



Fuzzy制御とその実システムへの応用に関する研究

安信, 誠二

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

1987-03-18

(Date of Publication)

2008-03-24

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

乙1073

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D2001073>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



神戸大学博士論文

Fuzzy 制御とその実システムへの
応用に関する研究

昭和 61 年 12 月

安 信 誠 二

Fuzzy制御とその実システムへの 応用に関する研究

目 次

第1章 緒論	
1.1 本研究に対する工学的背景	5
1.2 本研究の目的	9
1.2.1 本研究の狙い	9
1.2.2 他の研究との関連	9
1.3 本論文の概要	12
第2章 予見Fuzzy制御の提案	
2.1 はじめに	14
2.2 Fuzzy集合による人間の主観の定量化	14
2.2.1 Fuzzy集合	14
2.2.2 人間の主観の定量化	16
2.3 従来制御方式とその限界	17
2.4 状態評価Fuzzy制御	18
2.5 予見(目的評価)Fuzzy制御の提案	19
2.5.1 予見Fuzzy制御則の定式化	20
2.5.2 制御指令決定法	21
2.6 熟練者の制御とFuzzy制御の位置付け	23
2.6.1 熟練者の制御	23
2.6.2 Fuzzy制御の位置付け	23
2.7 おわりに	24
第3章 人間の制御戦略に基づくFuzzy制御方式の提案	
3.1 はじめに	25
3.2 運転における人間の制御戦略の検討	25
3.3 Fuzzy制御方式の提案	26

3.3.1	人間の制御戦略のアルゴリズム化	26
3.3.2	制御対象システムと経験モデル	27
3.3.3	推定部の機能	27
3.3.4	判断部の機能	28
3.3.5	実行部の機能	28
3.4	提案Fuzzy制御方式の伝達関数モデルへの適用	29
3.4.1	問題の記述	29
3.4.2	Fuzzy制御方式の適用	31
3.4.3	制御結果と検討	35
3.5	おわりに	37
第4章 Fuzzy制御の列車定位置停止制御への応用		
4.1	はじめに	38
4.2	列車定位置停止と運転士による運転	39
4.2.1	列車定位置停止制御	39
4.2.2	運転士による運転の考察	40
4.3	Fuzzy制御列車定位置停止制御	41
4.3.1	評価指標のFuzzy集合	41
4.3.2	Fuzzy制御則の決定	44
4.3.3	ブレーキ性能の推定	44
4.3.4	Fuzzy制御の実現	45
4.4	シミュレーションによる検討	46
4.4.1	シミュレーション条件と結果	47
4.4.2	シミュレーション結果の検討	47
4.5	おわりに	50
第5章 予見Fuzzy制御方式による列車自動運転		
5.1	はじめに	51
5.2	列車自動運転制御とモデリング	52
5.3	運転士による列車運転	53

5.3.1	駅間走行制御	53
5.3.2	定位置停止制御	54
5.4	予見Fuzzy制御列車自動運転システム	54
5.4.1	評価指標のFuzzy集合	54
5.4.2	Fuzzy制御則の決定	58
5.5	マイクロコンピュータによるATO制御装置の実現	59
5.6	シミュレーションによる比較・検討	61
5.6.1	シミュレーション条件と結果	62
5.6.2	シミュレーション結果の検討	65
5.7	実路線走行実験	66
5.7.1	P市地下鉄システムでの実験評価	66
5.7.2	D市地下鉄システムでの試運転	66
5.8	おわりに	69
第6章	Fuzzy制御のコンテナ・クレーン自動運転への応用	
6.1	はじめに	70
6.2	コンテナ・クレーンの運転とモデル化	70
6.2.1	コンテナ・クレーン運転システムの概要	70
6.2.2	クレーンのダイナミクス・モデル	72
6.3	オペレータの運転経験則	73
6.3.1	対象クレーン特性の習熟	73
6.3.2	運搬方式及び経路の設定	73
6.3.3	トロリ系の操作	73
6.3.4	ロープ系の操作	74
6.4	予見Fuzzy制御コンテナ・クレーン自動運転システム	75
6.4.1	制御構造の検討	75
6.4.2	クレーン特性のモデル化	75
6.4.3	評価指標のFuzzy集合	76
6.4.4	Fuzzy制御則	79
6.5	計算機シミュレーション	81

6.5.1	シミュレーション条件と結果	82
6.5.2	シミュレーション結果の検討	85
6.6	おわりに	85
第7章 予見Fuzzy制御コンテナ・クレーン運転システムの実現		
7.1	はじめに	86
7.2	マイクロコンピュータによる制御装置の実現	86
7.3	1/2スケール・クレーンによる実験	89
7.3.1	実験用クレーンと計算機シミュレーション	89
7.3.2	熟練者の運転との比較	89
7.4	おわりに	92
第8章 結論		
		93
謝辞		
		95
参考文献		
		97

第 1 章

第 1 章 緒論

1. 1 本研究に対する工学的背景

近年、VLSI、マイクロ・コンピュータを中心とした、計算機ハードウェア技術及びソフトウェア技術の発達は、その強力な情報処理能力を、安価に、容易に使用できることから、産業及び人間の生活に大きな影響を与えつつある。この計算機の利用は、統計分類処理、数値計算処理に端を発し、最近では、人間の知識に基づく推論の代行、すなわち知能の代行へと進んでいる。

一方、人間がある対象システムを自分自身の思い通りに動かしたいという技能に関しては、その代行を目指したのが自動制御技術であると言える。この自動制御技術の起源は、ジェームズ・ワットの遠心力とテコの原理を応用した蒸気機関の调速機であると云われている。その後、自動制御技術は、機械系による制御、オペアンプ等のアナログ系による制御、TTL等のデジタル回路による制御、さらに最近では、マイクロ・コンピュータによる制御へと、発展してきている。しかし、従来のマイクロ・コンピュータによる制御は、一定時間間隔で測定した状態量に基づきZ変換などによりサンプル値制御を行う方法が主

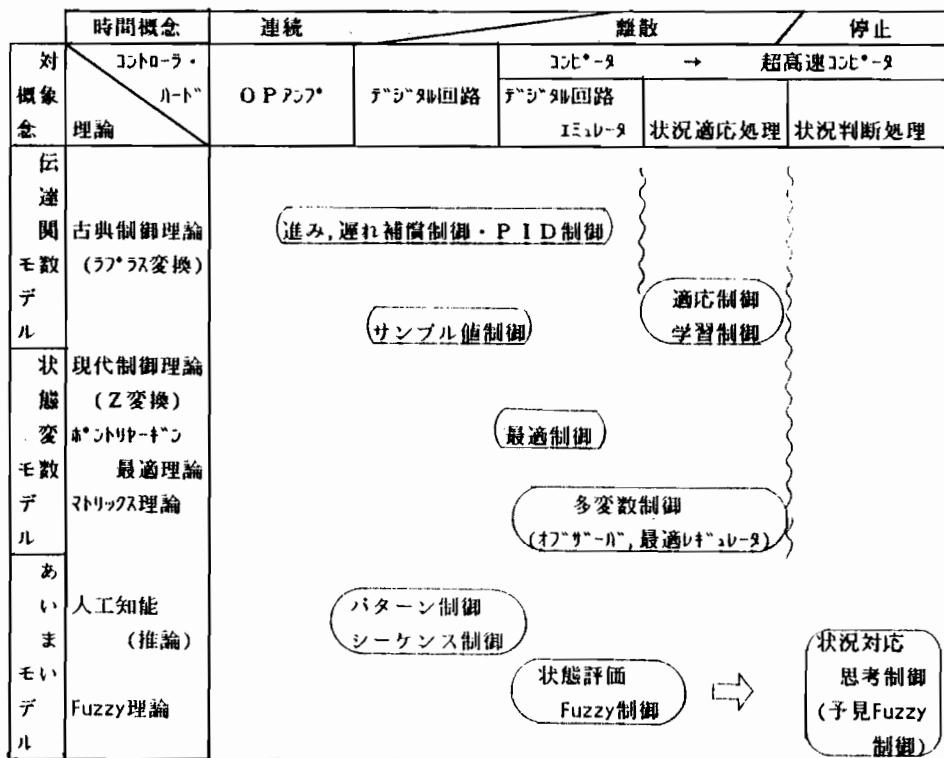
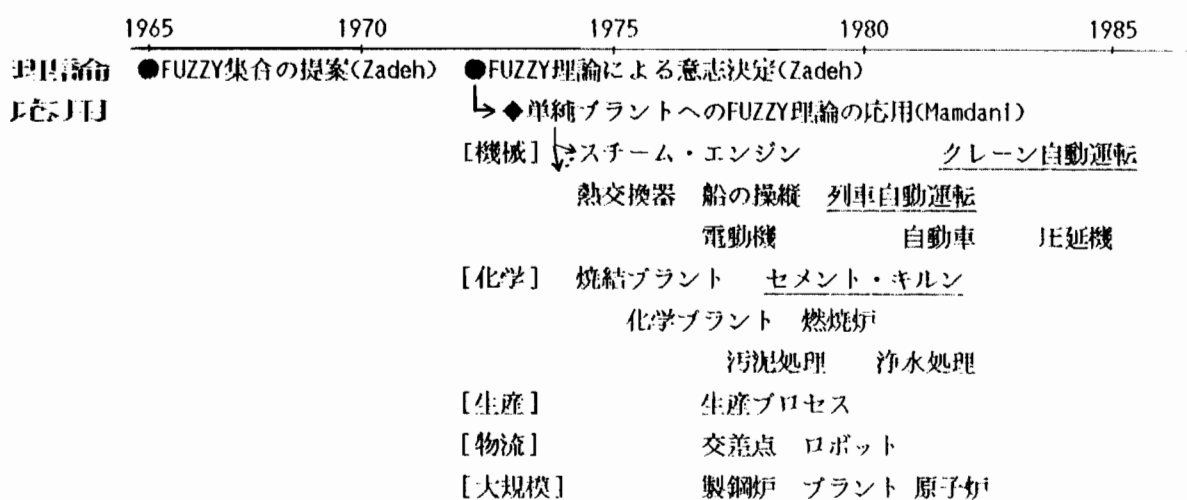


図 1. 1 コンピュータ制御技術の発展

であり、アナログ・コンピュータによる制御の延長上にあった。また最近では、状態変数モデルを用いた多変数制御理論、適応制御理論などによって、予め定められた状況に適応した処理が行われつつある。しかし、これら従来の計算機制御では、常に正確な制御を実現できるが、人間が行っている制御と比較して、人間が重視する制御目的を直接改善する制御が困難であり、制御の質の点で、熟練者に劣る場合があり、この人間の経験に基づく制御指令決定の代行を計算機で行うことが重要となってきた。これら技能の代行のためには、高度の情報処理能力が要求されるが、近年のハードウェアの進歩により、対象システムにとって、連続時間に等しいような100msecの間に、10万回（マイクロ・コンピュータ HD68000の場合）程度の演算が可能であり、この間に相当高度な情報の処理が行えるようになってきた。（図1.1）

この人間が運転を行う時に考えている経験則を組み込むためには、人間が対象システムの状態や制御目的をどのようにとらえているかを、計算機の上に数学的に表現し、アルゴリズム化する必要がある。この人間の主観的なあいまいさを、数学的に扱うため、従来のブール集合論の拡張として提案されたのがFuzzy集合論 [Zadeh, 1965]⁹⁵⁾である。このFuzzy理論の制御への応用は、Zadehの意志決定への応用提案 [1973]⁹⁶⁾をきっかけにMamdani [1974]⁸²⁾によるプラント制御への適用が検討された後、オペレータのシステム状態の判断による制御指令決定の操作マニュアルを効果的に組み込む方法としてセメント・キルンの制御 [Holmlad, et. al., 1982]⁸⁰⁾への実用化が進められている。（図1.2）



注) _ : 実用化

図1.2 Fuzzy理論と制御への応用

しかし、これら人間のシステム状態の判断に基づく制御指令の決定だけでは、熟練者が行っている制御目的を満足させながらのうまい運転を、計算機に組み込むことが困難である。そこで、筆者らは予見Fuzzy制御と呼ぶ、人間の制御目的評価を考慮した制御方式を提案した。

ここで適用対象の一つとして取り上げた列車自動運転は、日本では昭和51年の札幌市地下鉄東西線の実用運転を皮切りに、福岡市地下鉄など新規開発のシステムに対して、省力化の中心システムとして導入され、さらに大阪南港ニュートラム等の新交通システムにおいては、ホーム側にもドアを付けることにより、あたかも横に動くエレベータのように運転手不用のシステムを実現している。しかし、これら実用システムにおいて、マイクロコンピュータを用いたPID（比例・積分・微分）制御による自動運転と熟練運転手の運転を比較してみた場合、自動運転では、確かに常に同じ速度パターンに正確に追従した運転ができるが、熟練者が細心の注意をはらって運転した場合には、走行時間、消費電力量共少なく、停止精度も正確であり、また、乗り心地といった点からも乗客への影響を十分に考慮したうまい運転を行っており計算機でもこの熟練者並みの運転を実現することが要求されていた。

またもう一つの適用対象として取り上げるコンテナ・クレーンの運転は、港湾荷役機械の中核をなすものであり、その自動化への要求は強くあるが、約30mの長さのロープ系を先端で10cm程度の振れに抑え、短時間で荷を運搬する必要があることから、従来の制御方式ではその実現が困難であり、今でも熟練者の運転に頼っている。荷役作業の近代化には、この自動化、高効率化が不可欠であり、非熟練者でも熟練者と同等の運転が行えるシステムの開発が要請されていた。

本研究は、Fuzzy理論の制御への応用研究として位置付けられるものであり、従来計算機にアルゴリズムとして組み込むことが出来なかった、列車及びクレーンの運転手の技能に関する知的活動の自動化問題を扱った。これらの問題は、従来ヨーロッパなどで行われてきたセメント・キルン等の自動化とは内容が異なり、従来より提案されているFuzzy制御の手法の適用が困難であるものである。本論文は、上記問題に対して、制御目的を評価するという観点から新しい制御方式の提案を行い、さらに実システムへの適用実験を通して提案方式の有効性の検討を行った研究成果についてまとめたものである。

本研究の研究成果としては、以下の7項目がある。

(1) 制御目的を評価する予見Fuzzy制御方式の提案

- (2) 人間の制御戦略を模擬したFuzzy制御方式の提案
- (3) 予見Fuzzy制御方式による列車定位置停止制御方式の開発
- (4) 予見Fuzzy制御方式による列車自動運転方式の開発
- (5) 予見Fuzzy制御方式による列車自動運転実用システムの開発
- (6) 予見Fuzzy制御方式によるコンテナ・クレーン自動運転方式の開発
- (7) 予見Fuzzy制御方式によるコンテナ・クレーン自動運転実用システムの開発

1. 2 本研究の目的

1. 2. 1 本研究の狙い

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なわれている。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、各種の変動要因を押さえ込んだ常に正確で同じ制御が可能であるが、熟練者の方が変動要因にうまく対応し、対象システムの制御目的を満足する制御を行っている場合が多くある。

本研究の目的は、人間の制御に関する知的活動を組み入れることのできる制御技法を開発し、その技法を列車運転、クレーン運転の実システムへ適用し有効性を検証すると共に、計算機による熟練者と同等な運転を実現することである。

1. 2. 2 他の研究との関連

ここで、Fuzzy制御、列車自動運転、クレーン自動運転に関し、他の研究との関連についてのべる。

(1) Fuzzy制御

Fuzzy制御は、Fuzzy集合⁹⁵⁾ [Zadeh,1965] の提唱者であるカルフォルニア大学(米) Prof. Zadeh の人間の経験に基づく意志決定の定量化・アルゴリズム化 [Zadeh,⁹⁶⁾ 1973] 方法の提案を契機として、クイーン・メリー・カレッジ(英) Prof. Mamdani が、2入力、2出力のスチーム・エンジンの制御⁸²⁾ に対する言語的運転の計算機化として試みた後、ヨーロッパ及び日本において、計算機シミュレーション、モデル・プラント、実システムを対象として、交差点の制御 [Pappis,⁸⁴⁾ 1977]、セメント・キルンの制御 [Holmblad and Ostergaard,⁸⁰⁾ 1982]、浄水場の薬剤注入制御 [Tong,⁹²⁾ 1980; 柳下、伊藤、菅野、⁴⁹⁾ 1984]、自動車の速度制御 [前田、村上、³⁹⁾ 1985]、などに応用されてきた。これらの内、セメント・キルンの制御は、実際のセメント生成の運転において、オペレータの運転則をコンピュータ化し実用されている。以上述べたFuzzy制御方式は、いずれも、現在の対象システムの状態を「少し大きい」、「丁度良い」と言った人間の主観をFuzzy集合化することによって認識し、この状態認識に基づく制御指令の決定を人間に代わって行おうとするものである。

これに対して本論文では、人間が運転する場合には、実行可能な制御指令の代替案に対

して、現在の状態においてそれを実行した場合の結果を予測・予見し、対象システムが望ましい動きとなるようそのシステム本来の制御目的を考慮して、実行する制御指令を決定すると言った形に定式化した、新しい予見Fuzzy制御方式を提案する。

すなわち提案方式は従来の状態評価Fuzzy制御方式に対して、対象システムの物理的因果関係をモデルとして組み込み、現在及び将来の対象システムの動きをコントロール内で把握しながら、さらに現在実行可能な制御指令の効果を把握しながら、制御を行う点が異なっている。そのため、実用システムでも、制御指令の決定理由が明解であり、熟練者と同等の安定した運転を可能とすることができている。

(2) 列車自動運転

列車自動運転システムとは、運転手に代わり列車の出発から停止までの運転を行うシステムで、国内外各地の地下鉄、モノレール、新交通システム、などで実用化されつつあるが、これらの実用システムのほとんどは、

(a) 目標速度パターンを発生し、それに列車速度をPID制御を基本とした制御方式で追従させる方式である〔井原、1974⁶⁾；宮本、1982⁴³⁾；下浦ほか、1976¹⁶⁾；藤倉ほか、1977³³⁾；Ferbeck, 1983⁷⁹⁾〕。

なお、

(b) 最適制御をもちいた方式〔半田、1978²⁹⁾；荒屋、1979³⁾〕、

(c) 距離又は時間と列車速度により一定のパターンで制御指令を出力するオープンループ制御方式〔石井ほか、1974⁴⁾〕、

(d) 現在の速度から目標地点に停止させるために最適な制御指令を出力する方式〔下浦ほか、1981¹⁷⁾〕、

なども提案・実験されている。

しかし、これらの制御方式による列車運転を熟練運転士による運転と比較してみた場合、平均的で正確な運転は可能であるが、目標速度へ正確に追従するために制御指令を頻繁に変化させる必要があり、乗り心地、停止精度、あるいは消費電力量といったような人間が重要視する評価指標を十分に考慮した制御とはなっていないのが実情である。

本論文では、筆者らのPID制御による列車自動運転システム開発の経験に基づき、上記従来方式の問題点を解決し、熟練者と同等の運転が行えるシステムを提案する。

(3) クレーン自動運転

ここで対象としたコンテナ・クレーンとは、荷役機械設備の中核をなすものでクレーンの軌道上を移動(横行)するトロリとトロリから垂らしたロープの上下によって、船舶用コンテナをコンテナ船とトレーラ間で移載する荷役作業を行なう。このクレーンによる荷役作業の高能率化を図るためにはできるだけ早く正確に荷物を所定位置まで運搬することが必要であり、運転自動化への要求は強い[Nabeshima,1978]⁸¹⁾。しかし、従来の制御方式では実用的な自動化がむつかしく現在でも熟練者の運転に頼っている。このコンテナ・クレーンの運転自動化を阻止しているのは、トロリの横行制御だけで、コンテナの水平位置と振れの制御を実現せねばならないむつかしさである。

これに対し、これまでのクレーン制御方式は、ロープ長一定の仮定のもとで、

(a) 初期及び最終位置における振れ角が零の制約のもとで最短時間制御問題として定式化し求める[北森、1964¹²⁾;美多、金井、1979⁴⁰⁾、

(b) 振れ角と角速度の位相平面上での軌跡の特徴から幾何学的に求める[児新、1983]¹³⁾、

(c) 加速・減速の時間の対称性に着目して求める[森下、1978]⁴⁵⁾、

などの方法により目標速度パターンを導出し、これにレギュレータ制御等による追従方式が提案されていた。しかしこれらの方式は、ロープ長一定を前提条件としているため一度コンテナを所定の高さまで巻き上げた後、初めてトロリの横行を開始する。そのためロープの巻き上げ、巻き下げをしながらトロリの横行を行う熟練運転員の運転と比較して荷役時間がかかる、鋭角的に変化する目標速度パターンにトロリを追従させるためにオペレータの乗り心地が悪くなる、などの問題点があり実用化まで至っていない。この他、荷役時間の短縮を目的として巻き上げ下げと加減速を同時に行う非線形モデルに基づく方式も提案されている[Sakawa,et.al.,1982⁸⁵⁾;進藤、孫、坂和、1983¹⁸⁾]が、ロープとトロリを同時に正確に追従させることは、さらにむつかしい問題である。

本論文では、従来方式のように予め定めた目標速度パターンに追従させるのではなく、対象システムの現在の状態(トロリ速度、ロープ長)と搭載されたコンテナ等の障害物の状況に基づき、オペレータの経験則から作ったFuzzy制御則により、トロリ目標速度、トロリ加速力、ロープ目標速度を指令する新しいクレーン自動運転システムを提案する。

1. 3 本論文の概要

本論文は、人間の制御（運転）に関する知的活動をコンピュータ化するFuzzy制御について、対象システム本来の制御目的を評価する予見Fuzzy制御方式を提案し、さらにそれを拡張すると共に、列車自動運転、コンテナ・クレーン自動運転への応用、実用化を図り、その研究成果をまとめたものである。

第2章では、Fuzzy制御の基礎となるFuzzy理論について簡単に述べると共に、従来制御方式及び従来より提案されてきたFuzzy制御方式についてその問題点を検討し、対象システム本来の制御目的を評価し、運用者にとって望ましい状態となるような制御指令を決定する新しい予見Fuzzy制御方式を与える。[安信ほか、1983b,1984a]^{63) 66)}

第3章では、人間の運転に関する制御戦略を議論し、これに基づく汎用Fuzzy制御方式について述べる。ここでは、人間の制御戦略を、「推定」、「判断」、「実行」の3段階に階層化し、それぞれに対してFuzzy制御の考え方を適用した方式を提案する。さらに本方式を、むだ時間を含む伝達関数モデルへ適用し、本方式が一般的な対象に対しても有効であることを確認する。[安信ほか、1985a,1986f; Yasunobu,et.al.,1985a]^{69) 76) 89)}

第4章では、まず第2章にて提案した1組の制御則を用いる予見Fuzzy制御方式を、列車運転の中で最も運転手の熟練度が要求される列車定位置停止制御に対して適用する。ここでは、運転手の経験則に基づき、(1)乗り心地、(2)停止精度、(3)走行時分、を評価しながら列車を所定の停止目標に停止させる方式を提案する。さらに提案方式を従来より実用化されているPID制御による自動運転方式とコンピュータ・シミュレーションにより、停止精度、乗り心地(制御指令の変化回数)について評価し、提案方式の有効性を確認する。[安信ほか、1983a,1983b; Yasunobu,et.al.,1983]^{62) 63) 87)}

第5章では、第4章にて提案した予見Fuzzy制御による列車定位置停止の考え方を列車運転全体へ拡大し、駅を出発してから、次駅に停止するまでの列車運転全体に対する運転手の経験則の考察を行い、これに第2章にて提案した予見Fuzzy制御方式を適用する。ここでは、(1)安全性、(2)乗り心地、(3)制限速度より決まる目標速度への追従性、(4)消費電力量、(5)走行時間、(6)停止精度、を評価指標とする列車自動運転システムを提案する。さらに従来実用してきたPID制御による列車自動運転との比較を、計算機シミュレーションにより行い、消費電力量、制御のロバスト性について評価し、提案方式の有効性を確認する。[安信ほか、1984b]⁶⁷⁾ さらに提案方式をマイクロ・コンピュータに組み込み、実際の列車運転に適用した結果について述べる。[Yasunobu,

et.al.,1984,1985b]⁸⁸⁾⁹⁰⁾

第6章では、自動化への要求は強いが従来の制御方式では実用的な自動化がむつかしく、現在でも熟練者の運転に頼っているコンテナ・クレーンの運転に対して、Fuzzy制御の適用による実用的な自動運転方式を提案し、シミュレーションにより評価した結果について述べる。[安信、1986b,1986e]⁷²⁾⁷⁵⁾

第7章では、提案したFuzzy制御によるコンテナ・クレーン自動運転方式をマイクロ・コンピュータで実現する方法について述べ、実際のコンテナ・クレーンの1/2の大きさ(高さ18m)の実験用クレーンを用いて実験評価した結果について述べる。[安信ほか、1986d; Yasunobu,et.al.,1986]⁷⁴⁾⁹¹⁾

第8章は本研究の結論であり、研究結果の要約・評価について述べる。

第 2 章

第2章 予見Fuzzy制御の提案

2.1 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なわれている。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くある。この問題を解決するため、人間の知的行動をアルゴリズム化し、人間と同等の制御を実現しようという試みの一つがFuzzy（あいまい）制御である。

Fuzzy制御は、第1章にも述べたように、その可能性を示したカルフォルニア大（⁹⁶米）Zadeh[1973]の論文を契機として、クイーン・メリー・カレッジ（英）Mamdani[1974]⁸²⁾が最初に試みた後、計算機シミュレーション、モデル・プラント、実システムを対象として、プラントの制御[Mamdani,1974]⁸²⁾、交差点の制御 [Pappis,1977]⁸⁴⁾、セメント・キルンの制御[Holmblad,et.al.,1982]⁸⁰⁾、浄水場の薬剤注入制御[柳下ほか,1984]⁴⁹⁾、自動車の速度制御[前田ほか,1985]³⁹⁾、などに応用されてきた。

Fuzzy制御とは、ある量が「大きい」とか「小さい」といった、人間の言葉に含まれる主観的なあいまいさ（fuzziness）を0から1までの値に対応させることにより定義するFuzzy論理を用いて、人間の知的活動を計算機によりアルゴリズム化し実現しようとするものである。

本章では、まづ2.2節にてFuzzy集合による人間の主観の定量化の概念について述べ、2.3節にて従来の計算機制御方式を概観してその限界について考察する。次に、2.4節ではMamdaniらによって先に提案されセメント・キルンの制御に用いられている状態を評価し制御指令を決定する状態評価Fuzzy制御方式について述べ、2.5節にて制御結果が望ましい状態となるように制御目的を予見・予測しながら制御を行う予見Fuzzy制御方式を提案する。2.6節にて、これらの制御方式と熟練者の制御についてその関係を考察する。2.7節は、本章のまとめである。

2.2 Fuzzy集合による人間の主観の定量化

2.2.1 Fuzzy集合

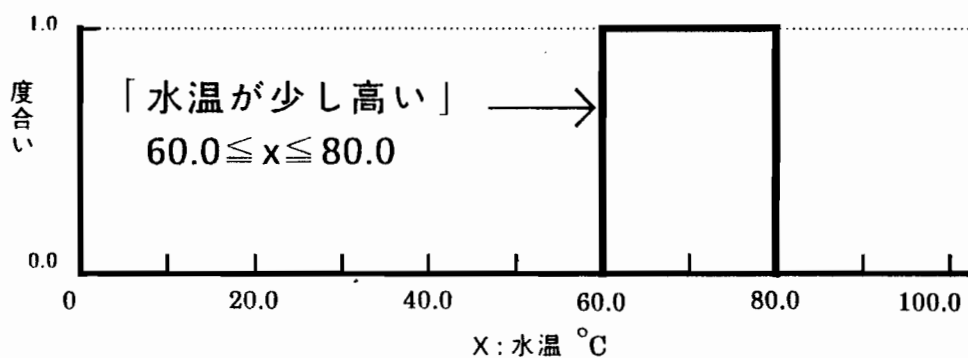
人間は機械と違って、その思考や行動にあいまいさを伴う。従ってなんらかの形で人間

とかかわりをもっているシステムを取り扱う場合には、この人間の持つあいまいさを無視する分けにはいかない。Fuzzy集合論は、このように”あいまいさ(fuzziness)”を数学的に取り扱うために、従来の0、1からなるブール集合論の拡張として提案されたものである。

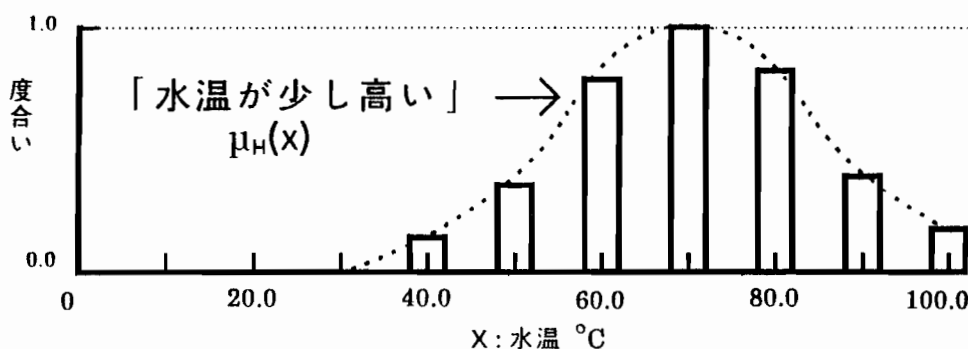
ここで、通常の集合(ブール集合)とFuzzy集合の違いを水温の測定値(全体をV(0°C ~ 100°C)とする)を例にとり簡単に紹介する。

まず、「水温が少し高い(H)」という通常の集合を考えると、水温の測定値xは、Hに属しているかいないかが、0又は1の値で明確に示される。(図2.1(a))

これに対して、「水温が少し高い(H)」というFuzzy集合は、各水温に値を0から1の間の度合いを対応させる関数 $\mu_H(x)$ (メンバシップ関数と呼ぶ)で定義される。 $\mu_H(x)$ の値が1に近づくほど、水温が少し高い度合いが大きいことになる。(図2.1(b))



(a) 通常(ブール)集合



(b) Fuzzy集合

図2.1 通常(ブール)集合とFuzzy集合

2. 2. 2 人間の主観の定量化

ここで、水温の測定値が、10℃刻みの値でしか測定されないとすると、測定値の全体Vは、{ 0℃、10℃、20℃、・・・、100℃ }の11個の有限集合となる。この時、水温が少し高い(H)のFuzzy集合は、

$$H = 0.0/0 + 0.0/10 + 0.0/20 + 0.0/30 + 0.2/40 + 0.5/50 + 0.8/60 + 1.0/70 + 0.8/80 + 0.5/90 + 0.2/100 \quad (2.1)$$

と各要素について、度合い/要素値の和として表わせ、簡単に、

$$H = \sum_{i=1}^{11} \mu_H(x_i) / x_i \quad (2.2)$$

と表す。

さらに、水温の測定値が連続的に測定できるような時、Hは次のように書かれる。

$$H = \int \mu_H(x) / x \quad (2.3)$$

またFuzzy集合の和、積、補は、

(1) 和：「水温が中位(M)又は少し高い(H)」

$$M \cup H = \int \mu_M(x) \vee \mu_H(x) / x \quad (2.4)$$

(2) 積：「水温が中位(M)かつ少し高い(H)」

$$M \cap H = \int \mu_M(x) \wedge \mu_H(x) / x \quad (2.5)$$

(3) 補：「水温が少し高くない(H^c)」

$$H^c = \int (1 - \mu_H(x)) / x \quad (2.6)$$

となる。

水温を表わす集合V = {x}と異なる集合U = {y} (例えば、圧力など)の度合いを併せた、例えば「水温が少し高く(H)かつ圧力が少し低い(L) : x is H and y is L」といった言葉は特にFuzzy関係と呼ばれ、HとLの直積、

$$H \times L = \int \mu_H(x) \wedge \mu_L(y) / (x, y) \quad (2.7)$$

表される。(2.7)式で示されるFuzzy関係は、図2.2のピラミッドで表すことができる。

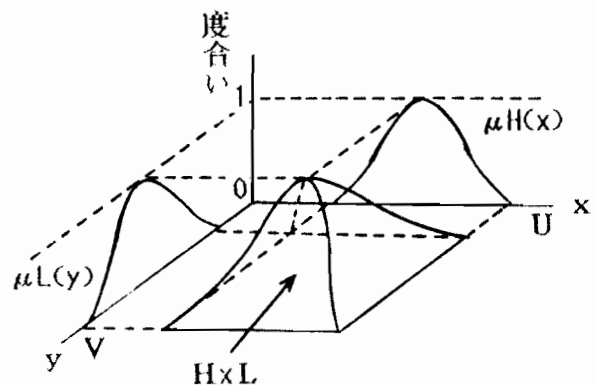


図2.2 Fuzzy関係(HxL)

2.3 従来制御方式とその限界

従来の計算機制御における制御システム設計を概観すると、設計者が対象の制御目的を満足できるように対象の線形モデル、目標値及びコントローラの構造・制御定数を設計する。また、コントローラは予め定められた評価関数によって目標値と状態量 X との偏差を評価しながら目標値になるべく正確に追従できる制御指令を決定している(図2.3)。コントローラの制御定数を決めた場合の応答であるとか、誤差平方和を最小にするような制御定数は、完備されたCADシステムによって容易に決定できる。しかし、その制御結果が本来の制御目的を満足しているかどうかは、また別であり、設計者の苦勞はここにあるといえる。

従って、特性が線形モデルで十分に表わ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が、状況に応じて特性が非線形に変化しその構造が不明確な対象の制御や、制御目的の数が多くしかもその重みが時間と共に変化するような対象の制御は難しく、状況に応じた制御定数の切り替えや、オブザーバによる対象の推定アルゴリズムを、設計者のノウハウで組み込むことにより、本来の制御目的を実現していくことになる。[嘉納、1982¹⁰⁾; 須田、1982¹⁹⁾]しかし、このように精密に構築されたコントローラは、対象機器の交換などの状況の変化に再び対応し直すのは困難である。

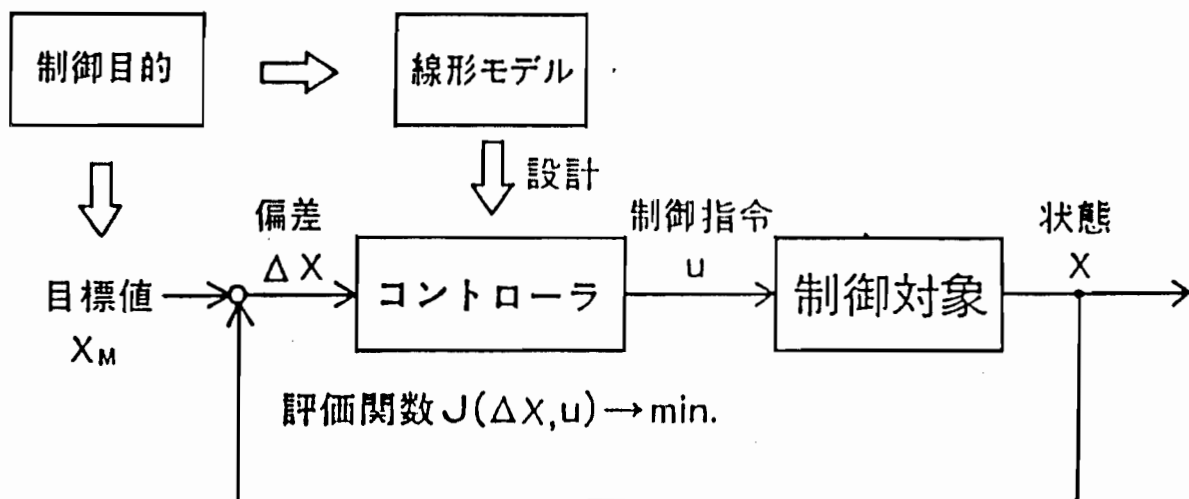


図2.3 従来の計算機制御方式

2.4 状態評価Fuzzy制御

人間による制御を、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のが、状態評価Fuzzy制御であり、これまでセメント・キルンの制御[Holmblad, et. al., 1982]⁸⁰⁾、浄水場の薬剤注入制御[柳下ほか, 1984]⁴⁹⁾へ適用されている。この制御では、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、図2.4に示すように「温度(x)が少し高く、圧力(y)が少し高ければ、燃料(u)を少し減らす」といった制御則により制御指令を決定する。一般的に書くと、

$$\begin{aligned} \text{If } (x \text{ is } A_i \text{ and } y \text{ is } B_i) \\ \text{Then } \Delta u \text{ is } C_i \quad i=1, n \end{aligned} \quad (2.8)$$

となる。ここで、 Δu は操作量の変化分を表わし、 A_i, B_i, C_i などは、 $x, y, \Delta u$ のとり「高い」、「中位」といったFuzzy集合で定義される値である。

Fuzzyコントローラは、 x, y の観測値、 $x \text{ is } x', y \text{ is } y'$ が与えられた時、 n 個の制御則の前提部(I f部)のFuzzy集合を評価し、その前提部を満たす度合いから Δu の値を決定する。この制御では、制御則の数は少ないが、その守備範囲がFuzzy集合で定義されているため、現在の観測値 x', y' に対する各制御則の満足度が求まり、その度合いを考慮することにより、制御則で記述している制御指令の間を補間した制御指令を出力できる。また、これら制御指令の決定は、上記のような制御則だけに依っているが、その決定は画一的であり、同一観測状態に対しては、常に同一制御指令が出力される。

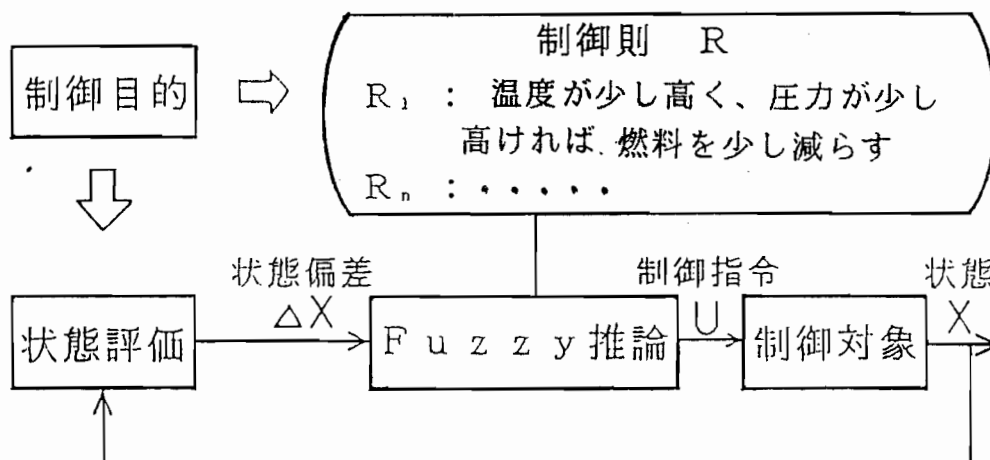


図2.4 状態評価Fuzzy制御

2.5 予見(目的評価) Fuzzy制御の提案

2.4節で述べたFuzzy制御の方法は、"If(x is A_i and y is B_i , then u is U_i ."なる形の制御則の集合 $R = (R_1, \dots, R_i, \dots, R_n)$ と、"x is A and y is B"なる形の入力から、Fuzzy推論(fuzzy reasoning)により制御指令uを推論する形式である[Mamdani, 1974⁸²⁾; Pappis, 1977⁸⁴⁾; 菅野, 1979²⁰⁾]。この形式のFuzzy制御は、多次元にあたる評価指標をもとに、あらかじめ決められた制御則の集合Rによって制御指令uを決定する多次元状態フィードバック制御に人間の経験を取り入れる方式として有効である。しかし、この方式では、人間が制御を行う時に考えているように、今ある制御指令を与えたと仮定して、それによる制御結果を評価しながら、制御目的に最適な制御指令を決定する制御の実現が困難であった。

そこで、列車の停止精度などを予測し評価する制御を行うため、以下に述べる予見Fuzzy制御を提案する。ここで提案する予見Fuzzy制御は、"If(u is $C_i \rightarrow x$ is A_i and y is B_i) then u is C_i ."なる形の制御則の集合 $R = (R_1, \dots, R_i, \dots, R_n)$ に対して、各制御則に含まれる制御指令 C_i を行った場合の各評価値(x, y)を予測し制御則を評価することによって、最も評価値の大きい制御則 R_i の制御指令 C_i によって制御を行う形式である。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かけて乗り心地良く正確に駅に止まれそうな状況ならば、ブレーキを少しかける。」といった、制御則に基づき制御指令を決定する。(図2.5)

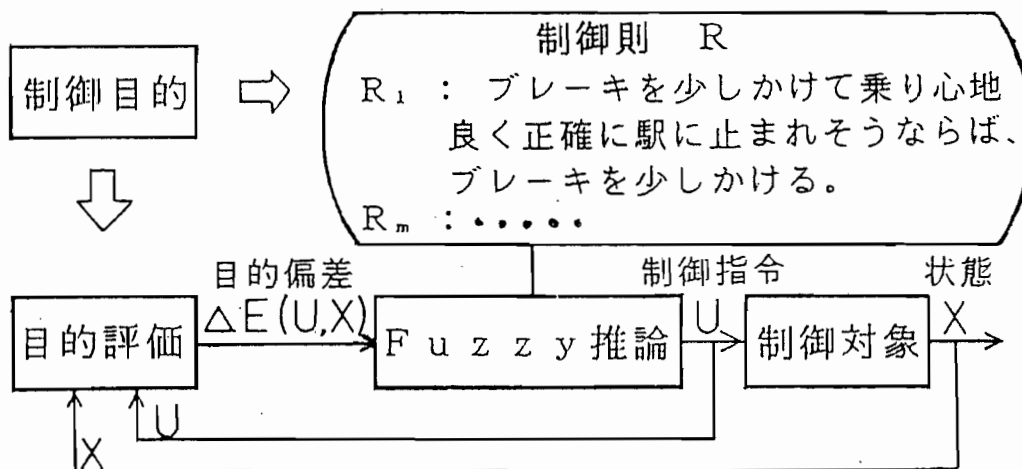


図2.5 予見(目的評価) Fuzzy制御

ここで提案する予見Fuzzy制御では、Mamdani [1974] らのFuzzy制御と同様に、

- (1) プロダクション・システムの、制御結果に基づき、(a) 評価指標の定義、
(b) 制御則の追加修正、が容易である、

といった特長をもつと同時に、各制御則で評価値を予測し制御指令を選択することから、

- (2) 各評価関数に関連したシステムの部分的知識に基づき予見制御が行える。
などの特長をもつ。

2.5.1 予見Fuzzy制御則の定式化

(1) 制御目的のFuzzy評価

ここで、制御指令 u が取りうる値の集合を $C = \{C_1, \dots, C_n\}$ とし、制御を評価する指標を x および y とする。評価指標 x 、 y に対する、「良い」、「悪い」、といったような評価を、メンバシップ関数 $\mu_{A_i}(x)$ 、 $\mu_{B_i}(y)$ 、を用いたFuzzy集合 A_i 、 B_i 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、

$$A_i = \int_U \mu_{A_i}(x) / x \quad (2.9)$$

$$B_i = \int_V \mu_{B_i}(y) / y \quad (2.10)$$

で表せる。

(2) 制御則の定式化

つぎに、ここで提案する予見Fuzzy制御で時々刻々評価する、「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。」といった制御則 R を以下のように定型化する。

$$R_i: " \text{If}(u \text{ is } C_i \rightarrow x \text{ is } A_i \text{ and } y \text{ is } B_i) \text{ then } u \text{ is } C_i. " \quad (2.11)$$

制御則 R_i の評価を行う前提部 (If部) を P_i とし、そ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、

$$P_i = \int_{U \times V} \mu_{P_i}(C_i: x, y) / (x, y) \quad (2.12)$$

$$= A_i \times B_i : u = C_i \quad (2.13)$$

と表わせ、図2.6中央の大きなピラミッド状のものとなる。

実際の制御においては、システムの部分的知識、制御目的にもとづいて、いくつかの制御則を記述し、全体の制御則 $R = (R_1, \dots, R_i, \dots, R_n)$ を定義する。

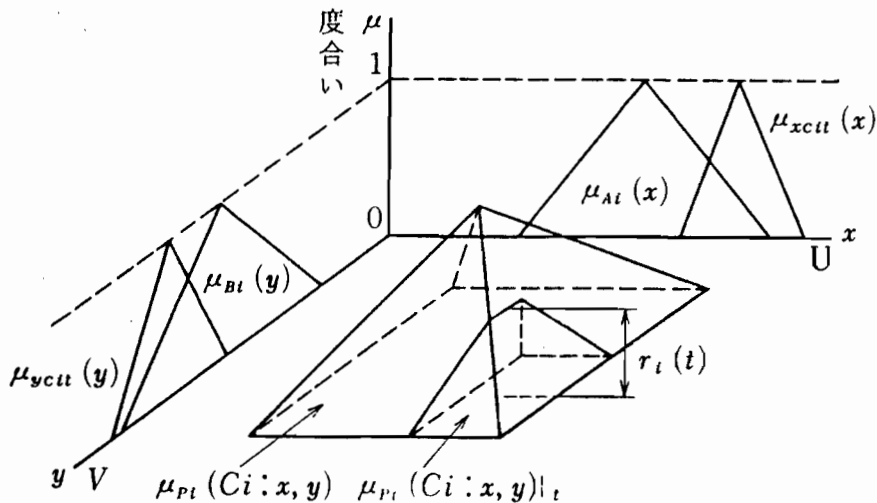


図2.6 予見Fuzzy制御の制御則評価例

2.5.2 制御指令決定方法

(1) 個々の制御則の評価

(2.11)式に示す制御則 R_i より、現在時刻 t において制御指令 $u_i \text{ is } C_i$ を実行した場合に、評価指標 x および 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にもとづき予測する。この予測結果 $X(C_i, t)$ 、 $Y(C_i, t)$ がつぎに示すようなメンバシップ関数 $\mu_{xci}(x)$ 、 $\mu_{yci}(y)$ 、で定義されるFuzzy集合で求めたとする。

$$X(C_i, t) = \int_U \mu_{xci}(x) / x \quad (2.14)$$

$$Y(C_i, t) = \int_V \mu_{yci}(y) / y \quad (2.15)$$

この時、時刻 t における制御則の前提部のFuzzy集合を表す $P_i | t$ は、

$$P_i | t = (A_i \cap x(C_i, t)) \times (B_i \cap y(C_i, t)) \quad (2.16)$$

となり、図 2. 6 に示すように制御則 R_i の前提部 P_i のピラミッドの部分となる。

この時刻 t における制御則前提部 $P_i | t$ の最大値 $r_i(t)$ を、

$$r_i(t) = \sup_{x,y \in U \times V} \mu_{P_i}(C_i : x, y) | t \quad (2.17)$$

によって求める。この $r_i(t)$ は、図 2. 6 に示すように、制御則前提部 $P_i | t$ の $Fuzzy$ 集合の山の高さに相当する値であり、この時刻 t における、一つの制御則 R_i の評価値（満足度、確からしさの値）となる。従って、この制御則 R_i で記述している制御指令 C_i は、 $r_i(t)$ の満足度で出力して良いことになる。このようにして、全ての制御則 $R_i (i = 1, n)$ を評価し、この時刻 t における評価値 $r_i(t) (i = 1, n)$ を求める。

(2) 最適制御指令の選択

上記のようにして求めた各制御則の制御指令 C_i に対する評価値 $r_i(t)$ を要素として、全体制御則 R のこの時刻 t における評価値 $R | t$ は、

$$R | t = r_1(t)/C_1 + \dots + r_i(t)/C_i + \dots + r_j(t)/C_j + \dots + r_n(t)/C_n \quad (2.18)$$

となる。すなわち、各制御則で仮定した制御指令 C_i はそれぞれ $r_i(t)$ の値でそれが出力されることを要求している。ここで、この制御則間で同一制御指令が存在する場合には、それらの max を取り併合する。

この全体制御則 R の評価値 $R | t$ は、この時刻 t において出力すべき制御指令の $Fuzzy$ 集合となっている。しかし、実システムにおいては、制御指令 u として単一のスカラー量が必要である。この $Fuzzy$ 量をスカラー量に変換する方法として、その重心をとる方法も提案されているが、ここでは、各制御指令 $C_i (i = 1, n)$ が独立であっても、実行可能とするため、代替案として仮定した n 個の制御指令の中の一つを選択する。

全体制御則 R の評価値 $r(t)$ は、各要素の最大値により、

$$r(t) = \max r_i(t) = r_j(t) \quad (2.19)$$

により求まる。従って、この全体制御則 R の評価値 $r(t)$ を決定している j 番目の制御則 R_j が最も満足度が高いことになる。

ここで提案する予見 $Fuzzy$ 制御では、時刻 t において、この最も満足度の高い制御則 R_j で仮定している " u is C_j " を最適な制御とし、 C_j を制御指令として出力する。

2.6 熟練者の制御と Fuzzy 制御の位置付け

2.6.1 熟練者の制御

ここで熟練者による制御（運転）を考えてみよう。熟練者は、対象システムに対する過去の経験から対象システムの特性を定性的に把握し、ノウハウを蓄積しながら本来の制御目的を満足する質の良い制御を行なっている。従って人間の制御に関する知的活動は、

(1) もし、今の状態ならば、過去の経験からこの制御指令を出したら良いという多次元状態評価と、(2) もし、今の状態でこの制御指令を出したならば、過去の経験から本来の制御目的を満足した制御ができそうだ、との二つの思考過程に分けることができる。

2.6.2 Fuzzy 制御の位置付け

この熟練者の制御に関する知的活動を Fuzzy 集合論によって定量化し、計算機化しようとするのが Fuzzy 制御である。これには、上記人間の思考過程に対応して、(1) 状態評価 Fuzzy 制御、(2) 予見(目的評価) Fuzzy 制御の二つのアプローチが提案されている。これらを、図 2.7 に示すように、対象の構造と制御目的の評価を二つの軸にとり、分類してみる。

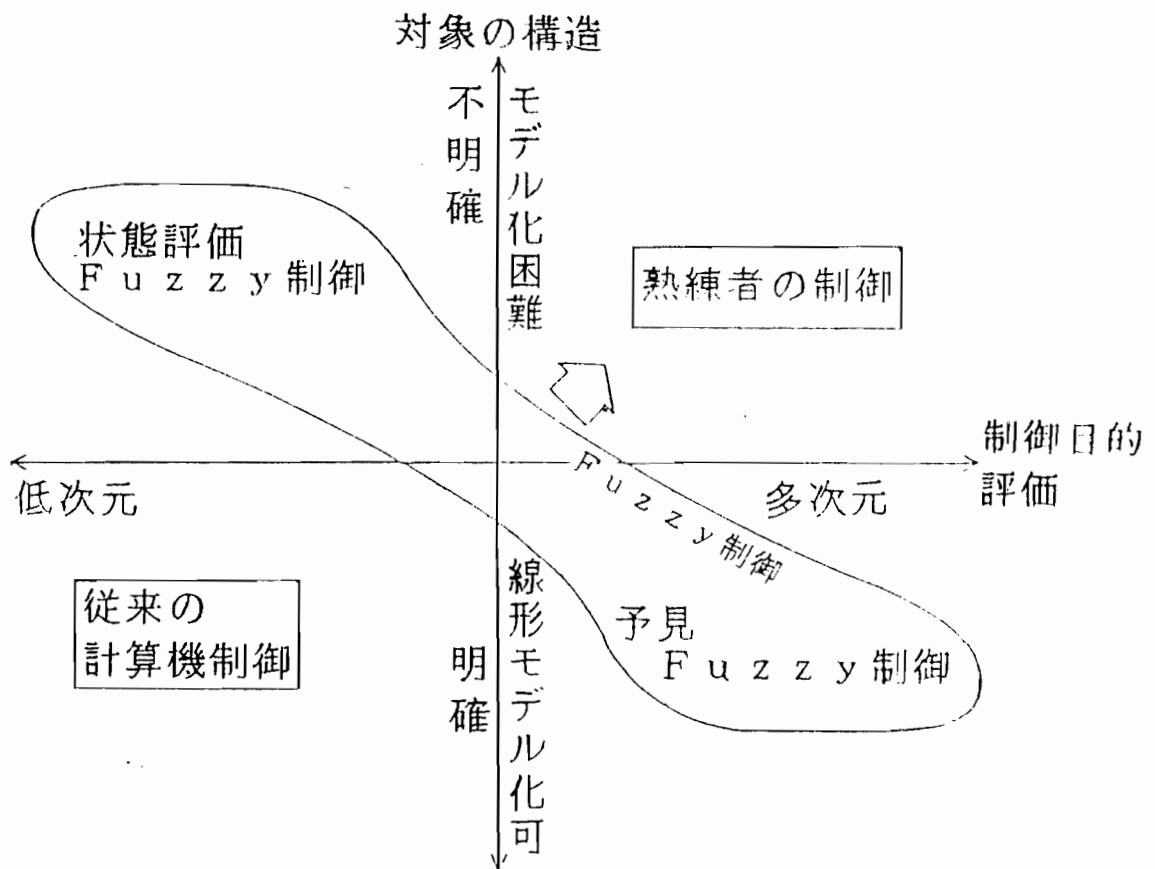


図 2.7 Fuzzy 制御の位置付け

状態評価Fuzzy制御は、対象システムの構造が不明確でありモデル化が困難な対象に対して制御目的の評価を潜在化させた制御則により制御を行なうことが出来る。また予見Fuzzy制御では、部分的な線形モデルを用いて現在の状態と仮定した制御指令に基づく制御結果(制御目的)を予測・予見し、これらの制御目的を多次元的に評価しながら制御を行なうことが出来る。

しかし、この二つのFuzzy制御は、相反するものではなく、適用対象に応じてうまく組み合わせることによって、より熟練者の制御に近付くことが可能である。

2.7 おわりに

本章では、従来より提案されているFuzzy制御について述べると共に、多次元にわたるあいまいな評価指標により経験的に行っている人間の制御をアルゴリズム化できる予見Fuzzy制御方式を提案し、これらの熟練者の制御、従来制御理論との位置付けについて考察した。

第 3 章

第3章 人間の制御戦略に基づく Fuzzy 制御方式の提案

3.1 はじめに

第2章では、熟練者の制御に関する知識を定量化しコンピュータ化する方法の一つとして、対象システム本来の制御目的を評価し、対象システムが運用者にとって望ましい状態となるような制御指令を決定する予見 Fuzzy 制御方式を提案した。この予見 Fuzzy 制御を後で述べるクレーン自動運転等の実システムへ適用を試みて行った場合、これらの人間の運転は、(a) 大局的な制御方策の判断と、(b) それに基づいた条件反射的な状況による制御指令の決定、(c) さらに制御結果の見直しによる対象システムの推定、の3段階で定式化することが可能であり、この考え方に基づくことにより、熟練者の経験をより正確に計算機に組み込むことができることが分かった。

本章では、まづ3.2節にて実システムにおいて熟練者が制御を行う場合にどのようなことを考えているかを、その制御戦略について筆者の経験に基づき検討する。3.3節では、上記人間の制御戦略に基づき、第2章にて提案した予見 Fuzzy 制御を拡張した新しい制御方式を提案する。3.4節では前節にて提案した制御方式の有効性を検討するため、むだ時間を入力にもつ定位性プロセスを例にとり伝達関数で表現されるような一般的な対象へ適用し計算機シミュレーションを行う。3.5節は、本章のまとめである。

3.2 運転における人間の制御戦略の検討

ここで、筆者らの Fuzzy 制御の実システムへの適用経験から、熟練者による制御(運転)全体の戦略について考えてみる。熟練者は対象システムに対する過去の経験からその特性を定性的に把握しノウハウを蓄積することによって、要所要所で本来の制御目的を満足する制御パターン(制御方策)を判断し、通常はその制御パターンに従って制御指令を決定している。また、時々過去の制御指令に対する応答をチェックし対象システムの現在の特性を推定している。

このように考えた人間の制御戦略は、次のように階層化ができる。

(1) 推定(評価)部

対象システムの現在の応答が、過去に経験した応答と比較してどうなのかをチェックし、もしシステムの構造や定数に変化しているようなら、それを認識する。

(2) 判断部

現在の状態やシステム定数の値から、過去の経験に基づき、現在実行可能な制御方策の実施結果を予測・予見し、最適と思われる制御方策を判断し決定する。

(3) 実行部

決定した制御方策に基づき、現在の状態から条件反射的に制御指令を出力する。

ここで、実行部はリアルタイムで動作し、判断部は対象システムの時定数と同等の時間間隔で、推定部はシステム定数の変化する可能性に応じた時間間隔で考慮されていると考えられる。また、実行部は、PID制御系などにより与えられた設定値に追従制御を行うマイナーなコントローラである場合も数多くある。

3.3 Fuzzy制御方式の提案

3.3.1 人間の制御戦略のアルゴリズム化

Fuzzy制御はこれまで、人間の制御に関する知的活動を一組の経験則で記述しアルゴリズム化（計算機化）する方式として提案、実システムへ適用されてきた。

ここでは、上記人間の制御戦略モデルに従い、(1)推定、(2)判断、(3)実行、の三階層に対し状態評価、予見（目的評価）、の二つのFuzzy制御の考え方を適用しFuzzy制御コントローラを構成する。（図3.1）

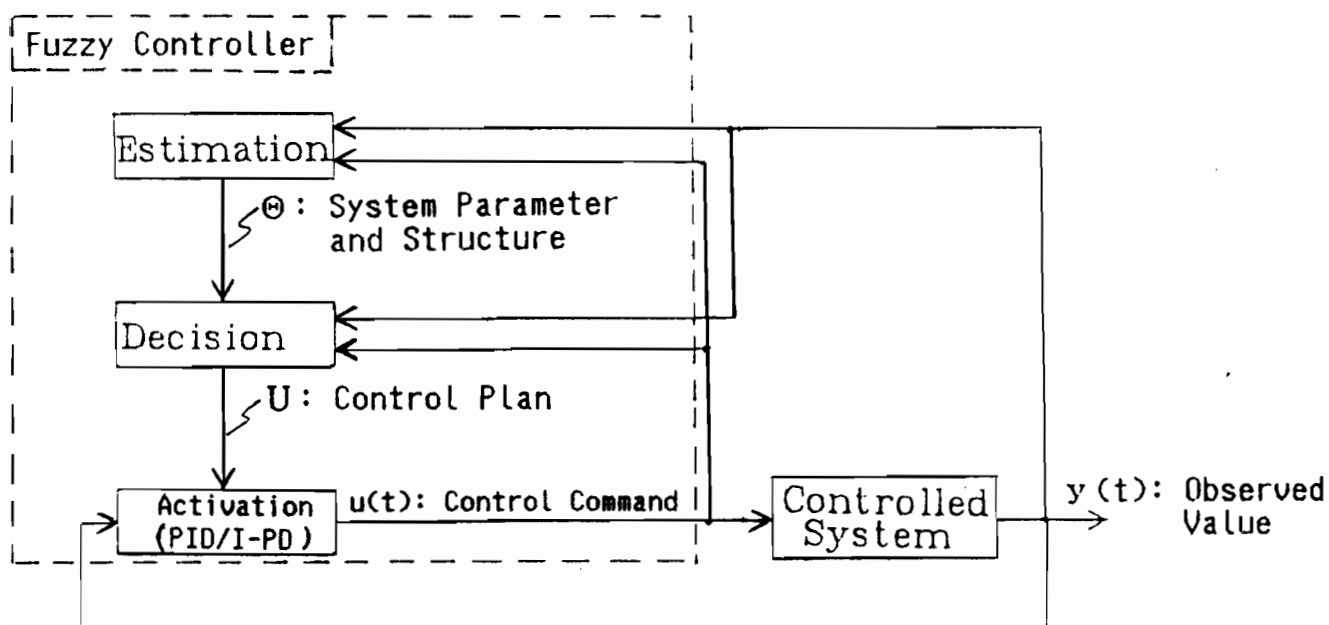


図3.1 Fuzzyコントローラの構造

各部分の概略機能は、次の通りである。

(1) 推定部

現在時刻 T_0 より過去の制御対象への入力 $(u(t), t < T_0)$ と、現在及び過去の制御対象の観測値 $(y(t), t \leq T_0)$ に基づき、現在の制御対象の応答をうまく説明できる(経験モデルにマッチする)システム定数やシステムの構造を選択する。

(2) 判断部

過去の制御対象への入力 $(u(t), t < T_0)$ と、現在及び過去の制御対象の観測値 $(y(t), t \leq T_0)$ 及び評価部で求めたシステム定数に基づき、現在選択しうる制御方策の中で、最も制御目的を満足する制御方策を決定する。

(3) 実行部

現在及び過去の制御対象の観測値 $(y(t), t \leq T_0)$ と、判断部で決定した制御方策に従い、制御対象に対する制御指令を決定する。

3.3.2 制御対象システムと経験モデル

制御対象システムの真の特性が、

$$y(T_0) = f(X(t), u(t), \theta), t \leq T_0 \quad (3.1)$$

ここで、 $X(t)$: 状態、 $u(t)$: 制御指令、 θ : 対象のシステム定数、 y : 観測値なる関数 f によって記述されるとする。これに対して経験及び解析により、この制御対象システムの特性が、

$$y(T_0) = g(X(t), u(t), \theta), t \leq T_0 \quad (3.2)$$

なる関数 g によって近似的に知られていると仮定する。ここで、 g は過去の、観測値、制御指令、定数によって定義される関数であり、一般には非線形な経験モデルである。また、エネルギー保存則や運動方程式などで明らかに成り立つ因果関係による将来の予測モデルも実システムを正確に制御するために重要である。ここで、このFuzzy制御を適用しようとしているシステムは、既に人間によって運転され、制御ノウハウが得られているのであるから、可制御なシステムであるとし、経験モデルによって定数の推定、制御結果の予測が可能であると仮定する。

3.3.3 推定部の機能

推定部では、過去の観測値・制御指令に基づき、これらの値を最もうまく説明できる対

象システムの定数を推定する。ここで用いる経験則は、「対象システムの定数を θ_k と仮定したとき、経験モデル g から求めた観測値の推定値 (y) がうまく一致 (Y_k) しているならば、システム定数は θ_k である。」の集まりで記述する。これを、以下の Fuzzy 推定則 E で定式化する。

(E1) If (θ is $\theta_1 \rightarrow y$ is Y_1) then θ is θ_1

;

(Ek) If (θ is $\theta_k \rightarrow y$ is Y_k) then θ is θ_k

;

(EK) If (θ is $\theta_K \rightarrow y$ is Y_K) then θ is θ_K

ここで、 y の値は過去の観測値及び制御指令を経験モデル g に代入して求めた値であり、システムを特徴付ける定数の数が複数個ある場合には、それらを決定しうるだけの個数を評価するよう可同定性を十分に考慮する必要がある。また、 $Y_1 \sim Y_K$ は「正確に一致」「うまく一致」といった言葉の意味を Fuzzy 集合化したものである。

3.3.4 判断部の機能

判断部では、現在の対象システムの定数 θ 、過去の観測値・制御指令に基づき、現在出力しようとする制御方策 U を決定する。ここで、用いる経験則は、「今の状態で、制御方策 U_m を仮定したとき、経験モデル g から求めた制御目的 q が、満足 (Q_m) できるならば、制御方策を U_m とする。」の集まりで記述する。これを、以下の Fuzzy 制御則 D で定式化する。

(D1) If (U is $U_1 \rightarrow q$ is Q_1) then U is U_1

;

(Dm) If (U is $U_m \rightarrow q$ is Q_m) then U is U_m

;

(DM) If (U is $U_M \rightarrow q$ is Q_M) then U is U_M

ここで、 $Q_1 \sim Q_M$ は制御目的を「十分に満足」「大体満足」といった運転者の主観に基づく評価を Fuzzy 集合化したものである。

3.3.5 実行部の機能

実行部では、判断部で決定した制御方策 U に従い、一般にはスカラー量である対象シス

テムに対する制御指令 u を決定する。ここでは、比較的単純な条件反射的に人間が行なっている運転を想定しており、経験則は、「制御方策 U_n が選択されていれば、これに基づいて制御指令 u_n を決定する。」の集まりで記述する。これを、以下の **F u z z y** 実行則 P で定式化する。

(P1) I f (U_1 i s S e l e c t e d) t h e n u i s u_1

:

(Pn) I f (U_n i s S e l e c t e d) t h e n u i s u_n

:

(PN) I f (U_N i s S e l e c t e d) t h e n u i s u_N

ここで、 u_n は現在及び過去の観測値に基づき制御方策 U_n を演算した結果である。ここで実行する制御方策としては、その動作パラメータを指定された、**P I D** や **I - P D** 制御方式が考えられる。

3. 4 提案 **F u z z y** 制御方式の伝達関数モデルへの適用

ここで提案した **F u z z y** 制御方式は、実システムにおける人間の制御活動を計算機により実現しようとするものであり、対象システムの動特性が概略や部分的にしか分からず、人間の経験による操作が有効である場合に適する。しかし、これらの対象に対する制御は対象システムの特異性の経験則化も重要なファクターとなり **F u z z y** 制御の特長を明確に示すことがむづかしい。そこで本論文では、提案した制御方式を、実システムの近似として有効であり制御理論の適用例として一般的である、むだ時間を入力にもつ定位性プロセス [荒木ほか、1984]²⁾ へ適用する。また、むだ時間及びシステム・ゲインが大幅に変化する場²⁾ 合についてシミュレーションを行い、**F u z z y** 制御の有効性を検討する。

3. 4. 1 問題の記述

図 3. 2 に示す伝達関数モデルを考える。この制御対象は、

$$G(s) = \frac{K}{(1 + Ts)(1 + 0.2Ts)} \cdot e^{-Ls} \quad (3.3)$$

なる伝達関数で表される、制御入力に対して L 秒のむだ時間をもつ定位性プロセスである。ここで、制御対象の各パラメータについて、時定数 (T) が 1. 0 秒、むだ時間 (L) が

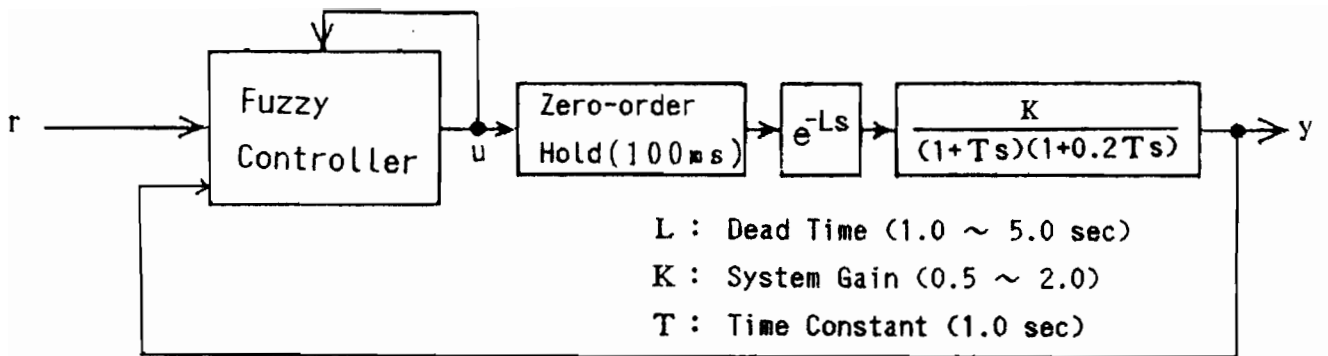


図3. 2 適用システムのブロック線図

名目値3.0秒、変化範囲1.0~5.0秒、システム・ゲイン(K)が名目値1.0、変化範囲0.5~2.0、なる値をとるとした。制御目的としては、オーバシュート、アンダーシュート、立ち上がり時間、整定誤差を評価する(図3.3)。以下、むだ時間(L)とシステム・ゲイン(K)の値は、未知であるが、その変化範囲は既知であるとして、制御系を考える。

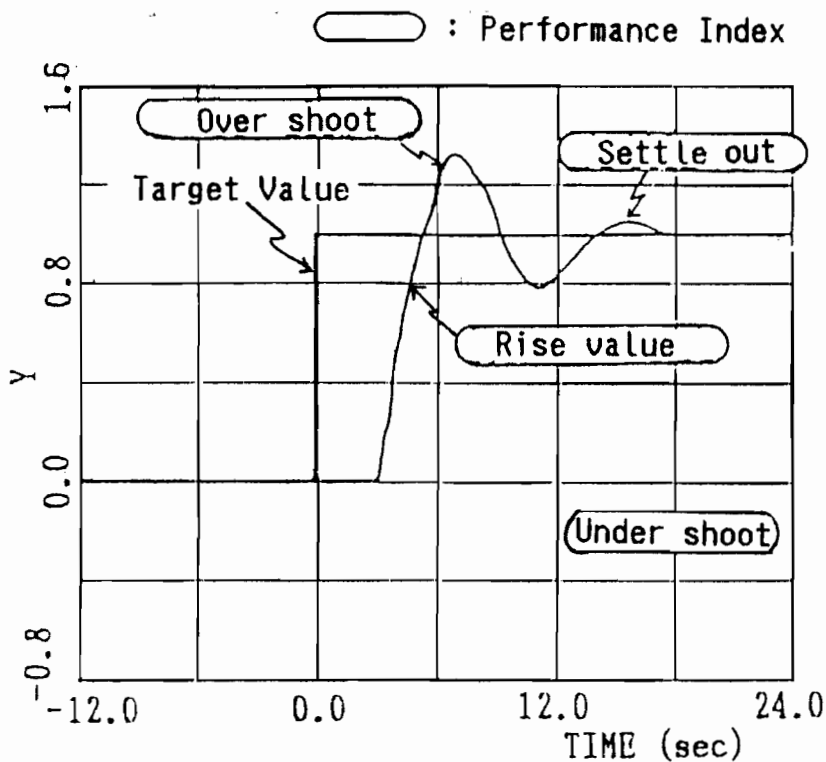


図3. 3 制御目的と評価指標

3.4.2 Fuzzy制御方式の適用

(1) 経験モデル

対象システムの構造が既知であることから、推定又は仮定した対象システムのむだ時間L及びゲインKに基づき、サンプリング時間を0.1秒とした状態遷移行列Φを作り、これによるサンプル値制御系のモデル

$$X(t+0.1) = \Phi \cdot X(t) + \Psi \cdot u(t-L) \quad (3.4)$$

$$\hat{y}(t) = C \cdot X(t) \quad (3.5)$$

$$\Phi = \begin{bmatrix} 0.905 & 0.075 \\ 0.0 & 0.607 \end{bmatrix}$$

$$\Psi = \begin{bmatrix} 0.004 \\ 0.079 \end{bmatrix}, \quad C = [5.0K, 0.0]$$

を経験モデルとした。

(2) 推定部

(a) 推定指標のFuzzy集合化

ここでは、むだ時間(L)の変化が最長5.0秒であることから、6.0秒前の観測値y(t0-6.0)と現在までの制御指令u(t0-6.0)～u(t0)に対して式(3.4)、(3.5)の経験モデルを適用し、4.5秒前、3.0秒前、1.5秒前、及び現在の観測値yの推定値、

$$E_3 = \hat{y}(t0-4.5), \quad E_2 = \hat{y}(t0-3.0),$$

$$E_1 = \hat{y}(t0-1.5), \quad E_0 = \hat{y}(t0)$$

を求め、それぞれ「うまく一致(RM)」と「正確に一致(AM)」の評価をFuzzy集合で定義した。(図3.4)

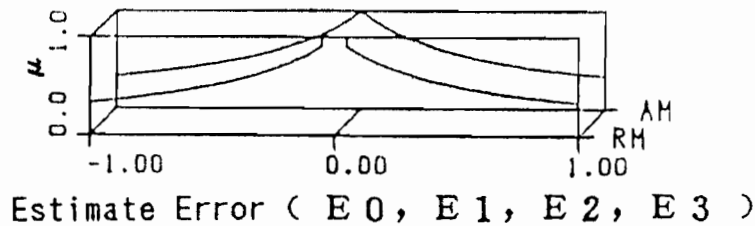


図3.4 Fuzzy推定部のメンバーシップ関数

(b) Fuzzy推定則

むだ時間L及びシステム・ゲインKの変化範囲から、むだ時間に関して2.0と4.0秒を、システム・ゲインに関して0.75と1.5を、システム定数の基本的仮定値として用い、さらに現在の推定値に対して±20%変化させた値をシステム定数の候補として、1秒毎に評価し、むだ時間の推定値EL、システム・ゲインの推定値EKを求める。上記Fuzzy集合に基づき作成したFuzzy推定則を表3.1に示す。ここで、*の記号は、現在の値に定数を乗算することを表す。

表3.1 Fuzzy推定則

1. If(EK is *1.0 and EL is *1.0→E0 is RM and E1 is RM and E2 is RM and E3 is RM)
then EK is *1.0 and EL is *1.0
2. If(EK is 0.75 and EL is *1.0→E0 is AM and E1 is AM and E2 is AM and E3 is AM)
then EK is 0.75 and EL is *1.0
3. If(EK is 1.5 and EL is *1.0→E0 is AM and E1 is AM and E2 is AM and E3 is AM)
then EK is 1.5 and EL is *1.0
4. If(EK is *1.0 and EL is 2.0→E0 is AM and E1 is AM and E2 is AM and E3 is AM)
then EK is *1.0 and EL is 2.0
5. If(EK is *1.0 and EL is 4.0→E0 is AM and E1 is AM and E2 is AM and E3 is AM)
then EK is *1.0 and EL is 4.0
6. If(EK is *0.8 and EL is *1.0→E0 is AM and E1 is AM and E2 is AM and E3 is AM)
then EK is *0.8 and EL is *1.0
7. If(EK is *1.2 and EL is *1.0→E0 is AM and E1 is AM and E2 is AM and E3 is AM)
then EK is *1.2 and EL is *1.0
8. If(EK is *1.0 and EL is *0.8→E0 is AM and E1 is AM and E2 is AM and E3 is AM)
then EK is *1.0 and EL is *0.8
9. If(EK is *1.0 and EL is *1.2→E0 is AM and E1 is AM and E2 is AM and E3 is AM)
then EK is *1.0 and EL is *1.2

(3) 判断部

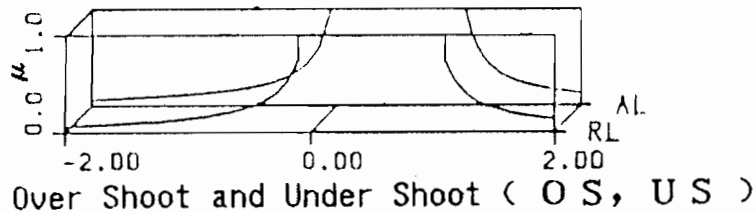
判断部では、指定されたシステム定数（K：ゲイン、L：むだ時間）に基づき、実行部に対する、制御方策を評価し最適な制御方策を決定する。

(a) 判断部の Fuzzy 集合

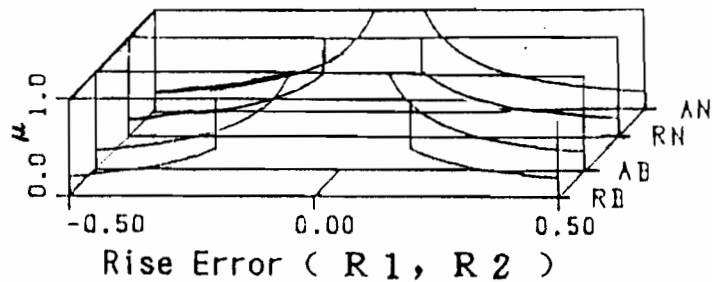
ここでは、ステップ入力に対する以下の応答を評価する。

(i) オーバシュート量（OS）及びアンダーシュート量（US）（図3.5(a)）

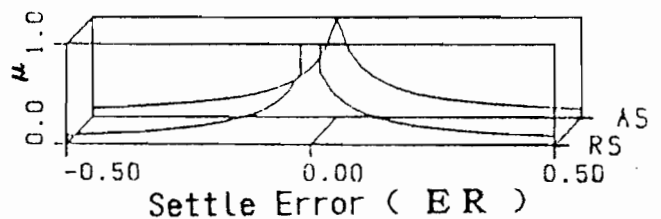
- ・オーバシュート量が 10%以下 : OS is AL
- ・オーバシュート量が約10%以下 : OS is RL
- ・アンダーシュート量が 10%以下 : US is AL
- ・アンダーシュート量が約10%以下 : US is RL



(a) オーバ・シュートとアンダ・シュートの評価



(b) 立ち上がりの評価



(c) 整定誤差の評価

図3.5 Fuzzy判断部のメンバーシップ関数

(ii)立ち上がり量 (R1, R2) (図3.5(b))

- ・ 10秒後には $\pm 20\%$ 以内に立ち上がる : R1 is AB
- ・ 10秒後には約 $\pm 20\%$ 以内に立ち上がる : R1 is RB
- ・ 18秒後には $\pm 10\%$ 以内に立ち上がる : R2 is AN
- ・ 18秒後には約 $\pm 10\%$ 以内に立ち上がる : R2 is RN

(iii)整定誤差 (ER) (図3.4(c))

目標値の変化後24秒から1秒間の誤差を評価する。

- ・ 24秒後には $\pm 2\%$ 以内に整定している : ER is AS
- ・ 24秒後には約 $\pm 2\%$ 以内に整定している : ER is RS

ただし、現在時刻が20秒を過ぎると、その5秒後より1秒間の誤差を評価する。

(b) Fuzzy判断則

制御方策としては、実行部で用いる10msecのサンプリング周期で動くPID制御系の制御定数を決定する。ここで、積分制御の定数(DD)は2.7、微分制御の定数(DD)は0.3、の初期値のままとした。比例制御のゲインDPを、0.1、0.3、0.5を基本的仮定値とし、さらに現在実行している比例制御のゲインDPの値と、その $\pm 10\%$ 、 $\pm 8\%$ 、 $\pm 6\%$ 、 $\pm 4\%$ 、 $\pm 2\%$ の値(DP*KP, KP=1.0 \pm 0.2*n, n=1,5)を候補として上記制御目的を評価する。この評価状況を図3.6に示す。また、上記Fuzzy集合に基づき作成したFuzzy判断則を表3.2に示す。

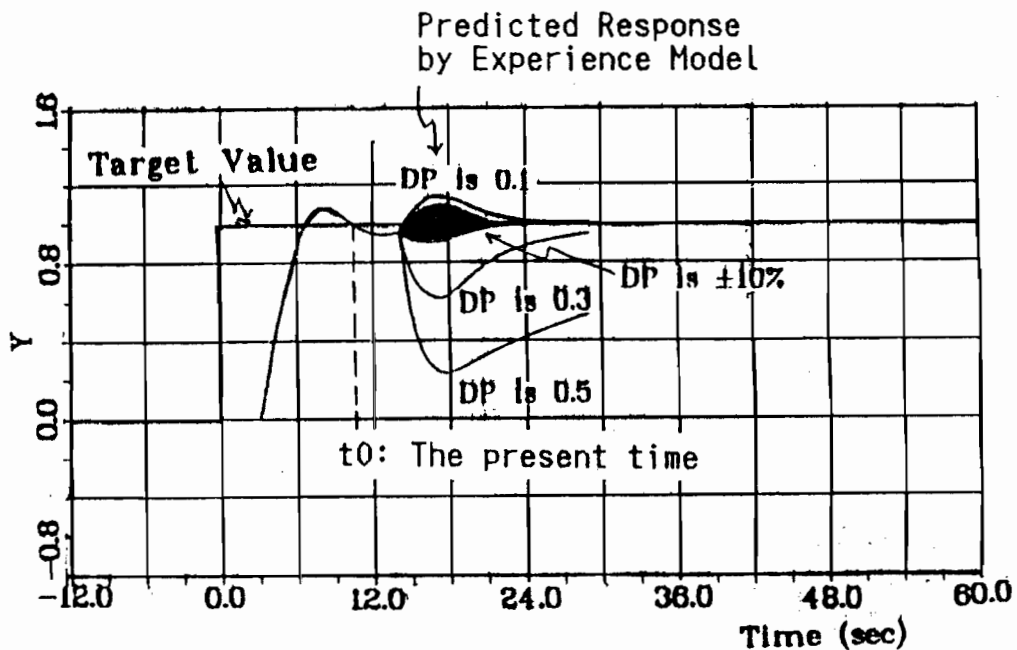


図3.6 システム・モデルに基づく制御応答の予測

表3.2 Fuzzy判断則

1. If(DP is *1.0 and DI is *1.0 and DD is *1.0
 →OS is RL and US is RL and ER is RS and R1 is RB and R2 is RN)
 then DP is *1.0 and DI is *1.0 and DD is *1.0
2. If(DP is 0.1 and DI is *1.0 and DD is *1.0
 →OS is AL and US is AL and ER is AS and R1 is AB and R2 is AN)
 then DP is 0.1 and DI is *1.0 and DD is *1.0
3. If (DP is 0.3 and DI is *1.0 and DD is *1.0
 →OS is AL and US is AL and ER is AS and R1 is AB and R2 is AN)
 then DP is 0.3 and DI is *1.0 and DD is *1.0
4. If (DP is 0.6 and DI is *1.0 and DD is *1.0
 →OS is AL and US is AL and ER is AS and R1 is AB and R2 is AN)
 then DP is 0.6 and DI is *1.0 and DD is *1.0
- N. If (DP is *KP and DI is *1.0 and DD is *1.0
 →OS is AL and US is AL and ER is AS and R1 is AB and R2 is AN)
 then DP is *KP and DI is *1.0 and DD is *1.0
 (N = 5,14 ; KP = 1.0 ±0.2·n , n = 1,5)

(4) 実行部

判断部によって与えられた制御方策(比例、積分、微分定数)に基づき、目標値と現在の観測値の偏差からPID制御の計算を行い、制御指令 $u(t)$ を0.1秒毎に出力する。Fuzzy実行則としては、以下を用いる。

If (U is Selected) then u is u1

この例では、実行則は1つであるため、本ルールは常に選択されPID制御の計算結果 u_1 を制御指令として出力する。

3.4.3 制御結果と検討

上記Fuzzy制御コントローラを、システム・ゲイン $K=1.0$ でむだ時間 L を1秒から5秒まで変えた場合(図3.7)と、むだ時間 L を3秒でシステム・ゲイン K を0.5か

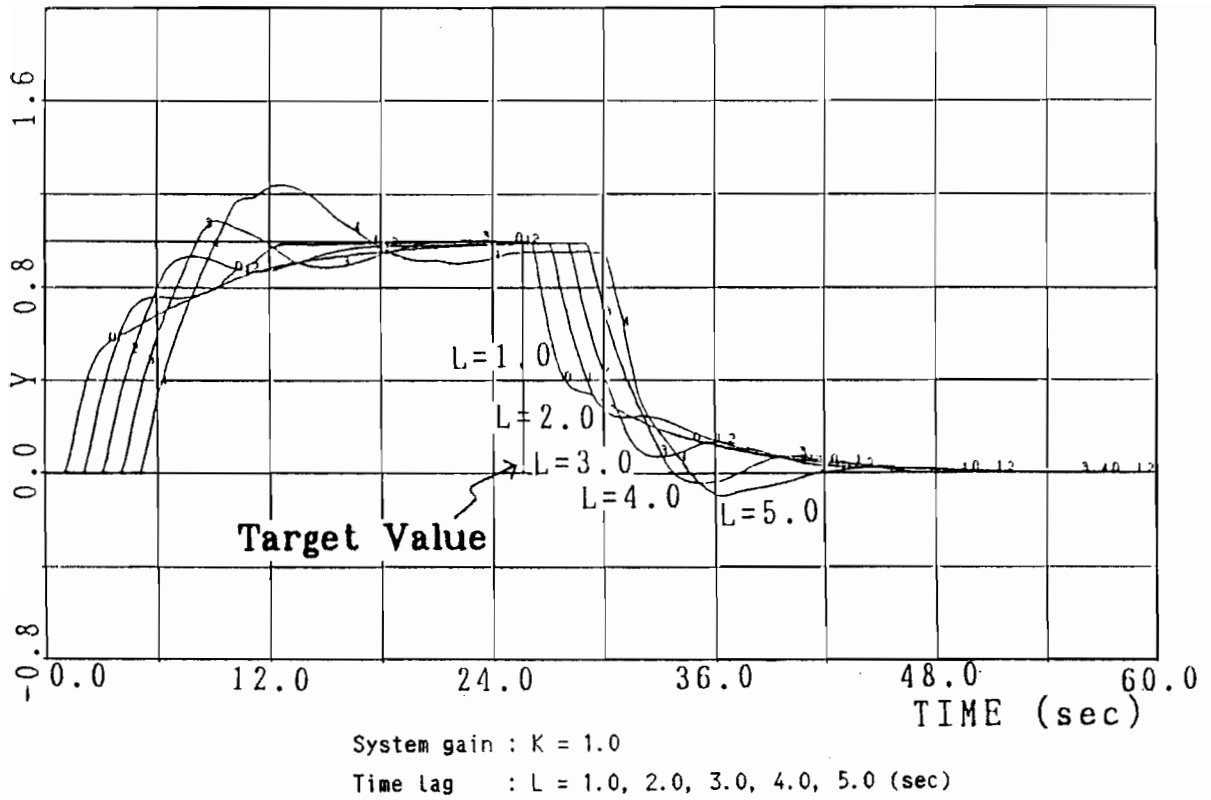


図3.7 伝達時間の変化に対するシミュレーション結果のまとめ

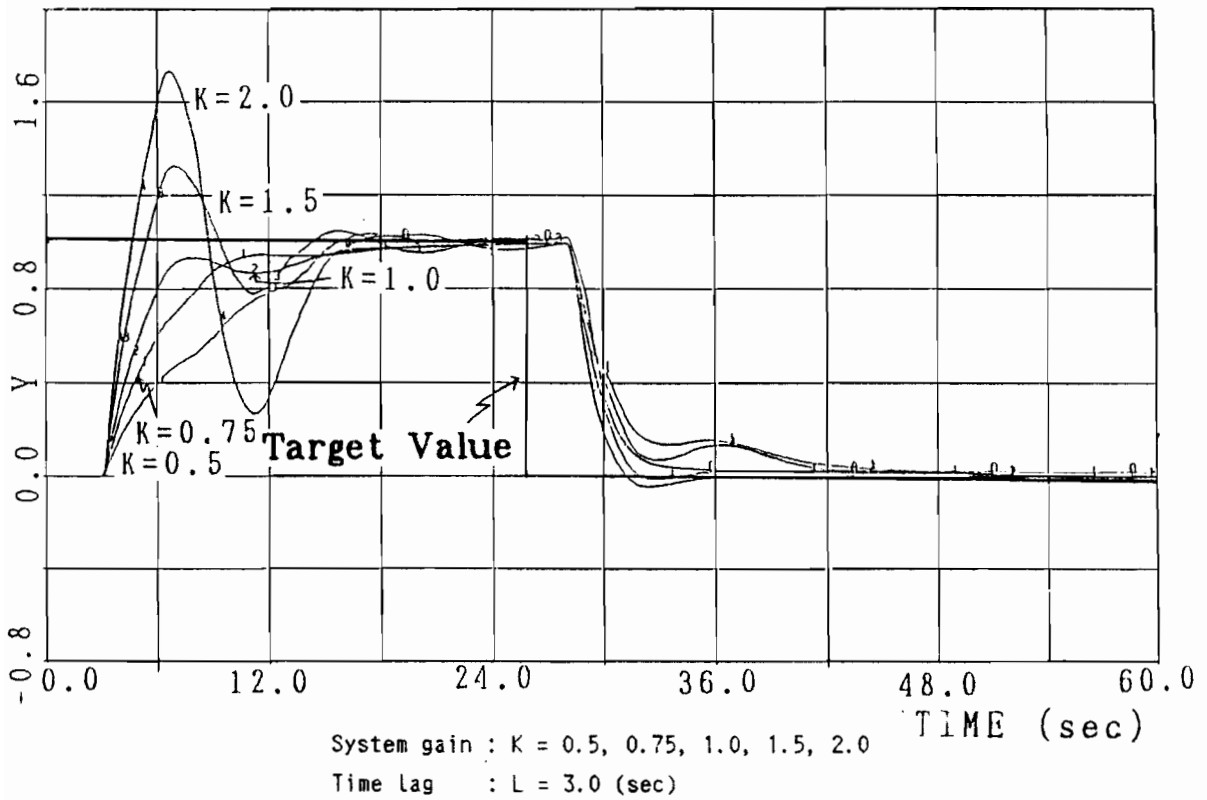


図3.8 システム・ゲインの変化に対するシミュレーション結果のまとめ

ら2.0まで変えた場合(図3. 8)について、2.5秒間のスナッフ入力を加えた結果を示す。図3. 7、図3. 8共に最初は対象システムの定数が未知であり、真のむだ時間が経過しさらに2、3秒たたないと正しい評価ができないため応答が振られているが、1.8秒過ぎからは安定な制御となっており、制御対象のパラメータが未知の場合でも状況を見ながら適切な制御指令を選択して行くという、人間の制御をうまくアルゴリズム化できているといえる。

3. 5 おわりに

本章では第2章にて提案し、実システムへの適用を進めている予見Fuzzy制御方式を、(1)推定(2)判断(3)実行、の三段階に階層化した人間の制御戦略に基づく制御方式に拡張し、伝達関数で表わされる対象への適用例を示した。ここで提案した制御方式は人間の経験則をそのままアルゴリズム化しコントローラは、その経験則に基づき制御指令を決定する。そのため、人間は推論状況により、コントローラが現在何を考え、どのような評価のもとにどうしようとしているのかを、時々刻々表示しチェックすることが可能であり、より人間に近付いたコントローラの実現に有効である。

第 4 章

第4章 Fuzzy制御の列車定位置停止 制御への応用

4.1 はじめに

第2章では、人間の制御活動を、制御目的を考えた勘に基づく代替案の選択としてアルゴリズム化する予見Fuzzy制御方式を提案した。この予見Fuzzy制御方式の概念は、本章に述べる列車定位置停止制御において、熟練者が、従来PID制御により実用化されている自動運転と比較して、質的に優れた運転をしており、これをアルゴリズム化できないかと検討した過程において生まれたものである。列車自動運転システム全体への適用は、次章にて述べ、本章では、PID制御と熟練者の運転で違いが目立ち、しかも複雑な制御を必要とする列車定位置停止制御(TASC: Train Automatic Stop Control)に適用し、予見Fuzzy制御方式の有効性を検討した結果について述べる。

ここで対象とした列車自動運転システムとは、運転士に代わり列車の出発、走行、停止の制御を行う制御システムであり、我が国では、札幌市地下鉄東西線〔北川ほか、1976〕¹¹⁾をはじめ、福岡市地下鉄〔坂本ほか、1981〕¹⁵⁾、大阪南港ポートタウン線〔東、1982〕³⁰⁾、などで実用化されている〔井原、1979〕⁶⁾；宮本、1982〕⁴³⁾。

この運転を制御系として見た場合、つぎのような特徴がある。

- (1) 入力データ(速度情報)の分解能が低い。
- (2) ブレーキ装置などの制御対象の特性が、時間と共に変化する。
- (3) 勾配などの路線条件が場所により異なり、列車の位置によって外力が変化する。
- (4) 制御に対する評価指標が、乗り心地良く、精度良く止める、といったように、多次元であいまいであり、非線形な制御系となる。

このように、ラフな入力データをもち、制御対象の特性と外乱がダイナミックに変化するうえに、非線形な制御系となる列車自動運転に対し、従来実用化されているのは、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による方式である〔北川ほか、1976〕¹¹⁾；下浦ほか、1981〕¹⁷⁾；藤倉ほか、1977〕³³⁾。なおこの線形化パターン追従の方法として、最適制御理論の適用が提案され計算機シミュレーションが行われている〔半田、1978〕²⁹⁾；荒屋、1979〕³⁾。さらに、距離又は時間と列車速度により一定のパターンで制御指令を出力するオープンループ制御方式〔石井、1974〕⁴⁾、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〔下浦、1976〕、などが提案され実験されている。

しかし、これら従来制御方式においては、先に述べた列車運転制御の重要な評価指標である、乗り心地、停止精度などを直接評価できない。たとえば、線形化パターン追従方式ではあらかじめ定めたパターンへの速度誤差平方和最小などの追従性が制御上の評価指標となっているわけで、乗り心地については、パターンの形状、制御定数で間接的に保証しているにすぎず、また、停止精度については、計算機シミュレーション又は実際の車両を用いた実験を行うことによりその分布を求めている。

いっぽう、熟練運転士が注意深く手動で運転すると、自動運転と比較してブレーキ・ノッチ（制御指令）の変化が少なくて乗り心地の良い、しかも停止精度の良い制御ができる。従って、この運転士が行っている制御をアルゴリズム化できれば、列車運転制御の評価指標を総合的に満足する制御が実現できると考えられる。

本章では、まづ4.2節にて列車定位置停止にて運転士が実際に運転を行っている時どのようなことを考えているかを考察する。4.3節では前節にて考察した運転士の経験則を第2章にて述べた予見Fuzzy制御によりFuzzy制御則化する。4.4節では、予見Fuzzy制御方式と従来より実用化しているPID制御方式による列車定位置停止について計算機シミュレーションにより比較し検討する。4.5節は本章のまとめである。

4.2 列車定位置停止と運転士による運転

4.2.1 列車定位置停止制御

ここでFuzzy制御を適用する列車定位置停止制御とは、列車が特定の地点を通過したことを示す地点情報と速度発電機による一定サンプリング時間内の走行距離とからブレーキの制御を行い次駅の所定の目標位置に停止させる制御である。（図4.1）

ここでは、制御系の入力を、最近の車両で採用されている離散的な減速度に対応したブレーキ・ノッチ指令とする。この制御系では、ブレーキ・ノッチ指令に対する実際の車両の減速度を応荷重装置により測った列車重量を用いて一定に保とうとするが、エア・ブレーキの空気圧の変動、列車重量の測定誤差、ブレーキ・パッドの摩擦係数の変動、などによって定格値に対する実際のブレーキ減速度に±30%程度の誤差を生じ、列車の位置により変化する勾配条件によって10%（1000mで10m上昇）当たり0.32 Km/h・sの誤差を生じる。また、速度の検出は、車輪の回転から発生する距離パルスから求めるが、

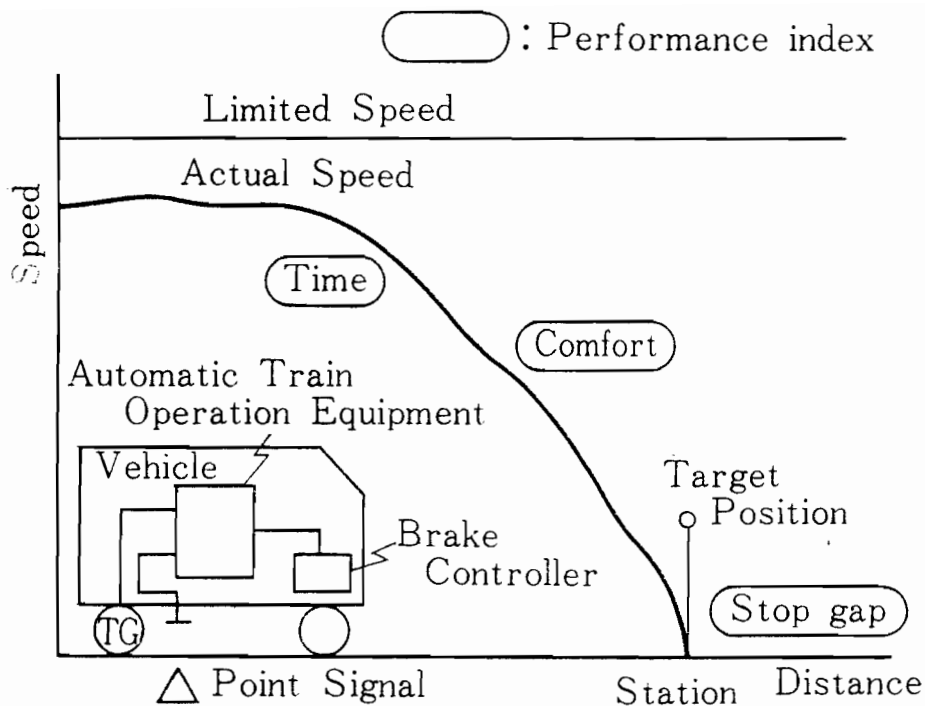


図4.1 列車定位置停止制御の概要

通常この距離パルスの分解能は1cm程度でありサンプリング時間を100msecとすると、0.36Km/h程度の悪い分解能の検出精度となる。このように、ここでの制御対象は、対象システムのパラメータ及び路線の勾配条件による外乱が変動するうえに、入力データがラフであり所定の停止目標に列車を停止させる制御（運転）が困難である。

4.2.2 運転士による運転の考察

つぎに、このような列車を運転する場合に運転士がどのようなことを考えながら列車の定位置停止制御を行っているかを定性的に記述する。以下に述べる制御方法は、我々がこれまで列車自動運転システムを開発〔安信ほか、1977a⁵⁰⁾～1980⁵⁸⁾；藤倉ほか、1977³³⁾；宮本ほか、1978⁴²⁾；Miyamoto, et. al., 1978⁸³⁾〕してきた経験から作成したものである。

運転士による列車定位置停止制御では、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、定位置停止のためのブレー

キをかけ始める。また、ブレーキ・ノッチを出力し、かつそのノッチが安定している場合には、ブレーキ・ノッチに対する実際の列車の減速度を推定する。さらに、時々刻々以下のことを考えながらブレーキ・ノッチを決定して行く。

- (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、そのノッチを保持する。
- (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・ノッチをかける。
- (3) 停止精度を良くするため；B地点を通過し、そのままうまく停止できないと判断した場合は、±nノッチ以内で正確に止まれるノッチを選択する。

以上のように、運転士は、時々刻々に(1)乗客の乗り心地、(2)走行時間、(3)停止精度の予測値、を考えながら予見制御として列車の定位置停止制御を行っている。

4.3 Fuzzy制御列車定位置停止制御

4.2節で述べた経験則による列車定位置停止制御を、第2章で述べたFuzzy制御により実現するわけであるが、先ず評価指標となる、乗り心地、停止精度、走行時分についてFuzzy集合を定義し、それに基づいて経験則をFuzzy制御則化する。

4.3.1 評価指標のFuzzy集合

評価関数を定義するために必要となる記号を定義する。

- 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)、
 $X_b(v)$: 列車速度に対応したB地点の位置(m)、
 $t_b = (X_b(v) - x(t)) / v(t)$: 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停止位置(m)、
 X_e : 許容停止誤差(m)。

つぎに評価関数を定義するのに使用するため、定義域を(a-b, a+b)とする三角形の関数L、関数Lでaより大きい部分を1、0とした関数F、定義域を(-∞, +∞)とした

尖った関数V、同じく定義域が $(-\infty, +\infty)$ で台形状の関数G、を以下のように定義する。

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

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

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

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

$$V(x, a, b) = b/(|x-a|+b)$$

$$G(x, a, b) = 1.0 \quad : a-b \leq x \leq a+b$$

$$G(x, a, b) = b/|x-a| \quad : x < a-b, \quad a+b < x$$

ここで、 $b > 0$ とする。

(1) 乗り心地(C)の評価指標の定義(図4.2)

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持している時間 t_c で評価する。

(i) 乗り心地が良い(CG)

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

(ii) 乗り心地が悪い(CB)

$$\mu_{CB}(t_c, N_c) = 1 - \mu_{CG}(t_c, N_c)$$

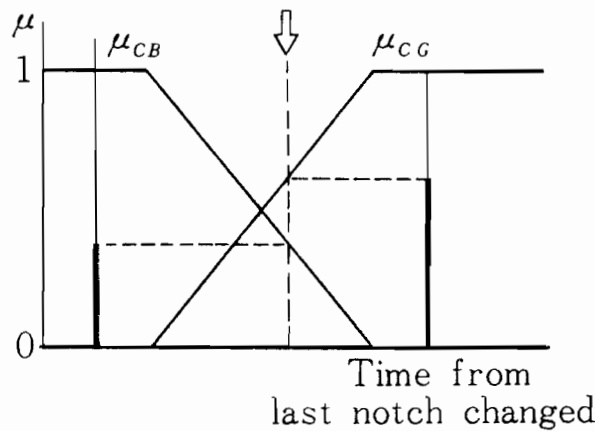


図4.2 乗り心地のメンバーシップ関数

(2) 停止精度 (G) の評価指標の定義 (図 4. 3)

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。

(i) うまく停止する (G_G) : $\mu_{GG}(x_p(N_p)) = G(x_p(N_p), X_t, X_z)$

(ii) 正確に停止する (G_A) : $\mu_{GA}(x_p(N_p)) = V(x_p(N_p), X_t, X_z)$

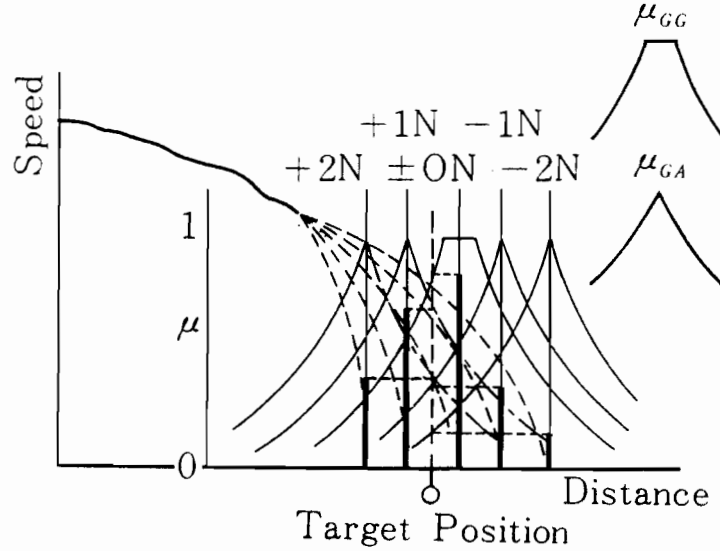


図 4. 3 停止精度のメンバーシップ関数

(3) 走行時間 (R) の評価指標の定義 (図 4. 4)

走行時分については、列車速度に対応したブレーキ開始地点 (B 地点) より出発駅側で定位置停止制御を開始すると走行時分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。

(i) 定位置停止制御ゾーン内にいる (R_T) : $\mu_{RT}(t_b) = F(t_b, 0, 2)$

(ii) 自由ゾーン内にいる (R_F) : $\mu_{RF}(t_b) = 1 - \mu_{RT}(t_b)$

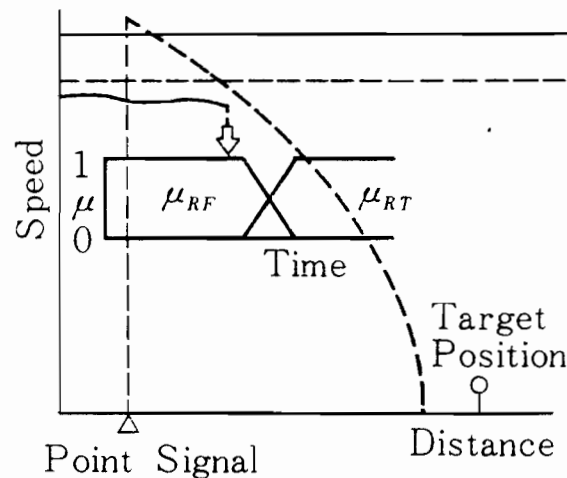


図 4. 4 走行時間のメンバーシップ関数

4. 3. 2 F u z z y制御則の決定

4. 2節で定性的に記述した定位置停止制御のための経験則を、上記評価指標のF u z z y集合により定式化しF u z z y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. 2節の(1)で述べた乗り心地を良くするための経験則を、予見F u z z y制御の制御則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
うまく停止できる : G is GG

に対応しており、すなわち、

(1) I f (DN is 0 → R is RT and G is GG) t h e n DN is 0

なるF u z z y制御則となる。4. 2節(2)、(3)の経験則からも同様にして、

(2-1) I f (N is 0 → R is RF and C is CG) t h e n N is 0

(2-1) I f (N is 1 → R is RT and C is CG) t h e n N is 1

(3) I f (DN is n → R is RT and C is CG and G is GA) t h e n DN is n
(n = ±1, ±2, ±3)

なる、定位置停止制御のための予見F u z z y制御の制御則が決定できる。

4. 3. 3 ブレーキ性能の推定

ここで対象としている列車は、ブレーキ・ノッチに対する実際のブレーキ減速度が、制御系自体で定格値に対して±30%変動し、さらに路線の勾配によって列車の位置により変化する外乱が加わるとした。このため、列車を正確に制御するためには、ブレーキ・ノッチに対する実際の減速度を推定する必要がある。

これに対して、ここでは運転士の制御を模擬しブレーキ・ノッチが一定時間(たとえば2秒間)以上変化しなかった場合に、その間の各サンプリング時間毎の走行距離により、実減速度を求めブレーキ性能を推定し、各ブレーキ・ノッチに対する減速度を推定する。

4.3.4 Fuzzy制御の実現

上記方法を、列車に搭載したマイクロ・コンピュータにより実現し、実際の列車に対する制御指令（ブレーキ・ノッチ）を時々刻々決定して行く。この処理手順を示したのが図4.5であり、このプログラムを100 msec 毎にくり返して起動することにより、その時点での制御指令を決定する。

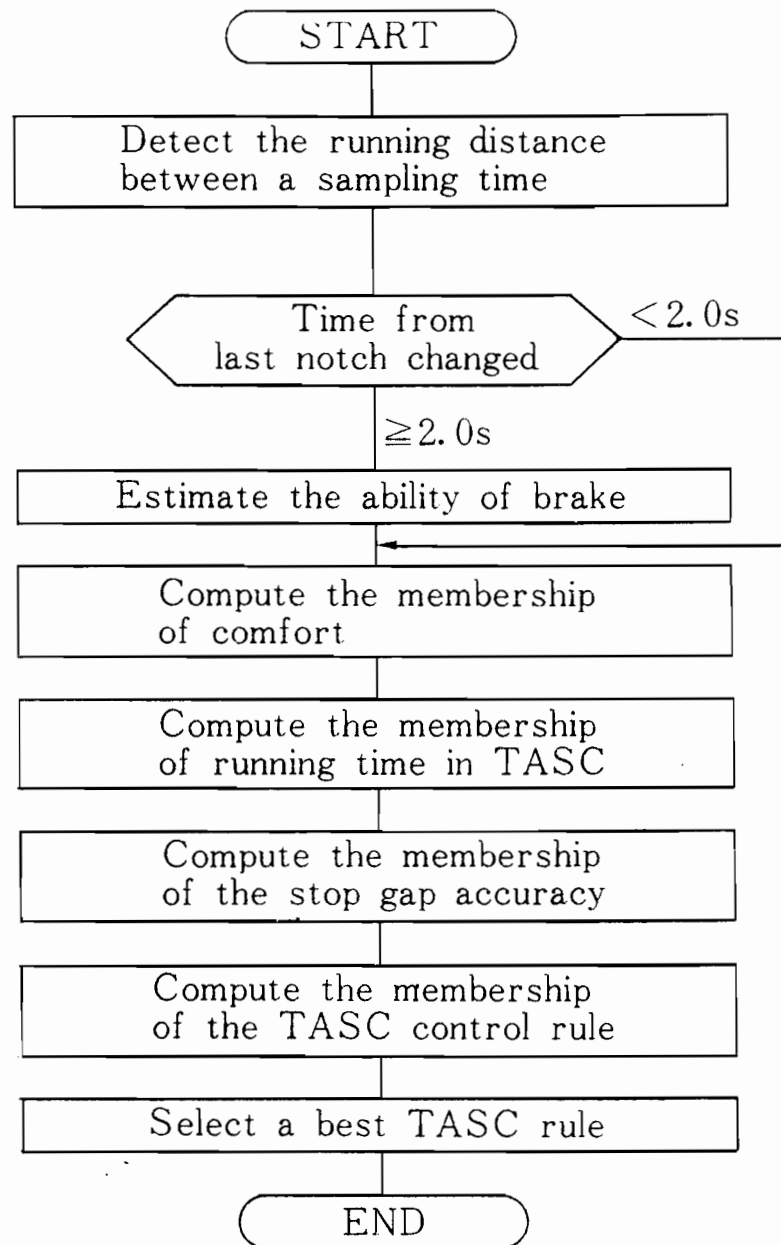


図4.5 Fuzzy制御による定位置停止制御アルゴリズムの処理フロー

4.4 シミュレーションによる検討

Fuzzy制御の実用性を検討するため、図4.6に示すモデルによって、従来より実用化しているPID制御と比較し、計算機シミュレーションを行った。

シミュレーションには、表4.1に示す諸元をもつ標準的な地下鉄車両を用いた。

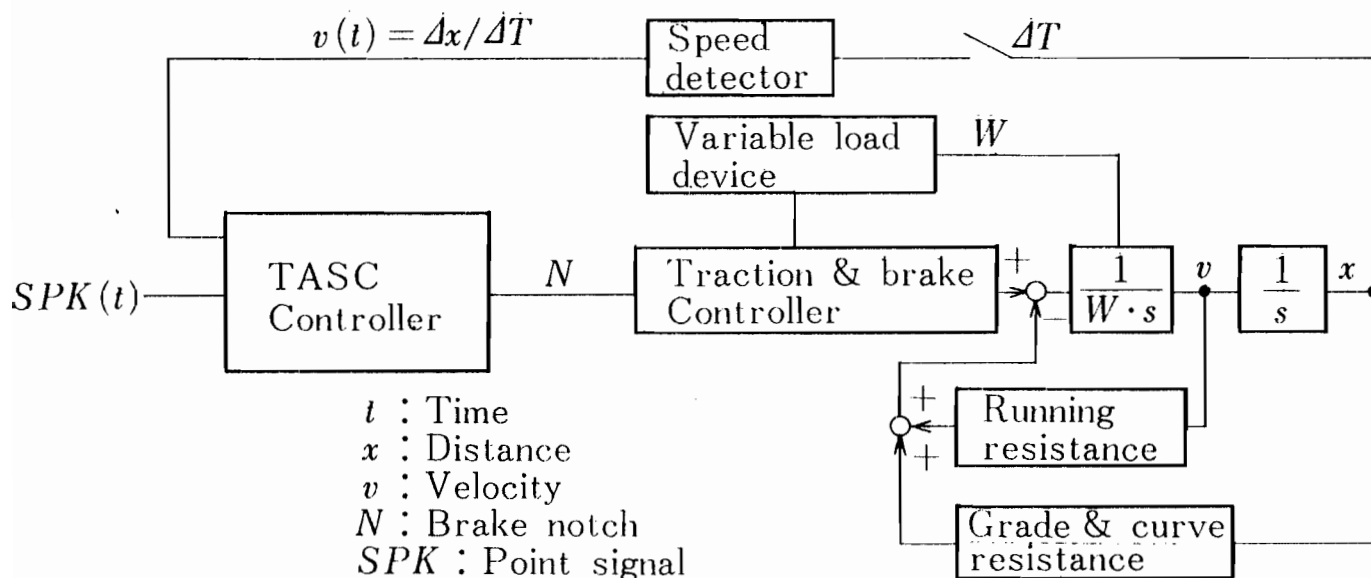


図4.6 定位置停止制御システムのブロック線図

表4.1 シミュレーション条件

列車長	:	83.5 m
列車総重量	:	129.0 ton
走行抵抗	:	$1.97 + 0.016 \cdot v + 0.00084 \cdot v^2$ Kg/ton
ブレーキ段数	:	9 段
最大ブレーキ減速度	:	定格値 = 5.14 Km/h·s
		最小値 = 3.6 Km/h·s
		最大値 = 6.68 Km/h·s
ブレーキ系むだ時間	:	0.2 sec
ブレーキ系時定数	:	0.6 sec

4.4.1 シミュレーション条件と結果

先にも述べたように、定位置停止制御では、ブレーキ・ノッチに対する実際の減速度の定格値に対する偏差が、その制御性に大きな影響を与える。ここでは、路線勾配が、 -5% 、 0% （平坦）、 $+5\%$ の各条件について、ブレーキ性能を定格値 $5.14\text{ Km/h}\cdot\text{s}$ に対して、 30% 減の $3.6\text{ Km/h}\cdot\text{s}$ 、 30% 増の $6.68\text{ Km/h}\cdot\text{s}$ を加えてシミュレーションを行った。シミュレーション結果の停止精度の平均値および標準偏差とノッチの変化回数を図4.7(a,b,c)、図4.8に示す。また、Fuzzy制御、PID制御による列車の走行状況およびノッチ変化の状況を図4.9、図4.10に示す。

4.4.2 シミュレーション結果の検討

図4.7、図4.8より、Fuzzy制御はPID制御と比較して、

- (1) ブレーキ性能の変動、勾配条件の変動に対して停止精度の平均値の変動が少なく、また全体の標準偏差が約 $1/3$ （PID制御 28 cm に対して、Fuzzy制御 10 cm ）と、常に正確な定位置停止制御を行っている。
- (2) ノッチの変化回数は約 $1/2$ （PID制御 16.0 回に対して、Fuzzy制御 6.6 回）となり、乗り心地の良い制御を行っている。

であり、人間の運転に近い制御を行っていることがわかる。

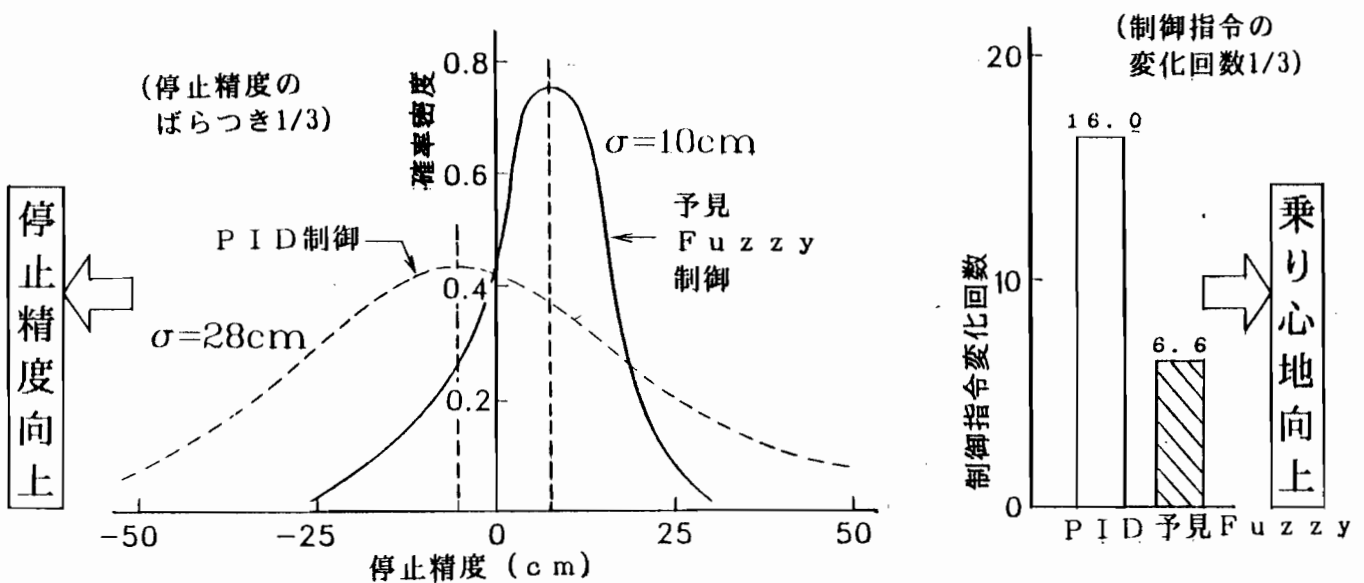
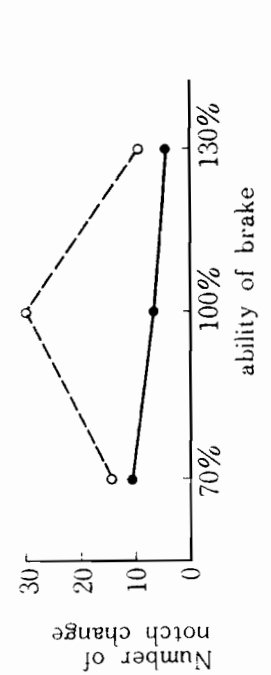
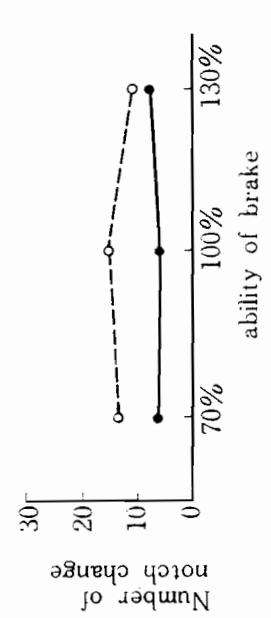
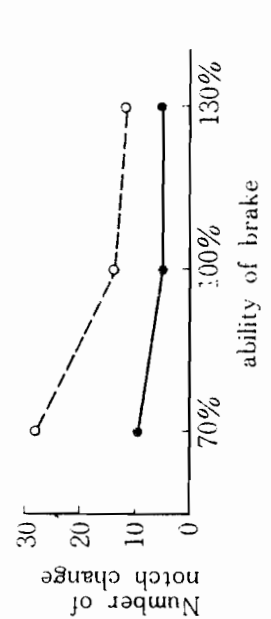
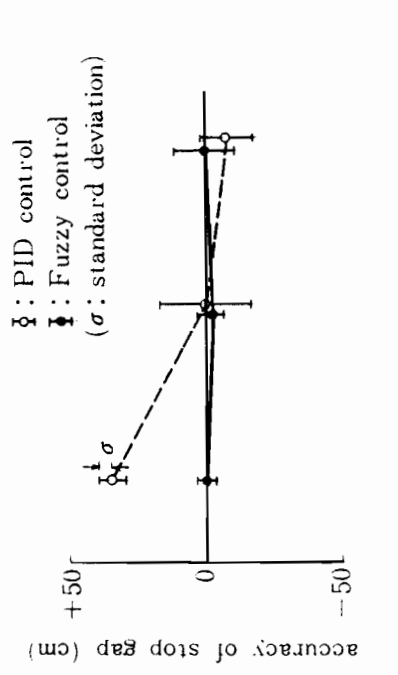
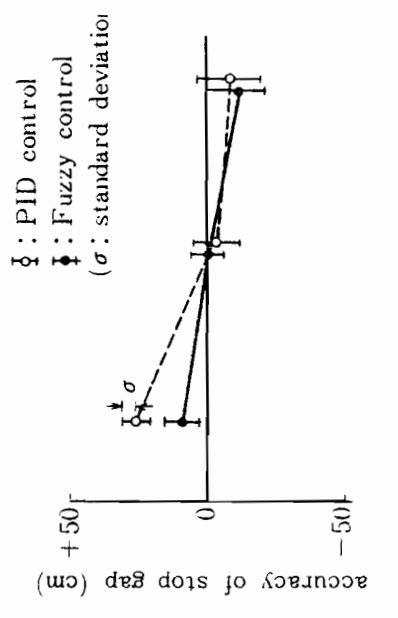
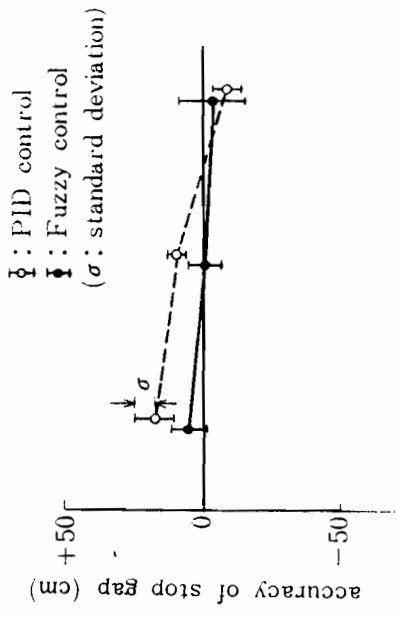


図4.8 定位置停止制御のシミュレーション結果のまとめ



(a) -5% の下り勾配

(b) 0% の平坦勾配

(c) +5% の上り勾配

図4.7 定位置停止制御の各勾配条件毎のシミュレーション結果

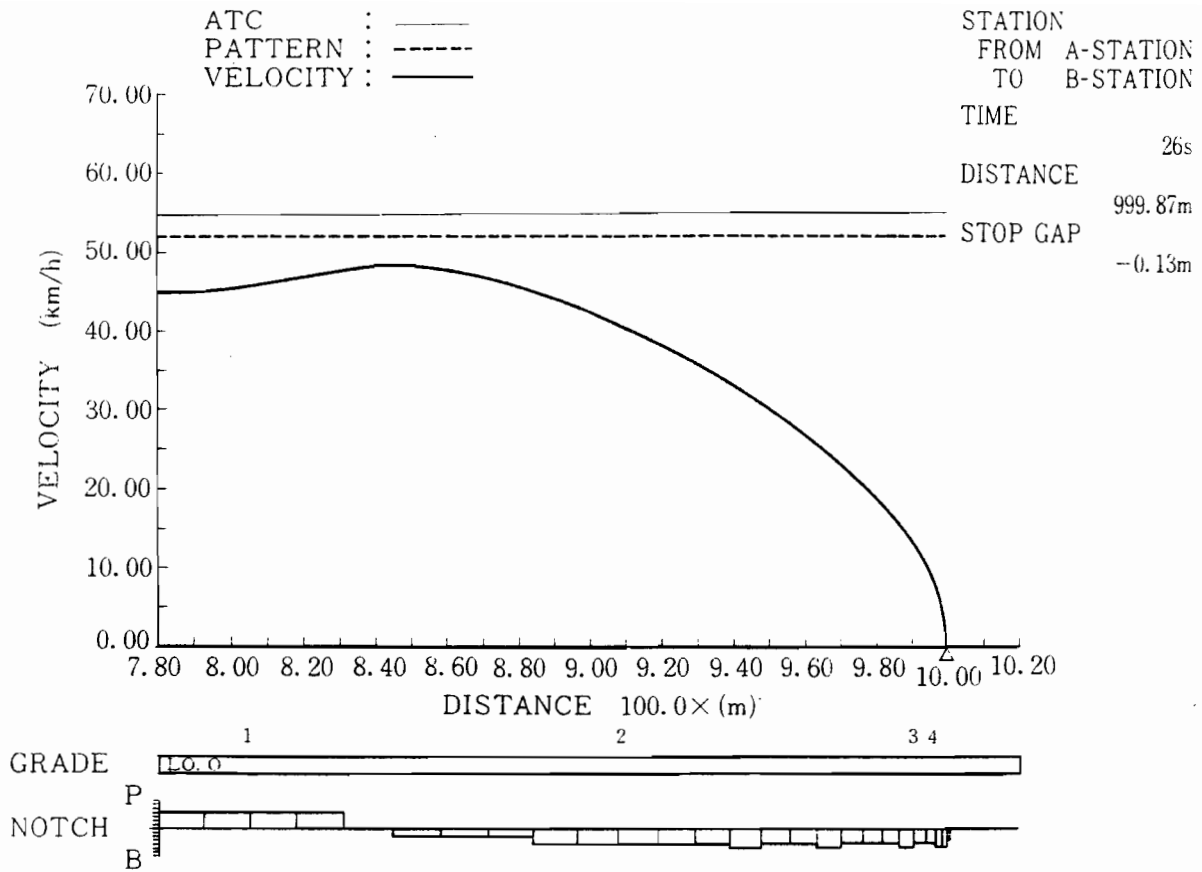


図 4. 9 F u z z y 制御による定位置停止制御結果

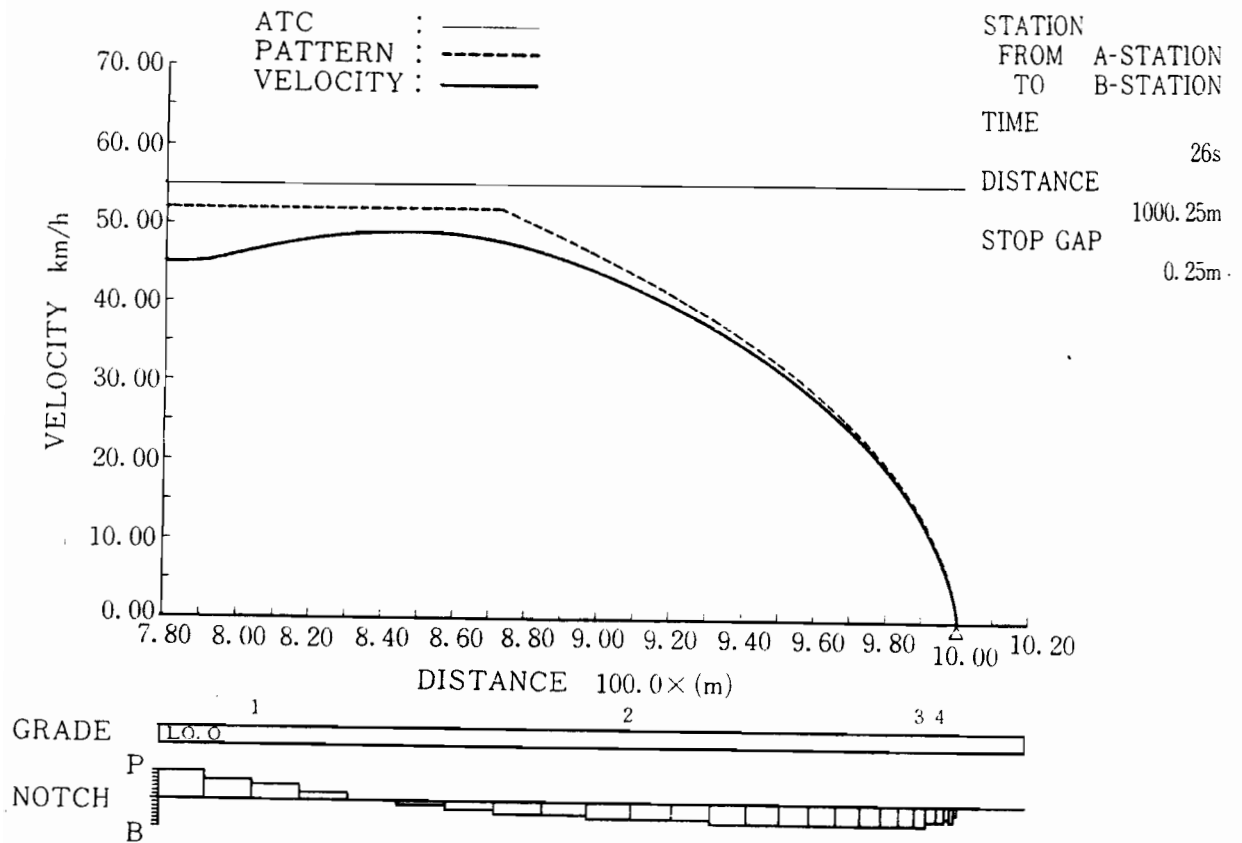


図 4. 10 P I D 制御による定位置停止制御結果

このように、提案した予見Fuzzy制御方式が従来より実用化されているPID制御方式と比較して、停止精度良く、ノッチ変化回数も少ない制御を行っているのは、以下の理由によるものと考えられる。PID制御では、一定減速度で変化する目標速度パターンに対し列車速度を追従させようとするが、制御対象のパラメータおよび外力の変動によって追従しきれず停止精度が悪くなり、しかも目標速度パターンに追従させるためブレーキ・ノッチを頻繁に変化する必要がある。これに対し提案方式では、評価指標である停止精度を直接予測しながら制御を行い、停止精度が±10cm以内だったらノッチを変化させずに乗り心地を良くするといった、制御対象の特徴を利用した制御を実現している。

また、PID制御は常に同じ目標速度パターンに追従させるため、外乱などがあっても画一的な止まり方、ができる点で提案方式より優れているが、この点は列車の運転にとって重要な評価指標ではない。

4.5 おわりに

本章では、第2章にて提案した、多次元にわたるあいまいな評価指標により経験的に行っている人間の制御をアルゴリズム化できる予見Fuzzy制御方式を、列車自動運転の中で最も複雑な制御を必要とする列車定位置停止の運転に適用し、運転士の経験則に基づき、(1)乗り心地、(2)停止精度、(3)走行時分、を評価しながら列車を所定の停止目標に停止させる制御則を作り、列車定位置停止制御を行った。

シミュレーションを行った結果、提案した予見Fuzzy制御方式により、熟練運転士の経験則をアルゴリズム化することができ、列車定位置停止制御のような、制御対象のパラメータおよび外乱が時間及び状態によって変動し、そのうえ多次元であいまいな人間の評価指標を満足する必要のある制御に対して、従来実用されているPID制御方式と比較して、制御指令(ノッチ)の変化回数を1/2、停止精度の標準偏差を1/3とした、乗り心地の良い、正確な定位置停止制御を、マイクロ・コンピュータで実現可能な単純なアルゴリズムで実現できることを明らかにした。

第 5 章

第5章 予見Fuzzy制御方式による 列車自動運転

5.1 はじめに

第2章にて、人間の断片的な経験則を、複数の目的に対応したFuzzy評価関数を用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、最良の評価を与える制御指令を決定する予見Fuzzy制御方式を提案し、第4章にて、列車を運転士に代わって駅の所定の目標停止位置に停止させる列車定位置停止制御へ適用、その有効性を示した。本章ではこの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全体へ適用した結果について述べる。

列車自動運転システムは国内外各地の地下鉄、モノレール、新交通システム、などで実用化されつつあるが、これらの実用システムのほとんどは、目標速度パターンを発生し、それに列車速度をPID制御を基本とした制御方式で追従させる方式である [井原、1979⁶⁾；宮本、1982⁴³⁾；北川ほか、1976¹¹⁾；下浦ほか、1981¹⁷⁾；藤倉ほか、1977³³⁾；Ferbeck、1983⁷⁹⁾]。

しかし、これらの制御方式による列車運転を熟練運転士による運転と比較してみた場合、平均的で正確な運転は可能であるが、目標速度へ正確に追従するために制御指令を頻繁に

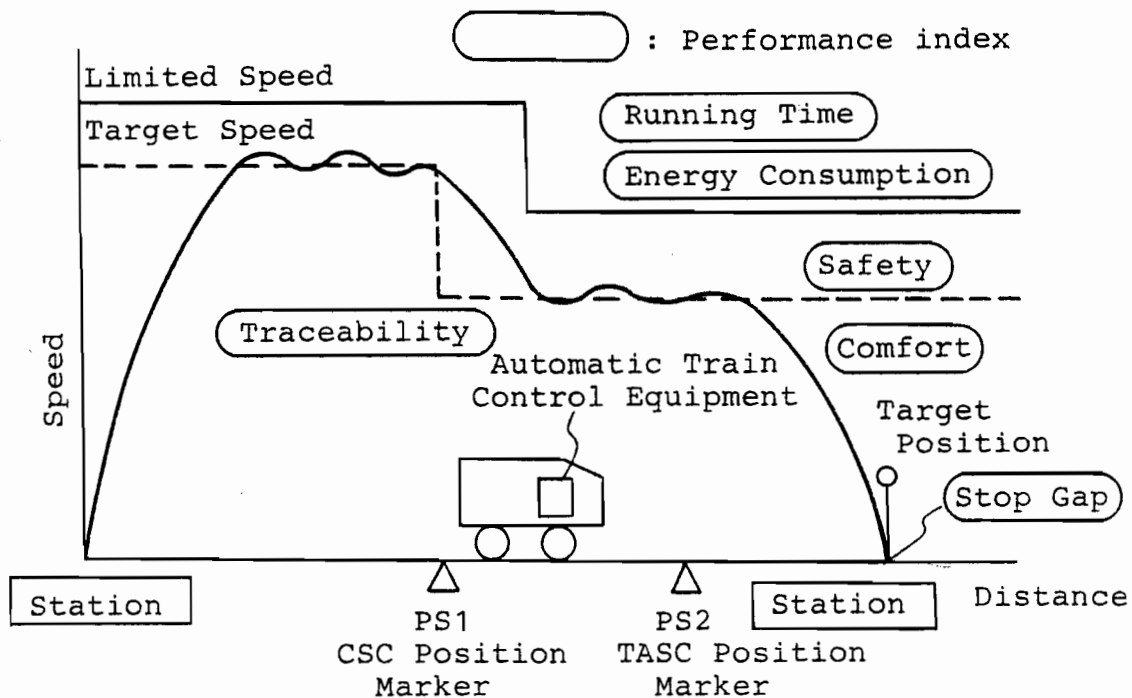


図5.1 列車自動運転システムの概要

変化させる必要があり、乗り心地、停止精度、あるいは消費電力量といったような人間が重要視する評価指標を十分に考慮した制御とはなっていないのが実情である。

本章では、まづ5.2節にて列車自動運転全体について述べ、5.3節にて運転士による列車運転全体についての経験則を考察する。次に5.4節にてこの経験則により開発した(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)消費電力量、(5)走行時間、(6)停止精度、を評価指標とする予見Fuzzy制御列車自動運転システムについて述べ、5.5節にてマイクロ・コンピュータによる実現の様子を示す。さらに5.6節にて、従来PID制御により実用化している方式と計算機シミュレーションにより比較・検討する。5.7節では提案方式により開発した列車自動運転システムの実際の車両を用いた実路線走行実験の結果について述べる。5.8節は本章のまとめである。

5.2 列車自動運転制御とモデリング

列車自動運転システム(A TO: Automatic Train Operation System、図5.1)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

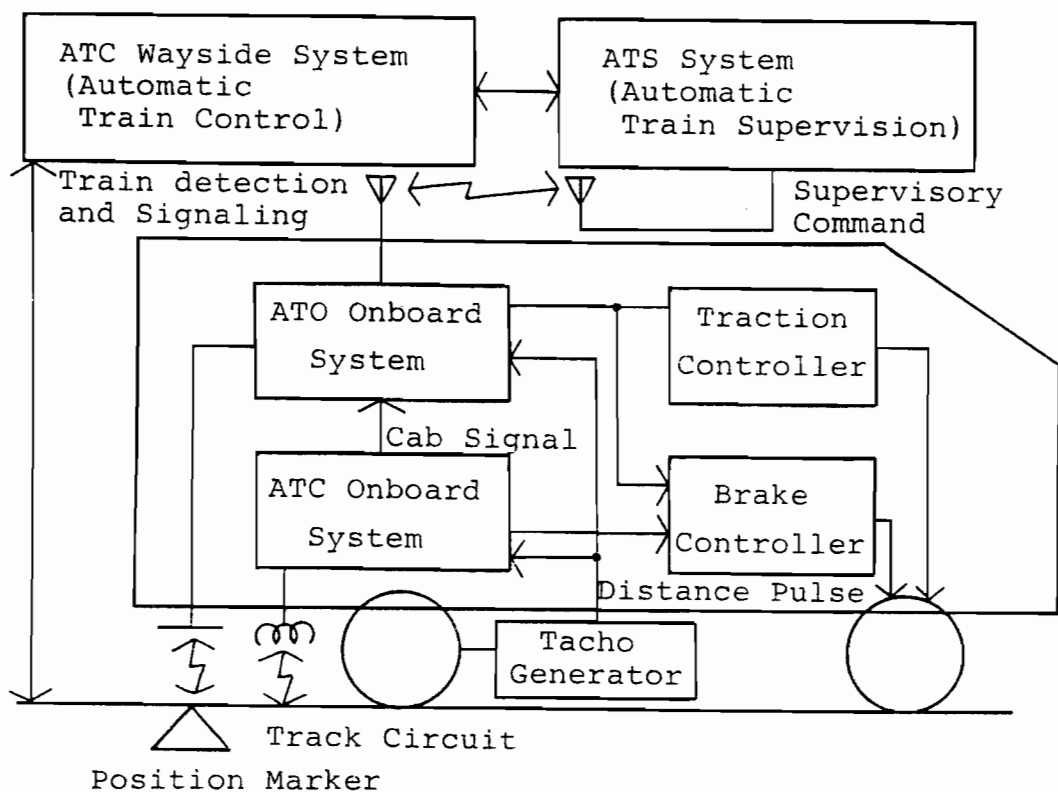


図5.2 列車自動運転装置の代表的構成

テムある。このシステムは、列車の最低限の安全を確保するA T C (Automatic Train 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5. 2に示す。A T O車上システムは、速度発電機による距離パルス、A T C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。[井原、1979; 宮本、1982]

本論文では、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。

5. 3 運転士による列車運転

本論文では、運転士の制御に関する知識を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P I D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[安信ほか、1977a~1980; 藤倉ほか、1977; 宮本ほか、1978; Miamoto, et. al., 1978]から、運転士の制御を考えてみる。この制御は、駅を出発してから制限速度を守りながら列車を走行させる駅間走行制御(C S C : Constant Speed Control)と、次駅の停止目標に列車を停止させる定位置停止制御(T A S C : Train Automatic Stop Control)、の2つに大別することができる。

5. 3. 1 駅間走行制御

運転士は出発指令を受けると直ちに最大ノッチで加速し、走行中は制限速度よりも少し低めに目標とする走行速度を設定し列車速度を調節する。もし走行中、前方に速度が制限されている区間があれば、その開始地点での目標とする走行速度を考える。また、与えられた次駅の到着予定時間よりも早く着きそうな時は、惰行運転による消費電力量の節約を考え制御を行う。

具体的には、時々刻々以下のことを評価しながら制御ノッチ(指令)の選択を行う。

(C-1) 安全性と乗り心地の確保のため; 制限速度をこえそうになった時は、現在ノッチと非常ブレーキの中間を出力し、制限速度をオーバーした時のA T Cシステムにより発生する非常ブレーキのショックを緩くする。

(C-2) 省エネルギー化を図るため; 惰行運転をしても走行時間を守れる地点を走

行している時、力行、ブレーキ・フッチ共出力しない。

- (C-3) 走行時間短縮のため； 制限速度よりはるかに低い速度の時、最大加速指令を出力する。
- (C-4) 乗り心地を良くするため； 現在のフッチのままで、目標とする速度を守れるとき、そのフッチを保持する。
- (C-5) 走行速度を守るため； 現在のフッチのままで、目標とする速度を守れそうもない時、±nフッチの中で正確に目標とする速度に列車速度を調節できるフッチを選択する。この時、乗り心地を確保するため前回のフッチ変化の大きさ、経過時間を考えフッチを変更する。

5.3.2 定位置停止制御

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、乗り心地と停止精度を評価して制御する。具体的には、時々刻々以下のことを評価しながら制御フッチ（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、そのフッチを確保する。
- (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フッチ以内で正確に止まれるフッチを選択する。

5.4 予見Fuzzy制御列車自動運転システム

5.4.1 評価指標のFuzzy集合

各評価指標の定義に先立ち、評価指標を定義するために必要となる記号を定義する。

t ：時間（sec）、 $x(t)$ ：列車位置（m）、 $v(t)$ ：列車速度（m/s）、

$N(t)$ ：制御フッチ（正の時力行、負の時ブレーキ）、 X_t ：停止目標位置（m）、

V_t ：制限速度信号より決まる目標速度（m/s）、 T_t ：駅間走行予定時間（sec）、

X_d ：制限速度低下地点（m）、 t_s ： X_d までの所要時間（sec）、

X_k :惰行制御終了地点 (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)、

R_t :余裕時間 t_z の許容範囲 (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 :選択対象の制御ノッチ、

C_b :ノッチ変化抑止時間 (sec)、

$V_p(N_p)$:制御ノッチ N_p を出力した場合の予測速度 (m/s)、

V_e :許容速度偏差 (m/s)、

$\alpha(N_p)$:制御ノッチ N_p を出力した場合の推定加速度 (m/s**2)、

$X_p(N_p)=-v(t)**2/(2.0*\alpha(N_p))+x(t)$:制御ノッチ N_p を出力した場合の予測停止位置(m)、

X_e :許容停止誤差 (m)。

つぎに、評価指標をメンバシップ関数を用いてFuzzy集合として定義する場合に便利であり、又マイクロ・コンピュータによるオンライン処理に適する直線傾斜と双曲線による基本関数、A、B、Cを定義する。Fuzzy集合のメンバシップ値は評価の満足度を表す。そこで、最大満足の1.0、半分の0.5、1/4の0.25のそれぞれを与える評価指標の値を用いてその形状を規定することにした。ここでAは、 $b > 0$ の時 a 以上で1.0、 $x = a - b$ で0.5、 $x = a - 3.0 \times b$ で0.25となり、 $b < 0$ の時 a 以上で1.0、 $x = a + b$ で0.5、 $x = a + 1.5 \times b$ で0.25、 $x < a + 2 \times b$ で0となる関数、Bは a 以下で1.0となるAと対称な関数、CはAとBを重ね凸形とした関数である。

$$\begin{array}{l}
 A(x,a,b) = \frac{b}{a+b-x} \quad : \quad x \leq a \\
 1.0 \quad : \quad a < x \\
 0.0 \quad : \quad x \leq a+2b \\
 1.0 + \frac{a-x}{2b} \quad : \quad a+2b < x \leq a \\
 1.0 \quad : \quad a < x
 \end{array}
 \left. \begin{array}{l} \\ \\ \\ \\ \end{array} \right\} \begin{array}{l} (b > 0) \\ \\ \\ (b < 0) \end{array}$$

$$B(x,a,b) = A(2a-x,a,x)$$

$$C(x,a_1,b_1,a_2,b_2) = \min(A(x,a_1,b_1), B(x,a_2,b_2))$$

(1) 安全性 (S) の評価指標の定義

安全性については、前方で現在の速度 $v(t)$ 以下に制限速度がなっている場合制限速度低下地点 X_d までの所要時間 $t_s(t_s=(X_d-x(t))/v(t))$ で危険性を評価する。

(a) 危険である (SD) : μ_{SD}

$$\mu_{SD}(t_s) = A(t_s, 0.0, -t_s)$$

(b) 安全である (SS) : μ_{SS}

$$\mu_{SS}(t_s) = B(t_s, -t_s, -t_s)$$

(2) 乗り心地 (C) の評価指標の定義

乗り心地については、前後方向の振動に関する基準は明確ではないが、上下方向の振動に対する基準²⁷⁾ [電気学会編、1960]、および乗車経験から、頻繁にノッチを変化させると、高振動数のショックを乗客に与えるため、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) : μ_{CG}

$$\mu_{CG}(t_c, N_c) = A(t_c, N_c, -N_c + C_b)$$

(b) 乗り心地が悪い (CB) : μ_{CB}

$$\mu_{CB}(t_c, N_c) = B(t_c, C_b, -N_c + C_b)$$

(3) 省エネルギー (E) の評価指標の定義

省エネルギーの評価については、駅間の特定の地点において、所定の地点 X_k まで惰行制御を行った場合の走行時分の増加を知識として持ち、これと出発時に与えられた駅間走行の余裕時間とを比較して、省エネ走行が可能な場合には、現在の列車位置 $x(t)$ から X_k までを省エネ走行区間として評価対象とする。なお、 E_x は省エネルギー評価指標の Fuzzy 集合を定義するのに用いる定数であり、 $X_k + E_x$ の地点で「省エネ走行ができる」との値が、0.5に低下しているとする。

(a) 省エネ走行ができる (ES) : μ_{ES}

$$\mu_{ES}(x(t)) = B(x(t), X_k, -E_x)$$

(b) 省エネ走行ができない (EN) : μ_{EN}

$$\mu_{EN}(x(t)) = A(x(t), X_k + E_x, -E_x)$$

(4) 走行速度 (T) の評価指標の定義 (図 5. 3)

走行速度については、予測速度 V_p が目標速度 V_t に対し許容速度誤差 V_e の範囲以内に入ることを「うまく走行する」と定義し、目標速度 V_t に一致することを「正確に走行する」と定義した。

(a) うまく走行する (TG) : μ_{TG}

$$\mu_{TG}(V_p(N)) = C(V_p(N), V_t(t) - V_e, V_e, V_t(t) + V_e, V_e)$$

(b) 正確に走行する (TA) : μ_{TA}

$$\mu_{TA}(V_p(N)) = C(V_p(N), V_t, V_e, V_t, V_e)$$

(c) 走行速度が低い (TL) : μ_{TL}

$$\mu_{TL}(V_p(N)) = B(V_p(N), V_t/2, V_t/4)$$

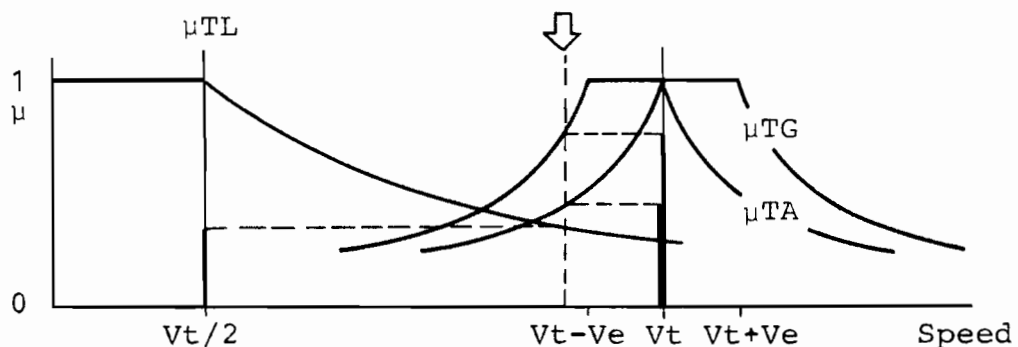


図 5. 3 追従性のメンバシップ関数

(5) 走行時間 (R) の評価指標の定義

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いる (RT) : μ_{RT}

$$\mu_{RT}(tz) = B(tz, 0.0, -Rt)$$

(b) 自由ゾーン内にいる (RF) : μ_{RF}

$$\mu_{RF}(tz) = A(tz, 2Rt, -Rt)$$

(6) 停止精度 (G) の評価指標の定義 (図 5. 4)

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 $X_p(N)$ で評価する。

(a) うまく停止する (GG) : μ_{GG}

$$\mu_{GG}(X_p(N)) = C(X_p(N), X_t - X_e, X_e, X_t + X_e, X_e)$$

(b) 正確に停止する (GA) : μ_{GA}

$$\mu_{GA}(X_p(N)) = C(X_p(N), X_t, X_e, X_t, X_t, X_e, X_t)$$

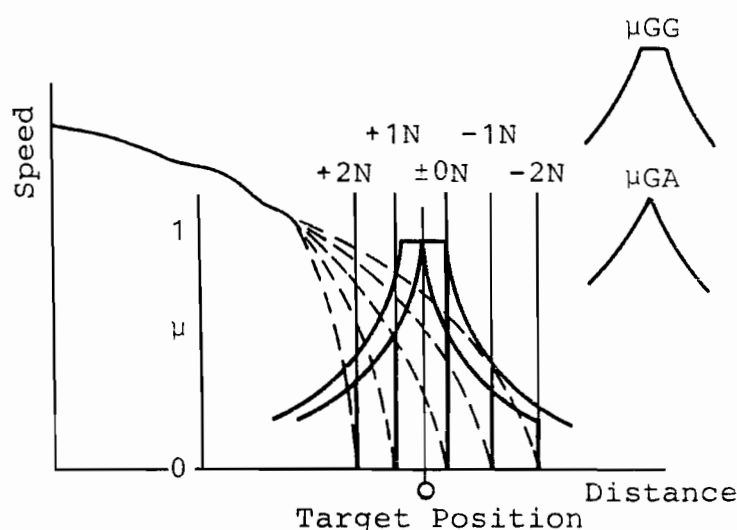


図 5. 4 停止精度のメンバシップ関数

5. 4. 2 Fuzzy 制御則の決定

5. 3 節で定性的に記述した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 は現在の制御ノッチの値に対する変化分を、PN は力行ノッチを、BN はブレーキ・ノッチを表す。また、非常ブレーキを Bmax、最大加速指令を P7 と記す。

5. 3 節の (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,
うまく停止できる → G is GG,

に対応しており、即ち、

(T-1) 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。5.3節(T-2), (T-3)の経験則からも同様にして、

(T-2.1) If(N is 0 → R is RF and C is CG) then N is 0.

(T-2.2) If(N is 1 → R is RT and C is CG) then N is 1.

(T-3) 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

(C-1) If(N is (N(t)+Bmax)/2 → S is SD) then N is (N(t)+Bmax)/2.

(C-2) If(N is 0 → S is SS and C is CG and E is ES) then N is 0.

(C-3) If(N is P7 → S is SS and C is CG and T is TL) then N is P7.

(C-4) If(DN is 0 → S is SS and T is TG) then DN is 0.

(C-5) If(DN is n → S is SS and C is CG and l is TA) then DN is n.

(n = ±1, ±2, ±3)

なる制御則が決定できる。

5.5 マイクロコンピュータによるATO制御装置の実現

駅間走行制御(CSC)、定位置停止制御(TASC)それぞれの制御則を、例えば100msec毎に評価することによって2つの制御による最適制御指令を独立に求めることができる。このCSC・TASC2つの制御指令の内減速側(力行ノッチの場合は小さい方、ブレーキ・ノッチの場合は大きい方)を選択し、駆動系・制動系への力行・ブレーキ指令として出力する。本方式をマイクロコンピュータにより実現した列車自動運転装置の処理フローを図5.5に示す。

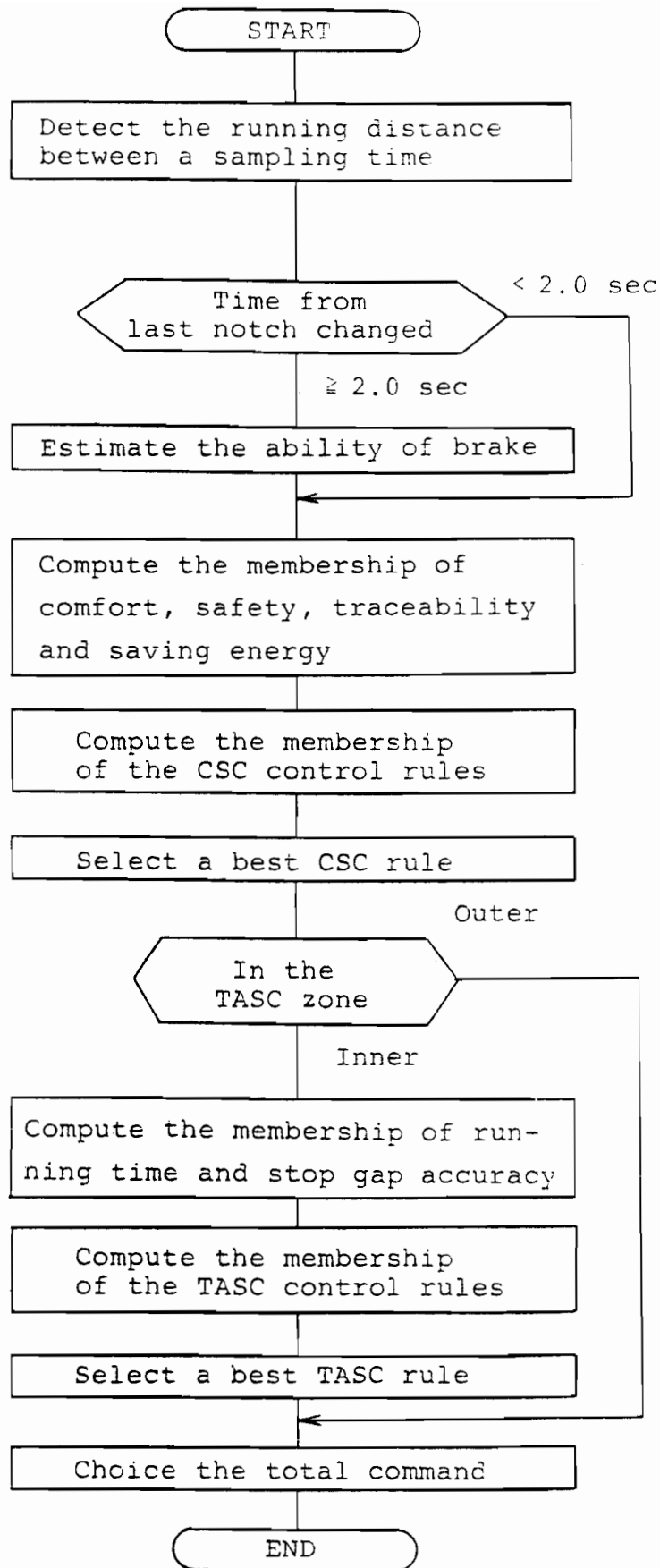


図5.5 Fuzzy制御列車自動運転アルゴリズムの処理フロー

5.6 シミュレーションによる比較・検討

開発した予見Fuzzy制御列車自動運転プログラムを、現在PID制御により実用化している列車自動運転装置に組み込み、予見Fuzzy制御、PID制御、2つの方式の性能を比較した。この比較は、両方の列車自動運転装置に実際の運転に即した条件を与えることによりシミュレーションにより実施した。(図5.6、表5.1)なお、列車定位置停止制御単独ではブレーキ性能、勾配条件が大きく変動した場合でも、停止誤差の標準偏差を1/3、ノッチ変化回数を1/2とした正確で乗り心地良い制御が実現できることを第4章にて示した。

表5.1 シミュレーション条件

列車長	:	83.5 m
列車総重量	:	129.0 ton
走行抵抗	:	$1.97+0.016*v+0.00084*v**2$ Kg/ton
力行ノッチ段数	:	7 段
最大力行加速度	:	3.3 Km/h*s
ブレーキ・ノッチ段数	:	9 段
最大ブレーキ減速度Bmax:	:	5.14 Km/h*s
ブレーキ系むだ時間	:	0.2 sec
ブレーキ系時定数	:	0.6 sec

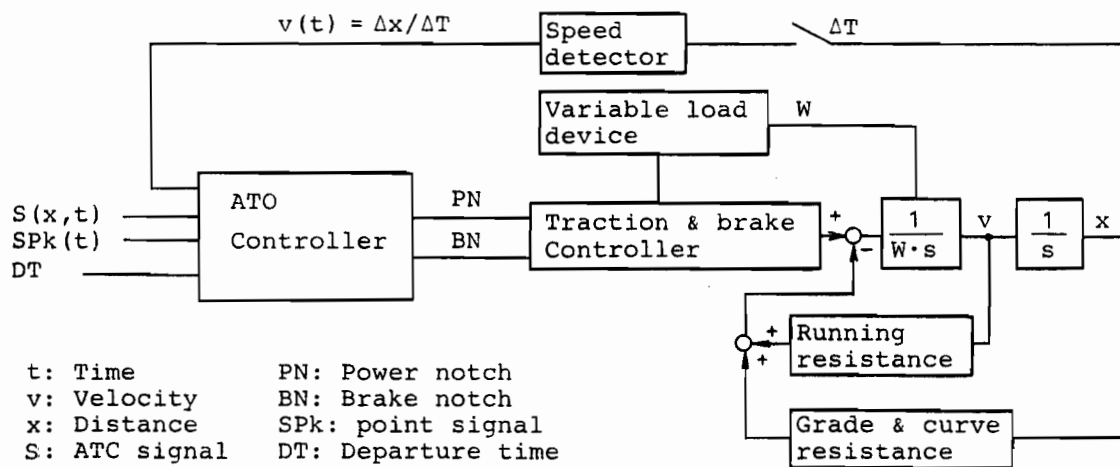


図5.6 列車自動運転システムのブロック線図

5.6.1 シミュレーション条件と結果

列車自動運転において、制御性能を定量的に評価する重要な指標となるのが消費電力量と駅間走行時間である。ここでは、全体的に+10%、0%（平坦）、-10%の勾配（10%は1000mで10m上昇）をもつ1000mの駅間を想定し走行時間を80sec、85sec、90sec、95sec、100secと指定した場合の消費電力量（力行時の積算値）を図5.7に、平坦（0%）で85secを指定した場合の結果を図5.8に示す。また、列車自動運転では、列車の走行に伴う勾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り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）も重要なファクターとなる。ここでは、PID制御、予見Fuzzy制御それぞれに対して、駅の手前60mの地点からそれまで平坦であった勾配を-20%の急な下り勾配に変化させてシミュレーションを行った結果を示す。（図5.9）

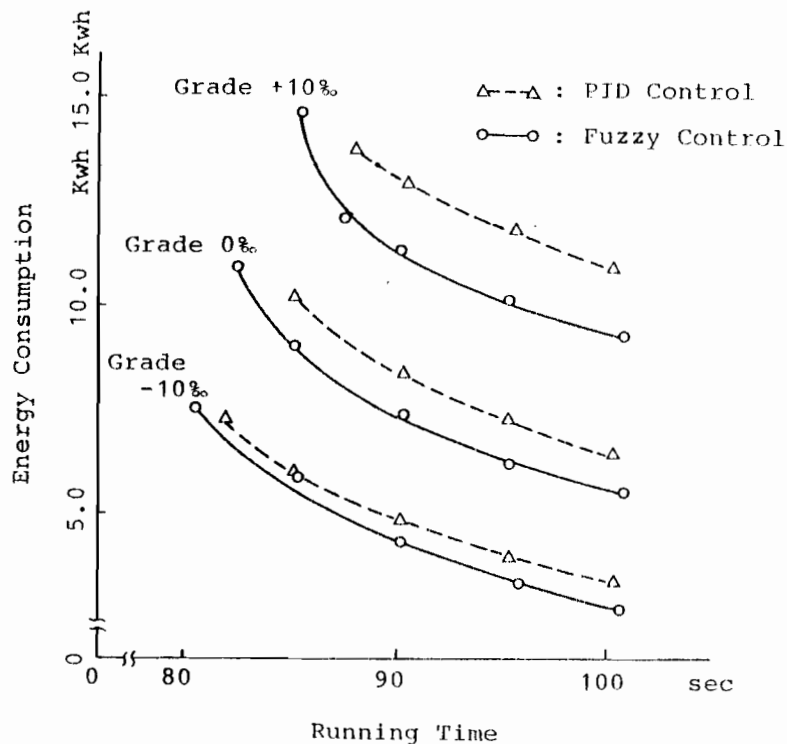
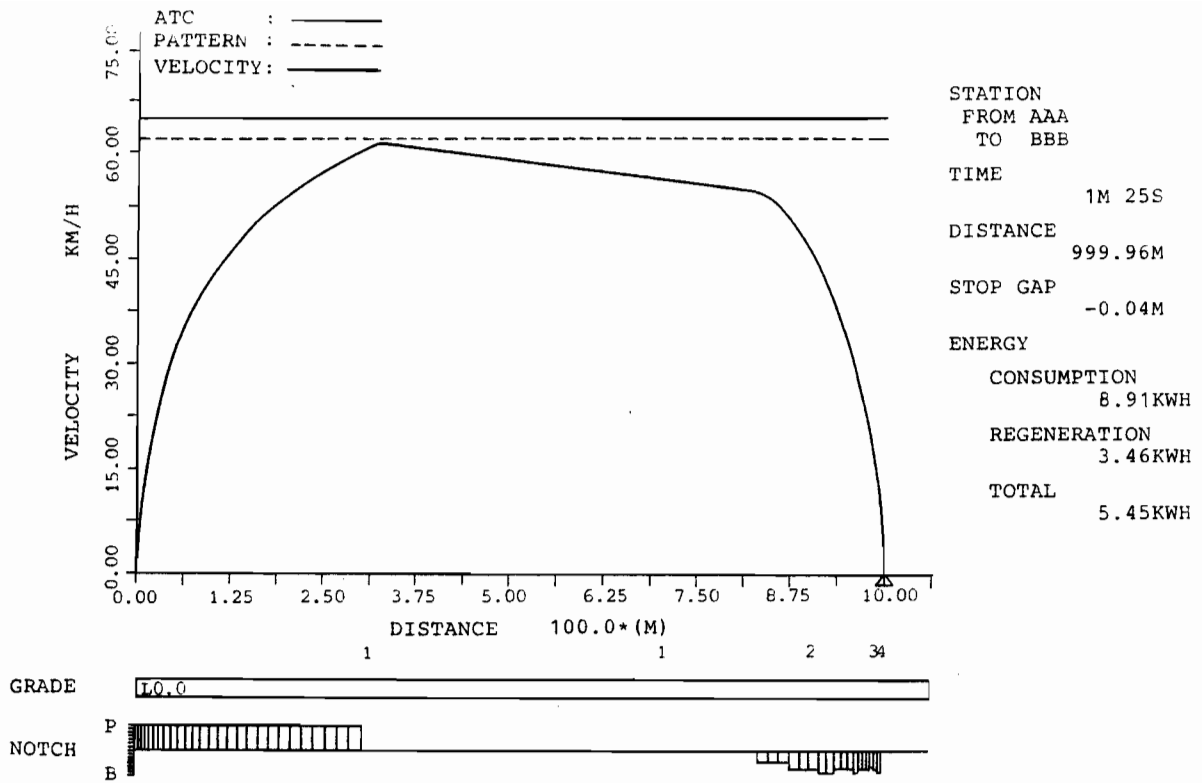
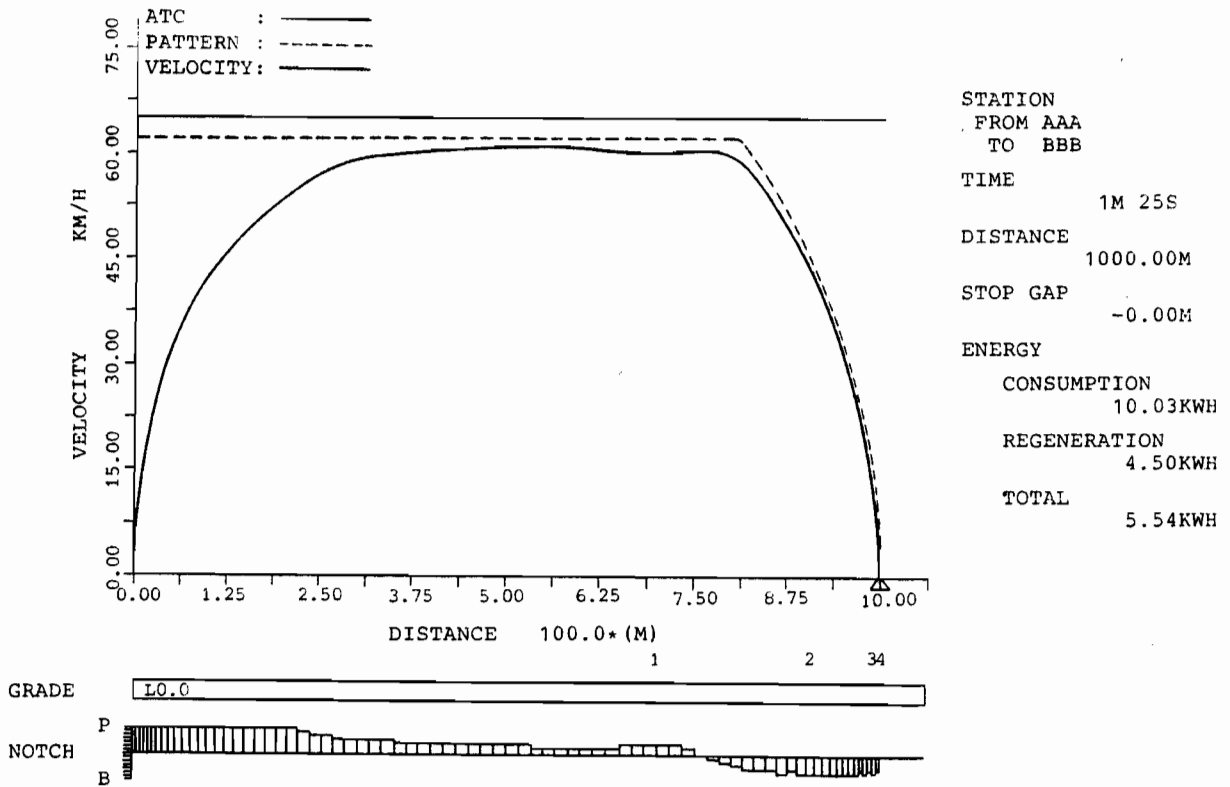


図5.7 消費電力量に関するシミュレーション結果のまとめ

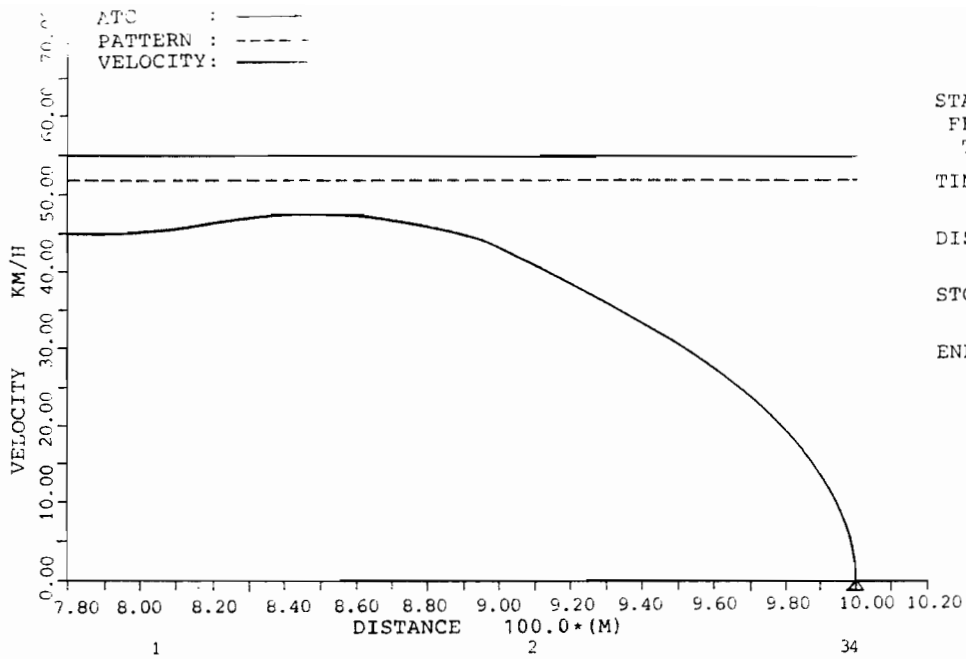


(a) Fuzzy制御列車自動運転による結果



(b) PID制御列車自動運転による結果

図5.8 シミュレーションによる走行曲線の比較(勾配:0%、走行時間:85秒)



STATION
FROM A-STATION
TO B-STATION

TIME 26 sec

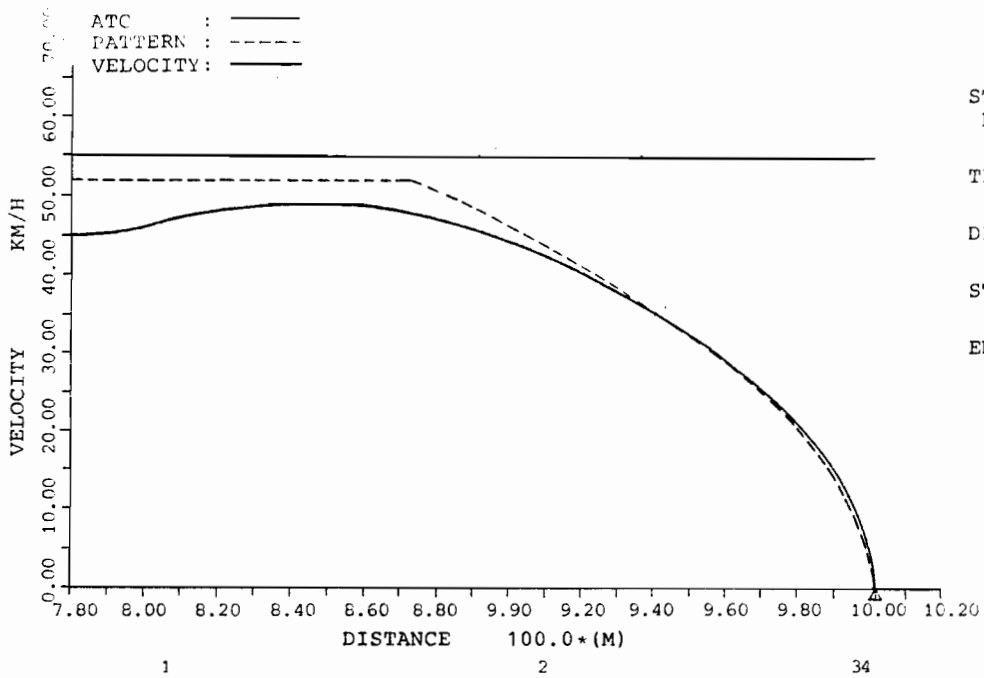
DISTANCE 1000.07M

STOP GAP 0.07M

ENERGY
CONSUMPTION 0.65KWH
REGENERATION 0.00KWH
TOTAL 0.65KWH



(a) Fuzzy制御列車自動運転による結果



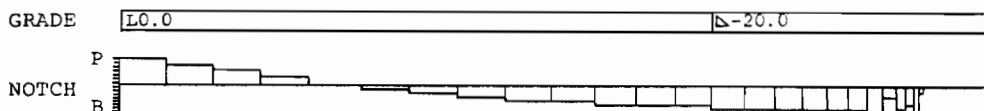
STATION
FROM A-STATION
TO B-STATION

TIME 27 sec

DISTANCE 1001.33M

STOP GAP 1.33M

ENERGY
CONSUMPTION 0.91KWH
REGENERATION 0.00KWH
TOTAL 0.91KWH



(b) PID制御列車自動運転による結果

図 5. 9 シミュレーションによるロバスト性の比較

(停止目標の手前60mにて勾配が平取から-20%に変化)

5.6.2 シミュレーション結果の検討

図5.7より、Fuzzy制御による列車自動運転装置は、PID制御により従来実用化している装置と比較して、(1)同じ消費電力量であればより少ない走行時間で、(2)同じ走行時間であればより少ない消費電力量で、走行可能(例えば、図5.8より、0%、85secの場合には、Fuzzy制御8.91Kwhに対し、PID制御10.03Kwh)である。その割合は、下り勾配(-10%)では少なく、上り勾配(+10%)となるほど大きくなっており、平均して10%を超える省エネルギーの効果があることが分かる。なお、図5.8において力行時の電力量からブレーキ(回生)時の理想的な回生電力量を引いたトータル電力量では、約2%の省エネとなるが、実際の車両においては、ブレーキ抵抗の挿入や空気ブレーキとの併用による熱的損失や、周囲の列車の状況により、回生できる電力量は限られており、ここでは確実に省エネ効果が期待できる力行時の消費電力量について比較した。

この結果で、下り勾配で消費電力量にそれほど差がないのは、下り勾配による加速力と走行抵抗による減速力がほぼ均衡しPID制御でもエネルギー的に良好な制御が行なわれておりFuzzy制御による省エネルギー運転の効果が少なくなっているためと考える。

また、図5.9のロバスト性の比較では、従来のPID制御による一定減速度で変化する目標速度パターン追従方式では、停止間際に列車の走行に伴い目標速度が急激に変化する上に、外乱として与えた-20%の下り勾配による加速力が加わり、1.33mの停止誤差を生じ、しかも停止間際のブレーキ・ノッチ指令の変動も大きい。これに対して、予見Fuzzy制御による方式では、ブレーキ・ノッチ指令の変化と最終的な停止精度を評価しながら制御を行なうと共に、ノッチ変化が安定している場合には、ブレーキ力を推定するという人間の制御を模擬しており、ここで与えたような環境の急変に対してもうまく対応した制御が可能となっている。

5.7 実路線走行実験

以上述べた予見Fuzzy制御による列車自動運転システム(Fuzzy-ATO)を、8ビットのマイクロ・コンピュータ(HD6800)へのリアル・タイム制御プログラム化し、実際の車両の運転を行った。本実験は、まづ昭和58年7月北海道のP市にて、既にPID制御方式により実用化(営業運転を実施)されていた列車自動運転システムを、プログラム交換によりFuzzy-ATOに交換し、基本性能を確認した。次に、昭和62年7月より開業しFuzzy-ATOによる営業運転を予定している東北地方のD市地下鉄システムにおける試運転の状況について述べる。

5.7.1 P市地下鉄システムでの実験評価

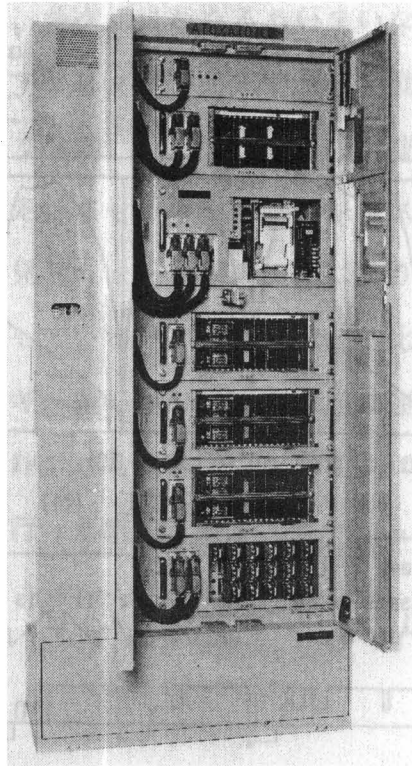
昭和58年7月に実施したP市地下鉄システムのFuzzy-ATO実路線走行実験では、図5.10(a)に示す列車自動運転装置により実験を行った。この路線での走行シミュレーション結果の一例を図5.11に示す。これらの結果は、熟練者運転士による運転曲線とほぼ一致している。実際の走行実験の結果の一例を図5.12に示すが、実際の列車の運転においても、シミュレーションによる事前評価と同様に、ノッチ変化の少ない手動運転に近い運転を行えることを確認した。

また本実験では、営業運転中の路線を用いて実験を行ったため、実験用に特別に信号等を追加するような事ができず、往復32駅間の中13駅間でしか消費電力量と走行時間の検討が行えなかったが、1駅間平均4.1秒又は約13.8%の消費電力量の節約が可能であるとの結果を得³⁶⁾[藤原ほか、1983]、図5.7に示したシミュレーションによる事前評価の正当性を確認した。

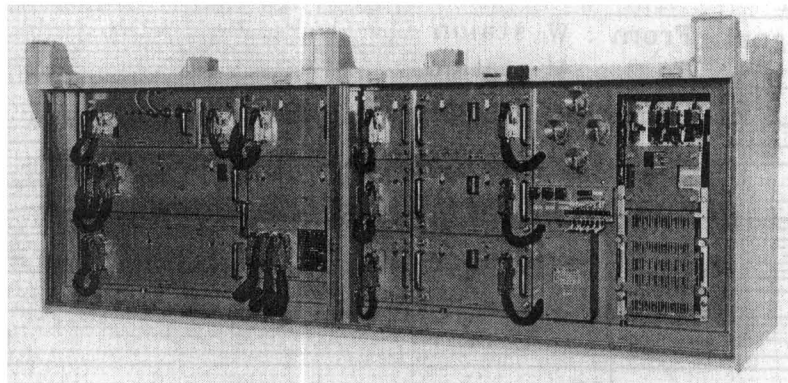
5.7.2 D市地下鉄システムでの試運転

P市地下鉄システムにおけるFuzzy-ATO装置の実用性の確認を受け、CPUは同じ8ビット・マイコン(HD6800)であるが、メモリ容量等の増強を行い、図5.10(b)に示すFuzzy-ATO装置を(株)日立製作所水戸工場にて開発し、D市地下鉄システム用自動運転システムとして納入した。

昭和61年7月の段階では、北部3駅間のみ線路が完成し、車両及び路線の機能確認や習熟運転を行っている段階であるが、P市地下鉄システムでの実験と同様に、乗り心地良く、熟練者並みの安定した自動運転を実現している。



(a) P市地下鉄システムへの搭載装置



(b) D市地下鉄システムへの搭載装置

図5.10 Fuzzy列車自動運転装置

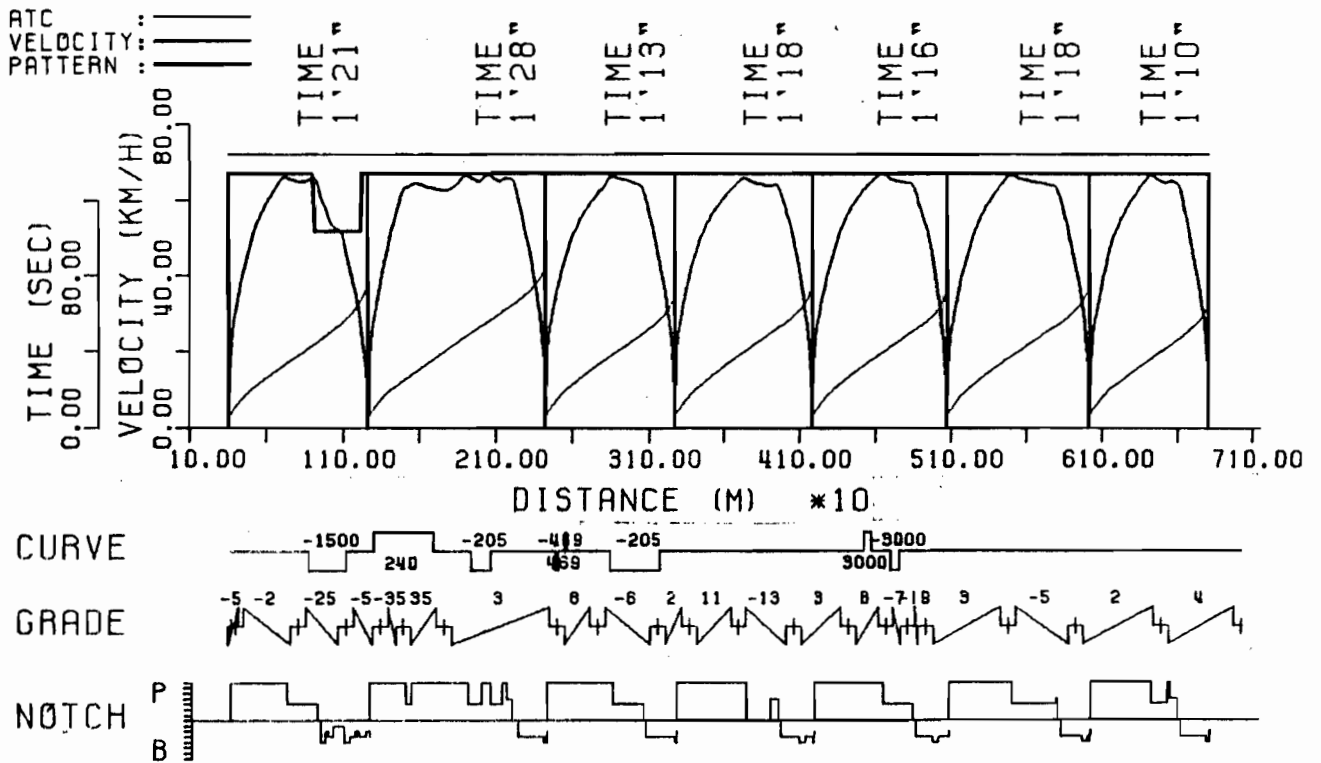


図5. 11 P市地下鉄システムの実路線走行シミュレーション結果

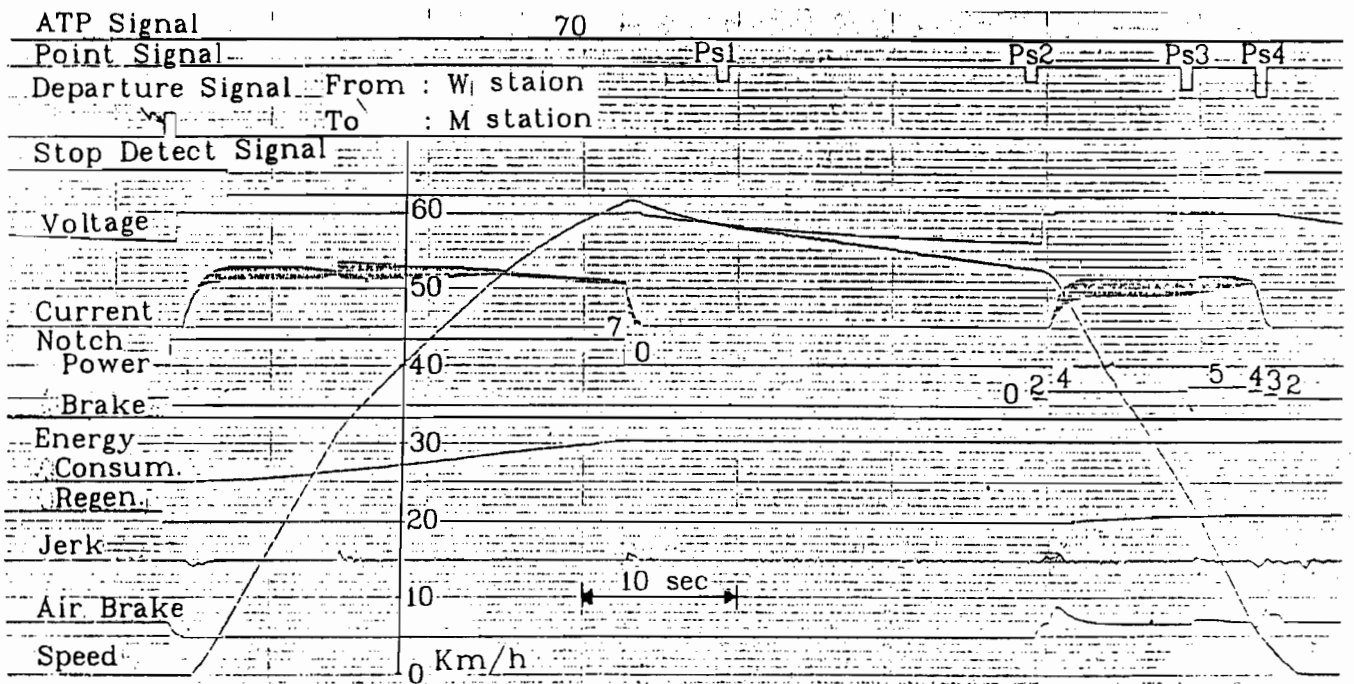


図5. 12 P市地下鉄システムの実列車走行試験結果の一例

5. 8 おわりに

本章では第2章にて提案した、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制御方式を列車自動運転に適用し、運転士の経験則に基づき、(1)安全性、(2)乗り心地、(3)追従性、(4)消費電力量、(5)走行時間、(6)停止精度、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、正確で乗り心地良く、環境の変動に強い上に、従来実用化しているPID制御方式と比較して、力行時の消費電力量を10%以上節約した省エネルギー運転が可能な列車自動運転が実現でき、熟練運転士と同等の制御が行えることが分った。さらに本方式をマイクロ・コンピュータに組み込み、実際の車両を用いて走行実験を行った結果、シミュレーションと同様の良好な結果が得られることを確認した。

第 6 章

第6章 Fuzzy制御のコンテナ・クレーン自動運転への応用

6.1 はじめに

第2章にて提案した人間の制御（運転）に関する知的活動の一つである対象システム本来の制御目的を評価し運用者にとって望ましい状態となるような制御指令を決定する予見Fuzzy制御方式については、第4章～第5章にて述べた列車自動運転への適用を通して、その有効性を確認した。本章では、第3章にて提案した「推定」、「判断」、「実行」の3段階に階層化した人間の制御戦略に基づくFuzzy制御方式を、コンテナ・クレーンの自動運転への応用を検討する。

本論文では、まづ6.2節にて対象としたコンテナ・クレーン運転システムを概観しそのモデル化を行う。次に6.3節で実際のコンテナ・クレーン運転の調査に基づきオペレータの運転経験則を整理し、6.4節にて前節にて得た経験則を予見Fuzzy制御方式によりコンテナ・クレーン自動運転システムへ組み込む。6.5節では計算機シミュレーションにて提案方式を従来方式と比較する。6.6節は、本章のまとめである。

6.2 コンテナ・クレーンの運転とモデル化

6.2.1 コンテナ・クレーン運転システムの概要

コンテナ・クレーンの運転は現在でも熟練者に頼っているが、その制御系は（1）トロリの横行速度操作系（トロリ系）、（2）コンテナの巻き上げ速度操作系（ロープ系）、の2つに別けられる。オペレータは、コンテナの位置、振れなどをみながら、トロリ系及びロープ系の目標速度指令とブレーキ指令を操作する。このトロリ系及びロープ系の駆動制御はACR(Automatic Current Regulator:電機子電流によるトルク制御)系を内部に持つAVR(Automatic Voltage Regulator:速度制御)系によって、トロリ速度及びロープ巻き上げ速度をフィードバックし、直流モータを制御する方式が一般的である。

このコンテナクレーン運転を自動化の観点からその制御目的を考えてみると、トロリ系とロープ系の二つを操作し、（1）コンテナが他の構造物に触れることなく安全に、（2）最短時間でトロリを目標地点へ移動させ、（3）目標地点で停止精度よく、コンテナの振れを止め、さらに、（4）トロリ上に乗務する運転手の乗り心地、も重要な評価指標となる。

(図6.1)

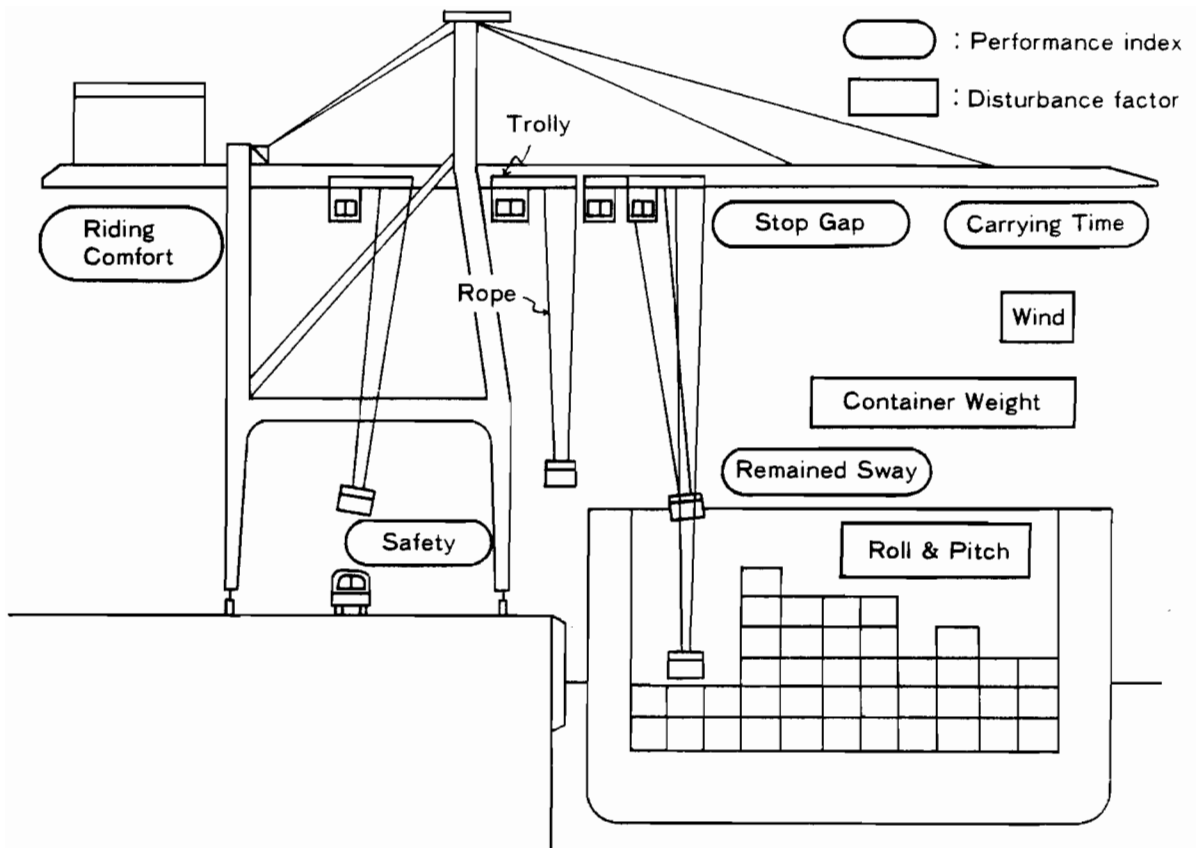


図6.1 コンテナ・クレーン運輸システム

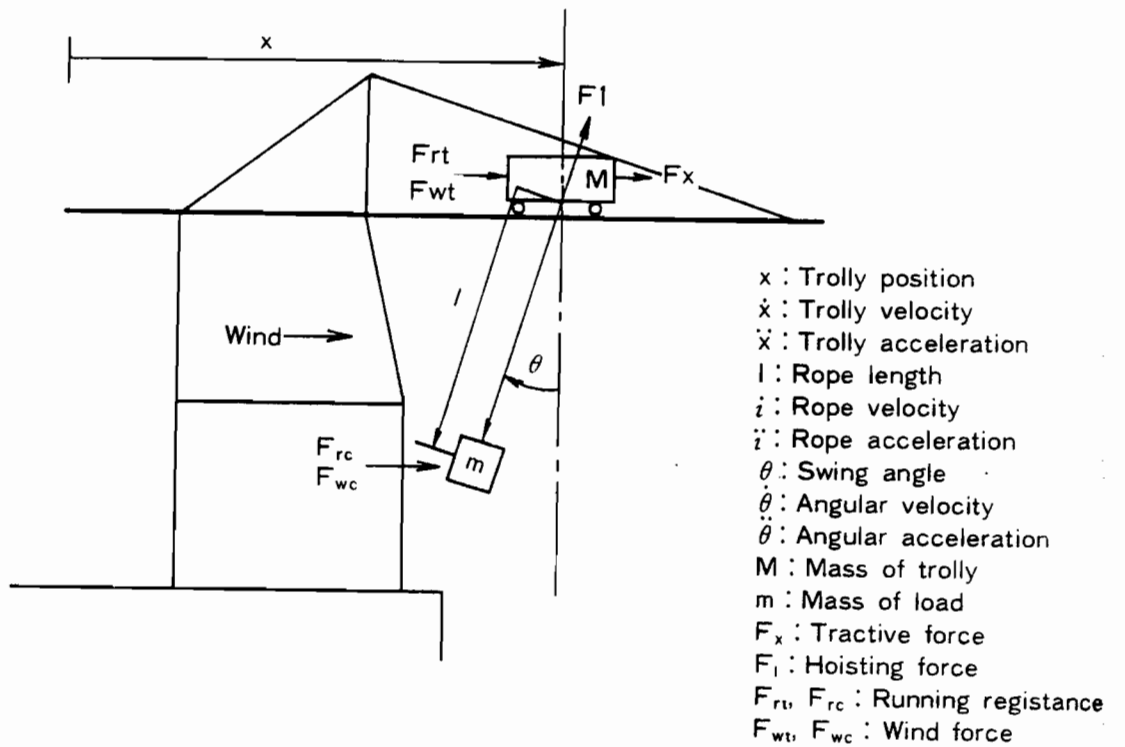


図6.2 クレーンシステム・モデル

6. 2. 2 クレーンのダイナミクス・モデル

図6. 1に示すコンテナ・クレーンのダイナミクスを図6. 2に示すモデルで考える。ここで、このクレーンのモデルに基づき運動エネルギー関数T、損失エネルギー関数F、位置エネルギー関数U、を求めると、

$$T = \frac{1}{2} M \dot{x}^2 + \frac{1}{2} m \left[\left\{ \frac{d}{dt} (x - l \sin \theta) \right\}^2 + \left\{ \frac{d}{dt} (l \cos \theta) \right\}^2 \right]$$

$$= \frac{1}{2} (m + M) \dot{x}^2 + \frac{1}{2} m \dot{\theta}^2 - m l \dot{x} \dot{\theta} \cos \theta + \frac{1}{2} m \dot{l}^2 - m x \dot{l} \sin \theta \quad (6.1)$$

$$F = \frac{1}{2} F_r t \dot{x}^2 + \frac{1}{2} F_r c (\dot{x} - l \dot{\theta})^2 \quad (6.2)$$

$$U = -m g l \cos \theta \quad (6.3)$$

となる。

ここで、一般化座標 $q = (x, l, \theta)'$ (' : 転置) としてラグランジュの運動方程式

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\delta T}{\delta \dot{q}_k} \right) - \frac{\delta T}{\delta q_k} + \frac{\delta F}{\delta \dot{q}_k} + \frac{\delta U}{\delta q_k} = Q_k \quad (k=1, 2, 3) \quad (6.4)$$

$$Q = (F_x + F_w t, F_l, -F_w c \cdot l) \quad (6.5)$$

より

$$\ddot{x} = \frac{F_l}{M} \sin \theta + \frac{F_x + F_w t - F_r t \dot{x} - F_r c (\dot{x} - l \dot{\theta})}{M} + \frac{F_r c (\dot{x} - l \dot{\theta}) - F_w c}{M} \cos \theta \quad (6.6)$$

$$\ddot{l} = \ddot{x} \sin \theta + l \ddot{\theta} + g \cos \theta + \frac{F_l}{m} \quad (6.7)$$

$$l \ddot{\theta} = \ddot{x} \cos \theta - 2 \dot{l} \dot{\theta} - g \sin \theta + \frac{F_r c + F_w c}{m} \quad (6.8)$$

を得る。また、 $\theta \doteq 0$ とし $\sin \theta = \theta$, $\sin 2\theta = 2\theta$, $\cos \theta = 1$ とすると式(6.6)(6.7)(6.8)

は、

$$\ddot{x} = \frac{Fl}{M} \theta + \frac{F_x + F_{wt} - F_{rt} \dot{x} - F_{wc}}{M} \quad (6.9)$$

$$\ddot{l} = \ddot{x} \theta + l \cdot \dot{\theta}^2 + g + \frac{Fl}{m} \quad (6.10)$$

$$\ddot{\theta} = \frac{1}{l} \ddot{x} - \frac{2}{l} \dot{l} \dot{\theta} - \frac{g}{l} \theta + \frac{F_{rc}(\dot{x} - l \dot{\theta}) - F_{wc}}{m \cdot l} \quad (6.11)$$

となる。以上のコンテナ・クレーンのダイナミクス・モデルを基本とし制御方式の検討を行なう。

6.3 オペレータの運転経験則

Fuzzy制御をコンテナ・クレーンの制御に適用するに当たり、実際のコンテナ・ヤードにおけるオペレータの操作の見学及び話を聞くことによりコンテナ・クレーン運転の実際を調査し、その運転方法を以下のようにまとめた。

6.3.1 対象クレーン特性の習熟

熟練オペレータでも、運転席に座った直後からうまい運転ができるわけではない。最初は各操作レバーを動かしてみるにより、そのクレーンの巻き上げ・横行モータの特性とロープ系の振れ特性を習熟し、徐々に高速運転を行っていく。

6.3.2 運搬方式及び経路の設定

オペレータは、現在位置から目標位置まで荷を運搬するに先立ち、途中にある船体や積載コンテナの状況を見て、荷がクリアすべき障害物の高さとその区間（危険地域）を知る。また、運搬距離と運搬物から最大横行速度などの運搬方式を決定する。

6.3.3 トロリ系の操作

トロリ系に関しては、その操作手順を大きく、始動、加速制御、定速走行、減速制御、

停止、停止位置補正制御、荷下ろし、の7つの領域に分け、初期振れ、風などの外乱や、独立に操作されているロープ長によって、ダイナミックに変化する領域の切り替えのタイミングを以下のように判断し運転を行う。

(T1) 始動領域では、現在の状態で加速制御を開始した時、残留振れ少なく、早く、安全に最大横行速度まで加速できるならば、加速制御を開始する。

(T2) 加速制御が終了し横行速度に達すれば、定速走行に移行する。

(T3) 定速走行領域では、現在のトロリ速度、ロープ長で減速制御をした時、残留振れ少なく、早く、安全に停止目標以降に停止できるならば、減速制御に移行する。

(T4) 減速制御が終了し横行速度が0に達すれば、停止領域に移行する。

(T5) 停止領域に入り暫くして、トロリがほぼ停止した時に、停止精度が悪ければ停止位置補正制御を開始する。

(T6) 停止領域に入り暫くして、トロリがほぼ停止した時に、停止精度がよければ横行を終了し荷下ろし領域に移行する。

さらに、運転の途中にトロリが予想外の動きをした場合には、運搬を中止しトロリを停止させる。

また、上記判断により決めた各領域では、以下のようにトロリの制御を実行する。

(C1) 始動領域では、目標速度を0とする。

(C2) 加速制御領域では、この領域に移行時に決めた加速方法を実行する。

(C3) 定速走行領域では、定速走行目標速度を指令する。

(C4) 減速制御領域では、この領域に移行時に決めた減速方法を実行する。

(C5) 停止領域では、目標速度を0とする。

(C6) 停止位置補正制御領域では、トロリを低速で目標位置の方向へ動かす。

(C7) 荷下ろし領域では、目標速度を0とする。

6.3.4 ロープ系の操作

ロープ系に関しては、コンテナの位置によって、その上げ下げを指令する。

(R1) 危険地域より前では、障害物を安全に越えられる高さ为目标として巻き上げる。

(R2) コンテナが危険地域にある時、この障害物を安全に越えられる高さを維持できるように、ロープ目標速度を操作する。

(R3) 危険地域より後では、目標高さ又は、現在位置と目標位置の間の障害物の高さの

高い方を目標として巻き下げる。

(R4) コンテナが目標位置上ではほぼ静止している時、目標高さへ巻き下げる。

6.4 予見Fuzzy制御コンテナ・クレーン自動運転システム

6.4.1 制御構造の検討

6.3節にて述べたオペレータの運転で、人間はトロリの位置を見ながらトロリの目標速度を加減し、振れ止め加速・減速を行っている。熟練者は、目標速度指令の微妙な加減で、モータの出力トルクを調整していると思われるが、フィードバック制御系では、それを模倣するのは不可能である。そこで、コントローラからモータの出力トルクを指定できるようにし、等価的にそれを模倣することとした。また振れ角については、ロープ系により荷を運搬するコンテナ・クレーンでは0.003rad(30mに対し、9cmの振れ)程度の振れ角をロープ系から測定することは困難である。しかし、振れ角零はロープ系にとっては大域漸近安定な点である。そこで、振れ角の制御自体はトロリ・ロープ系の自然な減衰に任せ、コントローラでは振れ角を大体零にもっていき制御を行い、実用的な自動運転を目指すこととした。

6.4.2 クレーン特性のモデル化

予見Fuzzy制御方式では熟練者の経験に基づく対象システムの特性把握を、部分モデルとして組み込み、制御結果の予見、予測、制御指令の決定に用いる。

(1) 固有周期のモデル化

ロープ長を一定($\dot{l}=0$)とし、トロリ系を固定($x=0$)した場合の固有周期 T_p は、式(6.11)より、

$$T_p = 2\pi \sqrt{l/g} \quad (6.12)$$

となる。また、同様に、ロープ長を一定($\dot{l}=0$)とし、トロリ系の加速力(F_x)を一定とした場合の加速周期 T_a は、式(6.9)～式(6.11)より、

$$T_a = T_p \cdot \sqrt{M/(M+m)} \quad (6.13)$$

として求めることができ、減速周期 T_d も同様である。

(2) 横行・巻き上げモータのモデル化

ロープ系の巻き上げ下げ及びトロリ系横行の速度は、AVR系、ACR系によるモータ制御ループによって、0.1秒程度の時定数でサーボ制御が行われる。従って、自動運転装

置側からは、目標速度VT及び加速トルクFTを出力すれば、ほぼその通りに動作するものとしてモデル化できる。

6.4.3 評価指標のFuzzy集合

経験則をFuzzy制御則化するためには、経験則の中に含まれる言葉の意味を定量化する必要がある。そこで、(1)安全性、(2)停止精度、(3)残留振れ、(4)運搬時間、の各評価指標について、経験則の中にある言葉をFuzzy集合化する。各Fuzzy集合の定義に先立ち、必要となる定数及び関数を定義する。

- x : トロリ位置(m), vt= \dot{x} : トロリ速度(m/s),
- HT: トロリの高さ(m), HS: 高度差の安全基準値(m),
- HK: 危険地域の障害物高さ(m), XS: 危険地域前後の安全基準値(m),
- Ls=HT-Hk-Hs: 運搬経路内の総ての障害物を安全にクリアできるロープ長(m),
- X1: 運搬経路内の危険地域の開始地点(m),
- X2: 運搬経路内の危険地域の終了地点(m),
- Xz: 距離の基準値(m), Vz: 速度の基準値(m/s)。

つぎに、評価指標をメンバシップ関数を用いてFuzzy集合として定義する場合に便利であり、又マイクロ・コンピュータによるオンライン処理に適する直線傾斜と双曲線による基本関数、A、B、Cを定義する。

$$\begin{aligned}
 A(x, a, b) &= b/(a+b-x) && : x \leq a && (b > 0) \\
 &1.0 && : a < x \\
 &0.0 && : x \leq a+2b && (b < 0) \\
 &1.0+(a-x)/2b && : a+2b < x \leq a \\
 &1.0 && : a < x
 \end{aligned}$$

$$B(x, a, b) = A(2a-x, a, b)$$

$$C(x, a1, b1, a2, b2) = \min(A(x, a1, b1), B(x, a2, b2))$$

(1) 安全性(S)の評価指標の定義(図6.3)

安全性については、トロリの現在位置(x)、加速周期(Ta)と横行速度(Vm)に基づき予測したコンテナの移動軌跡と積み付けられたコンテナまたは船等の障害物との余裕高さ(hm)から高さの安全性を、また、トロリの現在位置(x)と運搬経路内の最大高さの障害物

の区間(X1, X2)から位置に関する安全性を定義する。但し、巻き上げ(XC)、巻き下げ(XE)地域は運搬方向により少し異なる。以下で μ は、メンバーシップ関数を表す。

(a) 高さが危険(HD)

$$\mu_{HD}(hm) = B(hm, H_s, -H_s/2)$$

(b) 高さが安全(HS)

$$\mu_{HS}(hm) = A(hm, 2H_s, -H_s/2)$$

(c) 危険地域(XD)

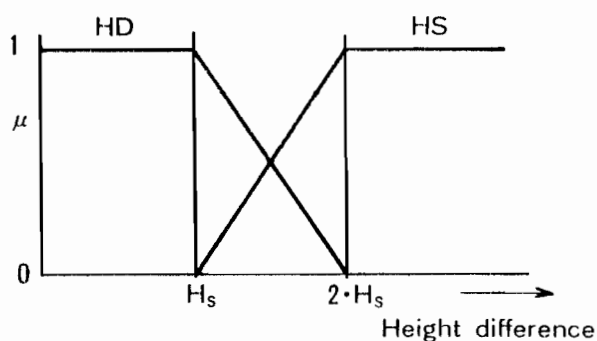
$$\mu_{XD}(x) = C(x, X_1, X_s/2, X_2, X_s/2)$$

(d) 巻き上げ地域(XC)

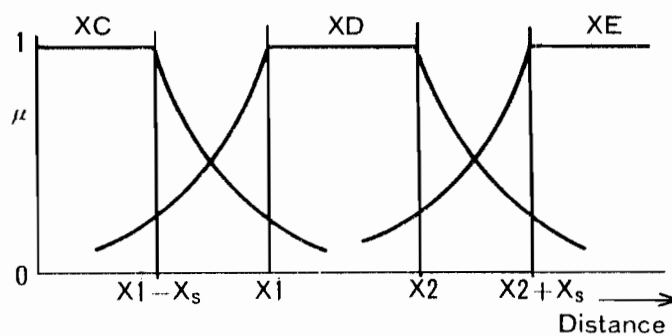
$$\mu_{XC}(x) = B(x, X_1 - X_s, X_s/2)$$

(e) 巻き下げ地域(XE)

$$\mu_{XE}(x) = A(x, X_2 + X_s, X_s/2)$$



(a) 高さ余裕



(b) トロリ位置

図6.3 安全性のメンバーシップ関数

(2) 停止精度 (G) の評価指標の定義 (図 6. 4)

停止精度については、停止目標 (XT) に対する現在のトロリ位置 (x) 及び、予測停止位置 (Xp=x+Vm・Td/2) により評価する。

(a) 停止目標以後に停止する (XT)

$$\mu_{XT}(Xp) = A(Xp, XT, -Xz)$$

(b) 停止精度が良い (XG)

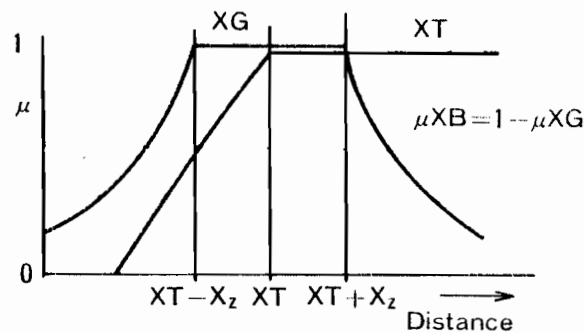
$$\mu_{XG}(x) = C(x, XT+Xz, Xz/2, XT-Xz, Xz/2)$$

(c) 停止精度が悪い (XB)

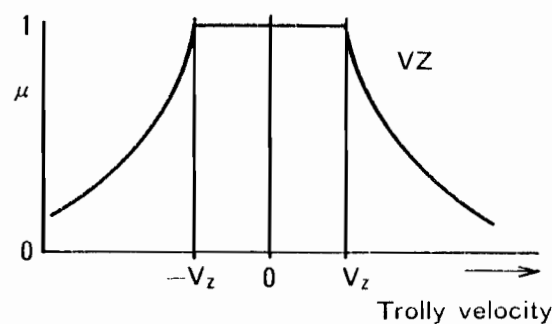
$$\mu_{XB}(x) = 1 - \mu_{XG}(x)$$

(d) トロリがほぼ停止 (VZ)

$$\mu_{VZ}(vt) = C(vt, -Vz, Vz, Vz, Vz)$$



(a) 停止誤差



(b) トロリ速度

図 6. 4 停止精度のメンバシップ関数

(3) 残留振れ(W)の評価指標の定義

ロープ系は、ロープ長さにより決まる固有周期 T_a 及び T_d の間加減速されることにより、残留振れのない加減速ができるはずである。そこで、加減速の終了時刻及び終了速度により残留振れを評価し、(a)加速終了(AE)、(b)減速終了(DE)、(c)トロリが高速(VM)、(d)トロリが低速(VL)の各評価指標を定義する。

(4) 運搬時間(P)の評価指標の定義

運搬開始後の経過時間(t)により、現在の動作領域を評価し、(a)始動領域(P0)、(b)加速領域(P1)、(c)定速領域(P2)、(d)減速領域(P3)、(e)停止領域(P4)、(f)停止位置補正領域(P5)、(g)荷下げ領域(P6)、(h)荷下ろし以前(<P6)の各評価指標を定義する。

6.4.4 Fuzzy制御則

(1) トロリ系制御則

6.3.3節で定性的に記述したトロリ系に関するオペレータの経験則(T1~T6)をFuzzy判断則として定式化する。たとえば(T3)の経験則は、この記号に対応した言葉で、「もし、定速走行領域(P2)で現在時刻(t)から減速周期(T_d)の間トルク F_m で減速した時、目標位置以後に停止する(XT)ならば、減速領域(t_3, t_4)と、減速トルク F_d をセットする。」と表せる。この経験則の各部分は、

- ・定速走行領域(P2)で → P is P2
- ・現在時刻(t)から減速周期(T_d)の間トルク F_m で減速した時
→ $t_3=t$ and $t_4=t+T_d$ and $F_d=F_m$
- ・目標位置以後に停止する → G is XT

に対応しており、即ち、

" If(P is P2 and ($t_3=t$ and $t_4=t+T_d$ and $F_d=F_m$ → G is XT))
then $t_3=t$ and $t_4=t+T_d$ and $F_d=F_m$ "

なるFuzzy判断則として記述できる。トロリ系判断則全体を表6.1に示す。

また、上記判断則により決めた各領域に従い実際にトロリ系への制御指令を出力する実行部(C1~C6)に関しても、たとえば(C3)の経験則が、

" If(P is P2) then $V_T=V_m$ and $F_T=F_d$ and $B_T=off$ "

なるFuzzy実行則として記述できる。トロリ系実行則全体を表6.2に示す。

表6. 1 トロリ系Fuzzy判断則

- (T1) If (P is P0 and (t1 = t and t2 = t+Ta and Fma = Fmax → S is HS)) then t1 = t and t2 = t+Ta and Fma = Fmax
- (T2) If (P is P2 and W is AE and W is VM) then t2 = t
- (T3) If (P is P2 and (t3 = t and t4 = t+Td and Fmd = Fmax → G is XT)) then t3 = t and t4 = t+Td and Fmd = Fmax
- (T4) If (P is P4 and W is DE and W is VL)
then t4=t and t5=t+3.0
- (T5) If (P is P5 and G is VZ and G is XB) then t5 = t
- (T6) If (P is P5 and G is VZ and G is XG) then t6 = t

表6. 2 トロリ系Fuzzy実行則

- (C1) If (P is P0) then VT= 0 and FT= Fn and BT is on
- (C2) If (P is P1) then VT= 2Vm and FT= Fma and BT is off
- (C3) If (P is P2) then VT= Vm and FT= Fn and BT is off
- (C4) If (P is P3) then VT= -Vm and FT= Fmd and BT is off
- (C5) If (P is P4) then VT= 0 and FT= Fn and BT is off
- (C6) If (P is P5) then VT= (XT-xt) and FT= Fn and BT is off
- (C7) If (P is P6) then VT= 0 and FT= Fn and BT is on

(2) ロープ系制御則

6. 3. 4節で定性的に記述したオペレータのロープ操作に関する経験則(R1~R4)についても、トロリ系と同様に、たとえば(R1)の経験則が、

" If(S is XC and P is <P6) then h is Ls"

なるFuzzy判断則として記述できる。ロープ系判断則全体を表6. 3に示す。

上記判断則では目標ロープ長を制御方策として求める。しかし、クレーンに対しては、ロープ系の目標速度VLで指令する必要がある。そこでここでは、次のゲインGLの飽和形比例制御を実行則として用いる。

$$VL = GL * (h - l) \quad -V_{lm} \leq VL \leq V_{lm} \quad (6.14)$$

表6.3 ロープ系Fuzzy判断則

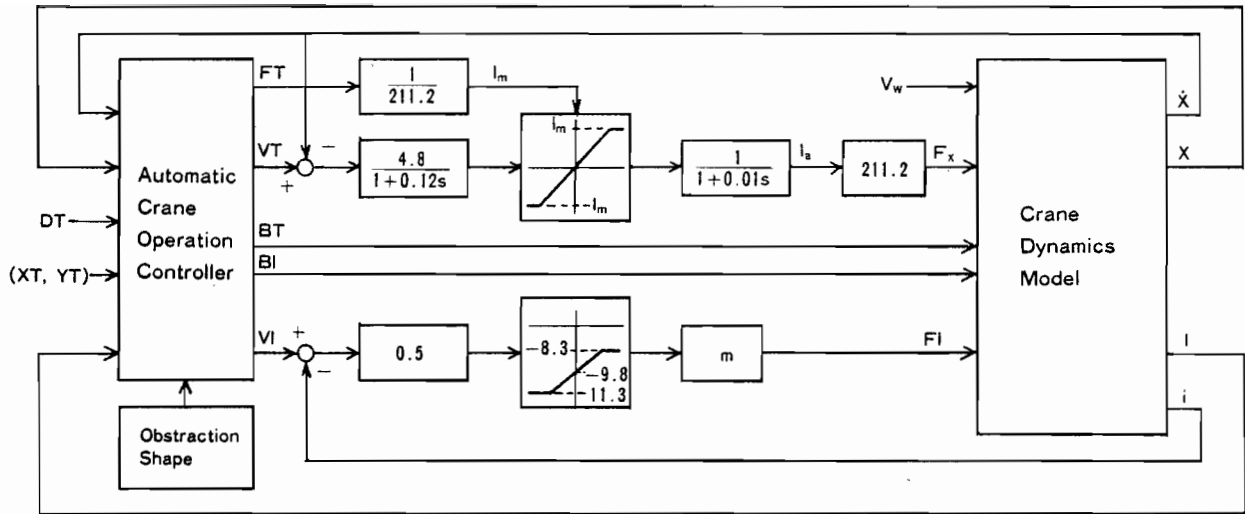
- (R1) If (S is XC and P is <P6) then h is Ls
- (R2) If (S is XD and P is <P6) then h is Ls
- (R3) If (S is XE and P is <P6) then h is Ln
- (R4) If (P is P6) then h is Lb

6.5 計算機シミュレーション

開発した予見Fuzzy制御コンテナ・クレーン自動運転の特性を、従来提案されているロープ長を一定とした最適運転パターンにトロリを追従させる方式(以下、従来制御方式と呼ぶ)と、計算機シミュレーションにより比較した(図6.5)。なお、美多ら⁴⁰⁾[1979]は、レギュレータを用いて追従制御を行っているが、ここでは、実際のクレーンに用いられている、AVR+ACR系による速度制御によりシミュレーションを行った。また、シミュレーション条件は、実際のコンテナ・クレーンの定数(表6.4)を用いた。

表6.4 シミュレーション条件

トロリ高さ	:	31.5 m
出発位置 (船倉 No.56)	:	(75.3 m , 3.0 m)
目標位置 (ヤードNo. 2)	:	(34.3 m , 0.0 m)
最大障害点高さ	:	11.3 m
トロリ最大速度 (Vm)	:	2.5 m/s
ロープ最大速度 (Vlm)	:	0.66 m/s
トロリ質量 (M)	:	15000 Kg
荷重質量 (m)	:	53500 Kg



DT : Departure signal
 FT : Maximum traction force
 VT : Target velocity of trolley
 VI : Target velocity of rope system
 V_w : Wind speed
 F_x : Tractive force
 x : Position
 (XT, YT) : Target position and height
 I_m : Maximum armature current
 BT : Brake command of trolley
 BI : Brake command of rope system
 I_a : Armature current
 FI : Hoisting force
 I : Rope length

図6.5 計算機シミュレーションのブロック線図

6.5.1 シミュレーション条件と結果

コンテナ・クレーンの運転において、制御性能と実用性を評価する上で重要な指標となるのが、運搬時間、停止精度と目標位置上での残留振れである。ここでは、実際の荷役作業を考え、コンテナ船上のコンテナを、ヤードまで運搬する場合を想定した。提案したFuzzy制御による運転状況を図6.6に、従来制御方式による運転状況を図6.7に示す。また、この2つのシミュレーションの運搬時間、停止精度、残留振れを表6.5にまとめて示す。

表6.5 シミュレーション結果のまとめ

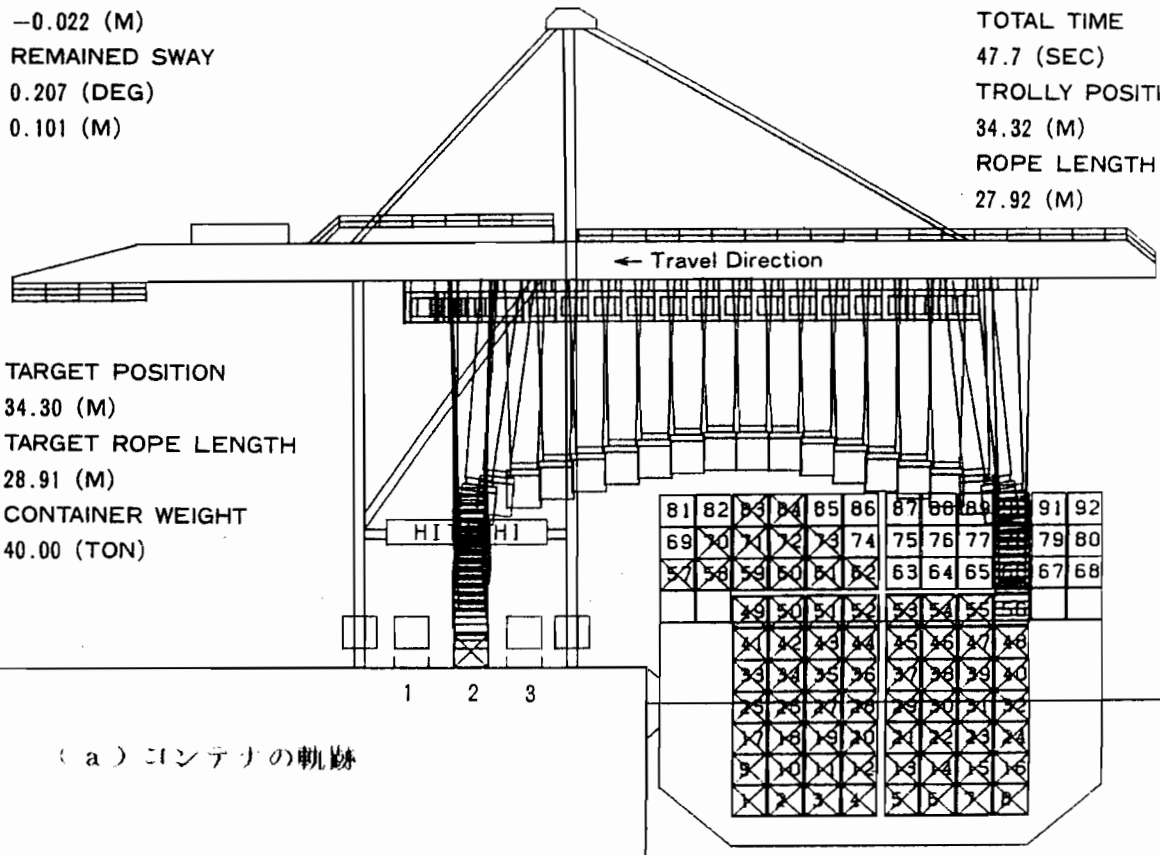
	運搬時間	停止精度	残留振れ
Fuzzy制御	47.7 sec	2.2 cm	10.1 cm
従来制御	68.6 sec	4.9 cm	22.6 cm

CONTAINER CRANE CONTROL ANALYSIS

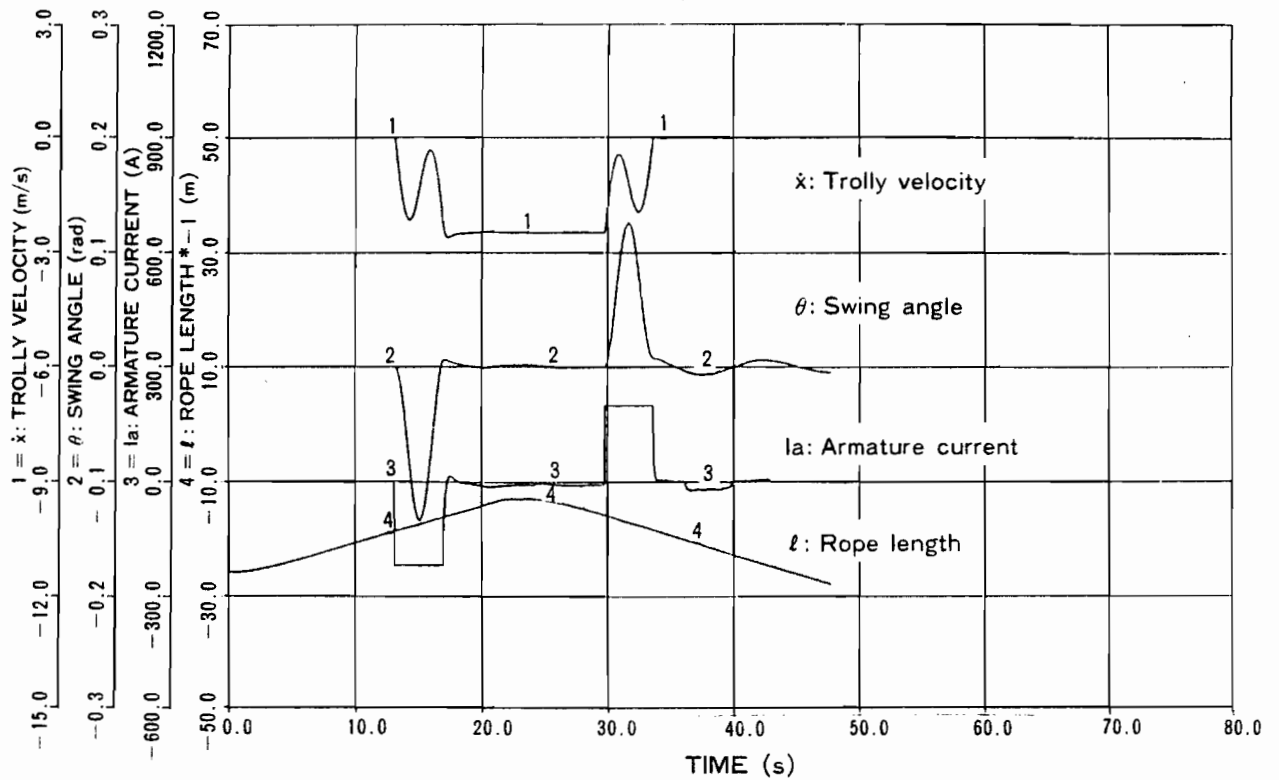
STOP GAP
-0.022 (M)
REMAINED SWAY
0.207 (DEG)
0.101 (M)

TIME
47.7 (SEC)
TOTAL TIME
47.7 (SEC)
TROLLY POSITION
34.32 (M)
ROPE LENGTH
27.92 (M)

TARGET POSITION
34.30 (M)
TARGET ROPE LENGTH
28.91 (M)
CONTAINER WEIGHT
40.00 (TON)



(a) コンテナの軌跡



(b) 各状態量 (トロリ速度、振れ角、電機子電流、ロープ長)

図 6. 6 Fuzzy 制御の結果

CONTAINER CRANE CONTROL ANALYSIS

STOP GAP

-0.049 (M)

REMAINED SWAY

0.464 (DEG)

0.226 (M)

TIME

68.6 (SEC)

TOTAL TIME

68.6 (SEC)

TROLLY POSITION

34.34 (M)

ROPE LENGTH

27.91 (M)

TARGET POSITION

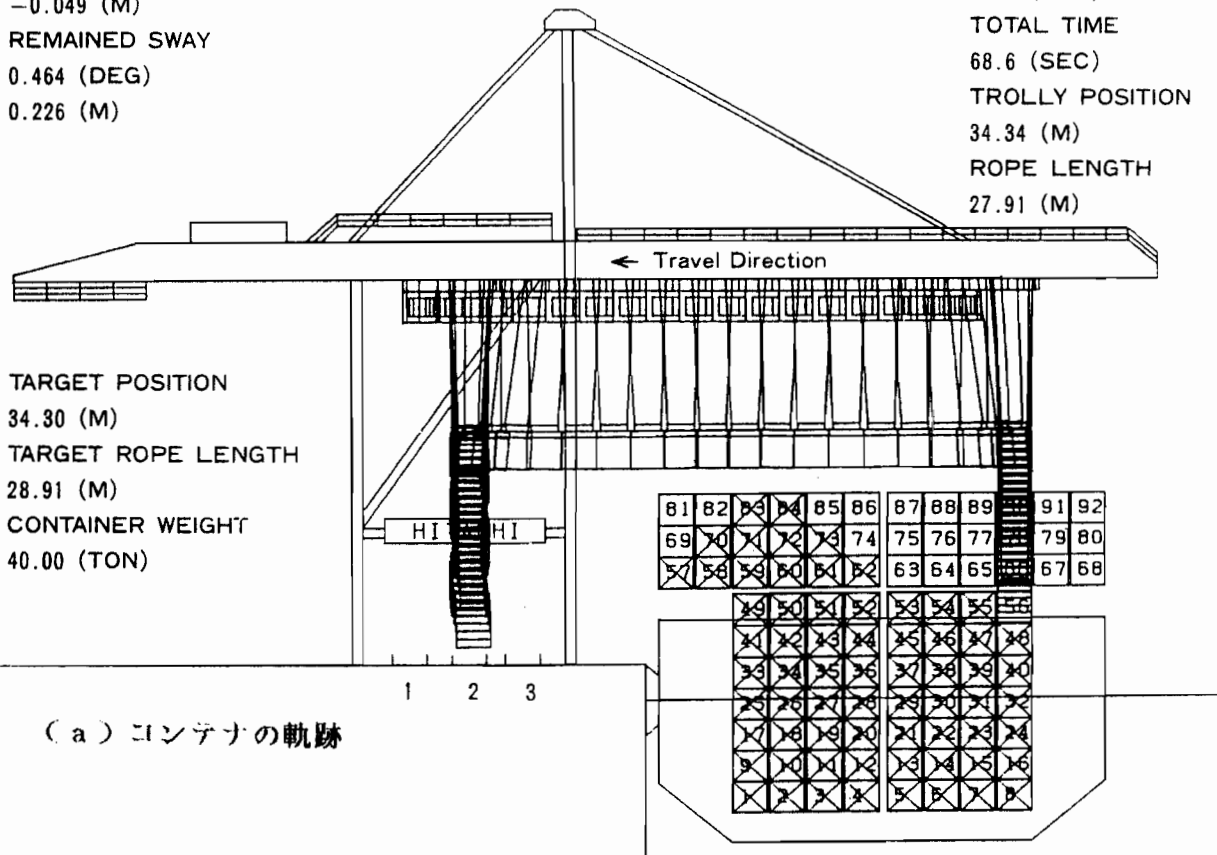
34.30 (M)

TARGET ROPE LENGTH

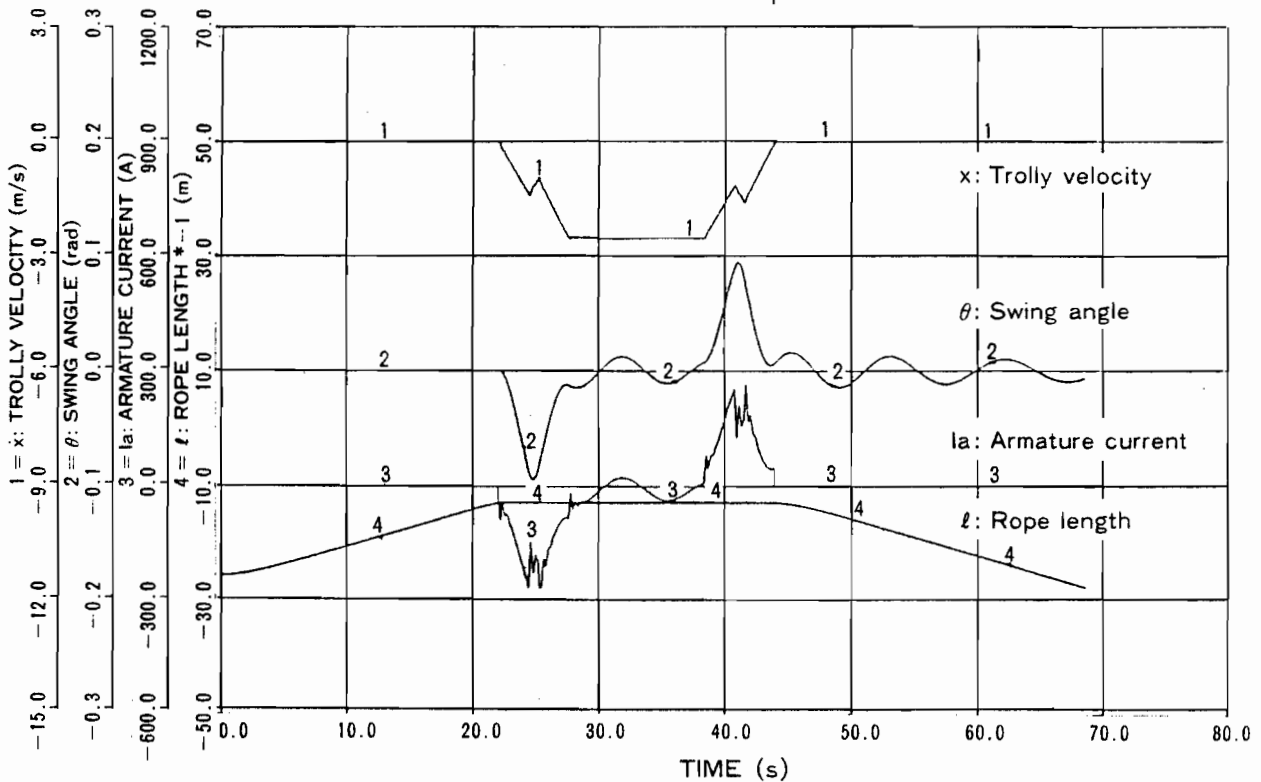
28.91 (M)

CONTAINER WEIGHT

40.00 (TON)



(a) コンテナの軌跡



(b) 各状態量 (トrolley速度、振れ角、電機子電流、ロープ長)

図6.7 従来制御の結果

6.5.2 シミュレーション結果の検討

従来制御方式では、停止精度は4.9cmであるが目標速度パターンへの追従遅れなどにより残留振れは22.6cmと大きくなっている。一方、Fuzzy制御による結果では、加速・減速時のロープ長の変化によるクレーンダイナミクスの非線形性より、残留振れが多少生じているが、運搬終了時には、停止誤差は2.2cm、残留振れ10.1cmとなっている。また運搬時間については、従来制御方式では一定の長さにロープを仮定しているため、障害物を完全にクリアできる高さ13mまでロープを巻き上げた後、加速、定速走行、減速を行い、目標位置に停止後コンテナを下ろしている。これに対しFuzzy制御では、巻き上げながら加速し、巻き下げながら減速した運転を行うため、この例では20.9秒(30.5%)運搬時間を短縮でき、大幅に高効率な荷役を実現している。

ここで提案している自動運転方式では、トロリ上にオペレータが乗務し、最終的なコンテナの上下、掴み解放の操作を行うことを、想定しているためオペレータの乗り心地も重要な評価指標となる。従来制御方式では、鋭角的なトロリ速度変化とモータ電流の激しい変化から、非常に乗り心地が悪いと推定される。これに対してFuzzy制御方式では、トロリ速度がS字カーブを描いており、又、モータ電流も滑らかに変化しているため、乗り心地良い動きとなっている。

なお本論文では、船上の1個のコンテナを運搬するシミュレーション結果について示し、従来制御方式と比較検討したが、Fuzzy制御方式では、図6.6(b)に示すように、減速領域への移行時にはコンテナの振れはほぼ停止しており、別の位置からコンテナを運搬する場合でもほぼ同様の停止精度、残留振れのシミュレーション結果が得られる。また、本方式をマイクロコンピュータに組込み実験を行い、実システムにおいても今回シミュレーションで示したのと同様に安定した制御を行なえることを確認しているが、これについては次章にて報告する。

6.6 おわりに

先に提案し、列車自動運転への実用化を進めている予見Fuzzy制御方式を、従来の制御方式では実用化が困難であったコンテナ・クレーンの運転へ適用し計算機シミュレーションを行った。その結果、本方式の採用により非熟練者でも行き先を指定し、出発ボタンを押し、停止後コンテナを下ろすだけで熟練者の運転を模擬した高効率な荷役作業が行え実用化方式として有効であることを確認した。

第 7 章

第7章 予見Fuzzy制御コンテナ・ クレーン運転システムの実現

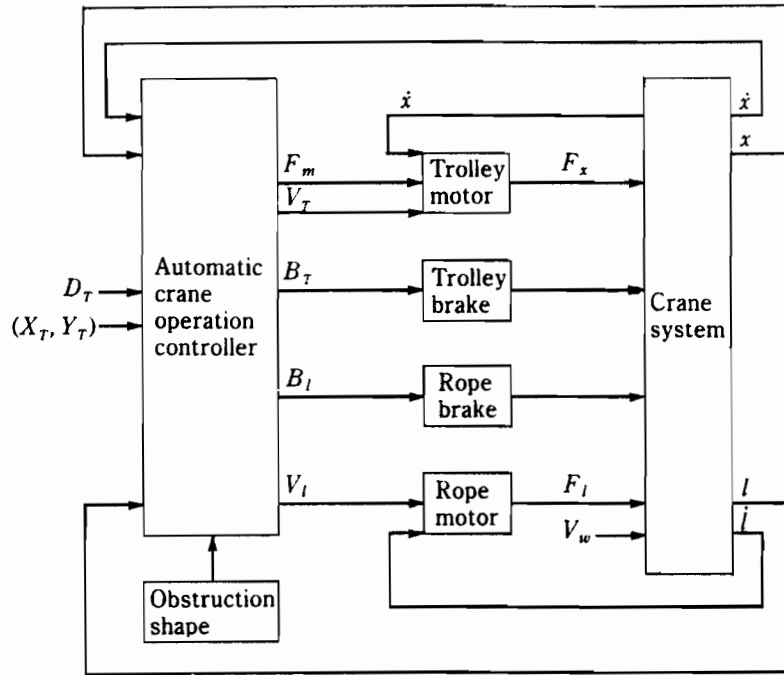
7.1 はじめに

第6章では、第3章にて提案したFuzzy制御方式を適用したクレーン自動運転方式を提案し、シミュレーションにてその機能を確認した。しかし、これら新方式による制御では、計算機シミュレーションではうまく行くが、実システムに適用しようとした場合、演算時間や状態量の計測の点から満足できる運転ができない場合も多い。そこで、前章にて提案した自動運転方式を16ビット・マイコン（CPUにHD68000を使用）に組み込み、18mの高さを持ち実用コンテナ・クレーンの約1/2の大きさを持つ実験用クレーンにて、その実用性を評価する実験を行った。

本章では、7.2節にてマイクロ・コンピュータによる制御装置の実現状況を、7.3節で1/2スケール・クレーンによる実験の様子を述べる。7.4節は、本章のまとめである。

7.2 マイクロ・コンピュータによる制御装置の実現

本コントローラは、フロッピーディスク等により予め出発前に設定された、障害物の形状（コンテナ・クレーン自身の構造、コンテナ船の構造、コンテナの積み付け状況等）とトロリの位置・ロープの長さから推定できるコンテナの移動軌跡とから安全性を評価してロープの上下及び加速のタイミングを決定し、固有周期の間の加減速により振れを抑えながら最短経路でコンテナを運搬して行く。本コントローラの入力は、（1）トロリ位置、（2）トロリ速度、（3）ロープ長さ、（4）運搬目標、（5）出発信号、（6）障害物の形状、であり、6章にて提案した、トロリ系Fuzzy判断則（表6.1）、トロリ系Fuzzy実行則（表6.2）、ロープ系Fuzzy判断則（表6.3）と各評価指標（図7.2）に従い、（1）トロリ目標速度、（2）トロリ加速力、（3）ロープ目標速度、（4）トロリ・ブレーキ指令、（5）ロープ及びブレーキ指令を出力する（図7.1）。図7.3に、判断部、実行部それぞれの概略処理フローを示す。ここで、判断部は100 msec 毎、実行部は 10 msec 毎に起動した。



D_T : Departure signal
 F_m : Maximum traction force
 V_T : Target velocity of trolley
 V_l : Target velocity of rope system
 F_x : Tractive force
 x : Trolley position
 \dot{x} : Trolley velocity
 (X_T, Y_T) : Target position and height
 V_w : Window speed
 B_T : Brake command of trolley
 B_l : Brake command of rope system
 F_l : Hoisting force
 l : Rope length
 \dot{l} : Rope velocity

図7.1 クレーン自動運転システムの構成

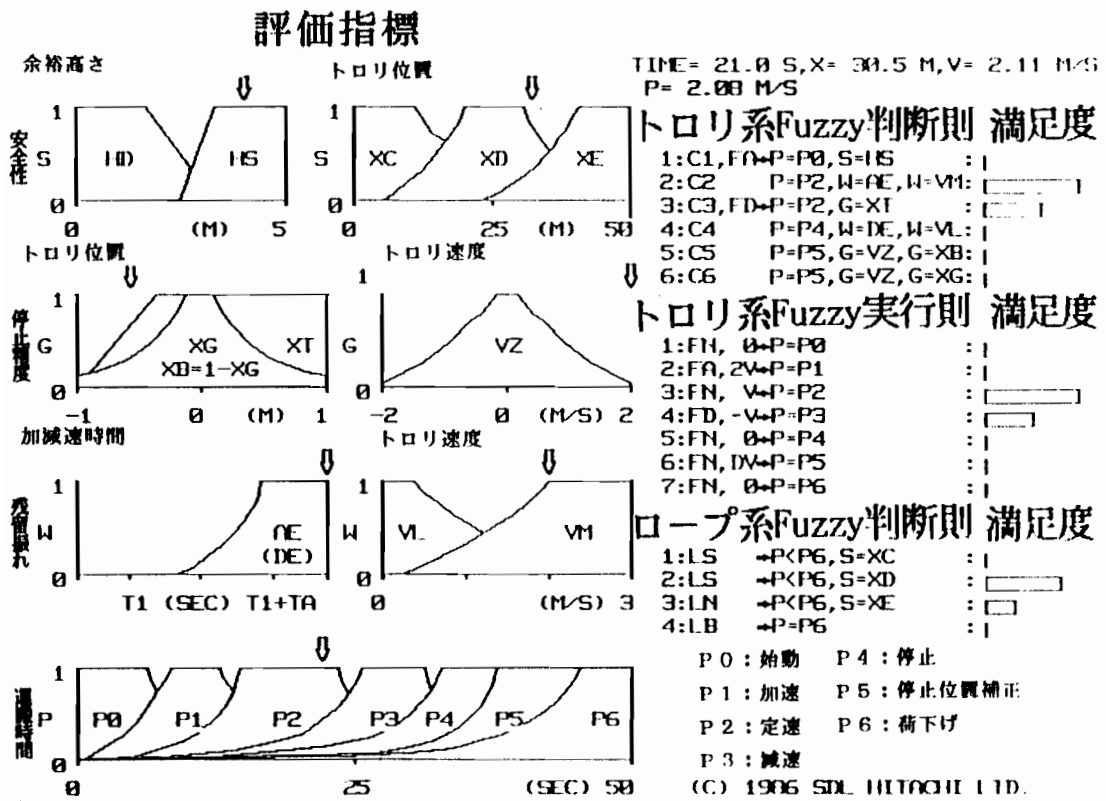


図7.2 評価指標と制御則

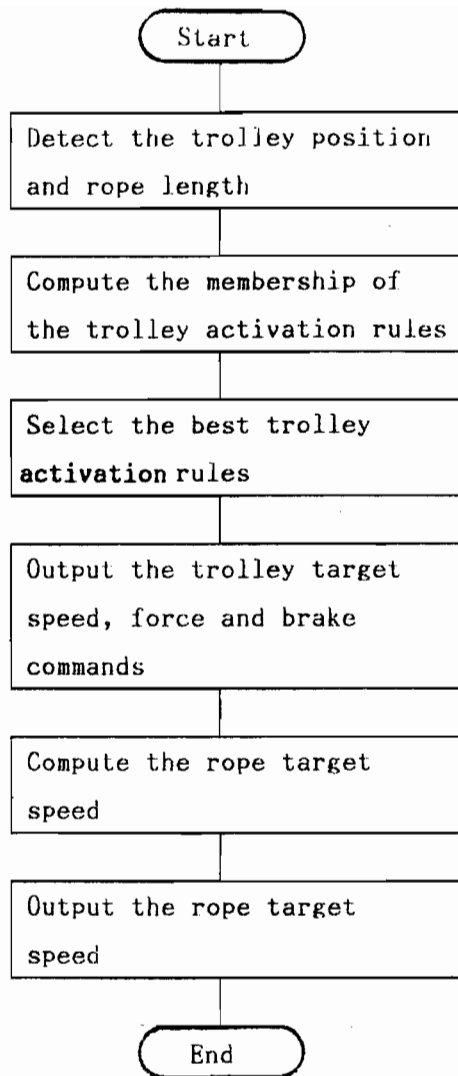
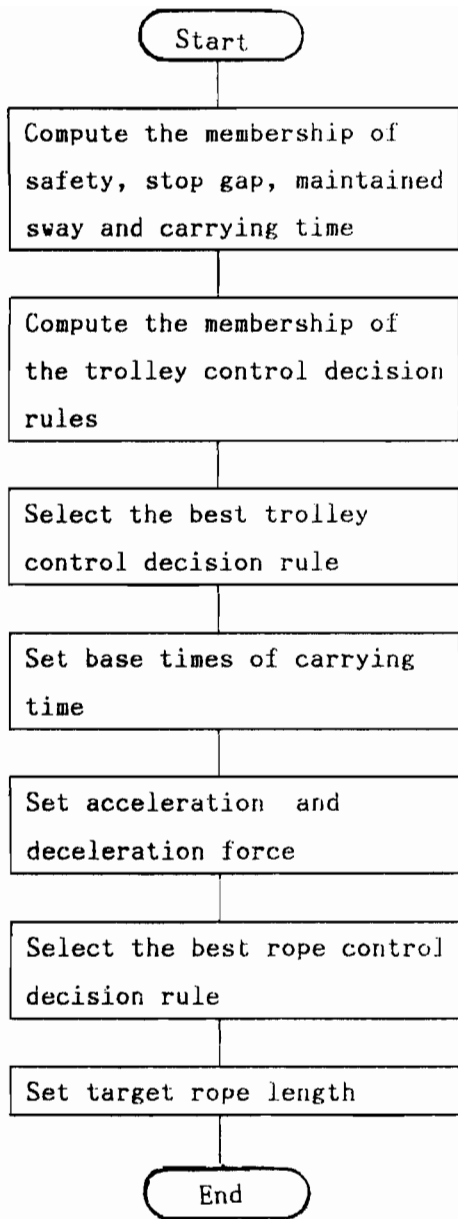


図 7. 3 Fuzzy 制御クレーン自動運転の処理フロー

7. 3 1/2スケール・クレーンによる実験

7. 3. 1 実験用クレーンと計算機シミュレーション

図7. 4に実験に用いたクレーンの写真を示す。このクレーンは、トロリの走行レールまでの高さが、17.8 m、スパン50 m（実験可能横行距離25 m）あり、実用されているコンテナ・クレーン（高さ約35 m）の約半分の大きさである。この実験用クレーンを用いて、6.45 tonの模擬コンテナを運搬した。このクレーンの仕様を表7. 1に示す。このクレーンは、コンテナ・クレーンとしては、1/2のスケールであるが、一般に工場内で用いられている天井走行クレーンと同じものである。この実験用クレーンを用いて、各種の条件にて実験を行ったが、ここでは、実際の荷役作業を想定した実験結果を示す。

図7. 5は、今回実験を行った、15 mの距離を途中5 mの障害物を越え、6.45 tonのコンテナを運搬する条件で、計算機シミュレーションを行った結果である。図7. 6は、同一条件によるトロリ速度、トロリ・モータ電機子電流の測定結果を示す。これらの測定値は、シミュレーションと同様な結果を示し、本アルゴリズムによって実際のクレーンが運転可能であることを確認した。

表7. 1 実験クレーンの仕様

クレーン高さ	: 17.8 m
トロリ系最大速度	: 1.25 m/s
ロープ系最大速度	: 0.3 m/s
トロリ質量	: 7500 Kg
荷質量	: 6450 Kg

7. 3. 2 熟練者の運転との比較

開発したFuzzy制御によるコンテナ・クレーン自動運転システム（Fuzzy-ACO、と略す）の有効性を検討するため、熟練者による運転と比較する実験を行った。図7. 7にFuzzy-ACOと手動による運転について、運搬時間、停止精度、残留振れについて、各20回の試行結果をまとめて示す。

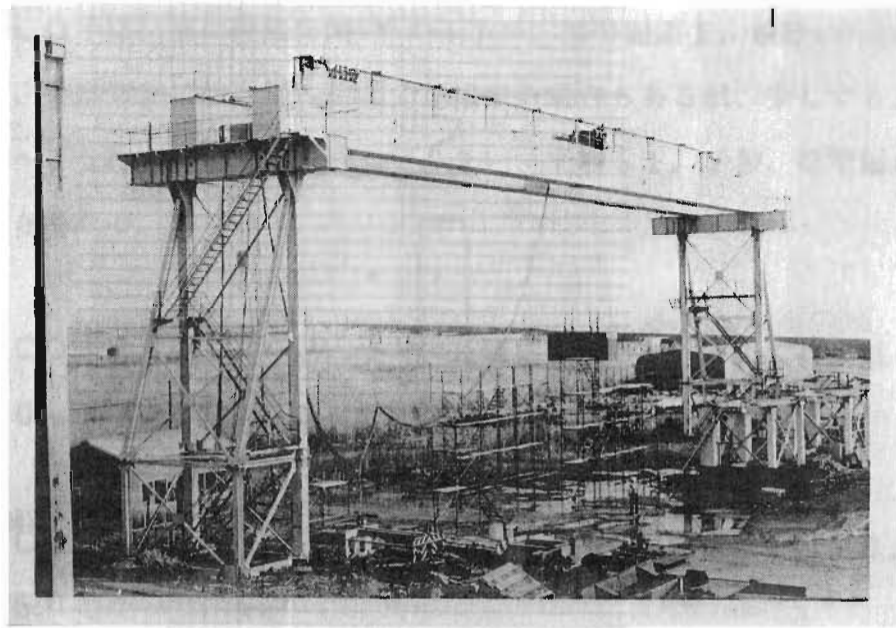


図7. 4 1/2スケール実験用コンテナ・クレーン装置

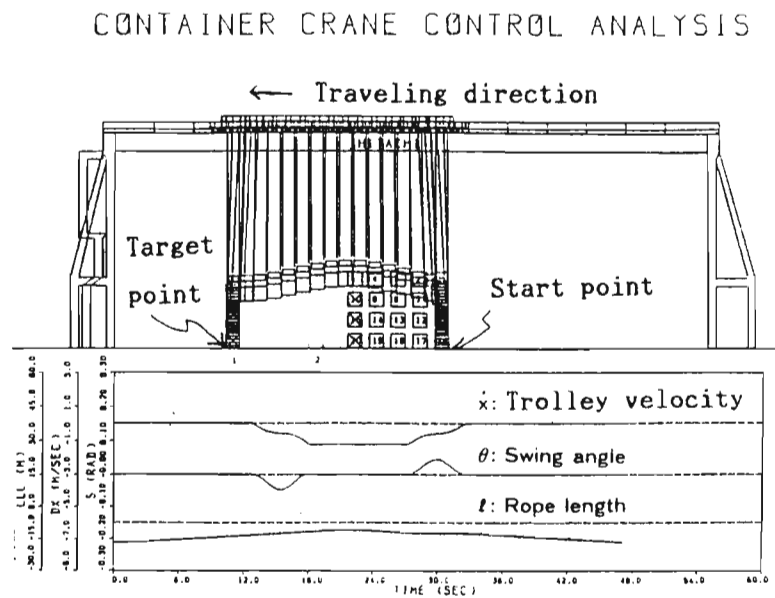


図7. 5 実験条件とそのFuzzy制御によるシミュレーション結果

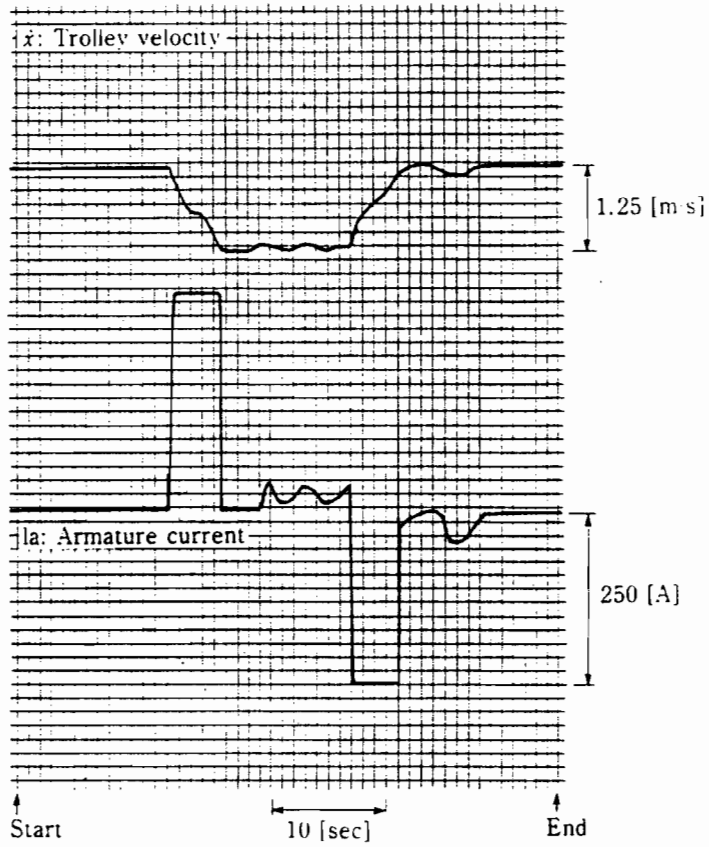


図7.6 Fuzzy制御による実験結果

評価項目 方式	運搬時間	停止精度(誤差)	残留振幅 (停止後5秒)
FUZZY 制御による 運転	<p>平均: 47.0sec σ: 1.0sec</p>	<p>平均: +1.9cm σ: 2.3cm</p>	平均: 5.7cm
熟練者 による 手動運転	<p>平均: 51.7sec σ: 4.3sec</p>	<p>平均: +5.6cm σ: 8.5cm</p>	平均: 10.8cm

図7.7 実験結果のまとめ

(1) 運搬時間

Fuzzy-ACOでは、常に最短時間(平均4.7秒、標準偏差1.0秒)で運搬している。これに対して、手動運転では、最短時間で運搬する場合もあるが、少しでもタイミングが狂うと、10~15秒は、すぐに浪費してしまい、平均51.7秒、標準偏差4.3秒とバラツキが大きくなる。

(2) 停止精度

Fuzzy-ACOでは、±5cm以内に常に正確に運搬している。これに対して、手動運転では、±10cm以上のバラツキがある。

(3) 残留振れ

Fuzzy-ACOでは、残留振れは5.8cmであるが、手動運転では10.8cmであり、約半分の振れとなっている。

総合的に評価すると、人間による運転では、タイミングが正確に合った場合には、最短時間で振れ少なく、停止誤差も少ない運転を実現できる。しかし、少しでもタイミングを逸した場合には、それを回復するのは、困難であり、運搬時間の増大につながる。これに対して、Fuzzy-ACOでは、熟練者の経験則に基づいて、常に正確な運搬を実現している。

7.4 おわりに

開発したFuzzy制御方式によるコンテナ・クレーン自動運転システムをマイクロ・コンピュータに組み込み、高さ18mの実験用クレーンを用いてその実用性を評価した。その結果、本システムにより熟練者と同等の安全に、正確に、早くコンテナを運搬できることを確認した。また、本システムを用いることにより、出発ボタンを押すだけで目標位置の真上まで自動的に運搬される分けて、非熟練者でも熟練者並みに荷役作業を行えることが分かった。

本システムは、この実験の後、実際のコンテナ・クレーンへ適用され実用性評価を進めているが、今回示した実験結果と同様、有効であるとの裏付けを得ている。

第 8 章

第 8 章 結 論

本研究は、人間の主観を定量化する F u z z y 集合を、人間が制御（運転）において行っている知的活動のコンピュータ化に応用し、実際のシステムの持つ問題を解決したものである。具体的には、「F u z z y 制御による人間の経験則のアルゴリズム化」、「列車運転の自動化」、「コンテナ・クレーン運転の自動化」を取り上げ、これらの運転における運転手の経験をコンピュータ化した自動化アルゴリズムの開発を目的に研究を行った。各章において得られた研究成果を要約すると次のようになる。

人間の経験則のアルゴリズム化に関しては、（１）、（２）の研究成果が得られた。

（１） 従来制御方式及び従来より提案されてきた F u z z y 制御方式についてその問題点を考察し、人間の運転において熟練者が行っているような、多次元にわたるあいまいな評価指標により経験的に行っている制御をアルゴリズム化でき、対象システム本来の制御目的を評価し、運用者にとって望ましい状態となるような制御指令を決定する新しい予見 F u z z y 制御方式を考案した。

（２） 人間の制御（運転）において行っている知的活動を、「推定」、「判断」、「実行」の３段階に階層化した制御戦略としてとらえ、この制御戦略に基づく F u z z y 制御方式を考案した。提案した制御方式を伝達関数で表される対象へ適用し、本方式が一般的な対象に対しても適用可能であることを示した。ここで提案した制御方式は人間の経験則をそのままアルゴリズム化し、コントローラは、その経験則を F u z z y 制御則化したものに基づき制御指令を決定する。そのため、コントローラの動作状況を監視する人間は、コントローラの推論状況により、コントローラが現在何を考え、どのような評価のもとにどうしようとしているのかを時々刻々表示させチェックすることが可能であり、より人間に近付いた制御を計算機により実現できると思われる。

列車運転の自動化に関しては、（３）、（４）、（５）の研究成果が得られた。

（３） 列車の定位置停止制御に対し、従来は P I D 制御により、平均的な対象モデルを考え、このモデルにより走行するパターンに追従させるよう計算機制御を行っていたが、先に提案した予見 F u z z y 制御方式により運転士の経験則に基づき、（a）乗り心地、（b）停止精度、（c）走行時分を評価しながら列車を所定の停止目標に停止させる制御則を作り、列車定位置停止制御を行った。シミュレーションの結果、提案方式により、従来実用している P I D 制御と比較して、制御指令の変化回数を 1/2、停止精度の標準偏差

を1/3とした、乗り心地の良い、正確な定位置停止制御を、実現可能であることを明らかにした。

(4) 列車運転全体に対し、運転士による運転を、(a)安全性、(b)乗り心地、(c)追従性、(d)消費電力量、(e)走行時間、(f)停止精度、を評価しながら、10個の駅間制御則、9個の定位置停止制御則から制御指令を決定するものとして定式化し、アルゴリズム化した列車自動運転システムを考案した。計算機シミュレーションの結果、本方式により、正確で乗り心地良く、環境の変動に強い上に、従来実用化しているPID制御方式と比較して力行時の消費電力量を10%以上節約した省エネルギー運転の可能な列車自動運転ができることを確認した。

(5) 提案した列車自動運転システムを、8ビットのマイクロ・コンピュータに組み込み、実際の地下鉄システムの列車を用いて運転を行い、計算機シミュレーションによる評価と同様に、実システムにおいても、乗り心地良く、正確で、省エネ化を図った運転が行え、熟練者と同等な運転が実現できることを実験により確認した。

コンテナ・クレーンの自動化に関しては、(6)、(7)の研究成果を得られた。

(6) 従来制御方式を適用した、トロリの横行目標速度パターンにレギュレータ制御などでトロリ速度を追従させる方式では、モータの追従性などから実用化が困難であったコンテナ・クレーン運転に対して、熟練オペレータの実荷役作業の調査及びその分析により、(a)安全性、(b)停止精度、(c)残留振れ、(d)運搬時間、を評価しながら、トロリ系の判断に6個、実行に7個、ロープ系の判断に4個の制御則を用いて、トロリ目標速度、トロリ加速力、ロープ目標速度を決定するものとして定式化し、アルゴリズム化したクレーン自動運転システムを考案した。計算機シミュレーションの結果、本方式の採用により、非熟練者でも行き先を指定して出発ボタンを押し、自動運転により目標直上に運搬されたコンテナを下ろすだけで、高効率な荷役作業が実現できることを確認した。

(7) 提案したクレーン自動運転システムを、16ビットのマイクロ・コンピュータに組み込み、高さ18mの実験用クレーンを用いてその実用性を評価し、本システムにより非熟練者でも熟練者と同様の、安全に、正確に、早くコンテナを運搬できることを確認し、実用化の裏付けを得た。

以上、人間の実システムの制御において行っている知的活動のコンピュータ化に関して、新方式の提案及びその2つの応用事例の研究成果について述べた。上記研究成果は、人間の制御を計算機化したいと言う実際システムのもつ課題を解決するものである。

〔 謝 辞 〕

本論文をまとめるにあたり、神戸大学大学院自然科学研究科 システム科学専攻 北村 新三 教授（工学部計測工学科）の暖かい御援助と適切な御指導、御便捷を賜ると共に、同システム科学専攻 平井一正 教授（同システム工学科）、松本治彌 教授（同計測工学科）、高森 年 教授（同計測工学科）、ならびに同生産科学専攻 丸橋 徹 教授（同電気工学科）の先生方には、熱心な御指導と御便捷を賜った。また、北村新三 教授、平井一正 教授には、本研究の基本となるシステム制御に関する手解きと、この分野を始める契機を与えて頂き、その後機会ある毎に励ましのお言葉を頂いた。これらの先生方に心より感謝の意を表す。

本研究を遂行するにあたり、（株）日立製作所、札幌市交通局、仙台市交通局の多くの方々の御指導、御援助を頂いた。

（株）日立製作所 システム開発研究所 三浦武雄 前所長（現在、同 情報事業本部長）、川崎 淳 所長、三巻達夫 主管研究長、井原廣一 前副所長（現在、同 宇宙技術推進本部 主管技師長）には、本研究の機会を与えて頂き、また研究全般にわたり御指導頂くと共に、同システム開発研究所第1部 春名公一 部長、松本邦顕 主任研究員には研究の具体的な進め方およびまとめ方に関して、御指導と御討論を頂いた。また、同研究所 井原廣一 前副所長、宮本捷二 前主任研究員（現在、同 研究開発部 主任技師）には、本研究の初期の段階から有益なる御助言と御討論を頂いた。ここに深謝する次第である。

列車自動運転への適用に関しては、（株）日立製作所システム開発研究所 関 進 主管研究員、能見 誠 主任研究員、藤倉信之 研究員より御指導頂くとともに、（株）日立製作所水戸工場 石田周二 主管技師長、武井謙二 副工場長、安波政弘 部長、高岡 征 主任技師、豊田瑛一 主任技師、には、実用化の観点から本研究に関して御討論頂いた。また、同工場、大村純夫 技師、清水朝行 技師、秋山弘之 技師、関野真一 企画員をはじめとする関係者の方々には、実用化システムの開発をして頂いた。また、（株）日立製作所 機電事業本部 村上啓一 次長、大島弘安 主任技師、寺沢 清 主任技師、小野関勝巳 技師、同システム事業部 庄山佳彦 事業部員、田畑彰 副技師長、安藤正博 部長、尾田至 課長、同東北支店 大津五郎 主任、をはじめとする関係者の方々には、実システム適用に関する貴重な御意見と御協力を頂いた。これらの方々には、厚く御礼を申し上げる。

また、列車自動運転の実システム適用に関し、運用者の立場から貴重な御意見と御討論

を頂いた、札幌市交通局、藤原純一 係長、俵谷忠浩 技師、仙台市交通局、日野望 課長、水間紀夫 係長、田代良二 技師、をはじめとする関係者の方々に厚く御礼を申し上げます。

コンテナ・クレーン自動運転への適用に関しては、(株)日立製作所 笠戸工場 鍋島康夫 前部長(現在、同 機電事業本部プラント建設本部長)、宇野修三 副技師長、藪 博昭 主任技師、牧野和央 主任技師、には、実用化の観点から本研究に関して御討論頂くと共に、同工場、長谷川俊次 企画員、宮長義明 企画員をはじめとする関係者の方々には、1/2 スケール・モデルによる実験および実用化システムの開発と、有益な御討論をして頂いた。また、(株)日立製作所 機電事業本部 桐生隆久 主任技師、高杉孝弘 主任技師には、実システム適用に関する貴重な御意見と実荷役作業調査に御協力を頂いた。これらの方々に厚く御礼を申し上げます。

また、本研究の遂行にあたり、(株)日立製作所システム開発研究所の、河野克己 研究員、前田みゆき 元企画員、川島治仁 企画員、津田隆子 企画員をはじめとする方々にプログラム化及びシミュレーション評価に御協力頂いた。これらの方々に厚く御礼を申し上げます。

〔参考文献〕

- 1) 明石、金子 (1981): クレーン用モーメントリミッタ;
第20回SICE学術講演会、429/430
- 2) 荒木ほか (1984): むだ時間システムを料理する—数値例による検討;
システムと制御、28-5、327/340
- 3) 荒屋 (1979): 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文集、15-1、1/8
- 4) 石井、櫻庭、大森 (1974): 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、586/591
- 5) 市川編 (1980): 多目的決定の理論と方法;
(社)計測自動制御学会
- 6) 井原 (1979): 地下鉄における計画と制御技術;
電気学会雑誌、99-11、1056/1060
- 7) 大村、秋山、小野関 (1986): 鉄道車両用制御エレクトロニクスの動向;
日立評論、68-3、7/10
- 8) 大平、久村 (1983): 単振動のロープ長制御による振動抑制;
第22回SICE学術講演会、533/534
- 9) 上杉、大西 (1980): 天井クレーンの振れ止め制御(II);
第19回SICE学術講演会、425/426
- 10) 嘉納 (1982): 最適制御理論—その設計との谷間;
システムと制御、26-3、125/134
- 11) 北川、安波、栗原ほか (1976): 札幌市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、226/230
- 12) 北森 (1964): クレーンの最適運転法;
第3回SICE学術講演会、347/348
- 13) 児新 (1982): 初期振れをもつ天井クレーンの適応制御;
第21回SICE学術講演会、289/290
- 14) 児新 (1983): ヤード用天井クレーンの振れ止め制御システム;
第22回SICE学術講演会、533/534
- 15) 坂本、栗山ほか (1981): 福岡市交通局高速鉄道トータルシステム;
日立評論、63-11、791
- 16) 下浦、磯田、三木 (1976): 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、533/537
- 17) 下浦、三木 (1981): 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、25-3、175/184
- 18) 進藤、係、坂和 (1983): コンテナクレーンの振れ止め制御;
計測自動制御学会論文集、19-5、430/432
- 19) 須田 (1982): 制御系設計手順の標準化の試み;
システムと制御、26-11、682/690

- 20) 菅野 (1979): 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
- 21) 菅野、高木 (1983a): あいまい制御;
計測と制御、22-1、84/86
- 22) 菅野 (1983b): あいまい理論 (I) ~ (IV);
計測と制御、22-1~6
- 23) 関野、安信ほか (1983): Fuzzy制御方式による自動列車運転装置の開発;
昭和58年電気学会東京支部大会
- 24) 田村、大波多 (1981): 天井クレーンの分岐限定法による最適制御;
第20回SICE学術講演会、315/316
- 25) 高木、菅野 (1983): あいまい制御則の設計と実システムへの応用;
第1回知識工学シンポジウム資料、39/44
- 26) 津村ほか (1983): 天井クレーンの振れ止め制御の一方法;
第22回SICE学術講演会、817/818
- 27) 電気学会編 (1960): 電気鉄道;
電気学会
- 28) 長尾多ほか (1978): 誘導無線装置を使用した天井クレーンの自動運転;
ビークルオートメーションシンポジウム、31/34
- 29) 半田 (1978): 時間・速度制御における自動運転方式;
電気学会論文誌、C-98-3、83/88
- 30) 東 (1982): 大阪南港ポートタウン線制御管理システム;
電気学会雑誌、102-1、10/14
- 31) 平井、羽根田、北村 (1980): システム制御工学;
森北出版
- 32) 飛禪 (1982): コンテナターミナルの現状と動向;
日本機械学会誌、Vol.85, No.759, 132/137
- 33) 藤倉、能見、安信ほか (1977): 列車の自動運転制御方式;
電気学会全国大会、2205/2206
- 34) 藤田、丸山 (1979): クレーンの振れ止め制御方式;
第18回SICE学術講演会、267/268
- 35) 藤田、丸山 (1980): クレーンの振れ止め制御方式;
第3回ビークル・オートメーション・シンポジウム、49/53
- 36) 藤原、関野、安信ほか (1983): Fuzzy制御方式による自動列車運転装置の開発;
第20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、272/276
- 37) 松本 他 (1982): クレーンの準最短時間振れ止め制御;
第21回SICE学術講演会、345/346
- 38) 前田、村上、戸田 (1983): あいまい推論によるFuzzy Logic コントロールの設計;
第1回知識工学シンポジウム資料、133/136
- 39) 前田、村上 (1985): Fuzzy Logic コントロールによる自動車の速度制御;
計測自動制御学会論文集、21-9、984/989

- 40) 美多、金井 (1979) : トロリーの最大速度に注目したクレーンの最適運転法 ;
計測自動制御学会論文集、15-6, 833/838
- 41) 三藤 他 (1983) : 2次抵抗制御とディスクブレーキを使用した天井クレーンの自動運転 ;
ピークルオートメーションシンポジウム、5/8
- 42) 宮本、井原、刈谷 他 (1978) : 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、60-10、59/64
- 43) 宮本 (1982) : 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
- 44) 宮本、安信、井原 (1983) : 知識工学応用制御システムのためのFuzzy推論制御則の表現に
ついて ;
情報処理学会第20回全国大会、1061/1062
- 45) 森下 (1978) : 走行クレーン運転自動化のための振れ止め制御 - 時間軸逆転フィードバック制
御方式 - ;
計測自動制御学会論文集、14-6, 739/744
- 46) 山崎、伊藤、久村 (1979) : ジブ形クレーンの制御に関する理論的考察 ;
計測自動制御学会論文集、15-6, 826/832
- 47) 山崎、菅野 (1984) : 自動学習ファジィコントローラ ;
計測自動制御学会論文集、20-8, 720/726
- 48) 山下ほか (1981) : クレーンの振子振れ止め制御学習(ランプにより状態教示した実験) ;
第20回SICE学術講演会、313/314
- 49) 柳下、伊藤、菅野 (1984) : ファジィ理論の浄水場薬品注入制御への応用 ;
システムと制御、28-10、597/604
- 50) 安信、藤倉、能見 (1977a) : 列車ダイナミクス・シミュレータの開発 ;
第21回システムと制御研究発表講演会、171/172
- 51) 安信、宮本、能見、井原 (1977b) : 軌道輸送システムにおける省エネルギー方式のシミュレー
ションによる考察 ;
第20回自動制御連合講演会、371/372
- 52) 安信、宮本、井原 (1978a) : 軌道輸送システム用電力シミュレータの開発 ;
第21回自動制御連合講演会、403/404
- 53) 安信、宮本、井原 (1978b) : 軌道輸送システム用電力シミュレータの開発 ;
第15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、18/22
- 54) 安信、宮本、井原 (1979) : 三相交流方式軌道輸送システム用シミュレータの開発 ;
第23回システムと制御研究発表講演会、93/94
- 55) 安信、宮本、井原 (1979a) : 軌道輸送システム設計評価シミュレータ ;
シミュレーション技術研究会、47/52
- 56) 安信、宮本、井原 (1979b) : 軌道輸送システム用電力シミュレータ ;
電気学会情報処理研究会、IP-79-55, 63/72
- 57) 安信、宮本、井原、田畑 (1979c) : 軌道輸送システム用電力シミュレータの開発 (第2報) ;
第16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、38/42

- 58) 安信、山中、能見、宮本、井原 (1980) : 三相交流給電方式軌道輸送システム用シミュレータ ;
第 23 回自動制御連合講演会、351/352
- 59) 安信、宮本、井原 (1981a) : 非線形状態推定における解の存在領域について ;
第 25 回システムと制御研究発表講演会、57/58
- 60) 安信、宮本、井原 (1981b) : Fuzzy 理論による列車自動運転制御 ;
第 20 回計測自動制御学会学術講演会予稿集、467/468
- 61) 安信、宮本、井原 (1982) : Fuzzy 理論による列車定位置停止制御 ;
第 21 回計測自動制御学会学術講演会予稿集、335/336
- 62) 安信、関野、宮本、井原 (1983a) : Fuzzy 制御による列車自動運転 ;
第 1 回知識工学シンポジウム資料、137/142
- 63) 安信、宮本、井原 (1983b) : 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、19-11, 873/880,
- 64) 安信、宮本、関野ほか (1983c) : Fuzzy 制御方式の開発と列車自動運転への適用、
第 20 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、267/271
- 65) 安信、宮本 (1983d) : 軌道輸送システム用電力評価シミュレータ ;
日本シミュレーション学会第 3 回シミュレーション・テクノロジー・コンファレンス、185/188
- 66) 安信、宮本 (1984a) : Fuzzy 制御の列車自動運転システムへの応用 ;
電気学会雑誌、104-10, 867/874
- 67) 安信、宮本、井原 (1984b) : 予見 Fuzzy 制御方式による列車自動運転 ;
システムと制御、28-10, 605/613
- 68) 安信、関野、宮本 (1984c) : 制御目的を評価する予見 Fuzzy 制御方式 ;
第 2 回知識工学シンポジウム資料、121/124
- 69) 安信、宮本 (1985a) : 人間の制御戦略に基づく汎用予見 Fuzzy 制御コントローラの提案 ;
第 3 回知識工学シンポジウム資料、127/132
- 70) 安信、宮本、長谷川 (1985b) : 予見 Fuzzy 制御によるコンテナクレーン自動運転方式の提案 ;
第 24 回計測自動制御学会学術講演会予稿集、379/380
- 71) 安信 (1986a) : あいまい工学の列車自動運転への適用 ;
あいまい制御基礎講習会資料、33/45
- 72) 安信 (1986b) : 予見 Fuzzy 制御によるコンテナ・クレーン自動運転方式 ;
第 4 回知識工学シンポジウム資料、13/18
- 73) 安信 (1986c) : 予見 Fuzzy 制御とコンテナ・クレーン自動運転システムへの適用 ;
第 2 回ファジイシステムシンポジウム講演論文集、32/37
- 74) 安信、川島、長谷川 (1986d) : 予見 Fuzzy 制御によるコンテナ・クレーン自動運転方式の
1/2 スケール・モデルによる評価 ;
第 25 回計測自動制御学会学術講演会予稿集、227/228
- 75) 安信 (1986e) : 予見 Fuzzy 制御によるコンテナ・クレーン自動運転方式の開発 ;
計測自動制御学会論文集、22-10, 1066/1073
- 76) 安信 (1986f) : 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 (投稿中)

- 77) 湯浅、久村 (1981): LQ問題のジブ・クレーン制御への応用;
計測自動制御学会論文集、17-6、783/785
- 78) Alsop, C.F et, al (1966): Ore Unloader Automation - A Feasibility Study;
IFAC東京大会論文集、VII22/VII35
- 79) Ferbeck, D. (1983): The Lille Undergrand - First Application of the VAL System;
4th IFAC/IFIP/IFORS Int. Conf. on Transportation Systems, Baden-Baden, 47/52
- 80) Holmblad, L.P. and Ostergaard, J.J (1982): Control of a Cement Kiln by Fuzzy Logic;
Fuzzy Information and Decision Process (M.M.Gupta & E.Sancez.),
North-Holland Company, 389/399
- 81) Nabeshima, Y., Kiryu, T. and Araki, M. (1978): Hitachi Automated Container Terminal System;
Hitachi Review, Vol.27, No.6, 295/300
- 82) Mamdani, E.A. (1974): Application of Fuzzy Algorithms for Control of Simple Dynamic
Plant;
Proc. IEE, 121-12, 1585/1588
- 83) Miyamoto, S. Nohmi, M., Yasunobu, S. et al. (1978): JUMPS - A Design Support
System for Urban Automated Guideway Transit System;
1978 Int. Conf. on Cybernetics and Society, 776/781
- 84) Pappis, C.P. (1977): A Fuzzy Logic Controller for a Traffic Junction;
IEEE Trans. SMC-7-10, 707/712
- 85) Sakawa, Y and Shindo, Y (1982): Optimal Control of Container Crane;
Automatica, Vol.18, No.3, 257/266
- 86) Yabu, H, et, al (1978): Recent Progress in Ship Unloaders;
Hitachi Review, Vol.27, No 6, 307/310
- 87) Yasunobu, S., Miyamoto, S. and Ihara, H. (1983): Fuzzy Control for Automated Train
Operation System;
4th IFAC/IFIP/IFORS Int. Conf. on Transportation Systems, Baden-Baden, 39/45
- 88) Yasunobu, S., Miyamoto, S., et al (1984): Application of Predictive Fuzzy Control to
Automatic Train Operation Controller;
Proc. of IECON'84, 657/662
- 89) Yasunobu, S. and Miyamoto, S. (1985a): Predictive Fuzzy Control and its Application to
Transfer Function Model;
1st I.F.S.A. Congress (Palma de Malloca, Spain)
- 90) Yasunobu, S. and Miyamoto, S. (1985b): Automatic Train Operation System by Predictive
Fuzzy Control;
Industrial Applications of Fuzzy Control (M.Sugeno ed.), North-Holland, 1/18
- 91) Yasunobu, S. and Hasegawa, T. (1986): Evaluation of Automatic Container Crane Operation
System Based on Predictive Fuzzy Control;
Control-Theory and Advanced Technology (C-TAT), 2-3, 419/432
- 92) Tong, R.M. (1977): A Control Engineering Review of Fuzzy Systems;
Automatica, 13, 559/569

- 93) Tong,R.M. et al. (1980): Fuzzy Control of the Activated Sludge Wastewater;
Treatment Process: Automatica,16,659/701
- 94) Tukamoto,Y., Takagi,T. and Sugeno,M. (1978) : Fuzzification of LAleph-1 and Its
Application toControl;
Proc. Int. Conf. on Cybernetics and Society, 2 ,1217/1221
- 95) Zadeh,L.A. (1965) : Fuzzy sets;
Information and Control, 8 ,338/353
- 96) Zadeh,L.A. (1973) : Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and
Decision Processes ;
IEEE Trans. SMC- 3 -1,28/44