

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	単一入力ルール群重視度結合型ファジィ推論モデルおよびそのファジィ制御応用
Title(English)	
著者(和文)	湯場崎直養
Author(English)	
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:乙第3404号, 授与年月日:2000年2月29日, 学位の種別:論文博士, 審査員:
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:乙第3404号, Conferred date:2000/2/29, Degree Type:Thesis doctor, Examiner:
学位種別(和文)	博士論文
Type(English)	Doctoral Thesis

博士論文

単一入力ルール群重視度結合型ファジィ推論 モデルおよびそのファジィ制御応用

湯場崎 直養

マイコム株式会社

平成 11 年度

摘 要

本論文では、まず複数入力システムに対してすべて1入力の If-Then 形のファジィルールから構成する単一入力ルール群 (Single Input Rule Modules、以下 SIRMs と略する) 固定重視度結合型ファジィ推論モデルを提案する。各 SIRM には対応する入力項目のみを前件部変数とする 1 入力のファジィルールを設定し、かつ各入力項目についてシステムの挙動への貢献の度合いを表す重視度を定義する。そして各 SIRM の推論結果の重視度付き総和をモデルの出力として求める。SIRM を導入することによって、ルール総数が入力項目数の増加にしたがって代数的にしか増えず、各ファジィルールが容易に設定でき、しかも重視度の導入によってシステムにおける各入力項目の役割を直接強調したり抑制したりすることができるので、従来のファジィ推論モデルの抱えている多くの問題点を解決できることを述べる。「1 次遅れ+むだ時間系」と「2 次遅れ+むだ時間系」の制御シミュレーションおよび非線形関数の同定シミュレーションを通じて、本モデルの構造が単純であるにもかかわらず、従来のファジィ推論モデルに比べて優れていることを示す。

次に、基本値と変動値からなる動的重視度を導入して、SIRMs 動的重視度結合型ファジィ推論モデルを提案する。基本値は対応する入力項目の定常状態における基本的な役割を果たし、変動値は制御状況に応じて動的に変化して動的重視度の大きさを調整する役割を持つ。これによって、各入力項目が制御状況に応じて大きさの異なる重視度を持つことが可能となり、制御状況が刻々と変化する制御問題にも適していることを述べる。定値制御系に対して、SIRMs 動的重視度結合型ファジィ推論モデルに基づくファジィ制御器の具体的な構築手法を示すとともに、偏差と偏差の 1 階差分と偏差の 2 階差分を入力項目として操作量の変化分を出力項目とするファジィ制御器が、通常の線形 PID 制御器に項目ごとに対応し非線形 PID 制御器であることを証明する。「1 次遅れ+むだ時間系」および「2 次遅れ+むだ時間系」に適用し、SIRMs 固定重視度結合型ファジィ推論モデルに比べて制御結果がさらに改善できることを示す。また、純粋な 1 次遅れ系を制御対象として動的重視度のパラメータの系統的な設定手法を導出する。本設定手法を時定数が 0.20 以上の純粋な 1 次遅れ系に適用すると、振動と定常誤差を起こさずにオーバーシュートとアンダーシュートをともに 1.0%以内に抑えることができることを示す。

そして、最初の応用例として、未拘束物体の軌道追従制御問題を取り上げる。テーブル上を自由に転がる公式試合用ピンポン球の軌道追従制御実験装置を製作し、ピンポン球の位置に関する予測誤差と移動速度および加速度を入力項目とするファジィ制御器を SIRMs 動的重視度結合型ファジィ推論モデルに基づいて構築する。移動速度に動的重視度を持たせることによって、ピンポン球の移動速度を小さく抑えることができることを述

べる。従来のファジィ推論モデルではファジィルールが多く必要であるだけでなく、ピンポン球の移動速度を有効に制御できないためピンポン球の軌道追従制御が短時間に失敗してしまう実験結果を例示する。これに対して、本ファジィ制御器では 3 種類の円軌道と 1 種類の楕円軌道に対して、ピンポン球を長時間にわたって精度よくスムーズに追従させることができることを示す。

二番目の応用例として、直線レールタイプの倒立振り子システムの安定化制御問題を取り上げる。SIRMs 動的重視度結合型ファジィ推論モデルに基づいて、倒立振り子システムの四つの状態変数を入力項目として操作量を出力項目とする安定化ファジィ制御器を構築する。各 SIRM において入力項目によらずにすべて同じルール設定を与え、各変動量変数の前件部変数としてすべて振子の角度の絶対値を用いることを示す。四つの SIRM のファジィルール計 12 個と四つの変動量変数のファジィルール計 12 個をしか持たない本安定化ファジィ制御器では、仮想目標角度を求めることなく、振子の角度制御と台車の位置制御が完全に並列に行え、しかも振子の角度制御と台車の位置制御の切り替えが自動的にスムーズに行われることを明らかにする。制御シミュレーションにより、本安定化ファジィ制御器は倒立振り子システムのパラメータが異なっても、広範囲の初期状態に対して倒立振り子システムを約 6.0 秒間で完全に安定化でき、汎用性が高いことを示す。

三番目の応用例として、振子の振り上げも含めた倒立振り子システムの振り上げおよび安定化制御問題を取り上げ、SIRMs 動的重視度結合型ファジィ推論モデルに基づく振り上げおよび安定化ファジィ制御器を構築する。本ファジィ制御器は、上記と同様の安定化ファジィ制御器に振子の実際の角度を $[-180.000^\circ, 0.000^\circ]$ または $[0.000^\circ, +180.000^\circ]$ に変換する装置を追加しただけであることを述べる。そして、本ファジィ制御器は、振子が倒立領域にあるときに自動的に安定化ファジィ制御器になり、振子が垂下領域にあるときに振子の角度のメンバーシップ関数の飽和特性により自動的に振り上げ制御器になることを明らかにする。いくつかの制御シミュレーションを行い、本振り上げおよび安定化ファジィ制御器によってすべて 4.0 秒以内に振子を垂下位置から振り上げて倒立振り子システムを完全に安定化することができることを示す。

目次

摘要	i
第 1 章 序論	1
第 2 章 SIRM _s 固定重視度結合型ファジィ推論モデル	7
2.1 緒言	7
2.2 従来のファジィ推論モデルについて	9
2.3 SIRM _s 固定重視度結合型ファジィ推論モデルの提案	11
2.4 提案モデルの特徴	14
2.4.1 入力項目の優先順位の差別化	15
2.4.2 重視度の調整で望ましい制御結果	15
2.4.3 ルール数の大幅削減	16
2.4.4 パラメータ数の大幅削減	17
2.4.5 ルールの設定簡単化	19
2.4.6 演算時間の短縮	19
2.4.7 ハードウェア化のしやすさ	20
2.5 「1次遅れ+むだ時間系」への適用	21
2.6 「2次遅れ+むだ時間系」への適用	28
2.7 提案モデルの学習アルゴリズム	35
2.7.1 ガウス型メンバーシップ関数の場合	36
2.7.2 三角形メンバーシップ関数の場合	37
2.8 非線形関数の同定への適用	38
2.9 結言	46
第 3 章 SIRM _s 動的重視度結合型ファジィ推論モデル	47
3.1 緒言	47
3.2 SIRM _s 動的重視度結合型ファジィ推論モデルの提案	49
3.3 定値制御系におけるファジィ制御器の構成法	53
3.4 線形 PID 制御器との比較	57
3.4.1 「1次遅れ+むだ時間系」について	57
3.4.2 「2次遅れ+むだ時間系」について	62

3.4.3	線形 PID 制御器の拡張としての提案モデル	68
3.5	SIRMs 固定重視度結合型ファジィ推論モデルとの比較	71
3.5.1	「1次遅れ+むだ時間系」について	71
3.5.2	「2次遅れ+むだ時間系」について	76
3.5.3	固定重視度モデルと動的重視度モデルの比較	83
3.6	結言	86
第4章	1次遅れ系における動的重視度パラメータ設定手法	87
4.1	緒言	87
4.2	ファジィ制御器の構成	88
4.3	動的重視度のパラメータの設定式導出	92
4.4	設定式による制御シミュレーション	97
4.4.1	時定数が $0.20 \leq T \leq 30.00$ の場合	97
4.4.2	時定数がそれ以外の場合	100
4.4.3	目標値が 1.0 以外の場合	103
4.4.4	目標値が階段状に変化する場合	106
4.4.5	プロセスゲインが 1.0 以外場合	107
4.4.6	出力項目のスケージングファクタを 0.1 以外に設定する場合	109
4.5	結言	110
第5章	未拘束物体の軌道追従制御	111
5.1	緒言	111
5.2	実験システムの全体構成	113
5.3	動的重視度モデルに基づくファジィ制御器	117
5.4	目標位置	122
5.5	軌道追従制御実験	124
5.5.1	パラメータ設定	124
5.5.2	小円軌道についての実験結果	126
5.5.3	中円軌道についての実験結果	129
5.5.4	大円軌道についての実験結果	131
5.5.5	楕円軌道についての実験結果	133
5.5.6	従来のファジィ推論モデルによる軌道追従制御実験	135
5.5.7	考察	139
5.6	結言	144

第 6 章 倒立振子システムの安定化制御	145
6.1 緒言	145
6.2 倒立振子システム	148
6.3 安定化ファジィ制御器	150
6.4 スケーリングファクタ設定	156
6.5 安定化制御シミュレーション(1)	157
6.5.1 試行錯誤による制御パラメータの設定	157
6.5.2 参照用倒立振子システムの安定化制御シミュレーション	158
6.5.3 参照用倒立振子システムの制御パラメータの汎用性について	161
6.5.4 考察	168
6.6 安定化制御シミュレーション(2)	170
6.6.1 ランダム最適探索法による制御パラメータの獲得	170
6.6.2 参照用モデルについての安定化制御シミュレーション	172
6.6.3 参照用モデル 1 の制御パラメータの汎用性について	174
6.6.4 参照用モデル 2 の制御パラメータの汎用性について	180
6.6.5 考察	187
6.7 結言	191
第 7 章 倒立振子システムの振り上げおよび安定化制御	193
7.1 緒言	193
7.2 倒立振子システム	196
7.3 振り上げおよび安定化ファジィ制御器	197
7.3.1 安定化ファジィ制御器	198
7.3.2 振り上げ制御器	202
7.3.3 制御パラメータの設定	205
7.4 振り上げおよび安定化制御シミュレーション	207
7.4.1 シミュレーション用倒立振子システムモデル	207
7.4.2 シミュレーション結果	209
7.4.3 考察	218
7.5 結言	220
第 8 章 結論	221
謝辞	227

参考文献228

第 1 章 序論

Mamdani^[40]がファジィ論理の概念をスチームエンジン実験装置の制御へ適用して以来、ファジィ理論に関する応用が種々の分野で盛んに行われるようになってきている。特にファジィ推論に基づいたファジィ制御^[73]は現場の人々にも理解されやすく、しかもエキスパートや熟練工の経験と知識をファジィルールの形で表現できることから、いち早く脚光を浴びた。今日までファジィ制御が家電製品、自動車、プラント運転、プロセス制御、地下鉄の停止位置制御、浄水池の薬品注入制御、トンネルの換気制御、ロボットの知的制御など多岐にわたって応用されている例^[13-15,32]が、すでに数多く報告されている。

ファジィ推論モデルは If-Then 形のファジィルールと推論法から構成される。Mamdani 方式のファジィ推論モデル^[40,73]（以下では、従来のファジィ推論モデルと称する）では通常、すべての入力項目が各ファジィルールの前件部に並列にセットされ、すべての出力項目が各ファジィルールの後件部にセットされるようになってきている。入力項目数が少ない場合には、そのようなルール構造が十分有効である。特に、1 入力あるいは 2 入力のファジィシステムを構築する場合、ルールテーブルが利用できるのも、ファジィルールをビジュアルに設定することができる。しかし、入力項目の個数が増えて 3 以上になると、ルールテーブルがほとんど利用できなくなるので、各ファジィルールの設定や調整は難しくなる。また、入力項目数の増加に伴って、設定できるファジィルールの最大個数が指数的に増大してしまう問題が生じる。さらに、各入力項目は、ともに同じルールの前件部に置かれることより推論においてすべて平等に扱われてしまう問題がある。というのは、各入力項目がシステムにおいて果たすべき役割と重要さが通常それぞれ異なり、システムの性能を改善するには、各入力項目の重要さをそれぞれの役割に合わせて強調したり抑制したりしなければならないからである。

最初の問題すなわちルール設定や調整に対して、メンバーシップ関数およびファジィルールを自動チューニングする手法^[2,20,54,69,70,80]がいくつか提案されているが、それらは入力と出力の組からなる教師パターンが予め得られることを前提としている。したがって、そのようなチューニング手法はスタティック関数の同定においては有効であるが、制御系のようなダイナミックシステムについては教師パターンとしての制御器の入出力信号が簡単に求められないので適用がほとんど不可能である。

二番目の問題すなわち入力項目数の増大により設定可能な最大ルール数が指数的に増加することに対して、階層型ファジィ推論モデル^[19]が報告されている。それは、まず入力項目をいくつかのサブグループに分けて各サブグループのファジィシステムを作り、次にサブグループのファジィシステムの出力変数を入力項目として再びサブグループ化を行い上位の層のファジィシステムを構築して、目標の出力項目が得られるまでさらに上位の層

を順次構成していく手法である。この階層型モデルによって、ファジィルールの総数を削減することができる。しかし、階層数と各層におけるサブグループの個数が通常経験的に決められ、また各入力項目をサブグループに振り分ける系統的な方法論もまだ確立されていない。さらに各サブグループのファジィシステムの出力変数の意味が必ずしも明確ではないことから、これらの出力変数を上位の層のサブグループに関係付けるときに混乱が起きやすく、各サブグループのファジィシステムの設定が難しい。

三番目の問題すなわち各入力項目の取り扱い方に対して、シングルトン型ファジィ推論モデル^[48-50]や順序構造モデル^[55,56]などが提案されている。それらは、各ファジィルールにそれぞれ異なる重みを与えることによって、各ルールに順序関係を定義付けることになる。ルールの重みが前件部変数の重みにもなるので、各ルールの前件部にあるすべての入力項目はまったく同じ重みを持ち、個別に調整することができない。また、ルール数が増えると、必要な重みの個数も増加し、各重みの設定も困難である。さらに、制御の観点からみれば、それぞれのファジィルールというよりもむしろ直接に入力項目に重みをつけて入力項目の重要さを強調したり、抑制したりするほうがオペレータにとってわかりやすく操作しやすい。

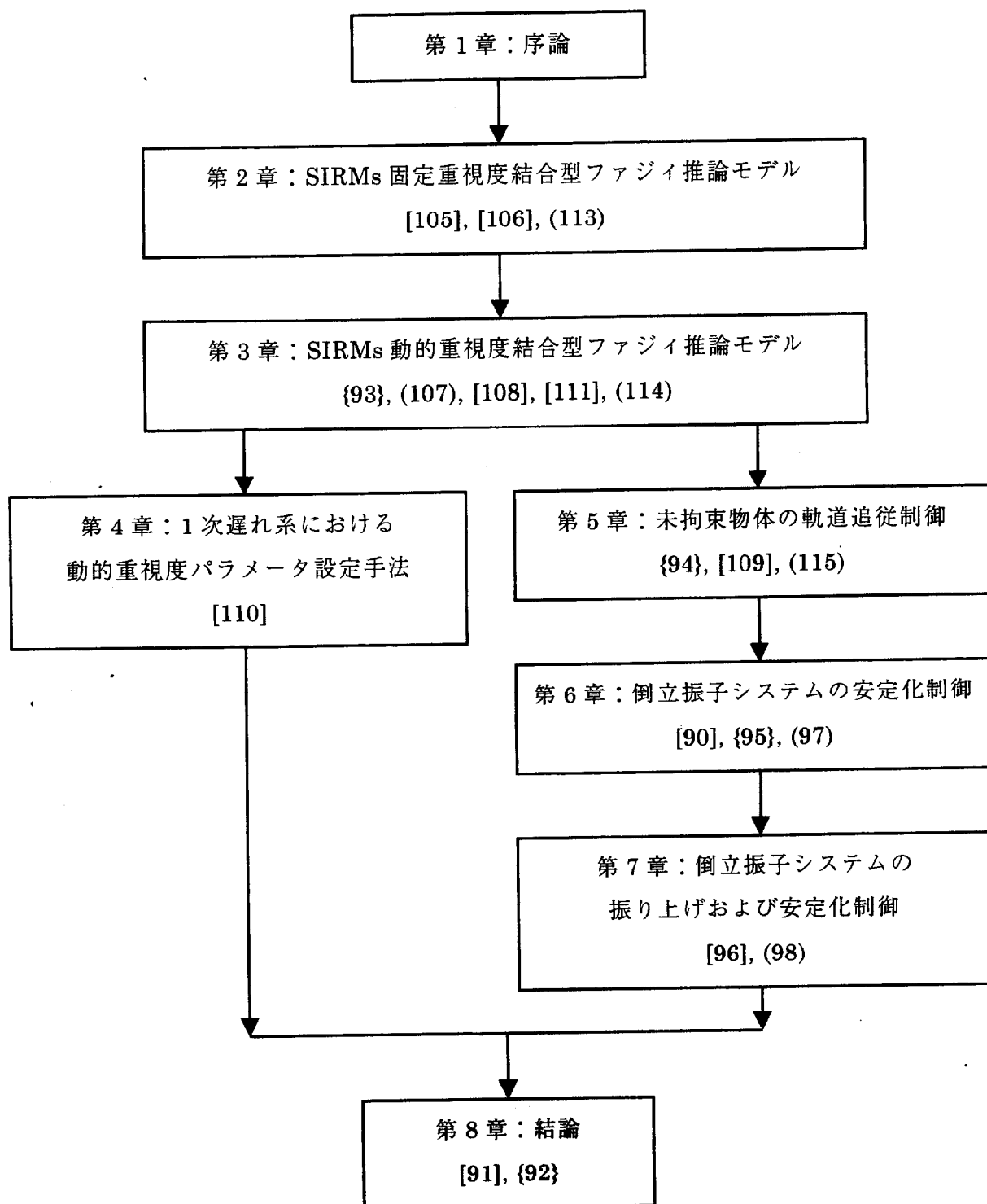
本論文では、複数入力システムに対してすべて1入力の If-Then 形のファジィルールから構成する単一入力ルール群 (**Single Input Rule Modules**、以下 **SIRMs** と略する) 固定重視度結合型ファジィ推論モデル^[105,106,113]を提案する。**SIRM**を導入することによって、設定可能な最大ルール数が入力項目数の増加にしたがって代数的にしか増えず、各ファジィルールが容易に設定できる。重視度の導入によって、各入力項目の重要さや貢献度が直感的に調整できるようになる。したがって、従来のファジィ推論モデルの上記の問題点を解決することが可能になる。「1次遅れ+むだ時間系」、「2次遅れ+むだ時間系」、および非線形関数の同定に適用することによって、**SIRMs** 固定重視度結合型ファジィ推論モデルは構造が簡単であるにもかかわらず、従来のファジィ推論モデルに比べて制御結果または同定結果を改善することができる。

しかし、制御プロセスにおいて制御状況が刻々と変化し、制御システムの各入力項目の相対関係も変化する。固定重視度を用いると制御開始から制御完了まで終始同じ大きさの重視度が使われるので、**SIRMs** 固定重視度結合型ファジィ推論モデルでは制御状況の変化に適応する能力に限界がある。そこで、制御状況の変化にダイナミックに追従する動的重視度を新たに定義し、**SIRMs** 動的重視度結合型ファジィ推論モデル^[93,107,108,111,114]を提案する。定値制御系に対して、**SIRMs** 動的重視度結合型ファジィ推論モデルに基づくファジィ制御器の構築手法を示す。「1次遅れ+むだ時間系」および「2次遅れ+むだ時間系」に適用し、制御結果がさらに改善できることを示す。動的重視度の設定を系統的に行う試みとして、純粋な1次遅れ系を制御対象として動的重視度のパラメータの設定手法^[110]を導出する。「1次遅れ+むだ時間系」については今後の課題になるが、本設定手法では

純粋な 1 次遅れ系に対してオーバーシュートとアンダーシュートをともに 1.0%以内に抑え振動と定常誤差を起こさずに制御することができる。

一方、応用例として、まず未拘束物体の軌道追従制御問題を取り上げ、テーブル上を自由に転がる公式試合用ピンポン球の軌道追従制御実験装置を製作し、SIRMs 動的重視度結合型ファジィ推論モデルに基づいてファジィ制御器^[94,109,115]を構築する。ピンポン球の位置に関する予測誤差と移動速度および加速度を入力項目に選び、そのうちの移動速度に対応する入力項目に動的重視度を持たせることで、ピンポン球を円軌道および楕円軌道に精度よく追従させることが可能になる。次に、直線レールタイプの倒立振子システムの安定化制御問題に対して、従来のファジィ推論モデル^[5,22,34,64,75]では振子の角度制御と台車の位置制御を同時に実現するには通常複雑なファジィ制御器を作って多数のファジィルールを用意しなければならない。SIRMs 動的重視度結合型ファジィ推論モデルによる安定化ファジィ制御器^[90,95,97]は、わずか 24 個の 1 入力 1 出力のファジィルールから構成され、振子の角度制御と台車の位置制御を並列に行う。そして、パラメータの異なる倒立振子システムに対しても初期状態を問わず短時間で完全に安定化させることができる。最後に、振子の振り上げも含めた倒立振子システムの振り上げおよび安定化制御問題について、その安定化ファジィ制御器に振子の実際の角度を $[-180.000^\circ, 0.000^\circ]$ または $[0.000^\circ, +180.000^\circ]$ に変換する装置を追加するだけで、振子が垂下領域にある時に自動的に振り上げ制御器になり、振子が倒立領域にあるときに自動的に安定化制御器になる振り上げおよび安定化ファジィ制御器^[96,98]を構築する。そして、その振り上げおよび安定化ファジィ制御器を用いることによって、振子の振り上げから倒立振子システムの安定化までが短時間で実現できることを示す。

本論文は図 1-1 に示すように 8 章から構成され、各章の概要は以下の通りである。



- [・] : 学術誌掲載論文
- {・} : 学術誌投稿中論文
- (・) : 国際会議発表論文

図 1-1 本論文の構成概要

第 1 章では、本研究の背景、動機、方法などを述べたあとで、各章の概要を言及している。

第 2 章では、従来のファジィ推論モデルを簡単に触れたあと、問題点を指摘する。それらの問題点を解決するため、単一入力ルール群 (SIRM) と重視度を導入して SIRM_s 固定重視度結合型ファジィ推論モデルを提案する。本モデルの方法論を詳しく説明し、ルール数の大幅削減やルールの設定の容易さおよびハードウェアの実現しやすさなどの特徴を述べる。本モデルを「1 次遅れ+むだ時間系」および「2 次遅れ+むだ時間系」へ適用し、従来のファジィ推論モデルに比べて制御結果が改善できることを示す。また、最急降下法を利用して本モデルのメンバーシップ関数、ファジィルール、重視度を自動チューニングするアルゴリズムを示す。多入力 1 出力の非線形関数が効率よく同定できることにより、本モデルは構造が簡単であるにもかかわらず、優れた非線形特性表現能力を持っていることを明らかにする。

第 3 章では、SIRM_s 固定重視度結合型ファジィ推論モデルを制御系に応用するときの問題点を指摘し、新たに動的重視度を定義する。そして、SIRM_s 固定重視度結合型ファジィ推論モデルの一つの拡張として、SIRM_s 動的重視度結合型ファジィ推論モデルを提案する。定値制御系に対して、このモデルに基づくファジィ制御器の具体的な構築手法すなわち各 SIRM の設定と動的重視度の求め方を示す。偏差と偏差の 1 階差分を入力項目とする場合の本モデルは通常の線形 PI 制御器に項目ごとに対応し非線形 PI 制御器であること、および偏差と偏差の 1 階差分と偏差の 2 階差分を入力項目とする場合には、本モデルは通常の線形 PID 制御器に項目ごとに対応し非線形 PID 制御器であることを証明する。そして、本モデルを「1 次遅れ+むだ時間系」および「2 次遅れ+むだ時間系」に適用し、オーバーシュートと定常誤差なしで目標到達時間がさらに大幅に短縮できることを示す。

第 4 章では、純粋な 1 次遅れ系を制御対象にして、動的重視度のパラメータの系統的な設定手法を求めることを試みる。SIRM_s 動的重視度結合型ファジィ推論モデルに基づいて、偏差と偏差の 1 階差分を入力項目として操作量の変化分を出力項目とするファジィ制御器を作る。時定数の大きさに応じて、純粋な 1 次遅れ系を四つの時定数領域に分類する。各時定数領域を代表するいくつかのサンプルプラントに対して、ランダム最適探索法で動的重視度のパラメータである基本値と変動幅のデータを集める。そして、それぞれのデータベースから基本値と変動幅の設定式を導出する。純粋な 1 次遅れ系に対する本設定式で、定常誤差と振動なしでオーバーシュートとアンダーシュートをともに 1.0% 以内に抑えることができることを示す。

第 5 章では、センサが装着されておらず外部から直接制御できない未拘束物体の軌道追従制御の難しさを述べたあと、SIRM_s 動的重視度結合型ファジィ推論モデルのこの問題への有効性を示すとともに、この問題の制御手法を探るための一例として公式試合用のピ

ンボン球の軌道追従制御実験装置を構築する。ピンポン球が任意の位置から目標軌道にスムーズに追従できるため、螺旋状漸近軌道を与える。従来のファジィ推論モデルではファジィルールが多く必要であるだけでなく、ピンポン球の移動速度を有効に制御できないためピンポン球の軌道追従制御が短時間に失敗してしまう実験結果を示す。一方、SIRMs 動的重視度結合型ファジィ推論モデルに基づいて構築したファジィ制御器では、ルール数が少ない上、各入力項目の重要さを必要に応じて調整できることを示す。特に、移動速度に対応する入力項目には動的重視度を定義することによって、移動速度が大きいときに抑制動作を強くし、移動速度が小さいときに抑制動作を弱くすることが可能になる。その結果、3種類の円軌道と1種類の楕円軌道に対して、ピンポン球を長時間にわたって精度よく安定でスムーズに追従させることができることを示す。

第6章では、SIRMs 動的重視度結合型ファジィ推論モデルを、4入力項目を有する倒立振子システムの安定化制御問題に適用する。倒立振子システムの特徴を各SIRMと動的重視度の設計に取り入れ、わずか24個の1入力1出力のファジィルールからなる安定化ファジィ制御器を作る。仮想目標角度を求める必要がなく、また振子の角度制御と台車の位置制御が完全に並列に行えることを明らかにする。そして、各入力項目のスケーリングファクタが固定でき、各動的重視度の基本値と変動幅が制御パラメータであることを述べる。試行錯誤で求めた一組の制御パラメータを用いて、振子の初期角度が $[-30.000^\circ, +30.000^\circ]$ の間、あるいは台車の初期位置が $[-2.250\text{m}, +2.250\text{m}]$ の間であれば、振子の長さが 0.200m から 2.200m までの倒立振子システムを、すべて約 8.0 秒間で完全に安定化させることができることを示す。また、ランダム最適探索法で求めた二組の制御パラメータを合わせて使えば、振子の初期角度 $[-30.000^\circ, +30.000^\circ]$ または台車の初期位置 $[-2.100\text{m}, +2.100\text{m}]$ の初期状態に対して、同じく振子の長さが 0.200m から 2.200m までの各倒立振子システムを、約 6.0 秒間で完全に安定化させることができることを示す。

第7章では、振子を垂下領域から倒立領域まで振り上げてから倒立領域で倒立振子システムを安定化させる倒立振子システムの振り上げおよび安定化制御問題を取り上げる。まず第6章のスケーリングファクタをそのまま用いて、同様の安定化ファジィ制御器を設計する。その安定化ファジィ制御器に振子の実際の角度を $[-180.000^\circ, 0.000^\circ]$ または $[0.000^\circ, +180.000^\circ]$ に変換する装置を追加する。そして、振子の角度のメンバーシップ関数の飽和特性を利用することによって、この安定化ファジィ制御器は振子が垂下領域にあるときには自動的に振り上げ制御器になり、振子が倒立領域にあるときには自動的に安定化制御器になることを述べる。いくつかの倒立振子システムを例に、ランダム最適探索法でそれぞれの制御パラメータを求めて振り上げおよび安定化制御シミュレーションを行う。他の制御手法に比べて本提案手法では、短時間内で振子を垂下位置から振り上げてさらに倒立振子システムをそのまま完全に安定化させることができることを示す。

第8章では、本学位論文を総括して、今後の展望を示す。

第 2 章 SIRM_s 固定重視度結合型ファジィ推論モデル

2.1 緒言

従来の If-Then 形ファジィ推論モデル^[40,73]では、ファジィルールの作成に当たって、システムのすべての入力項目が通常 If の前件部（条件部）にセットされ、すべての出力項目が Then の後件部（結論部）にセットされる。出力項目に関しては、複数の出力項目があってもそれぞれファジィルールにおいて独立しており、ファジィルールの前件部が後件部のすべての出力項目にとって共通のものであることから、ここでは一般性を失うことなく出力項目 1 個のみの場合を考える。

いうまでもなく、入力項目数が少ない場合には、従来のファジィ推論モデルのルール構造が有効である。とりわけ 1 入力あるいは 2 入力のファジィシステムについては、ルールテーブルが利用でき、ファジィルールをビジュアルに設定することができる。そして、実際にルールテーブルが多く利用されている。しかし、ルールテーブルは、メモリ容量の関係で実用的には最大 2 入力程度しか対応できない。実際入力項目数が 3 である場合^[38]、ルールテーブルでファジィルールを設定するには、そのうちの一つの入力項目に対してまず 1 入力のファジィルールを作ってその下にさらに残りの 2 入力のサブファジィルールグループを作る形で、各サブグループに対してそれぞれ一つのルールテーブルを用意しなければならない。入力項目数が 4 以上になると、従来のファジィ推論モデルでは前件部における入力項目間の関係が直感的にわかりにくく、ルールテーブルの利用も難しくなる。その結果、入力項目の個数が増えると、手動による各ファジィルールの設定や調整は困難である。

また、すべての入力項目が各ファジィルールの前件部に組み込まれることにより、入力が 1 項目増える毎に、設定できるファジィルールの最大個数はその入力項目のメンバーシップ関数の個数倍、すなわち、その入力項目の台集合の分割数倍に拡大する。したがって、入力項目数の増加に伴って、設定可能なファジィルールの最大個数が指数的に増大してしまうという問題が生じる。それはハードウェア化におけるメモリサイズ、および計算時間などに直接影響を与える。

さらに、今まであまり認識されていないようであるが、通常のファジィ推論において各入力項目はファジィルールの前件部に平等に設定されることから推論において各入力項目がすべて平等に扱われてしまうという問題がある。言い換えれば、スケーリングファクタを除いて、推論において各入力項目はすべて同じ重みを持っている。しかし、システムにおいて各入力項目が果たすべき役割と重要さが通常それぞれ異なり、システムの性能を改善するには各入力項目の重要さをそれぞれの役割に合わせて調整しなければならない。つ

まり、各入力項目にそれぞれ異なる重みを持たせることも肝要である。

ルール設定問題の対策として、すでいくつかの学習アルゴリズムが提案されており^[2,20,54,69,70,80]、与えられた入力データと出力データの組で構成される教師パターンに従って前件部変数のメンバーシップ関数と後件部の実数値出力を自動的にチューニングすることが可能である。また、コンプレックス法と重回帰分析法を用いて前件部と後件部をそれぞれ同定する手法^[73]も提案されている。いずれにおいても、教師パターンが予め正しく与えられていることを前提としている。スタティック関数の場合は、入力データをその関数に代入して直接出力データを求めることができ、しかも出力データがその時の入力データにしか依存しない。したがって、そのようなチューニング手法はスタティック関数の同定において有効である。しかし、制御対象とファジィ制御器からなる制御系については、ダイナミックシステムである制御対象が介在するため、ファジィ制御器の出力が適切か否かは即座に判断しにくく、教師パターンとして適切な制御器の入出力信号を求めるのが困難である。このような場合、自動チューニング手法の適用はほとんど不可能である。

設定可能な最大ルール数の指数的増大問題を解消するため、階層型ファジィ推論モデル^[19]を用いることが考えられる。すなわち多入力システムに対して、まず入力項目をいくつかのサブグループに分けて各サブグループのファジィシステムを作り上げ、次にサブグループのファジィシステムの出力変数を入力項目として再びサブグループ化を行い上位の層のファジィシステムを設定して、目標の出力項目が得られるまでさらに上位の層を順次構築していく手法である。各サブグループにおいて入力項目数が制限できるので、階層型ファジィ推論モデルが適用できるならば、ファジィルールの総数を削減することが可能であり、ルールの設定においてルールテーブルの利用も可能である。しかし、階層数と各層におけるサブグループの個数が通常経験的に決められ、また各入力項目をサブグループに振り分ける系統的な方法論もまだ確立されていない。さらに各サブグループのファジィシステムの出力変数の意味が必ずしも明確ではないことから、これらの出力変数を上位の層のサブグループに関係付けるときに混乱が起きやすく、各サブグループのファジィシステムの設定が難しい。なお、川路ら^[24]が PD 制御器と等価なファジィ制御器として前件部変数がただ一つであるファジィルールを導入しているが、それは入力項目数がそもそも 1 個しかない場合による結果である。入力項目数が 2 個以上ある場合は、ファジィルールの設定は従来のファジィ推論モデルとまったく同じになっている。

入力項目の重み問題に対して今まで対策がなかったが、それに近いものとして大西が提案した順序構造モデル^[55,56] や水本が提案したファジィシングルトン型推論モデル^[48-50]が知られている。順序構造モデル^[55,56]は基本的に 1 入力か 2 入力のファジィルールを持つが、各ルールに重要さに基づいて順序関係をつけ、合成演算のときに各ルールの役割の違いを区別するものである。しかし、その順序関係の設定が容易ではない上に自動チューニングにも向かず、また合成演算により順序関係が線形的に出力に現れない。後件部変数に

重み付きの実数出力値を取るファジィシングルトン型推論モデル^[48-50]では、後件部変数の重みが実質上ルール全体の重みすなわち順序関係であると見なせる。その結果、各ルールの前件部にあるすべての入力項目はまったく同じ重みを持ち、個別に調整することができない。また、ルール数が増えると、必要な重みの個数も増加し、各重みの設定も困難である。一方、制御の観点からみれば、それぞれのファジィルールというよりもむしろ直接に入力項目に重みをつけて入力項目の重要さを強調したり抑制したりするほうがオペレータにとってわかりやすく操作もしやすい。

そこで本章では、複数入力システムに対して、すべて 1 入力の If-Then 形式のファジィルールから構成される単一入力ルール群 (**Single Input Rule Modules**、以下 **SIRMs** と略記する) 固定重視度結合型ファジィ推論モデル^[105,106,113]を提案する。まず各入力項目についてそれぞれ一つのルール群を用意して各ルール群に対応する入力項目のみを前件部変数とする 1 入力のファジィルールをセットし、次にシステムにおける各入力項目の重要さに注目しそれぞれの重視度 (重み) を定義し、各ルール群の推論結果の重視度付き総和を本モデルの出力とする。本モデルが、前述の従来のファジィ推論モデルの問題点を解決できるだけでなく、ハードウェア化もしやすいなどの特徴を持っていることを述べる。そして、「1 次遅れ+むだ時間系」および「2 次遅れ+むだ時間系」に適用し、従来のファジィ推論モデルの場合よりも制御結果が改善できることを示す。また、本モデルの学習アルゴリズムを導出し、非線形多入力関数を同定することによって本モデルが優れた非線形特性を持っていることを明らかにする。

2.2 従来のファジィ推論モデルについて

以下では説明を簡単にするために、 n 入力 1 出力のファジィシステムを例にして、簡略化ファジィ推論法^[20,37,50]を用いることにする。ただし、以下で導出される結果は、ほかのファジィ推論法 (例えば **min-max 重心法**^[46]、**代数積加算重心法**^[46,50]など)、または複数入力複数出力システムにおいても容易に拡張できることを付記しておく。

n 入力 1 出力のシステムに対して、すべての入力項目が前件部に設定される従来のファジィ推論モデルでは、 j 番目のファジィルールを、

$$\text{If } \bigwedge_{i=1}^n x_i = A_i^j \text{ Then } y = c^j \quad (j=1,2,\dots,m) \quad (2-1)$$

で表すことができる。

ここでは、 x_i はシステムの i 番目の入力項目に対応し、その入力項目のスケーリングファクタで正規化されたルールの i 番目の前件部変数である。 y はシステムの出力項目に対応し、その出力項目のスケーリングファクタで正規化されたルールの後件部変数である。各入力項目は前件部で AND という代数積演算子によって結合されている。 A_i^j は j 番目のルールにおける i 番目の前件部変数 x_i がとるファジィラベルのメンバーシップ関数を意味する。簡略化ファジィ推論法を用いるため、 j 番目のルールにおける後件部変数に実数出力値 c^j が設定されている。なお、ルール番号 j は $j=1,2,\dots,m$ であり、入力項目番号 i は $i=1,2,\dots,n$ である。また、 m と n はそれぞれルール総数と入力項目総数を表す。

すべての入力項目の観測値 $x_1^0, x_2^0, \dots, x_i^0, \dots, x_n^0$ が与えられたとき、 j 番目のルールについて i 番目の入力項目のファジィグレードは $A_i^j(x_i^0)$ 、すなわち台集合上の x_i^0 におけるメンバーシップ関数 A_i^j の値となる。そして、そのルールの前件部の適合度 h^j が簡略化推論法により、

$$h^j = A_1^j(x_1^0) \cdots A_i^j(x_i^0) \cdots A_n^j(x_n^0) \quad (2-2)$$

で代数積として定義される。最後に、推論結果 y^0 は合成重心法により、

$$y^0 = \frac{\sum_{j=1}^m h^j \cdot c^j}{\sum_{j=1}^m h^j} \quad (2-3)$$

で求められる。ただし、 x_i^0 、 y^0 の上付記号「0」は変数と区別して、観測値または推論値またはモデルの出力値を表す。

このように従来のファジィ推論モデルでは、システムの入力項目が基本的にすべて各ルールの前件部に組み込まれている。そのため、設定できるファジィルールの最大個数が、各入力項目のファジィラベルの個数の組み合わせで決まる。入力項目数が少ない場合にはルールをある程度経験的に設定できるが、入力項目数が増えるにつれて設定可能なルール数が指数的に増加し、ルールの設定も格段に難しくなる。山崎ら^[87]は設定可能なルールの中の一部だけを設定する試みを行っているが、システムの入力項目数が大きくなるとやはり系統的に全体として対応しにくくなる。

2.3 SIRM_s 固定重視度結合型ファジィ推論モデルの提案^[105,106,113]

従来のファジィ推論モデルで、設定可能な最大ルール数が入力項目数の増加とともに指数的に増加するのは、すべての入力項目が各ルールの前件部にセットされることによる。しかし、各入力項目に対してそれぞれルール群を用意し、ルール群には対応する入力項目だけを前件部変数とする 1 入力の If-Then 形式のファジィルールを定義すれば、ルールの総数は各ルール群の中のルール数の総和になる。各ルール群には入力項目が 1 個しかないので、作成されるルールの個数は高々その入力項目の台集合の分割数にしかならない。これによって、全システムの最大ルール数は、各入力項目の台集合の分割数の総和になり、従来のファジィ推論モデルに比べてルール数を大幅に削減することができる。

そこで、 n 入力 1 出力のシステムに対して、SIRM_s 固定重視度結合型ファジィ推論モデル^[105,106,113]を提案する。本提案モデルには、SIRM (単一入力ルール群) と重視度という二つの新しい概念を導入している。そして、本提案モデルは、

$$\begin{aligned}
 \text{SIRM-1:} & \quad \left\{ R_1^j: \text{ If } x_1 = A_1^j \text{ Then } y_1 = c_1^j \right\}_{j=1}^{m_1} \\
 \dots & \quad \dots \\
 \text{SIRM-}i: & \quad \left\{ R_i^j: \text{ If } x_i = A_i^j \text{ Then } y_i = c_i^j \right\}_{j=1}^{m_i} \\
 \dots & \quad \dots \\
 \text{SIRM-}n: & \quad \left\{ R_n^j: \text{ If } x_n = A_n^j \text{ Then } y_n = c_n^j \right\}_{j=1}^{m_n}
 \end{aligned} \tag{2-4}$$

のような入力項目数 n と同数の SIRM を持つ。

ここで、 R_i^j は i 番目の単一入力ルール群 SIRM- i の j 番目のルールを表す。 x_i はシステムの i 番目の入力項目に対応し、その入力項目のスケールリングファクタで正規化された SIRM- i の唯一の前件部変数である。 y_i はシステムの出力項目に対応し、出力項目のスケールリングファクタで正規化された SIRM- i の後件部変数である。 y_i ($i=1,2,\dots,n$) はすべて同じシステムの出力項目に対応する中間変数である。 A_i^j は SIRM- i の j 番目ルールの前件部変数 x_i のメンバーシップ関数を意味する。簡略化推論法が使われるため、 c_i^j は SIRM- i の j 番目ルールの後件部変数の実数出力値を意味する。また、ルール群の番号は入力項目と同じ $i=1,2,\dots,n$ として、 i 番目のルール群 SIRM- i のルール番号は $j=1,2,\dots,m_i$ とする。 m_i は SIRM- i のルール総数を表す。

従来のファジィ推論モデルでは、前件部にすべての入力項目がセットされるため、各入力項目の各メンバーシップ関数が通常異なるファジィルールに何回も使われる。これに対して、提案のファジィ推論モデルでは、各ルールの前件部に入力項目が一つしかないので、一つのメンバーシップ関数が基本的に 1 回しか使われない。そのため、各ルール群の最

大ルール数は、その前件部変数の台集合の分割数つまりメンバーシップ関数の個数に等しくなる。

本提案モデルの各 SIRM には前件部変数が一つしかないので、前件部変数のファジィグレードがそのままその前件部の適合度になる。したがって、ルール群 SIRM- i ($i=1,2,\dots,n$) の入力項目の観測値 x_i^0 が与えられたとき、その j 番目ルールの前件部の適合度 h_i^j は、

$$h_i^j = A_i^j(x_i^0) \quad (2-5)$$

で計算され、そのルール群の推論結果 y_i^0 は合成重心法により、

$$y_i^0 = \frac{\sum_{j=1}^{m_i} h_i^j \cdot c_i^j}{\sum_{j=1}^{m_i} h_i^j} \quad (2-6)$$

で求められる。

通常、システムの動作に対して各入力項目の影響力あるいは貢献度は異なる。貢献度の大きい入力項目もあれば、貢献度の小さい入力項目もある。また強調によって、システムの性能をさらに良くする項目と、逆にシステムの性能に良い効果を与えない項目に区別することもできる。貢献度の大きいまたは望ましい影響をもたらす入力項目の役割を強調し、逆に貢献度の少ない入力項目の効果を抑制することは経験的手法とも合致し、システムの性能の向上につながる。

しかし従来手法では、すべての入力項目が平等に取り扱われ、たとえルール^[55,56]または後件部変数の実数出力値^[48-50]に重みが定義されても、結局すべての前件部変数に同じ重みを与えることになる。そこでここでは、入力項目の役割の違いに注目し、各入力項目について重視度を導入する。重視度の値が大きければ対応する入力項目の役割が強調され、小さければその役割が抑制される。各入力項目の重視度を w_i ($i=1,2,\dots,n$) に設定した場合、提案モデルの最終出力 y^0 を、

$$y^0 = \sum_{i=1}^n w_i \cdot y_i^0 \quad (2-7)$$

で各 SIRM の推論結果の重視度付き総和として定義する。

図 2-1 に、本提案モデルの構成図を示す。各 SIRM が並列に推論した結果にそれぞれの固定重視度が乗じられた後、すべての入力項目についての合計がモデルの出力となって

いることがわかる。これによって、重視度の大きい入力項目は最終出力に大きく貢献し、重視度の小さい入力項目は最終出力にあまり貢献しないことになる。また、重視度によって規定された入力項目間の相対関係がそのまま線形的に最終出力に写されるので、目的に合わせて重視度を操作すれば直感通りの結果を得ることが可能である。なお、各入力項目がそれぞれの SIRM に対応することから、入力項目の重視度が SIRM の重視度になっている。

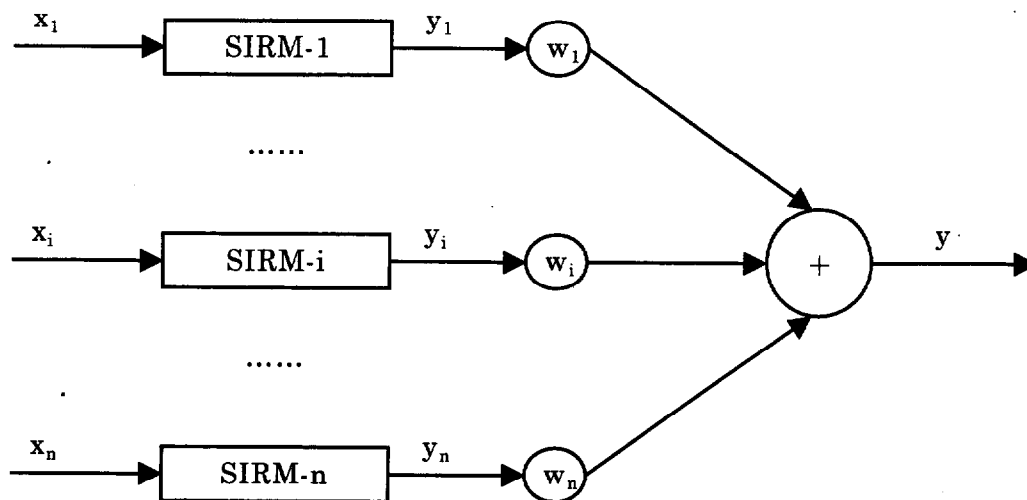


図 2-1 SIRM 固定重視度結合型ファジィ推論モデルの構成図

式(2-7)から分かるように、重視度の個数は入力項目の個数に等しい。各重視度が独立に設定されるので、重視度の総和をちょうど 1.0 になるように規制する必要はまったくない。この場合、本提案モデルの出力の最大値は出力項目のスケールリングファクタと各重視度によって決まる。また、式(2-7)の結果に出力項目のスケールリングファクタをかけたのが本モデルが実際に外部へ出力する操作量であるので、出力項目のスケールリングファクタと入力項目の重視度の積がその入力項目に対応する SIRM の後件部変数のスケールリングファクタになると見なされる。各重視度がすべて同じ値に設定されていれば、各 SIRM の後件部変数にすべて同じ大きさのスケールリングファクタがかかることになる。しかし、各重視度が異なる値に設定されていれば、各ルール群の後件部変数は同じ出力項目に対応するにもかかわらず、それぞれ異なるスケールリングファクタが定義されているのと同じことになる。このように本提案モデルでは、従来のファジィ推論モデルとは違って、同じ出力項目に対して同時に異なるスケールリングファクタを与えることができる。また、直接に各入力項目に独立に重視度を与え、各ルール群の合成演算結果の重視度付き総和を求める

ことにより、ルール数とパラメータ数を減らすばかりではなく、入力項目のシステム出力への影響を直感通りに操作できるという利点を持つ。Kuwahara ら^[33]は互いに補数となる重みを2つのファジィルール群の推論結果の結合に用いているが、それは本提案手法の重み操作の特別な場合に帰着する。

2.4 提案モデルの特徴^[105,106]

提案したファジィ推論モデルは、従来のファジィ推論モデルのいくつかの問題点を解決するために提案したものであるが、従来のファジィ推論モデルに比べて構造的に簡単であり、実用化に向いていることも直感的に理解できる。しかし、複数入力システムに対して、それぞれ一つの入力項目のみを前件部変数とする SIRM の集まりでシステムを表現するため、表現上いくつかの制約がある。

一つは、2.8 節で示すように、提案モデルにおいて入力項目間のつながりが弱いので、乗法的干渉が強いシステムに対して近似能力が低い。そのような場合、従来のファジィ推論モデルのほうがよい結果を得ることがある。

二つ目は、入力項目の個数の制約である。2.8 節では提案モデルによる 4 入力の非線形関数の同定が行われる。第 6 章と第 7 章では、4 入力項目を有する倒立振子システムの安定化制御／振り上げおよび安定化制御が行われる。また、6 入力項目を扱う二重倒立振子システムの安定化制御^[91,92]も成功している。三重倒立振子システムについては、8 入力項目になるが、基本的に同じ考え方で安定化制御器が構築可能である。しかし、入力項目数がさらに増えると、入力項目間の関係が一層複雑になるため、提案モデルでは正確な表現が難しくなる。一方、よく知られているように、通常の制御系はほとんど 2 入力項目の「1 次遅れ+むだ時間系」で近似できる。また、「1 次遅れ+むだ時間系」で近似できない高次制御系の場合、いくつかのサブグループに分割し、各サブグループにそれぞれ提案モデルが適用できる。

三つ目の制約は、第 3 章に関わるが、表現能力を高め、状況変化に対応できるため動的重視度が必要になってくる。その場合、提案モデルのシンプルさを維持するため、各動的重視度の変動量変数が一つか二つまでの入力項目を前件部変数にすることが望まれる。実際には、第 5 章の軌道追従制御では速度の重視度を決めるのに速度と加速度を前件部変数に選んでいる。第 6 章と第 7 章の倒立振子システムの安定化制御／振り上げおよび安定化制御では、四つの動的重視度の変動量変数がすべて振子の角度だけを前件部変数としている。二重倒立振子システムの安定化制御の場合^[91,92]では、6 入力項目に対して各動的重視度の変動量変数がいずれも両振子の角度を前件部変数にしている。したがって、各動的重視度の変動量変数の前件部変数として、基本的に密接に関係する一つか二つの入力項

目を選べばよい。

このように本提案モデルはいくつかの制約があるが、従来のファジィ推論モデルに比べて優れた特徴を数多く持っている。以下では、本提案のファジィ推論モデルの主な特徴を列挙する。

2.4.1 入力項目の優先順位の差別化

従来のファジィ推論モデルでは各入力項目を平等に扱うため、倒立振子システムの安定化に代表されるように振子の角度制御を台車の位置制御よりも優先的に行わなければならない問題に対してそのままの適用が難しい。本提案モデルでは、重視度を導入し、式(2-7)のように各 SIRM の推論結果の重視度付き総和をモデルの出力としているため、各入力項目の値が同じであれば、重視度が大きいほど対応する入力項目のモデルの出力への寄与が大きくなる。その結果、重視度の大きい入力項目はモデルの出力を左右し、制御対象を所定の方向に制御することが可能になる。すなわち、重視度によって各入力項目の優先順位を表している。重視度が大きければ優先順位が高く、重視度が小さければ優先順位が低いように、各入力項目を明確に差別化することが可能になる。例えば第 6 章の倒立振子システムの安定化制御において、振子の角度が大きいときに振子の角度制御を優先的に行い、振子がほぼ倒立になるときに台車の位置制御を開始するように四つの入力項目の重視度を設定することによって、安定化制御を短時間で簡単に実現できる。

2.4.2 重視度の調整で望ましい制御結果

個別のルールの重みを調整してルールの働きを制御する研究^[48,60]も行われているが、ルールと制御結果の関係が必ずしも明確ではない。制御の観点からみれば、個々のルールというよりもむしろ入力項目の働きを直接に操作したほうがオペレータにとって操作しやすい。本提案モデルでは、ルールではなく直接入力項目の重視度を調整することで入力項目のシステムへの影響を強調したり抑制したりすることができる。例えば 1 次遅れ系の制御において、偏差を強調すれば立ち上がりが早くなり、偏差の 1 階差分を強調すれば振動を小さく抑える場合が考えられる。また、すべてのファジィルールを固定した場合制御結果を変更しようとする、従来のファジィ推論モデルではスケーリングファクタを調整するしか方法がないが、本提案モデルではスケーリングファクタだけではなく各入力項目の重視度の相対関係なども調整できるので、様々な目的にあった結果を得ることが可能である。

2.4.3 ルール数の大幅削減

すでに 2.1 で述べたように、従来のファジィ推論モデルでは入力項目数の増加に伴って設定可能な最大ルール総数が指数的に増大してしまう問題がある。例えば、システムの各入力項目の台集合の分割数を m_i ($i=1,2,\dots,n$) とすれば、従来のファジィ推論モデルでは設定できる最大ルール総数は、

$$\text{従来のファジィ推論モデルの最大ルール総数} = \prod_{i=1}^n m_i \quad (2-8)$$

で与え、すべての入力項目の台集合の分割数の積になる。したがって、入力項目が一つ増えれば設定可能な最大ルール総数はその入力項目の台集合の分割数倍に増加してしまう。

それに対し、提案のファジィ推論モデルでは、全システムのルール総数は各 SIRM のルール数の総和になる。各 SIRM のルールの最大個数が対応する入力項目の台集合の分割数に等しいことより、本モデルで設定できる最大ルール総数は、

$$\text{提案のファジィ推論モデルの最大ルール総数} = \sum_{i=1}^n m_i \quad (2-9)$$

で求められ、各入力項目の台集合の分割数の総和になる。その結果、入力項目数の増加に対して、設定可能な最大ルール総数は対応する入力項目の台集合の分割数だけ代数的に増えることにとどまることがわかる。

このルール総数の差異を数値的にとらえるため、ここでは入力項目の数を 2 から 5 までとして、各入力項目の台集合の分割数をすべて 3 または 5 に設定する。この場合、従来のファジィ推論モデルと本提案のファジィ推論モデルでそれぞれ設定できる最大ファジィルール総数を表 2-1 と表 2-2 に示している。台集合の分割数がすべて 3 の場合、表 2-1 のように従来のファジィ推論モデルと本提案のファジィ推論モデルの最大ルール総数の比は、入力項目数が 2 であれば 1.5 倍になるが、入力項目数が 5 であれば 16.2 倍になる。台集合の分割数がすべて 5 の場合は、表 2-2 のようにその比は、入力項目数が 2 であれば 2.5 倍になるのに対して、入力項目数が 5 であれば 125.0 倍にもなる。従って、大規模なシステムになるほど、また入力項目の台集合の分割が細くなるほど、本提案モデルでルール数の大幅な削減が行われることがわかる。

表 2-1 分割数が 3 である場合の最大ルール総数の比較

入力項目数	従来の ファジィ推論モデル	提案の ファジィ推論モデル
2	9	6
3	27	9
4	81	12
5	243	15

表 2-2 分割数が 5 である場合の最大ルール総数の比較

入力項目数	従来の ファジィ推論モデル	提案の ファジィ推論モデル
2	25	10
3	125	15
4	625	20
5	3125	25

2.4.4 パラメータ数の大幅削減

設計パラメータの個数が多いと、操作性が悪くなり、ハードウェア化も難しくなる。したがって、ファジィシステムにおいて少ない設計パラメータで同じあるいはそれ以上の性能が実現できることが望まれる。(入出力項目のスケーリングファクタを除いて)従来のファジィ推論モデルでは、設計パラメータとして前件部変数のメンバーシップ関数を決めるパラメータと、後件部変数のメンバーシップ関数を決めるパラメータがある。本提案モデルでは、設計パラメータとして前件部変数、後件部変数のメンバーシップ関数を決めるパラメータの他、入力項目数と同じ個数の重視度も必要である。

後件部変数のメンバーシップ関数として、予めいくつかを定義しておいてルールを作るときにはその中から選ぶやり方があるが、ルールごとに異なるメンバーシップ関数を与える手法が学習などでよく利用され、より一般的といえる。そこで、後件部変数のメンバーシップ関数がルールごとに異なる場合について、従来のファジィ推論モデルと本提案モデルの最大の設計パラメータ総数の比較を行う。三角形またはガウス型メンバーシップ関数のように前件部変数の各メンバーシップ関数を決めるパラメータ数をすべて 2 個として、後件部変数の各メンバーシップ関数を高さ 1 の (パラメータ数が 1 個である) 実数値シングルトンとする。同じく各入力項目の台集合の分割数を m_i ($i=1,2,\dots,n$) とすれば、従

来のファジィ推論モデルで最大の設計パラメータ総数を、

$$\text{従来のファジィ推論モデルの最大パラメータ総数} = 2 \cdot \sum_{i=1}^n m_i + \prod_{i=1}^n m_i \quad (2-10)$$

で与えるのに対して、本提案のファジィ推論モデルで最大の設計パラメータ総数を、

$$\text{提案のファジィ推論モデルの最大パラメータ総数} = 2 \cdot \sum_{i=1}^n m_i + \sum_{i=1}^n m_i + n \quad (2-11)$$

で求める。

式(2-10)の右辺第 1 項はすべての前件部変数のメンバーシップ関数を決めるのに必要なパラメータ数を意味し、第 2 項はすべての後件部変数のシングルトン型メンバーシップ関数を決めるのに必要なパラメータであり、設定可能な最大ルール総数に等しい。式(2-11)の右辺第 1 項は式(2-10)の場合とまったく同じであるが、第 2 項は設定可能な最大ルール総数と同じ個数になる後件部変数のメンバーシップ関数のパラメータ総数を表し、第 3 項は入力項目数と同じ個数の重視度の個数を表す。

表 2-3 分割数が 3 である場合の最大設計パラメータ総数の比較

入力項目数	従来の ファジィ推論モデル	提案の ファジィ推論モデル
2	21	20
3	45	30
4	105	40
5	273	50

表 2-3 には、前件部変数のメンバーシップ関数の台集合の分割数がすべて 3 である場合について両モデルの最大設計パラメータ総数を示している。本提案モデルでは、入力項目数と同じ個数の重視度を導入しているため、入力項目数が少ない場合は最大の設計パラメータ総数は従来のファジィ推論モデルとほぼ同程度になっている。しかし、入力項目数が増えると、設定可能な最大ルール総数は従来のファジィ推論モデルでは指数的に増加するのに対して、本提案モデルでは代数的にしか増えない。設定可能な最大ルール総数と同じ個数のパラメータが必要であるので、表 2-3 のように本提案モデルでは最大の設計パラメータ総数を大幅に減らすことができる。また、設定可能な最大ルール総数に比べて重視度

の個数が無視できるので、本提案モデルでは、減らしたルール数とほぼ同じ個数のパラメータが削減できることがわかる。

なお、分解型ファジィシステムモデル^[67]では、元のシステムがいくつかの独立したサブシステムに分解できることを条件として設計パラメータの総数の削減を図っているが、完全分解の場合のみ本提案手法とほぼ同じ個数のパラメータを持ち、それ以外の場合は本手法よりも多くのパラメータを必要とする。また、その手法では設定可能な最大ルール総数が従来手法と全く同じであり、本提案手法のようにルール数およびパラメータ数をともに削減することはできない。

2.4.5 ルールの設定簡単化

複数入力ファジィシステムの場合、従来のファジィ推論モデルでは一つのルールを設定するのにすべての入力項目を同時に考慮しなければならないので、専門家にとってもかなり大変な作業になる。そのため、入力項目の数が増えると、ファジィルールの手動設定はほとんど不可能になる。一方、本提案モデルではすべてのルールの前件部に入力項目が一つしかないので、ルールを設定するときに対象となる入力項目とシステムの出力との関係だけを考えればよい。しかも、その設定は入力項目数が増えても変わらない。従って、設定時の難しさはある程度抑えることができる。

2.4.6 演算時間の短縮

従来のファジィ推論モデルの式(2-2)、式(2-3)と、本提案モデルの式(2-5)、式(2-6)、式(2-7)に基づいて、各前件部変数の台集合の分割数がすべて 3 である場合について、それぞれ必要な加算、乗算、除算の計算回数を表 2-4 に示す。

従来のモデルでは合成のときに除算が 1 回だけ行われるのに対して、提案モデルでは各 SIRM の推論結果を求めるときにそれぞれ 1 回の除算が必要である。その結果、提案モデルでは除算回数が入力項目数と同じになる。しかし、従来のモデルでは、各ルールの適合度の計算において各入力項目のファジィグレードの乗算が行われ、合成演算において各ルールの適合度と後件部変数の実数出力値との乗算、その乗算結果のすべてのルールについての総和、適合度のすべてのルールについての総和が行われる。入力項目数が増えれば、設定可能な最大ルール総数が指数的に大きくなるので、表 2-4 のように従来のモデルでは必要な加算と乗算の回数が急速に増加することがわかる。一方、本提案モデルでは、式(2-7)の中の加算と乗算が必要であるものの、各ルールの前件部に入力項目が 1 つしかないこと

から、前件部の適合度はその前件部変数のファジィグレードそのものとなり、乗算を必要としない。しかも、SIRM ごとに合成演算が行われ、各合成演算における乗算回数が前件部変数の台集合の分割数と同じになり、加算回数がその分割数の約 2 倍になる。したがって、本提案モデルでは必要な加算回数と乗算回数は入力項目数にほぼ比例することにとどまり、従来のモデルに比べて大幅に減少する。これによって、シミュレーションおよび実機実験における演算時間が短縮できる。

表 2-4 分割数が 3 である場合の演算回数の比較

入力項目数	演算種類	従来の ファジィ推論モデル	提案の ファジィ推論モデル
2	加算	16	9
	乗算	18	8
	除算	1	2
3	加算	52	14
	乗算	81	12
	除算	1	3
4	加算	160	19
	乗算	324	16
	除算	1	4
5	加算	484	24
	乗算	1215	20
	除算	1	5

2.4.7 ハードウェア化のしやすさ

ファジィシステムを実システムに適用するためには、通常それをハードウェア化する。その手法がいくつか提案されているが、その中で推論速度が最も速いのは仮想ページング方式^[104]である。仮想ページング方式は、ルックアップテーブルを用いてファジィシステムの推論結果を予めメモリに直接書き込んでおき、実際の入力データをアドレスデータとしてメモリに渡して対応する推論結果をメモリから引き出す方式である。従来のファジィ推論モデルをこの仮想ページング方式で実現する場合に、入力項目の個数または入力項目の分解能の総ビット数が大きいと、各入力値の組み合わせ数が増え、必要なメモリの容量が莫大になってしまう。現実には、入力項目の個数と分解能の総ビット数に制約を設け、

さらに補間手法^[102-104]を用いるなど工夫が行われている。本提案モデルでは、設定可能な最大ルール総数が大幅に削減でき、しかも SIRM を設計単位にしている。そして各 SIRM は 1 入力対応になっており、他の入力項目の影響を受けないので、たとえ入力項目の分解能が増やされても 1 枚のメモリチップで対応可能である。したがって、各 SIRM の推論結果をそれぞれ 1 枚のメモリチップに記憶させることによって、メモリに対する要求が格段に下げられ、多入力ファジィシステムのハードウェア化も実現可能になる。

2.5 「1 次遅れ+むだ時間系」への適用^[105,106]

提案した SIRM_s 固定重視度結合型ファジィ推論モデルは、構造が簡単であるにもかかわらず制御結果が改善できることを検証するため、まずよく知られている典型的な「1 次遅れ+むだ時間系」を制御対象として、提案手法と従来手法の制御性能の比較を行うことにする。

「1 次遅れ+むだ時間系」の伝達関数は、

$$G(s) = \frac{K \cdot e^{-Ls}}{1 + T \cdot s} \quad (2-12)$$

で与えられる。ここで、K、L、T はそれぞれプロセスゲイン、むだ時間、および時定数を表す。むだ時間と時定数の比 (L/T) の小さい順に、遅れ系、中間系、むだ時間系に分類でき、むだ時間が支配的になるほど制御が難しくなるといわれている^[60]。実際には、表 2-5 に示す三つのプラント^[60]について、目標値 1.0 に対して 0.1 秒のサンプリング周期で制御シミュレーションを行う。この三つのプラントは番号順にそれぞれ遅れ系、中間系、むだ時間系になっている。

表 2-5 「1 次遅れ+むだ時間系」のパラメータ

番号	プラントパラメータ		
(1)	K=1.0,	L=1.0,	T=10.0
(2)	K=1.0,	L=1.0,	T=1.0
(3)	K=1.0,	L=1.0,	T=0.1

従来のファジィ推論モデルで「1次遅れ+むだ時間系」のファジィ制御器を構築するには、通常正規化後の偏差 x_1 と偏差の1階差分 x_2 を前件部変数として操作量の変化分 Δy を後件部変数とする。そして、ファジィルールは表 2-6 のように 2 入力 1 出力のルールテーブルを用いて設定する^[60]。ただし、両前件部変数の台集合をともに 3 分割し、各分割に対応するメンバーシップ関数を図 2-2 のように三角形ないし台形に定義する。ラベル NB、ZO、PB は前件部変数の台集合上に定義されるメンバーシップ関数を代表し、それぞれ **N**egative **B**ig、**Z**er**O**、**P**ositive **B**ig を意味する。

表 2-6 従来のファジィ推論モデルによる「1次遅れ+むだ時間系」のファジィルール

後件部変数 Δy		x_2		
		NB	ZO	PB
x_1	NB	-1.0	-1.0	0.0
	ZO	-1.0	0.0	1.0
	PB	0.0	1.0	1.0

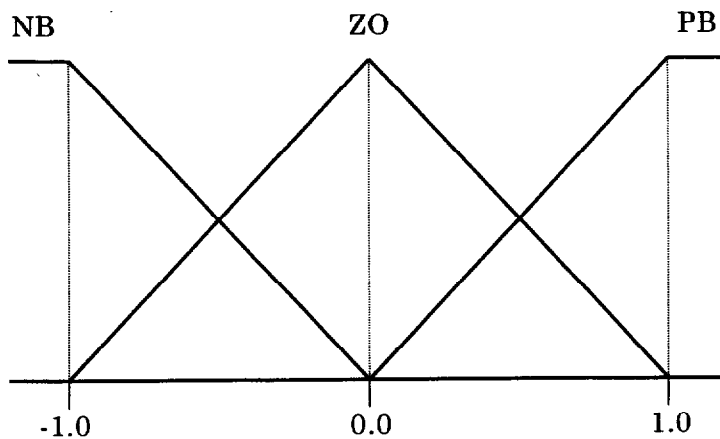


図 2-2 メンバーシップ関数

一方、本提案モデルでは、正規化後の偏差 x_1 と偏差の 1 階差分 x_2 を入力項目とし、操作量の変化分 Δy を出力項目として、「1 次遅れ+むだ時間系」のファジィ制御器を構築する。両入力項目に対してそれぞれ、入力項目の値が負であれば操作量を減少させ、入力項目の値が正であれば操作量を増加させるように、表 2-7 と表 2-8 の単一入力ルール群を設定する。表 2-7 中の Δy_1 と表 2-8 中の Δy_2 はともに出力項目 Δy に対応する中間変数を表す。ラベル NB、ZO、PB は同じく図 2-2 に定義されている前件部変数のメンバーシップ関数である。そして、操作量の変化分 Δy は、中間変数 Δy_1 、 Δy_2 の推論結果の重視度付き総和で与えられる。なお、表 2-6 中のルール総数が 9 個であるのに対して、本モデルではルール総数が 6 個になっている。

表 2-7 偏差についての単一入力ルール群

前件部変数	後件部変数
x_1	Δy_1
NB	-1.0
ZO	0.0
PB	1.0

表 2-8 偏差の 1 階差分についての単一入力ルール群

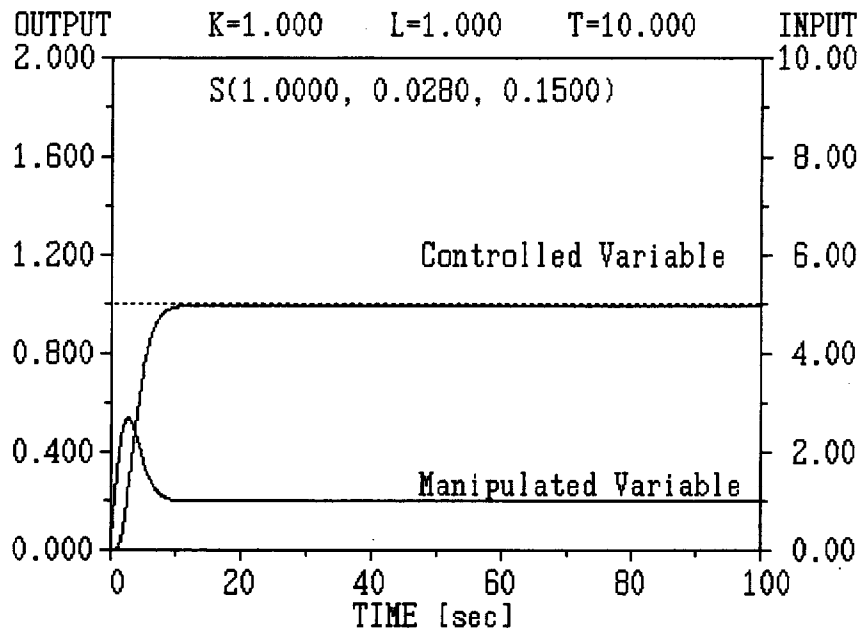
前件部変数	後件部変数
x_2	Δy_2
NB	-1.0
ZO	0.0
PB	1.0

図 2-3、図 2-4、図 2-5 には、この三つの「1 次遅れ+むだ時間系」についてのシミュレーション結果を示す。従来のファジィ推論モデルの場合、ファジィルールを固定しておく、後は調整できるパラメータは入出力項目のスケーリングファクタのみになる。従来モデルによる図(a)は、オーバーシュートなしで振動と定常誤差ができるだけ小さく立ち上がり時間がなるべく短くなるように、偏差と偏差の 1 階差分のスケーリングファクタおよび操作量の変化分のスケーリングファクタを試行錯誤で調整して、この 4 項目から総合的に判断して最もよかった制御結果である。これに対して本提案モデルによる図(b)は、図(a)と全く同じスケーリングファクタを使用し、偏差と偏差の 1 階差分の重視度を試行錯誤で調整して得た制御結果である。図 2-3 において、記号 S(1.0000, 0.0280, 0.1500)の括弧中の数値は順に偏差、偏差の 1 階差分、操作量の変化分のスケーリングファクタを意味する。記号 W(1.1690, 1.0400)の括弧中の数値は順に偏差と偏差の 1 階差分の重視度を表す。また、点線は目標値、上の曲線は制御対象の出力（制御量）の時間応答、下の曲線は操作量の時間応答を表す。

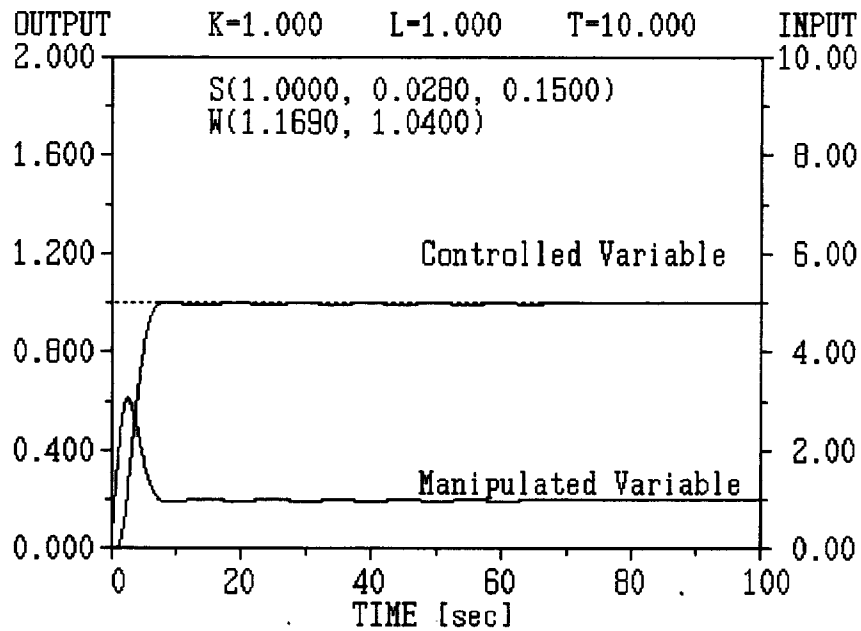
「1 次遅れ+むだ時間系(1)」の場合、図 2-3(a)に示すように、従来のファジィ推論モデルではわずかではあるが定常誤差が残っている。それに対し、図 2-3 (b)のように本提案モデルでは最初は振動が少し起こっているが、やがて目標値に収束していく。また、制御開始から目標到達までの目標到達時間は、従来モデルの場合の制御開始から安定になるまでの時間より 25%ほど短縮されている。さらに、図 2-3(a)における偏差の絶対値の時間の重み付き積分 (ITAE, Integral of Time multiplied by Absolute Error)¹⁷⁴⁾は約 106.6 であるのに対して、図 2-3(b)の ITAE は約 80.8 であり、20%以上減少している。

「1 次遅れ+むだ時間系(2)」については図 2-4(a)のように、従来モデルによる制御結果に定常誤差が少し残っている。それに比べて、提案モデルでは図 2-4(b)に示すように最初に振動が少しあるものの、定常誤差が完全になくなっている。さらに、目標到達時間は従来モデルの場合より約 20%短くなっている。なお、図 2-4(a)の ITAE は約 46.5 であるのに対して、図 2-4(b)の ITAE は約 41.1 となり、10%以上小さくなっている。

「1 次遅れ+むだ時間系(3)」については図 2-5(a)に示すように、従来モデルでは制御量は目標値に達した後しばらく振動してやがて目標値に落ち着いている。図 2-5(b)からわかるように、同様に提案モデルの場合も目標到達してから安定になるまで少し振動が生じている。しかし、従来モデルの場合に比べて、目標到達時間が 20%近く短縮されている。また、図 2-5(a)の ITAE は約 22.7 であるのに対して、図 2-5(b)の ITAE は約 17.3 であり、20%以上減っている。

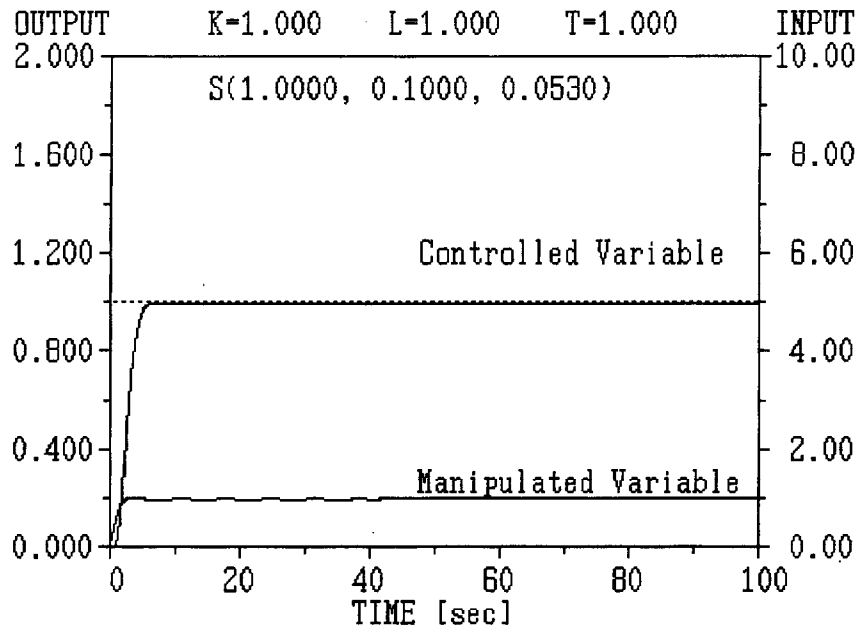


(a) 従来のファジィ推論モデル

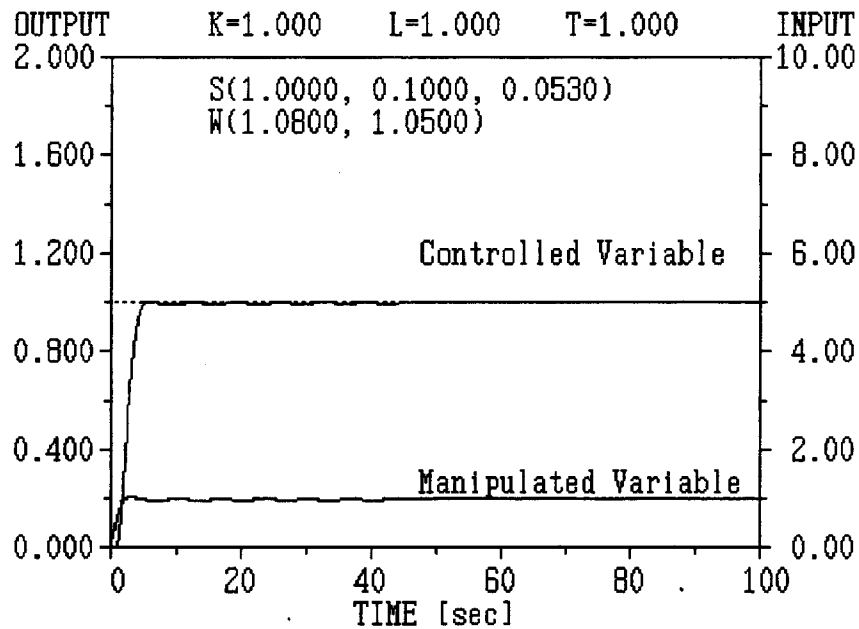


(b) SIRM_s 固定重視度結合型ファジィ推論モデル

図 2-3 「1次遅れ+むだ時間系(1)」についての制御結果

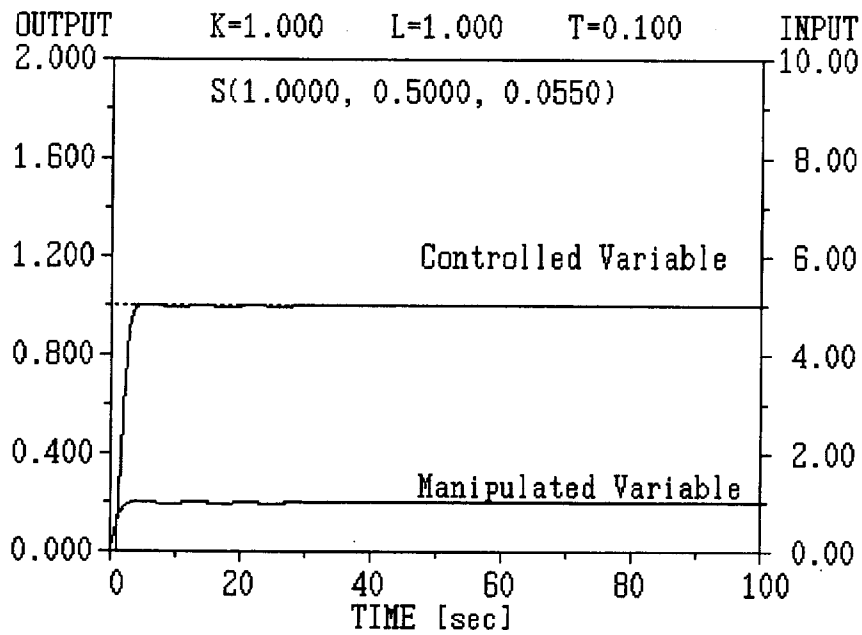


(a) 従来のファジィ推論モデル

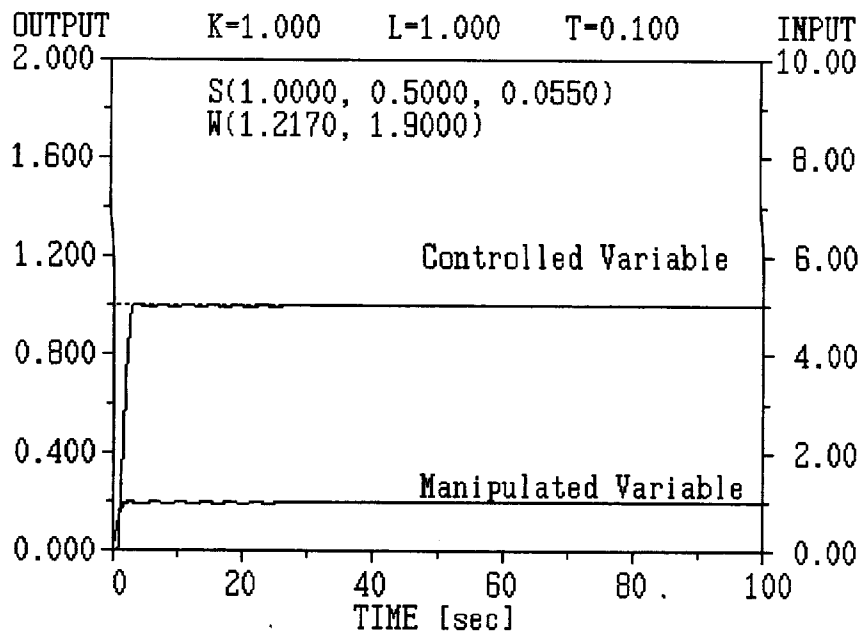


(b) SIRM_s 固定重視度結合型ファジィ推論モデル

図 2.4 「1次遅れ+むだ時間系(2)」についての制御結果



(a) 従来のファジィ推論モデル



(b) SIRM固定重視度結合型ファジィ推論モデル

図 2-5 「1次遅れ+むだ時間系(3)」についての制御結果

2.6 「2次遅れ+むだ時間系」への適用^[105,106,113]

2.5 では、「1次遅れ+むだ時間系」についての制御シミュレーションを通じて、従来のファジィ推論モデルに比べて、SIRMs 固定重視度結合型ファジィ推論モデルを用いることによって制御結果が改善できることを確認した。本節では、典型的な「2次遅れ+むだ時間系」に対して、本提案モデルと従来のファジィ推論モデルの比較を行う。

ここで扱う2次遅れ系の伝達関数を、

$$G(s) = \frac{A}{s^2 + B \cdot s + C} \cdot e^{-Ls} \quad (2-13)$$

を示す。ただし、A、B、Cは係数であり、Lはむだ時間である。ここでは具体的に表2-9に示す三つの2次遅れ系^[38]を制御対象とする。制御対象(1)、(2)、(3)はそれぞれ非振動減衰系、減衰振動系、減衰振動+むだ時間系である。なお、目標値をともに60.0として、サンプリング周期を0.1秒とする。

表 2-9 「2次遅れ+むだ時間系」のパラメータ

番号	プラントパラメータ
(1)	A=1.2280, B=0.6380, C=0.0340, L=0.0000
(2)	A=19.540, B=0.4000, C=0.5400, L=0.0000
(3)	A=0.2310, B=0.0994, C=0.0064, L=1.0000

2次遅れ系を制御するのに、正規化後の偏差 x_1 、偏差の1階差分 x_2 、偏差の2階差分 x_3 をファジィ制御器の入力項目として、操作量の変化分 Δy をファジィ制御器の出力項目とする。入力項目が三つあるので、従来のファジィ推論モデルでは3入力1出力のファジィルールを設定することになる。各入力項目の台集合をすべて3分割した場合、3入力1出力のファジィルールを表2-10のように構成することができる^[38]。ただし、ルールテーブルは最大2入力にしか対応できないため、3入力のうち偏差を主要条件として、偏差の1階差分と2階差分に関する各サブグループのルールテーブルを表示するようにしている。また、前件部変数のラベルNB、ZO、PBは「1次遅れ+むだ時間系」の場合と同じで、図2-2に定義したものをを用いている。

表 2-10 従来のファジィ推論モデルによる「2次遅れ+むだ時間系」のファジィルール

If $x_1 = \text{NB}$ Then

後件部変数 Δy		x_3		
		NB	ZO	PB
x_2	NB	-1.000	-1.000	-0.667
	ZO	-1.000	-0.667	-0.333
	PB	-0.667	-0.333	0.000

If $x_1 = \text{ZO}$ Then

後件部変数 Δy		x_3		
		NB	ZO	PB
x_2	NB	-0.667	-0.333	0.000
	ZO	-0.333	0.000	0.333
	PB	0.000	0.333	0.667

If $x_1 = \text{PB}$ Then

後件部変数 Δy		x_3		
		NB	ZO	PB
x_2	NB	0.000	0.333	0.667
	ZO	0.333	0.667	1.000
	PB	0.667	1.000	1.000

一方、本提案モデルでファジィ制御器を構成する場合、まず各入力項目に対してそれぞれ表 2-11、表 2-12、表 2-13 のように SIRM を設定する。ラベル NB、ZO、PB は図 2-2 に定義したものをを用いている。各 SIRM の後件部変数 Δy_i ($i=1,2,3$) はすべて出力項目 Δy に対応する中間変数を表す。各 SIRM の構成からわかるように、前件部変数の値が負であれば後件部変数の出力を負にし、前件部変数の値が正であれば後件部変数の出力を正にするようにしている。各 SIRM の推論結果の重視度付き総和が出力項目の値すなわち操作量の変化分になるので、偏差または偏差の差分が小さくなるように操作量を調整することが可能である。なお、ファジィルール総数は、従来モデルの場合において 27 個必要であるのに対して、提案モデルの場合においては、わずか 9 個となっている。

表 2-11 偏差についての単一入力ルール群

前件部変数	後件部変数
x_1	Δy_1
NB	-1.0
ZO	0.0
PB	1.0

表 2-12 偏差の 1 階差分についての単一入力ルール群

前件部変数	後件部変数
x_2	Δy_2
NB	-1.0
ZO	0.0
PB	1.0

表 2-13 偏差の 2 階差分についての単一入力ルール群

前件部変数	後件部変数
x_3	Δy_3
NB	-1.0
ZO	0.0
PB	1.0

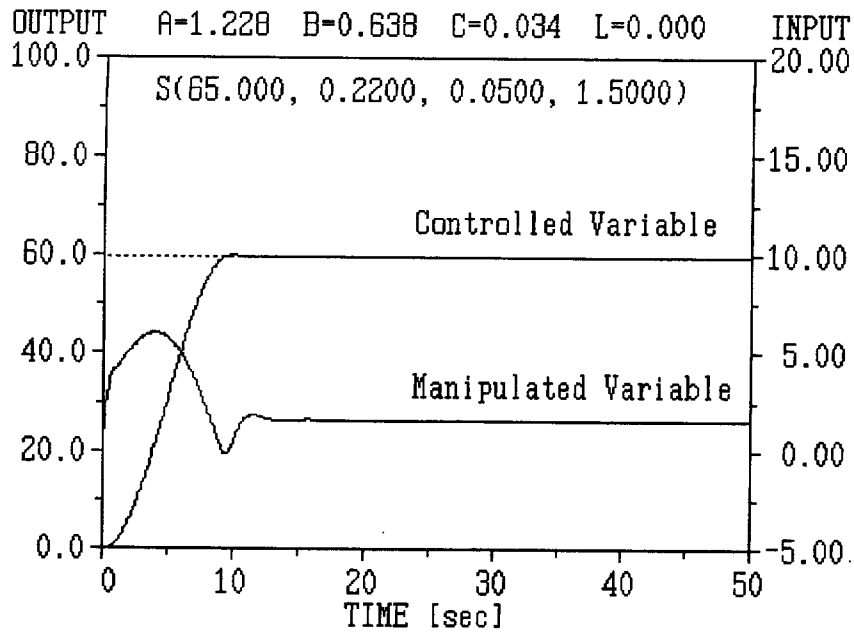
図 2-6、図 2-7、図 2-8 は、それぞれこの三つの制御対象についての制御シミュレーション結果を示す。図 2-6 において、記号 S(65.000, 0.2200, 0.0500, 1.5000)の括弧中の数値は順に偏差、偏差の 1 階差分、偏差の 2 階差分、操作量の変化分のスケーリングファクタを意味し、記号 W(5.5110, 2.8856, 1.9000)の括弧中の数値は順に各入力項目の重視度を意味する。

「2 次遅れ+むだ時間系(1)」について、図 2-6 のように従来モデルに比べて提案モデルではオーバーシュートをほとんど起こさずに目標到達時間を 40%以上短縮することができる。また、従来モデルの場合の ITAE は約 9694.8 であるのに対して、提案モデルの場合の ITAE はその 1/3 以下の約 3058.1 になっている。

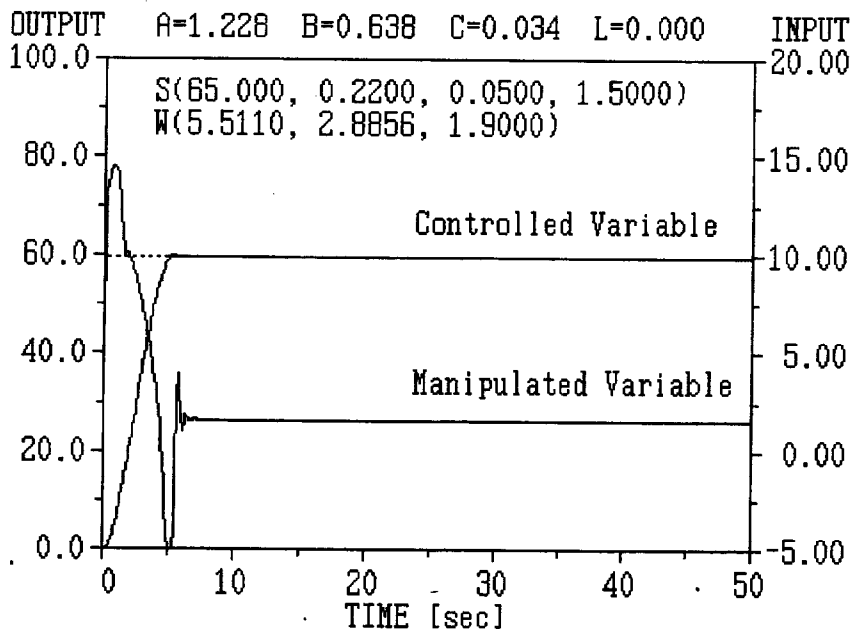
「2 次遅れ+むだ時間系(2)」について、図 2-7 からわかるように提案モデルではオーバーシュートがごくわずか見られるが、目標到達時間が従来モデルの場合に比べて 30%以上短縮できている。しかも、提案モデルの場合の ITAE は従来モデルの場合の約 2061.6 から半分近くの約 1096.2 に減少している。

「2 次遅れ+むだ時間系(3)」については、図 2-8(a)に示すように従来モデルでは目標到達してから振動が発生し、それが長時間にわたって持続することが操作量の時間応答曲線からわかる。それに対して、提案モデルでは目標到達時間が 10%ほど遅れ、ITAE が従来モデルの場合の 33232.9 から 40664.5 に増大しているが、振動はほとんど起きていない。

以上のように「1 次遅れ+むだ時間系」、および「2 次遅れ+むだ時間系」についての制御結果より、提案モデルは従来のファジィ推論モデルに比べて設定可能な最大ルール総数および設計パラメータ総数を大幅に削減できるだけでなく、制御性能も大幅に向上できることを確認した。

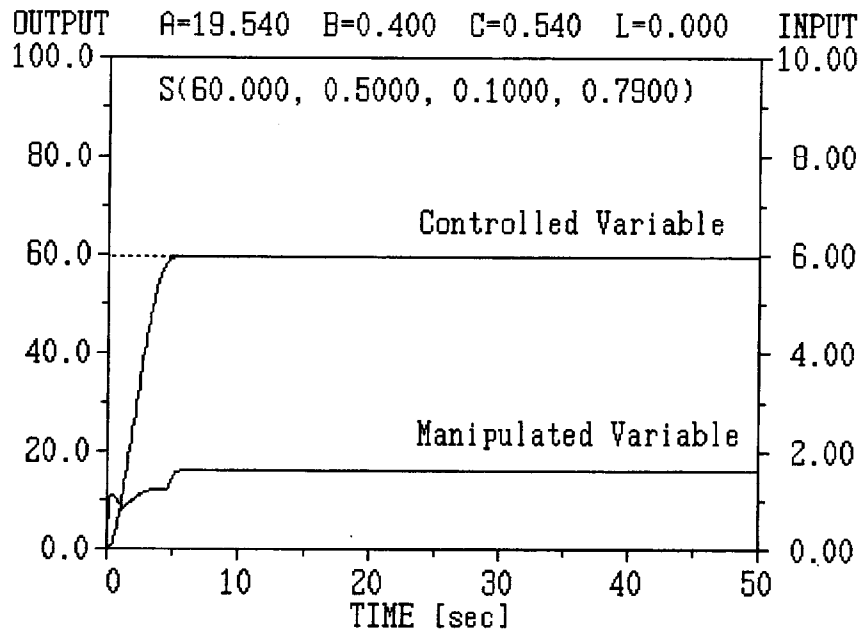


(a) 従来のファジィ推論モデル

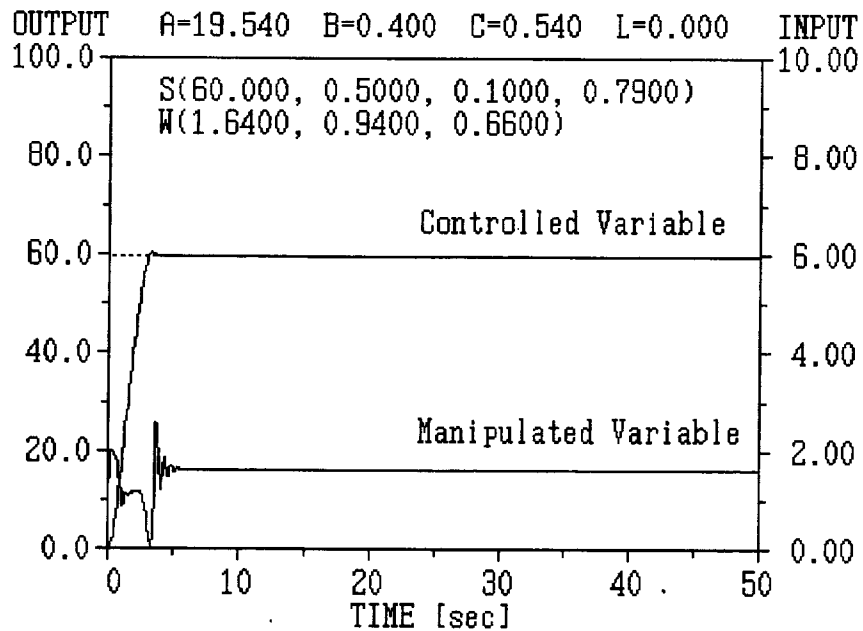


(b) SIRMs 固定重視度結合型ファジィ推論モデル

図 2-6 「2 次遅れ+むだ時間系(1)」についての制御結果

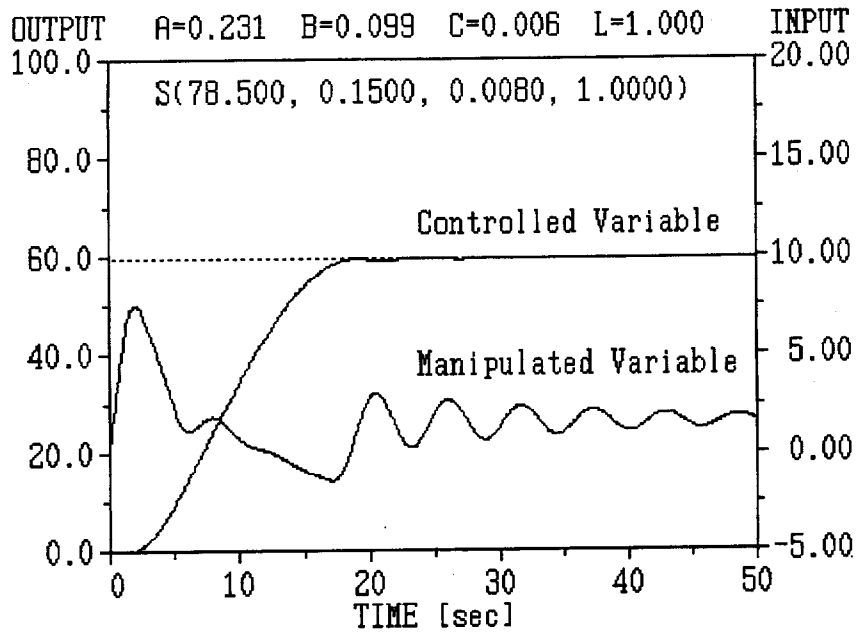


(a) 従来のファジィ推論モデル

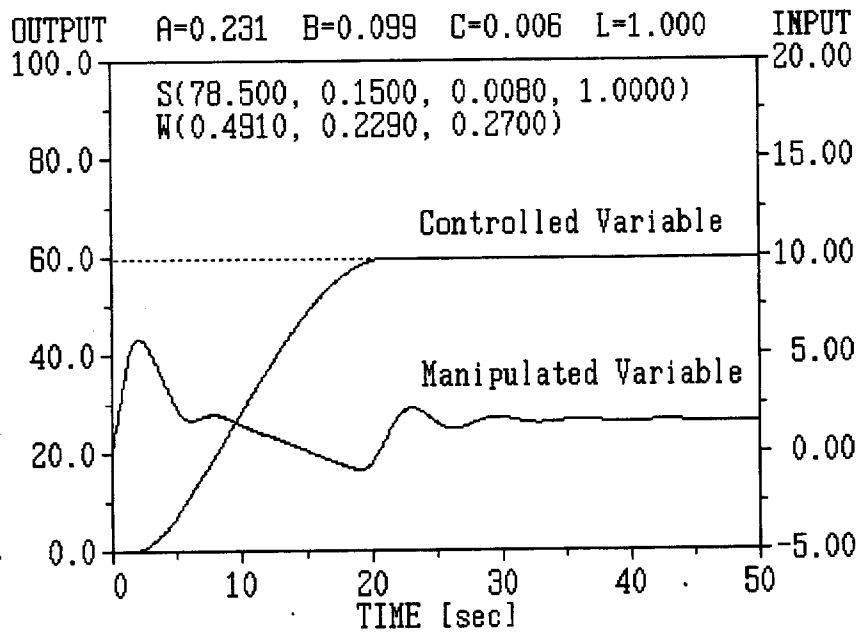


(b) SIRM_s 固定重視度結合型ファジィ推論モデル

図 2-7 「2 次遅れ+むだ時間系(2)」 についての制御結果



(a) 従来のファジィ推論モデル



(b) SIRM_s 固定重視度結合型ファジィ推論モデル

図 2-8 「2 次遅れ+むだ時間系(3)」についての制御結果

2.7 提案モデルの学習アルゴリズム [105,106]

システムが複雑になるにつれて、メンバーシップ関数とファジイルールを設定することが次第に難しくなる。また、たとえ試行錯誤でメンバーシップ関数とファジイルールが設定できるとしても、それは必ずしも最適なものとは限らない。それで、システムの入出力データに基づいてメンバーシップ関数とファジイルールを自動的に最適に作成することが望まれる。ここでは、教師パターン（入力パターンとその入力パターンに対応する真の出力値の組）が得られた場合の学習アルゴリズムを導くことにする。

教師パターン有りの場合、最急降下法が最も有効な学習手法として知られている。最急降下法を用いたメンバーシップ関数とファジイルールの学習アルゴリズム [2,20,54,69,70,80] がすでにいくつか提案されており、ここでも最急降下法を本提案モデルに適用する。ただし、学習しようとするパラメータは前件部変数のメンバーシップ関数のパラメータ、後件部変数の実数出力値、および入力項目の重視度である。

p 番目の入力パターン $(x_1^p, \dots, x_i^p, \dots, x_n^p)$ に対する真の出力を y^{Tp} とする。その教師パターンに対して、実際に提案のファジィ推論モデルの出力が y^{0p} であったとき、評価関数 E^p を、

$$E^p = \frac{1}{2} (y^{Tp} - y^{0p})^2 \quad (2-14)$$

で真の出力と実際の出力の二乗誤差として定義する。

ところで、式(2-5)、式(2-6)、式(2-7)を利用すれば、提案モデルの出力 y^{0p} は、

$$y^{0p} = \sum_{i=1}^n w_i \cdot \frac{\sum_{j=1}^{m_i} A_i^j(x_i^p) \cdot c_i^j}{\sum_{j=1}^{m_i} A_i^j(x_i^p)} \quad (2-15)$$

で表すことができる。すなわち、出力 y^{0p} は学習しようとする各パラメータの関数になっている。ただし、 w_i は SIRM- i に対応する i 番目の入力項目 x_i の重視度であり、 $A_i^j(x_i^p)$ は入力値 x_i^p における SIRM- i の j 番目ルールの入力項目 x_i のメンバーシップ関数 $A_i^j(x_i)$ のファジィグレードであり、 c_i^j は SIRM- i の j 番目ルールの後件部変数の実数出力値である。入力項目の番号は $i=1,2,\dots,n$ 、SIRM- i のルール番号は $j=1,2,\dots,m_i$ である。

一方、評価関数のこれらのパラメータに対するグラジエントベクトルの逆方向にこれらのパラメータを調整していけば、この評価関数が必ず極小値または最小値に収束することが最急降下法によって保証されている。したがって、式(2-14)と式(2-15)から評価関数

の各パラメータに対する偏微分を計算して各パラメータの修正式を求めることによって、簡略化ファジィ推論法をベースにした学習アルゴリズムを導くことができる。そして、教師パターンごとに各パラメータを修正式に基づいて逐次調整することを、評価関数の値が十分小さくなるまで繰り返す。

以下では、入力項目のメンバーシップ関数の形状別に各パラメータの学習アルゴリズムを示す。

2.7.1 ガウス型メンバーシップ関数の場合

入力項目のメンバーシップ関数 $A_i^j(x_i)$ が、

$$A_i^j(x_i) = \exp\left(-\frac{(x_i - a_i^j)^2}{b_i^j}\right) \quad (2-16)$$

でガウス関数として与えられるとする。この場合、メンバーシップ関数を決めるパラメータは中心位置 a_i^j と分散 b_i^j である。したがって、重視度 w_i 、後件部の実数出力値 c_i^j 、メンバーシップ関数のパラメータ a_i^j と b_i^j の修正量はそれぞれ、

$$\Delta w_i(t+1) = \alpha \cdot (y^{Tp} - y^{Op}(t)) \cdot y_i^0(t) \quad (2-17)$$

$$\Delta c_i^j(t+1) = \beta \cdot w_i(t) \cdot (y^{Tp} - y^{Op}(t)) \cdot \frac{h_i^j(t)}{\sum_{k=1}^{m_i} h_i^k(t)} \quad (2-18)$$

$$\Delta a_i^j(t+1) = \gamma \cdot w_i(t) \cdot (y^{Tp} - y^{Op}(t)) \cdot (c_i^j(t) - y_i^0(t)) \cdot \frac{h_i^j(t)}{\sum_{k=1}^{m_i} h_i^k(t)} \cdot \frac{2 \cdot (x_i^p - a_i^j(t))}{b_i^j(t)} \quad (2-19)$$

$$\Delta b_i^j(t+1) = \eta \cdot w_i(t) \cdot (y^{Tp} - y^{Op}(t)) \cdot (c_i^j(t) - y_i^0(t)) \cdot \frac{h_i^j(t)}{\sum_{k=1}^{m_i} h_i^k(t)} \cdot \left(\frac{x_i^p - a_i^j(t)}{b_i^j(t)}\right)^2 \quad (2-20)$$

により求められる。ただし、 t は現在の学習回数を意味し、 α 、 β 、 γ 、 η は学習係数を表す。

2.7.2 三角形メンバーシップ関数の場合

入力項目のメンバーシップ関数 $A_i^j(x_i)$ が二等辺三角形として、

$$A_i^j(x_i) = \begin{cases} 1 - |x_i - a_i^j| / b_i^j; & a_i^j - b_i^j \leq x_i \leq a_i^j + b_i^j \\ 0; & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2-21)$$

で定義される場合は、メンバーシップ関数を決めるパラメータは三角形の中心位置 a_i^j と中心位置からそのメンバーシップ関数の端までの幅 b_i^j になる。したがって、重視度 w_i 、後件部の実数値出力 c_i^j 、メンバーシップ関数の中心 a_i^j と幅 b_i^j の修正量はそれぞれ、

$$\Delta w_i(t+1) = \alpha \cdot (y^{Tp} - y^{Op}(t)) \cdot y_i^0(t) \quad (2-22)$$

$$\Delta c_i^j(t+1) = \beta \cdot w_i(t) \cdot (y^{Tp} - y^{Op}(t)) \cdot \frac{h_i^j(t)}{\sum_{k=1}^{m_i} h_i^k(t)} \quad (2-23)$$

$$\Delta a_i^j(t+1) = \gamma \cdot w_i(t) \cdot (y^{Tp} - y^{Op}(t)) \cdot \frac{(c_i^j(t) - y_i^0(t)) \cdot \text{sgn}(x_i^p - a_i^j(t))}{\sum_{k=1}^{m_i} h_i^k(t) \cdot b_i^j(t)} \quad (2-24)$$

$$\Delta b_i^j(t+1) = \eta \cdot w_i(t) \cdot (y^{Tp} - y^{Op}(t)) \cdot \frac{(c_i^j(t) - y_i^0(t)) \cdot |x_i^p - a_i^j(t)|}{\sum_{k=1}^{m_i} h_i^k(t) \cdot (b_i^j(t))^2} \quad (2-25)$$

により計算される。ただし、 t は現在の学習回数を意味し、 α 、 β 、 γ 、 η は学習係数を表す。また、 $\text{sgn}(x)$ は、

$$\text{sgn}(x) = \begin{cases} 1; & x > 0 \\ 0; & x = 0 \\ -1; & x < 0 \end{cases} \quad (2-26)$$

で示す符号関数を表す。さらに、式(2-24)と式(2-25)が $a_i^j(t) - b_i^j(t) \leq x_i^p \leq a_i^j(t) + b_i^j(t)$ のときに限って成り立つので、それ以外の場合にはこの二つのパラメータを学習しない。

2.8 非線形関数の同定への適用^[105,106]

ここでは、2.7 で導出した学習アルゴリズムを複数入力 1 出力の非線形関数の同定に適用して、本手案モデルが強い非線形性を持つシステムにも対応できることを示す。具体的には、表 2-14 に示す 2 入力 1 出力の非線形関数^[54,68]および 4 入力 1 出力の非線形関数^[67]を同定対象とする。なお、各入力項目の範囲をすべて $[-1.0, +1.0]$ とするので、出力の範囲は $[0.0, 1.0]$ になる。

表 2-14 同定用の非線形関数

番号	関数定義
関数(1)	$y = (2 \cdot x_1 + 4 \cdot x_2^2 + 0.1)^2 / 37.21$
関数(2)	$y = (2 \cdot \sin(\pi \cdot x_1) + \cos(\pi \cdot x_2) + 3) / 6$
関数(3)	$y = (2 \cdot x_1 + 4 \cdot x_2^2 + 0.1)^2 / 74.42 + ((3 \cdot e^{3x_3} + 2 \cdot e^{-4x_4})^{-0.5} - 0.077) / 4.68$
関数(4)	$y = (2 \cdot x_1 + 4 \cdot x_2^2 + 0.1)^2 / 37.21 \cdot (2 \cdot \sin(\pi \cdot x_3) + \cos(\pi \cdot x_4) + 3) / 6$

SIRM の個数が入力項目の個数に等しいことから、本提案モデルによるファジィ同定器は、関数(1)と関数(2)の場合は SIRM を二つ持ち、関数(3)と関数(4)の場合は SIRM を四つ持つ。同定において、入力項目の台集合をすべて 5 等分し、それぞれ一つのメンバーシップ関数を用意する。そして、初期の三角形またはガウス型メンバーシップ関数を、隣同士が値 0.50 で交差するように設定する。また、後件部変数の実数値メンバーシップ関数の初期値をすべて 0.00 にセットする。さらに、各入力項目の重視度の初期値をそれぞれ、関数(1)と関数(2)の場合は 0.50 に、関数(3)と関数(4)の場合は 0.25 に設定する。

入力項目の値が決まればそれを直接に同定用の関数に入力して真の出力が得られるので、その入力と出力の組を教師パターンとする。入力パターンに対して、各 SIRM の推論結果の重視度付き総和 y^{0p} がファジィ同定器の実際の出力になる。すべての教師パターンについての真の出力と実際の出力の平均自乗誤差

$$MSE = \frac{1}{P} \sum_{p=1}^P (y^{Tp} - y^{0p})^2 \quad (2-27)$$

がある閾値以下になるまで、2.7 で述べた学習アルゴリズムで各パラメータの学習を続け

る。ただし、学習係数 α 、 β 、 γ 、 η は試行錯誤で最終的にそれぞれ 0.10、0.10、0.01、0.01 に設定する。学習終了後、ファジィ同定器に教師パターンとは異なるテストパターンを与え、テストパターンに対する式(2-27)の平均自乗誤差を評価誤差として計算し、さらに真の出力と実際の出力との差の中から絶対値が最大となるものを最大誤差として求める。

まず、関数(1)と関数(2)に対しては、文献^[54]に合わせて入力項目のメンバーシップ関数を二等辺三角形とする。また、教師パターンとしてランダムに生成したデータ 20 組を用いて閾値 0.001 まで学習を行う。それから、テストパターンとして用意したランダムデータ 20 組を学習後のファジィ同定器に提示して、評価誤差と最大誤差を計算する。表 2-15 と表 2-16 にそれぞれ 10 回のシミュレーション結果を示している。ただし、各回のシミュレーションにおいて、それぞれ異なる教師パターンをランダムに生成するが、テストパターンは同じものを使用している。文献^[54]によれば、関数(1)について同定学習の回数と評価誤差がそれぞれ 19 回と 0.0171 になっており、関数(2)については学習回数と評価誤差がそれぞれ 19 回と 0.0038 になっている。表 2-15 から、本提案モデルによる関数(1)のファジィ同定器は学習回数がシミュレーションによって大きく変わり、その平均は約 107 回であり、文献^[54]の場合より数倍も多い。しかし、10 回のシミュレーションにおける平均の評価誤差は約 0.0059 であり、文献^[54]の結果の半分以下になっている。表 2-16 から、本提案モデルによる関数(2)のファジィ同定器は学習回数が 12 回から 37 回まで変化するが、その平均値 20 回は文献^[54]の場合とほぼ同じである。しかも、評価誤差は 10 回のシミュレーションのうち 8 回は小さくなっており、その平均値は文献^[54]の結果に比べて約 20%ほど減少している。また、最大誤差は全シミュレーションを通じて安定している。なお、文献^[54]では同定器のルール総数が 16 個であるのに対して、ここではルール総数がわずか 10 個である。

次に、同じく関数(1)と関数(2)に対して、文献^[68]のように入力項目のメンバーシップ関数を二等辺三角形とする。教師パターンとしてランダムデータ 49 組を用いる。そして、各入力項目を 0.04 刻みで順次変えていった得た 2601 (=51×51) 個の入出力データをテストパターンとする。関数(1)について、閾値 0.0035 で行った 10 回のシミュレーション結果を表 2-17 に示す。なお、閾値をもっと小さく設定すると、収束まで学習回数がかかったり、収束できなかつたりすることがある。この表からわかるように、ファジィシングルトン型学習法の場合^[68]では平均学習回数と平均評価誤差がそれぞれ約 19 回と 0.0029 であるのに対して、本提案モデルによるファジィ同定器ではほとんどの場合において学習回数が多く必要であり、評価誤差も少し大きくなっている。一方、関数(2)については、閾値を 0.0015 に設定したときの 10 回のシミュレーション結果を表 2-18 に示す。ファジィシングルトン型学習法の場合^[68]の平均学習回数 10 回と平均評価誤差 0.0039 に比べると、本提案モデルによるファジィ同定器では学習回数が半減し、数回で学習が収束してい

る。またほとんどの場合、評価誤差の値は半分近くまで減少し、最大誤差も小さく抑えられていることがわかる。

図 2-9 に、2601 個の入力パターンに対して、同定関数(1)の真の出力と表 2-17 の（最大誤差が一番大きい）学習番号 2 の同定器による実際の出力を示す。同定関数(1)において入力項目 x_2 が自乗の形で出力値に寄与することから、同定関数(1)は入力項目 x_2 に関して対称的になる。図 2-9(a)に示すように、入力項目 x_1 が+1.0 である場合、入力項目 x_2 の値が+1.0 または-1.0 であれば同定関数(1)は大きい値になる。これに対し、図 2-9(b)に示すように本同定器はその二カ所をまだ十分学習できておらず、そこで大きな誤差を発生している。図 2-10 に、同定関数(2)の真の出力と表 2-18 の（最大誤差が一番大きい）学習番号 1 の同定器による実際の出力を示す。この図からわかるように、同定関数(2)は出力曲面がかなり複雑になっているが、大きな出力値がほぼ一カ所に集中している。本同定器はこのような特徴をほぼ学習できて、真の出力曲面に近い形の出力曲面を形成している。なお、同定関数(1)において両入力項目が乗法的に干渉しているのに対して、同定関数(2)において両入力項目が加法的に干渉している。実際に、 $x_1 \times x_2$ のような乗法的干渉の強いシステムに対して、本提案モデルよりもむしろ従来のファジィ推論モデルのほうは同定結果がよいことがシミュレーションで確認できている。したがって、本提案モデルで乗法的干渉について表現能力が弱い、加法的干渉について表現可能である。

最後に、4 入力 1 出力の関数(3)と関数(4)について、入力項目のメンバーシップ関数をガウス型メンバーシップ関数としてファジィ同定器を構築する。まず、文献^[67]と全く同じ教師パターンを使って同じ閾値 0.001 に対してファジィ同定器を学習した後、文献^[67]と全く同じテストパターンを用いて動作をチェックしたところ、関数(3)については評価誤差と最大誤差が 0.0031 と 0.1107 になっており、関数(4)については評価誤差と最大誤差が 0.0031 と 0.1734 になっている。ちなみに文献^[67]では、関数(3)に対して評価誤差と最大誤差が 0.0063 と 0.1618 であり、関数(4)に対して評価誤差と最大誤差が 0.0069 と 0.1939 である。次に、文献^[67]と同じ方法で、教師パターンとテストパターンをそれぞれランダムに 20 組生成することにする。この場合、両関数に対して 0.001 の閾値で行った 10 回のシミュレーション結果をそれぞれ表 2-19 と表 2-20 に示す。関数(3)の場合、10 回平均の学習回数、評価誤差、最大誤差はそれぞれ約 68 回、0.0061、0.1585 になっている。関数(4)の場合、学習回数、評価誤差、最大誤差の平均値はそれぞれ 80 回、0.0056、0.1827 になっている。文献^[67]の結果と比較してみると、本提案モデルでは学習回数がかからず、評価誤差および最大誤差が少し小さくなっていることがわかる。しかも、ファジィルールはここではわずか 20 個しか使っていないのに対して、文献^[67]では 625 個も使っている。この点からも、本手法の同定能力の良さがうかがえる。

提案手法は一見して非線形システムに弱いように見えるが、チューニングによって各ルール群における入力と出力が非線形関係になり、さらに重視度も互いに異なってくる。こ

の 2 重の操作によって、提案手法の非線形性能が引き出され、複雑な入出力空間を形成することも可能になる。したがって、以上の例で示したように非線形性の強いシステムに対しても精度よく同定できるという結果が得られている。

表 2-15 教師パターンタ数が 20 個である場合の関数(1)の同定結果

学習番号	学習回数	評価誤差	最大誤差
1	144	0.0028	0.1163
2	39	0.0057	0.1538
3	50	0.0098	0.2485
4	145	0.0048	0.1539
5	38	0.0050	0.1873
6	37	0.0090	0.2404
7	279	0.0051	0.1437
8	74	0.0046	0.1999
9	220	0.0049	0.1531
10	49	0.0070	0.1740
平均値	107	0.0059	0.1771

表 2-16 教師パターンタ数が 20 個である場合の関数(2)の同定結果

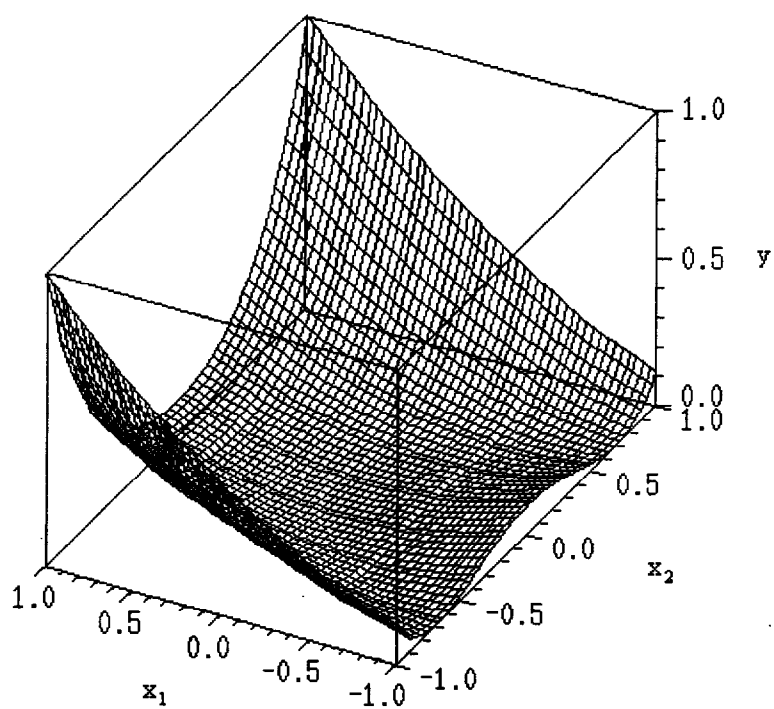
学習番号	学習回数	評価誤差	最大誤差
1	12	0.0035	0.1057
2	37	0.0025	0.1186
3	28	0.0048	0.1669
4	17	0.0028	0.0959
5	18	0.0013	0.1108
6	16	0.0025	0.0804
7	12	0.0049	0.1633
8	14	0.0037	0.0950
9	29	0.0025	0.0907
10	20	0.0034	0.1179
平均値	20	0.0032	0.1145

表 2-17 教師パターンタ数が 49 個である場合の関数(1)の同定結果

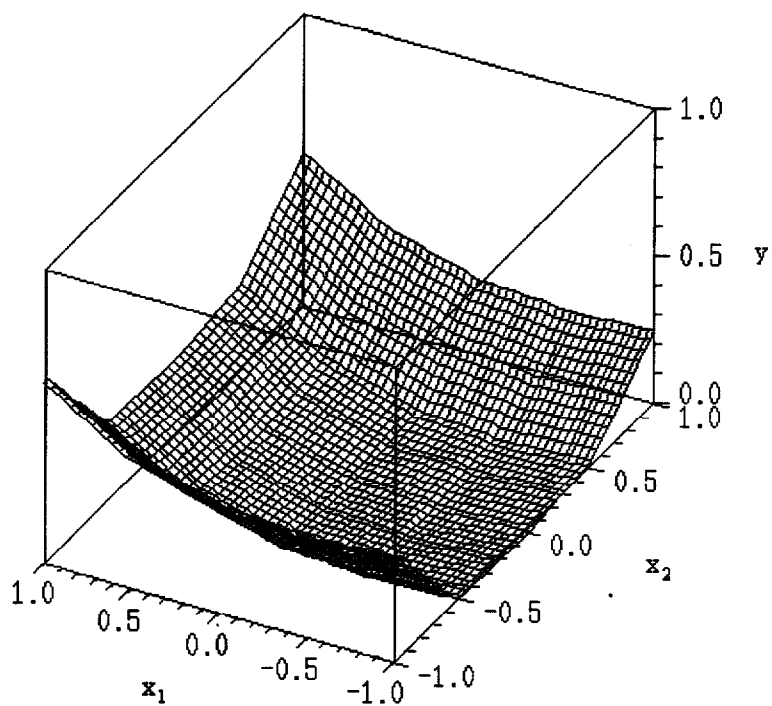
学習番号	学習回数	評価誤差	最大誤差
1	14	0.0077	0.4390
2	24	0.0083	0.4765
3	171	0.0080	0.3042
4	57	0.0095	0.4551
5	195	0.0083	0.3103
6	307	0.0102	0.4131
7	52	0.0100	0.2774
8	15	0.0080	0.4274
9	194	0.0080	0.3082
10	156	0.0112	0.3659
平均値	118	0.0089	0.3777

表 2-18 教師パターンタ数が 49 個である場合の関数(2)の同定結果

学習番号	学習回数	評価誤差	最大誤差
1	5	0.0048	0.2797
2	5	0.0017	0.1123
3	4	0.0023	0.1354
4	5	0.0015	0.1485
5	5	0.0017	0.1406
6	5	0.0018	0.1197
7	4	0.0023	0.1683
8	4	0.0023	0.1558
9	7	0.0016	0.1089
10	6	0.0020	0.1786
平均値	5	0.0022	0.1548

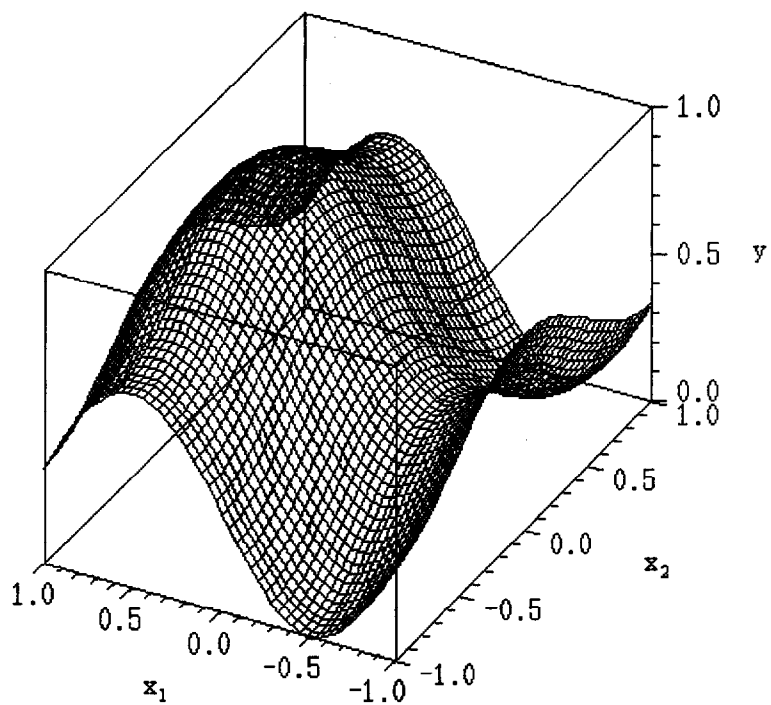


(a) 同定関数の真の出力曲面

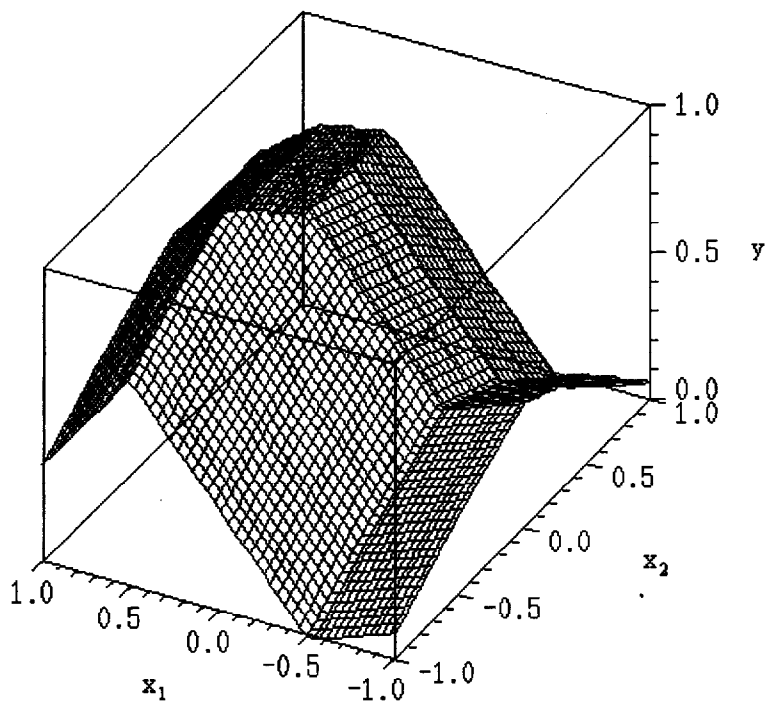


(b) 同定器による実際の出力曲面

図 2-9 教師パターン 49 組の場合の同定関数(1)についての同定例



(a) 同定関数の真の出力曲面



(b) 同定器による実際の出力曲面

図 2-10 教師パターン 49 組の場合の同定関数(2)についての同定例

表 2-19 教師パターンタ数が 20 個である場合の関数(3)の同定結果

学習番号	学習回数	評価誤差	最大誤差
1	78	0.0070	0.1718
2	85	0.0048	0.1742
3	98	0.0075	0.1875
4	94	0.0050	0.1254
5	29	0.0084	0.1917
6	65	0.0048	0.1157
7	58	0.0043	0.1575
8	43	0.0058	0.1367
9	80	0.0044	0.1481
10	47	0.0091	0.1766
平均値	68	0.0061	0.1585

表 2-20 教師パターンタ数が 20 個である場合の関数(4)の同定結果

学習番号	学習回数	評価誤差	最大誤差
1	107	0.0062	0.2069
2	72	0.0072	0.1638
3	44	0.0043	0.1661
4	115	0.0050	0.1616
5	85	0.0063	0.1508
6	35	0.0048	0.1798
7	46	0.0054	0.1738
8	45	0.0049	0.2382
9	93	0.0050	0.1897
10	158	0.0068	0.1963
平均値	80	0.0056	0.1827

2.9 結言

この章では、従来のファジィ推論モデルを述べた後、すべての入力項目を各ファジィルールの前件部にセットすることによって生じるファジィルールの設定問題、設定可能な最大ルール総数の指数的増加問題、および入力項目の重み問題などを指摘した。これらの問題を解決するため、複数入力システムに対して、ルール形式がすべて1入力である SIRMs 固定重視度結合型ファジィ推論モデルを提案した。本提案モデルでは、入力項目数と同じ個数の SIRM を有する。各 SIRM には対応する入力項目のみに関する1入力変数のファジィルールを設定し、かつ各入力項目についてシステムの挙動への貢献の度合いを表す重視度を定義する。そして各 SIRM の推論結果の重視度付き総和を最終出力として求める。

次に本提案モデルの優れた特徴を示し、従来のファジィ推論モデルに比べて設定可能な最大ルール総数およびパラメータ総数を大幅に削減でき、ルールの設定をある程度簡単にし、各入力項目を目的に合わせて強調したり抑制したりすることができることを述べた。また、メモリに対する要求が格段に軽減できるので、本提案モデルのハードウェア化も容易であることを述べた。

続いて、本提案モデルによるファジィ制御器を構築して、典型的な「1次遅れ+むだ時間系」および「2次遅れ+むだ時間系」に提案手法を適用した。従来モデルでは「1次遅れ+むだ時間系」のファジィ制御器を「2次遅れ+むだ時間系」に拡張しようとするとは大幅な変更が必要であるのに対して、本提案モデルでは偏差の2階差分に対応する SIRM と重視度を追加するだけで「1次遅れ+むだ時間系」のファジィ制御器を、「2次遅れ+むだ時間系」に拡張できることを示した。また、従来モデルによるファジィ制御器よりも、本提案モデルによるファジィ制御器のほうが制御性能が改善できることを示した。

そして、簡略化ファジィ推論法を用いた場合の本提案モデルの学習アルゴリズムを、三角形メンバーシップ関数とガウス型メンバーシップ関数のそれぞれの場合について、最急降下法に基づいて導出した。その学習アルゴリズムを二つの2入力1出力の非線形関数、および二つの4入力1出力の非線形関数の同定に適用した。ほとんどの場合において、従来モデルに比べて本提案モデルでは、少ないファジィルールで同程度あるいはそれ以上の同定結果が得られ、本提案モデルが非線形システムにも精度よく対応できることを示した。

第3章 SIRM_s 動的重視度結合型ファジィ推論モデル

3.1 緒言

第2章の SIRM_s 固定重視度結合型ファジィ推論モデル^[105,106,113]では、まず各入力項目についてそれぞれ一つのルール群を用意する。各ルール群には対応する入力項目のみを前件部変数とする単一入力のファジィルールを作成し、次にシステムにおける各入力項目の重要さに注目し固定重視度を定義して、各ルール群の推論結果の重視度付き総和をモデルの出力とする。この提案モデルでは、従来のファジィ推論モデルの問題点である設定可能な最大ファジィルール総数の指数的増加の問題、ファジィルールの設定難の問題、入力項目の均一重みの問題を解決することが可能になった。また、典型的な「1次遅れ+むだ時間系」と「2次遅れ+むだ時間系」について、この提案モデルによる制御性能が従来のファジィ推論モデルよりも改善できることを示した。

「1次遅れ+むだ時間系」と「2次遅れ+むだ時間系」に代表されるような制御問題においては、通常制御状況が時々刻々と変化している。しかし、SIRM_s 固定重視度結合型ファジィ推論モデルでは、各入力項目の重視度の値がすべて固定されている。それを制御問題に適用する場合、制御開始から制御終了まですべての制御状況に対して同一の固定重視度で処理しなければならないため、制御性能の更なる改善には限界がある。例えば、制御性能の評価指標の1つである目標到達時間を考えよう。重視度の値は制御プロセスを通じて変わらないので、制御開始時と目標接近時においても同じである。そのため、目標到達時間の短縮に貢献する入力項目の重視度を大きく設定すると、目標に速く到達する代わりにオーバーシュートなどが大きくなってしまう危険性がある。逆にこのような入力項目の重視度を小さく設定すると、今度はオーバーシュートが起こらないが目標到達時間が長くかかる可能性がある。従って、すべての制御指標を矛盾なく達成するには、ファジィ制御器のパラメータないし構造を実時間でダイナミックに調整することが望まれる。

マルチユニット型ファジィモデル^[39]では、複数のファジィコントローラを並列に接続して、制御応答の状態空間または時間経過のファジィ分割にそれぞれ割り当てる。そして、各ファジィコントローラの推論値とその時のファジィ分割の発火度合いとの重み平均がそのモデルの出力になる。時間変動型ファジィモデル^[49]では、後件部変数のシングルトンタイプの重みを時間的に変動させることによって「1次遅れ+むだ時間系」の制御がうまく行えることが示されている。また、複数のファジィルール群を重み関数に応じて時間的に切り替えて、制御系の立ち上がりの改善を図っている。ダイナミックファジィ制御法^[101]は、様々な状況にそれぞれ対応するファジィルール群を設けてメンバーシップ関数の形を有する時系列重みで結合する手法である。しかし、それらの手法では、各制御環境に対応

するファジイルール群をそれぞれまえて作っておく必要がある。また、切り替えパターンを設定するためにシステムの挙動を制御開始から終了まで完全に把握しておかなければならない欠点がある。さらに、時間的に変動する重みの場合は、予想外の外乱などへの対応は難しい。一方、制御の途中で入力項目のスケーリングファクタをある条件に基づいて倍に拡大したり半分に縮小したりするダイナミックなスケーリング法^[53]では、スケーリングファクタが階段状に変化するためスムーズな制御が期待できない。

この章では、SIRMs 固定重視度結合型ファジィ推論モデルの改良版として、動的重視度を導入し一層制御に適した SIRMs 動的重視度結合型ファジィ推論モデル^[93,107,108,111,114]を提案する。そこではまず各入力項目に対してそれぞれ、単一入力ルール群を構築し、動的重視度を与える。動的重視度は、対応する入力項目の定常状態時の機能を保証する基本値と、制御状況に応じてダイナミックに変化する変動値の和として定義する。次に、各サンプリング時刻において各重視度の変動値をそのときの局所的情報に基づいてファジィ推論で求め、その時点で取るべき重視度を実時間で決める。そして、各ルール群の推論結果の動的重視度付き総和をモデルの出力とする。定値制御系を対象にして、偏差、偏差の 1 階差分、偏差の 2 階差分などを入力項目として本提案モデルによるファジィ制御器の具体的な構成法を示す。従来の線形 PID 制御器と比較し、偏差と偏差の 1 階差分および偏差の 2 階差分から構築するファジィ制御器が項目ごとに PID 制御器に対応し非線形 PID 制御器であることを明らかにする。「1 次遅れ+むだ時間系」および「2 次遅れ+むだ時間系」に対し、SIRMs 固定重視度結合型ファジィ推論モデルの場合に比べて本提案モデルを用いることによって、オーバーシュートや振動などが発生せずに、目標到達時間がさらに 10%以上短縮できることを示す。

3.2 SIRM_s 動的重視度結合型ファジィ推論モデルの提案^[93,108,111,114]

以下では説明を簡単にするために、第2章と同じく n 入力 1 出力のシステムに対して SIRM_s 動的重視度結合型ファジィ推論モデルを構築していく。また、各 SIRM の推論法としてほかの手法も可能であるが、推論を簡単化するため簡略化推論法^[20,37,50]を用いる。さらに、制御系に限定して説明を進めたいので、出力項目としては操作量の変化分 Δu を用いることにする。すなわち、速度型^[73]のファジィ推論モデルを構築することになる。

まず、与えられた n 入力 1 出力のシステムに対して、

$$\begin{aligned}
 \text{SIRM-1:} & \quad \left\{ R_i^j: \text{ If } x_i = A_i^j \text{ Then } \Delta u_i = c_i^j \right\}_{j=1}^{m_i} \\
 \dots\dots & \quad \dots\dots \\
 \text{SIRM-}i: & \quad \left\{ R_i^j: \text{ If } x_i = A_i^j \text{ Then } \Delta u_i = c_i^j \right\}_{j=1}^{m_i} \\
 \dots\dots & \quad \dots\dots \\
 \text{SIRM-}n: & \quad \left\{ R_n^j: \text{ If } x_n = A_n^j \text{ Then } \Delta u_n = c_n^j \right\}_{j=1}^{m_n}
 \end{aligned} \tag{3-1}$$

のように各入力項目についてそれぞれ一つの SIRM を構成する。ただしここでは、 R_i^j は i 番目の単一入力ルール群 SIRM- i の j 番目のルールを表す。 x_i はシステムの i 番目の入力項目に対応し、その入力項目のスケーリングファクタで正規化された SIRM- i の唯一の前件部変数である。 Δu_i はシステムの出力項目 Δu に対応し、出力項目のスケーリングファクタで正規化された SIRM- i の後件部変数である。 Δu_i ($i=1,2,\dots,n$) はすべて同じシステムの出力項目に対応する中間変数である。 A_i^j は SIRM- i の j 番目ルールの前件部変数 x_i のメンバーシップ関数を意味する。簡略化推論法が使われるため、 c_i^j は SIRM- i の j 番目ルールの後件部変数の実数出力値を意味する。また、ルール群の番号は入力項目と同じ $i=1,2,\dots,n$ として、 i 番目のルール群 SIRM- i のルール番号は $j=1,2,\dots,m_i$ とする。 m_i は SIRM- i のルール総数を表す。

各入力項目の観測値 x_i^0 が与えられたとき、ルール群 SIRM- i の j 番目ルールの前件部の適合度が $A_i^j(x_i^0)$ になるので、そのルール群の推論結果 Δu_i^0 は合成重心法により、

$$\Delta u_i^0 = \frac{\sum_{j=1}^{m_i} A_i^j(x_i^0) \cdot c_i^j}{\sum_{j=1}^{m_i} A_i^j(x_i^0)} \tag{3-2}$$

で求められる。

SIRMs 固定重視度結合型ファジィ推論モデル^[105,106,113]では、入力項目の役割の違いに注目し、各入力項目について固定重視度を導入した。重視度により入力項目が直接操作でき、典型的な「1次遅れ+むだ時間系」および「2次遅れ+むだ時間系」に対して従来のファジィ推論モデルよりも制御結果が改善できた。

しかし、そのモデルでは各重視度の値は制御プロセスを通じて固定され、制御開始時と目標接近時などのように明らかに違う状況に対しても区別せずすべて同じものが使われた。それは制御構造が簡単にできる反面、制御性能の一層の向上を阻む原因とも考えられる。1次遅れ系を例えにとれば、目標到達時間を短くするには偏差項目の重視度のある程度大きめに設定すればよいが、それ以上大きく設定すると目標到達時間が短縮される代わりにオーバーシュートが大きくなったり、ときには振動が起こることもあり得る。一方、制御開始時に（偏差が大きいとき）偏差項目の重視度を大きく設定し、目標値に近づく（偏差が小さくなる）につれてその重視度を徐々に減少させていけば、オーバーシュートと振動を起こさずに目標到達時間を短縮し、優れた制御結果を得ることが可能である。このように、制御状況に応じてダイナミックに変化する重視度が望まれる。

そこで、各入力項目に制御環境に応じて変化する動的重視度を新たに導入する。入力項目 i ($i=1,2,\dots,n$) に対して、基本値を w_i 、変動幅を B_i 、変動量変数を Δw_i とする。基本値 w_i は SIRMs 固定重視度結合型ファジィ推論モデルにおける入力項目 i の固定重視度に相当する。変動幅 B_i は重視度の下限から上限までの変化範囲を制限する。変動量変数 Δw_i は制御状況に応じて $[0.0, 1.0]$ 内にダイナミックに変動する。そして、変動幅 B_i と変動量変数 Δw_i の推論値 Δw_i^0 の積を重視度の変動値とすると、入力項目 i の動的重視度 w_i^D を、

$$w_i^D = w_i + B_i \cdot \Delta w_i^0 \quad (3-3)$$

で基本値 w_i と変動値 $B_i \cdot \Delta w_i^0$ の和として定義する。明らかに変動量変数の推論値に応じて、動的重視度の値は $[w_i, w_i + B_i]$ 内に変動する。

これによって、SIRMs 動的重視度結合型ファジィ推論モデルでは、まず各入力項目に対してそれぞれ単一入力ルール群を構築し動的重視度の構造を決めて、そして実時間で各ルール群の推論結果と動的重視度の値を計算し、最後に式(3-4)のように各ルール群の推論結果の動的重視度付き総和

$$\Delta u^0 = \sum_{i=1}^n w_i^D \cdot \Delta u_i^0 \quad (3-4)$$

をモデルの出力 Δu^0 として求める。

本モデルにおいて、動的重視度の基本値は対応する入力項目の定常状態時における最低必要な働きを保証し、変動値はその入力項目の影響の度合いを制御状況に応じて調整する役割を持つ。こうすることによって、制御開始時には関連する入力項目に大きな重視度を与え、目標に到達する手前から重視度を小さくするような操作が可能になる。また、式(3-4)からわかるように、各 SIRM は対応する入力項目のモデル出力への寄与の符号を左右し、重視度でその入力項目の寄与の大きさを調整する。各入力項目の動的重視度の基本値と変動幅は試行錯誤か学習手法で設定される。各入力項目の動的重視度の変動量変数について、特に制約を付けていないが、本モデルのシンプルさを維持するために、基本的には最も関わりを持ち現在の制御状況を反映する 1 入力ないし 2 入力の単純なファジイルールによって求められる。

図 3-1 には、SIRMs 動的重視度結合型ファジィ推論モデルの構成図を示している。SIRMs 固定重視度結合型ファジィ推論モデルの図 2-1 と違って、各動的重視度が定数ではなく各時刻に調整されることに注意していただきたい。

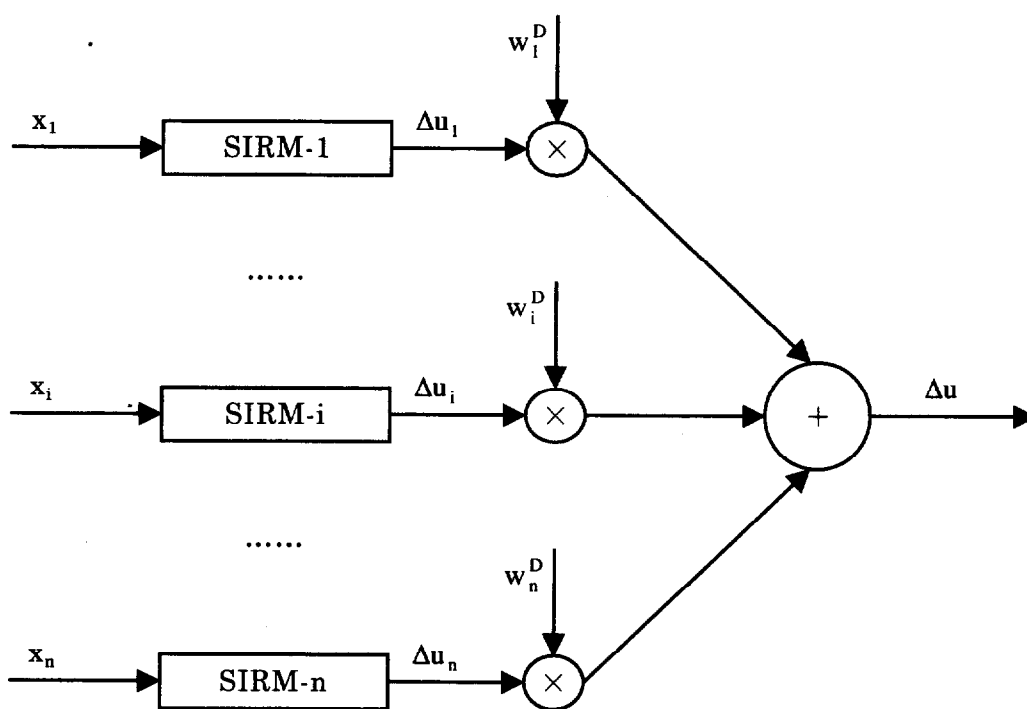


図 3-1 SIRMs 動的重視度結合型ファジィ推論モデルの構成図

すでに 2.3 で述べたように、各ルール群の後件部変数が同じシステムの出力項目に対応し、各ルール群の重視度付き推論結果がモデルの出力の一部であることから、重視度はシステムの出力項目のスケールリングファクタの一部と見なせる。従って、重視度をダイナミ

ックに変えることは、制御状況に応じて出力項目のスケーリングファクタを変えることに相当する。ファジィ制御器のスケーリングファクタを調整する手法^[37,39,100]がすでによくつか報告されているが、それらは、あらかじめ与えられたグローバルな評価基準に基づいて制御後の結果を評価してスケーリングファクタを修正し、最適と思われる結果が得られるまでそのプロセスを繰り返す手法である。従って、調整段階の制御実験と調整後の制御実験ではスケーリングファクタが異なるが、各制御実験においてはすべての状況を通して同一のスケーリングファクタが使われることになる。一方、ダイナミックなスケーリング法^[53]では、入力項目のスケーリングファクタは制御途中で伸縮可能であるが、階段状にしか変化しない。しかし、本提案モデルでは通常各重視度が互いに異なる値をとるので、各ルール群の後件部変数は同じ出力項目に対応するにもかかわらず異なるスケーリングファクタを持つことになる。つまり、システムの出力項目は実質上各ルール群ごとに異なるスケーリングファクタを有し、しかもそのスケーリングファクタが制御状況に応じてスムーズに変化する。また次節に示すように、本提案モデルでは動的重視度を変化させるのに対応する入力項目の局所的情報しか要らないため、真の意味での実時間調整が簡単に実現できる。

なお、各重視度の変動幅をすべてゼロに設定すれば、SIRMs 動的重視度結合型ファジィ推論モデルが実質上 SIRMs 固定重視度結合型ファジィ推論モデルになるので、SIRMs 固定重視度結合型ファジィ推論モデルは SIRMs 動的重視度結合型ファジィ推論モデルの特別な場合であると見なされる。以下では、SIRMs 固定重視度結合型ファジィ推論モデルを固定重視度モデルと略し、SIRMs 動的重視度結合型ファジィ推論モデルを動的重視度モデルに略記する。

3.3 定値制御系におけるファジィ制御器の構成法^[93,108,111,114]

制御系が定値制御系と追値制御系などに分類されているが、最も研究されかつ利用されているのは定値制御系である。よく知られている定値制御系として、1次遅れ系や2次遅れ系などが挙げられる。定値制御系に対してファジィ制御では通常、現サンプリング時刻 k (サンプリング周期を ΔT とすれば、正確には $k \cdot \Delta T$ となるが、簡単のため以下は単に k に略す) における目標値 R と実際の出力値 $y(k)$ の偏差 ($x_1(k) = R - y(k)$)、偏差の1階差分 ($x_2(k) = x_1(k) - x_1(k-1)$)、偏差の2階差分 ($x_3(k) = x_2(k) - x_2(k-1)$) などを入力項目とする。そして、操作量の変化分 Δu を出力項目とする。ここでは、このような定値制御系に対して、偏差や偏差の1階差分などを入力項目として操作量の変化分を出力項目とするファジィ制御器を本提案モデルに基づいて具体的に構成する方法を示す。ほかの制御系についても、類似して構築できる。

定値制御系では制御の目的はいうまでもなく、偏差や1階差分などをすべて速やかにゼロにし、実際の出力値を目標値に一致させることである。したがって、偏差などがゼロでないときには、それらをゼロに収束させる制御動作をとる必要がある。さらに、偏差などの値が大きい場合は、大きな制御動作を発行してそれらをできるだけ早くゼロに抑えることは制御性能を向上させる上できわめて重要である。

そこで、ファジィ制御器の構築に先立って、まず各入力項目の符号について考えてみる。各入力項目の定義式により、偏差に対応する入力項目の値が正のとき現時刻の出力値がまだ目標値に達しておらず、その入力項目の値が負のとき現時刻の出力値がすでに目標値を越えていることを意味する。偏差の1階差分に対応する入力項目の値が正であることは、現時刻の偏差が1時刻前の偏差よりも大きくなっている、すなわち拡大していることを意味する。逆にその入力項目の値が負であることは、現時刻の偏差が1時刻前の偏差より小さくなっている、すなわち減少していることを示す。偏差の2階差分に対応する入力項目の値が正であれば現時刻の1階差分が1時刻前のものよりも大きくなり、負であれば現時刻の1階差分が1時刻前のものより小さくなっていることを示す。より高次の差分についても同じことが言える。したがって、入力項目が正值のときには操作量を増大させ、入力項目が負値のときには操作量を減少させる必要があることがわかる。

ここでは、正規化後の各入力項目 $x_i(k)$ に対してともに台集合 $[-1.0, 1.0]$ 上に等間隔にファジィ集合を三つ定義し、それぞれのメンバーシップ関数 NB、ZO、PB を図 3-2 に示すように三角形ないし台形で与える。ただし、横軸は正規化後の入力項目の台集合を表す。縦軸は入力項目のファジィグレードを意味し、最大値が 1.0 である。また、ファジィルールの後件部変数の出力を実数値とする簡略化推論法を用いる。すると、以上の分析に基づいて各入力項目 i について単一入力ルール群 SIRM- i を表 3-1 のように構成することができる。そして、これらのルール群の後件部変数 $\Delta u_i(k)$ の推論結果の重視度付き総和はサ

ンプリング時刻 k のときの操作量の変化分 $\Delta u(k)$ を与えることになる。

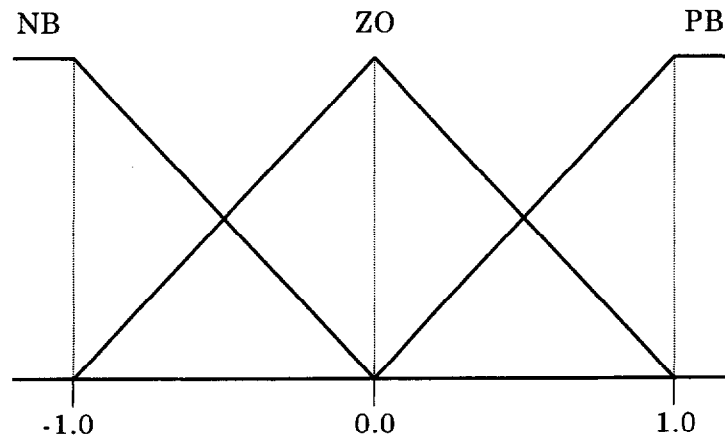


図 3-2 各入力項目のメンバーシップ関数

表 3-1 入力項目 i に対応する単一入力ルール群 SIRM- i

前件部変数 $x_i(k)$	後件部変数 $\Delta u_i(k)$
NB	-1.0
ZO	0.0
PB	1.0

この表からわかるように、前件部変数が正值の場合には後件部変数の出力も正になるので、操作量は大きくなる。その結果、実際出力値が目標値に近づくことによって、偏差や偏差の 1 階差分などは小さくなる。また、前件部変数が負値の場合は後件部変数の出力も負になるので操作量が減少し、実際出力値が目標値に戻されることによって偏差などの変化が抑えられる。なお、メンバーシップ関数の形状あるいはルールの設定をもっと複雑にすることも可能であるが、定値制御系の場合はここで挙げている設定で十分であることが以下の制御シミュレーション実験を通じて確認できる。

一方、制御の立場から見れば、入力項目たとえば偏差、1 階差分などの値が大きいときには対応する入力項目の重視度を大きくしてそれらの値をすばやく抑え、逆にその値が小さいときは重視度を大きくすると不安定になる傾向があることから重視度を少し小さめにして速応性を損なわずに制御の安定性を維持することが望まれる。このことから直感的に

わかるように、定値制御系の場合動的重視度を定めるのに対応する入力項目の現時刻の値の大きさだけを参照すればよい。すなわち、入力項目の値が大きければ対応する動的重視度を大きくし、入力項目の値が小さければ対応する動的重視度を据え置きにする。

動的重視度が変動量変数によって調整されるので、表 3-2 のように、サンプリング時刻 k における正規化後の各入力項目 $x_i(k)$ の絶対値を前件部変数として変動量変数 $\Delta w_i(k)$ を後件部変数とする 1 入力 1 出力のファジィルールを作ることができる。そして同じく簡略化推論法でサンプリング時刻 k のときの変動量変数の推論値 $\Delta w_i^0(k)$ を実時間で求めることができる。ただしここでは、ファジィラベル DS、DM、DB は図 3-3 に示すように台集合 $[0.0, 1.0]$ 上に等間隔に分布する前件部変数の三角形または台形メンバーシップ関数で表される。なお、横軸は各入力項目の絶対値が図 3-2 の場合と同じスケールリングファクタで正規化された台集合を表す。縦軸は前件部変数のファジィグレードを意味し、最大値が 1.0 である。

表 3-2 変動量変数 $\Delta w_i(k)$ のファジィルール

前件部変数 $ x_i(k) $	後件部変数 $\Delta w_i(k)$
DS	0.0
DM	0.5
DB	1.0

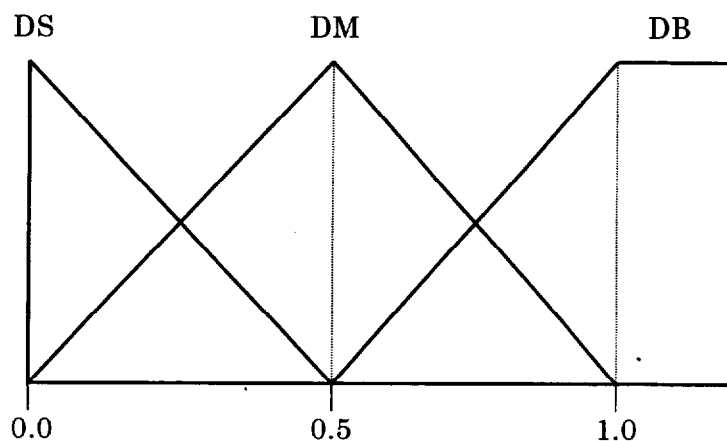


図 3-3 各入力項目の絶対値のメンバーシップ関数

表 3-2 からわかるように、ある入力項目の絶対値が大きい場合には対応する変動量変数に関する推論結果も大きくなるので、その入力項目の動的重視度は大きくなる。同時に対応する SIRM の推論値も大きくなるので、その入力項目の式(3-4)に占める割合は急激に増加する。その結果、その入力項目は絶対値を減少させる方向に影響力が強まるので、絶対値が減少していく。逆にもしある入力項目の絶対値が小さければ対応する変動量変数の推論値も小さいので、その入力項目の動的重視度はほぼ基本値にとどまることになる。この場合、基本値も小さければ、その入力項目が緩やかに変化していく。

図 3-4 には、3 入力項目の場合の本ファジィ制御器の構成図を示している。ただし、各 DID (Dynamic Importance Degree) ブロックはそれぞれの動的重視度を求めるモジュールを表す。この図からわかるように、各 SIRM ブロックの推論結果に対応する DID ブロックの出力を乗じたあと、すべての入力項目についての総和を本ファジィ制御器の出力としている。なお、各変動量変数 $\Delta w_i(k)$ のファジィルールの前件部には、対応する入力項目のそのときの値という局所的情報しか要らないことから、動的重視度が簡単に計算できるだけでなく、実時間での調整も可能となる。また、大規模なシステムを構築する場合でも同様にファジィルールが構成できる。さらに、定値制御系に対して、各入力項目の単一入力ルール群と変動量変数のファジィルールテーブルが入力項目によらずすべて同じように設定できるので、SIRMs 動的重視度結合型ファジィ推論モデルが容易に構築できることがわかる。

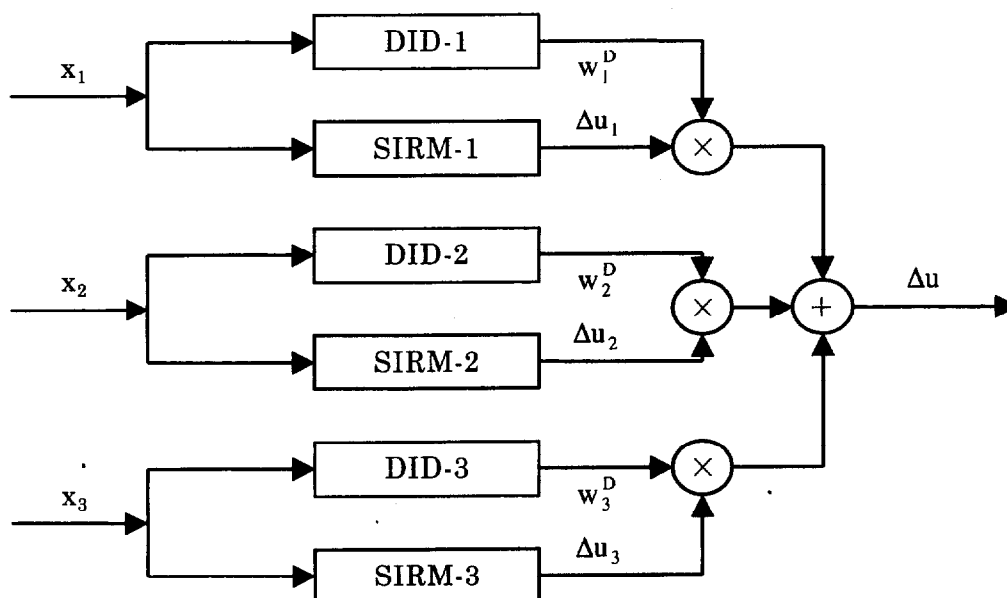


図 3-4 3 入力項目の場合の本ファジィ制御器の構成図

3.4 線形 PID 制御器との比較^[107,114]

動的重視度推論モデルの有効性を検証するため、ここでは第 2 章で使われた「1 次遅れ + むだ時間系」、および「2 次遅れ + むだ時間系」を制御対象として、提案手法と従来の線形 PID 制御器による制御性能の比較を行うことにする。ただし、以下のシミュレーション実験においては、サンプリング周期を 0.1 秒に設定して、最大操作量を 5.0 に制限する。

3.4.1 「1 次遅れ + むだ時間系」について

プロセスゲイン、むだ時間、および時定数をそれぞれ K 、 L 、 T とすれば、「1 次遅れ + むだ時間系」の伝達関数を、

$$G(s) = \frac{K \cdot e^{-Ls}}{1 + T \cdot s} \quad (3-5)$$

で表すことができる。

第 2 章と同じ表 3-3 に示す三つのプラント^[60]について、目標値 1.0 が与えられたときの制御シミュレーションを行う。なお、この三つのプラントは番号順にそれぞれ遅れ系、中間系、むだ時間系になっている。

表 3-3 「1 次遅れ + むだ時間系」のパラメータ

番号	プラントパラメータ		
(1)	$K=1.0,$	$L=1.0,$	$T=10.0$
(2)	$K=1.0,$	$L=1.0,$	$T=1.0$
(3)	$K=1.0,$	$L=1.0,$	$T=0.1$

これが「1 次遅れ + むだ時間系」を目標値 1.0 に制御する定値制御系の構築問題であることから、3.3 で述べたファジィ制御器を用いることができる。すなわち、動的重視度モデルで「1 次遅れ + むだ時間系」を制御するのに、正規化後の偏差 $x_1(k)$ と偏差の 1 階差分 $x_2(k)$ を入力項目として操作量の変化分 $\Delta u(k)$ を出力項目とする。そして、動的重視度

モデルによるファジィ制御器は、表 3-1 のように $x_1(k)$ と $x_2(k)$ をそれぞれ前件部変数とする単一入力ルール群 2 個と、表 3-2 のように動的重視度の変動量変数の値を推論するのに $x_1(k)$ と $x_2(k)$ の絶対値をそれぞれ前件部変数とする 1 入力 1 出力のファジィルールテーブル 2 個を持つことになる。

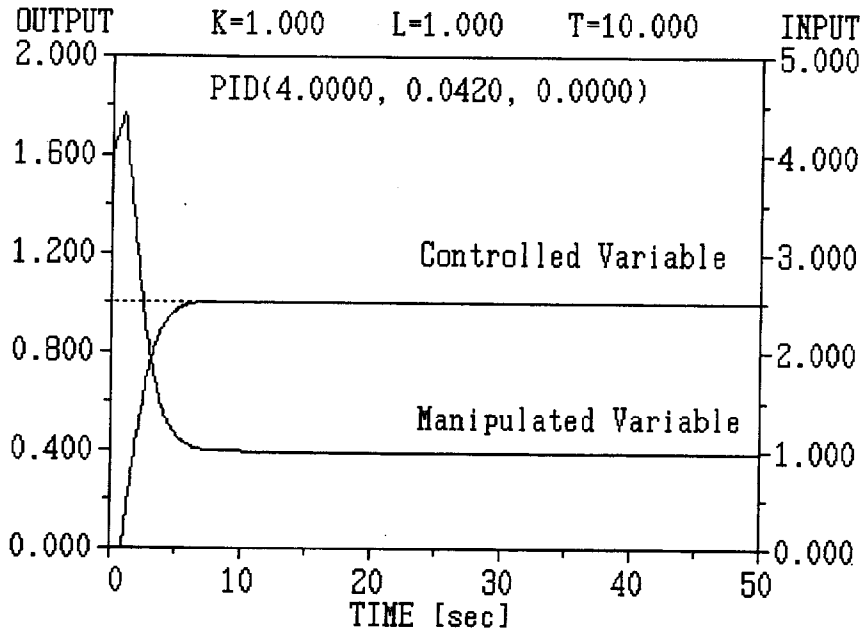
一方、詳細な理由を後で述べるが、偏差 $x_1(k)$ と偏差の 1 階差分 $x_2(k)$ からなる本ファジィ制御器が PI 制御器に対応するので、比較のため「1 次遅れ+むだ時間系」に対して線形 PI 制御器を用いることにする。線形 PI 制御器ではサンプリング時刻 k における操作量 $u^{PI}(k)$ が離散系の制御則^[18]

$$u^{PI}(k) = K_p \cdot x_1(k) + K_i \cdot \sum_{q=0}^k x_1(q) \quad (3-6)$$

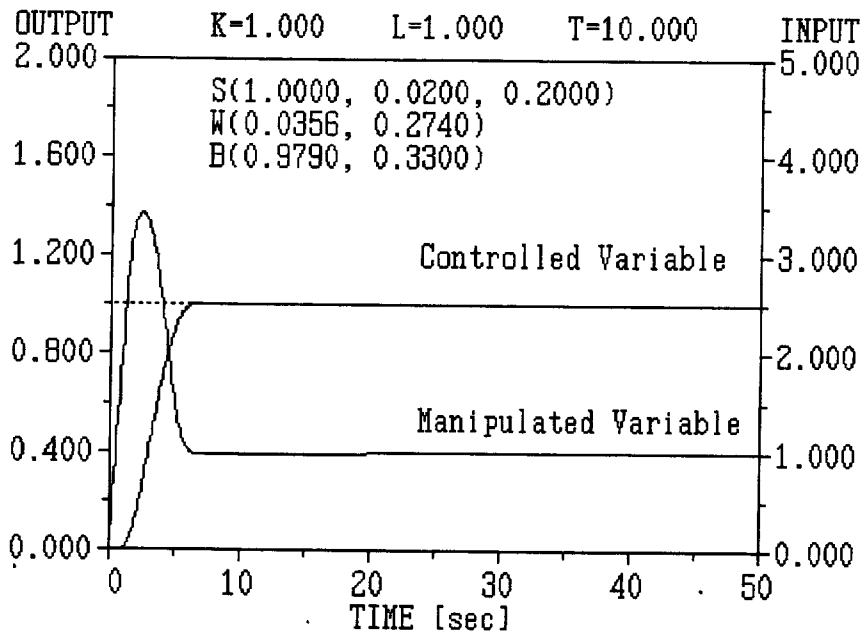
で求められる。ただし、係数 K_p と K_i はそれぞれ比例係数と積分係数を表す。また、 $x_1(k)$ は同じくサンプリング時刻 k における目標値と実際の出力値との偏差を表す。

オーバーシュートと振動および定常誤差をなるべく生じずかつ目標到達時間が最も短くなるように、PI 制御の場合は比例係数と積分係数を、本ファジィ制御器の場合はスケールリングファクタと動的重視度の基本値と変動幅を試行錯誤で調整する。三つのプラントについての制御シミュレーション結果をそれぞれ図 3-5、図 3-6、図 3-7 に示す。

なお、各図形の枠の外上に示しているのはプラントのパラメータである。図 3-5(a)において記号 PID(4.0000, 0.0420, 0.0000)の括弧中の数値は順に比例係数、積分係数、微分係数を意味するが、PI 制御のため微分係数がゼロになっている。図 3-5(b)において記号 S(1.0000, 0.0200, 0.2000)の括弧中の数値は順に偏差、偏差の 1 階差分、操作量の変化分のスケールリングファクタを意味し、三つの例に同じものが使われている。記号 W(0.0356, 0.2740)と記号 B(0.9790, 0.3300)の括弧中の数値はそれぞれ順に各入力項目の動的重視度の基本値と変動幅を表す。点線は目標値、上の曲線は制御対象の出力の時間応答、下の曲線は操作量の時間応答を表す。図 3-6 と図 3-7 についても同様である。

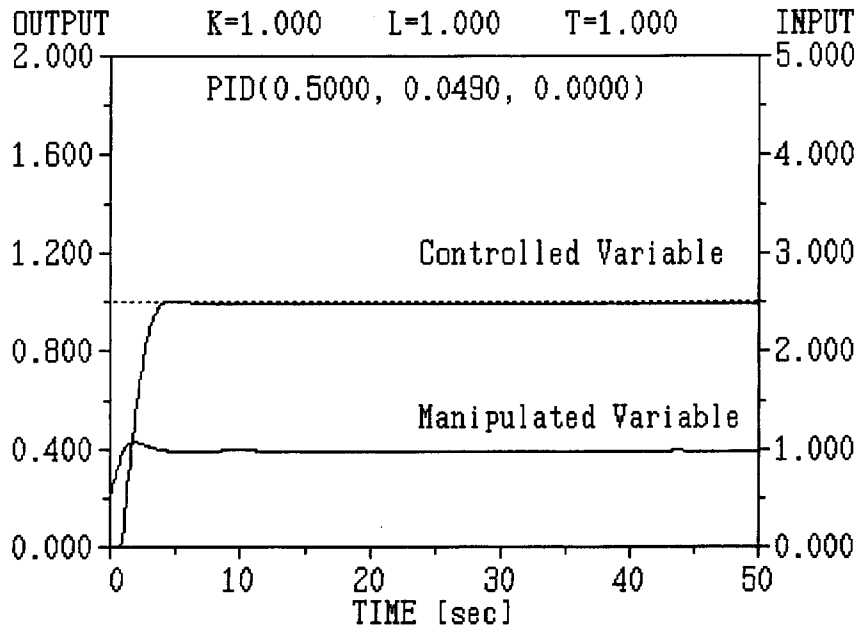


(a) 線形 PI 制御器

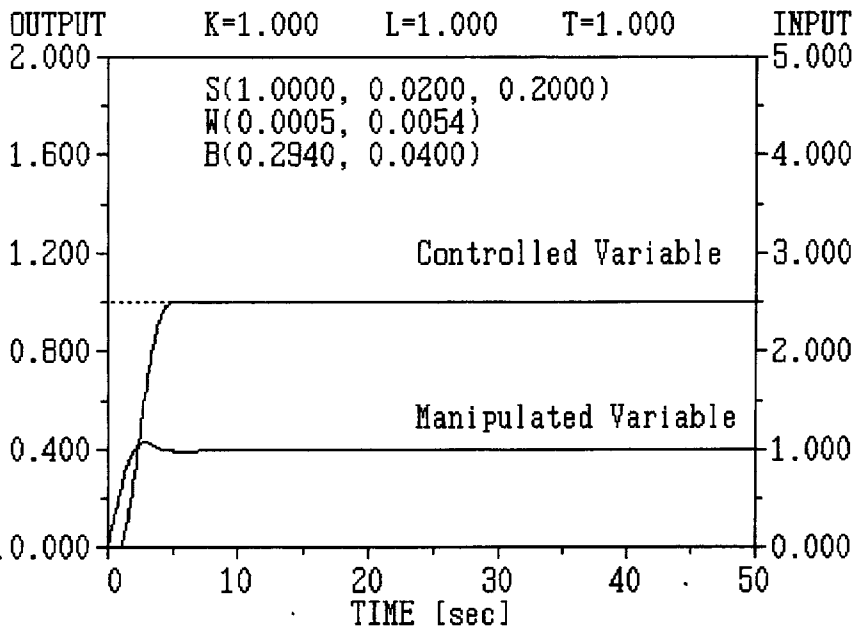


(b) SIRM_s 動的重視度結合型ファジィ推論モデル

図 3-5 「1次遅れ+むだ時間系(1)」についての制御結果



(a) 線形 PI 制御器



(b) SIRMs 動的重視度結合型ファジィ推論モデル

図 3-6 「1次遅れ+むだ時間系(2)」についての制御結果

図 3-5 のように「1 次遅れ+むだ時間系(1)」について、線形 PI 制御では立ち上がりが非常に速いが、目標値近くになると接近速度が急に遅くなる。それに対し、提案手法では操作量がゼロから次第に増加していくので立ち上がりこそ少し遅いが、目標値に近づいても接近速度があまり落ちないため、目標到達時間が線形 PI 制御の場合よりも 5%ほど短縮されている。また、線形 PI 制御の場合、偏差の絶対値の時間の重み付き積分 ITAE^[74] が約 47.5 であるのに対して、本提案モデルの場合の ITAE が約 66.6 になっている。

図 3-6 のように「1 次遅れ+むだ時間系(2)」については、線形 PI 制御では目標到達が早いですが、定常誤差が少し残っている。提案手法では線形 PI 制御に比べて目標到達時間がやや長くなっているが、定常誤差を全く生じていない。また、線形 PI 制御の場合の ITAE は約 23.6 であるが、本提案モデルの ITAE は約 38.7 になっている。それは立ち上がりが遅いことによると考えられる。

図 3-7 のように「1 次遅れ+むだ時間系(3)」について、線形 PI 制御では目標到達後少し振動が発生し、ITAE が約 23.2 になっている。一方、提案手法では目標到達時間が約 30% 短縮できた上に、振動やオーバーシュートなどが全然起こっていない。また、ITAE も約 17.6 であり、20%以上も小さくなっている。

3.4.2 「2 次遅れ+むだ時間系」について

ここで扱う 2 次遅れ系の伝達関数は、第 2 章と同じで、

$$G(s) = \frac{A}{s^2 + B \cdot s + C} \cdot e^{-Ls} \quad (3-7)$$

で記述される。ただし、A、B、C は係数であり、L はむだ時間である。

表 3-4 「2 次遅れ+むだ時間系」のパラメータ

番号	プラントパラメータ
(1)	A=1.2280, B=0.6380, C=0.0340, L=0.0000
(2)	A=19.540, B=0.4000, C=0.5400, L=0.0000
(3)	A=0.2310, B=0.0994, C=0.0064, L=1.0000

具体的に表 3-4 に示す三つの 2 次遅れ系^[38]を制御対象として、目標値とともに 60.0 とする。なお、制御対象(1)、(2)、(3)はそれぞれ非振動減衰系、減衰振動系、減衰振動+むだ時間系である。

これも定値制御系を設計する問題であるので、3.3 で述べたファジィ制御器の構築手法を用いることにする。すなわち、「2 次遅れ+むだ時間系」を制御するには、正規化後の偏差 $x_1(k)$ 、偏差の 1 階差分 $x_2(k)$ 、偏差の 2 階差分 $x_3(k)$ を入力項目として操作量の変化分 $\Delta u(k)$ を出力項目とする。動的重視度モデルに基づくファジィ制御器では、この三つの入力項目に対して、まずそれぞれを前件部変数とする単一入力ルール群を表 3-1 のように作成し、そして、それぞれの絶対値を前件部変数として対応する変動量変数を後件部変数とするルールテーブルを表 3-2 のように設定する。したがって、本ファジィ制御器では、表 3-1 のルール群と表 3-2 のルールテーブルを 3 個ずつ持つことになる。

一方、線形 PID 制御器ではサンプリング時刻 k における操作量 $u^{PID}(k)$ を離散系の制御則で記述すると、

$$u^{PID}(k) = K_P \cdot x_1(k) + K_I \cdot \sum_{q=0}^k x_1(q) + K_D \cdot x_2(k) \quad (3-8)$$

になる^[18]。ただし、 K_P 、 K_I 、 K_D はそれぞれ比例係数、積分係数、微分係数を表す。また、 $x_1(k)$ と $x_2(k)$ は偏差と偏差の 1 階差分を表す。

上記の三つの制御対象について、線形 PID 制御器と本ファジィ制御器による制御シミュレーションの結果をそれぞれ図 3-8、図 3-9、図 3-10 に示す。ただし、図 3-8(a)において、記号 PID(0.8200, 0.0005, 8.0000)の括弧中の数値は順に PID 制御器の比例係数、積分係数、微分係数を表す。図 3-8(b)において、記号 S(60.000, 1.0000, 0.1000, 1.0000)の括弧中の数値はそれぞれ偏差、偏差の 1 階差分、偏差の 2 階差分、操作量の変化分のスケールリングファクタを意味する。ここでは、三つの例で全く同一の設定値が使われている。また、記号 W(1.2400, 1.5000, 0.9000)と記号 B(30.000, 0.5000, 1.0000)の括弧中の数値はそれぞれ順次三つの入力項目の動的重視度の基本値と変動幅を表す。これらをすべて試行錯誤によって選んでいる。

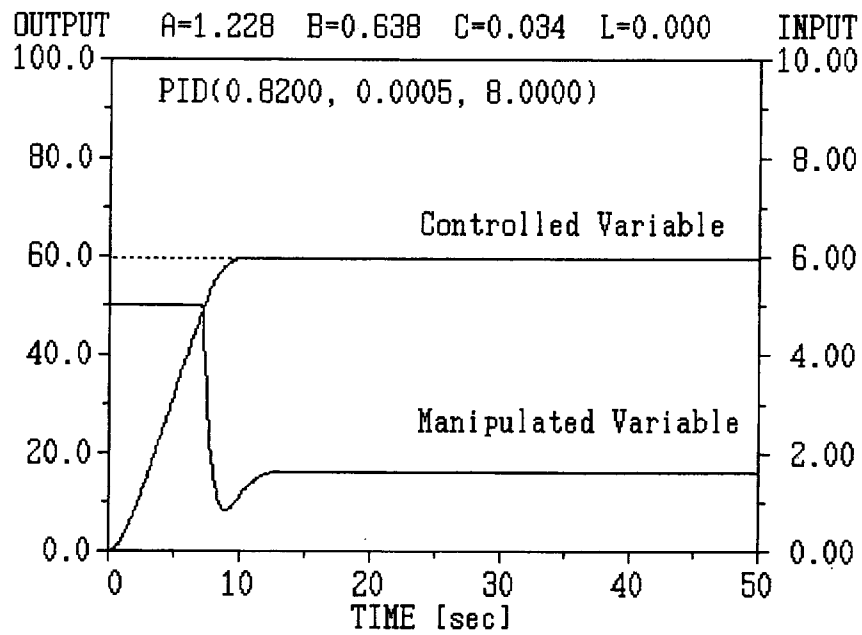
「2 次遅れ+むだ時間系(1)」について図 3-8 に示しているように、本提案モデルでは偏差の動的重視度に対して大きな変動幅が設定されていることから、制御開始時から大きな操作量が出力可能となるので、結果として立ち上がりは線形 PID 制御とほぼ同じとなり、目標到達時間が約 5%ほど短縮されている。また、線形 PID 制御の場合の ITAE は約 11072.7 であるのに対して、本提案モデルによる ITAE は 20%以上も小さい 8744.4 になっている。なお、操作量の曲線の最初の部分が 5.0 の水平直線になっているのは、最大操作量が 5.0 に制限されていて、実際の操作量がそれを越えた場合に強制的に 5.0 にセット

されるからである。

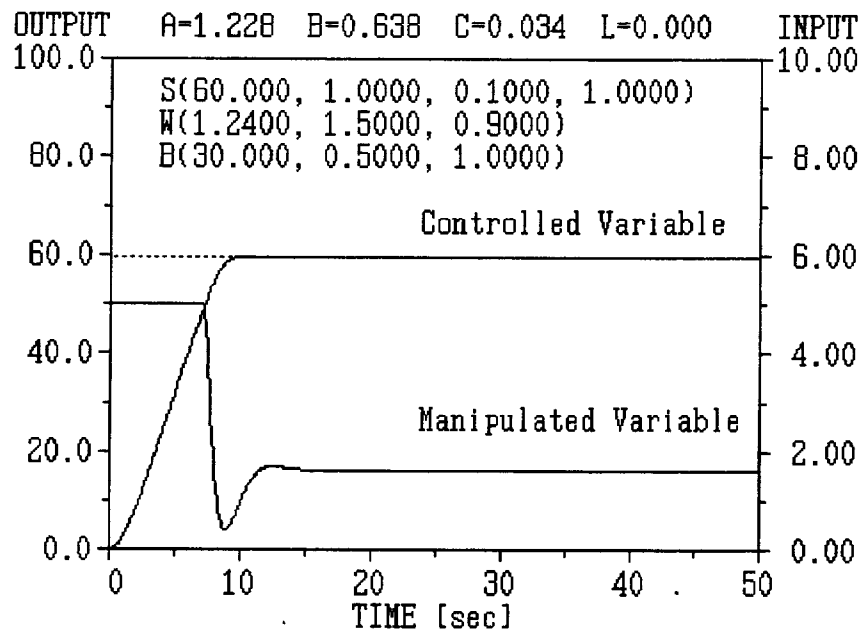
「2次遅れ+むだ時間系(2)」について、図 3-9 からわかるように本提案手法では立ち上がりが少し遅れるが、制御対象の出力がほぼ一定速度で目標値に達することができるので、線形 PID 制御の場合の半分以下の時間で目標に到達している。また、ITAE については、線形 PID 制御の場合の 1139.4 と比べて、本提案手法の場合は 765.4 と 30%以上も減少している。

「2次遅れ+むだ時間系(3)」については、図 3-10 に示すように本提案手法による結果は、PID 制御による結果とほとんど変わらないように見える。しかし、制御終了時のプラントの出力が、線形 PID 制御の場合は約 59.603 であるのに対して、本提案手法の場合は約 59.993 になっている。その結果、線形 PID 制御による ITAE が約 35527.3 であることに比べて、本提案手法による ITAE は約 33044.2 であり、7%ほど小さくなっている。

線形 PI または PID 制御では、各時刻における必要な操作量が式(3-6)または式(3-8)の制御則によって直接決定されることから制御開始直後から大きな操作量が出力できるので、通常立ち上がりが速いことは以上のシミュレーションによって確認できている。本提案モデルによるファジィ制御器では、操作量ではなく操作量の変化分を推論するので、動的重視度のパラメータの値を大きく設定しない限り制御開始からしばらくの間は操作量がゼロから次第に大きくなっていく。その結果、シミュレーション結果に示すように立ち上がりが多少遅くなる。しかし、偏差の動的重視度の働きにより目標値に接近速度があまり落ちずに近づくことができ、また 1 階差分あるいは 2 階差分の動的重視度の働きにより目標到達後の制御対象の出力の変化を抑えることができるので、オーバーシュートや振動や定常誤差などを起こさずに目標到達時間を短縮できることがわかる。

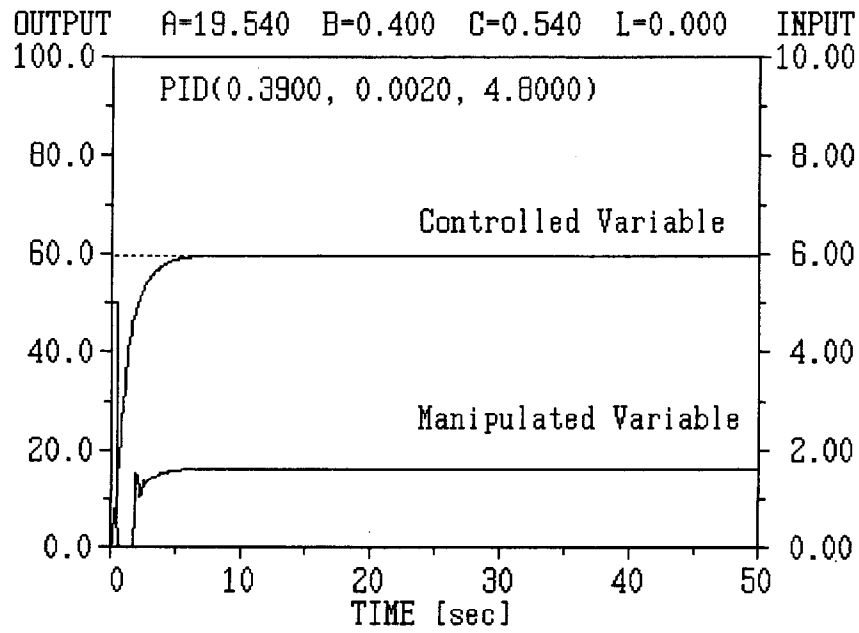


(a) 線形 PID 制御器

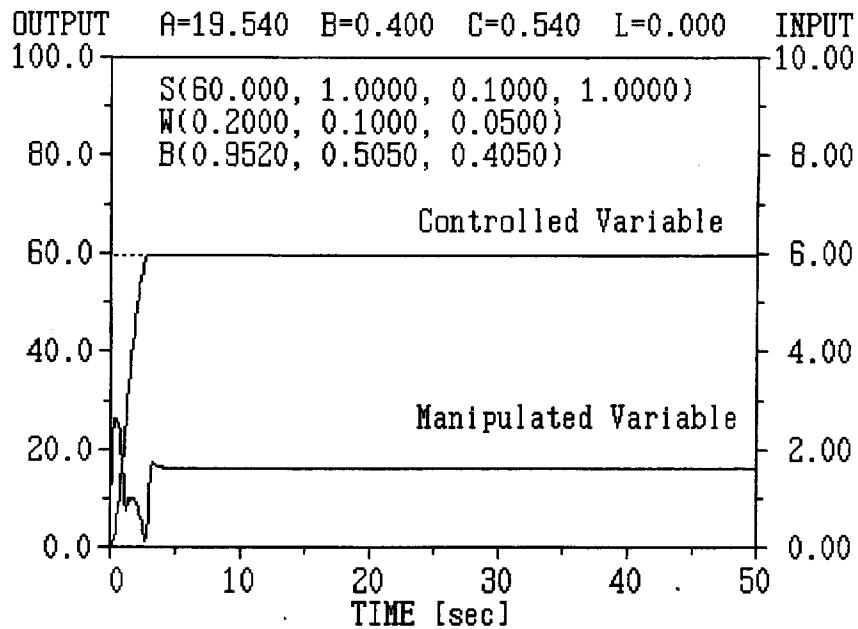


(b) SIRM_s 動的重視度結合型ファジィ推論モデル

図 3-8 「2 次遅れ+むだ時間系(1)」についての制御結果

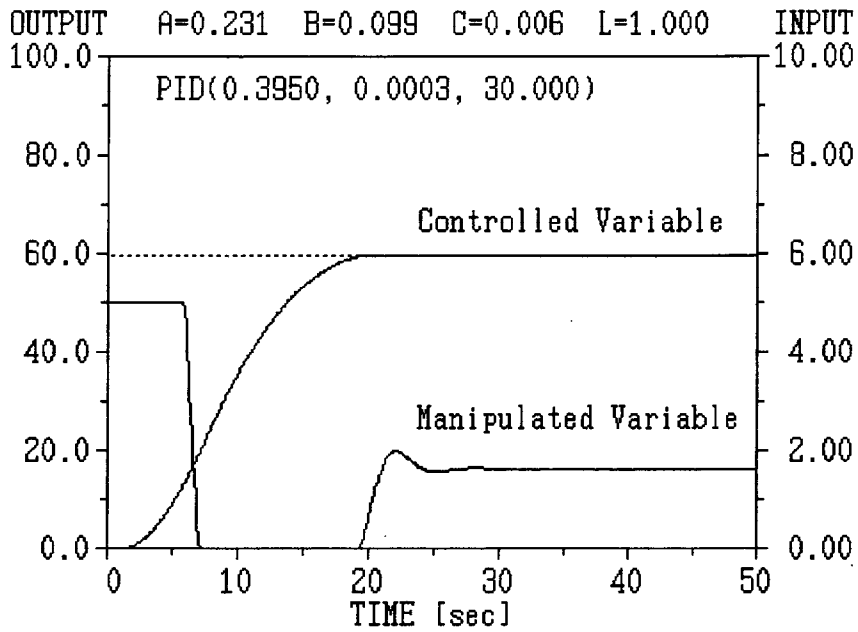


(a) 線形 PID 制御器

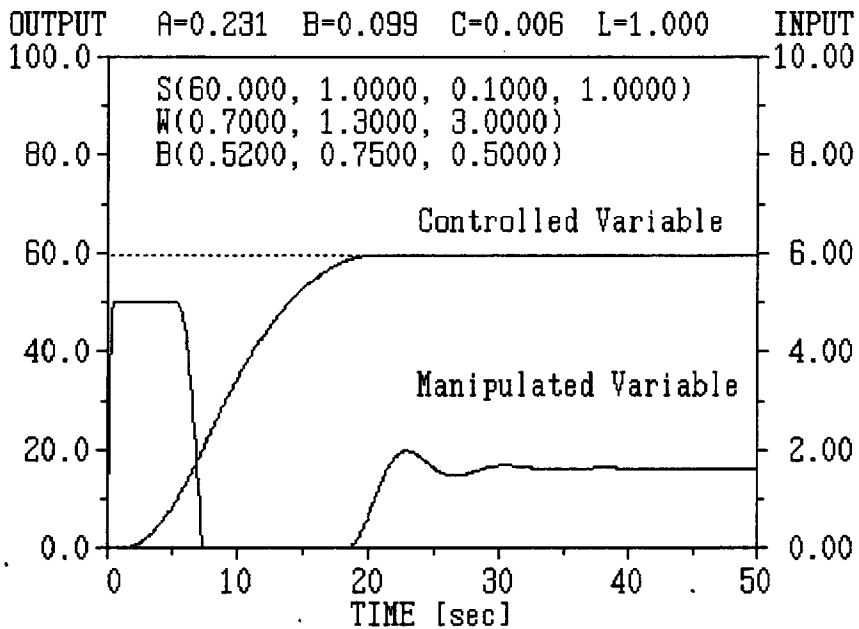


(b) SIRM_s 動的重視度結合型ファジィ推論モデル

図 3-9 「2 次遅れ+むだ時間系(2)」についての制御結果



(a) 線形 PID 制御器



(b) SIRM 動的重視度結合型ファジィ推論モデル

図 3-10 「2 次遅れ+むだ時間系(3)」 についての制御結果

3.4.3 線形 PID 制御器の拡張としての提案モデル

以上の制御シミュレーションからわかるように、本提案の動的重視度モデルでは制御開始時に入力項目の重視度を大きくし、目標値に近づくとつれてその値を小さくするような実時間操作によって、目標到達時間が短縮でき、オーバーシュートと定常誤差を発生せずスムーズに定常状態に移ることができる。

ところで、式(3-4)および本提案モデルによる「1次遅れ+むだ時間系」、「2次遅れ+むだ時間系」に対する定値制御系用ファジィ制御器の構成から、重視度の役割が線形 PI または PID 制御の係数に類似し、しかも各 SIRM の推論結果の重視度付き総和が線形 PI または PID 制御則に似ていることに注目し、ここでは本提案モデルと線形 PI または PID 制御との関係を明らかにする。

まず、式(3-6)より線形 PI 制御の場合の操作量の変化分は、

$$\Delta u^{PI}(k) = K_I \cdot x_1(k) + K_P \cdot x_2(k) \quad (3-9)$$

で求められる。ただし、 $x_1(k)$ と $x_2(k)$ は今までと同様に偏差と偏差の1階差分を表す。すなわち、偏差と積分係数、偏差の1階差分と比例係数、の積和で線形 PI 制御における操作量の変化分 $\Delta u^{PI}(k)$ が決まる。

「1次遅れ+むだ時間系」の定値制御に対して、本提案モデルによるファジィ制御器では操作量の変化分が、

$$\Delta u(k) = w_1^D(k) \cdot f[x_1(k)] + w_2^D(k) \cdot f[x_2(k)] \quad (3-10)$$

で与えられる。ただし、 $f[\cdot]$ は表 3-1 で決められる入出力関数を意味し、図 3-2 のメンバーシップ関数の形状より非線形であることがわかる。 $w_1^D(k)$ 、 $w_2^D(k)$ はサンプリング時刻 k における偏差と偏差の1階差分の動的重視度であり、表 3-2 と図 3-3 からわかるようにこれらもそれぞれの入力項目の非線形関数になっている。

ここで、式(3-10)を式(3-9)に比較すると、 $f[x_1(k)]$ を $x_1(k)$ に、 $f[x_2(k)]$ を $x_2(k)$ に対応させれば、偏差の動的重視度が線形 PI 制御器の積分係数に、偏差の1階差分の動的重視度が比例係数にそれぞれ対応していることがわかる。つまり、本ファジィ制御器の式(3-10)は通常の線形 PI 制御器に項目別に完全に対応できる。しかし、各動的重視度、各 SIRM の推論結果がともに対応する入力項目の非線形関数になっているので、 $w_1^D(k) \cdot f[x_1(k)]$ が $x_1(k)$ に関して、 $w_2^D(k) \cdot f[x_2(k)]$ が $x_2(k)$ に関してそれぞれ非線形になる。よって、式(3-10)が通常の線形 PI 制御器とは異なって非線形 PI 制御器であるといえる。また、 $f[x_i(k)]$ ($i=1,2$)を $x_i(k)$ の線形関数として定義しておき、重視度をすべて固定して(すなわち

変動幅をゼロにして) おけば、 $w_i^D(k) \cdot f[x_i(k)]$ が $x_i(k)$ に関して線形になるので、この場合の式(3-10)は線形 PI 制御器に帰着することになる。したがって、従来の線形 PI 制御器は、本提案モデルの特別な場合である。

次に、式(3-8)より線形 PID 制御の場合の操作量の変化分は、

$$\Delta u^{PID}(k) = K_I \cdot x_1(k) + K_P \cdot x_2(k) + K_D \cdot x_3(k) \quad (3-11)$$

で計算される。ただし、 $x_1(k)$ 、 $x_2(k)$ 、 $x_3(k)$ は同様にそれぞれ偏差、偏差の 1 階差分、偏差の 2 階差分を表す。すなわち、線形 PID 制御器における操作量の変化分 $\Delta u^{PID}(k)$ は偏差と積分係数、偏差の 1 階差分と比例係数、偏差の 2 階差分と微分係数の積和によって与えられる。

「2 次遅れ+むだ時間系」の定値制御に対して、以上からわかるように偏差、偏差の 1 階差分、偏差の 2 階差分を入力項目とした本提案モデルによるファジィ制御器では、操作量の変化分を、

$$\Delta u(k) = w_1^D(k) \cdot f[x_1(k)] + w_2^D(k) \cdot f[x_2(k)] + w_3^D(k) \cdot f[x_3(k)] \quad (3-12)$$

で表すことができる。ただし、 $f[\cdot]$ は同じく表 3-2 の入出力関数を意味し、 $w_1^D(k)$ 、 $w_2^D(k)$ 、 $w_3^D(k)$ はサンプリング時刻 k における偏差、偏差の 1 階差分、偏差の 2 階差分の動的重視度を表す。

ここで式(3-12)を式(3-11)と比較すると、 $f[x_1(k)]$ を $x_1(k)$ に、 $f[x_2(k)]$ を $x_2(k)$ に、 $f[x_3(k)]$ を $x_3(k)$ に対応させれば、偏差の動的重視度が線形 PID 制御の積分係数に、偏差の 1 階差分の動的重視度が比例係数に、そして偏差の 2 階差分が微分係数にそれぞれ対応することになり、式(3-12)は線形 PID 制御器の式(3-11)に項目ごとに対応していることがわかる。しかし、各動的重視度、各 SIRM の推論結果がともに対応する入力項目の非線形関数になっているので、 $w_i^D(k) \cdot f[x_i(k)]$ ($i=1,2,3$) が $x_i(k)$ に関して非線形になる。これによって、式(3-12)が通常の線形 PID 制御器とは異なり、非線形 PID 制御器を表すことがわかる。また、 $f[x_i(k)]$ を $x_i(k)$ の線形関数として定義しておき、重視度をすべて固定しておけば、 $w_i^D(k) \cdot f[x_i(k)]$ が $x_i(k)$ に関して線形になるので、式(3-12)は実質上線形 PID 制御器になる。したがって、従来の線形 PID 制御器が本提案モデルの特別な場合であるとみなせる。

同様に、もし偏差と偏差の 2 階差分を入力項目として操作量の変化分を出力項目とするファジィ制御器を本提案モデルに基づいて構築すれば、各項目ごとに線形 PD 制御器に対応する非線形 PD 制御器が得られることがわかる。

一方、従来のファジィ推論モデルで後件部に線形関数を置くことによって線形 PI または PID 制御が完全に実現できること^[47]が証明されている。位相部とゲイン部を個別に設計することによって線形 PD 制御器と恒等的に等しいファジィ制御器が作れること^[24]も示されている。しかし、それらはファジィルールを用いて線形 PID (PI と PD を含めて) 制御器を構成することができることを示しているに過ぎない。それに対し、SIRMs 動的重視度結合型ファジィ推論モデルに基づいて、線形 PID 制御器に項目ごとに対応する非線形 PID ファジィ制御器を構成することができる。

また、偏差と偏差の 1 階差分を前件部変数、操作量の変化分を後件部変数とする 2 入力 1 出力のファジィルールからなる従来のファジィ制御器は、非線形 PI 制御を実現しているといわれている^[18]が、その場合の操作量の変化分は、

$$\Delta u(k) = g[x_1(k), x_2(k)] \quad (3-13)$$

で表すことができる。ただし、 $g[\cdot]$ は非線形の 2 変数関数を表す。この式からわかるように、従来のファジィ制御器は線形 PI 制御器と同じ偏差と偏差の 1 階差分を入力とするが、操作量の変化分が偏差の部分と偏差の 1 階差分の部分に代数的に分解できないため、比例部分と積分部分からなる線形 PI 制御器には直接対応していないことになる。

なお、PID 制御器の各係数をファジィ推論でチューニングする手法^[89]が報告されているが、それは本提案モデルの式(3-12)において入出力関数 $f[x_i(k)]$ ($i=1,2,3$) を全部 $x_i(k)$ に置き換えて動的重視度を調整する場合に相当し、本提案モデルの特別な場合であるといえる。

制御問題において、各状態変数(入力項目)間に相互干渉が存在するが、それは基本的に加法的干渉と考えられる。1 次遅れ系の場合、例えば、偏差と偏差の 1 階差分が加法的に制御結果に現れる。そのため、制御要素の加算による PI 制御、PID 制御、線形状態フィードバック制御などはこのような制御問題にすでに数多く応用されている。本提案モデルでは、2 入力項目の場合は PI 制御に対応し非線形 PI 制御器になり、3 入力項目の場合は PID 制御に対応し非線形 PID 制御器になり、さらに倒立振子システムのように 4 入力項目以上の場合は線形フィードバック制御に対応し非線形フィードバック制御器になることも容易にわかる。したがって、制御問題に対して、本提案モデルは適している。

3.5 SIRM_s 固定重視度結合型ファジィ推論モデルとの比較^[93,108,114]

制御問題に対して、動的重視度モデルが固定重視度モデルよりも優位であることを検証するため、ここでは 3.4 とまったく同じ定値制御系である「1 次遅れ+むだ時間系」および「2 次遅れ+むだ時間系」を制御対象として、制御シミュレーションを行う。ただし、以下のシミュレーションにおいては、サンプリング周期を 0.1 秒に固定し、最大操作量を 5.0 とする。

3.5.1 「1 次遅れ+むだ時間系」について

表 3-3 に示されている三つの「1 次遅れ+むだ時間系」について、目標値を 1.0 として定値制御を行う。同様に、任意のサンプリング時刻 k において正規化後の偏差 $x_1(k)$ と偏差の 1 階差分 $x_2(k)$ をファジィ制御器の入力項目として操作量の変化分 $\Delta u(k)$ をファジィ制御器の出力項目とする。2.5 より、固定重視度モデルに基づくファジィ制御器は、偏差 $x_1(k)$ と偏差の 1 階差分 $x_2(k)$ にそれぞれ対応する表 3-1 の SIRM を計 2 個持つ。一方、3.4 より、動的重視度モデルによるファジィ制御器は、表 3-1 の SIRM を 2 個持つほか、偏差 $x_1(k)$ と偏差の 1 階差分 $x_2(k)$ の絶対値にそれぞれ対応する表 3-2 のルールテーブルも 2 個持つ。

ところが、2.5 では各プラントについての制御シミュレーションにおいて入力項目および出力項目のスケールリングファクタがプラントごとにそれぞれ異なっている。それは従来のファジィ推論モデルによる制御において最良の制御結果が得られるように選んだが、本提案モデルにとって必ずしも最適なものとは限らない。また、実用性と汎用性の立場から、パラメータの異なるプラントに対してもできるだけ同じセットのスケールリングファクタを使用することが望まれる。これによって、設計パラメータの個数を減らすことができ、設計者の負担を軽減することができる。

ここでは目標値が 1.0 であるので、安定な制御系であれば偏差は制御開始時に 1.0 であるがそれ以後 1.0 より小さくなる。したがって、この場合偏差の最大値が 1.0 であるので、偏差のスケールリングファクタを 1.0 に設定する。偏差の 1 階差分は、立ち上がりこそ少し大きくなるが、目標到達後基本的に小さくなる。そこで、目標到達後の安定性を重視するために、偏差の 1 階差分のスケールリングファクタを偏差のスケールリングファクタの 1% すなわち 0.01 に設定する。操作量の変化分のスケールリングファクタについては、3.4 において立ち上がりを速めるため 0.2 に設定したが、ここでは固定重視度モデルとのバランスを考慮してオーバーシュートを起こさないように操作量の変化分のスケールリングファクタを 0.1 に設定する。なお、動的重視度と操作量の変化分のスケールリングファクタの積が対

応する SIRM の出力変数のスケーリングファクタに相当するので、操作量の変化分のスケーリングファクタを 1.0 に設定して、動的重視度の各パラメータをそれぞれ 1/10 に縮小すれば、同じ結果が得られる。

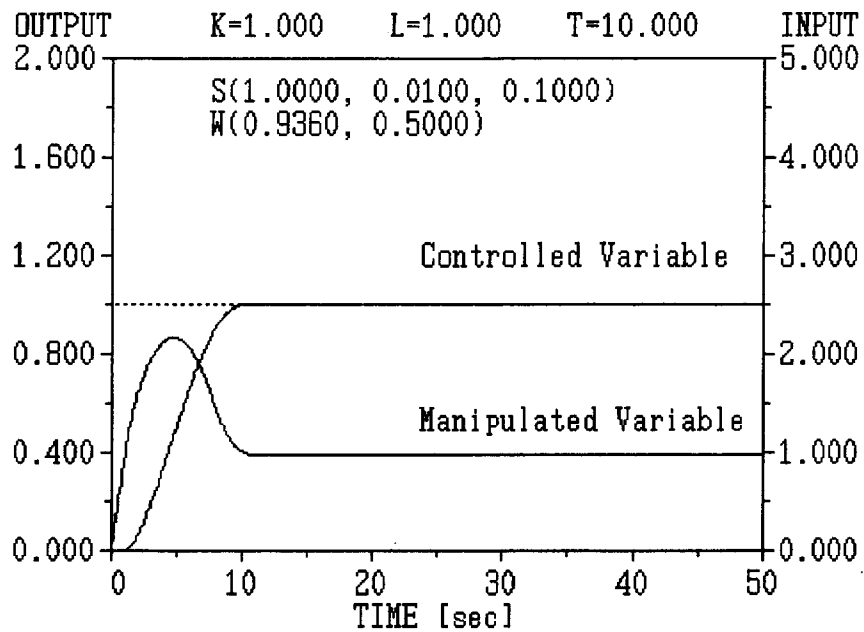
そして、シミュレーションにおいてオーバーシュートと振動および定常誤差を生じずに目標到達時間が最も短くなるように、固定重視度または動的重視度の基本値と変動幅を試行錯誤で調整する。具体的には、固定重視度モデルの場合は、まず偏差の固定重視度を小さな値から次第に増加していったら、オーバーシュートや振動が生じたら偏差の 1 階差分の固定重視度を大きくする。そして、制御結果が悪化する直前までそれを繰り返す。動的重視度モデルの場合は、まず偏差項目の動的重視度の変動幅を小さな値から開始し、オーバーシュートが起こったら偏差の 1 階差分項目の動的重視度の変動幅をオーバーシュートがなくなるまで引き上げる。このプロセスを繰り返した後、偏差項目の重視度の基本値を調整して目標到達時間を短くし、さらに偏差の 1 階差分項目の重視度の基本値でオーバーシュートと定常誤差を押さえ込む。最後に各パラメータの微調整を行う。

図 3-11、図 3-12、図 3-13 には、この三つのプラントについてこのようにして得られたシミュレーション結果を示している。各図において、(a)は固定重視度モデルによる結果であり、(b)は動的重視度モデルによる結果である。図 3-11(a)における記号 S(1.0000, 0.0100, 0.1000)の括弧中の数値は順に偏差、偏差の 1 階差分、操作量の変化分のスケーリングファクタを意味するが、これらの図からわかるように、この三つの例において両モデルとも入力項目と出力項目に対するスケーリングファクタをすべて統一している。また、図 3-11(a)における記号 W(0.9360, 0.5000)の括弧中の数値は固定重視度モデルの場合の各入力項目の固定重視度を表すのに対して、図 3-11(b)における記号 W(0.2000, 0.2000)の括弧中の数値は動的重視度モデルの場合の各入力項目の動的重視度の基本値を表す。記号 B(1.1230, 0.4000)の括弧中の数値は動的重視度モデルの場合における各入力項目の動的重視度の変動幅を表す。

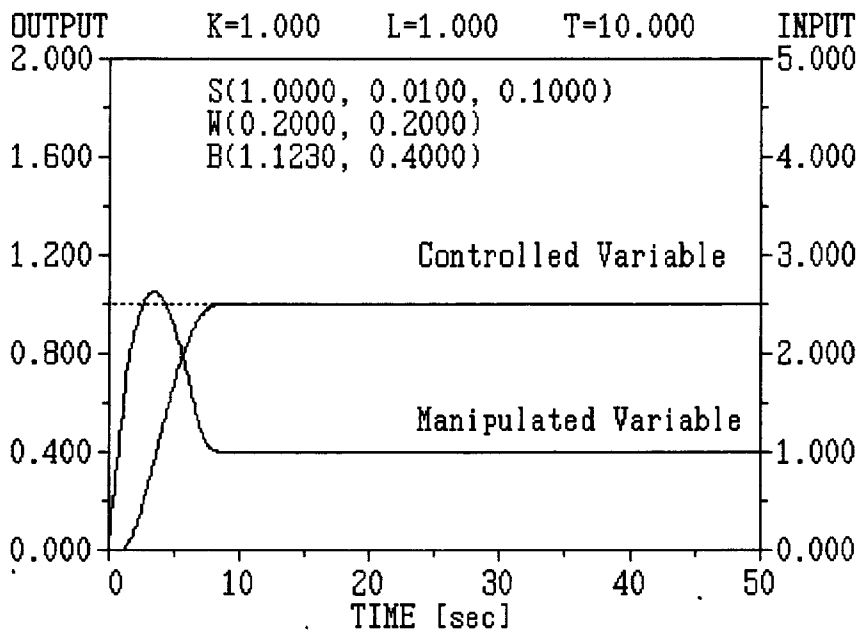
図 3-11 のように「1 次遅れ+むだ時間系(1)」について、目標値に到達するのに、固定重視度モデルの場合は約 10.0 秒間かかるのに対して、本動的重視度モデルの場合は約 8.0 秒である。また、固定重視度モデルの場合の ITAE は約 152.3 であるのに対して、本提案モデルの場合の ITAE は約 122.0 であり、20%ほど減少している。

図 3-12 のように「1 次遅れ+むだ時間系(2)」については、固定重視度モデルの場合に比べて、本提案モデルの場合は目標到達時間が 10%以上短縮できるほか、ITAE も 66.1 から 52.3 に 20%以上小さくなっている。

図 3-13 に示すように「1 次遅れ+むだ時間系(3)」については、両方とも短時間で目標に到達できるが、本提案モデルでは固定重視度モデルの場合より目標到達時間がさらに 20%以上短縮されている。また、ITAE は固定重視度モデルの場合には約 24.7 であるが、本提案モデルの場合には 20%以上小さい 18.2 になっている。

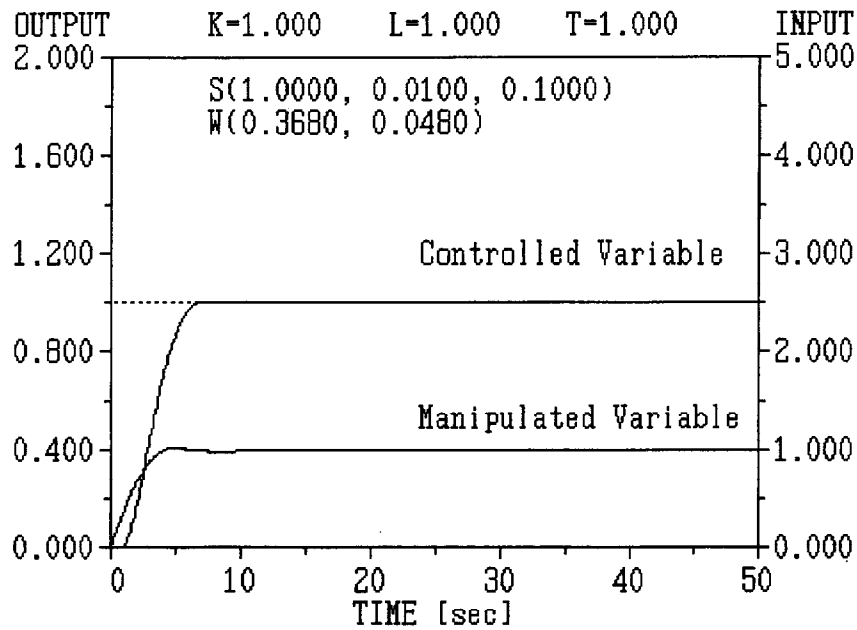


(a) SIRMs 固定重視度結合型ファジィ推論モデル

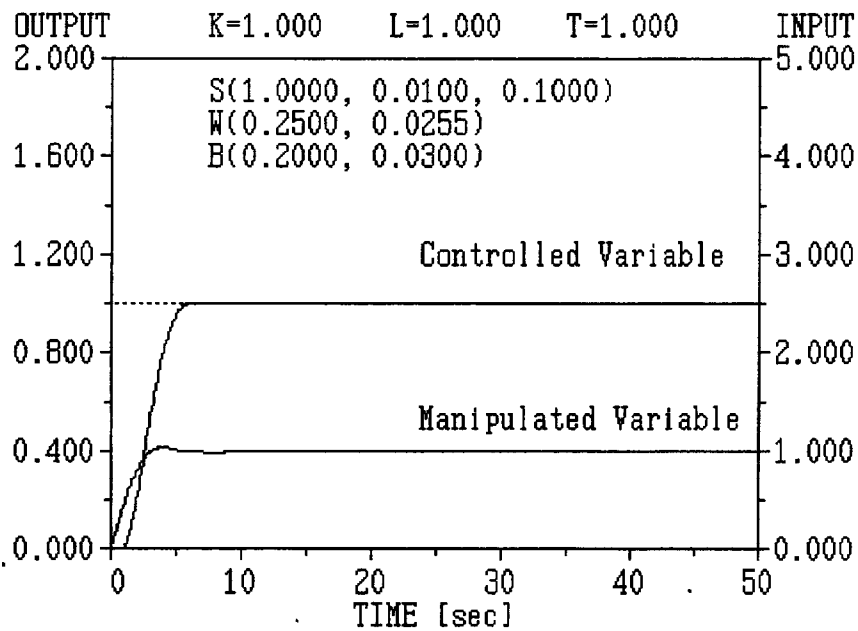


(b) SIRMs 動的重視度結合型ファジィ推論モデル

図 3-11 「1次遅れ+むだ時間系(1)」についての制御結果



(a) SIRMs 固定重視度結合型ファジィ推論モデル



(b) SIRMs 動的重視度結合型ファジィ推論モデル

図 3-12 「1次遅れ+むだ時間系(2)」についての制御結果

3.5.2 「2次遅れ+むだ時間系」について

表 3-4 に示す三つの「2次遅れ+むだ時間系」について、目標値 60.0 に対して固定重視度モデルと動的重視度モデルによる定値制御を行う。3.4 と同様に、正規化後の偏差 $x_1(k)$ 、偏差の 1 階差分 $x_2(k)$ 、偏差の 2 階差分 $x_3(k)$ を入力項目として操作量の変化分 $\Delta u(k)$ を出力項目とする。2.5 よりわかるように、固定重視度モデルに基づくファジィ制御器は、この三つの入力項目に対応して表 3-1 の SIRM を計 3 個有する。一方、動的重視度モデルに基づくファジィ制御器では、3.4 で述べたものとまったく同じ、各入力項目を前件部変数とする表 3-1 の SIRM を計 3 個持つほか、各入力項目の絶対値を前件部変数とする表 3-2 のルールテーブルを計 3 個必要とする。

この三つの「2次遅れ+むだ時間系」について、両モデルによるシミュレーション結果をそれぞれ図 3-14、図 3-15、図 3-16 に示す。ただし、記号 S(60.000, 1.0000, 0.1000, 1.0000) の括弧中の数値はそれぞれ偏差、偏差の 1 階差分、偏差の 2 階差分、および操作量の変化分のスケーリングファクタを意味する。同様の理由により、それは両モデルによるすべての制御シミュレーションにおいて統一して用いている。固定重視度モデルの場合、図 3-14(a)における記号 W(1.4000, 0.8000, 0.6000)の括弧中の数値は各入力項目に対する固定重視度になる。しかし、動的重視度モデルの場合、図 3-14(b)における記号 W(1.2400, 1.5000, 0.9000)の括弧中の数値は各入力項目の動的重視度の基本値に一致する。また、記号 B(30.000, 0.5000, 1.0000)の括弧中の数値は順に各入力項目に対する動的重視度の変動幅を表す。

なお、動的重視度モデルの場合において、各スケーリングファクタを含めてすべての設計パラメータを 3.4 の場合と同じ設定にしているため、当然ながらシミュレーション結果はまったく同じものが得られる。ただし、固定重視度モデルによるシミュレーション結果との比較をわかりやすくするため、動的重視度モデルによるシミュレーション結果をここで再表示している。

「2次遅れ+むだ時間系(1)」について、図 3-14 のように、固定重視度モデルでは目標到達時間が約 13.0 秒かかるのに対して、動的重視度モデルでは約 9.0 秒で目標に到達できる。また、固定重視度モデルの場合の ITAE は約 9880.6 であるのに対して、動的重視度モデルの場合の ITAE は約 8744.4 となり、10%以上小さくなっている。

「2次遅れ+むだ時間系(2)」について、図 3-15 に示しているように、固定重視度モデルの場合でも短時間で目標値に到達できる。しかし、動的重視度モデルでは目標到達時間がさらに 20%ほど短縮できている。また、ITAE は、固定重視度モデルの場合の 1241.5 から、動的重視度の場合の 765.4 に約 40%激減している。

「2次遅れ+むだ時間系(3)」について、図 3-16 のように、動的重視度モデルでも目標値に到達するのに約 20.0 秒間かかる。しかし、目標到達時間は固定重視度モデルの場合

に比べて 10%近く短縮されている。さらに、動的重視度モデルの ITAE は、固定重視度モデルの場合の 36524.8 に比べて 10%ほど小さい 33043.9 になっている。

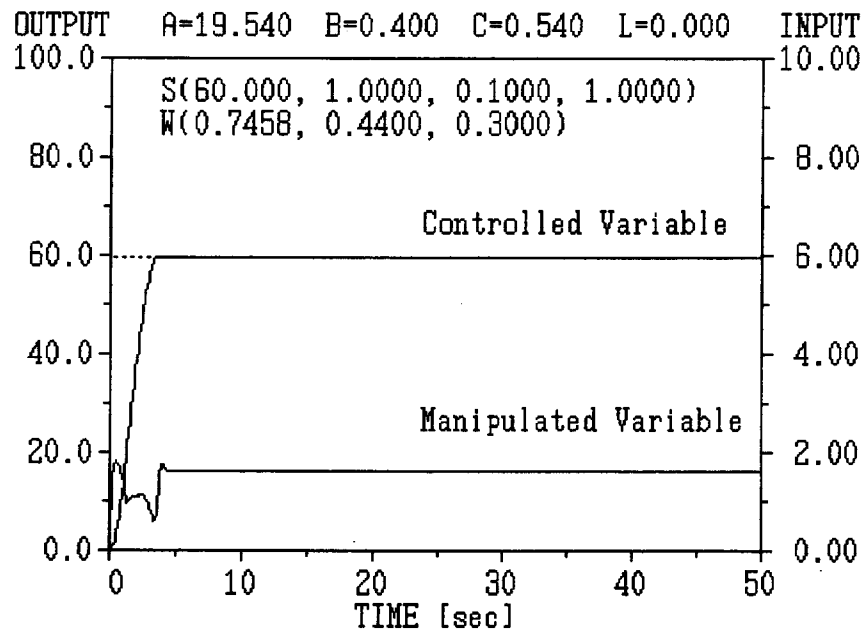
以上のシミュレーションでは、操作量の最大値をすべて 5.0 に制限している。そのため、図 3-14 と図 3-16 における操作量の時間応答曲線のように、5.0 より大きい操作量がすべて 5.0 にカットされるため、高さ 5.0 の水平直線部分が現れている。そこで操作量の制約をなくして、この二つの 2 次遅れ系に対して両モデルによる制御結果の比較を以下で改めて行うことにする。

ここで、この二つの 2 次遅れ系に対して最大操作量を無制限にして、各入力項目および出力項目のスケーリングファクタをそのままに固定する。図 3-17 と図 3-18 には、各入力項目の固定重視度または動的重視度のパラメータだけを調整して得たシミュレーション結果をそれぞれ示している。操作量が大きくとれるので、立ち上がりが速くなり、図 3-14 と図 3-16 の結果に比べて両モデルとも目標到達時間が短縮されていることがわかる。

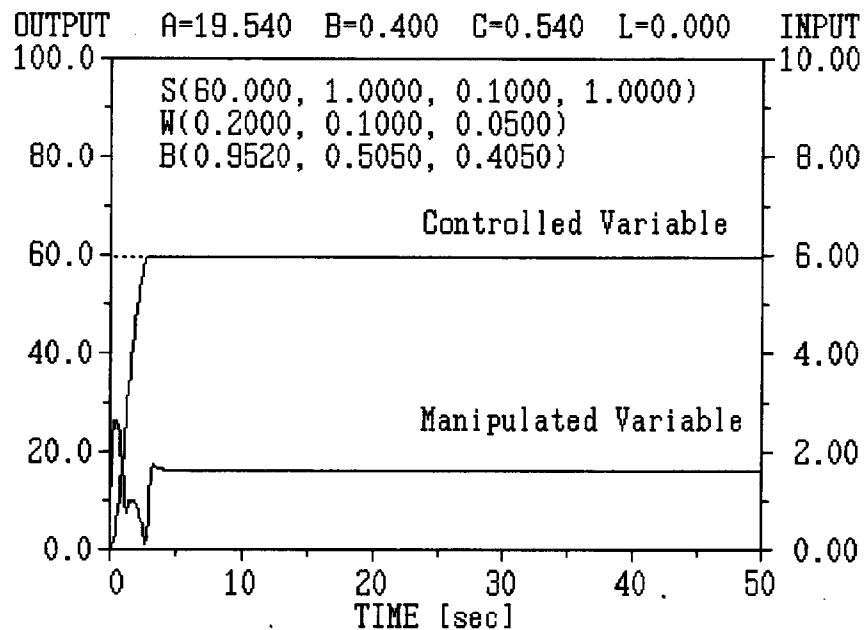
図 3-17 のように「2 次遅れ+むだ時間系(1)」について、固定重視度モデルでは、目標到達時間が約 8.3 となり、ITAE が約 5798.6 となっている。それに対して、動的重視度モデルでは、目標到達時間が約 6.9 秒と 20%近く短縮でき、ITAE が約 3921.7 と 30%以上も減少している。

図 3-18 に示すように「2 次遅れ+むだ時間系(3)」については、固定重視度モデルの場合目標到達時間が約 18.0 秒かかるが、動的重視度モデルの場合それが約 12.0 秒に短縮されている。また、固定重視度モデルの場合の ITAE は約 25332.5 であるのに対して、動的重視度モデルの場合の ITAE はその約半分の 13245.8 になっている。

以上のように「1 次遅れ+むだ時間系」および「2 次遅れ+むだ時間系」についてのシミュレーション結果から、固定重視度モデルに比べて、動的重視度モデルを用いることによって制御結果がさらに改善できることがわかる。

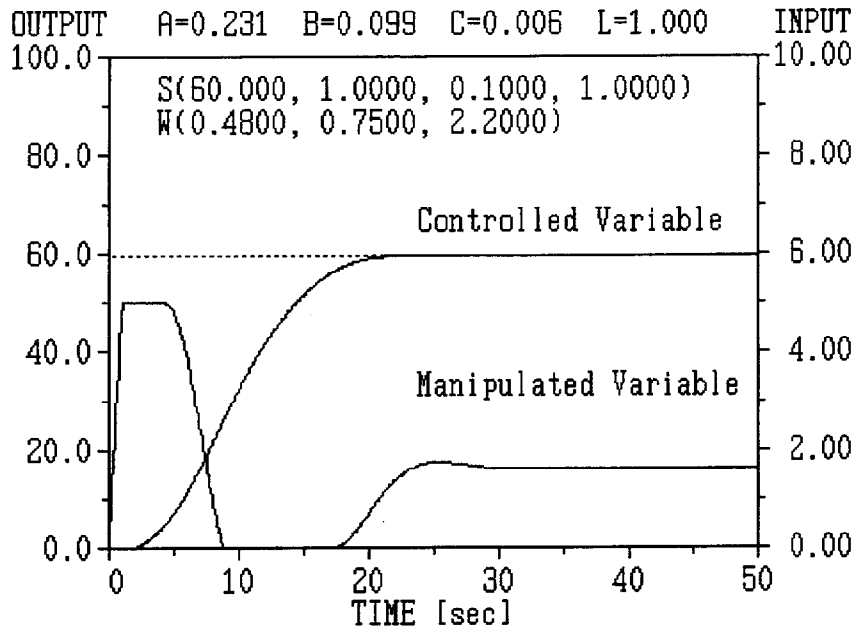


(a) SIRMs 固定重視度結合型ファジィ推論モデル

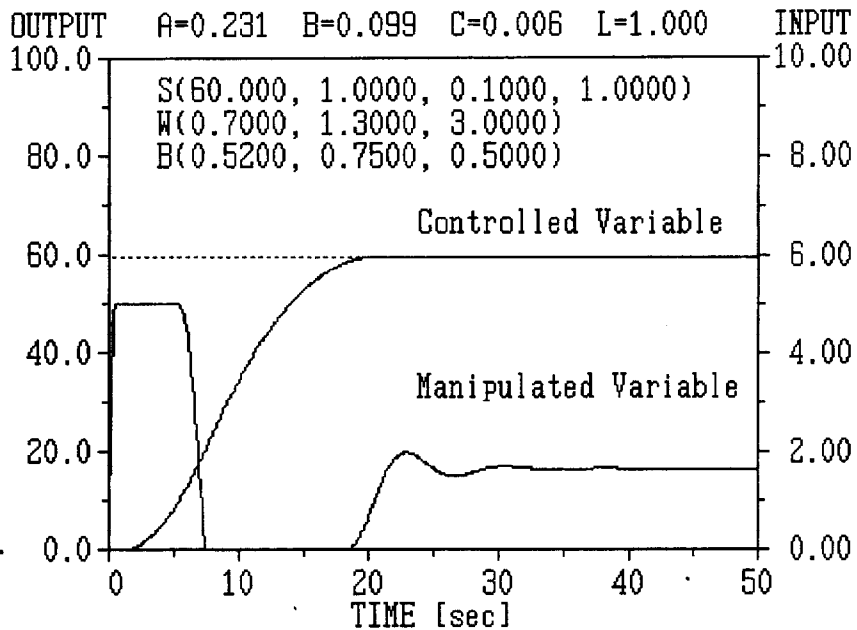


(b) SIRMs 動的重視度結合型ファジィ推論モデル

図 3-15 「2次遅れ+むだ時間系(2)」についての制御結果

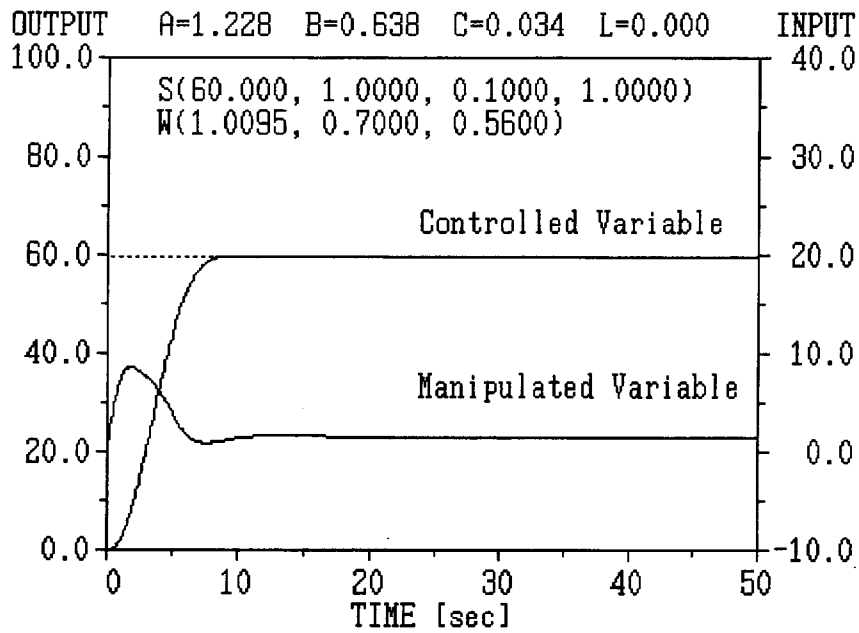


(a) SIRM_s 固定重視度結合型ファジィ推論モデル

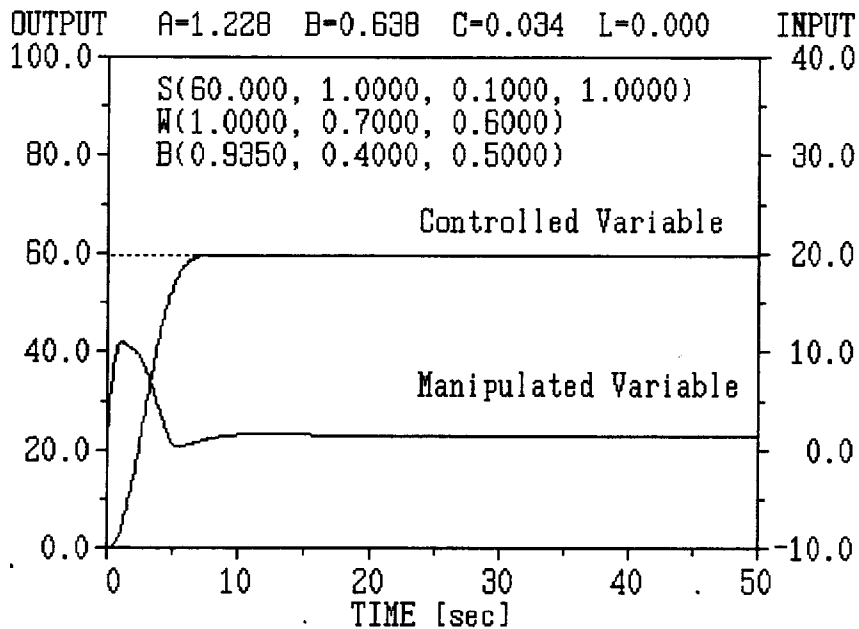


(b) SIRM_s 動的重視度結合型ファジィ推論モデル

図 3-16 「2次遅れ+むだ時間系(3)」についての制御結果

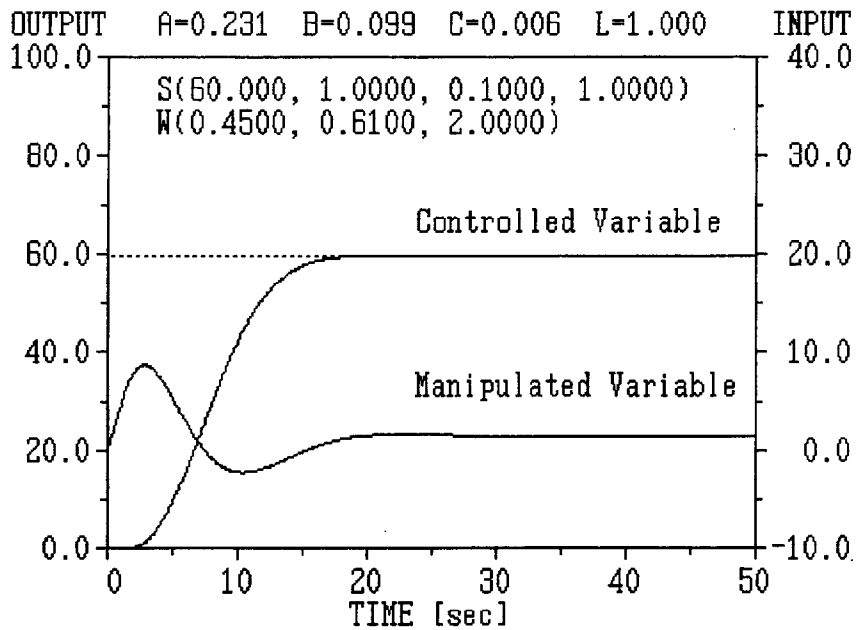


(a) SIRM_s 固定重視度結合型ファジィ推論モデル

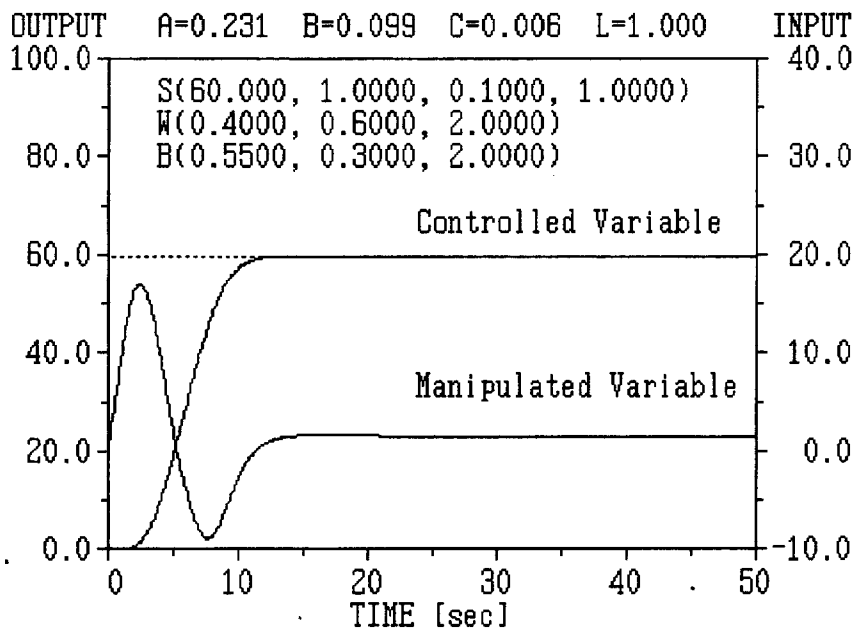


(b) SIRM_s 動的重視度結合型ファジィ推論モデル

図 3-17 「2次遅れ+むだ時間系(1)」について操作量無制限の場合の制御結果



(a) SIRMs 固定重視度結合型ファジィ推論モデル



(b) SIRMs 動的重視度結合型ファジィ推論モデル

図 3-18 「2次遅れ+むだ時間系(3)」について操作量無制限の場合の制御結果

3.5.3 固定重視度モデルと動的重視度モデルの比較

一般的に、偏差項目は、目標値と実際の出力との差に注目して、立ち上がりから目標到達までの間、あるいは制御の途中で振動が起こった間にシステムに影響を与える。偏差項目の重視度を大きく設定すると、制御対象の立ち上がりが速くなる傾向がある。また、偏差の1階差分は偏差の変化を示す量なので、定値制御系の場合実質上制御対象の出力の変化を表現することになる。したがって、偏差の1階差分の重視度を大きくすると、制御対象の出力を一定値に抑えようとすることになる。その結果、立ち上がりが遅れるが、振動が抑制される。さらに、偏差の2階差分は偏差の1階差分の変化を対象とするので、それに大きな重視度を与えると、偏差の1階差分の変化を均一化しようとすることになる。偏差の1階差分の変化量は制御対象の出力の傾斜に相当するので、この場合制御対象はほぼ直線的に目標値まで立ち上がることになる。

図 3-11 に示すように制御対象に実際に加わった操作量は、許容の最大操作量以下の値になっている。また、動的重視度モデルの場合、偏差および偏差の1階差分に対して設定した動的重視度はそれぞれいずれも、基本値が対応する固定重視度モデルの場合の固定重視度より低い、基本値と変動幅の和がその固定重視度より大きくなっている。しかも、偏差の動的重視度の各パラメータの値は対応する偏差の1階差分の動的重視度の各パラメータの値よりも大きくなっている。したがって、動的重視度モデルによる制御においては、制御開始直後から偏差の動的重視度の値が大きくなるので操作量の増加が速く、制御対象の立ち上がりも速くなっている。しかも目標値に近づくと偏差の動的重視度の値がより小さくなり、相対的に偏差の1階差分の影響力が強くなるので、制御対象の出力はオーバーシュートと振動などを起こさずにスムーズに目標値に達している。それは、最初は速応性重視であった制御目的が目標値近くから安定性重視に移り変わることを示している。

図 3-19 には、例として図 3-11 の動的重視度モデルによる制御対象の出力と固定重視度モデルによる制御対象の出力の差、および動的重視度モデルによる偏差項目の実際の動的重視度と固定重視度モデルによる偏差項目の固定重視度の差をそれぞれ表示する。出力に差が現れた部分は、基本的に固定重視度モデルによる目標値到達までの間の制御に対応している。また、重視度の差の曲線において、ゼロより上の部分は動的重視度の方が固定重視度より大きい、ゼロより下の部分は動的重視度の方が逆に小さいことを意味する。すなわち、制御開始より約 3.5 秒から動的重視度の値が固定重視度モデルの場合の固定重視度より小さくなっている。しかし、操作量がなめらかに変化するので、図 3-11 からわかるように動的重視度が固定重視度より小さくなくてもしばらくは大きな操作量が制御対象に加わり続けることができる。そのため、その後も目標値の近くまで接近速度をほぼ一定に保つことができ、そして目標値の手前で速度を大きく落とすことができる。結果として図 3-18 に示すように、固定重視度モデルによる目標値到達までの間の出力との差が正値に

なり、動的重視度モデルによる制御対象の出力が目標値までの距離をそれだけ速く縮めていることがわかる。

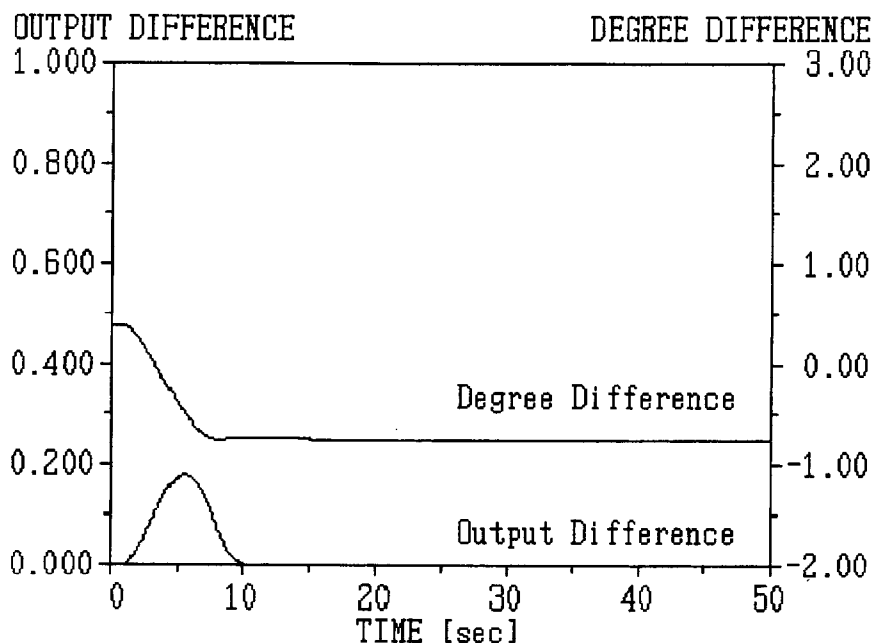


図 3-19 重視度と制御対象の出力との関係

また図 3-21 と図 3-22 にはそれぞれ、「1 次遅れ+むだ時間系(1)」に対して構築した固定重視度モデルによるファジィ制御器、および動的重視度モデルによるファジィ制御器の入出力制御特性を示す。入力項目 $x_1(k)$ と $x_2(k)$ がともに $[-1.0, 1.0]$ 以内である場合、固定重視度モデルではその構成からわかるように操作量の変化分 $\Delta u(k)$ が線形になるので、この領域に対応する入出力制御特性は図 3-21 に示すように平面状になる。これに対し、動的重視度モデルでは各動的重視度が対応する入力項目の値によって変わってくるので、この部分の入出力制御特性が図 3-22 に示すようになめらかな曲面になっている。また、一つの入力項目が $[-1.0, 1.0]$ の領域外になる場合も、動的重視度モデルは非線形の入出力制御特性を持つ。さらに、両入力項目がともに正（負）で大きいとき、動的重視度モデルでは正（負）でより大きな操作量の変化分を出すことができる。このように、動的重視度を導入することによって新たに非線形特性を作り出すことができ、制御性能の改善につながっていることがわかる。

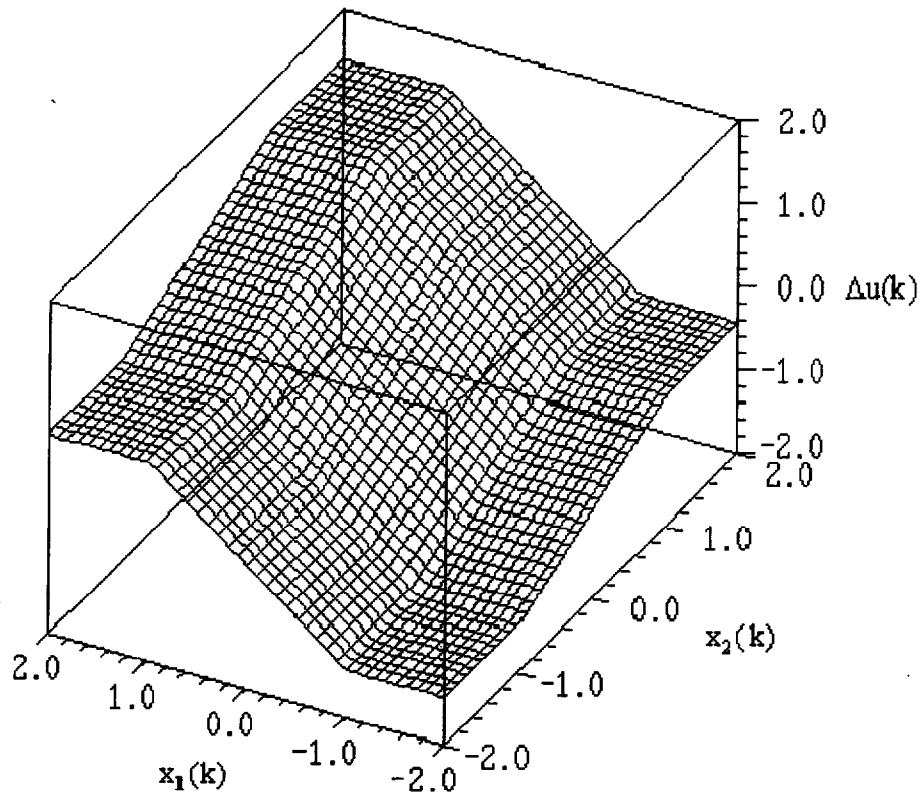


図 3-20 SIRM_s 固定重視度結合型ファジィ推論モデルの入出力制御特性

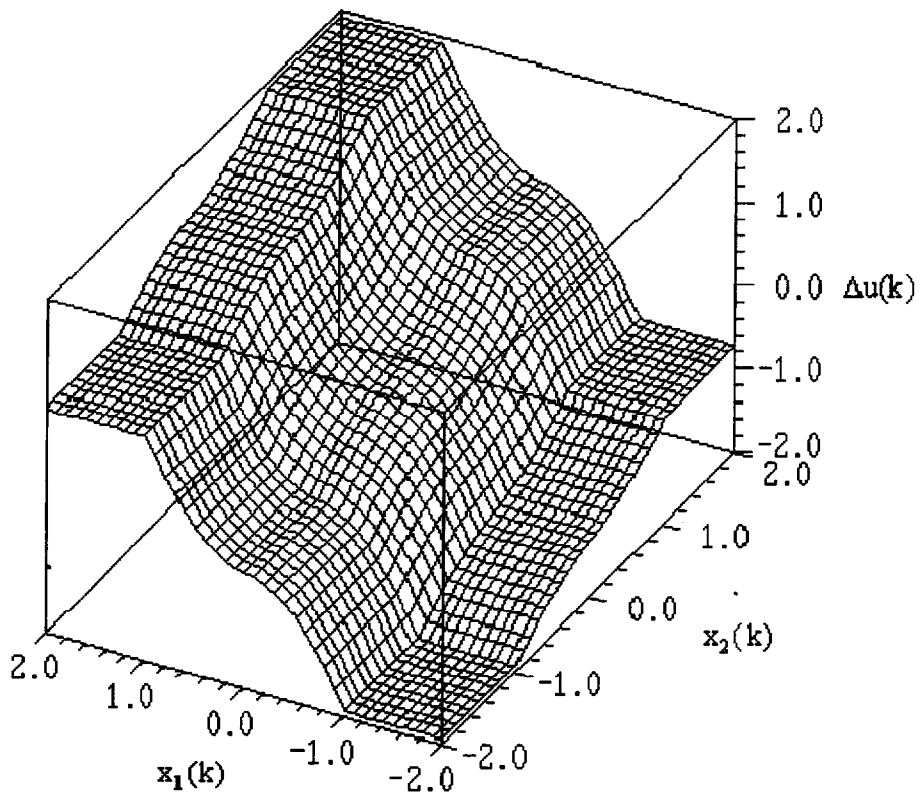


図 3-21 SIRM_s 動的重视度結合型ファジィ推論モデルの入出力制御特性

3.6 結言

SIRMs 固定重視度結合型ファジィ推論モデルでは、すべての重視度が固定されるため、制御系として適用するときには制御環境の変化に必ずしもうまく対応できない。そこで、この問題を解決するため、複数入力ファジィ制御系に対して各入力項目に動的重視度の概念を新たに導入して SIRMs 動的重視度結合型ファジィ推論モデルを提案した。本モデルでは、各入力項目に対してそれぞれ SIRM と動的重視度を与える。動的重視度は基本値と変動値からなり、基本値が対応する入力項目の定常状態における基本的な役割を果たし、変動値が制御状況に応じて動的に変化して動的重視度の大きさを調整する役割を持つ。これによって、各入力項目が状況に応じて異なる重視度を持つことが可能になる。

次に、定値制御系に対して、SIRMs 動的重視度結合型ファジィ推論モデルに基づくファジィ制御器の構成手法を示した。定値制御系の特徴から、各入力項目に関する SIRM、および各変動量変数に関するファジィルールテーブルが容易に設定できることを述べた。各変動量変数の値を求めるのに対応する入力項目の局所的情報を用いればよく、モデル全体のファジィルール数などを小さく抑えていることを明らかにした。

そして、「1次遅れ+むだ時間系」および「2次遅れ+むだ時間系」を制御対象として、従来の線形 PID 制御器と動的重視度モデルに基づくファジィ制御器によるシミュレーションを行った。動的重視度モデルの場合は、立ち上がりが遅れる傾向があるものの、目標到達時間が線形 PID 制御器の場合とだいたい同程度になるかまたは線形 PID 制御器の場合よりも短縮できるほか、ITAE もほとんどの場合において減少できることを示した。また、偏差と偏差の1階差分を入力項目として操作量の変化分を出力項目とする動的重視度モデルが、線形 PI 制御器と項目ごとに対応し、非線形 PI 制御器になることを証明した。さらに、偏差と偏差の1階差分および偏差の2階差分を入力項目として操作量の変化分を出力項目とする動的重視度モデルが、線形 PID 制御器と項目ごとに対応し、非線形 PID 制御器になることを証明した。

最後に、固定重視度モデルと動的重視度モデルを「1次遅れ+むだ時間系」および「2次遅れ+むだ時間系」に適用し、定値制御の結果比較を行った。固定重視度モデルに比べて、動的重視度モデルの場合はファジィルール総数が約倍になるが、立ち上がり時と安定状態時のような異なる制御状況に効率よく動的に対応できる。また、動的重視度モデルの場合は目標到達時間がさらに10%近くあるいはそれ以上短縮でき、ITAE も10%近くあるいはそれ以上小さくなることを示した。

第4章 1次遅れ系における動的重視度パラメータ設定手法

4.1 緒言

第3章で述べたように、SIRMs 動的重視度結合型ファジィ推論モデル^[93,107,108,111,114]では、制御状況に応じて動的に変化する動的重視度を導入しているため、「1次遅れ+むだ時間系」と「2次遅れ+むだ時間系」のような定値制御系に対しオーバーシュートやアンダーシュートあるいは振動などを起こさずに、目標到達時間を大幅に短縮することができた。しかし、そこでは動的重視度の基本値と変動幅を設定する系統的な方法は提案されておらず、試行錯誤でこれらのパラメータ調整を行った。

従来の線形 PID 制御においては、比例係数、積分係数、微分係数が設計パラメータである。また、メンバーシップ関数とファジィルールをすべて固定とするファジィ制御器を考えると、従来のファジィ推論モデルに基づくファジィ制御器では、各入力項目と出力項目のスケールリングファクタが設計パラメータになる。一方、SIRMs 固定値重視度結合型ファジィ推論モデルに基づくファジィ制御器の場合は、各スケールリングファクタの他、各入力項目の固定値重視度も設計パラメータになる。SIRMs 動的重視度結合型ファジィ推論モデルに基づくファジィ制御器では設計パラメータとして、出力項目のスケールリングファクタ、各入力項目のスケールリングファクタ、各入力項目の動的重視度を定める基本値と変動幅が含まれている。したがって、SIRMs 動的重視度結合型ファジィ推論モデルを適用するときには、予め決めなければならない設計パラメータ数が最も多く作業者に重い負担がかかるため、これらのパラメータに関する系統的な設定手法が望まれる。

一方、「1次遅れ+むだ時間系」に関する限界感度法やステップ応答法など^[74]が、従来の線形 PID 制御器における比例係数、積分係数、微分係数を設定する手法としてよく知られている。しかし、これらの設定手法では制御結果に対する評価指標の制約はゆるく、通常オーバーシュートは 20%程度まで許容され、整定時間についても制御開始から制御量が定常値を中心とする上下 5%の範囲内に収まるまでの時間とされている。また、限界感度法を適用するには、まずプラントの安定限界を調べる必要がある。そして、ステップ応答法は、むだ時間のないプラントに利用できない。

従来のファジィ推論モデルに基づくファジィ制御において、朝山ら^[3]は「1次遅れ+むだ時間系」のファジィコントローラに対して初めて入力項目のスケールリングファクタの最適調整式をまとめた。さらに田中ら^[78]はファジィ規則表の回転を利用して、むだ時間の補償もでき異なる目標値に対しても対応できる設定公式を与えている。しかし、この二つの調整手法では、いずれもオーバーシュートを 20%としている。藤本ら^[8]は「1次遅れ+むだ時間系」に対して目標値を考慮した入出力項目のスケールリングファクタに関する最適

調整式を導出している。この場合、オーバーシュートが小さく抑えられるが、アンダーシュートが目立ち、振動も発生する。

この章では、純粋な1次遅れ系を制御対象として、SIRMs 動的重視度結合型ファジィ推論モデルで偏差と偏差の1階差分を入力項目とするファジィ制御器を構築して、動的重視度のパラメータの設定手法^[110]を試みる。サンプルプラントに対してランダム最適探索法^[4,83]で収集した最適な動的重視度のパラメータのデータベースに基づいて、各動的重視度の基本値と変動幅の設定式を導く。本設定式を用いることによって、広範囲の純粋な1次遅れ系に対して振動と定常誤差なしでオーバーシュートとアンダーシュートがともに1.0%程度に抑えられ、制御量が速やかに目標値に到達できることを示す。

4.2 ファジィ制御器の構成

むだ時間なしの純粋な1遅れ系の伝達関数は、

$$G(s) = \frac{K}{1+T \cdot s} \quad (4-1)$$

で記述される。ただし、係数 K と T はそれぞれプロセスゲインと時定数を表す。ここでは SIRMs 動的重視度結合型ファジィ推論モデルに基づいて、任意のサンプリング時刻 k (サンプリング周期を ΔT とすれば、正確には $k \cdot \Delta T$ となるが、簡単のため以下は単に k に略す) における正規化後の偏差 $x_1(k)$ と偏差の1階差分 $x_2(k)$ を入力項目、操作量の変化分 $\Delta u(k)$ を出力項目として、一定の目標値に対する1次遅れ系のファジィ制御器を構築する。

3.3 で述べた定値制御系のファジィ制御器の構成手法からわかるように、この場合入力項目 $x_1(k)$ と $x_2(k)$ に対して SIRM をそれぞれ表 4-1 と表 4-2 のように設定できる。ここでは、各 SIRM において対応する入力項目が唯一の前件部変数となっている。後件部には、出力項目に対応する中間変数がそれぞれ $\Delta u_1(k)$ と $\Delta u_2(k)$ と定義されている。また、スケーリングファクタで正規化された両入力項目 $x_1(k)$ と $x_2(k)$ に対して、ともに台集合 $[-1.0, 1.0]$ 上に等間隔でファジィ集合を三つ定義し、それぞれのメンバーシップ関数を図 4-1 に示すように三角形ないし台形で与える。さらに簡略化推論法を用いるため、ファジィルールの後件部変数の出力に実数値を設定している。

表 4-1 入力項目 $x_1(k)$ に対応する SIRM

前件部変数 $x_1(k)$	後件部変数 $\Delta u_1(k)$
NB	-1.0
ZO	0.0
PB	1.0

表 4-2 入力項目 $x_2(k)$ に対応する SIRM

前件部変数 $x_2(k)$	後件部変数 $\Delta u_2(k)$
NB	-1.0
ZO	0.0
PB	1.0

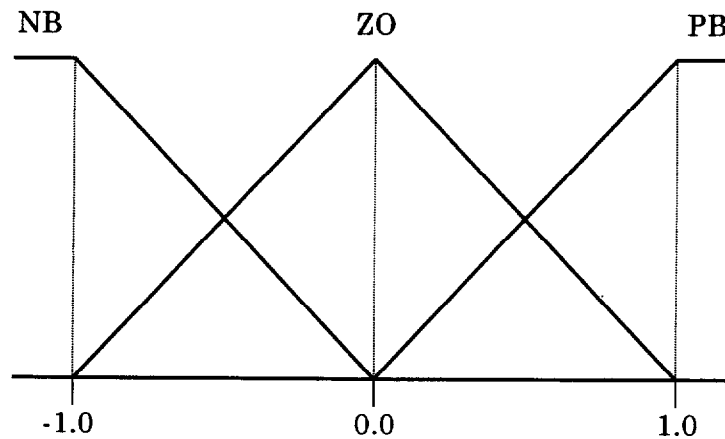


図 4-1 各入力項目のメンバーシップ関数

一方、各入力項目 $x_i(k)$ の動的重視度 $w_i^D(k)$ は、

$$w_i^D(k) = w_i + B_i \cdot \Delta w_i^0(k) \quad (4-2)$$

で定義される。ただし、パラメータ w_i は動的重視度の基本値を意味し、対応する入力項目の定常状態時における役割を保証する。パラメータ B_i は動的重視度の変動幅を表し、

動的重視度の変動上限を制限する。 $\Delta w_i^0(k)$ は制御状況に応じて $[0.0, 1.0]$ 内に動的に変化する変動量変数 $\Delta w_i(k)$ の推論値を表す。

表 4-3 変動量変数 $\Delta w_1(k)$ のファジイルール

前件部変数 $ x_1(k) $	後件部変数 $\Delta w_1(k)$
DS	0.0
DM	0.5
DB	1.0

表 4-4 変動量変数 $\Delta w_2(k)$ のファジイルール

前件部変数 $ x_2(k) $	後件部変数 $\Delta w_2(k)$
DS	0.0
DM	0.5
DB	1.0

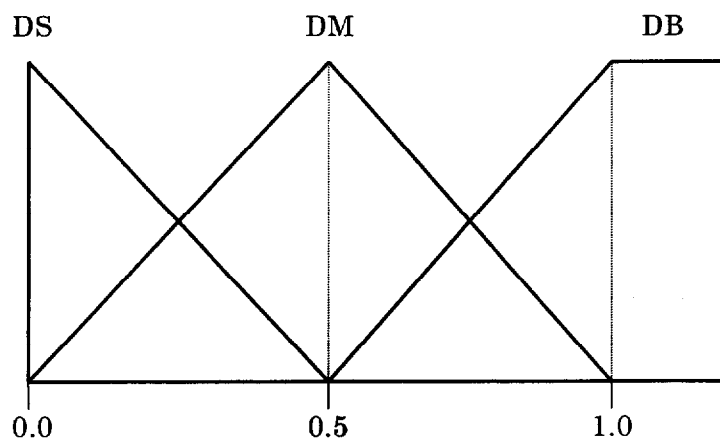


図 4-2 各入力項目の絶対値のメンバーシップ関数

同様に、サンプリング時刻 k における正規化後の入力項目 $x_1(k)$ の絶対値を前件部変数として変動量変数 $\Delta w_1(k)$ を後件部変数とする 1 入力 1 出力のファジイルールテーブル、

および入力項目 $x_2(k)$ の絶対値を前件部変数として変動量変数 $\Delta w_2(k)$ を後件部変数とする 1 入力 1 出力のファジィルールテーブルをそれぞれ表 4-3 と表 4-4 のように作ることができる。そして簡略化推論法でサンプリング時刻 k のときの変動量変数の推論値 $\Delta w_1^0(k)$ と $\Delta w_2^0(k)$ を実時間で求めることができる。ただしここでは、ファジィラベル DS、DM、DB は図 4-2 のように台集合 $[0.0, 1.0]$ 上に等間隔に分布する前件部変数の三角形または台形メンバーシップ関数で表される。

ここで、各 SIRM の実際の出力値 $\Delta u_1^0(k)$ および動的重視度 $w_1^D(k)$ が求められたとすると、サンプリング時刻 k における本ファジィ制御器の出力 $\Delta u^0(k)$ は、

$$\Delta u^0(k) = w_1^D(k) \cdot \Delta u_1^0(k) + w_2^D(k) \cdot \Delta u_2^0(k) \quad (4-3)$$

で各 SIRM の推論結果の動的重視度付き総和として計算する。

図 4-3 には、本ファジィ制御器の構成図を示している。ただし、 $x_1(k)$ と $x_2(k)$ はすでに正規化された入力項目であり、SIRM ブロックおよび DID ブロックに入力される。各 SIRM ブロックは対応する入力項目の現在値に基づいて出力項目に対応する中間変数を推論する。各 DID ブロックは対応する入力項目の絶対値に基づいて変動量変数を推論した後動的重視度の値を計算する。なお、本ファジィ制御器の出力 $\Delta u(k)$ に出力項目のスケールリングファクタをかけて得た値が、実際にプラントに加わる操作量の変化分になる。

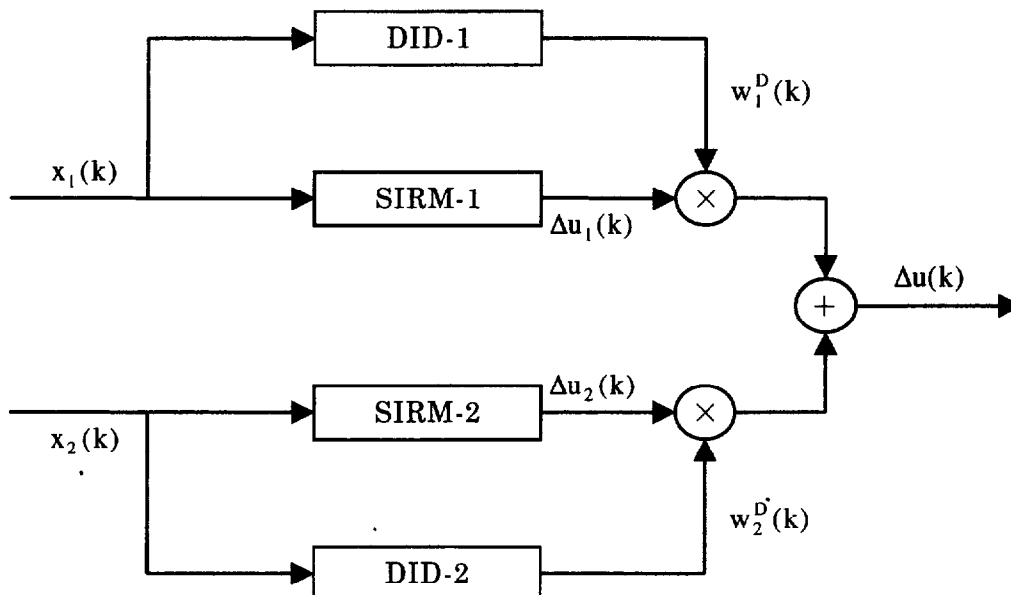


図 4-3 本ファジィ制御器の構成図

4.3 動的重視度のパラメータの設定式導出

プロセスゲインがプラントの動特性に関係しないため、ここではプロセスゲインを $K=1.00$ に固定し、時定数の範囲を $0.20 \leq T \leq 30.00$ とする。また、目標値 R を 1.00 とする。プロセスゲインと目標値がそれ以外の場合については、後の制御シミュレーションで対応策を述べる。サンプリング周期を文献^[3,8]と同じように 0.1 秒に固定する。さらに、本ファジィ制御器のファジィルールおよびメンバーシップ関数はすべて 4.2 で示した通りに固定する。

偏差の最大値は通常目標値以内に収まるので、偏差に対応する入力項目のスケーリングファクタを 1.00 に設定する。実際、偏差の 1 階差分の最大値は不明であるが、プラントの出力がなめらかに変化することを期待して、偏差の 1 階差分に対応する入力項目のスケーリングファクタを偏差の最大値の 1% すなわち 0.01 に設定する。式(4-3)より、プラントに加わる操作量変化分の実際の大きさは、各 SIRM の推論値に対応する動的重視度と出力項目のスケーリングファクタの積をかけたものから構成されているので、ここでは出力項目のスケーリングファクタを 0.10 に選ぶ。したがって、ここでは入出力項目のスケーリングファクタの設定値は 3.5 の「1 次遅れ+むだ時間系」の場合のものとまったく同じになり、一貫性が保たれていることがわかる。なお、出力項目のスケーリングファクタをほかの値に設定することも可能であるが、その場合動的重視度と出力項目のスケーリングファクタの積が一定値になるように、以下に示す動的重視度の各パラメータの設定式を同倍率で割ればよい。

両入力項目の動的重視度を定めるパラメータは、偏差の動的重視度の基本値 w_1 と変動幅 B_1 、偏差の 1 階差分の動的重視度の基本値 w_2 と変動幅 B_2 である。これらのパラメータの設定式を導出するのに、 $0.20 \leq T \leq 30.00$ という時定数の範囲から代表的な時定数を選んで対応する純粋な 1 次遅れ系（サンプルプラント）を制御対象とする。そして、サンプルプラントに対して、この四つのパラメータをランダム最適探索法^[4,83]で求める。

現在の探索回数を t として、探索したいパラメータからなるベクトルを $v(t)$ とする。要素数がベクトル $v(t)$ と同じであるガウス型ランダムベクトルを $g(t)$ として、その中心をベクトル $b(t)$ とする。ベクトル $v(t)$ に関する評価関数を $p[v(t)]$ とすると、ベクトル $v(t)$ の要素数に等しい次元の探索空間において、ランダム最適探索を表 4-5 の手順にしたがって行うことができる。

表 4-5 ランダム最適探索手順

ステップ 0	探索回数を $t=0$ として、ガウス型ベクトルの中心を $b(0)=0$ に初期化し、探索ベクトル $v(0)$ をランダムに生成する
ステップ 1	その時の評価関数 $p[v(t)]$ を計算する
ステップ 2	$b(t)$ を中心にガウス型ベクトル $g(t)$ の各要素をそれぞれ独立にランダムに生成する
ステップ 3	探索空間において現探索ベクトルとガウス型ベクトルの和で決定される位置を新しい探索点として評価関数 $p[v(t)+g(t)]$ を計算する。もし $p[v(t)+g(t)] < p[v(t)]$ すなわち評価関数値が減少するならば、その新しいベクトルが次回の探索における探索ベクトルになるように、現探索ベクトルとガウス型ベクトルの中心をそれぞれ $v(t+1)=v(t)+g(t)$ と $b(t+1)=0.4g(t)+0.2b(t)$ に更新して、ステップ 6 に進める。さもなければ、ステップ 4 に進める
ステップ 4	探索空間において現探索ベクトルとガウス型ベクトルの差で決定される位置を新しい探索点として評価関数 $p[v(t)-g(t)]$ を計算する。もし $p[v(t)-g(t)] < p[v(t)]$ すなわち評価関数値が減少するならば、その新しいベクトルが次回の探索における探索ベクトルになるように、現探索ベクトルとガウス型ベクトルの中心をそれぞれ $v(t+1)=v(t)-g(t)$ と $b(t+1)=b(t)-0.4g(t)$ に更新して、ステップ 6 に進める。さもなければ、ステップ 5 に進める
ステップ 5	正方向と負方向の探索がともに失敗したので、探索ベクトルを変化させずにガウス型ベクトルの中心ベクトルを半分に縮めて、すなわち $v(t+1)=v(t)$ と $b(t+1)=0.5b(t)$ にして、ステップ 6 に進める
ステップ 6	探索回数を $t=t+1$ に更新する。もしそれが指定の最大探索回数にまだ達していなければステップ 1 に戻って探索を繰り返す；さもなければ探索を終了する

ランダム最適探索法では、探索空間上でランダムに候補を探すことによって、最急降下法^[70]のように極小点に陥って出られなくなることはなく、無限に探索を続ければ最小点に収束することが可能であることが理論上保証されている。しかも、制御対象と制御器からなる制御系の場合、評価関数によって制御器の良し悪しが直接評価できるので、その後段にある制御対象の同定モデル^[82]またはシステムヤコビアン^[1]を求める必要がない。

ここでは、両入力項目の動的重視度の基本値と変動幅から 4 要素の探索ベクトル $v(t)$ に対して、探索回数 t のときの評価関数を、

$$p[v(t)] = \sum_{k=1}^{SS} (1 + C \cdot P_1 + D \cdot P_2) \cdot |R - y(k)| \cdot k \cdot \Delta T \quad (4-4)$$

で定義する。式(4-4)において、SS は 1 回のランダム探索における制御開始からの最大サンプリングステップ数であり、 $y(k)$ はサンプリング時刻 k のときのプラントの出力値である。パラメータ C はプラントの出力値が目標値と交差した回数を表す。プラントが立ち上がってから目標値を超えなければゼロになるが、目標値を往復するような振動が生じたときには大きくなる。パラメータ D はプラントの出力の変化値の符号が変化した回数を意味する。オーバーシュートやアンダーシュートが発生した場合に、さらに目標到達前にすでに振動が起きた場合にもカウントされる。 P_1 と P_2 はともに非負のペナルティ係数である。 P_1 と P_2 をともにゼロに設定した場合、式(4-4)は従来用いられる偏差の絶対値の時間重み付き積分^[74]の離散形になる。しかし、この二つのペナルティ係数を正值に設定すると、偏差の絶対値に $C \cdot P_1$ と $D \cdot P_2$ が加かるので、定常誤差だけではなく、オーバーシュートとアンダーシュートおよび振動も評価値に反映される。したがって、式(4-4)は、拡張した偏差の絶対値の時間重み付き積分ともいえ、オーバーシュートとアンダーシュートおよび振動などを抑制するのに有効である。

ところが、 $0.20 \leq T \leq 30.00$ の時定数の範囲から選んだサンプルプラントに対して動的重視度の各パラメータの値をランダム最適探索法で求めることができるが、サンプルプラントによってパラメータ値が大きく異なるので、この時定数の範囲をすべてカバーするような簡潔な設定式を得ることができない。そこで、時定数領域 $0.20 \leq T \leq 30.00$ を試行錯誤で四つの部分領域に分割してそれぞれの設定式を求めることにする。表 4-6 のように、各部分領域においていくつかの代表的な時定数を決め、その時定数を持つ純粋な 1 次遅れ系をサンプルプラントとする。

表 4-6 時定数領域分割と各代表時定数

時定数領域分割	サンプルプラントの時定数
$0.20 \leq T \leq 0.70$	0.20、0.40、0.60
$0.70 < T \leq 1.80$	1.00、1.20、1.40、1.60
$1.80 < T \leq 5.00$	2.00、3.00、4.00、5.00
$5.00 < T \leq 30.00$	10.00、15.00、20.00、25.00、30.00

そして、ペナルティ係数 P_1 と P_2 を経験的にそれぞれ 100 と 25 に選んで、最大サンプリングステップ数 SS を 250 (すなわち 1 回のランダム探索が 25 秒間になる) に設定する。各サンプルプラントに対して上記の評価関数を用いてそれぞれランダム探索を 10000 回行い、各重視度の基本値と変動幅のデータを求める。パラメータごとにこれらのデータを集めて各部分領域のデータベースを構築する。各部分領域について、パラメータごとのデータベースにあるデータを観察し規則性を抽出して、経験的に式にまとめる。それから、時定数を同部分領域内のサンプルプラントの中で最小の時定数から最大の時定数まで 0.01 ずつ変化させて生成する各プラントに対して制御動作をチェックし、振動を発生せずオーバーシュートとアンダーシュートも小さくなるように式と係数を試行錯誤的に修正する手順を繰り返す。

なお、部分領域の境界にあるサンプルプラント間の時定数領域 (例えば、部分領域 $0.20 \leq T \leq 0.70$ のサンプルプラントの時定数 0.60 から、部分領域 $0.70 < T \leq 1.80$ のサンプルプラントの時定数 1.00 までの間) については外挿になるので、同じく 0.01 の間隔で生成した各プラントをそれぞれの設定式で制御して制御性能の比較を行う。これによって、部分領域間の最終境界線を決める。

以下は各部分領域における動的重視度の各パラメータの設定式を示す。

a) 領域 $0.20 \leq T \leq 0.70$

この場合、偏差と偏差の1階差分の動的重視度の各パラメータは式(4-5)で与える。ただし、 $\max(x, y)$ はxとyを比べ大きいほうの値をとる演算である。

$$\left. \begin{aligned} w_1 &= -0.33T + 1.95 + 1.38 \max(0.00, 0.50 - T) + 4.00 \max(0.00, 0.30 - T) \\ w_2 &= 0.25T + 0.04 \\ B_1 &= 0.25T + 1.10 \\ B_2 &= 0.25T + 0.12 \end{aligned} \right\} \quad (4-5)$$

b) 領域 $0.70 < T \leq 1.80$

この場合、各動的重視度の基本値と変動幅を式(4-6)で求める。

$$\left. \begin{aligned} w_1 &= 0.65T + 2.60 + 0.15 \max(0.00, T - 1.40) \\ w_2 &= 0.25T + 0.20 \\ B_1 &= 0.35T + 2.75 \\ B_2 &= 0.50T + 0.75 \end{aligned} \right\} \quad (4-6)$$

c) 領域 $1.80 < T \leq 5.00$

この場合、各動的重視度のパラメータは、式(4-7)で計算する。ただし、 $|x|$ はxの絶対値を意味する。

$$\left. \begin{aligned} w_1 &= 0.70T + 2.83 + 0.025 |T(T - 1)| \\ w_2 &= 0.10T + 0.60 \\ B_1 &= 0.35T + 2.75 \\ B_2 &= 0.50T + 0.75 \end{aligned} \right\} \quad (4-7)$$

d) $5.00 < T \leq 30.00$

この場合、各動的重視度の基本値と変動幅を式(4-8)で求める。

$$\left. \begin{aligned} w_1 &= 0.51T + 8.80 \\ w_2 &= 0.22T + 2.60 \\ B_1 &= 0.52T + 8.30 \\ B_2 &= 0.22T + 3.90 \end{aligned} \right\} \quad (4-8)$$

4.4 設定式による制御シミュレーション

4.4.1 時定数が $0.20 \leq T \leq 30.00$ の場合

上記の設定手法で、ゲインが 1.00、時定数が 0.20 から 0.01 の間隔で 30.00 までであるすべての 1 次遅れ系について目標値 1.0 に対する制御シミュレーションを行った結果、いずれのシミュレーションにおいても、振動と定常誤差なしで目標到達時間が速く、オーバーシュートとアンダーシュートがともに 1.0%程度に抑えられることが確認できている。図 4-4 の(a)-(d)には、それぞれ各部分領域における境界点（または境界点に近い点）と中央点の時定数を持つプラントについての制御結果を例示している。

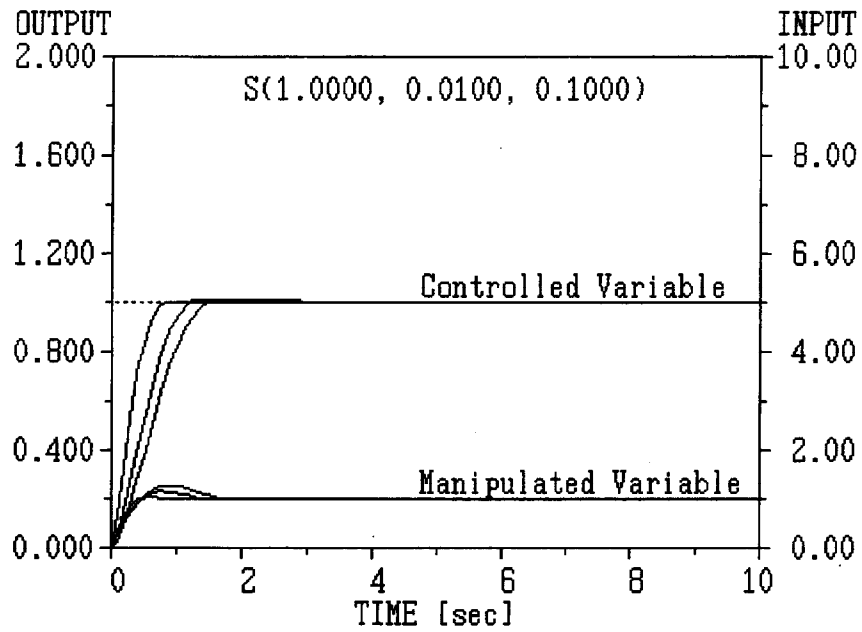
図 4-4(a)は時定数領域 $0.20 \leq T \leq 0.70$ に対応して、時定数がそれぞれ 0.20、0.45 と 0.70 である三つのプラントについての制御結果である。各動的重視度は、設定式(4-5)で求められている。第 2 章と第 3 章と同じく、記号 $S(1.0000, 0.0100, 0.1000)$ の括弧中の数字は、順次偏差、偏差の 1 階差分、および操作量の変化分のスケールリングファクタを表す。また、上部の 3 本の曲線と下部の 3 本の曲線は、左から右へそれぞれ順にこの三つのプラントの制御量と操作量の時間応答を表す。

図 4-4(b)は時定数領域 $0.70 < T \leq 1.80$ に対応して、制御量曲線は左から右へ時定数がそれぞれ 0.71、1.255 と 1.80 である各プラントについての制御結果を表している。この場合各動的重視度は、設定式(4-6)によって求められている。

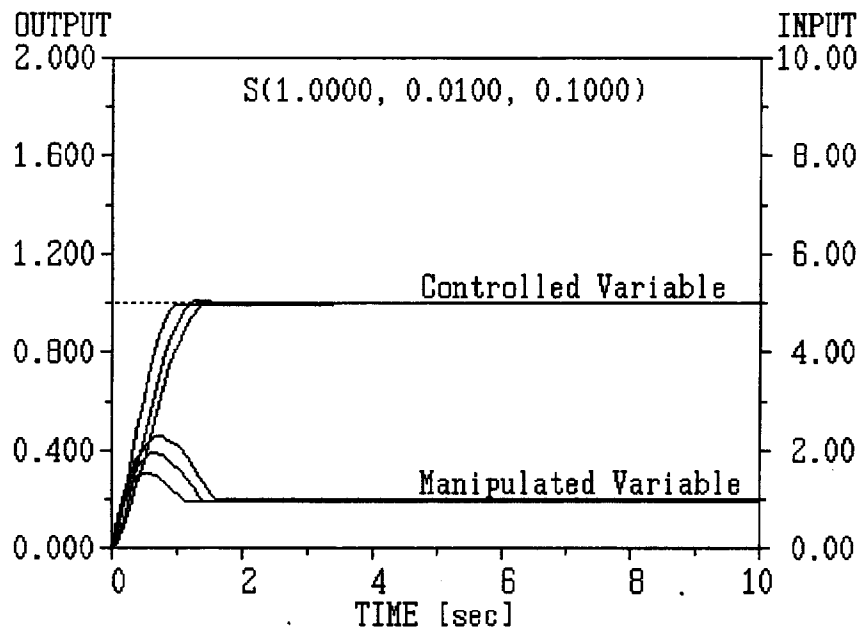
図 4-4(c)は時定数領域 $1.80 < T \leq 5.00$ に対応して、制御量曲線は同じ左から右へ時定数がそれぞれ 1.81、3.405、5.00 である三つのプラントについての制御結果である。この場合各動的重視度は、設定式(4-7)によって計算されている。

図 4-4(d)は時定数領域 $5.00 < T \leq 30.00$ に対応して、制御量曲線は同じ左から右へ時定数がそれぞれ 5.01、17.505 と 30.00 であるプラントについての制御結果を示している。この場合の各動的重視度は、設定式(4-8)で計算されている。

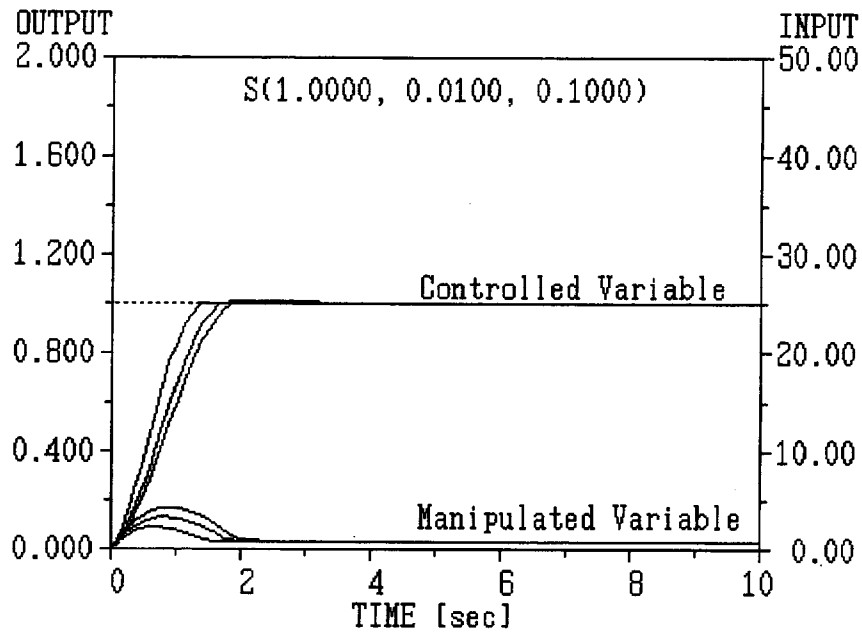
図 4-4 からわかるように、この範囲内の各プラントに対して、本設定手法に基づいて求めた動的重視度の基本値と変動幅を用いることにより、オーバーシュートや振動などをほとんど起こさずに目標値に速やかに到達することができる。また、ほかの部分領域についても同じことが言えるが、例えば部分領域 $0.20 \leq T \leq 0.70$ について時定数が境界点 0.20 と 0.70 の間の純粋な 1 次遅れ系に関する制御量の時間応答曲線は、すべて図 4-4(a)における左と右の制御量曲線の間に見られることが確認できている。



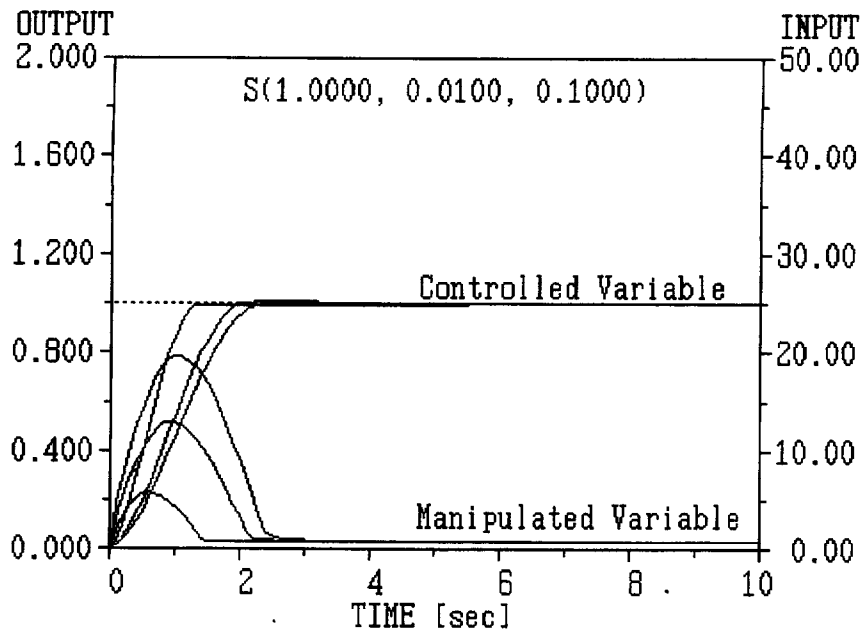
(a) 領域 $0.20 \leq T \leq 0.70$ における代表的な制御例



(b) 領域 $0.70 < T \leq 1.80$ における代表的な制御例



(c) 領域 $1.80 < T \leq 5.00$ における代表的な制御例



(d) 領域 $5.00 < T \leq 30.00$ における代表的な制御例

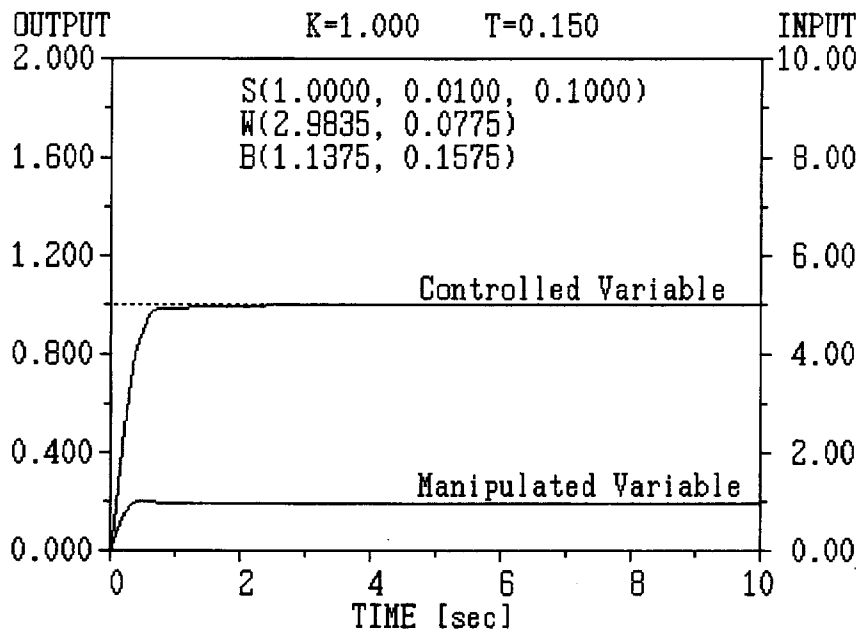
図 4-4 提案設定手法による制御シミュレーション結果

4.4.2 時定数がそれ以外の場合

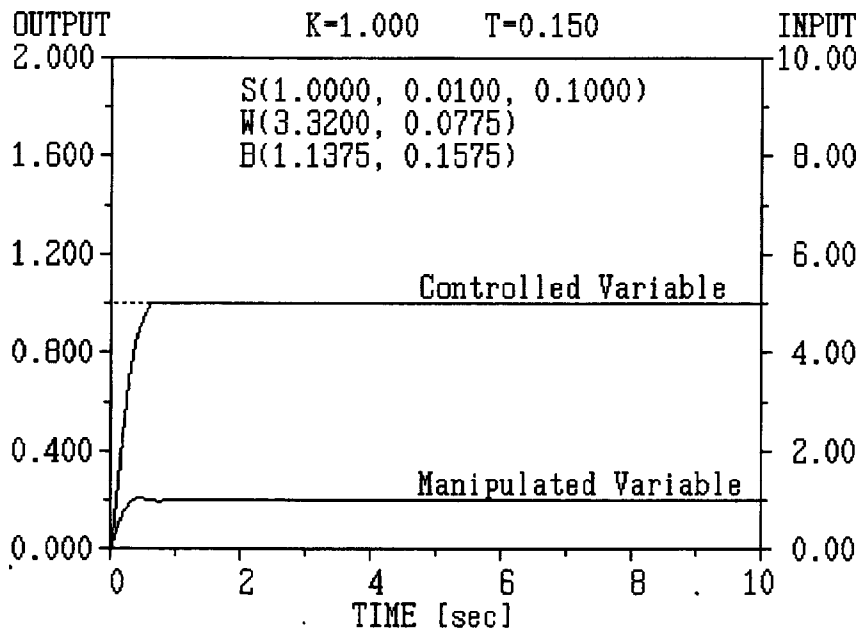
このように、時定数が $0.20 \leq T \leq 30.00$ 以内であれば、対応するプラントについての制御結果は本設定手法によって保証されている。しかし時定数がその範囲以外になる場合もあり得るので、そのような場合に対して本設定手法が拡張できるか否かを検証する。

時定数が 0.20 より小さい場合、式(4-5)で求めたパラメータでは制御が保守的になる傾向が見られることはシミュレーションを通じてわかっている。この場合、偏差の動的重視度の基本値を増やす、すなわち偏差を強調するという操作を行えばよい。図 4-5(a)には、時定数が 0.15 であるプラントについての制御結果を示している。図の外側に記している $K=1.000$ と $T=0.150$ は、プラントのゲインと時定数を表す。記号 $W(2.9835, 0.0775)$ の括弧中の数値はそれぞれ偏差と偏差の 1 階差分の動的重視度の基本値を意味し、記号 $B(1.1375, 0.1575)$ の括弧中の数値はそれぞれ各動的重視度の変動幅を意味する。これらの数値は式(4-5)によって直接得られた計算値である。この場合、プラントは立ち上がったから目標値に接近するとき速度が非常に遅くなり、約 2.4 秒かかってようやく目標値に到達することがわかる。一方、同じプラントに対して、偏差の動的重視度の基本値だけを 2.9835 から 3.3200 に変更したときの結果を図 4-5(b)に示す。明らかにオーバーシュートなしで目標到達時間が約 0.6 秒になっている。時定数がもっと小さい場合についても、同じことが言える。

一方、時定数が 30.00 よりも大きい場合には、式(4-8)を用いて動的重視度の基本値と変動幅を求めることになる。例として図 4-6 に時定数がそれぞれ 65.00 と 100.00 であるプラントについて、式(4-8)の計算値をそのまま用いて制御した結果を示す。図 4-6 から、オーバーシュートなしで目標値に短時間に到達できることがわかる。実際に時定数を 30.01 から 100.00 まで 0.01 の刻みで変化させて設定式(4-8)の挙動をチェックしたところ、すべてのプラントについて最大操作量がそれぞれ異なるが、オーバーシュートと振動を生じずに図 4-6 の例とほぼ同じ時間で目標値に到達することが確認できている。したがって、式(4-8)の適用範囲が時定数 100.00 まで拡張できることがわかる。

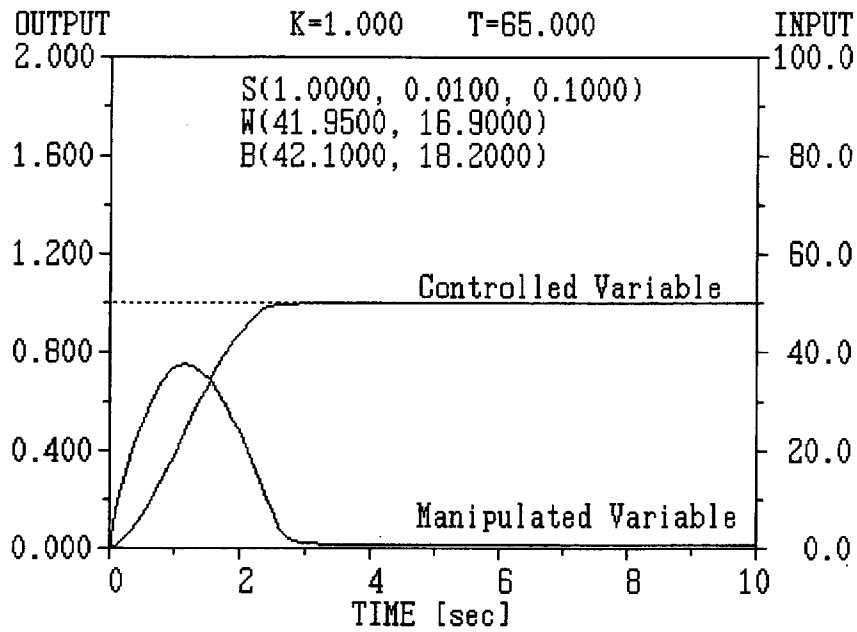


(a) 設定式(4-5)をそのまま利用した場合

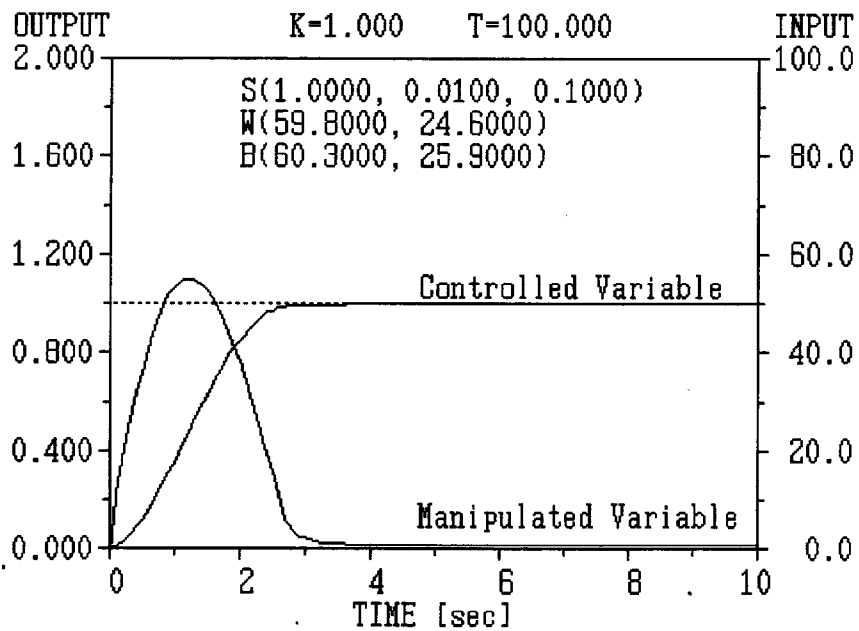


(b) 偏差の重視度の基本値を調整した場合

図 4-5 時定数が小さいプラントについての制御結果



(a) 時定数 65.00 の場合



(b) 時定数 100.00 の場合

図 4-6 時定数が高いプラントについて設定式(4-8)による制御結果

4.4.3 目標値が 1.0 以外の場合

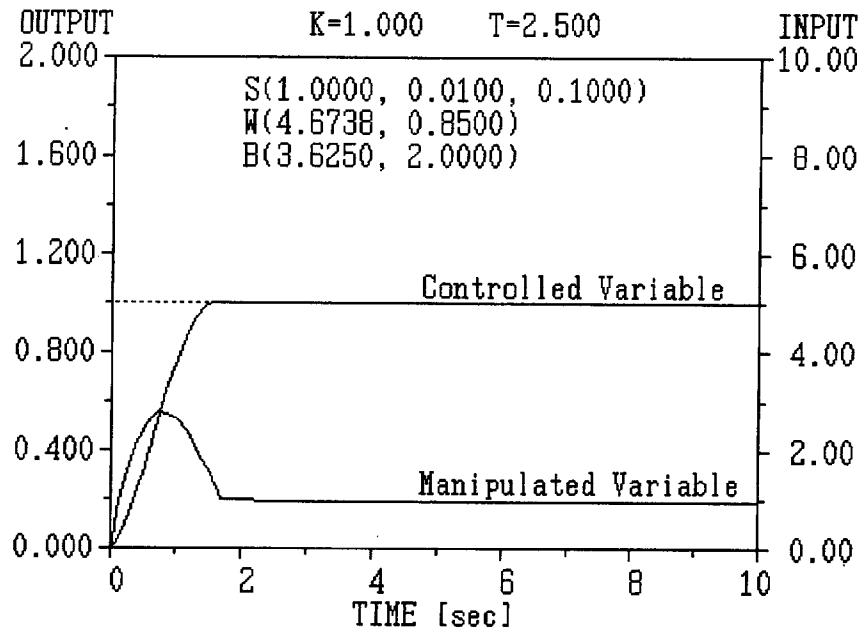
4.3 の設定式は、すべて目標値 1.0 に対して導出したものである。また、以上の制御シミュレーションにおいても、目標値がすべて 1.0 に設定されている。ここでは、目標値が 1.0 以外の場合について考えてみる。

線形時不変システムの 1 次遅れ系では、制御量は操作量に線形関係を持つ。しかも、ゼロの初期位置から出発した 1 次遅れ系では、制御量が操作量に比例するという性質が知られている。したがって、目標値が 1.0 以外のものに設定された場合、それに応じた倍率で操作量を増加または減少させれば、制御量は同倍率で拡大または縮小されることになる。その結果、偏差と偏差の 1 階差分の大きさがともに同倍率で拡大または縮小されることが理解できる。一方、本ファジィ制御器では、各 SIRM の推論値に動的重視度と出力項目のスケールリングファクタの積を乗じてから総和を取ることによって操作量の変化分が得られる。目標値が 1.0 以外の場合、動的重視度の設定を変更せずに、単に目標値 1.0 の場合の偏差と偏差の 1 階差分および操作量の変化分のスケールリングファクタに新しい目標値を乗じたものを新しいスケールリングファクタにすればよい。これによって、ファジィ制御器への入力値そして SIRM の推論値が目標値に依存しなくなり、ファジィ制御器からの最終出力値すなわち操作量の変化分は、目標値が 1.0 のときの操作量の変化分に新しい目標値をかけたものになる。その結果、制御量が同率に拡大または縮小されるので、プラントの出力曲線の形状が、目標値に対して完全に相似形になる。

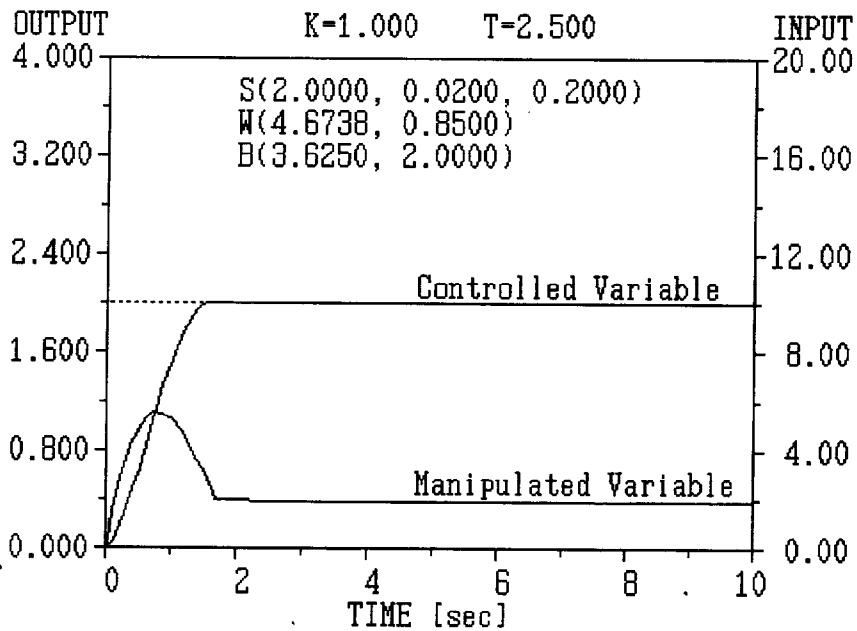
図 4-7(a)と(b)には、時定数 2.50 のプラントに対して目標値がそれぞれ 1.0 と 2.0 である場合の制御結果を示している。図 4-7(b)の目標値が図 4-7(a)の目標値の倍であるので、図 4-7(b)の制御量と操作量の最大スケールをともに図 4-7(a)の倍に拡大している。この場合、動的重視度のパラメータは式(4-7)によって計算され、図 4-7(a)と(b)において同じになっている。しかし、目標値 1.0 の場合各スケールリングファクタがそれぞれ 1.000、0.010、0.100 であるが、図 4-7(b)のように目標値が 2.0 であるので各スケールリングファクタを倍の 2.000、0.020、0.200 に設定している。

図 4-8(a)と(b)には、時定数 13.00 のプラントに対して目標値がそれぞれ 1.0 と 0.5 である場合の制御結果を示す。図 4-8(b)の目標値が図 4-8(a)の半分になるので、制御量と操作量の最大スケールをともに半分に縮小している。式(4-8)による動的重視度のパラメータは図 4-8(a)と(b)において同じである。しかし、図 4-8(b)において、各スケールリングファクタを目標値 1.0 の場合の半分の 0.500、0.005、0.050 に設定している。

これらの図から分かるように、1.0 以外の目標値に対して、動的重視度のパラメータをそのまま 4.3 の設定式で計算し、目標値 1.0 の場合の各スケールリングファクタを新しい目標値に応じて拡大または縮小すれば、操作量と制御量の時間応答が目標値 1.0 の場合と同じ形をしている。

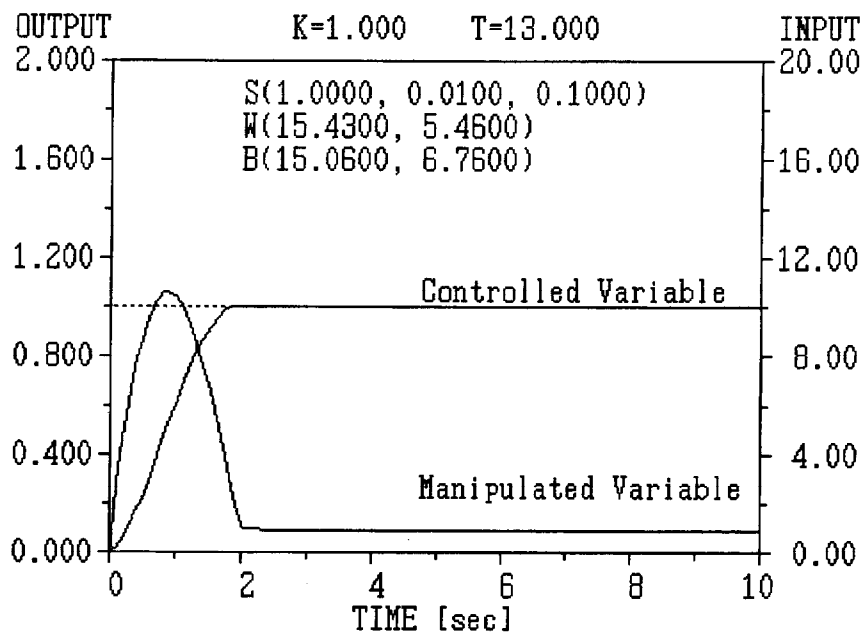


(a) 目標値を 1.0 に設定した場合

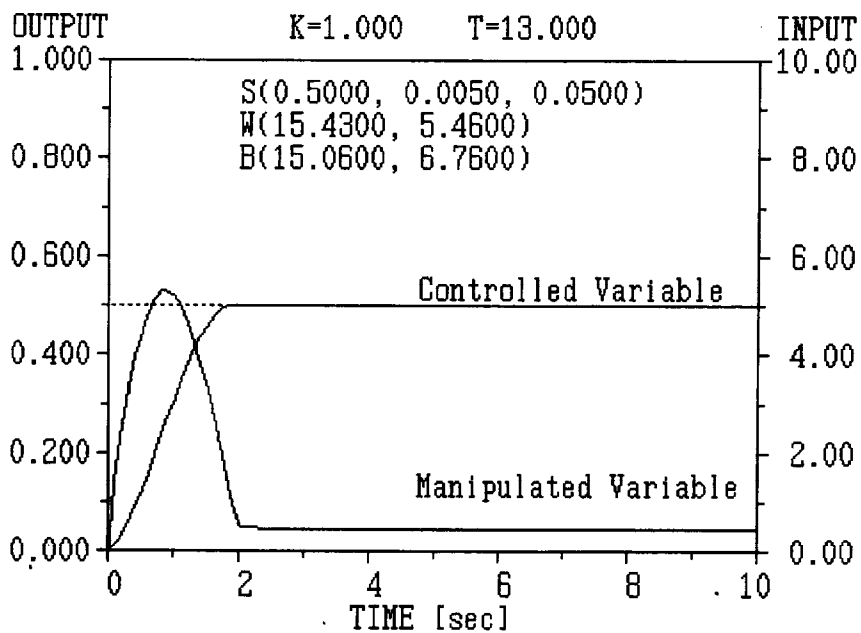


(b) 目標値を 2.0 に変更した場合

図 4-7 時定数 2.50 のプラントについて異なる目標値に対する制御結果



(a) 目標値を 1.0 に設定した場合



(b) 目標値を 0.5 に変更した場合

図 4-8 時定数 13.000 のプラントについて異なる目標値に対する制御結果

4.4.4 目標値が階段状に変化する場合

同じ制御プロセスにおいて、途中で目標値が階段状に切り替わる場合がある。ここでは、目標値が切り替わるときに、制御量がすでに整定状態に入っていると仮定する。この場合前節と同じように、目標値が変わるたびに、動的重視度の各パラメータを変更する必要はない。そして、以前の目標値に立ってみれば以前の目標値から新しい目標値への変化量が新しい目標値に相当するので、各スケーリングファクタだけを目標値の変化量に応じて変更すればよい。すなわち、目標値 1.0 のときの各スケーリングファクタ 1.000、0.010、0.100 に、新しい目標値と直前の目標値（制御開始直前の目標値を 0.0 とする）の差を倍率としてかければよい。

例として、目標値が制御開始時に 2.0、10.0 秒後に 5.0、20.0 秒後に 9.0、30.0 秒後に 5.5、そして 40.0 秒後に 1.0 に変わるときの制御結果を図 4-9 に示す。目標値の変化量は順にそれぞれ 2.0、3.0、4.0、-3.5、-4.5 である。そして、各区間における入出力項目のスケーリングファクタは、目標値の変化量に基づいてそれぞれ(2.000, 0.020, 0.200)、(3.000, 0.030, 0.300)、(4.000, 0.040, 0.400)、(-3.500, -0.0350, -0.350)、(-4.500, -0.0450, -0.450)に設定されている。この図からは、振動がなく、オーバーシュートもほとんど生じていないことがわかり、良好な制御結果であることが確認できる。

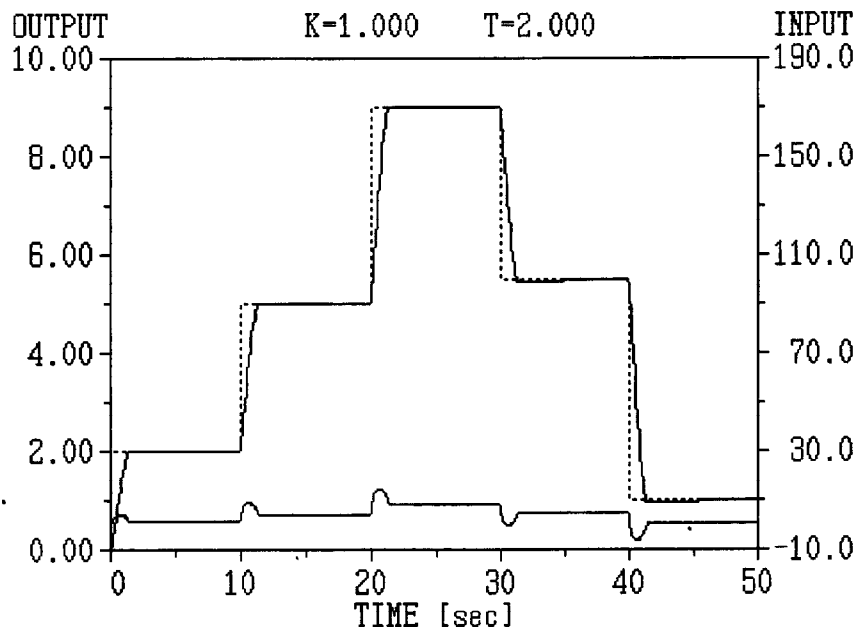


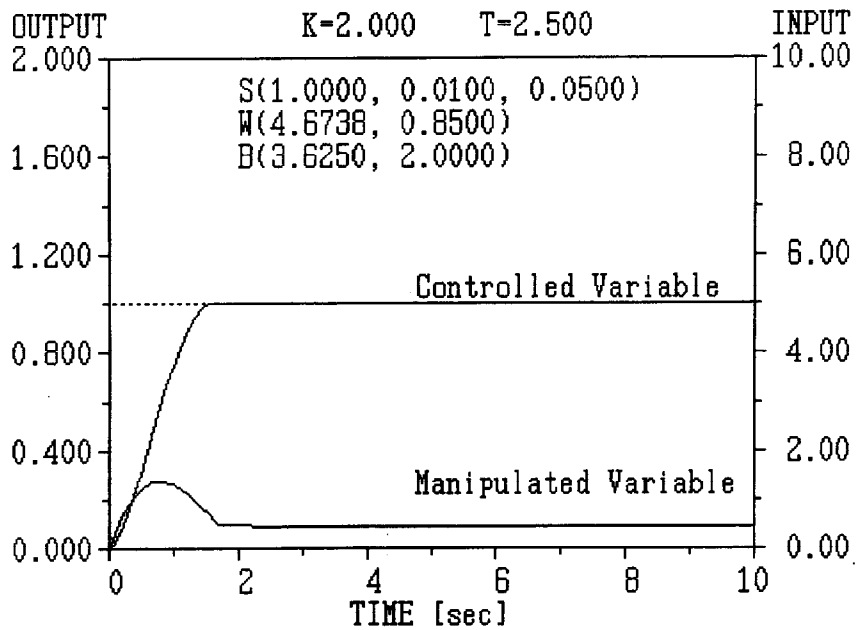
図 4-9 目標値が階段状に変化した場合の制御例

4.4.5 プロセスゲインが 1.0 以外場合

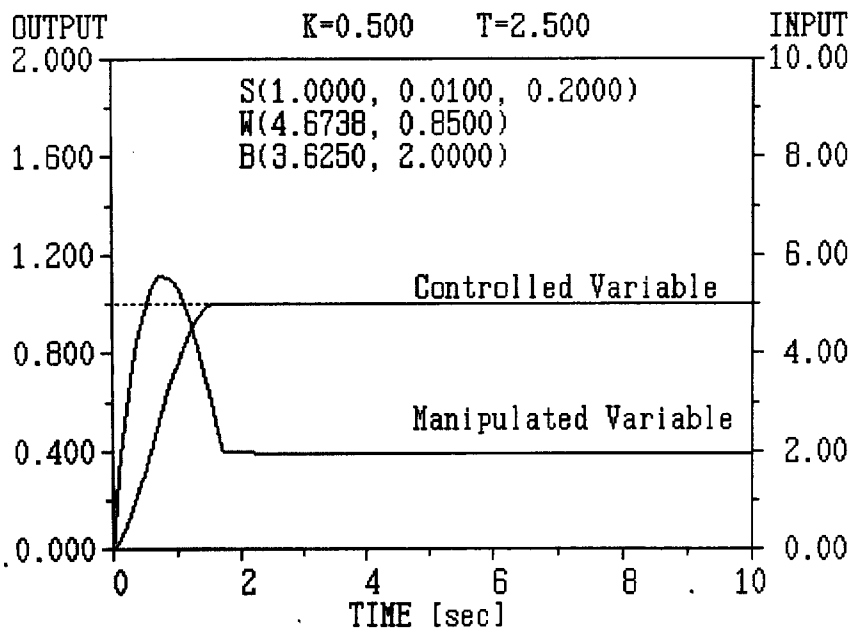
プロセスゲインは制御対象の動特性に関与せず、単に操作量と合わせて線形的に制御量を拡大したり縮小したりする。したがって、プロセスゲインが 1.0 以外の場合に、プロセスゲイン 1.0 のときと同じ制御量の時間応答を出すには、本設定手法で求めた重視度の各パラメータを変更することなく、プロセスゲインと出力項目のスケールリングファクタの積が一定になるように、プロセスゲインに応じて出力項目のスケールリングファクタを変えればよい。

例えば、図 4-10(a)は、図 4-7(a)のプラントのプロセスゲインを 1.0 から 2.0 に変更した場合のシミュレーション結果を示している。プロセスゲインが倍になっているので、プロセスゲインと出力項目のスケールリングファクタの積を一定にするため、出力項目のスケールリングファクタを 0.100 からその半分の 0.050 に減らしている。その結果、図 4-10(a)を図 4-7(a)に比べて、各サンプリング時刻において操作量がちょうど半分になっているが、制御量曲線がまったく同じになっていることがわかる。

図 4-10(b)は、図 4-7(a)のプラントのプロセスゲインを 1.0 から 0.5 に変更した場合のシミュレーション結果を示している。プロセスゲインが半分になっているので、プロセスゲインと出力項目のスケールリングファクタの積を一定にするため、出力項目のスケールリングファクタを 0.100 からその倍の 0.200 に増やしている。その結果、図 4-10(b)は、図 4-10(a)に比べて各サンプリング時刻における操作量が四倍になり、図 4-7(a)に比べて各サンプリング時刻における操作量が二倍になっているが、制御量曲線がまったく同じになっていることがわかる。



(a) ゲイン 2.0 の場合



(b) ゲイン 0.5 の場合

図 4-10 プロセスゲインが 1.0 以外の場合の制御結果

4.4.6 出力項目のスケーリングファクタを 0.1 以外に設定する場合

これまで目標値 1.0 に対して、出力項目のスケーリングファクタを 0.1 に設定している。しかし、SIRMs 動的重視度結合型ファジィ推論モデルより、各 SIRM の推論値の動的重視度付き総和でモデルの出力が決まり、その出力と出力項目のスケーリングファクタの積が操作量の変化分を与える。また、変動量変数の推論値が同じであれば、動的重視度が基本値と変動幅によって左右される。したがって、出力項目のスケーリングファクタを 0.1 以外に設定する場合、各動的重視度と出力項目のスケーリングファクタの積がそれぞれ一定になるように各動的重視度の基本値と変動幅を変更すれば、操作量と制御量は出力項目のスケーリングファクタ 0.1 の場合と同じになることがわかる。この場合、出力項目のスケーリングファクタの大きさに応じて、本設定手法で求めた各動的重視度の基本値と変動幅を反比例に修正すればよい。

図 4-11 は、例として図 4-7(a)のプラントに対して出力項目のスケーリングファクタを 0.1 から 1.0 に変更した場合の制御結果である。出力項目のスケーリングファクタが 10 倍拡大されているので、図 4-7(a)と比較してわかるように図 4-11 における各動的重視度の基本値と変動幅がそれぞれ 1/10 に縮小されている。また、操作量および制御量の時間応答曲線はこの二つの図においてそれぞれ完全に同じになっている。

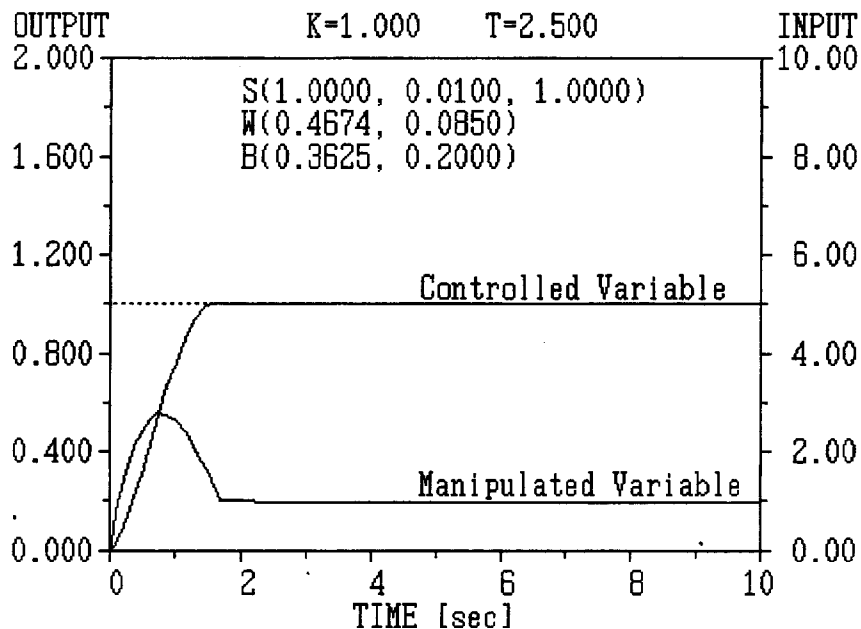


図 4-11 出力項目のスケーリングファクタ 1.0 の場合の制御結果

4.5 結言

SIRMs 動的重視度結合型ファジィ推論モデルを純粋な 1 次遅れ系に適用し、偏差と偏差の 1 階差分を入力項目として操作量の変化分を出力項目とするファジィ制御器を構成した。本ファジィ制御器は、第 3 章で述べた「1 次遅れ+むだ時間系」のファジィ制御器と同じ構造を持っている。

ランダム最適探索法によるパラメータの探索手順を詳しく説明し、新しい評価関数としてオーバーシュートと振動なども評価できる拡張した偏差の絶対値の時間重み付き積分を定義した。0.20 から 30.00 までの時定数範囲を四つの部分領域に分けて、それぞれいくつかの代表的なサンプルプラントを選択した。本ファジィ制御器のファジィルールおよびメンバーシップ関数をすべて固定し、入力項目および出力項目のスケーリングファクタをすべて固定した上で、各サンプルプラントについてその評価関数に基づいてランダム最適探索法で両入力項目の動的重視度の最適な基本値と変動幅を求め、パラメータごとのデータベースを構築した。そして、各部分領域について、各パラメータのデータベースに基づいて両動的重視度の基本値と変動幅に関する設定式をそれぞれ導出した。

本設定式を用いることによって、時定数が 0.20 から 30.00 までの純粋な 1 次遅れ系に対して、振動と定常誤差が発生せずにオーバーシュートとアンダーシュートが 1.0%程度に抑えられることを示した。時定数が 0.20 より小さい場合は、本設定式による制御結果が保守的になりがちであるが、偏差の動的重視度の基本値だけを調整すれば制御結果がよくなることを例示した。時定数が 30.00 より大きい場合は、本設定式がそのまま利用できることを述べた。

目標値が 1.0 以外に設定された場合、目標値 1.0 のときの入出力項目の各スケーリングファクタにその目標値をかければ、制御結果が目標値 1.0 の場合に相似することを明らかにした。目標値が階段状に変化する場合は、目標値 1.0 のときの入出力項目の各スケーリングファクタに目標値の変化量を乗じるだけでよいことを示した。また、プロセスゲインが 1.0 以外の場合、出力項目のスケーリングファクタだけを反比例に変えれば、プロセスゲイン 1.0 の場合と同じ制御結果が得られることを証明した。

第 5 章 未拘束物体の軌道追従制御

5.1 緒言

AI 手法^[62]、適応制御^[6]、ニューロ^[65,99]、ファジィ推論^[10]、ファジィ・ニューロ^[71]などによる軌道追従あるいは経路計画の実験がすでに多数報告されているが、そのほとんどはアームロボット^[6,99]または移動ロボット^[10,62,65,71]を制御対象としている。アームロボットは通常機構の制約により束縛されており、指令なしでは自由に動作することができない。移動ロボットも構造により拘束されてはいるが、装備されているセンサにより外部環境を認識する能力を持つので、一定範囲内で自律的に行動することが可能である。

一方、テーブルなどとの接触による摩擦力、空気抵抗力を除いて、機械的な拘束を受けておらず、しかもセンサも装備されていない未拘束物体に関しては、ボールの安定制御^[16]や、2次元移動物体の把握^[17]や、ピンポン球の打ち返し制御^[76,77]などが報告されているが、いずれにおいても軌道追従制御は行われていない。未拘束物体、たとえばテーブル上に自由に移動できるピンポン球は、センサを持たないので環境の認識ができない上、環境の影響を受けやすく、自身の位置や速度などを管理する能力もない。このような未拘束物体の数学モデルは、未拘束物体と環境がすべて理想的である場合には運動方程式を用いて記述できる。そして、運動方程式を用いれば、理想環境における未拘束物体の軌道追従制御が精度よく行える^[112]。しかし、実際には未拘束物体と環境の接触が一様ではなく、特にピンポン球とテーブルを考える場合摩擦力が接触点によって大きく変わり、空気の抵抗も無視できず、湿度も大きく影響する。これらの要素をすべて完全に把握することが難しいことから、未拘束物体の正確で求解可能な数学モデルの導出は現実には非線形の形でさえ困難である。そのため、PID 制御や現代制御などの手法が適用できず、未拘束物体を目標軌道に正確に追従させることは非常に難しい。

それに対し、ファジィ制御は、制御対象の数学モデルを必要とせず、非線形現象にも対応できる。しかし、構造とパラメータがともに固定されるため、従来のファジィ推論モデル^[40,73]は制御状況の変化に適応するに限界がある。一方、SIRMs 動的重視度結合型ファジィ推論モデル^[93,108,111,114]では、各入力項目に対して SIRM が定義されるほか制御状況に応じて変化する動的重視度も導入されるため、従来のファジィ推論モデルはもちろんのこと、SIRMs 固定重視度結合型ファジィ推論モデル^[105,106,113]に比べても、制御性能が大幅に改善できる。すべての入力項目を各ファジィルールの前件部にセットする従来のファジィ推論モデルでは、入出力空間が当然ながら SIRMs 動的重視度結合型ファジィ推論モデルの場合の入出力空間と異なる。その入出力空間を SIRMs 動的重視度結合型ファジィ推論モデルの入出力空間と同じに設定することができれば、従来のファジィ推論モデルが

SIRMs 動的重視度結合型ファジィ推論モデルの場合と同様の挙動をすることが推測できる。それは、**SIRMs** 動的重視度結合型ファジィ推論モデルの入出力空間が教師信号として与えられる場合に、たとえばシングルトンタイプのメンバーシップ関数ないし重み付きのメンバーシップ関数を用いて自動チューニング手法で実現可能であるが、教師信号としての入出力空間は通常未知である。その場合、**SIRMs** 動的重視度結合型ファジィ推論モデルと同じ機能を持たせるには、すべてのファジィルールおよび重みを試行錯誤で一つずつ調整しなければならない、ルール数が増えるほど非現実的になる。

そこで本章では、**SIRMs** 動的重視度結合型ファジィ推論モデルのこの種の問題への有効性を示すとともにこの種の問題への制御手法を探るために、未拘束のピンポン球を制御対象として軌道追従制御実験システムを構築し、**SIRMs** 動的重視度結合型ファジィ推論モデルに基づいたファジィ制御器を設計する^[94,109,115]。ピンポン球の位置に関する予測誤差と移動速度および加速度を入力項目として、予測誤差と加速度に固定重視度を与え、移動速度に動的重視度を定義する。そして、ピンポン球が任意位置からでも目標軌道にスムーズに追従できるように螺旋状漸近軌道を導入する。従来のファジィ推論モデルでは、ルール数が多く必要になるだけでなく、移動速度を小さく抑えることができないためピンポン球が目標軌道にほとんど追従できないことを明らかにする。それに比べて、本提案のファジィ制御器で大きさの異なる円と楕円を目標軌道として実機実験を行い、未拘束のピンポン球が精度よく目標軌道に追従できることを示す。

5.2 実験システムの全体構成

図 5-1 のように本実験システムは、公式試合用黄色いピンポン球、有効範囲が 0.440m × 0.440m の正方形である白色テーブルを持つ実験台、カラー CCD カメラ、カラー画像処理処置、ビデオモニター、パソコン、コントローラ、X 軸と Y 軸用の駆動装置およびステッピングモータ・ギアセットから構成される。詳細データは表 5-1 に示している。図 5-2 は、ほぼ正面から撮った本システムの実機写真を示している。

この実験台の一番下に実験台を固定するための底板があり、その底板の上に軸が水平になるように Y 軸ステッピングモータ Motor Y と同軸の駆動ギアが設置されている。その駆動ギアと噛み合う弧状の従動ギアが駆動ギアの上に置かれ、軸は駆動ギアの軸と平行に設置されている。その従動ギアの上に従動ギアと一体になっている平板があり、初期状態では水平である。その平板の上に X 軸ステッピングモータ Motor X ともう一つの同軸の駆動ギアは、軸が水平にしかも Motor Y の軸と直交になるように固定されている。その駆動ギアと対になるもう一方の従動ギアは同じく弧状をし、軸が駆動ギアの軸と平行になるように駆動ギアの上に置かれている。そして、実験用の白色テーブルがその従動ギアの上に固定されている。

図 5-1 の点線で示すように、テーブルの中心を通る横線と縦線がそれぞれ Motor X と Motor Y の軸に一致し、ここではそれらを X 軸と Y 軸に設定する。Motor X と Motor Y の間の平板が、底板上における Y 軸方向の二つのベアリング機構によって支えられている。また、実験用の白色テーブルは、その平板上における X 軸方向の二つのベアリング機構によって支えられている。すなわち、この実験台は 2 層構造をしている。下層の Motor Y が回転する場合、その上層の Motor X とテーブルが Motor Y と一緒に Y 軸周りに回転する。しかし、Motor X の軸方向が Motor Y の軸方向に直交しているため、Motor X 自身の X 軸周りの回転は Motor Y の Y 軸周りの回転と直交方向となるため、Motor Y の回転にまったく影響されない。一方、上層の Motor X が回転する場合は、下層の Motor Y が影響を受けずに、テーブルだけが Motor X と一緒に回転する。

ピンポン球はテーブルの上に自由状態に置かれる。CCD カメラはテーブルの中央の真上に固定し、テーブルと一緒に回転できる仕組みになっている。各サンプリング時刻において、CCD カメラがそのときのテーブルを含めた大きさ 432 画素 × 432 画素のカラー画像を取り込んで画像処理装置に転送する。カラー画像処理装置では、ピンポン球が黄色であり、テーブルが白色であることを利用してピンポン球と背景の区別を可能にする。そして、その画像を 2 値化処理した後、ピンポン球の領域を割り出す。さらに処理時間を短縮するため、3 画素おきに 1 画素を読みとる方式で重心処理を行い、ピンポン球の中心位置を検出する。その中心位置は唯一測定可能な情報であり、以下の実験においてピンポン球の実際位置として利用されている。

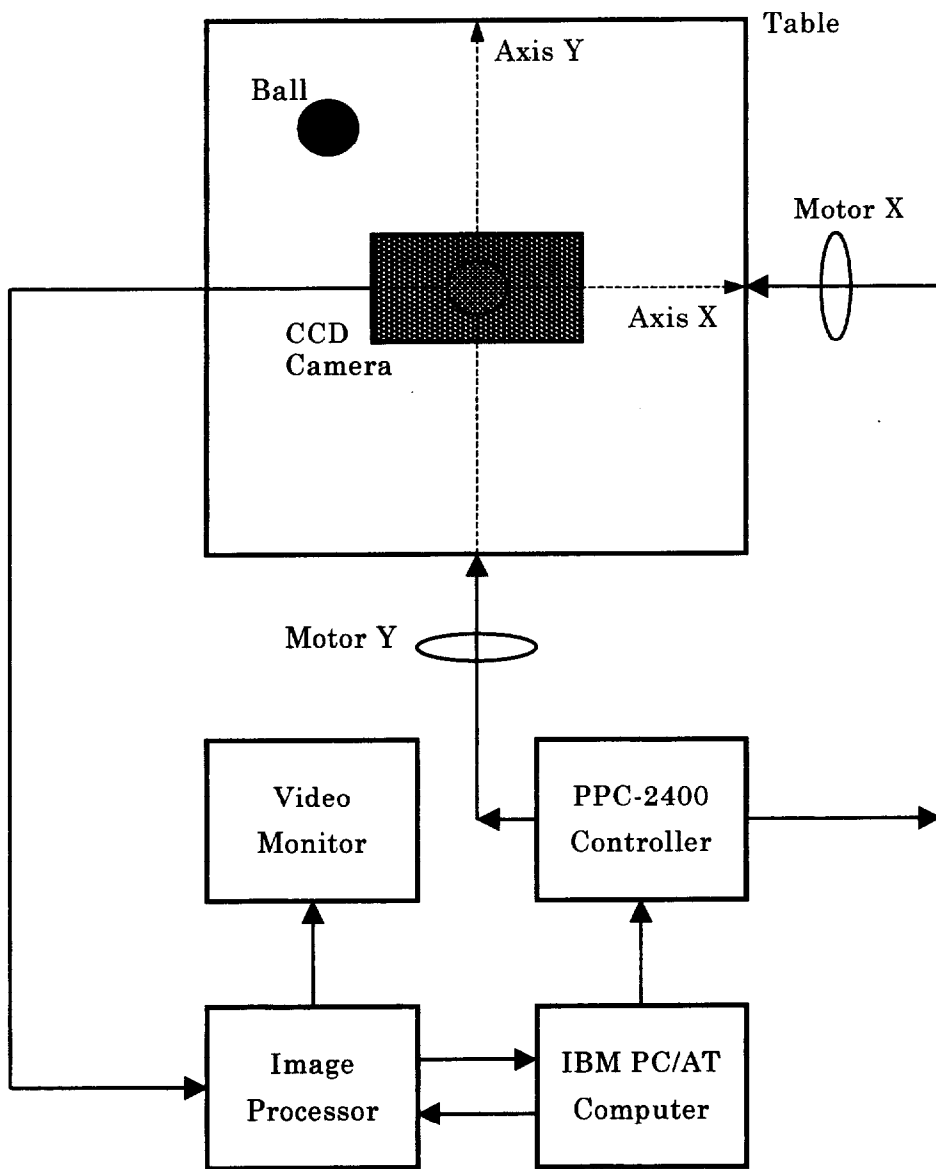


図 5-1 未拘束物体軌道追従制御実験システムの全体構成図

表 5-1 未拘束物体軌道追従制御実験システムの構成要素詳細

構成要素名	規格
ピンポン球	黄色、直径 0.038m
実験台	白色、0.440m×0.440m
レンズ	キャノン製 JF4.8 1.8EA-II
CCD カメラ	ソニー製 XC-711RR
画像処理装置	マイクロ・テクニカ製 MTAT-CL
ビデオモニター	ソニー製 PVM-9040
パソコン	ACER 製 90MHz Pentium
モータ用コントローラ	マイコム製 4 軸ボード PPC-2400
X 軸駆動装置	マイコム製 UPS50
Y 軸駆動装置	マイコム製 UPS50
X 軸モータ・ギアセット	オリエンタルモータ製 UHG100-2B
Y 軸モータ・ギアセット	オリエンタルモータ製 UHG50-5B

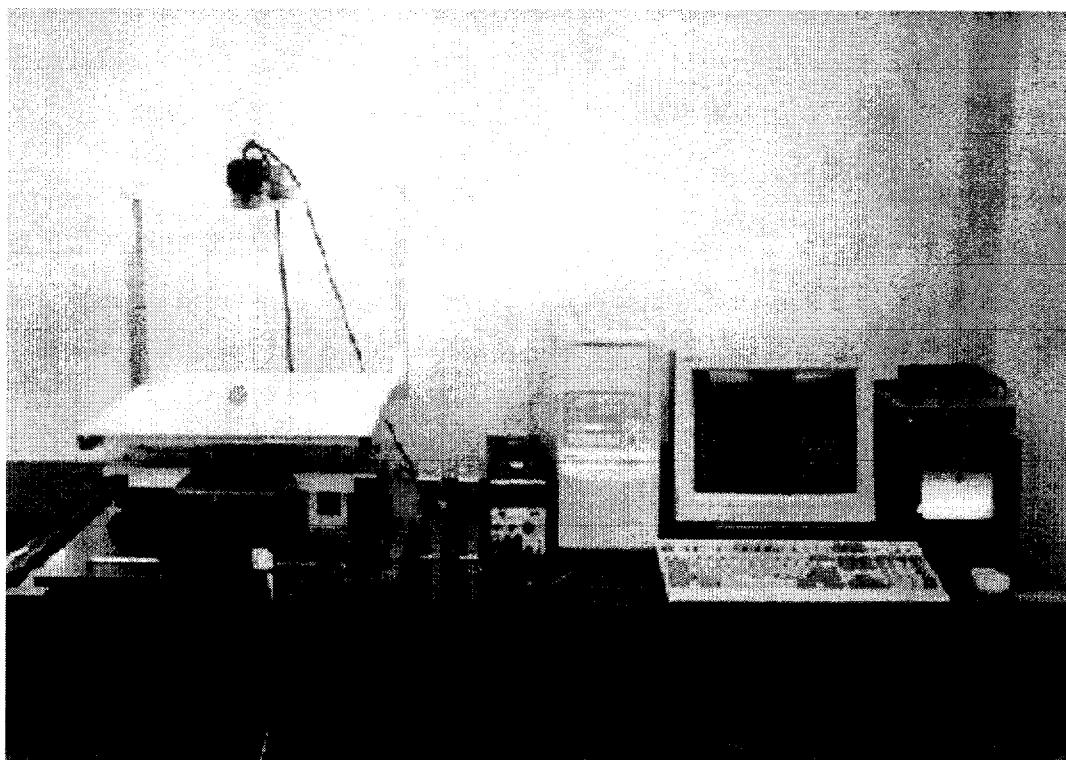


図 5-2 未拘束物体軌道追従制御実験システムの実機写真

コンピュータでは、現時刻と過去の位置情報をもとに速度と加速度を近似的に求める。そしてこれらを次節で述べるファジィ制御器に入力する。ファジィ制御器は SIRMs 動的重視度結合型ファジィ推論モデルに基づいて必要な操作量を決定する。両ステッピングモータは駆動装置を通して PPC-2400 というボードタイプのモータ用コントローラに接続されている。PPC-2400 コントローラは全部で 4 軸すなわち 4 台のモータが同時に制御できるが、本実験においてはそのうちの 2 軸制御のみを利用する。PPC-2400 コントローラはファジィ制御器から受け取った操作量指令をパルス信号に変換して駆動装置に出力し、ステッピングモータを回転させる。

なお、本実験装置の構造により、X 軸のステッピングモータ Motor X が回転すれば、テーブルが X 軸周りに回転し、その上のピンポン球は Y 軸と平行な方向に転がろうとする。同様に Y 軸のステッピングモータ Motor Y が回転すれば、テーブルが Y 軸周りに回転し、ピンポン球は X 軸と平行な方向に転がろうとする。Motor X の回転と Motor Y の回転が互いに直交していることから、この二つの動きは互いに独立しており、ピンポン球の実際の動作はこの両方向の動きの合成結果として決定される。

ピンポン球が静止していてしかもテーブルが水平状態であれば、ピンポン球はずっと静止のままである。しかし、もしテーブルが水平状態から回転し始めれば、ピンポン球の重力の方向はテーブルに対して垂直ではなくなる。その重力によってテーブルに平行な力が生じて、ピンポン球を低い方向へ押そうとする。その力の大きさと方向はテーブルと水平面との角度に依存する。テーブルが水平面に対して生じた角度がある値以上になると、その力がピンポン球とテーブルとの間の摩擦力より大きくなるので、ピンポン球は転がり始める。従って、X 軸と Y 軸の水平面に対するそれぞれの角度を適切に調整することによって、ピンポン球を目標軌道に沿って移動させることが可能である。

5.3 動的重視度モデルに基づくファジィ制御器

前節で述べたようにピンポン球の X 方向と Y 方向の運動が互いに独立していることから、以下では X 方向の制御についてのみ述べるが、Y 方向についても同様なファジィ制御器が構築されている。また実験システムの構成により、X 方向の制御は Motor Y を駆動することによって行われることに注意する必要がある。

サンプリング周期を ΔT 、現在のサンプリング時刻を $k \cdot \Delta T$ 、ピンポン球の現時刻の X 方向の位置を $x_1(k)$ とする。このとき、X 方向におけるピンポン球の移動速度 $x_2(k)$ と加速度 $x_3(k)$ は正確な測定が難しいことから、それぞれ

$$x_2(k) = \{x_1(k) - x_1(k-1)\} / (\Delta T) \quad (5-1)$$

$$x_3(k) = \{x_2(k) - x_2(k-1)\} / (\Delta T) \quad (5-2)$$

で差分を利用して近似的に計算することにする。そして、現時刻から次の時刻に至るまで加速度 $x_3(k)$ が一定であると仮定すると、次の時刻におけるピンポン球の予測位置 $x_1^E(k+1)$ が運動方程式

$$x_1^E(k+1) = x_1(k) + x_2(k) \cdot \Delta T + x_3(k) \cdot (\Delta T)^2 / 2 \quad (5-3)$$

により求められる。また、次の時刻における目標位置を $x_1^T(k+1)$ とすると、予測誤差 $x_1^T(k+1) - x_1^E(k+1)$ が得られる。

ピンポン球のような未拘束物体は、動いているときテーブル表面との摩擦が小さいので、移動速度が減衰しにくい。そのため、移動速度が大きいとピンポン球が速度と同じ方向に一直線に移動し続ける傾向があり、途中でピンポン球の移動方向を円滑に変えることはきわめて難しい。円、楕円のような目標軌道をうまく追従させるには、方向をたえず変える必要があるので、ピンポン球の速度を小さく抑えなければならない。

ここで、予測誤差、速度、および加速度を入力項目とし、操作量（テーブルの Y 軸周りの回転角）の変化分 $\Delta u(k)$ を出力項目として、単一入力ルール群と重視度を設定することにする。なお本実験において、位置、速度、加速度の方向定義は X 軸の方向に一致している。すなわち、図 5-1 に示すように、X 軸の正方向が右側になっているので、ピンポン球の X 軸の位置、速度、加速度はすべて正方向が右側である。また、テーブルが水平に位置する初期状態から Motor X の X 軸周りの回転がないとして、Motor Y の Y 軸周りの回転によって Y 軸を通る水平面から X 軸の正方向までできる回転角がその水平面上にあれば、その回転角すなわち操作量を正としている。

表 5-2 予測誤差に関する単一入力ルール群

前件部変数 $x_1^T(k+1) - x_1^E(k+1)$	後件部変数 $\Delta u_1(k)$
NB	1.0
NS	0.5
ZO	0.0
PS	-0.5
PB	-1.0

表 5-3 速度に関する単一入力ルール群

前件部変数 $x_2(k)$	後件部変数 $\Delta u_2(k)$
NB	-1.0
NS	-0.5
ZO	0.0
PS	0.5
PB	1.0

表 5-4 加速度に関する単一入力ルール群

前件部変数 $x_3(k)$	後件部変数 $\Delta u_3(k)$
NB	-1.0
NS	-0.5
ZO	0.0
PS	0.5
PB	1.0

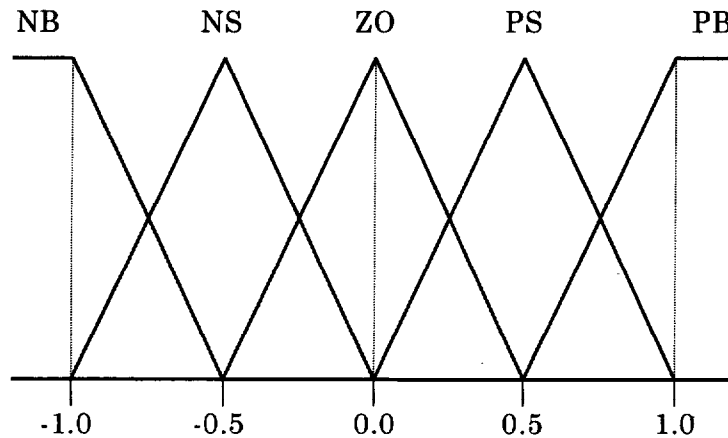


図 5-3 各入力項目のメンバーシップ関数

この定義からわかるように、操作量が正であればピンポン球が X 軸の負方向に移動し、操作量が負であればピンポン球が X 軸の正方向に移動することに対応する。従って、追従誤差および移動速度を小さく抑えるには、各入力項目に対して 1 入力 1 出力の単一入力ルール群をそれぞれ表 5-2、表 5-3、表 5-4 のように設定することができる。ここで、NB、NS などは、正規化後の各入力項目のメンバーシップ関数を意味し、図 5-3 のように三角形ないし台形として定義される。各ルール群の後件部変数 $\Delta u_i(k)$ ($i=1,2,3$) はともに出力項目 $\Delta u(k)$ に対応する中間変数である。簡略化推論法^[20,37,50]を用いるため、後件部に等間隔分布の実数値がセットされている。

表 5-2 では各ルールの前件部変数のメンバーシップ関数と後件部変数の実数値がちょうど反対関係に設定されているので、予測誤差が正のときに操作量を減少させ、予測誤差が負のときに操作量を増加させることによってピンポン球を目標位置の方向に転がせて予測誤差を小さくしようとしている。表 5-3 と表 5-4 では各ルールの前件部変数のメンバーシップ関数と後件部変数の実数値の符号が完全に一致しており、速度あるいは加速度が正で大きくなると、そのルール群の出力も正で大きくなるので、操作量が増大される。速度あるいは加速度が負で大きくなると、そのルール群の出力も負で大きくなるので、操作量が減少される。これによって、速度または加速度を抑制しようとしている。

システムに対して、各入力項目の影響力がそれぞれ異なる。重視度は入力項目の影響力を表す尺度である。重視度の値が相対的に大きいほど、対応する入力項目は強調され、強い影響力を持つことになる。実際に、予測誤差の重視度を大きくしてその誤差を短時間内でなくそうとすると、制御動作が必然的に大きくなり、速度も増大してしまうので、軌道追従制御は逆に難しくなる。また、速度と加速度の重視度を小さく設定すると、速度が小さいときには追従が滑らかに行われるが、何らかの原因で速度が大きくなった場合はその値を小さく抑えるのに時間がかかる。このことから、予測誤差の重視度を小さくし、速度

と加速度の重視度を大きく設定するという基本制御戦略が立てられる。しかし、速度の重視度が大きい値に固定されると、速度が小さいときでも制御動作が大きくなるから逆にスムーズに追従できなくなる不都合も生じる。従って、速度が小さいときにはその重視度を小さくし低速度の移動を維持して、速度が大きくなるとその重視度を大きくし速度を速やかに小さく抑えることが望まれる。

そこで、各入力項目の重視度の基本値を w_i ($i=1,2,3$) とする。また、速度項目の重視度の変動幅を B_2 とし、現時刻における変動量変数を $\Delta w_2(k)$ とすると、速度項目の動的重視度は $w_2 + B_2 \cdot \Delta w_2^0(k)$ となる。以上の分析から変動量変数 $\Delta w_2(k)$ の推論値 $\Delta w_2^0(k)$ が表 5-5 のように正規化後の現時刻の速度と加速度の絶対値を前件部変数とするファジィルールで決められる。ただし、これらのファジィルールは試行錯誤によって設定され、各前件部変数のメンバーシップ関数 DS と DB は図 5-4 に示すように台形とする。なお、1 次遅れ系および 2 次遅れ系の場合と違って、この変動量変数が密接に関わっている二つの入力項目の絶対値を前件部変数にしていることに注意していただきたい。

表 5-5 速度の動的重視度の変動量変数のファジィルール

後件部変数 $\Delta w_2(k)$		$ x_3(k) $	
		DS	DB
$ x_2(k) $	DS	0.0	0.5
	DB	0.5	1.0

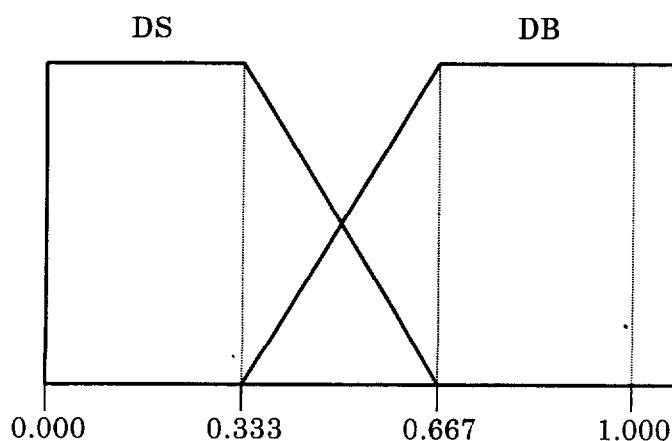


図 5-4 表 5-5 の前件部変数のメンバーシップ関数

こうすれば、速度と加速度の値がゼロに近い場合変動量変数の推論値が小さくなるので速度項目の重視度も小さく、逆に速度と加速度の値がともに大きくなった場合は変動量変数の推論値が大きくなるので速度項目の重視度も大きくなる。また現時刻の局所的情報しか使わないので、速度項目の影響力が制御状況に応じて実時間で動的に調整できる。

各単一入力ルール群の推論結果を $\Delta u_i^0(k)$ ($i=1,2,3$) とすれば、本ファジィ制御器の最終出力 $\Delta u^0(k)$ は動的重視度モデルに従って、

$$\Delta u^0(k) = \Delta u_1^0(k) \cdot w_1 + \Delta u_2^0(k) \cdot \{w_2 + B_2 \cdot \Delta w_2^0(k)\} + \Delta u_3^0(k) \cdot w_3 \quad (5-4)$$

で求められる。なお、速度項目の重視度の変動幅 B_2 をゼロにすると、本ファジィ制御器は SIRMs 固定重視度結合型ファジィ推論モデルに基づくものと一致する。したがって、後の実験において、SIRMs 固定重視度結合型ファジィ推論モデルによる実験も行う。

本ファジィ制御器のブロック図を図 5-5 に示す。ただし、各変数にサンプリング時刻の表示を省いている。ブロック DID-2 の出力 w_2^D は、速度の動的重視度を表す。この図からわかるように、予測誤差と加速度に固定重視度を与えているのに対して速度に動的重視度を与えている。

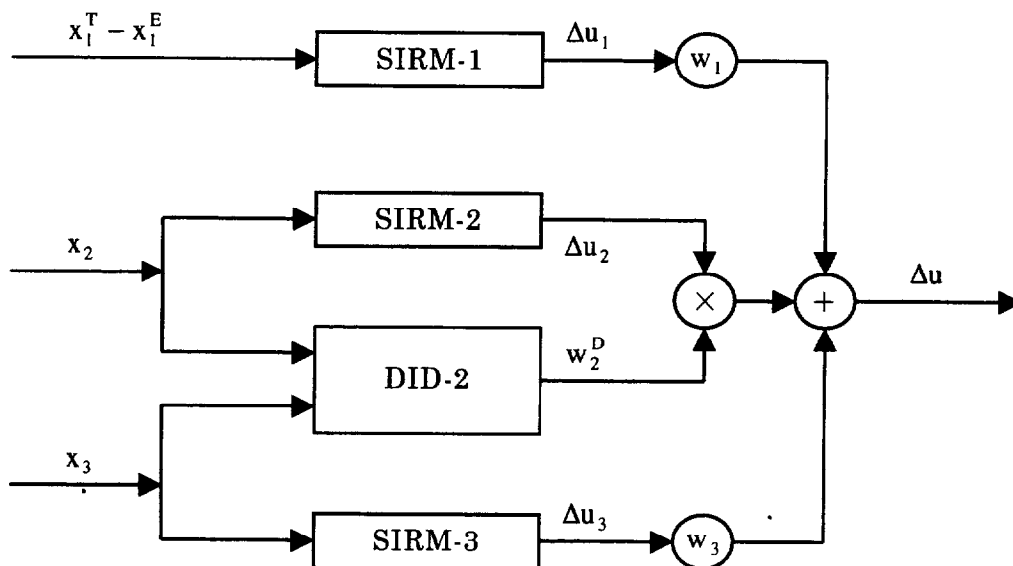


図 5-5 軌道追従用ファジィ制御器のブロック図

5.4 目標位置

軌道追従制御において、制御対象が移動した軌跡が軌道追従の結果になるので、各サンプリング時刻における制御対象の位置が重要である。正確に目標軌道を追従させるには、各サンプリング時刻において制御対象をある目標位置に移動させることが必要である。したがって、目標軌道を与えるだけでは不十分であり、各サンプリング時刻で次の時刻になるときの目標位置をあらかじめ与えなければならない。

しかし、ピンポン球のような未拘束物体の場合、移動速度は一定ではなく、場所などによっても異なる。しかも、その速度を直接制御できないため、各サンプリング時刻における目標位置を予め指定して固定しておく、移動速度が遅い場合は目標位置に遅れをとったり、移動速度が速い場合は目標位置を一直線に越えたりする問題が起こる。このような場合、追従誤差が累積されるので、誤差がますます拡大していく。追従誤差を減らすため、移動速度を増大あるいは減少させると、今度は逆に反対方向の誤差が生じたり、追従軌道が滑らかなさを失ったりする。したがって、各サンプリング時刻において、その時の制御対象の位置に応じて目標位置を生成しなければならない。また、制御対象が目標軌道から離れているとき、制御対象の現在の位置からほぼ垂直方向に直接目標軌道上に目標位置を選ぶと、制御対象が目標軌道に交差するように移動してしまうので、追従軌道はギザギザになりがちである。滑らかな追従軌道を選ぶには、制御対象を小さな速度で目標軌道と接する方向に移動させることが欠かせない。

そこで、図 5-6 に示すように、ピンポン球が目標軌道に円滑に追従するように、現時刻の位置 $(x_1(k), y_1(k))$ から

$$\begin{cases} x_1^T(k+j) = [1 + \{r(k) - 1\} \cdot d] \cdot a \cdot \cos\{\theta(k) + \alpha \cdot j\} \\ y_1^T(k+j) = [1 + \{r(k) - 1\} \cdot d] \cdot b \cdot \sin\{\theta(k) + \alpha \cdot j\} \end{cases} \quad (5-5)$$

で定義される螺旋状の漸近軌道を仮想的に生成する。ただし、 a 、 b は目標軌道を決めるパラメータであり、例えば円軌道の場合は共に半径を表して、楕円軌道の場合はそれぞれ長軸と短軸の長さを表す。距離率 $r(k)$ は現時刻の位置 $(x_1(k), y_1(k))$ から原点までの距離と、原点から現時刻の位置へ引いた直線が目標軌道と交差する点から原点までの距離との比率を意味し、 $\theta(k)$ は X 軸の正方向からその直線までの角度である。漸近率 d は現在位置から 1 サンプル周期で目標軌道にどの程度近づくかを意味し、 $[0.0, 1.0]$ の間の値をとる。ステップ角 α は原点に対し制御対象が 1 サンプル周期で目標軌道に沿って回転する角度の理想値を表す。なお、 j は現時刻からカウントするサンプリングステップ数である。

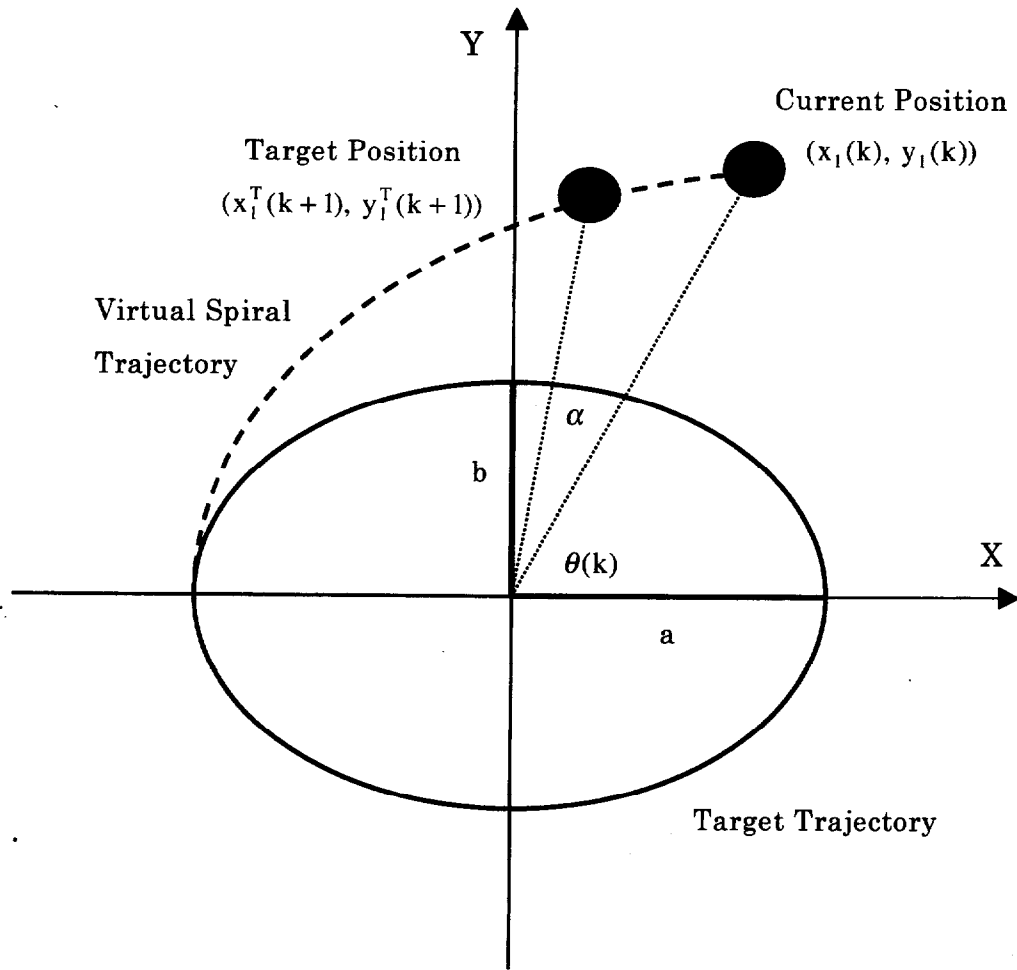


図 5-6 目標軌道と仮想漸近軌道および目標位置の関係図

ステップ角を大きく設定すると、1 サンプル周期の移動量が大きいことから、制御対象が速い速度で移動しなければならない。ステップ角を小さく設定すると、1 サンプル周期の移動量が小さいことから制御対象が緩やかな速度で移動すればよいが、追従時間がかかる。距離率 $r(k)$ は制御対象の現時刻の位置と目標軌道との相対関係により決まり、目標軌道上にあれば 1.0 であり、目標軌道の外側であれば 1.0 より大きく、内側であれば 1.0 より小さくなる。漸近率 d を 0.0 に設定すると、式(5-5)の右辺の第 1 項が 1.0 になるので、仮想漸近軌道は目標軌道になってしまう。逆に漸近率 d を 1.0 に設定すると、式(5-5)の右辺の第 1 項が $r(k)$ になるので、制御対象と原点の間の距離がずっと一定になり、仮想漸近軌道は目標軌道に漸近できなくなる。しかし、漸近率 d が 0.0 と 1.0 の間の値であれば、距離率 $r(k) > 1.0$ のとき式(5-5)の右辺の第 1 項が $r(k)$ より小さくなるので、仮想漸近軌道は外側から目標軌道に近づく。距離率 $r(k) = 1.0$ のとき式(5-5)の右辺の第 1 項が 1.0 のまま変わらないので、仮想漸近軌道は目標軌道そのものである。距離率 $r(k) < 1.0$ のとき式(5-5)の右辺の第 1 項が $r(k)$ より大きくなるので、仮想漸近軌道は内側から目標

軌道に接近する。したがって、式(5-5)の仮想漸近軌道は必ず目標軌道に漸近していく。

実際には、各サンプリング時刻 k においてそのときの位置から式(5-5)の仮想漸近軌道を生成し、 $j=1$ すなわち次の時刻に対応する仮想漸近軌道上の点 $(x_1^T(k+1), y_1^T(k+1))$ をサンプリング時刻 $k+1$ における目標位置とする。漸近率とステップ角が適切に設定されていれば、制御対象がほぼ接線方向に漸近軌道に沿って移動し、最終的には目標軌道に追従することになる。

5.5 軌道追従制御実験

5.5.1 パラメータ設定

以下では、円軌道と楕円軌道为目标軌道として選ぶ。目標軌道の中心をテーブルの中心（すなわち座標原点）に置き、楕円の場合は長軸と短軸をそれぞれテーブルの X 軸と Y 軸に一致させる。そして、逆時計回りを軌道追従方向として、ピンポン球の軌道追従制御実験を行う。

実験において、サンプリング周期を短縮するため、画像処理とモータの駆動を並行に行うようにしている。また、ピンポン球の移動速度を有効に制御し、移動方向をスムーズに調整するため、サンプリング周期を小さく設定することが望まれる。ここでは、画像処理の時間とモータの駆動時間を考慮してサンプリング周期を 0.13 秒に設定している。一方、テーブルが水平面に対して X 方向と Y 方向に回転できる角度範囲を共に $[-1.5^\circ, +1.5^\circ]$ としている。（正確な数値がないが）角度がだいたい 0.6° ぐらいであれば、ピンポン球が静止状態から転がるようになる。

試行錯誤で予測誤差、速度、加速度のスケールファクタを 0.02m、0.10m/s、0.10m/s² に設定し、操作量の変化分のスケールファクタを 0.6° にセットしている。また、各入力項目の重視度の基本値を 0.2、0.4、0.4 に設定し、速度項目の動的重視度の変動幅 B_2 を 0.0 と 0.4 に 2 通りに設定している。 $B_2 = 0.0$ の場合は SIRMs 固定重視度結合型ファジィ推論モデルすなわち固定重視度モデルに対応し、 $B_2 = 0.4$ の場合は SIRMs 動的重視度結合型ファジィ推論モデルすなわち動的重視度モデルに対応する。さらに仮想漸近軌道における目標位置の設定パラメータとして、漸近率 d を 0.8 に、ステップ角 α を 3.0° に固定している。

すべての軌道追従制御実験を、テーブルが水平に位置しかつピンポン球が静止している状態からスタートし、2400 サンプリングステップまで行う。実験中ピンポン球がテーブルの有効範囲を出たところで、その回の実験が失敗したと見なす。ただし、ピンポン球の初期状態の影響を考慮して実験開始から最初の 200 サンプリングステップ目までの軌跡

を無視して、それ以後の軌跡すなわち 201 サンプルングステップ目から 2400 サンプルングステップ目までの軌跡から制御結果を評価することにする。なお、1 回の実験における総サンプルングステップ数を 2400 に設定した理由は、後の実験結果からも分かるように、円軌道、楕円軌道に問わず 2400 サンプルングステップまで実験を行えば、200 サンプルングステップ目までの軌跡を除いても約 4 週の軌跡が得られることによる。

またここでは、追従軌道を評価するため、いくつかの評価指標を以下のように定義している。各回の実験において、サンプルング時刻 k におけるピンポン球の実際位置から原点までの距離を $d^{AO}(k)$ として、そのとき原点から実際位置へ引いた直線が目標軌道と交差する交点から原点までの距離を $d^{CO}(k)$ とする。ただし、上付記号 AO は Actual position to Origin を意味し、上付記号 CO は Cross point to Origin を意味する。すると、1 回の実験における軌道追従の最大誤差は、

$$\text{最大誤差} = \max_{k=201}^{2400} \{d^{AO}(k) - d^{CO}(k)\} \quad (5-6)$$

で 201 サンプルングステップ目から 2400 サンプルングステップ目までの間に $d^{AO}(k)$ と $d^{CO}(k)$ の差の絶対値の最大値として定義され、大きいほどピンポン球が目標軌道から遠く離れていることを意味する。平均誤差は、

$$\text{平均誤差} = \sum_{k=201}^{2400} \{d^{AO}(k) - d^{CO}(k)\} / 2200 \quad (5-7)$$

で 201 サンプルングステップ目から 2400 サンプルングステップ目までの $d^{AO}(k)$ と $d^{CO}(k)$ の差の平均値として計算され、正で大きいほどピンポン球が主に目標軌道の外側に移動していることを表す。標準偏差は、

$$\text{標準偏差} = \sqrt{\sum_{k=201}^{2400} \left[\{d^{AO}(k) - d^{CO}(k)\} - \text{平均誤差} \right]^2 / 2200} \quad (5-8)$$

で $d^{AO}(k)$ と $d^{CO}(k)$ の差の平均誤差に対する差の自乗平均として求められ、大きいほどピンポン球が目標軌道に対して激しく接近したり遠ざかったりしていることを意味する。平均周期は、201 サンプルングステップ目から目標軌道を 1 周するのにかかるサンプルングステップ数の平均値で与えられる。したがって、最大誤差、平均誤差、標準偏差がすべて小さければ、追従制御結果がよいことが分かる。

5.5.2 小円軌道についての実験結果

まずテーブルの有効範囲の約 1/3 に当たる半径 0.073m の円軌道に対して、ピンポン球をほぼ同じ位置にセットして、固定重視度モデルおよび動的重視度モデルによる軌道追従制御実験をそれぞれ 20 回ずつ行い、その結果を表 5-6 と表 5-7 にまとめている。

表 5-6 は 20 回の実験のうち最大誤差が各指定範囲内に収まった場合の実験回数を示している。例えば、最大誤差が 0.03m 以下になった実験回数は、固定重視度モデルの場合ではわずか 1 回であるのに対して、動的重視度モデルの場合では 6 回に増えている。この表からわかるように、固定重視度モデルの場合は最大誤差の現れた頻度が 0.03m 以上の各区間にほぼ均一に分布しているのに対して、動的重視度モデルの場合は最大誤差が 0.05m 以下の区間に集中し 0.05m 以上の区間にはほとんど現れていない。

表 5-7 は、各回の実験における最大誤差、平均誤差、標準偏差、および平均周期、のすべての実験についての平均である最大誤差平均、総合平均誤差、総合標準偏差、総合平均周期を示している。表 5-7 より、固定重視度モデルの場合に比べて、動的重視度モデルを用いることによって、最大誤差平均と総合平均誤差はともに 20%以上小さくなっており、総合標準偏差も 10%ほど小さくなっている。つまり、動的重視度モデルの場合軌道追従がもっと精確に行われている。また、総合平均周期が 10%以上長くなっていることから、移動速度に対応する入力項目に動的重視度を与えることによってピンポン球の移動速度が確実に小さく抑えられていることがわかる。

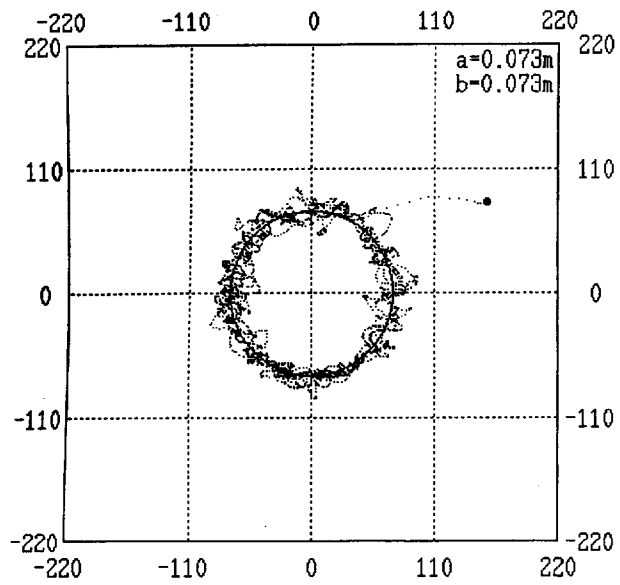
図 5-7(a)には動的重視度モデルを用いた場合の実験結果の 1 例を示している。実線の枠は実験用テーブルを意味し、その大きさ (X と Y 方向にともに -220 から 220 まで、単位は mm) はテーブルの有効範囲を代表する。この場合、 $a=0.073\text{m}$ と $b=0.073\text{m}$ はともに目標軌道の半径を表す。太い点は初期位置を表す。図 5-7(b)はこの例の 201 サンプル目からの軌跡を左上から右へそして左下から右へ順に 1 周目から 4 周目まで 1 周ごとに描いたものである。この例では、最大誤差と平均誤差および標準偏差がそれぞれ 0.0267m、0.0018m、0.0079m になっており、しかも目標軌道を 1 周するステップ数の平均周期に対する最大ずれがわずか 5%にすぎなく、安定した動作を示している。

表 5-6 最大誤差が指定範囲に収まった実験回数

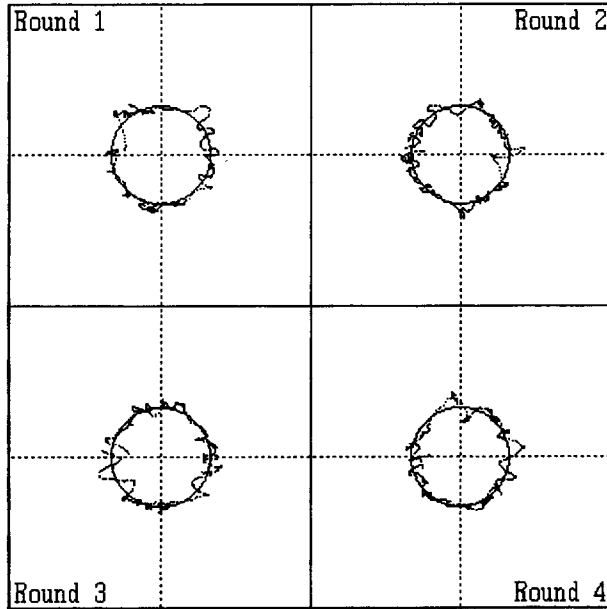
指定誤差範囲 (m)	固定重視度 モデル	動的重視度 モデル
≤ 0.03	1	6
0.03~0.04	5	5
0.04~0.05	4	7
0.05~0.06	7	2
$0.06 \leq$	3	0

表 5-7 総合評価指標の比較

総合評価指標	固定重視度 モデル	動的重視度 モデル
最大誤差平均 (m)	0.0484	0.0378
総合平均誤差 (m)	0.0024	0.0019
総合標準偏差 (m)	0.0086	0.0079
総合平均周期 (ステップ)	465	520



(a) 開始から終了までの全軌跡



(b) 1周ごとの軌跡

図 5-7 半径 0.073m の円軌道についての追従結果

5.5.3 中円軌道についての実験結果

次にテーブルの有効範囲の半分に当たる半径 0.110m の円軌道について、ほぼ同じ初期位置に対して軌道追従制御実験を固定重視度モデルおよび動的重視度モデルに基づいてそれぞれ 100 回ずつ行い、結果を表 5-8 と表 5-9 に示す。表 5-8 からわかるように、固定重視度モデルの場合に比べて動的重視度モデルを用いることによって、最大誤差が 0.05m を越えた実験回数は 100 回のうち 15 回も少なくなり、最大誤差が 0.03m 以下に収まった実験回数はほぼ倍になっている。また表 5-9 より、総合標準偏差があまり変わっていないものの、最大誤差平均と総合平均誤差はそれぞれ 10%と 20%以上小さくなっており、制御対象が目標軌道に一層精確に追従できていることがわかる。

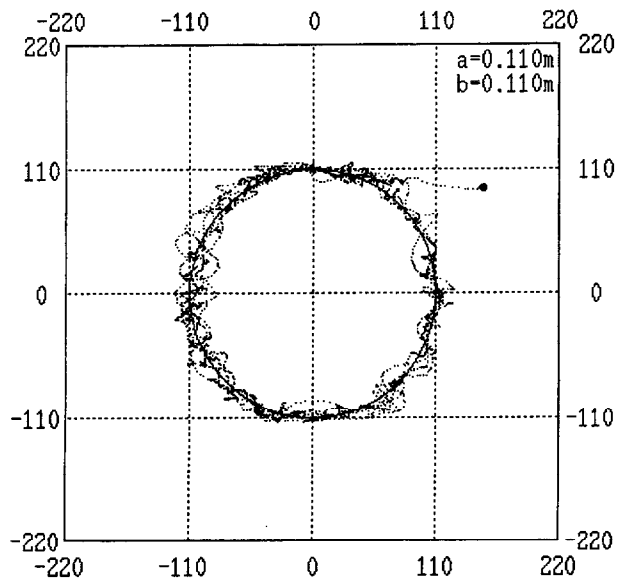
図 5-8 は動的重視度モデルによる追従制御結果の 1 例を示している。この例では、最大誤差、平均誤差、標準偏差がそれぞれ 0.0231m、0.0019m と 0.0066m であり、平均周期に対する軌道 1 周のサンプリングステップ数の最大ずれが約 6%である。

表 5-8 最大誤差が指定範囲に収まった実験回数

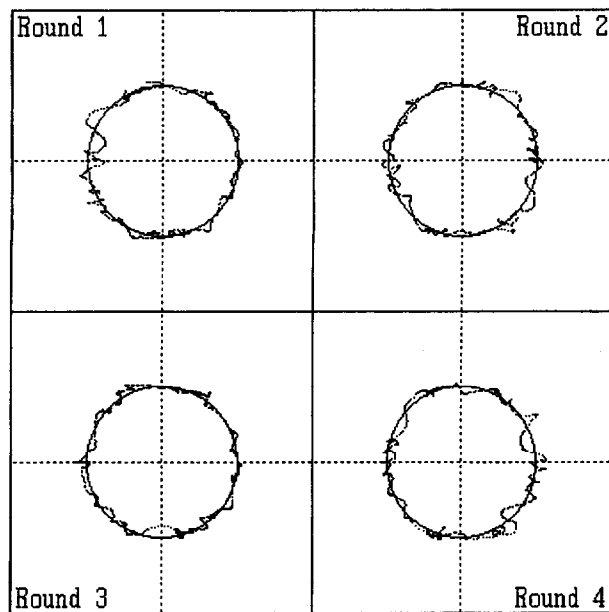
指定誤差範囲 (m)	固定重視度モデル	動的重視度モデル
≤0.03	7	13
0.03~0.04	40	50
0.04~0.05	23	22
0.05~0.06	17	5
0.06≤	13	10

表 5-9 総合評価指標の比較

総合評価指標	固定重視度モデル	動的重視度モデル
最大誤差平均 (m)	0.0453	0.0409
総合平均誤差 (m)	0.0028	0.0020
総合標準偏差 (m)	0.0086	0.0083
総合平均周期 (ステップ)	482	541



(a) 開始から終了までの全軌跡



(b) 1周ごとの軌跡

図 5-8 半径 0.110m の円軌道についての追従結果

5.5.4 大円軌道についての実験結果

表 5-10 と表 5-11 には、テーブルの有効範囲の約 2/3 に当たる半径 0.155m の円軌道について、固定重視度モデルおよび動的重視度モデルに基づいてそれぞれ行った 20 回の実験結果を示している。固定重視度モデルの場合は最大誤差が 0.05m 以下の実験回数はわずか 9 回であるのに対して、動的重視度モデルの場合はそれは 16 回となり、倍に近く増えていることがわかる。また、動的重視度モデルによって、最大誤差が 0.05m を越えた実験回数は約 1/3 に減っている。さらに、最大誤差平均と総合平均誤差はそれぞれ約 20% と 30%減少し、総合標準偏差は 10%近く小さくなっていることもわかる。

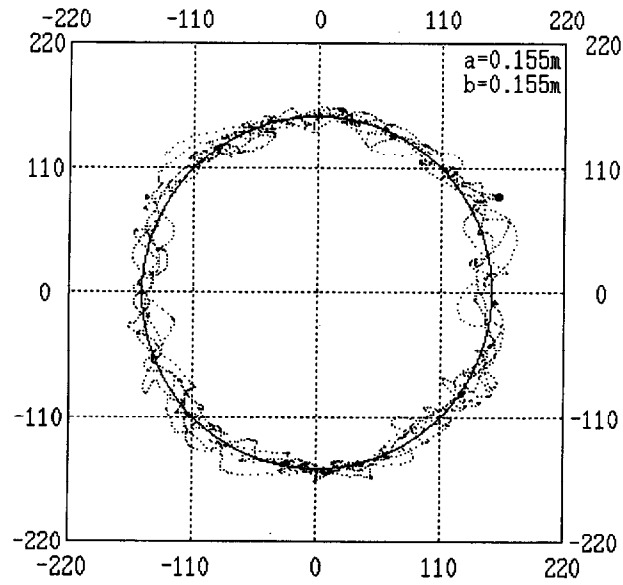
図 5-9 は動的重視度モデルによる実験結果の 1 例を示している。この例では、最大誤差と平均誤差および標準偏差がそれぞれ 0.0303m、0.0017m と 0.0091m になっており、平均周期に対する軌道 1 周のサンプリングステップ数の最大ずれが 4%未満であることから、ピンポン球が精度よく規則正しく目標軌道に追従できていることがいえる。

表 5-10 最大誤差が指定範囲に収まった実験回数

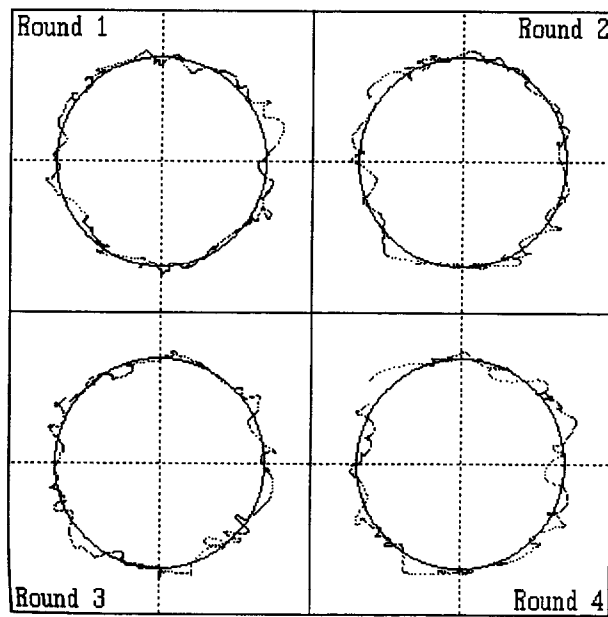
指定誤差範囲 (m)	固定重視度モデル	動的重視度モデル
≤0.03	0	1
0.03~0.04	3	8
0.04~0.05	6	7
0.05~0.06	9	3
0.06≤	2	1

表 5-11 総合評価指標の比較

総合評価指標	固定重視度モデル	動的重視度モデル
最大誤差平均 (m)	0.0501	0.0428
総合平均誤差 (m)	0.0027	0.0017
総合標準偏差 (m)	0.0107	0.0098
総合平均周期 (ステップ°)	494	568



(a) 開始から終了までの全軌跡



(b) 1周ごとの軌跡

図 5-9 半径 0.155m の円軌道についての追従結果

5.5.5 楕円軌道についての実験結果

以上、3種類の円軌道についての追従制御結果から、固定重視度モデルに比べて動的重視度モデルに基づくファジィ制御器で優れた結果が得られることがわかる。そこで、長軸と短軸がそれぞれ0.144mと0.092mである楕円軌道について、動的重視度モデルによる20回の追従制御結果を表5-12と表5-13に示す。楕円の場合曲率の大きい部分では制御対象の移動方向を大きく変える必要があるため、曲率の小さい部分に比べて誤差が少し大きくなる傾向がある。しかし、80%の実験では最大誤差が0.05m以内に抑えられ、全体として円軌道の場合とほぼ同じレベルの追従結果が得られているといえる。

図5-10は楕円軌道の追従結果の1例を示している。この例では最大誤差0.0277m、平均誤差0.0022m、標準偏差0.0072mが得られ、目標軌道を1周するのにかかるサンプリングステップ数の平均周期に対する最大ずれがわずか2%である。

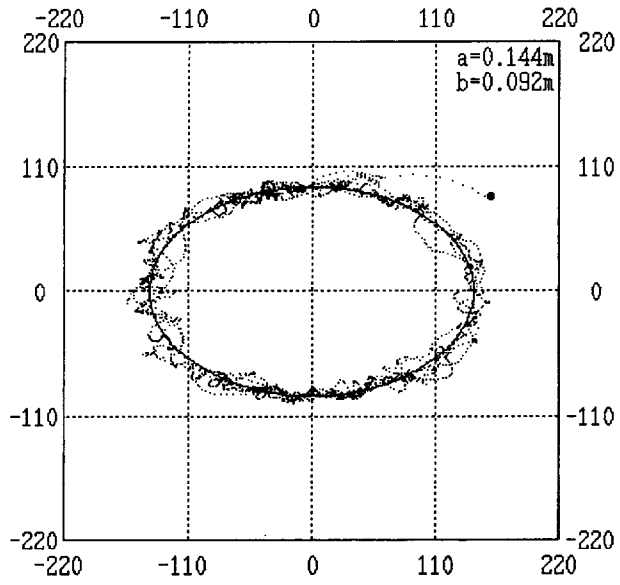
なお、ここでも円軌道の場合と同じような誤差の測り方をとっているが、それはほとんどの場合において原点からピンポン球の現在位置まで引いた直線が楕円軌道と直交しないことより直交方向ではなく斜め方向から測られることになる。直交方向から測るとすれば、楕円軌道についての追従誤差の値はもっと小さくなるはずである。

表 5-12 最大誤差が指定範囲に収まった実験回数

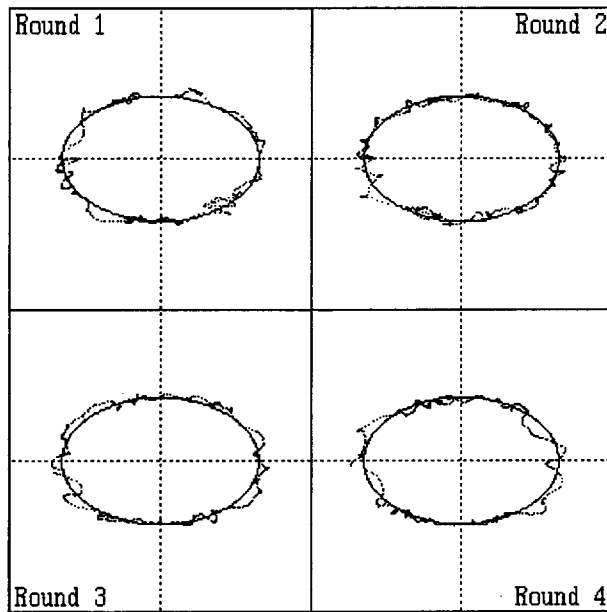
指定誤差範囲 (m)	動的重視度モデル
≤ 0.03	3
0.03~0.04	5
0.04~0.05	8
0.05~0.06	2
$0.06 \leq$	2

表 5-13 総合評価指標

総合評価指標	動的重視度モデル
最大誤差平均 (m)	0.0433
総合平均誤差 (m)	0.0023
総合標準偏差 (m)	0.0088
総合平均周期 (ステップ)	559



(a) 開始から終了までの全軌跡



(b) 1周ごとの軌跡

図 5-10 楕円軌道についての追従結果

5.5.6 従来のファジィ推論モデルによる軌道追従制御実験

ここで比較のため、すべての入力項目を各ファジィルールの前件部にセットする従来のファジィ推論モデルを用いて、軌道追従用ファジィ制御器を作る。入力項目としてピンポン球の位置に関する予測誤差、移動速度および加速度が計三つあるので、文献^[38,105,106]にしたがってファジィルールの表 5-14 のように設定する。すなわち、予測誤差を条件としてサブファジィルールグループを構築し、各サブファジィルールグループにさらに移動速度と加速度を条件として操作量の変化分を出力とする。こうすれば、サブファジィルールグループの設定に 2 入力 1 出力のルールテーブルが利用できる。ただし、各前件部変数について、動的重視度モデルの場合と同じ図 5-3 に定義したメンバーシップ関数を用いるので、それぞれ五つのメンバーシップ関数を持つ。したがって、表 5-14 のようにサブファジィルールグループが計五つ設定されている。このように動的重視度モデルの場合、速度の変動量変数のルールを入れてルール総数はわずか 19 個であるのに対して、従来のファジィ推論モデルの場合、ルール総数はその 6 倍以上の 125 個になっている。

また、各入力項目と出力項目のスケーリングファクタには、動的重視度モデルの場合と同じものを使う。このファジィ制御器で、半径 0.110m の円軌道に対してほぼ同じ位置に置かれるピンポン球の軌道追従制御実験を計 50 回行う。表 5-15 には、各回の実験においてピンポン球が実験開始からテーブルの有効範囲の外側に飛び出してしまう（すなわち追従制御の失敗）までのサンプリングステップ数を示している。ただし、上の 2 行目の数字を左の 2 列目の数字に足した値は実験番号を意味し、それに対応する表中の値は失敗までのサンプリングステップ数を表す。この表からわかるように、各回の実験における失敗までのサンプリングステップ数は実験によってそれぞれ 131 から 1512 まで大きく異なり、その平均値がわずか 498 にとどまっている。これに対して、固定重視度モデルおよび動的重視度モデルではともに、5.5.3 で述べたように 2400 サンプリングステップまでの実験 100 回の内、失敗した実験は 1 回もない。

図 5-11(a)は、43 番目の実験に対応する、サンプリングステップ数 1512 までテーブル上に残ったピンポン球の実際の軌跡を示している。図 5-11(b)は、同じく 201 サンプリングステップ目から座標原点に対する 1 周ごとの軌跡計 4 周を描いている。図 5-11(a)から、ピンポン球の位置を表す点がテーブル上にランダムに分布しているように見え、軌道らしいものを見つけだすことさえ難しいことから、ピンポン球が目標軌道に追従していたか否かは不明である。一方、図 5-11(b)の各周の軌道を全体から眺めてみたら、ピンポン球が目標軌道に対して追従していた様子がすこし読みとれる。しかし、追従誤差が大きく、しかも動きが激しいことがわかる。それは、すなわち、未拘束移動物体の制御において移動速度を優先的に抑えないと行けないのに、従来のファジィ推論モデルでは各入力項目を平等に扱い、速度の制御だけを強調したりすることができないからである。

表 5-14 従来のファジィ推論モデルによる軌道追従制御用ファジィルール

(a) If $x_1^T(k+1) - x_1^E(k+1)$ is NB, Then

$\Delta u(k)$		$x_3(k)$				
		NB	NS	ZO	PS	PB
$x_2(k)$	NB	0.0	0.2	0.4	0.6	0.8
	NS	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
	ZO	0.4	0.6	0.8	1.0	1.0
	PS	0.6	0.8	1.0	1.0	1.0
	PB	0.8	1.0	1.0	1.0	1.0

(b) If $x_1^T(k+1) - x_1^E(k+1)$ is NS, Then

$\Delta u(k)$		$x_3(k)$				
		NB	NS	ZO	PS	PB
$x_2(k)$	NB	-0.4	-0.2	0.0	0.2	0.4
	NS	-0.2	0.0	0.2	0.4	0.6
	ZO	0.0	0.2	0.4	0.6	0.8
	PS	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
	PB	0.4	0.6	0.8	1.0	1.0

(c) If $x_1^T(k+1) - x_1^E(k+1)$ is ZO, Then

$\Delta u(k)$		$x_3(k)$				
		NB	NS	ZO	PS	PB
$x_2(k)$	NB	-0.8	-0.6	-0.4	-0.2	0.0
	NS	-0.6	-0.4	-0.2	0.0	0.2
	ZO	-0.4	-0.2	0.0	0.2	0.4
	PS	-0.2	0.0	0.2	0.4	0.6
	PB	0.0	0.2	0.4	0.6	0.8

(d) If $x_1^T(k+1) - x_1^E(k+1)$ is PS, Then

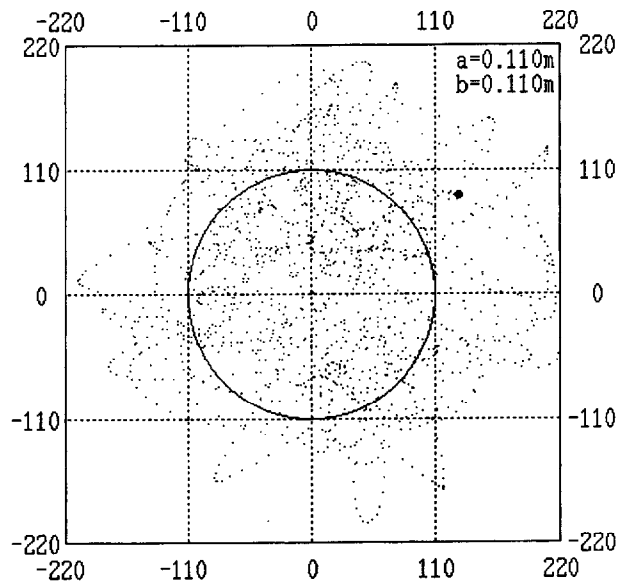
$\Delta u(k)$		$x_3(k)$				
		NB	NS	ZO	PS	PB
$x_2(k)$	NB	-1.0	-1.0	-0.8	-0.6	-0.4
	NS	-1.0	-0.8	-0.6	-0.4	-0.2
	ZO	-0.8	-0.6	-0.4	-0.2	0.0
	PS	-0.6	-0.4	-0.2	0.0	0.2
	PB	-0.4	-0.2	0.0	0.2	0.4

(e) If $x_1^T(k+1) - x_1^E(k+1)$ is PB, Then

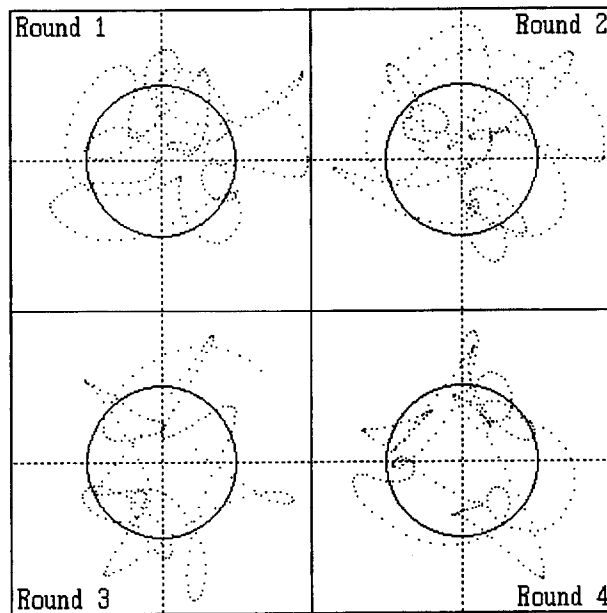
$\Delta u(k)$		$x_3(k)$				
		NB	NS	ZO	PS	PB
$x_2(k)$	NB	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-0.8
	NS	-1.0	-1.0	-1.0	-0.8	-0.6
	ZO	-1.0	-1.0	-0.8	-0.6	-0.4
	PS	-1.0	-0.8	-0.6	-0.4	-0.2
	PB	-0.8	-0.6	-0.4	-0.2	0.0

表 5-15 各回の実験における失敗までのサンプリングステップ数

失敗までの サンプリング ステップ数		実験回数									
		+1	+2	+3	+4	+5	+6	+7	+8	+9	+10
実験 回数	0	464	313	277	1030	669	902	530	214	239	527
	10	438	869	938	317	659	268	177	684	156	409
	20	355	160	205	151	775	855	589	136	146	774
	30	1315	131	228	1469	594	288	175	467	172	290
	40	1288	399	1512	140	158	1038	319	154	215	300



(a) 開始から終了までの全軌跡



(b) 1周ごとの軌跡

図 5-11 従来のファジィ推論モデルによる追従結果

5.5.7 考察

制御対象として未拘束のピンポン球を使っているため、ロボットなどの拘束物体のように移動速度（方向も含めて）を自由に操作することはできない。また、ピンポン球とテーブルの表面の摩擦は静摩擦と運動摩擦に区別され、静摩擦が運動摩擦よりはるかに大きい。移動中では運動摩擦が小さいので運動を維持するには小さな操作量があれば十分であるのに対して、ピンポン球を静止状態から動かすには静摩擦をクリアできるような大きな操作量が必要となる。その結果、ピンポン球が静止状態から動き出したときには加速度がかなり大きくなっているため、速度はゼロから急増してしまう。さらに実際には摩擦の大きさは湿度や接触位置などによって異なり、ピンポン球の追従制御を一層難しくしている。しかし、5.5.2～5.5.5 に示しているように、動的重視度モデルに基づいて構築したファジィ制御器を用いることによって、円軌道と楕円軌道を問わずに 80%以上の軌道追従制御実験における最大誤差が 0.05m 以内に抑えられている。さらに、約 50%の実験において最大誤差が 0.04m 以内になっている。それは目標軌道から最大約ピンポン球 1 個分しかを離れていないことを意味し、良好な追従結果が得られているといえる。

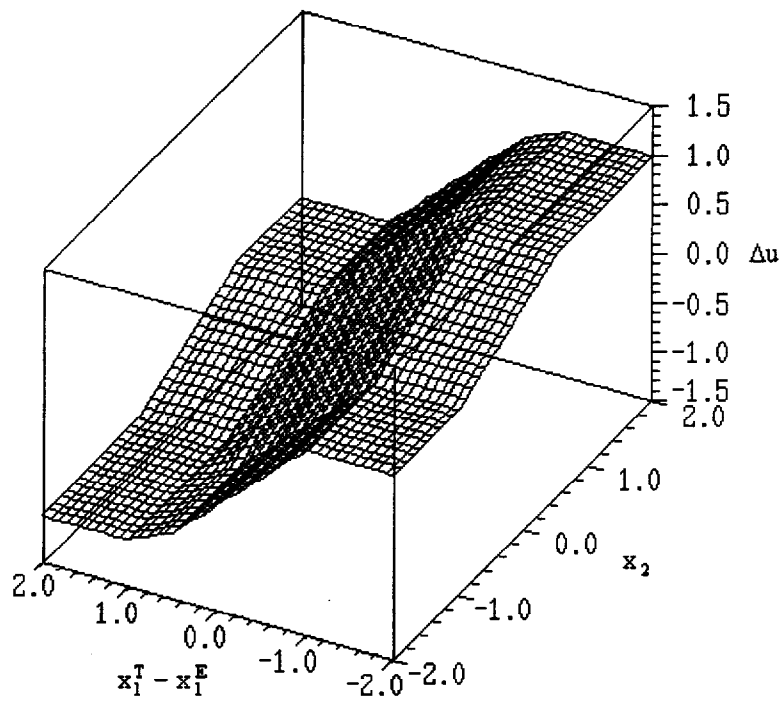
ところで、ピンポン球の速度を低く抑えるため、速度項目および加速度項目の単一入力ルール群の後件部変数に前件部変数のメンバーシップ関数と一致する値を設定している。速度と加速度が同じ方向の場合本ファジィ制御器は、加速度を反対方向に切り替えて速度をゼロに抑えようとする操作量の変化分を出力する。しかし、速度がゼロに抑えられるときには反対方向の加速度を生じてしまうので、今度はピンポン球が反対方向に動き出す。その結果として、各例に見られるようにピンポン球が目標軌道を往復に横切りながら移動することになる。

また、最大誤差が 0.05m を越えた実験のほとんどは、いわゆる静摩擦から運動摩擦に変わったときに生じたものである。すなわち、軌道追従の途中で摩擦の変化などによって、ピンポン球が静止あるいはそれに近い状態に陥ってしまうことがある。そのような状態から再び動き出そうとすると、どうしても大きな操作量が必要なので、初期状態からの軌跡部分と同じようにピンポン球が速いスピードで一直線に飛び出すことになり、大きな誤差を生じてしまう。ただし、このような場合では速度項目の強発火により速度が抑制され、次に予測誤差項目も強く発火するので、やがて制御対象が目標軌道に戻されていく。

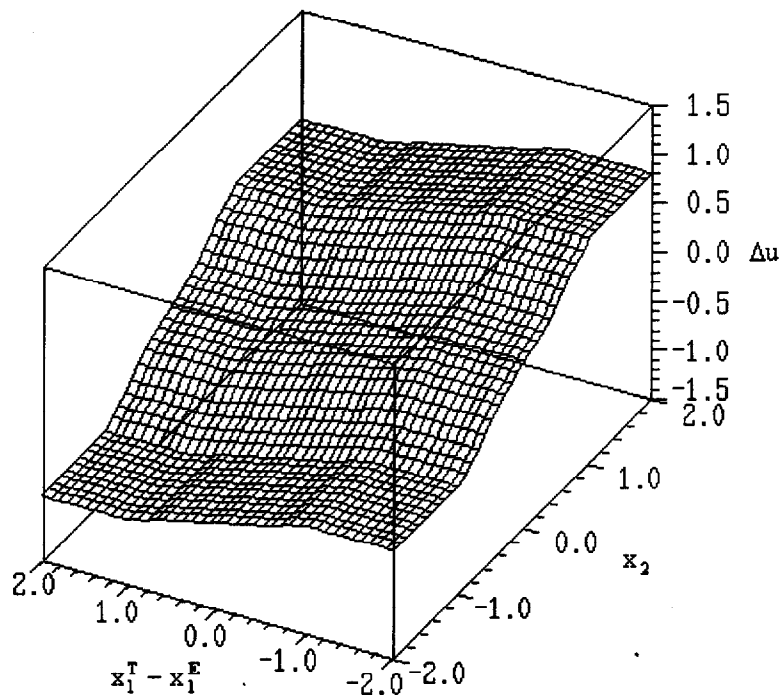
さらに、サンプリング周期の影響も無視できない。本実験では画像処理とモータ駆動の関係でサンプリング周期を 0.13 秒に設定している。実際に画像を取り込み始めてからファジィ制御器が出力を下すまで 1 周期分の時間がかかる。そして、その出力に基づいてモータの駆動を開始してから、モータの動作が完了するまでまた約 1 周期分の時間が必要である。このように、本軌道追従制御実験においては、制御動作を即座に開始できず、約 2 周期分の遅れを生じている。その結果、ピンポン球がこの 2 周期分の間にほぼ元の

速度で移動することにより、追従誤差が大きくなってしまふ。制御動作の遅れを完全になくすことはできないので、追従結果を改善するには、サンプリング周期をもっと短くして制御動作の遅れをできるだけ短くするしかないことは明らかである。

動的重視度モデルによるファジィ制御器、および従来のファジィ推論モデルによるファジィ制御器の入出力制御特性を図 5-12、5-13、5-14 に示す。ただし、三つの入力項目があるため、図 5-12、5-13、5-14 はそれぞれ加速度、速度、予測誤差を 0.0 に固定した場合の入出力制御特性を表している。従来のファジィ推論モデルの場合、表 5-14 のように速度と加速度に関するルール設定が対称になっているため、加速度を 0.0 に固定したときの入出力制御特性(図 5-12(a))は速度を 0.0 に固定したときの入出力制御特性(図 5-13(a))とまったく同じになっている。しかも、各入出力制御特性において、最大出力値すなわち操作量の変化分はすべて 1.0 である。これに対して、動的重視度モデルの場合、各 SIRM の推論結果の重視度付き総和がモデルの出力になるため、各入力項目の動的重視度の値がそれぞれ異なることにより加速度を 0.0 に固定したときの入出力制御特性(図 5-12(b))は速度を 0.0 に固定したときの入出力制御特性(図 5-13(b))と異なっている。また、各入出力制御特性において最大出力値はそれぞれ異なる。予測誤差を 0.0 に固定したときの最大出力値は 1.2 であるのに対して、速度を 0.0 に固定したときの最大出力値は 0.6 であり、加速度を 0.0 に固定したときの最大出力値は 0.8 である。つまり、速度と加速度がともに大きいときに、操作量を大きくすることによって速度と加速度を速やかに小さく抑えることが可能になる。そして、速度と加速度が小さいときに、たとえ予測誤差が大きくても操作量の変化分を小さく抑えることによって、ピンポン球をスムーズに目標軌道に追従させることが可能になる。その結果、安定した良好な軌道追従制御軌道が得られている。

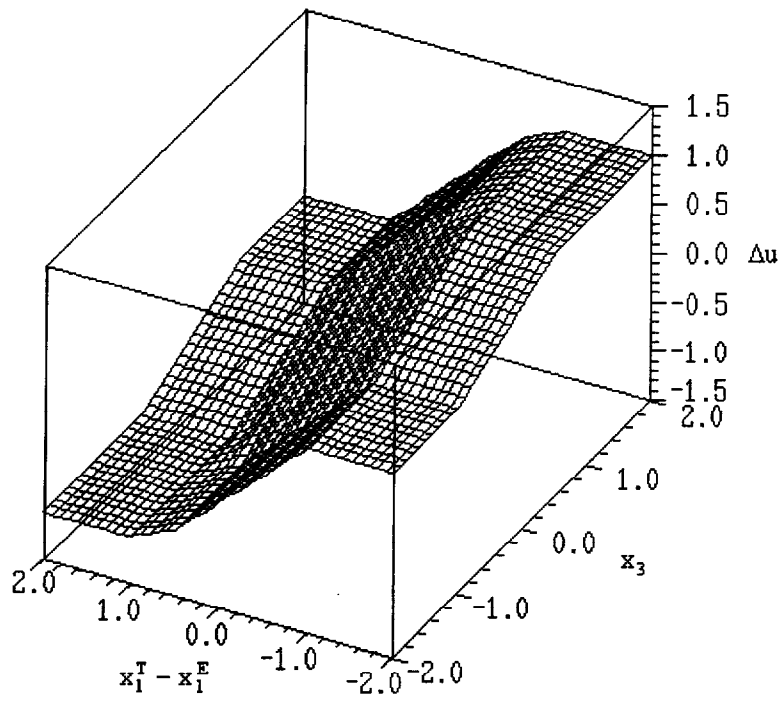


(a) 従来のファジィ推論モデルによる場合

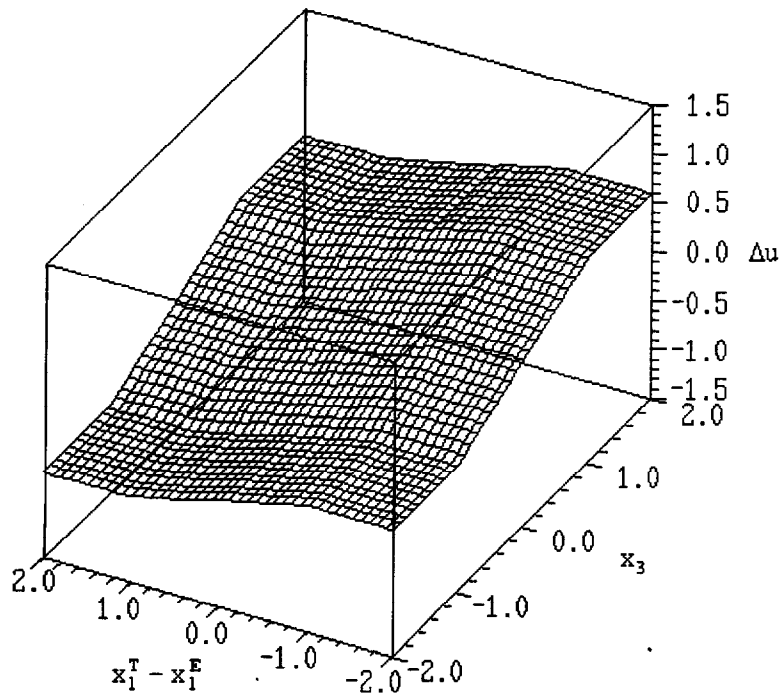


(b) 動的重視度モデルによる場合

図 5-12 加速度を 0.0 に固定した場合のファジィ制御器の入出力特性

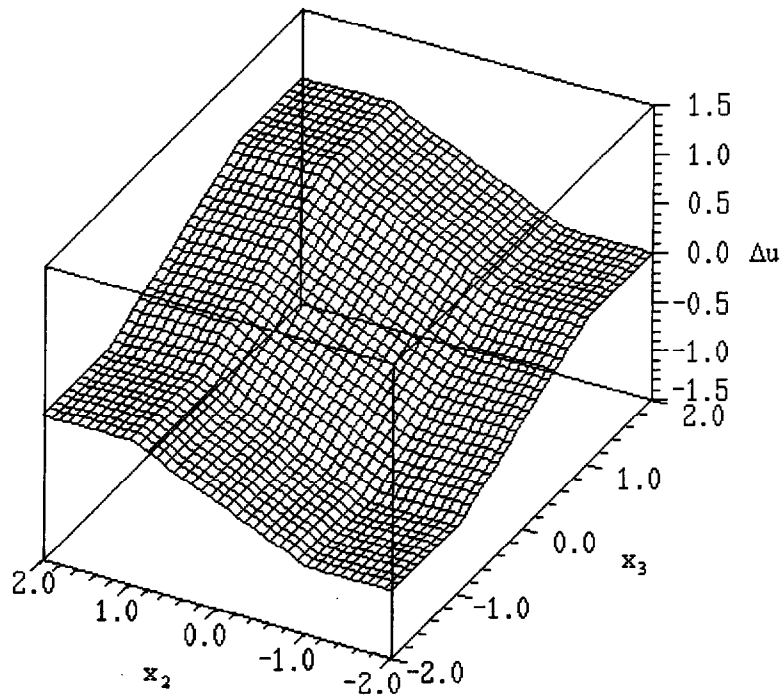


(a) 従来のファジィ推論モデルによる場合

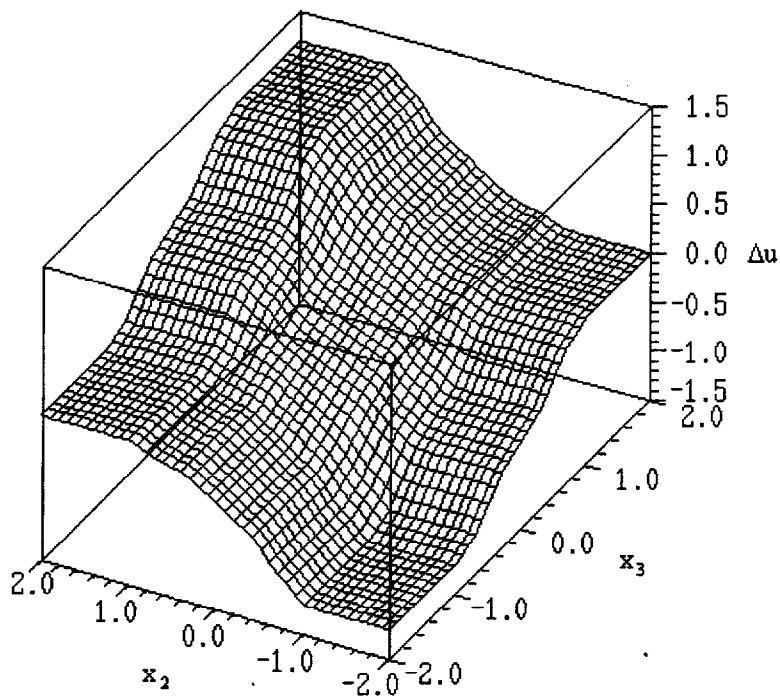


(b) 動的重視度モデルによる場合

図 5-13 速度を 0.0 に固定した場合のファジィ制御器の入出力特性



(a) 従来のファジィ推論モデルによる場合



(b) 動的重視度モデルによる場合

図 5-14 予測誤差を 0.0 に固定した場合のファジィ制御器の入出力特性

5.6 結言

本章では、公式試合用ピンポン球を制御対象として未拘束物体の軌道追従制御実験システムを構築した。ピンポン球の位置を検出するのに CCD カメラを用いたが、それはピンポン球に関する唯一の外部情報である。ピンポン球の速度と加速度はその情報に基づいて近似的に求めた。ピンポン球の速度を直接調整できないので、その速度をいかに小さく制御するかが軌道追従制御の要であることを指摘した。実験用テーブルは X と Y 方向でそれぞれ 1 台のステッピングモータに繋がれ、上下回転可能である。ステッピングモータを通じてこのテーブルの角度を制御することによりテーブル上にあるピンポン球を目標軌道に追従させる構造になっていることを述べた。

次に、ピンポン球の現在位置に対して次のサンプリング時刻における予測誤差を計算し、その予測誤差と移動速度および加速度を入力項目としてテーブルの角度の変化量を出力項目とした。SIRMs 動的重視度結合型ファジィ推論モデルに基づいてテーブルの X 方向と Y 方向の角度に関するファジィ制御器をそれぞれ設計した。予測誤差と加速度についてともに固定重視度を与えたが、速度については動的重視度を定義した。その動的重視度の変動量変数は、現サンプリング時刻の速度と加速度を入力とするファジィルールで推論される。これによって、ピンポン球の速度を小さく抑えることが可能になる。

また、目標位置について議論し、ピンポン球のような未拘束物体に対して目標位置を予めすべて固定したり、目標軌道にほぼ直交するように目標軌道上から直接選んだりするやり方が適切でないことを述べた。未拘束物体が任意位置からでも滑らかに円または楕円の目標軌道に追従できるため、仮想の螺旋状漸近軌道を設けて目標位置を実時間で設定する方法を示した。その仮想漸近軌道が必ず目標軌道に収束していくことも証明した。

さらに、大きさの異なる 3 種類の円と 1 種類の楕円を目標軌道として、軌道追従制御実験を行った。固定重視度モデルの場合に比べて動的重視度モデルを用いた場合、目標軌道の種類と大きさにほとんど影響されずに、80%以上の実験で最大誤差が 0.05m 以下に抑えられ、目標軌道を 1 周するのにかかるサンプリングステップ数のばらつきも小さく、全体として安定した良好な追従結果が得られることを示した。従来ファジィ推論モデルでは、ルールの設定が煩雑だけではなく、移動速度が抑えられないためピンポン球の軌道追従制御が途中で失敗することを例示した。その結果、未拘束物体の軌道追従制御において SIRMs 動的重視度結合型ファジィ推論モデルが有効であることを明らかにした。

第6章 倒立振り子システムの安定化制御

6.1 緒言

振り子と台車からなる倒立振り子システムは構造が簡単であるにもかかわらず典型的な不安定非線形システムであり、新しい制御手法の有効性を検証するベンチマークとして、広く利用されている。通常倒立振り子システムの制御問題は二つに分けられる。一つは倒立振り子システムの安定化制御問題であり、もう一つは倒立振り子システムの振り上げおよび安定化制御問題である。本章では前者の直線レールタイプ倒立振り子システムの安定化制御問題を取り扱う。後者の直線レールタイプ倒立振り子システムの振り上げおよび安定化制御問題は7章で述べる。

直線レールタイプの倒立振り子システムの安定化制御とは、初期状態によらず振り子を短時間で安定に倒立させ、しかも台車を速やかに指定位置に戻すことである。この制御目標を果たすため、非線形制御理論に基づいた現代制御手法^[26]では、倒立振り子システムの数学モデルに基づいて複雑な非線形オブザーバと非線形状態フィードバックを設計しなければならない。可変構造システムに基づいた現代制御手法^[61]では、同じ倒立振り子システムの数学モデルを必要とする上に、倒立点の近傍で線形化を行ってそしてスライドモードの解析をしなければならない。また、現代制御理論をベースにしているこれらの手法は、専門家以外の人にとってはわかりにくく、実用化されるときの一つの支障となる。

ニューロ PD 制御方式^[1]では、制御対象の入力変動に対する出力変動の割合であるシステムヤコビアンが必要であるため、ニューラルネットワークを用いて倒立振り子システムの同定モデルを求め、振り子と台車に対してそれぞれの PD 制御器の係数を出力する二つのニューラルネットワークをその同定モデルに基づいてチューニングする構成になっている。この方式は PD 制御器を用いているため、振り子の倒立点のごく狭い近傍の状態に対してのみ倒立振り子システムを安定化させることができる。仮想目標値発生部を持つ学習制御方式^[21,66]では、振り子の角度と角速度の仮想目標値を生成する関数を先験的知識により与え、評価部で一時的な教師信号としてニューロ制御器を学習する仕組みになっている。この場合、教師信号に台車^[21]またはベースリンク^[66]の位置情報が間接的にしか含まれていないため、そのニューロ制御器で倒立振り子システムを完全に安定化させることは難しい。倒立振り子システムのニューロモデルを利用してニューロ制御器をチューニングする手法^[82]では、特定の制御対象を同定したニューロモデルに対してニューロ制御器を学習させることから、制御対象のパラメータが変更された場合にはニューロ制御器を学習し直さなければそのまま安定化できない可能性がある。

一方、制御対象の数学モデルを必要としないしかも人間の経験と直観に基づくファジィ推論によって安定化制御を行う研究も数多く報告されている。Berenji^[5]は強化学習でチューニングした行動対状態評価ニューロネットと行動選択ファジィネットを用いて倒立振子の制御を行っている。Kim ら^[29]、Lu ら^[36]、Wong ら^[84]はそれぞれ遺伝的アルゴリズムを用いて振子の倒立制御用ファジィルールないし前件部メンバーシップ関数を決める手法を提案している。Lin ら^[35]は適応ファジィスライディングモード法を開発して倒立振子の安定化を試みている。Margaliot^[41]らは倒立振子のファジィモデルに対してリアプノフ関数でファジィ制御規則を算出する手法を発表している。Mikulcic^[45]らはファジィクラスタリングでファジィルールを検出する手法を振子の倒立制御に適用している。Saez ら^[63]は後件部が多項式であるファジィ予測制御器を用いて振子の角度制御を図っている。Yamakawa^[86]は台車の位置制御を考慮していないが、高速ファジィ推論ボード上にわずか7個のファジィルールを用いて倒立振子の実験を行っている。しかし、倒立振子システムの安定化制御は通常振子の角度制御と台車の位置制御を抱えるが、これらの手法では台車の位置制御が考慮されておらず、振子の角度制御のみが行われている。

ファジィ推論で倒立振子の角度制御と台車の位置制御を両方とも実現しようとする、4 入力ファジィ制御器を作らないといけない。ファジィルールなどの設定を容易にするために、学習法を利用してルールの設定の自動化を図る研究^[22,34,64,75]が報告されている。連続値操作量の強化学習法によってファジィ規則を自動生成する手法^[22]では、振子と台車が 10.0° の初期角度に対して 12.0 秒間以上にわたって振動し、しかも角度と位置の定常誤差が残る。ニューラルネットワークを用いてファジィ規則を抽出する手法^[34]では、倒立振子システムを安定化させるのに 3 段の学習を行わなければならない、しかも 396 個ものファジィ規則を必要とする。非線形最適化手法を使ってファジィ規則を獲得する手法^[64]では、最終的には誤差こそが残らないが、システムが完全に安定倒立状態になるまで 200.0 秒間以上もの時間がかかる。離散値操作量の強化学習法でファジィ規則をチューニングする手法^[75]では、台車の位置が目標からずれるだけでなく、振子が最後まで微小振動を続ける。

また、倒立振子の角度制御と台車の位置制御を完全に分離して設計する階層型ファジィ制御手法^[23,25,28,31,43,44,88]も提案されている。それは、台車の位置制御を倒立振子の角度制御にとって一種の外乱であるという考え方に基づいて台車に関するファジィ規則から仮想目標角度を導出し、それを振子に関するファジィ規則の入力に組み込むことによって振子の制御と台車の制御を実現する。倒立状態の近傍に関する近似線形モデルの位相平面図から得た知識により位相部とゲイン部をそれぞれ設計して操作量を定める手法^[23,25]では、完全に安定化になるまで時間がかかり、振子の角度が大きいときシステムの倒立安定化が難しい。レールを敷かない自走式倒立振子の制御法^[28]では、ファジィ規則がかなり単純ではあるが、振子を完全に倒立させることができていない。レールの代わりにアームを用い

た回転式制御^[31]では、振子倒立制御用ルールテーブルと台車位置制御用ルールテーブルおよび制御動作決定用ルールテーブルが必要であるにもかかわらず、制御開始から 70.0 秒間以上経過してもシステムがまだ振動する。振子の振り上げも兼ねた場合^[43,44,88]は、台車制御用ファジィ規則数と振子制御用ファジィ規則数がそれぞれ 49 個も設けられている。

ところで、SIRMs 動的重視度結合型ファジィ推論モデル^[93,108,111,114]では、各入力項目に対してそれぞれ SIRM と制御状況に応じて変化する動的重視度が定義され、各 SIRM の推論値を動的重視度で結合することによって出力が求められる。このモデルは構造が簡単で直感的に分かりやすく、各入力項目を動的重視度によって強調したり抑制したりすることができ、しかも 2 入力項目と 3 入力項目制御対象に対して制御性能が大幅に改善できることを、すでに 3 章と 4 章および 5 章で述べた。

そこで本章では、4 入力項目を有する倒立振子システムに SIRMs 動的重視度結合型ファジィ推論モデルを適用し、4 入力項目制御対象への有効性を示すとともに汎用性のある倒立振子システムの安定化制御器を構築する^[90,95,97]。各 SIRM と動的重視度の設定に倒立振子システムの挙動の特徴を取り入れることによって、各 SIRM の後件部が入力項目に無関係にすべて同じ形に設定でき、振子の両動的重視度の変動量変数のファジィルールテーブルがちょうど台車の両動的重視度の変動量変数のファジィルールテーブルと補数関係になるように設定できることを述べる。その結果、仮想目標角度を求めることなく、ごく自然な形で倒立振子の角度制御と台車の位置制御が並列にスムーズに行えることを明らかにする。それから、本ファジィ制御器の制御パラメータが各動的重視度の基本値と変動幅になるが、これらの制御パラメータの設定指針を示す。

また、試行錯誤で選んだ一組の制御パラメータを利用した本ファジィ制御器で、0.001s から 0.020s までの間のサンプリング周期に対して、振子の長さが 0.200m から 2.200m まで、振子の質量が 0.001kg から、台車の質量が 0.002kg から、かつ振子の質量と台車の質量の比が 0.005 から 0.500 までのすべての倒立振子システムについて、 -30.000° から $+30.000^{\circ}$ までの任意角度から、また -2.250m から $+2.250\text{m}$ までの任意位置から、約 8.0 秒間で完全に安定化させることができることを示す。

さらに、ランダム最適探索法^[4,83]で振子が短い場合の制御パラメータと振子が長い場合の制御パラメータをそれぞれ求める。この二組の制御パラメータを合わせて利用すれば、0.001s から 0.020s までの間のサンプリング周期で、振子の長さが 0.200m から 2.200m まで、振子の質量が 0.001kg から、台車の質量が 0.002kg から、かつ振子の質量と台車の質量の比が 0.005 から 0.500 までのあらゆる倒立振子システムについて、 -30.000° から $+30.000^{\circ}$ までの任意角度から、また -2.100m から $+2.100\text{m}$ までの任意位置から、約 6.0 秒間で完全に安定化させることができることを示す。

6.2 倒立振り子システム

ここで用いる倒立振り子システムは図 6-1 に示すように、直線レール、レール上を左右に動く台車、その台車の上の支点を通じてレールと同じ平面を 360°回転できる振り子、そして台車を左右に動かす駆動系から構成される。

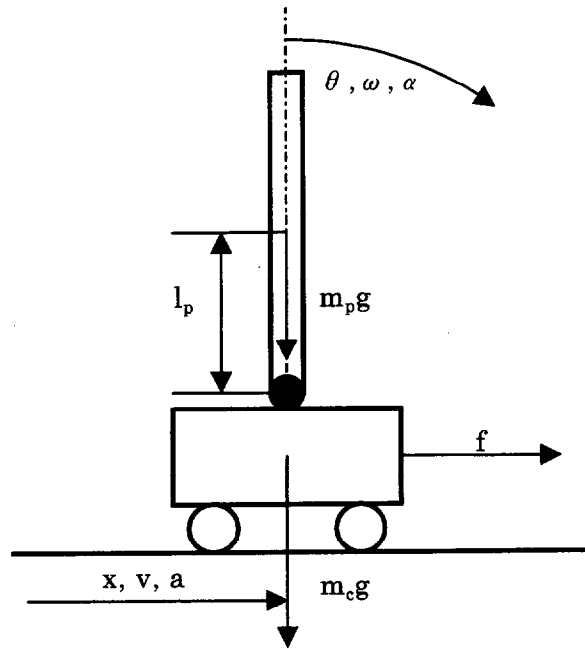


図 6-1 倒立振り子システムの構成図

ここで、振り子の質量が均一分布し、振り子と支点の間の摩擦および台車とレールの間の摩擦がすべて無視できると仮定すると、倒立振り子システムの運動方程式^[5,22,34,45,63,75,82]は、

$$\alpha = \frac{(m_c + m_p)g \sin \theta - \{f + m_p l_p \omega^2 \sin \theta\} \cos \theta}{\{4/3(m_c + m_p) - m_p (\cos \theta)^2\} l_p} \quad (6-1)$$

$$a = \frac{4/3\{f + m_p l_p \omega^2 \sin \theta\} - m_p g \sin \theta \cos \theta}{\{4/3(m_c + m_p) - m_p (\cos \theta)^2\}} \quad (6-2)$$

で与えられる。

ただし、 m_c と m_p はそれぞれ台車と振り子の質量（単位 kg）を表し、 $g=9.8\text{m/s}^2$ は重力加速度である。 l_p は振り子の重心から支点までの長さ（単位 m）で、質量が均一分布すると仮

定するので振子の半分の長さを意味する。また、変数 θ 、 ω 、 α はそれぞれ振子の鉛直方向に対する角度、角速度、および角加速度を表し、矢印の方向を正とする。変数 x 、 v 、 a はそれぞれレールの原点に対する台車の位置、速度、および加速度を意味し、矢印の方向を正とする。変数 f は台車に加わる駆動力（単位 N）であり、右方向を正とする。なお、変数 θ 、 ω 、 x 、 v が倒立振り子システムを記述する四つの状態変数になる。

実機実験の場合、状態変数 θ 、 ω 、 x 、 v が検出可能であれば、状態方程式を求める必要がなく、倒立振り子システムをブラックボックスと見なすことができる。しかし、シミュレーションを行う場合には、各状態変数の値を得るため上記の運動方程式で振子の角加速度と台車の加速度を計算しなければならない。ここでは微小なサンプリング周期 T に対し、オイラー法を利用してサンプリング時刻 $(k+1)T$ における倒立振り子システムの各状態変数の値を、

$$\begin{cases} \theta(k+1) = \theta(k) + T \cdot \omega(k) \\ \omega(k+1) = \omega(k) + T \cdot \alpha(k) \\ x(k+1) = x(k) + T \cdot v(k) \\ v(k+1) = v(k) + T \cdot a(k) \end{cases} \quad (6-3)$$

のように求める。

なお、倒立振り子システムの運動方程式（式(6-1)と式(6-2)）において、駆動力と総質量の比、および振子の質量と総質量の比をそれぞれ、

$$D_F = f / (m_c + m_p) \quad (6-4)$$

$$R_M = m_p / (m_c + m_p) \quad (6-5)$$

のように定義しておけば、質量に対する無次元化運動方程式^[43,44]

$$\alpha = \frac{g \sin \theta - \{D_F + R_M l_p \omega^2 \sin \theta\} \cos \theta}{\{4/3 - R_M (\cos \theta)^2\} l_p} \quad (6-6)$$

$$a = \frac{4/3 \{D_F + R_M l_p \omega^2 \sin \theta\} - R_M g \sin \theta \cos \theta}{\{4/3 - R_M (\cos \theta)^2\}} \quad (6-7)$$

が得られる。

6.3 安定化ファジィ制御器^[90,96,97]

6.1 ですでに述べたように、ここでいう倒立振り子システムの安定化制御とは、初期状態によらずに振り子を短時間で安定に倒立させ、しかも台車を速やかにレールの原点に戻すことである。したがって、振り子が倒立する時の角度を 0.0° として、台車がレールの原点にある時の位置を 0.0m とするので、この制御問題は各状態変数の目標値がすべてゼロである一種のレギュレータとも考えられる。なお、台車をレールの原点ではなく任意の指定位置に制御をしたいときには、後のシミュレーションに示すように台車の実際位置からその指定位置を引いたものを新しい台車の位置として用いればよい。

以下では、サンプリング時刻 kT において倒立振り子システムの四つの状態変数（振り子の角度 θ と角速度 ω 、台車の位置 x と速度 v ）がそれぞれのスケールリングファクタで正規化されたものを入力項目 $x_i(k)$ ($i=1,2,3,4$) として、操作量すなわち駆動力 f が操作量のスケールリングファクタで正規化されたものを出力項目 $f(k)$ とする。そして、SIRMs 動的重視度結合型ファジィ推論モデル^[93,108,111,114]に基づいて、倒立振り子システムの安定化ファジィ制御器を構築する。

SIRMs 動的重視度結合型ファジィ推論モデルでは、各入力項目に対しそれぞれ対応する入力項目のみを前件部変数とする単一入力ルール群すなわち SIRM を、その入力項目と制御対象の挙動の関係により設定する。各入力項目に対してさらにそれぞれ、入力項目の定常状態時の機能を保証する基本値と制御状況に応じてダイナミックに変化する変動値からなる動的重視度を定義する。そして、各 SIRM の推論値を動的重視度で結合することにより、全体として制御対象の全空間を効率よく制御する一体化したファジィ制御器が実現される。

まず、各入力項目に対してそれぞれの SIRM を構築する。日常的経験より、振り子の角度または角速度が正值の場合、駆動力を正にして台車をレールの右方向に移動させれば、振り子が負の方向すなわち逆時計回りに回転し、角度または角速度が減少する方向に変化することがわかる。同様に角度あるいは角速度が負値の場合は、駆動力を負にして台車を左方向に動かせば、振り子が正の方向すなわち時計回りに回転し、角度あるいは角速度が増加する方向に変化することになる。

一方、台車の位置または速度の SIRM を作る時に、振り子の制御を考慮しなければならない。倒立振り子システムを安定化する場合、台車の位置制御を優先的に行うと、振り子の角度制御ができなくなる。そのため、振り子を倒立させた後に台車の位置制御を行うように、振り子の角度制御と台車の位置制御に順序を付ける必要がある。つまり、振り子の角度制御を優先して、振り子がほぼ倒立になってから台車の位置制御を行わなければならない。このとき、台車の位置または速度が正值の場合、正の駆動力を台車に加えて台車をさらに右方向に移動させることによって、振り子をあえて負の方向すなわち逆時計回りに少し倒す。位置

または速度が負値の場合は、逆に負の駆動力を台車に施して台車をさらに左方向に移動させることによって、振子をあえて正の方向すなわち時計回りに少し傾ける。そして、振子が倒立位置から少し倒れているため、今度は振子を倒立させることによって台車の位置制御も間接的に果たされる。

表 6-1 各入力項目の単一入力ルール群 SIRM-i ($i=1,2,3,4$)

前件部変数 $x_i(k)$	後件部変数 $f_i(k)$
NB	-1.0
ZO	0.0
PB	1.0

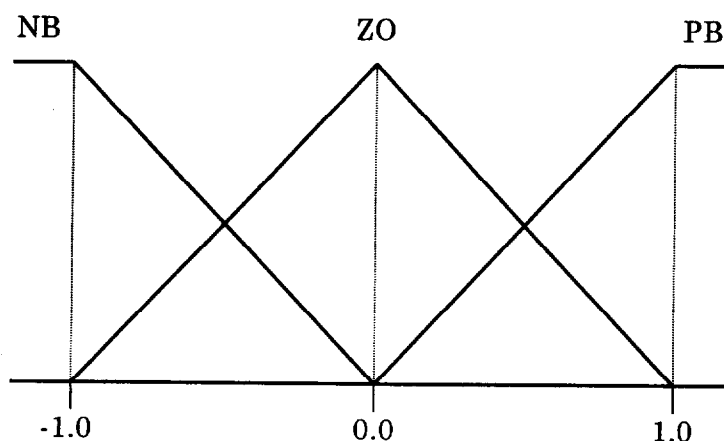


図 6-2 各入力項目のメンバーシップ関数

したがって、各入力項目に対応する SIRM を表 6-1 のように設定することができる。ただし、ラベル NB、ZO、PB は各前件部変数のメンバーシップ関数を意味し、図 6-2 のように三角形ないし台形で定義している。ラベル NB と PB には飽和領域を設けている。これは、安定化制御においては状態変数の絶対値がスケーリングファクタ以上になったときにその部分を吸収させ、振り上げ制御においては垂下領域にある振子を初期励振そして加振させるためである。図 6-2 の横軸は各 SIRM の前件部変数 $x_i(k)$ ($i=1,2,3,4$) の台集合に対応し、縦軸はファジィグレードに対応し、最大値が 1.0 である。各 SIRM の後件部変数 $f_i(k)$ ($i=1,2,3,4$) は、すべて本ファジィ制御器の出力項目に対応する中間変数である。

また、簡略化推論法^[20,37,50]を用いるため、後件部には実数値をセットしている。

しかし、表 6-1 のように各入力項目の SIRM がすべて同じ設定になっているので、SIRM だけでは振子の角度制御と台車の位置制御に優先順位を付けることはできない。そのため、各入力項目にそれぞれ動的重視度を与えて、動的重視度の大きさによって制御の優先順位を決めることが必要である。

次に、各入力項目の動的重視度を求めることにする。すでに 3 章で述べたように重視度は、各入力項目が制御対象の挙動に果たす影響力がそれぞれ異なることから導入され、大きいほど制御対象の挙動へ強く影響する。サンプリング時刻 kT における各入力項目の動的重視度 $w_i^D(k)$ ($i=1,2,3,4$) は、

$$w_i^D(k) = w_i + B_i \cdot \Delta w_i^0(k) \quad (6-8)$$

で定義される。

基本値 w_i は対応する入力項目の定常状態時における必要な働きを保証し、変動幅 B_i と変動量変数 $\Delta w_i(k)$ の推論値 $\Delta w_i^0(k)$ からなる変動値 $B_i \cdot \Delta w_i^0(k)$ は、その入力項目の影響の度合いを制御状況に応じて調整する役割を持つ。 $w_i^D(k)$ の上付記号「D」は基本値と区別するため動的の意味で使われ、 $\Delta w_i^0(k)$ または $f_i^0(k)$ の上付記号「0」は後件部変数と区別してファジィ推論結果を表す。基本値と変動幅は非負の制御パラメータであり、後に示す試行錯誤またはランダム探索法で求められる。変動量変数は制御状況の変化を動的重視度に反映する重要な項目であり、制御対象の特性に合わせて求める必要があるが、倒立振りシステムの場合以下に示すファジィルールで記述される。

振子の角度の変動量変数または角速度の変動量変数について、振子の角度の絶対値が大きい場合、振子を速やかに鉛直方向に回転させなければ振子が倒れてしまうので、重視度を大きくして角度と角速度の影響力を強化しなければならない。しかし、振子の角度の絶対値がゼロに近いすなわち振子がほぼ倒立している場合には、倒立状態の安定化を図るため、重視度を小さくして角度と角速度の影響力を弱める必要がある。したがって、重視度の値に変化をもたらすのが変動量変数であることから、角度と角速度の変動量変数に関するファジィルールを、表 6-2 のように正規化後の角度の絶対値を前件部変数として構築することができる。ただし、ラベル DS、DM、DB は図 6-3 のように三角形ないし台形として定義されるメンバーシップ関数を意味する。図 6-3 の横軸は振子の角度のスケールリングファクタで正規化された角度の絶対値の台集合に対応し、縦軸はファジィグレードに対応し、最大値が 1.0 である。

表 6-2 振子の両変動量変数に関するファジィルール

前件部変数 $ x_1(k) $	後件部変数 $\Delta w_i(k) (i=1,2)$
DS	0.0
DM	0.5
DB	1.0

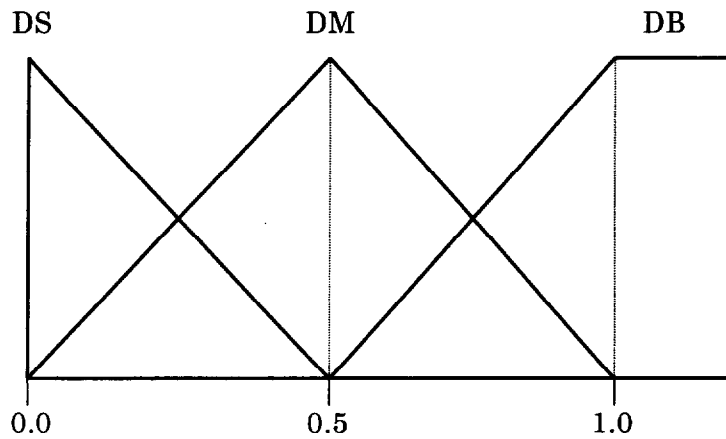


図 6-3 角度の絶対値のメンバーシップ関数

一方、倒立振子システムの安定化を図るには、台車の位置制御に比べて振子の倒立制御を優先して行わなければならない。すなわち、振子が倒立していないとき、まず振子の倒立制御を行い振子をほぼ倒立状態に持っていく。そして振子の倒立状態を安定させながら台車の位置制御を行い、台車をレールの原点に移動させていくようにする必要がある。これは、倒立振子システムの安定化制御において振子の角度制御が一番重要であり、振子の角度と角速度に大きめの重視度を与え、台車の位置と速度の重視度の変動量変数について振子の角度を参考にして決めることを意味している。振子が倒立状態から大きく倒れたとき、振子の角度制御を直ちに行わなければいけないので、台車の位置と速度の重視度を小さくして振子の角度制御に重点を置く。振子がほぼ倒立であるとき、その倒立状態を維持するだけでよいので、台車の位置と速度の重視度を少し大きくして振子の安定化を図るとともに台車の位置制御を行う。そこで、台車の位置と速度の重視度の変動量変数について、表 6-3 のように振子の角度の絶対値を前件部変数とするファジィルールテーブルを作成できる。なお、メンバーシップ関数 DS、DM、DB は同じく図 6-3 に定義されている。

表 6-3 台車の両変動量変数に関するファジールール

前件部変数 $ x_i(k) $	後件部変数 $\Delta w_i(k)$ ($i=3,4$)
DS	1.0
DM	0.5
DB	0.0

最後に、サンプリング時刻 kT において、各動的重視度の値が式(6-8)で求められ、しかも各 SIRM の推論値 $f_i^0(k)$ ($i=1,2,3,4$) がすでに得られたとすれば、本ファジィ制御器の最終出力 $f(k)$ は SIRMs 動的重視度結合型ファジィ推論モデルに従って、

$$f(k) = \sum_{i=1}^4 f_i^0(k) \cdot w_i^D(k) \quad (6-9)$$

で各 SIRM の推論値の動的重視度付き総和として計算される。この出力値に操作量のスケールリングファクタを乗じたものは、実際に台車に施す駆動力になる。

表 6-1 に示しているように、各 SIRM の後件部の実数値はまったく同じ設定になっている。また、式(6-9)より、各 SIRM の推論値の重視度付き総和が本ファジィ制御器の出力になる。したがって、本ファジィ制御器の構成では、各重視度の値が異なるものの、各 SIRM が完全に並行に推論して駆動力を作り出すことになる。その結果、台車が移動して振子の角度変化を引き起こすので、台車の状態は実質上振子の角度に変換されることがわかる。これは、仮想目標角度の発想^[23,25,28,31,43,44,88]に近いが、仮想目標角度を求めることなく振子の角度制御と台車の位置制御を並列してすべて直接駆動力を推論することに特徴がある。

また、台車に関する表 6-3 の後件部の実数値の設定順序がちょうど振子に関する表 6-2 の後件部の実数値の順序と反対になっている。前件部変数がまったく同じであることから、各サンプリング時刻においてこの二つの表の推論結果の和はちょうど 1.0 になることがわかる。つまり、振子の角度と角速度の変動量変数が大きな値を取るとき、台車の位置と速度の変動量変数は小さな値しか出せない。逆に振子の角度と角速度の変動量変数が小さな値になるとき、台車の位置と速度の変動量変数が大きな値になる。これによって、振子の角度が大きいときに振子の角度制御を優先して、振子がほぼ倒立しているときには倒立状態を安定させながら台車の位置制御を行うことが可能になる。そしてその振子の角度制御と台車の位置制御の切り替えは、各サンプリング時刻において振子の角度の大きさに基づいて制御状況を判断して各動的重視度を自動的に調整することによって、一つの計算式の中でスムーズに行われる。

振子と台車の制御規則をただ単に並列に構成しても制御は不可能であると言われているが^[23,25]、このように SIRM と動的重視度を用いることによって振子の制御規則と台車の制御規則を完全に並列に推論することが可能になる。

以上により、ファジィ制御器の入力項目と出力項目の正規化処理の表示を省略して、倒立振子システムの安定化制御器のブロック図を図 6-4 に示すことができる。倒立振子システムから四つの状態変数を出力するので、それを太線で表示している。その太線から各 SIRM ブロックに細線でそれぞれ一つの状態変数が引き渡される。また、動的重視度を求める各 DID ブロックがすべて振子の角度（絶対値）を入力としていることがわかる。図 6-4 に示すように、本ファジィ制御器は構造が単純であり、各ブロックの処理も非常にシンプルになっていることが理解できる。

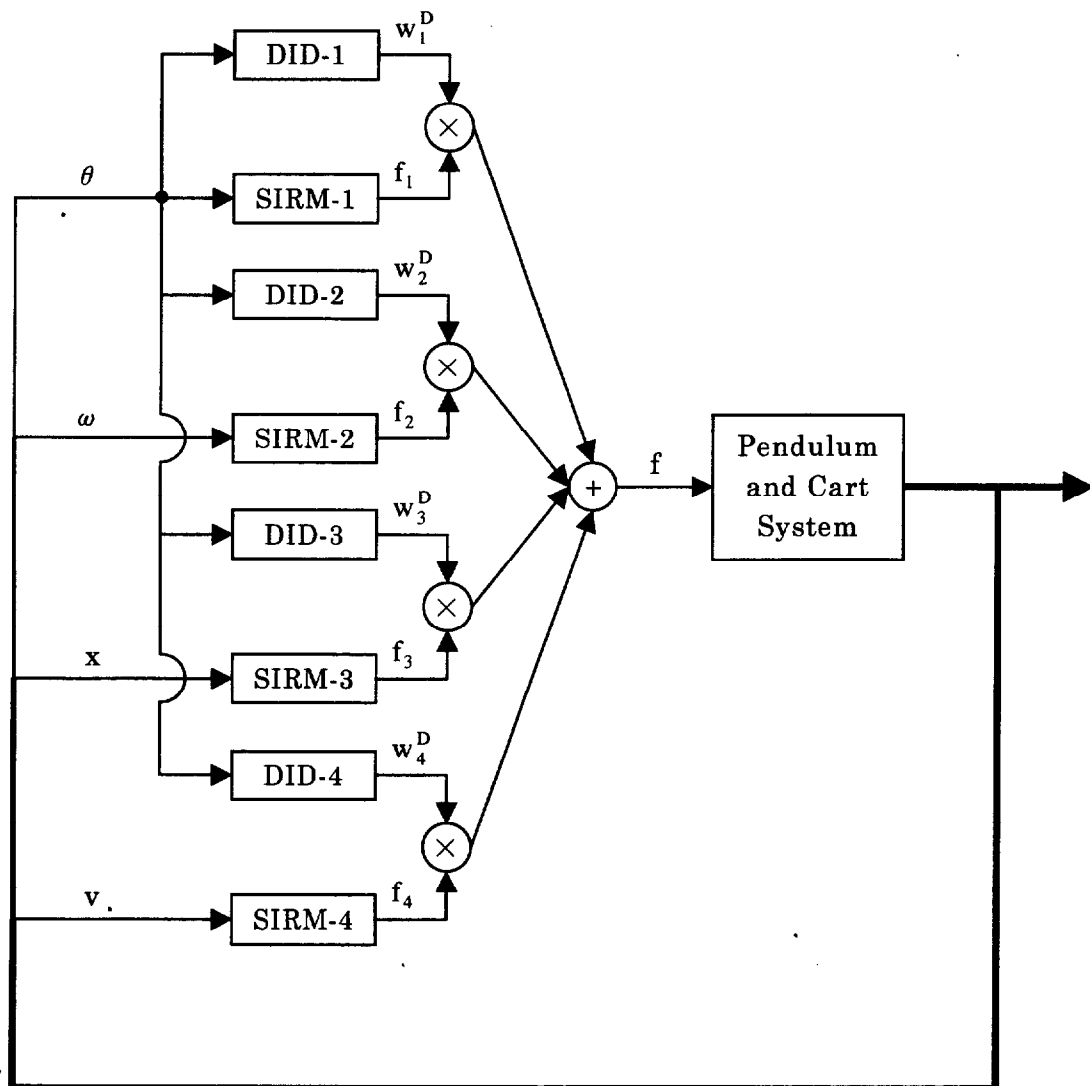


図 6-4 倒立振子システムの安定化制御器のブロック図

6.4 スケーリングファクタ設定

ここでは、振子の角度範囲を -30.000° から $+30.000^\circ$ までとして、台車の移動範囲を -2.400m から $+2.400\text{m}$ まで^[5,75]とする。振子または台車が上記範囲を超えた場合、制御は失敗したと見なす。振子の角速度と台車の移動速度の最大値はわからないが、ここではファジィ制御器への四つの入力項目のスケーリングファクタを、それぞれ $30.000^\circ/\text{s}$ 、 $100.000^\circ/\text{s}$ 、 2.400m 、 1.000m/s に設定する。なお、実験スペースの制限によって台車の移動範囲が $[-2.400\text{m}, +2.400\text{m}]$ より狭い場合もあり得るが、上記のスケーリングファクタを変えずに単に台車の移動範囲を実際の許容範囲にすればよい。

また、本ファジィ制御器の出力（式(6-9)）に出力項目のスケーリングファクタを掛けたものが倒立振子システムへの実際の操作量になるが、この出力項目のスケーリングファクタは当然ながら振子と台車の質量に影響される。振子と台車の総質量が軽ければ小さな駆動力だけでも安定化が可能であるが、振子と台車の総質量が重ければ駆動力を大きく出力しなければ安定化は失敗してしまう。倒立振子システムの無次元化運動方程式(6-6)と(6-7)の操作量に関する部分すなわち駆動力と総質量の比 D_F を総質量によらずに一定するには、振子と台車の総質量に比例してこのスケーリングファクタを設定しなければならない。実際に振子の質量と台車の質量をいろいろと変えてシミュレーションを繰り返した結果、このスケーリングファクタを振子と台車の総質量の10.0倍にすればよいことがわかっている。そこで、振子の質量 m_c と台車の質量 m_p に対して、出力項目のスケーリングファクタを $10.0(m_c + m_p)$ とする。ただし、単位はニュートンNである。なお、これが偶然にも重力加速度にはほぼ一致していることも付記しておく。

これらの入力項目のスケーリングファクタは、以下の安定化制御および振り上げ制御においてすべて固定するとする。また、出力項目のスケーリングファクタは、以下の安定化制御および振り上げ制御においてともに振子と台車の総質量の10.0倍に設定する。

6.5 安定化制御シミュレーション(1) [90,95,97]

ここではまず参照用倒立振子システムに対して試行錯誤で本ファジィ制御器の制御パラメータを設定した後、参照用倒立振子システムの安定化制御シミュレーションを行う。そして、同じ制御パラメータを用いて、参照用倒立振子システムのパラメータと異なるほかの倒立振子システムに対しても安定化制御シミュレーションを行い、本ファジィ制御器の汎用性を示す。

6.5.1 試行錯誤による制御パラメータの設定

6.4 で各スケーリングファクタの設定について述べたが、ここでは制御パラメータの設定について述べる。6.3 で言及したように、本ファジィ制御器の制御パラメータは各入力項目の動的重視度を定める基本値と変動幅である。安定化制御シミュレーションを行う前に、これらの制御パラメータを設定しておかなければならない。

各動的重視度の基本値と変動幅を設定するのに、まず倒立振子システムのパラメータを決めなければならない。関連文献の中から最もよく利用されている倒立振子システム [22,41,63,75,82,84] のパラメータが、振子の質量 $m_p=0.100\text{kg}$ 、振子の半分の長さ $l_p=0.500\text{m}$ 、台車の質量 $m_c=1.000\text{kg}$ であることがわかる。そこで、その倒立振子システムを参照用倒立振子システムとして選ぶ。この場合、振子と台車の総質量が 1.100kg であるので、6.4 の設定より出力項目のスケーリングファクタが 11.0N になる。また、同様にサンプリング周期についても関連文献を参考して、 $T=0.010\text{s}$ とする [21,41,45,61,63,66,82,84]。

すでに 6.3 で述べたように、倒立振子システムの安定化を行うに当たって振子の角度制御を台車の位置制御より優先的に行わなければならない。したがって、動的重視度の基本値と変動幅を設定するときに、まず振子に関する両重視度を台車に関する両重視度より大きく設定しなければならない。また、振子の角度と角速度がともに振子の角度制御に関わる入力項目であるので、振子の角度制御をバランスよく行うには（スケーリングファクタの影響もあるが）振子の角度と角速度の重視度をほぼ同程度にすることが必要である。同様に、台車の位置と速度の重視度もほぼ同じ値にすることが必要である。さらに、各動的重視度の基本値を対応する変動幅と同程度にすることも、あらゆる制御状態に対して滑らかに安定化制御を行う立場から望まれる。

この設定指針を基にして、参照用倒立振子システムに対して試行錯誤で決めた各基本値と変動幅を、表 6-4 に示す。この表から、振子の両動的重視度のパラメータが台車の両動的重視度のパラメータより約 10 倍ほど大きく、各動的重視度の基本値が対応する変動幅とだいたい同レベルになっていることがわかる。

表 6-4 試行錯誤で設定した各動的重視度の基本値と変動幅

入力項目	基本値	変動幅
振子の角度	2.00	2.50
振子の角速度	1.50	1.00
台車の位置	0.15	0.20
台車の速度	0.15	0.20

6.5.2 参照用倒立振子システムの安定化制御シミュレーション

参照用倒立振子システムについて、振子の初期角度が 15.000° 、台車の初期位置が 1.500m 、ほかの状態変数の初期値がすべてゼロである状態から、本ファジィ制御器で表 6-4 の制御パラメータを用いて行った安定化制御結果を図 6-5 に示す。

図 6-5(a)は振子の角度と台車の位置の時間応答図であり、左軸と右軸がそれぞれ振子の角度と台車の位置を表す。図 6-5(b)はそのときの操作量の時間応答図である。記号 $\text{Plant}(0.100, 0.500, 1.000, 0.010)$ の括弧中の各値は順に振子の質量、振子の半分の長さ、台車の質量、サンプリング周期を意味する。また、記号 $\text{State}(15.00, 0.00, 1.50, 0.00)$ の括弧中の各値はそれぞれ振子の角度、角速度、台車の位置、速度の初期値を表す。

図 6-5 からわかるように、振子の初期角度と台車の初期位置がともに正であるので、本ファジィ制御器は、まず正で大きな操作量を出して台車をさらに右すなわち正方向に移動させることによって振子の角度が負値になるように、振子を反対方向にレールの原点側に向けて少し倒す。そして、小さな駆動力で振子を倒立させると同時に、台車をレールの原点に戻していく。その結果、制御開始から約 7.7 秒間で参照用倒立振子システムが完全に安定化される。この場合、最大操作量が約 20.0N となっている。なお、ここでいう完全安定化とは、倒立振子システムの四つの状態変数の値が同時にそれぞれ 0.100° 、 $0.100^\circ/\text{s}$ 、 0.010m 、 0.010m/s 以内に収まっている状態を指す。

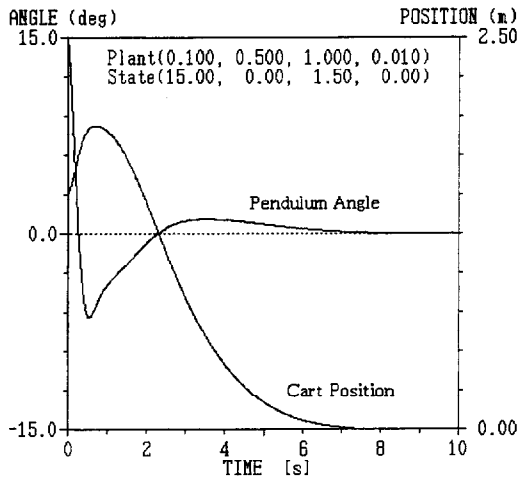
図 6-6 は振子の初期角度が 30.000° の場合の制御結果を示している。この場合、制御開始から最大約 50.0N の操作量が台車をレールの原点から右方向に約 1.250m まで移動させることによって、振子の角度が正の 30.000° から負の約 5.000° に変化する。そして、約 8.2 秒間で振子がスムーズに倒立され、台車がレールの原点に復帰されている。

図 6-7 は台車の初期位置が 2.250m の場合の制御結果を示している。この場合、振子の初期角度と初期角速度がともに零であるので、制御開始時の操作量が台車の位置に左右さ

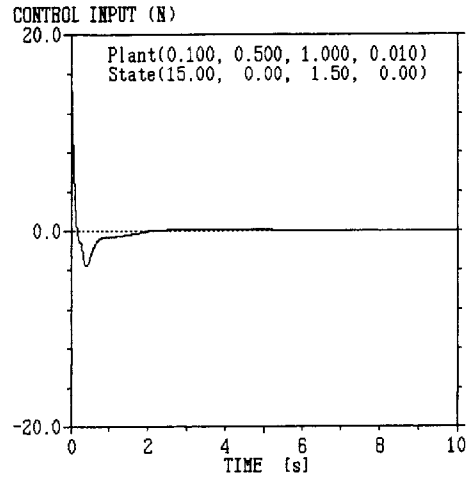
れる。そのため、最大わずか 4.0N 未満の操作量は台車をさらに少し右方向に動かして振子を倒立状態から負方向に 5.000° 近く倒す。そして、振子が再び倒立状態に戻されるとともに、台車がレールの原点に向かっていく。結局、倒立振子システムが約 7.3 秒間で完全に安定化されていることがわかる。

以上のシミュレーション結果からわかるように、本ファジィ制御器を用いることによって参照用倒立振子システムを初期状態によらずに約 8.0 秒間で完全に安定化することができる。また、振子の角度が大きいほど、振子をすばやく倒立させるため、台車を遠くへ移動させるのに大きめの操作量が必要であり、倒立振子システムが完全安定化になるまで時間が相対的に少しかかる。さらに、ここで注目したいのは、振子の初期角度の影響部分（すなわち振子の角度が初期値から初めての零度までの間の応答部分）を除けば、振子が 1 回振れるだけで倒立振子システムが完全に安定化できることである。

これに比べて、連続値操作量を用いた強化学習法^[22]では、初期角度 10.000° に対して振子が倒立されるまで 12.0 秒以上かかって、しかも台車の位置制御に定常誤差が残っている。仮想目標角度を用いた手法^[25]では、振子の角度が漸近安定になるが、わずかな外乱に対して 8.0 秒ほど経過しても振子がまだ大きく振動し、台車の位置制御に定常誤差が残っている。ニューラルネットによるファジィルール抽出手法^[34]では、396 個ものファジィルールを用いて、初期角度 20.000° に対して倒立振子システムが安定化されるまで 8.0 秒以上必要である。可変構造システムに基づいた現代制御手法^[61]では、倒立振子システムが完全安定化になるまで 8.0 秒以上かかっている。非線形最適化手法でファジィ規則を獲得する手法^[64]では、初期角度 15.000° に対して 200.0 秒以上かかってようやく倒立振子システムが安定化できる。離散値操作量を用いた強化学習法^[75]では、振子が一応倒立されるが、完全倒立ではなく倒立点の近傍でたえず振動している。

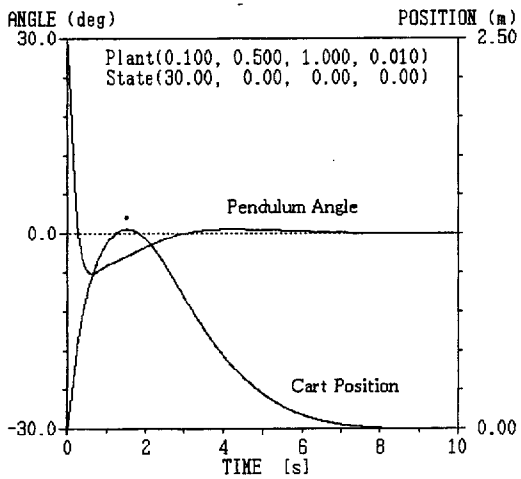


(a) 振子角度と台車位置の時間応答

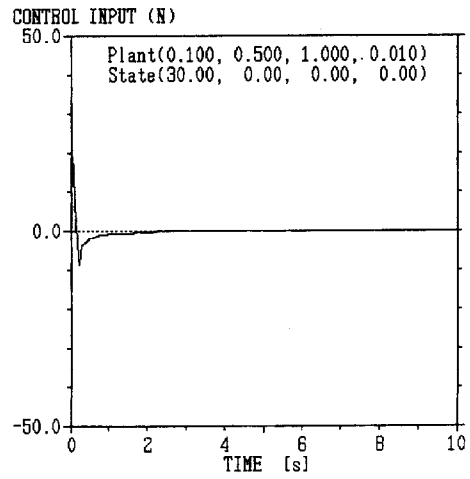


(b) 操作量の時間応答

図 6-5 参照用倒立振り子システムの安定化制御結果(1)

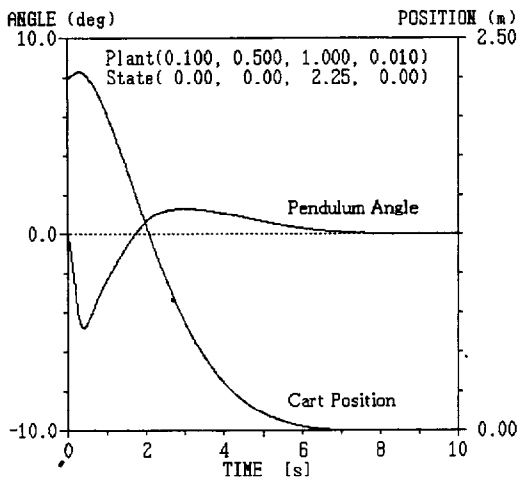


(a) 振子角度と台車位置の時間応答

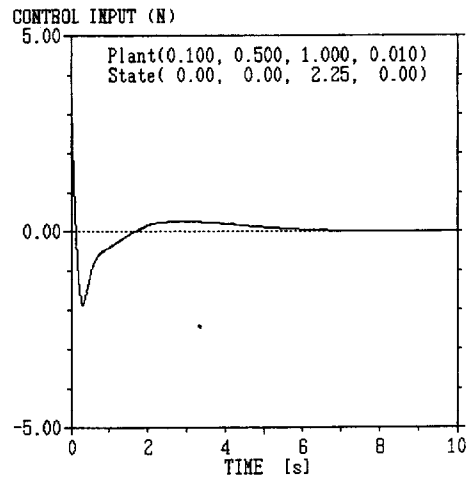


(b) 操作量の時間応答

図 6-6 参照用倒立振り子システムの安定化制御結果(2)



(a) 振子角度と台車位置の時間応答



(b) 操作量の時間応答

図 6-7 参照用倒立振り子システムの安定化制御結果(3)

6.5.3 参照用倒立振子システムの制御パラメータの汎用性について

表 6-4 の制御パラメータは参照用倒立振子システムに対して求めたのであるが、ここで参照用倒立振子システム以外の倒立振子システムに対してその制御パラメータを用いた本ファジィ制御器の汎用性を検証することにする。ただし、ここでいう汎用性とは、振子の質量や長さや台車の質量などが参照用倒立振子システムの場合と異なる倒立振子システム、またはサンプリング周期が 0.010s 以外に設定された場合の倒立振子システムについても同様に安定化できるか否かを意味する。

倒立振子システムの安定化制御においては、振子の長さが短いほど、振動周波数が高く高応答が要求されるため、制御が難しいことが直感的にわかる。また、振子の長さがある程度以上に長くなると、振子の重心が高く重心の周りの慣性も大きいため、バランスは崩れやすい。この場合、振子のバランスをとるのに台車を大きく移動させることが必要であるので、安定化制御は難しくなる。さらに、サンプリング周期が長いほど、振子の角度制御に遅れが大きく生じるので振子の安定化が一層困難であることも推測できる。

そこで、表 6-4 の制御パラメータをそのまま利用して、参照用倒立振子システムとパラメータが異なるほかの倒立振子システムについて安定化制御シミュレーションを行う。図 6-8 は、振子の長さをともに 0.200m に固定し、振子と台車の質量の比を順に 0.500 から 0.050 へさらに 0.005 へ変えた場合の制御シミュレーション結果を示している。図 6-9 は図 6-8 に対応して、振子の長さをすべて 1.200m に変更した場合の制御結果を示している。図 6-10 は図 6-9 に対応し、振子の長さをさらに 2.200m に変更した場合の制御結果である。ただし、これらの安定化制御シミュレーションにおいて振子の初期角度をすべて 30.000° に設定し、サンプリング周期をすべて 0.020s ^[22,34,75] に設定している。また、操作量の時間応答の表示を省いている。なお、青山ら^[1]がサンプリング周期を 0.050s としている以外、ほかの文献においてはサンプリング周期がすべて 0.020s 以下になっている。

振子が短い場合の図 6-8 より、振子がすばやく反対側に少し倒されてから急峻に倒立され、倒立振子システムがそれぞれ約 3.8、5.2、4.8 秒で完全に安定化されている。図 6-9 では、振子がスムーズに反対側に振れてから滑らかに倒立に向かい、倒立振子システムがそれぞれ約 8.3、8.3、8.4 秒で完全に安定化されている。振子が長い場合の図 6-10 では、振子がスムーズに反対側に少し倒れてから揺れながら倒立されていって、倒立振子システムがそれぞれ約 8.9、9.0、9.1 秒で完全に安定化されている。これらのシミュレーション結果から分かるように、参照用倒立振子システムの制御例（図 6-5、図 6-6、図 6-7）に比べて、サンプリング周期を倍に変更したにもかかわらず、表 6-4 の制御パラメータに基づいた本ファジィ制御器でパラメータが大幅に異なる各倒立振子システムを、すべて約 8.0 秒間で完全に安定化させることができる。また、振子が長くてしかも振子と台車の質量の比が小さければ、完全安定化時間が多少長くなることもわかる。

図 6-9(a)と(b)のように振子の長さが一定の場合、振子の質量と台車の質量の比が 0.500 から 0.050 に変わるときに倒立振り子システムの挙動が少し異なってくる。しかし、図 6-9(b)と(c)のように、質量の比が 0.050 から 0.005 に変わるときには倒立振り子システムの挙動がほとんど同じになり、しかも、操作量の時間応答も似ている。出力項目のスケールリングファクタを総質量の 10.0 倍に固定しているので、倒立振り子システムの無次元化運動方程式（式(6-6)と式(6-7)）においてシステムの挙動に影響する項目は、振子の質量と総質量の比 R_M のみになる。そして、 R_M は大きいとき振子の角加速度と台車の加速度に影響を与えるが、小さくなるとその影響が段々薄くなる。したがって、シミュレーション結果がこれとよく一致していることが確認されている。

また、図 6-8(a)、図 6-9(a)、図 6-10(a)のように振子の質量と台車の質量の比を一定にした場合、振子の長さによって制御結果が大きく変わっていることがわかる。振子が短い場合振子の応答が速いため、振子は最初は急激に反対側に回転するが、その後短時間で滑らかに倒立状態になる。振子が長い場合振子の慣性が大きいため、振子は最初はスムーズに反対側に回転するが、その後操作量はその慣性に打ち勝つほど大きくないので数回小さく振れながら倒立していく。振子の長さがその中間の場合、制御結果は参照用倒立振り子システムの場合（図 6-6）によく似ており、倒立振り子システムは約 8.0 秒間で滑らかに安定化されている。そして、振子の角度の大きさが同じであっても、振子が長くなるにつれて振子の重心が支点に対して水平方向に大きく離れる。この場合、振子のバランスをとるのに台車を速く大幅に移動させなければならないので、レールの原点に対する台車の最大移動距離が図 6-8、図 6-9、図 6-10 のように次第に大きくなっていく。したがって、振子が短い場合は、台車を少し移動すればよいが、振子が反対側に倒れる危険性がある。振子が長い場合は、振子が相対的に滑らかに倒立されやすいが、台車がレールの端まで走って安定化制御が失敗する可能性が大きい。

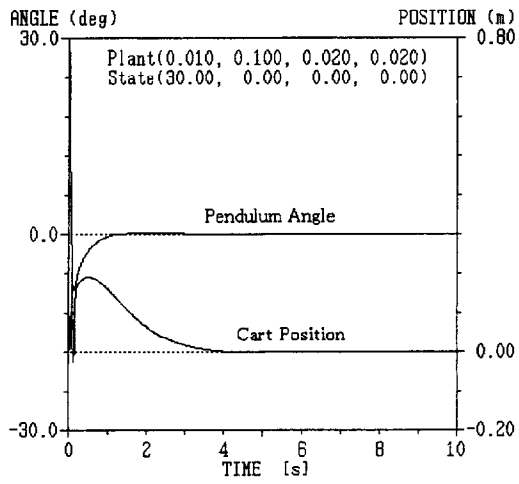
さらに、無次元化運動方程式（式(6-6)と式(6-7)）より、ほかの条件をすべて固定した場合、振子の質量と台車の質量が変わっても、駆動力と総質量の比 D_F および振子の質量と総質量の比 R_M さえ一定であれば、振子角度の時間応答および台車位置の時間応答はまったく同じになることがわかる。したがって、例えば図 6-9(b)に示している結果は、サンプリング周期 0.020s で振子の初期角度 30.000° に対して、振子の長さが 1.200m であり、振子の質量と台車の質量の比が 0.050 であるすべての倒立振り子システムに関する安定化制御結果を代表している。

図 6-11(a)は、振子の長さが 0.200m である図 6-8(a)の倒立振り子システムを 0.010s のサンプリング周期で安定化制御したシミュレーション結果を示す。図 6-8(a)に比べて、図 6-11(a)の場合安定化時間が約 6.4 秒となり、台車の最大移動量も大きくなるが、振子の角度制御はかなり滑らかになっていることがわかる。図 6-11(b)は、1.200m の振子である図 6-9(a)の倒立振り子システムを 0.010s のサンプリング周期で制御した結果である。この場

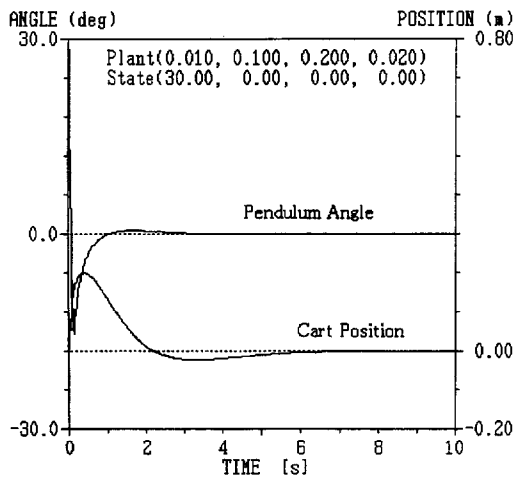
合、安定化時間が約 8.4 秒と若干長くなっている以外、制御結果は図 6-9(a)とほとんど同じになっている。図 6-11(c)は、2.200m の振りである図 6-10(a)の倒立振り子システムを同じく 0.010s のサンプリング周期で制御した結果を示している。この場合の結果は、図 6-10(a)とほとんど変わらない。つまり、サンプリング周期を短く設定すれば、各入力項目のスケーリングファクタが固定されているため、1 サンプリング周期あたりにおける各入力項目の本ファジィ制御器への入力値が相対的に小さくなり、台車を押す操作量も弱くなる。振子の長さが短い場合には、振子の高応答性によって振動が起こりやすいため、小さな操作量で振動の発生が防げ、スムーズな安定化結果が得られることがわかる。振子が長くなるにつれて、振子の回転慣性が大きくなるので、その慣性によってサンプリング周期の影響が緩和され、安定化制御結果があまり変わらないことになる。

このように、本ファジィ制御器で安定化できる倒立振り子システムの初期状態の範囲は倒立振り子システムのパラメータおよびサンプリング周期に依存する。ここでは、振子の角速度と台車の速度の初期値をともにゼロに固定するとして、振子の長さ l_p とサンプリング周期 T_s がそれぞれ 2.200m と 0.020s に設定された場合について安定化できる初期状態の範囲を考える。シミュレーションによって得られた経験的な結果として、振子の初期角度が 20.000° のときに台車の初期位置が 1.200m までであれば安定化でき、振子の初期角度が 10.000° のときに台車の初期位置が 1.700m までであれば安定化できる。また、台車の初期位置がレールの原点にあり振子の初期角度が -30.000° と $+30.000^\circ$ の間であれば、あるいは振子の初期角度がゼロであり台車の初期位置が $-2.250m$ と $+2.250m$ の間であれば、倒立振り子システムの安定化が可能である。

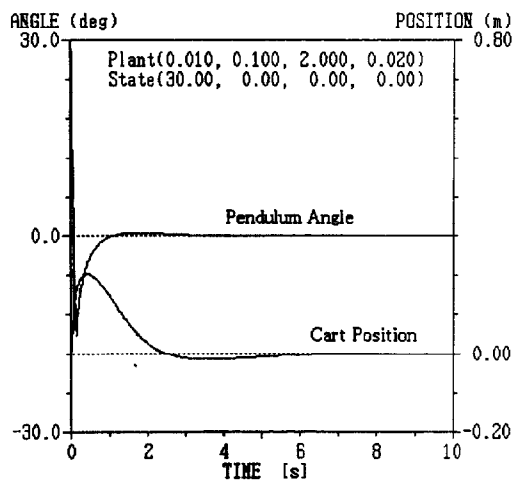
この初期状態の安定化範囲に対して実際に表 6-4 の制御パラメータを用いた本ファジィ制御器で検証したところ、サンプリング周期を 0.001s から 0.020s までの間に設定すれば、振子の半分の長さが $0.100m \leq l_p \leq 1.100m$ 、振子の質量が $m_p \geq 0.001kg$ 、台車の質量が $m_c \geq 0.002kg$ 、かつ $0.005 \leq m_p/m_c \leq 0.500$ であるあらゆる倒立振り子システムを、約 8.0 秒間で完全に安定化することができることがわかる。これは、振子の長さ l_p と質量 m_p 、台車の質量 m_c 、およびサンプリング周期 T_s がすべて明記されている過去の諸報告の中、青山ら^[1]のケースを除いてほかの倒立振り子システム^[21,22,34,41,45,61,63,75,82,84]のパラメータをすべて含むこととなり、本ファジィ制御器の汎用性が非常に高いことを示している。なお、ここで質量の上限値を入れていないのは、それが操作量に関係し、操作量に制限がなければ振り子と台車の質量がいくら重くなっても理論上は対応できることを意味する。シミュレーションにおいては、振子の質量が 5.000kg まで、台車の質量が 10.000kg までである倒立振り子システムの動作が確認できている。



(a) 振り子と台車の質量比が 0.500 である場合

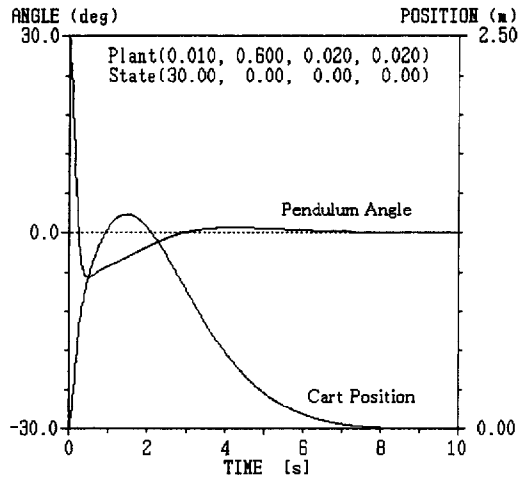


(b) 振り子と台車の質量比が 0.050 である場合

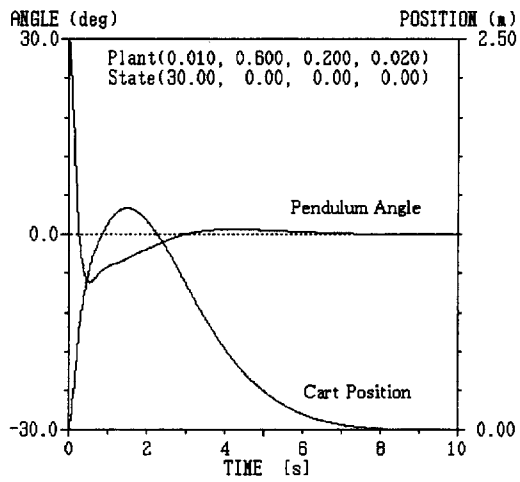


(c) 振り子と台車の質量比が 0.005 である場合

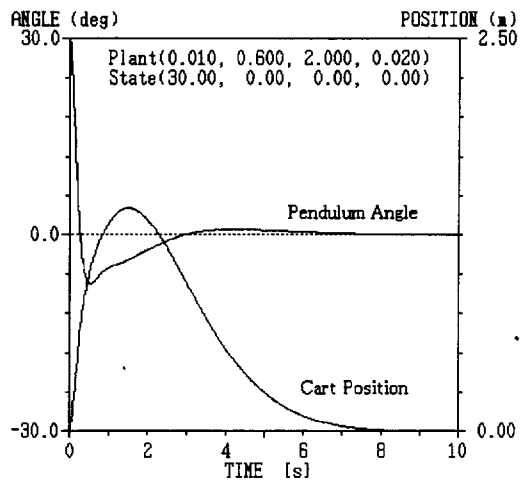
図 6-8 振り子の長さが 0.200m である倒立振り子システムの安定化制御結果



(a) 振り子と台車の質量比が 0.500 である場合

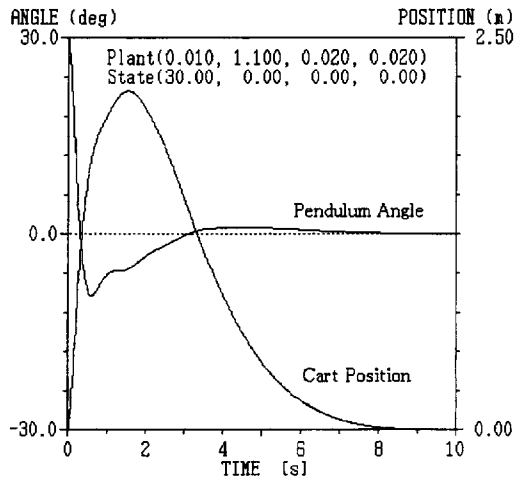


(b) 振り子と台車の質量比が 0.050 である場合

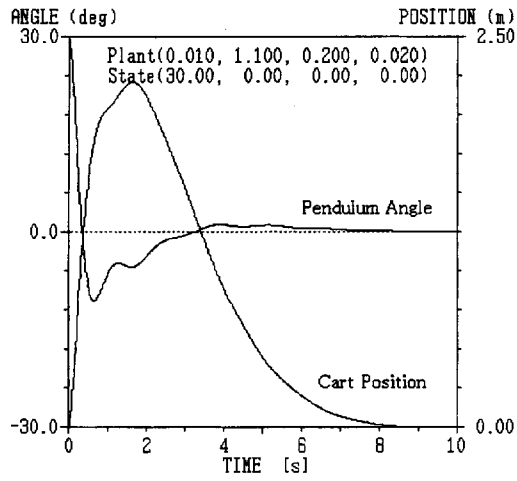


(c) 振り子と台車の質量比が 0.005 である場合

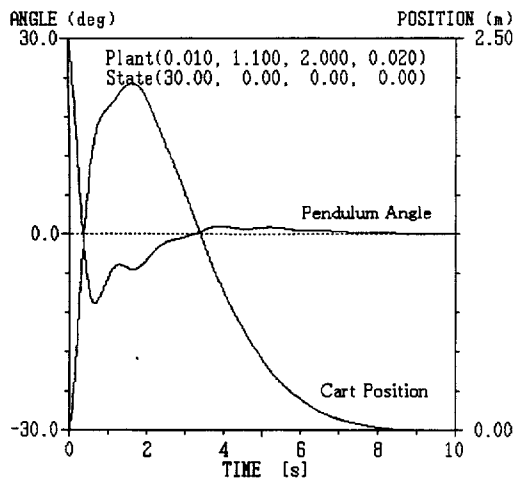
図 6-9 振り子の長さが 1.200m である倒立振り子システムの安定化制御結果



(a) 振り子と台車の質量比が 0.500 である場合

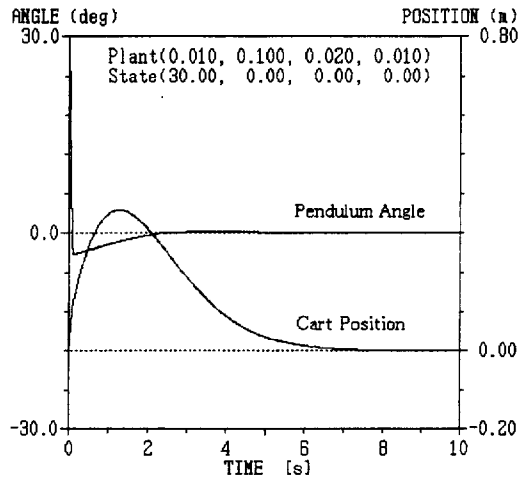


(b) 振り子と台車の質量比が 0.050 である場合

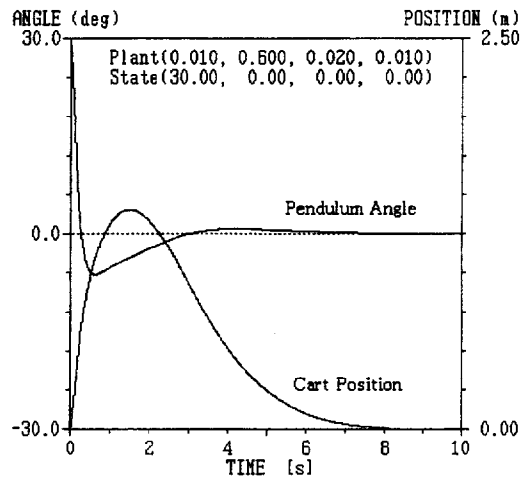


(c) 振り子と台車の質量比が 0.005 である場合

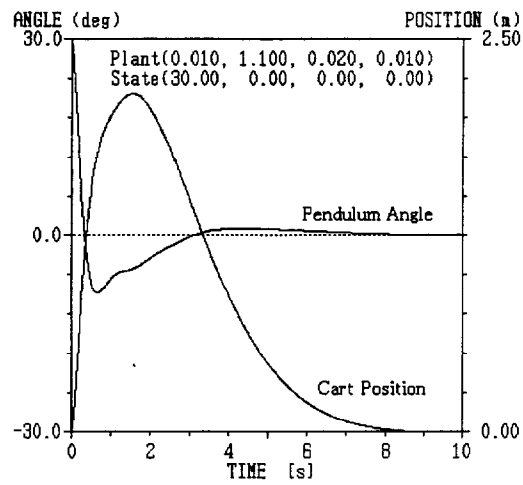
図 6-10 振り子の長さが 2.200m である倒立振り子システムの安定化制御結果



(a) 振子の長さが 0.200m である場合



(b) 振子の長さが 1.200m である場合



(c) 振子の長さが 2.200m である場合

図 6-11 サンプルング周期を 0.010s に変更した場合の安定化制御結果

6.5.4 考察

ここで注意したいのは、6.5.3 に示した表 6-4 による倒立振子システムの初期状態の安定化範囲が、パラメータの異なる倒立振子システムをすべてカバーする最も厳しいものであることである。実際振子の長さが 2.200m より短ければ、安定化できる初期状態の範囲がもっと広がる。例えば、今まで設定した振子の角度マージンを $[-30.000^\circ, +30.000^\circ]$ から $[-60.000^\circ, +60.000^\circ]$ に変更したとして、振子の長さ、振子の質量と台車の質量がそれぞれ 0.200m、0.100kg、2.000kg である倒立振子システムに対して、図 6-12 に示すようにサンプリング周期 0.020s のままで、振子の初期角度が 57.100° になるまで安定化が可能である。しかも、安定化時間が約 9.1 秒になっている。

一方、振子の初期角度を 30.000° に固定すれば、振子の長さによって設定できる最大サンプリング周期が違ってくることが推測できる。振子の長さが 0.200m であれば、サンプリング周期が最大 0.030s まで設定できる。振子の長さが 1.200m であれば、図 6-13 のようにサンプリング周期を 0.070s に設定しても、振子が左右に数回揺れるものの倒立振子システムが約 8.3 秒で安定化されている。また、振子の長さが 2.200m である倒立振子システムに対して、サンプリング周期を 0.030s までに設定することができる。しかし、サンプリング周期を 0.030s に設定すると、倒立振子システムが完全安定化になるまで振動が持続する。このように、振子が短いまたは長い場合は設定できる最大サンプリング周期が制限されているが、振子の長さがその間であればある程度大きめのサンプリング周期でも安定化が図れる。

以上の各シミュレーションにおいて、すべてレールの原点を台車の目標位置としている。台車をレールの原点ではなく任意の指定位置 x_0 に移動したい場合には、台車の実際位置 x からその指定位置 x_0 を引いたもの $(x-x_0)$ を新しい状態変数 x として、今までと同じように本ファジィ制御器に用いればよい。図 6-14 には、初期角度が 30.000° から出発した振子を倒立させるとともに台車を -1.500m に移動させるシミュレーション例を示している。振子の角度制御と台車の位置制御が完璧に行われていることがわかる。

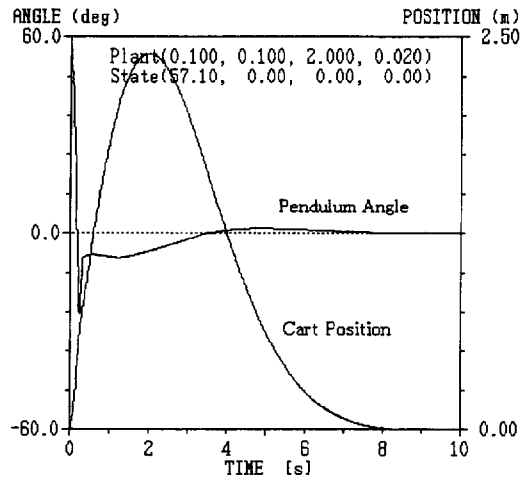


図 6-12 振子の長さが 0.200m である場合に安定化できる振子の最大初期角度

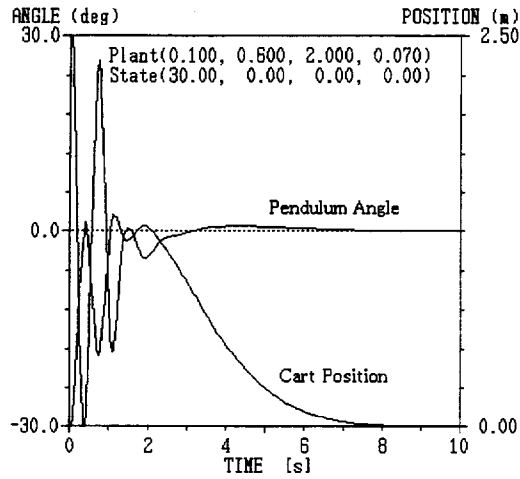


図 6-13 振子の長さ 1.200m とサンプリング周期 0.070s の場合の安定化制御結果

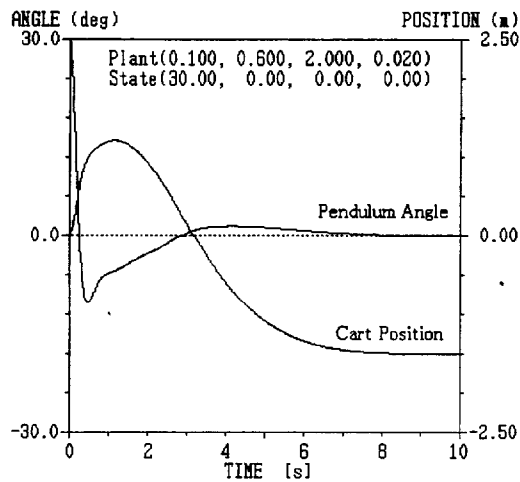


図 6-14 台車の目標位置を -1.500m とする倒立振り子システムの安定化制御結果

6.6 安定化制御シミュレーション(2)

表 6.4 の制御パラメータである動的重視度の基本値と変動幅は、試行錯誤によって選ばれたので、必ずしも最適なものとはいえない。ここでは、二つの参照用倒立振子システムモデルに対して、汎用性を損なわずに最適あるいは最適に近い制御パラメータをランダム最適探索法^[4,83]でそれぞれ求めることにする。各参照用モデルに各自の制御パラメータを適用して安定化制御動作を確認する。そして各参照用モデルの制御パラメータを用いた本ファジィ制御器の汎用性を検証し、両参照用モデルの制御パラメータを合わせることによって表 6.4 の制御パラメータとほぼ同じ範囲のあらゆる倒立振子システムに対してもっと短時間で安定化できることを示す。

6.6.1 ランダム最適探索法による制御パラメータの獲得

まず 6.5 と同様に、参照用モデル 1 として、振子の質量 $m_p=0.100\text{kg}$ 、振子の半分の長さ $l_p=0.500\text{m}$ 、台車の質量 $m_c=1.000\text{kg}$ である倒立振子システム^[22,41,63,75,82,84]を選ぶ。参照用モデル 2 として、振子の質量、振子の半分の長さ、台車の質量がそれぞれ $m_p=0.100\text{kg}$ 、 $l_p=0.100\text{m}$ 、 $m_c=0.200\text{kg}$ である倒立振子システムを選ぶ。参照用モデル 1 は振子が長い場合に対応し、参照用モデル 2 は振子が短い場合に対応する。

次に、安定化制御の目標が短時間内に各状態変数をすべてゼロにすることから、ランダム最適探索用の評価関数を、

$$\Phi = \sum_{k=1}^{500} (|\theta(k)| + |\omega(k)| + |x(k)| + |v(k)| + |f(k)|) \quad (6-10)$$

のように定義する。サンプリング周期を 0.020s に設定し、しかも 1 回探索あたりの倒立振子システムの安定化制御時間を 10.0s に設定しているので、式(6-10)は各状態変数の絶対値と駆動力の絶対値を計 500 サンプルステップにわたって合計することになる。ただし、駆動力の最大値についてここでは特に制限していないが、必要に応じて駆動力に制約を付けることも考えられる。

すでに 6.3 で述べたように、倒立振子システムの安定化制御において振子の角度制御を台車の位置制御より優先的に行わなければならない。そのため、振子の動的重視度の基本値と変動幅をそれぞれ台車の動的重視度の基本値と変動幅より大きく設定することが必要である。そこで、振子の角度と角速度、および台車の位置と速度に対応する各動的重視度の基本値の初期値を順に 1.000 、 1.000 、 0.150 、 0.150 に設定し、変動幅の初期値を順に

1.000、1.000、0.200、0.200 に設定する。そして、4.3 で述べたランダム最適探索の手順にしたがって、この評価関数が最小になるようにそれぞれ 50,000 回の探索学習を行う。なお、各スケールリングファクタは 6.4 で述べたとおりである。

参照用モデル 1 について、振子の初期角度 30.000° に対してランダム最適探索によって求めた各動的重視度の基本値と変動幅を表 6-5 に示す。この表からわかるように振子の角度の基本値と変動幅が振子の角速度の基本値と変動幅とそれぞれほぼ同程度になっており、台車の位置の基本値と変動幅が台車の速度の基本値と変動幅とそれぞれほぼ同じ値になっている。しかも、振子の角度と角速度の基本値と変動幅がともに台車の位置と速度の基本値と変動幅より数倍も大きくなっている。すなわち、倒立振子システムの安定化制御において、振子の制御が台車の制御より重要視されることを意味している。このように表 6-5 は各制御パラメータが表 6-4 の各々のパラメータより大きくなっているが、パラメータ間の関係が 6.5.1 で示している設定指針に一致している。

表 6-5 振子が長い場合の各動的重視度の基本値と変動幅

入力項目	基本値	変動幅
振子の角度	4.6394	4.6920
振子の角速度	4.5827	3.3846
台車の位置	1.0728	1.1276
台車の速度	0.8928	0.5263

表 6-6 振子が短い場合の各動的重視度の基本値と変動幅

入力項目	基本値	変動幅
振子の角度	1.8963	2.4739
振子の角速度	0.9775	2.8638
台車の位置	0.3746	1.0412
台車の速度	0.3900	0.3138

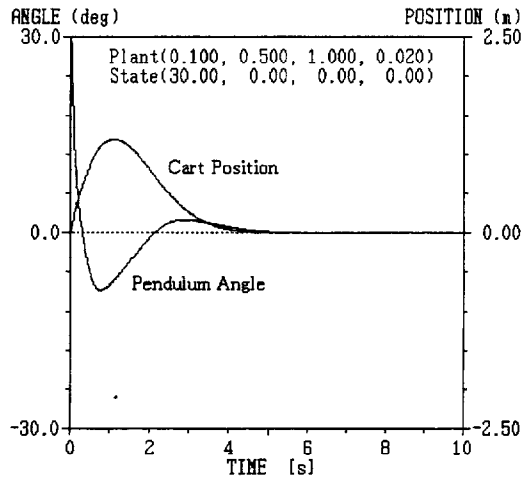
参照用モデル 2 について、同じく振子の初期角度 30.000° に対してランダム最適探索によって得られた安定化制御用制御パラメータを表 6-6 に示す。この場合も、振子の動的重視度の制御パラメータの値が台車の動的重視度のパラメータの値より倍以上大きく、振子の角度と角速度のパラメータの値がそれぞれほぼ同程度になっており、台車の位置と速度

のパラメータの値もそれぞれだいたい同レベルになっていることがわかる。なお、表 6-6 の各制御パラメータの値がそれぞれ表 6-5 の各制御パラメータの値より小さいことは、短い振子が高応答性を持つので、台車に大きな操作量が作用すると振子が反対側に倒れてしまう可能性があり、むしろ小さめの操作量でも安定化が実現できることを意味し、逆に長い振子が大きな慣性を持つのでそれを克服するに大きめの操作量が必要であることを意味する。

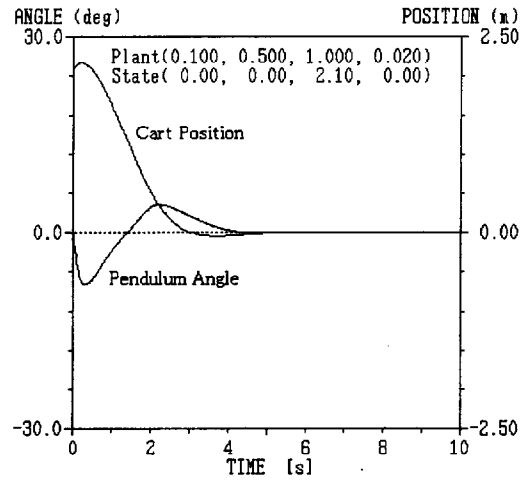
6.6.2 参照用モデルについての安定化制御シミュレーション

参照用モデル 1 について、表 6-5 の制御パラメータを用いた本ファジィ制御器で安定化制御を行った結果を図 6-15 に示している。ただし、振子の初期角度と台車の初期位置は、図 6-15(a)においてそれぞれ 30.000° と 0.000m であるのに対して、図 6-15(b)においてはそれぞれ 0.000° と 2.100m である。いずれの初期状態に対しても倒立振子システムがそれぞれ約 5.7 秒と 5.5 秒でスムーズに安定化できている。図 6-15(a)は、(サンプリング周期が異なるが) 図 6-6 に比べて完全安定化時間が 2.0 秒以上短縮できていることがわかる。したがって、ランダム最適探索法によって参照用モデル 1 に対する安定化制御が大幅に改善できている。

参照用モデル 2 について、初期状態をそれぞれ図 6-15(a)と図 6-15(b)と同じように設定して、表 6-6 の制御パラメータで安定化制御を行った結果を図 6-16(a)と(b)に示す。振子が短いため、その高応答性によって制御開始時振子がすばやく回転し、その後振動が起こるが、やがて振動が収まり、振子がスムーズに倒立されていく。図 6-16(a)の場合、倒立振子システムが約 3.2 秒で安定化されている。図 6-16(b)の場合、倒立振子システムが約 5.7 秒で安定化できている。表 6-4 に比べて、表 6-6 において台車の制御パラメータの大きさが全制御パラメータに占める割合が相対的に大きくなっているため、台車の位置制御がやや強調される結果として振動が少し発生してしまうと考えられる。

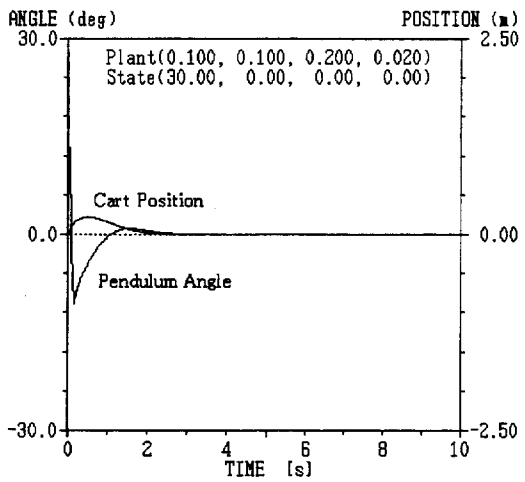


(a) 30.000°の初期角度に対して

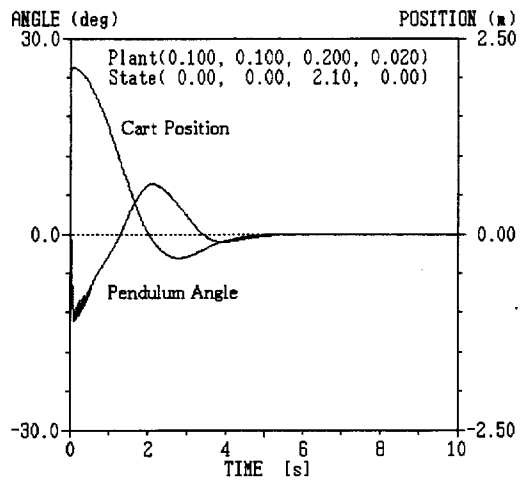


(b) 2.100mの初期位置に対して

図 6-15 参照用モデル 1 についての安定化制御結果



(a) 30.000°の初期角度に対して



(b) 2.100mの初期位置に対して

図 6-16 参照用モデル 2 についての安定化制御結果

6.6.3 参照用モデル 1 の制御パラメータの汎用性について

ここでは、参照用モデル 1 とパラメータが異なる倒立振り子システムに対して、表 6-5 の制御パラメータを用いた本ファジィ制御器の汎用性を検証する。

まず、振り子の長さが 1.400m であり、振り子と台車の質量比がそれぞれ 0.500、0.050、0.005 である倒立振り子システムについて、初期角度 30.000 ° に対する安定化制御シミュレーションを行い、その結果を図 6-17(a)、(b)、(c) に示す。振り子角度の時間応答曲線および台車位置の時間応答曲線は各図においてそれぞれほぼ同じになっており、完全安定化時間はそれぞれ約 6.1、6.2、6.2 秒になっている。また、制御開始から反対側に倒れたときの振り子の最大角度、およびレールの原点から離れた台車の最大移動距離はともに、振り子と台車の質量比が 0.500 から 0.050 に変わったときにほんの少し大きくなっているが、振り子と台車の質量比がさらに 0.050 から 0.005 に変わったときにほとんど変化していない。したがって、表 6-5 を用いた本ファジィ制御器による制御結果が振り子と台車の質量比によらずにほとんど同じであると見なされる。振り子の長さを 0.600m あるいは 2.200m に変更しても、同様の傾向が見られる。これに対して、表 6-4 の場合は振り子と台車の質量比によって、例えば振り子の長さが 1.200m である倒立振り子システムについて安定化制御結果に差が少し現れている。これは、表 6-5 の制御パラメータは振り子と台車の質量比の変化を吸収する能力が大きいことによると考えられる。

次に、サンプリング周期の影響を調べるため、図 6-17(c) の倒立振り子システムに対してサンプリング周期を 0.020s から 0.010s、0.005s、0.001s に変更して安定化制御を行った結果をそれぞれ図 6-18(a) と (b) と (c) に示す。完全安定化時間はすべて約 6.2 秒である。この四つの図よりわかるように、サンプリング周期を変更しても、差がわからないほど安定化制御結果はほとんど同じになっている。このようにサンプリング周期を 0.020s 以下であればどんな値に設定してもほぼ同じ制御結果が得られるので、サンプリング周期が異なっても安定化制御はほとんど影響を受けないことになる。これは、振り子がある程度長い倒立振り子システムに対する、表 6-4 による安定化制御結果に一致している。

振り子と台車の質量比、およびサンプリング周期が安定化制御結果にほとんど影響しないことから、以下では振り子と台車の質量をそれぞれ 0.100kg と 1.000kg に固定し、サンプリング周期を 0.020s に設定する。図 6-19 には、振り子の長さが 0.600m である倒立振り子システムについての安定化制御結果を示す。図 6-20 には、振り子の長さが 2.200m である倒立振り子システムについての安定化制御結果を示す。ただし、図 6-19(a) と図 6-20(a) は振り子の初期角度と台車の初期位置が 30.000 ° と 0.000m である場合に対応し、図 6-19(b) と図 6-20(b) は振り子の初期角度と台車の初期位置が 0.000 ° と 2.100m である場合に対応している。

これらの図からわかるように、倒立振り子システムのパラメータが参照用モデル 1 と異なるにもかかわらず、いずれの場合においてもスムーズに振り子を倒立させ台車をレールの原点に移動させることができ、倒立振り子システムを図 6-19 の場合では約 5.1 秒と 6.2 秒、図 6-20 の場合では約 6.3 と 6.4 秒で完全に安定化させることができる。そして、振り子は初期状態から倒立して安定状態になるまで、初期角度の影響部分を除けば、1 回だけ振れてそして倒立される。

図 6-19(a)と図 6-20(a)のように、制御開始時に振り子が倒立していない場合、台車が振り子の倒れている方向に一旦移動して振り子を反対方向に少し倒した後、振り子が倒立されるにつれて台車がレールの原点に移動して停まることがわかる。図 6-19(b)と図 6-20(b)のように、制御開始時に振り子が倒立していて台車がレールの原点から離れている場合、台車がさらに遠くへ移動して振り子をレールの原点側に向けて少し倒した後、振り子の角度制御が行われるとともに台車の位置制御も行われている様子が伺える。また、図 6-19(a)と図 6-15(a)と図 6-20(a)、または図 6-19(b)と図 6-15(b)と図 6-20(b)を比較すると、初期条件が同じであるにもかかわらず振り子が長くなるにつれて、振り子がレールの原点側に向かって倒される角度が次第に大きくなり、台車がレールの外側に移動する距離もますます増え、システム全体の動きに荒さがだんだん現れてくることがわかる。これは、振り子の長さがある程度以上になると慣性が増大することによって安定化制御が難しいという我々の経験によく一致している。

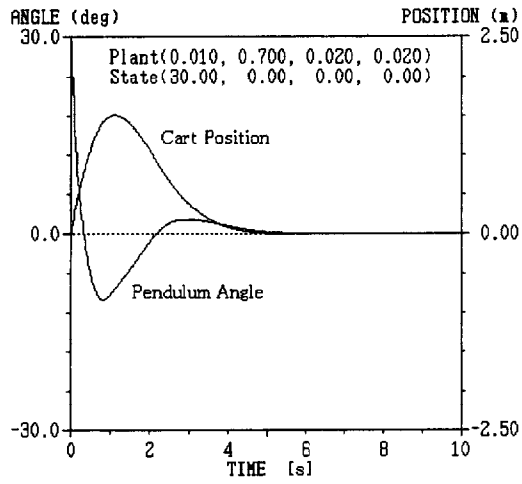
表 6-5 の制御パラメータが安定化できる倒立振り子システムの初期状態の範囲（ただし、振り子の角速度と台車の速度の初期値がともにゼロとする）は、以下の通りにシミュレーションによって得られている。振り子の長さ l_p とサンプリング周期 T_s がそれぞれ 2.200m と 0.020s に設定された場合、振り子の初期角度が 20.000° のときに台車の初期位置が 1.200m まで、振り子の初期角度が 10.000° のときに台車の初期位置が 1.700m までであれば、倒立振り子システムが安定化できる。また、台車の初期位置がゼロである場合に振り子の初期角度が -30.000° と $+30.000^\circ$ の間であれば、あるいは振り子の初期角度がゼロである場合に台車の初期位置が $-2.100m$ と $+2.100m$ の間であれば、倒立振り子システムの安定化が可能である。ここで注意すべきことは、安定化できる台車の初期位置の範囲が表 6-4 の場合に比べて少し狭くなっていることである。これは、表 6-5 からわかるように各動的重視度の基本値と変動幅の値が表 6-4 のそれぞれの約 2 倍になっているので、表 6-5 による安定化制御が台車の移動速度を大きくして台車を遠くへ走らせる傾向があることによる。

この範囲内の任意の初期状態に対して、サンプリング周期を 0.001s から 0.020s までの間に設定すれば、振り子の半分の長さ l_p が $0.300m \leq l_p \leq 1.100m$ 、振り子の質量が $m_p \geq 0.001kg$ 、台車の質量が $m_c \geq 0.002kg$ 、かつ $0.005 \leq m_p/m_c \leq 0.500$ であるあらゆる倒立振り子システムを、すべて約 6.0 秒間で完全に持続振動なしで安定化できることが制御シミュレーションによって確認できている。これは、過去に報告されている多くの直線レールタイプの倒

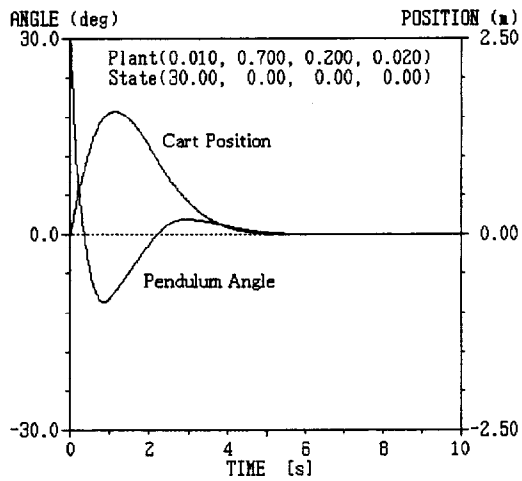
立振子システム [22,34,41,45,61,63,75,82,84]のパラメータ範囲を含むこととなり、表 6-5 を用いる本ファジィ制御器の汎用性が高いことを示している。なお、ここで質量の上限値を入れていないのは、同じくそれが操作量に関係し、操作量に制限がなければ振子と台車の質量がいくら重くなっても理論上は対応できることを意味する。シミュレーションにおいては、振子と台車の質量がそれぞれ 5.000kg までと 10.000kg までである倒立振子システムを安定化することができる。

このように、試行錯誤で求めた表 6-4 の制御パラメータでは倒立振子システムを安定化するのに 8.0 秒前後かかるのに対して、ランダム最適探索法で求めた表 6-5 の制御パラメータを用いることによって倒立振子システムが約 6.0 秒間で安定化できる。したがって、表 6-5 によって安定化時間が約 25%ほど短縮でき、安定化制御の性能が大幅に改善できる。また、安定化するのに 12.0 秒以上かかる連続値強化学習法^[22]、わずかな外乱に対して 8.0 秒ほど経過しても振子がまだ大きく振動する仮想目標角度方式^[25]、396 個ものファジィルールで 8.0 秒以上かかって安定化するニューロによるファジィルール抽出手法^[34]、完全安定化になるまで 8.0 秒以上かかる可変構造システム方式^[61]、安定になるまで 200.0 秒以上かかる非線形最適手法によるルール学習方式^[64]、完全安定化が実現できない離散値強化学習方式^[75]などに比べて、表 6-5 を用いる本安定化ファジィ制御器の優位性が確認できる。

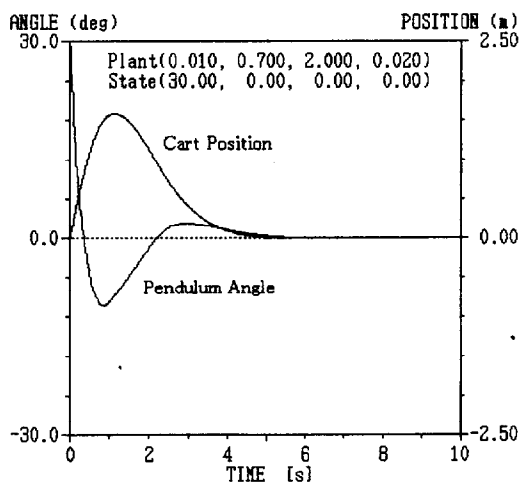
なお、振子の長さが 0.600m よりも短い倒立振子システムの場合、表 6-5 の制御パラメータが大きいことと振子が高応答性を持つことより、表 6-5 の制御パラメータを用いると安定化制御に持続振動が起こる可能性がある。短い振子の場合でも滑らかに安定化制御を行うため、参照用モデル 2 に対して求めた表 6-6 の制御パラメータを利用する。これは次節で述べる。



(a) 振子と台車の質量比が 0.500 である場合

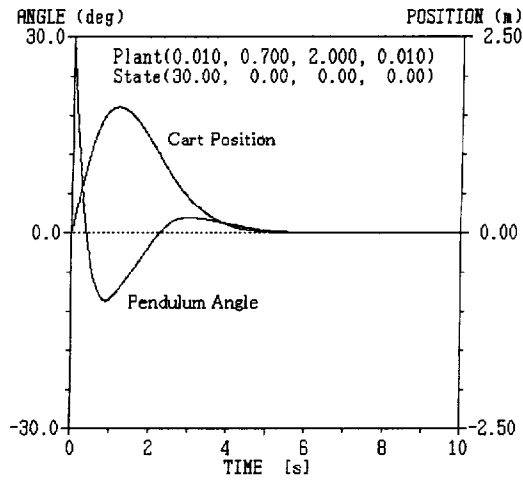


(b) 振子と台車の質量比が 0.050 である場合

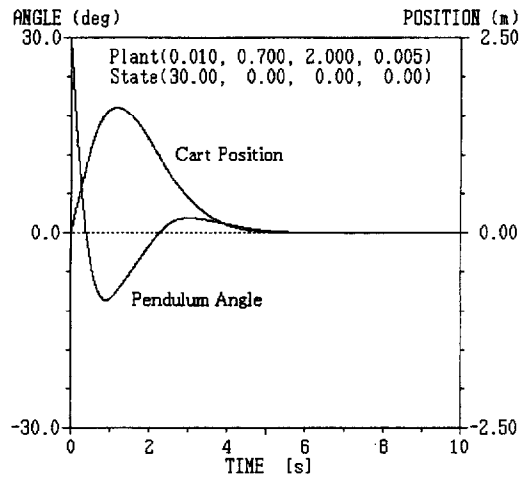


(c) 振子と台車の質量比が 0.005 である場合

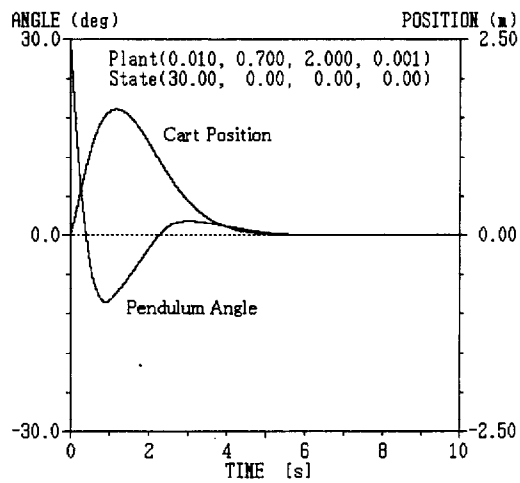
図 6-17 振子と台車の質量比を変更した場合の安定化制御結果



(a) サンプル周期が 0.010s である場合

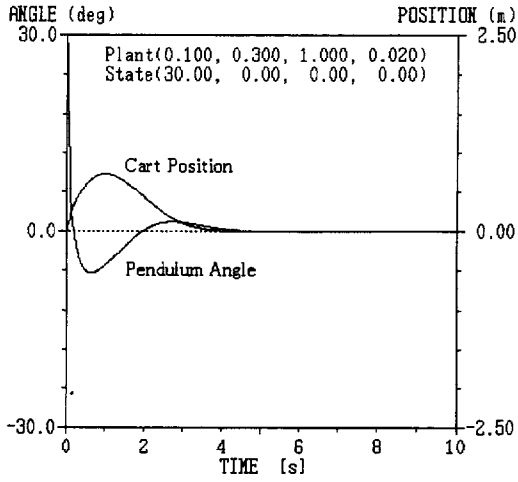


(b) サンプル周期が 0.005s である場合

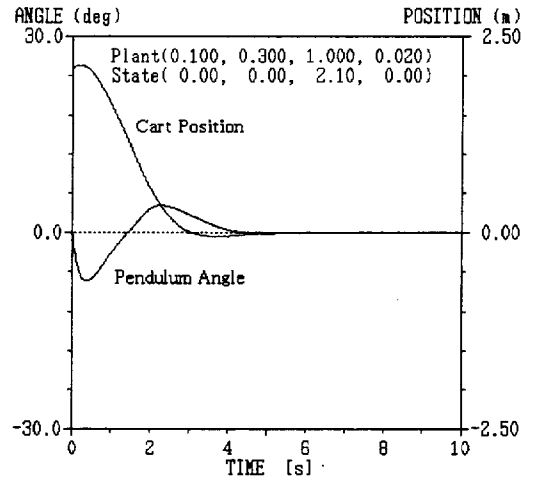


(c) サンプル周期が 0.001s である場合

図 6-18 サンプル周期を変更した場合の安定化制御結果

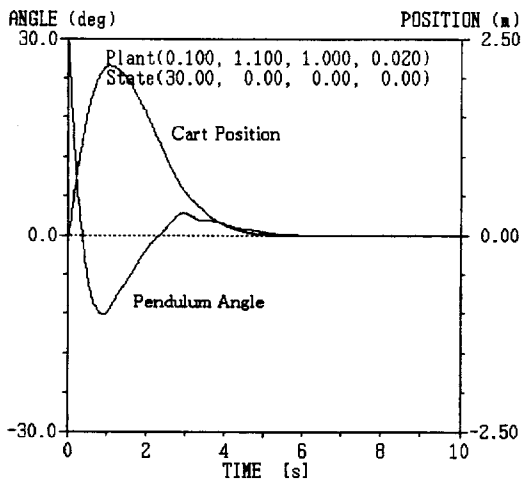


(a) 初期角度 30.000° の場合

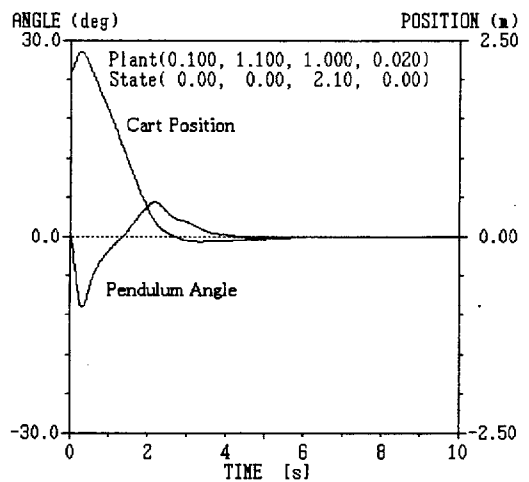


(b) 初期位置 2.100m の場合

図 6-19 振子の長さが 0.600m である倒立振り子システムの安定化制御結果



(a) 初期角度 30.000° の場合



(b) 初期位置 2.100m の場合

図 6-20 振子の長さが 2.200m である倒立振り子システムの安定化制御結果

6.6.4 参照用モデル 2 の制御パラメータの汎用性について

6.5.3 と 6.6.3 の結果から分かるように、サンプリング周期を最大 0.020s とすれば、表 6-4 によって安定化できる振子の長さの範囲は [0.200m, 2.200m] であるのに対して、表 6-5 によって安定化できる振子の長さの範囲は [0.600m, 2.200m] になっている。すなわち、振子の長さが 0.600m 未満である倒立振子システムに対して、サンプリング周期を短縮したりしない限り、表 6-5 の制御パラメータでは振動なしで完全に安定化できる保証がない。しかし、実験装置をコンパクトにするために、0.600m より短い振子を使うケース [1,21,26] がしばしばある。そこで、短い振子の倒立振子システムに対して求めた表 6-6 を用いて、振子の長さが 0.600m 未満である倒立振子システムの安定化制御を図ることとする。

まず、振子の長さやサンプリング周期をそれぞれ 0.200m と 0.020s に固定して、振子と台車の質量比をそれぞれ 0.500、0.050、0.005 に変えたときの倒立振子システムについて、表 6-6 の制御パラメータで行った安定化制御シミュレーション結果を図 6-21 に示す。この場合、振子と台車の質量比が 0.500 から 0.050 に変更された場合には振子角度の時間応答がかなり違って、台車の最大移動量も少し異なっているのに対して、この質量比が 0.050 から 0.005 に変わった場合にはほとんど同じような制御結果が得られている。一方、図 6-22 は、図 6-21 の場合の振子の長さを 0.500m に変更した場合の安定化制御結果を示している。この場合、振子と台車の質量比が 0.500 から 0.050 に変更されても、振子角度の時間応答に差があまりなく、台車の最大移動量もほぼ同じ大きさになっていることがわかる。すなわち、振子が短い場合に、振子と台車の質量比が大きければ倒立振子システムの安定化制御はその質量比の変化によって影響を受けるが、その質量比が小さければ安定化制御はその質量比の変化の影響をあまり受けない。また、振子が長くなるにつれて、振子と台車の質量比の変化が倒立振子システムの安定化制御に与える影響は次第に薄くなる。

図 6-21 の各図を図 6-8 の各図に比較すると、制御パラメータ以外の設定がまったく同じである。しかし、図 6-21 のように表 6-6 の制御パラメータを用いることによって、振子角度の時間応答が滑らかになっており、振子と台車の質量比が大きく変わっても台車がレールの原点に戻されるまでの時間がほぼ同じになっている。しかも、倒立振子システムが完全に安定化されるまでそれぞれ約 3.2、3.6、3.6 秒しかかからず、安定化時間が 20% 以上短縮できることがわかる。一方、図 6-22 の各図を図 6-21 の各図に比べて、振子が適当に長ければ振子角度の時間応答がもっと滑らかになっており、倒立振子システムがそれぞれ約 4.8、4.9、5.0 秒で安定化されていることがわかる。

なお、図 6-21(a)の倒立振子システムの振子と台車の質量比が図 6-16(a)の場合と同じにも 0.500 であり、さらに（出力項目のスケールファクタを除いて）ほかのパラメータがまったく同じである。すでに 6.6.3 で述べたように、操作量を除いてこの二つの結果

は実際にはまったく同じになっていることが理解できる。

次に、サンプリング周期を 0.020s から 0.010s に変更して、図 6-21(a)と図 6-21(c)の倒立振り子システムを安定化したシミュレーション結果をそれぞれ図 6-23(a)と図 6-23(b)に示す。同様に図 6-22(a)と図 6-22(c)の各倒立振り子システムの安定化制御結果をそれぞれ図 6-24(a)と図 6-24(b)に示す。いずれにおいても、倒立振り子システムを図 6-23 では約 4.4 秒と 4.5 秒、図 6-24 では約 5.0 秒と 5.1 秒で振動なしに安定化させることができている。振子の長さが 0.200m の場合、振子と台車の質量比が大きい図 6-23(a)を図 6-21(a)と比べるとわかるように、サンプリング周期が短く設定されれば、台車の最大移動量が増大し、安定化時間も少し長くなるが、振子を無理なくスムーズに倒立させることができる。振子と台車の質量比が小さい図 6-23(b)を図 6-21(c)に比べると、安定化時間が少しかかるが、振子角度の応答曲線および台車位置の応答曲線がそれぞれ似ていることがわかる。一方、振子の長さが 0.500m の場合、サンプリング周期を短くすると、図 6-24(a)と(b)のように制御結果は振子と台車の質量比の大きさにあまり関係なく、また図 6-22(a)と図 6-22(c)に比較して安定化時間が多少延びる以外は振子角度の応答曲線および台車位置の応答曲線がほとんど同じになっていることがわかる。要するに、サンプリング周期は主に振子が短いしかも振子と台車の質量比が大きい倒立振り子システムの安定化制御に影響し、サンプリング周期が小さければ振子の角度制御をスムーズにすることができる。それ以外の場合にサンプリング周期の影響が小さいと考えられる。

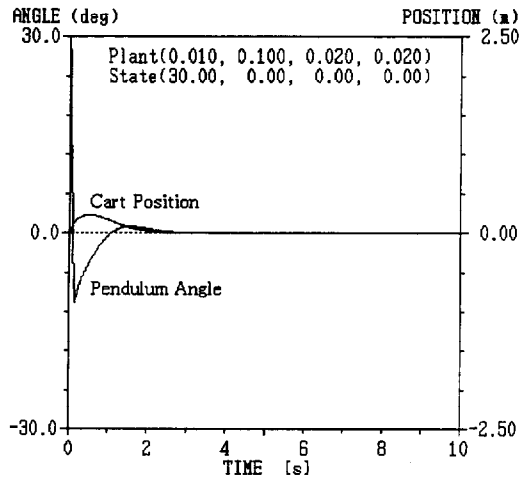
そして、図 6-25 にはサンプリング周期 0.020s に対し、振子の長さ、振子の質量と台車の質量をそれぞれ 0.200m、0.100kg、1.000kg に固定した倒立振り子システムに対する安定化制御シミュレーション結果を示している。図 6-26 には同じサンプリング周期 0.020s に対し、振子の長さ、振子の質量と台車の質量をそれぞれ 0.500m、0.100kg、1.000kg に設定した場合のシミュレーション結果を示している。ただし、図 6-25(a)と図 6-26(a)の初期状態は振子の初期角度と台車の初期位置がそれぞれ 30.000° と 0.000m であるのに対して、図 6-25(b)と図 6-26(b)の初期状態は振子の初期角度と台車の初期位置がそれぞれ 0.000° と 2.100m である。この四つの例では、安定化時間がそれぞれ約 3.6 秒、5.7 秒、4.9 秒、6.1 秒になっている。これらの結果からわかるように、振子の長さが異なっている、また初期状態が大きく違っても、表 6-6 の制御パラメータで倒立振り子システムを約 6.0 秒間で完全に振動なしに安定化させることができる。

実際に表 6-6 の制御パラメータを利用することによって、振子の半分の長さが $0.100\text{m} \leq l_p < 0.300\text{m}$ 、振子の質量が $m_p \geq 0.001\text{kg}$ 、台車の質量が $m_c \geq 0.002\text{kg}$ 、かつ $0.005 \leq m_p/m_c \leq 0.500$ であるあらゆる倒立振り子システムを、振子の初期角度が 20.000° のときに台車の初期位置が 1.200m までである初期状態、または振子の初期角度が 10.000° のときに台車の初期位置が 1.700m までである初期状態、または台車の初期位置がゼロであり振子の初期角度が -30.000° と $+30.000^\circ$ の間である初期状態、または振子の初期角度がゼロであり

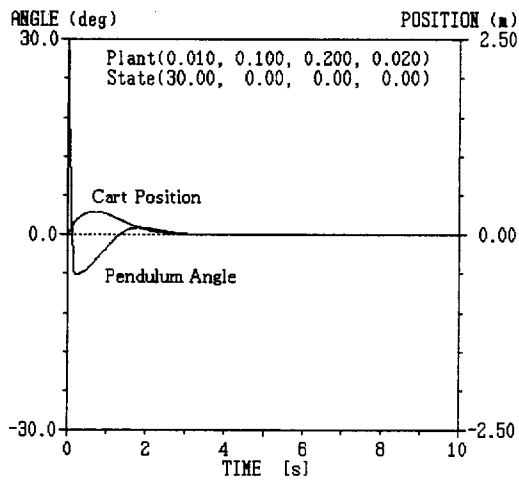
台車の初期位置が-2.100m と+2.100m の間である初期状態に対して、[0.001s, 0.020s] 内のサンプリング周期ですべて約 6.0 秒間でほとんど振動なしに完全に安定化することができる。サンプリング周期を除いて、この倒立振子システムのパラメータの対応範囲は、過去に報告されている倒立振子システム^[1,21]をカバーしている。

さらに、これらの安定化制御結果は、非線形制御手法^[26]の制御結果には及ばないが、ニューロ PID 制御方式^[1]や仮想目標値発生部を持つ学習制御方式^[21]などによる制御結果とほぼ同程度かそれ以上になっている。本ファジィ制御器の構造のシンプルさ、実行のしやすさ、および制御パラメータの汎用性の高さなどより、本ファジィ制御器が非常に優れているといえる。

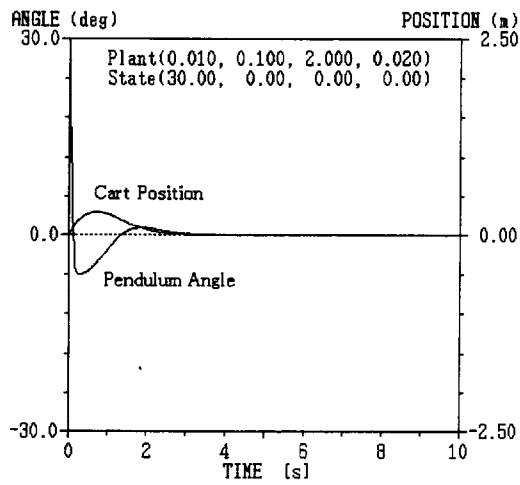
なお、実際に表 6-6 の制御パラメータで振子の長さが 0.600m から 0.750m までである倒立振子システムも安定化することができ、しかも安定化時間が表 6-5 による場合とほぼ同じである。ただし、振子の反対側への最大振れ角度と台車の最大移動量がともに大きく、しかも振子角度の時間応答が荒くなる傾向があるので、振子の長さが 0.600m 以上である倒立振子システムについては、表 6-5 の制御パラメータを利用した方がよい。



(a) 振り子と台車の質量比が 0.500 である場合

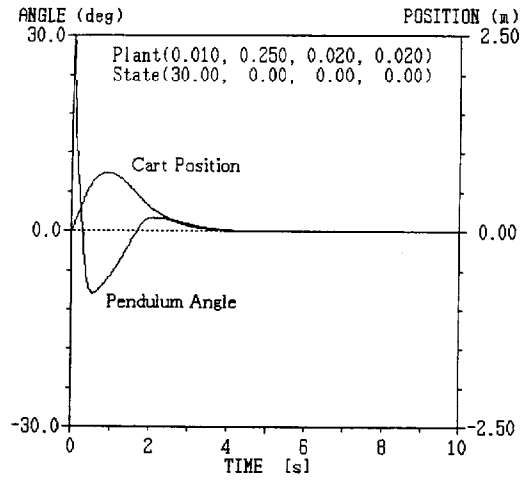


(b) 振り子と台車の質量比が 0.050 である場合

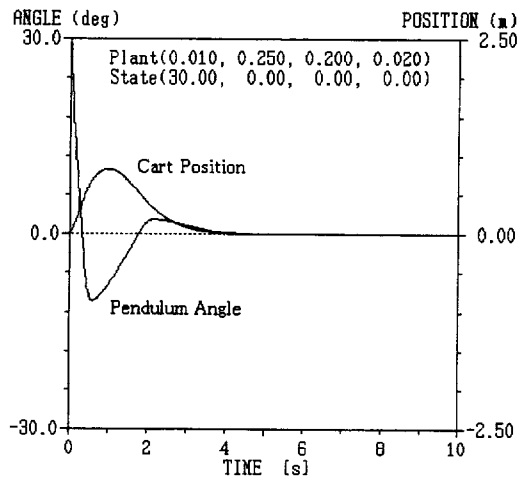


(c) 振り子と台車の質量比が 0.005 である場合

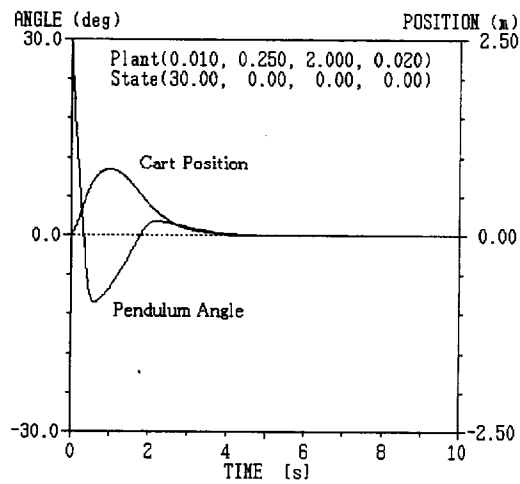
図 6-21 振り子の長さが 0.200m である倒立振り子システムの安定化制御結果



(a) 振り子と台車の質量比が 0.500 である場合

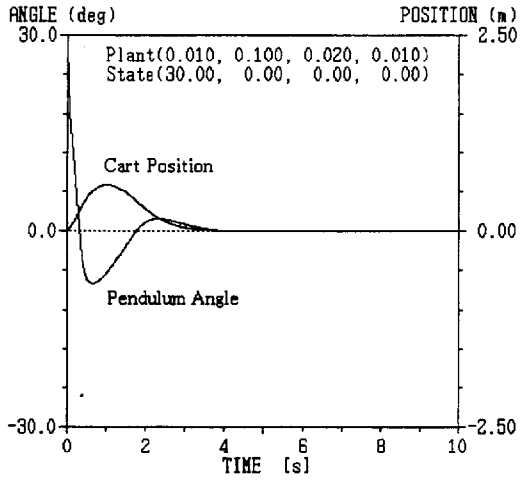


(b) 振り子と台車の質量比が 0.050 である場合

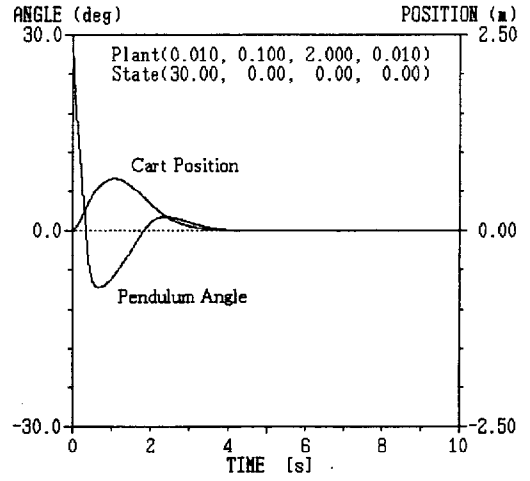


(c) 振り子と台車の質量比が 0.005 である場合

図 6-22 振り子の長さが 0.500m である倒立振り子システムの安定化制御結果

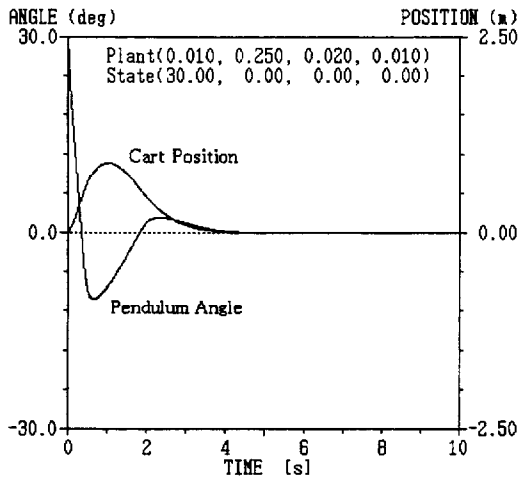


(a) 質量比が 0.500 である場合

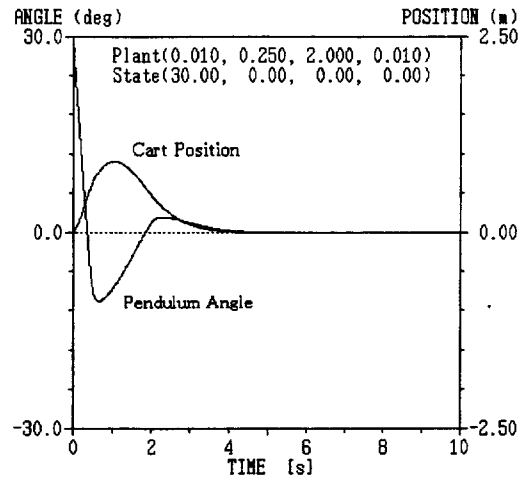


(b) 質量比が 0.005 である場合

図 6-23 振子の長さ 0.200m とサンプリング周期 0.010s の場合の安定化制御結果

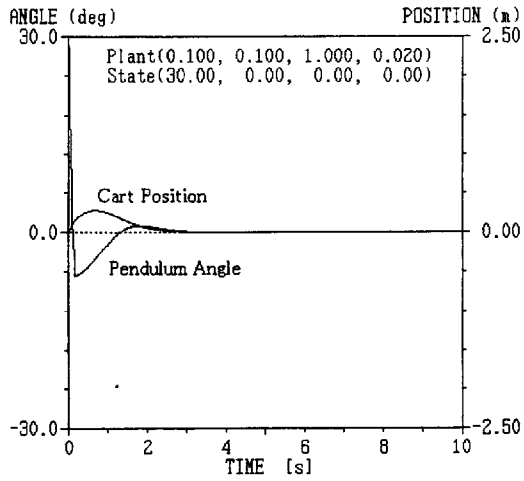


(a) 質量比が 0.500 である場合

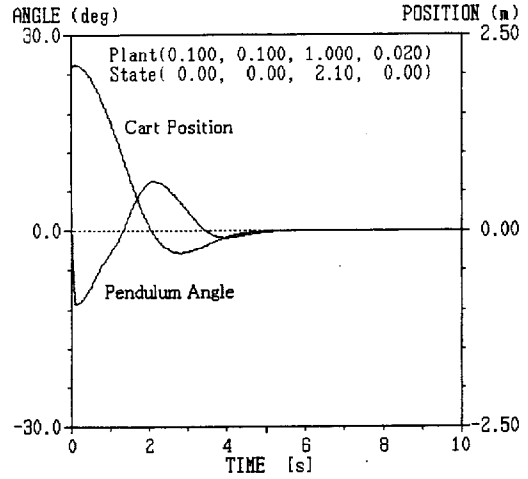


(b) 質量比が 0.005 である場合

図 6-24 振子の長さ 0.500m とサンプリング周期 0.010s の場合の安定化制御結果

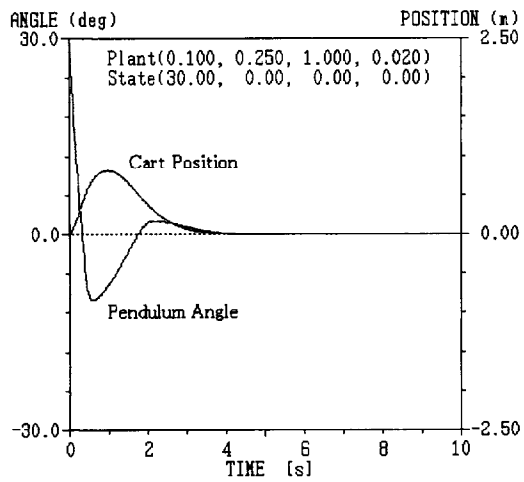


(a) 初期角度 30.000° の場合

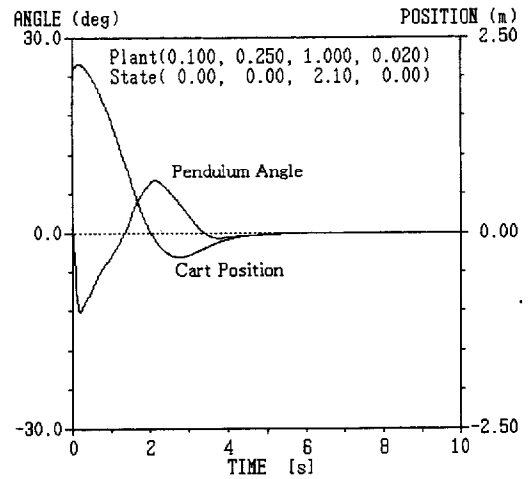


(b) 初期位置 2.100m の場合

図 6-25 $l_p=0.100\text{m}$ 、 $m_p=0.100\text{kg}$ 、 $m_c=1.000\text{kg}$ の場合の安定化制御結果



(a) 初期角度 30.000° の場合



(b) 初期位置 2.100m の場合

図 6-26 $l_p=0.250\text{m}$ 、 $m_p=0.100\text{kg}$ 、 $m_c=1.000\text{kg}$ の場合の安定化制御結果

6.6.5 考察

以上より、表 6-5 と表 6-6 の制御パラメータを合わせて利用すると、表 6-4 のように振子の半分の長さが $0.100\text{m} \leq l_p \leq 1.100\text{m}$ 、振子の質量が $m_p \geq 0.001\text{kg}$ 、台車の質量が $m_c \geq 0.002\text{kg}$ 、かつ $0.005 \leq m_p/m_c \leq 0.500$ であるすべての倒立振子システムを約 6.0 秒間で完全に安定化することができる。以下では、振子の長さが 0.600m 以上であれば表 6-5 の制御パラメータを利用し、振子の長さが 0.600m 未満であれば表 6-6 の制御パラメータを利用するとする。

すでに 6.6.4 で述べたように、表 6-6 の適用範囲として振子の長さが 0.200m 以上であることが要求される。しかし、実際に 0.200m よりも短い振子を使ったケースがある。例えば、川谷ら^[26]は半分の長さ 0.063m、質量 0.140kg の振子を用いている。ここでは、サンプリング周期を 0.020s に設定して、表 6-6 の制御パラメータをそのまま利用してその倒立振子システムの安定化制御を行ってみる。ただし、台車の質量に関するデータが記されていないので、台車の質量を 0.500kg と仮定する。図 6-27 に安定化制御シミュレーション結果を示す。30.000° の初期角度に対して、振子が反対側に回転してから倒立されるまで少し振動しているものの、倒立振子システムが約 2.4 秒で完全に安定化されていることがわかる。このように、振子の長さが 0.200m 未満である倒立振子システムに対しても、表 6-6 の制御パラメータで安定化を実現することは可能である。実際に、振子の長さが 0.100m から 0.200m 未満である倒立振子システムに対して、表 6-6 の制御パラメータを用いることによってサンプリング周期 0.020s でもすべて 6.0 秒以内に安定化できることが確認できている。

また、図 6-23 と図 6-24 より、振子が短い倒立振子システムの場合サンプリング周期を小さく設定することによって振子を振動させずにスムーズに倒立させることができることがわかっている。この場合、台車の最大移動量が少し大きくなり、倒立振子システムが安定化されるまで少し時間がかかるが、安定化時間がいずれも 6.0 秒以内になっている。実際に検証したところ、サンプリング周期 0.010s で振子の長さが 0.080m から 0.200m 未満である倒立振子システムに対してすべて 6.0 秒以内に振動なしに安定化できることがわかっている。例えば、図 6-27 の倒立振子システムをサンプリング周期 0.010s で制御した結果を図 6-28 に示している。この図からわかるように、台車の最大移動量が図 6-27 の場合の約 0.150m から 0.500m 近くに増大し、安定化時間が約 2.4 秒から約 4.2 秒に拡大している。しかし、振子の最大振れ角度が約 18.000° から 10.000° 未満になり、振子角度の時間応答曲線も滑らかになっている。なお、サンプリング周期を 0.005s に設定できれば、振子の長さが 0.040m である倒立振子システムでさえ 6.0 秒以内に振動なしで滑らかに安定化できることをシミュレーションで確認したことを付記しておく。

逆に、サンプリング周期が大きめに設定されても同等の制御結果が得られれば、ハードウェアの設計にかかる負担が軽減でき、コストの削減につながる。実際に表 6-6 の制御パラメータを用いれば、振子の長さが 0.200m から 0.600m までである倒立振子システムに対してサンプリング周期を 0.030s までに設定しても安定化できる。また、振子の長さが 0.300m 以上であればサンプリング周期を 0.040s まで設定でき、振子の長さが 0.500m 以上であればサンプリング周期を 0.050s まで設定できる。図 6-29 は、振子の長さが 0.200m である図 6-25(a) の倒立振子システムをサンプリング周期 0.030s で制御した結果を示している。振子が 2 回振れながら倒立されていって、台車も少しふらついているが、倒立振子システムが約 4.0 秒間で安定化されている。一方、表 6-5 の制御パラメータで、振子の長さが 0.700m 以上であれば 0.030s までのサンプリング周期で安定化でき、振子の長さが 0.800m 以上であれば 0.040s までのサンプリング周期で安定化でき、振子の長さが 0.900m 以上であれば 0.050s までのサンプリング周期で安定化できる。

本ファジィ制御器の安定化できる振子の初期角度の範囲は -30.000° から $+30.000^{\circ}$ までとしている。それは、倒立振子システムの諸パラメータの中に振子の長さが安定化できる振子の最大初期角度を最も影響するので、振子の長さが 2.200m である倒立振子システムに対して設定した範囲である。したがって、振子の長さが 2.200m 以下であれば、振子の初期角度がもっと大きくても本ファジィ制御器で倒立振子システムが安定化できることが十分可能である。例として図 6-30 には、振子の長さが 0.200m である図 6-12 の倒立振子システムを振子の最大初期角度 52.500° に対して行った安定化シミュレーション結果を示している。図 6-12 に比べて、図 6-30 では安定化できる振子の最大初期角度が若干小さいが、振子角度の時間応答曲線が滑らかになっており、しかも倒立振子システムが約 7.6 秒で完全に安定化されている。

振子を倒立させながら台車をレールの原点以外の指定位置に移動させたいときには、6.5.4 で述べたように台車位置を表す状態変数からその指定位置を引いたものを新しい状態変数として今までと同じように用いればよい。図 6-31 は、例として、図 6-14 の倒立振子システムを安定化させながら台車を目標位置 -1.500m に移動させる制御結果である。図 6-14 の場合安定化時間が 8.0 秒以上かかっているのに対して、図 6-31 では台車が目標位置を行き過ぎてからスムーズに目標位置に戻され、しかも倒立振子システムが約 7.0 秒間で安定化されている。

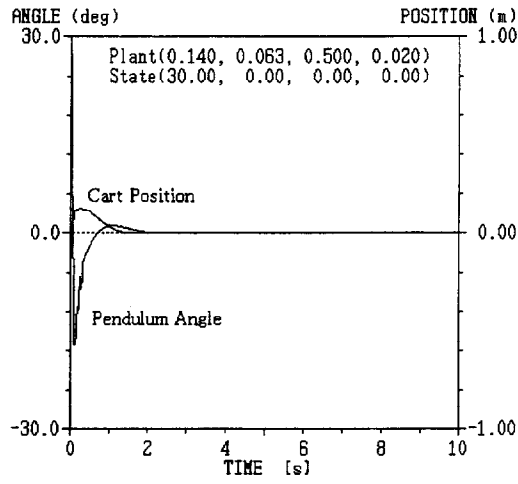


図 6-27 $l_p=0.063\text{m}$ 、 $m_p=0.140\text{kg}$ 、 $m_c=0.500\text{kg}$ 、 $T=0.020\text{s}$ の場合の安定化制御結果

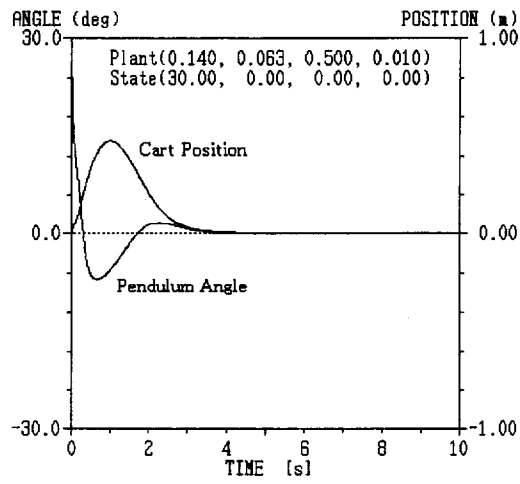


図 6-28 図 6-27 の倒立振り子システムをサンプリング周期 0.010s で制御した結果

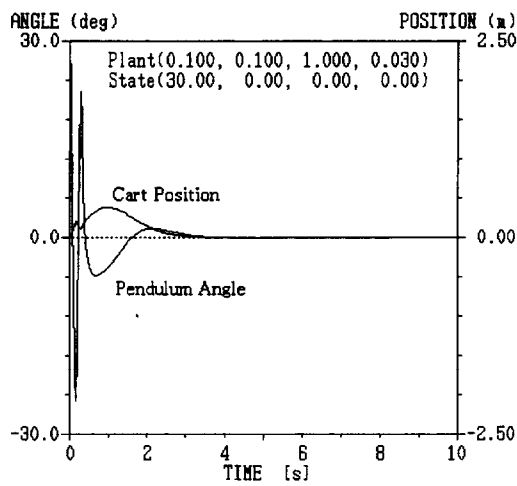


図 6-29 図 6-25(a)の倒立振り子システムをサンプリング周期 0.030s で制御した結果

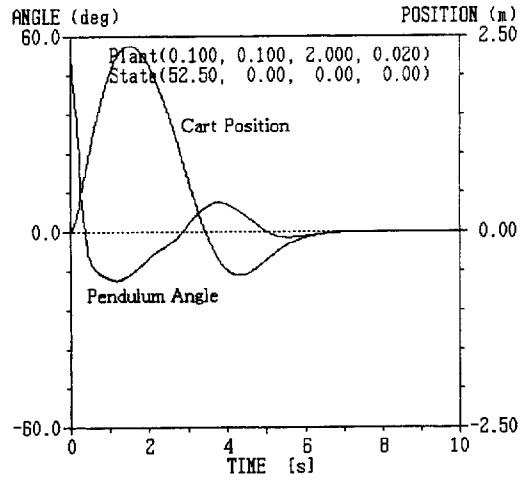


図 6-30 振子の長さが 0.200m である場合に安定化できる振子の最大初期角度

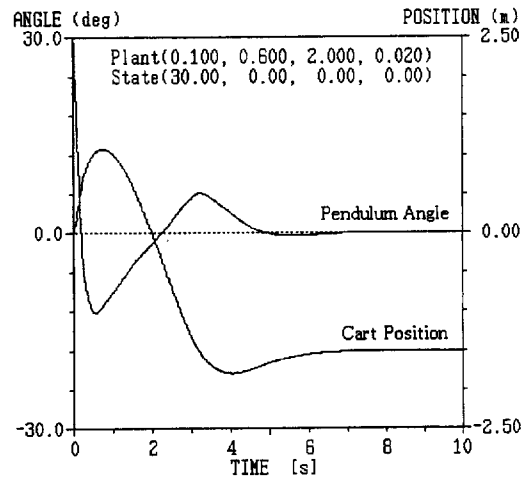


図 6-31 台車の目標位置を -1.500m とする倒立振子システムの安定化制御結果

6.7 結言

本章では、振子の角度制御と台車の位置制御からなる直線レールタイプの倒立振り子システムの安定化制御問題を取り上げ、従来の制御手法では安定化制御器が複雑になり、理想的な制御結果が得られにくく、制御パラメータの汎用性も乏しいなどの欠点を指摘した。そして、SIRMs 動的重視度結合型ファジィ推論モデルを倒立振り子システムの安定化制御問題に適用し、汎用性のある安定化ファジィ制御器を構築した。

本安定化ファジィ制御器の設計にあたって、振子の角度、振子の角速度、台車の位置、台車の速度を入力項目として、台車を駆動する操作量を出力項目とした。各 SIRM をそれぞれの入力項目の大きさに応じて設定した。各 SIRM の後件部の設定は入力項目に無関係にすべて同じになっている。一方、倒立振り子システムの安定化制御において振子の角度制御を台車の位置制御よりも優先的に行わなければならないので、振子の角度と振子の角速度に対応する両動的重視度を台車の位置と台車の速度に対応する両動的重視度より大きく設定する必要があることを述べた。そこで、各動的重視度の変動量変数のファジィルールを作るときにすべて振子の角度の絶対値を前件部変数とした。振子の角度の絶対値が大きいために振子の両動的重視度の変動量変数の推論値が大きくなり台車の両動的重視度の変動量変数の推論値が小さくなるように、振子の両動的重視度の変動量変数のファジィルールテーブルと台車の両動的重視度の変動量変数のファジィルールテーブルをちょうど補数関係のように設定した。そして、各 SIRM および変動量変数の推論は、現サンプリング時刻における倒立振り子システムの状態変数値に基づいているので、実時間で計算することが可能である。

このように本ファジィ制御器が四つの SIRM のファジィルール計 12 個と、四つの変動量変数のファジィルール計 12 個からなる非常に簡単な構造をしていることを示した。本ファジィ制御器を用いることによって、仮想目標角度を求めることなく、振子が倒立されていないときには振子の角度制御を優先にして、振子がほぼ倒立になっていれば台車の位置制御をすこし強めることが可能になった。そして、振子の角度制御と台車の位置制御は完全に並列に実行され、ともに操作量を推論し、その切り替えが制御状況に応じてごく自然な形で自動的に行われることを明らかにした。

スケーリングファクタを除いて、本ファジィ制御器の制御パラメータは各動的重視度の基本値と変動幅である。スケーリングファクタを試行錯誤で設定して、それがすべての安定化制御シミュレーションにおいて共通になることを述べた。制御結果のさらなる改善を図るには、このスケーリングファクタの最適化を行う必要がある。制御パラメータについては、それが動的重視度の大きさを左右するので、振子の角度または角速度の動的重視度の基本値と変動幅の和が台車の位置または速度の動的重視度の基本値と変動幅の和よりも大きくなければならないような基本設定指針を提示した。

この設定指針に基づき、ある特定の参照用倒立振子システムを対象にして試行錯誤的に一組の制御パラメータを選んだ。サンプリング周期が 0.001s から 0.020s までの間に設定されれば、この組の制御パラメータを利用した本ファジィ制御器で、参照用倒立振子システムはもちろんのこと、振子の長さが 0.200m から 2.200m まで、振子の質量が 0.001kg から、台車の質量が 0.002kg から、かつ振子の質量と台車の質量の比が 0.005 から 0.500 までのすべての倒立振子システムを、 -30.000° から $+30.000^{\circ}$ までの振子の任意角度に対して、また -2.250m から $+2.250\text{m}$ までの台車の任意位置に対して、約 8.0 秒間で完全に安定化させることができることを示した。

また、ランダム最適探索法で振子が短い場合の制御パラメータと振子が長い場合の制御パラメータをそれぞれ一組ずつ求めた。この二組の制御パラメータを合わせて利用すれば、本ファジィ制御器で -30.000° から $+30.000^{\circ}$ までの振子の任意角度に対して、また -2.100m から $+2.100\text{m}$ までの台車の任意位置に対して、振子の長さが 0.200m から 2.200m まで、振子の質量が 0.001kg から、台車の質量が 0.002kg から、かつ振子の質量と台車の質量の比が 0.005 から 0.500 までのあらゆる倒立振子システムを、0.001s から 0.020s までの間のサンプリング周期で約 6.0 秒間で完全に安定化させることができることを示した。

さらに、振子が短ければ振子の初期角度をさらに大きく設定でき、逆に振子が長ければサンプリング周期を 0.020s より大きく設定してもよいことをシミュレーション結果をもって実証した。サンプリング周期を短く設定すれば、振子角度と台車位置の時間応答曲線が一層滑らかになるだけでなく、振子の長さが 0.200m よりも短い倒立振子システムについても同様に安定化できることを例示した。振子を倒立させながら台車をレールの原点以外の指定位置に移動する方法を述べ、台車の実際位置からその指定位置を引いたものを台車の新しい位置とするだけでよいことをシミュレーションによって実証した。

このように、SIRMs 動的重視度結合型ファジィ推論モデルが 4 入力項目を有するシステムに対しても有効であることを示したとともに、本提案の安定化ファジィ制御器が単純な構造を持ちながら、汎用性が高く、広範囲の倒立振子システムについて優れた安定化制御結果が得られることを示した。

第7章 倒立振り子システムの振り上げおよび安定化制御

7.1 緒言

倒立振り子システムは、振子が垂下状態である安定な平衡点と、振子が倒立状態である不安定な平衡点を持つ。倒立振り子システムの振り上げおよび安定化制御とは、台車を左右に動かすことによって垂下位置にある振子を振り上げて不安定な倒立位置に静止させ、しかも台車を指定位置に移動させることである。これは、振子の振り上げ制御、倒立振り子システムの安定化制御すなわち不安定平衡点付近の振子の角度制御と台車の位置制御から構成される。第6章では直線レールタイプの倒立振り子システムの安定化制御のみについて説明しているが、本章では振子の振り上げも含めた直線レールタイプの倒立振り子システムの振り上げおよび安定化制御を取り上げる。

これまでも倒立振り子システムの振り上げおよび安定化制御に関する研究は、数多く報告されている。それらを分類すると、振子の振り上げ制御と倒立振り子システムの安定化制御に対してそれぞれ専用の制御器を設計する手法と、一つの制御器で振子の振り上げ制御と倒立振り子システムの安定化制御を両方ともカバーする手法がある。

前者については、倒立振り子システムは振子が垂下位置から倒立位置近くまで振り上げられる過程において非線形性が強く線形化が難しいことから、回転アームタイプの倒立振り子システムに対して振り上げに位相平面上の軌跡に基づく Bang-bang 状態フィードバック制御と倒立安定化に近似線形モデルに基づく最適レギュレータによる線形状態フィードバック制御からなる制御方式^[9]が提案されている。全自動振り上げ安定化制御方式^[30]では、倒立振り子システムの非線形モデルのパラメータを推定してから、非線形性を考慮した最適レギュレータ制御則で振り上げを行い、1入力2出力の非線形制御則で倒立安定化を行っている。ハイブリッド制御方式^[51,52]は、制御方式^[9]に似ているが、直線レールタイプの倒立振り子システムを制御対象として、振り上げに台車の移動幅を考慮した Bang-bang フィードフォワード制御と倒立安定化に線形状態フィードバック制御を施している。台車の移動距離を短く制限する手法^[81]では、振り上げに対して一定の加速度で台車を左右に同じ時間間隔で駆動する非線形制御器と、倒立安定化に対してサイクルを設けて各サイクルに振子の最初の状態に基づいて制御動作を決めるもう一つの非線形制御器を開発しているが、振り上げ開始から安定化まで約 15.0 秒間もかかっている。これらの手法はいずれも、倒立振り子システムの数学モデルを必要とする上に、振り上げ用制御器と安定化用制御器を別々に設計しなければならず、両制御器の切り替えを工夫しなければならないという問題がある。

また、複数ルールベース方式^[11]は、回転アームタイプの倒立振り子システムを制御対象とするが、振り上げ用にファジイルールベース二つと、倒立安定化用に振り子角度制御ファジイルールベース、ベースリンク位置制御ファジイルールベース、この二つのルールベースの出力を調停する合成ファジイルールベースを用いている。実際、ベースリンクの位置制御が完了するまで 5.0 秒間以上かかっている。ニューロ PID 制御方式^[69]では、専用のファジィ制御器で振子を振り上げて、システムヤコビアンに基づいたニューロで PID 制御器の諸係数を調整するニューロ PID 制御器で倒立振り子システムの安定化を行っているが、振り上げ開始から約 9.0 秒ほどで倒立振り子システムの安定化を実現している。誤差逆伝播学習法に基づいたニューラルネットワーク方式^[72]では、回転アームタイプの倒立振り子システムを制御対象として、制御目標に到達するまでの中間状態を生成する仮想目標関数を学習したニューラルネットワークを振り上げと倒立安定化に対してそれぞれ 1 個ずつ用意しているが、ベースリンクの位置制御に定常誤差が残っている。人間の制御戦略に基づいたアプローチ^[88]では、予見ファジィ制御器で振子の振り上げを行い、台車に関するファジイルールベースによる仮想目標角度を考慮した振り子に関するファジイルールベースで操作量を推論することによって倒立振り子システムの安定化を図っているが、倒立振り子システムが安定化されるまで 6.0 秒間以上かかっている。これらの手法も、振り上げ用制御器と安定化用制御器を個別に設計する必要があり、両制御器の切り替えを明確に決めなければならない。

後者として、ニューラルネット駆動型ファジィ推論法^[12]では、ニューラルネットワークの誤差逆伝播学習法を用いて入出力データから制御用ファジイルールの前件部のメンバーシップ関数と後件部の入出力関係を同定することができるが、倒立振り子システムを制御するときには手動操作で入出力データを収集してその中から教師データを抽出する作業が必要である。台車に関する 49 個のファジイルールから仮想目標角度を導出しそれを振り子に関する 49 個のファジイルールの入力に組み込むアプローチ^[43,44]では、振り子角度のメンバーシップ関数の飽和性を利用して振子を励振または加振させることによって振り上げを可能にし、その二つのルールベースで安定化を行っているが、振り上げ開始からの安定化時間が約 10.0 秒ほどかかっている。微分幾何学的アプローチの場合^[57,58]は、倒立振り子システムの数学モデルに対して座標変換と入力変換により線形近似システムを作り、最適制御理論により振り上げおよび安定化の制御則を導出している。しかし、振り子と台車が持続振動し、倒立振り子システムが安定化されるまで 10.0 秒以上必要である。ファジィシーケンシャル方式^[79]では、わずか 3 個のファジイルールを切り替えることによって振子の振り上げと倒立振り子システムの安定化を可能にしている。しかし、ファジイルールの後件部にセットされている線形状態フィードバックベクトルが、倒立振り子システムの数学モデルに基づいて求めなければならない。ランダム最適探索法に基づいたニューラルネットワーク方式^[83]では、一つの 3 層ニューラルネットで振子の振り上げおよび倒立振り子システムの安定化

がともに図れるが、振り上げ開始から倒立安定になるまで 6.0 秒以上の時間がかかっている。操作量の選択肢として三つを用意し、振子のエネルギー関数に基づいて探索ルートを順次決めていく木探索による制御手法^[85]では、振り上げ開始から約 8.0 秒間で倒立振り子システムが安定化されているが、台車のレール原点からの最大移動量が 3.000m を越えているほか、操作量の選択肢を増やすと探索区間が指数的に増加する問題が生じる。

第 6 章では、SIRMs 動的重視度結合型ファジィ推論モデルを倒立振り子システムの安定化制御に適用し、4 入力項目を有するシステムにおいても有効であることを示すとともに、短時間で倒立振り子システムを安定化させることができることを示した。そこで本章では、SIRMs 動的重視度結合型ファジィ推論モデルを倒立振り子システムの振り上げおよび安定化制御にも適用し、振り上げおよび安定化ファジィ制御器^[96,98]を構築する。

倒立振り子システムの四つの状態変数を入力項目として台車への駆動力を出力項目とする。第 6 章の安定化ファジィ制御器の場合と同じように、各 SIRM すなわち単一入力ルール群の前件部変数として対応する入力項目を使用するが、各動的重視度の変動量変数のファジィルールの前件部変数としてはすべて振子の角度の絶対値を用いる。これによって、振子の角度制御と台車の位置制御を並列的に実行することを可能にし、しかも振子の角度制御を台車の位置制御より優先的に行うことを可能にする。また、振子の角度を $[-180.000^\circ, 0.000^\circ]$ または $[0.000^\circ, +180.000^\circ]$ に変換する装置を加える。本ファジィ制御器は、振子の角度が $[-30.000^\circ, +30.000^\circ]$ にあるときに第 6 章の安定化ファジィ制御器とまったく同じになり、振子が垂下領域にあるときには振子角度のメンバーシップ関数の飽和特性により自動的に振り上げ制御器になることを示す。制御パラメータである各動的重視度の基本値と変動幅を設定するにあたって考慮すべき事項を述べ、ランダム最適探索法^[4,83]による制御パラメータのチューニング手法を提示する。3 種類の倒立振り子システムに対して振り上げおよび安定化制御シミュレーションを行い、本ファジィ制御器が振子の振り上げから系全体の安定化までをすべてスムーズにカバーし、しかも 4.0 秒以内に倒立振り子システムを垂下状態から倒立安定化させることができることを示す。

7.2 倒立振り子システム

ここで取り扱う倒立振り子システムは図 7-1 のように、直線レール、レール上を左右に動く台車、その台車の上の支点を通じてレールと同じ平面を 360° 回転できる振り子、台車を左右に動かす駆動系から構成される。振り子の質量が均一分布し、摩擦が一切無視できるとすれば、倒立振り子システムの運動方程式^[5,22,34,45,63,75,82]は、

$$\alpha = \frac{(m_c + m_p)g \sin \theta - \{f + m_p l_p \omega^2 \sin \theta\} \cos \theta}{\{4/3(m_c + m_p) - m_p (\cos \theta)^2\} l_p} \quad (7-1)$$

$$a = \frac{4/3\{f + m_p l_p \omega^2 \sin \theta\} - m_p g \sin \theta \cos \theta}{\{4/3(m_c + m_p) - m_p (\cos \theta)^2\}} \quad (7-2)$$

で表される。

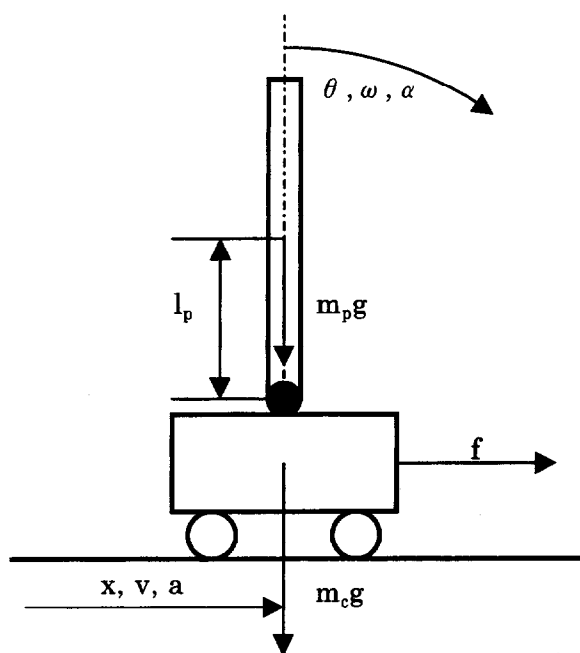


図 7-1 倒立振り子システムの構成図

ただし、 m_c と m_p はそれぞれ台車と振子の質量（単位 kg）を表し、 $g=9.8\text{m/s}^2$ は重力加速度である。 l_p は振子の重心から支点までの長さ（単位 m）であるが、振子の半分の長さに等しい。また、変数 θ 、 ω 、 α はそれぞれ振子の鉛直方向に対する角度、角速度、および角加速度を表し、矢印の方向を正とする。変数 x 、 v 、 a はそれぞれレールの原点に対する台車の位置、速度、および加速度を意味し、矢印の方向を正とする。変数 f は台車に加わる駆動力（単位 N）であり、右方向を正とする。なお、変数 θ 、 ω 、 x 、 v が倒立振り子システムを記述する四つの状態変数になり、オイラー法によって求められる。（詳細は、6.2 を参照）。

7.3 振り上げおよび安定化ファジィ制御器

すでに 7.1 で述べたようにここでいう倒立振り子システムの振り上げおよび安定化制御とは、垂下位置から振子を短時間で振り上げて安定に倒立させ、しかも台車を速やかにレール上の指定位置に移動させることである。台車の実際位置からその指定位置を引いたものを新しい台車の位置として用いればよいので、以下では一般性を失うことなくレールの原点を台車の目標位置とする。したがって、振り上げおよび安定化制御は各状態変数の目標値がすべてゼロである一種のレギュレータを求めることであると考えられる。

ここでは、振子の角度の安定化範囲すなわち倒立領域を -30.000° から $+30.000^\circ$ までとして、台車の移動範囲を -2.400m から $+2.400\text{m}$ まで^[5,75]とする。台車が上記範囲を超えた場合、制御は失敗したと見なす。そして、6.4 で述べたように四つの入力項目のスケーリングファクタをそれぞれ 30.000° 、 $100.000^\circ/\text{s}$ 、 2.400m 、 1.000m/s に設定し、出力項目のスケーリングファクタを振子と台車の総質量の 10.0 倍に設定する。

倒立振り子システムの振り上げおよび安定化制御において、最終目標はシステムの倒立安定化であり、振り上げは振り倒立への手段に過ぎない。以下ではまず SIRM_s 動的重視度結合型ファジィ推論モデルによる倒立振り子システムの安定化ファジィ制御器を述べ、次にこの安定化ファジィ制御器が自然に振子の振り上げ制御器にもなることを示す。ただし、この安定化ファジィ制御器は 6.3 で設計したものと同じであるので、詳しい説明は省くことにする。

7.3.1 安定化ファジィ制御器

サンプリング時刻 kT において倒立振り子システムの四つの状態変数（振子の角度 θ と角速度 ω 、台車の位置 x と速度 v ）がそれぞれのスケーリングファクタで正規化されたものを入力項目 $x_i(k)$ ($i=1,2,3,4$) として、操作量すなわち駆動力 f が操作量のスケーリングファクタで正規化されたものを出力項目 $f(k)$ とする。SIRMs 動的重視度結合型ファジィ推論モデル^[93,108,111,114]に基づいて安定化ファジィ制御器を以下に構築する。

まず、各入力項目に対して SIRM を構築する。日常的経験より、振子の角度または角速度が正（負）値の場合、駆動力を正（負）にして台車をレールの右（左）方向に移動させれば、振子が負（正）の方向に回転し、角度または角速度が減少（増加）する方向に変化することがわかる。一方、台車の位置または速度が正（負）値の場合、正（負）の駆動力を台車に加えて台車をさらに右（左）方向に移動させることによって、振子をあえて負（正）の方向に少し倒す。そして、振子を倒立させることによって、台車の位置制御も間接に果たされる。したがって、各 SIRM を表 7-1 のように設定することができる。

表 7-1 各入力項目の単一入力ルール群 SIRM- i ($i=1,2,3,4$)

前件部変数 $x_i(k)$	後件部変数 $f_i(k)$
NB	-1.0
ZO	0.0
PB	1.0

ただし、後件部変数 $f_i(k)$ ($i=1,2,3,4$) は、すべて出力項目 $f(k)$ に対応する中間変数である。また、前件部変数の各メンバーシップ関数 NB、ZO、PB は図 7-2 に三角形ないし台形で定義している。ここで、メンバーシップ関数 NB と PB に飽和領域（すなわち -1.0 以下または +1.0 以上の入力項目に対応するメンバーシップ関数値 1.0 の部分）を設けることに注意を要する。これは、安定化制御においては状態変数の絶対値がスケーリングファクタ以上になったときにその部分を吸収させ、振り上げ制御においては垂下領域にある振子を初期励振そして加振させるためである。

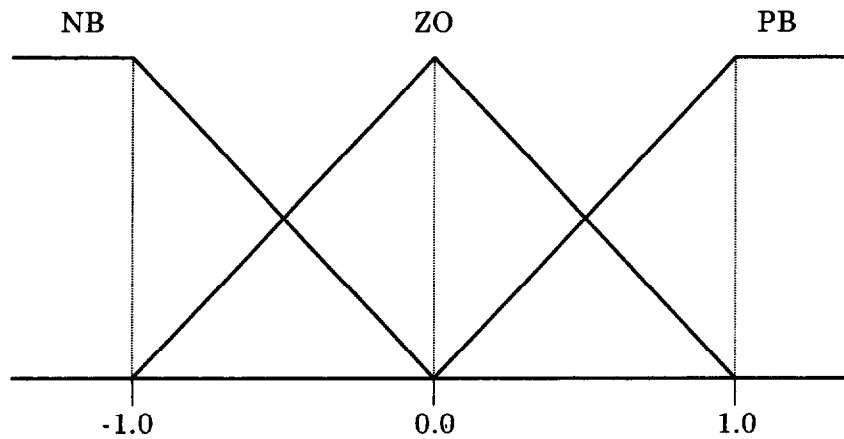


図 7-2 各入力項目のメンバーシップ関数

しかし、台車の位置制御を優先的に行うと振子の角度制御ができなくなるので、振子を立たせた後台車の位置制御を行うようにしなければならない。これを可能にするには、動的重視度を利用する。サンプリング時刻 kT における各入力項目の動的重視度 $w_i^D(k)$ ($i=1,2,3,4$) は、

$$w_i^D(k) = w_i + B_i \cdot \Delta w_i^0(k) \quad (7-3)$$

で定義される。基本値 w_i は対応する入力項目の定常状態時における必要な働きを保証し、変動幅 B_i と変動量変数 $\Delta w_i(k)$ の推論値 $\Delta w_i^0(k)$ からなる変動値 $B_i \cdot \Delta w_i^0(k)$ はその入力項目の影響の度合いを制御状況に応じて調整する役割を持つ。

振子の角度の絶対値が大きい場合、振子を速やかに鉛直方向に回転させなければ振子が倒れてしまうので、振子の角度と角速度の重視度を大きくして角度と角速度の影響力を強化しなければならない。しかし、振子の角度の絶対値がゼロに近いすなわち振子がほぼ倒立している場合には、倒立状態の安定化を図るため、振子の角度と角速度の重視度を小さくして角度と角速度の影響力を弱める必要がある。したがって、角度と角速度の動的重視度の変動量変数に関するファジィルールを、表 7-2 のように正規化後の角度の絶対値を前件部変数として構築することができる。ただし、メンバーシップ関数 DS、DM、DB は図 7-3 に三角形ないし台形として定義している。

表 7-2 振子の両変動量変数に関するファジィルール

前件部変数 $ x_1(k) $	後件部変数 $\Delta w_i(k) (i=1,2)$
DS	0.0
DM	0.5
DB	1.0

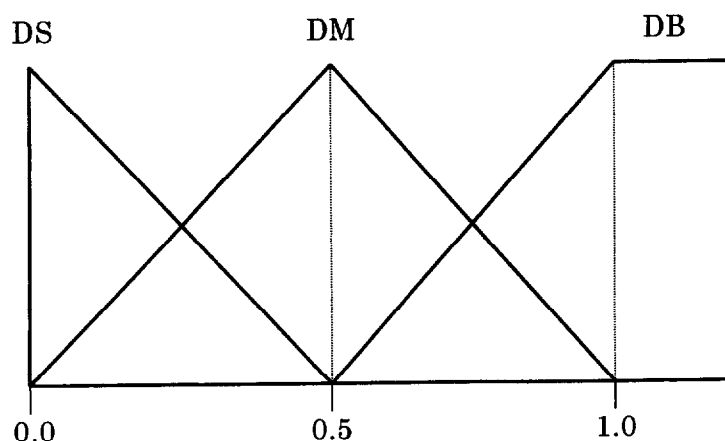


図 7-3 角度の絶対値のメンバーシップ関数

一方、倒立振子システムの安定化を図るには、台車の位置制御に比べて振子の倒立制御を優先に行わなければならない。振子が倒立状態から大きく倒れたとき、振子の角度制御を直ちに行わなければいけないので、台車の位置と速度の重視度を小さくして振子の角度制御に重点を置く。振子がほぼ倒立であるとき、その倒立状態を維持するだけでよいので、台車の位置と速度の重視度を少し大きくして振子の安定化を図るとともに台車の位置制御を行う。そこで、台車の位置と速度の動的重視度の変動量変数について、表 7-3 のように振子の角度の絶対値を前件部変数とするファジィルールテーブルを作成できる。なお、メンバーシップ関数 DS、DM、DB は同じく図 7-3 の通りである。

表 7-3 台車の両変動量変数に関するファジイルール

前件部変数 $ x_i(k) $	後件部変数 $\Delta w_i(k)$ ($i=3,4$)
DS	1.0
DM	0.5
DB	0.0

表 7-2 と表 7-3 の後件部の実数値の順序がちょうど反対になっている。これによって、振子の角度の絶対値が大きいときに、振子の角度と角速度の変動量変数が大きな値を取るが、台車の位置と速度の変動量変数が小さな値しか出せない。逆に振子の角度の絶対値が小さいときに、振子の角度と角速度の変動量変数の推論値が小さいが、台車の位置と速度の変動量変数の推論値が大きくなる。この結果、振子の角度が大きいときに振子の角度制御を優先して、振子がほぼ倒立しているときには倒立状態を安定させながら台車の位置制御を行うことが可能になる。

最後に、サンプリング時刻 kT において、各動的重視度の値が求められ、しかも各 SIRM の推論値 $f_i^0(k)$ ($i=1,2,3,4$) が得られたとすれば、本ファジィ制御器の最終出力 $f(k)$ は、各 SIRM の推論値の動的重視度付き総和

$$f(k) = \sum_{i=1}^4 f_i^0(k) \cdot w_i^D(k) \quad (7-4)$$

として計算される。この出力値に操作量のスケーリングファクタを乗じたものは、実際に台車に施す駆動力になる。

7.3.2 振り上げ制御器

図 7-1 からわかるように、振子が垂直倒立しているときに、振子の角度を 0.000° と定義している。また、時計回りを振子の角度の正方向としている。この設定で、振子が倒立位置から時計回りに回転すれば、振子の角度は 0.000° から増大していく。そして、振子がそのまま垂下位置になるときに、振子の角度はちょうど $+180.000^\circ$ になる。その位置から振子がさらに時計回りに回転し続ける場合には、ここではその角度を倒立位置から逆時計周りに沿って負の値として測ることにする。同様に、振子が倒立位置から逆時計回りに回転すれば、振子の角度は 0.000° から負の値に小さくなっていく。そして、振子が逆時計回りに回転して垂下位置になるときに、振子の角度はちょうど -180.000° になる。そこから振子がさらに回転を継続する場合は、今度はその角度を倒立位置から時計回りに沿って正の値として測ることにする。

つまり、振子の倒立位置と垂下位置の右部分と左部分をそれぞれ角度の正值と負値に対応させ、振子の角度を $[-180.000^\circ, 0.000^\circ]$ または $[0.000^\circ, +180.000^\circ]$ に変換する。このように、振子が垂下に位置するときの角度は $+180.000^\circ$ にもなるし、 -180.000° にもなる。しかし、振子が垂下に位置するときの振子の状態は、静止状態、時計回りに回転して垂下位置に到達する状態、逆時計回りに回転して垂下位置に到達する状態という 3 通りしかない。振子が垂下位置に静止するときの振子の角度を $+180.000^\circ$ と予め決めておくと、ほかの両状態のときの振子角度がすでに前段で述べたようにそれぞれ $+180.000^\circ$ と -180.000° であるので、垂下位置にある振子の角度の符号は一意に決まる。

一方、振子の角度のスケールリングファクタは 30.000° に設定している。ここで、振子の角度が倒立領域 $[-30.000^\circ, +30.000^\circ]$ 以外である場合に、7.3.1 の安定化ファジィ制御器の挙動を調べる。振子の角度が倒立領域 $[-30.000^\circ, +30.000^\circ]$ 以外になると、図 7-2 のメンバーシップ関数の定義により、振子の角度に対応する入力項目の値はメンバーシップ関数 NB または PB の飽和領域に入る。また表 7-1 から、振子の角度が $+30.000^\circ$ より大きい場合は、振子の角度に対応する SIRM においてメンバーシップ関数 PB 対応のファジィルールのみが発火し、（ほかの SIRM の出力がないとして）この SIRM より台車を右方向に移動させる駆動力が発生する。そして、台車が右方向に移動することによって、振子の角度が倒立位置から $+90.000^\circ$ 以内であれば振子に逆時計回りのトルクが生じるので振子は倒立に向かって逆時計回りに回転するが、振子の角度が $+90.000^\circ$ を越えていれば振子に時計回りのトルクが生じるので振子は時計回りに加振されることになる。同様に振子の角度が -30.000° より小さい場合は、振子の角度に対応する SIRM においてメンバーシップ関数 NB 対応のファジィルールしか発火しないので、台車を左方向に押す駆動力が発生する。そして、台車が左方向に動くことによって、角度が倒立位置から -90.000° 以内である振子に時計回りのトルクが現れるので振子は時計回りに回転して倒立していく

が、角度が -90.000° と -180.000° の間である振子に逆時計回りのトルクが現れるので振子は時計回りに加振されることになる。

振子の角速度がゼロであれば、上記の加振は初期励振になる。すなわち、振子が $[-90.000^\circ, +90.000^\circ]$ 以外の垂下領域にあれば、7.3.1 の安定化ファジィ制御器は振子を初期励振する。例えば、振子が垂下位置 ($+180.000^\circ$) に静止する状態で制御を始めると、振子が時計回りに初期励振される。しかし、振子は一旦励振されると回転し始めるので、角速度が零以外の値になる。垂下領域の振子が倒立位置に向かって回転する場合、振子の角速度が角度と異なる符号を持つので、振子の角速度に対応する SIRM は振子の角度に対応する SIRM と符号の相反する推論値を出して、台車を動かす駆動力を弱める。その結果、角速度の符号が変わらなければ振子は倒立されていくが、角速度の符号が反対に変われば振子は垂下位置に倒れていく。つまり、振子が垂下位置に向かって回転することから、振子の角速度は角度と同じ符号を持つ。この場合、振子の角速度に対応する SIRM は振子の角度に対応する SIRM と同じ符号の推論値を出力し、台車を動かす駆動力を一層大きくする。その結果、振子は角度の符号が変わるまで垂下位置を境にして駆動力の符号と反対方向に一段と加振され続ける。

また、垂下領域の振子に対して、台車がレールの原点の右側に位置していれば、台車の位置に対応する SIRM の働きで台車を右方向に押す力が発生し、振子を時計回りに加振する。台車がレールの原点の左側にあれば、台車を左方向に移動する力が発生し、振子を逆時計回りに加振する。さらに、台車の速度についても、台車の速度が正であれば対応する SIRM の推論値が正になるので、台車が右方向に移動し、垂下領域の振子が時計回りに回転する傾向がある。台車の速度が負であれば対応する SIRM の推論値も負になるので、台車が左方向に移動し、振子が逆時計回りに回転する傾向がある。

このように振子の角度変換装置を追加し、振子角度のメンバーシップ関数の飽和特性と各 SIRM の定義および振子の角度制限を利用することで、7.3.1 の安定化ファジィ制御器は垂下領域にある振子に対して自動的に振り上げ制御器に変身し、振子を励振、加振する駆動力を生成することができる。振子は例えば左側に 1 回振られて倒立領域に到達できずに再び垂下領域に落ちる場合、今度は左方向の駆動力が生じるので、右側に加振されるようになる。そして、制御パラメータである動的重視度の各パラメータが適切に設定されていれば、振子は左右に次第に強く加振されるうちに振り上げられる。振子が振り上げられたら、今度は安定化制御器の機能を発揮し、倒立振子システムを安定化させる。

以上により、SIRMs 動的重視度結合型ファジィ推論モデルによる倒立振子システムの振り上げおよび安定化ファジィ制御器のブロック図を図 7-4 にまとめることができる。ただし、各入力項目と出力項目の正規化処理などの表示を省略している。倒立振子システムから四つの状態変数を出力するので、それを太線で表示している。その太線から PATD ブロックおよび振子角度以外のほかの三つの SIRM ブロックに細線でそれぞれ一つの状

状態変数が引き渡される。PATD (Pendulum Angular Transformation Device) ブロックは振子の実際角度を $[-180.000^\circ, 0.000^\circ]$ または $[0.000^\circ, +180.000^\circ]$ に変換する装置を表す。PATD ブロックの出力は振子角度の SIRM ブロックおよび各 DID ブロックに入力され利用されている。各 DID ブロックは対応する動的重視度を求める処理を表す。

6.3 の安定化ファジィ制御器の構成図 (図 6-4) と比べて、図 7-4 は PATD ブロックが増えている以外は図 6-4 とまったく同じである。PATD ブロックが振子の角度を変換する働きをするが、振子の角度は倒立領域 $[-30.000^\circ, +30.000^\circ]$ 以内であればそのまま何も処理されずに PATD ブロックを通過する。この場合、図 7-4 と図 6-4 は実質上まったく同じになる。以上の観点から、安定化ファジィ制御器の構成図または振り上げおよび安定化ファジィ制御器の構成図がともに図 7-4 に表現されていることになる。

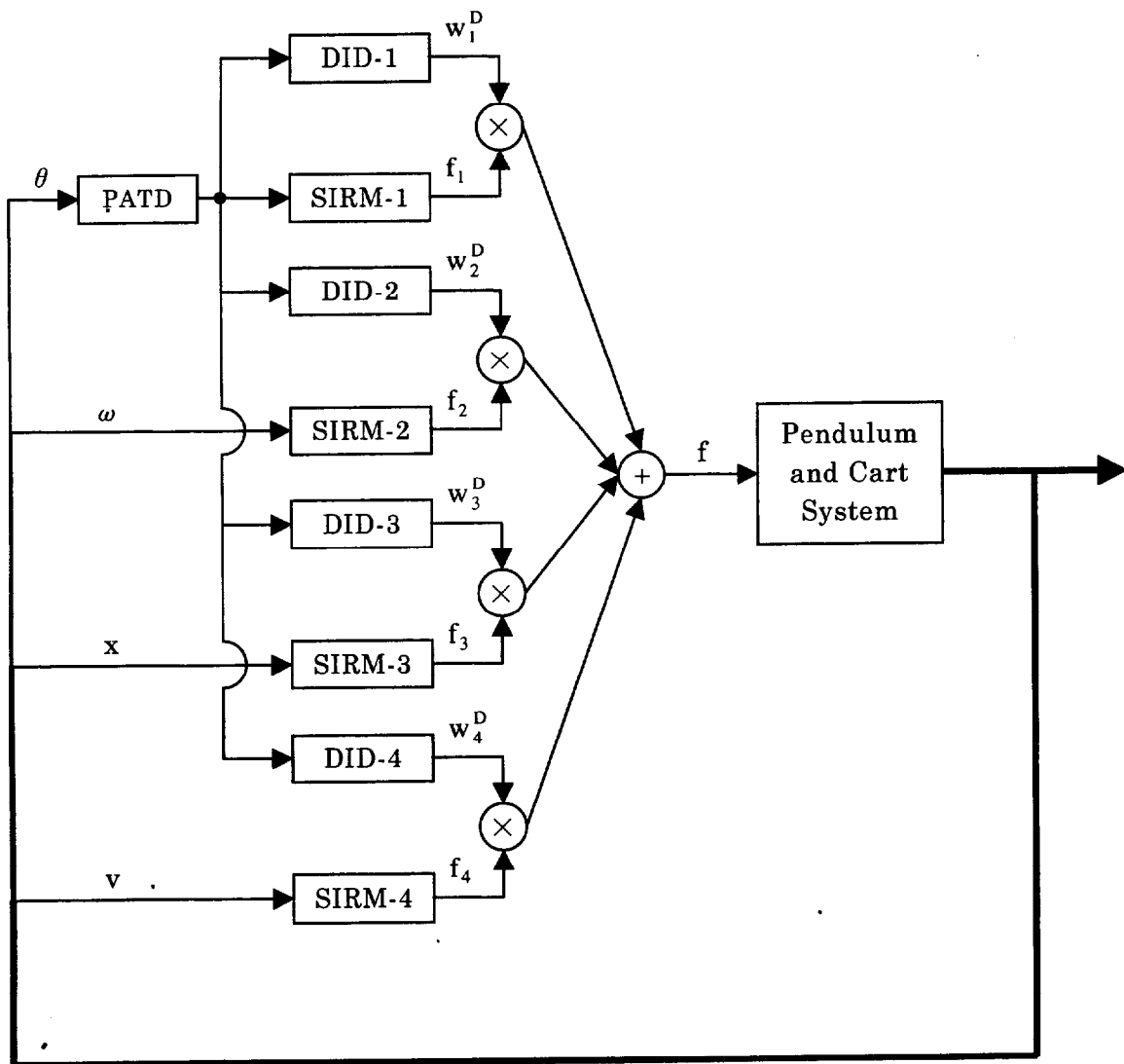


図 7-4 倒立振り子システムの振り上げおよび安定化制御器のブロック図

7.3.3 制御パラメータの設定

本振り上げおよび安定化ファジィ制御器の制御パラメータは、各入力項目の動的重視度の基本値と変動幅である。

振り上げおよび安定化制御の最終目的が倒立振り子システムの安定化であるので、倒立振り子システムを倒立安定させるには振り子の角度制御を台車の位置制御より優先的に行わなければならない。したがって、倒立領域において、振り子の角度と角速度の動的重視度を大きく設定する必要がある。つまり、この二つの入力項目の動的重視度の基本値と変動幅の和を大きくしなければならない。

一方、垂下領域においては、変動量変数のルールテーブル表 7-2 と表 7-3 からわかるように、振り子の両変動量変数の推論値がともに 1.0 になるのに対して、台車の両変動量変数の推論値がともに 0.0 になる。すなわち、台車の両動的重視度の変動幅が振り上げに関与しないので、その基本値を大きく設定すれば振り子を強く加振することができる。しかし、レールの長さが制限されているので、この場合台車は高速でレールの端へ移動してぶつかってしまう可能性が高い。しかも、その設定は倒立領域にも共通になることから、倒立安定化に振り子の角度制御が優先できなくなるような悪影響を与える恐れもある。したがって、倒立安定化とのバランスを考えて、台車の両動的重視度の基本値を大きく設定することはできない。振り子の両動的重視度の基本値と変動幅については、すべて大きく設定して振り子を強く振り上げることが考えられる。ただし、最大出力可能な駆動力が制御システムによって決まっており、規格以上の駆動力を出力することはできない。さらに、たとえ振り子が振り上げられたとしても、もしそのときほかの三つの状態変数（振り子の角速度、台車の位置と速度）がすでに大きくなって安定化制御器がそれを短時間内に吸収できなければ、台車がレールの端まで走ったり振り子が倒立位置を通過して再び垂下位置に戻ってしまうことが起こりうる。そして、倒立領域に振り上げられたときの台車の位置と速度をすばやく吸収するため、安定化制御を壊さない程度に台車の両動的重視度の変動幅を大きくする必要がある。

このようにこれらの制御パラメータを決めるのに、振り子の加振、システムの安定化、レールの長さの制限、最大駆動力などを含めて総合的に考慮しなければならないので、試行錯誤による設定は困難である。ここで、4.3 で説明したランダム最適探索法^[4,83]を用いて各基本値と変動幅を最適に選ぶことにする。振り上げおよび安定化制御の目的が四つの状態変数を短時間ですべてゼロにすることから、ランダム最適探索用の評価関数を、

$$\Phi = \sum_{k=1}^{SS} (|x_1(k)| + |x_2(k)| + |x_3(k)| + |x_4(k)| + \varepsilon \cdot |f(k)|) \quad (7-5)$$

のように定義することができる。これによって、本振り上げおよび安定化ファジィ制御器の四つの入力項目と一つの出力項目の絶対値の総和を一定時間間隔にわたって評価する。

式(7-5)において、 $x_i(k)$ ($i=1,2,3,4$) はスケーリングファクタで正規化された四つの入力項目であり、 $f(k)$ はスケーリングファクタで正規化された出力項目である。パラメータ ε は出力項目の大きさを調整する重み係数である。 ε を大きく設定することによって、この評価関数における出力項目の割合が増加するので、ランダム最適探索を通じて出力項目の最大値および全消費エネルギーを抑制することが可能である。操作量したがって出力項目の最大値が予め与えられた場合には、最大値を超えないようにこの評価関数に出力項目の制約条件を追加すればよい。また、以下のシミュレーションでは 1 回の探索評価時間を最大 10.0 秒とするが、SS はそれに対応するサンプリングステップ数を表す。

実際には、振子が垂下位置に静止し台車がレールの原点に止まる状態である倒立振り子システムに対して、各基本値と変動幅の初期値をすべてゼロにセットしてランダム最適探索をスタートさせ、この評価関数の値が小さくなる方向に指定回数になるまで各制御パラメータをチューニングし続ける。

なお、式(7-5)が安定化制御のみの場合の評価関数(6.6.1の式(6-10))と異なっていることに注意する必要がある。式(6-10)が正規化前の四つの状態変数と操作量の値を直接評価しているのに対して、式(7-5)では正規化後の四つの入力項目と1つの出力項目を評価している。

振り上げおよび安定化制御の場合においても、式(6-10)のように直接各状態変数および操作量を評価する方法を用いると、振子が垂下位置に静止し台車がレールの原点に止まる初期状態に対してランダム最適探索がほとんど進まない状態に陥ってしまう。それは、この初期状態がちょうどその評価関数の極小点に対応しているからと考えられる。この場合、振子の角度(ラジアン単位)が最大であるがほかの状態変数の値がゼロであるので、その評価関数の値は小さい。振子が加振されると、振子の角度が小さくなるもののほかの状態変数の値が大きくなるので、その評価関数の値はかえって大きくなる。その結果、探索がなかなかその極小点から抜け出すことはできない。

振り上げおよび安定化制御の場合の評価関数を式(7-5)のように定義すると、例えば振子の角度に対応する入力項目は、この式において最大 6.0 になる。振子の角度が式(6-10)において最大約 3.14 であるので、振子の角度に対応する入力項目が式(7-5)において占める割合は増加する。一方、正規化のため、台車の位置に対応する入力項目の評価関数への寄与の度合いが変わらないが、振子の角速度と台車の位置に対応する入力項目の評価関数への寄与の度合いがともに減少する。したがって、垂下位置の初期状態よりもほかの状態のほうが式(7-5)の評価関数値を小さくする可能性が高くなるので、ランダム最適探索が行われやすくなる。

7.4 振り上げおよび安定化制御シミュレーション

7.4.1 シミュレーション用倒立振子システムモデル

ここでは、提案する振り上げおよび安定化ファジィ制御器の動作を検証し、これまで報告されている他手法と比較するため、表 7-4 に示す三つの倒立振子システムモデルを用いることにする。

この三つのモデルはそれぞれ、パラメータがほぼ明記されている文献^[88]、文献^[51,52]、文献^[43]の直線レールタイプの倒立振子システムに対応し、振子の長さの順に並べている。ただし、摩擦を一切無視し、振子の質量を均一分布としている。表 7-4 からわかるように、この三つのモデルは、振子の質量、振子の全長、台車の質量がそれぞれ大きく異なり、シミュレーション例として妥当なものとする。なお、下線がついているパラメータの値は、対応する文献に記されていないので、ここでは適切と考えた値に選んでいる。

表 7-4 各倒立振子システムモデルのパラメータ一覧表

モデル名	パラメータ名	値
モデル 1	振子の質量	0.0410 kg
	振子の全長	0.2400 m
	台車の質量	<u>0.1000</u> kg
	サンプリング周期	0.0100 s
モデル 2	振子の質量	0.1600 kg
	振子の全長	0.5000 m
	台車の質量	0.4800 kg
	サンプリング周期	<u>0.0100</u> s
モデル 3	振子の質量	0.0245 kg
	振子の全長	1.0000 m
	台車の質量	0.0600 kg
	サンプリング周期	<u>0.0100</u> s

そして、評価関数においてパラメータ $\varepsilon=0$ を選ぶ。パラメータ $\varepsilon=0$ は、ランダム最適探索において本ファジィ制御器の出力項目を評価しないことを意味する。この場合、操作量の最大値が無制限となり、必要に応じて大きくなってよいことになる。

モデル 1 とモデル 2 について、ランダム最適探索法で 50,000 回チューニングして、結果がそれ以上ほとんど変化しないのでそこで探索をうち切ることになっている。モデル 3 については、50,000 回の探索で振り上げおよび安定化が達成されるが、完全安定になるまで時間がかかるので、最終的に 500,000 回まで探索を行うことにしている。表 7-5 に各モデルについての探索後の各動的重視度の基本値と変動幅を示している。

表 7-5 ランダム最適探索法による制御パラメータ

モデル名	入力項目	基本値	変動幅
モデル 1	振子の角度	4.8836	5.0320
	振子の角速度	4.4618	3.6337
	台車の位置	1.4321	3.0385
	台車の速度	0.0395	2.0676
モデル 2	振子の角度	1.4390	3.5118
	振子の角速度	1.2738	1.5383
	台車の位置	0.1830	0.3404
	台車の速度	0.5283	0.0038
モデル 3	振子の角度	6.1584	2.9204
	振子の角速度	5.2056	0.0131
	台車の位置	2.3044	0.8732
	台車の速度	0.0000	1.3823

表 7-5 からわかるように各モデルについて、振子の角度に対応する動的重視度の基本値は振子の角速度に対応する動的重視度の基本値と同程度になっており、振子の角度に対応する動的重視度の変動幅は振子の角速度に対応する動的重視度の変動幅より大きくなっている。そして、振子の角度に対応する動的重視度の基本値と変動幅の和は、振子の角速度に対応する動的重視度の基本値と変動幅の和より大きくなっている。

また、振子の両動的重視度の基本値に比べて、台車の両動的重視度の基本値はかなり小さくなっており、しかも台車の速度に対応する動的重視度の基本値はゼロ近くになる傾向が見受けられる。台車の速度に対応する動的重視度は基本値がほぼゼロであれば、変動幅がある程度の値を持つ。台車の位置に対応する動的重視度の基本値と変動幅の和は、台車の速度に対応する動的重視度の基本値と変動幅の和より大きくなっている。

さらに、振子の両動的重視度のそれぞれの基本値と変動幅の和はいずれも、台車の両動的重視度のそれぞれの基本値と変動幅の和よりかなり大きくなっている。しかも、振子の各動的重視度の基本値だけでも、台車の両動的重視度のそれぞれの基本値と変動幅の和と同じあるいはそれ以上に大きくなっている。これは、本ファジィ制御器が振子の振り上げ制御も行うが、振子の角度制御を制御開始から制御終了まで終始優先的に行うことを意味する。また、台車の動的重視度の変動幅が振り上げ制御に影響しない上に、台車の動的重視度の基本値が振子の各動的重視度の基本値に比べて半分以下になっているので、台車の両動的重視度は振子の振り上げ制御にあまり影響せず、主に倒立振子システムの安定化制御に貢献するとも考えられる。

7.4.2 シミュレーション結果

まず、各モデルについてランダム最適探索法で求めた表 7-5 の制御パラメータを用いて、振子の初期角度が 30.000° であり他の状態変数の初期値がすべてゼロである初期状態に対して安定化制御のみを行う。図 7-5 にそれぞれの制御シミュレーション結果を示す。比較のため、6.6.1 の表 6-5 と表 6-6 の安定化制御パラメータによる制御結果を図 7-6 に示している。この場合いまでもなく、振子の長さによって、モデル 1 とモデル 2 の安定化制御は表 6-6 の制御パラメータで行われ、モデル 3 の安定化制御は表 6-5 の制御パラメータで行われている。なお、操作量の時間応答の表示を省いている。

表 7-6 完全安定化までかかる時間の比較

モデル名	表 7-5	表 6-5 と表 6-6
モデル 1	5.1s	4.6s
モデル 2	8.9s	5.0s
モデル 3	8.5s	5.9s

表 7-5 および表 6-5 ないし表 6-6 の制御パラメータで各倒立振子システムモデルが制御開始から完全に安定化されるまでに必要な時間を表 7-6 に記している。なお、完全安定化とは、6.5.2 で定義したように倒立振子システムの四つの状態変数の値が同時にそれぞれ 0.100° 、 $0.100^\circ/\text{s}$ 、 0.010m 、 0.010m/s 以内に収まっている状態を指す。表 7-6 からわかるように、表 7-5 の制御パラメータによる安定化制御では完全安定化まで時間がかかり、

しかもそれが振子の長さに伴って増大する傾向がある。これは、表 7-5 の制御パラメータが振子の振り上げ制御も兼ねなければならないので、振り上げ制御と安定化制御を妥協した結果となり、安定化制御を多少犠牲にしているからと考えられる。

また、図 7-6 から、倒立振子システムは短時間内で完全安定化できるだけでなく、振子が初期部分を除いて左右に 1 回振るだけで完全に倒立され、台車が一旦原点を離れていくがオーバーシュートなしに原点に戻されていることがわかる。図 7-5 では、モデル 1 とモデル 3 について振子が倒立位置に対して 2 回ほど振動し、台車がレールの原点に対して往復する傾向が見られる。さらに、台車の移動距離を注目すると、表 7-5 による安定化制御では台車の原点からの最大移動距離が表 6-5 または表 6-6 による安定化制御の場合ほど長くないことがわかる。モデル 1 とモデル 3 について、表 7-5 のように台車の両重視度の基本値と変動幅の総和と振子の両重視度の基本値と変動幅の総和との比 0.268 と 0.242 が、それぞれ表 6-6 の場合の 0.205 と表 6-5 の場合の 0.173 に比べて大きくなっているため、台車の位置制御の影響が強くなり、台車を早くレールの原点へ戻すことによって最大移動量が抑えられている。モデル 2 については、表 7-5 のように制御パラメータの総和 8.818 が表 6-6 の 10.332 より小さいので、最大操作量が相対的に小さくなる結果、台車の最大移動量が小さく抑えられている。しかも、モデル 2 の場合、振子の動的重視度の制御パラメータに比べて台車の動的重視度の制御パラメータが非常に小さくなっているため、台車は振子の倒立に向けて緩やかに移動する。その結果、振子の振動が抑えられるが、台車がゆっくりと原点に戻ることになる。

次に、台車がレールの原点に停止し振子が垂下位置に静止する初期状態に対し、表 7-5 の制御パラメータを使って倒立振子システムの振り上げおよび安定化制御を行う。図 7-7、図 7-8、図 7-9 は順にこの三つのモデルについての制御結果を示している。各図の(a)、(b)、(c)はそれぞれ振子の角度と角速度の時間応答、台車の位置と速度の時間応答、およびそのときの操作量の時間応答を示している。また、Plant(0.041, 0.120, 0.100, 0.010)の括弧中の各値は順に振子の質量、振子の半分の長さ、台車の質量、サンプリング周期を意味する。なお、振子角度の時間応答図において、振子の角度の連続変化をわかりやすく表示するため、垂下位置から逆時計回りに倒立位置までの角度を $[180.000^\circ, 0.000^\circ]$ に、さらに逆時計回りに倒立位置を越えた場合には振子の角度を $[-45.000^\circ, 0.000^\circ]$ のように表示するのに対して、垂下位置から時計回りに倒立位置までの角度を $[180.000^\circ, 360.000^\circ]$ に、さらに時計回りに倒立位置を越えた場合には振子の角度を $[360.000^\circ, 405.000^\circ]$ のように表示している。

図 7-7 からわかるように、制御開始時振子の角度が $+180.000^\circ$ であるので、本ファジィ制御器により台車を右方向に駆動する操作量が発生し、振子が時計回りに初期励振される。そして、制御開始から数サンプリングステップが経過したとき、操作量は最大値約 26.0N に達し、振子を時計回りに一層強く加振する。振子と台車が軽くて、しかも振子が短いた

め、振子は負の角度（図においては $[180.000^\circ, 360.000^\circ]$ に対応する）と正で大きな角速度を持つようになる。このとき、振子の角度と角速度に対応する SIRM の推論値がそれぞれ -1.0 と $+1.0$ になり、振子の両変動量変数の推論値がともに $+1.0$ になる。そして、すでにレールの原点の右側にある台車はさらにレールの右側に移動しようとするが、両基本値が振子の角度の基本値に比べて小さいため、その影響力が操作量にあまり現れない。しかも、振子の角度の基本値と変動幅の和が角速度の基本値と変動幅の和より大きいので、操作量は負に転じて台車を左方向に押すようになる。その結果、台車は依然右方向に移動するが、移動速度が減少し始める。それに伴って、振子の角速度も減少するがその値がまだ正であるので、振子はその勢いで振り上げられようとする。そして、台車の移動速度が負に変わって、台車が原点に向かって移動する。その時、振子がすでに $[-90.000^\circ, +90.000^\circ]$ の領域に振り上げられているので、振子の角速度は再び増大する。台車の速度の基本値がゼロに近いので、台車の速度が負で大きくなるにもかかわらず、操作量はあまり変化しない。振子が倒立位置に対して倒立領域 $[-30.000^\circ, +30.000^\circ]$ に入ると、振子の角度に対応する SIRM の推論値は -1.0 と 0.0 の間になるのに対して、振子の角速度に対応する SIRM の推論値はまだ $+1.0$ のままである。振子の角度は基本値と変動幅がともに大きいため、操作量への寄与が急速に減る。結果として、振子の角速度が支配的になり、操作量が正に増加するので、台車の速度は負で大きな値からゼロ近くに変化し、振子の角速度も減少する。それから振子の角速度は角速度のスケーリングファクタに対応する $[-100.000^\circ/\text{s}, +100.000^\circ/\text{s}]$ の範囲に入れば操作量に与える影響が逆に弱くなるので、操作量は再び減少し始める。そして、振子がほぼ安定に倒立されれば、振子の角度と角速度の操作量への寄与部分はほぼゼロになるのに対して、台車の位置と速度による操作量への寄与部分は相対的に大きくなる。この場合、台車の位置（正）と台車の速度（負）の符号がちょうど反対であるが、台車の位置の基本値と変動幅の和が台車の速度の基本値と変動幅の和より大きいため、台車の位置に対応する出力が操作量において支配的になり、正で小さな操作量が台車に加わることになる。したがって、振子の倒立状態が保たれた状態で台車が減速しながらレールの原点にゆっくりと移動していく。最終的に、倒立振子システムは約 2.65 秒間で完全に安定化されている。

モデル 1 に比べて、モデル 2 では振子が倍以上長い、制御パラメータの総和が小さい。そのため、図 7-8 に示すように操作量が相対的に小さく、振子は時計回りに初期励振された後その勢いで倒立領域に達することができず、再び垂下領域に戻される。垂下位置に戻るまでに今度は最大約 55.0N の操作量で逆時計回りに加振されるので、振子は逆時計回りに回転して倒立領域に到達している。その時、振子が倒立に向かって逆時計回りに回転し、台車が負の位置から原点に向かって移動するが、振子の角速度と台車の速度の値がともにまだ大きいので、振子と台車はそれぞれ倒立位置とレールの原点に停まらずに通っていき、その結果、振子角度の時間応答図および台車位置の時間応答図に示すように、

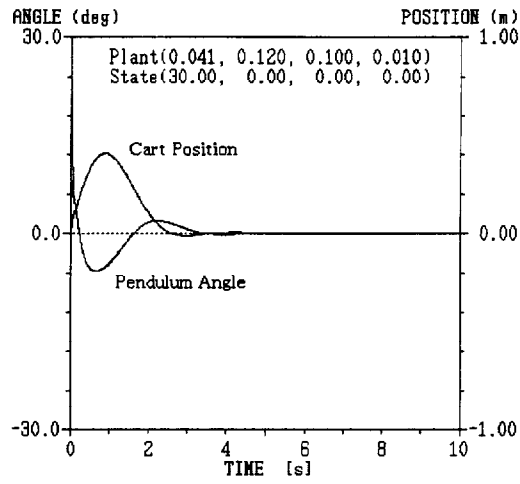
オーバーシュートが生じている。すなわち、倒立位置に振り上げられた振子は、その勢いで倒立位置を通過して反対側に少し倒された後、再び倒立位置に戻されている。それに対応して、台車もレールの原点を少し通り過ぎた後、再び原点に戻されている。しかし、オーバーシュートが起きたにもかかわらず、倒立振子システムは約 1.17 秒で完全に安定化されている。

モデル 3 は振子の長さがちょうどモデル 2 の場合の 2 倍である。図 7-9 のように、モデル 3 の振り上げおよび安定化制御の挙動はモデル 2 の場合に似ており、振子が時計回りに初期励振された後、逆時計回りに最大約 12.0N の操作量で加振されて倒立領域に到達している。倒立領域で同様に振子の角度の時間応答にオーバーシュートが発生し、台車の位置の時間応答にもオーバーシュートが少し起こっている。しかし、オーバーシュートはともに小さく、しかも短時間後なくなっている。倒立振子システム全体は約 3.93 秒間で完全に安定化できている。

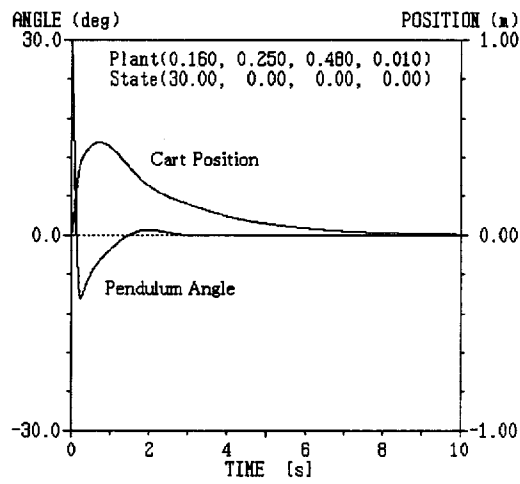
表 7-7 には、各モデルを振り上げおよび安定化するのに必要な最大操作量、制御開始から振子を倒立領域に振り上げるまでの振上時間、および制御開始からモデルを完全に安定化させるまでの安定化時間をまとめている。このように、どのモデルについても振子を垂下位置から約 0.5 秒ほどで振り上げることができ、各倒立振子システムを 4.0 秒以内に完全に安定化させることができることがわかる。

表 7-7 振り上げおよび安定化制御の結果

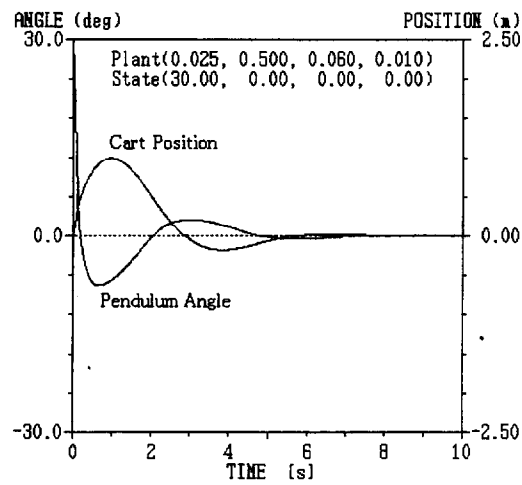
モデル名	最大操作量	振上時間	安定化時間
モデル 1	26.0N	0.26s	2.65s
モデル 2	55.0N	0.51s	1.17s
モデル 3	12.0N	0.51s	3.93s



(a) モデル 1 の場合

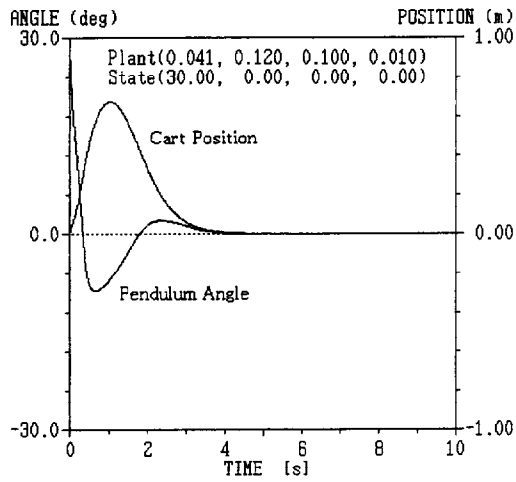


(b) モデル 2 の場合

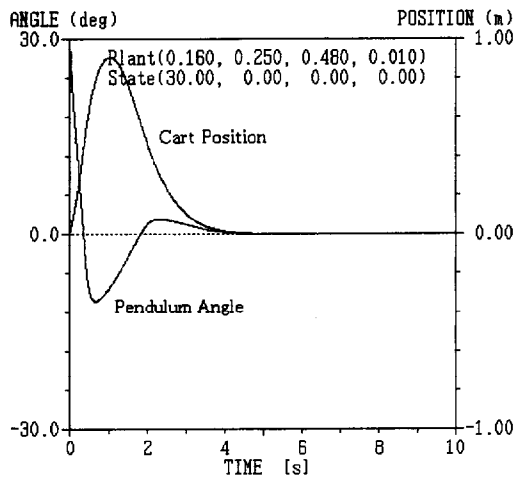


(c) モデル 3 の場合

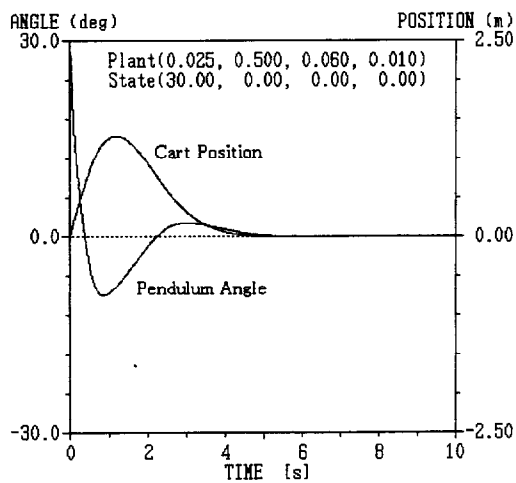
図 7-5 表 7-5 の制御パラメータによる安定化制御シミュレーション結果



(a) モデル 1 の場合

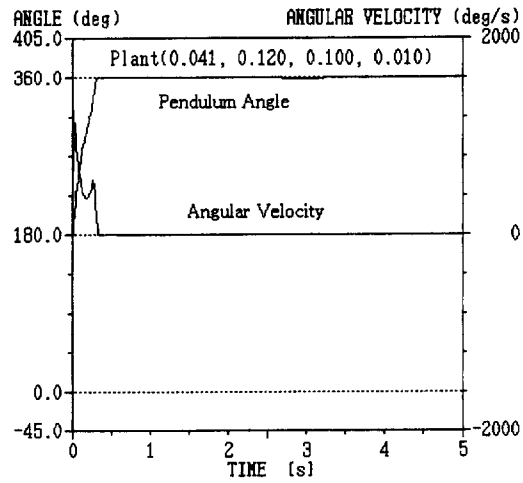


(b) モデル 2 の場合

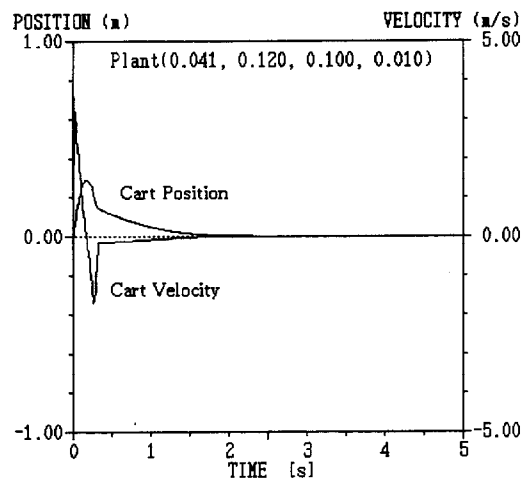


(c) モデル 3 の場合

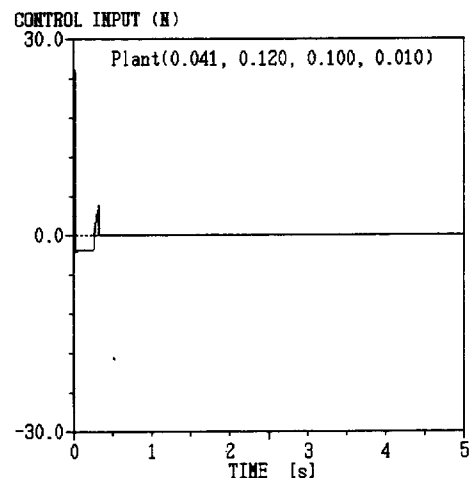
図 7-6 表 6-5 と表 6-6 の制御パラメータによる安定化制御シミュレーション結果



(a) 振子の角度と角速度の時間応答

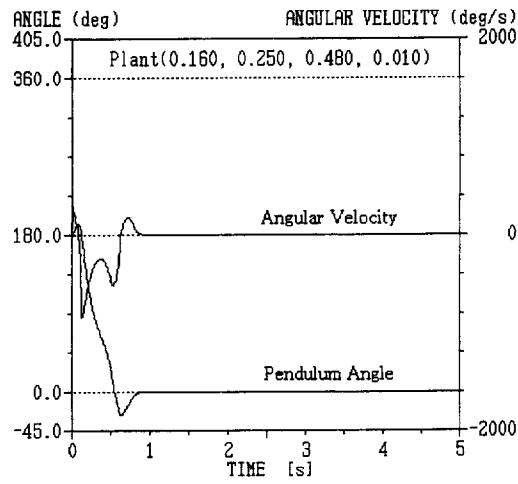


(b) 台車の位置と速度の時間応答

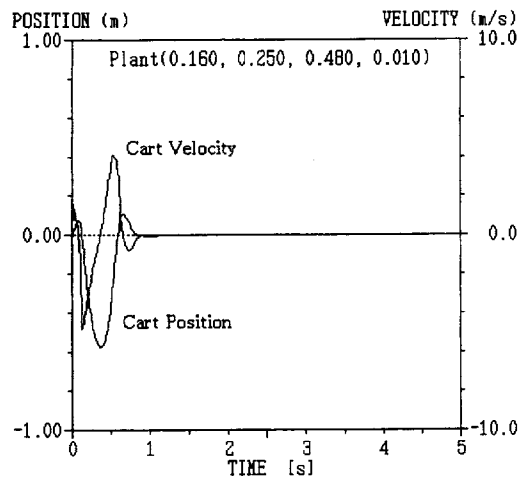


(c) 操作量の時間応答

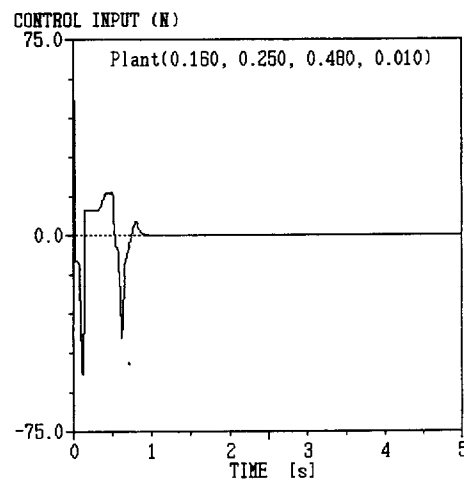
図 7.7 モデル 1 についての振り上げおよび安定化制御結果



(a) 振子の角度と角速度の時間応答

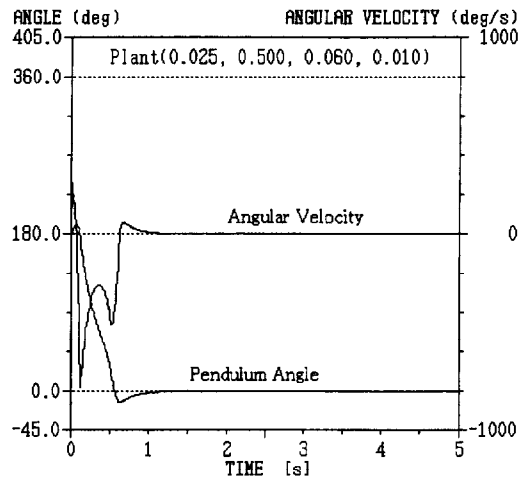


(b) 台車の位置と速度の時間応答

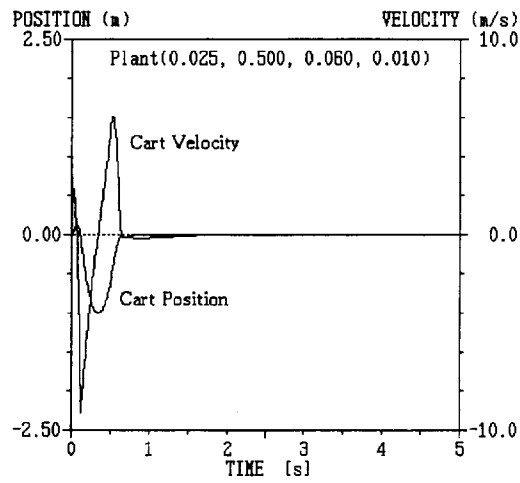


(c) 操作量の時間応答

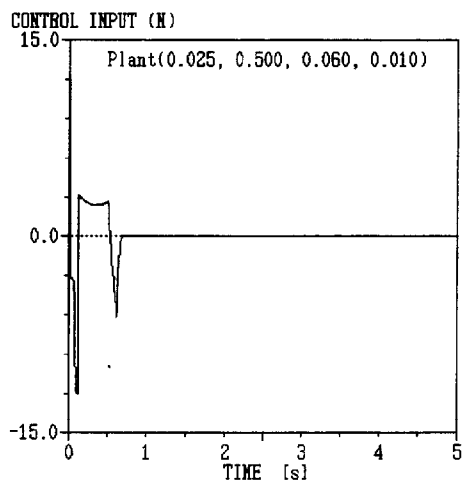
図 7-8 モデル 2 についての振り上げおよび安定化制御結果



(a) 振子の角度と角速度の時間応答



(b) 台車の位置と速度の時間応答



(c) 操作量の時間応答

図 7-9 モデル 3 についての振り上げおよび安定化制御結果

7.4.3 考察

a) スケーリングファクタ

第 6 章の倒立振り子システムの安定化制御と、本章の倒立振り子システムの振り上げおよび安定化制御においては、提案のファジィ制御器の入力項目と出力項目のスケーリングファクタをすべて統一するようにしている。それは、振り上げ制御問題と安定化制御問題がそれぞれ倒立振り子システムの異なる側面を捉える制御問題であり、振り上げ制御抜きでは倒立振り子システムの制御が完全とは言えないからである。この立場から、同じスケーリングファクタを利用することは適切であると考えられる。

しかし、倒立振り子システムによって最適なスケーリングファクタがそれぞれ存在し、しかも最適なスケーリングファクタは通常わからないため、あらゆる倒立振り子システムにとって最適である共通のスケーリングファクタを求めることは不可能である。そこで、第 6 章では参照用倒立振り子システムに対してスケーリングファクタを試行錯誤で設定し、それをほかの倒立振り子システムにも適用するようにしている。そして、それは、本章でもそのまま用いている。したがって、振り上げおよび安定化制御結果のさらなる改善を図り、あるいは最適な振り上げおよび安定化制御結果を得るには、まずそのスケーリングファクタが振り上げおよび安定化制御に適しているか否かを検証することが必要である。

b) 汎用性なしの制御パラメータ

第 6 章ですでに述べたように、表 6-4、または表 6-5、または表 6-6 は汎用性を持ち、パラメータの異なる倒立振り子システムを安定化させることができる。しかし、本章で求めた制御パラメータは、汎用性がほとんどなく、ランダム最適探索で学習したその倒立振り子システム以外のものを振り上げおよび安定化させることは不可能な場合も多い。また、振子の質量、台車の質量の変化に比べて、振子の長さの変化による影響も少し大きいように思える。これは、振子の固有周波数の差異によって振動特性が異なり、同じ制御パラメータを適用すると振子の角速度が全然違ってくることによるものと考えられる。

例えば、表 7-5 のモデル 1 の制御パラメータで、振子の質量を 0.041kg から [0.023kg、0.069kg] に変更しても、振動が発生し安定化時間も 9.0 秒ほどかかるが、振り上げおよび安定化制御は可能である。また、台車の質量を 0.100kg から [0.060kg、0.170kg] に変えても、8.0 秒前後で振り上げおよび安定化制御ができる。しかし、振子の長さを元の 0.120m から 0.132m に変更しただけで、振子が倒立領域に振り上げられるときに台車がレールの端にぶつかるので、振り上げおよび安定化制御は失敗してしまう。

また、初期状態について、垂下位置のときの状態しか学習していないので、垂下位置付近の初期状態に対して振り上げおよび安定化制御が可能である。しかし、振子が垂下位置から大きく離れた状態に対しては、台車を同じ方向に長時間に駆動して振子を加振することになるため、台車がレールの端に越えてしまう。これを解決する手法として、一定回数ごとに初期状態をランダムに変更してランダム最適探索を行うことが有効である。

c) ほかの倒立振子システムについて

なお、モデル 1 について、安信^[88]は 6.0 秒ほどかかって振子を数回振ってから振り上げおよび安定化を実現している。モデル 2 について、森ら^[51,52]の手法では本ファジィ制御器と同じ約 2.0 秒間で振り上げおよび安定化制御ができる。モデル 3 について、松浦^[43]の手法では振り上げおよび安定化制御を行うのに約 10.0 秒間必要である。

また、林ら^[12]のモデル、大住ら^[57,58]のモデルについても、パラメータ $\varepsilon=0$ としたランダム最適探索で求めた制御パラメータで振り上げおよび安定化制御を行っている。文献^[12]には振り上げからの安定化時間が記されていないが、文献^[57,58]では 10.0 秒以上かかって振子を左右に数回振ることによって振子を振り上げて倒立振子システムを安定化させている。これに対して、本提案ファジィ制御器では両モデルがそれぞれ約 3.1 秒間と約 2.5 秒間で振り上げおよび安定化できるという結果を得ている。

したがって、このように本提案手法は構造のシンプルさに加えて倒立振子システムを短時間内に振り上げおよび安定化することができることから、これまでの制御手法に比べて本提案手法の優位性が確認できる。

7.5 結言

本章では、SIRMs 動的重視度結合型ファジィ推論モデルを倒立振り子システムの振り上げおよび安定化制御に適用し、振り上げおよび安定化ファジィ制御器を構築した。本ファジィ制御器は、正規化後の倒立振り子システムの四つの状態変数を入力項目に選び、正規化後の操作量を出力項目に用いた。四つの入力項目に対して、四つの SIRM をまったく同じ形に設定した。四つの動的重視度の変動量変数のファジィルールに、すべて正規化後の振子の角度の絶対値を唯一の前件部変数とした。そして、振子の両動的重視度の変動量変数のファジィルールをちょうど台車の両動的重視度の変動量変数のファジィルールと相反するように設定した。これによって、振子の角度制御と台車の位置制御を並列に実行することが可能になり、しかも振子の角度制御を台車の位置制御より優先的に行うことが可能になった。

また、振子の実際の角度を $[-180.000^\circ, 0.000^\circ]$ または $[0.000^\circ, +180.000^\circ]$ に変換する装置を追加した。振子の角度のメンバーシップ関数が倒立領域 $[-30.000^\circ, +30.000^\circ]$ 以外に飽和領域を持つので、振子がこの飽和領域に現れるときに振子の角度に対応する SIRM が発火可能であり、角度の変換装置によって垂下領域にある振子を初期励振して加振することが可能であることを述べた。本提案のファジィ制御器は、振子の角度が倒立領域 $[-30.000^\circ, +30.000^\circ]$ にあるときには第 6 章の安定化ファジィ制御器とまったく同じになり、振子が垂下領域にあるときには振子の角度のメンバーシップ関数の飽和特性により自動的に振り上げ制御器になることを明らかにした。したがって、本ファジィ制御器は、振り上げ制御器と安定化制御器を一体化した、理解しやすい実用向けの制御器であるといえる。

さらに、制御パラメータである各動的重視度の基本値と変動幅を設定するにあたって考慮すべき事項を示し、入出力項目からなる評価関数を与えてランダム最適探索法による制御パラメータのチューニング手法を述べた。制御対象として三つの代表的な倒立振り子システムモデルを選んだ。各モデルについてランダム最適探索法で制御パラメータのチューニングを行った。チューニングで得られた制御パラメータを用いて、振り上げおよび安定化制御シミュレーションを行った。いずれのモデルについても、本ファジィ制御器は 4.0 秒以内に振子を垂下位置から振り上げてシステムを完全に倒立安定化させることができ、これまでの振り上げおよび安定化制御手法に比べて優れていることを示した。

第 8 章 結論

本論文では、最初にすべての入力項目を各ルールの前件部に取り組み従来のファジィ推論モデルの問題点として、ファジィルールの設定難、設定可能な最大ルール総数の指数的增加、および各入力項目の均一重みの 3 項目を指摘した。そしてそれらの問題点を解決するために、まず SIRMs (Single Input Rule Modules、単一入力ルール群) 固定重視度結合型ファジィ推論モデルを提案した。対応する入力項目を唯一の前件部変数とする各単一入力ルール群 SIRM は 1 入力 1 出力のファジィルールからなるので、ルール数が入力項目の台集合の分割数に等しくなる。したがって、SIRMs 固定重視度結合型ファジィ推論モデルでは従来のファジィ推論モデルに比べて、設定可能な最大ルール総数が各入力項目の台集合の分割数の総和しかないのでルール総数を大幅に減らすことができ、しかも各ルールが 1 入力 1 出力の形になるためルールをある程度容易に設定できるようになった。また、重視度の導入で各入力項目に大きさの異なる重視度を与えることができ、各入力項目をシステムにおける役割の違いに応じて強調したり抑制したりすることが可能になった。その結果、従来のファジィ推論モデルが抱えている諸問題を解決できるだけでなく、計算時間の短縮とハードウェア化しやすいなどの利点を有することが明らかになった。さらに、「1 次遅れ+むだ時間系」および「2 次遅れ+むだ時間系」の制御シミュレーションおよび非線形関数の同定シミュレーションを通じて、SIRMs 固定重視度結合型ファジィ推論モデルが従来のファジィ推論モデルより優れていることも確認した。

次に、SIRMs 固定重視度結合型ファジィ推論モデルの一拡張として SIRMs 動的重視度結合型ファジィ推論モデルを提案した。そこで、動的重視度を新たに定義することによって重視度を制御状況の変化に応じて適応に自動調整できるようにしたので、重視度が制御開始時に大きな値を取り、制御安定時に小さな値を取るようなことが可能になった。しかも、動的重視度の変動量変数のルール設定において基本的に 1 入力項目か 2 入力項目の局所的情報しか用いないので、ルール総数は SIRMs 固定重視度結合型ファジィ推論モデルの場合に比べて高々数倍程度にとどまる。SIRMs 動的重視度結合型ファジィ推論モデルは SIRMs 固定重視度結合型ファジィ推論モデルの各特徴を継承するとともに、状況が刻々と変化する制御問題に一層柔軟に適する性質を持つ。定値制御系に対して SIRMs 動的重視度結合型ファジィ推論モデルに基づいて構築した、偏差、偏差の 1 階差分、偏差の 2 階差分などを入力項目とするファジィ制御器では、各 SIRM および各動的重視度の変動量変数についてすべて入力項目によらない 1 入力 1 出力のファジィルールを設定している。従来のファジィ推論モデルでは「1 次遅れ+むだ時間系」のファジィ制御器を基に「2 次遅れ+むだ時間系」のファジィ制御器を作るときに大幅な変更作業が必要であるのに対して、SIRMs 動的重視度結合型ファジィ推論モデルでは偏差の 2 階差分に対応す

る SIRM と重視度を追加するだけで「1 次遅れ+むだ時間系」のファジィ制御器を「2 次遅れ+むだ時間系」に容易に拡張できる。また、線形 PID 制御器との関係を調べ、偏差と偏差の 1 階差分と偏差の 2 階差分を入力項目、操作量の変化分を出力項目とする場合の本ファジィ制御器が通常の線形 PID 制御器に項目ごとに対応し非線形 PID 制御器であることを証明した。「1 次遅れ+むだ時間系」および「2 次遅れ+むだ時間系」の制御シミュレーションにより、SIRMs 動的重視度結合型ファジィ推論モデルでは SIRMs 固定重視度結合型ファジィ推論モデルの場合に比べて大幅に改善された制御結果を得ている。しかし、制御パラメータである動的重視度の基本値と変動幅の設定は、試行錯誤的に行っている。動的重視度の基本値と変動幅を自動的に系統的に設定できるため、試みとして純粋な 1 次遅れ系を制御対象として制御パラメータの設定手法を導出した。本設定手法で時定数が 0.20 以上の純粋な 1 次遅れ系を制御すると、振動と定常誤差を起こさずにオーバーシュートとアンダーシュートをとともに 1.0%以内に抑えることができた。

SIRMs 動的重視度結合型ファジィ推論モデルは、制御問題への実用モデルとして提案している。そこで、応用例として、まず未拘束物体の軌道追従制御問題を取り上げ、テーブル上を自由に転がる公式試合用ピンポン球の軌道追従制御実験装置を製作した。ピンポン球の位置に関する予測誤差と移動速度および加速度を入力項目として、SIRMs 動的重視度結合型ファジィ推論モデルに基づいたファジィ制御器を構築した。ピンポン球を目標軌道に精度良く追従させるにはピンポン球の移動速度を小さく制御することが必要であるため、予測誤差と加速度に固定重視度を設定したのに対して移動速度に動的重視度を持たせた。そして、ピンポン球の移動速度と加速度の絶対値を前件部変数として、移動速度の動的重視度の変動量変数を推論した。3 種類の円軌道および 1 種類の楕円軌道に対して軌道追従制御実験を行い、SIRMs 固定重視度結合型ファジィ推論モデルでも軌道追従実験が失敗なく行えたが、SIRMs 動的重視度結合型ファジィ推論モデルを用いることによってさらに安定した精度の良い軌道追従結果が得られた。これに対し、従来のファジィ推論モデルでは、ファジィルールを多く要するだけでなく、ピンポン球の移動速度をほかの予測誤差と加速度と区別して特別に強調したりすることができないため、ピンポン球の移動速度を小さく抑制することができず予定のサンプリングステップ数までピンポン球がまだ実験台上に残った軌道追従制御結果すら得られず、本提案モデルの有用性が確認できた。

二番目の応用例として、直線レールタイプの倒立振り子システムの安定化制御問題を取り上げた。振り子の角度制御と台車の位置制御をとともに実現しなければ安定化にはならないので、振り子の角度、振り子の角速度、台車の位置、台車の速度を入力項目に選んだ。四つの入力項目があるため、従来のファジィ推論モデルでは多数のファジィルールを用意しなければならない。これに対し、SIRMs 動的重視度結合型ファジィ推論モデルによる安定化ファジィ制御器は、SIRM のルール計 12 個と変動量変数のルール計 12 個で構成することができた。そして、四つの SIRM は入力項目によらずにすべて同じ形のルールに設定し

ている。振子の角度制御を台車の位置制御よりも優先的に行わなければいけないので、四つの変動量変数の前件部変数としてすべて振子の角度の絶対値を用いた。振子の両変動量変数のルールおよび台車の両変動量変数のルールをそれぞれ同じに設定し、しかも振子の両変動量変数のルールを台車の両変動量変数のルールとちょうど相反になるように設定した。これによって、仮想目標角度を求めることなく、振子が倒れた場合に振子の角度制御が優先に行われ振子がほぼ倒立された場合に台車の位置制御が主に行われるように、振子の角度制御と台車の位置制御を滑らかに切り替えながら並列に実行することが可能になった。制御シミュレーションにより、本安定化ファジィ制御器は倒立振子システムのパラメータが異なっても、広範囲の初期状態に対して倒立振子システムを短時間で完全に安定化でき、汎用性が高いことを確認した。また、この汎用性をロバスト制御の立場からみれば、倒立振子システムに大きなモデル誤差がある場合でも、本安定化ファジィ制御器はほぼ同程度の時間で完全に安定化できるので、定常ロバストであるといえる。

三番目の応用例としては、同じく直線レールタイプの倒立振子システムを制御対象として、振子の振り上げも含めた倒立振子システムの振り上げおよび安定化制御問題を取り上げた。SIRMs 動的重視度結合型ファジィ推論モデルに基づいて設計した振り上げおよび安定化ファジィ制御器は、上記二番目の応用例の場合と同様の安定化ファジィ制御器および振子の実際の角度を $[-180.000^\circ, 0.000^\circ]$ または $[0.000^\circ, +180.000^\circ]$ に変換する装置から構成されている。振子の角度のメンバーシップ関数に $[-30.000^\circ, +30.000^\circ]$ 以外に飽和領域を持たせたため、振子の角度がこの飽和領域にあるときにも対応する SIRM が発火することが可能になった。そして、振子角度の変換装置によって垂下領域にある振子の角度がこの飽和領域に変換されるので、振子の角度の SIRM の発火により振子を初期励振して加振することができた。その結果、本振り上げおよび安定化ファジィ制御器は、振子が垂下領域にある時に自動的に振り上げ制御器になり、振子が倒立領域にあるときに自動的に安定化制御器になった。また、いくつかの制御シミュレーションで本振り上げおよび安定化ファジィ制御器を用いることによって、短時間で振子を垂下位置から振り上げて倒立振子システムを完全に安定化することができた。なお、安定化制御のみを考えると、この振子角度の変換装置が振子の角度を変換せずにそのまま通過させるだけになるため、本振り上げおよび安定化ファジィ制御器は実質上上記二番目の応用例の場合の安定化ファジィ制御器そのものとなり、安定化ファジィ制御器は本振り上げおよび安定化ファジィ制御器の特別な場合に過ぎない。

以上のように、SIRMs 動的重視度結合型ファジィ推論モデルでは構造が単純でありながら、優れた制御能力を持ち、入力項目数が 2 個から 4 個までである制御対象に適用できることがわかる。また、制御構造の直観性、ルール設定の容易さ、ソフトウェアとハードウェアへの実装のしやすさなどから、SIRMs 動的重視度結合型ファジィ推論モデルが従来のファジィ推論モデルに優位的であることが確認できる。

制御系に限らず、多入力システムにおいて各入力項目の影響力が通常異なるため、本提案モデルの適用が良い結果に結びつくこと期待できる。従来のファジィ推論モデルでは、入力項目数が 5 個以上になるとルール設定が一層難しくなるため、入力項目数が 5 個以上の制御システムへの応用例が少ないと思う。典型的な多入力システムとして、多重倒立振子システムがあげられる。例えば、直列型二重倒立振子システムの安定化制御を考えると、台車の位置制御を含めると入力項目数が 6 個になる。この直列型二重倒立振子システムを制御するのに、従来のファジィ推論モデル^[53]では階層型のファジィ制御器を設計する。すなわち、単振子の倒立振子システムの安定化制御に基づいてまず台車の位置制御を摂動として仮想目標角度を求め、そして両振子についてそれぞれ推論で得られた中間操作量を入力として最終の操作量を推論する。その手法では、直列型二重倒立振子システムが 40 秒以上かかって安定化されている。一方、SIRMs 動的重視度結合型ファジィ推論モデルでは、入力項目数が増えても SIRM と変動量変数のルールテーブルが代数的に増えることにとどまる。しかも、各 SIRM が一つの前件部変数のみを持ち、各変動量変数のルールが一つないし二つの前件部変数のみを持つので、ルールの設定が容易である。そのため、直列型二重倒立振子システムに対して、SIRMs 動的重視度結合型ファジィ推論モデルによる安定化制御器^[91]は、単振子の安定化制御器を拡張した形で 6 個の SIRM と 6 個の動的重視度から構成できる。しかも、台車の位置制御、下の振子の角度制御と上の振子の角度制御の優先順位がそれぞれ異なり、上の振子の角度制御を最優先しなければならないが、動的重視度を用いることによってそれを明確に表現できる。その結果、直列型二重倒立振子システムを 10 秒ほどで完全に安定化できる。

入力項目数が直列型二重倒立振子システムと同じである並列型二重倒立振子システムの安定化制御については、台車の移動が直接両振子の角度制御に影響し、両振子の固有周波数の比によっては可制御性が失われるため、現代制御でも難しいとされる制御問題^[27]である。この問題に対して、これまで台車の位置制御を考慮せずに両振子の角度制御のみを 4 入力 1 出力のファジィルールで行う研究^[7]が報告されているが、台車の位置制御も含めたファジィ制御手法はまだ見当たらない。筆者らは SIRMs 動的重視度結合型ファジィ推論モデルをこの問題に適用し、同様に 6 個の SIRM と 6 個の動的重視度からなる安定化ファジィ制御器^[92]を設計している。シミュレーションでは 10 秒内に並列型二重倒立振子システムを完全に安定化できる結果を得ている。

直列型三重倒立振子システムの安定化制御では、入力項目数が 8 個あり、台車の位置制御のほか、3 本の振子の角度制御もすべて行う必要がある。明らかのように、上に位置するほど振子のバランスが崩れやすく、姿勢の建て直しを優先的に行わないと倒れてしまうため、制御の優先順位は、台車より下の振子、下の振子より中間の振子、中間の振子より上の振子のように上に位置するほど高くなる。従来のファジィ推論モデルでは、このような安定化制御器の構築がほとんど不可能に近い。そのため、台車と下の振子を考慮せず

に上の 2 本の振子のみを対象とするファジィ制御器^[42]が提案されているが、各振子を倒立するのではなく倒れない程度に制御するのが精一杯で、完全安定化にはほど遠い結果になっている。しかし、SIRMs 動的重視度結合型ファジィ推論モデルを直列型三重倒立振子システムの安定化制御に適用すれば、8 個の SIRM と 8 個の動的重視度で台車の位置制御と 3 本の振子の角度制御をすべて行うことができ、しかも各制御の優先順位を適切に表現できる。これによって、直列型三重倒立振子システムを短時間で完全に安定化することが期待できる。

従来のファジィ推論モデルは、1980 年代に大きなブームを起し、現在では極めて多くの分野に進出を果たしている。しかし、倒立振子システムに代表されるような制御問題に対して、多くのファジィルールと特別な制御構造を必要とする上で、制御結果が現代制御手法の場合に比べてかなり劣っている。また、従来のファジィ推論モデルでは、多重倒立振子システムの安定化制御問題を基本的にまだ解決できていない。本提案モデルは、従来のファジィ推論モデルの直観性や操作性などを継承しながら構造的単純さと汎用性を持つ。しかも、従来のファジィ推論モデルにとって難しいとされる制御問題も容易に解決でき、現代制御手法の場合に匹敵する制御性能が得られる。そのため、数学モデルが得られない問題はもちろんのこと、数学モデルが立てられても複雑な現代制御理論が必要とされる問題にも、本提案モデルの活躍が期待される。

また、各 SIRM はそれぞれ一つの前件部変数しかなく、各動的重視度の変動量変数はそれぞれ一つか二つの前件部変数を持つ。各入力項目の分解能を従来のファジィ推論モデルの場合と同じとすれば、入力項目の個数が多いほど必要なメモリサイズが格段に減少し、各 SIRM と動的重視度間の演算が乗算と加算のみである。したがって、仮想ページング方式で各 SIRM の推論結果および各動的重視度のすべての値をメモリに書き込んだあと加算回路と乗算回路等を設計すれば、入力に応じてメモリから各 SIRM と動的重視度の値を読み出して積和算を出力するワンチップまたはワンボードの高速ファジィコントローラが実現可能になる。

制御において、系の安定性解析は最も重要な研究課題の一つである。ファジィ制御において、制御器を言語形式のファジィルールで表すため、系の安定性解析は難しい。しかし、SIRM の導入によって、各入力項目が分散的に処理され、各入力項目値の変化による制御対象の挙動を理解しやすくなる。特に、SIRMs 固定重視度結合型ファジィ推論モデルの場合、各重視度がすべて固定されるため、特定の制御対象に対して安定性解析を行いやすい。SIRMs 動的重視度結合型ファジィ推論モデルの場合、動的重視度の変動量変数のルール設定によっては制御器が複雑になることがある。しかし、定値制御系に対して、各 SIRM と各変動量変数のルールが対応する入力項目のみを前件部変数とするので、各入力項目値と制御結果との直接関連を調べるのが可能である。したがって、本提案モデルに基づいたファジィ制御器の安定性解析に関して、研究がさらに進むものと考えられる。

一方、データベースの検索システム、医療診断システム、プラント故障診断システム、画像認識システム、感性情報抽出システム、似顔絵生成システムなどにおいては、通常入力項目数が多いため、従来のファジィ推論モデルでは限界がある。この場合、ルールの設定が容易である SIRM_s 動的重視度結合型ファジィ推論モデルを直接応用することが考えられる。また、SIRM_s 動的重視度結合型ファジィ推論モデルに基づいて、システムを階層構造にすることも可能である。すなわち、まず入力項目間の関わりなどによっていくつかのグループに分割し、各グループにそれぞれ SIRM_s 動的重視度結合型ファジィ推論モデルを適用する。グループの総数が数個であれば、各グループの出力項目を新しい入力項目としてさらに SIRM_s 動的重視度結合型ファジィ推論モデルを適用し目的の出力を求める。グループの総数がさらに大きくなれば、各グループの出力項目を再分割しさらに上位の層を構築する。各グループにおいて、各 SIRM と動的重視度の変動量変数のファジィルールが容易に設定でき、各入力項目の役割を適切に表現できる。これによって、少ないルールで効率よく機能する階層型ファジィシステムが構築可能である。

また、本論文では各 SIRM および変動量変数について、それぞれ [-1.0, +1.0] と [0.0, +1.0] において線形的な入出力関係を設定している。そして、制御パラメータである各動的重視度の基本値と変動幅を、試行錯誤またはランダム最適探索法によって与えている。システムが複雑になるにつれて、入力項目間の影響および入力項目と出力項目との非線形関係が強くなると予測される。また、入力項目数が増えるにつれて、試行錯誤による制御パラメータの設定はもはやできなくなる。非線形性の強いシステムおよび大規模システムを精度良く取り扱うには、SIRM_s 動的重視度結合型ファジィ推論モデルにも強い非線形特性を持たせる必要がある。それを可能にするため、各 SIRM の前件部変数のメンバーシップ関数と後件部変数の実数値、各制御パラメータ、各変動量変数の前件部変数のメンバーシップ関数と後件部変数の実数値をすべて含めた新しい自動チューニング法に関する研究が待たれる。

このように、本提案モデルは、制御問題のみではなく画像認識システムなどの制御以外の問題にも適用でき、しかもファジィシステムの安定性解析手法および自動学習手法などの開発にも繋がる。そして、本提案モデルによって、シンプルで実用的な新しいファジィシステムを世の中にアピールし、ファジィシステムのさらなる普及に拍車を掛けることができる。本論文では、そのような観点から、理論と基本的応用方向を指した。

謝 辞

本論文をまとめるにあたり、懇切丁寧なご指導とご鞭撻を賜りました東京工業大学大学院総合理工学研究科知能システム科学専攻廣田薫教授に深甚な謝意を申し上げます。

本研究過程において、親切なご指導とご教示をいただきました東京工業大学大学院総合理工学研究科知能システム科学専攻菅野道夫教授、新田克己教授、室伏俊明助教授、内海彰講師に心から謝意を申し上げます。

また、本研究に暖かい激励を与えていただきましたシステム総合研究所榎木義一理事長に、深く感謝いたします。

さらに、本研究にアドバイスをいただきました大阪電気通信大学大学院情報工学専攻水本雅晴教授に、厚く感謝いたします。

最後に、本研究において、理解と協力をいただきましたマイコム株式会社の社員一同に感謝いたします。

参 考 文 献

- [1] 青山武郎、大松繁、岸田芳幸：倒立振子のモデル化と安定化のためのニューロ PD 制御、システム制御情報学会論文誌、Vol.11、No.1、pp.10-18(1998).
- [2] 荒木昭一、野村博義、林勲、若見昇：ルールを逐次的に生成するファジィモデリングの一提案、日本ファジィ学会誌、Vol.4、No.4、pp.722-732(1992).
- [3] 朝山宏、森永智昭、佐野学、田中一男：一次遅れ+むだ時間系におけるファジィコントローラの最適調整、第 6 回ファジィシステムシンポジウム講演論文集、東京、pp.193-196(1990).
- [4] N. Baba: A New Approach for Finding the Global Minimum of Error Function of Neural Networks, Neural Networks, Vol.2, pp.367-373(1989).
- [5] H. R. Berenji: A Reinforcement Learning-Based Architecture for Fuzzy Logic Control, International Journal of Approximate Reasoning, Vol.6, No.2, pp.267-292(1992).
- [6] L. Dessaint, S. Robert, M. Saad and G. Olivier: A Cartesian-Based Adaptive Tracking Controller for a SCARA Robot, Proceedings of the International Conference on Industrial Electronics, Control, and Instrumentation, Maui, USA, Vol.3, pp.1517-1521(1993).
- [7] 藤田和之、水本雅晴：遺伝的アルゴリズムによるファジィシングルトン型推論法の下での並列倒立振子のファジィ制御、第 11 回ファジィシステムシンポジウム講演論文集、沖縄、pp.379-382(1995).
- [8] 藤本浩二、村上周太：ファジィ制御系（一次遅れ+無駄時間系、積分系）におけるスケーリングファクタの最適調整、第 8 回ファジィシステムシンポジウム講演論文集、広島、pp.553-556(1992).
- [9] K. Furuta, M. Yamakita and S. Kobayashi: Swing up Control of Inverted Pendulum, Proceedings of the International Conference on Industrial Electronics, Control, and Instrumentation, pp.2193-2198(1991).
- [10] J. Gasos, M. C. Garcia-Alegre and R. Garcia: Fuzzy Strategies for the Navigation of Autonomous Mobile Robots, Proceedings of the International Fuzzy Engineering Symposium'91, Yokohama, Japan, Vol.2, pp.1024-1034(1991).
- [11] Y. Ha and M. Tomizuka: Fuzzy Global and Local Motion Control of an Inverted Pendulum Using Multiple Rule Bases, Proceedings of the Asian Control Conference, Tokyo, Japan, pp.497-500(1994).
- [12] 林勲、野村博義、若見昇：ニューラルネット駆動型ファジィ推論による推論ルール

- の獲得、日本ファジィ学会誌、Vol.2、No.4、pp.585-597(1990).
- [13] 廣田薫：ファジィ活用事例集、工業調査会(1991).
- [14] 廣田薫：新・ファジィ実用化応用技術実例（第二集）、ミマツデータシステム(1991).
- [15] 廣田薫：ファジィ技術の実用化応用、シュプリンガー・フェアラーク東京(1992).
- [16] 廣田薫、倪景慈：不安定ボールのファジィ制御、法政大学工学部研究集報、No.27、pp.41-50(1991).
- [17] 廣田薫、渡辺秀則：水平多関節型アームロボットを用いたファジィ制御による2次元移動物体の把握、第5回ファジィシステムシンポジウム講演論文集、神戸、pp.65-70(1989).
- [18] 本多中二、大里有生：ファジィ工学入門、pp.140-142、海文堂(1989).
- [19] H. Ichihashi: Iterative Fuzzy Modeling and a Hierarchical Network, Proceedings of the Fourth IFSA World Congress, Brussels, Belgium, Vol. Engineering, pp.49-52(1991).
- [20] 市橋友秀、渡辺俊彦：簡略ファジィ推論を用いたファジィモデルによる学習型制御、日本ファジィ学会誌、Vol.2、No.3、pp.429-437(1990).
- [21] 池田直人、斉藤真也、北村新三：多層ネットワークによる倒立振子の安定化学習制御、システム制御情報学会論文誌、Vol.3、No.12、pp.405-413(1990).
- [22] R. M. Kandadai and J. M. Tien: On a Fuzzy-Neural Hierarchical Controller with a Self-Generating Knowledge Base, Proceedings of 1996 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, Beijing, China, Vol.4, pp.2625-2630(1996).
- [23] S. Kawaji and T. Maeda: Fuzzy Servo Control System for an Inverted Pendulum, Proceedings of the International Fuzzy Engineering Symposium'91, Toronto, Canada, Vol.2, pp.812-823(1991).
- [24] 川路茂保、松永信智、前田輝幸：ファジィ制御系の設計に関する一考察、第19回制御理論シンポジウム講演論文集、神戸、pp.313-318(1990).
- [25] 川路茂保、野口功：ファジィ推論による倒立振子の安定化制御、第5回ファジィシステムシンポジウム講演論文集、神戸、pp.107-113(1989).
- [26] 川谷亮治、土井智晴、外川一仁：倒立振子系に対する非線形オブザーバの一構成法、計測自動制御学会論文集、Vol.30、No.11、pp.1408-1410(1994).
- [27] 川谷亮治、山口尊志：並列型2重倒立振子系の解析とその安定化、計測自動制御学会論文集、Vol.29、No.5、pp.572-580(1993).
- [28] Y. Kim, D. Kang, W. Bang, J. Kim and Z. Bien: Balancing and Position Control of a Circular Inverted Pendulum System Using Self-Learning Fuzzy Controller, Proceedings of the Seventh IFSA World Congress, Prague, Czech, Vol.3, pp.501-

504(1997).

- [29] J. Kim, Y. Moon and B. P. Zeigler: Designing Fuzzy Net Controllers Using Genetic Algorithm, IEEE Control Systems Magazine, Vol.15, No.3, pp.66-72(1995).
- [30] 小林正人、篠原茂行、田村捷利：適応同定機構を有する倒立振子の全自動振り上げ安定化制御、日本機械学会論文集、Vol.58、No.556、pp.152-159(1992).
- [31] 小林貴生、西野順二、小高知宏、小倉久和：自走式倒立振子の階層的適応型ファジィ制御、第13回ファジィシステムシンポジウム講演論文集、富山、pp.35-38(1997).
- [32] 国際ファジィ工学研究所 (LIFE)：ファジィ技術の先端的应用、日刊工業新聞社(1993).
- [33] H. Kuwahara, Y. Seno, M. Harada, and K. Kinoshita: Application of Fuzzy Theory to the Control of Shield Tunneling, Proceedings of the Third IFSA World Congress, Seattle, USA, pp.250-253(1989).
- [34] K. H. Kyung and B. H. Lee: Fuzzy Rule Base Derivation Using Neural Network-Based Fuzzy Logic Controller by Self-Learning, Proceedings of the International Conference on Industrial Electronics, Control, and Instrumentation, Maui, USA, Vol.1, pp.435-440(1993).
- [35] S. Lin and Y. Chen: Design of Adaptive Fuzzy Sliding Mode for Nonlinear System Control, Proceedings of the Third IEEE International Conference on Fuzzy Systems, Orlando, USA, pp.35-39(1994).
- [36] H. Lu, S. Tzeng and M. Yeh: Fuzzy Logic Controller Design Using Genetic Algorithm, Proceedings of IIZUKA'96, Vol.2, Iizuka, Japan, pp.525-528(1996).
- [37] 前田幹夫、村上周太：ファジィ論理を用いた自動車追従制御、第3回ファジィシステムシンポジウム講演論文集、大阪、pp.61-66(1987).
- [38] 前田幹夫、村上周太、山崎久代：自己調整ファジィ制御装置の設計、第5回ファジィシステムシンポジウム講演論文集、神戸、pp.89-94(1989).
- [39] 前田幹夫、坪根昌弘、村上周太：マルチユニット型ファジィ学習制御、第9回ファジィシステムシンポジウム講演論文集、札幌、pp.285-288(1993).
- [40] E. H. Mamdani: Application of Fuzzy Algorithms for Control of Simple Dynamic Plant, Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, Vol.121, No.12, pp.1585-1588(1974).
- [41] M. Margaliot and G. Langholz: Adaptive Fuzzy Controller Design via Fuzzy Lyapunov Synthesis, Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on Fuzzy Systems, Anchorage, USA, pp.354-359(1998).
- [42] 増井重弘、寺野寿朗、井田博哉：ファジィとGAによる三重倒立振子におけるマン・

- マシンシステム、第 11 回ファジィシステムシンポジウム講演論文集、沖縄、pp.109-112(1995).
- [43] 松浦克昌：カート位置制御を含めた倒立ポールの振り上げ、安定化ファジィ制御、日本ファジィ学会誌、Vol.5、No.2、pp.397-408(1993).
- [44] 松浦克昌、永森光晴：カート・ポール系ファジィ制御におけるポール立ち上げ方式の改善、日本ファジィ学会誌、Vol.8、No.4、pp.749-756(1996).
- [45] A. Mikulcic and J. Chen: Experiments on Using Fuzzy Clustering for Fuzzy Control System Design, Proceedings of the Fifth IEEE International Conference on Fuzzy Systems, New Orleans, USA, Vol.3, pp.2168-2174(1996).
- [46] M. Mizumoto: Fuzzy Controls under New Fuzzy Reasoning Methods, Proceedings of the Joint Hungarian-Japanese Symposium on Fuzzy Systems and Applications, Budapest, Hungary, pp.122-126(1991).
- [47] 水本雅晴：ファジィ制御法による PID 制御の実現、第 7 回ファジィシステムシンポジウム講演論文集、名古屋、pp.245-249(1991).
- [48] 水本雅晴：ファジィ制御の改善法(VI)－シングルトン型ファジィ推論法による場合一、第 8 回ファジィシステムシンポジウム講演論文集、広島、pp.529-532(1992).
- [49] 水本雅晴：ファジィ制御の改善法(VIII)－ファジィシングルトン型推論法による時間変動型ファジィ制御、第 10 回ファジィシステムシンポジウム講演論文集、大阪、pp.445-448(1994).
- [50] M. Mizumoto: Product-Sum-Gravity Method = Fuzzy Singleton-Type Reasoning Method = Simplified Fuzzy Reasoning Method, Proceedings of the Fifth IEEE International Conference on Fuzzy Systems, New Orleans, USA, Vol.3, pp.2098-2102(1996).
- [51] 森正三、西原裕善、古田勝久：倒立振り子制御用ハイブリッド制御系、計測自動制御学会論文集、Vol.12, No.4, pp.482-487(1976).
- [52] S. Mori, H. Nishihara and K. Furuta: Control of Unstable Mechanical System – Control of Pendulum, International Journal of Control, Vol.23, No.5, pp.6730-692(1976).
- [53] ムハマド・ロムジ、高濱徹行、小高知宏、小倉久和：倒立二重振り子系に対するファジィ制御知識の表現とスケーリングによる適応制御、日本ファジィ学会誌、Vol.8、No.3、pp.576-585(1996).
- [54] 野村博義、林勲、若見昇：デルタルールによるファジィ推論の自動チューニング手法と障害物回避への応用、日本ファジィ学会誌、Vol.4、No.2、pp.379-388(1992).
- [55] 大西巍：制御規則の順序構造モデルによるファジィ推論方法、日本ファジィ学会誌、Vol.2、No.4、pp.577-584(1990).

- [56] 大西巍：順序構造モデルによるファジィ推論とその制御への応用、Vol.4、No.4、pp.733-741(1992).
- [57] A. Ohsumi and T. Izumikawa: Nonlinear Control of Swing-up and Stabilization of an Inverted Pendulum, Proceedings of the 34th Conference on Decision & Control, New Orleans, USA, pp.3873-3880(1995).
- [58] 大住晃、泉川岳哉：非線形制御による倒立振子の振上げと安定化、計測自動制御学会論文集、Vol.33、No.10、pp.1011-1018(1997).
- [59] S. Omatu and M. Yoshioka: Stability of Inverted Pendulum by Neuro-PID Control with Genetic Algorithm, Proceedings of 1998 IEEE International Joint Conference on Neural Networks, Anchorage, USA, pp.2142-2145(1998).
- [60] 大坪昭文、林健一郎、村上周太、前田幹夫：簡略推論法を適用した低次元分割におけるファジィ制御性能の改善、第11回ファジィシステムシンポジウム講演論文集、沖縄、pp.375-378(1995).
- [61] Y. Pan and K. Furuta: VSS Controller Design for Discrete-Time Systems, Proceedings of the International Conference on Industrial Electronics, Control, and Instrumentation, Maui, USA, Vol.3, pp.1950-1955(1993).
- [62] G. Pradel and Z. Jin: An Insect-Based Approach to Autonomous Mobile Robot Navigation, Proceedings of the International Conference on Industrial Electronics, Control, and Instrumentation, Maui, USA, Vol.3, pp.1448-1453(1993).
- [63] D. Saez and A. Cipriano: Design of Fuzzy Model Based Predictive Controllers and Its Application to an Inverted Pendulum, Proceedings of the Sixth IEEE International Conference on Fuzzy Systems, Barcelona, Spain, Vol.2, pp.915-919(1997).
- [64] 阪井節子、高濱徹行：非線形最適化手法を用いた倒立振子ファジィ制御規則の学習、第13回ファジィシステムシンポジウム講演論文集、富山、pp.61-64(1997).
- [65] M. A. Salichs, E. A. Puente, D. Gachet and J. R. Pimentel: Learning Behavioral Control by Reinforcement for an Autonomous Mobile Robot, Proceedings of the International Conference on Industrial Electronics, Control, and Instrumentation, Maui, USA, Vol.3, pp.1436-1441(1993).
- [66] M. Sekiguchi, T. Sugasaka and S. Nagata: Control of a Multivariable System by a Neural Network, Proceedings of 1991 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Sacramento, USA, pp.2644-2649(1991).
- [67] 石岩、水本雅晴、湯場崎直養、大谷正幸：分解型ファジィシステムモデルに対するファジィ推論とファジィ規則のチューニング、第12回ファジィシステムシンポジ

- ウム講演論文集、東京、pp.175-178(1996).
- [68] 石岩、水本雅晴、湯場崎直養、大谷正幸：ファジィシングルトン型推論法におけるファジィ規則のチューニング手法、第 12 回ファジィシステムシンポジウム講演論文集、東京、pp.353-356(1996).
- [69] 石岩、水本雅晴、湯場崎直養、大谷正幸：ニューロ・ファジィ学習アルゴリズムによるファジィ規則の一生成法、日本ファジィ学会誌、Vol.8、No.4、pp.695-705(1996).
- [70] 石岩、水本雅晴、湯場崎直養、大谷正幸：最急降下法によるファジィ規則の自動チューニング手法、日本ファジィ学会誌、Vol.8、No.4、pp.757-767(1996).
- [71] K. Song and L. Sheen: Fuzzy-Neuro Control Design for Obstacle Avoidance of a Mobile Robot, Proceedings of the International Joint Conference of the Fourth IEEE International Conference on Fuzzy Systems and the Second International Fuzzy Engineering Symposium, Yokohama, Japan, Vol.1, pp.71-76(1995).
- [72] 菅坂玉美、関口実、長田茂美：ニューラルネットワークによる倒立振子の振り上げと倒立制御、第 17 回システムシンポジウムと第 14 回知能システムシンポジウムと第 1 回ニューラルネットワークシンポジウム合同シンポジウム講演論文集、岡山、pp.63-67(1991).
- [73] 菅野道夫：ファジィ制御、pp.67-136、日刊工業新聞社(1988).
- [74] 須田信英：PID 制御、pp.1-38、朝倉書店(1992).
- [75] 高濱徹行、阪井節子、小倉久和、中村正朗：強化学習法による離散値制御のためのファジィ制御規則の学習、日本ファジィ学会誌、Vol.8、No.1、pp.115-122(1996).
- [76] 田中一男、神田大和：3次元簡易 Ping-Pong ロボット、第 11 回ファジィシステムシンポジウム講演論文集、沖縄、pp.607-610(1995).
- [77] 田中一男、奥大輔：人間との対戦を実現するファジィピンポンロボット、第 13 回ファジィシステムシンポジウム講演論文集、富山、pp.731-732(1997).
- [78] 田中一男、佐野学：一次遅れ+むだ時間系におけるファジィコントローラのパラメータの最適調整、日本ファジィ学会誌、Vol.3、No.3、pp.583-591(1991).
- [79] N. Wakami, H. Akahori and H. Ichihashi: A Comparative Study of Fuzzy Sequence Method Control and Linear Feedback Control, Proceedings of the Third IFSA World Congress, Seattle, USA, pp.63-66(1989).
- [80] L. Wang and J.M. Mendel: Back-Propagation Fuzzy System as Nonlinear Dynamic System Identifiers, Proceedings of the IEEE International Congress on Fuzzy Systems, San Diego, USA, pp.1409-1415(1992).
- [81] Q. Wei, W. P. Dayawansa and W. S. Levine: Nonlinear Controller for an Inverted Pendulum Having Restricted Travel, Automatica, Vol.31, No.6, pp.841-850(1995).
- [82] V. Williams and K. Matsuoka: Learning to Balance the Inverted Pendulum Using

- Neural Networks, Proceedings of the IEEE International Joint Conference on Neural Network, Singapore, pp.214-219(1991).
- [83] ウィリアムス・ビクトル、徳成剛、松岡清利：ランダム探索によるニューラルネットワークの学習、第17回システムシンポジウム、第14回知能システムシンポジウム、第1回ニューラルネットワークシンポジウム合同シンポジウム講演論文集、岡山、pp.149-156(1991).
- [84] C. Wong and S. Her: An Auto-Generating Method in the Fuzzy System Design, Proceedings of the Sixth IEEE International Conference on Fuzzy Systems, Barcelona, Spain, Vol.3, pp.1651-1656(1997).
- [85] Y. Xia and H. Inooka: Application of Tree Search to the Swinging Control of a Pendulum, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Vol.22, No.5, pp.1193-1198(1992).
- [86] T. Yamakawa: Stabilization of an Inverted Pendulum by a High-Speed Fuzzy Logic Controller Hardware System, Fuzzy Sets and Systems, Vol.32, pp.161-180(1989).
- [87] 山崎東、菅野道夫：ファジィ制御、システムと制御、Vol.28、No.7、pp.442-446(1984).
- [88] 安信誠二：人間の制御戦略による倒立振子の振り上げ安定化制御、第13回ファジィシステムシンポジウム講演論文集、富山、pp.265-268(1997).
- [89] 安信誠二、トムソン・シリングリンゴ：PID制御&ファジィ推論による階層型ファジィ制御方式と実験評価、第10回ファジィシステムシンポジウム講演論文集、大阪、pp.435-436(1994).
- [90] 易建強、湯場崎直養、廣田薫：SIRMs動的重視度結合型ファジィ推論モデルによる倒立振子システムの安定化制御、日本ファジィ学会誌、Vol.11、No.3、pp.492-502(1999).
- [91] 易建強、湯場崎直養、廣田薫：SIRMs動的重視度結合型ファジィ推論モデルによる二重倒立振子システムの安定化制御、日本ファジィ学会誌、(掲載予定)。
- [92] 易建強、湯場崎直養、廣田薫：SIRMs動的重視度結合型ファジィ推論モデルによる並列型二重倒立振子システムの安定化ファジィ制御、計測自動制御学会論文集(投稿中)。
- [93] J. Yi, N. Yubazaki and K. Hirota: A Proposal of SIRMs Dynamically Connected Fuzzy Inference Model for Plural Input Fuzzy Control, Fuzzy Sets and Systems(submitted).
- [94] J. Yi, N. Yubazaki and K. Hirota: Trajectory Tracking Control of Unconstrained Object Using the SIRMs Dynamically Connected Fuzzy Inference Model, Journal of Advanced Computational Intelligence(submitted).

- [95] J. Yi, N. Yubazaki and K. Hirota: A New Fuzzy Controller for Stabilizing Inverted Pendulum Systems Based on the SIRMs Dynamically Connected Fuzzy Inference Model, *Journal of Advanced Computational Intelligence*(submitted).
- [96] J. Yi, N. Yubazaki and K. Hirota: Upswing and Stabilization Control of Inverted Pendulum System Based on the SIRMs Dynamically Connected Fuzzy Inference Model, *Fuzzy Sets and Systems*, (accepted).
- [97] J. Yi, N. Yubazaki and K. Hirota: SIRMs Dynamically Connected Fuzzy Inference Model Applied to Stabilization Control of Inverted Pendulum and Cart Systems, *Proceedings of the 18th International Conference of the North American Fuzzy Information Processing Society*, New York, USA, pp.771-775(1999).
- [98] J. Yi, N. Yubazaki and K. Hirota: Upswing and Stabilization Control of Inverted Pendulum and Cart System by the SIRMs Dynamically Connected Fuzzy Inference Model, *Proceedings of the Eighth IEEE International Conference on Fuzzy Systems*, Seoul, South Korea, Vol.1, pp.400-405(1999).
- [99] S. Yildirim, and V. Aslantas: Feedback Error Learning for Control of a Robot Using SMENN, *Proceedings of the Fourth International Workshop on Advanced Motion Control*, Mie, Japan, Vol. 2, pp.518-523(1996).
- [100] H. Ying and L. C. Sheppard: Tuning Parameters of the Fuzzy Controller Based on the Golden Section Search, *Proceedings of the Ninth International Conference of the North American Fuzzy Information Processing Society*, Toronto, Canada, Vol.1, pp.86-89(1990).
- [101] N. Yubazaki, M. Otani, T. Ashida and K. Hirota: Dynamic Fuzzy Control Method and Its Application to Positioning of Induction Motor, *Proceedings of the International Joint Conference of the Fourth IEEE International Conference on Fuzzy Systems and the Second International Fuzzy Engineering Symposium*, Yokohama, Japan, Vol.3, pp.1095-1102(1995).
- [102] N. Yubazaki, M. Otani, T. Ashida, A. Muto, J. Yi, K. Hirota and W. Pedrycz: Fuzzy Control Based on Interpolation Algorithm, *Proceedings of 1996 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, Beijing, China, Vol.1, pp.394-399(1996).
- [103] N. Yubazaki, M. Otani, A. Muto, A. Ashida, J. Yi, K. Hirota and Y. Shi: Fuzzy Inference Chip FZP-0401A Based on Interpolation Algorithm, *Fuzzy Sets and Systems*, Vol.98, No.3, pp.299-310(1998).
- [104] N. Yubazaki, M. Otani, A. Muto, T. Ashida, J. Yi, Y. Shi and K. Hirota: Virtual Paging Fuzzy Inference Chip Using Interpolation Algorithm, *Proceedings of the*

- International Conference of CFSA/IFIS/SOFT'95, Taipei, Taiwan, pp.441-446(1995).
- [105] 湯場崎直養、易建強、廣田薫：複数入力ファジィ制御のための単一入力ルール群結合型ファジィ推論モデルの提案、日本ファジィ学会誌、Vol.9、No.5、pp.699-709(1997).
- [106] N. Yubazaki, J. Yi and K. Hirota: SIRMs (Single Input Rule Modules) Connected Fuzzy Inference Model, Journal of Advanced Computational Intelligence, Vol.1, No.1, pp.23-30(1997).
- [107] N. Yubazaki, J. Yi and K. Hirota: SIRMs Dynamically Connected Fuzzy Inference Model and PID Controller, Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on Fuzzy Systems, Anchorage, USA, pp.325-330(1998).
- [108] 湯場崎直養、易建強、廣田薫：動的重視度を用いた SIRMs ファジィ推論モデル、日本ファジィ学会誌、Vol.10、No.3、pp.522-531(1998).
- [109] 湯場崎直養、易建強、廣田薫：SIRMs 動的重視度結合型ファジィ推論モデルによる未拘束物体の軌道追従制御、日本ファジィ学会誌、Vol.10、No.6、pp.1164-1174(1998).
- [110] 湯場崎直養、易建強、廣田薫：1次遅れ系に適用した SIRMs 動的重視度結合型ファジィ推論モデルにおける動的重視度のパラメータ設定手法、日本ファジィ学会誌、Vol.10、No.6、pp.1175-1181(1998).
- [111] 湯場崎直養、易建強、廣田薫：SIRMs 動的重視度結合型ファジィ推論モデルによる非線形 PID 制御、計測自動制御学会論文集、Vol.35、No.2、pp.244-252(1999).
- [112] 湯場崎直養、易建強、大谷正幸、芦田隆次、畝村暢一、川崎慎一、廣田薫：2 ステッピングモータによる平面上のボールの運動軌道のファジィ制御、第 11 回ファジィシステムシンポジウム講演論文集、沖縄、pp.71-74(1995).
- [113] N. Yubazaki, J. Yi, M. Otani and K. Hirota: SIRM's Connected Fuzzy Inference Model and Its Applications to First-Order Lag Systems and Second-Order Lag Systems, Proceedings of 1996 Asian Fuzzy Systems Symposium, Kenting, Taiwan, pp.545-550(1996).
- [114] N. Yubazaki, J. Yi, M. Otani and K. Hirota: SIRMs Dynamically Connected Fuzzy Inference Model and Its Applications, Proceedings of the Seventh IFSA World Congress, Prague, Czech, Vol.3, pp.410-415(1997).
- [115] N. Yubazaki, J. Yi, M. Otani, N. Unemura and K. Hirota: Trajectory Tracking Control of Unconstrained Objects Based on the SIRMs Dynamically Connected Fuzzy Inference Model, Proceedings of the Sixth IEEE International Conference on Fuzzy Systems, Barcelona, Spain, Vol.2, pp.609-614(1997).