

簡略化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に関する研究

応用電子部

林 健一郎, 大坪 昭文, 白仁田 和彦

ファジィ制御の中心概念となるのがファジィ推論であるが、最近ファジィ制御器の高速化を目的として、ファジィ推論の高速化を図った「簡略化推論法」が使用されるようになってきた。また、現在ファジィ制御器を設計するにあたり、ファジィ分割数として 7×7 分割や 5×5 分割といった高次のものが良く使用されている。しかし、高次分割数になるほど制御パラメータの数は飛躍的に増加し、ファジィ制御器の調整は困難な作業となってしまう。そのため、ファジィ制御器の低次元分割化が望まれている。

このような背景から本報告では、まず、高速推論が可能な「簡略化推論法」を適用した場合の低次元分割におけるファジィ制御性能の改善法について検討を行った。次に、むだ時間のある一次遅れ系を対象とした各種シミュレーションの検討結果から、本改善法の有効性を検証した。最後に、ファジィ制御器の非線形特性を表すコントロールマップを用いて本改善法の検討を行った。その結果、ファジィ分割数が低次の 3×3 分割の場合でも、本改善法によって多種多様なファジィ制御器の非線形特性が実現でき、制御性能が改善できることが明らかになった。

1. はじめに

ファジィ制御はL.A.Zadehによって1965年に提唱されたファジィ理論⁽¹⁾に基づいているが、このファジィ制御の中心概念となるのがファジィ推論である。現在ファジィ推論法として、E.H.Mamdaniの提案した「min-max-重心法」⁽²⁾やそれを人間の直感に合うように水本が改善を施した「代数積-加算-重心法」⁽³⁾といったものが多く用いられている。

しかし、これらのファジィ推論法は後件部メンバーシップ関数をファジィ集合としているため、ファジィ推論過程における計算処理に時間を要するという問題があった。そこで、後件部メンバーシップ関数を非ファジィなシングルトン型とすることにより、ファジィ推論の高速化を図った「簡略化推論法」が市橋⁽⁴⁾や前田・村上⁽⁵⁾らによって提案されている。

また、現在ファジィ制御器を設計するにあたり、ファジィ分割数として 7×7 分割や 5×5 分割といった高次のものが良く使用されている。これは、一般に高次分割数になるほど、多種多様なファジィ制御器の非線形特性が実現し易くなるからである。

しかし、高次分割数になるほど制御規則やメンバーシップ関数などの制御パラメータの数は飛躍的に増加してしまい、この傾向はファジィ制御器の入出力変数の増加に伴って一層顕著なものとなる⁽⁶⁾。その結果、高次分割数になるほど、ファジィ制御器の調整や検証は困難で時間を要する作業となるばかりでなく、その高速化の要求をも達成できなくなる。

更には、現在までの報告はファジィ分割数を 7×7 分割のように高次とした場合の制御性能の検討がほとんどであり^{(3)(7)~(10)}、特に、 3×3 分割のように低次分割数とした場合のファジィ制御器の非

線形特性や制御性能の改善について、余り検討されていない。

以上のような背景から、本報告では、ファジィ制御器の高速化と低次元化を目的として、まず、高速推論が可能な「簡略化推論法」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について検討を行う。ここでの検討は、ファジィ分割数が低次の3×3分割の場合に、ファジィ推論法として「簡略化推論法」⁽⁴⁾⁽⁵⁾を用いた場合、その後件部のシングルトン型メンバーシップ関数Z Oの高さhを調整することにより、制御性能が改善できるという方法である。

次に、制御規則表を規則で埋め尽くした「Rutherfordの制御規則」⁽¹¹⁾、更にはファジィ制御器の一層の高速化のために規則数を大幅に減少した「山崎・菅野の制御規則」⁽¹²⁾に対して、シミュレーションを行った検討結果から本改善法の有効性を確認する。ここで、前件部メンバーシップ関数として一般的な三角型だけでなく釣鐘型も使い、本改善法における両者の違いを示す。なお、制御対象としてむだ時間のある一次遅れ系を3つのモデルに分類したものを用いる。

最後に、ファジィ制御器の非線形特性を表すコントロールマップを用いて本改善法の検討を行い、ファジィ分割数が低次の3×3分割の場合でも、この高さhの調整だけでファジィ制御器の多種多様な非線形特性が実現できることを示す。

2. ファジィ制御系の構成と制御対象

本シミュレーションにおけるファジィ制御系は図1に示した構成であり、Eは偏差、 ΔE は偏差の変化分である。ここで、ファジィ制御器の出力は操作量Uの変化分 ΔU で制御器は速度型としている。また、

ファジィ制御のための推論法として「簡略化推論法」⁽⁴⁾⁽⁵⁾を用いた。

検討した制御対象は、プラント特性の代表的なモデルであるむだ時間のある一次遅れ系とした。そのモデルの伝達関数は次式となる。

$$G(s) = \frac{Ke^{-Ls}}{1+Ts} \quad \text{----- (1)}$$

上式において、Lはむだ時間の大きさ、Tは一次遅れ時定数、Kはプラントゲインを表す。

一般に制御系設計の知識により、むだ時間のある一次遅れ系はL/Tの値に応じて、時定数が支配的な遅れ系、中間系、むだ時間が支配的なむだ時間系の3つのモデルに分類できる⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾が、ここでL/Tの値が大きくなるほど制御し難い系と言われる⁽¹⁵⁾。本シミュレーションにおいては、これらのモデルを制御対象とし、L/Tの値が0.1から10の範囲となるように、遅れ系の場合L=1[S]、T=10[S]、K=1 (L/T=0.1)、中間系の場合L=1[S]、T=1[S]、K=1 (L/T=1)、むだ時間系の場合L=1[S]、T=0.1[S]、K=1 (L/T=10)と設定した。

3. 制御規則とメンバーシップ関数

制御規則として、ファジィ分割数が低次の3×3分割の場合に、その制御規則表を全て規則で埋め尽くした「Rutherfordの制御規則」⁽¹¹⁾と、更には規則数減少のためにその制御規則表に空きを設けた「山崎・菅野の制御規則」⁽¹²⁾を用いた。これらの制御規則表をそれぞれ表1の(a)と(b)に示すが、ここで3×3分割とは、前件部及び後件部をNB (Negative Big), ZO (Zero), PB (Positive Big)のような3つのファジィラベルで分けること

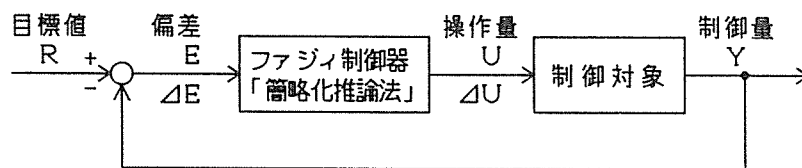


図1 ファジィ制御系の構成

表1 3×3分割の場合の制御規則表

(a) Rutherfordの制御規則

ΔE \ E	NB	ZO	PB
PB	Z_h	PB	PB
ZO	NB	Z_h	PB
NB	NB	NB	Z_h

(b) 山崎・菅野の制御規則

ΔE \ E	NB	ZO	PB
PB		PB	
ZO	NB	Z_h	PB
NB		NB	

である。

前件部メンバーシップ関数としては、図2に示すような通常良く使用される(a)三角型に加えて(b)釣鐘型を用いた⁽¹⁶⁾。ここで用いたメンバーシップ関数を $A_i(x)$ ($i=1\sim3$) とすると、

三角型は

$$A_i(x) = \max \left[\frac{-|x-b_i|+a}{a}, 0 \right], a>0 \quad (2)$$

釣鐘型は

$$A_i(x) = \exp \left[-\frac{(x-b_i)^2}{a^2} \right] \quad (3)$$

(2), (3)式において、 b_i はメンバーシップ関数のグレード値が1になる x の値、 a はその広がりを表す。

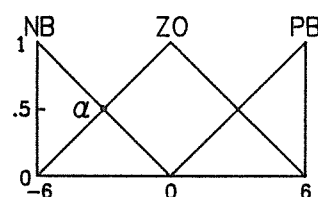
なお、図2において隣合うメンバーシップ関数との交点のグレード値を交叉値 α と呼び、

$$\alpha = \min_x \left[\bigvee_{i=1}^3 A_i(x) \right] \quad (4)$$

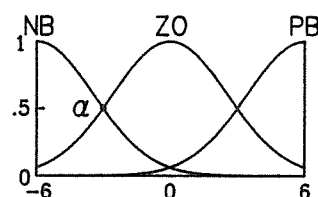
この交叉値 α は、一般に良好な制御性能が得られるとの指摘⁽⁷⁾⁽⁸⁾がある $\alpha=0.5$ に設定した。

一方、後件部メンバーシップ関数としては、ファ

ジ集合ではなく図3に示すような幅が零のシングルトン型⁽¹⁰⁾を用いた。



(a) 三角型



(b) 釣鐘型

図2 前件部メンバーシップ関数

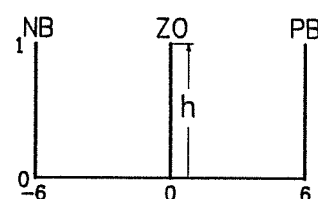


図3 後件部メンバーシップ関数
(シングルトン型)

4. シミュレーション法と簡略化推論法

先に著者らは、各種ファジィ推論法の構築とその特性検討が容易に実行できるファジィ制御用シミュレータ⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾の開発を行った。本シミュレータにおけるシミュレーション手順を図4に示すが、ここに活用した機能の一部を簡単に紹介する。

まず、ファジィ分割数と制御規則の設定を行い、次に、以下に示すような4つのステップでファジィ推論法の決定を行う。

Step1: 入力があった場合に、各規則の前件部適合度を求めるための「適合度演算法」の設定。

Step2: 各規則による推論結果を求めるための「含意演算法」の設定。

Step3: 各規則による推論結果を統合化し、規則全体としての推論結果を求めるための

「統合化法」の設定。

Step4: 規則全体としての推論結果を非ファジィ化し, 出力を求めるための「非ファジィ化法」の設定。

そして, メンバシップ関数と規格化定数の設定後, 制御対象を設定しファジィ制御シミュレーションを実行する。

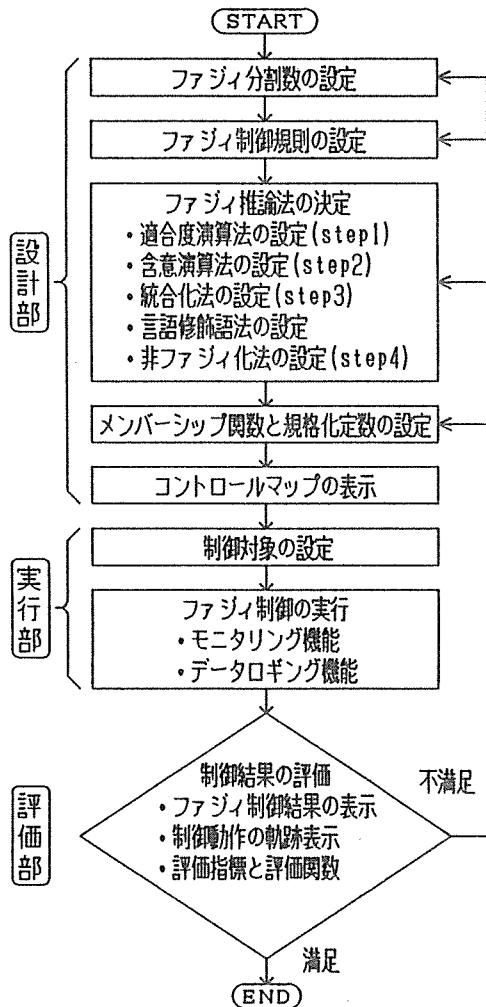


図4 ファジィ制御用シミュレータにおけるシミュレーション手順

「簡略化推論法」⁽⁴⁾⁽⁵⁾ (別名「代数積-加算-高さ法」) は, 図3に示したように後件部メンバシップ関数を非ファジィなシングルトン型とすることにより, ファジィ推論過程における計算処理の大幅な高速化を図ったものである。

図5に「簡略化推論法」における推論過程⁽¹⁰⁾を示すが, この推論過程では, ファジィ推論法の決定の

Step1, 2において代数積($\times$)演算を設定し, Step3, 4で高さ法⁽⁸⁾ (重み付き加算平均)を設定するものである。ここで, A_i, B_i ($i=1,2$) は前件部のファジィ集合, h_i は各規則の前件部適合度, z_i は後件部のシングルトン型の位置を表す。また, x_0, y_0 は観測値である確定値入力, z_0 は推論結果である非ファジィな出力を表す。

なお, この「簡略化推論法」をソフトウェアで実現した場合には, 後件部メンバシップ関数をファジィ集合とするファジィ推論法の「min-max-重心法」⁽²⁾の約6倍, 「代数積-加算-重心法」⁽³⁾の約5倍の高速でファジィ推論を実行できる (NEC社製のパーソナルコンピュータPC-9821Apを使用し, C言語のMicrosoft Cを用いて作成したファジィ推論法のプログラムをMS-DOS上で実行した場合)。

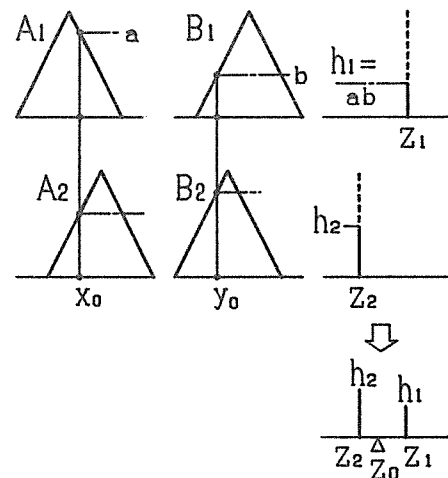


図5 「簡略化推論法」における推論過程

5. 低次元分割における制御性能の改善

ファジィ分割数が低次の 3×3 分割の場合には, 図3から分かるように, 後件部にはNB (負), ZO (零), PB (正)の3つのシングルトン型メンバシップ関数しか存在しないので, シングルトン型ZOの高さ h を変更しその制御への貢献度を調整することで, ファジィ制御器の非線形ゲイン特性⁽¹⁹⁾を変更できる。ここで, 後件部のシングルトン型ZOの高さ h は, 表1の制御規則表において示しているように, 後件部がZOである規則の制御への貢献度つまり後件部がZOである規則の重み h を表すことに

なる⁽¹⁰⁾。

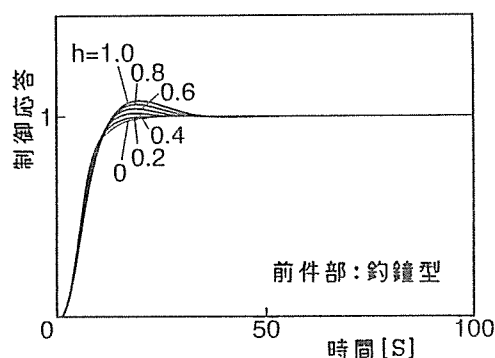
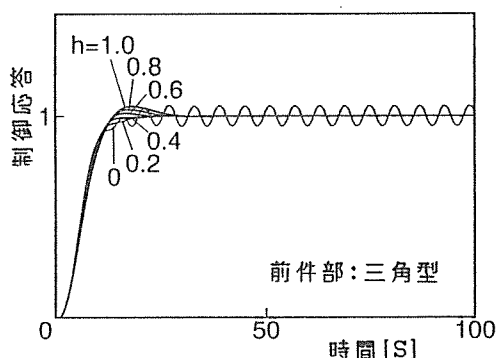
本章では、ファジィ推論法として高速推論が可能な「簡略化推論法」⁽⁴⁾⁽⁵⁾を適用した場合、このシングルトン型ZOの高さ h の調整法によって制御性能の改善が図れることを示す。

5.1 制御規則表を埋め尽くした場合

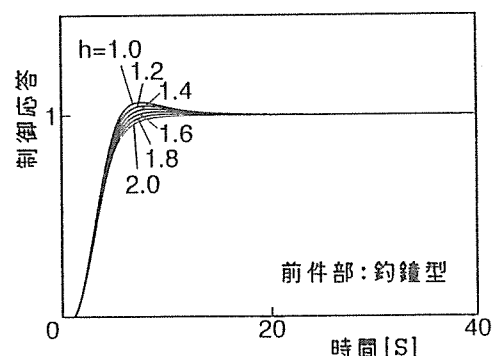
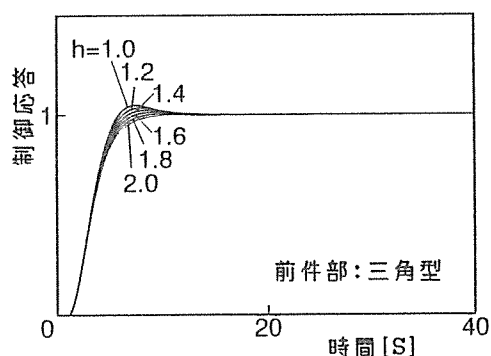
本節では、まず、表1(a)の制御規則表を規則で埋め尽くした「Rutherfordの制御規則」⁽¹¹⁾に対し

て、この高さ h の調整法の適用で制御性能が改善できることを示そう。図6は、「Rutherfordの制御規則」を用いた場合に、後件部のシングルトン型ZOの高さ h を変化させた場合の制御結果を示したものである。

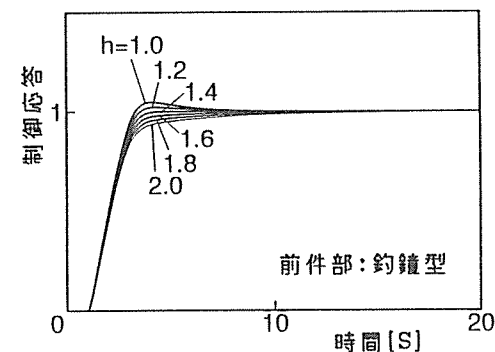
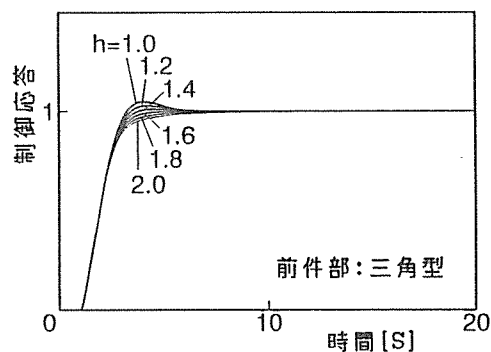
図6(a)遅れ系では、シングルトン型ZOの高さ h を1から小さくして、その制御への貢献度を「抑制」($0 \leq h \leq 1$)するに従って、前件部メンバーシップ関数の型に関わらず制御結果は改善されている。



(a) 遅れ系 $L=1$ [S], $T=10$ [S], $K=1$ ($L/T=0.1$)



(b) 中間系 $L=1$ [S], $T=1$ [S], $K=1$ ($L/T=1$)



(c) むだ時間系 $L=1$ [S], $T=0.1$ [S], $K=1$ ($L/T=10$)

図6 後件部シングルトン型ZOの高さ h を変化させた場合の制御結果
(「Rutherfordの制御規則」の場合)

具体的にはシングルトン型Z Oの貢献度の「抑制」に従って、一般には相反する傾向を示すものであるが、ここでは立ち上がり特性とオーバーシュート量が同時に改善される結果となっている。前件部メンバーシップ関数が三角型の場合には、ある高さhでハンチング（持続振動）が起こり不安定となっている。一方、釣鐘型の場合には $h=0$ の場合でも制御が可能となっている。

図6 (b) 中間系と(c) むだ時間系では、遅れ系の場合

合とは逆にシングルトン型Z Oの高さhを1から大きくして、その制御への貢献度を「強調」（ $1 \leq h$ ）するに従って制御結果は改善されている。前件部メンバーシップ関数が釣鐘型の場合には、hを大きくするに従ってオーバーシュート量は改善されていくが、逆に立ち上がり特性は若干悪くなっている。一方、三角型の場合には、立ち上がり特性の良さは保ったまま、オーバーシュート量を大幅に改善することができ、良好な制御結果となっている。

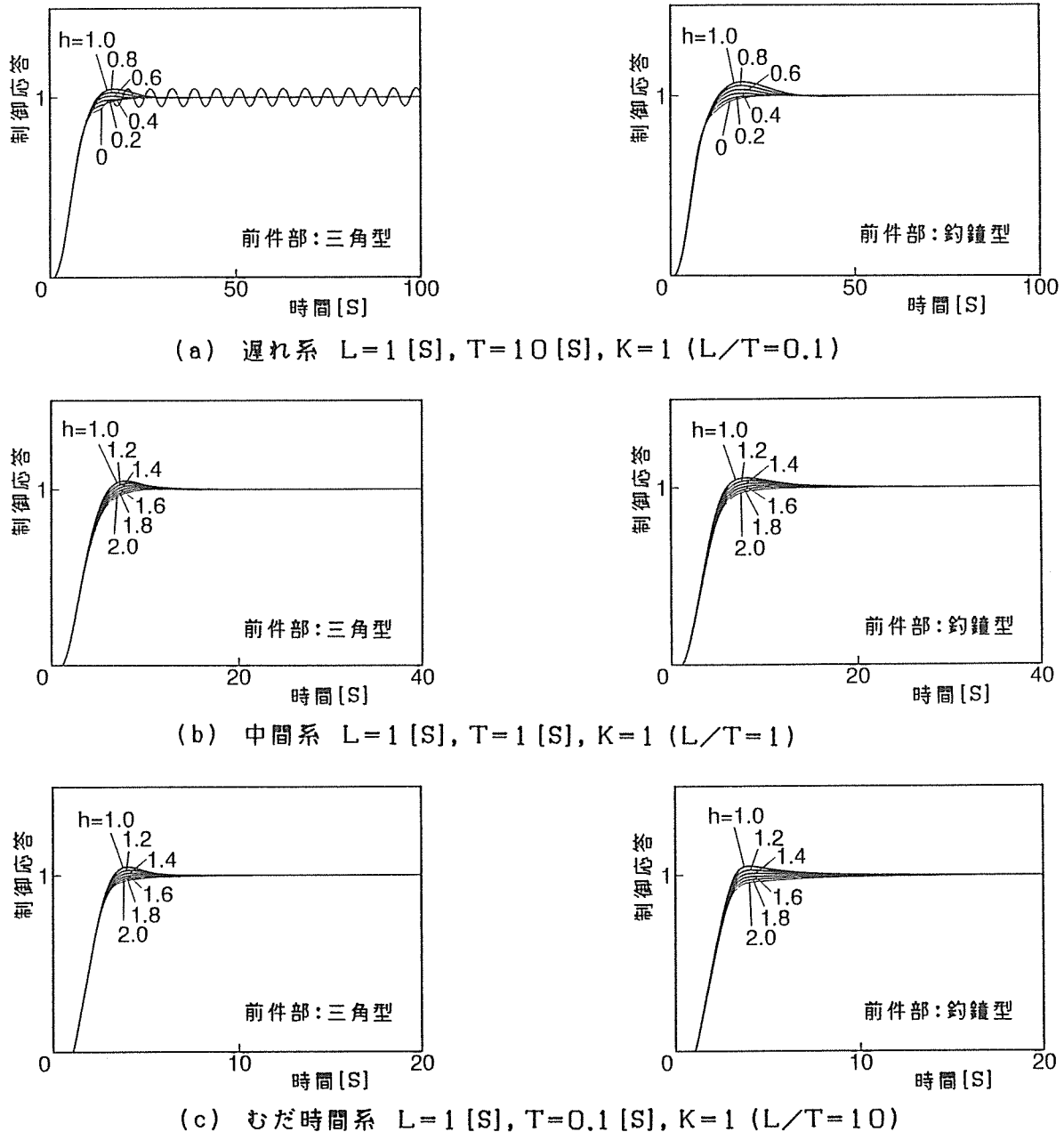


図7 後件部シングルトン型Z Oの高さhを変化させた場合の制御結果
（「山崎・菅野の制御規則」の場合）

5.2 規則数を大幅に減少した場合

本節では、更にファジィ制御器の一層の高速化を目的として、規則数を9個から5個の約半分に減少した表1(b)の「山崎・菅野の制御規則」⁽¹²⁾に対しても、この高さ h の調整法の適用で制御性能が改善できることを示そう。図7は、「山崎・菅野の制御規則」を用いた場合に、後件部のシングルトン型ZOの高さ h を変化させた場合の制御結果を示したものである。

図7から分かるように、この規則数を大幅に減少した「山崎・菅野の制御規則」の場合も、図6に示した「Rutherfordの制御規則」の場合の制御結果と司様に、シングルトン型ZOの高さ h の調整法を適用することで、モデルが(a)遅れ系の場合にはシングルトン型ZOの高さ h を1から小さくし、その制御への貢献度を「抑制」することによって、モデルが(b)中間系や(c)むだ時間系の場合には、逆にシングルトン型ZOの高さ h を1から大きくし、その制御への貢献度を「強調」することによって、制御性能が改善できる。

なお、この「山崎・菅野の制御規則」を用いた場

合、制御規則表を規則で埋め尽くした「Rutherfordの制御規則」を用いた場合の約1.5倍の速度で、ファジィ推論を実行できることになる（前記したようなプログラムのインプリメント環境の場合）。

以上、5.1、5.2節において述べてきたように、シングルトン型ZOの高さ h の調整法の特徴は、一般的な規格化定数の調整法⁽⁶⁾が前件部及び後件部の3つの規格化定数の変更を要する（図1に示したファジィ制御系の場合）のに比べ、1つのパラメータ h の変更によって、遅れ系、中間系、むだ時間系のどのモデルに対しても制御性能の改善を図ることができる点にある。ここでは、立ち上がり特性の良さは保ったままオーバーシュート量を大幅に低減できる。

5.3 コントロールマップにおける検討

本節では、コントロールマップを用いてこの高さ h の調整法の特徴を考察すると、コントロールマップはファジィ制御器の非線形ゲイン特性を三次元的に示すもの⁽¹⁹⁾で、その形状からファジィ制御系の挙動をある程度予測することができる⁽²⁰⁾。

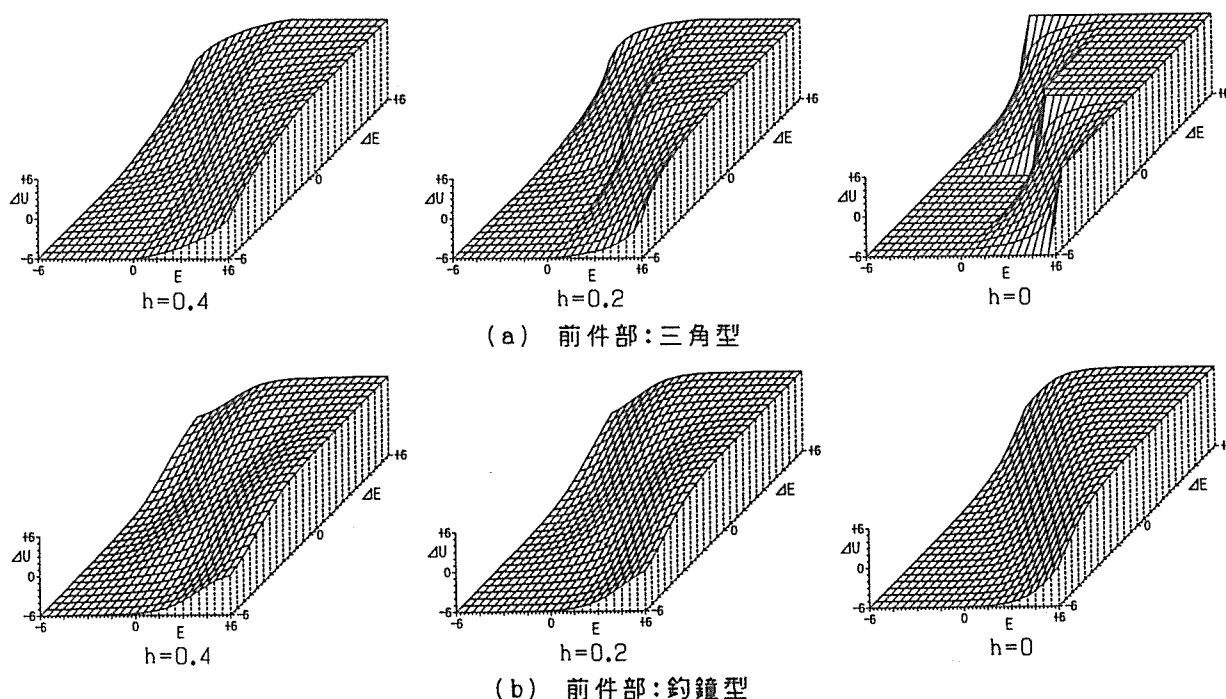


図8 後件部シングルトン型ZOの高さ h を小さくした場合のコントロールマップ
（「Rutherfordの制御規則」の場合）

図8は、制御規則表を規則で埋め尽くした「Rutherfordの制御規則」⁽¹¹⁾において、前件部メンバーシップ関数が三角型と釣鐘型の場合に、高さ h の値を0.4, 0.2, 0と小さくして、後件部のシングルトン型ZOを「抑制」した場合のコントロールマップを示したものである。

図8から分かるように、シングルトン型ZOの高さ h が小さくなるに従って、コントロールマップの原点近傍の形状は前件部メンバーシップ関数が(a)三角型の場合いびつなものとなるが、(b)釣鐘型の場合には $h=0$ の場合でも極めて滑らかに形成されている。従って、図6(a)遅れ系の場合の制御結果で示したように、前件部メンバーシップ関数が釣鐘型の場合、 h の値が零に近づいた場合でも制御が可能になることが、このコントロールマップの形状からうかがえる。

更には、「Rutherfordの制御規則」を用いた場合に、後件部のシングルトン型ZOの高さ h を変化させた場合のコントロールマップを斜めに、その非線形ゲイン特性の変化が最も顕著に現れる ΔU 軸と直

線 $E=\Delta E$ を通る平面で切った場合の断面図を図9に示す。同図(a)は高さ h を1から小さくし後件部のシングルトン型ZOを「抑制」した場合の、同図(b)は高さ h を1から大きくし後件部のシングルトン型ZOを「強調」した場合のコントロールマップの断面図を示したものである。

この図から、ファジィ分割数が低次の 3×3 分割の場合でも、この高さ h の調整のみで、多種多様な非線形ゲイン特性を有するコントロールマップが実現できることが分かる。

すなわち、図6に示した「Rutherfordの制御規則」を用いた場合の制御結果において、モデルが(a)遅れ系のように時定数が支配的な場合には、後件部のシングルトン型ZOを「抑制」することにより、その非線形ゲイン特性を大きくした場合のコントロールマップを、一方、(b)中間系や(c)むだ時間系のようにむだ時間が支配的になってきた場合には、逆に後件部のシングルトン型ZOを「強調」することにより、その非線形ゲイン特性を小さくした場合のコントロールマップを適用することにより、制御性能

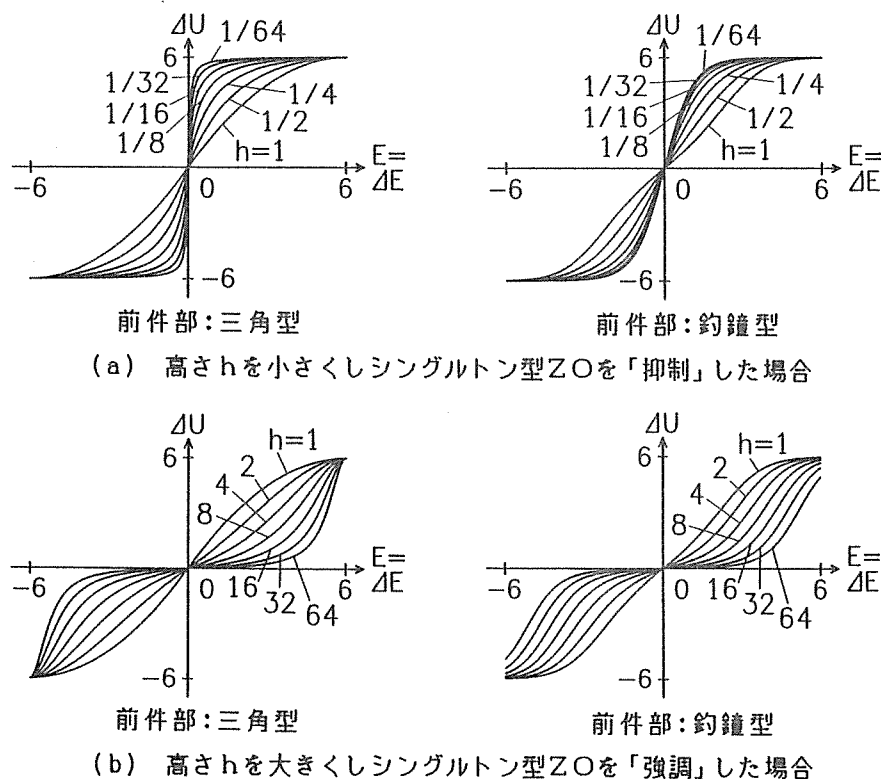


図9 後件部シングルトン型ZOの高さ h を変化させた場合のコントロールマップの断面図（「Rutherfordの制御規則」の場合）

の改善を行った。

なお、本節では、制御規則表を規則で埋め尽くした「Rutherfordの制御規則」を用いた場合のコントロールマップにおいて、シングルトン型ZOの高さhの調整法の検討を行った。規則数を大幅に減少した「山崎・菅野の制御規則」⁽¹²⁾を用いた場合にも、「Rutherfordの制御規則」を用いた場合とほとんど同様なコントロールマップの形状と断面図が得られ、ここでの検討と同様な考察を行うことができる。

6. おわりに

本報告では、ファジィ制御器の高速化と低次元化を目的として、まず、ファジィ分割数が低次の 3×3 分割の場合に、ファジィ推論法として高速推論が可能な「簡略化推論法」⁽⁴⁾⁽⁵⁾を適用した場合、その後件部のシングルトン型メンバーシップ関数ZOの高さhを調整することによって、制御性能が改善できるという方法を提案した。

次に、制御対象としてむだ時間のある一次遅れ系を設定し、まず制御規則表を規則で埋め尽くした「Rutherfordの制御規則」⁽¹¹⁾、更には一層の高速化のために規則数を大幅に減少した「山崎・菅野の制御規則」⁽¹²⁾に対して行った各種シミュレーション結果から、本改善法の有効性を検証した。

最後に、コントロールマップを用いた本改善法の検討において、ファジィ分割数が低次の 3×3 分割の場合でも、この高さhの調整だけで、多種多様なファジィ制御器の非線形特性が実現できることを示した。

最後に、本研究を遂行するにあたりご指導いただいた大阪電気通信大学の水本雅晴教授、九州工業大学の村上周太教授、前田幹夫助教授に深く感謝いたします。なお、本研究は佐賀県先端重要技術研究開発事業の実用技術共同研究で実施したものである。

参考文献

- (1) L.A. Zadeh : “Fuzzy Sets”, Information and Control, 8, 338 ~ 358(1965)
- (2) E.H. Mamdani : “Applications of Fuzzy Algorithms for Control of Simple Dynamic Plant”, Proc. of IEE, 121, 12, 1585 ~ 1588 (1974)
- (3) 水本雅晴 : 「ファジィ制御の改善法Ⅳ (代数積-加算-重心法による場合)」, 第6回ファジィシステムシンポジウム講演論文集, 9~13 (平2)
- (4) 市橋秀友・田中英夫 : 「PIDとFUZZYのハイブリッド型コントローラ」, 第4回ファジィシステムシンポジウム講演論文集, 97~102 (昭63)
- (5) 前田幹夫・村上周太 : 「ファジィ制御とその応用」, システム/制御/情報, 34, 5, 282 ~ 287 (平2)
- (6) 寺野寿郎他 : 「実用ファジィ制御技術」, 電子情報通信学会, 45~46, 98~110 (平3)
- (7) 水本雅晴 : 「ファジィ制御の改善法Ⅰ」, 第3回ファジィシステムシンポジウム講演論文集, 153~158 (昭62)
- (8) 水本雅晴 : 「ファジィ制御の改善法Ⅱ」, 第4回ファジィシステムシンポジウム講演論文集, 91~96 (昭63)
- (9) 水本雅晴 : 「ファジィ制御の改善法Ⅲ」, 第5回ファジィシステムシンポジウム講演論文集, 499~504 (平元)
- (10) 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)」, 第8回ファジィシステムシンポジウム講演論文集, 529~533 (平4)
- (11) M. Braae and D.A. Rutherford : “Theoretical and Linguistic Aspect of the Fuzzy Controller”, Automatica, 15, 533 ~ 577 (1979)
- (12) 山崎東・菅野道夫 : 「ファジィ制御」, システムと制御, 28, 7, 442~446 (昭59)
- (13) T. Iwasaki and A. Morita : “Fuzzy Auto Tuning for PID Controller with Model Classification”, Proc. of NAFIPS'90, 90 ~ 93 (1990)
- (14) 岩崎隆至・森田温・丸山寿一 : 「制御対象のクラス分けを付加したファジィオートチューニング」, 日本ファジィ学会誌, 5, 3, 639~

649 (平5)

- (15) 松山裕：「温度の測定と制御」，(財)省エネルギーセンター，124～128 (平元)
- (16) 菅野道夫：「ファジィ制御」，日刊工業新聞社，76～84 (昭63)
- (17) K. Hayashi, I. Muta, T. Hoshino and A. Otsubo:
“ Simulator for Evaluation of Various Fuzzy Control Methods ”, Proc. of Fifth IFSA World Congress, 949 ～ 952 (1993)
- (18) 林健一郎・大坪昭文：「各種ファジィ制御法の評価用シミュレータ」，日本ファジィ学会誌，6, 2, 260～264 (平6)
- (19) 張啗敦・荒木光彦：「ファジィ制御系の数理的解析と産業応用の可能性について」，計測自動制御学会論文集，26, 11, 1267～1274 (平2)
- (20) 前田幹夫・福宮英二・坪根昌弘：「非線形スケーリングファクタとそのファジィ制御への応用」，第8回ファジィシステムシンポジウム講演論文集，549～552 (平4)