ファジィ分割数が低次の場合の制御性能の改善* (ファジィ制御用シミュレータの適用)

林 健一郎^{*1}, 牟田 一 弥^{*1}
星 野 勉^{*1}, 大坪 昭 文^{*2}

Improvement of Control Performances for Low-Dimensional Number of Fuzzy Labelings (Using Fuzzy Control Simulator)

Kenichiro HAYASHI, Itsuya MUTA,
Tsutomu HOSHINO and Akifumi OTSUBO

Recently fuzzy control has been recognized to be of great usefulness in many engineering fields. However, the adjustment of fuzzy control parameters such as control rules, membership functions has been carried out by trial and error, and the definite design method of fuzzy control systems has not been established yet. In this paper, the influences of fuzzy inference methods on control performances have been examined by the simulations of a first order lag system with dead time. Moreover, the improvement of control performances in case of low-dimensional number of fuzzy labelings has been tried. Main results are as follows: (1) When the number of fuzzy labelings is low-dimension such as 3×3 divisions, control performances are dependent on fuzzy inference methods. Therefore, in case of low-dimensional number of fuzzy labelings, the selection of fuzzy inference methods is important. (2) Even in case of low-dimensional number of fuzzy labelings such as 3×3 divisions, by using the simple method of changing the height of the consequent membership function ZO, the non-linear characteristic of a fuzzy controller can be tuned and its control performances can be improved.

Key Words: Fuzzy Control, Fuzzy Inference Methods, Low-Dimensional Number of Fuzzy Labelings, Control Performances, Fuzzy Control Simulator

1. ま え が き

ファジィ制御の特徴は、たとえ制御対象の厳密な数学モデルがわからなくても、熟練したオペレータの経験や知識などを言語的制御規則の形で記述して、ファジィ推論を行うことにより、あたかも人間が行うような巧妙な制御をコンピュータで容易に実現できる点にある。

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り、Mamdaniの提案した推論法⁽¹⁾が現在最も多く用いられているが、必ずしも人間の直感にマッチした推論法ではないという指摘から、これに改善を施した種々のファジィ推論法が水本により提案されてきている^{(2)~(8)}。

しかし、ファジィ制御に関する研究がまだ日も浅いこともあって、ファジィ推論法による制御性能の違いや、制御対象の種類や特性に応じた適切なファジィ推論法の検討は、ほとんどなされていない状況にある。

また、ファジィ制御系は、制御規則などに依存した

強い非線形特性を有しているため、ファジィ制御系の設計法の確立は容易ならざるものがあり、ファジィ推論法、制御規則、メンバシップ関数などの設定と調整は試行錯誤的に行われている実状にある。

したがって、現段階ではファジィ制御系における設計指針を見い出すために、種々の検討が可能な設計支援システムが求められる。そこで、著者らは各種ファジィ推論法が容易に実現できる「ファジィ制御用シミュレータ」の開発を行った⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。本稿は、このシミュレータを活用して得られた成果を報告するものである。

さて、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 分割のように高次のものがよく使用されている。これは、一般にファジィ分割数が高次になるに従って、多様なファジィ制御器の非線形特性の実現が可能となるからである。

しかし、ファジィ分割数が高次になるほど、制御規則や制御パラメータの数は飛躍的に増加するので、ファジィ制御器の調整は極めて困難で時間を要する作業となってしまう。しかも、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。また、最近のシステムの複雑化や大規模化に伴う要請から、ファジィ制御器の低次元化への要求が高まっている。

* 原稿受付 平成5年6月4日。

^{*1} 佐賀大学理工学部 (〒840 佐賀市本庄町1)。

^{*2} 正員、佐賀県工業技術センター (〒849 佐賀市鍋島町大字八戸溝114)。

しかしながら、現在までの報告はファジィ分割数を高次とした場合の検討結果に関するものがほとんどであり、ファジィ分割数を 3×3 分割のように低次とした場合の検討はほとんどなされていない。

そこで、本稿ではファジィ分割数を低次とした場合に、各種ファジィ推論法の違いが制御性能に及ぼす影響や低次分割数における制御性能の改善法について、むだ時間のある 1 次遅れ系を対象とした種々のシミュレーションを実行し、検討を行った。

その結果、ファジィ分割数が低次の場合、ファジィ推論法の違いは制御性能に大きな影響を及ぼすので、その選定は極めて重要となることがわかった。さらには、ファジィ分割数が低次の場合ファジィ推論法を変更することなしに、後件部メンバシップ関数 ZO の高さの調整だけで制御性能が改善できることが明らかになった。

2. ファジィ制御系の構成

本稿では、図 1 に示すようなファジィ制御系のシミュレーションを行う。ここで、 R は目標値、 Y は制御量、 E は偏差、 ΔE は偏差の変化分を示す。また、ファジィ制御器は操作量 U の変化分 ΔU を出力する速度形としている。

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 1 次遅れ系であり、

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

式(1)において、 L はむだ時間の大きさ、 K はシステムゲイン、 T は 1 次遅れ時定数を表す。

一般に、制御系設計の知識により、むだ時間のある 1 次遅れの系は L/T の値により、遅れ系(時定数が支配的な系)、中間系、むだ時間系(むだ時間が支配的な系)の三つのモデルに分類できる⁽¹¹⁾⁽¹²⁾。本シミュレーションにおいては、 L/T の値は図 6 に示すように 0.1 から 10 の範囲とし、また遅れ系のモデルパラメータは水本と同様に設定した^{(2)~(7)}。

3. 制御規則とメンバシップ関数

本稿ではファジィ分割数が 3×3 分割の場合の表 1 に示す山崎・菅野の制御規則表⁽¹³⁾に基づいてシミュレーションを実行した。ここで、 3×3 分割とは、前件部

図 1 ファジィ制御系の構成

および後件部を表 1 に示すように、NB (Negative Big), ZO (Zero), PB (Positive Big) の三つのファジィレベルに分けることである。

メンバシップ関数は、前件部メンバシップ関数として、通常よく用いられる図 2 (a) に示す三角形と、低次分割数における制御性能の改善では図 2 (b) に示す釣鐘形も用いた⁽¹⁴⁾。また、後件部メンバシップ関数として、非ファジィ化法が重心法の場合には、図 3 に示すような NB, PB の片割れを左右対象に修復した三角形⁽⁴⁾を、また、非ファジィ化法が高さ法の場合には、その三角形の底辺の幅を零としたシングルトン⁽³⁾(図 3 中の点線)を用いた。

ここで用いたメンバシップ関数を $A_i(x)(i=1 \sim n)$ とすると

三角形は

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

表 1 山崎・菅野の制御規則表

$\Delta E \backslash E$	NB	ZO	PB
PB		PB	
ZO	NB	ZO	PB
NB		NB

(a) 三角形

(b) 釣鐘形

図 2 前件部メンバシップ関数

図 3 後件部メンバシップ関数

釣鐘形は

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

式(2), (3)において, n はファジィラベル数, b_i はメンバシップ関数のグレードが1になる x の値, a はその広がりを表す。また, 台集合は $[-6, 6]$ に規格化している。

なお, 図2において隣合うメンバシップ関数との交点のグレードを交差値 α と呼び,

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

以下のシミュレーションにおいては, 前件部メンバシップ関数の交差値 α は, 一般的に良好な制御性能が得られるとの指摘⁽²⁾⁽³⁾がある $\alpha=0.5$ とした。

4. シミュレーション法

先に著者らは, 573 種類に及ぶ多種多様なファジィ推論法が実現できる「ファジィ制御用シミュレータ」の開発を行った⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。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, ここに利用した機能の一部を簡単に紹介する。

まず, ファジィ分割数や制御規則の設定を行い, 次に示すようなステップでファジィ推論法の決定を行った後, シミュレーションを実行する。

図4 シミュレーション手順

Step 1: 入力があった場合に, 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

Step 2: 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

Step 3: 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

Step 4: 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「非ファジィ化法」の設定

本稿では, ファジィ推論法の違いが制御性能に及ぼす影響を調べるため, ファジィ推論法として「min-max-重心法」, 「min-加算-重心法」, 「代数積-max-重心法」, 「代数積-加算-重心法」, およびそれらの非ファジィ化法を高さ法とした合計8種類を用いた^{(2)~(8)}。

例えば, 「代数積-加算-重心法」と「代数積-加算-高さ法」の場合のファジィ推論の過程を図5に示す。

図5(a)の「代数積-加算-重心法」では, まず Step 1, 2 において代数積($\times$)演算を行い, 次に Step 3 において加算($+$)演算を行い, 最後の Step 4 で重心法を用いるものである。ここで, $A_i, B_i (i=1, 2)$ は前件部の, C_i は後件部のファジィ集合, および C'_i は各推論結果の, C' は統合化後のファジィ集合である。また, x_0, y_0 はシングルトン入力, z_0 は推論結果である非ファジィな出力を表す。

図5(b)の「代数積-加算-高さ法」では, 「代数積-加算-重心法」と同様に, Step 1, 2 において代数積($\times$)演算を行い, Step 3, 4 で高さ法(重み付き加算平均)を用いるものである。ここで, $h_i (i=1, 2)$ は各規則の前件部適合度を, z_i は後件部シングルトンの位置を表し, そのほかの記号は(a)の場合と同様である。

(a) 「代数積-加算-重心法」の場合

(b) 「代数積-加算-高さ法」の場合

図5 ファジィ推論の過程

5. 各種ファジィ推論法による制御性能

一般に、ファジィ分割数が 7×7 分割のように高次の場合、ファジィ推論法の違いは制御性能にほとんど影響を与えないと言われている⁽¹⁵⁾が、ファジィ分割数を低次の 3×3 分割とした場合の検討はなされていない。そこで、本章では、ファジィ分割数が低次の場合に、ファジィ推論法の違いが制御性能に及ぼす影響を調べてみよう。

図6は前述した8つのファジィ推論法を用いた場合のステップ応答を示したものである。ここで、図6における左段は「非ファジィ化法」として重心法を用いた場合の、右段は高さ法を用いた場合の制御結果である。

制御対象が(a)遅れ系の場合「非ファジィ化法」の種類にかかわらず、「統合化法」のための演算子として

加算(+)を用いた場合が良好な制御結果となっている。一方、(b)中間系や(c)むだ時間系の場合には「非ファジィ化法」の種類にかかわらず、「適合度演算法」および「含意演算法」のための演算子として論理積(min)を用いた場合が、極めて良好な制御結果となっている。

また、どのモデルにおいても「非ファジィ化法」として重心法を用いた場合が高さ法を用いた場合より、ファジィ推論法の制御結果に及ぼす影響は大きくなっている。特に、(b)中間系や(c)むだ時間系の場合には、「代数積-max-高さ法」と「代数積-加算-高さ法」、「min-max-高さ法」と「min-加算-高さ法」を用いた場合の制御結果はほとんど同一であるのに対し、それらの「非ファジィ化法」を重心法とした場合の制御結果は異なっている。

また、(a)遅れ系から(b)中間系、(c)むだ時間系

(a) 遅れ系 $L=2, T=20, K=1 (L/T=0.1)$

(b) 中間系 $L=10, T=10, K=1 (L/T=1)$

(c) むだ時間系 $L=100, T=10, K=1 (L/T=10)$

図6 各種ファジィ推論法による制御結果

とむだ時間が支配的なモデルになるほど、一般に整定までに要する推論回数が増加するので、ファジィ推論法の制御結果に及ぼす影響はより顕著なものとなっている。

以上のように、ファジィ分割数が低次の 3×3 分割の場合、ファジィ推論法の違いは制御性能に大きな影響を及ぼすことになる。すなわち、この場合ファジィ分割数が高次の場合と比べ、制御領域はより粗くファジィ分割されて各制御戦略間の距離が大きくなるので、各制御戦略間の補間(内挿推論)を行うファジィ推論法⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾の違いが制御結果に大きな影響を及ぼすようになるためである。したがって、ファジィ分割数が低次の場合ファジィ推論法の選定は重要なものとなる。

6. 低次分割数における制御性能の改善

第5章での検討の結果、ファジィ分割数が低次の

3×3 分割の場合、ファジィ推論法の違いは制御性能に大きな影響を及ぼし、ファジィ推論法の変更によって制御性能の改善ができることがわかった。

本章では、ファジィ分割数が低次の場合ファジィ推論法は固定したままでも、後件部メンバシップ関数 ZO の制御への貢献度を調整するだけで、簡便に制御性能の改善を図れることを示そう。

ファジィ分割数が 3×3 分割の場合、図3に示したように後件部には NB(負), ZO(零), PB(正)の三つのメンバシップ関数しか存在しないので、メンバシップ関数 ZO の制御への貢献度を変更することで、ファジィ制御器の非線形特性を調整できる。

6・1 後件部 ZO の高さ h の変更による改善 本節では、後件部メンバシップ関数 ZO の高さ h の変更によって、その制御への貢献度の調整を行うことにより、制御性能の改善を行った。

図5(a)に示したファジィ推論法で、人間の直感に

図7 高さ h を変化させた場合の制御結果

合うという指摘のある「代数積-加算-重心法」⁽⁶⁾に対して、後件部メンバシップ関数 ZO の高さ h を変更した場合の制御結果を図7に示した。なお、図6は、ここで $h=1$ とした場合の制御結果であった。

(a)遅れ系のモデルの場合、後件部 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」するに従って、前件部メンバシップ関数の形にかかわらず、ステップ応答は改善されていることがわかる。具体的には、後件部 ZO の貢献度の「抑制」に従って、一般に立ち上がり特性とオーバーシュート量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。

前件部メンバシップ関数が三角形の場合、ある高さ h で持続振動が発生し不安定となっている。一方、釣鐘形の場合には h が小さくなると制御性能が大幅に改善され、 $h=0$ の場合でも制御が可能となっている。この場合、表1の制御規則表で中央の要素がなくなり、4個の規則数に縮減しても制御が可能となることを意味する。

(b)中間系や(c)むだ時間系のモデルの場合、(a)遅れ系の場合とは逆に h を1から大きくして、後件部 ZO の制御への貢献度を「強調」するに従って、ステップ応答は改善されている。前件部メンバシップ関数が釣鐘形の場合、 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反面、立ち上がり特性は若干悪くなっている。一方、三角形の場合には立ち上がり特性はそのままオーバーシュート量が改善され、良好な制御結果となっている。

以上のように、ファジィ分割数が低次の 3×3 分割の場合、ファジィ推論法を変更することなしに、後件部メンバシップ関数 ZO の高さ h を調整するだけで、遅れ系、中間系、むだ時間系のどのモデルにおいても制御性能を改善することができる。ここでは、立ち上がり特性はそのままオーバーシュート量を大幅に低減できる。

6.2 コントロールマップにおける改善法の検討

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表し⁽¹⁸⁾、その形状からファジィ制御系の挙動をある程度予測できるものである⁽¹⁹⁾。本節では、このコントロールマップの形状から高さ h の調整法の特徴を検討してみよう。

図8は、ファジィ推論法として「代数積-加算-重心法」を用い、後件部メンバシップ関数 ZO の高さ h の値を0.4, 0.2, 0と小さくした場合のコントロールマップを表したものである。

図8から高さ h の変更によるコントロールマップの形状変化がわかるが、前件部メンバシップ関数が三角形の場合 h が小さくなるに従って、コントロールマップの形状はいびつなものとなる。特に、この三角形では、前述した図7(a)の制御結果において、 h を小さくすると目標値近傍で振動が持続する現象が見られるのは、コントロールマップの中央部が急峻な傾斜となり、そこでゲインが急変するためである。一方、釣鐘形の場合には $h=0$ の場合でも原点近傍の形状は極めてなめらかに保たれることから、この場合でも制御が可能であることがわかる。

図8 コントロールマップ

図 9 コントロールマップの断面図

また、ファジィ推論法が「代数積-加算-重心法」で、後件部メンバシップ関数 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 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。図 9 (a) は高さ h を小さくし後件部メンバシップ関数 ZO を「抑制」した場合の、図 9 (b) は高さ h を大きくし後件部メンバシップ関数 ZO を「強調」した場合のコントロールマップの断面図である。

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、後件部メンバシップ関数 ZO の高さ h の調整のみで、多種多様なファジィ制御器の非線形ゲイン特性を実現できることがわかる。

すなわち、前述した図 7 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、後件部メンバシップ関数 ZO を「抑制」することで、その非線形ゲイン特性を大きくしたコントロールマップを適用することにより制御性能の改善を行った。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となった場合には、逆に後件部メンバシップ関数 ZO を「強調」することで、その非線形ゲイン特性を小さくしたコントロールマップを適用することにより改善を行った。

7. む す び

以上、むだ時間のある 1 次遅れ系を対象とし、ファジィ分割数が低次の場合の各種ファジィ推論法による

制御性能、および低次分割数の場合の制御性能の改善法について種々のシミュレーションを実行し、検討を行った。おもな結果を次に示す。

(1) ファジィ分割数が 3×3 分割のように低次の場合には、ファジィ推論法の違いは制御性能に大きな響を及ぼすので、その選定は重要となる。

(2) ファジィ分割数が低次の場合でも、ファジィ推論法を変更することなしに、後件部メンバシップ関数 ZO の高さ h を調整するだけで、多種多様なファジィ制御器の非線形特性が実現でき、制御性能を改善できる。

なお、本稿では制御規則表に空きが存在する山崎・菅野の制御規則を用いた場合の制御結果のみ報告したが、制御規則表が埋め尽くされた Rutherford の制御規則⁽²⁰⁾を用いた場合の検討も行っている⁽²¹⁾。

おわりに、本研究を進めるにあたり有益なご助言を頂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、前田幹夫助手らに深く謝意を表す。また、本研究は「佐賀県先端重要技術研究開発事業」の助成を得て実施したことを記し、ここに関係各位に厚くお礼申し上げる。

文 献

- (1) Mamdani, E. H., *Applications of Fuzzy Algorithms for Control of Simple Dynamic Plant*, Proc. IEEE, 121-12(1974), 1585-1588.
- (2) 水本, 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, (1987), 153-158.
- (3) 水本, 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, (1988), 91-96.
- (4) 水本, 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, (1989), 499-504.
- (5) 水本, 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, (1990), 9-13.
- (6) 水本, ファジィ制御の改善法V-強調型および抑制型のファジィ制御規則を使用した場合-, 第7回ファジィシステムシンポジウム, (1991), 269-273.
- (7) 水本, 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, (1992), 529-533.
- (8) 水本, ファジィ制御の改善法VII-ファジィシングルトン型推論法と代数積-加算-重心法の等価性-, 第9回ファジィシステムシンポジウム, (1993), 313-316.
- (9) 林・大坪・松尾・牟田, 各種ファジィ制御法の評価用シミュレータの開発, 第8回ファジィシステムシンポジウム, (1992), 433-436.
- (10) Hayashi, K., ほか3名, Simulator for Evaluation of Various Fuzzy Control Methods, *Prep. of Fifth IFSA World Congress*, (1993), 949-952.
- (11) 岩崎・森田, モデル分類型ファジィオートチューニングコントローラ, 第32回自動制御連合講演会, (1989), 267-268.
- (12) Iwasaki, T. and Morita, A., Fuzzy Auto-Tuning for PID Controller with Model Classification, *Proc. of NAFIPS'90*, (1990), 90-93.
- (13) 山崎・菅野, ファジィ制御, システムと制御, 28-7 (1984), 442-446.
- (14) 菅野, ファジィ制御, (1988), 76-78, 日刊工業新聞社.
- (15) 例えば, 田中・佐野, 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調整公式, 日本ファジィ学会誌, 3-3(1991), 583-591.
- (16) 水本, ファジィ推論法による補間I, 第5回ファジィシステムシンポジウム, (1989), 461-466.
- (17) 水本, 山田, ファジィ推論法による補間II-条件部が2変数の場合-, 第8回ファジィシステムシンポジウム, (1992), 217-220.
- (18) 張・荒木, ファジィ制御系の数理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(1990), 1267-1274.
- (19) 前田・福宮・坪根, 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, (1992), 549-552.
- (20) Brrae, M. and Rutherford, D. A., Theoretical and Linguistic Aspects of the Fuzzy Controller, *Automatica*, 15(1979), 533-577.
- (21) 林・大坪・牟田・星野・松尾, 低次元分割におけるファジィ制御性能の改善, 第9回ファジィシステムシンポジウム, (1993), 321-324.