領域別のスケーリングファクタによるファジィ制御*

林 健一郎^{*1}, 大坪 昭文^{*1}, 白仁田 和彦^{*1}

Fuzzy Control Using Scaling Factors Suitable for Control Areas

Kenichiro HAYASHI, Akifumi OTSUBO^{*2} and Kazuhiko SHIRANITA^{*2}Industrial Technology Center of Saga, 114 Yaemizo, Nabeshima-cho, Saga-shi, Saga, 849-0932 Japan

In the conventional fuzzy control method, as the value of a scaling factor in the consequent part is the same in all control areas, improvement of the nonlinear input/output characteristics of a fuzzy controller is limited thus, its control performance cannot be improved markedly. Therefore, a new fuzzy control method, which can markedly improve the control performance compared with the conventional fuzzy control method, is proposed in this paper. In the proposed fuzzy control method, the control performance is improved because the value of the scaling factor in the consequent part is tuned dynamically according to the control area by using the fuzzy inference method. Then, on the basis of the simulation results, in which the first- and second-order lag systems with dead time are set as the controlled system, the effectiveness of the proposed fuzzy control method in improving the control performance is compared with the conventional fuzzy control method.

Key Words: Fuzzy Control, Simplified Inference Method, Scaling Factor, Tuning Rules, Weight, Control Performance

1. 緒 言

ファジィ集合の概念がカリフォルニア大学のZadehにより提案されて⁽¹⁾以来, 現在ではファジィ理論とその応用に関する研究があらゆる分野において急速な進展を見せている。なかでも, ファジィ制御はファジィ理論の応用分野として最も早くから注目されており, ロンドン大学のMamdaniがはじめてそれをスチームエンジンの制御に適用した⁽²⁾ことが, ファジィ制御の実用化への端緒となった。

このファジィ制御の方法として従来から良く用いられてきたものは, 山崎・菅野らが提案したファジィ制御の方法である⁽³⁾⁽⁴⁾が, この方法はファジィ制御規則の後件部メンバーシップ関数に三角型を用いるので, 非ファジィ化などの推論計算に時間を要し, ファジィ制御の実行速度に限界があった。そのため, ファジィ制御の高速化の目的のために, 山崎・菅野らが提案し

たファジィ制御の方法において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方法が, 市橋⁽⁵⁾や前田⁽⁶⁾らによって提案され, 現在この方法が従来のファジィ制御の主流となっている⁽⁷⁾。

この後件部メンバーシップ関数をシングルトン型とするファジィ制御の改善のために, 水本は使用するファジィ制御規則に重み付けをすることにより, ファジィ制御器の非線形な入出力特性を改善して, ファジィ制御の制御性能の改善を図る方法を提案している⁽⁸⁾⁽⁹⁾。そして, この従来のファジィ制御の制御規則に重み付けする水本提案の方法は, ファジィ制御器の制御現場での調整が比較的容易となる⁽¹⁰⁾ことから, 実際に良く用いられている⁽¹¹⁾⁽¹²⁾。しかしながら, 水本が基にした従来のファジィ制御の方法においては, 後件部のスケーリングファクタ(規格化定数)を全制御領域で同じ値としているため, その制御規則に重み付けをしたとしても, ファジィ制御器の非線形な入出力特性の改善には限界があった。従って, 水本提案のファジィ制御規則に重み付けする方法においても, 従来のファジィ制御の制御性能を大幅には改善できないという問題があった。

* 原稿受付 2000年11月28日。

^{*1} 正員, 佐賀県工業技術センター(☎849-0932 佐賀市鍋島町大字八戸溝114)。

E-mail: otubo@saga-itc.go.jp

そこで、本論文では、これら全制御領域で後件部スケールリングファクタの値を一定とするファジィ制御の方法とは違って、ファジィ推論法を用いてその値を制御領域に応じ動的に調整することにより、従来のファジィ制御と比べて大幅に制御性能が改善できるという方法を提案する。ここで提案するファジィ制御の方法の特長は、制御領域に応じて後件部スケールリングファクタの値を調整することで、ファジィ制御器の非線形な入出力特性の改善が容易となる点にある。

従って、本論文では、まず、全制御領域で後件部スケールリングファクタの値を一定とする従来のファジィ制御の方法について説明した後、ファジィ推論法により制御領域に応じてその値を調整する提案のファジィ制御の方法について述べる。そして、むだ時間のある一次遅れ系と二次遅れ系を制御対象に設定したシミュレーション結果から、提案したファジィ制御の制御性能の改善における有効性を、従来のファジィ制御とその制御規則に重み付けしたファジィ制御と比較して示す。

2. 領域別にスケールリングファクタを設定するファジィ制御

本章では、まず、全制御領域で後件部スケールリングファクタの値を一定に設定する従来のファジィ制御の方法について述べる。次に、制御領域に応じその値をファジィ推論法を用いて動的に調整する提案のファジィ制御の方法について述べる。

2.1 従来のスケールリングファクタ一定によるファジィ制御 全制御領域において後件部スケールリングファクタの値を一定に設定する、従来から良く用いられてきたファジィ制御の方法は山崎・菅野らが提案したものである⁽³⁾⁽⁴⁾。このファジィ制御の方法においては、その制御規則表を規則で埋め尽くした表1に示すファジィ制御規則⁽¹³⁾が実用上良く用いられる。また、ファジィ制御規則の前件部メンバーシップ関数として図1(a)に示すような三角型、後件部メンバーシップ関数として現在図1(b)に示す非ファジィなシングルトン型が良く用いられる⁽⁷⁾。ここで、前件部と後件部のメンバーシップ関数の台集合は $[-6, 6]$ の範囲に規格化され、従来のファジィ制御の方法においては、前件部と後件部のスケールリングファクタは全制御領域で一定の値に設定される。

表1の制御規則表において、 i 番目の規則を規則 i とすると、

規則 i : If E is A_i and ΔE is B_i then ΔU is c_i
 $(i=1, \dots, 25)$ (1)

Table 1 Fuzzy control rules

$\Delta E \backslash E$	NB	NS	ZO	PS	PB
PB	0	3	6	6	6
PS	-3	0	3	6	6
ZO	-6	-3	0	3	6
NS	-6	-6	-3	0	3
NB	-6	-6	-6	-3	0

NB: Negative Big PB: Positive Big
 NS: Negative Small PS: Positive Small
 ZO: Zero

と表現できる。ここで、 E は偏差、 ΔE は偏差の変化分であり、 ΔU は操作量 U の変化分を表している。 A_i 、 B_i はそれぞれ E 、 ΔE に関する前件部のファジィ変数であり、 c_i は ΔU に関する後件部のシングルトン型の位置を表している。

いま、このファジィ制御器に前件部スケールリングファクタにより規格化後の確定値 E^0 、 ΔE^0 が入力されたとすると、規則全体としての推論結果である出力 ΔU^0 は、ファジィ推論法の簡略化推論法⁽⁷⁾の推論手順に従うことにより、

$$\Delta U^0 = \frac{\sum_{i=1}^{25} h_i \cdot c_i}{\sum_{i=1}^{25} h_i} \quad (2)$$

となる。ここで、 $\cdot$ は代数積の演算を意味する。また、 h_i は規則 i の前件部の適合度であり、

Fig. 1 Membership functions

$$h_i = A_i(E^0) \cdot B_i(\Delta E^0) \quad (3)$$

で計算される。なお、制御対象への実際の出力は式(2)の ΔU^0 に後件部スケールリングファクタの値を掛けただものである。

2.2 領域別のスケールリングファクタによるファジィ制御 従来のファジィ制御においては、どの制御領域においても前件部、後件部スケールリングファクタの両方とも同一の値に設定したままである⁽³⁾⁽⁴⁾。一方、ここで提案するファジィ制御は、特に後件部スケールリングファクタ（実際には従来のファジィ制御で設定した後件部スケールリングファクタに対する重み）の値を、ファジィ推論法の簡略化推論法⁽⁷⁾により制御領域に応じて動的に調整するものである。ただし、前件部スケールリングファクタの値は全制御領域において従来のファジィ制御の場合と同様に同一の値に設定している。

従って、ここで提案のファジィ制御の場合においても、従来のファジィ制御の場合と同様に、表1に示したファジィ制御規則を用いて、その前件部と後件部に図1に示したメンバーシップ関数を用いる。提案のファジィ制御において、従来のファジィ制御で設定した後件部スケールリングファクタの値を調整するために用いる、後件部スケールリングファクタに対する重みの調整用規則を表2に示す。ここで、表中の重みが1.0の制御領域においては、従来のファジィ制御で設定した後件部スケールリングファクタの値を、提案のファジィ制御でもそのまま用いることを意味する。また、 w_1 は制御応答の立ち上がりの領域 $(E, \Delta E) = (PB, ZO)$ の、 w_2 は目標値近傍の領域 $(E, \Delta E) = (ZO, ZO)$ の従来のファジィ制御で設定した後件部スケールリングファクタに対する重みを意味する。

いま、規格化後の確定値入力力が E^0 、 ΔE^0 である場合に、表2の調整用規則に簡略化推論法を適用した場合の推論結果を重み W^0 とすると、提案のファジィ制御における後件部スケールリングファクタ $S'_{\Delta U}$ の値は、

$$S'_{\Delta U} = W^0 \cdot S_{\Delta U} \quad (4)$$

で計算される。ここで、 $S_{\Delta U}$ は従来のファジィ制御で設定した後件部スケールリングファクタの値である。なお、重み W^0 を求めるための簡略化推論法では、前節の式(1)～式(3)において、後件部の ΔU を重み W に、

Table 2 Tuning rules for weight on scaling factor in consequent part

$\begin{matrix} E \\ \Delta E \end{matrix}$	NB	NS	ZO	PS	PB
PB	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
PS	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
ZO	1.0	1.0	w_2	1.0	w_1
NS	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
NB	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0

NB: Negative Big PB: Positive Big
NS: Negative Small PS: Positive Small
ZO: Zero

また c_i を重み W に関するシングルトン型の位置 w_i に置き換えた式を用いる。

以上述べてきたように、ここで提案するファジィ制御の方法は、ファジィ推論法により決定される式(4)の後件部スケールリングファクタを用いること以外は、従来のファジィ制御の方法と全く同じであり、前節の式(1)～式(3)に基づいて実行される。従って、提案のファジィ制御の方法においては、表2の後件部スケールリングファクタに対する重みの調整用規則における重み w_1 と w_2 の設定が、制御性能の改善のためには特に重要となるが、それらの具体的な設定の仕方については3.1節で述べる。

3. シミュレーション例

本章では、ファジィ推論法を用いて後件部スケールリングファクタを動的に調整する提案のファジィ制御が、従来のファジィ制御⁽³⁾⁽⁴⁾とその制御規則に重み付けしたファジィ制御⁽⁸⁾⁽⁹⁾と比較して制御性能が改善できることを、むだ時間のある一次遅れ系と二次遅れ系を制御対象としたシミュレーション結果から示す。

3.1 制御対象とパラメータ調整 本シミュレーションにおける制御系の構成を図2に示す。同図において R は目標値、 E は偏差、 ΔE は偏差の変化分、 Y は制御量を表している。また、ファジィ制御器（提案／従来）からの出力は操作量 U の変化分 ΔU であり、制御器として速度型となっている。

Fig. 2 Configuration of a fuzzy control system in this simulation

設定した制御対象には、むだ時間のある一次遅れ系として式(5)に示すような伝達関数を用いた。

$$G(s) = \frac{e^{-10s}}{1+20s} \quad (5)$$

また、むだ時間のある二次遅れ系として前田・村上らと同様に式(6)の伝達関数⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾を用いた。

$$G(s) = \frac{35.78 e^{-5s}}{(1.73s+1)(16.85s+1)} \quad (6)$$

ここで提案のファジィ制御におけるパラメータ調整は、基本的に以下に述べるような手順に従って実行される。

〈手順1〉従来のファジィ制御とした場合にオーバーシュート量が仕様を満足して良好な制御応答になるように、前件部と後件部のスケーリングファクタの値を決定し、それらの値を提案のファジィ制御におけるスケーリングファクタの値とする。

〈手順2〉従来のファジィ制御よりも立ち上がり特性が改善するように、表2の後件部スケーリ

ングファクタに対する重みの調整用規則における重み w_1 の値を調整(大きく)する。

ここで、重み w_1 の初期値は1.0としている。

〈手順3〉立ち上がり特性の改善に伴うオーバーシュート量の増加を抑制するために、前件部の ΔE に関するスケーリングファクタの値を調整(小さく)する。もし、この調整でオーバーシュート量の増加が抑制できない場合には、手順2に戻り重み w_1 の値を現在値よりも小さくする。

〈手順4〉目標値近傍における振動を抑制するために、表2の後件部スケーリングファクタに対する重みの調整用規則における重み w_2 の値を調整(小さく)する。ここで、重み w_2 の初期値は1.0としている。

〈手順5〉提案のファジィ制御の制御性能が改善でき得る限り、手順2から手順4を繰り返し実行する。

以上述べた提案のファジィ制御のパラメータ調整手順においては、ファジィ制御における経験的なパラメータ調整の知識を活用した^{(14)~(18)}。

(a) Control results

(b) Map of weight on scaling factor ($w_1=1.6$ and $w_2=0.5$ in Table 2)

Fig. 3 Comparison of control performances for a first-order lag system with dead time under 0% overshoot

(a) Control results

(b) Map of weight on scaling factor ($w_1=2.1$ and $w_2=0.6$ in Table 2)

Fig. 4 Comparison of control performances for a first-order lag system with dead time under 5% overshoot

なお、従来のファジィ制御のパラメータ調整は、実際に良く行われる前件部と後件部のスケールリングファクタの調整を行った^{(16)~(18)}。また、従来のファジィ制御の制御規則に重み付けしたファジィ制御のパラメータ調整は、前件部と後件部のスケールリングファクタの調整に加えて、制御規則に対する重みの調整を行った⁽⁸⁾⁽⁹⁾。

3.2 シミュレーション結果 図3は、制御対象がむだ時間のある一次遅れ系の場合に、オーバーシュート量が0%の場合の提案のファジィ制御と従来のファジィ制御及びその制御規則に重み付けしたファジィ制御との制御性能の比較を行ったものである。同図の(a)は各々の制御結果を示したものであり、同図においてProposed Fuzzyが提案のファジィ制御、Conventional Fuzzy 1が従来のファジィ制御、Conventional Fuzzy 2が従来のファジィ制御の制御規則に重み付けしたファジィ制御を意味している。ここで、Conventional Fuzzy 2においては、Proposed Fuzzyにおける後件部スケールリングファクタへの重み付けと同様に、制御領域 $(E, \Delta E) = (PB, ZO)$ 、 (ZO, ZO) で制御規則への重み付けを行った。同図の(b)は

提案のファジィ制御における後件部スケールリングファクタに対する重みを三次元的に制御領域で表現したマップを示したものである。また、図4は、同じくむだ時間のある一次遅れ系の場合に、オーバーシュート量が5%の場合の図3と同様な制御性能の比較を行ったものである。

図3と図4の制御結果から分かるように、オーバーシュートが無い場合にも有る場合にも、制御規則に重み付けしたファジィ制御の場合が、従来のファジィ制御の場合と比べて制御性能が若干改善される結果となっている。それに対して、提案のファジィ制御の場合には、従来のファジィ制御やその制御規則に重み付けしたファジィ制御の場合と比べて、立ち上がり特性の良さにもかかわらず目標値にいち早く整定し、大幅に制御性能が改善される結果となっている。

図5は、制御対象がむだ時間のある二次遅れ系の場合にオーバーシュート量が0%の場合の、また、図6は、同じくむだ時間のある二次遅れ系の場合にオーバーシュート量が5%の場合の、図3、図4と同様な提案のファジィ制御と従来のファジィ制御及びその制御規則に重み付けしたファジィ制御との制御性能の比較

(a) Control results

(b) Map of weight on scaling factor
($w_1=1.8$ and $w_2=0.5$ in Table 2)

Fig. 5 Comparison of control performances for a second-order lag system with dead time under 0% overshoot

(a) Control results

(b) Map of weight on scaling factor
($w_1=2.1$ and $w_2=0.6$ in Table 2)

Fig. 6 Comparison of control performances for a second-order lag system with dead time under 5% overshoot

を行ったものである。

図5と図6の制御結果から分かるように、むだ時間のある二次遅れ系の場合も一次遅れ系の場合の制御結果と同様に、オーバーシュートが無い場合にも有る場合にも、従来のファジィ制御の制御規則に重み付けしたファジィ制御の場合が従来のファジィ制御の場合より制御性能が若干改善されてはいるものの、提案のファジィ制御の場合には従来のファジィ制御の場合と比べて大幅に制御性能が改善される結果となっている。

すなわち、図3から図6において示した各制御性能の比較により、むだ時間のある一次遅れ系の場合も二次遅れ系の場合も、ここで提案のファジィ制御は、ファジィ推論法により制御領域に応じて動的に決定される後件部スケールリングファクタを用いることにより、その値を全制御領域で一定とする従来のファジィ制御と比べて、大幅に制御性能を改善できることが分かった。ここで、従来のファジィ制御の制御規則に重み付けしたファジィ制御が、従来のファジィ制御と比べて制御性能の若干の改善しかできなかったのは、提案のファジィ制御における後件部スケールリングファクタへの重み付けに比べて、制御規則への重み付けではファジィ制御器の非線形な入出力特性の改善に限界があるためと考えられる。

なお、本シミュレーションを実行するにあたっては、著者らが開発した多種多様な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⁽¹⁹⁾⁽²⁰⁾を活用した。

4. 結 言

本論文では、まず、ファジィ推論法の簡略化推論法⁽⁷⁾を用いて、後件部スケールリングファクタの値を制御領域に応じ動的に調整することにより、従来のファジィ制御と比べて制御性能が大幅に改善できるというファジィ制御の方法を提案した。そして、むだ時間のある一次遅れ系と二次遅れ系を制御対象に設定したシミュレーション結果から、提案したファジィ制御の制御性能の改善における有効性を、全制御領域で後件部スケールリングファクタ一定とする従来のファジィ制御⁽³⁾⁽⁴⁾とその制御規則に重み付けしたファジィ制御⁽⁸⁾⁽⁹⁾と比較して示した。その結果、従来のファジィ制御の制御規則に重み付けしたファジィ制御が、従来のファジィ制御と比べて制御性能の若干の改善しかできないのに対し、ここで提案のファジィ制御は大幅に制御性能を改善できることが分かった。

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九州工業大学工学部の村上周太教授、前田幹夫助教授らに厚く謝意を表します。

文 献

- (1) Zadeh, L. A., Fuzzy Sets, *Information and Control*, 8 (1965), 338-358.
- (2) Mamdani, E. H., Applications of Fuzzy Algorithms for Control of Simple Dynamic Plant, *Proc. IEE*, 121-12 (1974), 1585-1588.
- (3) 山崎東・菅野道夫, ファジィ制御, システムと制御, 28-7 (1984), 442-446.
- (4) 菅野道夫, ファジィ制御, (1988), 日刊工業新聞社.
- (5) 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, (1988-5), 97-102.
- (6) 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 (1990), 282-287.
- (7) 水本雅晴, 最近のファジィ制御法, 数理科学, 29-3 (1991), 20-26.
- (8) 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, (1992-5), 529-532.
- (9) Mizumoto, M., Fuzzy Controls by Fuzzy Singleton-Type Reasoning Method, *Procs. 5th IFSA World Congress*, (1993), 945-948.
- (10) 水本雅晴, ファジィ制御に対する最近の手法, システム/制御/情報, 38-11 (1994), 590-595.
- (11) 張志明, ファジィ・クレーン・コントローラ (ICR-600), 日本ファジィ学会誌, 10-3 (1998), 455-459.
- (12) 藤吉誠・孫士杰・張志明, 都市ごみ流動床炉のファジィ計測制御システム, 第15回ファジィシステムシンポジウム講演論文集, (1999-6), 289-292.
- (13) 田中一男, アドバンストファジィ制御, (1994), 共立出版(株).
- (14) 前田幹夫・村上周太, 自己調整ファジィコントローラ, 計測自動制御学会論文集, 24-2 (1988), 191-197.
- (15) Maeda, M. and Murakami, S., A Self-Tuning Fuzzy Controller, *Fuzzy Sets and Systems*, 51-2 (1992), 29-40.
- (16) 林真司, ファジィ制御系のチューニング方法, 第6回ファジィシステムシンポジウム講演論文集, (1990-9), 189-192.
- (17) 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, (1990-9), 193-196.
- (18) 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) におけるスケール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, (1992-5), 553-556.
- (19) 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 (1994), 260-264.
- (20) Hayashi, K. and Otsubo, A., Simulator for Studies of Fuzzy Control Methods, *Fuzzy Sets and Systems*, 93-2 (1998), 137-144.