折れ線型メンバーシップ関数による調整簡便なファジィ制御

非会員 林 健 一 郎 (佐賀県工業技術センター)

正 員 大 坪 昭 文 (佐賀県工業技術センター)

正 員 白仁田 和彦 (佐賀県工業技術センター)

A New Type of Fuzzy Control Simply Tuned Using Piecewise Linear Membership Functions

Kenichiro Hayashi, Non-member, Akifumi Otsubo, Member, Kazuhiko Shiranita, Member
(Industrial Technology Center of Saga)

In this paper, we propose a tuning method in which the membership functions in a fuzzy controller can be set up simply by utilizing the knowledge of tuning parameters in a conventional PID controller. In the method proposed here, fuzzy control is realized by applying the simplified inference method to only four simple fuzzy control rules, in which the piecewise linear membership functions determined by the knowledge are used in the antecedent part.

Therefore, we first show that PI control can be realized by using the linear membership functions in the antecedent part of the above fuzzy control rules. Then, we show that the piecewise linear membership function used in the proposed fuzzy control can be determined easily by the composition of two different linear membership functions. Finally, from the results of the simulation for the first- and second-order lag systems with dead time, we show the effectiveness of this fuzzy control in improving control performance, compared with a conventional type of fuzzy control using the triangular membership functions.

キーワード：ファジィ制御，折れ線型メンバーシップ関数，簡略化推論法，PID制御器，調整知識

1. ま え が き

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⁽¹⁾て以来，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。それ以来，大規模な一般産業機器システムへの適用から最近の家電製品を中心とした応用に至るまで，いろいろな分野において数多くのファジィ制御の実用化事例が報告されてきた⁽³⁾。

このファジィ制御の特徴は，一般に制御性能における過渡特性の改善やロバスト性に優れた制御が比較的容易に実現できることにありと言われる⁽⁴⁾。一方，ファジィ制御の特徴は本質的に非線形制御であることなので，いまだ一般的な非線形制御の設計法が確立していない現在，ファジィ制御の統一的な設計法の確立は困難を極め⁽⁵⁾，ファジィ制御器の制御パラメータの調整は試行錯誤に依存せざるを得ないのが現状である。それ故，この調整には面倒で時間のかかる作業が必要となり，その調整作業をいかにして

効率的に実行するかが，ファジィ制御において早急に解決すべき重要な課題となっている。

このファジィ制御における課題の解決を目的として，まず，田中・佐野らは，制御対象をむだ時間のある一次遅れ系とした多数のシミュレーション実験を行い，その結果を最小2乗法によりつなぐことで，ファジィ制御器のスケールリングファクタ（規格化定数）の調整公式を導出している^{(6) (7)}。一方，村上・前田らは，制御対象をむだ時間のある一次遅れ系と積分系に設定し，最適調整法の一種のシンプレックス法を適用したシミュレーション結果から，ファジィ制御器におけるスケールリングファクタの調整則を求めている^{(8) (9)}。更には，和多田・浅居らは，制御対象をむだ時間のある一次遅れ系とし，最適調整法の山登り法を適用したシミュレーション結果により，ファジィ制御器のメンバーシップ関数の定義域の設定（このことはスケールリングファクタの決定に相当）に一定の指針を与えている^{(10) (11)}。その他，多点探索を可能とする最適調整法の遺伝的アルゴリズムを用い，制御対象をむだ時間のある一次遅れ系としたシミュレーション結果から，ファジィ制御器の最適パラメータの定式化も行われている⁽¹²⁾。

しかしながら，これらの最小2乗法や最適調整法を用いるアプローチは，基本的に試行錯誤の繰り返しとなり，厩

大量のシミュレーション実験と計算が必要となるため、制御対象のパラメータの値をある範囲に限定したシミュレーション結果から、ファジィ制御器のパラメータの調整指針を見出ししているに過ぎなかった。

そこで、本論文では、以上述べてきたようなアプローチとは違って、従来のPID制御器におけるパラメータ調整に関する知識^{(13)~(16)}を利用することにより、調整簡便にファジィ制御器のメンバーシップ関数が設定できるという方法を提案する。ここでの提案は、PID制御器のパラメータ調整の知識から決定される折れ線型メンバーシップ関数を、僅か4個の簡単な構造のファジィ制御規則の前件部に設定し、高速推論が可能な簡略化推論法⁽¹⁷⁾を適用することにより、ファジィ制御を実現するという方法である。

従って、本論文では、まず、ここで提案のファジィ制御との比較のために、前件部に三角型メンバーシップ関数を用いる従来型のファジィ制御^{(4) (5)}について説明を行う。次に、先のファジィ制御規則において、前件部を直線型メンバーシップ関数とすることでPI制御が実現できることを示した後、2つの異なる直線型メンバーシップ関数を合成することにより、提案のファジィ制御で用いる折れ線型メンバーシップ関数が容易に決定できることを示す。最後に、この折れ線型メンバーシップ関数を用いたファジィ制御の有効性を、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、スケーリングファクタ調整による従来型のファジィ制御と比較して示す。

2. 従来の三角型メンバーシップ関数によるファジィ制御

従来型のファジィ制御^{(4) (5)}においては、前件部メンバーシップ関数として図1(a)に示す三角型、後件部メンバーシップ関数として最近同図(b)に示すような非ファジィなシングルトン型が良く使用される。ここで、前件部と後件部の台集合はそれぞれ7分割とし、[-6, 6]の範囲に規格化している。また、ファジィ制御規則として、無制御の(陽に制御を行わない)領域が存在しないように制御規則表を規則で埋め尽くした、表1に示すRutherfordの制御規則⁽¹⁸⁾が実用上良く用いられる。

表1の制御規則表において、 i 番目の制御規則を規則 i とすると、

規則 i : If E is A_i and ΔE is B_i then ΔU is c_i
($i=1, \dots, 49$) (1)

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。また、 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、 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、後件部メンバーシップ関数をシングルトン型とする簡略化推論法⁽¹⁷⁾の推論手順に従うことにより、

(a) Triangular type (Antecedent part)

(b) Singleton type (Consequent part)

図1 メンバーシップ関数 (7分割)

Fig. 1. Membership functions under seven partitions.

表1 Rutherfordの制御規則
Table 1. Rutherford's control rule.

$\Delta E \backslash E$	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
PB	0	2	4	6	6	6	6
PM	-2	0	2	4	6	6	6
PS	-4	-2	0	2	4	6	6
ZO	-6	-4	-2	0	2	4	6
NS	-6	-6	-4	-2	0	2	4
NM	-6	-6	-6	-4	-2	0	2
NB	-6	-6	-6	-6	-4	-2	0

$$\Delta U^0 = \frac{\sum_{i=1}^{49} w_i \cdot c_i}{\sum_{i=1}^{49} w_i} \tag{2}$$

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

$$w_i = A_i(E^0) \cdot B_i(\Delta E^0) \tag{3}$$

で計算される。

なお、(1)式から分かるように、このファジィ制御器では出力が操作量 U の変化分 ΔU であるので、制御器として速度型となっている。また、偏差 E とその変化分 ΔE からファジィ推論を用いて出力 ΔU を求めるので、このファジィ制御器は非線形なPI制御を実現している。

3. 折れ線型メンバーシップ関数によるファジィ制御

本章では、(4)式に示す僅か4個の簡単な構造のファジィ制御規則において、まず、前件部を直線型メンバーシップ関数として簡略化推論法⁽¹⁷⁾を適用することで、P I制御が実現できることを示す。そして、先のファジィ制御規則の前件部を、2つの異なる直線型メンバーシップ関数から合成される折れ線型メンバーシップ関数とすることで、調整簡便に実現できるファジィ制御の提案を行う。

規則1: If E is P_1 then ΔU is m_1

規則2: If E is N_1 then ΔU is $-m_1$

規則3: If ΔE is P_2 then ΔU is m_2

規則4: If ΔE is N_2 then ΔU is $-m_2$ (4)

ここで、 E 、 ΔE はそれぞれ偏差、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。また、 P_i 、 N_i ($i=1,2$) は正 (Positive)、負 (Negative) を意味する前件部のファジィ変数であり、 m_i 、 $-m_i$ ($i=1,2$) は後件部における正、負のシングルトン型の位置を表している。

(4)式に示したファジィ制御規則では操作量 U の変化分 ΔU が出力であるので、制御器は速度型となっている。また、相反する規則1と規則2、規則3と規則4の組により、それぞれI動作、P動作を実現している。

従って、P I制御は、図2に示すように(4)式の前件部に正・負の直線型メンバーシップ関数、後件部にシングルトン型 m_i 、 $-m_i$ ($i=1,2$) を用いることで実現できる。前件部の直線型メンバーシップ関数は

$$P_i(E_i) = \frac{1}{2\ell_i} E_i + 0.5$$

$$N_i(E_i) = -\frac{1}{2\ell_i} E_i + 0.5 \quad (i=1,2) \quad (5)$$

である。ここで、

$$E_1 = E, E_2 = \Delta E \quad (6)$$

いま、このファジィ制御器に確定値 E^0 、 ΔE^0 が入力されたとすると、簡略化推論法における推論手順に従うことにより、規則全体としての推論結果である出力 ΔU^0 は、

$$\begin{aligned} \Delta U^0 &= \frac{1}{2} \left(\frac{m_1}{\ell_1} E^0 + \frac{m_2}{\ell_2} \Delta E^0 \right) \\ &= \frac{m_1}{2\ell_1} E^0 + \frac{m_2}{2\ell_2} \Delta E^0 \end{aligned} \quad (7)$$

となる。

ここで、第1項、第2項はそれぞれI動作、P動作に相当し、(7)式はそれらの線形結合となっているので、(7)式はP I制御を実現している。また、(7)式の第1項、第2項の係数 $m_1/2\ell_1$ 、 $m_2/2\ell_2$ は、それぞれP I D制御器⁽¹³⁾におけるI、Pパラメータに相当している。

さて、ここで提案するファジィ制御は、(4)式の前件部に2つの異なる直線型メンバーシップ関数から合成される正・負の折れ線型メンバーシップ関数を設定し、後件部に

シングルトン型 m_i 、 $-m_i$ ($i=1,2$) を用いることで実現できる。

図3にP I制御を意味する前件部における3つの異なる正の直線型メンバーシップ関数を示す。正の折れ線型メンバーシップ関数 P_i ($i=1,2$) は、基準となる直線型メンバーシップ関数①から求める2つの直線型メンバーシップ関数②と③を合成することにより、図4に示すように決定できる。また、負の折れ線型メンバーシップ関数 N_i ($i=1,2$) は、正の折れ線型メンバーシップ関数 P_i の補集合をとることにより決定できる。なお、図3、図4において、前件部の台集合は $[-6,6]$ の範囲に規格化しており、 $E_1 = E$ 、 $E_2 = \Delta E$ である。

ここで、折れ線型メンバーシップ関数 P_i を構成する直線型メンバーシップ関数②と③の形状と後件部のシングルトン型の位置 m_i 、 $-m_i$ は、制御対象の種類や特性などに依存するが、基本的に以下に述べるような調整方針により決定できる(調整手順の詳細は次章で記述)。

まず、基準となるP I制御を意味する直線型メンバーシップ関数①の形状は、過渡応答法といったP I D制御器におけるパラメータ最適調整の知識⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾に基づいて、(7)式のI、Pパラメータに相当する $m_i/2\ell_i$ ($i=1,2$) を設定することにより、 ℓ_i ($i=1,2$) の値から決定される。また、 m_i ($i=1,2$) の値から後件部のシングルトン型の位置も決定される。

次に、直線型メンバーシップ関数②の形状は、このメンバーシップ関数を用いるP I制御が、直線型メンバーシップ関数①を用いるP I制御より立ち上がり特性を改善するように、直線型メンバーシップ関数①の形状を基に、P I

(a) Linear type
(Antecedent part)

(b) Singleton type
(Consequent part)

図2 メンバーシップ関数 (2分割)

Fig. 2. Membership functions under two partitions.

図3 正の直線型メンバーシップ関数 (前件部)

Fig. 3. Positive linear membership functions in antecedent part.

図4 正・負の折れ線型メンバーシップ関数 (前件部)

Fig. 4. Positive and negative piecewise linear membership functions in antecedent part.

D制御器におけるPIパラメータ調整の知識^{(15) (16)}を用いて決定される。つまり、この直線型メンバーシップ関数②は制御性能の速応性を改善する目的で設定される。なお、直線型メンバーシップ関数②は $[0, 1]$ 以外のグレード値もとおり、通常のメンバーシップ関数の概念を拡張したもの^{(19) (20)}となる。

最後に、直線型メンバーシップ関数③の形状は、直線型メンバーシップ関数②と③から合成される折れ線型メンバーシップ関数を用いるファジィ制御が、直線型メンバーシップ関数②による立ち上がり特性の改善に伴う振動を抑えて整定を早めるように、PIパラメータ調整の知

識^{(15) (16)}を用いて決定される。つまり、この直線型メンバーシップ関数③は制御性能の安定性を高める目的で設定される。

すなわち、ここで提案のファジィ制御は、速応性改善のための直線型メンバーシップ関数②と安定性向上のための直線型メンバーシップ関数③から合成される、折れ線型メンバーシップ関数を(4)式のファジィ制御規則の前件部に用い、ファジィ推論法の簡略化推論法を適用することで実現できる。このファジィ制御においては、前章で述べた従来型のファジィ制御と違って、そのメンバーシップ関数の設定にPID制御器における経験的なパラメータ調整の知識を活用できる。

なお、この合成された折れ線型メンバーシップ関数も、通常のメンバーシップ関数の概念を拡張したものとなるが、この場合のファジィ推論は通常の場合のファジィ推論の拡張となるだけである^{(19) (20)}。

4. 従来のファジィ制御との性能比較

本章では、前章にて提案した折れ線型メンバーシップ関数を用いたファジィ制御が、従来型のファジィ制御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対象としたシミュレーション結果から示す。

本シミュレーションにおける制御系の構成を図5に示す。同図において R は目標値、 E は偏差、 ΔE はその変化分、 Y は制御量を表している。また、ファジィ制御器(提案/従来型)からの出力は操作量 U の変化分 ΔU となっている。ここで、従来型のファジィ制御のパラメータ調整は、実際良く行われる前件部と後件部のスケーリングファクタの調整^{(6) - (12)}を行った。

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(8)式に示すような伝達関数を用いた。

$$G(s) = \frac{e^{-10s}}{1 + 20s} \quad (8)$$

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(9)式の伝達関数^{(15) (16)}を用いた。

$$G(s) = \frac{35.78e^{-5s}}{(1.73s+1)(16.85s+1)} \quad (9)$$

提案のファジィ制御における折れ線型メンバーシップ関数の調整方針を前章で述べたが、ここでは各直線型メンバーシップ関数の形状パラメータの調整手順を具体的に述べる。

図5 本シミュレーションにおける制御系の構成

Fig. 5. Configuration of a control system in this simulation.

(1) 基準となるPI制御を意味する直線型メンバーシップ関数①の設定

まず、制御対象をむだ時間のある一次遅れ系に近似して等価一次遅れ時定数 T と等価むだ時間 L の値を求める。次に、その T と L の値から過渡応答法の一種の拡張リアクション・カーブ法⁽¹⁴⁾の式に基づいて、I、Pパラメータに相当する $m_i/2\ell_i$ ($i=1,2$) の値が決定される。ここで、後件部のシングルトン型の位置 m_i は、 ℓ_i の値を入力を取り得る範囲の上限値に設定することで決定される。

(2) 立ち上がり特性の改善のための直線型メンバーシップ関数②の設定

直線型メンバーシップ関数①によるPI制御よりも立ち上がり特性が改善するように、直線型メンバーシップ関数

①の形状を基にして、直線型メンバーシップ関数②の形状を制御応答を見ながら決定する。ここでは、立ち上がり特性が改善するようにI動作に関わる ℓ_1 の値を小さくし、それに伴うオーバーシュートを抑制するためにP動作に関わる ℓ_2 の値を小さくする。このことは、直線型メンバーシップ関数②の傾きを直線型メンバーシップ関数①の傾きより大きくすることに相当する。

(3) 振動を抑え整定を早めるための直線型メンバーシップ関数③の設定

直線型メンバーシップ関数②と③から合成される折れ線型メンバーシップ関数を用いたファジィ制御において、直線型メンバーシップ関数②による立ち上がり特性の改善に伴う目標値近傍での振動を抑制するように、直線型メンバ

(a) Control results

(b) Piecewise linear membership functions

(c) Control map of proposed fuzzy control

図6 むだ時間のある一次遅れ系の場合の両制御性能の比較（オーバーシュート量が5%の場合）

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

(a) Control results

(b) Piecewise linear membership functions

(c) Control map of proposed fuzzy control

図7 むだ時間のある一次遅れ系の場合の両制御性能の比較（オーバーシュート量が0%の場合）

Fig. 7. Comparison of control performances for a first-order lag system with dead time under 0% overshoot.

ーシップ関数③の形状を制御応答を見ながら決定する。ここでは、このファジィ制御において目標値近傍で振動が生じないように、直線型メンバーシップ関数②の形状を基にしてI動作、P動作に関わる ℓ_i ($i=1,2$)の値を大きくする。このことは、直線型メンバーシップ関数③の傾きを直線型メンバーシップ関数②の傾きより小さくすることに相当する。

なお、直線型メンバーシップ関数②と③の形状パラメータの調整指針としては、PID制御器におけるPIパラメータ調整に関する経験的な知識⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾を活用した。

図6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5%の場合の提案のファジィ制御と従来型の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)は両者の制御結果を示したものであり、また、(b)は(a)に示した提案のファジィ制御の場合のI動作とP動作に関する折れ線型メンバーシップ関数の形状を、(c)はその場合の入出力特性を三次元的に表現したコントロールマップを示したものである。図7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0%の場合の同様な制御性能の比較を行ったものである。ここで、図6と図7の提案のファジィ制御における制御パラメータの値をそれぞれ表2と表3に示す。

図6と図7の制御結果から分かるように、オーバーシュートが有る場合も無い場合にも、提案のファジィ制御の場合には従来型のファジィ制御の場合と比べ、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

(a) Control results

(b) Piecewise linear membership functions

(c) Control map of proposed fuzzy control

図8 むだ時間のある二次遅れ系の場合の両制御性能の比較 (オーバーシュート量が5%の場合)

Fig. 8. Comparison of control performances for a second-order lag system with dead time under 5% overshoot.

(a) Control results

(b) Piecewise linear membership functions

(c) Control map of proposed fuzzy control

図9 むだ時間のある二次遅れ系の場合の両制御性能の比較 (オーバーシュート量が0%の場合)

Fig. 9. Comparison of control performances for a second-order lag system with dead time under 0% overshoot.

表2 図6の提案のファジィ制御における
制御パラメータの値

Table 2. Control parameters in proposed fuzzy
control shown in Fig. 6.

	I action		P action	
	ℓ_1	m_1	ℓ_2	m_2
Linear type ①	40.0	4.18	1.60	2.38
Linear type ②	28.6	4.18	1.14	2.38
Linear type ③	46.8	4.18	1.45	2.38

表4 図8の提案のファジィ制御における
制御パラメータの値

Table 4. Control parameters in proposed fuzzy
control shown in Fig. 8.

	I action		P action	
	ℓ_1	m_1	ℓ_2	m_2
Linear type ①	60.0	0.308	3.0	0.186
Linear type ②	47.4	0.308	2.53	0.186
Linear type ③	76.2	0.308	3.09	0.186

表3 図7の提案のファジィ制御における
制御パラメータの値

Table 3. Control parameters in proposed fuzzy
control shown in Fig. 7.

	I action		P action	
	ℓ_1	m_1	ℓ_2	m_2
Linear type ①	40.0	4.36	1.50	2.78
Linear type ②	30.8	4.36	1.14	2.78
Linear type ③	36.0	4.36	2.45	2.78

表5 図9の提案のファジィ制御における
制御パラメータの値

Table 5. Control parameters in proposed fuzzy
control shown in Fig. 9.

	I action		P action	
	ℓ_1	m_1	ℓ_2	m_2
Linear type ①	60.0	0.287	3.0	0.199
Linear type ②	44.2	0.287	2.26	0.199
Linear type ③	52.7	0.287	4.56	0.199

制御性能を改善される結果となっている。

図8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5%の場合の、また、図9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0%の場合の、図6、図7と同様な提案のファジィ制御と従来型のファジィ制御との制御性能の比較を行ったものである。ここで、図8と図9の提案のファジィ制御における制御パラメータの値をそれぞれ表4と表5に示す。

図8と図9の制御結果から分かるように、一般にむだ時間を有する二次遅れ系は一次遅れ系と比較して制御し難い系であるが、この場合もむだ時間のある一次遅れ系の場合の制御結果と同様に、オーバーシュートの有る無しにかかわらず、提案のファジィ制御の場合が従来型のファジィ制御の場合と比べ大幅に制御性能を改善される結果となっている。

すなわち、図6から図9において示した両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、速応性と安定性を考慮した折れ線型メンバーシップ関数により決定されるコントロールマップを適用することで、従来型のファジィ制御と比べ大幅に制御性能を改善できることが分かった。

なお、本シミュレーションを実行するにあたり、著者らが開発した多種多様なファジィ制御法が容易に実現できる

ファジィ制御用シミュレータ^{(21) (22)}を活用した。

5. むすび

本論文では、まず、僅か4個の簡単な構造を有するファジィ制御規則の前件部を、2つの異なる直線型メンバーシップ関数から合成される折れ線型メンバーシップ関数とし、簡略化推論法を適用することで実現できる調整簡便なファジィ制御の提案を行った。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、ここで提案のファジィ制御が従来型のファジィ制御と比べ制御性能を改善できることを示した。

提案のファジィ制御の主な特長を次のようにまとめる。

(1) 従来型のファジィ制御が多数の制御規則（前件部2変数で7分割なので $7 \times 7 = 49$ 個）が必要となるのに対し、提案のファジィ制御では僅か4個の簡単な構造の制御規則（前件部独立な1変数）で済むので、制御の高速化をも達成できる。

(2) 提案のファジィ制御の場合には、従来型のファジィ制御と違ってPID制御器との対応付けが可能となるので、折れ線型メンバーシップ関数の設定にPID制御器におけるパラメータ調整の知識が利用できる。その結果、提案のファジィ制御では一般に試行錯誤的に行われるファジィ制御器のパラメータ調整が容易となる。

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。

(平成10年11月25日受付, 平成11年6月9日再受付)

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. IEE*, **121**, 12, 1585-1588 (1974)
- (3) 例えば, 廣田薫編: 「ファジィ活用事例集」, 工業調査会 (1991)
- (4) 菅野道夫: 「ファジィ制御」, 日刊工業新聞社 (1988)
- (5) 日本ファジィ学会編: 講座ファジィ⑤「ファジィ制御」, 日刊工業新聞社 (1993)
- (6) 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, 193-196 (1990-9)
- (7) 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調整公式」, 日本ファジィ学会誌, **3**, 3, 583-591 (1991-8)
- (8) 勘久保広一・村上周太・前田幹夫: 「ファジィ制御におけるパラメータの最適調整」, 第9回計測自動制御学会九州支部学術講演会予稿集, 83-84 (1990-12)
- (9) 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, 553-556 (1992-5)
- (10) 和多田淳三・山本隆広・浅居喜代治: 「ファジィ制御のためのメンバーシップ関数の自動調節法」, 第7回ファジィシステムシンポジウム講演論文集, 627-630 (1991-6)
- (11) 米田元・浅居喜代治・奥田徹示: 「ファジィ学習制御に関する研究」, 第1回インテリジェントシステム・シンポジウム講演論文集, 35-38 (1991-10)
- (12) 高柳一郎・村上周太: 「遺伝的アルゴリズムによるファジィ制御系の最適パラメータ調整」, 第12回計測自動制御学会九州支部学術講演会予稿集, 43-46 (1993-11)
- (13) 例えば, システム制御情報学会編: システム制御情報ライブラリー6「PID制御」, 朝倉書店 (1992)
- (14) 例えば, 宮崎誠一・宮崎仁: 「パソコンで学ぶ自動制御の実用学」, CQ出版社 (1991)
- (15) 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, 191-197 (1988-2)
- (16) M. Maeda and S. Murakami: "A Self-Tuning Fuzzy Controller", *International Journal for Fuzzy Sets and Systems*, **51**, 1, 29-40 (1992)
- (17) 水本雅晴: 「最近のファジィ制御法」, 数理科学, **29**, 3, 20-26 (1991-3)
- (18) M. Bräa and D. A. Rutherford: "Theoretical and Linguistic Aspect of the Fuzzy Controller", *Automatica*, **15**, 533-577 (1979)
- (19) 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, 245-249 (1991-6)
- (20) M. Mizumoto: "Realization of PID Controls by Fuzzy Control Methods", *International Journal for Fuzzy Sets and Systems*, **70** (2-3), 171-182 (1995)
- (21) 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 (1994-4)
- (22) K. Hayashi and A. Otsubo: "Simulator for Studies of Fuzzy Control Methods", *International Journal for Fuzzy Sets and Systems*, **93**, 2, 137-144 (1998)

林 健一郎

(非会員) 1954年9月9日生。1978年九州大学工学部動力機械工学科を卒業。1981年佐賀県工業技術センターに入所。1991年佐賀大学大学院電気工学専攻修士課程, 1994年同大学院博士課程を修了。工学博士。主として, ファジィ制御などの知的制御技術を用いた自動化システムの研究に従事。計測自動制御学会, 日本ファジィ学会などの会員。

大坪 昭文

(正員) 1965年11月4日生。1988年佐賀大学理工学部電子工学科を卒業後, 同年佐賀県工業技術センターに入所。1998年九州工業大学大学院電気工学専攻博士課程を修了。工学博士。主としてファジィ制御, ニューラル制御などを用いた知的制御システムの研究に従事。電気学会, 電子情報通信学会などの会員。

白仁田 和彦

(正員) 1961年12月20日生。1984年佐賀大学理工学部電子工学科を卒業後, 同年佐賀県工業技術センターに入所。1998年九州芸術工科大学大学院情報伝達専攻博士課程を修了。工学博士。主としてニューラルネットワーク, ファジィ制御などを用いた知的情報処理システムの研究に従事。電気学会, 電子情報通信学会などの会員。