自己調整ファジィコントローラ[†]

前田 幹夫*・村上 周太*

Self-Tuning Fuzzy Controller

Mikio MAEDA* and Shuta MURAKAMI*

This paper deals with a self-tuning fuzzy controller. The fuzzy controller is constructed with linguistic control rules which consist of the fuzzy variables and the fuzzy sets. Each of fuzzy sets is characterized by a membership function. The self-tuning fuzzy controller has a function that the parameters of membership functions are adequately adjusted by two learning rule sets.

One is the repeated learning rule set which adjusts the parameters of membership functions of the fuzzy controller after evaluating the control results with respect to the control performances. The other is the real time learning rule set which adjusts the parameters of the fuzzy controller by evaluating the control response at the real time.

By control simulation, it is shown that the desired control results are obtained and that the usefulness of the self-tuning fuzzy controller is recognized.

Key Words: self-tuning, fuzzy controller, learning rule

1. はじめに

最初にファジィ集合論 (Zadeh)¹⁾ とファジィ論理 (Marinos)²⁾ を制御に応用したのは Mamdani³⁾ であり、以後、数々のファジィ制御に関する研究や実用化^{4)~9)} が行われている。ファジィ制御の特長はオペレータ (専門家) のもつ制御対象制御のための定性的なノウハウ或は制御戦略を「If~then…」型の言語的制御則で表現できることや、制御対象の厳密な定量的モデルが得られなくても、制御対象の入出力の定性的関

係のみで制御則を構成できることである。

ファジィ制御による制御結果は言語的制御則 (Linguistic Control Rule; LCR), つまり、専門家により知識表現された制御則に依存する。それゆえ、専門家の制御知識などを言語規則として表現することが重要である。だが、専門家の制御知識を完璧に規則化することは難しい。このことから、オペレータの動作をモニターすることによって制御則を構成しようという試み^{10), 11)} や、ある程度の制御知識を与えておき、制御結果あるいは制御の途中結果によって知識を追加、修正、削除することで、制御則を再構成しようとする試みがある。前者は経験的および統計的処理による制御則の構成である。後者は学習規則によって制御結果を評価して制御則の再構成を行うものであり、Baaklini¹²⁾, Procyk¹³⁾ によって始まり、山崎¹⁴⁾ によって種々の問題点が改良されている。

著者らは以前、自動車の速度制御のための制御則を構成し、ファジィ制御装置を設計した⁹⁾。このファジィ制御装置には6個のパラメータがある。ファジィ制御装置の設計においてこれらのパラメータを適切な値に設定することが重要である。また、動特性の変動する系や非線形系などを制御する場合、すべての制御領域において、満足する制御結果を得るために、パラメータを実時間で変える必要がある。

そこで、著者らは、あたかも専門家が制御応答を評価して、パラメータを調整するような学習則を提案する。この学習則は、制御結果を古典的制御性能に近い基準で評価することによってファジィ制御装置のパラメータを調整する反復整則と制御応答をサンプル時点では評価することによってパラメータを調整する実時間調整則からなる。これらの調整則は、先に述べた後者の学習規則に類するが、山崎らの方法とは少し異なる。山崎らの方法は、制御応答の評価から、制御則の結論部のファジィ集合 (台集合) をその集合の平行移動によって修正している。著者らの方法は、言語的制

[†] 第25回計測自動制御学会学術講演会で発表 (昭61・7)

* 九州工業大学工学部 北九州市戸畑区仙水町 1-1

* Faculty of Engineering, Kyushu Institute of Technology, Kitakyushu

(Received August 10, 1987)

(Revised November 9, 1987)

御則の条件部と結論部のファジィ集合をそのメンバーシップ関数のパラメータを変えることによって修正する方法である。また、著者らの制御則は山崎らの制御則に比べ規則数が少なく、シンプルである。そして、推論法は異なる。更に、本ファジィ制御装置は PID 制御装置に類似している。この著者らの提案する学習則を付加された自己調整ファジィコントローラは学習によってパラメータを自己調整しながら、いい替えると、制御装置のゲインを調整しながら希望する応答を得るように制御対象を制御する。

本論文では、パラメータ調整のための学習規則ならびに自己調整ファジィコントローラの構成について述べる。そして、種々の制御シミュレーションによって、この制御装置の有効性を検討する。

2. ファジィ推論

ファジィ推論には、Zadeh¹⁵⁾、Mamdani¹⁶⁾、水本¹⁷⁾らの直接法や、塚本¹⁸⁾、Baldwin¹⁹⁾らの間接法がある。ここでは塚本の推論法と、Zadeh の合成則を基本とする簡略推論法²⁰⁾について述べる。

2.1 塚本の推論

一般にファジィ推論とは、(1)式において、ファジィ命題 1 が与えられているとき、ファジィ命題 2 (ファジィ情報) が入力された場合、ファジィ命題 3 を求めることをいう。

命題 1 : If x is P then y is Q .

命題 2 : x is P' .

命題 3 : y is Q'

(1)

ここで、 P, P', Q, Q' はファジィ集合であり、メンバーシップ関数 $\mu(\cdot)$ で性格づけられる。

命題 1 において、 P, Q をそれぞれ Big, Big とすると、塚本は、「もし x が大きければ大きいほど、 y も大きい」というように解釈し、これを観点とした推論法を提案している。その手順を以下に示す。

(a) まず、逆真理値限定法 (CTQ) によって、命題 1 の条件である “ x is P ” と命題 2 の “ x is P' ” のファジィマッチングをもとめ、それを言語的真理値 (ファジィ真理値) τ_P とする。

(b) 条件側の τ_P と命題 1 の言語的真理値 $\tau_{P \rightarrow Q}$ (通常は true) を fuzzy modus ponens (FMP) に適用して、結論側命題 “ y is Q ” のファジィ真理値 τ_Q を求める。

(c) 真理値限定法 (TQ) によって、(b) で求めた τ_Q と “ y is Q ” から、命題 3 の “ y is Q' ” を求める。

このようにして、入力情報 “ x is P' ” が与えられ

Fig. 1 Diagrams of Tsukamoto's fuzzy reasoning

るとき、“ y is Q' ” が推論される。上の手順をグラフ化すると Fig. 1 のようになる。ただし、図中の X, Y はそれぞれ要素 x, y の全体集合である。なお、ルール数が 1 以上のときはルール間で推論結果の協調が取られる。

2.2 簡略推論

この方法は Zadeh の合成則¹⁵⁾と mamdani の推論法¹⁶⁾に基づくものである。

まず、 n 個のルールがつぎのように与えられているとする。

$$\begin{aligned} R1: & \text{If } x_1 \text{ is } A_1, x_2 \text{ is } B_1 \text{ then } y \text{ is } C_1 \\ R2: & \text{If } x_1 \text{ is } A_2, x_2 \text{ is } B_2 \text{ then } y \text{ is } C_2 \\ & \vdots \\ Rn: & \text{If } x_1 \text{ is } A_n, x_2 \text{ is } B_n \text{ then } y \text{ is } C_n \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、 x_1, x_2, y はファジィ変数ある。そして、 $A_i, B_i, C_i (i=1, \dots, n)$ はファジィ集合であり、それぞれ、メンバーシップ関数 $\mu_{A_i}(x_1), \mu_{B_i}(x_2), \mu_{C_i}(y) (i=1, \dots, n)$ をもつ。

いま、 x_1, x_2 の非ファジィ情報が与えられると、 y は合成則と Braae, Rutherford の重心法²¹⁾によって (3) 式のように推論される。

$$\hat{y} = \frac{\sum_{i=1}^n [\mu_{A_i}(x_1) \odot \mu_{B_i}(x_2)] \cdot \bar{y}_i}{\sum_{i=1}^n [\mu_{A_i}(x_1) \odot \mu_{B_i}(x_2)]} \quad (3)$$

ここで、 $\hat{y}$ は y の推論値であり、 $\bar{y}_i (i=1, \dots, n)$ はメンバーシップ関数 $\mu_{C_i}(y)$ が最大値を取るとき y の値である。そして、 $\odot$ は $\min$ (代数積も可能) を意味し、 $\cdot$ は代数積を表わす。その推論過程は Fig. 2 ($n=2$ の場合) に示される。

なお、著者らは、3 章において、制御則の数を少なくするために規則の条件部を 1 変数にして、この規則

Fig. 2 Simplified fuzzy reasoning

のファジィ推論に塚本の方法を用いる。また、学習則のファジィ推論には、規則の中に、詳細な記述をするために規則の条件部を2変数にしたものがあり、その規則数も多いため、推論計算を簡単にする理由から、簡略法を用いる。

3. 自己調整ファジィコントローラの構成

この章では、ファジィ制御装置とファジィ制御装置のパラメータを制御応答結果を評価して調整する学習規則（調整則）について述べる。

3.1 ファジィ制御装置⁹⁾

ファジィ制御装置はつぎの制御則で構成されている。

- LCR 1: If e_k is P_1 then Δu_k is P_{u1}
 LCR 2: If e_k is N_1 then Δu_k is N_{u1}
 LCR 3: If Δe_k is P_2 then Δu_k is P_{u2}
 LCR 4: If Δe_k is N_2 then Δu_k is N_{u2}
 LCR 5: If $\Delta^2 e_k$ is P_3 then Δu_k is P_{u3}
 LCR 6: If $\Delta^2 e_k$ is N_3 then Δu_k is N_{u3}

ただし、時刻 k に対して、

$$\begin{aligned} e_k &= r - y_k \\ \Delta e_k &= e_k - e_{k-1} \\ \Delta^2 e_k &= \Delta e_k - \Delta e_{k-1} \\ \Delta u_k &= u_k - u_{k-1} \end{aligned} \quad (5)$$

P_i, P_{ui} : Positive, N_i, N_{ui} : Negative
 $(i=1, 2, 3)$

r : 目標値

y_k : 制御量

e_k : 制御偏差

Δe_k : 制御偏差の一階差分

$\Delta^2 e_k$: 制御偏差の二階差分

Δu_k : 操作量 u_k の一階差分

である。ルール中のファジィ集合 P_i, P_{ui} と N_i, N_{ui} のメンバーシップ関数 $\mu_i(\cdot)$ は(6)～(8)式に示されるように、条件側が逆正接曲線で、結論側が直線である。

$$\mu_{P_i}(e_i) = \frac{1}{\pi} \tan^{-1}(c_i \cdot e_i) + 0.5, \quad (6)$$

$$\mu_{N_i}(e_i) = \frac{1}{\pi} \tan^{-1}(-c_i \cdot e_i) + 0.5,$$

$$\mu_{P_{ui}}(\Delta u) = \frac{1}{2 \cdot b_i} \Delta u + 0.5, \quad (7)$$

$$\mu_{N_{ui}}(\Delta u) = -\frac{1}{2 \cdot b_i} \Delta u + 0.5, \quad (i=1, 2, 3)$$

ただし、

Fig. 3 Membership functions of manipulated variable

$$\begin{aligned} e_1 &= e, e_2 = \Delta e, e_3 = \Delta^2 e \\ c_1 &= \tan(0.45\pi)/a_1, c_2 = \tan(0.45\pi)/a_2, \\ c_3 &= \tan(0.45\pi)/a_3 \end{aligned} \quad (8)$$

ここで、ファジィ制御装置に $e, \Delta e, \Delta^2 e$ に対する非ファジィ情報が与えられると、(4)式の制御則と塚本のファジィ推論によって、操作量 Δu_k のファジィ集合が Fig. 3 の太線のように求められる。そして、非ファジィ操作量 $\Delta u_k, u_k$ は、各メンバーシップ関数の交点 $\Delta u_1, \Delta u_2, \Delta u_3$ を、

$$\Delta u_1 = \frac{1}{\pi} [\tan^{-1}(c_1 \cdot e) + \tan^{-1}(c_2 \cdot \Delta e)] / (d_1 + d_2)$$

$$\Delta u_2 = \frac{1}{\pi} [\tan^{-1}(c_2 \cdot \Delta e) + \tan^{-1}(c_3 \cdot \Delta^2 e)] / (d_2 + d_3),$$

$$\Delta u_3 = \frac{1}{\pi} [\tan^{-1}(c_3 \cdot \Delta^2 e) + \tan^{-1}(c_1 \cdot e)] / (d_3 + d_1)$$

(9)

ただし、 $d_i = 1/(2 \cdot b_i)$, $(i=1, 2, 3)$ とすると、

$$\Delta \hat{u}_k = \text{medium}\{\Delta u_1, \Delta u_2, \Delta u_3\} \quad (10)$$

$$u_k = u_{k-1} + \Delta \hat{u}_k \quad (11)$$

となる。ここで、(10)式の medium は中間の値をとることを意味する。

ファジィ制御装置の6個のパラメータの各組 $(a_1, b_1), (a_2, b_2), (a_3, b_3)$ はそれぞれ、PID 制御装置の I, P, D ゲインに対応する。たとえば、 a_1 を小さく b_1 を大きくすることは、積分ゲインを大きくすることに対応する。

3.2 パラメータ調整の概要

本論文におけるパラメータ調整は、ファジィ制御装置のパラメータ、すなわち、(4)式の制御則のファジィ集合を性格づけるメンバーシップ関数のパラメータを制御応答結果の評価により調整することである。ファジィ制御装置のパラメータ調整の学習則には反復的パラメータ調整規則と実時間パラメータ調整規則とがある。ファジィ制御装置のパラメータは、まず、制御結果の評価から反復調整則により一意的に決められる。そして、これを初期パラメータとして制御途中の調整時期において、そのときの制御応答から実時間調整則によってパラメータは更に調整される。このよう

Fig. 4 Self-tuning of fuzzy controller

に反復調整—実時間調整の繰返しによってパラメータは適切な値へと調整される。なお、二つの方法を併用するのはパラメータを速やかに適切な値に収束させるためである。

これらの学習則を付加された自己調整ファジィコントローラは Fig. 4 に示される。ただし、 y^* は目標応答である。

3.3 反復パラメータ調整²²⁾

反復パラメータ調整は、制御が終了した時点で、制御結果を評価することによってファジィ制御装置のパラメータを一意的に設定する方法である。制御結果の評価としては、種々の考え方があるが、ここでは、Fig. 5 に示すような従来から用いられている古典的制御性能に準じた評価基準、つまり、オーバーシュート量 (overshoot)、目標到達時間 (reaching time) 振幅 (amplitude)、を考える。また、制御結果の評価基準には当てはまらないが、制御対象の特性を把握する要素の一つとしてむだ時間 (lag time) も基準として採用する。

これらの制御性能の評価とむだ時間の長さに応じて、3.1 節のファジィ制御装置のパラメータを調整するルールが、著者らの経験や、ファジィ制御装置が PID 制御装置に類似していることから、Table 1, 2 のように得られる。ここで、表中の e_{OV} , e_{RT} , e_{AM} は、

$$\begin{aligned} e_{OV} &= OV - OV^*, \\ e_{RT} &= RT - RT^*, \\ e_{AM} &= AM - AM^*, \end{aligned} \quad (12)$$

OV , OV^* : オーバーシュートの実際値と目標値

RT , RT^* : 目標到達時間の実際値と目標値

Fig. 5 Control performances

Table 1 Parameter adjustment rule for performances

Antecedent	Consequent					
Performance	Δa_1	Δa_2	Δa_3	Δb_1	Δb_2	Δb_3
e_{OV}	P_{e1}	P_{a11}	N_{a12}	N_{a13}	P_{b11}	P_{b12}
	N_{e1}	N_{a11}	P_{a12}	P_{a13}	N_{b11}	N_{b12}
e_{RT}	P_{e2}	N_{a21}	P_{a22}	P_{a23}	N_{b21}	N_{b22}
	N_{e2}	P_{a21}	N_{a22}	N_{a23}	P_{b21}	P_{b22}
e_{AM}	P_{e3}	P_{a31}	N_{a32}	P_{a33}	N_{b31}	N_{b32}
	N_{e3}	N_{a31}	P_{a32}	N_{a33}	P_{b31}	P_{b32}

P .: Positive, N .: Negative

Table 2 Parameter adjustment rule for lag time

Antecedent	Consequent					
Lag time	Δa_{1L}	Δa_{2L}	Δa_{3L}	Δb_{1L}	Δb_{2L}	Δb_{3L}
P_L	P_{a1L}	N_{a2L}	N_{a3L}	P_{b1L}	P_{b2L}	N_{b3L}

P .: Positive N .: Negative

AM , AM^* : 振幅の実際値と目標値

であり、 L はむだ時間である。通常 OV^* , AM^* は 0 とされる。また、前件側の P , N のメンバーシップ関数は逆正接曲線であり、後件側の P , N は釣鐘形である。なお、Table 2 の P_L は原点を通る逆正接曲線である。

制御結果を Table 1, 2 の調整規則に適用し、簡略推論を行うことにより、パラメータ修正量 Δa_i , Δb_i ($i=1, 2, 3$) が得られる。そして、制御装置のパラメータ a_i , b_i は次式により修正される。

$$a_i^{\text{NEW}} = a_i^{\text{OLD}} + (1 - FP)(\Delta a_i + \Delta a_{iL}),$$

$$b_i^{\text{NEW}} = b_i^{\text{OLD}} + (1 - FP)(\Delta b_i + \Delta b_{iL}),$$

$$\alpha_i \leq a_i \leq \beta_i, \gamma_i \leq b_i \leq \delta_i \quad (i=1, 2, 3) \quad (13)$$

ただし、 FP は後で述べるファジィ評価値であり、添字 L のついた値はむだ時間に対する推論値である。

α_i , β_i , γ_i , δ_i ($i=1, 2, 3$) はパラメータのとりうる範囲 (制限) を決める値である。

反復調整は最良の制御結果が得られた時点、つまり、オーバーシュート、目標到達時間、振幅の三つの制御性能による次式のファジィ終了評価基準 (FP) を満たした時点で終了する。

$$FP \triangleq \min \{\mu_{OV}(e_{OV}^*), \mu_{RT}(e_{RT}^*), \mu_{AM}(e_{AM}^*)\},$$

$$FP \geq \theta, \theta \in [0, 1] \quad (14)$$

ただし、 μ_{OV} , μ_{RT} , μ_{AM} はそれぞれ、オーバーシュート、到達時間、振幅に対する良さの度合を表すメンバーシップ値であり、 θ は終了基準定数である。

3.4 実時間パラメータ調整

ここでは、3.3 節の反復調整によって修正されたパラメータを初期パラメータとして、制御応答が観測さ

れた時点で、ファジィ制御装置のパラメータを実時間調整する方法について述べる。

実時間パラメータ調整とは、制御量の応答 (y_k) が目標応答 (y_k^*) に一致するように制御装置のパラメータを実時間で調整することである。目標応答に対する制御量の応答には、Fig. 6(a)～(b)に示す四つのパターンを考える。たとえば、(a)は、「 m サンプル前に、応答偏差が正で、現時点でも偏差が正で大きくなっていることから、 m サンプル後には偏差がもっと大きくなるであろう」ということを示している。時刻 k でのこれら四つのパターンと操作量の関係はつぎのように表わせる。

- (1) $e_k^* \geq 0, \Delta e_k^* \geq 0$ のとき、 Δu_k を大きく増加させる。
- (2) $e_k^* \geq 0, \Delta e_k^* \leq 0$ のとき、 Δu_k を少し減少させる。
- (3) $e_k^* \leq 0, \Delta e_k^* \geq 0$ のとき、 Δu_k 少し増加させる。
- (4) $e_k^* \leq 0, \Delta e_k^* \leq 0$ のとき、 Δu_k を大きく減少させる。

ここで、 $\sim$ はファジィ化記号であり、時刻 k において、

$$\begin{aligned} e_k^* &= y_k^* - y_k \\ \Delta e_k^* &= e_k^* - e_{k-m}^* \\ e_k^* &: \text{応答偏差} \\ \Delta e_k^* &: \text{応答偏差の } m \text{ サンプル間の変化分} \\ m &: \text{時間間隔} \end{aligned} \quad (15)$$

である。

また、Fig. 3 において、 DU_1 と DU_2 の頂点を I 点、 DU_3 と DU_4 の頂点を P 点、 DU_5 と DU_6 の頂点を D 点とする。このとき、I, P, D の三つの頂点の座標と正のパラメータ $a_i, b_i (i=1, 2, 3)$ との関係は、

$$\text{I 点: } \left(\frac{1}{\pi} 2b_1 \cdot \tan^{-1}(e \cdot \tan(0.45\pi)/a_1), 1 \right)$$

Fig. 6 Real time response patterns

$$\text{P 点: } \left(\frac{1}{\pi} 2b_2 \cdot \tan^{-1}(\Delta e \cdot \tan(0.45\pi)/a_2), 1 \right) \quad (16)$$

$$\text{D 点: } \left(\frac{1}{\pi} 2b_3 \cdot \tan^{-1}(\Delta^2 e \cdot \tan(0.45\pi)/a_3), 1 \right)$$

となる。この式の I 点から、「もし、 e が正のとき、 a_1 を大きく、 b_1 を小さくすると、頂点 I は左に移動する」ということがわかる。そして、頂点が左に移動すると、Fig. 3 より操作量が減少する可能性が生じる。それゆえ、操作量を増減させるには三つの頂点を同時に移動させる必要がある。これらのことから、操作量、頂点、パラメータ a_i, b_i の関係はつぎのように表わされる。

(5) Δu を増加させたいとき、もし、頂点が正の領域 ($e \geq 0$) にあるならば、 a を小さく、 b を大きくすればよいが、もし、頂点が負の領域 ($e < 0$) にあるならば、 a を大きく、 b を小さくする。

(6) Δu を減少させたいとき、頂点が正の領域にあるならば、 a を大きく、 b を小さくすればよいが、もし、頂点が負の領域にあるならば、 a を小さく、 b を大きくする。

ただし、 a, b は $e (e_1=e, e_2=\Delta e, e_3=\Delta^2 e)$ の関係するパラメータである ((16)式参照)。

これまで示した(1)～(6)の関係からファジィ制御装置のパラメータ調整規則が Table 3 のように得られる。ただし、表の後件側のファジィ集合は(16)式の頂点が正の領域にある場合の集合であり、負の時は逆符号のファジィ集合 (たとえば $P \leftrightarrow N$) となる。各ファジィ集合 P, N の形は前件側が逆正接曲線、後件側が釣鐘形 (ファジィ数) である。

パラメータ $a_i, b_i (i=1, 2, 3)$ は Table 3 にそって簡略推論することで得た値で修正されるわけであるが、ここでは、計算を簡単にするため、ある一つのパラメータの値を推論し、その値を他のパラメータに比率配分する方法を採用する。たとえば、Fig. 3 のように P, I, D の順に並んでいるとき、中央の I 点に関するパラメータの修正量 Δa_1 を簡略推論によって求

Table 3 Parameter adjustment rule at real time

Antecedent		Consequent	
e_k^*	Δe_k^*	Δa	Δb
P_{e4}	P_{e5}	NB_a	PB_b
P_{e4}	N_{e5}	PS_a	NS_b
N_{e4}	P_{e5}	PS_a	PS_b
N_{e4}	N_{e5}	PB_a	NB_b

P : Positive, N : Negative,
 PB : Positive Big, PS : Positive Small,
 NB : Negative Big, NS : Negative Small

める。そして、他のパラメータにはこの値を比率配分する。このとき、修正後のパラメータ a_i は、

$$\begin{aligned} a_1^{ew} &= a_1^{ld} + \text{Sgn}(I) \cdot \lambda_1 \cdot \Delta a_1, \\ a_2^{ew} &= a_2^{ld} + \text{Sgn}(P) \cdot \lambda_2 \cdot \Delta a_1, \\ a_3^{ew} &= a_3^{ld} + \text{Sgn}(D) \cdot \lambda_3 \cdot \Delta a_1 \end{aligned} \quad (17)$$

となる。ただし、 $\lambda_p (p=1, 2, 3)$ は正の比率定数であり、 $\text{Sgn}(\cdot)$ は頂点の符号(正または負)を意味する。パラメータ b_i もパラメータ a_i と同じ方法で修正される((17)の a を b に置き換える)。

なお、パラメータ a_i, b_i の調整は同時に行われずに、時期をかねて交互に行われる。それは、 a_i を変化させ Δu を増加しても、 b_i を動かすと Δu が減少する場合があるからである。

また、パラメータ調整時期も簡単な規則で決められる。これは、「制御偏差が小さいときは調整時間間隔を大きく取り、制御偏差が大きいときは調整時間間隔を小さく取る」というものである。

4. ファジィ制御のシミュレーション

自己調整ファジィコントローラによる制御シミュレーションを三つの制御対象に対して行う。(18)式は制御対象の数式モデル(2次遅れ系)である。

$$\begin{aligned} \dot{x}_1(t) &= x_2(t), \\ \dot{x}_2(t) &= -ax_2(t) - bx_1(t) + cu(t-L), \end{aligned} \quad (18)$$

x_1 : 制御量

$u(t-L)$: 操作量

L : むだ時間

(18)式において、各モデルを記述する定数 a, b, c をつぎの(i), (ii), (iii)に示す。

(i) モデル 1: $a=0.638, b=0.034,$

$c=1.228, L=0$

(ii) モデル 2: $a=0.0994, b=0.0064,$

$c=0.2310, L=1$

(iii) モデル 3: $a=0.40, b=0.54, c=19.54,$

$L=0$

これらすべての系は安定系であるが、モデル 3 の系は減衰振動系でもある。各モデルのシミュレーション結果を Fig. 7~Fig. 9 に示す。このとき、学習則のファジィ集合のパラメータの値は、種々のシミュレーションから、条件側が $P_{e1}: 80, P_{e2}: 40, P_{e3}: 20, P_{e4}: 10, P_{e5}: 5$, 結論側は釣鐘型の中心軸の値 $P_{a1}: 80, P_{a2}: 9, P_{a3}: 7, P_{b1}: 1, P_{b2}: 2.5, P_{b3}: 0.3, P_{b4}: 2.0, P_{b5}: 0.2$ とする。

Negative に対しては、いま示した値の符号を負にした値である。また、終了評価基準 FP と λ_p の与え方によって、学習回数、つまり、パラメータ調整の

終了時期は変化する。よって、これらの FP や λ_p を種々のシミュレーション結果から決める。たとえば、 $\lambda_1: 0.1, \lambda_2: 0.05, \lambda_3: 0.02$ である。また、サンプルタイムはモデル 1, 2 が 1 秒、モデル 3 が 0.5 秒である。

Fig. 7 はモデル 1 の制御結果である。実線は学習のないファジィ制御装置(Normal)で制御した結果であり、×印は Normal の結果から反復調整法により一意的に初期パラメータを設定し、パラメータを実時間調整しながら制御した結果である。図からわかるように、パラメータ調整したときの結果は、パラメータ調整をしない結果に比べ、オーバーシュートや振幅が小さく、速応性があり、よい結果となっている。また、制御開始 50 秒後からの操作量と制御量の変動は、制

Fig. 7 Control result of model 1

Fig. 8 Control result of model 2 (lag time: 1 s)

Fig. 9 Control result of model 3

御装置のロバスト性を検討するために、制御対象の動特性のゲインをその値を中心に、その値の $\pm 50\%$ だけ 60 秒周期で変動させたときの結果である。この結果からも、学習機能を備えた制御装置によって、制御性能が改善され、操作量の変化も滑らかであるということがわかる。Fig. 8 はモデル 2 の制御結果であり、オーバーシュートは少しあるものの 2 度の反復一実時間調整で制御性能の良い結果が得られている。Fig. 9 はモデル 3 の 2 度の学習による制御結果であり、操作量に変動があるものの、オーバーシュートがなく速応性のある結果となっている。

以上の結果から、自己調整ファジィコントローラは先に示した制御対象に対して有効に制御していることがわかる。また、ここでは述べなかったが、5 秒までのむだ時間を考慮した系の学習制御も、種々のシミュレーションの結果、学習のない結果に比べ改善された。

5. おわりに

ファジィ制御装置を調整するために、反復パラメータ調整、実時間パラメータ調整の学習規則を提案した。そして、これらの学習機能を付加したファジィ制御装置、つまり、自己調整ファジィコントローラを構成し、この制御装置による制御シミュレーションを行った。その結果、自己調整ファジィコントローラは有効であるということがわかった。今後の課題は、実際の制御への応用である。たとえば、自動車の速度制御や給湯ボイラーの温度制御などへの適用が考えられる。また、本手法は PID 制御装置に応用可能であり、それによって制御結果の改善が予想される。

なお、状況に応じて、学習則にオフセット、操作量の変化の制約などを考慮した評価ルールを付け加えると、更に良好な学習が行われると思われる。

参考文献

- 1) L. A. Zadeh: Fuzzy Sets, Information and Control, 8, 338/353 (1965)
- 2) P. N. Marinos: Fuzzy Logic and Its Application to Switching Systems, IEEE Trans. Computers, C-18-4, 343/348 (1969)
- 3) E. H. Mamdani: Application of Fuzzy Algorithms for Control of Simple Dynamic Plant, Proc. IEE, 121-12, 1585/1588 (1974)
- 4) J. J. Ostergaard: Fuzzy Logic Control of a Heat Exchanger Process, Fuzzy Automata and Decision Processes (M. M. Gupta, et al. eds.), 285/320, North-Holland (1977)
- 5) W. J. M. Kickert and E. H. Mamdani: Analysis of a Fuzzy Logic Controller, Fuzzy Sets and Systems, 1-1, 29/44 (1978)
- 6) R. E. King: Fuzzy Logic Control of a Cement Kiln, Proc. IEEE Conf. on Applications of Adaptive and Multivariable Control, 56/59 (1982)
- 7) 安信, ほか: Fuzzy 制御による列車定位置停止制御, 計測自動制御学会論文集, 19-11, 873/880 (1983)
- 8) 柳下, ほか: ファジィ理論の浄水場薬品注入制御への応用, システムと制御, 28-10, 597/604 (1984)
- 9) 前田, 村上: Fuzzy Logic コントローラによる自動車の速度制御, 計測自動制御学会論文集, 21-9, 984/989 (1985)
- 10) M. Sugeno and K. Murakami: An Experimental Study on Fuzzy Parking Control Using a Model Car, Industrial Applications of Fuzzy Control (M. Sugeno ed.), 125/138, North-Holland (1985)
- 11) 前田, ほか: ファジィコントローラの設計, 第 2 回ファジィシステムシンポジウム講演論文集, 38/43 (1986)
- 12) N. Baaklini: Automatic Learning Control Using Fuzzy Logic, Ph. D Thesis, London University (1976)
- 13) T. J. Procyk: A Self-Organising Controller for Dynamic Processes, Ph. D Thesis, London University (1977)
- 14) T. Yamazaki: An Improved Algorithm for a Self-Organising Controller, and Its Experimental Analysis, Ph. D Thesis, London University (1982)
- 15) L. A. Zadeh: Calculus of Fuzzy Restriction, Fuzzy Sets and Their Applications to Cognitive and Decision Processes (L. A. Zadeh, et al. Eds.), 1/39, Academic Press (1975)
- 16) E. H. Mamdani: Application of Fuzzy Logic to Approximate Reasoning Using Linguistic Synthesis, IEEE Trans. Computers, C-26-12, 1182/1191 (1977)
- 17) 永本雅晴: ファジィ推論, システムと制御, 28-7, 436/441 (1984)
- 18) Y. Tsukamoto: Fuzzy Logic Based on Lukasiewicz Logic and Its Applications to Diagnosis and Control, Ph. D Thesis Tokyo Insti./Tech. (1979)
- 19) J. F. Baldwin: A New Approach to Approximate Reasoning Using a Fuzzy Logic, Fuzzy Sets and Systems, 2-4, 309/325 (1979)
- 20) 前田, ほか: Fuzzy コントローラの設計, 九州工業大学研究報告, 第 49 号, 43/51 (1984)
- 21) M. Braae and D. A. Rutherford: Fuzzy Relations in a Control Setting, Kybernetes, 7, 185/188 (1978)
- 22) 前田, ほか: あいまい推論による Fuzzy Logic コントローラの設計, 第 1 回知識工学シンポジウム講演資料, 133/136 (1983)