

# ファジィ制御における規格化定数の調整法 —操作例からの学習—

5 D-5

塩崎慎治\* 山下善之\*\* 鈴木 睦\*\*

\*日本ユニシス(株) \*\*東北大学工学部

## 1. はじめに

ファジィ制御<sup>[1]</sup>は熟練したオペレータの経験・知識に基づいて制御用のルールを作成し、そのルールの推論結果を用いて制御を行うものである。ルールはファジィ変数を用いて定性的な記述がされているが、実際に制御対象を制御するには実測値とファジィ変数を対応づける規格化定数を決定しておかなければならない。この規格化定数は制御性能に大きな影響を与えるため、その値を決定する作業(チューニング)は熟練者のノウ・ハウをもとに慎重に行われるが、直感に頼っている部分もあり、多くの時間を必要としている。本稿では、熟練者の操作例をもとに、ドメインの知識として与えられたファジィ制御則の規格化定数を学習により自動チューニングする手法について述べる。

## 2. 学習方法

### 2.1 規格化定数

ファジィ変数の台集合の定義域  $[-a, a]$  と実測値の定義域  $[-b, b]$  との対応を次のように規格化定数  $S$  を用いて定義する。

$$S = b/a$$

### 2.2 アルゴリズム

人間が何かを学習するときのことを考えると、学習の前提となる(場合によってはそれだけでは役に立たない)ドメインの知識を学習後には役に立つ知識に変換していることがよくある。また、ドメインの知識があった方が学習結果の正当性も高いと考えられる。本手法はこのような人間の学習手法を参考にしており、「操作例によるドメインの知識の操作可能な知識への変換」を行うものである。

操作例として、熟練オペレータ等による良好な制御結果が、

$$(\bar{e}_j, \Delta \bar{e}_j, \Delta \bar{u}_j) \quad j=0, 1, \dots, m$$

なる時系列として与えられているとする。ここで、 $\bar{e}_j$  は実測値と目標値との差分、 $\Delta \bar{e}_j$  は差分の変化分、 $\Delta \bar{u}_j$  は出力(操作量)の変化分、 $j$  は時点を表す。

また、ドメインの知識として、ファジィ制御で用いる制御用ルールが

$$\text{IF } e = E_i \text{ AND } \Delta e = \Delta E_i \text{ THEN } \Delta u = \Delta u_i \\ i=0, 1, \dots, n$$

のように与えられているとする。制御用ルールは、その前件部に実測値と目標値との差分( $e$ )および差分の変化分( $\Delta e$ )、後件部に出力(操作量)の変化分( $\Delta u$ )に関する記述が行われる。ここで、 $e, \Delta e, \Delta u$ の規格化定数をそれぞれ  $S_e, S_{\Delta e}, S_{\Delta u}$  とし、評価関数  $P$  を

$$P(S_e, S_{\Delta e}, S_{\Delta u}) = \sum_{j=0}^m (\Delta \hat{u}_j - \Delta \bar{u}_j)^2$$

で定義する。なお、 $\Delta \hat{u}_j$  は  $\bar{e}_j, \Delta \bar{e}_j$  の実測値に対して規格化定数として  $S_e, S_{\Delta e}, S_{\Delta u}$  を用いたときの推論結果、 $m$  は制御応答が収束したとみなせる時点である。

このとき、評価関数  $P$  を最小にする  $S_e, S_{\Delta e}, S_{\Delta u}$  をシプレックス法による極値探索で決定する。

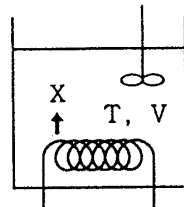
規格化定数が決定されることで、定性的な部分のみの記述であった(使えない)制御ルールが、実際に制御に使える操作可能な知識に変換されたことになる。

## 3. 実例

### 3.1 制御モデルと制御目標

一次遅れ系の簡単な例として、ヒータによる水の加熱の場合について考察した。

$$\text{制御モデル: } dT/dt = (X - hA(T - T_r)) / C_p \rho V$$



- $x$  : 発熱量 [J/s]
- $T$  : 水温 [K]
- $T_r$  : 室温 [K]
- $C_p$  : 比熱 [J/kg·K]
- $\rho$  : 密度 [kg/m<sup>3</sup>]
- $V$  : 体積 [m<sup>3</sup>]
- $h$  : 伝熱係数 [J/K·s·m<sup>2</sup>]
- $A$  : 伝熱面積 [m<sup>2</sup>]

制御目標: 水温  $T_t = 328$  [K]

操作変数: 発熱量  $X$  [J/s]

なお、今回設定した初期値及び他のパラメータ類の値は

- 発熱量の最大値 :  $Xh = 10 \times 10^3$  [J/s]
- 水温(初期値) :  $T = 298$  [K]
- 室温 :  $T_r = 273$  [K]
- 比熱 :  $C_p = 4.2$  [J/kg·K]
- 密度 :  $\rho = 1.0 \times 10^3$  [kg/m<sup>3</sup>]
- 体積 :  $V = 1.0$  [m<sup>3</sup>]
- 伝熱係数 :  $h = 2.0$  [J/K·s·m<sup>2</sup>]
- 伝熱面積 :  $A = 20.0$  [m<sup>2</sup>]
- サンプリング時間 :  $\Delta t = 1.0$  [s]

である。

An Adjustment Method of Scaling Factors for Fuzzy Controller.  
- Learning from an Operation Example -

Shinji SHIOZAKI\*

Yoshiyuki YAMASHITA\*\*, Mutsumi SUZUKI\*\*

\*Nihon Unisys, Ltd.

\*\*Department of Biochemistry and Engineering, Tohoku Univ.

### 3. 2 学習結果

本来は人間のオペレータによる操作結果を教師データとして学習させるのであるが、ここではその代わりとしてファジィ制御による制御結果やPID制御<sup>[2]</sup>による制御結果を教師データとして学習させた。

#### (1) 教師データとしてファジィ制御の結果を用いた場合

教師データとして、別途調整済みのファジィ制御器の入出力関係を用いれば、全く同じ構造のファジィ制御則を学習するものと考えられる。そこでそれを確認する目的のシミュレーションを行った。

ファジィ制御のルールの記述に用いるファジィ変数として、NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PBの7種類の三角形をしたファジィ集合を定義し、規格化は[-3, 3]で行った。制御ルールは、

```
IF e=NS AND Δe=PB THEN Δu=NM
IF e=PS AND Δe=NB THEN Δu=PM
      ⋮
```

のようなものである。教師データとして与えたファジィ制御器の規格化定数の値は、

$$S_e=10.00, S_{\Delta e}=5.00, S_{\Delta u}=1.00$$

である。学習後得られた規格化定数は、

$$S_e=9.99, S_{\Delta e}=5.01, S_{\Delta u}=1.00$$

であり、ほぼ一致している。このことから学習が正しく行われたことが確認できる。

#### (2) 教師データとしてPID制御の結果を用いた場合

ファジィ制御とは異なる制御器からも学習できることを確認するために、教師データとしてPID制御器の入出力関係を用いた。

PID制御は誤差信号  $e(t)$  に対して次のような出力  $u(t)$  を発生させるコントローラによる制御である。

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d de(t)/dt$$

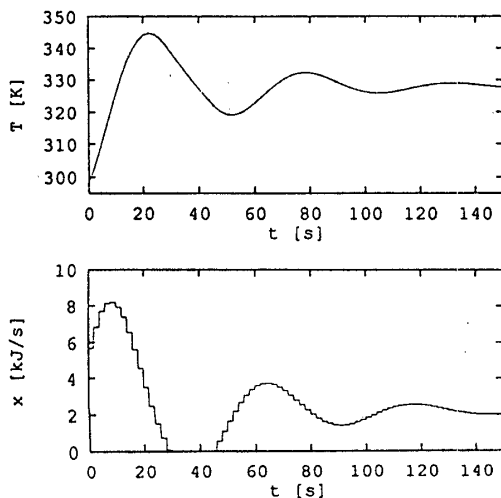


図1 教師データ (PID制御)

比例ゲインなどのPIDパラメータは応答を見ながら、試行錯誤的に決定した。その値は

$$K_p=0.07, K_i=0.03, K_d=0.02$$

である。

教師データとして用いるPID制御の様子を図1に示す。この教師データを用いた学習後のファジィ制御の様子を図2に示す。学習後のファジィ制御器の規格化定数の値は、

$$S_e=30.08, S_{\Delta e}=59.05, S_{\Delta u}=2.54$$

となった。ファジィ制御器がPID制御器とほぼ同じ動きをしており、学習が正しく行われたことが確認できる。

### 3. 3 本手法の特徴

本手法は、ドメインの知識(今回の考察では制御用ルールの定性的な記述部分)を用いているため、学習時の探索空間が限定され、比較的精度の良い結果が短時間で学習される。特に熟練したオペレータの操作例のようにその操作の特性を完全に解析し定義することが難しい場合でも、定性的な部分のドメインの知識が分かっている場合、制御に利用できる規格化定数を導くことが可能である。

### 4. おわりに

本手法が熟練したオペレータの操作例からだけではなく、制御器の出力結果からも学習できることを利用して、従来PID制御などの古典制御により制御が行われていたものをファジィ制御に移行する場合などに、今まで使っていたPID制御の出力を操作例として学習させることにより、簡単にファジィ制御器の規格化定数を決定することができる。なお、本手法はファジィ制御のような機械系に限らない。今後は人間系への適用も行っていきたい。

### 参考文献

- [1] 菅野道夫：ファジィ制御，日刊工業新聞社，1988。
- [2] 櫻田榮一，中西英二：化学プロセス制御，朝倉書店，1987。

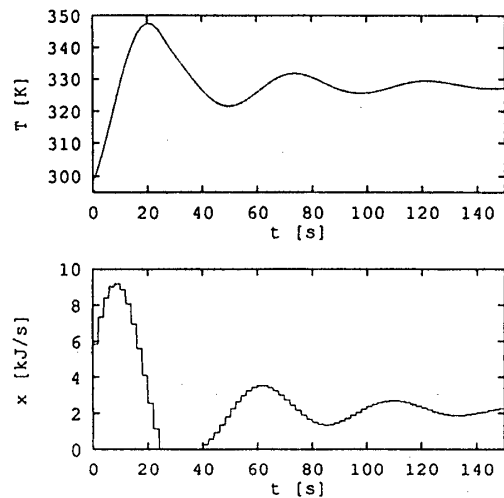


図2 学習後のファジィ制御