ファジィ推論による制御対象の同定と オートチューニングへの応用*

岩崎 隆至^{*1}, 森田 温^{*2}, 丸山 寿一^{*2}

Plant Identification with Fuzzy Inference and Its Application to Auto-Tuning

Takashi IWASAKI, Atsushi MORITA and Hisaichi MARUYAMA

This paper presents a new identification method which utilizes fuzzy inference in parameter identification. The proposed system has an additional control loop where a real plant is replaced by a plant model. At first, an input signal, such as a step signal, is given to both control loops. Then the parameters in the plant model are modified such that the output signal features, such as magnitude of an overshoot, of the two loops become closer. Fuzzy rules describe the relationship between comparison results of the features and magnitudes of modification in the model parameter values. This method is effective in auto-tuning because the response of the closed loop is verified. The proposed method is tested both in simulations for several plants with first-order lags and dead-times, and in experiments for motor control. The results show that the proposed method is effective in practical use.

Key Words: Automatic Control, Identification, Fuzzy Inference, Auto-Tuning, Plant Control, Motion Control

1. ま え が き

ダイナミクスシステムを対象とするコントローラの設計に際しては制御対象の動特性を把握することが必要であり、その動特性の表現として伝達関数で示された制御対象モデルを用いることが有効である。この制御対象モデルのパラメータ同定法としては、最小二乗法などのシステム同定理論⁽¹⁾に基づく手法が、理論的で一般性のあるものとして通常用いられる。しかし、この手法はコントローラの設計とは独立な同定アルゴリズムであり最終目標である閉ループ系の応答による同定結果の修正が困難であること、正確な同定値を得るために同定用信号の印加が必要となる場合が多いこと、などの性質を持つ。これらの性質は応用分野によっては実用上問題となる場合があり、例えば、制御対象に適したコントローラパラメータを自動的に設定するオートチューニングにおいては、同定用信号の印加は望ましいものではない。

そこで、本論文では、制御対象モデルのパラメータ同定の新しい考え方として、ファジィ推論による同定

法を提案する。この手法は、閉ループ系の応答波形から抽出した特徴量を基にパラメータ同定を行う手法であり、特別な同定用信号を必要としないこと、コントローラの設計と結びつけやすく閉ループ系の応答を確認しながら同定が行えることなどに特長がある。また、本論文では、この同定法の特長を利用して、この同定法と一般的な制御系設計法を結びつけたオートチューニング法を提案する。以下では、提案するファジィ推論による同定法とそのオートチューニングへの応用について述べ、二つの具体例に対して本方式の有効性を示す。

2. ファジィ推論を用いた 制御対象の同定

図1の実線で示された部分が、提案する同定法によるシステムの構成図である。この方式は、二つの閉ループ系を持ち、一方は実際の制御対象を、他方は計算機上の制御対象モデルを、それぞれ同じ特性を持つコントローラで制御する構造になっている。そして、二つの閉ループ系の応答波形の特徴量の比較値から、ファジィ推論により制御対象モデルの修正を行う。特徴量とは、例えば、ステップ応答時のオーバーシュート量などであり、ファジィ推論はこの特徴量の比較値とモ

* 原稿受付 平成3年11月11日。

^{*1} 正員、三菱電機(株)(〒661 尼崎市塚口本町8-1-1)。

^{*2} 三菱電機(株)。

デル修正量との関係を表現するために用いられている。この特徴量やファジィルールは、制御対象モデルやコントローラの構造、各パラメータの特性などに応じて適切なものに決定する必要がある。

この同定法の概略手順は次のようになる。まず、制御対象モデルのパラメータの初期値を決める。そして、ある入力(SV)の変化に対して得られた二つの閉ループ系の出力(PV, Model PV)からそれぞれ特徴量を抽出し、その値を比較する。二つの閉ループは、制御対象と制御対象モデルのみ異なるので、得られた特徴量の差異は制御対象とそのモデルとの差異に起因するものである。そこで、特徴量の比較値から制御対象モデルのパラメータのずれを推定するファジィ推論を行い、モデルパラメータを修正する。以上の手順を繰り返し、特徴量の差がなくなった時点で、同定値が得られたと判断する。

本方式は同定法として次のような特長がある。

① 通常の指令としての入力変化に対する閉ループ系の応答から特徴量を抽出するため、同定のための特別な入力変化を必要とせず同定が可能になる。

② 特徴量の抽出方法を工夫することにより、ノイズの影響を受けにくくできる。また、パラメータの修正結果を確認しながら繰返すため、一時的なノイズにも強い。

3. オートチューニングへの応用

オートチューニングとは、制御対象の特性に適したコントローラパラメータを自動的に設定する機能である。提案した同定法を一般的な制御系設計法に結びつけることにより、同定用信号の印加を必要とせず閉ループ系の応答(特徴量)を確認しながらパラメータ設定が行えるオートチューニング方式が実現できる。

これまで提案されているオートチューニング方式にも、特徴量を基にファジィ推論により直接コントローラパラメータを変更していくものがある⁽²⁾⁽³⁾。しかし、これらの方式は、制御対象モデルを陽に利用せずに特

徴量とパラメータ修正量の関係を直接ファジィルールで表現しようとしているため、一般性のあるファジィルールの決定が困難で、チューニング結果が制御対象の特性に影響されやすく、ステップ入力などの特定の入力変化が必要であるという問題がある。

提案した同定法を用いたオートチューニング方式を、図1の点線部を含めたブロック図に示す。これは、提案した同定法にコントローラを修正するためのコントローラ設計部を追加したものである。すなわち、ファジィ推論により制御対象モデルのパラメータが修正された場合、コントローラ設計部によりその時点での制御対象モデルに最適なコントローラが決定され、二つの閉ループのコントローラが修正される。最終的に、制御対象の同定の終了時に、制御対象に適したコントローラが得られる。

図1の制御対象モデルを含む閉ループでは、その制御対象モデルに最適なコントローラが常に用いられるためその閉ループ系の応答は望ましいものになり、ここから得られた特徴量は、実際の制御対象の応答の特徴量の目標基準として適切なものである。したがって、このオートチューニング方式は、制御対象モデルのパラメータ同定結果とコントローラの設計結果を統合して評価し、閉ループ系の応答を目標基準に近づけようとするものであるといえる。

本節で述べた方式は、従来の特徴量を基に直接コントローラを修正するファジィオートチューニング手法⁽²⁾⁽³⁾に比べ、オートチューニング手法として以下のような特長を持つ。

① コントローラ設計部において制御理論に基づいた一般的な制御系設計法を使用できるので、特性の大きく異なる制御対象にも適用できる。

② 制御対象と制御対象モデルの応答の比較によりチューニングを行うので、チューニング手順の繰返しにおいて毎回厳密に同じ入力変化が必要ではない。

次章より、提案した方式について、二つの具体例を示しその有効性を示す。

4. プラント制御系における オートチューニング

一次遅れ+むだ時間で伝達関数が示される制御対象をPI(比例・積分)コントローラで制御する場合のPIパラメータの決定に、前節で示したオートチューニング方式を適用し、シミュレーションによってその有効性を示す。この制御対象は、プラント制御で一般的な特性として用いられるものである。

コントローラの伝達関数 $C(s)$ は次式で表されると

図1 ファジィ推論を用いた制御対象の同定法

する。

$$C(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{K_i s} \right) \dots \dots \dots (1)$$

ただし、 K_p は比例ゲイン、 K_i は積分時定数を示し、この二つのオートチューニングで決定する PI パラメータである。また、制御対象の伝達関数 $P(s)$ は次式で表されるとする。

$$P(s) = \frac{K_1 \exp(-Ls)}{1 + Ts} \dots \dots \dots (2)$$

ただし、 L はむだ時間の大きさ、 T は一次遅れ時定数、 K_1 はプラントゲインを示す。

今回のシミュレーションでは、制御対象モデルの伝達関数 $P_m(s)$ を制御対象と同じ一次遅れ+むだ時間系の構造を持つとした。

$$P_m(s) = \frac{K_{1m} \exp(-L_ms)}{1 + T_ms} \dots \dots \dots (3)$$

ただし、添字 m は制御対象モデルのパラメータであることを示す。 L_m 、 T_m 、 K_{1m} がファジィ推論によって修正される。

ここでは、特徴量、およびその比較値として図 2 に示すものを用いた。図 2 の各特徴量の式において、 $A \sim E$ 添字 p および m は、それぞれ制御対象および制御対象モデルの応答に対する検出値を示す。特徴量の比較値 cmp_ovr 、 cmp_rise 、 cmp_r30 、 cmp_rng がファジィ推論の入力となる。

ファジィ推論のためのルールを図 3 に、メンバシップ関数を図 4 に示す。これらは、制御における一般的な知識から得られる定性的な関係を基に決定した。ファジィ推論方式としては一般的な MIN-MAX-重心法を用いた。

Features:
 $p_ovr = \frac{E_p}{D_p}$, $p_rise = B_p$, $p_r30 = A_p$, $p_rng = C_p$
 $m_ovr = \frac{E_m}{D_m}$, $m_rise = B_m$, $m_r30 = A_m$, $m_rng = C_m$
 Comparison results:
 $cmp_ovr = p_ovr - m_ovr$, $cmp_rise = \frac{p_rise}{m_rise}$
 $cmp_r30 = \frac{p_r30}{m_r30}$, $cmp_rng = \frac{p_rng - m_rng}{m_r30 + m_rng}$

図 2 特徴量とその比較値

- RULE1: IF cmp_ovr is not large
 AND cmp_rise is large
 THEN dK is negative.
- RULE2: IF cmp_ovr is not large
 AND cmp_rise is middle
 THEN dK is zero.
- RULE3: IF cmp_ovr is not large
 AND cmp_rise is small
 THEN dK is positive.
- RULE4: IF cmp_ovr is much large
 THEN dK is positive
 dL is positive
 dT is negative.
- RULE5: IF cmp_r30 is large
 THEN dL is positive.
- RULE6: IF cmp_r30 is middle
 THEN dL is zero.
- RULE7: IF cmp_r30 is small
 THEN dL is negative.
- RULE8: IF cmp_rise is s_middle
 AND cmp_r30 is s_middle
 AND cmp_ovr is large
 THEN dK is positive
 dT is positive.
- RULE9: IF cmp_rise is s_middle
 AND cmp_r30 is s_middle
 AND cmp_rng is large
 THEN dT is positive.
- RULE10: IF cmp_rise is s_middle
 AND cmp_r30 is s_middle
 AND cmp_rng is middle
 THEN dT is zero.
- RULE11: IF cmp_rise is s_middle
 AND cmp_r30 is s_middle
 AND cmp_rng is small
 THEN dT is negative.

図 3 同定のためのファジィルール(プラント制御系)

図 4 メンバシップ関数(プラント制御系)

k 回目の制御対象モデルパラメータの修正は、ファジィ推論の結果である $dL(k)$, $dT(k)$, $dK(k)$ を用いて、次式のように決定する。

$$L_m(k+1) = 2^{dL(k)} \cdot L_m(k) \dots\dots\dots (4)$$

$$T_m(k+1) = 2^{dT(k)} \cdot T_m(k) \dots\dots\dots (5)$$

$$K_{1m}(k+1) = 2^{dK(k)} \cdot K_{1m}(k) \dots\dots\dots (6)$$

また、コントローラ設計法で用いられる PI パラメータの決定法には、部分的モデルマッチング法⁽⁴⁾を採用した。

図 5 にシミュレーション結果を示す。図中、(a), (b), (c) はそれぞれ特性の大きく異なる制御対象に対する結果を示しており、実線は制御対象を含む閉ループ系の出力 PV, 点線はモデルを含む閉ループ系の出力 Model PV を表す。制御対象の応答は、チューニング前にはモデルの応答と異なって望ましいものではなかったが、最終的には一致し目標仕様を満たすようになったことがわかる。

図 5 (b) で用いた制御対象に対し、さまざまな初期値からチューニングを行った場合の同定結果を、表 1

表 1 一次遅れ+むだ時間系の同定結果
($L=2.03$, $T=2.03$, $K_1=1.0$)

Initial value			Identified value		
L_m	T_m	K_{1m}	L_m/L	T_m/T	K_{1m}/K_1
4.06	4.06	2.0	0.97	1.05	1.03
1.015	4.06	2.0	0.96	1.05	1.04
4.06	1.015	2.0	1.12	0.88	0.91
1.015	1.015	2.0	1.10	0.90	0.93
4.06	4.06	0.5	0.98	1.00	1.05
4.06	1.015	0.5	0.93	0.90	0.97

に示す。初期値にかかわらず 10% 程度の誤差で同定が完了していることがわかる。

なお、制御対象の特性によっては同定結果に誤差が生じる。これは閉ループ系の応答に誤差の影響が現れにくい場合に起こり、例えば図 5 (c) では、この制御対象の特性が主に L と K_1 の値に支配されるため T の同定結果に大きな誤差が残る。しかし、この同定誤差は、閉ループ系の応答にはほとんど影響を与えず、オートチューニングの実用上の問題にはならない。

5. モータ制御系における 負荷イナーシャの同定

モータを機械に取付けて動作させる場合を考えると、通常、電流ループ内の定数やトルク定数は、モータのパラメータとして与えられる。したがって、負荷イナーシャ J の値を同定できれば、コントローラパラメータの適切な値を決定できる場合が多い。そこで、提案した同定法を J の同定に適用し、実験によって有効性を確認する。

標準的なモータ位置制御系に対して本方式を適用した場合のブロック図を図 6 に示す。基本となるモータ位置制御系は、電流、速度、位置の信号がフィードバックされ、それぞれ比例または比例・積分制御されている。図中、 J は実際の負荷イナーシャ、 J_m はモデルの負荷イナーシャを示し、 J_m を J に一致させることが同定の目的である。また、 K_{cp} , K_{ci} , K_{vp} , K_{vi} , K_{pp} はコントローラパラメータを示し、それぞれ電流比例ゲイン、電流積分時定数、速度比例ゲイン、速度積分時定数、位置比例ゲインである。

図 5 一次遅れ+むだ時間系に対するオートチューニング結果

図 6 モータ位置制御系に対する負荷イナーシャの同定とオートチューニング

図 6 の下の閉ループ系が実際のモータ制御系、上の閉ループ系が制御対象モデルの制御系であり、これらは負荷イナーシャパラメータ J と J_m のみが異なっている。そのほかの各定数およびゲインは、あらかじめモータパラメータとして与えられた値および制御対象のコントローラのゲインを採用しており、二つの閉ループ系で一致させている。

提案した同定法を適用する場合、より正確な同定結果を得るために特徴量を適切に選択する必要がある。図 6 の制御系では、電流 i 、速度 $\dot{\theta}$ 、位置 θ の信号を用いることができるので、適切な特徴量はこれらのいずれの信号から抽出すべきかについて検討する。

同定のための特徴量は J と J_m の違いによりなるべく大きな差が出るものが望ましい。そこで、入力 u から電流、速度、位置までのそれぞれの伝達関数について、 J と J_m のみが異なる二つの閉ループ系の間の比を計算すると(ただし、簡単のため、電流ループの応答は十分速いとし、速度ループは比例制御のみとした)、次のようになる。まず、入力 u から電流 i までの伝達関数の比は、

$$\frac{G_{cm}}{G_c} = \frac{(J/K_T)s^2 + K_{vp}s + K_{pp}K_{vp}}{(J_m/K_T)s^2 + K_{vp}s + K_{pp}K_{vp}} \cdot \frac{J_m}{J} \quad \dots\dots\dots (7)$$

となる。ここで、 G_c 、 G_{cm} はそれぞれ J と J_m に対する電流 i までの伝達関数を示す。また、入力 u から速度 $\dot{\theta}$ 、位置 θ までの伝達関数の比は、

$$\begin{aligned} \frac{G_{vm}}{G_v} &= \frac{G_{pm}}{G_p} \\ &= \frac{(J/K_T)s^2 + K_{vp}s + K_{pp}K_{vp}}{(J_m/K_T)s^2 + K_{vp}s + K_{pp}K_{vp}} \quad \dots\dots\dots (8) \end{aligned}$$

となる。ここで、 G_v 、 G_{vm} 、 G_p 、 G_{pm} はそれぞれ J と J_m に対する速度 $\dot{\theta}$ 、位置 θ までの伝達関数を示す。

- RULE1: IF cmp_I is large THEN dJ is positive.
 RULE2: IF cmp_I is middle THEN dJ is zero.
 RULE3: IF cmp_I is small THEN dJ is negative.

図 7 同定のためのファジィルール(モータ制御系)

図 8 メンバシップ関数(モータ制御系)

式(7)、(8)から、 J と J_m の差は、速度、位置の信号には主に高周波成分にしか現れないが、電流信号には直流成分にも顕著に現れることがわかる。したがって、今回は同定のための特徴量は、ステップ状の位置指令値を入力 u とした場合の電流信号から抽出した。具体的には、位置指令値入力後電流値が正の区間の時間積分値を特徴量として用い、制御対象側と制御対象モデル側の特徴量の比 cmp_I を特徴量の比較値とした。 cmp_I を入力するファジィ推論のためのルールとメンバシップ関数をそれぞれ図 7 と 8 に示す。この場合は同定するパラメータが 1 個であるため、ファジィ推論は単純なものになっている。制御対象モデルの J_m の修正はファジィ推論出力 dJ を基に式(4)と同様に

表 2 負荷イナーシャの
同定値と実際値の比

motor rotor inertia	$\frac{J_m}{J}$
1.0	1.00
1.5	1.06
2.0	1.05
2.5	1.10
3.0	1.10
3.5	1.04

図 9 負荷イナーシャ同定の実験結果

行っている。また、 J_m の修正ごとに、速度ループのゲイン K_{vp} , K_{vi} を最適なものに変更するオートチューニングを行っている。

図 9 に実験における電流信号の変化の様子を示す。図の (a), (b), (c) はそれぞれ 1, 2, 3 回めの入力に対する電流信号を示しており、実線は実機の電流値、点線はモデルの電流値を示す。この結果は、 J_m の初期値をモータロータイナーシャの値とし、モータにロータイナーシャの 2.5 倍の負荷を取付けた場合のものである。ファジィ推論による修正を 2 回行った後の 3 回めの入力に対しては、実機とモデルの電流信号がほぼ一致し、同定が完了していることがわかる。

表 2 に、モータにさまざまな負荷を取付けた場合の実際値と同定値との比を示す。ほぼ正確な同定値が得られていることがわかり、この応用における提案した手法の有効性が確認できた。

6. む す び

ファジィ推論により、閉ループ系の応答の特徴量から制御対象の同定を行う手法について提案した。また、この同定法に基づくオートチューニング方式を提案した。このオートチューニング方式は特別な同定用信号を必要とせず、広い範囲の制御対象に柔軟に対応でき

るものである。プラント制御のモデルとして一般的に用いられる一次遅れ+むだ時間系、およびモータ位置制御系に対し、提案した方式の適用を行い、シミュレーションと実験によりその有効性を確認した。

今回提案した手法には、本文中に示したように純粋なパラメータ同定手法としては正確な同定結果が得られない場合があること、制御対象と制御対象モデルが構造的に異なっている場合のロバスト性の確認ができていないこと、同定パラメータが多くなるとルールが複雑になることといった問題点が残されている。これらの問題点を、適用する対象に応じて解決していくことが、今後の課題である。

文 献

- (1) 例えば、中溝、信号解析とシステム同定、(1988)、1、コロナ社。
- (2) 野本・近藤、ファジィ・オートチューニング・コントローラ、第 3 回ファジィシステムシンポジウム講演論文集、(1987-6)、117-120。
- (3) Iwasaki, T. and Morita, A., Fuzzy Auto-Tuning for PID Controller with Model Classification, *Proc. of NAFIPS'90*, (1990), 90-93.
- (4) 北森、制御対象の部分的知識に基づく制御系の設計法、計測自動制御学会論文集、15-4、(1979)、549-555。