オートチューニングファジィフィルタによる 加速度コントローラの構成法

正員 大石 潔 (大阪工大)

正員 土川 浩史 (大阪工大)

Design Method of Acceleration Controller Based on Auto-tuning Fuzzy Filter

Kiyoshi Ohishi, Member, Hiroshi Tsuchikawa, Member (Osaka Institute of Technology)

It has been reported that the acceleration control method realizes a fine and fast motion control. The acceleration control method has an ability to suppress the effects of dynamical nonlinearities rapidly. Moreover, the acceleration control method has an accurate output response for each motion reference. However, when the conventional acceleration control system is designed, it is often difficult to define both its nominal parameters and its frequency characteristics systematically.

This paper proposes the new model following acceleration control system using the auto-tuning fuzzy filter. The structure of the proposed system has no nominal mechanical parameter of actuator. Its frequency characteristics is determined by the auto-tuning fuzzy filter. This fuzzy filter is constructed by the new auto-tuning algorithm based on the simplex design method. Therefore, the proposed acceleration control system is designed automatically, and it realizes a fine motion control easily.

キーワード：加速度制御，ファジィ制御，モーションコントロール

1. ま え が き

ロボット制御の分野において、高精度なモーション制御を行うために、アクチュエータの高性能な制御系の実現が望まれている。ロボットの各関節を駆動するアクチュエータには、モーション制御の際に摩擦力・干渉力・慣性力・重力などの様々な外力が印加されるので、アクチュエータを駆動する制御系は外力の影響を瞬時に補償する必要がある。そのために、これまで外乱オブザーバやモデル追従加速度制御系などによって加速度コントローラを構成し、この加速度コントローラに基づくロボットマニピュレータの高性能なモーション制御法が提案されてきた^{(1)~(3)}。加速度コントローラは、ロボットマニピュレータの各関節のアクチュエータを加速度指令で駆動させるので、マニピュレータの複雑な逆運動力学計算を行うことなく⁽⁴⁾⁽⁵⁾、簡単にロバストなモーション制御を実現させることができる。

しかしながら、従来の加速度コントローラでは、制

御対象であるロボットマニピュレータの各関節のアクチュエータの構造や、パラメータのノミナル値をあらかじめ知っておく必要がある。また、加速度コントローラの応答性能を決めるとき、設計者はこのための試行錯誤的作業と経験的知識をある程度必要になる。このため、加速度コントローラの構成法がわかっている、それを実現するときに煩雑な作業をある程度伴うことになる。

そこで本論文では、従来のモデル追従加速度制御系にオートチューニングファジィフィルタを付加することにより⁽⁶⁾⁽⁷⁾、アクチュエータのパラメータのノミナル値を一切必要とせず、に、所望の応答特性をもつ加速度コントローラを自動的に実現する方法を提案する。提案する加速度コントローラは、モデル追従加速度制御系の規範モデルに理想的な加速度コントローラを採用し、かつ加速度コントローラの応答特性を決定する作業をすべてオートチューニングファジィフィルタに集約させている。これより、制御対象の構造やパラメータの情報をあらかじめ知る必要がなく、更に試行錯

誤的作業や経験的知識も要求されることもない。

本論文では、1自由度マニピュレータによる実験とシミュレーションによって、提案する加速度コントローラの構成法の有効性を確認している。

2. ファジィフィルタを付加したモデル追従加速度制御系

加速度コントローラは、図1に示すように積分器2個をカスケード結合した形で構成される。ロボットマニピュレータの各関節のアクチュエータが図1のような加速度コントローラとして扱えると、ロボットマニピュレータのモーション制御は加速度指令に基づいて計画すればよくなる。この結果、ロボットマニピュレータのモーション計画が簡単になり、かつ高性能な応答結果が期待できることになる。

加速度コントローラをより簡単に実現するために、規範モデルに理想的な加速度コントローラを採用したモデル追従加速度制御系を図2のように構成する。図2において、 $P(s)$ はロボットマニピュレータの関節を駆動するアクチュエータである。ここでは、トルク指令で駆動されるDDモータを制御対象のアクチュエータとしている。 $P_m(s)$ は規範モデルであり、本論文では簡単に加速度コントローラを構成するために、ここに理想的な加速度コントローラを採用している。この規範モデル $P_m(s)$ の出力に制御対象の $P(s)$ の応答を一致させるために、並列補償要素 $H(s)$ が制御対象に補償入力を加えることになる。従って、 $H(s)$ は制御対象の応答を理想的な加速度コントローラの応答に一致させるようにするので、制御対象を加速度コント

図1 加速度コントローラの構成図
Fig. 1. Acceleration controller.

図2 モデル追従加速度制御系の構成図
Fig. 2. Model following acceleration control system.

ローラに変換させるための前置フィルタ $G(s)$ はスカラー量の1でよいことになる。これより、図2のモデル追従加速度制御系は、並列補償要素 $H(s)$ の構成を除くと、その他の構造とパラメータは一意に決定されることになる。

並列補償要素 $H(s)$ は、一般に規範モデルの逆システム $P_m^{-1}(s)$ と低域フィルタ $F(s)$ をカスケード結合した系で構成される。図2において、規範モデルが2個の積分器で構成されるので、その逆システム $P_m^{-1}(s)$ は2階の微分系となり、低域フィルタ $F(s)$ は二次遅れ要素となる。この低域フィルタ $F(s)$ の周波数特性が、加速度コントローラを維持する周波数帯域を決めるので、設計者はなるべく高い周波数帯域まで広げて設計したくなる。しかしながら、 $F(s)$ を高い周波数帯域まで広げると、系全体の対雑音性やロバスト安定性が難しくなるときが出てくる。このため、この低域フィルタ $F(s)$ は、実際に加速度コントローラを構成するときに、試行錯誤的に調整されることがしばしばである。

そこで本論文では、図3に示すように並列補償要素 $H(s)$ に直列にファジィフィルタ $FU(s)$ を挿入して、低域フィルタ $F(s)$ の構造を一意に決定することを提案する。すなわち、低域フィルタ $F(s)$ をモデル追従加速度制御系のソフトウェアのサンプリング周波数の1/10程度に相当する二次遅れ要素で構成し、試行錯誤的な調整作業を直列に挿入されたファジィフィルタ $FU(s)$ にすべて負わせることにする。ここで、サンプリング周波数の1/10程度とした理由は、理想的な信号処理がサンプリング周波数の1/10程度までとみなされるからである。このように、加速度コントローラの周波数特性の実現上の不都合を、すべてファジィフィルタ $FU(s)$ の設計で考慮したので、実現される加速度コントローラのパラメータはファジィフィルタ

図3 ファジィフィルタを用いたモデル追従加速度制御系

Fig. 3. Model following acceleration control system using fuzzy filter.

以外のすべてを一意的に定まることになる。

3. ファジィフィルタの構成とその特性

図3における加速度コントローラに使用されるファジィフィルタ $FU(s)$ のアルゴリズムは、「IF～, THEN～」形式の25個のルールで構成されている。ファジィフィルタ $FU(s)$ のアルゴリズムの入力は並列補償要素 $H(s)$ の出力 η とそのサンプリング時間の間の変化分 $\Delta\eta$ である。また、ファジィフィルタ $FU(s)$ のアルゴリズムの出力は、アクチュエータへの操作量 U_{cmp} となる。このルールを以下に示す。

ルール 1 : IF $\eta = PB, \Delta\eta = PB,$

THEN $U_{\text{cmp}} = PB$

ルール 2 : IF $\eta = PB, \Delta\eta = PS,$

THEN $U_{\text{cmp}} = PB$

ルール 25 : IF $\eta = NB, \Delta\eta = NB,$

THEN $U_{\text{comp}} = NB$

このルールをまとめると、表1のようになる。表1において、これらのファジィアルゴリズムの前件部と後件部の各々の値は、制御対象と制御系を実現する装

表 1 ファジィフィルタのアルゴリズムのルール
Table 1. Fuzzy rule set of fuzzy filter.

		$\Delta \eta$				
		PB	PS	ZO	NS	NB
η	PB	PB	PB	PM	PS	ZO
	PS	PB	PM	PS	ZO	NS
	ZO	PM	PS	ZO	NS	NM
	NS	PS	ZO	NS	NM	NB
	NB	ZO	NS	NM	NB	NB

図 4 前件部のメンバシップ関数

Fig. 4. Membership function of fuzzy filter.

置の両者の特性を考慮した経験的知識に基づいて決定することができる。ファジィフィルタ $FU(s)$ のアルゴリズムの前件部には、図4のような二等辺三角形のメンバシップ関数を採用している。各ルールの適合度は、メンバシップ関数の重みを用いて(1)式のように計算される。

$$\left. \begin{aligned} \Omega_{11} &= PB(\eta) \times PB(\Delta\eta) \\ \Omega_{12} &= PM(\eta) \times PB(\Delta\eta) \\ &\vdots \\ \Omega_{25} &= NB(\eta) \times NB(\Delta\eta) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

本論文では、ファジィ推論の計算量を少なくしてサンプリング時間を短くするために、ファジィルールの後件部をシングルトン形式で表現している。従って、ファジィフィルタ $FU(s)$ の出力は(2)式の重み付け平均式によって算出される。

$$U_{\text{cmp}} = \frac{\Omega_{11i} \times PB + \Omega_{12i} \times PB + \dots + \Omega_{55i} \times NB}{\Omega_{11i} + \Omega_{12i} + \dots + \Omega_{55i}} \dots\dots\dots (2)$$

提案するファジィフィルタ $FU(s)$ の応答特性の調整は、後件部のパラメータを固定にして、前件部のパラメータ $\eta_{\max}$ と $\Delta\eta_{\max}$ のみで行うことにする。これより、ファジィフィルタ $FU(s)$ の調整をより簡単に行うことができることになる。アクチュエータの出力には、必ず最大値が存在する。制御系の補償量がどんなに大きくても、実際にはある値に制限されてしまう。これより、ファジィフィルタのルールの後件部の PB と NB の値はアクチュエータの最大出力値かまたは定格出力値になる。後件部の PB と NB が定まると、 PM , PS , NM , NS の値もある程度定まることになる。ここに技術者の経験的知識を導入すれば、後件部の各値はアクチュエータの能力に応じた最適なゲイン配分を行ったことになる。本論文では、そのように後件部の各値を定めてファジィフィルタを構築する。

図 5 ファジィフィルタを用いたモデル追従加速度制御系の構成

Fig. 5. Block diagram of model following acceleration control system using fuzzy filter.

このファジィフィルタを用いたモデル追従加速度制御系の構造を改めて図5に示す。図5において、並列補償要素 $H(s)$ は規範モデルの逆システム $P_m^{-1}(s)$ と低域フィルタ $F(s)$ のカスケード結合で表し、制御対象のアクチュエータに印加される外力をまとめて T_d で表す。これより、モデル追従加速度制御系は2入力1出力の系となるので、出力 θ までの伝達特性を記述すると(3)式ようになる。(3)式において、規範モデル $P_m(s)$ とその逆システム $P_m^{-1}(s)$ は相殺されるので、(3)式は(4)式のようにまとめられる。よって、図5の構成図は図6の構成図に変換することができる。

$$\theta = \frac{P_m(S) \left[\dot{\omega}^{cmd} - \frac{\{1 - FU(S)F(S)P_m^{-1}\}}{\{\delta(S)\{1 - FU(S)F(S)P_m^{-1}\} * \frac{(S)P_m(S)}{(S)P_m(S) + 1}\} T_d} \right]}{\delta(S) \frac{P_m(S) - P(S)}{P(S)}} \quad (3)$$

$$\theta = \frac{P_m(S) \left[\dot{\omega}^{cmd} - \frac{\{1 - FU(S)F(S)\} T_d}{\{\delta(S)\{1 - FU(S)F(S)\} + 1\}} \right]}{\delta(S) \frac{P_m(S) - P(S)}{P(S)}} \quad (4)$$

図6と(4)式より制御対象のアクチュエータに加わる外力の影響を抑えて、アクチュエータを加速度コントローラにするためには、(5)式が成立すればよいことになる。更に、(5)式が成立するには、(6)式が成立してよいことになる。

$$1 - U(S)F(S) = 0 \quad (5)$$

$$U(S)F(S) = 1 \quad (6)$$

図6 図5の等価変換図
Fig. 6. Equivalent system of Fig. 5.

図7 1自由度マニピュレータの実験システム
Fig. 7. Tested one-degree-of-freedom manipulator.

すなわち、ファジィフィルタ $FU(S)$ と低域フィルタ $F(s)$ のカスケード結合した系のゲインが1であるならば、外力の影響を完全に抑圧するロバストな加速度コントローラを実現することができることになる。本論文で提案するファジィフィルタは、入出力の伝達

表2 実験システムの仕様と定格
Table 2. Specification and rated value of tested system.

Rated voltage	100 V	Maximum torque	7.14 N·m
Rated current	3.8 A	J	4.08×10^{-3} N·m
Rated torque	0.44 N·m	D	0.0 N·s/m
Maximum speed	209.33 rad/s		

表3 人間が調整したファジィフィルタのパラメータ
Table 3. Parameters of fuzzy filter tuned by human operator.

$\eta_{\max} = 2.0165 \times 10^{-2}$ rad/s ²	$\Delta\eta_{\max} = 5.0000 \times 10^{-2}$ rad/s ²
$PB = 7.14$ N·m	$PM = 0.714$ N·m
$PS = 0.0714$ N·m	$NS = -0.0714$ N·m
$NB = -7.14$ N·m	$NM = -0.714$ N·m

図8 加速度指令に対する応答のシミュレーション結果(人間がファジィフィルタを調整した場合)
Fig. 8. Numerical results of output response to sine curve acceleration command $\dot{\omega}^{cmd}$.

特性の定常ゲインが1である低域フィルタになるように設計されるので、(6)式の条件を満足することになる。また、低域フィルタ $F(s)$ の周波数帯域は加速度コントローラのソフトウェアのサンプリング周波数の限界の帯域になっているので、ファジィフィルタ $FU(s)$ の周波数特性によって加速度コントローラの周波数特性を所望のものにすることになる。

そこで、提案する加速度コントローラの有効性を確認するために、図7に示す1自由度マニピュレータの実験システムによる計算機シミュレーションを行う。実験システムは、ボールネジによってDDモータの回転トルクを直進方向の力に変換させている。実験システムのアクチュエータの定格と仕様は表2に示す。また、このときの加速度コントローラのサンプリング時

間は $100\mu\text{s}$ であり、低域フィルタ $F(s)$ の二次遅れ要素の固有振動数は $1,000\text{ rad/s}$ である。

まずモデル追従加速度制御系のファジィフィルタ $FU(s)$ を試行錯誤的に調整する。すると、表3に示すファジィフィルタ $FU(s)$ が構成される。次に、このファジィフィルタ $FU(s)$ を用いてモデル追従加速度制御系の加速度指令 ω^{cmd} に対するDDモータの位置 θ と速度 ω の時間応答特性を調べる。その結果を図8に示す。図8の結果により、ファジィフィルタを用いたモデル追従加速度制御系が加速度指令 ω^{cmd} に対してよく追従していることがわかる⁽⁶⁾⁽⁷⁾。

4. ファジィフィルタの自動調整アルゴリズム

本論文では、表1に示されるファジィフィルタ

図9 オートチューニングファジィフィルタによる加速度コントローラの構成図
Fig. 9. Model following acceleration control system using auto-tuning fuzzy filter.

図10 二乗誤差平均 e_m とメンバシップ関数の底辺の長さとの関係
Fig. 10. Relation to e_m , η_{max} and $\Delta\eta_{\text{max}}$.

$FU(s)$ のファジィルールを、ロボットマニピュレータのアクチュエータのいかにかわらず一意に決定している。ファジィルールの各パラメータの値は、アクチュエータの最大出力または定格出力の値を PB と NB の値にすることにより、順に PM , PS , NM , NS の値が適当に配分されることになる。従って、ファジィフィルタ $FU(s)$ の特性を調整する箇所は、図 4 に表されるメンバシップ関数の二等辺三角形の底辺の長さとなる。

一般に、図 4 のメンバシップ関数の底辺の長さを小さくすると、周波数特性が高帯域まで伸び即応性が増すが、逆に小さくし過ぎると振動的になる。また、底辺の長さを大きくすると、周波数特性が高帯域まで伸ばせなくなる所以对雑音性は良いが、逆に大きくし過ぎると即応性が鈍くなる。そこで、本論文ではこの特長を利用して、ファジィフィルタ $FU(s)$ をオートチューニングアルゴリズムによって自動的に調整することを試みる。

オートチューニングアルゴリズムを作製するために、ファジィフィルタを用いたモデル追従加速度制御系の応答性能とメンバシップ関数の底辺の長さの関係を図 9 に示すシステムで調べる。ここで、理想的な加速度コントローラ $P_m'(s)$ の出力 θ_m と実際のアクチュエータ $P(s)$ の出力 θ の差の二乗誤差平均値 e_m を (7) 式に定義し、この e_m と各メンバシップ関数の底辺の長さ $\Delta\eta_{\max}$ と $\eta_{\max}$ の関係を、定量的に図 10 のような三次元のグラフで示す。二乗誤差平均値 e_m は、 $P_m'(s)$ と $P(s)$ に正弦波の加速度指令 $\dot{\omega}^{\text{cmd}}$ を与えて、その 1 周期を 100 分割したときのそれぞれのデータから算出している。図 10 の定量的データは、図 7 の実験システムに 0.5 Hz の正弦波の加速度指令値 $\dot{\omega}^{\text{cmd}}$ を与えたときのものである。また図 10 の☆の箇所は、先に設計者が試行錯誤的に求めたファジィフィルタを示している。

$$e_m = \frac{1}{k} \times \sum_{i=1}^k \{ \theta_m' - \theta \}^2 \dots \dots \dots (7)$$

ただし、 $k=100$ (データ数)

図 10 の結果より、二乗誤差平均値 e_m は設計者の調整した☆の箇所に向かって単調減少になっていることがわかる。そこで本論文では、二乗誤差平均値 e_m が最小となるようなファジィフィルタを探索するアルゴリズムを形成することにする。図 10 の三次元グラフは、制御対象のアクチュエータによって変動することが予想されるが、DD モータやサーボモータの場合にはほとんど図 10 のような単調減少の傾向を示すことがシミュレーションによって得られている。

図 10 のような数式で記述できない単調減少の探索問題を解く方法には、シンプレックス法が一般的である⁽⁸⁾。シンプレックス法はシンプレックスという多角形を用いて、その頂点の高さから逐次高さの低い地点へシンプレックスを移動させていく方法である。本論文では、調整するパラメータが $\Delta\eta_{\max}$ と $\eta_{\max}$ の 2 変数であるため、シンプレックスに三角形を採用している。図 11 に自動調整アルゴリズムで採用している三角形の基本的な移動方法を示す。提案する自動調整ア

図 11 自動調整アルゴリズムにおけるシンプレックスの移動方法

Fig.11. Moving method of simplex in auto-tuning algorithm.

図 12 自動調整アルゴリズムの流れ図
Fig. 12. Flowchart of auto-tuning algorithm.

ルゴリズムは図 11 の移動方法を組合せて、三角形を図 12 の流れ図に従って、二乗誤差平均値 e_m の最も小さい領域へ移動させていく。そして、自動調整アルゴリズムが最終的に収束すると、 $\Delta\eta_{\max}$ と $\eta_{\max}$ は最終的に得られた三角形の頂点の重み付け平均値によって決定される。

加速度コントローラがこの自動調整アルゴリズムによって所望の周波数特性をもつためには、ファジィフィルタ $FU(s)$ を調整するときの加速度指令 $\dot{\omega}^{\text{cmd}}$ として、所望の周波数特性の正弦波の加速度指令値 $\dot{\omega}^{\text{cmd}}$ を与えればよいことになる。すなわち、加速度コントローラの周波数特性も、自動調整アルゴリズムを動作させるときの加速度指令値 $\dot{\omega}^{\text{cmd}}$ の周波数によって同時に一意的に決定されることになる。

提案する自動調整アルゴリズムの有効性を計算機シミュレーションによって確認する。シミュレーションでは、まず図 7 の実験システムのモデル追従加速度制御系のファジィフィルタ $FU(s)$ を、自動調整アルゴリズムによって調整する。このときの加速度指令値 $\dot{\omega}^{\text{cmd}}$ は、0.5 Hz の周波数の正弦波である。ファジィ

(a) 調整時のメンバシップ関数のパラメータの軌跡

(b) 調整時の自乗誤差平均値 e_m の軌跡

図 13 自動調整アルゴリズムのシミュレーション結果

Fig. 13. Tuning locus of auto-tuning algorithm in numerical simulation.

表 4 自動調整アルゴリズムで調整されたファジィフィルタ

Table 4. Parameters of auto-tuning fuzzy filter in simulation.

$\eta_{\max} = 1.9645 \times 10^{-2} \text{ rad/s}^2$ $\Delta\eta_{\max} = 4.1961 \times 10^{-2} \text{ rad/s}^2$			
$PB = 7.14 \text{ N} \cdot \text{m}$	$PM = 0.714 \text{ N} \cdot \text{m}$	$PS = 0.0714 \text{ N} \cdot \text{m}$	
$NB = -7.14 \text{ N} \cdot \text{m}$	$NM = -0.714 \text{ N} \cdot \text{m}$	$NS = -0.0714 \text{ N} \cdot \text{m}$	

フィルタ $FU(s)$ のパラメータ $\Delta\eta_{\max}$ と $\eta_{\max}$ の軌跡と自乗誤差平均値 e_m の軌跡を図 13 に示し、表 4 に最終的に調整されたファジィフィルタ $FU(s)$ のパラメータの値を示す。また、計算機シミュレーションは図 14 に示す。この結果より、提案する自動調整アルゴリズムが二乗誤差平均値 e_m を小さくする方向にパラメータを調整していることが確認できる。更に、表 4 と表 3 とを比較すると、ファジィフィルタ $FU(s)$ のパラメータがほとんど同じ値に収束しているの、図 8 と図 14 のシミュレーション結果も同じ応答になってことがわかる。よって、提案する自動調整アルゴリズムが、人間による試行錯誤的調整とほぼ同様の調整

図 14 加速度指令に対する応答のシミュレーション結果(オートチューニングファジィフィルタを用いた場合)

Fig.14. Numerical results of output response to sine curve acceleration command ω^{cmd} .

を行えることが確認される。

5. 実験結果

次に、図 15 に示される軌跡追従制御系の実験を行って、自動調整アルゴリズムによって調整された加速度コントローラの有効性を実際に確認する。軌跡追従制御系は(8)式の伝達関数で表現されるように、位置・速度・加速度の各々の指令値に対してマンピュレータが位相遅れを生じないように追従させる制御系である。実験システムのハードウェアシステムは図 16 に示す。オートチューニングファジィフィルタを用いたモデル追従加速度制御系、および軌跡追従制御系は DSP のアセンブリ言語で実現されている。そのサンプリング時間は $100\ \mu\text{s}$ である。また、自動調整アルゴリズムはマイクロプロセッサ(i80286)上の C 言語で実現されている。

図 17 に自動調整アルゴリズムによって調整されたときのファジィフィルタ $FU(s)$ のパラメータと二乗誤差平均値 e_m の軌跡を示す。最終的に自動調整アルゴリズムによって調整されたパラメータを表 5 に示

図 15 軌跡追従制御系の構成図
Fig.15. Continuous path tracking control system.

図 16 実験システムのハードウェア
Fig.16. Hardware of tested system.

(a) 調整時のメンバシップ関数のパラメータの軌跡

(b) 調整時の二乗誤差平均値 e_m の軌跡

図 17 自動調整アルゴリズムの実験結果
Fig.17. Tuning locus of auto-tuning algorithm in experiment.

表 5 自動調整アルゴリズムで調整された実験の
ファジィフィルタ

 Table 5. Parameters of auto-tuning fuzzy
filter in experiment.

$\eta_{\max} = 1.2737 \times 10^{-2} \text{ rad/s}^2$ $\Delta\eta_{\max} = 1.1640 \times 10^{-1} \text{ rad/s}^2$		
$PB = 7.14 \text{ N}\cdot\text{m}$	$PM = 0.714 \text{ N}\cdot\text{m}$	$PS = 0.0714 \text{ N}\cdot\text{m}$
$NB = -7.14 \text{ N}\cdot\text{m}$	$NM = -0.714 \text{ N}\cdot\text{m}$	$NS = -0.0714 \text{ N}\cdot\text{m}$

図 18 軌跡追従制御の実験結果

 Fig. 18. Experimental results of continuous
path tracking control.

す。実験結果より、シミュレーションと同様に、二乗誤差平均値 e_m が小さくなる方向にファジィフィルタのパラメータを調整していることがわかる。このときの加速度コントローラの低域フィルタ $F(s)$ の二次遅れ要素の固有振動数も $1,000 \text{ rad/s}$ である。

実験結果は図 18 に示す。実験は位置指令値 θ^{ref} として三角波状の信号を入力したときの 1 自由度マニピュレータの位置 θ を計測している。図 18 には、規範モデルに制御対象のノミナル値を用いた従来のモデル追従加速度制御系での結果と、人間が試行錯誤的に調整したファジィフィルタを用いたモデル追従加速度制御系の結果と、更に自動調整アルゴリズムによって調整されたファジィフィルタを用いたモデル追従加速度制御系の結果を示している。ただし、従来のモデル追従加速度制御系の低域フィルタ $F(s)$ の二次遅れ要素の固有振動数は 200 rad/s であり、これ以上帯域を広げることは無理だった。

実験結果より、どの加速度コントローラにおいても、制御対象の 1 自由度マニピュレータの出力 θ が指令値 θ^{ref} に完全に追従していることがわかる。これより、自動調整アルゴリズムが適切にファジィフィルタ $FU(s)$ のパラメータを調整していることがわかる。

また、制御対象のアクチュエータのノミナル値に 2~3 倍の変化が存在しても図 17 と図 18 の実験結果と同じようになった。これは、規範モデルに理想的な加速度コントローラを採用しているので最初から規範モデルと制御対象のモデル化誤差がかなり大きくなるため、実際に想定されるパラメータ変動に対してほとんど影響がないものと考えられる。

6. ま と め

本論文では、アクチュエータのパラメータのノミナル値をいっさい必要としないで、自動的に所望の周波数特性をもつ加速度コントローラを実現する手法を提案した。提案する加速度コントローラは、制御対象の構造やパラメータの情報をあらかじめ知っておく必要がない。また、加速度コントローラの周波数特性を決定する作業をすべてオートチューニングファジィフィルタに集約させているので、設計者は試行錯誤的作業や経験的知識を全く必要とせずに加速度コントローラを構成できることが、実験とシミュレーションによってわかった。

本論文が、マニピュレータもモーション制御においてご参考になれば幸いである。

(平成 4 年 4 月 13 日受付, 同 4 年 9 月 3 日再受付)

文 献

- (1) 駒田・村上・大西：「加速度に基づく多自由度ロボットの力フィードバック制御」, 電学論 D, **109**, 325(平元-5)
- (2) 松田・大石：「位置情報だけを用いた DSP による加速度制御系」, 同上 D, **110**, 101(平2-2)
- (3) 大石・松田：「DD アクチュエータの力とコンプライアンスのロバスト制御」, 同上 D, **110**, 1133(平2-11)
- (4) C. H. An, C. G. Atkeson & J. M. Hollerbach: Model-Based Control of a Robot Manipulator (1988) The MIT Press
- (5) J. J. Craig: Introduction to Robotics Mechanics & Control (1986) ADDISON WESLEY
- (6) 土川・片岡・大石・荻野：「オートチューニングファジィ加速度コントローラの構成法」, 電気学会産業計測制御研究, IIC-91-13, p. 1(平3)
- (7) K. Ohishi, H. Tsuchikawa & H. Kataoka: "Motion Control Based on Auto-tuning Fuzzy Acceleration Controller", Proc. of IEEE/IES AMC '92, p. 369
- (8) 志水：システム最適化理論(昭51)コロナ社

大 石 潔 (正員)

昭和32年10月生。61年3月慶応義塾大学大学院工学研究科博士課程修了。同年4月大阪工業大学電気工学科講師。平成元年同大学助教授、現在に至る。工

学博士。1986年IEEE/IECON '85 Outstanding Paper Award。主として、電動機制御、ロボット、ファジィ制御に関する研究に従事。IEEE、計測自動制御学会、システム制御情報学会、日本ロボット学会、日本ファジィ学会、日本機械学会会員。

土 川 浩 史 (正員)

昭和42年6月生。平成4年3月大阪工業大学大学院工学研究科修士課程修了。同年4月新日本製鐵入社。在学中は、主としてファジィ制御、ロボットに関する研究に従事。