仮想目標値を用いた縦型空気圧サーボ系の相互位置同期制御*

柴田 論^{*1}, 神代 充^{*1}
山本 智規^{*2}, 清水 顯^{*1}

Synchronized Control of Mutual Position for Vertical Type Pneumatic Servo Systems Using Virtual Reference

Satoru SHIBATA^{*3}, Mitsuru JINDAI,
Tomonori YAMAMOTO and Akira SHIMIZU^{*3} Department of Mechanical Engineering, Ehime University,
3 Bunkyo-cho, Matsuyama-shi, Ehime; 790-8577 Japan

Synchronized control of mutual position for two vertical type pneumatic servo systems is discussed from the viewpoint of practical use in this study. In the proposed control system, fuzzy controller is used in each pneumatic servo system to follow the reference input. An adjustment controller is constructed in synthesizing the input to a fuzzy virtual reference generator to consider the difference in characteristics of the both axes. A PD controller is introduced to realize the synchronization of both pneumatic servo systems, in which the outputs are the inputs of revision to both plants. The fuzzy virtual reference generator that can adjust the reference input to both fuzzy controllers adaptively by fuzzy rules is constructed to improve the control performances of both axes. The applicability of the proposed method is confirmed by experiments using existent vertical type pneumatic servo systems.

Key Words: Pneumatic Servo System, Synchronized Control, Virtual Reference, Fuzzy Control, Adjustment Controller, Synchronized Controller, Practical Use

1. はじめに

近年, 空気圧機器は, 設置コストが安価で経済的効果が高く, 他の駆動方式に比べ高速駆動が可能である等の優れた特徴がある。そのため工作機械や搬送ラインなどの自動化機器の駆動部として利用されている。

しかし, 空気圧システムは空気の圧縮性による低剛性や圧力の応答遅れ, ピストン, シリンダ間のしゅう動摩擦, 空気の温度変化によるプラントの特性変動などの, 制御性能に悪影響を与える非線形性を有する系である。これらの影響が無視できるほど小さい場合や, プラントの特性変動とみなすことが可能な場合には, 最適制御⁽¹⁾, 適応制御⁽²⁾, ゲインスケジューリング制御⁽³⁾等が有効である。これらの非線形性が無視できない場合, ポジカスト制御手法⁽⁴⁾, 適応制御とニューラルネットを併用する手法⁽⁵⁾やニューロ制御⁽⁶⁾, ファジィ・ニューラルネット制御⁽⁷⁾などの非線形性に対応可能な制御手法の空気圧サーボ系への応用が提案され, 望ましい制御性能が得られている。また, 基準

ステップ入力に対しては, 空気圧サーボ系の応答は安定性と立ち上がり時間の間で妥協点を見いださなければならなかったという問題に対し, 安定性を確保しつつ望ましい立ち上がり時間を短縮することが可能な, 仮想目標値に基づく方法が提案され, 実験的にその有用性が示されている⁽⁸⁾。

一方, 製造ラインなどの生産現場では, 製品の生産速度や品質の向上のため, 自動化機器に求められる作業も多様化, 複雑化してきている。例えば, 複数のアクチュエータが相互同期し共同作業を行う必要性も高まりつつある。この問題は, 電気式サーボモータを主としたメカトロサーボ系で議論されており, 各軸間の出力差にゲインを乗じてそれぞれにフィードバックする(同期固定ゲインコントローラ)ことにより相互位置同期が達成されている⁽⁹⁾⁻⁽¹¹⁾。しかしながら, 空気圧サーボ系の相互同期を考えた場合, 非線形性のために各軸の特性が異なることが一般的であり, これらの特性差を考慮して, 相互位置同期および目標値追従という二つの目的を満足しなければならない。このような制御手法は, 空気圧サーボ系ではこれまでにほとんど報告されていない。

これらのことを考慮して, 本報告では, 二つの縦型空気圧シリンダの相互位置同期制御について, 相互位

* 原稿受付 2002年3月13日。

^{*1} 正員, 愛媛大学工学部(〒790-8577 松山市文京町3)。^{*2} 学生員, 愛媛大学大学院。

E-mail: eusibata@enl.ehime-u.ac.jp

置同期および目標値追従という二つの目的を同時に満足する手法について検討する。提案した制御手法では、まず、各軸の目標値追従にファジィコントローラをそれぞれ構成する。そして、両軸間の高精度な同期を実現するために、同期ファジィコントローラを提案する。さらに、相互位置同期状態を維持した上で、望ましい目標値追従特性を実現するために、目標値と、両軸の特性差を補う働きを有する調整コントローラからの出力である両軸の代表値との誤差および誤差速度を入力とし、目標値に対する補正量を出力とする仮想目標値生成器を導入している。

提案した手法の有効性を検討するために、実機実験を行い、過渡状態や定常状態における制御性能について実験的に検討した。

2. 縦型空気圧サーボ系の構成

図1に実験装置の空気圧駆動系を示す。空気圧シリンダは、複動型片ロッド空気圧シリンダを用い、内径50 mm、ロッド径22 mm、およびストローク500 mmである。シリンダはロッドを上向きにして鉛直に設置しており、ロッド先端には荷台が取付けられ、負荷質量を自由にすることができる。シリンダ内の圧力制御は、上室側と下室側の2個の3ポート電磁弁を(SMC製XT 323-4)をパルス幅変調方式(PWM方式)で互いに逆位相で駆動することにより行われる。シリンダ上室(ロッド側)とシリンダ下室(ヘッド側)とでピストンの受圧面積、容積が異なることによるシリンダ両室の特性(充てん時定数、圧力流量特性等)の違いを少なくするために、電磁弁の吸排気口には固定絞

りを取付けてある。それは、シリンダ上室とシリンダ下室に同じ圧力を加えた状態で、静止位置を維持するという指針で設定した。ここでは、シリンダ下室(ヘッド側)の電磁弁には、吸排気口ともに径2.5 mm、上室(ロッド側)の電磁弁には、吸排気口ともに径2.0 mmの絞りを取付けている。

ピストン位置の検出には、同軸型直線マグネスケールを用いた。マグネスケールは、線形の特長永久強磁性合金の表面に正確に0.2 mmピッチの磁性目盛りを記録してあり、この磁性目盛りをMGH(Multi Gap Head)で読みとることにより高精度の位置情報を得ることができる。マグネスケールからの信号は、マグネスケールディテクタで移動量に対応したパルス信号に変換される。その後、その信号は16 bitsカウンタ回路でカウントされ、インタフェース回路を通して計算機に取込まれる。計算機上での位置検出の最小分解能は5 μ mである。計算機からのアクチュエータ操作信号は、インタフェース回路を通り、12 bits D/A変換器でアナログ信号に変換され、電磁弁駆動用のパワーアンプに導かれる。また、シリンダのロッド側およびヘッド側の圧力を観測できるように、半導体小型圧力変換器がシリンダに取付けられている。これらからの信号は、圧力変換器用アンプ、12 bits A/D変換器、インタフェース回路を順に通じ計算機に取込まれる。計算機には、32 bitsパーソナルコンピュータ(クロック周波数800 MHz)を用いた。

3. 制御系の構成

図2に、本研究で提案した制御系のブロック線図を示す。提案した制御系において、仮想目標値生成器では仮想目標値の決定、ファジィコントローラA、Bでは、それぞれのプラント操作を行う。また、プラントAとプラントBの同期をとるために、両軸間の誤差および誤差速度を入力とし、それぞれのプラント入力に対する補正量を算出する同期コントローラを設ける。さらに、相互位置同期状態を維持した上で、望ましい目標値追従特性を実現するために、目標値と、調整コントローラからの出力である両軸の代表値との誤差および誤差速度を入力とし、目標値に対する補正量を出力とする仮想目標値生成器を導入する。

3.1 ファジィコントローラA、Bの構成 ファジィコントローラA、Bは前件部変数として誤差 e_1 、 e_2 と誤差の変化分 Δe_1 、 Δe_2 をとり、後件部変数には操作量の変化分 Δu_1 、 Δu_2 をもつ2入力1出力のファジィPIコントローラである。前件部メンバシップ関数 $A1_{ij}$ 、 $A2_{ij}$ は七つにファジィ分割され、頂点を $a1_{ij}$ 、

Fig. 1 Schematic diagram of vertical type pneumatic servo systems

Fig. 2 Block diagram of the proposed scheme

$a2_{ij}$ 幅を $(a1_{i+1j} - a1_{i-1j})$, $(a2_{i+1j} - a2_{i-1j})$ とする三角形にすることで,

$$A1_{ij}(x1_j) = \begin{cases} \frac{x1_j - a1_{i-1j}}{a1_{ij} - a1_{i-1j}} : a1_{i-1j} \leq x1_j \leq a1_{ij} \\ \frac{a1_{i+1j} - x1_j}{a1_{i+1j} - a1_{ij}} : a1_{ij} \leq x1_j \leq a1_{i+1j} \\ 0 : x1_j \leq a1_{i-1j}, x1_j \geq a1_{i+1j} \end{cases}$$

$$A2_{ij}(x2_j) = \begin{cases} \frac{x2_j - a2_{i-1j}}{a2_{ij} - a2_{i-1j}} : a2_{i-1j} \leq x2_j \leq a2_{ij} \\ \frac{a2_{i+1j} - x2_j}{a2_{i+1j} - a2_{ij}} : a2_{ij} \leq x2_j \leq a2_{i+1j} \\ 0 : x2_j \leq a2_{i-1j}, x2_j \geq a2_{i+1j} \end{cases}$$

..... (1)

と表される。ただし、 $i=0 \sim 6, j=1, 2$ であり、 $x1_1 = e_1, x1_2 = \Delta e_1, x2_1 = e_2, x2_2 = \Delta e_2$ とした。

ここで、 $x1_1, x1_2, x2_1, x2_2$ が与えられたとき、次のような過程を経て推論結果の出力 $\Delta u_1, \Delta u_2$ を求めた。

1) 各規則の適合度 μ_{1n}, μ_{2n} を計算する (min-max 法)。

$$\mu_{1n} = A1_{i1}(x1_1) \wedge A1_{i2}(x1_2) \quad \mu_{2n} = A2_{i1}(x2_1) \wedge A2_{i2}(x2_2) \quad \text{..... (2)}$$

ここで、メンバーシップ関数は二等辺三角形型を採用しているので、四つのルールが選択される。すなわち、 $n=1 \sim 4$ である。

2) ファジィコントローラ A, B それぞれにおいて、各ファジィ規則で定められた 49 個の操作量変化の中で選択された $W1_n, W2_n$ を適合度 μ_{1n}, μ_{2n} でそれぞれ加重平均し、 $\Delta U_1, \Delta U_2$ を得る (高さ法)。

$$\Delta U_1 = \frac{\sum_{n=1}^4 \mu_{1n} \cdot W1_n}{\sum_{n=1}^4 \mu_{1n}} = \frac{\sum_{n=1}^4 \mu_{1n} \cdot W1_n}{\sum_{n=1}^4 \mu_{1n}}$$

$$\Delta U_2 = \frac{\sum_{n=1}^4 \mu_{2n} \cdot W2_n}{\sum_{n=1}^4 \mu_{2n}} = \frac{\sum_{n=1}^4 \mu_{2n} \cdot W2_n}{\sum_{n=1}^4 \mu_{2n}} \quad \text{..... (3)}$$

3) 操作量の変化分 $\Delta u_1, \Delta u_2$ は推論結果の出力

$\Delta U_1, \Delta U_2$ にスケーリングファクタ $S3_1, S3_2$ をそれぞれ施すことによって得る。

$$\Delta u_1 = S3_1 \cdot \Delta U_1 \quad \Delta u_2 = S3_2 \cdot \Delta U_2 \quad \text{..... (4)}$$

後件部実数値は、本実験を行う前の予備実験において、それぞれのプラントに対し以下の最急降下法に基づくオートチューニング法を用いて、矩形波基準入力に対し決定しておく。

$$W1(k+1) = W1(k) + \frac{A1\mu_1(\alpha_1 e_1 + \beta_1 \Delta e_1)}{\alpha_1 + \beta_1}$$

$$W2(k+1) = W2(k) + \frac{A2\mu_2(\alpha_2 e_2 + \beta_2 \Delta e_2)}{\alpha_2 + \beta_2} \quad \text{..... (5)}$$

ただし、 μ_1, μ_2 は k 時点での適合度、 $W1(k), W2(k)$ は k 時点での後件部の値、 $W1(k+1), W2(k+1)$ は修正後の値、 α_1, β_1 と α_2, β_2 は誤差および誤差の変化量の重み値、 $A1, A2$ は学習係数とする。

図 3 にファジィコントローラ A, B の、前件部メンバーシップ関数の頂点を示す。また、表 1, 2 に、式 (5) のオートチューニングによって得られた後件部実数値をファジィコントローラ A, B についてそれぞれ示す。ただし、プラント A, B への目標入力として、シリンダ中央部を挟んで振幅が ± 100 mm, 周期 20 秒の矩形波を用いた。

3.2 相互位置同期コントローラの構成 ここでは、本研究で提案する相互位置同期コントローラについて説明する。ファジィコントローラ A, B が個々に学習を行ったのでは、目標入力にそれぞれ追従することは実現できても同期状態を維持することは困難である。特に、どちらか一方のシリンダに付加外力が加わった場合などは、空気圧系特有のコンプライアンス特性のために応答は一時的に大きく目標値からは逸脱し、相互位置同期は崩れてしまう。そこでそのような

Table 1 Incremental weighting factors of fuzzy rules in fuzzy controller A

		Δe_1						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
e_1	NB	25	-6	-6.3	-7.2	-3.8	-0.2	-1.9
	NM	-6	-6	-6	-4	-1	-0.7	2
	NS	-6	-6	-4	-2	0.2	4.4	4
	ZO	-6	-4.5	-3.9	0	4.1	4.4	6
	PS	-4	-4.5	-0.1	1.9	4	6	6
	PM	-2	-0.8	1	4	6	6	6
	PB	1.9	0.4	3.8	6.6	6	6	25.1

Table 2 Incremental weighting factors of fuzzy rules in fuzzy controller B

		Δe_2						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
e_2	NB	-25.1	-6	-6	-7	-3.2	-1.6	-2
	NM	-6	-6	-6	-4	0.1	0.9	2
	NS	-6	-6	-4.1	-2	1.1	3.3	4
	ZO	-6	-4.1	-4.7	0	4.7	4.3	6
	PS	-4	-2.6	-1.6	2	4.1	6	6
	PM	-2	1.4	-0.4	4	6	6	6
	PB	2	1.7	3.2	7.5	6.2	6	25.2

Fig. 3 Membership function for the antecedent clause of fuzzy controller A, B

場合でも、両軸の相互位置同期を実現するために以下の同期コントローラを付加する。

コントローラとしては、両軸間の同期における過渡的挙動の改善を図るため、PD コントローラを用いる。このコントローラで算出された値は両軸に異符号で出力され、それぞれの出力値を補ってプラントに出力される。しかし、両軸間に特性差がある場合、ただ異符号にして出力するだけでは良好な同期を取ることができない。よってそれぞれの出力値にゲインを乗ずることによって特性差を補う。

$$u_{3i}(k+1) = \left[K_{pe4}(k) + K_D \frac{\{e_i(k) - e_i(k-1)\}}{T} \right] \cdot \xi_i \quad \dots\dots\dots (6)$$

$u_{3i}(k)$: 操作量

$e_i(k)$: 合成誤差

K_P : 比例ゲイン

K_D : 微分ゲイン

T : サンプルングタイム

ξ_i : 特性差解消ゲイン ($i=1$: プラント A 側)
($i=2$: プラント B 側)

これらのコントローラの効果により、両軸の空気圧サーボ系における応答の定常状態のみならず、過渡状態でも同期を維持することが可能となることを目的とする。

3.3 仮想目標値生成器 仮想目標値 $V_r(k)$ は、基準入力 $r(k)$ に Δr を加えることによって、次式のように合成される。

$$V_r(k) = r(k) + \Delta r \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここで、 Δr は、基準入力 $r(k)$ と後述する調整コントローラの出力 $y_3(k)$ との誤差 e_3 とその変化分 Δe_3 を用いて、オートチューニングファジィ推論法に基づく仮想目標値生成器により、以下のように生成されるものとする。

前件部変数には、 e_3 および Δe_3 を用いた。また、メンバシップ関数には二等辺三角形のものをを用いた。

ここで、 e_3 と Δe_3 が与えられたとき、次のような過程を経て推論結果の出力を求めた。

(1) 各規則の適合度 μ_m を計算する (min-max 法)。

$$\mu_m = \mu(e_3) \wedge \mu(\Delta e_3) \quad \dots\dots\dots (8)$$

ただし、 $\mu(*)$ は $*$ のメンバシップ関数における所属度を表す。ここで、メンバシップ関数は二等辺三角形型を採用しているので、四つのルールが選択される。すなわち、 $m=1 \sim 4$ である。

(2) 各ファジィ規則で定められた 49 個の仮想目標値変化の中で選択された W_m を適合度 μ_m で加重平均し、 ΔR を得る (高さ法)。

$$\Delta R = \frac{\sum_{m=1}^4 \mu_m \cdot W_m}{\sum_{m=1}^4 \mu_m} \quad \dots\dots\dots (9)$$

(3) 仮想目標値の変化分 Δr は推論結果の出力 ΔR にスケーリングファクタ S_6 を施すことによって得る。

$$\Delta r = S_6 \cdot \Delta R \quad \dots\dots\dots (10)$$

3.4 調整コントローラ 本研究では、両軸を同等に扱うイコールステイタス方式とし相互に同期状態を維持したままでの目標値への追従性の改善を目指す。その一手法として式 (11) に示す調整コントローラを仮想目標値生成器に付加する。両軸の位置情報をフィードバックし、合成させることにより両軸ともに目標値への追従性向上をはかるものである。

$$y_3(k) = \frac{p \cdot y_1(k) + q \cdot y_2(k)}{p + q} \quad \dots\dots\dots (11)$$

ここで、式(11)における p および q は 1 軸側および 2 軸側の制御性能を知った上で、性能を考慮した値にすることにより、より良好な目標値への追従性を得るための重みである。

4. 実験

4.1 実験条件 本構成法の有用性を確認するために、二つの実在の縦型空気圧サーボ系による実験を行った。実験条件は以下のようなものである。

目標入力として、シリンダ中央部を挟んで振幅が ± 100 mm、周期 20 秒の矩形波を用いた。A 軸と B 軸の特性差がより顕著になる条件として、B 軸側のみ 88 kg の質量を加えてある。電磁弁に供給する一次側供給圧力は、ゲージ圧で 0.4 MPa とし、サンプリングタイムは 20 ms とする。ピストン位置はストローク中央を原点とし、上向きを正としている。また搬送波周波数は 37 Hz とした。

スケーリングファクタ S_{31} , S_{32} はともに 52.0 とした。また、同期コントローラのパラメータは次のように設定した。

$$K_P=0.1 \quad K_D=0.5 \quad \xi_1=1.4 \quad \xi_2=2.0$$

仮想目標値生成器における、前件部メンバシップ関数を図 4 に示し、表 3 に後件部実数値の初期値を示す。また、仮想目標値生成器のパラメータは次のように設定した。

$$\alpha_3=0.01 \quad \beta_3=0.14 \quad \gamma=0.001 \quad S_6=5.0$$

4.2 実験結果 まず、仮想目標値生成器の有効性について実験的に検討した。図 5 に仮想目標値生成器を付加せず、同期コントローラのみの場合の初期応答を示し、図 6 に仮想目標値生成器を付加した場合の初期応答を示す。両図を比較してわかるように、仮想目標値を付加することにより立ち上がりが改善されていることがわかる。

ここで図 7(a), (b) に 30 周期分の立ち上がり時間のヒストグラムをそれぞれ示す。仮想目標値生成器を付加しない場合には立ち上がりに 0.5 秒から 0.8 秒かかるのに対し、今回の構成法を用いた場合では 0.3 秒付近であり、速応性という観点から目標値への追従性が改善されていることがわかる。

次に、調整コントローラのパラメータ p および q の応答における影響を検討した。そのときの実験結果を図 8 に示す。ただし、図 8(a) では $p:q=1:4$ であり、(b) では $p:q=1:1$ 、(c) では $p:q=4:1$ としたときの定常応答を示している。図 8 を見てわかるように、 $p:q=1:4$ のときの波形が目標値への追従性の面から見て最も良好であるのがわかる。本報告で用

Table 3 The consequent clause of virtual reference generator

		Δe_3						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
e_3	NB	0	-0.1	-0.1	-216	-134	-130	-5000
	NM	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-11
	NS	-0.3	-0.3	-0.3	-2	-0.7	-0.2	-5
	ZO	0.1	0.1	1	0	-0.6	0.1	0.1
	PS	5	0.2	1	3	0.5	0.4	0.4
	PM	11	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
	PB	5000	137	142	227	0.1	0.1	0

Fig. 4 Membership function for the antecedent clause of virtual reference generator

Fig. 5 Steady-state response of the conventional design scheme

Fig. 6 Steady-state response of the proposed design scheme

Fig. 7 Comparison of the rise time

 Fig. 8 Transient response when the parameter p and q in adjustment controller are changed

Fig. 9 Steady-state response when external loads are added

いた空気圧サーボ系は、同期コントローラの働きでその特性差による影響を軽減することができるものの、1軸に比べて2軸は立ち上がり性能が劣っている。実験結果からもわかるように、立ち上がり性能が劣っているシリンダに対するパラメータ q を、優れているシリンダに対するパラメータ p より大きくとることにより、両軸の目標値への追従特性を改善することが可能である。このように、調整コントローラにおいて p 、 q を調節することにより、応答の過渡特性を変化させることが可能であり、両軸の特性差を考慮した望ましい値を指定することにより良好な仮想目標値を生成できることがわかる。

次に、定常状態において、1軸側、あるいは2軸側に外力を加えたとき、同期状態がどのように変化するかについての実験を行った。そのときの結果を図9に示す。ただし、矢印の時刻に1軸側あるいは2軸側にのみ500 Nの一時外力を加えた。また、図9(a)は提案した手法において同期コントローラがない場合、図9(b)は提案した手法の結果をそれぞれ示す。図9(a)を見てわかるように、同期コントローラがない場合は、外乱が加わった後しばらくの間、同期状態が

崩れている。これに対し、提案した手法図9(b)は、外力に起因する1軸側あるいは2軸側の応答の変化に、2軸側あるいは1軸側の応答が良好に同期し、さらに速やかに目標値へと追従していることがわかる。このように、提案した手法では同期コントローラが有効に働き、相互位置同期が良好に行われている。

図10, 11は1軸, 2軸における30回繰返し位置決め動作を行ったときの位置決め精度のヒストグラムを示す。測定位置は目標値の符号が変化してから9秒後の位置とした。各図において、左側は目標値がマイナス、右側は目標値がプラスのときのグラフである。図を見てわかるように、1軸, 2軸のあいだには、位置決め精度の大きな違いは見られず、その値は0.6mm未満に収まっており、良好な制御性能を確認した。

5. 結 言

本報告では、二つの縦型空気圧シリンダの相互位置同期制御について検討した。提案した制御手法では、まず、各軸の目標値追従にファジィコントローラをそれぞれ構成する。そして、両軸間の高精度な同期を実現するために、同期ファジィコントローラを提案した。さらに、相互位置同期状態を維持した上で、望ましい目標値追従特性を実現するために、目標値と、調整コントローラからの出力である両軸の代表値との誤差および誤差速度を入力とし、目標値に対する補正量

を出力とする仮想目標値生成器を導入した。

提案した手法の有効性を検討するために、実機実験を行い、過渡状態や定常状態における制御性能について実験的に検討した。その結果、以下のことが明らかになった。

- ・仮想目標値生成器を導入することにより、導入しない場合と比較して両軸ともに立ち上がり時間が短縮され、速応性が改善された。

- ・調整コントローラのパラメータを調整することにより、両軸の特性差を考慮した望ましい仮想目標値を生成でき、両軸ともに良好な目標値追従特性が実現できた。

- ・同期化ファジィコントローラの働きにより、1軸あるいは2軸のみに外力を加えても、両軸は良好な同期状態を維持することがわかった。

以上のことから、提案した制御手法は、目標値への追従特性を劣化することなく、望ましい相互位置同期特性を実現することが実験的に確認され、有効な手法であることが明らかになった。

ただし本報告では、過渡状態において2軸間の特性差に起因する応答の誤差は、同期コントローラの働きでかなり小さい値となっているものの、まだ改善の余地がある。両軸の特性差が応答に与える影響をさらに軽減し、より高い同期特性を実現する制御手法を考案することを今後の課題としたい。

また、本手法を、実際の工業製品を想定して、その制御性能を評価することは、実用性を確認するという意味で重要なアプローチであるので、今後取り組んでいきたい。

文 献

- (1) 則次俊郎・和田力・伴野順一, 電空制御弁の動作遅れを考慮した空気圧サーボ系の最適制御, 計測自動制御学会論文集, 24-5 (1988), 491-497.
- (2) 則次俊郎・和田力・矢野坂雅巳, 空気圧サーボ系の適応制御, 計測自動制御学会論文集, 24-11 (1988), 1187-1194.
- (3) 塚本典之・川上幸男・中野和夫, 空気圧サーボ系へのゲインスケジューリング制御の適用について, 日本フルードパワーシステム学会論文集, 33-1 (2002), 15-20.
- (4) 則次俊郎・和田力・小原浩志, 空気圧サーボ系の学習ボジカスト制御, 計測自動制御学会論文集, 28-5 (1992), 587-594.
- (5) 田中幹也・柴田諭・神代充・清水顕, 空気圧サーボ系のニューラルネットワークを併用した適応極配置制御, 機論, 66-643, C(2000), 843-849.
- (6) 柴田諭・田中幹也・藤原重治・清水顕, 空気圧サーボ系の σ 修正法を用いたニューロコントロール, 機論, 66-642, C(2000), 509-513.
- (7) 柴田諭・豊原耕平・山本智規・清水顕, ファジィ・ニューラルネットワークを用いた重力負荷を受ける空気圧サーボ系の制御, 機論, 65-632, C(1999), 172-178.
- (8) 柴田諭・清水顕, 仮想目標値を用いた縦型空気圧サーボ

Fig. 10 Positioning accuracy of the proposed design scheme on cylinder 1

Fig. 11 Positioning accuracy of the proposed design scheme on cylinder 2

- 系のファジィ制御, 機論, 66-651, C(2000), 3640-3646.
- (9) 中村政俊・前田貴信・後藤聡・久良修郭, メカトロサーボ系の複数軸相互間の位置同期制御法とその特性解析, 第12回日本ロボット学会学術講演会予稿集, No. 3 (1994-11), 961-962.
 - (10) 中村政俊・前田貴信・久良修郭, 誤差フィードバック位置同期を図ったメカトロサーボ系の輪郭制御法, 日本ロボット学会誌, 15-5 (1997), 544-551.
 - (11) 中村政俊・前田貴信・久良修郭, 産業用多関節ロボットアームの相互位置同期制御を図った高精度輪郭制御法, 日本ロボット学会誌, 15-5 (1997), 736-743.
 - (12) 鎌野琢也・福見淳二・鈴木茂行・原田寛信・片岡雄, 自己調整ファジィコントローラを用いた高速二軸位置同期システム, ファジィ学会論文誌, 8-1 (1996), 47-56.