適応機能を導入した2自由度サーボ系に基づく 超音波モータの位置制御

正員 長縄 明大* 非会員 三宅 拓郎**
正員 田中 幹也*** 正員 岡 正人****

Position Control of Ultrasonic Motors Based on Two-degree-of-freedom Servo Systems with Adaptive Technique

Akihiro Naganawa*, Member, Takuo Miyake**, Non-member,
Kanya Tanaka***, Member, Masato Oka****, Member

Ultrasonic motors (USM) which has many useful features such as small, light and high torque at low speed are expected to find many applications in several fields. However it is difficult to control precisely since the USM contains nonlinear properties caused by driving frictions, changes of temperature, fluctuation of load-mass and so on. To date, a large number of studies have been made on the compensation of the USM nonlinear properties using neural network, fuzzy control and other position control theories as well. However, studies aiming at holding the optimal tracking performance of the USM designed for nominal plant have not been reported yet. Accordingly, in this paper, we propose a position control method of the USM using a two-degree-of-freedom optimal servo system with an adaptive technique. The effectiveness of the proposed method is well demonstrated based on the results of our experimental study.

キーワード：超音波モータ，位置制御，2自由度サーボ系，適応機能，同定

Keywords: ultrasonic motor, position control, two-degree-of-freedom servo system, adaptive technique, identification

1. はじめに

超音波モータ (USM) は，小型軽量，低速高トルクであり，作動音が小さく，停止時の保持トルクも大きいなど，様々な特徴を有しているため，小型モーションコントロールのアクチュエータとしての応用が期待されている⁽¹⁾⁽²⁾。また，磁気作用を動作原理としていないことから，電磁ノ

イズを発生せず，その影響も受けないため，医療，福祉分野をはじめとして，従来の電磁モータが使用できない環境・分野での利用も期待されている。しかし，USMは，動作原理が摩擦駆動であり，その入出力特性は本質的に非線形性を有するうえ，摩擦熱などによる温度上昇や負荷の変化など，駆動条件によってもその動特性は大きく変動する。このため，特性変動に適応するため，ファジー⁽³⁾⁽⁴⁾やニューラルネットワーク⁽⁵⁾⁽⁶⁾を用いた制御手法に関する研究が多くなされている。しかし，USMの特性変動に伴い目標値応答特性も変動すると考えられるが，これまで評価関数を最小にする最適な目標値応答特性の保持を目的とした研究は行われていない。

そこで，本論文では，USMのモデルに対して設計した目標値応答特性を保持するために，2自由度最適サーボ系⁽⁷⁾⁽⁹⁾に適応機能を取り入れた位置制御手法について検討を行う。本手法の特徴は，USMの特性変動に対して，評価関数を最小にする最適な目標値応答特性の保持が実現でき，さらに，導入する適応機能は，外乱除去にも効果的であることである。本論文で提案する制御系設計は，USMのモデルに対して2自由度サーボ系を構成し，このサーボ系に適応機能を取り入れることにより行われるが，USMの特性変

* 秋田大学工学資源学部

〒010-8502 秋田市手形学園町 1-1

Faculty of Engineering and Resource Science, Akita University

1-1, Tegata-gakuen-machi, Akita 010-8502

** 日本電産株式会社

〒601-8205 京都市南区久世殿城町 338

Nidec Corporation

338, Tonoshiro-cho, Kuze, Minami-ku, Kyoto 601-8205

*** 山口大学工学部

〒755-8511 宇部市常盤台 2-16-1

Faculty of Engineering, Yamaguchi University

2-16-1, Tokiwadai, Ube 755-8511

**** 宇部工業高等専門学校

〒755-8555 宇部市常盤台 2-14-1

Ube National College of Technology

2-14-1, Tokiwadai, Ube 755-8555

動が USM 全体で起こるのではなく、USM の一部で生じることに着目し、部分的な同定を行いながら適応機能を取り入れるものである。なお、これまで 2 自由度最適サーボ系に適応機能を導入した研究として、文献(10)があるが、この文献では、制御対象全体の同定を行ない、その結果を用いてゲイン調整を行なう。しかし、本論文では、制御対象である USM の変動部分のみを同定した適応化であり、文献(10)とは異なる手法である。

本論文の構成は、以下のとおりである。2 章では、実験装置の構成と USM のモデル表現について、3 章では、制御系の構成として、目標値応答の保持を目的とした適応機能の導入法について述べる。4 章では、本手法の有効性を確認する実験結果について、5 章では、結論を述べる。

2. 実験装置の構成とモデル化

〈2・1〉 実験装置 図 1 に USM の実験装置の構成図を、表 1 に実験装置の諸元を示す。図 1 において、USM、エンコーダ、および負荷は同軸上にカップリングを介して接続されている。エンコーダからの情報は、パーソナルコンピュータに内蔵されたカウンタボードに位置情報として入力される。PC 内で計算された出力信号の情報は、DO (Digital Output) ボードを経由して駆動回路に伝えられ、USM を回転させる。なお駆動方式は、ヒステリシス現象が少なく、入力と出力が比較的線形の関係である位相差制御方式を用いた。位相差制御回路は、シフトレジスタを用いたデジタル回路で構成されており、位相差は、 $-\pi/2 \sim \pi/2$ rad の間を 128 分割して、0.0245 rad 刻みで調節できる。また、駆動周波数は、共振周波数より 0.5 kHz ほど高い 35.5 kHz で行った。印加電圧は 30 V を加え、昇圧回路で昇圧して USM に与えた。

〈2・2〉 速度特性 図 2 に印加電圧位相差に対する USM

図 1 実験装置

Fig. 1. The schematic of experimental system.

表 1 実験装置の諸元

Table 1. Performance of experimental system.

USM	No-load rotational speed	15.708 rad/s
	Strating torque	0.39 Nm
	Self-holding torque	0.39 Nm
Drive circuit	Driving frequency	35.5 kHz
	Phase difference	$-\pi/2 \sim \pi/2$ rad
	Minimum phase difference	0.0245 rad
Encoder	Resolution	6.28×10^{-5} rad
Load	min~max	0~0.25 Nm

の回転速度特性を示す。図中の No-load 0s は無負荷時におけるモータ駆動直後のデータ、No-load 600s は無負荷時における 600 秒駆動後のデータ、Load は負荷 0.125 Nm を加えた場合のデータを表す。図より、負荷がない場合には、印加電圧位相差を変化することにより、USM が連続的に正回転、停止、逆回転できることがわかる。また、時間が経過するにつれ、高速回転域での回転速度が低下することから、モータの特性が時間的に変化していることがわかる。これは圧電素子の特性が温度により変化するためであると考えられる。一方、負荷を加えた場合には、高速回転域での回転速度が低下するとともに、位相差ゼロ付近で不感帯が生じることがわかる。

以上のように、駆動時間による特性変動(摩擦熱変動)や負荷による不感帯の存在により、USM の速度特性には大きな変動が生じるといえ、制御の際にはこれらが影響し、問題になると考えられる。

〈2・3〉 USM のモデル表現 本論文では、USM の位置制御について考える。USM のモデルは、位相差制御入力を $u(t)$ 、回転角度を出力 $y(t) = \theta(t)$ とすると、図 3 のブロック線図のように表すことができる。本論文では、伝達特性 $G(s)$ を 1 次遅れ要素として表し、ゼロ次ホールドを前置して離散化した $G(z)$ を

$$G(z) = \frac{bz^{-1}}{1+az^{-1}} \dots \dots \dots (1)$$

で表す。速度 $\dot{\theta}(t)$ は、エンコーダからの角度情報に基づき、後退差分により求めると、USM の積分器は、

図 2 位相差入力に対する回転速度特性

Fig. 2. Characteristic of Revolving speed for phase difference.

図 3 超音波モータのモデル

Fig. 3. Block diagram of USM model.

$$\frac{1}{s} \approx \frac{T}{1-z^{-1}} \quad (2)$$

により近似することができる。状態量を

$$x(k) = \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta(k) \\ \dot{\theta}(k) \end{bmatrix} \quad (3)$$

とすると、離散時間における状態空間表現として、

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) \quad (4)$$

$$y(k) = Cx(k) \quad (5)$$

が得られる。ここで、 T をサンプリング周期とすると、 $t = kT$ であり、

$$A = \begin{bmatrix} 1 & -Ta \\ 0 & -a \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} Tb \\ b \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

である。

3. 制御系の構成

〈3・1〉 2自由度サーボ系の設計 本論文では、(4)、(5) 式のモデルに対して、評価関数を最小にする最適な目標値応答特性を実現する 2 自由度最適 1 型サーボ系を設計する⁽⁷⁾⁽⁸⁾。その制御系は、状態フィードバックにより構成すると、図 4 のように表される。図中の $F = [f_1 \ f_2]$ は最適レギュレータゲインを表す。また、 H 、 E 、 J はつぎのように表されるゲインであり、(9) 式中の ξ は、フィードバック特性を調整することができるパラメータである。

$$H = [C(I - A + BF)^{-1}B]^{-1} \quad (7)$$

$$E = C(I - A + BF)^{-1} \quad (8)$$

$$J = (1 - \xi)H \quad (9)$$

この制御系の特徴は、制御対象に変動がなく、外乱も存在しない場合には、図中の $q(k)$ は 0 となり、目標値応答特性にコントローラの積分補償の効果は現れず、状態フィードバックとフィードフォワード項からの信号により、つぎに示すような評価関数を最小にする最適な目標値応答特性

図 4 状態フィードバックによる 2 自由度サーボ系

Fig. 4. Two-degree-of-freedom servo system via state feedback.

が得られる。

$$y(k) = C(zI - A + BF)^{-1}B H r(k) \quad (10)$$

一方、目標値応答特性とは独立に調整できるゲイン定数 J を有しており、この J を調整することにより、制御対象の変動や外乱の影響を効果的に抑制することができる。しかし、 J の調整によっては、観測雑音の影響が操作量に大きく現れる場合があるため、感度特性と観測雑音の影響のトレードオフを図る必要がある⁽⁹⁾。

〈3・2〉 適応機能の導入 前節で述べた 2 自由度最適サーボ系では、USM の位置制御に対して、モデルに対して設計した最適な目標値応答特性がある程度保持されると思われるが、USM は、図 2 に示すように駆動時間あるいは負荷により、その特性が大きく変動するため、応答特性の保持にも限界があると考えられる。そこで、本研究では、最適な目標値応答特性の保持を目的とした適応機能を制御系に取り入れることを考える。

図 3 より、USM の位置制御では特性変動が起こると、その変動は制御対象中の積分器 $1/s$ で起こるのではなく、伝達特性 $G(s)$ のみで起こり、(1) 式の係数 a 、 b が変動すると仮定できる。そこで、変動後の伝達特性を、 $G(z)$ の代わりに、

$$\bar{G}(z) = \frac{\bar{b}z^{-1}}{1 + \bar{a}z^{-1}} \quad (11)$$

として表すと、USM の変動は、係数 $\bar{a}$ 、 $\bar{b}$ で表現されることになる。このため、適応機能の導入では、USM 全体の同定を行わず、伝達特性 $G(s)$ の入出力信号を用いた部分的な同定を行い、同定した結果を用いてコントローラ中のゲインを調整すれば、計算量を少なくした適応化を図ることができる。

今、USM の特性が変化し、伝達特性 $G(s)$ の入出力信号を用いて、係数 $\bar{a}$ 、 $\bar{b}$ を同定したとする。このとき、変動後の USM の状態方程式の行列を $\bar{A}$ 、 $\bar{B}$ で表すと、以下の補題が成り立つ。

〔補題〕 USM の特性変動の前後において、変動前に設計した最適な目標値応答特性を保持するためには、目標値応答特性を決定する極配置を変動前後で一致させればよく、

$$A - BF = \bar{A} - \bar{B}\bar{F} \quad (12)$$

が成り立てばよい。ここで、 $\bar{F}$ は変動後のシステムに対するレギュレータゲインを表す。

(証明) ここでは、変動後の目標値応答特性から変動前の目標値応答特性を導く。変動後の目標値応答は、

$$y(k) = C(zI - \bar{A} + \bar{B}\bar{F})^{-1}\bar{B} \times [C(I - \bar{A} + \bar{B}\bar{F})^{-1}\bar{B}]^{-1}r(k)$$

で与えられる。このため、(12) 式が成り立つと、

$$y(k) = C(zI - A + BF)^{-1}B$$

$$\begin{aligned} & \times [C(I - A + BF)^{-1} \bar{B}]^{-1} r(k) \\ & = C(zI - A + BF)^{-1} \bar{B} b \\ & \times [C(I - A + BF)^{-1} \bar{B} b]^{-1} r(k) \end{aligned}$$

ここで,

$$\bar{B}b = \begin{bmatrix} T\bar{b} \\ \bar{b} \end{bmatrix} b = \begin{bmatrix} Tb \\ b \end{bmatrix} \bar{b} = B\bar{b}$$

が成り立つので,

$$\begin{aligned} y(k) &= C(zI - A + BF)^{-1} B\bar{b} \\ & \times [C(I - A + BF)^{-1} \bar{B} b]^{-1} r(k) \\ & = C(zI - A + BF)^{-1} B \\ & \times [C(I - A + BF)^{-1} B]^{-1} r(k) \end{aligned}$$

となり, (10) 式に一致する。□

この補題より, つぎの系が成り立つ。

[系] 変動後のシステムに対するレギュレータゲイン $\bar{F} = [\bar{f}_1 \quad \bar{f}_2]$ は, つぎのように一意に定まる。

$$\bar{f}_1 = \frac{b}{\bar{b}} f_1 \dots \dots \dots (13)$$

$$\bar{f}_2 = \frac{a - \bar{a} + b f_2}{\bar{b}} \dots \dots \dots (14)$$

(証明) (12) 式より,

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} 1 & -Ta \\ 0 & -a \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Tb \\ b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 & f_2 \end{bmatrix} \\ & = \begin{bmatrix} 1 & -T\bar{a} \\ 0 & -\bar{a} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} T\bar{b} \\ \bar{b} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{f}_1 & \bar{f}_2 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

となる。このため,

$$b f_1 = \bar{b} \bar{f}_1$$

$$a + b f_2 = \bar{a} + \bar{b} \bar{f}_2$$

が得られるので, (13), (14) 式が成り立つ。□

(注意) 本論文の定式化では, 伝達特性 $G(s)$ を (1) 式のように 1 次遅れ系として表しているため, ゲイン $\bar{F}$ は一意に定まるが, $G(s)$ を 2 次遅れ系で表すと, $\bar{F}$ は一意には定まらない。

以上をまとめると, 本論文の制御アルゴリズムは下記のようになる。

- (1) USM のモデルを決定し, レギュレータゲイン F を求め, 2 自由度最適サーボ系を設計する。
- (2) USM を駆動する。
- (3) 伝達特性 $G(z)$ の同定を行い, 係数 $\bar{a}$, $\bar{b}$ を更新する。
- (4) (13), (14) 式に基づき, 変動した USM に対するゲイン $\bar{F}$ を決定する。
- (5) 制御系のゲイン H , J を更新する。
- (6) 制御入力 $u(k)$ を求め, USM に指令を与える。
- (7) サンプル周期 T ごとに, 3~6 の手順を繰り返す。

4. 実験結果

本論文では, 適応機能がない 2 自由度サーボ系と結果を比較しながら, 本手法の有効性について述べる。

伝達特性 $G(s)$ は, 位相差制御入力 $u(t)$ を 0 から $\pi/2$ rad ヘステップ状に変化させた場合の速度 $\dot{\theta}(t)$ の応答波形から, つぎのように求めた。

$$G(s) = \frac{1888.59}{s + 833.3} \dots \dots \dots (15)$$

この伝達特性 $G(s)$ に対して, サンプル周期 $T = 4$ ms で離散化し, (1) 式の係数 a , b を求めた。

目標値は, 周期 2 s, 振幅が 0.2356 と -0.1571 rad を変化する矩形波とし, また, レギュレータゲインの初期値は, $F = [1.28347 \quad 0.00019]$ とした。

積分ゲイン J に含まれるパラメータ ξ は, フィードバック特性を考慮して決定する⁽⁹⁾。図 5 は, つぎの感度関数 $S(z)$ のゲイン特性を示している。

$$S(z) = \frac{z-1}{z-\xi} [1 + F(zI - A)^{-1} B]^{-1} \dots \dots \dots (16)$$

図 5 感度関数 $S(z)$ のゲイン特性

Fig. 5. Gain plots of sensitivity function $S(z)$.

図 6 観測雑音から操作量 $u(k)$ までの伝達関数 $W(z)$ の特異値曲線

Fig. 6. Singular value plots of transfer function $W(z)$ from observation noise to control input $u(k)$.

また、図 6 は、つぎの観測雑音から操作量 $u(k)$ までの伝達関数 $W(z)$ の特異値曲線を示している。

$$W(z) = \left[1 - \Phi(z) \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} \right]^{-1} \times \left[\Phi(z) \begin{bmatrix} 0 \\ -C \end{bmatrix} - K \right] \dots\dots\dots (17)$$

ここで、

$$\Phi(z) = \left[-K \quad J \right] \left\{ zI - \begin{bmatrix} A & 0 \\ -C & 1 \end{bmatrix} \right\}^{-1} \dots\dots\dots (18)$$

$$K = F + JE \dots\dots\dots (19)$$

である。これらの図より、本論文では感度特性と観測雑音の影響によるトレードオフを考慮して $\xi = 0.45$ とした。また、同定に用いたアルゴリズムは、忘却係数 (0.99) を導入した逐次最小 2 乗法とした。

図 7 は、時間変動に対する実験結果を示している。本論文では、USM を 600 秒駆動させた後の位置制御について検討を行い、適応機能がある場合もない場合も、どちらも目標値にほぼ追従しているといえる。

この結果を定量的に評価する。本論文では、最適な目標値応答特性の保持を目的としているため、モデルに対する応答 $\hat{y}(k)$ と結果を比較する。この評価を、

$$\sqrt{\frac{\sum_{k=1}^N \{\hat{y}(k) - y(k)\}^2}{\sum_{k=1}^N \hat{y}^2(k)}} \times 100 \quad (\%) \dots\dots\dots (20)$$

により行い、求めた結果を表 2 に示す。表に示すように、適応機能を導入した制御系は、適応機能がない場合より、誤差が小さく、目標値応答特性を保持しているといえる。

つぎに、負荷を与えた場合の追従性能について検討する。

図 7 時間変動に対する実験結果

Fig.7. Experimental results for driving time (No-load).

図 8 は、負荷として、0.1875 Nm を与えた時の駆動直後の実験結果を示している。図より、適応機能を導入した制御系は、モデルに対する応答 $\hat{y}(k)$ にほとんど一致しているといえるが、適応機能がない制御系は、立ち上がりに遅れがみられる。この場合のモデルの応答 $\hat{y}(k)$ に対する追従誤差を、(20) 式により求めると、適応機能を導入した場合は、ない場合に比べて 1/4 以下に抑えられ、その有効性が確認できる。

図 9 は、USM に負荷を与えた場合の伝達特性 $G(z)$ の係数 $\bar{a}$, $\bar{b}$ の推移を示している。 $G(z)$ のパラメータは、時刻 1.5s のとき変動しているものの、定常状態においては収束しているといえる。なお、この変動は、USM の回転角度が目標値に一致、すなわち静止している状態での変動であるため、ノイズの影響によるものと考えられる。

最後に、外乱除去特性に関する実験結果について述べる。

表 2 目標値追従性能の評価

Table 2. Evaluation of tracking performance.

	No-load	Load	Disturbance
without adaptation	2.11 %	8.77 %	1.47 %
with adaptation	1.78 %	1.84 %	0.62 %

図 8 負荷変動に対する実験結果

Fig.8. Experimental results for load.

図 9 伝達特性 $\bar{G}(z)$ の係数 $\bar{a}$, $\bar{b}$ の時間変化

Fig.9. Parameter $\bar{a}$ and $\bar{b}$ of transfer function $\bar{G}(z)$.

図 10 外乱除去特性

Fig. 10. Properties of disturbance rejection.

図 10 は、600 秒駆動後の USM において、出力 $y(k)$ が、目標値 0.2356 rad に追従し定常状態にあるとき、操作量 $u(k)$ に 0.1718 rad のステップ外乱が混入したときの、外乱除去特性の結果を表している。図より、適応機能を有する制御系は、外乱の影響を効果的に抑制していることがわかる。この場合の目標値に対する誤差 ((20) 式の $\hat{y}(k)$ を目標値 $r(k)$ とする) を表 2 に示しているが、適応機能がない場合に比べて、誤差は半分以下に抑えられている。

5. おわりに

本論文では、USM の位置制御に対し、最適な目標値応答特性を保持するため、2 自由度最適 1 型サーボ系に適応機能を取り入れた手法を提案した。本論文で提案した適応機能は、USM の特性変動のみを同定し、同定により得られた係数から制御系のゲインを調整する手法である。

本手法を有効性を検証するため、実機実験を行なった。その結果、

- (1) 駆動時間変動に対する追従性、および負荷を与えた場合の追従性は、モデルに対して設計した最適な目標値応答特性を保持できることが確認できた。
- (2) 導入した適応機能は、制御系に混入する外乱除去にも効果的であった。

謝 辞

本研究は、財団法人スズキ財団科学技術研究助成制度による支援対象研究の一部として行われたものである。関係各位に謝意を表す。

(平成 14 年 9 月 26 日受付)

文 献

- (1) 見城尚志・指田年生：超音波モータ入門，総合電子出版社 (1991)
- (2) 谷腰欣司：超音波とその使い方，日刊工業新聞社 (1994)
- (3) T. Senjyu, H. Miyazato, and K. Uezato: "Precise Speed Control of Ultrasonic Motors by Repetitive Control with Fuzzy Reasoning", *Japan Society for Fuzzy Theory and Syst.*, Vol.8, No.1, pp.158-166 (1996-1) (in Japanese)
- 千住智信・宮里 裕・上里勝実：「ファジィ推論を導入した繰返し制御による超音波モータの高精度速度制御」，日本ファジィ学会誌，8，

- 1, pp.158-166 (1996-1)
- (4) K. Nishibori, S. Okuma, Y. Eryu, and S. Sakai: "Position Control of Robot Manipulators with Ultrasonic Motors using Pulse Width Modulation and Fuzzy Controllers", *Journal of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol.60, No.574, pp.2052-2056 (1994-6) (in Japanese)
- 西堀賢司・大熊 繁・江龍康雄・酒井 哲：「超音波モータを用いたロボットマニピュレータの PWM とファジィ推論による位置決め制御」，日本機械学会論文集 C，60，574，pp.2052-2056 (1994-6)
- (5) K. Fukuda, T. Kamano, T. Suzuki, T. Yasuno, and H. Harada: "High Accuracy Positioning System with Ultrasonic Motor using Frequency and Phase Neural Networks", *The Japan Society of Appl. Electromagn. and Mechanics*, Vol.6, No.4, pp.350-357 (1998-12) (in Japanese)
- 福田耕治・鎌野琢也・鈴木茂行・安野 卓・原田寛信：「周波数および位相差ニューラルネットワークを用いた超音波モータ位置決めシステムの高精度化」，日本 AEM 学誌，6，4，pp.350-357 (1998-12)
- (6) M. Oka, A. Uchibori, H. Morioka, and K. Tanaka: "Precise Position Control of Ultrasonic Motors Using Neural Network", *Journal of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol.67, No.659, pp.2219-2225 (2001-7) (in Japanese)
- 岡 正人・内堀晃彦・森岡 弘・田中幹也：「ニューラルネットワークを用いた超音波モータの精密位置決め制御」，日本機械学会論文集 C，67，659，pp.2219-2225 (2001-7)
- (7) Y. Fujisaki and M. Ikeda: "Synthesis of Two-Degree-of-Freedom Optimal Servosystems", *Trans. of the Society of Instrument and Control Engineers*, Vol.27, No.8, pp.907-914 (1991-8) (in Japanese)
- 藤崎泰正・池田雅夫：「2 自由度積分型最適サーボ系の設計」，計測自動制御学会論文集，27，8，pp.907-914 (1991-8)
- (8) T. Hagiwara, M. Ichiki, M. Kanaboshi, K. Fukumitsu, and M. Araki: "Digital Two-Degree-of-Freedom LQI Servo Systems; Design Method and Its Application to Positioning Control of a Pneumatic Servo Cylinder", *Trans. of The Institute of Systems, Control and Information Engineers*, Vol.11, No.2, pp.51-60 (1998-2) (in Japanese)
- 萩原朋道・一木将人・金星光晴・福光研一・荒木光彦：「デジタル型 2 自由度 LQI サーボ系；設計法とその空気圧シリンダの位置決め制御への応用」，システム制御情報学会論誌，11，2，pp.51-60 (1998-2)
- (9) A. Naganawa, M. Hiranuma, K. Aida, and G. Obinata: "An Application for Tank System and its Analysis in Frequency Domain of Two-Degree-of-Freedom Optimal Type-1 Servo System; Study on a Trade-off between Influence of Observation Noise and Disturbance Rejection and Robust Stability", *Trans. of The Institute of Systems, Control and Information Engineers*, Vol.12, No.1, pp.1-10 (1999-1) (in Japanese)
- 長縄明大・平沼雅裕・愛田一雄・大日方五郎：「2 自由度最適 1 型サーボ系のタンクシステムへの応用と周波数領域での解析；観測雑音の影響と外乱抑制のトレードオフおよびロバスト安定性に関する考察」，システム制御情報学会論誌，12，1，pp.1-10 (1999-1)
- (10) S. Masuda, S.L. Shah, A. Inoue, and Y. Hirashima: "A Design Method of Two-Degrees-of-Freedom Adaptive Model Predictive Control Systems Based on State Space Approach", 19th SICE Symposium on Adaptive Control, pp.103-106 (1999)

長 縄 明 大 (正員) 1967 年生。1995 年 3 月東北大学大学院工学研究科機械工学専攻博士課程修了。同年 4 月東北大学工学部機械電子工学科助手。1996 年新潟大学大学院自然科学研究科助手。1999 年秋田大学工学資源学部機械工学科講師。2001 年同助教授，現在に至る。博士 (工学)。機械システムの制御に関する研究に従事。計測自動制御学会，システム制御情報学会，日本機械学会，日本ロボット学会，IEEE 会員。

三宅 拓郎 (非会員) 1977 年生。2000 年秋田大学鉱山学部機械工学科卒業。2002 年 3 月秋田大学大学院鉱山学研究科機械工学専攻博士前期課程修了。同年 4 月日本電産株式会社, 現在に至る。在学中は, 超音波モータの制御に関する研究に従事。日本機械学会会員。

岡 正人 (正員) 1961 年生。1986 年九州工業大学工学部第 II 部電気科卒業。1989 年宇部工業高等専門学校機械工学科技官。1995 年同助手, 現在に至る。山口大学大学院理工学研究科博士後期課程システム工学専攻在学中。超音波モータの制御に関する研究に従事。日本機械学会会員。

田中 幹也 (正員) 1952 年生。1982 年防衛大学理工学研究科卒業。同校研究員を経て, 1990 年広島電機大学工学部電子工学科助教授。1992 年愛媛大学工学部機械工学科助教授。1998 年山口大学工学部電気電子工学科教授, 現在に至る。工学博士。適応制御を中心とした制御理論およびその応用研究に従事。計測自動制御学会, システム制御情報学会, 電子情報通信学会, 日本機械学会, IEEE 会員。