

超音波モータの位置制御に関する基礎的検討

Basic Examination on Position Control of Ultrasonic Motor

三宅 拓郎[□], 長縄 明大[□], 田中 幹也[△], 岡 正人[△]

Takuo Miyake[□], Akihiro Naganawa[□], Kanya Tanaka[△] and Masato Oka[△]

[□] 秋田大学, [△] 山口大学, [△] 宇部高専

[□]Akita University, [△] Yamaguchi University, [△] Ube National College of Technology

キーワード: 超音波モータ (ultrasonic motor), 位置制御 (position control), PID 制御 (PID control),
2 自由度最適 1 型サーボ系 (two-degree-of-freedom optimal type-1 servo system)

連絡先: 〒 010-8502 秋田市手形学園町 1-1 秋田大学工学資源学部機械工学科 長縄研究室
三宅拓郎, Tel:070-6136-5176, Fax:018-837-0405, E-mail:miyake@control.mech.akita-u.ac.jp

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, 作動音が静かで保持トルクが大きいなどの特徴を備えていることから, 小型モーションコントロールシステム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ため, 従来の電磁モータで問題になっている電磁ノイズを発生せず, その影響も受けない電磁両立性にきわめて優れている. それにより, 強磁場を扱う磁気共鳴診断装置 (MRI) 内用のロボットアームなど, 医療・福祉分野のアクチュエータとしての利用も期待されている.

USM は従来の電磁モータと異なり, 摩擦駆動であるため, その入出力特性は本質的に非線形特性を有し, 摩擦熱や負荷の変化によってその動特性が大きく変動する. したがって, 特性変動に対処するため, ファジィ制御³⁾, ニューラルネットワークを用いた制御⁴⁾ など, 適応機能を有する制御法が数多く提案されている. しかし, 超音波モータの制御に, 線形制御を用いた場合の性能に関する報告は行われていない. これは, 線形制御では, 超音波モータの非線形特性に対処するのが困難であるためと考えられるが, 線形制御で補償しきれない部分を非線形制御で補うような制御法を適用する場合には, 線形制御でどの程度の性能が得られるかを調べる必要があると思われる.

そこで, 本報告では, 超音波モータの位置制御に対し

て, PID 制御と 2 自由度最適 1 型サーボ系を適用した場合の摩擦熱変動の影響について考察する. PID 制御は, 制御構造が簡単であることや制御パラメータの物理的な意味が明確であることなどの理由により, 古くから広い範囲の制御問題へ適用され, 実用化されている制御方式の中で最も用いられているものである. また, 2 自由度最適 1 型サーボ系は, 近年盛んに研究されている制御手法であり, 制御対象に変動がない理想状態と制御対象の変動の影響を明確に解析することができる^{5)~7)}. なお, 本報告では, 負荷を与えない場合の基本的な特性のみについて考察を行う.

2. 超音波モータ

2.1 実験装置

Fig. 1 に USM の実験装置の構成図を示す. Table 1 に USM とエンコーダの諸元を, Table 2 に駆動回路の諸元を示す. Fig. 1 において, USM, エンコーダが同軸上に接続されている. エンコーダからの情報は, パーソナルコンピュータ (PC) 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 I/O ボードを経由して, 駆動回路に伝えられ, USM を回転させる. 回転子の移動は, ヒステリシス現象が少なく入力と出力が比較的線形に近い関係が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てデジタル回路で構成した. また, 昇

圧回路は昇圧トランスを用いた．駆動周波数は固定して，共振周波数より 0.5(kHz) ほど高い 35.5(kHz) で行った．USM の駆動は，位相差を可変にすることで制御した．位相差は $\pm 90 \sim 90(\text{deg})$ の間を 128 分割して， $1:406(\text{deg})$ の刻みで調節できる．印加電圧は 30(V) を加えた．

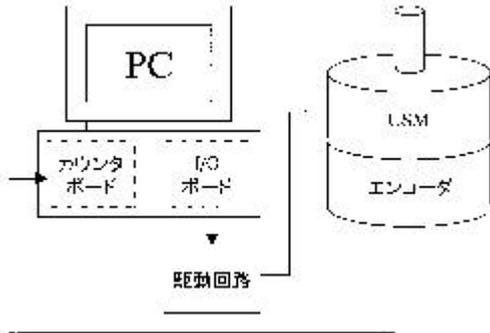


Fig. 1 The schematic of the experimental system

USM	定格回転数:100(rpm)
	定格トルク:2(kgcm)
	保持トルク:4(kgcm)
エンコーダ	分解能:14; 400(P/R)

Table 1 Performance of USM and encoder

駆動周波数	35.5(kHz)
印加電圧	30(v)
位相差	$\pm 90 \sim 90(\text{deg})$
最小位相差分解能	0:1046(deg)
サンプリング周期	1.0(msec)

Table 2 Performance of drive circuit

2.2 超音波モータの速度特性

印加電圧位相差に対する USM の回転速度特性を Fig. 2 に示す．図中 (a) はモータ駆動直後，(b) は 5 分間駆動後，(c) は 10 分間駆動後のデータを表す．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，図中 (a); (b); (c) を比較することにより，モータの特性が時間的に変化している様子が見られる．この特性変化は，超音波モータの駆動原理（摩擦熱）によるものであると考えられる．

3. 制御系の構成

3.1 PID 制御

PID コントローラは，次式で与えられる．

$$u(t) = \frac{K(z)}{1 - z^{-1}} e(t) \quad (1)$$

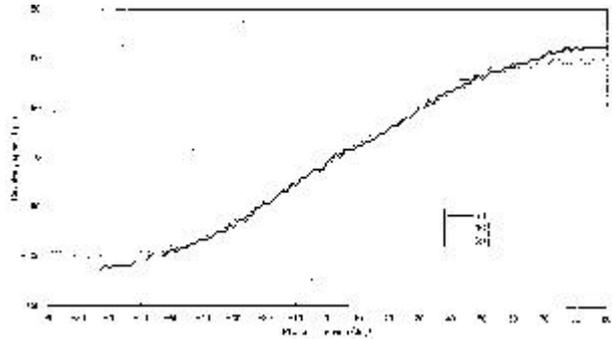


Fig. 2 Speed characteristics for phase difference

ただし，

$$e(t) = r(t) - y(t) \quad (2)$$

$$K(z) = K_P(1 - z^{-1}) + K_I + K_D(1 - z^{-1})^2 \quad (3)$$

ここで， K_P ; K_I ; K_D は，それぞれ，比例ゲイン，積分ゲイン，微分ゲインを表す．

3.2 2 自由度最適 1 型サーボ系

制御対象 $P(z)$ は， $z = 1$ に零点を持たない可制御，可観測な線形時不変系とする．

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

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

ここで， $x(t)$ は $n \in n$ 状態ベクトル， $u(t)$ は $m \in 1$ 操作量ベクトル， $y(t)$ は $m \in 1$ 出力ベクトルを表す．この制御対象 $P(z)$ に対して，2 自由度最適 1 型サーボ系は状態フィードバックにより Fig. 3 のように構成される (5)~(7)．

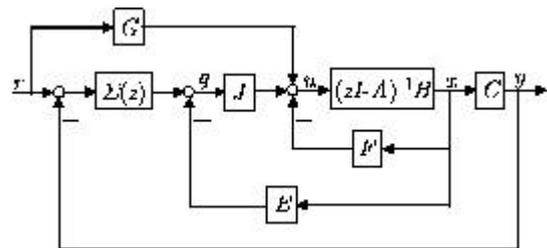


Fig. 3 Type-1 servo system via state feedback

ここで，ブロック線図中の各ゲイン行列は，

$$G = [C(I - A + BF)^{-1}B]^{-1} \quad (6)$$

$$E = C(I - A + BF)^{-1} \quad (7)$$

$$J = (I - A)G \quad (8)$$

であり， F は最適レギュレータゲインを表す．また， $S(z)$ は積分器を表し，

$$S(z) = \frac{z^{-1}}{1 - z^{-1}} \quad (9)$$

である。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、信号 $q(t)$ はゼロとなるので、制御に積分補償の効果は現れず、制御対象の変動あるいは外乱が存在する場合にのみ $q(t) \neq 0$ となり積分補償の効果が見れる。したがって、この制御系では、信号 $q(t)$ 変化を見ることにより、超音波モータの特性変動に対する影響を目標値応答特性と独立して解析することができる。また、積分ゲイン J は、感度特性と観測雑音が操作量 $u(t)$ に与える影響のトレードオフを考慮して決定する必要がある。

4. 実験結果

4.1 PID 制御の場合

実験を行うにあたり、(3) 式で表される 3 つのゲインは、試行錯誤の結果、 $K_P = 1; K_I = 0.05; K_D = 0.001$ と選んだ。なお、これらのゲインは厳密に調整されたものではなく、組み合わせの一例である。目標値は、周期 4(sec)、振幅が 13.5 ~ 9(deg) の矩形波を用いた。

Fig. 4 は PID 制御を行った場合の目標値と出力、Fig. 5 は PID 制御を行った場合の操作量を示し、(a) は駆動直後の結果、(c) は 10 分間駆動後の結果を示す。なお、横軸の時間は、駆動直後の結果にあわせて、また 5 分間駆動後の結果は、(a) の駆動直後の結果とほとんど一致していたので省略した。これらの図より、摩擦熱の影響により制御性能が変動してしまう様子がわかる。



Fig. 4 Experimental results of PID control (Reference and outputs)

4.2 2 自由度最適 1 型サーボ系の場合

はじめに、超音波モータのモデルを決定するため、印加電圧位相差を 0 ~ 90(deg) に変化させた場合の角速度 (rpm) を出力とするステップ応答実験を行った。その応答波形を、一次遅れ系 $K=(Ts + 1)$ により近似した結果、 $K = 0.01577, Ts = 0.001050$ であった。状態量 $x_1(t) = y(t)$ を回転子位置 (deg)、状態量 $x_2(t)$ を角速度

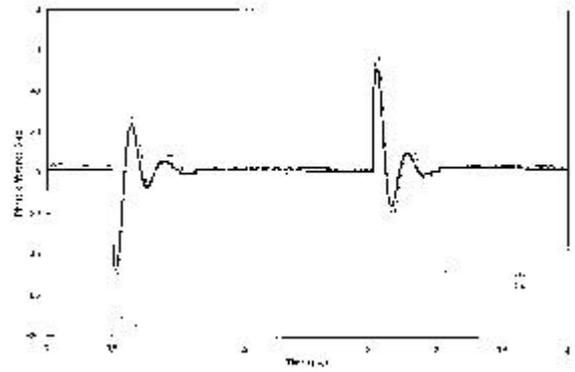


Fig. 5 Experimental results of PID control (Control inputs)

(rpm) とすると、状態方程式は次式で表される。

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -952.38 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 15.0268 \end{bmatrix} u(t) \quad (10)$$

$$y(t) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} \quad (11)$$

これをサンプリング周期 $\Delta t = 1[\text{msec}]$ で離散化したものをノミナルプラント $P(z)$ とした。最適レギュレータゲイン F は、次の評価関数を最小にするように $\lambda = 0.2$ として設計した。

$$\dot{A} = \sum_{i=0}^{\infty} [y^i(t)y(t) + \lambda u^i(t)u(t)] \quad (12)$$

また積分ゲイン J のパラメータ λ は、次の理由により $0 < \lambda < 0.9$ とした。本手法において、制御系の極は、 A の固有値となる。 $\lambda = 0.2$ で最適レギュレータを設計した場合、 A の固有値の絶対値の最大値は 0.97 となる。このため、本論文では、 λ が、制御系の代表根とならないように最大値を $\lambda = 0.9$ とした。 $\lambda = 0; 0.45; 0.9$ と変えた場合のゲイン行列を Table 3 に示す。 λ が小さいほど積分ゲイン J が大きくなっている

λ	λ	G	J	E	F
0.2	0.9		0.22	30.46 46.95	2.20 3.56
	0.45	2.22	1.20		
	0		2.22		

Table 3 Control parameters of type-1 servo system

Fig. 6, Fig. 7, Fig. 9, Fig. 10 は、実験結果を示す。Fig. 6 は、2 自由度 1 型サーボ系において、積分ゲインのパラメータ λ を $\lambda = 0; 0.45; 0.9$ と変えた場合のモータ駆動直後の出力を示している。なお、目標値は、周期 2(sec) の矩形波とした。図より、出力がほとんど一致しているの

が分かる．これは，3.2 節で述べたようにフィードバック特性が目標値応答と独立しているためである．

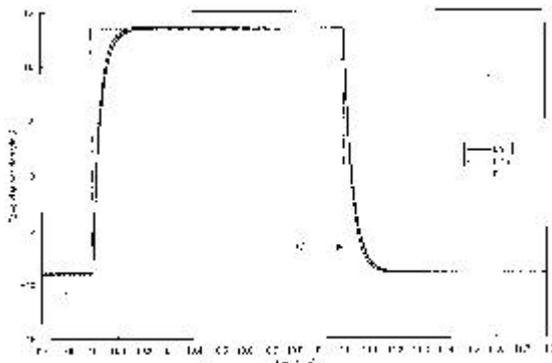


Fig. 6 Experimental results for optimal servo system (Reference and outputs)

Fig. 7 は，この場合の操作量の比較を示す．図より，パラメータ α の値を小さくすると操作量の変動が大きくなる様子がわかる．この変動は，観測雑音の影響によるものである．これを示すために，Fig. 3 における制御系に対して，観測雑音から操作量 $u(t)$ までの伝達関数 $W(z)$ を求めると，

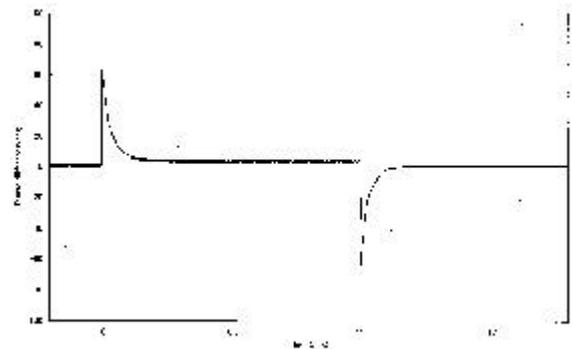
$$W(z) = \frac{B(z)}{A(z) + \alpha C(z)} \quad (13)$$

となる．ただし，

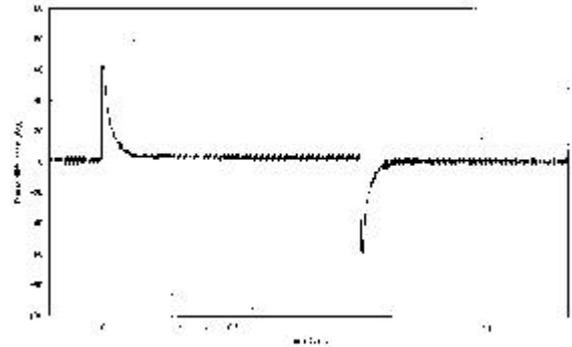
$$H = F + JC(I - A + BF)^{-1} \quad (14)$$

である．(13) 式に対して，パラメータ α の値を変えた場合のゲイン特性を Fig. 8 に示す．図より，パラメータ α を小さくすると高周波数領域のゲイン特性が大きくなっているのが分かる．このため，パラメータ α を小さくしたとき操作量 $u(t)$ が変動するのは，観測雑音のためであるといえる．しかし，パラメータ α が大きくなると感度特性が劣化する⁷⁾ ので，観測雑音の影響とのトレードオフをはかる必要がある．本報告では，パラメータ $\alpha = 0.45$ として以下の議論を進めるものとする．

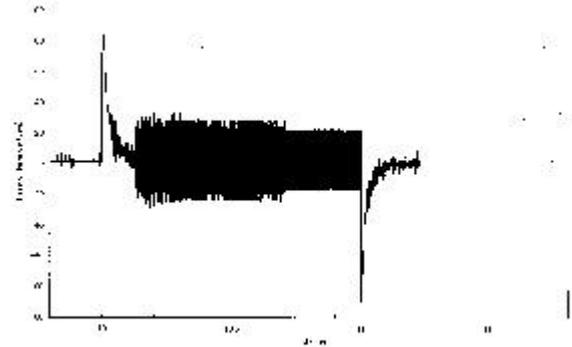
Fig. 9 は，パラメータ $\alpha = 0.45$ とし，10 分間駆動したときの操作量を示す．(a) は駆動直後の結果，(c) は 10 分間駆動後の結果を示す．なお，横軸の時間は駆動直後の結果にあわせて．図より，(a) の駆動直後では操作量は飽和しておらず，線形制御の範囲で制御を行っている



(1) $\alpha = 0.9$



(2) $\alpha = 0.45$



(3) $\alpha = 0$

Fig. 7 Experimental results for optimal servo system (Control inputs)

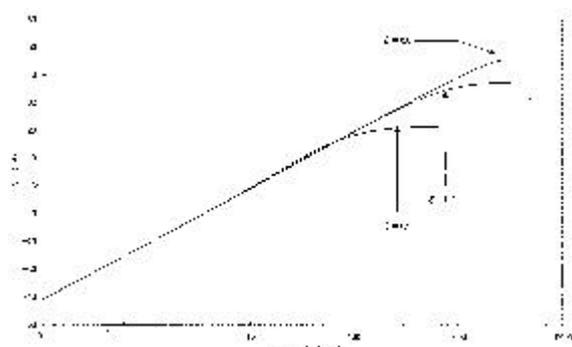


Fig. 8 Gain plots value of transfer function $W(z)$ from observation noise to control input $u(t)$

が、(c) の 10 分間駆動後では、操作量は飽和 ($\pm 90^\circ$ の位相差を越えた) している様子がわかる。この場合の信号 $q(t)$ の様子を Fig. 10 に示す。3.2 で述べたように、信号 $q(t)$ は、モデル化誤差や外乱が存在する場合には 0 にはならないので、摩擦熱により超音波モータの特性が大きく変化し、その影響が目標値変化に同調して現れていると考えられる。

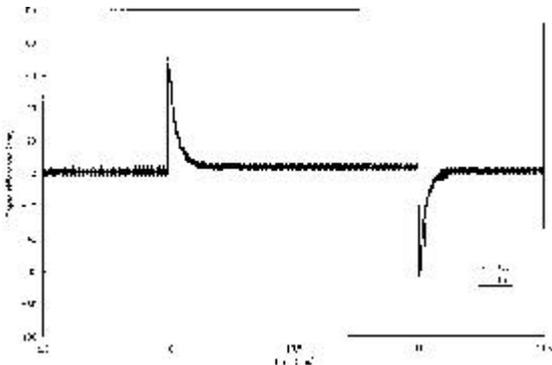


Fig. 9 Experimental results for optimal servo system (Control inputs)

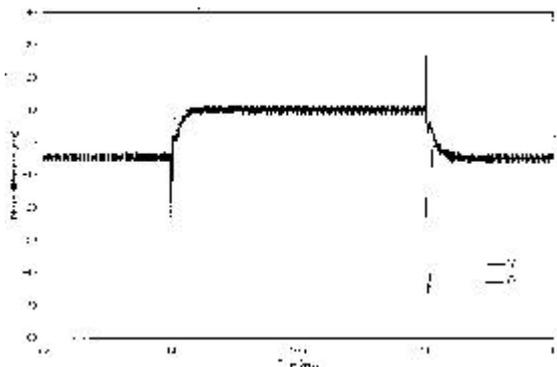


Fig. 10 Experimental results for optimal servo system (Signal $q(t)$)

5. おわりに

本報告では、超音波モータの位置制御に対して、PID 制御と 2 自由度最適 1 型サーボ系を適用した場合の実験を行った。いずれも負荷をかけない場合の結果であるが、摩擦熱による影響のため制御性能を継続するのが困難であるといえる。とくに、2 つの制御法とも、10 分間駆動では操作量の最大値を増大させる傾向にあった。今後はさらに議論を進め、特性変動に対処する制御法について検討し、負荷をかけた場合の考察を行う予定である。

参考文献

1) 見城, 指田: 超音波モータ入門, 総合電子出版社

(1991)

2) 谷腰: 超音波とその使い方, 日刊工業新聞社 (1994)

3) 千住, 宮里, 上里: ファジィ推論を導入した繰り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, Vol. 8, No. 1, pp. 158-166 (1996)

4) 千住, 宮里, 上里: ニューラルネットワークによる超音波モータの位置制御, 電気学会論文誌, Vol. 116, No. 10, pp. 1059-1066 (1996)

5) 藤崎, 池田: 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, Vol. 27, No. 8, pp. 907-914 (1991)

6) 萩原, 一木, 金星, 福光, 荒木: 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文誌, Vol. 11, No. 2, pp. 51-60 (1998)

7) 長縄, 平沼, 愛田, 大日方: 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文誌, Vol. 12, No. 1, pp. 1-10 (1999)