



超音波モータの高速・精密位置決め制御に関する研究*

青柳誠司** 小田高広*** 神谷好承** 岡部佐規一**

A Study on Fast and Fine Position Control of an Ultrasonic Motor

Seiji Aoyagi, Takahiro Oda, Yoshitugu Kamiya and Sakiichi Okabe

Fast and fine position control of an ultrasonic motor is generally difficult because its rotational speed is nonlinear to voltage, frequency or phase shift input. This paper shows both theoretically and experimentally that the motor has an approximate first-order transfer function between phase shift input and rotational speed output in the case of coarse motion to a command position. This paper also shows experimentally that the rotor moves finely and intermittently in the neighborhood of the command position. A linear position control system which applies integral control action was developed. A fast response of about 50ms and fairly high positioning accuracy up to a rotary encoder resolution were both realized.

Key words: ultrasonic motor, fast positioning, fine positioning, phase shift input, linear control system

1. はじめに

進行波型超音波モータは機械振動を利用した摩擦駆動のモータであり、ロータの構造が簡単のため応答が速く立ち上がり時間は数msのオーダーである¹⁾²⁾。ロータの回転速度はモータに印加する2相の正弦的な電圧の振幅、周波数、位相差等の数種類のパラメータで操作可能であるが、それらに対して非線形な関係を有する。このため従来研究されている超音波モータの位置決め制御法は、ロータの位置情報を用いて低ゲインの比例制御を行うものがほとんどであり、その位置決め速度は数秒のオーダーである³⁾⁴⁾⁵⁾。これは応答が速いという超音波モータの特長を十分に生かしているとは言えない。

本研究では、通常 $\pi/2$ で用いている位相差を可変として制御入力として取り扱い⁶⁾、高速かつ精密な位置決め制御を行うことを目的とする。本論文では、目標値近傍までの粗動域では位相差入力・速度出力系が一次遅れ要素で近似できることを理論的、実験的に解明し、線形制御系を構成することで比較的高速な位置決め応答を可能とした。また目標値近傍において位相差入力が小さくなると、進行波頂点が超音波領域周波数

で上下動してロータがステータと離脱・接触を繰り返すため固体摩擦の影響が少なくなり、ロータの微動が可能となることを明らかにした。この原理を用いて積分補償を制御系に加えることで、定常偏差および残留振動のない位置決めを達成した。

2. ロータの運動方程式の理論的導出

2.1 ステータ表面速度の数式的解析

超音波モータの圧電体は図1にグループ1, 2として示すような各々 n 次の定在波をステータに生成する2個の分極グループで形成され、それらは互いに空間的に定在波の $1/4$ 波長分の位相差を持つように弾性体に接着されている。各グループに互いに時間的位相差 ϕ を持ち、超音波領域の角振動数 ω で正弦的に変化する振幅 V の2相の電圧を加えると、定在波の合成波として時間的に進行する弾性波がステータ表面に励振される。ロータの回転速度はこれら ϕ , V , ω で操作可能だが、 ϕ のみがロータの回転方向を制御することが可能なので、制御入力として適していると考えられる。従って、本研究では V , ω を一定に保ち、 ϕ のみを変化させる制御法を取り扱う。定在波の振幅は圧電体の電界誘起ひずみ特性、ステータの共振特性等に従い、 V , ω によって決定されるので、以下定数 A とおく。

*原稿受付 平成3年10月21日

**正会員 金沢大学工学部 (金沢市小立野2-40-20)

***正会員 沖電気工業(株) (八王子市東浅川町550-5)

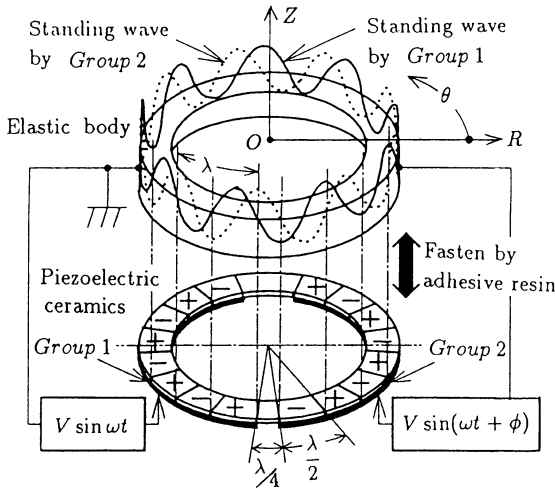


Fig.1 Outline of stator of ultrasonic motor

図1に示すような円筒座標系 (R, θ, z) をとるとステータ中立軸に生成される2相の定在波は、以下のように表示される。

$$Z_1 = A \sin n\theta \sin \omega t \quad (1)$$

$$Z_2 = A \cos n\theta \sin(\omega t + \phi) \quad (2)$$

これらを合成した進行波は $Z = Z_1 + Z_2$ により求められ、以下のようになる。

$$Z = A \sqrt{1 - \cos \phi \cos(2\omega t + \phi)} \cos(n\theta - \psi) \quad (3)$$

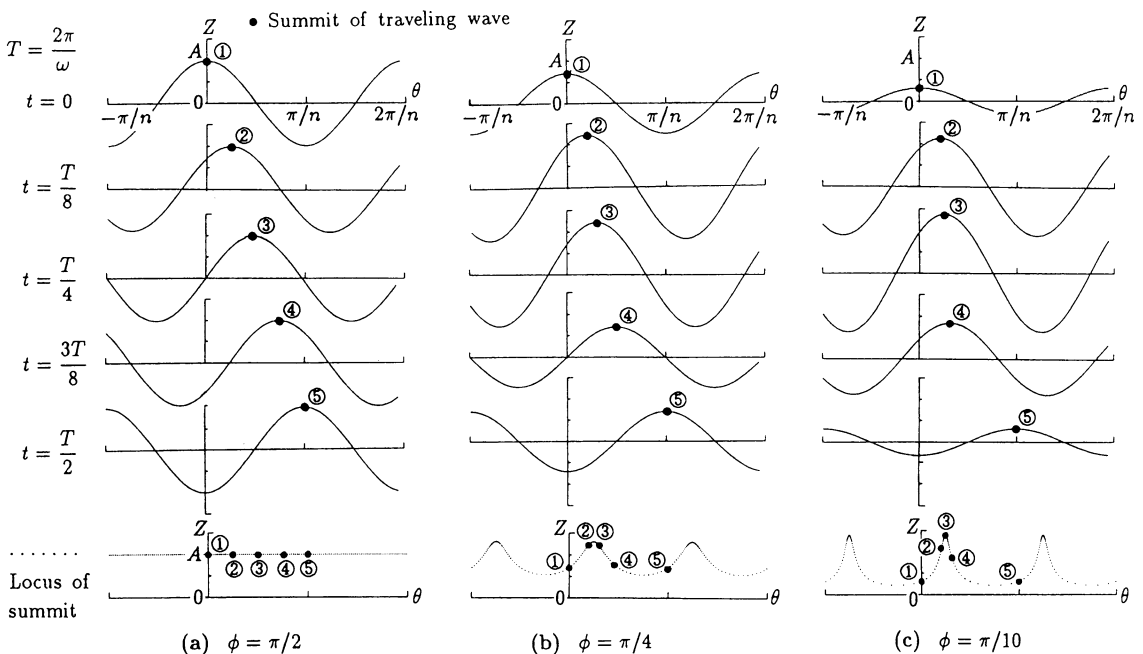
$$\text{ここで } \psi = \tan^{-1} \frac{\sin \omega t}{\sin(\omega t + \phi)} \quad (4)$$

進行波の頂点の位置 θ_s は $\partial Z / \partial \theta = 0$ を解くことにより $\theta_s = (2l\pi + \psi)/n$ (l は整数) となる。図2(a)~(c)に $\phi = \pi/2, \pi/4, \pi/10$ の場合について式(3), (4)より進行波の時間推移を計算した結果を示す。また進行波頂点の軌跡を計算した結果を点線で示す。進行波の振幅は、 $\phi = \pm \pi/2$ 以外の場合、時間とともに変化し、進行波頂点は上下動する。 ϕ の値が小さいほど、上下動の幅および立上りの鋭さが大きい。

図3に示すようにステータ表面の任意の質点を p とし、ステータがたわまない状態での位置を p_0 とする。 p は時間とともに図に示すような楕円運動を行う²⁾。 p_0 から p への横方向の変位 ξ はたわみ角を δ 、ステータの半径を r 、ステータの厚みを α として、

$$\begin{aligned} \xi &= -\frac{a}{2} \sin \delta \approx -\frac{a}{2} \cdot \frac{dZ}{dX} = -\frac{a}{2} \cdot \frac{dZ}{d(r\theta)} \\ &= \frac{an}{2r} A \sqrt{1 - \cos \phi \cos(2\omega t + \phi)} \sin(n\theta - \psi) \end{aligned} \quad (5)$$

のように表される。ここで δ は微小であるとして近似を行った。進行波頂点での横方向の速度 v_s をステータ表面速度と呼ぶことにする。これは式(5)を時間 t で微分して $\theta = \psi/n$ を代入することにより、



A : Amplitude of standing wave shown in Eqs. (1) and (2)

Magnification of every coordinate axis is same.

Fig.2 Transition of traveling wave

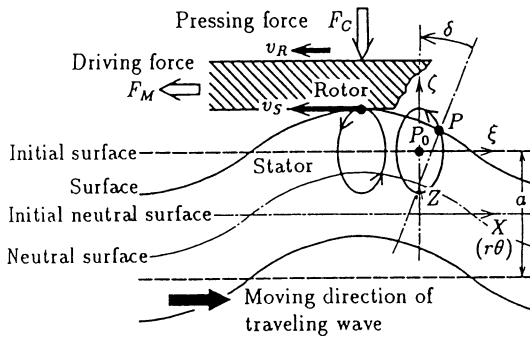


Fig.3 Driving mechanism of motor

$$v_s = \frac{an\omega}{2r} A \frac{\sqrt{1 - \cos\phi \cos(2\omega t + \phi)}}{\sin^2(\omega t + \phi) + \sin^2\omega t} \sin\phi \quad (6)$$

のように表される。ここでロータの進行方向（図3の左方向）を正とした。

2.2 ロータの駆動メカニズムと運動方程式

図3に示すように進行波頂点付近でのステータからロータへの力の伝達は、転がりりと滑りが共存する摩擦力によって行われ、ロータに伝達される推力 F_M は次式で表される^{7) 8)}。

$$F_M = \varepsilon v_s (1 - \tau) F_C = \varepsilon (v_s - v_R) F_C \quad (7)$$

ただし、 ε ：比例係数、 v_R ：ロータの周速度

$\tau = v_R / v_s$ ：滑り率、 F_C ：押付け力

ロータの回転角を θ 、慣性モーメントを J_R とすると、摩擦が無いと仮定した場合のロータの運動方程式は $J_R \ddot{\theta} = r F_M$ となり、 $v_R = r \dot{\theta}$ および式(7)を用いて以下のように整理される。

$$J_R \ddot{\theta} + \varepsilon r^2 F_C \dot{\theta} = r \varepsilon v_s F_C \quad (8)$$

式(8)よりロータの回転角速度 $\dot{\theta}$ は右辺 $r \varepsilon v_s F_C$ に対して1次遅れ系になり、その時定数のオーダーは次

章で実験的に求められるように数msである。このため式(6)より v_s は数十 μs の超音波領域の周期 $T = 2\pi/\omega$ で変化するが、 v_s がロータの運動に変換される際、この早い変化は時間的に平均化されると仮定できる。これより v_s は以下ようになる。

$$v_s = \frac{an\omega}{2r} Ag(\phi) \quad (9)$$

ここで

$$g(\phi) = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{\sqrt{1 - \cos\phi \cos(2\omega t + \phi)}}{\sin^2(\omega t + \phi) + \sin^2\omega t} \sin\phi dt \quad (10)$$

式(8)、(9)、(10)より、 $\ddot{\theta} = 0$ が成立する定常状態での位相差 ϕ と速度 $\dot{\theta}$ の関係を表す速度特性曲線は、関数 $g(\phi)$ の形で象徴される。図5(a)に $g(\phi)$ を数値的に計算した結果を一点鎖線で示す。 $g(\phi)$ は、2点 $(\pm\pi/2, g(\pm\pi/2))$ を結ぶ直線 $g_{m.i.}(\phi) = k_1\phi$ と、原点における $g(\phi)$ の接線 $g_{m.x}(\phi) = k_2\phi$ との間に挟まれた領域に存在する。ただし $k_1 = 0.6 \text{ rad}^{-1}$ 、 $k_2 = 2.1 \text{ rad}^{-1}$ である。図5(a)より $20^\circ < |\phi| < 70^\circ$ 程度の範囲では $k_1 < k < k_2$ を満たす係数 k を用いて、 $g(\phi) = k\phi$ の近似式が比較的精度良く成立する。これを式(8)に代入すると、位相差入力・速度出力系の伝達関数は式(11)のように表される。これより ϕ の範囲を目標値までの粗動域に限定すれば、伝達関数は理論的に1次遅れ要素で表される。

$$G(s) = \frac{1/(2r^2) \cdot an\omega Ak}{J_R/(\varepsilon r^2 F_C) \cdot s + 1} = \frac{K_M}{T_M s + 1} \quad (11)$$

3. 実験による伝達関数の決定

3.1 速度特性

図4に実験で用いた超音波モータおよび駆動システムの概略を示す。押付け力は出力軸に取り付けたコイ

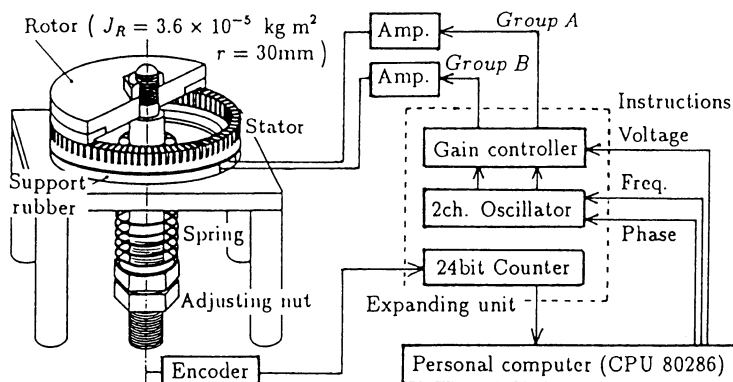
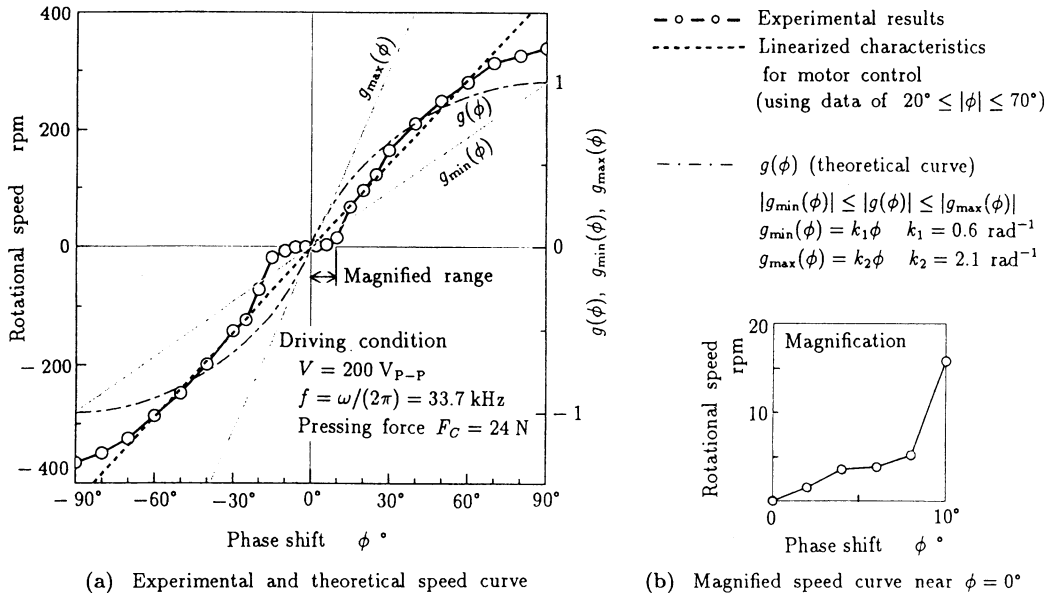


Fig.4 Driving system of ultrasonic motor



(a) Experimental and theoretical speed curve

(b) Magnified speed curve near $\phi = 0^\circ$

Fig.5 Speed curve according to phase shift change

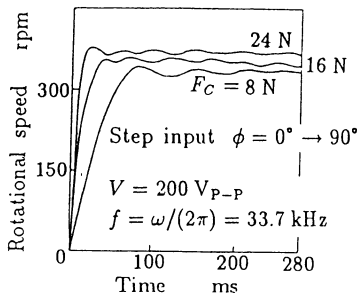


Fig.6 Speed response to phase shift step input

ルばねをボルトで締めることによって調整される。

図5(a)に位相差入力に対する速度特性を実線で示す。測定に際して駆動電圧、駆動周波数は図中に示す値に固定した。比較のため式(10)で表される $g(\phi)$ を、 $\phi = 40^\circ$ で関数値と実験で求めた速度とが一致するように縦方向の縮尺を調整し、一点鎖線を表示した。両曲線は共に原点を通り、 $|\phi|$ の増加に従って微係数が減少するS字状の曲線を描く。このことは、理論式(8)、(9)、(10)の正当性を裏付けている。実験で求めた速度特性を、 $20^\circ < |\phi| < 70^\circ$ の範囲のデータを用いて最小二乗法により直線近似した結果を図5(a)の点線で示す。この範囲では近似値とデータの誤差は5%以下であり、比較的良好な精度で直線近似が可能である。

位相差 ϕ が $\pm 8^\circ$ 以内の場合、図5(b)に ϕ が正の場合について拡大して示すように、ロータは5rpm以下の極めて低い速度で回転し、 $\phi = 0^\circ$ において停止する。この理由を以下に定性的に考察する。既に図2の点線

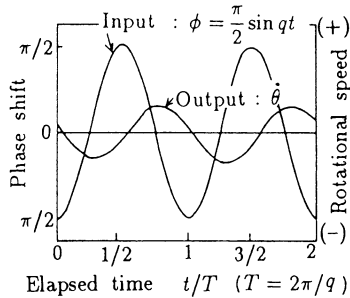
で示したように $\phi = 0^\circ$ の近傍では進行波頂点が超音波領域の周波数で時間とともに鉛直方向に運動するためロータがこの運動に追従できずに離脱すると考えられる。この際ロータはステータと離脱・接触を繰り返し間欠的に駆動され、離脱を伴うため固体摩擦の影響が少なくなり、ロータの微動が可能になっていると考えられる。

以上のように位相差入力に対する速度特性は $\phi = 0^\circ$ 近傍を除いて原点を通る直線ではほぼ近似可能であり、線形制御に適している。また $\phi = 0^\circ$ 近傍で微動が可能なので、積分補償を制御系に加えると定常偏差が除去され精密な位置決めが可能なが予想される。

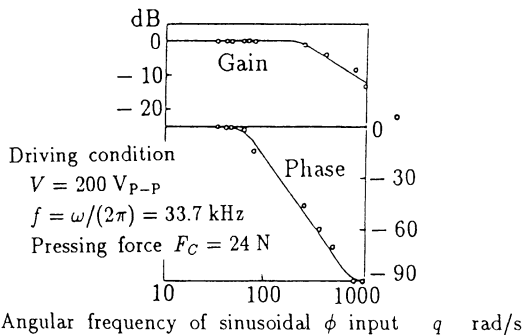
3.2 過渡応答特性

位相差を制御入力としてステップ応答を測定した結果の一例を図6に示す。また図7(a)に示すように位相差入力を $\phi = \pi/2 \cdot \sin q t$ に従って周期的に変化させ、ロータの回転速度がそれにどの程度追従するかを q を変化させて調べた結果を、ボード線図として図7(b)に示す。この図においては、角振動数 $q = 0$ の場合のロータの回転速度を基準として 0dB とし、 q の増加に従う回転速度の減少をdB で表示した。これらの結果より伝達関数が1次遅れ要素で近似可能なことが実験的に確認できる。

図8に実験で使用したモータの垂下特性を示す。これより式(7)における係数 ε を求め、各定数を用いて式(11)から時定数 T_w を計算した結果と、図6のステップ応答より実験的に求めた T_w を表1に示す。押付



(a) Speed response to sinusoidal phase shift input



(b) Bode diagram between phase shift input and rotational speed output

Fig. 7 Frequency response of rotational speed to phase shift input

け力 F_C が24N, 16N の場合これらは 15%以内の誤差で一致し, 理論式(11)の正当性が裏付けられる。 F_C が8N の場合 T_M の実験値が理論値よりかなり大きくなるが, これは F_C が小さいためロータの離脱が生じ, 理論式(7)~(11) が成立しないためと考えられる。

4. 位置決め制御系の構成と位置決め実験

ここではモータを1次遅れ要素として扱い, 位置, 速度をフィードバックする制御を行うことで, 従来の位置のみをフィードバックする位置決めに比べて高速な応答を得ることを目的とする。なお, 本制御系では定常偏差を除去するために積分補償を用いている。

4.1 積分補償を用いたフィードバック制御系

伝達関数のゲイン定数 K_M を図5(a)の点線で示す線形近似した速度特性の傾きより求め, 時定数 T_M を図6のステップ応答より求めて, 図9に示す制御系を構成した¹⁰⁾。3極が

$$-\omega_n \zeta_n \pm \omega_n \sqrt{1 - \zeta_n^2} j, \quad -T_n + 0j$$

ここで $\omega_n = 2\pi \cdot 10$, $\zeta_n = 0.707$, $T_n = 500$ (12)

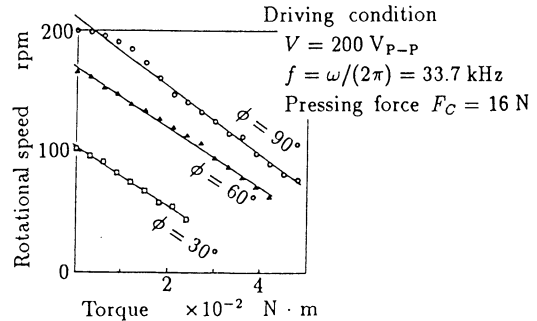


Fig. 8 Experimental torque-speed curve

Table 1 Time constant of rotational speed

F_C N	T_M ms	
	Theoretical *	Experimental
24	6.2	7.1
16	9.3	10.5
8	18.5	32.5

$$* T_M = J_R / (\epsilon r^2 F_C), \quad J_R = 3.6 \times 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^2, \quad \epsilon = 0.27 \text{ s/m}, \quad r = 30 \text{ mm}$$

になるようにフィードバックゲイン K_r , K_v , K_A を定めた。 ω_n は制御系の固有角振動数, ζ_n は制御系の減衰比, T_n は制御系の定常偏差を $e^{-T_n t}$ のように減少させる係数を表す。 ω_n を大きく採ればより高速な応答が得られるが, 制御入力飽和してしまうこと, 安定性が損なわれることを考慮して本システムでは10 Hzに設定した。サンプリングは0.5ms 間隔に行い速度はエンコーダパルスの差分値により求めた。実際の制御系は, モータが連続系で, その他の図9において点線で囲まれた部分は離散値系であるが, サンプリングタイムをモータの時定数の10%以下に設定したため, 近似的に連続時間系として取り扱い極指定を行った¹⁰⁾。

4.2 位置決め応答結果

図10(a)に目標値を27° (エンコーダ300 パルスに相当)とした場合の位置決め応答の結果を示す。駆動電圧, 駆動角振動数は図5(a)に示す条件と同じ値に設定した。図の実線は式(12)の3極より求められる理論的な目的応答曲線の計算値を示している。ほぼ理論通りの応答が得られ, エンコーダの分解能の精度を持ち, 立上がり時間が50ms程度の位置決めを達成できた。位相差入力がスパイク状に変化しているのは, エンコーダパルスの差分値によりデジタル的に求められた回転速度が, 図9に示す比較的高いゲイン K_A を介して, サンプリングタイムごとに間欠的に位相差入力へフィードバックされるためである。

4.3 微動駆動による定常偏差の除去

図10(b)に目標値近傍での制御入力と回転角度を

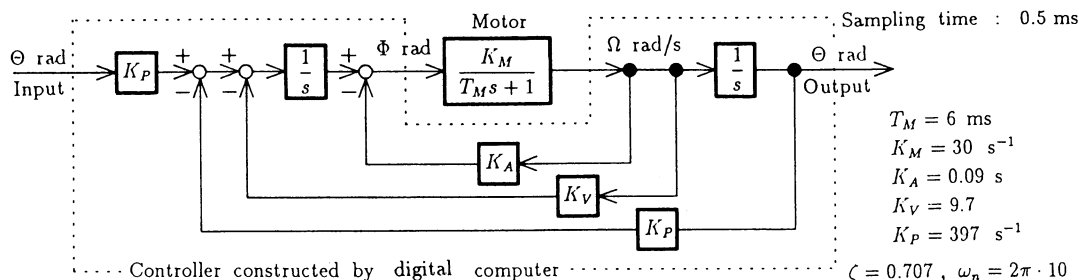


Fig.9 Block diagram of servo system

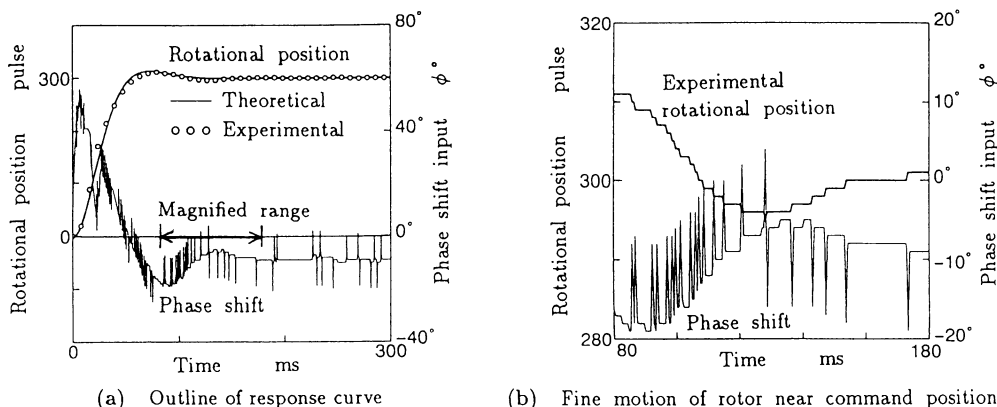


Fig.10 Response curve of motor in the case of command 300pulse (1 pulse = 0.09°)

拡大して示す。エンコーダの1パルス程度の間欠的なロータの微動が可能であり、積分補償が有効に機能していることが確認できる。位置決め後の制御入力値が0°でなく約-8°を平均値として変化するのは積分補償動作によるものである。ロータがエンコーダの1パルス分目標値のまわりで微動した時に速度フィードバックが働き、位相差入力スパイク状に変化している。

5. 結 言

進行波型超音波モータにおいて2相の駆動電圧の位相差を制御入力とする高速かつ精密な位置決め制御法を提唱した。以下に結果をまとめる。

- (1) 目標値近傍までの粗動域では、位相差入力・速度出力系が一次遅れ要素で近似できることを理論的、実験的に明らかにした。
- (2) 線形制御入力として適する位相差を用いた位置、速度フィードバック系によって、50msの立ち上がり時間を達成した。
- (3) 微小位相差入力により間欠微動が可能なことを実験的に明らかにし、積分補償の付加でエンコーダ分解能までの位置決めを実現した。

参 考 文 献

- 1) 指田年生: 超音波モータ開発のアプローチ, 自動化技術, 15, 12 (1982) 31.
- 2) 徳島 晃, 原尾則行, 高橋健一郎, 菅野伸和, 稲葉律男: 超音波モータ, National Technical Report, 33, 5 (1987) 4.
- 3) T. Hatsuzawa, K. Toyoda and Y. Tanimura: Speed Control Characteristics and Digital Servo-System of a Circular Traveling Motor, Rev. Sci. Instrum., 57, 11 (1986) 2886.
- 4) T. Kamano, T. Suzuki and T. Kuzuhara: Position Control System Driven by Ultrasonic Motor, Jpn. J. Appl. Phys., 28, Suppl. (1989) 155.
- 5) 西堀賢司, 大熊 茂, 江龍康雄, 杉本利孝: 超音波モータを用いたロボットマニピュレータの位置決め制御, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'91講演論文集 (1991) 95.
- 6) 加藤厚生, 伊藤宏司, 伊藤正美: 超音波モータのコンプライアンス調節, 第8回日本ロボット学会学術講演会講演論文集 (1990) 985.
- 7) 黒澤 実, 上羽貞行: 進行波型超音波モータの効率, 日本音響学会誌, 44, 1 (1988) 40.
- 8) 遠山茂樹, 野中 学, 梅津 清: 超音波モータによるロボット用アクチュエータの開発 - 第2報 ステータの開発 -, 1991年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (1991) 207.
- 9) 神谷好承, 青柳誠司, 岡部佐規一, 横山恭男: サーボ増幅器の性質を考慮したサーボ系の動特性の解析, 1990年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (1990) 689.
- 10) 荒木光彦: デジタル制御理論入門, 朝倉書店, (1991) 123.