

ファジィコントローラによる超音波モータの位置決め制御*

青柳誠司** 笹木 亮*** 神谷好承** 岡部佐規一**

Position Control of an Ultrasonic Motor Using a Fuzzy Controller

Seiji Aoyagi, Toru Sasaki, Yoshitugu Kamiya and Sakiichi Okabe

A fast and fine position control method of an ultrasonic motor has been already studied which uses phase shift input and applies a linear control system. However this method has a drawback in damage of the lining material because the rotor jumps slightly from the stator in an ultrasonic frequency in the neighborhood of a command position. So it is desired to cut down voltage input and to decrease the amplitude of the traveling wave after the coarse positioning is completed. This paper presents a new control method which uses not only phase shift input but also voltage input and varies them using a fuzzy controller. Besides a fast and fine positioning, prevention of abrasion of the lining material was achieved by applying this fuzzy control method.

Key words: ultrasonic motor, fuzzy controller, fast positioning, fine positioning, prevention of abrasion

1. 緒 言

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、それらに対しては非線形な関係を有している³⁾。筆者らは先に、位相差を制御入力とする方法を提案し、位相差入力・速度出力系を1次遅れ要素で近似して線形制御系を構成することで立上がり時間が50ms程度で定常偏差のない位置決めを達成できることを示した⁴⁾。

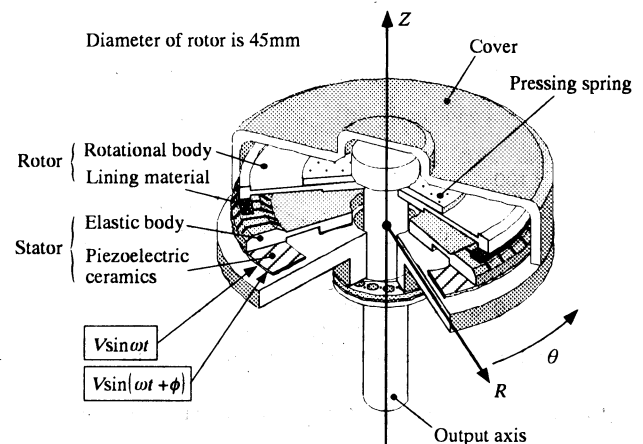
しかしながら、この制御法では位置決め後にステータに定在波が生じてロータとステータが超音波領域の周波数で接触・離脱を繰り返すため、ロータ裏面に貼られているライニング材が損耗するおそれがある。このため目標値近傍に達した後は駆動電圧を下げることでステータの振幅を小さくする対応が望まれる。そこで本論文では従来1入力制御が通常であった超音波モータを、ファジィコントローラを用いて位相差、電圧の2入力制御する手法を提唱する。ファジィ制御を適用することにより従来の線形制御では実現が難しい非線形2入力のシステムの制御が可能となり、従来の線形制御を適用した場合に比べて高速・精密のみならずライニング材の損耗も少ない超音波モータの位置決めを達成した。

2. ファジィ位置制御系の構成

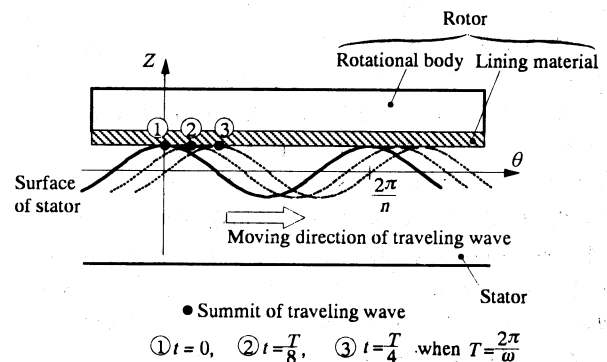
2.1 超音波モータの速度特性

図1(a)に超音波モータの概形を示す。圧電体は各々が 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。図1(b)に $\phi = 90^\circ$ の場合の進行波の時間推移の様子を示す。ロータはステータ表面にあらかじめ押し付けられており、進行波頂点の時間推移に伴ってそれと逆の方向に回転運動を行う⁴⁾。



(a) Structure of ultrasonic motor



(b) Transition of traveling wave in the case of $\phi = 90^\circ$

Fig.1 Outline and driving mechanism of ultrasonic motor

* 原稿受付 平成6年4月1日
 ** 正会員 金沢大学工学部(金沢市小立野2-40-20)
 *** 正会員 富山大学工学部(富山市五福3190)

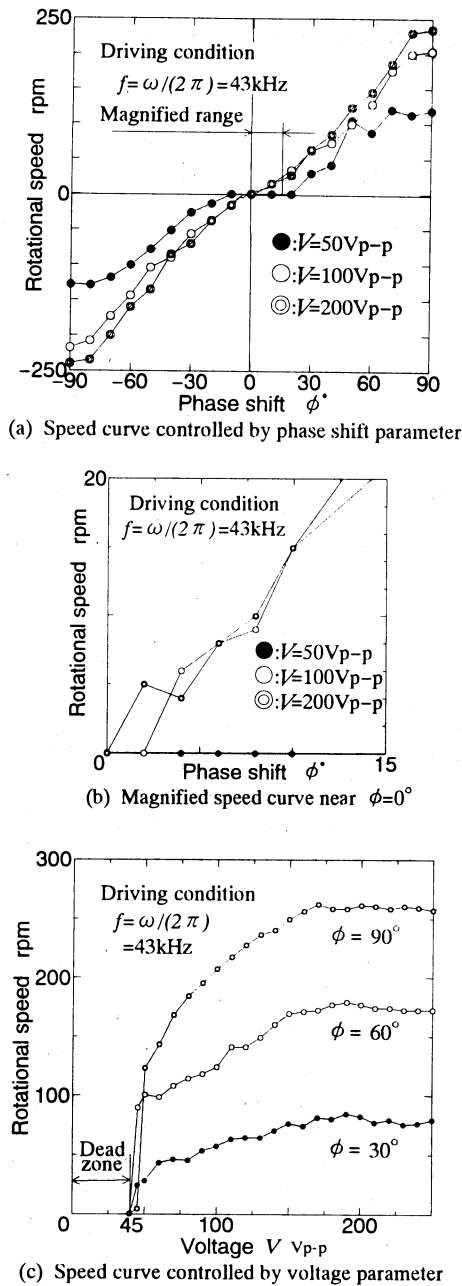


Fig.2 Experimental speed curve according to ϕ, V change

本研究では進行波型超音波モータとして新生工業社製の型式USR-45を用いた⁵⁾。図2(a)~(c)に ϕ, V に対するモータの速度特性を実験的に求めた結果をそれぞれ示す。これより速度特性は各入力に対して非線形性を示すが、位相差入力に対しては大域的に線形近似が可能である。なお本論文中各制御入力の範囲は $|\phi| < 90^\circ$ 、 $|V| < 200\text{Vp-p}$ とし、便宜上モータが負の方向に回転する際の V の符号を負とする。

2.2 位相差が0近傍での進行波頂点の挙動

図3(a)~(d)に $\phi = 90^\circ, 45^\circ, 18^\circ, 0^\circ$ の場合について進行波頂点の軌跡を計算した結果を示す⁴⁾。図中Aは各分極グループの発生する定在波の振幅であり、圧電体の電界誘起ひずみ特性、ステータの共振特性等に依り V, ω によって決定される定数である。進行波の振幅は、 $\phi = \pm 90^\circ$ 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。 $|\phi|$ の値が小さいほど上下動の幅および立上がりの鋭さが大きく、 $\phi = 0^\circ$ では合成波は

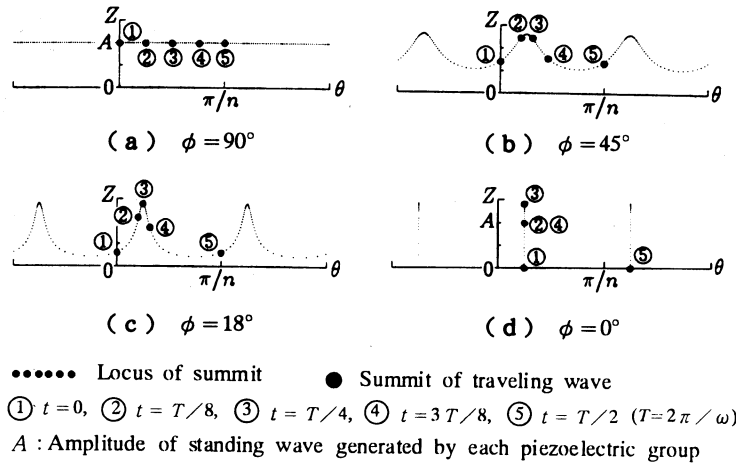


Fig.3 Transition of summit of traveling wave

進行波とはならず定在波となる。

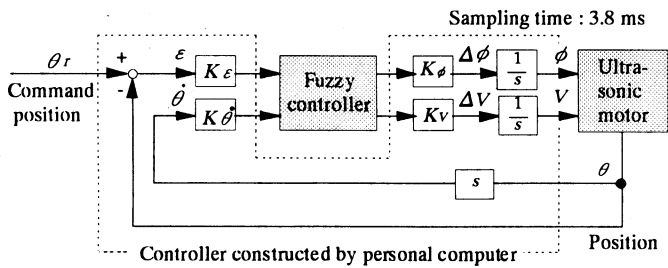
位相差を制御入力とした線形制御系では、位置決め目標値近傍で位相差は 0° に近くなり、図3(c), (d)に示すように進行波頂点が超音波領域の角振動数 ω で鉛直方向に運動するため、ロータが追従できず離脱すると考えられる。この際ロータはステータと離脱・接触を繰り返し間欠的に駆動され、離脱を伴うため固体摩擦の影響が少なくなりロータの微動が可能になる。このことは図2(b)に ϕ が正の場合について拡大して示すように、電圧 V が 100Vp-p 、または 200Vp-p で位相差 ϕ が $\pm 8^\circ$ 以内の場合ロータが 10rpm 以下の比較的低い速度で回転することから裏付けられる。従ってロータがステータと離脱・接触を繰り返すことは、制御系に積分補償を加えることにより定常偏差が除去され精密な位置決めが行えるという利点を生み出している⁴⁾。しかしこのことは一方でロータ裏面に貼られているライニング材を損耗させることにもつながり、モータの寿命を考えた場合重大な短所となる。

2.3 ファジィ制御の適用理由

ライニング材の損耗を抑制することを考えた場合、目標値近傍に達した後に駆動電圧を下げて図3の中でAで示される各分極グループの発生する定在波の振幅を減少させ、進行波頂点の上下動の振幅を小さくすることが望まれる。このためには位相差、電圧の2つを制御入力として同時に変化させることが必要である。本研究では、図2(a), (c)に示すようにモータの速度特性が位相差、電圧の各入力に対して非線形であること、固体摩擦の存在・圧電体のヒステリシス等により電圧入力に対しては不感帯があること、摩擦駆動のため駆動メカニズムの数式モデル化が難しいこと⁶⁾等を考慮して、これらを解決すべく多入力の非線形系に適用され近年成果を挙げているファジィ制御を適用することにした⁷⁾。

2.4 装置構成と位置制御系

ファジィコントローラとしてオムロン社製の型式FZ-3000を用いた⁸⁾。図4にファジィ位置制御系の信号の流れをブロック図で示し、図5に制御装置の構成図を示す。図中の ε は目標値から現在のロータの回転角度を差し引いた位置偏差を表しており、 $\dot{\theta}$ は回転速度を表している。パーソナルコンピュータによってエンコーダのパルス値より ε を、また差分値より $\dot{\theta}$ を求め、それらに定数 $K_\varepsilon, K_{\dot{\theta}}$ を乗じた値をD/Aコンバータを介してファジィコントローラに出力する。ファジィコントローラは次章で述べるあらかじめ入力されたルールとメンバーシップ



ε : Position error φ̇ : Rotational speed
 Δφ : Phase shift change ΔV : Voltage change
 K_ε, K_φ, K_θ, K_V : Gain constants of normalization

Fig.4 Block diagram of fuzzy control system

Table 1 Rules of fuzzy control

		Rotational speed $\dot{\theta}$								
		$\Delta\phi$	ΔV	NL	NM	NS	ZR	PS	PM	PL
Position error ε	PL						PL	PM		
	PM						PM			
	PS						PS	ZR		NM
	ZR	PL	PM	PS	ZR	NS	NM	NL		
	NS	PM		ZR	NS					
	NM						NM			
	NL			NM	NL					

※ Each label means as follows:
 PL : Positive Large
 PM : Positive Medium
 PS : Positive Small
 ZR : Zero
 NS : Negative Small
 NM : Negative Medium
 NL : Negative Large

※ Same rules are valid for both $\Delta\phi$ and ΔV

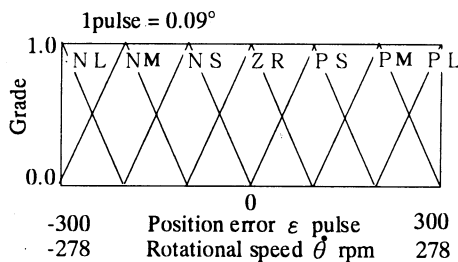


Fig.6 Membership functions for antecedent variables of $\varepsilon, \dot{\theta}$

関数に基づきファジィ推論の演算をハードウェアで実行する。パーソナルコンピュータはファジィ演算結果を A/D コンバータを介して取り込み、それらに定数 K_ϕ, K_V を乗じて制御入力の変化分 $\Delta\phi, \Delta V$ を計算し、

$$\phi_i = \phi_{i-1} + \Delta\phi_i, \quad V_i = V_{i-1} + \Delta V_i \quad (1)$$

のように i 番目のサンプリングタイムにおける制御入力 ϕ_i, V_i を計算する。なお $K_\varepsilon, K_\phi, K_\theta, K_V$ はそれぞれ $\varepsilon, \dot{\theta}, \Delta\phi, \Delta V$ に関するメンバーシップ関数 (図6, 図7 (a), (b) 参照) の台集合の範囲とファジィコントローラの入出力電圧範囲 $\pm 5V$ とを一致させるための規格化定数である。 ϕ, V が $\Delta\phi, \Delta V$ を加算されることにより最大または最小値を越えて $|\phi| > 90^\circ, |V| > 200V$ となった場合は、 $\phi = \pm 90^\circ, V = \pm 200V_{p-p}$ をモータに入力することにした。

3. ファジィ制御の有効性の実験的検討

3.1 ファジィルール

制御入力の変化分 $\Delta\phi, \Delta V$ の値を決定するためには表1に示すファジィルールを両者共通に用いる⁷⁾。表中欄が空白の部分はルールが存在せず $\Delta\phi, \Delta V$ のファジィ演算結果は 0 となり、制御入力 ϕ, V は値をそのまま保持することになる。表1

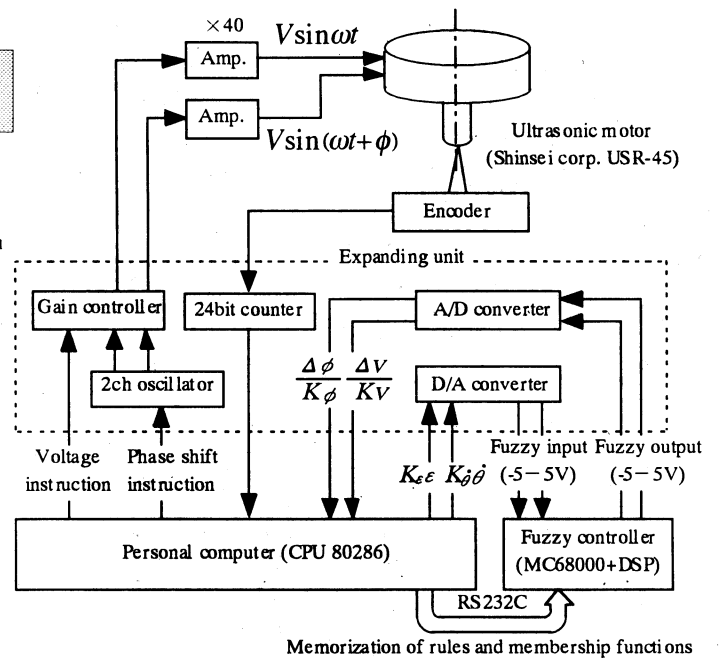
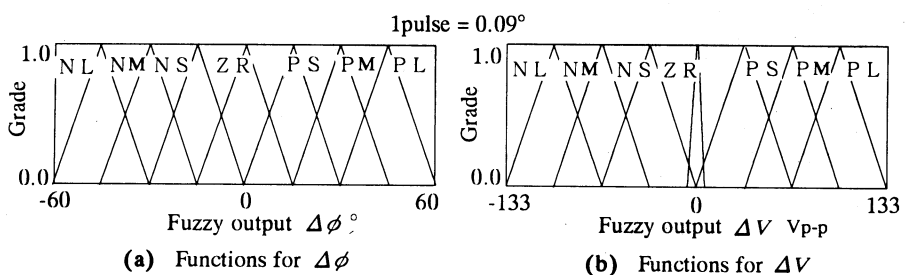


Fig.5 Components of fuzzy control system for ultrasonic motor



(a) Functions for $\Delta\phi$

(b) Functions for ΔV

Fig.7 Membership functions for consequent variables of $\Delta\phi, \Delta V$

に示すファジィルールは一次遅れ+むだ時間系の定性的性質を考慮して、その高速・精密な位置決めを目的として考案されたものであるが⁷⁾、本研究で扱う超音波モータも V を固定して ϕ を制御入力とした場合一次遅れ系で近似できることが示されており⁴⁾、 V に対する速度特性も図2 (c) に示すように不感帯があるものの大域的には線形性を有するので、このルールを採用した。

3.2 メンバーシップ関数とファジィ推論方法

ここでは目標値がエンコーダ 300パルス (27° に相当) の位置決めを行うことを考え、ファジィ推論における前件部変数のメンバーシップ関数としては図6に示すものを用いた。これらは隣りあう変数のメンバーシップ関数が高さ 0.5 で交わる三角形のものであり、ファジィ制御において標準的に用いられているものである⁷⁾。図7 (a), (b) に後件部変数のメンバーシップ関数を示す。 ΔV の ZR のメンバーシップ関数の形を他よりも幅が狭い尖鋭な三角形とし、目標値近傍で $|\Delta V|$ が 0V になりやすく、それよりも大きな値が出力されやすいように配慮した。これは V に関する速度特性に図2 (b) に示すように $0V < V < 45V_{p-p}$ においてロータが回転しない不感帯があるので、これに対応するバイアス電圧を与えるためである⁸⁾。なお $\dot{\theta}, \Delta\phi, \Delta V$ に対するメンバーシップ関数の台集合の範囲については、高速・精密な位置決めが行えるように応答結果を参照し

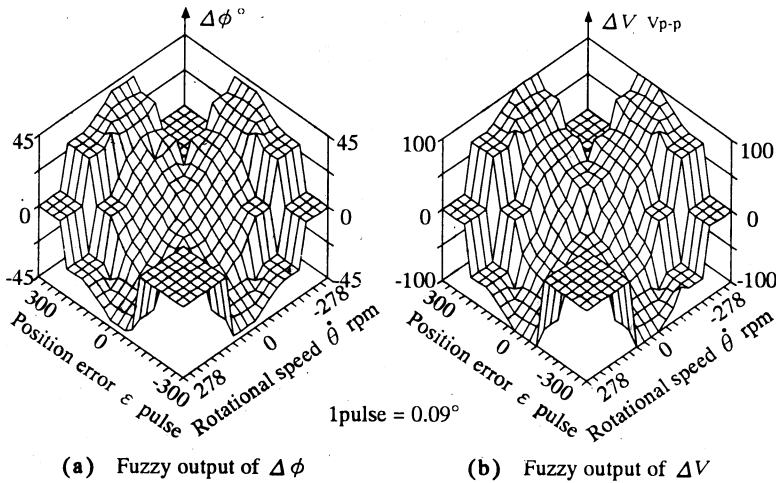


Fig. 8 Relationship between ε , $\dot{\theta}$ and $\Delta\phi$, ΔV

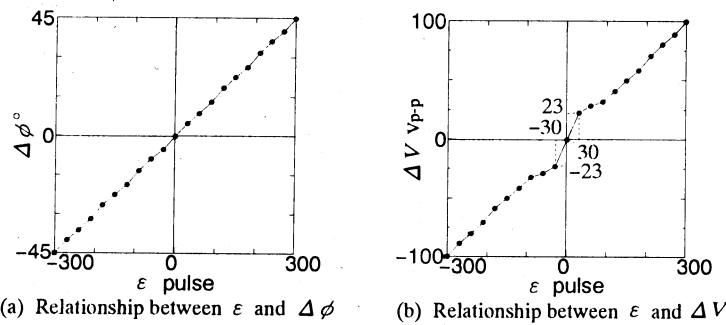


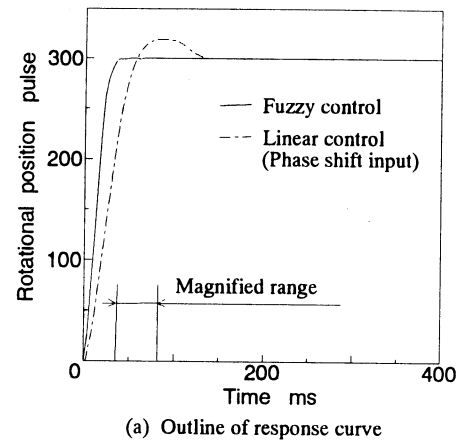
Fig. 9 Relationship between ε and $\Delta\phi$, ΔV in the case of $\dot{\theta}=0$

ながら規格化定数を試行錯誤的に変化させることにより、調整を行った⁷⁾。

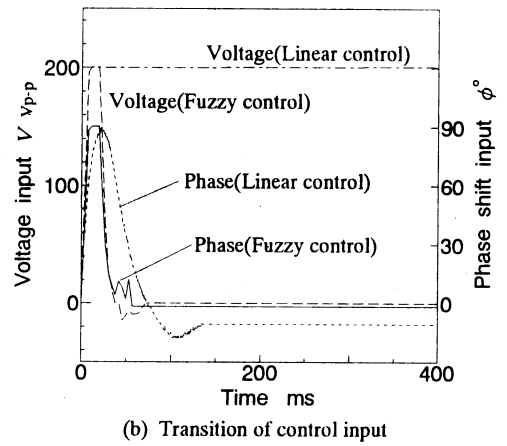
ファジィコントローラは推論方法として min-max-重心法¹⁰⁾を採用している。 ε , $\dot{\theta}$ を変化させて表1に示すルールおよび図6, 図7(a), (b)に示すメンバーシップ関数に基づいて $\Delta\phi$, ΔV の値をファジィ推論演算した結果を図8(a), (b)に示す。 $|\varepsilon|$ が大きき場合 $\dot{\theta}$ の値によらず $\Delta\phi$, ΔV は同一符号をとり(ただし零も含める), 式(1)に従って $|\phi|$, $|V|$ は最大値 90° , $200V_{p-p}$ まで速やかに増加する。このことは線形制御における等価的な位置ゲインが大きく、その速度ゲインが零であることを意味し、目標値近傍までの粗動域において制動が効きにくい。また $|\varepsilon|$ が小さく $|\dot{\theta}|$ が大きき場合は、 $\Delta\phi$, ΔV は $\dot{\theta}$ と符号が逆な大きな値をとる。このことは等価的な速度ゲインが大ききことを意味し、目標値近傍で制動が強く効く。これらより線形制御に比べて立上がり速く、行き過ぎ量が少ない位置決め応答が得られることが予想される。図8(a), (b)の $\dot{\theta}=0$ の平面における ε と $\Delta\phi$, ΔV の関係を図9(a), (b)に示す。 $\dot{\theta}=0$ で ε が小さい目標値近傍において、 $\Delta\phi$ は ε に対して線形な関係を有しており、 ΔV は ε に対する変化率が大きく $|\varepsilon| < 30$ パルスにおいて擬似的に $\pm 23V$ のバイアス電圧が設けられている。このことと図2(a)~(c)で示した速度特性とを考えあわせると、目標値近傍で ϕ を制御入力としたロータの微動が可能になり高い位置決め精度が得られることが予想される。

3.3 位置決め応答結果および線形制御との比較

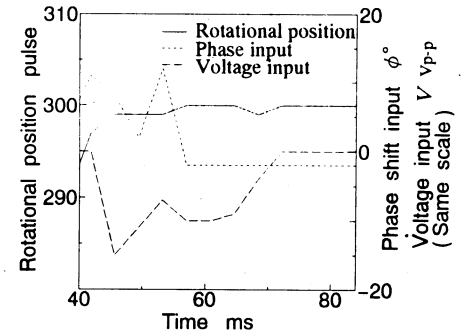
図10(a)にファジィ制御系による位置決め応答結果を示し、



(a) Outline of response curve



(b) Transition of control input



(c) Magnified response curve of fuzzy control near command position

Fig. 10 Response curve of motor in the case of command 300 pulse

図10(b)にその際の制御入力 ϕ , V の時間推移を示す。また位相差入力・速度出力系を一次遅れ要素で近似し、3極が

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

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

になるような積分補償を用いた線形制御系を構成して位置決めを行った結果を図中にあわせて示す⁴⁾。ファジィ制御を行う場合粗動域において制御入力 ϕ , V は最大値 90° , $200V_{p-p}$ に近い値をとり、線形制御を行う場合に比べて応答の立上がりが速い。また目標値近傍に達してから ϕ , V は速やかに零付近まで減少し、線形制御に比べて行き過ぎ量が小さく、整定時間が速い応答が実現されている。これらのファジィ制御を用いた応答の特長は ε , $\dot{\theta}$ に対して $\Delta\phi$, ΔV が図8(a), (b)に示したよう

Table 2 Comparison between fuzzy control and linear control

	Rise time ms	Overshoot pulse	Settling time ms	Steady-state error pulse
Fuzzy control	20.7	0	72.2	±1
Linear control	38.1	19	134.6	±1

※ Each data is the average of 10 times measurements.

な非線形な関係を有することに起因している。

図10(c)にファジィ制御を行った場合の目標値近傍での回転角度と制御入力 ϕ 、 V を拡大して示す。ロータはエンコーダ1パルス程度の間欠的な微動を行っており、定常偏差が無い位置決めが実現されている。これは本制御法は式(1)で示したように $\Delta\phi$ 、 ΔV をサンプリングタイムごとに計算して ϕ 、 V に加算するため、位置偏差がある限り $|\phi|$ 、 $|V|$ は増加することになり、線形制御における積分補償と同等の機能を有しているためである。以上述べてきたファジィ制御による応答と線形制御による応答を比較した結果を表2にまとめて示す。

4. 摩耗の低減効果の検証

ファジィ制御を適用することにより図10(b)に示すように目標値近傍において V は約0Vとなり、ステータの振幅が減少するため、 $V = 200V_{p-p}$ をモータに入力し続ける線形制御に比べてライニング材の損耗が少ないことが期待される。本章ではこのことを実験的に検証した。

ファジィ制御を用いて10秒間隔で1万回の目標値300パルスの位置決めを未使用のモータに行わせた。また同様の操作を線形制御を適用して行った。これら2つのモータを分解し、ライニング材の表面を図11(a)に示す条件で顕微鏡観察した結果を図11(b)に示す¹¹⁾¹²⁾。なおライニング材の材質はテフロン系の樹脂(住友化学製、商品名エコノール)である。ファジィ制御を適用した場合、および線形制御を適用した場合ともに、ライニング材の表面には外縁部に円周方向に沿ってステータとの接触・離脱により生じたスクラッチ痕(写真で他の部分よりも黒くなっている部分)が見られるが、その面積および損傷の程度はファジィ制御を適用した場合の方が線形制御の場合に比べてかなり小さいことがわかる。

触針式表面粗さ測定機(東京精密製、型式サーフコム300B)を用い、ライニング材表面の粗さ曲線を外縁部からロータの中心に向かって0.5mmの長さにおいて求めた。測定は各ロータにおいて場所を変えて10回行った。各曲線について十点平均粗さ R_z を求めてそれらの平均値を計算した結果、ファジィ制御を用いたロータでは $0.8\mu m$ 、線形制御を用いたロータでは $1.4\mu m$ であり、ファジィ制御を用いたライニング材のスクラッチ痕の深さが線形制御を用いたそれよりも浅いことが検証された。

以上の顕微鏡観察および表面粗さ測定の結果より、ファジィ制御を適用することによりライニング材の損耗が抑制され、モータの長寿命化が達成されることが確認できた。

5. 結 言

進行波型超音波モータをファジィコントローラを用いて位相差、電圧の2入力での制御し、高速、精密かつライニング材の損

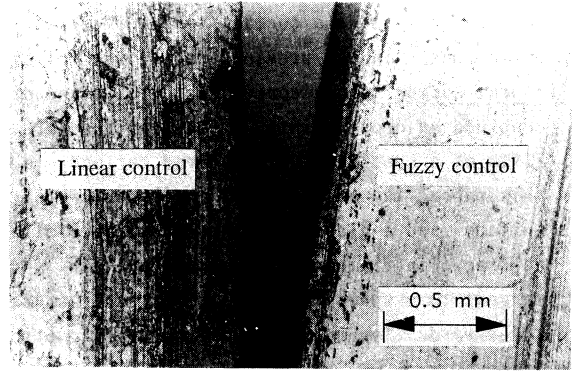
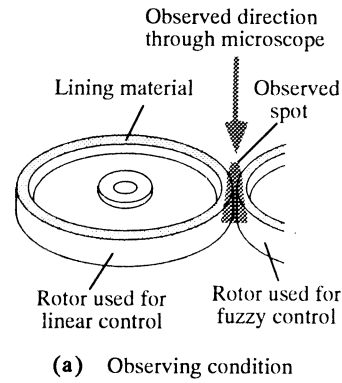


Fig.11 Result of microscope observation of lining material

耗の少ない位置決めを達成した。以下に結果をまとめる。

- (1) エンコーダの分解能までの高い位置決め精度を有し、位相差のみを制御入力とする線形制御に比べて立上がり時間が約20msと短く、行き過ぎ量が小さく、整定時間が短い位置決めを達成した。
- (2) 目標値近傍においてステータの振幅が減少するため、線形制御に比べてライニング材の損耗を抑制することができることを顕微鏡観察により実験的に確認した。

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 Tech. Rep., 33, 5 (1987) 4.
- 3) T.Hatsuzawa, K.Toyoda and Y.Tanimura: Speed Control Characteristics and Digital Servosystem of a Circular Traveling Motor, Rev.Sci.Instrum., 57,11,(1986) 2886.
- 4) 青柳誠司, 小田高広, 神谷好承, 岡部佐規一: 超音波モータの高速・精密位置決め制御に関する研究, 精密工学会誌, 59, 2 (1993) 121.
- 5) 超音波モータ技術説明書, 新生工業, (1989) 1.
- 6) 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.
- 7) 菅野道夫: ファジィ制御, 日刊工業新聞社, (1988) 67.
- 8) コンパクトファジィコントローラFZ-3000取扱説明書, オムロン(株), (1989) 1.
- 9) 柳 栄一, 御手洗礼治: 超音波モータによる高精度位置決めシステム, 自動化技術, 24, 12 (1992) 76.
- 10) E.Mamdani: Advances in the Linguistic Synthesis of Fuzzy Controller, Int.J.Man-Machine Studies, 8, 6, (1976) 669.
- 11) 金沢 元, 月本貴之, 前野隆司, 三宅 明: 超音波モータのトライボロジー, トライボロジスト, 38, 3 (1993) 207.
- 12) 本田知己, 加藤康司: 進行波型超音波による摩擦駆動における摩擦摩耗の基本特性, トライボロジスト, 38, 8 (1993) 727.