

## 進行波型超音波モータの安定制御の研究

### On stable control of Traveling Wave Type Ultrasonic Motor

小谷 若菜<sup>†</sup>      史 小軍<sup>††</sup>      加藤 厚生<sup>†††</sup>  
Wakana Kotani      Xiaojun Shi      Atsuo Kato

**Abstract** Driving principle of a traveling wave type ultrasonic motors are different from those of the electoromagnetic motors. It has good characteristics of a simple structure ,large-torque at low speed and short start-stop times. As actuators for prosthetic arm, we propose to use it .But, it is not easy to control them, because they are generated heat by frictional motion between a stator and rotor . Then resonance frequency are changed to lower region with respect to rise of the temperature . For tracking resonance frequency change, we propose to use a phenomenon that phase difference between electric voltage and current wave is the same in resonance condition.

#### 1. はじめに

超音波モータは、1973 年にアメリカの IBM 社の H. V. Barth により原理が発表され、1981 年に日本の (株) 新生工業の指田<sup>1)</sup> によって実用化された。そのためか、日本での研究が最も活発である。このモータは、従来のモータとは異なり、圧電セラミクスを励振させステータ上に進行波を起こし、その上にロータを加圧接触させることにより駆動力を得ている。長所として、低回転・高トルク、小型で軽量、高応

答、保持力が強い、静粛、磁気に強いことなどが挙げられる。この特徴を生かし、現在ではキャノンの一眼レフカメラ EOS の自動焦点合わせ機構に使われているのをはじめ、東京都庁のブラインド（ロールスクリーン）や自動ドア、時計、紙送り機構、自動車のヘッドレストの自動調整機構、などに使用されている。<sup>2)</sup>

そこで、我々は超音波モータを義手のアクチュエータとして利用するための研究を続けている。<sup>3)</sup>

しかし、超音波モータは摩擦駆動であるため、モータ全体としての効率が低いことやモータ自身発熱し、そのため共振周波数が著しく変化して安定な出力が得られないこと、そして摩耗などによる耐久性の低さなどの問題がある。

<sup>†</sup> 愛知工業大学工学研究科電気電子工学専攻

<sup>††</sup> 愛知工業大学訪問研究員

<sup>†††</sup> 愛知工業大学電子工学科

本論文では、モータの基本特性、また安定に駆動するための制御回路の試作を行い、測定を行った。

2. 進行波型超音波モータの動作原理

2・1 基本構成

進行波型超音波モータ（㈱新生工業 USM-60）の構造を図 1 に示す。ステータの上面には 7 2 個の歯が刻まれ下面には 9 枚の圧電セラミックと三つの電極が貼られている。ロータは、ステータとの接触面に摩擦材（高分子プラスチック）が貼られている。ロータは、円盤状のゴムを介してディスクスプリングによって強くステータに押し付けられている。ディスクスプリングは、軸と回転を共にする構造を介して軸に連結されている。したがって、ロータの回転力が、ゴム、ディスクスプリング、出力軸へと伝達される機構が構成されている。

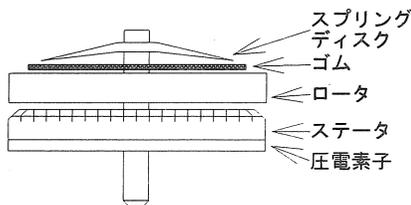


図 1 超音波モータの構成図

図 2 のようにステータの裏に貼り付けられた圧電セラミックは大きく 3 組に分けられていおり、2 組は駆動用、もう 1 組は検出用である。電極も 3 組に分けて圧電セラミック表面に貼られており、ステータと共に挟みこむ形になる。GND 端子はステータ自身となる。+（記号）、-（記号）はポーリング（永久分極）の方向を示す。つまり、正の電圧を印加した時には+記号の圧電セラミックは伸び、-の圧電セラミックは縮む。また、負の電圧を印加した時には、その逆である。このモータを駆動する時には、左右 2 組の圧電セラミックを励振すればよい。

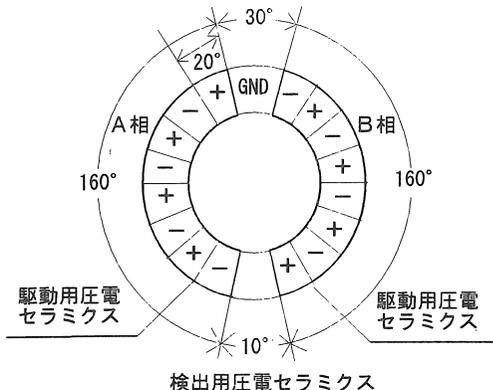


図 2 圧電セラミックス

2・2 動作原理

図 2 の 2 組の駆動用圧電セラミックスに 90° 位相の異なる正弦波電圧を印加すると、2 つの波はステータ上で合成され、図 3 のように進行波がおきる。この時、ステータ上にある一点を取ると、その点の軌跡は楕円となる。この上にロータを加圧接触させると、楕円運動がロータと接する部分では、回転方向の力と変位を持つため、ロータはその方向へとつつかれ、ロータはステータとの摩擦接触によって移動を始める。この際、ステータ上の進行波の進行方向とロータの移動方向とは逆になる。

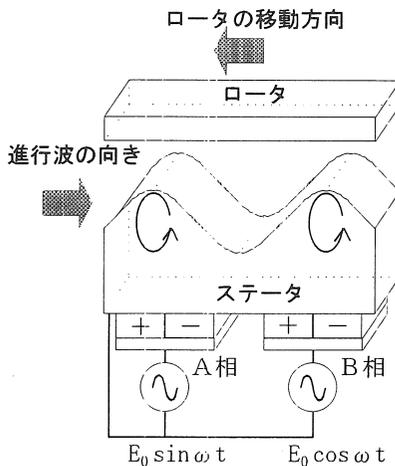


図 3 超音波モータの原理

### 3. 速度制御

進行波型超音波モータの速度制御は従来の電磁モータと比べて容易ではない。現在、速度制御として、A相、B相間の正弦波電圧の位相差を $+90^\circ$ 、 $-90^\circ$ と高速で切り替え速度調整を行なう正逆転PWM方式<sup>4)</sup>や駆動周波数を変化させ速度制御を行なう駆動周波数調整法<sup>5)</sup>や印加する駆動電圧の振幅を変化させる電圧振幅調整法などが考案されている。

超音波モータは通常、2組の駆動用圧電セラミックスつまりA相とB相に、印加する正弦波電圧の位相差は $90^\circ$ または $-90^\circ$ の状態で使用されている。しかし、我々は2相の圧電セラミックスに印加する電圧の位相差が $-90^\circ \sim +90^\circ$ と連続的に変化すると、表面の一点の軌跡も連続的に変化することに着目し、印加電圧の位相差を変化させ速度・トルクを制御する“位相差制御法”を採用している。<sup>3)</sup>

図4は、位相差制御回路の構成図である。超音波モータ (USM-60) を駆動する周波数は40kHzである。この1周期を1/256の位相精度で駆動することにし、システムクロックを $40\text{kHz} \times 256 = 10.24\text{MHz}$ とした。発振器として、PLL回路を製作し、分周比はコンピュータで出力出来るようにした。このことにより、システムクロックの周波数を調節可能とした。

位相シフト器は8bitダウンカウンタで構成され、一方(A)を固定位相用とし、プリセット値は192に固定した。もう一方(B)は、可変位相用として使用しており、位相差データセレクト信号によってプリセット値を127~255まで変化させることができる。システムクロックの256パルス分を1周期とするので、これにより、A相とB相の圧電セラミックスに印加する正弦波電圧の位相差を $-90^\circ \sim +90^\circ$ を1/128ステップで変化させることが可能となる。

各位相シフト器からの信号は、波形整形器と電圧増幅器で、p-p200Vに昇圧されモータの共振特性により正弦波となってモータに印加される。

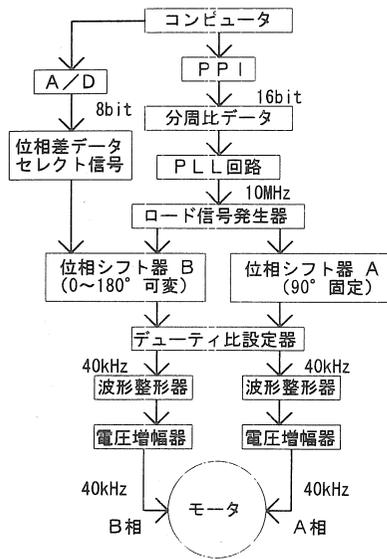


図4 位相差制御回路の構成図

図5は、2相の時間的位相差を $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$ と変化した時の表面の一点がどのような軌跡を描くかを示してある。図から、 $90^\circ$ の時がロータとステータとの接触面積が最も増え、効率よく駆動力が伝達されることが分かる。また、 $0^\circ$ のときロータと接触する点の軌跡は、下からステータを突き上げるような垂直方向の運動をするため、ロータを回転させることはない。

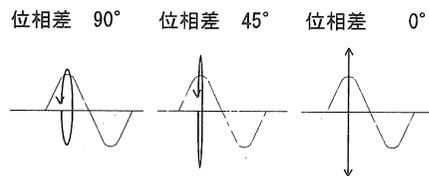


図5 軌跡の変化

ロータがステータの振動に完全に追従している場合はロータも振動するだけであるが、実際ステータ

の振動は速く、ロータはこの振動に追従することができない。つまり、ロータは少しの間だけステータから浮くことになり、静止トルクは小さくなる。それ以外の時は、接触点の描く軌跡はほぼ楕円である。その楕円は 2 相の時間的位相差の変化によって形状、速度、ステータとの接触面積が異なる。

図 6 は、圧電セラミックスに印加する 2 相正弦波の位相差が $-90^{\circ} \sim +90^{\circ}$  まで  $1/128$  ステップで連続的に変化した時の回転速度の変化を示してある。+、- は、時計回転、反時計回転を表している。特に位相差が  $0^{\circ}$  の時は前に述べたように、接触点の軌跡が上下運動をするだけなので、静止トルクは  $0.03[\text{Nm}]$  と非常に低く、シャフトを持って簡単にまわすことが出来る。このように位相差制御では、非常に簡単に速度や回転方向を変えたり、停止させることが出来る。

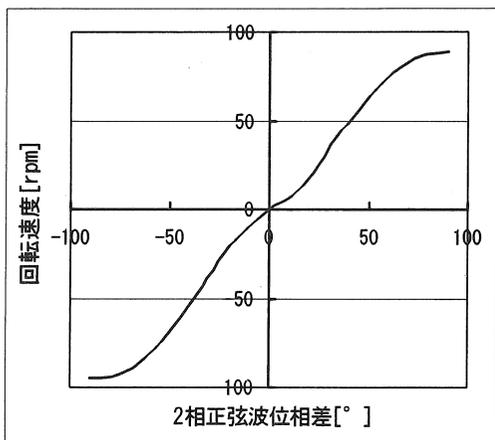


図 6 位相変化に対する回転速度特性

#### 4. 超音波モータの特性

##### 4・1 時間-温度変化

図 7 に駆動時間に対するステータの温度変化を示す。ステータにサーミスタを貼り、2 相正弦波位相差が  $90^{\circ}$ 、 $45^{\circ}$ 、 $0^{\circ}$  の時について温度測定を行った。

ステータの温度はどの位相差でも、30 分位で飽和することが分かる。

発熱の原因として、

- ・ロータとステータ間の摩擦熱
- ・ステータのたわみ熱

があげられる。摩擦熱は、ロータの回転速度が速い時、つまり位相差  $90^{\circ}$  のときに多く発生すると考えることができる。一方、たわみ熱は振幅の大きい時、つまり位相差  $0^{\circ}$  のときに多く発生すると考えることができる。

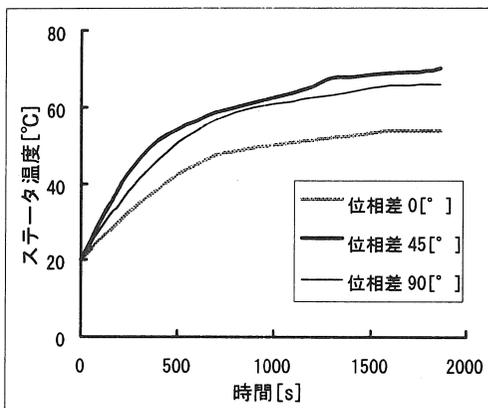


図 7 時間-位相差によるステータの温度変化

図 8 に 2 相正弦波位相差が  $90^{\circ}$  の時の駆動周波数に対する回転速度特性を示す。

同図は、ステータの温度が約  $48^{\circ}\text{C}$  一定の時に、駆動周波数を高い周波数から低い周波数へと変化させた場合のモータの回転速度である。モータの回転速度はステータの振動振幅に比例することから、モータの共振点付近において回転速度が最大となる。また、駆動周波数-回転速度特性の特徴として、駆動周波数を下げると徐々に回転速度は上がっていく。しかし、駆動周波数を共振点付近より下げると回転速度は急激に落ちていくことが分かる。このこ

とより、共振点より高い周波数を利用し制御を行うのが良いことが分かる。

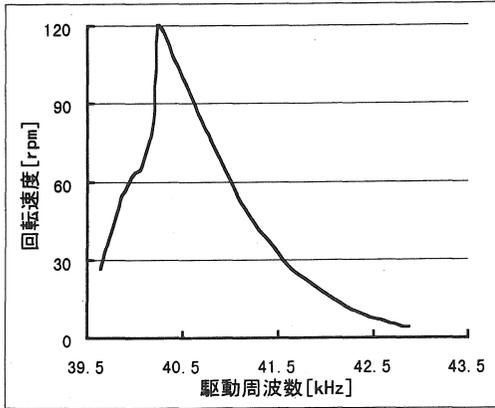


図8 駆動周波数に対する回転速度特性

図9に駆動周波数を上げていった時と下げていった時の回転速度特性を示す。どちらも2相正弦波位相差は90°、ステータ温度48°Cの時のものである。これから、モータはヒステリシスを持っていることが分かる。

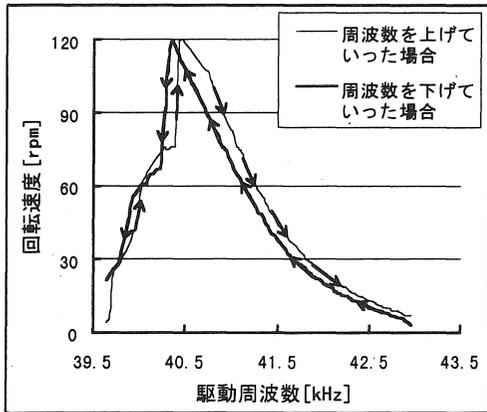


図9 ヒステリシス特性

4・4 温度—回転速度特性

図10に、温度に対する回転速度特性を示す。駆

動周波数を41.02kHz一定にして、モータを約30分間駆動した。温度が上昇するにつれて、回転速度も下がっていくのが分かる。これは、ステータの温度上昇により、共振周波数が変化したため、回転速度が落ちたと考えることが出来る。

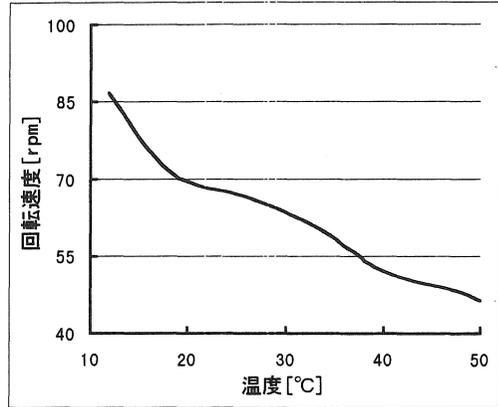


図10 ステータの温度上昇に対する回転速度

4・5 温度—共振周波数特性

図11に温度に対する共振周波数の変化を示す。同図から、温度上昇に従い、最適駆動周波数が低下していくのが分かる。これは、ステータの金属部固有周波数が温度に大きく依存するためである。

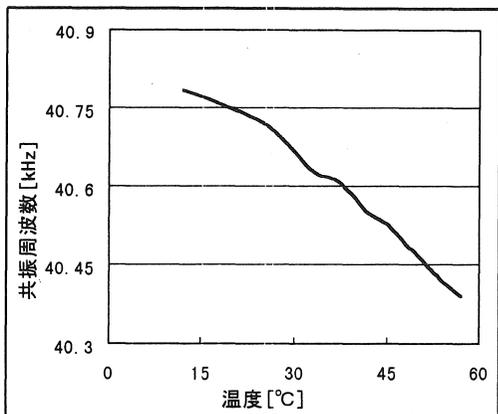


図11 温度に対する共振周波数の変化

図 10、11 から分かるように、モータを駆動する時に起こる発熱によって、モータの温度が上昇し、共振周波数が変化する。また、モータは周波数依存性が非常に高いので (図 8)、オープンループのまま安定に駆動させることは、無理であり、共振周波数を追従するための制御が必要となる。

## 5. 安定制御

一般的に共振周波数では、電圧と電流の位相差が  $0^\circ$  になる現象を利用し安定制御をする。

図 12 は、モータに印加する電圧とモータに流れる電流の位相差を検出する回路である。前に述べたように、コンピュータのデータをもとに 2 組の圧セラミックスに印加する正弦波電圧を作り、モータに印加する。共振状態を検出するための電圧信号は、固定位相側のモータに加える電圧とする。

また、電流信号は、同じように固定位相側に流れる電流に、直列に抵抗を入れ電圧に変換したものとす。検出した電圧と電流の信号を、位相比較器にいれ共振状態を検出する位相差データとしてコンピュータに取り込む。

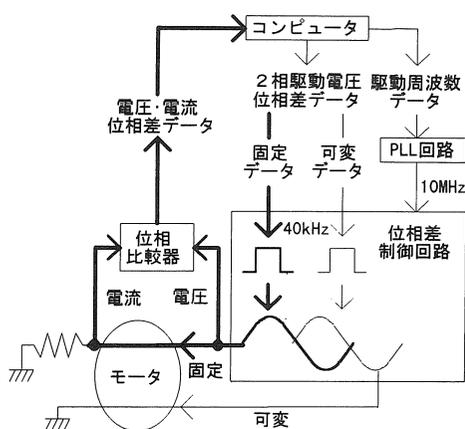


図 12 電圧・電流検出回路

図 13 に、図 12 の回路で行った駆動周波

数に対する電圧-電流間位相差と回転速度の関係を示す。2 相正弦波位相差は、 $90^\circ$  である。横軸に駆動周波数、主軸に電圧-電流間位相差データそして第二軸にその時の回転速度が示してある。図から、最大回転速度の時、印加電圧-電流間位相差は  $0^\circ$  に近づいているのが分かる。しかし、最高回転速度近辺、つまり共振周波数付近では、電圧-電流間位相差が不安定になるため、共振周波数より高い周波数で駆動すると良いことが分かる。

図 13 では、2 相正弦波位相差が  $90^\circ$  の場合についての測定データを示した。図 14 は、電圧・電流間位相差を  $90^\circ$ 、 $70^\circ$ 、 $50^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $0^\circ$ 、 $-30^\circ$ 、 $-50^\circ$ 、 $70^\circ$ 、 $90^\circ$  にし、駆動周波数を  $43.5\text{kHz} \sim 39.5\text{kHz}$  と変化させた時の回転速度と電圧-電流間位相差である。各位相とも最高回転速度の時に電圧-電流間位相差が  $0^\circ$  に近づいている。

図 14 の実験結果をもとにして、最適駆動周波数追従制御を行う。安定制御回路として、図 12 で用いた測定システムを利用する。(図 15)

図 16 は、安定制御を行った場合と行っていない場合の温度に対する回転速度の変化である。これより、安定制御を行った場合の方が温度変化に対しても安定に回転していることが分かる。

図 17 は、2 相正弦波が  $90^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $3^\circ$  で安定制御を行った時の、温度に対する回転速度である。図からほぼ安定しているといえる。また、 $-90^\circ \sim 0^\circ$  の時についても同様の結果が得られた。

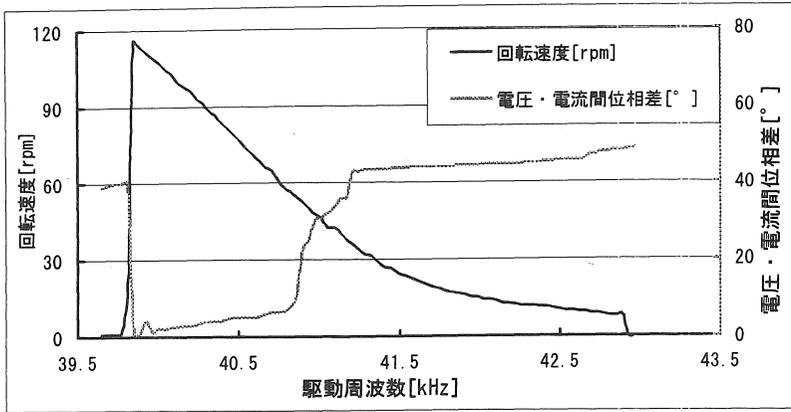


図 1 3 駆動周波数に対する回転速度と電圧・電流間位相差特性 1

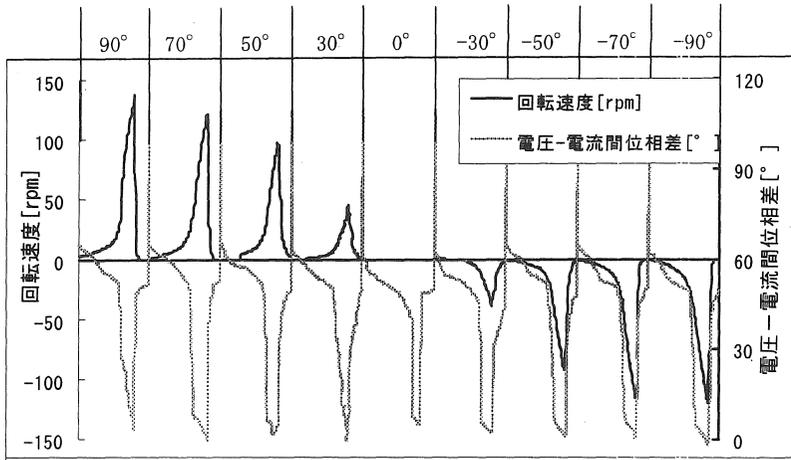


図 1 4 駆動周波数に対する回転速度と電圧・電流間位相差特性 2

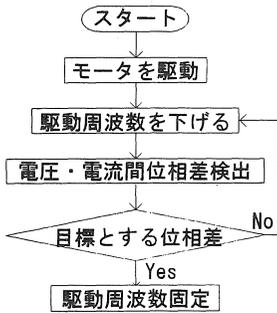


図 1 5 フローチャート

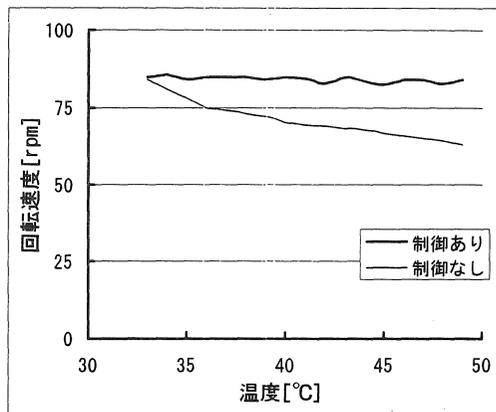


図 1 6 回転速度変化の比較

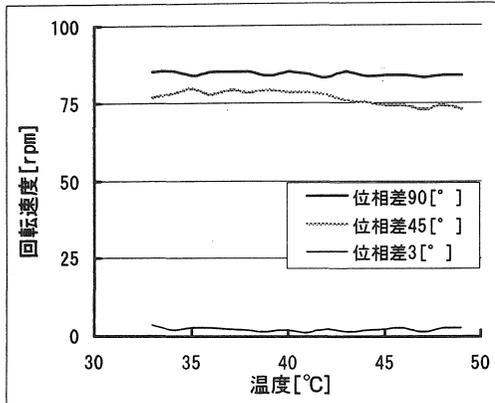


図17 安定制御を行った時の  
各位相差での温度変化に対する回転速度

## 5. まとめ

進行波型超音波モータの安定制御の研究を目的とし、そのために必要なモータの基本特性の測定システムを試作し、測定を行った。測定結果により、ステータの温度上昇による共振周波数の変化について確認をした。

また、共振状態における電圧と電流の関係に基づき、コンピュータを用いてステータの温度変化に対する共振周波数の変化を補償する回路（安定制御）を試作し、安定に動作することを確認した。さらに、従来の安定制御は2組の圧電セラミックスに印加する正弦波電圧の位相差が、 $-90^\circ$  から  $+90^\circ$  の状態で行うものが大多数を占めるが、 $-90^\circ \sim +90^\circ$  迄変化

させた時にも、本制御が有効であることを確認した。

- ロータとステータの加圧力のばらつきによる共振周波数・最高回転速度のばらつき
- ロータやステータの表面上の傷による共振周波数、最高回転速度のばらつき
- ロータとステータが常に加圧接触されている独特の構造をもつため静止トルクが非常に高いので、起動時に最適駆動周波数を与えてもスムーズに駆動しない場合がある

など、実際に駆動するにあたっての問題点も多い。

## 参考文献

- 1) 指田年生；“超音波モータの試作”，応用物理, 51(6)，713/720, 1982.
- 2) 史小軍他；“超音波モータ及び応用展望”，愛知工業大学”研究報告”，31, 13/20, 1996.
- 3) 加藤厚生他”，位相差制御による超音波モータのコンプライアント動作”，計測自動制御学会論文集, 27(11), 1290/1295, 1991.
- 4) 西堀賢司他；“ロボット用超音波モータの速度制御”，日本機学会論文集(C編), 57(538), 166/170, (1991).
- 5) 秋山勇治；“屈曲波振動型超音波モータの各種速度制御法式の検討”，電気学会回転機研究会資料, Vol. RM-89, No. 8, 25/33, (1989).

(受理 平成9年3月21日)