

# 球面超音波モータのための球面ロータの開発

## Development of spherical rotor of spherical ultrasonic motor

代表研究者 東京農工大学工学部助教授 遠山 茂樹

Associate Prof., Tokyo A&T Univ.

TOYAMA Shigeki

共同研究者 東京大学工学部教授 高野 政晴

Prof., Tokyo Univ.

TAKANO Masaharu

共同研究者 東京農工大学工学部教授 永井 正夫

Prof., Tokyo A&T Univ.

NAGAI Masao

**Abstract** — The purpose of this research is to develop a multi degree of freedom spherical ultrasonic motor(*SUM*). The *SUM* has many different characteristics from traditional electromagnetic motor. Firstly, the *SUM* outputs high torque during low speed driving and doesn't need reduction gear. This is an important factor to reduce the size of joint. Secondly, the *SUM* has a few duty to design it. This factor advantage to compose a complex mechanism like a manipulator. So the *SUM* is optimum as actuator in the case of driving multi degree of freedom in a small space. Under this background, we developed a new actuator which has multi degree of freedom at one joint.

## 1 研究目的

産業の発展に伴い、様々な産業分野で高性能なアクチュエータへのニーズが高まってきた。アクチュエータに求められる性能としては多自由度・高精度・高トルク等があるが、一方で他の機器に組み込まれて使われることが多いため小型で軽量であることも重要な要素となってきた。従来の電磁式のアクチュエータを用いて多自由度の機構を構成しようとすると、複数の一自由度アクチュエータと複雑な伝達機構を組み合わせなければならなかった。このため、多自由度機構全体では大型で重いものになってしまう上、いくつもの伝達機構を用いるため、機構自体の弾性変形や機構的なガタの影響も無視できなかった。

こういった問題を解決するためには一関節で多自由度の駆動ができ、伝達機構を用いずに出力が取り出せるアクチュエータが必要となってくる。本研究では、進行

波型の超音波モータを用いて多自由度での駆動を可能にしたアクチュエータを開発したので報告する。超音波モータは摩擦駆動のモータである。そのため、駆動子であるステータと非駆動子であるロータの接する部分について考察をすることは超音波モータのアクチュエータとしての性能を向上させるためには非常に重要である。本研究では、この点に着目しロータ表面の材質について考察を行い、作成したロータを用いてモータを組み、特性評価を行った。

## 2 研究経過

### 2.1 ロータ材質の検討

ロータの材質については次のような条件を有することが好ましいとされている。

- ステータ表面に均一な圧力で接触できること。

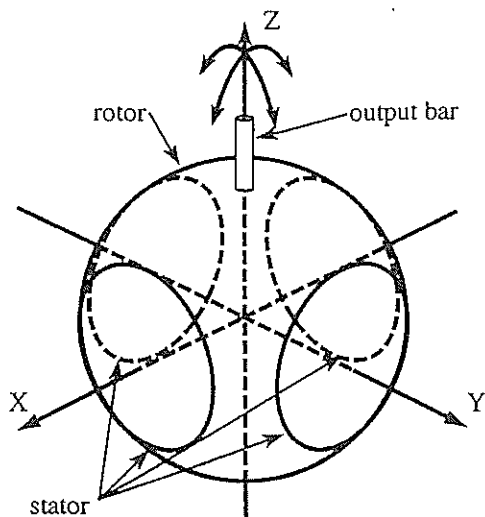


Fig. 1: structure of Spherical ultrasonic motor

- ステータの表面波の波頭の近くに  $1/8 \sim 1/4\lambda$  の領域で密着し、他には接触しない程度の弾性を有すること。
- できればライニング材の垂直方向ヤング率に対して接線方向ヤング率が高いこと。
- 摩擦係数が大きいこと。
- 品質係数 (Q) が高いこと。

本研究においては、以前から本研究室で用いていたものも含め次の4種類のタイプのロータについて比較検討を行なった。

1. アルミニウム (ライニング材無し)
2. アルミニウム (エコノールをラミネート)
3. ポリカーボネイト
4. アクリル

1. アルミニウム (ライニング材無し) のロータの場合は全く回転しなかった。本来ライニング材は、ロータの耐摩耗・摩擦係数向上のためにロータ側に貼付けられるものである。1. の条件のロータはこの点での性能が欠けていたために回転しなかったものと考えられる。

2. のライニング材としてエコノールをラミネートしたロータの場合、平面型のモータではある程度の性能が確認できたが、球面型のモータではあまり良好な特性は得られなかった。これはアルミ球

自身の重みのため、ロータの中心が本来の原点位置からずれてしまい各ステータに片当たりが生じてしまったためであると考えられる。

4. のアクリル球を用いたときは材質が脆すぎたためにロータ表面にステータの振動が原因と見られるクラックが生じてしまい、このクラックとステータの引っ掛りによって停止してしまう現象が見られた。

3. のポリカーボネイト球を用いたときが最も安定した回転が得られた。先に述べたロータ材に求められる材質の条件とアクリル球で見られたような現象を考えるとロータ材にはやはり多少の弾性を持った材質の方が適しているという結論を得た。

### 3 研究の成果

前項までの研究の成果として、実際に組立てたモータの特性評価を行った。実験はモータとしての基本特性を把握するための電圧-回転数特性、位相差-回転数特性、周波数-回転数特性、回転数-トルク特性の測定及出力軸の軌跡制御を行った。軌跡制御は、コンピュータに波形発生ボードをインストールして行った。また、超音波モータは、長時間駆動していると発熱して、ステータの機械的な性質が変化し、共振周波数が変化してしまうので、位置の制御は位相差をパラメータとして行った。

#### 3.1 回転数特性

電圧、位相差、周波数の各パラメータを変化させたときの測定結果をFig.2、3、4に示す。回転数の測定は、パソコンのタイマーで一定時間ロータを回転させたときの出力軸の回転角をロータリーエンコーダで測定することにより行った。

Fig.2より、圧電体に印加する電圧が高い程、回転数が上がることが分かるが、あまり高い電圧をかけすぎると、振幅が大きくなりすぎて圧電体が破損することがあるため、今回は印加電圧の上限を200(V)とした。

Fig.3より、圧電体に印加する2つの定在波の位相差の変化に対して、回転数はほぼ正弦波状に変化することが分かる。

Fig.4より、圧電体に印加する2つの定在波の周波数変化に対する回転数の変化は共振周波数より低い帯域ではほとんど回転せず、共振周波数より高い帯域では多少共振点から離れても回転することがわかる。

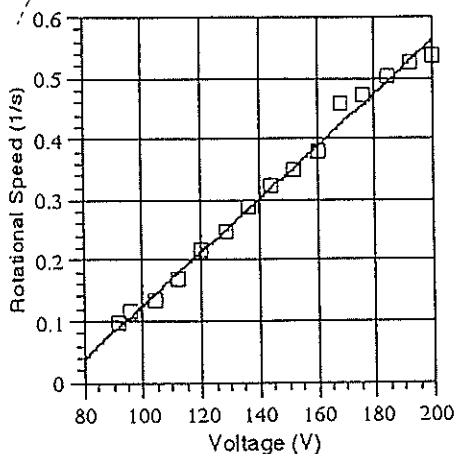


Fig. 2: input AC voltage - rotational speed characteristic

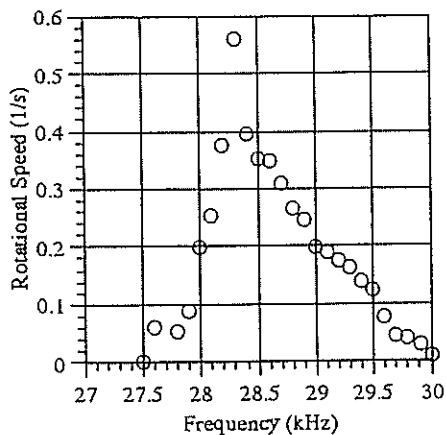


Fig. 3: driving frequency - rotational speed characteristic

### 3.2 回転数—トルク特性

トルクの測定は、出力軸に加えた外荷重と出力軸の長さの積を求めることで算出した。Fig.5は周波数、電圧、位相差を一定にした状態で出力軸に加える外荷重を順次変えていったときの回転数を測定した結果を示したものである。

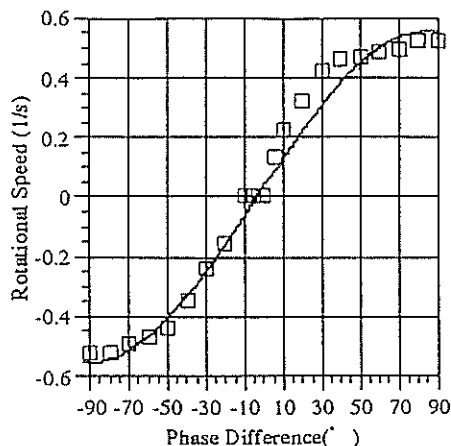


Fig. 4: phase difference - rotational speed characteristic

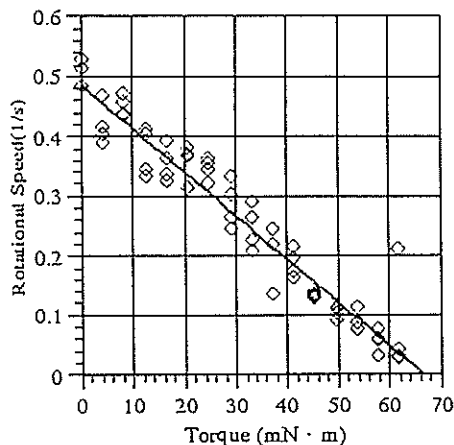


Fig. 5: torque - rotational speed characteristic

### 3.3 軌跡制御

軌跡の制御は出力軸の位置をロータリーエンコーダを応用した機構を用いて検出し、フィードバックした。制御は平面上の速度ベクトルで計算したものに補正をかけて入力角速度ベクトルとし、最終的に時間的位相差に変換し制御入力とした。先ず、現在位置を始点とし、x軸から $\theta$ の方向の大きさ $V_d$ の速度ベクトルを制御の基本値とし、これに出力軸の位置をフィードバックした。現在値(X, Y)の目標軌跡への垂直距離に比例した $\pi + \pi/2$ の方向のベクトルを $V_f$ とし、制御入力を $V_{in} = V_d + V_f$ とした。(Fig.6参照)さらに、 $V_{in}$ を補正して角速度ベクトルにし2対のステータで発生させる角速度ベクトルに分解して、最終的に時間的位相差に変換し、ステー

タへ入力した。

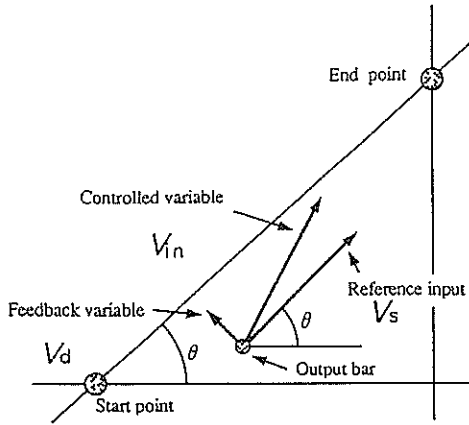


Fig. 6: control trace

Fig.7, 8、に実際に制御を行った結果を示す。これらのグラフを見ると右下に向かって移動するときプロットの幅が狭くなっているが、これは二つのステータの性能のバラツキに因るものである。なお今回はコンピュータの処理速度が不十分であったため、各頂点で出力軸が目標座標に到達したかどうかの判断は、2(mm)の精度で行っている。

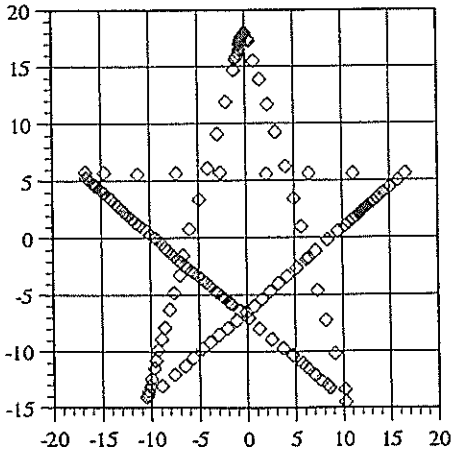


Fig. 7: star

#### 4 今後の課題と発展

多自由度駆動のできるアクチュエータとして球面のステータと球状のロータで構成される球面超音波モータを開発し、その動作の確認をした。しかしアクチュエータとしては未完成な部分が多く

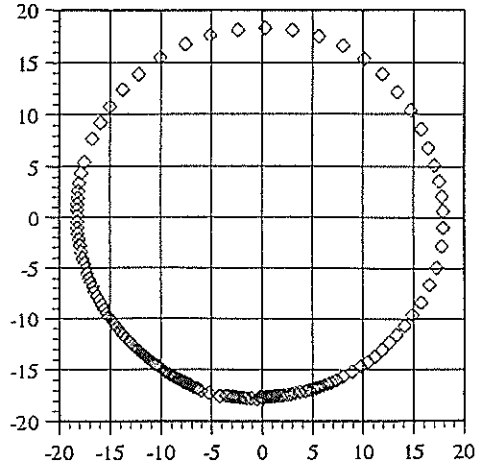


Fig. 8: circle

の課題がある。最も大きな問題はトルク不足である。現在は500~600 g・cm程度のトルクが出せるが、ロボット等の関節に用いるような場合には倍程度のトルクが必要である。今回はロータの材質の検討を行ったが、これからはステータの形状・圧電素子の電気的な性質等の面から改良をしていく必要がある。今回開発したモータは二自由度での駆動制御が行えるが、実際には駆動している最中にFig.1のステータ中心が存在する面に垂直な方向の回転ベクトル成分が発生し、三自由度の動きをしている。現在の構造ではこの三自由度目の動作の制御ができないので、何らかの方法で制御しなければならない。これらの球面超音波モータ自体の改良と平行して、超小型マニピュレータなどの応用例についても研究をしていく予定である。

#### 5 発表論文リスト

- 1995 IEEE Multi degree of freedom spherical ultrasonic motor, vol.3,2935-2940
- 1995 ICAR'05 Control strategy of spherical ultrasonic motor