

多自由度超音波モータ

＝高機能高性能アクチュエータの実現を目指して＝

慶應義塾大学 前野 隆 司

Takashi Maeno

慶應義塾大学大学院 竹村 研治郎

Kenjiro Takemura

1. はじめに

近年、ロボットをはじめとする運動機構がより人間に近い空間で利用されるようになりつつある⁽¹⁾⁽²⁾。これに伴い、それらの駆動機構にはより複雑で人間親和性の高い動作の発現が期待されている。超音波モータにおいても、性能の向上に関する研究と並び、機能向上を目指した研究が盛んに行われている。そのひとつが多自由度超音波モータに関する研究⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾である。1つのモータで複数自由度の運動を実現できる多自由度超音波モータは、コンパクトで複雑かつ巧みな動作を生成できるロボットや機械システムを具現化するために極めて有効な研究課題である。

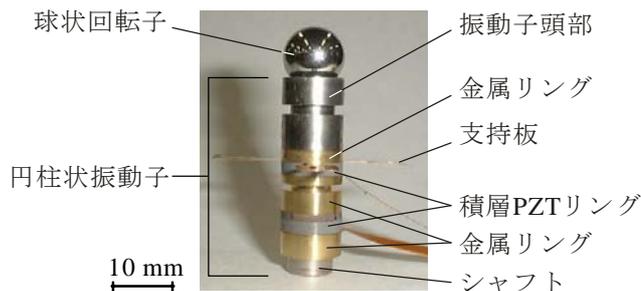
多自由度超音波モータにおいても、他の超音波モータと同様、高出力化および高耐久化は重要な課題である。ただし、特に医療用・人間親和機器用をターゲットにする場合には、高耐久化よりも高機能化の方が重要性が高い。例えば医療機器の場合、他の機器で代替できないような高度な機能・性能を有するならば、高価で使い捨てであってもかまわないと考えられるからである。このため、本稿では、筆者らが開発した多自由度超音波モータ⁽⁶⁾の高機能化・高性能化へのアプローチという文脈の中で高出力化にも触れる形で本モータの実用化に向けた現状を紹介する。

2. 高機能化へのアプローチ

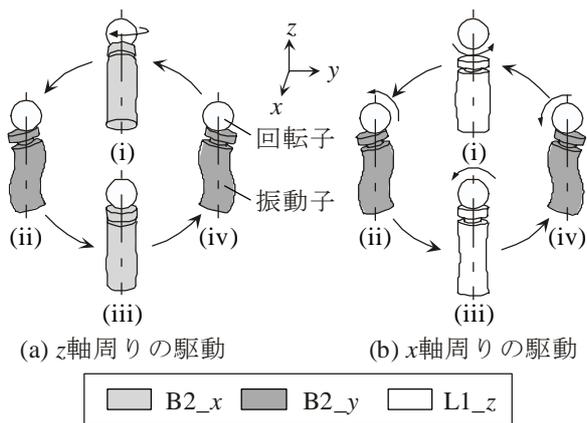
超音波モータは振動子と移動子(回転子, 直進子)から構成されており、振動子の振動エネルギーを、摩擦力を介して移動子の運動に変換する摩擦駆動モータである。進行波型超音波モータでは振動子の2つの相似形固有モードを、定在波型超音波モータで

は2つの非相似形固有モードを利用するのが一般的である。従来の1自由度超音波モータでは、2つの固有モードを時間的位相差 $\pi/2$ で組み合わせることによって、振動子表面にある一定軸周りの楕円運動を生成させ、移動子の1自由度運動を得ている。この考え方を拡張し、3つの固有モードを組み合わせることで楕円運動の回転軸を3次元空間内で任意に変化させれば、多自由度運動可能な超音波モータを実現することができると考えられる。そこで、筆者らは、振動子・回転子接触部での振動方向が直交座標系の座標軸に一致するような固有モード、すなわち、円柱状振動子の縦振動(z 軸方向)と2つの曲げ振動(x, y 軸方向)を利用した多自由度超音波モータを開発した。

第1図に筆者らが開発した多自由度超音波モータを示す。本モータは球状回転子と円柱状振動子から構成されており、回転子を任意の軸周りに回転駆動可能である。振動子は主に金属弾性体リングと積層PZTリング、シャフトから成り、ボルト締めランジュバン型振動子に準ずる構造である。回転子は、振動子頭部内に配置された永久磁石によって振動子に加圧接触されている。振動子・回転子接触部が z 軸方向に伸縮する縦振動1次モードおよび $x(y)$ 軸方向に振動する曲げ振動2次モードの固有振動数が約



第1図 多自由度超音波モータ



第2図 駆動原理

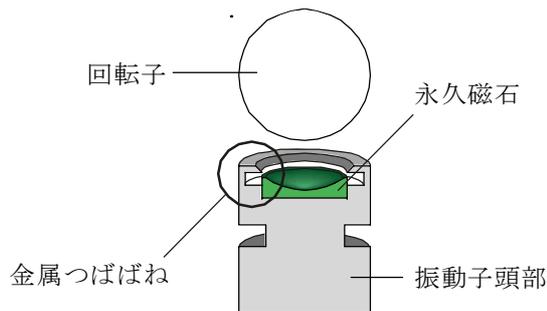
40 kHz で一致するように、有限要素法を用いて振動子形状を設計した。振動子の直径、高さ、および質量はそれぞれ 10 mm, 31 mm, および 16.9 g である。

第2図に本モータの駆動原理を示す。(a)は回転子をz軸周りに駆動する際の模式図である。x軸方向とy軸方向の曲げ振動を時間的位相差 $\pi/2$ で組み合わせると、振動子頭部は首振り運動し、回転子は摩擦力によってz軸周りに回転する。(b)は回転子をx軸周りに駆動する際の模式図である。z軸方向の縦振動とy軸方向の曲げ振動を組み合わせることによって、振動子頭部はx軸周りに回転し、回転子のx軸周りの回転運動が可能となる。曲げ振動の振動方向をx軸方向とすることによって、y軸周りの回転も可能である。さらに、3つの固有モードの振幅および時間的位相を適当に組み合わせることによって、回転子を任意の回転軸周りに駆動することができる。

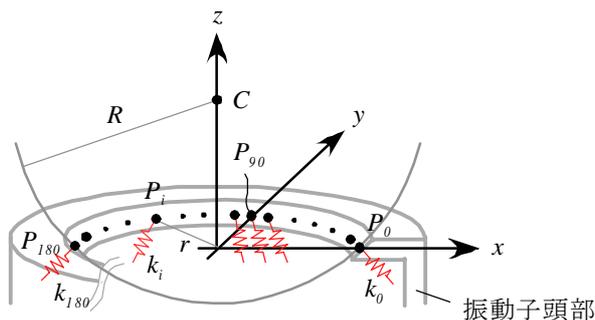
以上のように、本モータはひとつの振動子で多自由度の運動を生成できる。従来は3自由度の運動を生成するためには3つの超音波モータが必要であった⁽⁷⁾ことを勘案すると、単位体積あたりの機能は3倍に向上したといえる。したがって、我々のアプローチは、システム全体としてみれば、機能の重畳に基づく高出力化であるということもできよう。

3. 高性能化へのアプローチ

前述のように、超音波モータは摩擦駆動モータである。したがって、振動子・回転子間の接触部構造および接触状態が、出力や耐久性に大きく影響する。



第3図 接触部の金属つばばね構造



第4図 つばばね構造のモデル化

そのため、従来から超音波モータの接触状態に関する検討がなされてきた⁽⁸⁾⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。多自由度超音波モータにおいても、接触部構造および接触状態の理解は駆動特性把握のために重要である。以下に本モータの接触部構造および、数値計算モデルによる駆動特性の推定について述べる。

3.1 接触部構造

従来の超音波モータの駆動特性に関する研究により、振動子・回転子接触部には概して次のような特性が求められることが知られている。

- (1) 摩擦係数が大きいこと
- (2) 適当な弾性特性を有すること
- (3) 耐摩耗性に優れていること

本モータでは、これらの相反する条件をできるだけ満足する接触部構造として、第3図に示すような金属つばばね構造を採用した。樹脂摩擦材を用いた場合には上記(1)～(3)の条件を独立に設計することが困難であるのに対し、金属つばばね構造を採用することによって、少なくとも(1)(3)と(2)を分離して設計することが可能となる。

3.2 駆動特性の推定

本モータに限らず、これまでに報告されている多

自由度超音波モータは、第2図に示したように2つの固有モードのみを用いて駆動を行う場合には従来の超音波モータと同様な駆動方式である。しかし、3つの固有モードすべてを組み合わせると回転子を駆動する際の駆動状態（回転軸・回転数・トルク）は容易には予想できない。そこで、筆者らは、上述した金属つばね構造を有する振動子・回転子接触部を第4図のように離散的に配置した節点 P_i および線形ばね k_i をもちいてモデル化し、固有モードのいかなる組み合わせに対しても回転子の駆動状態を推定可能な数値計算法を提案した⁽¹¹⁾。計算手順は第5図のとおりである。

本手法により、固有モードの任意の組み合わせに対する回転子の回転軸・回転数・トルク・効率を知ることができる。つまり、摩擦係数 μ や振動子・回転子間の弾性特性などを変化させた際の、回転子の駆動特性の変化をシミュレーションすることが可能である。たとえば、本手法を利用すれば、振動子・回転子間の弾性特性と出力トルクとの非線形な特性をシミュレーションにより把握でき、所望の出力に対して適切なつばね構造を設計することができる。このことは、振動子・回転子間の摺動損失を最小限に抑え、耐久性を向上させることにつながると考えられる。

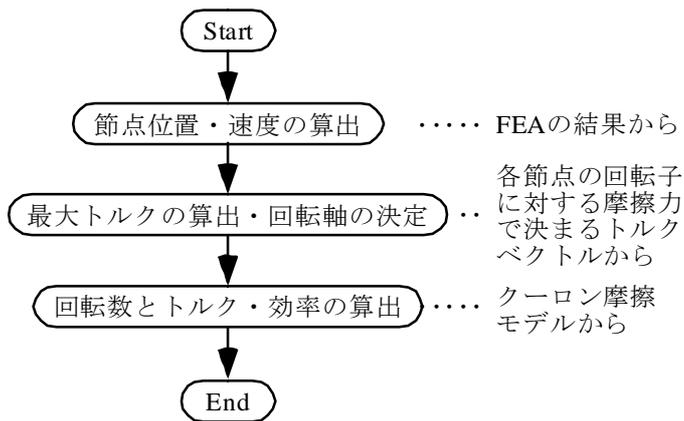
4. 駆動特性

多自由度超音波モータでは3つの固有モードを利用している。各固有モードを励振するために3つの交流信号が積層PZTリングへ入力される。つまり、本モータの独立な操作パラメータは、周波数、3つの電圧、2つの位相の合計6個である。

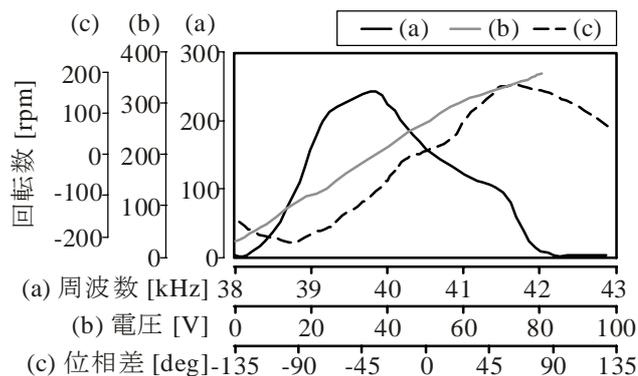
第6図に、縦振動とy軸方向の曲げ振動を組み合わせた時の操作パラメータと無負荷回転数の関係を示す。第7図には、縦振動とy軸方向の曲げ振動を組み合わせた時のトルクと回転数の関係を示す。なお、入力パラメータの基本設定は第1表のとおりである。第1表の条件の下、無負荷回転数は約250rpm、最大トルクは約7mNmであった。

ところで、超音波モータの最大トルク T_{max} は

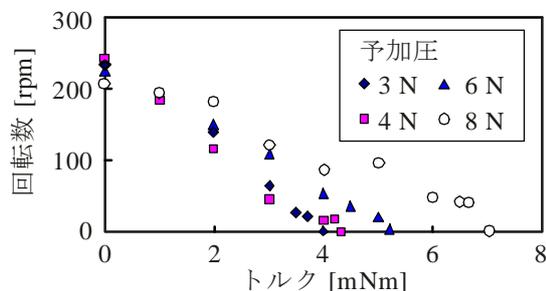
$$T_{max} = \mu N r \tag{1}$$



第5図 解析の流れ



第6図 パラメータと無負荷回転数

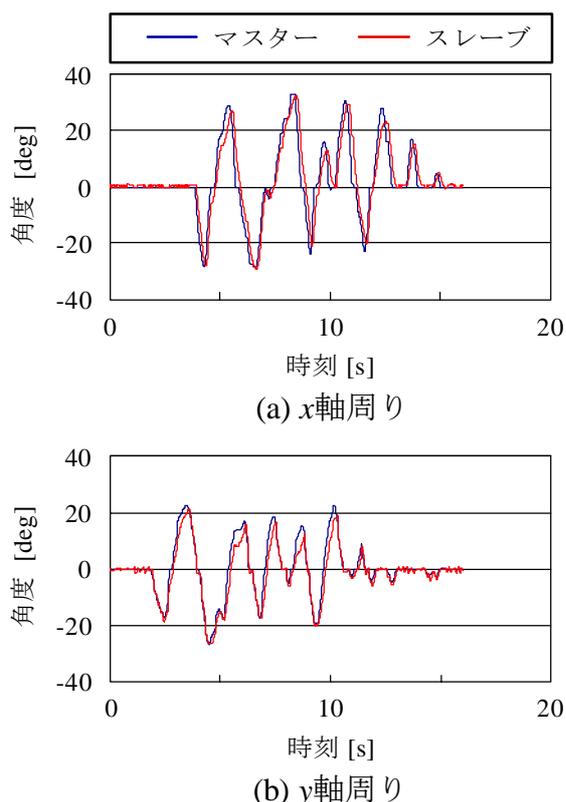


第7図 トルクと回転数の関係

第1表 パラメータの基本設定

| | 縦振動 | 曲げ振動 (y軸方向) |
|-----------|------|-------------|
| 電圧 [V] | 10 | 20 |
| 位相 [deg] | 0 | 90 |
| 周波数 [kHz] | 39.5 | |

によって概算できる。ただし、 μ は振動子・回転子間の摩擦係数、 N は振動子・回転子間予加圧、 r は接触部の半径である。たとえば、予加圧 N が4Nの場合、本モータが発生可能な最大トルク T_{max} は10mNm程度であると考えられる。第7図の結果はこの約45%を示している。したがって、3.2節で示し



第8図 マスター・スレーブ追従実験の結果

た数値計算手法の結果などを用いて金属つばね構造を工夫すれば、更なる高性能化を図ることができよう。

第8図に、ジョイスティックと本モータによってマスター・スレーブシステムを構築して行った追従実験結果の一例を示す。パラメータの設定は第2表に示すとおりである。操作パラメータは曲げ振動の電圧とし、回転子のxおよびy軸周りの角度の比例制御を行った。スレーブはマスターによく追従している。以上により、1つの振動子によって回転子の多自由度運動を生成・制御可能であることを示した。

5. おわりに

本稿では、筆者らが開発した多自由度超音波モータの高機能化および高性能化に対する技術的アプローチについて述べ、その中で高出力化および高耐久化についても触れた。また、本モータの駆動特性および制御実験の結果を示した。以上より、超音波モータの駆動原理を拡張することによって、電磁モータでは実現が難しい小型多自由度ダイレクト駆動の実現が可能であることを確認した。今後は、本モータの高機能性を生かし、小型多自由度マニピュレー

第2表 追従実験の基本設定

| | 縦振動 | 曲げ振動 (x軸方向) | 曲げ振動 (y軸方向) |
|-----------|------|----------------|----------------|
| 電圧 [V] | 12.5 | 0~25 | 0~25 |
| 位相 [deg] | 0 | 90, -90 | 90, -90 |
| 周波数 [kHz] | 40 | | |

タや能動内視鏡、手術支援ロボット等への応用展開を図ってゆく必要がある。

<参考文献>

- (1) <http://www.jp.aibo.com/>
- (2) <http://www.intuitivesurgical.com/>
- (3) R. Bansevicius : “Piezoelectric Multi-Degree-of-Freedom Actuator/Sensors”, Proc. 3rd Int. Conf. Motion and Vibration, K9-K15, 1996.
- (4) T. Amano, T. Ishii, K. Nakamura and S. Ueha : “An Ultrasonic Actuator with Multi-degree of Freedom Using Bending and longitudinal Vibrations of a Single Stator”, Proc. IEEE Ultrasonics Symp., 1, 667-670, 1998.
- (5) 青柳学, 富川義朗, 高野剛浩 : “多重モード円環振動子を用いた多自由度超音波モータの構成”, 日本音響学会春季講演論文集(II), 979-980, 1999.
- (6) K. Takemura and T. Maeno : “Characteristics of an Ultrasonic motor Capable of Generating a Multi-Degrees of Freedom Motion”, Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, 3660-3665, 2000.
- (7) 遠山茂樹, 張国強, 杉谷滋, 長谷川慎一, 中村和人, 宮谷保太郎 : 超音波モータを用いたロボット用アクチュエータの開発 -第2報 球面超音波モータの試作-, 日本ロボット学会誌, 13-2, 235-241, 1995.
- (8) 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, 40-46, 1988.
- (9) T. Maeno, T. Tsukimoto and A. Miyake : “Finite Element Analysis of the Rotor/Stator Contact in a Ring-type Ultrasonic Motor”, IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control, 39, 668-674, 1992.
- (10) 前野隆司 : “固着・滑りを考慮した超音波モータの接触解析”, 日本音響学会誌, 54-4, 305-311, 1998.
- (11) 竹村研治郎, 前野隆司 : “多自由度超音波モータの駆動状態推定法”, 日本音響学会誌, 57-7, 445-452, 2001.