

# 複数の回転子を有する多自由度超音波モータの開発

## Development of a Multi-Degree-of-Freedom Ultrasonic Motor with Multiple Rotors

○金杉 英明 (慶大)

正 前野 隆司 (慶大)

Hideaki KANASUGI, Keio University  
Takashi MAENO, Keio University

The purpose of this research is to develop the multi-degree-of-freedom ultrasonic motor that can independently rotate multiple spherical rotors with a single stator. First, we proposed driving principle of the motor that has two spherical rotors. We can drive two rotors independently, by combining the first and second longitudinal vibration modes, first and second twist vibration modes, and odd number bending vibration mode of the rectangular plate. We designed and produced the stator with the use of finite element method. By measuring vibration characteristics and drive performance, we confirmed the effectiveness of proposed driving principle.

**Key Words:** Ultrasonic Motor, Multi-Degree-of-Freedom

### 1. 研究背景・目的

近年、機械システムの使用される領域は多岐にわたり、複雑な動作の生成が要求されている。複雑な動作を実現するには、多自由度駆動部を有する運動機構が必要である。このため、多自由度を有する軽量・小型アクチュエータの開発が求められている。そこで、単一モータで多自由度運動を実現可能であり、低速高トルクという特徴により減速器を必要としない超音波モータが注目されている。また、設計自由度が高いことから、さまざまな形状の多自由度超音波モータの開発が行われてきた。しかし、従来の多自由度超音波モータは、1つもしくは複数の振動子を用いて、1つの回転子を回転させるものであった[1][2]。さらに、形状が複雑であるため、小型化が困難であるという課題も有している。ロボットハンドのような複雑かつ多自由度の運動機構に適用するためには、複数の多自由度超音波モータを配置する必要がある。したがって、機構の小型化には限界があった。単一振動子により複数の回転子を駆動することにより、複雑かつ多自由度の運動機構の小型・軽量化が図れると考えられる。このため、本研究では、図1に示すように、単一振動子により、2軸まわりに回転可能な2つの球状回転子を独立に駆動する多自由度超音波モータの開発を行う。

### 2. 駆動原理の提案

超音波モータとは、振動子に超音波領域の固有振動を励振し、摩擦力を介して回転子を駆動するアクチュエータである。固有振動数の一致した2つの固有振動モードを、 $\pi/2$ の位相差を持たせて励振することにより、楕円軌道を生成することができる。また、互いに直交する複数の固有振動モードを組み

合わせることで、任意の軸まわりに楕円軌道を生成可能である。楕円軌道上に球状回転子を接触させることにより、摩擦力により回転子を回転させる多自由度超音波モータが開発されている[2]。この原理を拡張し、振動子表面上の2点に楕円軌道を生成することにより、2つの球状回転子を駆動可能であると考えられる。しかし、固有振動数を一致させることが可能であり、振動子表面上の2点に任意の楕円軌道を生成し得る固有振動モードの組み合わせはない。そこで、本研究では、一様断面を有する板に生じる縦振動とねじり振動の2次モードの固有振動数が1次モードの2倍であることに着目して、駆動原理を提案した。用いる固有振動モードは、縦振動1次モード・2次モード、ねじり振動1次モード・2次モード、および奇数次の曲げ振動モードとした。ここで、縦振動1次モードとねじり振動1次モードの固有振動数は、それぞれ奇数次の曲げ振動モードの固有振動数と一致させる必要がある。これらの振動モードを振幅の比率を変化させて合成することにより、振動子表面上の2点に、同一平面内のさまざまな軌道を生成することができる。この2点に球状回転子を接触させることにより、2つの回転子を任意の軸まわりに独立に駆動することが可能となる。

縦振動1次モード・2次モードおよび奇数次の曲げ振動モードを合成した際のy軸まわりの駆動例を図2に示す。図2(a)は、奇数次の曲げ振動モードおよび縦振動2次モードを用いて、2つの回転子を同方向へ駆動する際の模式図である。2つの固有振動モードは、固有振動数の比が1:2となっている。このため、振動子表面上の2点はx-z平面内で、8の字の軌道上を同じ回転方向に運動する。これにより、振動子に接触した2つの回転子を、y軸まわりの同じ回転方向に駆動する。図

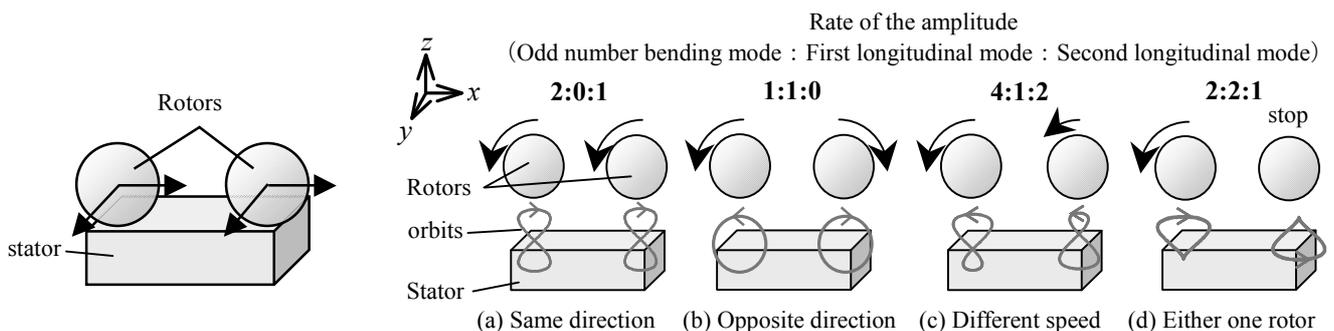


Fig.1 conceptual diagram

Fig.2 combination of the vibration modes

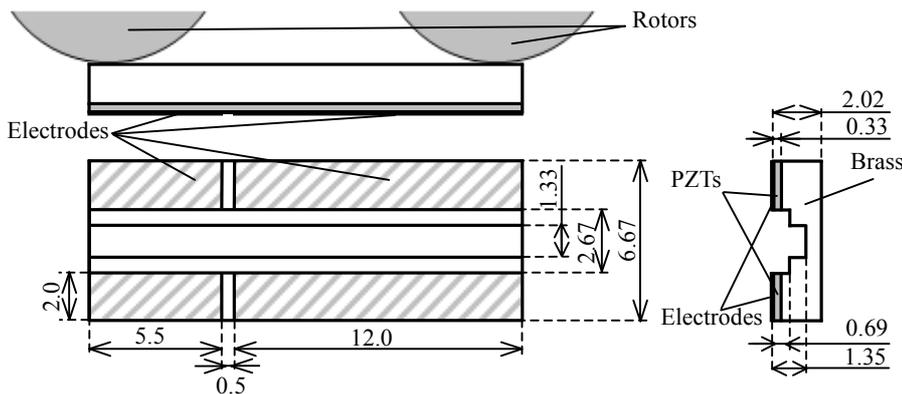


Fig.3 Figure of the stator and arrangement of the electrodes [mm]

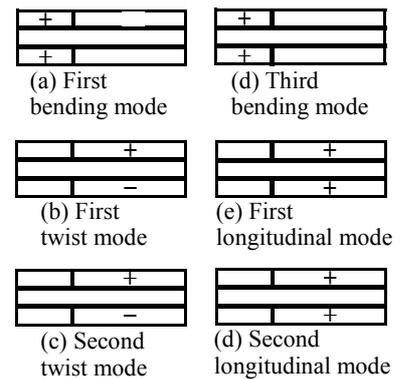


Fig.4 Input signal of the electrodes

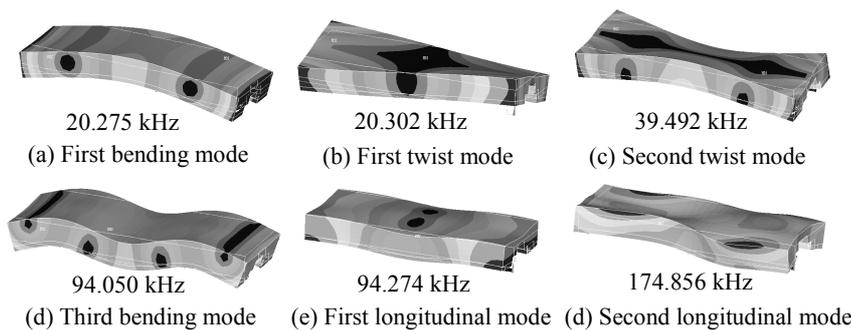


Fig.5 Vibration modes

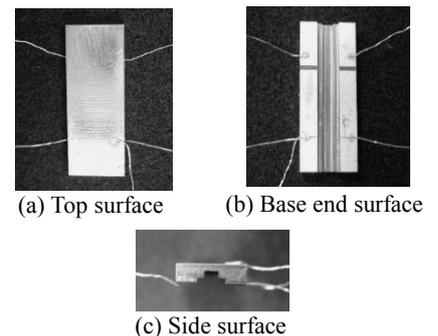


Fig.6 Stator

2(b)は、奇数次の曲げ振動モードおよび縦振動1次モードを用いて、2つの回転子を異方向へ駆動する際のモード図である。2つの固有振動モードを、 $\pi/2$ の時間的位相差を持たせて励振することにより、振動子表面上の2点はy軸まわりの異なる回転方向に楕円運動を行う。これにより、振動子に接触した2つの回転子を、y軸まわりの異なる回転方向に駆動する。3つの固有振動モードを振幅の比率を調節して組み合わせることにより、図2(c)のように2つの回転子を任意の異なる速度で駆動することや、図2(d)のように片方の回転子を静止させた状態で他方の回転子を駆動することも可能である。

同様に、ねじり振動1次モード・2次モードおよび奇数次の曲げ振動モードを用いることにより、x軸まわりの駆動も可能である。

### 3. 振動子の設計

提案する駆動原理を実現するためには、縦振動1次モードとねじり振動1次モードの固有振動数をそれぞれ奇数次の曲げ振動モードの固有振動数と一致させる必要がある。このため、有限要素法を用いて振動子の設計を行った。振動子の材料は黄銅とし、底面に振動を励起するための圧電素子を接着した。解析の結果決定した振動子形状を図3に示す。底面に固有振動数を調整するための溝を設けることにより、曲げ振動1次モードとねじり振動1次モード、および曲げ振動3次モードと縦振動1次モードの2組の固有振動数をそれぞれ一致させることを可能とした。

また、6つの振動モードを選択的に励振するために、圧電解析を行い、圧電素子の電極配置を決定した。決定した電極配置を図3に、各振動モードを励振する際の各電極への入力信号を図4にそれぞれ示す。この際、励振される振動モードと固有振動数の解析結果を図5に示す。図5より、曲げ振動1次モードとねじり振動1次モード、および曲げ振動3次モードと縦振動1次モードの2組の固有振動数の差はそれぞれ、27 Hz および 224 Hz と、十分小さいことがわかる。

### 4. 振動子の製作および駆動実験

設計した振動子を製作し、振動特性を測定して製作した振動子の評価を行った。測定の結果、加工誤差などの影響から、曲げ振動1次モードとねじり振動1次モード、および曲げ振動3次モードと縦振動1次モードの固有振動数の差は、それぞれ、約 800 Hz および約 2 kHz となってしまった。しかし、回転子との接触点の振動方向の測定結果より、所望の振動を選択的に励振可能であることが確認できた。

次に、回転子にベアリングを用いて、駆動実験を行った。今回製作した振動子は固有振動数のずれが大きいため、共振点付近で各振動モードを励起した。実験の結果、組み合わせる振動モードが2つの場合に関しては、提案した駆動原理が実現可能であることを確認した。ただし、固有振動数のずれが大きいため、3つの振動モードを組み合わせることはできなかった。今後、固有振動数のずれを考慮した再設計を行うことにより、3つの振動モードを組み合わせる場合の検証を行う必要がある。また、振動子の支持機構の検討および回転子の保持機構と予圧印加機構の検討を行う必要がある。

### 5. 結論

縦振動1次モード・2次モード、ねじり振動1次モード・2次モード、および奇数次の曲げ振動モードを組み合わせることにより、単一振動子を用いて2つの回転子を2軸まわりに回転する多自由度超音波モータの駆動原理を提案した。駆動原理に基づいて設計した振動子の製作および駆動実験を行い、提案した駆動原理の有効性を確認した。

### 文献

- [1] 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, Vol.13 No.2, pp.235~241, 1995
- [2] 竹村研治郎, 前野隆司, 小島信行: 縦振動と横振動の縮退に基づく多自由度超音波モータの開発, 日本ロボット学会誌, Vol.16 No.8, pp.1115~1122, 1998