

多自由度超音波モータ

- 手首のように器用な運動の生成を目指して -

慶應義塾大学 前野 隆司

はじめに

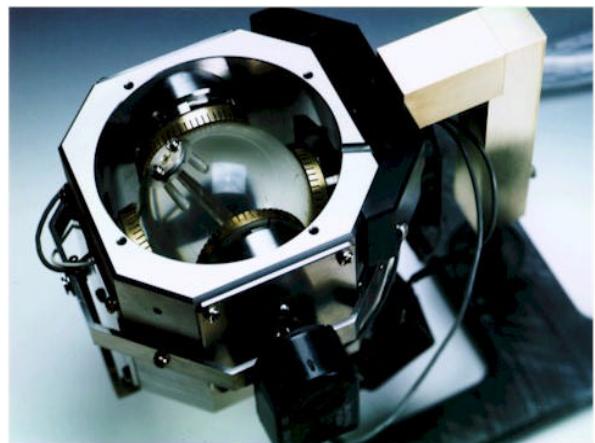
ロボットがブームである。ホンダの二足歩行ロボットやソニーのペットロボットが世の中をにぎわしている。今後は、さらに巧みで生物のような動きを実現できる医療・福祉、家庭、アミューズメントロボットの開発へとトレンドは移行してゆこう。このようなロボットを実現するためには、単体で首や手首、目玉のような多自由度運動を実現できるアクチュエータの開発が不可欠である。また、医療工学・生物工学の分野における微細作業用マニピュレータや、高度な作業を行う産業用自動組立ロボットを実現するためにも、多自由度アクチュエータのニーズは高い。このため、様々な多自由度アクチュエータの開発が試みられてきた⁽¹⁾。特に、超音波モータは、低速高トルク特性を有するため減速器が不要で回転軸を直接駆動できること、高保持トルク特性を有し停止時に通電が不要であること、高速高精度レスポンス、静肅性、単純構造、電磁ノイズレスなどの特徴を有することから、ロボットアームやマニピュレータの関節に配置して多自由度運動を生成するために適している。しかし、従来の超音波モータは1軸まわりの回転または1軸方向の直動しか行えなかつた。そこで、近年、いくつかの多自由度超音波モータが提案されている^{(2)~(8)}。本稿では、筆者らが開発した縦-横振動複合型多自由度超音波モータを中心に、多自由度超音波モータの特徴と用途について述べる。

1. 多自由度超音波モータの分類

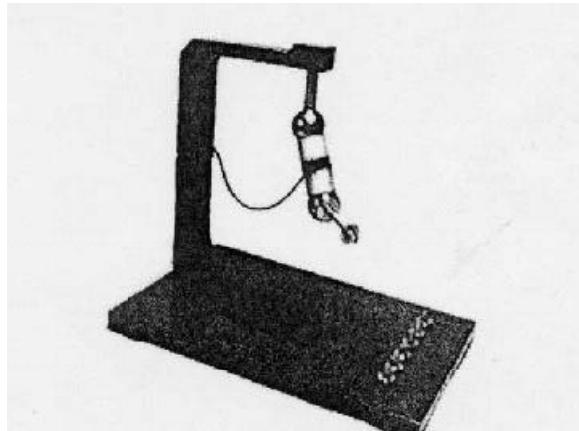
近年開発された多自由度超音波モータには、遠山ら⁽²⁾、Banseviciusら⁽³⁾、青柳ら⁽⁴⁾、石井ら^{(5),(6)}、筆者ら⁽⁷⁾によるものがある。

遠山ら⁽²⁾の超音波モータ（第1図）は、円環状の振動子（ステータ）を球状の回転子（ロータ）のまわりに複数個配置することにより、多軸まわりの回転を生成するものである。ただし、本モータは複数の振動子を用いているため、小型化には適していない。

Bansevicius⁽³⁾は、球殻状または円筒状振動子の内面に球状の回転子が接する構造の圧電マニピュレ



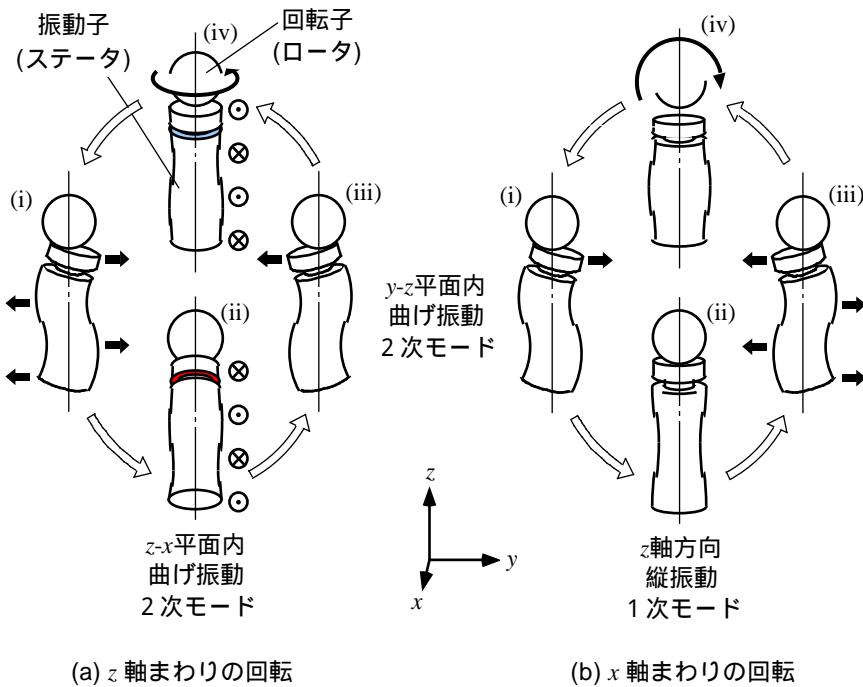
第1図 リング型振動子を用いた多自由度超音波モータ⁽²⁾



第2図 Piezoelectric micromanipulator⁽³⁾

ータ（第2図）を提案している。しかし、構造が複雑であるため設計が困難であること、大出力が得られないことなどの問題が残されている。

青柳ら⁽⁴⁾、石井ら^{(5),(6)}、筆者ら⁽⁷⁾は、それぞれ、单一の振動子に固有振動数の等しい複数の固有振動を励振することによって、振動子表面に3軸まわりの橈円振動を生成して回転子を3軸まわりに回転させる多自由度超音波モータを提案した。以下



第3図 多自由度超音波モータの駆動原理模式図⁽⁷⁾

に、筆者ら⁽⁷⁾の小型多自由度超音波モータを例に、多自由度超音波モータの駆動原理を説明する。

2. 多自由度超音波モータの原理

従来の回転型超音波モータは、回転子を1軸まわりに回転させるものであった。すなわち、振動子に振幅1μmから数μm程度の2つの固有振動を発生させ、2つの振動の位相を調整することにより、振動子の表面に楕円振動を生じさせる。楕円振動している点に回転子を接触させると、波に乗るサーフボードのように、回転子は振動子の波に応じて回転する。

以上のように、従来の超音波モータでは、2つの固有振動モードを利用していた。これに対し、多自由度超音波モータは、3つの固有振動モードを用いる点が特徴である。つまり、筆者らが提案したモータ⁽⁷⁾の場合には、第3図に示したy-z平面内曲げ振動2次モード、z-x平面内曲げ振動2次モード、z軸方向縦振動1次モードという3つのモードを振動子に励振する。振動子の形状を調整することにより、3つの固有振動の固有振動数はほぼ等しい45kHzとなっている。3つの固有振動モードは、棒状の金属製振動子に挟み込まれた圧電セラミックス(PZT、チタン酸ジルコン酸鉛)に交流電圧を印加することによって励振される。

第3図(a)は、2つの曲げ振動2次モードを用いる場合の駆動原理の模式図である。2つの曲げ振動は、互い違いに振幅が最大となるように、時間的位相を90度違えて励振されている。このため、棒状の振動子の頭部は、曲げ振動の向きに応じて首を傾ける。つまり、まず右へ(i)、次に向こう側

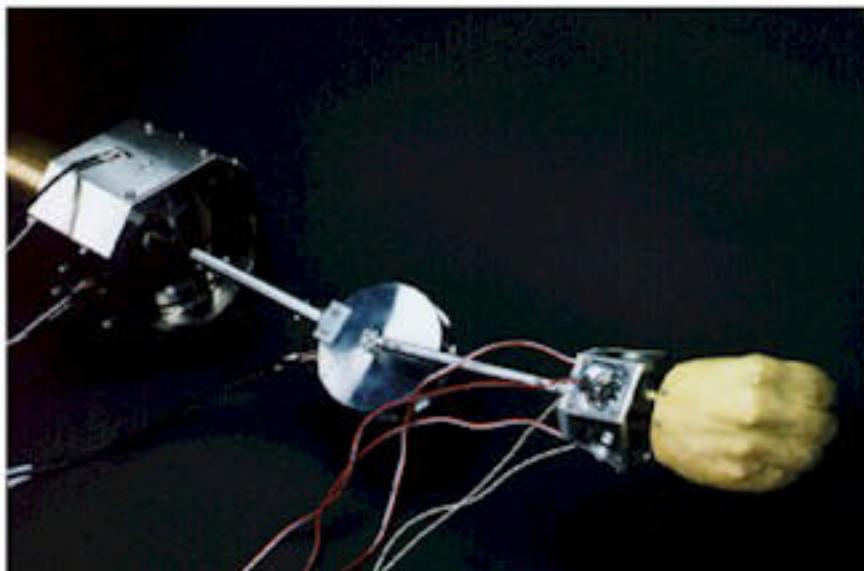
へ(ii)、さらに左へ(iii)、手前へ(iv)、と1周期でz軸まわりに360度首振り運動する。したがって、振動子上面に圧着された球状回転子は振動子上面のいずれかの点と常に接触しながらz軸まわりに回転する。

第3図(b)は、曲げ振動2次モードのうちの1つと縦振動1次モードを用いる場合である。曲げ振動2次モードと縦振動1次モードを、やはり時間的位相を90度違えて励振している。この結果、振動子の先端部は、まず右に傾き(i)、次に上に伸び(ii)、左に傾き(iii)、下に縮む(iv)という運動を繰り返す。つまり、振動子上面の点には、x軸まわり(反時計まわり)の楕円振動が生じる。したがって、回転子は(ii)のときに振動子上面につつかれるように接触し、時計まわりに回転する。

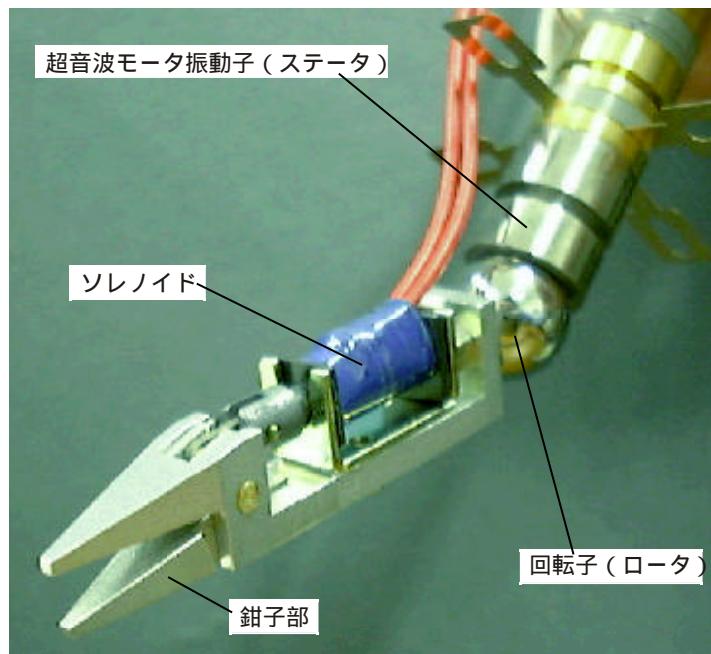
以上はz軸またはx軸まわりの回転の例であるが、3つの固有振動モードの振幅と位相を様々に組み合わせることにより、球状の回転子を任意の方向に回転させることが可能である。

振動子は直径10mm、長さ約30mm、回転子は直径10mmであり、棒状の振動子の長手方向ほぼ中央に設けた4枚の支持板を固定台に固定する構造である。回転子は振動子の先端に設けた磁石により振動子に吸着される。加圧力は、数N程度である。振動子先端には45度のテバ状に樹脂が貼付されており、ここに回転子が接触する。

現在のモータの最大回転速度は250rpm程度、最大トルクは7mNm程度である⁽⁸⁾。現状では出力トルクが小さいなどの問題があるが、加圧機構・接触部構造などを変更することにより大出力化を図つてゆく予定である。



第4図 球面超音波モータを用いた人工義手⁹⁾



第5図 多自由度超音波モータを用いた多自由度鉗子⁽¹⁰⁾

3. 多自由度超音波モータの適用例

多自由度超音波モータの応用例としては、義手⁽⁹⁾やロボットハンド⁽¹⁰⁾の駆動用、監視カメラやロボットの目⁽⁷⁾の駆動用など、生物の目玉や関節の多自由度運動と同等の運動を人工物にも行わせようとするものが多い。これらのうち、義手と医療用ロボットハンドへの適用例について、以下に述べる。

第4図は遠山ら⁽⁹⁾の義手の例である。肩部および手首部に多自由度超音波モータを配することにより、それぞれ3自由度の運動を可能にしてい

る。腕関節が1自由度を有するので、合計7自由度である。本ハンドは、指令値に応じて自在に位置決め制御できることが確認されている。

次に、筆者らが開発中の遠隔腹腔鏡下手術用ロボットハンド⁽¹⁰⁾について述べよう。近年、患者の腹部にあけた小さな穴から鉗子を挿入し、医師が手術を行う腹腔内手術が重要性を増している。しかし、鉗子は自由度が小さいため、縫うなどの複雑な操作は難しい。そこで、多自由度超音波モータを用いた小さな多自由度ロボットハンドが実現できれば、たくみな遠隔腹腔鏡手術が行えると考えられる。医師は、患者の腹腔内の実画像のモニ

タを見ながら、遠隔地で手術動作を行えばよい。すなわち、医師の手の動きはマスター・ロボットハンドを介して、多自由度スレーブハンドに送られる。多自由度スレーブハンドは、実際の患者の腹腔内で医師の手の動きに応じて運動し、手術を行う。このような遠隔腹腔鏡下手術では、医師の手の動きを正確に再現する必要がある。特に、手首の3軸まわりの回転を再現するためには、本超音波モータのような小型多自由度アクチュエータが適しているといえよう。

そこで、筆者らは、2章で述べた多自由度超音波モータを手首部に、ソレノイドを鉗子部に用いたスレーブロボットハンドを開発した(第5図)。⁽¹⁰⁾ 手首部が3自由度、ソレノイドが1自由度の運動を、それぞれ行う。手首部が3自由度を有するため、縫合動作などの巧みな運動の生成が可能である。現在は、本ロボットハンドの動作特性を確認中である。

多自由度超音波モータの義手およびロボットハンドへの適用例について述べた。多自由度モータは、これらの例のように、複雑で巧みな動作が必要な、医療・福祉・家庭・アミューズメントロボットなどの要素技術として有効と考えられる。

おわりに

多自由度超音波モータの原理、分類、適用例について述べた。多自由度超音波モータの研究は始まったばかりであり、生産性・信頼性・出力特性・摩擦摩耗特性など、改善すべき課題も少なくない。しかし、これまでのアクチュエータとは異なり、生物のような巧みな運動が可能であることをうまく生かすことができるならば、今後重要性が増すと考えられる人間親和性の高い人工物の運動制御に広く用いられるようになると想っている。

参考文献

- (1) 矢野：“多自由度アクチュエータ”，日本ロボット学会誌，vol. 15, no. 3, pp. 330-333, 1997.
- (2) 遠山，張，杉谷，長谷川，中村，宮谷：“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）”，日本ロボット学会誌，vol.13, no.2, pp.235-241, 1995.
- (3) R. Bansevicius: “Piezoelectric Multi-Degree-of-Freedom Actuators/Sensors”, Proc. JSME 3rd

International Conf. on Motion and Vibration Control, pp. K9-K15, 1996.

- (4) 青柳，富川，高野：“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”，日本音響学会研究発表会講演論文集，Vol. 1999, No. 秋季2, pp. 979-980, 1999.
- (5) 石井，天野，中村，上羽：“複合振動を用いた多自由度超音波アクチュエータの試作”，日本音響学会研究発表会講演論文集，Vol. 1997, No. 秋季2, pp. 1171-1172, 1997.
- (6) 天野，石井，中村，上羽：“複合振動を用いた多自由度超音波アクチュエータの試作（II）”，日本音響学会研究発表会講演論文集，Vol. 1998, No. 春季2, pp. 1019-1020, 1998.
- (7) 前野，竹村，小島：“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.
- (8) Kenjiro Takemura, Takashi Maeno and Nobuyuki Kojima: “Development of a Bar-Shaped Ultrasonic Motor for Multi-Degrees of Freedom Motion”, Proc. The Fourth International Conference on Motion and Vibration Control, vol. 1, pp. 195-200, 1998.
- (9) 遠山，深谷：“球面超音波モータを用いた人工義手の開発”，第15回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 689-690, 1997.
- (10) 竹村，前野：“多自由度超音波モータを用いた腹腔鏡下手術支援ロボットの開発”，日本機械学会ロボティクスメカトロニクス講演会予稿集, 2p1-13-015, 2000.

筆者紹介

前野隆司（昭和37年1月19日生・広島県出身）

慶應義塾大学理工学部機械工学科

〒223-8522横浜市港北区日吉3-14-1

Tel: 045-563-1141(ex.3105)

Fax: 045-563-5943

E-mail: maeno@mech.keio.ac.jp

<主な業務歴および資格>

昭和61年東京工業大学機械工学専攻修士課程修了。同年キヤノン(株)入社、平成2年カリフォルニア大学バークレー校客員研究員、平成7年慶應義塾大学専任講師、現在助教授。工学博士。