

圧電型多次元ドライブシステム

Multi-DOF Piezoelectric Driving System

竹村 研治郎

(東工大)

前野 隆司

(慶大)

Kenjiro Takemura

(Tokyo Institute of Technology)

Takashi Maeno

(Keio University)

As a mechanical system has become having large number of DOFs, the number of actuators used for the system has been increasing. In order to integrate the compact system, a multi-DOF actuator might become a key technology. Accordingly, there have been developed multi-DOF actuators including multi-DOF piezoelectric actuators. The piezoelectric actuators potentially have great features for multi-DOF direct-drive actuation, such as high torque at low speed, high stationary torque, and quick response etc. In this paper, there introduce several multi-DOF piezoelectric actuators.

Key Words: multi-DOF, piezoelectric actuator, ultrasonic motor.

1 緒言

機械システムの応用分野が多岐に渡るにつれて、システムの多自由度化が進んでいる。特に、ヒューマノイドロボットや医療ロボットなど我々の生活環境近くでの利用が期待されるロボットでは、軽量でスペース効率が良いアクチュエータを選定、配置することが重要であり、従来の1自由度アクチュエータの組み合わせでは新たなブレークスルーを生むのが難しい。これに伴い、アクチュエータに複数の機能を重畳した機能要素である多次元ドライブシステム（多自由度アクチュエータ）への期待が高まっており、これまでに多くの多次元ドライブシステムが検討されてきた。本稿では、多次元ドライブシステムの中でも圧電型多次元ドライブシステムについて研究例と幾つかの応用例を概説する。

2 圧電型多次元ドライブシステムの分類

圧電型ドライブシステムは、圧電逆効果（電気-機械変換）を利用したドライブシステムであり、一般に非共振駆動型ドライブシステムと共振駆動型ドライブシステム（超音波モータ）に大別できる。また、運動形態を見ると回転型およびニア型が実現されている。圧電型多次元ドライブシステムも一般的な圧電型ドラ

Table 1: Multi-DOF piezoelectric driving systems

駆動形態	運動形態	文献
非共振駆動	回転3自由度	[1]
	並進3自由度	[2]
共振駆動	回転3自由度	[3,4]
	回転2自由度	[5]
	回転3自由度	[6,7]
	並進2自由度	[8,9]
	回転3自由度	[10]
	回転3自由度	[11-14]
	回転3自由度	[15,16]
	回転3自由度 (並進2自由度+回転1自由度)	[17]

イブシステムと同様の分類が適用できる。すなわち、非共振型と共振型のいずれも提案されており、運動形態としては回転型、並進型、および回転・並進のハイブリッド型多次元ドライブシステムがある。Table 1に主な研究例を上記の分類に沿ってまとめた。以下に、駆動形態の分類に従って非共振駆動型多次元ドライブシステムと共振駆動型多次元ドライブシステム（多自

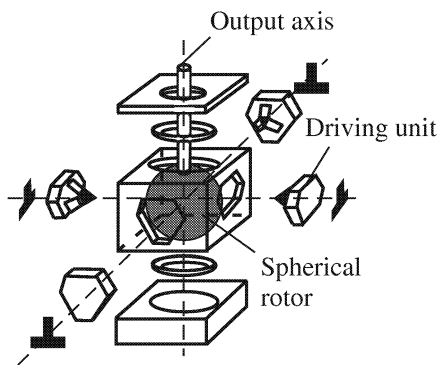


Fig. 1: Spherical actuator [1]

由度超音波モータ) を紹介する。

3 非共振駆動型多次元ドライブシステム

圧電型ドライブシステムのうち、非共振駆動型ドライブシステムは圧電逆効果で生じる圧電素子の変形を直接機械的な出力として取り出すアクチュエータである。圧電型ドライブシステムは圧電逆効果による微小変形を利用するため、精密位置決めなどの分野で広く利用されている。このため、多次元マイクロドライブシステムなどの実現に適した駆動方式であると考えられる。

佐々江らは Fig. 1 に示す球面アクチュエータを開発した [1]。本アクチュエータは4つの駆動ユニットが球状回転子の周囲に配置された構造となっている。各ユニットはトラス状に組まれた PZT であり、各 PZT に適当な電圧を印加することによって先端部を3次元空間内で任意の方向に駆動することができる。これらの PZT 先端部により支持された球状回転子は、各接点において任意のベクトル回りの駆動トルクを受けることになる。この結果、各駆動トルクの合成によって回転子の多次元運動を実現することができる。

吉田らは Fig. 2 に示すスムーズインパクト駆動機構 (SIMD) を用いて、マイクロ SIMD (Fig. 3) を開発した [2]。マイクロ SIMD 自体は並進1自由度運動のみ可能だが、これらを複数個直列に配置することにより多次元ドライブを実現している。

4 共振駆動型多次元ドライブシステム

共振駆動型圧電ドライブシステムは、共振現象を利用して圧電逆効果で生じる圧電素子の変位を拡大す

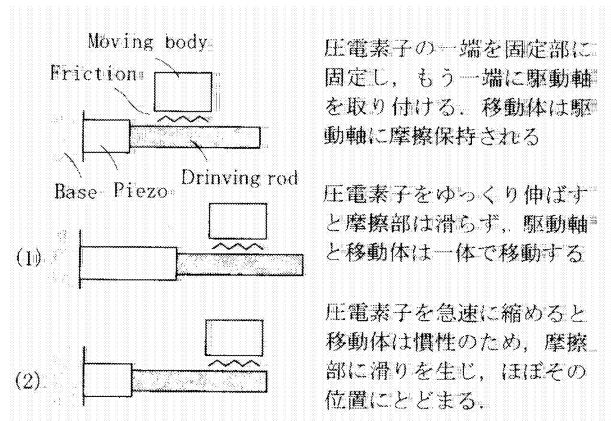


Fig. 2: Driving principle of SIMD [2]

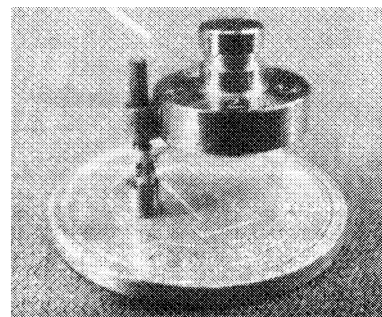


Fig. 3: Micro SIMD [2]

るドライブシステムであり、超音波モータとして知られている。一般に、低速高トルク、高保持トルクなどの特徴を有するため、多次元ドライブシステムのようなダイレクトドライブシステムには有利な駆動方式である。このため、ロボット関節の駆動や光ハンドリングなどへの応用が期待される。

遠山らは Fig. 4 に示す球面超音波モータを開発した [3]。本モータは球状回転子の周囲にリング状振動子を複数配置した構造となっている。リング状振動子に進行波を励振し、摩擦力を介して回転子に駆動トルクを与える。複数の振動子を用いているものの、各振動子で発生する駆動トルクを合成することにより回転子に多自由度運動を発生させることができる。遠山らは、応用例として球面超音波モータを利用した義手 (Fig. 5) などを提案し、福祉分野への展開を図っている [4]。

リング状振動子を Fig. 6 のように二重構造にした2軸駆動超音波アクチュエータも開発されている [5]。共振部1と共振部2では同次数の振動モードに対しても共振周波数が異なるため、振動子への入力電圧の周

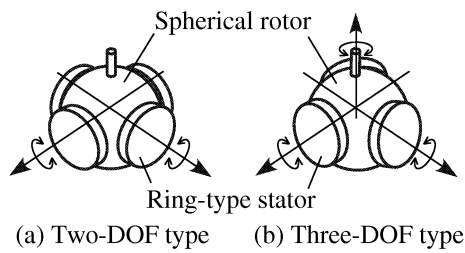


Fig. 4: Multi degree of freedom spherical ultrasonic motor [3]

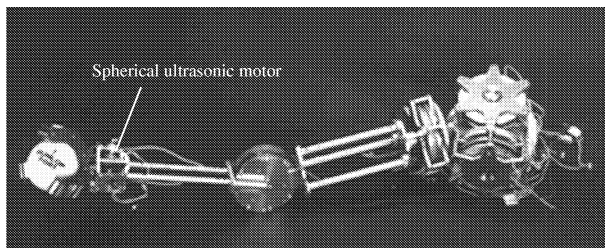


Fig. 5: Artificial arm with spherical ultrasonic motor [4]

波数を変化させることによって選択的に各共振部に進行波を励振することができる。本モータを応用したパン・チルト駆動機構を搭載したレーザポインタの位置制御システムを Fig. 7 に示す。

Fig. 8 は Amano らが開発した多自由度超音波アクチュエータである [6]。円柱状振動子の縦振動と曲げ振動を利用して振動子・回転子接触部に直交 3 軸回りの楕円運動を生成し、摩擦力によって球状回転子を直交 3 軸回りに駆動することができる。3 つの振動モードを利用することにより単一振動子によって球の多次元運動を実現した。超音波モータの静粛性を利用して、

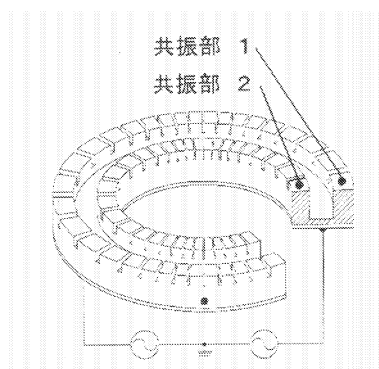


Fig. 6: Ring type stator with dual axes drive [5]

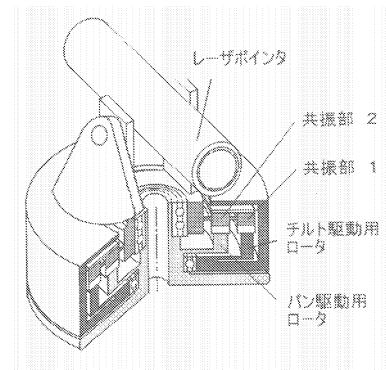


Fig. 7: Position control system for laser pointer [5]

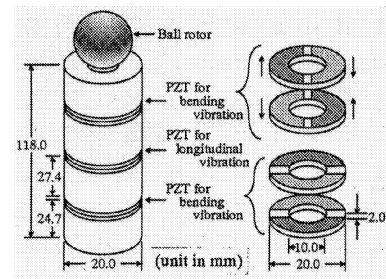


Fig. 8: Ultrasonic actuator with multi-degree of freedom [6]

聴覚機能を有するダミーヘッドの首振り駆動に応用している (Fig. 9) [7]。

Fig. 10 は Ferreira らが開発した圧電ナノポジショナである [8]。平板状振動子の複数の曲げ振動を選択的に励振することにより、図中 x および y 方向への並進が可能な定在波型多自由度超音波モータである。また、これと同様の原理の振動子をフレキシブルリンクでアレイ状に配置したコンベア型ロボット (Fig. 11) を開発し、数十 Kg の物体の搬送に成功している [9]。

青柳らは多重モード円環振動子の固有振動を利用して球状回転子に多自由度回転運動を発生できる多自由度超音波モータ (Fig. 12) を開発した [10]。円環状振動子の内周部を球状回転子との接触部にすることによって、加圧機構を組み込んだ構造となっている。

筆者らも、円柱状振動子の縦振動と 2 つの曲げ振動を利用した多自由度超音波モータ (Fig. 13) を開発した [11][12]。本モータは直径 10mm、高さ約 30mm の円柱状振動子と直径 10mm の球状回転子から構成されている。駆動原理を Fig. 14 に示す。(a) は回

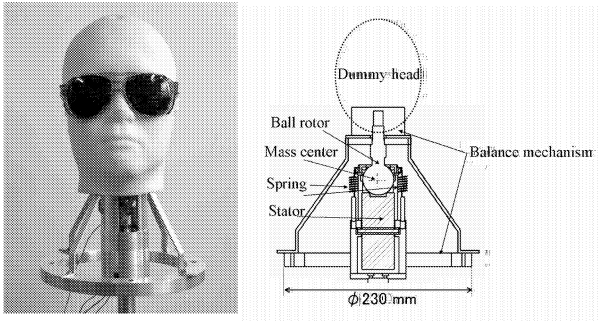


Fig. 9: Dummy head system [7]

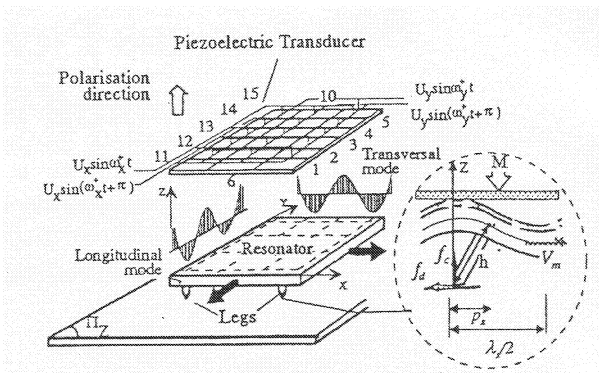


Fig. 10: Piezoelectric Nanopositioner [8]

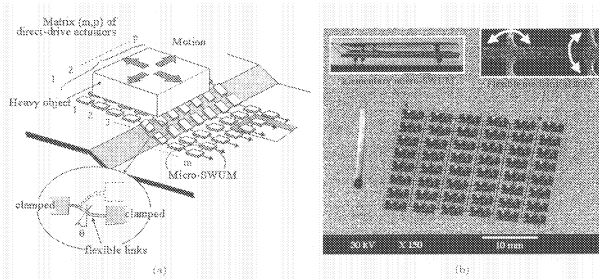


Fig. 11: Flexible conveyor [9]

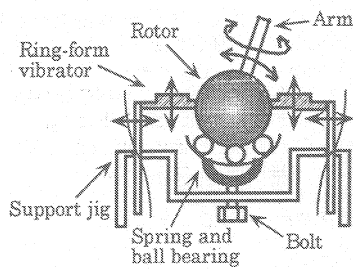


Fig. 12: Multi-degree-of-freedom ultrasonic motor using multi-mode ring-form vibrator [10]

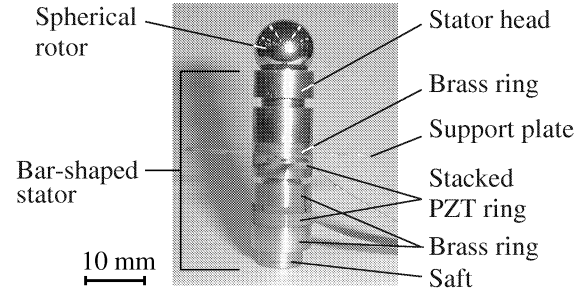


Fig. 13: Bar-type multi-DOF ultrasonic motor

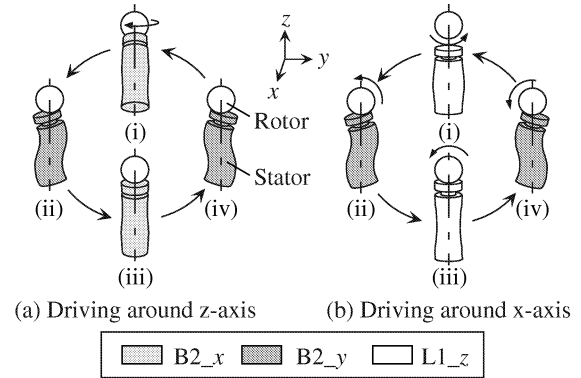


Fig. 14: Driving principle of bar-type multi-DOF ultrasonic motor

転子を z 軸回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 軸回りに回転する。一方、(b) は回転子を x 軸回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 軸回りに回転し、回転子の x 軸回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 軸回りの回転も可能である。なお、本モータで利用する曲げ振動 2 次モードと縦振動 1 次モードの共振周波数は約 40kHz で一致している。これまでに、入力電圧 24 V において無負荷回転数約 250 rpm、最大トルク約 7 mNm を得ている。筆者らは、ハードウェア開発とともに回転子を任意の回転軸回りに駆動するための制御法 [13] や、応用例として手術用多自由度鉗子 (Fig. 15) [14] の開発も行っている。

このほか、球状回転子に対して相対的に小型な平板状振動子で多次元ドライブを実現した平板状多自由度超音波モータ (Fig. 16) [15] も開発されている。平

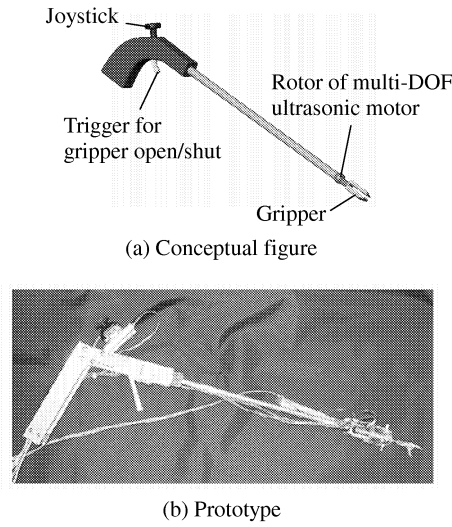


Fig. 15: Prototype of multi-DOF forceps

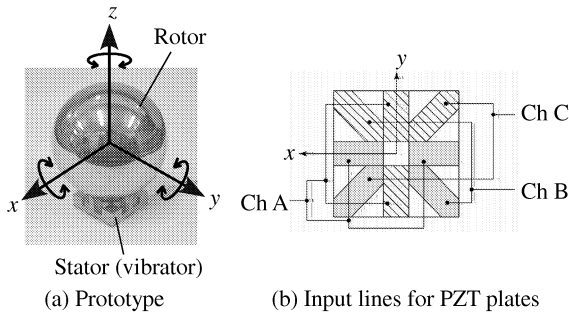


Fig. 16: Plate-type multi-DOF ultrasonic motor

板の3つの面外振動モードを利用し、回転子を直交3軸回りに駆動することができる。本モータの振動子の体積は回転子のそれに対して約66%であり、スペース効率が良い。ただし、回転子の直径は40 mmである。また、自励発振回路を応用した本モータの駆動回路も開発した[16]。Fig. 17に自励発振駆動回路を示す。Fig. 16中の各軸回りに駆動するには位相差を持った2つの交流電圧が必要である。このため、水晶振動子に適用される自励発振回路の振動子を超音波モータの振動子に置き換えたものに移相回路を付加した形である。本回路を用いた平板状多自由度超音波モータの駆動実験の結果、無負荷回転数70 rpmの回転（オープンへの入力：18 V）を実現している。

これまでに紹介した共振型多次元ドライブシステム（多自由度超音波モータ）のほとんどは、振動子の複数の振動モードを時間的位相差を持って励振することによって駆動するモータである。このため、各振

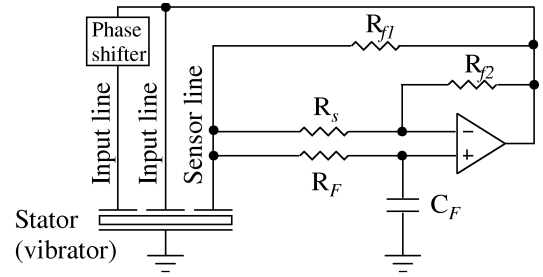


Fig. 17: Self-oscillation driving circuit

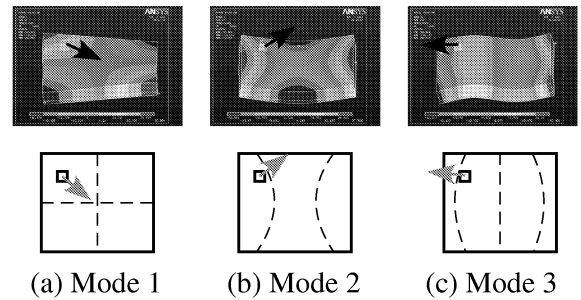


Fig. 18: Vibration mode of stator

動モードの固有振動数を一致させることが重要な設計課題となるが、非相似モードの固有振動数は一般に異なっているため有限要素法を用いた試行錯誤的な設計が行われてきた。このため、設計課題の簡略化を目指した多自由度超音波モータも提案されている。Otokawaらは、1自由度当たり1つの振動モードを利用し合計3自由度運動が可能な振動モード選択型多自由度超音波モータを開発した[17]。Fig. 18に本モータで利用する矩形振動子の3つの面外振動モードを示す。この振動子を回転子の下方にFig. 19のように4つ配置し、各振動子にFig. 20に示すように振動を励振すると、球状回転子に3自由度回転運動を生成できることを確認している。また、回転子の形状を平板とすれば、並進2自由度、回転1自由度の運動も実現できると考えられる。

5 結言

本稿では、機械システムの更なる多自由度化に対して期待される多次元ドライブシステムのうち、圧電型多次元ドライブシステムについて研究例を紹介した。圧電型ドライブシステムは、設計自由度の高さをはじめ低速高トルクや高保持トルクなどの優れた特徴を有している。Table 1に示したように、これまでは多自

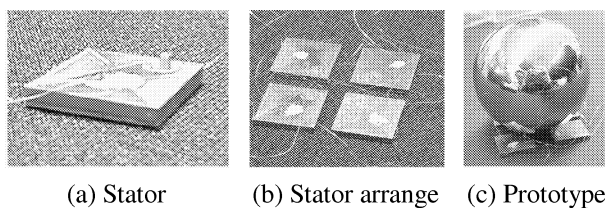


Fig. 19: Muti-DOF ultrasonic motor with single-phase-driving

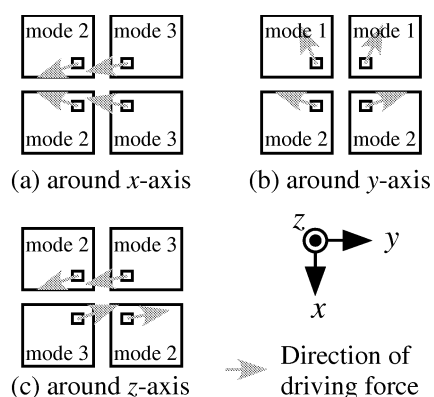


Fig. 20: Combination of vibration modes

由度回転運動を生成するドライブシステムが多く提案されているが、今後、設計自由度の高さを生かした新たな多次元ドライブシステムの創製ならびに実用化がさらに進展することを期待したい。

参考文献

- [1] 佐々江啓介, 五百井清, 大築康生, 黒崎泰充, 3 自由度小型アクチュエータの開発 (第3報) —球面アクチュエータの設計と性能試験—, 精密工学会誌, Vol. 62, No. 4, (1996), pp. 599-603.
- [2] 吉田龍一, 岡本泰弘, マイクロ SIDM, 日本機械学会 2002 年度年次大会後援論文集 (VIII)(2002), pp.370-371.
- [3] S. Toyama *et al.*, *Multi degree of freedom Spherical Ultrasonic Motor*, Proceedings of International Conference on Robotics and Automation, (1995), pp. 2935-2940.
- [4] 遠山茂樹, 深谷直樹, 関塚真, 球面超音波モータを利用した人工義手の開発 —簡易姿勢検出機構の検討—, 日本機械学会第 75 回通常総会講演会講演論文集 (IV), (1998), pp. 573-574.
- [5] 超音波モータ連絡会編, 超音波モータガイド, (2001), pp. 14-15.
- [6] Takafumi Amano, Takaaki Ishii, Kentaro Nakamura and Sadayuki Ueha, *An Ultrasonic Actuator with Multi-degree of Freedom Using Bending and longitudinal Vibrations of a Single Stator*, Proceedings of IEEE Ultrasonics Symposium, (1998), pp. 667-670.
- [7] S. Niwano, C.-H. Yun, J. Friend, K. Nakamura, S.

- Ueha and T. Hirahara, *An Active Dummy Head driven by a Multi-degree-of-freedom Ultrasonic Actuator*, Proceedings of WCU 2003, (2003), pp. 1597-1600.
- [8] A. Ferreira and J.-G. Fontaine, *Coarse/Fine Control of a Teleoperated Autonomous Piezoelectric Nanopositioner Operating under a Microscope*, 2001 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechtronics Proceedings, (2001), pp. 1313-1318.
- [9] A. Ferreira, *Design of a flexible conveyer microrobot with electromagnetic field-based friction drive control for microfactory stations*, Journal of Micromechanics, Vol. 1, No. 1, (2000), pp. 49-67.
- [10] 青柳孝ら, 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), (1999), pp. 979-980.
- [11] 前野隆司ら, 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, (1998), pp. 1115-1122.
- [12] K. Takemura and T. Maeno, *Design and Control of an Ultrasonic Motor Capable of Generating Multi-DOF Motion*, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 6, No. 4, (2001), pp. 499-506.
- [13] K. Takemura and T. Maeno, *Control of Multi-DOF Ultrasonic Motor using Neural Network based Inverse Model*, Proceedings of 2002 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robotics and Systems, (2002), pp. 2187-2192.
- [14] S. Park, K. Takemura and T. Maeno, *Development of Multi-DOF Actuator for Surgical Tools*, Proceedings of the 32nd International Congress and Exposition on Noise Control Engineering, (2003), pp. 3039-3046.
- [15] 大野裕司, 竹村研治郎, 前野隆司, 平板状振動子を用いた多自由度超音波モータの開発, 日本音響学会 2001 年春季研究発表会講演論文集, (2001), pp. 903-904.
- [16] K. Takemura, Y. Ohno and T. Maeno, *Design of a Plate Type Multi-DOF Ultrasonic Motor and its Driving Characteristics*, Proceedings of IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, (2003), pp. 1309-1314.
- [17] K. Otokawa *et al.*, *Development of a Multi-Degree-of Freedom USM using Single Mode of Vibrations*, Proc. ICA 2004, (2004)[in preparation for publication].