

## 嵌入型円環状多自由度球面超音波モータの開発

|                    |   |
|--------------------|---|
| その他（別言語等）<br>のタイトル | Development of Rotor Embedded Disk Type<br>Multidegree-of-Freedom Spherical Ultrasonic<br>Motor |
| 著者                 | 盧 波, 青柳 学, 田村 英樹, 高野 剛浩   |
| 雑誌名                | 日本ロボット学会学術講演会講演論文集  |
| 巻                  | 2011  |
| ページ                | 1A2-F08(1) - 1A2-F08(4)   |
| 発行年                | 2011-05   |
| URL                | <a href="http://hdl.handle.net/10258/1650">http://hdl.handle.net/10258/1650</a>                 |

## 嵌入型円環状多自由度球面超音波モータの開発

|                    |   |
|--------------------|---|
| その他（別言語等）<br>のタイトル | Development of Rotor Embedded Disk Type<br>Multidegree-of-Freedom Spherical Ultrasonic<br>Motor |
| 著者                 | 盧 波, 青柳 学, 田村 英樹, 高野 剛浩   |
| 雑誌名                | 日本ロボット学会学術講演会講演論文集  |
| 巻                  | 2011  |
| ページ                | 1A2-F08(1) - 1A2-F08(4)   |
| 発行年                | 2011-05   |
| URL                | <a href="http://hdl.handle.net/10258/1650">http://hdl.handle.net/10258/1650</a>                 |

# 嵌入型円環状多自由度球面超音波モータの開発

## Development of Rotor Embedded Disk Type Multidegree-of-Freedom Spherical Ultrasonic Motor

○ 盧 波 (室蘭工大)      青柳 学 (室蘭工大)  
 田村英樹 (東北工大)      高野剛浩 (東北工大)

Bo LU, Manabu AOYAGI, Muroran Institute of Technology, maoyagi@mmm.muroran-it.ac.jp  
 Hideki TAMURA, Takahiro TAKANO, Tohoku Institute of Technology

In this paper, we propose a novel rotor embedded disk type multi-degree-of-freedom (MDOF) spherical ultrasonic motor (SUSM). The MDOF-SUSM consists of a spherical rotor and a stator vibrator with all-in-one structure, the spherical rotor is embedded in a stator vibrator with a spherical inner surface, and a motor shaft is mounted on the rotor. The stator vibrator with piezoceramic disks and plates stuck on its surfaces can excite five vibration modes, independently and simultaneously. The spherical rotor of the motor can rotate around three axes by combining two vibration modes among the five vibration modes. This paper describes the basic construction and the operating principle of the rotor embedded type MDOF-SUSM, modal analysis results about the stator vibrator, and some measurement results from the first trial manufacture to verify the operating principle and research the Z-axis rotation. The MDOF-SUSM in this study has possibilities of a simple structure, compact and small size, lightweight, and a large torque-to-weight ratio.

**Key Words:** Multi-degree-of-freedom(MDOF), Spherical ultrasonic motor(SUSM), Disk type, Rotor embedded

### 1. はじめに

アクチュエータシステムは、ヒューマノイドロボットや産業用機器装置の発展に伴い、複雑化・高機能化が進み、多自由度 (MDOF) の駆動が求められている。現在実際に使われている多自由度アクチュエータシステムは、1 自由度アクチュエータを組み合わせた構造が用いられている。しかし、このような構造では体積および運動誤差が大きく、制御精度の向上が困難などの問題点が存在している。

多自由度アクチュエータの中でも球面モータは、人間の眼球や手首・肩と同様の動きを実現できる理想的な多自由度アクチュエータとして長く切望されてきた<sup>1-2)</sup>。特に、超音波モータ (USM) は、低速時に高トルク特性を有するため減速器が不要である。また直接駆動ができ、自己保持特性を有し停止時に通電が不要である。さらに速応性、単純構造、静粛性、制御性に優れ、非電磁性などの特徴を有するため、人間親和性の高いロボット用多自由度動作を生成するために適しており、これまでに多くの多自由度球面超音波モータ (MDOF-SUSM) が考案されている<sup>3-6)</sup>。

筆者らは多重モード円環振動子を用いて、球状ロータを任意軸に回転する MDOF-SUSM を開発している<sup>7-10)</sup>。本研究では、MDOF-SUSM の実用化のための更なる小型化・高トルク化、単純構造化の実現を目指すため、ロータ嵌入型多自由度球面超音波モータを新規に考案し、試作した。球状ロータは単一の円環状振動子に嵌入され、ステータの表面に貼り付けた圧電板により励振された多重モードの組み合わせによって、3 軸の自由回転が可能になる。小型化および高トルク化に有効なサンドウィッチ構成の 2 つのステータの一体化をコンセプトとし<sup>10)</sup>、部品点数の極限までの減少と構造の単純化することで単一デバイス化を実現する。

本研究で考案した MDOF-SUSM の構造は非常に簡単になり、従来型に存在するロータの X(Y)軸回転が不安定、振動子支持部の妨害振動の影響が大きいなどの問題点の解決が期待でき

る。実現できればロボット、医療福祉、宇宙マニピュレータなど広い応用幅に期待されている。

本報告では新たに考案したロータ嵌入型多自由度球面超音波モータの動作原理、基本構造および回転原理を確認するため試作した Z 軸回転用 SUSM の実験結果について報告する。

### 2. モータの基本構造および動作原理

#### 2.1 基本構造

Fig.1 に本研究で提案した回転子嵌入型多自由度球面超音波モータの基本構成を示す。単一のステータ振動子に球状ロータを嵌入する構造は、従来のサンドウィッチ型構成で用いた 2 つのステータ振動子で球状ロータを内包するように一体化したものとみなせる<sup>9-10)</sup>。球状回転子は単一の円環振動子に嵌入し、ステータ振動子の各表面に貼り付けた圧電板 (PZT) を励振することによって、任意軸方向に回転ができる。

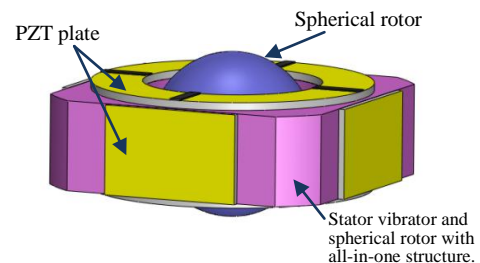


Fig.1 Assembly and component parts of rotor embedded type MDOF-SUSM.

#### 2.2 動作原理

モータのステータ振動子と球状ロータはロッドエンド同様の製作方法で一体構造を実現し、モータの構造が簡単、妨害振動などの影響が少ない。円環振動子は各表面に 6 枚圧電板

を貼り付け、屈曲振動モード( $B_{11}$ -mode,  $B_{11}'$ -mode), 径方向伸縮振動モード( $R_1$ -mode), 非軸対称振動モード[ $((1,1))$ -mode,  $((1,1))'$ -mode]の3種類, 5つの振動モードが励振可能である。モータの上下表面に貼り付けた2枚の円環状圧電板は屈曲振動モード励振用であり, 外側の4枚の圧電板は径方向伸縮振動モードと非軸対称振動モード励振用である。

Fig.2 に汎用有限要素法解析ソフト(ANSYS)で共振周波数を解析した結果を示す,  $B_{11}$ -mode が 39.45kHz,  $R_1$ -mode が 39.34kHz,  $((1,1))$ -mode が 46.94kHz であった。

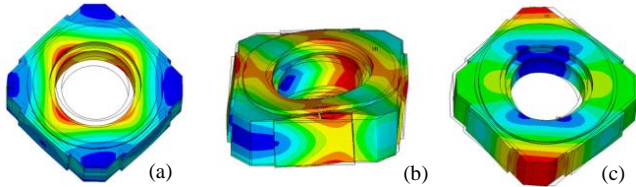


Fig. 2 Modal analysis result: (a)  $R_1$ -mode, (b)  $B_{11}$ -mode, (c)  $((1,1))$ -mode.

ロータ嵌入型 MDOF-SUSM を励振可能な3種類の中に, 球状ロータは X(Y)軸回転に用いる振動モードの形状は Fig2(a), (b)に, Z 軸回転に用いるモードを Fig2(c)に示す。Fig.3 に各回転軸の形成に必要な振動モードの組み合わせを示す。

以下に振動モードの組み合わせ方法を述べる:

- (a) Fig.3(a)に示す, 駆動周波数  $f_1$ , X(Y)軸回転する場合:
- X(Y)軸回転に, 振動子は同一の周波数における2種類の振動モードを励振することが可能である。振動子上下表面に貼り付けた PZT 圧電板により  $B_{11}$ -mode と  $B_{11}'$ -mode が励振される。 $B_{11}'$ -mode は  $B_{11}$ -mode と同形の直交縮退モードである。
  - 振動子外側の4枚の圧電板あるいは振動子上下表面に貼り付けた PZT 圧電板により,  $R_1$ -mode が励振される。
  - $R_1$ -mode と  $B_{11}$ -mode の組み合わせにより X 軸方向回転が実現できる。
  - $R_1$ -mode と  $B_{11}'$ -mode の組み合わせにより Y 軸方向回転が実現できる。
- (b) Fig.3(b)に示す, 駆動周波数  $f_2$ , Z 軸回転する場合:
- 振動子外側の4枚の圧電板あるいは振動子上下表面に貼り付けた PZT 圧電板により,  $((1,1))$ -mode と  $((1,1))'$ -mode が励振される。二つ振動モードを組み合わせることによってモード回転が生じ, 球状ロータとステータ振動子の球面接触面に楕円運動が生成され, 球状ロータのZ軸方向回転が可能になる。

### 2.3 モータの駆動方法

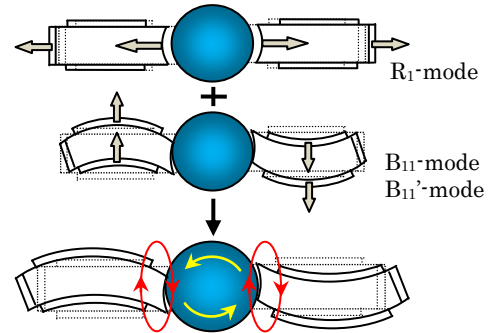
Fig.4にMDOF-SUSMの駆動方法として電極の組み合わせを示す。圧電板の電極の組み合わせによって, 球状ロータの各回転軸を形成する。

各振動モードの励振方法を Table I に示す。

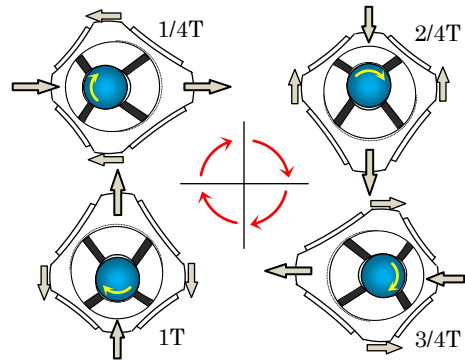
## 3. モータの設計および試作

### 3.1 振動子の設計

有限要素法を用いた固有値解析にて, ステータ振動子の固有振動数とその振動モード形状を知ることができる。これにより, モータの形状の設計が可能になる。本研究で考案したロータ嵌入型 MDOF-SUSM のステータ振動子を Fig.5 に示す。ステータ振動子の外径  $R_1$ , 球面接触面の内径  $R_2$ , 振動子の厚



(a) X(Y)-axis rotation of the rotor.



(b) Z-axis rotation of the rotor.

Fig. 3 Operating principle of rotor embedded type MDOF-SUSM.

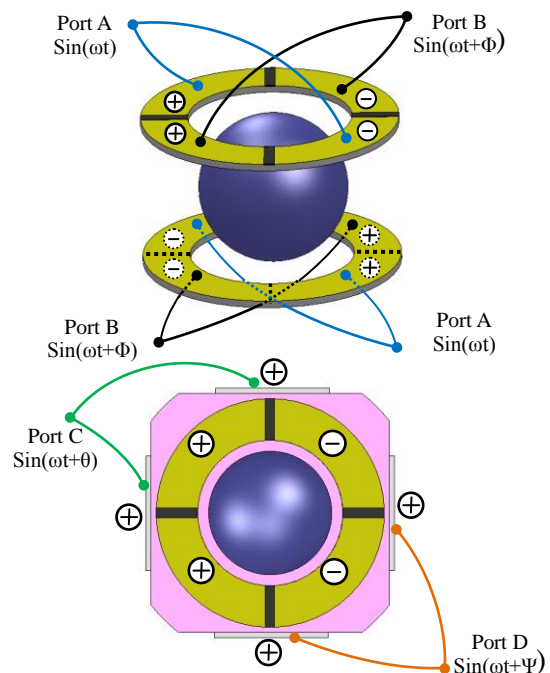


Fig. 4 Arrangement of electrodes of the piezoelectric disks and plates under the sandwich structure.

み  $D_1$ , 圧電板接着面形成のための振動子周囲の正方形切除長さ  $L_1$  に対する屈曲振動モード( $B_{11}$ -mode,  $B_{11}'$ -mode), 径方向伸縮振動モード( $R_1$ -mode), 非軸対称振動モード[ $((1,1))$ -mode,  $((1,1))'$ -mode]の共振周波数の変化を調査した。

Table I. Combination of electrodes and vibration modes.

| Rotation axis | Frequency | Quantity | Phase difference [deg] | Vibration mode                        |
|---------------|-----------|----------|------------------------|---------------------------------------|
| X             | $f_1$     | Port A   | $\Theta=0$             | $B_{11}$ -mode<br>+ $R_1$ -mode       |
|               |           | + Port C | $\Phi=0$               |                                       |
|               |           | + Port D | $\Psi=180$             |                                       |
| Y             | $f_1$     | Port B   | $\Theta=0$             | $B_{11}'$ -mode<br>+ $R_1$ -mode      |
|               |           | + Port C | $\Phi=0$               |                                       |
|               |           | + Port D | $\Psi=180$             |                                       |
| Z             | $f_2$     | Port C   | $\Theta=0$             | $((1,1))$ -mode<br>+ $((1,1))'$ -mode |
|               |           | + Port D | $\Phi=0$               |                                       |
|               |           |          | $\Psi=0$               |                                       |

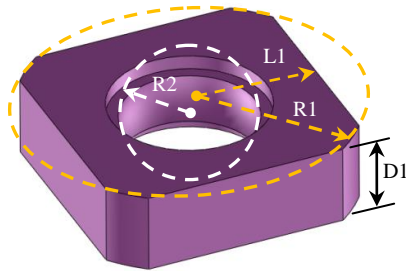


Fig. 5 Stator model and parameters for FEM analysis.

まずステータ振動子の外径  $R_1$  を変えた時の  $B_{11}$ -mode,  $R_1$ -mode,  $((1,1))$ -mode の共振周波数の変化を調べた。この時ステータ振動子の球面接触面の内径  $R_2 = 12.7\text{mm}$ , 厚み  $D_1 = 14\text{mm}$ , 周囲の正方形切除長さ  $L_1 = 6\text{mm}$  で固定している。その解析結果を Fig.6(a)に示す。結果として,  $R_1$  が約  $29\text{mm}$  の時に  $B_{11}$ -mode と  $R_1$ -mode の共振周波数は同一になることが分かった。

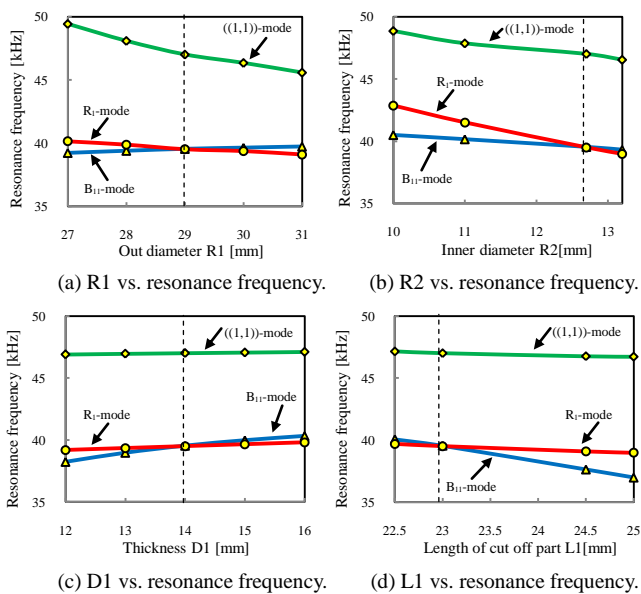


Fig. 6 Simulated resonant frequency vs. parameters of stator.

### 3.2 モータの試作

本研究では, 多自由度球面超音波モータの部品点数を極限まで減少し, 構造の単純化により単一デバイス化を実現する。単一のステータ振動子に球状ロータを嵌入する構造では, モータの製作が容易ではない。製作方法を Fig.7 に示す。ステータ振動子の二つの部分を二回に分けて一体化する。まず, 振

動子のインナーレース部分は球状ロータを包み込んでスウェッジ加工を施した後, 予定の寸法にレースの外径と端面を切削する。次に加工した球状ロータとレース全体をハウジングに挿入し, 余分な部分を取り除く。この方法でモータの一体化構造を実現する。

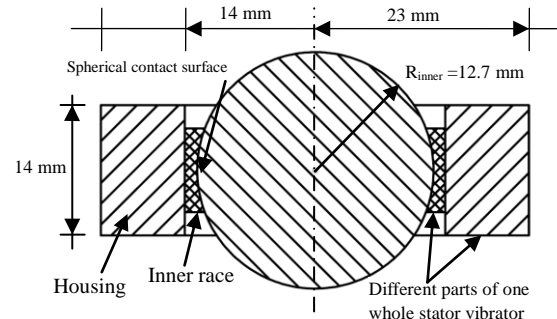


Fig. 7 The cross profile of motor with all-in-one structure.

考案したロータ嵌入型 MDOF-SUSM の回転原理の確認および Z 軸回転の検討のため, 試作した。製作方法はまだ継続した改善が必要である。今回は X(Y)軸方向の回転が検討しないため, 試作したモータは設計した寸法ではなく, ステータ振動子は単純な円環型で, Fig.8 に示すように上下表面に 2 枚だけの PZT 圧電円板を貼り付けた構造である。圧電セラミックス円板の電極に導線をはんだ付けしている。

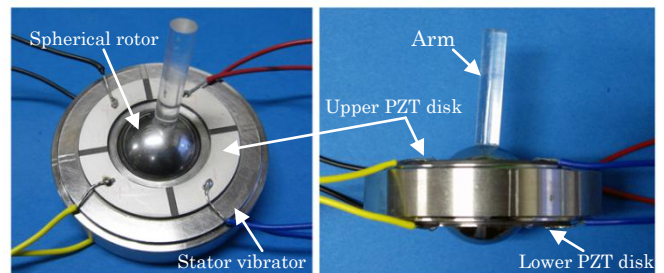


Fig. 8 Component of SUSM in the first trial manufacture.

## 4. 実験結果

### 4.1 振動特性

試作した MDOF-SUSM のステータ振動子のアドミタンス特性の測定結果を Fig.9 に示す。モータは Z 軸方向の回転の検討のために試作したため, 今回振動子のアドミタンス特性の測定結果は球状ロータが Z 軸回転に用いる非軸対称振動モード

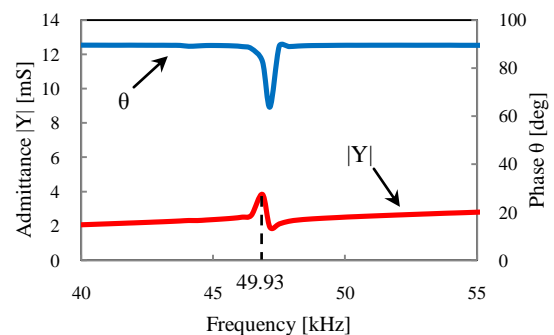


Fig. 9 Input admittance characteristics [((1,1))-mode].



[[1,1]-mode, ((1,1))'-mode]だけを記録した。非軸対称振動モードの共振周波数は 49.93 kHz であり、有限要素法解析結果と同様の結果が得られた。

## 4.2 最大トルクの測定結果及び従来型との比較

ロータ嵌入型 MDOF-SUSM 試作し、モータの動作原理の確認するため、Z 軸回転を実験的に検討した。ステータ振動子の上下表面に 2 枚の PZT 圧電円板を貼り付けて、各圧電円板の 4 分割された駆動電極の励振および位相の切り替えにより、駆動周波数が 46.93kHz の時、ロータ嵌入型 MDOF-SUSM の二相駆動による球状ロータの双方向回転が実現できた。

Fig. 10 に((1,1))-mode の印加電圧に対する、モータの最大トルクの測定結果を示す。Z 軸回転の最大トルクは印加電圧の増加に伴って増加することが分かった。印加電圧は 190[Vp-p] の時、最大トルクは約 15[mNm]であった。

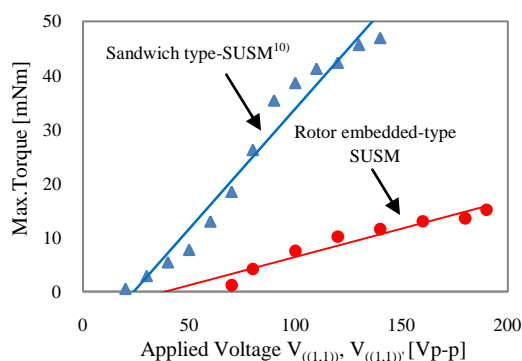


Fig. 10 Maximum torque and applied voltage on Z-axis rotation.

Table II. Comparison of rotor embedded type and sandwich one MDOF-SUSM.

| MDOF-SUSM type                 |        | Sandwich-type | Rotor embedded-type |
|--------------------------------|--------|---------------|---------------------|
| Diameter [mm]                  | Stator | 39.0          | 58.0                |
|                                | Rotor  | 20.0          | 25.4                |
| Max torque [mNm] ( $V_{p-p}$ ) | X(Y)   | 58.04(80)     | —                   |
|                                | Z      | 45.6(140)     | 15.14(190)          |
| Torque/Weight [Nm/kg]          | X(Y)   | 0.703         | —                   |
|                                | Z      | 0.552         | 0.049               |

Fig. 10 と Table III に、サンドイッチ型 MDOF-SUSM<sup>10)</sup>と本研究で試作したロータ嵌入型 MDOF-SUSM の最大トルクの比較を示す。本提案の MDOF-SUSM の振動子有効振動部分の単位重量あたりのトルクはサンドイッチ型 MDOF-SUSM より小さいことが分かった。その要因として以下の要素があげられる：

- 今回の実験品はロータ嵌入型 MDOF-SUSM の初めての試作品であり、一体化構造でロータの予圧調整が非常に難しい。モータの試作方法の検討は大きな課題である。今回の実験品はステータ振動子と球状ロータ予圧が小さい、間隔が大きいため、大きなトルクが得られないと考えられる。
- Fig. 7 に示すステータ振動子の材料はすべて SUS403 である。重量は増加することによってモータの単位重量あたりトルクは小さくなった。次の研究段階として Fig. 7 に振動子のハウジング部分の材料は軽いアルミ合金素材を利用してモータを試作する。

## 5. おわりに

本研究で考案した回転子嵌入型円環状 MDOF-SUSM では、単純な構造でモータの単一デバイス化を実現する。現段階では、ロータ嵌入型 MDOF-SUSM の回転原理の確認および Z 軸回転の検討のため、試作した。ステータ振動子の上下表面に 2 枚の PZT 圧電円板を貼り付け、4 分割された駆動電極の励振および位相の切り替えにより、球状ロータは Z 軸双方向の回転を実現した。さらに、モータの動作原理を確認し、Z 軸の回転特性を明らかにした。予圧が小さいため、大きなトルクが得られなかった。

今後は、ステータ振動子の一体化試作方法および予圧調整方法を検討し、設計した寸法で MDOF-SUSM を試作し、実験的な方法でモータの性能を明らかにする。また、モータの摩擦特性・耐久性・高トルク化などの性能改善について検討する。

## 文献

- [1] J. Wang, K. Mitchell, G. W. Jewell and D. Howe, "Multi-degree-of-freedom spherical permanent magnet motors," *Proc. Int. Conf. Robotics and Automation (ICRA2001)*, Vol.2, pp.1798-1805, 2001.
- [2] 矢野智昭, 久保田義昭, 鹿山透, 鈴木健生, "2 自由度球面同期モータの開発", 日本 AEM 学会誌 vol.17, No.1, pp.29-34, 2009.
- [3] 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," in *Proc. 1998 IEEE Ultrason. Symp.*, pp.667-670, 1998.
- [4] S. Toyama and S. Hatae, "Multi degree of freedom spherical ultrasonic motor," *Proc. Int. Conf. Robotics and Automation (ICRA1995)*, Vol. 3, pp. 2935-2940, 1995.
- [5] Y. Goda, D. Koyama, and K. Nakamura, "Design of Multi-Degree-of-Freedom Ultrasonic Micromotors" *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 48, pp.07GM06-1-4, 2009.
- [6] T. Takano, Y. Tomikawa, and C. Kusakabe, "Same phase drive-type ultrasonic motors using two degenerate bending vibration modes of a disk," *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control* 39, pp.180-186, 1996.
- [7] M. Aoyagi, T. Ogasawara, Y. Tomikawa, and T. Takano, "Multi-degree-of-freedom ultrasonic actuator employing multi-vibration modes of a disk," in *Proc. 7th Int. Conf. New Actuators Germany (ACTUATOR 2000)*, pp. 399-402, 2000.
- [8] M. Aoyagi, S. P. Beeby, and N. M. White, "A novel multi-degree-of-freedom thick-film ultrasonic motor," *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control* 49, no.2, pp.151-158, 2002.
- [9] M. Aoyagi, T. Nakajima, Y. Tomikawa, and T. Takano, "Examination of disk-type multidegree-of-freedom ultrasonic motor," *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol.43, pp.2884-2890, 2004.
- [10] B. Lu, M. Aoyagi, T. Takano, and H. Tamura, "Examination of Sandwich-Type Multidegree-of-Freedom Spherical Ultrasonic Motor," *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 49, No. 7, pp. 07HE24-1-7, 2010.