

アウトロータ型多自由度球面超音波モータのステータ振動子の検討

室蘭工業大学大学院 ○盧 波, 青柳 学

要 旨

アウトロータ型多自由度球面超音波モータを考案した。3方向の振動変位が発生可能な2枚のステータ振動子とその間に配置したばねを回転シャフトで支持し、球状アウトロータで包み込む構成である。球状アウトロータは2つのステータ振動子の外周部における摩擦駆動により3軸回転が可能である。試作したステータ振動子の外周部の変位を調べ、動作原理を確認した。

1. はじめに

近年、メカトロニクス・ロボット技術の進展に伴い、従来よりも軽量、高機能、高精度、狭い空間での移動・作業に優れる多自由度(MDOF)アクチュエータが必要とされている[1],[2]。その中でも球面超音波モータ(SUSM)は、以下の特徴を有するため、多自由度駆動源として適していると考えられる[1],[6]。

- 1) 関節や眼球などの駆動・ジョイント機能を兼備し、複雑な多自由度動作で直接駆動ができる。自己保持特性を有し停止時に通電が不要である。
- 2) 低速時に高トルク特性を有するため減速器が不要であり、駆動システムの小型・単純化・軽量化が実現できる。
- 3) 回転の中心が全軸で一致するため、運動方程式が簡単になり、超音波モータの高速応答性と高制御性を活かした動作が期待できる。
- 4) 潤滑油の必要がない、電磁ノイズを発生しないなどの特徴を有し、環境性に優れる。

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多自由度球面超音波モータ(MDOF SUSM)を開発している[3]-[6]。本研究では、更なる高トルク化・単純化および実用化を実現するため、アウトロータ型MDOF SUSMを考案・検討した[6]。球状アウトロータは2つのステータ振動子の外周部駆動により3軸の回転が可能である。

本報告では考案したアウトロータ型MDOF SUSMの動作原理、基本構造、有限要素法を用いたステータ振動子の解析・設計などについて報告する。

2. 動作原理

本研究で考案したステータ振動子は金属円板の上下両面に貼り付けた2枚の圧電円板により、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、計5つの振動モードが励振可能である。これらの振動モードの組み合わせによって、摩擦接触面に楕円変位が形成され、3軸上で回転が可能である。

Fig.1に各軸回転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とMDOF SUSMの動作原理を述べる。

(a) X(Y)軸回転：ステータ振動子に電圧(駆動周波数 f_1)を印加する場合、 R_1 -modeおよび B_{11} -mode(B_{11}' -mode)が励振される。 B_{11}' -modeは B_{11} -modeの直交する振動モードである。 R_1 -modeと B_{11} -modeの組み合わせによりX軸回転が実現できる。同じ原理で R_1 -modeと B_{11}' -modeを組み合わせにより、Y軸回転が実現可能である。

(b) Z軸回転：ステータ振動子に電圧(駆動周波数 f_2)を

印加することにより、 $((1,1))$ -modeと $((1,1))'$ -modeが励振される。この2つ振動モードの組み合わせによって振動モード回転が生じ、Z軸回転が実現できる。

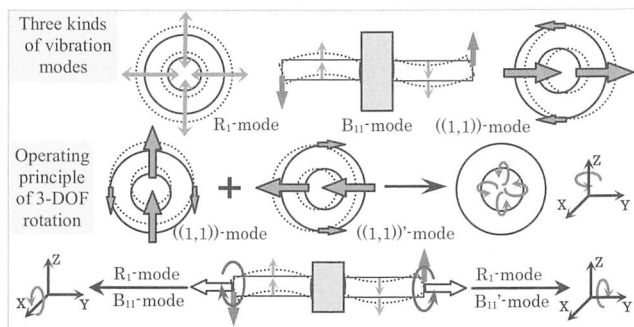


Fig. 1 Operating principle of the outer-rotor-type MDOF SUSM.

3. モータの基本構造

3.1 ステータ振動子と圧電円板

Fig.2(a)に本研究で提案するアウトロータ型MDOF SUSMのステータ振動子の構造図を示す。円環状のステータ振動子外周部の振動変位と発生力を利用する。駆動力を増加させるため、振動子の外周部とアウトロータの接触面に球面加工を施している。また、屈曲振動モードが励振される時、4つの 33° 幅の最大変位部分[4]だけを利用し、不要摩擦面を一部切除した。

Fig.2(b)および2(c)にステータ振動子に貼り付けた圧電円板01, 02(富士セラミックス, C213, 1.2mm厚)の電極パターン図を示す。圧電円板01は R_1 -mode励振用であり、圧電円板02の電極は4分割され、 B_{11} -mode(B_{11}' -mode)と $((1,1))$ -mode[$((1,1))'$ -mode]励振する。

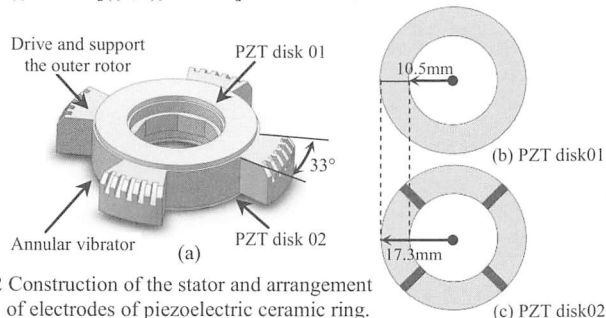


Fig. 2 Construction of the stator and arrangement of electrodes of piezoelectric ceramic ring.

3.2 モータの基本構造

本研究で提案したアウトロータ型MDOF SUSMの断面構造図をFig.3に示す。球状アウトロータは2つのステータ振動子を包み込んでいる。ステータ振動子の間に1つのスプリングを配置され、中心に棒状回転シャフトを挿入し支持する。回転シャフトは軸方向に段付き構造となっており、その外周部に正方形切除加工を施している。ステータ

振動子は軸方向にスライドでき、スプリングによりアウターロータに予圧される。また、回転シャフトはステータ振動子が回転しないように穴形状は回転シャフト外周に合わせる。

このような構造では従来型 MDOF SUSM に存在する予圧の不均一さ、振動子回転軸の不一致、支持部への不要振動の発生などの問題点を解決できると考えられる。また、円環振動子外周駆動による駆動半径の増加により、高トルク化が期待できる。球状アウターロータの表面が広く露出しており、ロータ回転位置検出装置や出力アームの配置の自由度が高い。

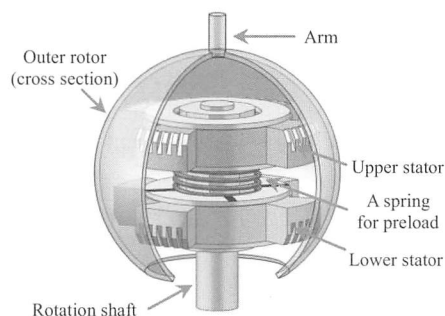


Fig. 3 Assembly and component parts of SUSM in sandwich structure.

4. 振動子設計

有限要素法解析(FEM, ANSYS Inc.)を用いてステータ振動子形状の設計を行った。具体的には振動子の厚みと外径を変化させることによって利用する3種類の振動モードの共振周波数の近接を試みた。ステータ振動子を Fig.4 に示す。アウターロータの内径 $R_0=28\text{mm}$ 、シャフトの内径(振動子の内径) $R_1=9\text{mm}$ に固定して解析を行った結果を Fig.5 に示す。Fig.5(a)より振動子厚み $D=9\text{mm}$ において B_{11} -mode (B_{11} '-mode)および R_1 -mode の縮退が確認された。さらに Fig.3(b)より振動子外径 $R_2=17.8\text{mm}$ において縮退が確認された。最終的に、外径 $R_2=17.8\text{mm}$ 、厚み $D=9\text{mm}$ 、球状アウターロータを支持・駆動する4つの 33° 幅の接触部分の外径は $R_3=25.5\text{mm}$ と定めた。

FEM 解析により、共振周波数は、 B_{11} -mode が 46.72kHz 、 R_1 -mode が 46.76kHz 、 $((1,1))$ -mode が 37.00kHz であった。

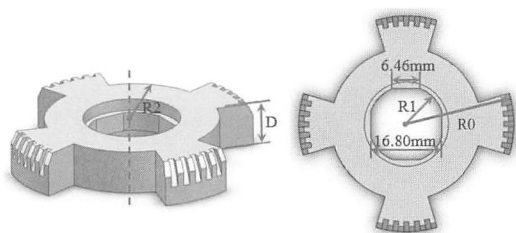
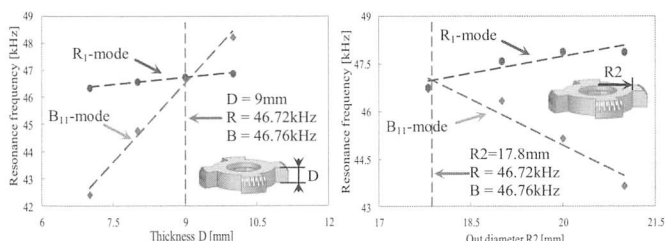


Fig. 4 Stator model and parameters for FEA analysis.



(a) D vs. resonance frequency. (b) R2 vs. resonance frequency.

Fig. 5 Simulated resonant frequency vs. parameters of stator.

5. 実験結果

試作した MDOF SUSM のステータ振動子を Fig.6 に示す。振動子の上下表面に2枚の PZT 圧電円板を貼り付け、圧電円板の電極に導線をはんだ付けしている。

2 つステータ振動子のアドミタンス特性と共振周波数を Table I に示す。製作誤差が存在するため、2 つのステータ振動子は同じではないが、振動子特性と FEM 解析では同様の結果が得られた。

試作したステータ振動子を励振させて、外周にボールベアリングを接触させた結果、3 軸方向に対応する回転が得られ、動作原理に従う楕円運動の発生を確認した。

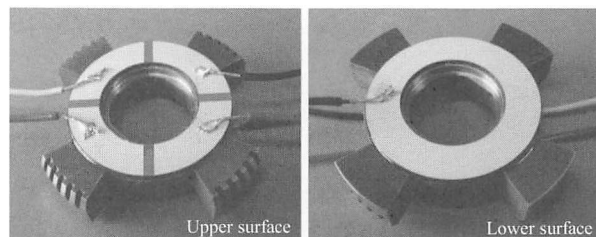


Fig. 6 Photograph of the prototype stator vibrator.

Table I. Resonance frequency and admittance characteristics of the stator vibrators.

Basic characteristics of stator	B_{21} -mode	R_1 -mode	$((1,1))$ -mode
Upper stator			
Resonance frequency(kHz)	47.75	47.98	37.39
Admittance (mS)	2.68	1.52	1.43
Lower stator			
Resonance frequency(kHz)	47.79	47.87	37.42
Admittance (mS)	3.53	1.74	1.61

6. おわりに

本研究ではアウターロータ型 MDOF SUSM を考案し、有限要素法を用いてステータ振動子の設計を行った。また、試作した振動子を利用してモータの動作原理を確認した。今後、球状アウターロータを試作し、モータの性能を実験的に明らかにする。また、モータ耐久性向上の方法及び位置決めへの応用などについて検討する。

参考文献

- [1] 矢野智昭：“宇宙用球面モータ”，第 28 回日本ロボット学会学術講演会予稿集，J2010AC1N2-3，2010.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 盧波，青柳学，田村英樹，高野剛浩：“嵌入型円環状多自由度球面超音波モータの開発”，日本機械学会 2011 年ロボティクス・メカトロニクス講演会，pp. 1A2- F08, 2011.
- [6] 盧波，青柳学：“アウターロータ型多自由度球面超音波モータの検討”，ROBOMECH2012 講演論文集，2P1-D10, 2012.