

磁歪材料を用いた 3 軸球面モータの特性評価

Study on three-DOF drive for Micro Spherical Motor using Magnetostrictive Material

上野 敏幸*¹ (正員), 坂本 龍介*¹ (学生員), 山田 外史*¹ (正員)

Toshiyuki UENO (Mem.), Ryusuke SAKAMOTO (Stu. Mem.), Sotoshi YAMADA (Mem.)

We propose a three-DOF spherical motor using magnetostrictive material (Galfenol). The motor consists of four U shape cores of Galfenol rods wound two coils, a permanent magnet, iron fixture, elastic ring and spherical rotor. Top of the rod is shaped step to exert torque. The magnetomotive force of the magnet provides bias magnetostriction for the rods and attractive force to maintain the rotor on the magnet. When opposite phase currents flow in coils of opposing rods, the torque for X or Y axes rotation is exerted on the rotor and the rotor is rotated based on smooth impact drive mechanism by saw tooth deformation of the rod, slowly expansion (contraction) and rapidly contraction (expansion) of the rods. On the other hand, when opposite phase currents flow in two coils of four rods, torque for Z axis rotation is exerted on the rotor by bending deformation of four rods. In this paper, the displacements of rods with sinusoidal and sawtooth currents resulting in angular velocity of the rotor were investigated to verify the principle.

Keywords: magnetostriction, iron-gallium alloy, spherical motor, three-DOF, bending deformation.

1 緒言

近年、災害現場の探索や内視鏡手術、スキャナミラーの角度制御など、狭所空間で利用できる多自由度マイクロアクチュエータの開発が求められている。小型で多自由度の動きを行う場合、1 個で多軸の回転を可能にする球面モータが有利である。球面モータは従来の 1 軸の回転モータを 3 個組み合わせるものに対し、コンパクトで小型、軽量かつ高効率である特徴を有する。球面モータの研究開発においては、従来から電磁力や圧電素子を利用する試みがあるが、概して大型で、電磁型では構成部品が多く機構が複雑であること、圧電型では、脆性材料の耐久性や、高周波で高電圧を出力できる電源を要するといった課題があり、ほとんど実用化に至っていない[1, 2]。

我々は、磁歪材料（鉄ガリウム合金、Galfenol[3, 4]）を用いた小型でシンプル、かつ低電圧駆動の球面モータの開発を行っている。鉄ガリウム合金は鉄系の磁歪材料で、最大磁歪が 300 ppm、引張りや曲げ、衝動などの外力に強く、機械加工が可能な特徴を有する。本研究では、これまで 2 軸駆動のモータについて、直径 3 mm 径の小型のものを試作し、回転速度やトルク等の測定により球面モータの実用化の可能性を探ってきた

[5-7]。本稿では、自由度を更に増やした 3 軸駆動の球面モータを提案する。その動作原理を確認するため磁歪の変位特性や駆動周波数をパラメータとしたロータの回転速度の測定を行ったので報告する。

2 構成と駆動原理

提案するモータの構成を Fig. 1 に、断面図を Fig. 2 に示す。ステータは、直径 5 mm 径の磁性体で構成される円柱治具に、2 組の対になる A1 と A2, B1 と B2 の 4 本の鉄ガリウム合金($\text{Fe}_{81.6}\text{Ga}_{18.4}$)のロッドが 90 度等配で接合されたものである。ロッドの先端には直径 4 mm 径の球面ロータが保持されている。ロッドは、 $1.5 \times 1 \times 10 \text{ mm}^3$ の角柱の中央に幅 0.5 mm 長さ 7 mm のスリットが入った U 字型になっており、その 2 本の足には巻数 167 ターン、抵抗 6.5 Ω の駆動コイルが巻かれている。またロッドの先端はロータの直径に合わせ、適度に側面からトルクを作用させるように段差に加工されている。ロッドの外周には更にリン青銅のリング

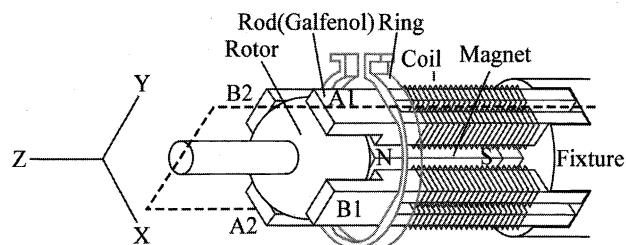


Fig. 1 Configuration of spherical motor.

連絡先：上野 敏幸，〒920-1192 石川県金沢市角間町，
金沢大学理工研究域電子情報学系，
e-mail: ueno@ec.t.kanazawa-u.ac.jp

*¹ 金沢大学

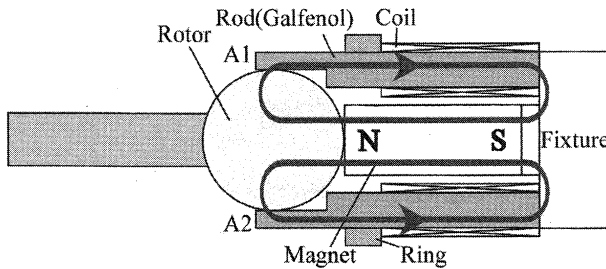


Fig. 2 Cross section of spherical motor.

が取り付けられ、これを収縮し締め付けることで、ロッドの側面からロータに適度な押しつけ力が作用する。この加圧で適度な摩擦力が発生し、静止時にロータの角度を保持することができる。

合計 8 個の駆動コイルの励磁パターンでロッドの変形を切り替えることで、ロータの 3 軸回転が実現できる。駆動原理について説明する。まずステータの中央には $2 \times 2 \times 5 \text{ mm}^3$ の永久磁石(Nd-B-Fe)が配置され、この起磁力で Fig. 2 のように磁石、ロータ、ロッド、治具で構成される閉磁路内を磁束が環流する。ロッドは長手方向に磁化容易軸があり磁歪効果により、このバイアス磁束でロッドには適度な長手方向の様な伸びが発生している。

X 軸回転では A1 と A2 のロッドを利用する。Fig. 3 のように対になるロッドのコイル（それぞれのロッドの足に巻かれた 2 個の駆動コイルは同相）に逆位相の電流を流すと、ロッド、ロータ、治具で構成される閉磁路内を磁束が流れる。この磁束は A1 と A2 のロッドでは逆方向で、これがバイアス磁束に重畳することで、A1 では磁束が増加し伸びが、A2 では磁束が減少し縮みが発生する。この伸縮が摩擦力を介し、ロータにトルクを作用する。また電流の方向を逆向きにすることで、トルクの方向は逆になる。また Y 軸回転のためには B1, B2 を利用し、同様な電流パターンで駆動コイルを励磁する。

Z 軸回転においては、4 個のロッドを同時に利用する。Fig. 4 のように、各ロッドの足に巻かれた 2 個の駆動コイルに逆位相の電流を流すとロッド内の閉磁路を磁束が環流する。この磁束がバイアス磁束に重畳することで、ロッドの 1 本の足で磁束が増加し伸びが、他方の足では磁束が減少し縮みが発生する。つまりロッド内で伸びと縮みが同時に発生する。その結果、片持ち梁のように根本が固定されたロッドには屈曲変形が生じる。この時、ロッドの先端は、A1 と A2 では X

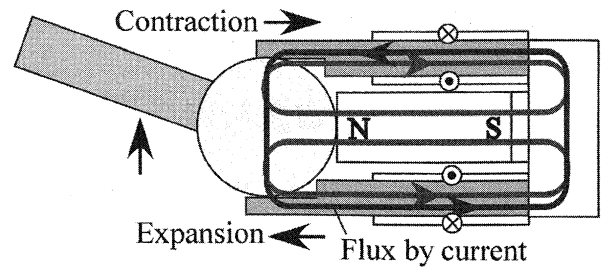


Fig. 3 Deformation of rods by currents of 180° phase difference flowing in coils in opposing rods.

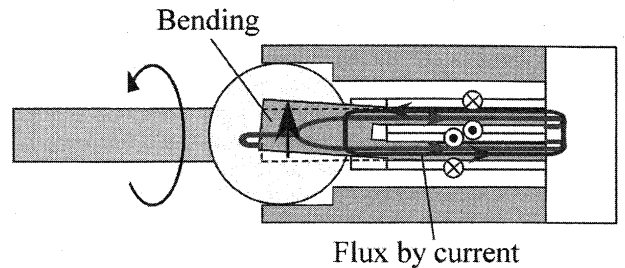


Fig. 4 Deformation of rods by currents of 180° phase difference flowing in two coils in four rods.

軸方向（互いに逆方向）、B1 と B2 では Y 軸方向（互いに逆方向）に変位し、この変位が摩擦力を介し、ロータに Z 軸回転のトルクを作用する。

以上に述べた励磁パターン及び、摩擦トルクにより、ロータは各軸において微小回転するが、1 方向への連続的な回転のためには、スムーズインパクト駆動 (SIDM) の原理を利用する[8]。励磁電流をノコギリ波状にすると、ロッドには電流に追従したノコギリ波状の変位が生じる。例えばノコギリ波の緩やかな立ち上がり時は A1 では緩やかな伸びが、A2 では緩やかな縮みが生じ、摩擦力が十分大きい場合、ロータはその伸縮に同期し微小回転する。一方、電流の急な立下り時は A1 では急な縮みが、A2 では急な伸びが生じる。ここでロータの質量による慣性力が十分大きい場合（慣性力 > 静止摩擦力）、ロータとロッド間で滑りが生じる。この滑りの分、ロータは回転する。これを繰り返すことでロータが一方向へ連続的に回転する。逆方向の回転のためには逆ノコギリ波で駆動コイルを励磁する。これらの駆動方法は X, Y, Z 軸で共通である。

3 試作と測定結果

以上に述べた駆動原理を試作で検証した。作製しモータを Fig. 5 に示す。使用した鉄ガリウム合 (Galfenol) は最大磁歪を増加させるため応力焼き鈍

処理を施したもので、U字コアの形状加工は、精密加工 (NC フライス加工) に行った。またロッドと治具の接合はエポキシ系の接着剤を用い、保持具を用い組み立てることで、ロッドの平行度を出した。

本研究では、励磁電流を、共振周波数よりも十分低い周波数 100 Hz で変化させたロッドの変位と、ノコギリ波で変化させた過渡的なロッドの応答、およびロータの回転速度を測定した。Fig. 6 に測定系を示す。コイルの励磁は電流制御で行った。それぞれの測定で、ファンクションジェネレータ(WAVE FACTORY 1945, NF 回路製)から出力した信号波形をバイポーラ電源(BPS120-5, 高砂製作所製, 1 A/V)で増幅した正弦波電流(±1.2 A, 100 Hz, 4 周期), およびノコギリ波電流(±0.2 A, 1 kHz, 連続)を駆動コイルに流した。この時の電流の波形は、電流プローブ(TM502A, Tektronix 製)にて確認した。ロッド変位の計測には、レーザードップラー振動計(LV-1710, 小野測器製, 周波数帯域 100 kHz)を用い、X, Y 軸回転においては、長手方向の伸び変位の測定のためロッドの先端面の中心部に、Z 軸回転では曲げ変位の測定のためロッド側面(できるだけ先端部)にレーザを当てた。ロータの回転角度および角速度の計測のために、ロータにシャフトを接合し、そ

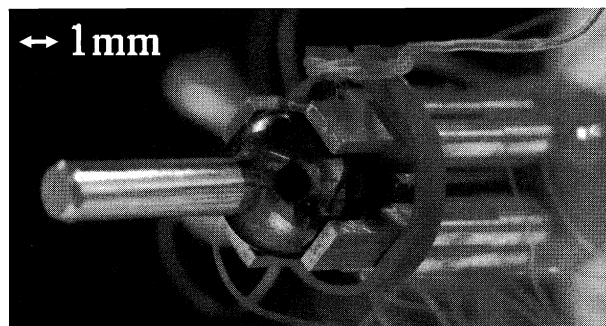


Fig. 5 Fabricated spherical motor.

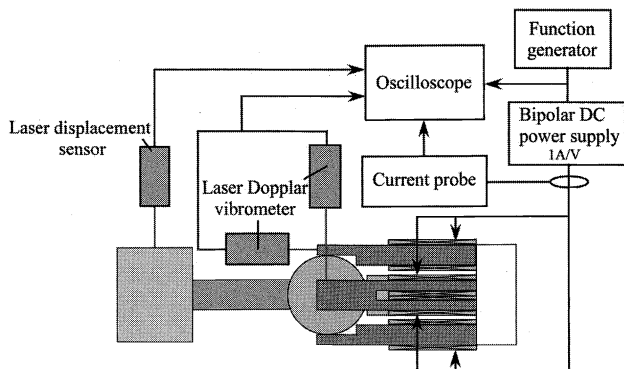


Fig. 6 Measurement setup.

の先端に角柱の $5 \times 5 \times 4\text{mm}^3$ の真鍮製の錘を取り付けた。この錘はロータの回転に必要な慣性力の発生にも寄与する。X, Y 軸回転においては、錘の側面の中央部、Z 軸回転においては、側面の端付近の変位を測定し、これらを微小角度と仮定することで、変位を角度に換算し、回転速度を算出した。

3.1 変位の測定結果

Fig. 7 は X 軸回転のために A1 と A2, Fig. 8 は Y 軸回転のために B1, B2 のコイルを励磁した場合の励磁電流と変位の関係を測定した結果である。ここでは変位を拘束しないよう締め付けリングを取り付けない場合にて計測を行った。Fig. 7 にあるよう磁石のバイアスで、電流ゼロで磁歪が発生しており、電流の増加により A1 では変位が増加し、A2 では減少していることが確認できる。同様に Fig. 8 では B1 が増加、B2 が減

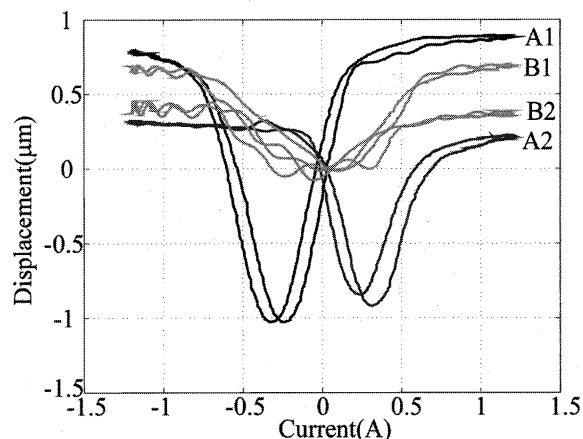


Fig. 7 Displacements vs. current with sinusoidal currents of 180° phase difference, A1-A2.

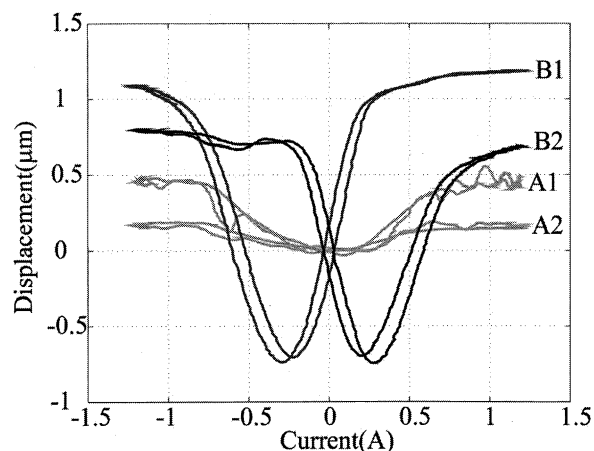


Fig. 8 Displacements vs. current with sinusoidal currents of 180° phase difference, B1-B2.

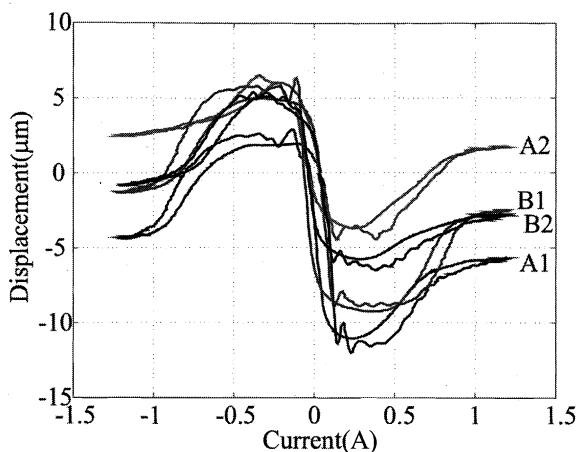


Fig. 9 Displacements vs. current with sinusoidal currents of 180° phase difference flowing in 2 coils of 4 rods.

少している。また変位は $\pm 0.2A$ の範囲で線形に変化し、A1で $1.7\ \mu\text{m}$ 、A2で $1.2\ \mu\text{m}$ 、B1で $1.7\ \mu\text{m}$ 、B2で $1.4\ \mu\text{m}$ (平均 $1.5\ \mu\text{m}$)の変位幅があった。これは、バルクの物性値の磁歪(200 ~ 300 ppm)で換算した変位と同程度で、U字型への微細加工後も磁歪特性が維持されていることがわかる。また線形領域の傾き d (変位/電流) はA1で $4.59\ \mu\text{m}/\text{A}$ 、A2で $3.65\ \mu\text{m}/\text{A}$ 、B1で $6.79\ \mu\text{m}/\text{A}$ 、B2で $6.40\ \mu\text{m}/\text{A}$ 、平均で $5.36\ \mu\text{m}/\text{A}$ と算出される。ロータの回転には、この線形領域の変位を利用するため $\pm 0.2A$ の範囲で電流を励磁する。ロッドで変位幅および傾きのバラツキについて、これはそれぞれのロッドの個体差であり、鉄ガリウム合金の結晶構造などに起因する。ロッドの伸縮を効率よく利用するためには、バイアス時のロッドの変位は、変位幅の中央50%付近にある場合が望ましい。バイアス時の変位はA1とA2でそれぞれ59%と79%、B1とB2でそれぞれ43%と50%で、A2においては変位幅が小さいためバイアスが大きくなったが、他の3本については、ほぼ適切なバイアスが付加されていることが確認された。ここで励磁していないロッドの変位幅は $0.5\ \mu\text{m}$ 程度で、また $\pm 0.2A$ の線形領域においては変位がほとんど発生しないことがわかる。 $\pm 0.2A$ 以上から変位が発生するのは、励磁したロッドが磁気飽和し、この漏れ磁束が作用したものと推測される。従って線形領域では、励磁しないロッドの変位はロータの回転に寄与せず、励磁したロッドの変形、ひいてはその方向にロータが回転するものと期待できる。

次にZ軸回転の検証のため、全ての駆動コイルを励磁した場合の測定結果をFig. 9に示す。この場合、先

に述べたとおり、各ロッドの足に巻かれた2個の励磁コイルの電流の向きは逆位相とした。4本のロッドは同じ方向に屈曲変位し、変位は $\pm 0.1A$ 付近で最大値に近づき、 $\pm 0.2A$ において最大、A1, A2でそれぞれ $13.7\ \mu\text{m}$ 、 $10.0\ \mu\text{m}$ 、B1, B2でそれぞれ $14.5\ \mu\text{m}$ 、 $11.3\ \mu\text{m}$ 、平均で $12.4\ \mu\text{m}$ の曲げ変位が発生した。線形領域の傾き d はA1, A2でそれぞれ $85.1\ \mu\text{m}/\text{A}$ 、 $47.6\ \mu\text{m}/\text{A}$ 、B1, B2でそれぞれ $76.7\ \mu\text{m}/\text{A}$ 、 $58.0\ \mu\text{m}/\text{A}$ 、平均で $66.9\ \mu\text{m}/\text{A}$ であった。Fig. 7から9の結果を比較すると、Z軸回転の場合の励磁において、変位が $\pm 0.1A$ とより小さな電流で最大値に達していることがわかる。これはZ軸回転の励磁では、閉磁気回路がロッド内で構成され、X, Y軸回転(ロータとロッドの空隙を通る閉磁気回路)の場合よりも磁気抵抗が小さいからである。ここで変位が $\pm 0.5A$ から減少するのは、ロッドの一方の足では伸びが最大値に達した後に変化しないのに対し、他方の足では変位が縮みから伸びに逆転するからである。

以上から、3軸のロータの回転には、電流振幅が $\pm 0.2A$ 程度あれば十分であることを確認した。

3.2 ノコギリ波電流でのロッドの変位測定結果

次にノコギリ波電流($\pm 0.2A$, 周波数 $1\ \text{kHz}$)でコイルを励磁した場合のロッドの変位を測定した。Fig. 10はX軸回転のためにA1とA2を、Fig. 11はY軸回転のためにB1とB2のコイルを励磁した場合の過渡応答である。励磁したロッドは、電流に同期し、ほぼ時間遅れなく追従し、緩やかな伸縮また急峻な伸縮の変位が発生することがわかる。4本のロッドの変位の平均は $1.2\ \mu\text{m}$ で、先の変位測定の平均 $1.5\ \mu\text{m}$ に対して約20%減少した。これは線形領域のみの励磁を行っていること、また若干ではあるが、リングの締め付けでロッドの変形が拘束されたためだと思われる。先の場合と同様に、励磁していないロッドも漏れ磁束により変位しているが、その変位幅は $0.1\ \mu\text{m}$ から $0.1\ \mu\text{m}$ と小さいため回転においてはその影響は無視できると思われる。また変位のバラツキは先の変位の測定で示された傾向と同様である。

Fig. 12は、Z軸回転のためにコイルを励磁した場合の変位の過渡応答である。4本のロッドが電流に追従したノコギリ波で変位した。A2, B2では $\pm 0.1A$ 付近で変位が飽和している。変位幅は平均で $7.3\ \mu\text{m}$ と、静特性の $12.4\ \mu\text{m}$ と比較し、約40%減少した。X, Y軸と同様に、この原因は、リングによるロッドの変形の拘束によるものと考えられる。

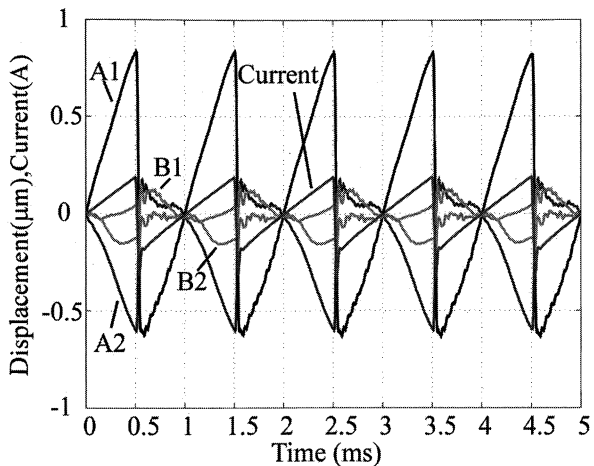


Fig. 10 Time response with saw tooth currents of 180° phase difference, A1-A2.

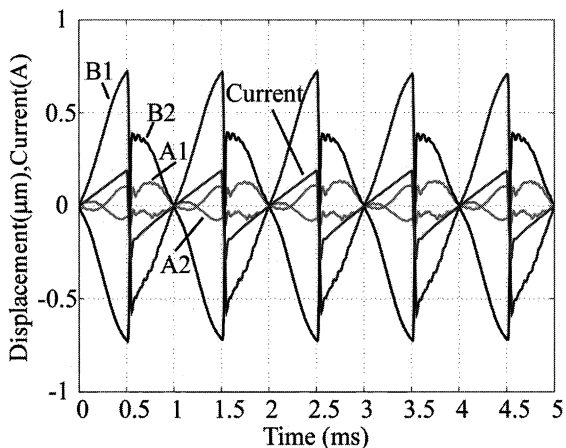


Fig. 11 Time response with saw tooth currents of 180° phase difference, B1-B2.

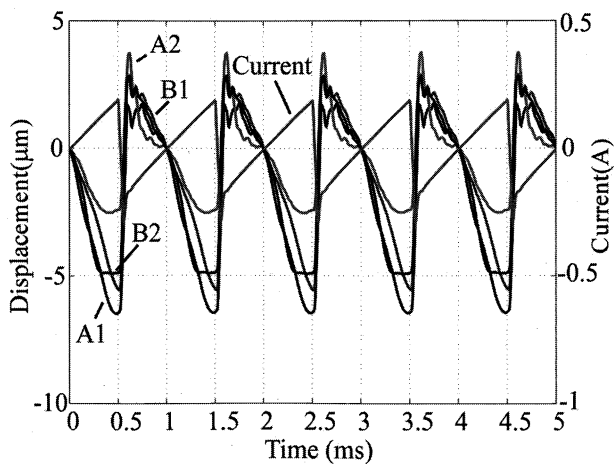


Fig. 12 Time response with saw tooth currents of 180° phase difference flowing in 2 coils of 4 rods.

3.3 ロータの回転速度

駆動周波数をパラメータとした場合の回転速度を測定した。ここではX軸回転でA1からA2、Y軸回転でB1からB2、Z軸回転でA1からB1に向かう方向を順方向、反対を逆方向とする。Fig. 13はX、Y軸回転での順方向、逆方向の周波数と回転速度の関係を測定した結果である。プロット点は測定値で、実線でその傾向を示す。概して、回転速度は低周波数域で比例的に増加し、最大値を取った後、減少する傾向であった。例えばX軸の順方向、逆方向では約6 kHz、Y軸の順方向、逆方向では約7 kHzまで周波数に比例的に増加し、これ以上の周波数では減少した。この理由として、低周波数域では、SIDMの摩擦駆動原理に従い、1ノコギリ波でほぼ同じ回転変位が発生し、つまり単位秒あたりのノコギリ波の数に比例し角速度が増加する。一方、

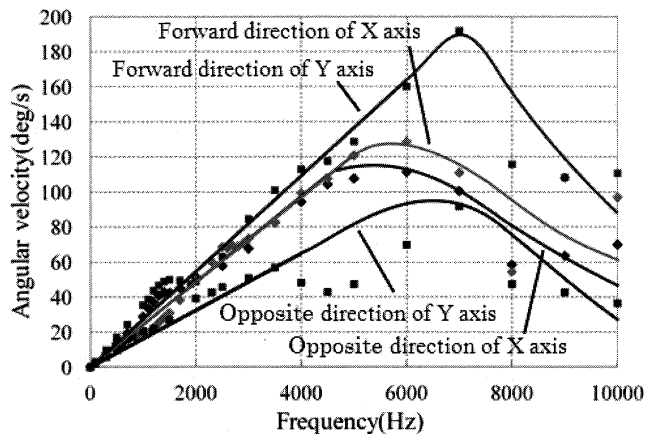


Fig. 13 Relationship between driving frequency and angular velocity for X and Y axis rotations.

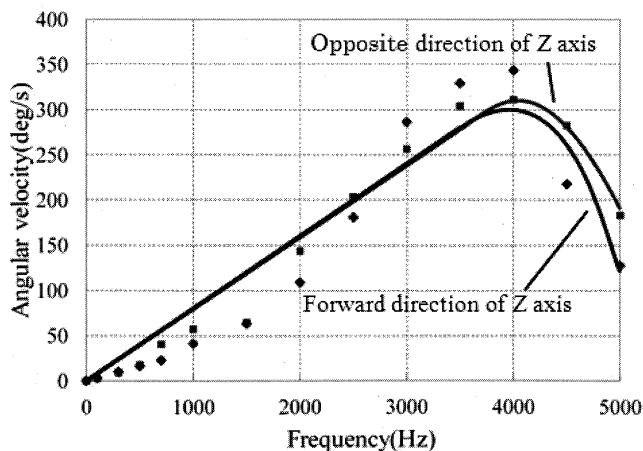


Fig. 14 Relationship between driving frequency and angular velocity for Z axis rotation.

周波数が高くなると、ノコギリ波の緩やかな立ち上りにおいても電流の傾きは急になり、この部分でも滑りが生じる。つまり両方において滑った状態になり変位が生じない。また高周波で速度が減少する理由としては、バイポーラ電源の特性で、電流がノコギリ波状に出力されていないことも考えられる。それぞれの回転での傾きの違いについて、ロッドとロータの接触の不均一性やロッドの個体差による変位の違いが原因であると思われる。これを裏付けるよう、低周波数においても、X軸回転の励磁時に僅かなY軸回転が生じるなど、意図しないトルクの影響でロータが傾いて回転する場合が見られた。回転速度の最大値はX軸回転では周波数6 kHzにおいて順方向で110 deg/s、逆方向で130 deg/s、Y軸回転では7 kHzにおいて順方向で190 deg/s、逆方向で90 deg/sであった。トルクは、リングの締め付けによる加圧の仕方、また励磁電流の波形を変えることによりさらに増加が可能であると思われる。

Fig. 14はZ軸回転時の周波数と角速度の関係を測定した結果である。回転速度は順方向、逆方向ともに約4 kHzまで周波数に比例的に増加し、これ以上の周波数では減少していった。回転速度が減少する原因は、先の述べたよう周波数が高くなるにつれて緩やかな立ち上がりでも滑りが生じること、また屈曲変形は一般に共振周波数が低いいため、共振周波数以上の励磁電流ではロッドの変位が生じない2点の理由が考えられる。回転速度の最大値として周波数4 kHzにおいて順方向で350 deg/s、逆方向で310 deg/sを確認した。

4 結言

本研究では、鉄ガリウム合金のU字コアを基本にした3軸球面モータを提案し、実験によりその駆動原理を検証した。その結果、コイルの励磁パターンを変えることにより3軸駆動に必要なロッドの伸縮および屈曲変形が発生することを確認した。そしてノコギリ波電流によるコイルの励磁でロータが3軸方向に独立して連続的に回転すること、また低周波数域で駆動周波数に比例し回転速度が増加することを確認した。今後の予定として、ロータを安定に回転させるための締め付けの機構や駆動電流波形の改善を行うと同時に、モータの特性を示すトルクや駆動電圧の評価などを詳細に行う。本研究では、2軸駆動の球面モータにおいて、USB電源(5V)で動作するオペアンプを用いたノコギリ波電流発生回路にてモータを駆動することに成功している。同様な電源を3軸にも拡張し、駆動回路を含めた

球面モータのシステムの開発、および実用化を目指す予定である。

謝辞

本研究は、財団法人三豊科学技術振興協会および科学技術振興機構の研究助成（研究成果最適化展開支援事業 A-Step）にて行われた。

(2011年4月1日受付, 2011年9月13日再受付,
2011年10月15日再々受付)

参考文献

- [1] 矢野他, 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.
- [2] 前野 他, 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, 16(8), pp. 1115-1122, 1998.
- [3] A.E. Clark, M. Wun-Fogle, J.B.Restorff, Magnetostrictive Properties of Body-Centered Cubic Fe-Ga and Fe-Ga-Al Alloy, *IEEE, Trans. Mag.*, Vol. 37, pp. 3238-3240, 2000.
- [4] A.E. Clark, M. Wun-Fogle, J.B.Restorff, Magnetostrictive property of Galfenol alloys under compressive stress, *Materials Transaction*, Vol. 43, pp. 881-886, 2002.
- [5] T.Ueno etc., Machining of Iron-Gallium for Microactuator, *Sensors and Actuators A*, 137, pp. 134-140, 2007.
- [6] T.Ueno etc., Miniature spherical motor using iron-gallium alloy(Galfenol), *Sensors and Actuators A*, 154, pp. 92-96, 2009.
- [7] 上野, 澤村, 山田, 鉄ガリウム合金を用いた球面モータの小型化と駆動評価, 電磁力関連のダイナミクスシンポジウム講演論文集, pp. 462-467, 2010.
- [8] 吉田他, スムーズインパクト駆動機構(SIDM)の開発 (第2報), 駆動電圧波形の最適化, 精密工学会誌, No. 68, pp. 536-542, 2002.