J113011

14-12 球面ステッピングモータの回転特性*

佐々木 亮^{*1}, 五福 明夫^{*2}, 矢野 智昭^{*3}, 柴田 光宣^{*4}

Rotation characteristics of a 14-12 spherical stepping motor

Ryo SASAKI^{*1}, Akio GOFUKU^{*2}, Tomoaki YANO^{*3} and Mitsunobu SHIBATA^{*4}^{*1}Graduate School of Natural Science and Technology, Okayama Univ., Japan
3-1-1, Tsushima-Naka, Kita-ku, Okayama, 700-8530 Japan^{*2}Graduate School of Natural Science and Technology, Okayama Univ., Japan^{*3}National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, Japan^{*4}Faculty of Engineering, Okayama Univ., Japan

When a robot system is developed by only normal motors that rotate around axis, the necessary number of motors is the same as that of joints resulting in large and complicated system. On the other hand, spherical motors will realize a small and simple mechanism because they can rotate in various directions. A group of spherical motors that can rotate in 360 degrees is proposed by applying the working principle of planer stepping motors to spherical motors. There are various types in arranging permanent magnets on the rotor and electro-magnets on the stator. The authors developed a spherical motor in which a permanent magnet is placed on the apex of a truncated octahedron for the rotor and an electro-magnet is placed on either the apex of a regular dodecahedron or the middle point of two apexes for the stator. The spherical motor has two kinds of rotation axes and rotates totally around six axes. This study evaluates experimentally (1)the relation between the frequency of 5 phase AC and rotation frequency and (2)rotation output torque of the developed spherical motor.

Key Words : Spherical stepping motor, 6-8 spherical motor, 14-12 spherical motor, actuator

1. 結 言

現在通常に用いられているモータは1自由度のものが大半である。1自由度のモータで多自由度の回転を行えるシステムを実現するには、所望する関節と同数のモータを組み合わせなければならない。それに伴うシステム全体の大型化、あるいは複雑化は避けられない。これに対して球面モータは

- ・ 複数の回転軸を有するため、モータの個数を軽減でき、システム全体の小型化、あるいは単純化を実現出来る、
- ・ 各自由度の回転中心が同じであるため、制御の簡単化による高速化が見込める、
- ・ 組み付け誤差や、難メンテナンス化による超高精度化の困難さが解消される

などといった特徴を有している^(1,2)。つまり、球面モータは従来の多自由度を有するシステムのサイズや制御をコンパクトかつスマートにすることが可能である。球面モータはこれらの特徴を活かして、全方向移動可能な移動機構の駆動部⁽⁸⁾や、ロボットの関節・眼、攪拌器⁽¹⁰⁾などへの応用が期待されている。これまでに球面モータは、電磁力によって駆動する電磁型^(1,7-10)、圧電素子を用いて発生される超音波により駆動する超音波型⁽³⁻⁵⁾、牽引力によって駆動する牽引型⁽⁶⁾などが開発されている。著者らも、電磁型球面モータを研究開発し⁽⁷⁾、その全方向移動台車の駆動輪や攪拌器への応用を検討している⁽⁸⁻¹⁰⁾。

^{*1} 岡山大学 自然科学研究科^{*2} 正員, 岡山大学自然科学研究科 (〒700-8530 岡山県岡山市北区津島中 3-1-1)

E-mail: fukuchan@sys.okayama-u.ac.jp

^{*3} 正員, 産業技術総合研究所^{*4} 正員, 岡山大学 工学部創造工学センター

電磁型球面モータはいくつかの課題を抱えている。入力するエネルギーに対して、出力されるエネルギーが高くない非効率性はその一例である。このため、エネルギー効率を上げて、高トルクを出力することが実用化において重要である。また電磁型球面モータは一般にオープンループで制御されており、回転子の姿勢計測によるフィードバック制御も回転性能向上には必要である⁽¹⁾。

高トルク出力に関して、矢野は、回転子の永久磁石と固定子の界磁巻線が無駄なく働いて回転子の出力トルクに変換され、回転子を全く異なる方向の軸周りに無限回転できる球面モータのグループを提案した⁽¹⁾。Fig.1には球面モータの回転子や固定子に利用可能な多面体の例を示す。そして、回転子には球に内接する正六面体の頂点に永久磁石を配置し、固定子には球に内接する正八面体の頂点と辺の中心に電磁石を配置した球面モータ(6-8 球面モータ)を考案し、動作シミュレーションと試作・性能評価を行った⁽¹²⁻¹³⁾。6-8 球面モータの写真 Fig.2 に示す。

6-8 球面モータでは、3つの軸周りでのみ高トルクの回転が可能であり、回転軸の数が少ない。そこで著者らは、回転子には球に内接する切頂八面体の頂点に永久磁石を配置し、固定子には球に内接する正十二面体の頂点と辺の中心に電磁石を配置した球面モータを設計して、試作した⁽¹⁴⁻¹⁵⁾。この球面モータは、6-8 球面モータにならって、14-12 球面モータと呼ぶ。本研究では、14-12 球面モータの回転特性として、回転周波数と回転出力について評価を行ったので以下に報告する。

Fig.1 The group of polyhedron

Fig.2 6-8 spherical motor

2. 14-12 球面モータの回転軸と動作原理の概要

Fig.3 The total system of a 14-12 spherical motor

Fig.4 Regular dodecahedron and truncated octahedron

Fig.5 The top view around Axis 1

Fig.6 The top view around Axis 2

2・1 回転軸

本研究で対象とする 14-12 球面モータの全体構成を Fig.3 に示す。14-12 球面モータが左下に、駆動に必要な 5 相交流の PWM を出力する SH マイコンが右下に、5 相交流の周波数を制御するための PC が右上に示されている。14-12 球面モータで使用する図形の組み合わせは、切頂八面体と正十二面体である。回転子の永久磁石は切頂八面体の頂点に配置し、固定子の電磁石は正十二面体の頂点と辺の中心に配置する。Fig.4 では、左側の図が固定子に用いる正十二面体を、右側の図が回転子に用いる切頂八面体を表している。この球面モータでは、2つの図形のいずれかの面を平行にし、その2面を垂直に貫く軸周りに回転させる。正十二面体の向かい合う面は平行であ

るので、回転軸は正十二面体の面の数の半数であり、6本存在する。切頂八面体は、正方形と正六角形の2種類の面で構成されているため、正十二面体の面である正五角形と向き合う面は、正方形か正六角形の2種類存在する。正六角形と向き合った場合を Axis 1 と呼び、正方形と向き合った場合を Axis 2 と呼ぶこととする。Fig.4の矢印は、2種類ある回転軸を示している。

まずは Axis1 周りの回転の場合について説明する。この場合は正六角形が向き合っているため、Axis 1 に沿って回転子と固定子を上から見ると、Fig.5のような図形の組み合わせとなる。これは平面ステッピングモータの構造と同じである。この切頂八面体と正十二面体の組み合わせの特徴は、上側だけでなく、反対側の下側にも同様の平面ステッピングモータの関係が存在することに加えて、2段目と3段目にも正六角形ではないが、六角形と正五角形の関係が存在することである。すなわち、この2つの図形の組み合わせは、平面ステッピングモータを回す時の回転能力に比べて、4段分同じものがあるため、単純に4倍の回転能力を持つことが期待出来る。

次に Axis 2 の場合について説明する。この場合は正方形が向き合っているため、Fig.6のような正方形と正五角形の組み合わせとなる。Axis 2 の場合でも、上側だけでなく、下側や2段目、3段目にも同じ図形の関係が存在する。従って、1組の図形の関係だけで駆動する時に比べて、4倍の回転能力を持つことが期待できる⁽¹⁴⁾。

3. 14-12 球面モータの構造

3・1 回転子と固定子

回転子の構造を説明する。永久磁石は切頂八面体の頂点に配置する。回転子の素材には NAK80 というプリハードン系金型用鋼を使用する。回転子は、その大きさが外径 62[mm]、内径 52[mm]で厚さ 5[mm]の鉄球殻をベースとする。永久磁石を外側に S 極が 12 個、N 極が 12 個向くように、しかも隣同士が同じ極とならないように交互に合計 24 個配置する。永久磁石の直径は 12[mm]、厚さは 5[mm]、磁束密度は 380[mT]で素材が NdFeB のものを使用する。そして、外径 78[mm]、内径 71[mm]の亚克力球殻をかぶせることで回転子を構成する。亚克力球殻を外した状態の回転子を Fig.7 に示す。

次に固定子を説明する。電磁石の配置は正十二面体の頂点と辺の中心に行う。固定子の素材には亚克力を使用し、外径は 120[mm]、内径は 100[mm]で厚さは 10[mm]である。試作した亚克力球殻を Fig.8 に示す。

3・2 電磁石と軸受

製作した電磁石を Fig.9 に示す。電磁石は、直径 3[mm]の鉄芯に、直径 0.2[mm]の銅線を 1000 回巻きつけている。電磁石の長さは 20[mm]である。電磁石に 0.1[A]の電流を流した時の磁束密度は 22.2[mT]である。電磁石は、正十二面体の頂点と辺の中心、そして面の中心にも配置するので合計 62 個取り付ける。また、回転子を支持するために使用するボールキャスターを Fig.10 に示す。ボールキャスターは、固定子の下 3 点と上 3 点に合計 6 個を設置している。なお、電磁石の先端と固定子の亚克力表面までのギャップは 4[mm]である⁽¹¹⁾。

Fig.7 Rotor without acrylic spherical shell

Fig.8 Stator without electro-magnets

Fig.9 Electro-magnet

Fig.10 Ball caster

4. 14-12 球面モータの回転特性

4・1 回転周波数測定

14-12 球面モータは 5 相交流で駆動されるが、5 相交流の周波数と回転周波数の関係は以下になる。まず、Axis 1 周りの回転の場合を考える。この場合は、Fig.5 に示すように正五角形が正六角形と向き合っている。従って、5 相交流を用いて、Fig.11 のように固定子の電磁石を駆動することにより、分解能 24° で回転する。つまり、

5 相交流 1 周期で $24^\circ \times 5 = 120^\circ$ 回転する。従って、5 相交流が 3 周期で $120^\circ \times 3 = 360^\circ$ 回転する。このことから、Axis 1 周りには 5 相交流の周波数の 1/3 倍が回転子の回転周波数の理論値となる。

次に Axis 2 周りの回転の場合を説明する。この場合は、5 相交流を用いて、Fig.12 のように駆動することにより、分解能 36° で回転する。つまり、5 相交流で $36^\circ \times 5 = 180^\circ$ 回転する。これから、5 相交流が 2 周期で $180^\circ \times 2 = 360^\circ$ 回転する。このことから Axis 2 周りには、5 相交流の周波数の 1/2 倍が回転子の回転周波数の理論値となる。

それぞれの Axis 周りの回転周波数を計測した結果を Fig.13 に示す。図において直線は理論値を表す。実験値は、回転の様子を動画撮影し、1 周するのに要するフレーム数から示している。図からわかるように、実験値は理論値によく一致している。

Fig.11 Rotation of rotor around the Axis 2 by 5-phase AC

Fig.12 Rotation of rotor around the Axis 1 by 5-phase AC

(a) Rotation around Axis 1

(b) Rotation around Axis 2

Fig.13 Frequency of applied 5phase AC current vs. theoretical and experimental and experimental values

4・2 回転出力トルク計測

(a) Rotation around Axis 1

(b) Rotation around Axis 2

Fig.14 Rotation output torque

回転出力トルクは、回転子に直径 2[cm]の出力棒を取り付け、回転に対して接線方向に引くように糸を取り付け、フォースゲージを用いて初動トルクとして計測した。使用したフォースゲージは、Shimpo 社の FPG-50 である。フォースゲージを PC と接続し、計測される張力をリアルタイムで PC に入力出来るようにした。Fig.14 に計測した張力から、出力棒の直径を考慮して計算したトルクと回転角速度の関係を示す。Axis 1 周の測定では、静止状態から起動し、安定した回転が出来た 5 相交流周波数域の 1-8[Hz]で行った。最大回転出力トルクは 5 相交流周波数が 1[Hz]の時の 0.0753[Nm]であった。

また、Axis 2 周りの測定では、5 相交流周波数域 1-4[Hz]の間で行った。最大回転出力トルクは、5 相交流周波数が 1[Hz]の時の 0.045[Nm]であった。

5. まとめ

本報告では、14-12 球面モータの回転特性評価として、回転角速度と回転出力トルクの計測を行った。その結果、回転角速度は理論値によく一致していることを確認した。また、最大回転出力トルクは、Axis 1 の場合には、5 相交流周波数が 1[Hz]の時の 0.0753[Nm]であり、Axis 2 の場合には、1[Hz]の時の 0.045[Nm]であった。但し、いずれの回転軸周りの回転においても、あまり高くない値であった。この原因としては、

1. 回転子を支持するために、取り付けたボールキャスターの摩擦が大きいこと、
 2. 電磁石は直径 0.2[mm]の銅線を 1000 回巻いて製作しているため抵抗が大きくなっており、電流が小さくなり電磁石で発生する磁束が大きくないこと、
 3. 回転子と固定子のギャップは 4[mm]で設計しており、かなり大きいこと、
- などが考えられる。これらを改善すれば、トルクが向上することが期待出来る。

また、トルク向上以外の今後の課題には、回転軸を切り替えるための方法の確立とそのための電磁石駆動切替システムの開発などがある。

文 献

- (1) 矢野智昭, 高トルク球面モータの開発, 第 50 回自動制御連合講演会 (2007.11.24)
- (2) 矢野智昭, 球面モータ, 日本ロボット学会, Vol.21, pp.740-743(2003)
- (3) 国立大学法人東京農工大学工学部機械システム工学科遠山研究室[球面超音波モータ]: <http://www.tuat.ac.jp/~toyama/>(2012.07.09)
- (4) ダブル技研株式会社超音波モータ: www.j-d.co.jp/ultrasonic/ultrasonic3.html(2012.07.09)
- (5) M.Hoshina, T.Masahimo, S.Toyama, "Development of Pipe Inspection Robot; Driving System and Control of Outer-rotor-typed Spherical Ultrasonic Motor", International Conference of Advanced Robotics (ICA2009), June, 2009.
- (6) Hirokazu Nagasawa, Satoshi Honda, "Development of a Spherical Motor Manipulated by Four Wires" The Fifteenth Annual Meeting of American Society for Precision Engineering, Scottsdale, Arizona, U.S.A, (2000)
- (7) 五福明夫, 永井孝和, 池下聖治, 柴田光宣, 亀川哲志, 全方位回転可能な球面モータの開発, 日本機械学会論文集 (C 編) 74(747), 2713-2720, 2008-11-25
- (8) 単万里, 五福明夫, 亀川哲志, 柴田光宣, 球面モータを用いたホロノミック全方向移動台車の開発と球面減速駆動方式の提案, 日本機械学会論文集 (C 編) Vol.77, No.784(2011), pp.4630-4640
- (9) 五福明夫, 単万里, 柴田光宣, 山西輝裕, 亀川哲志, 球面モータ駆動の攪拌器の開発, 日本機械学会論文集 (C 編) Vol.77, No.778(2011), pp.2400-2406
- (10) Wanli Shan, Akio Gofuku, Mitsunobu Shibata, Tomoaki Yano, Tetsushi Kamegawa, A Stirrer Driven by a Spherical Stepping Motor, *Proc. ISEF 2011 - XV International Symposium on Electromagnetic Fields in Mechatronics, Electrical and Electronic Engineering*, (2011).
- (11) 和田容輔, 五福明夫, 横家大貴, 球面モータにおけるホール素子を用いた姿勢検出機構の改良, 第 24 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム pp.317-320(2012)
- (12) 矢野智明, 高トルク球面モータの開発: 正六面体と正四面体に基づく球面ステッピングモータの提案, 日本 AEM 学会誌 16(2), pp.108-113(2008)
- (13) 矢野智昭, 高トルク球面モータを目指して: 正六面体と正八面体に基づくステッピングモータの解析, 日本 AEM 学会誌 17(2), pp.216-221(2009)
- (14) 矢野智昭, 高トルク球面モータの開発: 第 4 報: 切頂八面体と正十二面体に基づく球面ステッピングモータの提案, 機素潤滑設計部門講演会講演論文集 2008(8), pp.137-140
- (15) Akio Gofuku, Ryo Sasaki, Tomoaki Yano, Yosuke Wada, Mitsunobu Shibata, Development of a Spherical Stepping Motor Rotating around Six Axes, *Presented in ISEM 2011 - 15th International Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics*, (2011).