変調波磁束を用いたスクリュモータの提案

A Novel Magnetic Screw Motor Utilizing a Modulated Magnetic Flux

高原 一品^{*1} (学生員), 平田 勝弘^{*1} (正員), 新口 昇^{*1} (正員)

Kazuaki TAKAHARA (Stu Mem.), Katsuhiro HIRATA (Mem.), Noboru NIGUCHI (Mem.)

A feed screw mechanism is used in various machines and robots. Mechanical screws such as ball and slide screws have various problems due to their mechanical frictions. In order to solve these problems, a magnetic screw which is one of contactless screws has been proposed. Nowadays, magnetic screw motors which a magnetic screw is integrated with a motor are proposed. However, these screw motors require permanent magnets in their mover, and the volume of the permanent magnets increases as the stroke increases. In this paper, in order to solve these problems, a magnetic screw motor whose permanent magnets are in its stator is proposed. The static characteristics of the proposed motor is investigated using 3-D finite element analysis.

Keywords: magnetic screw, motor, linear actuator, finite element method.

(2019 年 9 月 26 日受付, 2020 年 7 月 7 日再受付)

1 緒言

回転運動を直動運動に変換することが可能な送りねじは、搬送用装置など様々な分野で用いられている。しかし、ボールねじなどの機械式の送りねじは、摩擦による発熱、摩耗、振動・騒音、低効率などの課題が存在する。一方で、磁気スクリュは磁力で力を伝達するゆえに上記の問題は生じない[1]。さらに、磁気ばねによる弾性や過負荷時に脱調する推力リミッタ機能を持つ。そのため、協働ロボットなどへの応用も期待されており、様々な磁気スクリュが提案されている。

しかし、磁気スクリュを駆動するためには、モータが必要であり、システムの大型化が問題となる。そのため、磁気スクリュとモータを一体化したスクリュモータが提案されている。C. S. Cyusa らは、磁気ナットの構造を有する回転子の内側に、磁気ねじ型の並進可動子を有する 2 可動子のスクリュモータを提案した[2]。可動子を 2 つ有しており、構造が複雑でシステムの大型化につながる。回転子と並進可動子を有するスクリュモータは他にも報告されている[3, 4]。Y. Fujimoto らはアキシアルギャップの IPM 型スクリュモータを提案した[5]。可動子、固定子共にらせん型構造をしており、構造が複雑である。さらに、可動子に

永久磁石を有するため、ストローク長に応じて永久磁石体積が増加し、高コスト化につながる。M. Sakai らはラジアルギャップの IPM 型スクリュモータを提案した[6]。M. Sakai らの提案構造も可動子に永久磁石を有するため、ストローク長の増加に従って永久磁石体積が増加し、コストが増加するという課題がある。

ストローク長による永久磁石体積の増加をなくするため、本稿では固定子に永久磁石を配置し、可動子の突極により変調された磁束を用いて駆動するスクリュモータを提案する。変調波磁束を用いた Modulated 型 (M 型) スクリュモータの構造と動作原理を説明し、有限要素解析を用いて IPM 型との特性比較を行う。

2 基本構造と動作原理

2.1 IPM 型と M 型スクリュモータの構造

IPM 型の基本構造を Fig. 1 に示し、仕様を Table 1 に示す。IPM 型は 3 相電機子巻線を有する固定子と永久磁石を有するスクリュ型可動子から構成される。固定子のティース先端には、Fig. 1(b)に示すようにらせん型突極が設けられている。スクリュ型可動子は Fig. 1(c)に示すように、可動子表面にらせん型の突極が貼り付けられている。Fig. 2(a)に示すように、X-Y 平面に着目すると 3 相 IPM 型同期モータと同様の構造をしており、Y-Z (X-Z) 平面に着目した場合、Fig. 2(b)に示すように IPM 型磁気スクリュと同様の構造をしている[7]。

次に、本稿で提案する M 型の構造を Fig. 3 に示し、仕様を Table 1 に示す。Fig. 3 に示すように、M 型は永

連絡先: 高原 一品, 〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1
大阪大学大学院工学研究科

e-mail: kazuaki.takahara@ams.eng.osaka-u.ac.jp

^{*1} 大阪大学大学院

Fig. 1 Basic structure of the IPM-type screw motor.

Fig. 3 Basic structure of the M-type screw motor.

Table 1 Specifications of screw motor.

Item	IPM-type	M-type
Outer diameter [mm]	70	
Stack length [mm]	60	
Number of coil turns	20	
Number of rotor poles	10	16
Number of stator slots	12	
Helical pitch [mm]	4	
Effective permanent magnet volume [mm ³]	16,207	6067
Permanent magnet thickness [mm]	2.0	1.4
Permanent magnet material	N48SH	
Core material	50A400

Fig. 2 Cross-sectional view of the IPM-type.

Fig. 4 Cross-sectional view of the M-type.

久磁石を有する固定子と、鉄心のみから構成されるスクリュ型可動子から構成されている。固定子には Fig. 3(b)に示すように 3 相の電機子巻線が施され、ティース先端にはらせん型の突極が設けられている。さらに、ティース開口角部には径方向に着磁された瓦型の永久磁石が配置されている。固定子内径やコイル断面積を IPM 型と統一するため、M 型の瓦型永久磁石の厚みは 1.4 mm となっている。スクリュ型可動子には Fig. 3(c)に示すように、周方向に配置された突極の先端にらせん型の突極が設けられている。X-Y 平面に着目した場合、Fig. 4(a)に示すように 3 相のバーニアモータと同様

Fig. 5 Magnetic circuit of the IPM-type.

Fig. 6 Magnetic circuit of the M-type.

の構造となっている[8]。Y-Z (X-Z) 平面に着目した場合、Fig. 4(b)に示すようにコンシークメント型磁気スクリュと同様の構造をしている[9]。X-Y 平面における極数と Y-Z (X-Z) 平面における突極のピッチは、IPM 型、M 型共に独立して決定可能である。

2.2 動作原理

次にそれぞれのスクリュモータの動作原理について説明する。スクリュモータの動作原理はモータパートとスクリュパートに分けることが可能であるため、それぞれのパートごとに動作原理を説明する。

2.2.1 IPM 型のスクリュパートの動作原理

IPM 型スクリュパートの磁束の流れを Fig. 5(a)に示す。Fig. 5(a)に示すように、磁束は可動子の永久磁石からスクリュ可動子のらせん型突極を経て固定子のティースに入り、鉄心を通り可動子に戻る。磁束が固定子と可動子のらせん型突極を通過することにより、磁気スクリュとして作用する[7]。このスクリュパートにおいては1条ねじだけでなく、多条ねじにおいても成り立つ。推力は固定子と可動子の直動と回転の電気角位相差に応じて生じる。位相差が0の場合、スクリュの電気角位相は直動方向の変位から次式のように算出できる。

$$\theta = \frac{2\pi}{L} p \quad (1)$$

ここで、 θ はスクリュの回転角度、 L はスクリュのリード長、 p はスクリュの直動方向の変位である。固定子と可動子間の相対変位がらせん型突極のピッチの半分を超えた場合スクリュ型可動子は脱調し、次の突極の位置まで可動子が移動する。

2.2.2 IPM 型のモータパートの動作原理

Fig. 2(a)に示したように、IPM 型スクリュモータの X-Y 平面での構造は3相同期モータと同様の構造をしている。そのため、通常の3相同期モータと同様の動作原理で可動子を回転させることが可能である[6]。

2.2.3 M 型のスクリュパートの動作原理

M 型スクリュモータのスクリュパートにおける磁束の流れを Fig. 6(a)に示す。固定子の永久磁石により生じた磁束はティース先端のらせん型突極からエアギャップに出て、可動子の突極と鉄心を経て再び固定子へと戻る。磁束が固定子と可動子のらせん型突極を通過することにより磁気スクリュとして作用する。このスクリュパートにおいては1条ねじだけでなく、多条ねじにおいても成り立つ。推力は IPM 型と同様に、固定子と可動子の直動と回転の電気角位相差に応じて生じる。また、固定子と可動子間の相対変位がらせん型突極のピッチの半分を超えた場合スクリュ型可動子は脱調し、次の突極の位置まで可動子が移動する。

2.2.4 M 型のモータパートの動作原理

M 型スクリュモータを回転させるために、固定子永久磁石による起磁力分布と可動子突極によるパーミアンス分布による変調波磁束を用いる。すなわち、電機子巻線に3相交流を印加することによって発生する回転磁界と、変調波磁束が同期して可動子が回転する。ここで、起磁力分布 F 、パーミアンス分布 P は以下の式で表せるとする。

$$F = F_s \sin Z_s \theta \quad (2)$$

$$P = P_0 + P_r \sin Z_r \theta \quad (3)$$

ここで、 Z_s 、 Z_r はそれぞれ固定子のティースと可動子の突極の極数であり、 F_s 、 P_r はそれぞれ起磁力分布とパーミアンス分布の振幅、 P_0 はパーミアンス分布の平均値、 θ は円周方向の機械角度である。変調波磁

Fig. 7 Analysis result of transmission forces.

Fig. 8 Magnetic flux vector distribution.

Fig. 9 Analysis result of torques.

束は起磁力とパーミアンスの積によって次式のように求められる。

$$\begin{aligned}
 F \times P &= F_s \sin Z_s \theta \times (P_0 + P_r \sin Z_r \theta) \\
 &= F_s P_0 \sin Z_s \theta - \frac{1}{2} F_s P_r \cos \{(Z_s + Z_r) \theta\} \\
 &\quad + \frac{1}{2} F_s P_r \cos \{(Z_s - Z_r) \theta\}
 \end{aligned} \quad (4)$$

可動子の突極数 Z_r は式(4)右辺の第2項もしくは第3項が回転磁界と同期するように決定される。すなわち、式(5)に示される極数の関係式が成り立つ。

$$Z_s \pm Z_r = p \quad (5)$$

ここで、 p は巻線の極対数である。

3 FEM による推力・トルク特性の評価

3.1 最大伝達推力, トルク, 鎖交磁束の評価

最大伝達推力は可動子の Z 軸方向変位を固定し、電気角 1 周期分回転させることにより確認する。本稿では電気角 2 deg ずつ回転させることとする。各モデルの推力の解析結果を Fig. 7 に示す。また、Fig. 8 に回転角 90 deg における各モデルの Y-Z 断面での磁束密度ベクトル図を示す。Fig. 7 より、IPM 型の最大伝達推力は約 102.9 N、M 型は約 21.5 N であり、M 型の最大伝達推力は IPM 型より約 79 % 減少した。固定子もしくは可動子と対向している永久磁石の体積に着目した場合、M 型の永久磁石体積は IPM 型と比較し 37 % となっており、ストロークが 0 mm の場合の永久磁石体積当たりの推力密度比は IPM 型の方が M 型の約 1.8 倍となっている。IPM 型ではらせん型突極が可動子表面全域に設けられている。それに対し、M 型の場合はらせん型突極が可動子表面の約半分だけ設けられている。そのため、IPM 型の永久磁石体積当たりの推力密度比が M 型の約 2 倍になっていると考えられる。Fig. 8 より、可動子が回転した際に可動子の突極が Z 軸方向に移動し、推力が発生していることがわかる。

次に、各モデルの最大伝達推力確認時のトルクを Fig. 9 に示す。Fig. 9 より、トルクの peek-to-peek は IPM 型で約 0.27 Nm、M 型で約 0.64 Nm であった。可動子と固定子の最小公倍数が IPM 型で 30、M 型で 24 であり、M 型の方が最小公倍数が小さいためトルクのリップルが大きくなったと考えられる。また、M 型のリップルはピーク値にばらつきが見られるが、バーニア型においては複数の変調波磁束が生じるため、コギングトルクにも高調波成分が生じる[10]。Fig. 9 のトルクには 1 次の成分のリップルがみられるが、これは磁気ね

Fig. 10 Analysis result of flux linkage.

Fig. 11 Analysis result of transmission force.

じの位相差によって推力を発生させる場合に生じる反トルクである。Fig. 9 のトルクの 1 次成分は IPM 型で 68 mNm, M 型で 16 mNm であり, 最大推力と反トルクの 1 次成分の比は IPM 型が 1.5 N/mNm, M 型が 1.4 N/mNm となった。

最後に, 各モデルの鎖交磁束を Fig. 10 に示す。Fig. 10 より, 両モデルとも 3 相交流の鎖交磁束が得られており, 3 相同期モータと同様の磁気回路を構成できていることがわかる。

Fig. 12 Harmonic component of transmission force.

Fig. 13 Analysis result of torque.

3.2 電流印加時の推力とトルク特性

本稿では電流密度が 5 A/mm^2 となるように電流振幅を決定し, $I_d=0$ 制御で電流を印加する。また, Z 軸方向に位相差 90 deg を保ちながら, 強制並進移動と強制回転させることとする。推力の解析結果を Fig. 11 に示す。Fig. 11 より, 平均推力は Fig. 7 の最大伝達推力を保っていることがわかる。これより, 電流を印加しても推力には影響はなく, 固定子と可動子の磁気スクリュとしての位相差のみで推力が決定されることがわかる。推力リップルは IPM 型で約 3.6 %, M 型で約 10.0 % となった。M 型の推力リップルは IPM 型の約 2.8 倍となったが, スクリュモータとして機能していることがわかる。M 型の推力リップルが大きくなった原因を確認するため, Fig. 11 の各モデルの推力を FFT し, 0 次成分の振幅に対する各次数成分の振幅の割合を Fig. 12 に示す。M 型においては 8 次と 24 次の成分が特に出ている。8 次は可動子突極の次数, 24 次は可動子突極と固定子スロット数の最小公倍数にあたる。IPM 型では可動子極数に対応する成分が 10 次, 固定子スロット数に対応する成分が 6 次であるがそれぞれ 0.1 % と M 型に比べ小さい。これは, 磁気スクリュと

Fig. 14 Relationship between the force per permanent magnet volume and the stroke.

してのらせんに設けられた分割溝の大きさに起因すると考えられる。理想的には磁気ねじのらせんはすべて連続であるが、実際には円周方向に分割されている。IPM 型は分割溝が狭いため影響が大きく見られないが、M 型はモータの動作原理上分割溝が広く、推力リップルの原因になっていると考えられる。また、IPM 型は 1 次成分が 0.4% 出ているが、これは可動子の軸方向長さが十分ではないため、永久磁石が移動した影響が出ていると考えられる。

次に、各モデルの電流を印加した際のトルクを Fig. 13 に示す。Fig. 13 の各モデルのトルクを平均すると、IPM 型は 1.27 Nm, M 型は 0.64 Nm であった。ただし、平均算出には 180 度点のデータは除いている。各モデルのトルクはそれぞれ最大伝達推力を出力可能であることがわかる。そのため、モータ部分をより小型化することも可能である。M 型のトルクリップルはコギングトルク同様に高調波成分が重畳されていること、ステップ角度が高調波成分に対し粗いことによりばらつきが大きくなっている。

3.3 ストローク長と永久磁石体積当たりの推力密度

IPM 型と M 型のストローク長と永久磁石体積当たりの推力密度特性の関係を比較する。永久磁石当たりの推力密度は径や永久磁石の材料、M 型の可動子突極の幅等様々なパラメータに依存する。そのため、本稿の比較はあくまでも本稿で用いた各仕様における結果である。本稿では、固定子の積厚は固定し、可動子の軸長は固定子の積厚にストローク長を加えた長さとする。ストローク長と永久磁石体積当たりの推力密度の関係を Fig. 14 に示す。Fig. 14 より、ストローク長が約 50 mm 以上の場合、本稿で提案した M 型の方が IPM 型に比べ永久磁石体積当たりの推力密度が高いことが

わかる。

4 結言

本稿では、固定子にのみ永久磁石を有し、変調波磁束を用いて駆動するスクリュモータを提案した。基本構造と動作原理について説明し、3 次元の有限要素法による磁場解析により推力・トルク特性を確認した。本稿で用いた各仕様において、提案した M 型は IPM 型と比較して、ストローク長が 50 mm 以上の範囲において永久磁石体積当たりの推力密度が高いことがわかり、有効性を示せた。

参考文献

- [1] X. G. Garcia, H. Beppu, M. Tanaka and Y. Okawa, A Vial Loading System with Non-Contact Drive Mechanism Using Magnetic Technology, *Technical Journals of Azbil Corporation*, 2017.
- [2] C. S. Cyusa and Y. Fujimoto, Enactment Based Direct-Drive Test of a Novel Radial-Gap Helical RotLin Machine, *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 54, No. 2, pp. 1273-1282, 2017.
- [3] K. Lu and W. Wu, Electromagnetic Lead Screw for Potential Wave Energy Application, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 50, No. 11, 2014.
- [4] J. Wang, K. Atallah and W. Wang, Analysis of a Magnetic Screw for High Force Density Linear Electromagnetic Actuators, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 47, No. 10, pp. 4477-4480, 2011.
- [5] Y. Fujimoto, T. Suenaga and M. Koyama, Control of an Interior Permanent Magnets Screw Motor with Power-saving Axial-gap Displacement Adjustment, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 61, No. 7, 2014.
- [6] M. Sakai, K. Hirata and Y. Nakata, Characteristics Analysis of a Helical Teethed Linear Actuator, *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, Vol. 50, No. 1-2, pp. 571-578, 2016.
- [7] R. J. A. Paul, Magnetic rotary-to-linear converter, *IEE Journal on Electric Power Applications*, Vol. 1, No. 4, pp. 115-116, 1978.
- [8] Y. Nakata, T. Fujimoto, H. Ishiguro, and K. Hirata, Design and optimization of a novel small-sized linear vernier motor without mover magnets for artificial muscle applications, *Proceedings of the IEEE INTERMAG 2012*, B G-01, 2012.
- [9] A. Heya, Y. Nakata, M. Sakai, H. Ishiguro, and K. Hirata, "Force Estimation Method for a Magnetic Lead-Screw-Driven Linear Actuator", *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 54, No. 11, Art. No. 8207805, 2018.
- [10] Y. Chen, X. Zhu, L. Quan, Z. Xiang, Y. Du, and X. Bu, "A V-Shaped PM Vernier Motor With Enhanced Flux-Modulated", *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 54, No. 11, Art. No. 8203804, 2018.