

二自由度電磁アクチュエータの磁気干渉特性

Magnetic Interference Characteristics of Electromagnetic Actuator with Two-Degree-of-Freedom

大澤文明* 岩田太陽** 波田明久** 稲熊幸雄*

Fumiaki Osawa*, Taiyo Iwata**, Akihisa Hata**, Yukio Inaguma*

Summary

A multi degree of freedom motor can constitute small-sized and lightweight systems capable of performing complicated motions. Furthermore, applications to industrial instruments by means of direct drive are expected to be promising. This study is aimed at developing practical multi degree of freedom motors capable of performing high-power rotary and linear motions using conventional three-phase inverters. This report proposes a motor that performs rotary and linear motions. First, we present a method for installing a salient pole on a needle with magnets, which can enable the use of soft magnetic materials with low eddy-current loss as iron cores. This study demonstrates the effectiveness of the salient pole in increasing the electromagnetic force. Then, the model is used to explain the interactive magnetic interference generated by the armature currents for rotational and translation motions.

キーワード：電磁アクチュエータ，二自由度，回転・直動，磁気干渉

Keywords : electromagnetic actuator, two degrees of freedom, rotary and linear motion, Magnetic interference

1. はじめに

電気機器や産業システムの複雑化や高機能化に伴い、高い制御性とバックドライバビリティを有する多自由度駆動が要求されることが多い。二自由度以上の駆動を実現するには、モータを複数組み合わせた構成になるが、ギヤやボールねじ、クランクなどの機械的な動力伝達機構を必要とする。そのため、組み合わせによる精度低下、機械装置の大型化、制御性劣化が問題となる。近年では複数の自由度の動きを単一のモータで実現できる多自由度アクチュエータの開発が希求されている。

これまでに眼球や肘・肩関節などの動きを実現する球面駆動アクチュエータや超精密位置決めステージ機

構への適用を目的として平面駆動アクチュエータが研究されている。これらは高出力化や小型・軽量化、高周波域における渦電流損が課題とされており、高い飽和磁束密度の材料を利用するなど特性の高度化に向けた取り組みが求められている。また、ダイレクトドライブを可能にする多自由度アクチュエータは、高精度な位置決めが期待できるものであるが、支持機構が複雑になり、性能劣化の要因になっている。

本研究は低渦電流損である軟磁性材を鉄心に使用することを見据えて、多自由度電磁アクチュエータの高性能化および運動制御技術の導入を目標としている。本論文では、軸方向の直動と軸中心の回転運動が可能な二自由度電磁アクチュエータに突極を設置することにより発生する磁気的な干渉メカニズムを考察する。

* 電気電子工学科

** 工学研究科 電気・電子工学専攻

2. 移動磁界

アクチュエータの1/2基本構造をFig. 1に示す。直動・回転駆動用の電機子巻線が軸方向と円周方向に2層に施されている。2組の三相巻線はそれぞれ分布巻でありY結線されている。各軸における巻線の極数は4極であり、回転と直動の磁束密度分布 B_{RL} は次式で表される。

$$\begin{aligned} B_{RL}(\theta_R, \phi_R, \theta_L, \phi_L) &= B_R(\theta_R, \phi_R) + B_L(\theta_L, \phi_L) \\ &= -\frac{3}{2}K \left[I_R \cos\left(\phi_R - \theta_R + \frac{\pi}{6}\right) + I_L \cos\left(\phi_L - \theta_L + \frac{\pi}{6}\right) \right] \end{aligned} \quad \dots (1)$$

ここで、添字 R と L は回転・直動軸を表し、 B_R と B_L は各軸の磁束密度、 θ_R と θ_L は各軸の位置を表す電気角、 ϕ_R と ϕ_L は各軸の電流位相角、 I_R と I_L は三相励磁電流の最大値、 K は巻線の有効インダクタンスに起因する比例定数である。電流位相角 ϕ_R 、 ϕ_L を変化させることにより、大きさ $3/2KI_R$ および $3/2KI_L$ を保ちながら二自由度方向に移動磁界を発生させる。

可動子表面は回転方向に4極、直動方向に2極の永久磁石がヨーク鉄心に市松状に接合されている。二自由度の方向に磁石を配置すると、可動子鉄心上に設置される磁石の面積は可動子表面積の1/2となる。そのため、可動子表面の未使用領域に鉄心突極を設置することにより磁石電磁力に併用して突極性に基づくリラクタンス電磁力を得る。

3. 磁気干渉

可動子表面の突極配置と回転・直動巻線のd,q軸電流の関係をFig.2に示す。回転と直動方向に逆突極を設置することにより回転・直動のd軸インダクタンス $L_d(R)$ 、 $L_d(L)$ とq軸インダクタンス $L_q(R)$ 、 $L_q(L)$ はそれぞれ $L_q(R) > L_d(R)$ 、 $L_q(L) > L_d(L)$ となる。このとき、 $L_q(R) - L_d(R)$ および $L_q(L) - L_d(L)$ に比例したリラクタンストルク・電磁力を発生する。回転または直動にのみ突極性をもつ突極配置もあるが、本稿では磁石電磁力を優先し、永久磁石配置後の未使用領域に突極を設置する。

逆突極を有する二自由度電磁アクチュエータの数式モデルをd-q軸座標系で表すと次式で与えられる。

$$\begin{bmatrix} v_d(R) \\ v_q(R) \\ v_d(L) \\ v_q(L) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R + p(L_d(R) + l) & -\omega(L_q(R) + l) \\ \omega(L_d(R) + l) & R + p(L_q(R) + l) \\ 0 & 0 \\ -vM_d(R) & 0 \end{bmatrix}$$

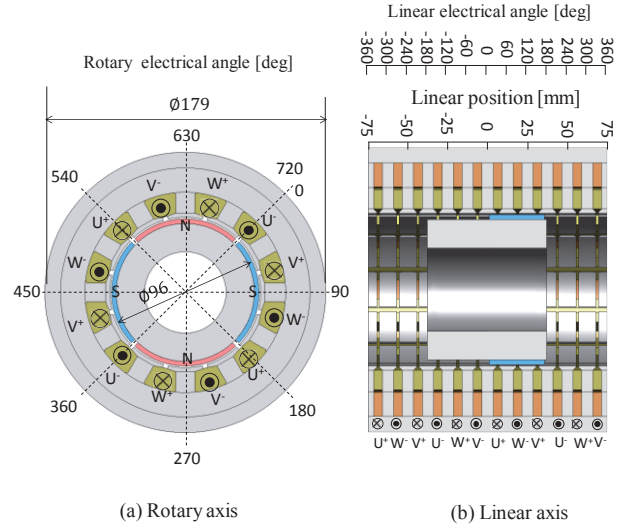


Fig.1 Structure of electromagnetic actuator.

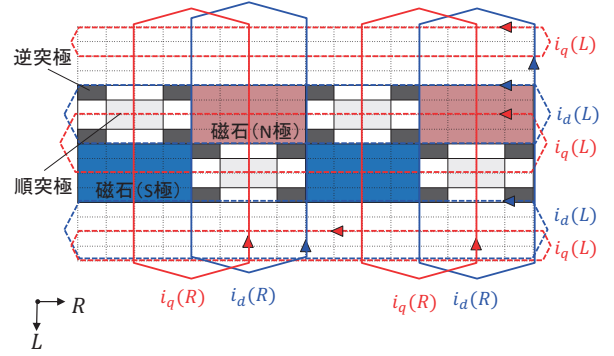


Fig.2 Positions of the salient poles and dq-axis.

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -\omega M_d(L) & 0 \\ R + p(L_d(L) + l) & -v(L_q(L) + l) \\ v(L_d(L) + l) & R + p(L_q(L) + l) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d(R) \\ i_q(R) \\ i_d(L) \\ i_q(L) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega\psi \\ 0 \\ v\psi \end{bmatrix} \quad \dots (2)$$

ここで、 $v_d(R)$ 、 $v_q(R)$ ：回転巻線のd,q軸電圧、 $v_d(L)$ 、 $v_q(L)$ ：直動巻線のd,q軸電圧、 $i_d(R)$ 、 $i_q(R)$ ：回転巻線のd,q軸電流、 $i_d(L)$ 、 $i_q(L)$ ：直動巻線のd,q軸電流、 $L_d(R)$ 、 $L_q(R)$ ：回転のd,q軸有効インダクタンス、 $L_d(L)$ 、 $L_q(L)$ ：直動のd,q軸有効インダクタンス、 l ：漏れインダクタンス、 $M_d(R)$ 、 $M_d(L)$ ：回転と直動のd軸相互インダクタンス、 R ：巻線抵抗、 ψ ：dq軸座標上の永久磁石による電機子鎖交磁束、 ω ：回転速度、 v ：直動速度である。

逆突極性を有する回転・直動二自由度電磁アクチュエータのトルク τ および推力 f は、(2)式より次式に求める。

$$\begin{aligned}
\tau &= P_n [\psi i_q(R) + \{L_d(R) - L_q(R)\} i_d(R) i_q(R) \\
&\quad - M_d(L) i_d(L) L_q(R)] \\
&= P_n \left[\psi I_R \cos \beta_R + \frac{1}{2} \{L_q(R) - L_d(R)\} I_R^2 \sin 2\beta_R \right. \\
&\quad \left. + M_d(L) I_R I_L \sin \beta_L \cos \beta_R \right] \\
&= \tau_m + \tau_r + \tau_w, \quad \dots (3)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
f &= P_n [\psi i_q(L) + \{L_d(L) - L_q(L)\} i_d(L) i_q(L) \\
&\quad - M_d(R) i_d(R) L_q(L)] \\
&= P_n \left[\psi I_L \cos \beta_L + \frac{1}{2} \{L_q(L) - L_d(L)\} I_L^2 \sin 2\beta_L \right. \\
&\quad \left. + M_d(R) I_R I_L \sin \beta_R \cos \beta_L \right] \\
&= f_m + f_r + f_w. \quad \dots (4)
\end{aligned}$$

ここに、 P_n : 極対数、 β_R 、 β_L : 回転と直動のq軸からの進み電流位相角、 I_R 、 I_L : 回転と直動の電機子電流の実効値である。

(3) 式と (4) の右辺第1項である τ_m と f_m は移動磁界の極と可動子磁石との吸引・反発力により発生するマグネット電磁力、第2項の τ_r と f_r は移動磁界による極と可動子突極との吸引力により発生するリラクタン্স電磁力、第3項の τ_w と f_w は突極構造に起因する軸間の磁気干渉力である。

直動巻線にd軸電流 $i_d(L)$ を与えたときの突極に形成される磁界 $M_d(L)i_d(L)$ と回転巻線のq軸電流 $i_q(R)$ との関係を Fig.3 に示す。 $i_d(L) < 0$ のときは Fig.3(a)に示すように回転巻線にq軸電流 $i_q(R)$ を流すと、ローレンツ力が作用して正のリラクタン্সトルクが発生する。一方、 $i_d(L) > 0$ のときは Fig.3(b)に示すように $i_q(R)$ を流すと、負のリラクタン্সトルクが発生する。これより、回転のq軸電流 $i_q(R)$ と直動のd軸電流 $i_d(L)$ の間には突極を介して磁気干渉が生じる。直動のd軸電流が $i_d(L) < 0$ のときは永久磁石の磁束を減磁する弱め界磁電流になる。回転巻線にd軸電流 $i_d(R)$ を与えたときの突極に形成される磁界と直動巻線のq軸電流 $i_q(L)$ との関係を Fig.4 に示す。 $i_d(R) < 0$ のときは Fig.4(a)に示すように $i_q(L)$ を流すと、正のリラクタン্স電磁力が発生する。一方、 $i_d(R) > 0$ のときは Fig.4(b)に示すように $i_q(L)$ を流すと、負のリラクタン্স電磁力が発生する。これより、直動時に回転巻線にd軸電流を流すと磁気干渉が生じる。

これより、回転・直動時はdq軸電流が

$$i_d(R) \neq 0 \wedge i_d(L) \neq 0 \quad \dots (5)$$

のとき軸間に磁気干渉が生じる。

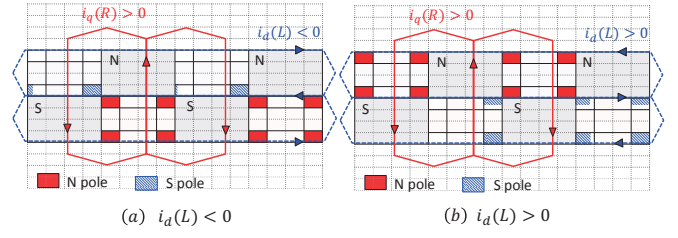


Fig.3 Magnetic interference of $L_d(L)I_d(L)$ and $i_q(R)$.

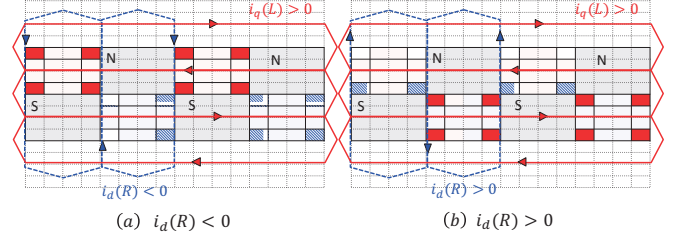


Fig.4 Magnetic interference of $L_d(R)I_d(R)$ and $i_q(L)$.

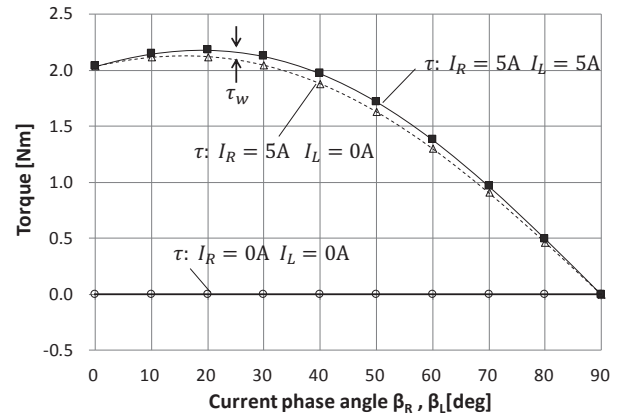


Fig.5 Current phase angle versus torque characteristics.

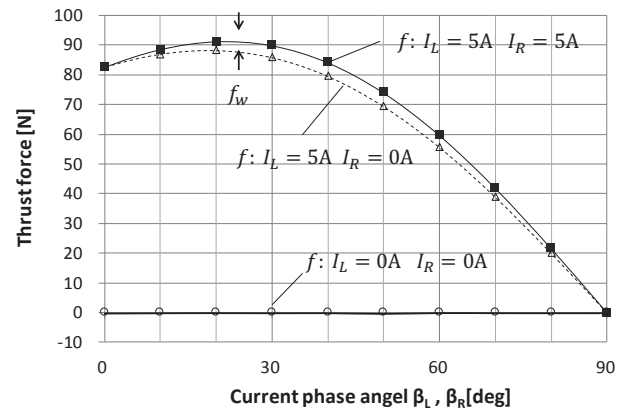


Fig.6 Current phase angle versus thrust force characteristics.

4. 出力特性

回転・直動の両巻線に電機子電流 I_R 、 I_L を印加したと

きの磁気干渉に伴うトルク変動を Fig.5 に示す。回転時 ($I_R = 5A$, $I_L = 0A$) を破線, 回転・直動時 ($I_R = 5A$, $I_L = 5A$) を実線で表わす。回転・直動時は回転時に比べてトルクが磁気干渉力 τ_w だけ増加している。一方, 電流位相角を $\beta_R, \beta_L = 0 \text{ deg}$ とし, $i_d(R) = i_d(L) = 0$ 運転時は軸間に磁気干渉は生じない。磁気干渉に伴う推力変動を Fig.6 に示す。回転・直動時 ($I_L = 5A$, $I_R = 5A$) は直動時 ($I_L = 5A$, $I_R = 0A$) に比べて推力が磁気干渉力 f_w だけ増加している。これより, d 軸電流を印加すると軸間に突極性に基づく磁気干渉が発生するのが分かる。

磁気干渉力と d 軸電流の大きさの関係を Fig.7 に示す。回転時に直動の d 軸電流 $i_d(L)$ を 0A から-5A まで変化させるとトルクが増加する。同様に直動時に回転の d 軸電流 $i_d(R)$ を 0A から-5A まで変化させると推力が増加する。d 軸電流 $i_d(L)$, $i_d(R)$ を $\pm 5A$ の範囲で変化させたときの全出力に対する軸間干渉力の比率 τ_w/τ , f_w/f を Fig.8 に示す。 $i_d(L)$, $i_d(R) \leq 0$ のときは $\tau_w, f_w \geq 0$, $i_d(L)$, $i_d(R) > 0$ のときは $\tau_w, f_w < 0$ となり, 軸間干渉力はd軸電流 $i_d(L)$, $i_d(R)$ の大きさに比例する。 $i_d(L) = i_d(R) = 0$ のときは螺旋運動において軸間干渉は生じない。

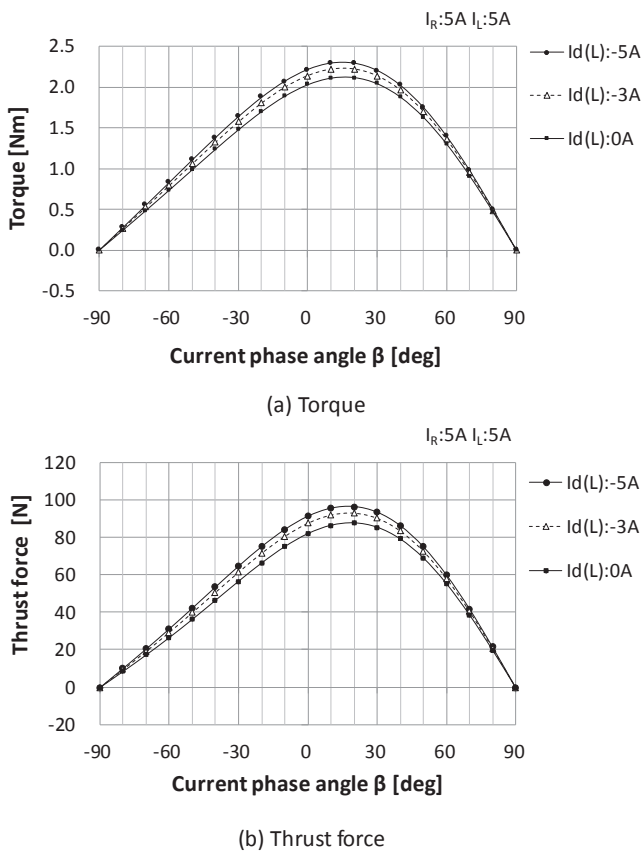


Fig.7 Electromagnetic force and d-axis electric current.

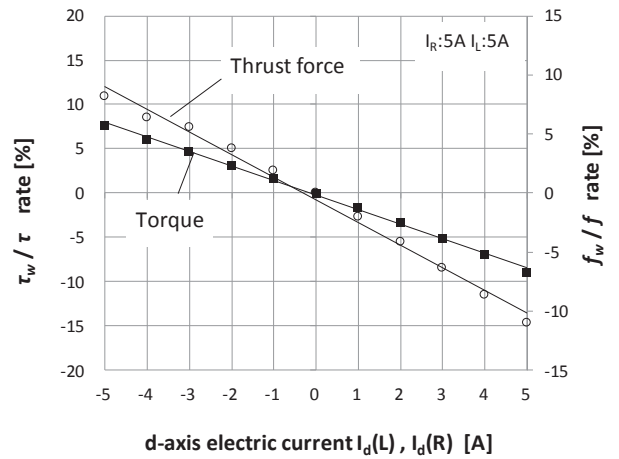


Fig.8 Relations of d-axis electric current and magnetic interference.

螺旋運動における電流位相角とトルク・推力の関係を次式に整理する。

$$\text{I) } \beta_R = 0 \wedge \beta_L = 0 \quad \tau = \tau_m, f = f_m \quad \dots (6)$$

$$\text{II) } \beta_R = 0 \wedge \beta_L \neq 0 \quad \tau = \tau_m + \tau_r, f = f_m + f_r + f_w \quad \dots (7)$$

$$\text{III) } \beta_R \neq 0 \wedge \beta_L = 0 \quad \tau = \tau_m + \tau_r + \tau_w, f = f_m + f_r \quad \dots (8)$$

$$\text{IV) } \beta_R \neq 0 \wedge \beta_L \neq 0 \quad \tau = \tau_m + \tau_r + \tau_w, f = f_m + f_r + f_w \quad \dots (9)$$

5. まとめ

本論文では, 軸方向の直動と軸中心の回転運動が可能な二自由度電磁アクチュエータに逆突極を設置することにより発生する磁気的な干渉メカニズムを考察した。突極を有する本アクチュエータの数学モデルを導出し, 二自由度の軸間に発生する磁気干渉の発生原理を明らかにした。螺旋運動のような二自由度駆動時における電流位相角とトルク・推力の関係を示した。

今後は, 軸間における磁気干渉の非干渉化と軸間干渉に起因する d 軸電流の有効利用を検討することである。

参考文献

- 1) 多自由度新世代アクチュエータの性能評価調査委員会：新世代アクチュエータの性能評価とそれを活かす多自由度構成の提案, 電学技法, No.1378, pp.48-61, 2016.
- 2) 多自由度モータのシステム化技術調査専門委員会：多自由度モータのシステム化技術, 電学技報, No.1140, pp.3-10, 2008.

- 3) 新世代アクチュエータの多自由度化可能性調査専門委員会：新世代アクチュエータの多自由度化可能性，電学技報，No.1265，pp.3-8，2012.
- 4) 矢野智昭・金子真：回転中心を同一とする多自由度アクチュエータの基礎的検討，日本ロボット学会誌，Vol.11，No.6，pp.875-882，1993.
- 5) 牧野省吾・鹿山透・室北幾磨・矢原春樹・大戸基道：回転と直動の複合ダイレクトドライブを可能にするθZモータ，電学論D，Vol.134，No.7，pp.683-690，2014.
- 6) T.T. Overboom, J.W. Jansen, E.A. Lomonova, and F.J.F. Tacken : *Design and Optimization of a Rotary Actuator for a Two-Degree-of-Freedom $z\phi$ -Module* , IEEE Trans.Industry Applications, Vol.46, No.6, pp.2401-2409, 2010.
- 7) P. Bolognesi, O. Bruno, F. Papini, V. Biagini, and L. Taponecco : *A Low-Complexity Rotary-Linear Motor Useable for Actuation of Active Wheels* , in Proc. Int. Symp. on Power Electronics Electrical Drives Automation and Motion, pp. 331-338, 2010.
- 8) 長谷川裕也・平田勝弘：2自由度電磁アクチュエータの研究，電気論D，Vol.125，No.5，pp.519-523，2005.