多自由度球面同期アクチュエータの許容電流に着目したトルク領域法

Evaluation Method for Multi-Degree-of-Freedom Spherical Electromagnetic Synchronous Actuators under Allowable Current

高原 一晶^{*1}(学生員), 平田 勝弘^{*1}(正員), 新口 昇^{*1}(正員), 西浦 悠介^{*1}(学生員), 堺谷 洋^{*1}Kazuaki TAKAHARA (Stu. Mem.), Katsuhiro HIRATA (Mem.), Noboru NIGUCHI (Mem.),
Yusuke NISHIURA (Stu. Mem.), Yo SAKAIDANI

Multi-degree-of-freedom (multi-DOF) actuators have been developed for the fields of robotics and industrial machinery. We have proposed an evaluation method for the multi-DOF actuators based on a torque equation and singular value decomposition under constant power. However, the evaluation method does not take into account a current density. In this paper, we propose a new evaluation method considering an allowable current. Finally, the static torque characteristics of a previously developed multi-DOF actuator is evaluated using the proposed evaluation method.

Keywords: multi degree of freedom, spherical actuator, static characteristics, evaluation.

(2016 年 11 月 24 日受付, 2017 年 4 月 3 日再受付)

1 緒言

現在, 産業用ロボットなどで用いられているリンク機構では, 多自由度の動作を実現するために, その自由度に応じて 1 自由度アクチュエータを組み合わせている[1]。その際, エンドエフェクタ付近のアクチュエータの質量がベース付近のアクチュエータに対して負荷となるため, ベースに近付くにつれてアクチュエータが大型化する傾向にあり, 力制御等の高精度な制御における問題が指摘されている[2]。これらの課題の解決方法として, 球面駆動可能なアクチュエータが注目されている。多自由度球面アクチュエータを用いることで, 搭載するアクチュエータの数を削減でき, 機構の小型化が期待できる。また, 従来のシリアルリンク機構では, 複数台のアクチュエータの駆動軸の交点を一致させるなどの工夫がなければ, 逆運動学を一意に解くことができない[3]。しかし, 球面駆動可能なアクチュエータを用いることで, 各自由度の回転軸は常に一点で交わるため, 上記の問題は生じない。したがって, 逆運動学を幾何学的に解くことが可能となり, 制御の簡素化による高速化, 高度化が期待できる。

以上の利点から多自由度球面アクチュエータの産業用ロボット等への応用が期待されており, 研究・開

発が盛んに行われている。電磁力を利用した多自由度球面アクチュエータは, 同期モータ, ステッピングモータ, 誘導モータといった様々な駆動原理を利用したアクチュエータが報告されている[4-10]。特に, 球面同期アクチュエータは任意軸周りにトルクを制御可能なトルク発生式が開発されており, その制御性の高さから多くの研究機関が開発に取り組んでいる[4-8]。

しかし, 球面同期アクチュエータは任意の姿勢, 任意の軸周りのトルクを実現できるという特長を有するが, 可動範囲全域に渡って各姿勢, 各方向のトルクを評価することは困難であり, 単軸周りの局所的な評価に留まっている[5-9]。著者らはある姿勢における任意軸周りの静特性を評価する手法として, 定電力下におけるトルク領域法を提案した[11]。この手法は定電力下で, 任意の可動子姿勢において発生可能なトルクの領域をトルク発生式から求める手法である。この手法により, 球面同期アクチュエータの任意の軸周りにトルクを発生できる特長を活かした評価が可能となったが, 電力の制限のみに着目しており, アクチュエータ自体の許容電流は考慮されていない。実際のアクチュエータでは巻線の絶縁被膜の保護などの観点から許容電流を定めるため, 巻線の線径や冷却条件が異なる場合は許容電流に着目した評価が必要となる。

そこで本稿では, 許容電流に着目した際のトルク領域をトルク発生式から求め, 定電力下におけるトルク領域と比較する。それにより, 定電力下のトルク領域では考慮できていなかった静特性について検証する。

連絡先: 高原 一晶, 〒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 知能・機能創成工学専攻,
e-mail: kazuaki.takahara@ams.eng.osaka-u.ac.jp

^{*1} 大阪大学

2 球面同期アクチュエータのトルク発生式

本稿で扱う多自由度球面同期アクチュエータの概念図を Fig. 1 に示す。球状の可動子の表面に複数の球殻状の永久磁石を配置し、固定子に巻線を放射状に配置している。可動子と同期するように巻線に多相の電流を印加し、多自由度の回転を実現している。なお、巻線に印加する電流の相数はアクチュエータによって異なり、4 相励磁から 96 相励磁まで報告されている[4-8]。

次に、本稿で用いるトルク発生式について述べる[4]。ここで、各巻線で生成された磁界は他の巻線で生成された磁界に影響を及ぼさず、独立にアクチュエータのトルクに寄与すると仮定すると、多自由度の球面同期アクチュエータのトルク発生式は式(1)で表される。

$$\begin{bmatrix} \tau_X \\ \tau_Y \\ \tau_Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_X(p_1) & K_X(p_2) & \cdots & K_X(p_n) \\ K_Y(p_1) & K_Y(p_2) & \cdots & K_Y(p_n) \\ K_Z(p_1) & K_Z(p_2) & \cdots & K_Z(p_n) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ \vdots \\ i_n \end{bmatrix} \quad (1)$$

ここで、 τ_X , τ_Y , τ_Z はそれぞれ X 軸, Y 軸, Z 軸周りの電流トルク, $i_1, i_2, \dots, i_n$ は各相の巻線電流, K_X, K_Y, K_Z はそれぞれ X 軸, Y 軸, Z 軸周りの各相巻線におけるトルク定数である。このトルク定数で構成された行列をトルク定数行列と呼ぶ。 p は各相巻線と可動子との位置関係を示し、可動子の姿勢を変数に持つ。式(1)を用いて任意の姿勢における電流トルクを設定することにより、各相の電流値を求めることができる。式(1)の右辺はそれぞれ相数と同数のベクトルの線形結合で表すことができる。簡単のために、例として 3 相の電流を入力する 2 自由度のトルク発生式を分解すると、式(2), (3)のようになる。ここで、2 自由度の場合は、式(1)の Z 軸周りの成分を除いたトルク発生式となる。

$$\begin{bmatrix} \tau_X \\ \tau_Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.5 \cos\left(\frac{\pi}{3}\right) & 3 \cos\left(\frac{\pi}{18}\right) & 2 \cos\left(-\frac{11}{18}\pi\right) \\ 1.5 \sin\left(\frac{\pi}{3}\right) & 3 \sin\left(\frac{\pi}{18}\right) & 2 \sin\left(-\frac{11}{18}\pi\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$= k_1 i_1 + k_2 i_2 + k_3 i_3$$

$$k_1 = \begin{bmatrix} 1.5 \cos\left(\frac{\pi}{3}\right) \\ 1.5 \sin\left(\frac{\pi}{3}\right) \end{bmatrix}, \quad k_2 = \begin{bmatrix} 3 \cos\left(\frac{\pi}{18}\right) \\ 3 \sin\left(\frac{\pi}{18}\right) \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$k_3 = \begin{bmatrix} 2 \cos\left(-\frac{11}{18}\pi\right) \\ 2 \sin\left(-\frac{11}{18}\pi\right) \end{bmatrix}$$

ベクトル k_1, k_2, k_3 は単位電流を印加した際のトルク

Fig. 1 Basic structure of spherical actuators.

Fig. 2 Torque coordinate of Eq. (3).

Fig. 3 Current coordinate.

定数ベクトルと呼ばれ、大きさはトルクの大きさを表し、向きはトルクが作用する軸を表す。このトルク定数ベクトル k_1, k_2, k_3 を Fig. 2 に示し、この空間をトルク座標系と定義する。また、トルク定数ベクトル k_1, k_2, k_3 を発生するために必要な電流を Fig. 3 に示し、この空間を電流座標系とする。電流ベクトルの各要素は、各相に印加する電流を意味する。ここで、トルク定数行列は電流座標系からトルク座標系への線形写像を意味し、トルク定数行列の階数が m であれば、 m 次元上の任意のトルクベクトルを表現可能となる。すなわち、式(2)において、階数は 2 であるため 2 次元上の任意のトルクベクトルを表現できることがわかる。

3 トルク領域

第 2 節でトルク定数行列は電流座標系からトルク座標系への線形写像を意味し、その階数に応じた次元のトルクベクトルが表現可能であることを述べた。しかし、実際のアクチュエータでは供給される電力の制限

や、巻線の絶縁被膜の保護などによる電流の制限のために電流座標上で領域が定義され、その射影であるトルクがトルク座標上の対応する領域に制限される。そのため、本節では定電力下でのトルク領域と、許容電流を定めた際のトルクの領域をトルク発生式より導出する。そして、このトルク領域を用いて各可動子姿勢での静トルク特性を定義する。

3.1 定電力下でのトルク領域

定電力下におけるトルク領域は、トルク発生式におけるトルク定数行列を特異値分解することによって、各姿勢における任意方向に発生可能なトルクの領域を算出する。トルク発生式を元にトルク領域の導出方法を記す[11]。

まず、電力に制限を与えた場合の電流座標上での領域について考える。 n 相の球面アクチュエータに入力された電力が銅損と等しいと仮定すると式(4)が得られる。

$$R(i_1^2 + i_2^2 + \dots + i_n^2) = \text{const.} \quad (4)$$

ここで、 R は巻線抵抗であり、各巻線の巻線抵抗は同じとしている。例として 3 相の場合を考えると、電流の領域は Fig. 4 のような球体となる。この電流の領域を式(2)のトルク定数行列によってトルク座標上に射影すると、Fig. 5 に示す楕円の領域となる。原点とこの領域内の点を結ぶベクトルが、電流を印加することによって発生可能なトルクを表す。この 2 自由度の場合の定電力下でのトルク領域の導出について記す。例として式(2)の 2 行 3 列のトルク定数行列 $\mathbf{K}$ について考えると、式(5)で表される $\mathbf{K}$ の特異値分解が可能である。

$$\mathbf{K} = [\mathbf{u}_1 \ \mathbf{u}_2] \begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \end{bmatrix} [\mathbf{v}_1 \ \mathbf{v}_2 \ \mathbf{v}_3]^T \quad (5)$$

ここで、 $\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2$ は左特異ベクトル、 σ_1, σ_2 ($\sigma_1 \geq \sigma_2$) は特異値、 $\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \mathbf{v}_3$ は右特異ベクトルである。 $\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2$ は長軸、短軸の向き、 σ_1, σ_2 は長軸、短軸の長さを表す。また、 $\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2$ は長軸、短軸のトルクベクトルを発生させるために必要な電流を表す。一定電力の条件下で長軸、短軸のトルクベクトルを補間すると、トルクベクトルの軌跡は次式で表される。

$$\begin{bmatrix} \tau_x \\ \tau_y \end{bmatrix} = \sigma_1 \mathbf{u}_1 \cos \theta + \sigma_2 \mathbf{u}_2 \sin \theta \quad (6)$$

Fig. 4 Current area under constant power.

Fig. 5 Torque output area of Eq. (8).

ここで、 $\cos \theta, \sin \theta$ は補間係数である。式(6)より、2 自由度球面同期アクチュエータが一定電力下で発生可能なトルクの領域は、Fig. 5 の例に示すように原点を中心として長軸を最大トルクベクトル、短軸を最小トルクベクトルとした楕円となる。トルク定数行列は可動子姿勢によって変化するため、トルク領域も可動子姿勢によって変化する。また、3 自由度の場合は $\mathbf{Z}$ 軸成分が追加され、トルク領域は楕円体となる。

3.2 許容電流に着目したトルク領域

次に、許容電流に着目した際のトルク領域をトルク発生式から求める。まず、許容電流を定めた際の電流座標上での領域について記す。 n 相の場合の許容電流は以下の式(7)で定義する。

$$|i_j| = i_{\max} \quad (j=1,2,\dots,n) \quad (7)$$

ここで、 i_k は各相の電流であり、 $i_{\max}$ は許容電流である。例として 3 相の場合を考えると、電流の領域は Fig. 6 のような立方体となる。この電流の領域を式(2)のトルク定数行列によってトルク座標上に射影すると、Fig. 7 の例に示すような多角形の領域となる。原点とこの領域内の点を結ぶベクトルが、電流を印加することによって発生可能なトルクを表す。すなわち、このトルク領域では X 軸回りに最大約 3 Nm のトルクを発生できる。この 2 自由度の場合のトルク領域の導出について

て記す。任意の相を 1 つ選択し、その他を定数とすると、トルク座標上で式(8)の線分の式を得る。

$$\begin{aligned} \mathbf{P}_j &= \mathbf{k}_j i_j + \sum_{l=1}^n (1 - \delta_{jl}) \mathbf{k}_l i_l, \\ |i_j| &\leq i_{\max}, \quad |i_l| = i_{\max} \quad (j=1,2,\dots,n) \end{aligned} \quad (8)$$

ここで、 $\mathbf{P}_j$ は線分上の任意の点を表すベクトル、 δ_{jl} はクロネッカーのデルタである。この線分に原点から垂線を下ろした際の長さが最も長い線分がトルク領域の境界として現れる。垂線の長さが最大となるときの式(8) 第 2 項を α_j とおくと、次式のように表される。

$$\mathbf{P}_j = \mathbf{k}_j i_j \pm \alpha_j, \quad |i_j| \leq i_{\max}, \quad (j=1,2,\dots,n) \quad (9)$$

すべての相に対しても同様に算出すると、式(10)に示す連立方程式が得られる。

$$\begin{cases} \mathbf{P}_1 = \mathbf{k}_1 i_1 \pm \alpha_1 \\ \mathbf{P}_2 = \mathbf{k}_2 i_2 \pm \alpha_2 \\ \vdots \\ \mathbf{P}_j = \mathbf{k}_j i_j \pm \alpha_j \\ \vdots \\ \mathbf{P}_n = \mathbf{k}_n i_n \pm \alpha_n \end{cases}, \quad |i_j| \leq i_{\max} \quad (10)$$

この連立方程式がトルク領域の境界を表す。つまり、トルク定数ベクトルがすべて平行でない場合、許容電流に着目した 2 自由度 n 相球面アクチュエータのトルク領域は $2n$ 角形となる。

3 自由度の場合は直線の連立方程式ではなく、平面の連立方程式を考える。任意の相を 2 つ選択し、その他を定数とする。それにより、トルク座標上で式(11)の平面の式が得られる。

$$\begin{aligned} \mathbf{P}_{jk} &= \mathbf{k}_j i_j + \mathbf{k}_k i_k + \sum_{l=1}^n (1 - \delta_{jl})(1 - \delta_{kl}) \mathbf{k}_l i_l, \\ |i_j|, |i_k| &\leq i_{\max}, \quad |i_l| = i_{\max}, \quad (j, k=1,2,\dots,n, \quad j \neq k) \end{aligned} \quad (11)$$

ここで、 $\mathbf{P}_{jk}$ は平面上の任意の点を表すベクトルである。2 自由度の場合と同様に、この平面に原点から垂線をおろした際の長さが最も長い平面がトルク領域の境界として現れる。垂線の長さが最大となるときの式(11) 第 3 項の値を α_{jk} とおくと、次式のように表される。

$$\begin{aligned} \mathbf{P}_{jk} &= \mathbf{k}_j i_j + \mathbf{k}_k i_k \pm \alpha_{jk}, \\ |i_j|, |i_k| &\leq i_{\max}, \quad (j, k=1,2,\dots,n, \quad j \neq k) \end{aligned} \quad (12)$$

Fig. 6 Current area under allowable current.

Fig. 7 Torque output area of Eq. (13).

すべての相の組み合わせに対しても同様に算出すると、式(13)に示す連立方程式が得られる。

$$\begin{cases} \mathbf{P}_{12} = \mathbf{k}_1 i_1 + \mathbf{k}_2 i_2 \pm \alpha_{12} \\ \mathbf{P}_{13} = \mathbf{k}_1 i_1 + \mathbf{k}_3 i_3 \pm \alpha_{13} \\ \vdots \\ \mathbf{P}_{jk} = \mathbf{k}_j i_j + \mathbf{k}_k i_k \pm \alpha_{jk} \\ \vdots \\ \mathbf{P}_{n(n-1)} = \mathbf{k}_n i_n + \mathbf{k}_{n-1} i_{n-1} \pm \alpha_{n(n-1)} \end{cases}, \quad (13)$$

$$|i_j|, |i_k| \leq i_{\max}, \quad (j, k=1,2,\dots,n, \quad j \neq k)$$

この連立方程式がトルク領域の境界を表す。つまり、3 自由度の場合、トルク領域は多面体となる。トルク定数ベクトルを組み合わせで得られる平面がすべて平行でない場合、3 自由度 n 相の球面アクチュエータのトルク領域は nC_2 面体となる。以上で示したように、トルク領域の形状は 2 自由度の場合は多角形、3 自由度の場合は多面体となる。また、許容電流に着目したトルク領域も、定電力下でのトルク領域と同様に、トルク領域は可動子姿勢によって変化する。

3.3 トルク領域による静特性評価

このトルク領域を用いて、静特性の評価を行う。本稿では例として、最小トルクについて扱う。最小トルクはトルク領域の境界上で、原点と原点に最も短い点を結ぶベクトルの大きさとする。すなわち、このトルクベクトルの大きさは、その姿勢において任意軸周り

に発生可能なトルクの大きさとなる。

定電力下におけるトルク領域の最小トルクは、短軸半径の長さであり、最も小さい特異値となる。定電力下における最小トルクは式(14)とする。

$$T_{\min} = \begin{cases} \sigma_2 & (2\text{-DOF}) \\ \sigma_3 & (3\text{-DOF}) \end{cases} \quad (14)$$

許容電流を考慮したトルク領域の場合、最小トルクは式(15)で表される。

$$T_{\min} = \begin{cases} \min(\mathbf{P}_j) & (2\text{-DOF}) \\ \min(\mathbf{P}_{jk}) & (3\text{-DOF}) \end{cases} \quad (15)$$

$$j, k = 1, 2, \dots, n, \quad j \neq k$$

4 球面同期アクチュエータの静特性評価

実際にアクチュエータに対して定電力下、許容電流下での最小トルクを算出し、比較を行う。例として、著者らが開発している 2 自由度球面アクチュエータを挙げる[7]。目的はロボット関節への適用であり、高トルク密度化のために球中心からエアギャップまでの距離を長くとることができるアウターロータ型を採用した初の球面同期アクチュエータであり、以降はアクチュエータ α と呼ぶ。アクチュエータ α の仕様を Table 1 に示し、その基本構造を Fig. 8 に示す。アウターロータ型のため、球殻状の可動子が固定子の外側に配置される。可動子の永久磁石は緯度方向に 22.5 度間隔で極が変わり、経度方向は極が一様になるように配置されている。また、固定子の巻線は 30 度間隔で配置された巻線群が Z 軸周りに 60 度おきに 6 つ配置されている。巻線が施されたティースは 24 本であるが、原点对称な位置の巻線には同相の電流を入力して制御するため、アクチュエータ α のトルク発生式は式(1)において $n=12$ とし、Z 軸周りの成分を除いた式となる。トルク定数 K_x , K_y は Fig. 9 に示す単相巻線を可動子全域にわたり、3 次元有限要素解析を行うことにより求まる。例として K_x の結果を Fig. 10 に示す。

本稿では、許容電流を $i_{\max}=2.5 \text{ A}$ として最小トルクを算出する。これは電流密度を 5.0 A/mm^2 として算出された値である。また、電力は全巻線に許容電流を流すことが可能な値とし、電力を式(16)の値とする。

$$R \sum i^2 = 0.27 \times 2.5^2 \times 12 = 20 \text{ W} \quad (16)$$

ここで、巻線抵抗 R は 0.27Ω で算出した。

Table 1 Specification of actuator α .

	Actuator α
Diameter of rotor	97.0 mm
Diameter of stator	83.2 mm
Thickness of permanent magnets	3.0 mm
Air gap length	1.5 mm
Residual magnetic flux density	0.68 T
Number of coil turns	50 turns
Diameter of coil	0.8 mm

Fig. 8 Basic structure (Actuator α).

Fig. 9 Simple pole.

Fig. 10 Torque constant.

本評価手法をアクチュエータ α に適用した際の最小トルクを Fig. 11 に示す。アクチュエータ α は経度 60 度毎に周期性があるため、経度 0 度から 60 度に傾斜角 (緯度) 0 度から 40 度まで姿勢を変化させ、各姿勢で

Fig. 11 Minimum torque.

Table 2 Maximum value of Minimum torque.

Under constant power		Under allowable current	
Maximum Value	1.03 Nm	Maximum Value	0.89 Nm
Latitude (deg)	Longitude (deg)	Latitude (deg)	Longitude (deg)
36	30,90,150 210,270,330	30	30,90,150 210,270,330

Table 3 Minimum value of Minimum torque.

Under constant power		Under allowable current	
Minimum Value	0.51 Nm	Minimum Value	0.41 Nm
Latitude (deg)	Longitude (deg)	Latitude (deg)	Longitude (deg)
30	0,60,120 180,240,300	37	0,60,120 180,240,300

の最小トルクを算出した結果である。最小トルクが最大, 最小となる姿勢をそれぞれ Table 2, Table 3 に示す。

Table 2 より, 固定子巻線が配置されているラインに沿って最小トルクが大きい姿勢が集中している。一方で, Table 3 より直下に巻線が存在しない姿勢で最小トルクが小さくなっていることがわかる。これは, 巻線が配置されているライン上の姿勢の方が, トルクに寄与できる巻線が多いためと考えられる。

また, 定電力下における最小トルクは, 許容電流に着目した場合の最小トルクよりも全域で大きいことがわかる。これは, 定電力下では, 巻線抵抗によって消費される電力という制限のみを考えており, 各巻線に許容電流以上の電流を印加しているためである。本来は固定子巻線の絶縁被膜の保護などの観点から, 許容電流の制限を定める必要があり, 許容電流に着目した最小トルクが定電力下における最小トルクよりも小さくなる場合が存在する。

したがって, 巻線の線径や冷却条件が異なる球面アクチュエータの比較には, アクチュエータ自体の許容電流に着目したトルク領域も用いる必要があると考えられる。

5 結言

本稿では球面アクチュエータ自体の許容電流に着目したトルク領域による評価方法を提案した。これにより, 定電力下におけるトルク領域法では考慮できていなかった球面アクチュエータ自体の制限を用いた評価が可能となった。

しかし, 鉄心を用いたアクチュエータではコギングトルクが発生し, トルク領域が平行移動する。実際に出力するトルクはコギングトルクの影響を受けるため, コギングトルクも考慮する必要があると考える。

参考文献

- [1] 武田行生, パラレルマニピュレータの機構と特性, 日本ロボット学会誌, Vol. 30, No. 2, pp. 124-129 (2012)
- [2] H. Asada, T Kaneda, and R. Reddy, Design Concept of Direct-Drive Manipulators Using Rare-Earth DC Torque Motors, Proceeding of 11th ISIR, pp. 629-636 (1981)
- [3] 平田勝弘, 次世代アクチュエータ原理と設計法, 科学技術出版, 2013
- [4] K. Kahlen, I. Voss, C. Priebe and R. W. De Doncker, Torque Control of a Spherical Machine with Variable Pole Pitch, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 19, No. 6, pp. 1628-1634 (2004)
- [5] H. Son and Kok-Meng Lee, Open-Loop Controller Design and Dynamic Characteristics of a Spherical Wheel Motor, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 57, No. 10, pp. 3475-3482 (2010)
- [6] B. van Nijhuis, J. W. Jansen, B. L. J. Gysen, and E. A. Lomonova, Topology Comparison of Slotless Permanent Magnet Semispherical Actuators, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 50, No. 11 (2014)
- [7] Y. Sakaidani, K. Hirata, N. Niguchi and S. Maeda, Experimental verification of feedback control of a 2-DOF spherical actuator, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 50, No. 11 (2014)
- [8] 西浦悠介, 平田勝弘, 堺谷洋, 新口昇, 3 自由度アウトロータ型電磁球面アクチュエータに関する研究, 電気学会論文誌 D, Vol. 136, No. 3(2016), pp.232-237
- [9] A. Bhatia, M. Kumagai and R. Hollis, Six-Stator spherical induction motor for balancing mobile robots, 2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), pp. 226-231
- [10] 矢野 智昭, 多面体にもとづく球面ステッピングモータの分類, 電気学会研究会資料, IEEJ LD 2009, LD09055, (2009)
- [11] 高原一品, 平田勝弘, 新口昇, 西浦悠介, 堺谷洋, 藤原優文, 多自由度球面同期アクチュエータの定電力下における静特性評価手法の提案, 電気学会論文誌 D, Vol. 136, No. 11(2016), pp.907-912