多自由度球面アクチュエータの出力トルク計算における解析精度向上

Improvement of Analysis Accuracy in Torque Calculation of Multi-Degree-of-Freedom Spherical Actuators

房安 浩嗣^{*1}(正員), 平田 勝弘^{*2}(正員), 新口 昇^{*2}(正員), 高原 一晶^{*2}(学生員)Hirotsugu FUSAYASU (Mem.), Katsuhiro HIRATA (Mem.), Noboru NIGUCHI (Mem.),
Kazuaki TAKAHARA (Stu. Mem.)

Multi-degree-of-freedom (multi-DOF) spherical actuators have been developed for the fields of robotics and industrial machinery. We have proposed an outer rotor type three-DOF spherical actuator that can realize a high torque density. Its input current of each coil is calculated using the torque generation equation based on the torque constant matrix. Although a control method to calculate the current value has already been proposed, the analysis accuracy of the torque model is not sufficiently examined for a precision robot that requires the positioning accuracy of about 0.1 mm. In this paper, for the purpose of applying our three-DOF spherical actuator to such a precision robot, we investigated the factors that affect the analysis accuracy of a dynamic analysis method and improved the analysis accuracy.

Keywords: multi-degree-of-freedom, spherical actuator, industrial robots, torque constant map, finite element method.

(2020 年 11 月 16 日受付, 2021 年 3 月 15 日再受付)

1 緒言

近年, 工作機械をはじめとする多くの機械が多軸化, 多自由度化しており, それらの装置では, 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]。エンドエフェクタ側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の負荷となるため, アクチュエータが大型化する傾向にあり, 力制御等における問題が指摘されている[2]。また, 各アクチュエータの位置決め誤差の累積により, ロボット先端の位置決め精度が低下するという課題も存在する。これに対して, 球面駆動可能なアクチュエータを用いることで, 機構小型化による前述の制御問題の解決, および各自由度の回転軸が一点で交わることで制御簡素化による高速化, 高度化が可能となる。さらに, 各アクチュエータの位置決め誤差の累積がなく, 高精度の位置決めが期待できる。これらの理由から, 球面駆動可能なアクチュエータは, 産業用ロボット等の分野, 中でも, 人の手での直接操作が困難な微細作業や危険作業等を置き換えるロボットへの応用が期待されている。

電磁力を利用した多自由度球面アクチュエータは,

連絡先: 房安 浩嗣, 〒571-8506 門真市門真 1006, パナソニック (株) CNS 社 生産技術センター,
e-mail: fusayasu.hirotsugu@jp.panasonic.com

^{*1}パナソニック ^{*2}大阪大学

同期モータやステッピングモータ等の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おり, 球面同期アクチュエータは, 任意軸まわりトルクを制御可能なトルク発生式が提案されており, 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[3-8]。

これまで, 筆者らは, 高トルク密度実現可能なアウターロータ型の 3 自由度球面アクチュエータの開発を行っており, トルク定数行列をもとにトルク発生式を用いて各コイルの入力電流値を算出する制御方法を提案しているが, 0.1 mm 程度の位置決め精度を必要とする微細作業ロボットへの適用に対しては, トルクモデルの解析精度の検討が不十分である[9, 10]。

そこで本稿では, トルク発生式を用いたトルクモデルを筆者らが提案してきた球面同期アクチュエータに適用し, トルクの解析精度に影響を与える因子を検討し, 解析精度改善に関する検討を行ったので報告する。

2 球面アクチュエータの構造と動作原理

2.1 アクチュエータ構造

本稿で扱う 3 自由度の駆動が可能なアウターロータ型球面同期アクチュエータは, Fig. 1 に示すように, 球状の可動子内面に緯度, 経度方向に極が切り替わるように球殻状の永久磁石を配置し, 固定子に複数のコイルを配置している。アウターロータ型は可動子を外側に持ち, 電磁力が発生するエアギャップを外側に配置

Fig. 1 Structure of spherical actuator (full model).

Table 1 Specification of spherical actuator.

Diameter [mm]		97.0
Thickness of permanent magnets [mm]		3.0
Air gap length [mm]		0.7
Residual magnetic flux density [T]		0.68
Number of phases		5
Number of coil turns		180
Movable range [deg]	x and y-axis	40
	z-axis	360

できるため、高トルク化が期待できる。一方で、可動子が外側にあることから球面軸受を用いて可動子を支持することが困難であり、ジンバル機構による支持はシステム全体の大型化につながる。そこで、Fig. 1(d)のように先端が自由に回転するクランプングスクリューで可動子内側を直接支持する構造としている。駆動時は可動子と同期するようにコイルに多相の電圧を印加し、多自由度の回転を実現している。なお、コイルに印加する電圧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[11, 12]。

本稿では、少相化と高トルク化の両立が可能な球面アクチュエータとして、文献[13]により提案した補極を有する磁気回路独立磁極モデル構造であるクラウンポール型モデル（以下、CP 型モデル）を用いて、トルクモデルの解析精度の検討を行う。アクチュエータ仕様を Table 1 に示す。球状の可動子には球殻状の永久磁石が緯度 θ 方向に 22.5 度間隔、経度 ϕ 方向に 30 度間隔で極が切り替わるよう配置されている。固定子は、原点对称の位置関係にある 2 本の磁極を一对とした磁極

対で構成される。磁極対は、コイルと軟磁性体の鉄心

Fig. 2 Flow of magnetic flux.

でできており、CP 型モデルの特徴として、Fig. 2 に示すように主極鉄心の周囲に巻いたコイルを覆うように補極が追加されている。これにより、磁束は主極鉄心から可動子のバックヨークを通り、補極を通ってループするので、主極鉄心に加え補極鉄心でもトルクを発生可能であり、高トルク化が可能な構造である。Fig. 1 に示す固定子には、10 本の磁極（5 本の磁極対）が配置されている。磁極対を構成する 2 本の磁極には同相の電流を入力するため、制御電流の相数は磁極数の半数となり、5 相となる。

2.2 トルク発生式

本稿で用いるトルク発生式について述べる。ここで、各コイルで生成された磁界は他のコイル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次式で表される[14, 15]。

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} K_{mx}(p_1) & K_{mx}(p_2) & \cdots & K_{mx}(p_n) \\ K_{my}(p_1) & K_{my}(p_2) & \cdots & K_{my}(p_n) \\ K_{mz}(p_1) & K_{mz}(p_2) & \cdots & K_{mz}(p_n) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ \vdots \\ i_n \end{bmatrix} \\
 &+ \begin{bmatrix} T_{cogx}(p_1) + T_{cogx}(p_2) + \cdots + T_{cogx}(p_n) \\ T_{cogy}(p_1) + T_{cogy}(p_2) + \cdots + T_{cogy}(p_n) \\ T_{cogz}(p_1) + T_{cogz}(p_2) + \cdots + T_{cogz}(p_n) \end{bmatrix} \\
 &= \mathbf{K}_m \mathbf{i} + \mathbf{T}_{cog}
 \end{aligned} \tag{1}$$

ここで、 T_x , T_y , T_z はそれぞれ x, y, z 軸まわりの出力トルク、 p_n は可動子座標系での各コイルの位置を示し、 $K_{mx}(p_n)$, $K_{my}(p_n)$, $K_{mz}(p_n)$ はそれぞれ x, y, z 軸まわりの各コイルにおけるマグネットトルク定数、 $i_1, i_2, \dots, i_n$ は各相のコイル電流、 $T_{cogx}(p_n)$, $T_{cogy}(p_n)$, $T_{cogz}(p_n)$ はそれぞれ x, y, z 軸まわりの各磁

Fig. 3 Simple pole model.

極におけるコギングトルクを示す。また、 $\mathbf{K}_m$ はマグネットトルク定数行列、 $\mathbf{T}_{cog}$ はコギングトルクベクトルである。式(1)の右辺第 1 項は電流トルク、右辺第 2 項はコギングトルクであり、出力トルクはこの二つのトルクの和で表される。

球面アクチュエータのトルクは、Fig. 3 に示すような簡易磁極モデルが各姿勢におけるコイル位置 p_n で発生するトルクを足し合わせるることによって式(1)から得られる。簡易磁極モデルを緯度 θ 方向に $\Delta\theta$ 刻み、経度 φ 方向に $\Delta\varphi$ 刻みで回転させて、その各姿勢に対して 3 次元有限要素法を用いた磁界解析を行い、次式により、マグネットトルク定数行列 $\mathbf{K}_m(p_n)$ とコギングトルクベクトル $\mathbf{T}_{cog}(p_n)$ を算出することで、トルク定数マップが計算できる。

$$\mathbf{K}_m(p_n) = \begin{bmatrix} K_{mx}(p_n) \\ K_{my}(p_n) \\ K_{mz}(p_n) \end{bmatrix} = \mathbf{T}(p_n, 1\text{ A}) - \mathbf{T}(p_n, 0\text{ A}) \quad (2)$$

$$\mathbf{T}_{cog}(p_n) = \begin{bmatrix} T_{cogx}(p_n) \\ T_{cogy}(p_n) \\ T_{cogz}(p_n) \end{bmatrix} = \mathbf{T}(p_n, 0\text{ A}) \quad (3)$$

ここで、 $\mathbf{T}$ は磁界解析により得られた簡易磁極モデルに働くトルクであり、 p_n は簡易磁極モデルの可動子座標系での位置、0A, 1A はそれぞれコイルに流れる電流である。これらのトルク定数行列は、あらかじめ設定した磁極位置の x, y, z 軸まわりのトルク定数を記したトルク定数マップとなり、任意の可動子姿勢に対する磁極位置で必要なトルク定数は、トルク定数マップから磁極位置に応じた値を参照することで求まる。トルク定数マップをフルモデルの解析結果から求めようとすると、3 自由度の球面アクチュエータの任意の回転を表現するには、磁極と永久磁石との位置関係に

対称性がないため、緯度 θ 方向、経度 φ 方向ともに可動領域全体にわたる解析を行う必要があるが、一対の磁極対からなる簡易磁極モデルを用いる場合、緯度 θ 方向に 1/2、経度 φ 方向に 1 電気角分の解析を行うことで、モデルの対称性を利用して可動領域全体のトルク定数マップを算出することができる。

2.3 出力トルクの解析精度

Fig. 1～3 の 3 自由度球面アクチュエータを用い、出力トルクの解析精度を検証する。任意姿勢において目標トルクを出力するための各相の電流値は、式(1)を用いることで計算できる。可動子を回転させて、各姿勢で目標トルクを出力する各相の電流値を式(1)から計算し、その電流値を Fig. 1 のフルモデルに入力し、3 次元有限要素法による磁界解析により出力トルクを算出する。目標トルクに対する出力トルクを比較することで、本解析法の解析精度を検証する。

Fig. 4 にトルク定数マップ解析を行う簡易磁極モデルとトルク解析を行うフルモデルの磁界解析における要素分割図を示し、Table 2 に解析諸元を示す。両モデルとも、磁極部分の要素サイズを 1 mm 程度に設定したが、Fig. 4 に示すように、簡易磁極モデルは磁極対が 1 対のみであるためフルモデルとは要素分割が異なる。1 ステップ当たりの解析時間は、簡易磁極モデルを用いたトルク定数マップ解析が約 2 分、フルモデルを用いたトルク解析が約 3 分である。出力トルクの解析精度への影響が大きいトルク定数マップの分解能は、緯

Fig. 4 Finite-element subdivisions except for air.

Table 2 Discretization data.

Model	Simple pole	Full
Number of elements	1,013,536	1,415,804
Number of nodes	200,640	268,670
Number of steps	891 x 2 current condition	41
CPU time [h]	57	2.1

Used computer : Intel Xeon Gold 5122 x 2 (3.6GHz), 4 parallel

Fig. 5 Static analysis result.

度 θ 方向に 1.1 度、経度 ϕ 方向に 1.5 度とし、0A と 1A の電流値に対してそれぞれ 891 ステップの解析を行ってトルク定数マップを算出した[9]。検証は、可動子を x 軸のまわりに 0~40 度の範囲で 1 度ごとに回転させ 41 ステップの解析を行い、その各姿勢で目標トルク $T_x = 0.5 \text{ Nm}$ に対する出力トルクを比較する。Fig. 5 に出力トルクの解析結果を示す。Fig. 5 より x 軸まわりの出力トルク T_x の解析結果は、目標トルクに対して平均 4.2%、最大で 9% の誤差があり、0.1 mm 程度の位置決め精度を必要とする微細作業ロボットへの適用を考えると、解析精度の向上が必要である。

3 出力トルクの解析精度向上検討

3.1 出力トルクの解析誤差要因

Fig. 5 に示した出力トルクの解析誤差の要因を考察する。出力トルクは式(1)より、電流トルクとコギングトルクの和で表されることから、Fig. 5 の出力トルクの解析結果を、電流トルクとコギングトルクの成分に分解して比較することで、解析誤差の要因を考察する。ここでは、代表して x 軸のまわりのトルク成分により検討を行う。Fig. 6 に電流トルク、Fig. 7 にコギングトルクを示す。Fig. 6 では、式(1)のトルク発生式における右辺第 1 項の電流トルクを破線で示し、フルモデルの 3 次元有限要素法による出力トルクの解析結果を実線で示す。Fig. 7 では、式(1)右辺第 2 項のコギングトルクを破線で示し、フルモデルの解析結果を実線で示す。Fig. 6 より、電流トルクはトルク発生式とフルモデルの解析結果で良く一致しており、その差は 1% 以下である。一方、Fig. 7 に示すコギングトルクは、トルク発生式とフルモデルの解析結果で差があり、その差は約 6% フルモデルの解析結果が大きくなっている。この結果より、Fig. 5 に示した出力トルクの解析誤

Fig. 6 Comparison of current torque.

Fig. 7 Comparison of cogging torque.

差の要因は、コギングトルクの解析精度の影響が支配的であることがわかる。

3.2 コギングトルク計算の考察

Fig. 7 に示したコギングトルク計算におけるトルク発生式とフルモデルの解析結果の差の要因を考察する。トルク発生式のコギングトルクベクトルは、Fig. 3 の簡易磁極モデルの磁界解析結果を使っており、Fig. 1 のフルモデルによる解析と、以下の 2 点が異なる。第 1 の相違点は、Fig. 4 に示したように要素分割が異なる点であり、第 2 の相違点は、簡易磁極モデルでは影響の小さかった隣接磁極の影響がフルモデルでは大きくなる点である。

第 1 の相違点である要素分割の影響を検討する。Fig. 8(a) に、可動子を x 軸のまわりに 0~40 度の範囲で 1 度ごとに回転させ、その各姿勢で求めた x 軸のまわりのコギングトルクを示し、Fig. 8(b) に、比較した 2 つの要素分割のコギングトルクの差を示す。Fig. 8(a) の灰色の破線は、フルモデルの要素分割 (FM) を用いた結果であり、黒色の実線は簡易磁極モデルの要素分割 (SP) を用いた結果である。Fig. 8 より、フルモデルの要素分割と簡易磁極モデルの要素分割の結果は良く

(a) cogging torque around x axis

(b) difference between SP and FM

Fig. 8 Comparison of cogging torque by the difference of mesh division.

(a) cogging torque around x axis

(b) difference between AEP and FM

Fig. 9 Effect of adjacent magnetic poles.

一致しており、その差は 1 % 以下の 2 mNm 以下である。このことから、本解析モデルは十分に細かい要素分割となっており、コギングトルクの差は要素分割の差ではないことがわかる。

次に、第 2 の相違点である隣接磁極の影響を検討する。5 本の磁極対からなるフルモデルにおいて、それぞれの磁極対のみをモデル化した解析を行い、出力トルクを重ね合わせることで隣接磁極の影響をなくしたモデルとフルモデルを比較する。Fig. 9(a) に、可動子を x 軸のまわりに 0~40 度の範囲で 1 度ごとに回転させ、その各姿勢で求めた x 軸のまわりのコギングトルクを示す。灰色の破線はフルモデル (FM)、黒色の実線は上述の隣接磁極の影響をなくしたモデル (AEP) の結果である。Fig. 9(b) に、AEP と FM のコギングトルクの差を示す。Fig. 9 より、隣接磁極の有無によりコギングトルクの解析結果の差は約 8 % の 50 mNm 程度あることがわかる。このことから、Fig. 5 に示した出力トルクの解析誤差の要因として、本解析法の各コイルの電流計算において、コギングトルクの隣接磁極の影響を考慮していないことが支配的であると考えられる。

3.3 コギングトルク誤差を考慮した電流計算

トルク定数行列をもとにトルク発生式を用いて各コイルの入力電流値を算出する本解析法において、(1)~(3)式で求めるトルク定数マップのコギングトルクの隣接磁極影響を考慮する方法を検討した。Fig. 7 の結果より、フルモデルのコギングトルクは、トルク定数マップから算出するコギングトルクに比べて約 6 % 大きいことから、トルク定数マップのコギングトルクが過小評価となっていると考えられるため、トルク定数マップのコギングトルクの補正を考えた。Fig. 10 に、トルク定数マップのコギングトルクを 6 % 補正した結

Fig. 10 Analysis result using modified cogging torque.

果を示す。Fig. 10 より, x 軸のまわりの出力トルク T_x の解析結果は, 平均 1.6 % (38.1 %低減), 最大で 4 % (44.4 %低減) と, 大幅に解析誤差を低減できた。

4 動トルク特性解析

3 次元有限要素法による磁界解析と次式で示す回転運動の運動方程式を連成し, 可動子の位置をフィードバックする閉ループ制御を行う。

$$T = J \frac{d^2\theta}{dt^2} + B \frac{d\theta}{dt} + K\theta + \tau \quad (4)$$

ここで, J は慣性モーメント, B は可動子の周辺媒体 (空気や油など) の粘性減衰係数, K はバネ定数, τ は摩擦トルクである。

動トルク特性解析における閉ループ制御系を Fig. 11 に示す。制御系は, MATLAB/Simulink で構成し, ここから得られる各相の電流値 I_n を磁界解析モデルの各コイルの入力とし, 可動子に働くトルクを解析する。Simulink で式(4)の運動方程式を解いて可動子の回転角度を算出し, フィードバックする。

Fig. 12 に, x 軸のまわりに振幅 15 度, 2 Hz の正弦波

Fig. 11 Control diagram of dynamic analysis.

Fig. 12 Result of dynamic analysis.

Fig. 13 Comparison of positioning accuracy.

を与えた場合の動トルク特性解析結果を示す。Fig. 12 より, 角度誤差は 1 % 以下で, 良好な結果が得られた。球面アクチュエータに設置した 200 mm の長さのアーム先端の位置決め誤差を Fig. 13 に示す。トルク定数マップのコギングトルクを補正する本解析法により, 平均位置決め誤差を 20 % 以上低減となる 0.03 mm 低減できた。回転角が 5 度以下となる時間で誤差低減が小さく, その時間で発生している最大誤差の低減も小さいが, 今回想定している微細作業では 5 度以上回転するため, 0.1 mm 程度の位置決め精度を必要とする微細作業ロボットへの適用に対して, 十分な解析精度が得られた。なお, 回転角が 5 度以下と移動量の小さな作業を行う場合については, 解析時間刻み幅の最適化などにより解析精度の向上が必要である。

5 結言

本稿では, アウターロータ型 3 自由度球面同期アクチュエータを用いて, 出力トルクの解析精度に影響を与える因子を検討し, 解析精度の向上を図った。その結果, トルク発生式を用いたトルクモデルによる本解析法において, 各コイルの電流計算時にコギングトルクの隣接磁極の影響を考慮していないことが誤差発生の主要因であることがわかった。

そこで, トルク定数マップに対してコギングトルクの隣接磁極影響の補正法を導入し, 出力トルクの解析精度を 38.1 % 改善し平均誤差 1.6 % が得られた。さらに, 3 次元有限要素法による磁界解析と MATLAB/Simulink を用いた動トルク特性解析における閉ループ制御系を構築し, 位置決め精度を評価した。平均位置決め誤差を 20 % 以上低減し, 0.1 mm 程度の位置決め精度を必要とする微細作業ロボットへの適用に対して, 十分な解析精度が得られた。

参考文献

- [1] 武田, 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] C. Xia, H. Li and T. Shi, 3-D Magnetic Field and Torque Analysis of a Novel Halbach Array Permanent-Magnet Spherical Motor, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 44, No. 8, pp. 2016-2020, 2008.
- [4] 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.
- [5] B. van Nijhuijs, 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.
- [6] 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.
- [7] 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, 2015.
- [8] 矢野, 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.
- [9] 房安, 増山, 平田, 新口, 高原, 多自由度球面アクチュエータの出力トルク計算における解析精度の検討, 日本機械学会第 31 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム, 23A1-4, 2019.
- [10] 房安, 増山, 平田, 新口, 高原, 多自由度球面アクチュエータのトルク計算方法と位置決め精度の関係, 電気学会リニアドライブ研究会資料, MAG-19-180, MD-19-118, LD-19-084, 2019.
- [11] J. Wang, G. W. Jewell and D. Howe, A Novel Spherical Actuator: Design and Control, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 33, No. 5, pp. 4209-4211, 1997.
- [12] 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.
- [13] 高原, 平田, 新口, 雨堤, 新しい磁極構造を有する少相 3 自由度球面アクチュエータの開発, 日本 AEM 学会 MAGDA コンファレンス, OS8-2, 2018.
- [14] 西浦, 平田, 堺谷, 新口, 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.
- [15] N. Kasashima, K. Ashida, T. Yano, A. Gofuku and M. Shibata, Torque Control Method of an Electromagnetic Spherical Motor Using Torque Map, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 21, No. 4, pp. 2050-2060, 2016.