

揺動球・回転球を用いた高トルク 3 自由度球面モータ

茨城大学 学術研究院 応用理工学野 機械システム工学領域

北山 文矢

1. はじめに

近年、家電・自動車・航空機の電動化、高齢化に伴う福祉・医療機器の需要増加、生産性向上のためのロボット導入・加工機械の高度化により、多くのモータが機械に組み込まれている。車載向けを除く小型モータの世界出荷台数は 60 億個(2024 年調べ)、車載向けの小型モータの世界出荷台数は 31 億個(2022 年調べ)であり、モータの市場は大きい。多自由度への動作を要する機械では、各駆動部にモータを多数搭載して対応している。しかし、モータ個数に依存して重量化・大型化する傾向にあり、各モータの回転軸が直交でないことに起因する制御の複雑化の課題もある。

これらの問題を解決するために、多自由度球面モータ(1,2)が開発されてきた。球面モータは 1 台で多自由度に回転でき、機械全体のシンプル化・省スペース化・回転軸直行化を達成できる。球面電磁モータは 1 自由度電磁モータや 1 自由度電磁リニアモータを基にしており、中速中トルク～高速低トルク特性である。そのため、ロボット眼球・手振れ補正・攪拌機などの用途への応用(3)が期待できる。一方で、ロボット関節や加工機械などでは球面モータのトルク不足が懸念される。高トルク化に向けた磁気回路設計(4)は考案されているものの、飛躍的なトルク向上は難しい。1 自由度電磁モータでは波動歯車や遊星歯車などの高減速比の減速機の併用で低速高トルク特性を実現している。球面モータ用減速機は多自由度駆動に起因する幾何学的制約が強いために実現が難しい。球面モータ用減速機の報告例として複数の球体を用いた減速機(5)が存在するが、球面モータの上部に複数の球を重ねて配置する構成であるため大型化は避けられない。

我々は多自由度高トルク駆動の実現を目指し、ワブルモータ(6)・Swirling モータ(7)などの揺動運動を回転運動に変換する機能を搭載した特殊 1 自由度電磁モータに着目した。これらの 1 自由度モータは大推力をトルクに変換することで大トルクを得る。本研究では Swirling モータ拡張した揺動球・回転球を用いた球面モータを開発する。

2 章では提案球面モータの基本構成・動作原理について述べる。3 章では数値計算によるトルク特性解析結果について述べる。4 章では試作機を用いた動作試験について述べる。5 章でまとめを述べる。

2. 揺動球・回転球を用いた球面モータ

提案球面モータの基本構造を図 1 に示す。固定子(Stator)、揺動球(Swirlor)、回転球(Rotor)から構成され、Rotor の中に Swirlor が封入される構造となっている。Stator は 8 個のコイル、ヨーク、Rotor を回転支持するためのボールローラ、磁気ピンから構成される。Swirlor はヨーク、磁石、磁気ピンから構成される。Rotor は非磁性体の球殻である。Swirlor が 8 極になるよう磁石を配置しており、Stator の 8 相のコイルと反応することで任意の直動方向に力を発生させる。Rotor と Swirlor は接触しており、接触摩擦によりトルクを伝達する。先行研究の Swirling モー

タでは Swirler に Stator から機械ピンを直接指すことで Swirler の回転を抑制しているが、提案球面モータでは Swirler と Stator の間に Rotor が配置されているために機械ピンを用いることはできない。そこで、各軸周りに配置した板状の磁石から成る磁気ピンを用いて、磁気カップリングの原理で Rotor への機械的な干渉なしで Swirler の回転を抑制している。

本モータの模式図を図 2 に示す。まず、コイルに電流を印加し、Swirler に電磁力 $\mathbf{F} = [F_x, F_y, F_z]^T$ を与える。電磁力 $\mathbf{F}$ は推力定数行列 $\mathbf{K}(\theta, \Phi)$ と印加電流ベクトル $\mathbf{I} = [I_1, \dots, I_8]^T$ とディテ

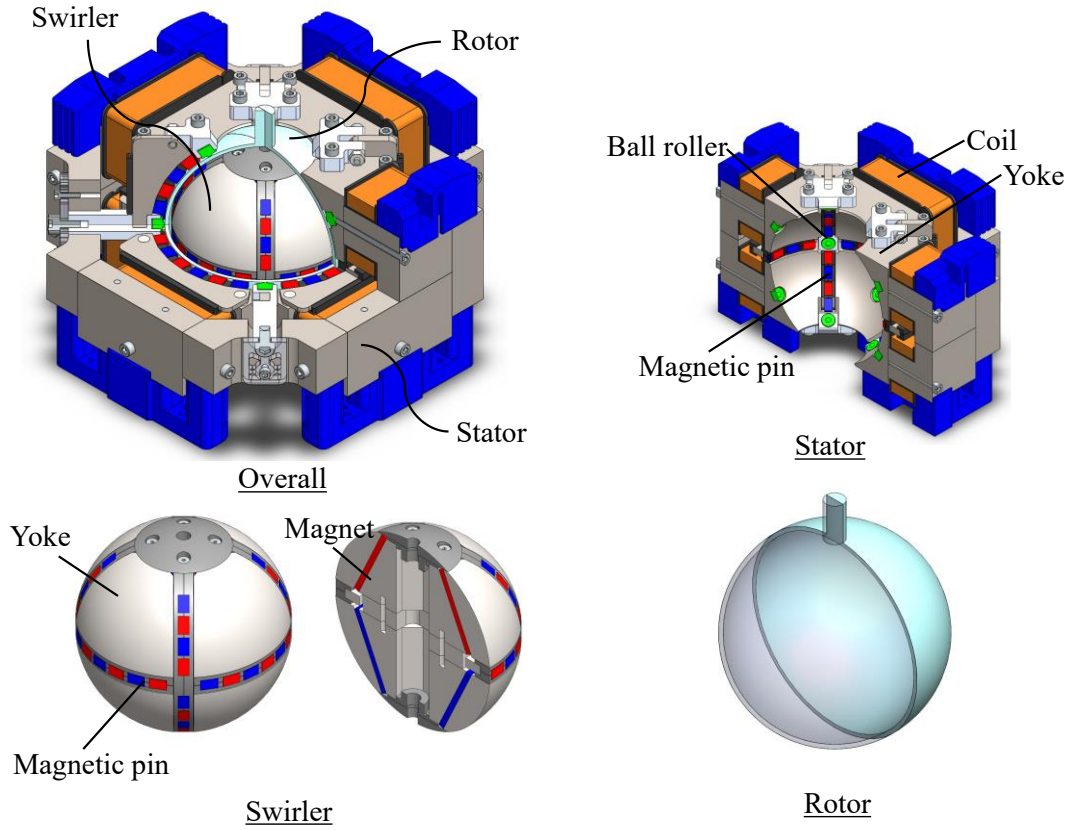


図 1 提案球面モータの基本構造

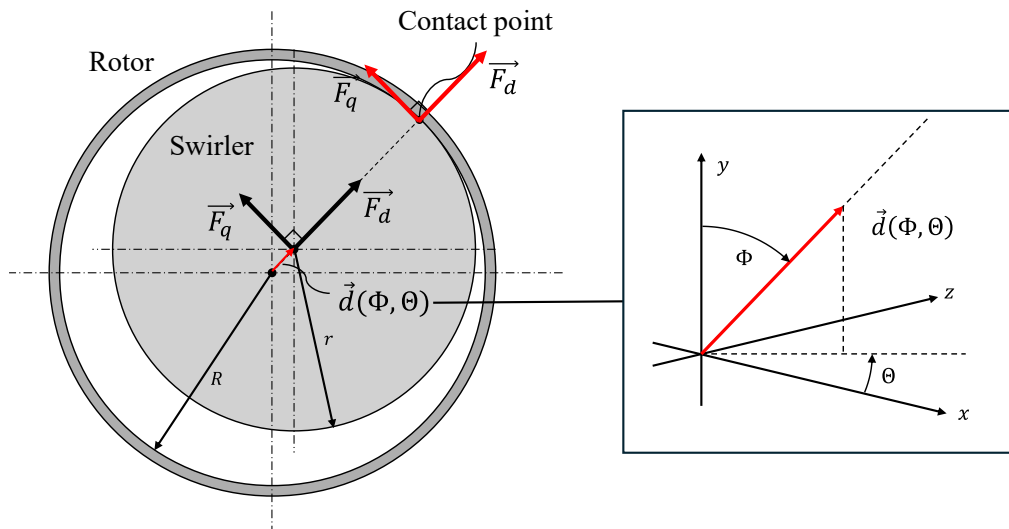


図 2 提案球面モータの模式図

トルクベクトル $\mathbf{F}_{pm}(\theta, \Phi) = [F_{pmx}(\theta, \Phi), F_{pmy}(\theta, \Phi), F_{pmz}(\theta, \Phi)]^T$ から式(1)で求まる。 θ, Φ は swirler の位置ベクトルを表現するための角度である。

$$\mathbf{F}(\theta, \Phi) = \mathbf{K}(\theta, \Phi)\mathbf{I} + \mathbf{F}_{pm}(\theta, \Phi) \cdot \cdot \cdot (1)$$

$$\mathbf{K}(\theta, \Phi) = \begin{bmatrix} K_{1x}(\theta, \Phi) & \cdots & K_{8x}(\theta, \Phi) \\ K_{1y}(\theta, \Phi) & \cdots & K_{8y}(\theta, \Phi) \\ K_{1z}(\theta, \Phi) & \cdots & K_{8z}(\theta, \Phi) \end{bmatrix}$$

電磁力 $\mathbf{F}$ は Swirler から Rotor に伝わる伝達力となり，接触点の接平面に垂直な成分 $\mathbf{F}_d$ ，接触点の接平面の成分 $\mathbf{F}_q$ に分解できる。Rotor の半径 R から式(2)でトルクが発生する。

$$\mathbf{F}(\theta, \Phi) = R\mathbf{F}_q \cdot \cdot \cdot (2)$$

ただし，式(3)の制約条件を超えると Rotor が滑ることに留意する。 μ を摩擦係数とする。

$$|\mathbf{F}_q| \leq \mu|\mathbf{F}_d| \cdot \cdot \cdot (3)$$

3. 解析を用いたトルク評価

三次元有限要素法を用いた磁場解析によりコイル 1 の推力定数，ディテント力を求めた。磁場解析ソフトウェアとして JMAG Designer(株式会社 JSOL)を用いた。Swirler と Stator が対向しているためにディテント力は最大 70N 程度と大きい。推力定数をみると，X 軸方向で大きく，

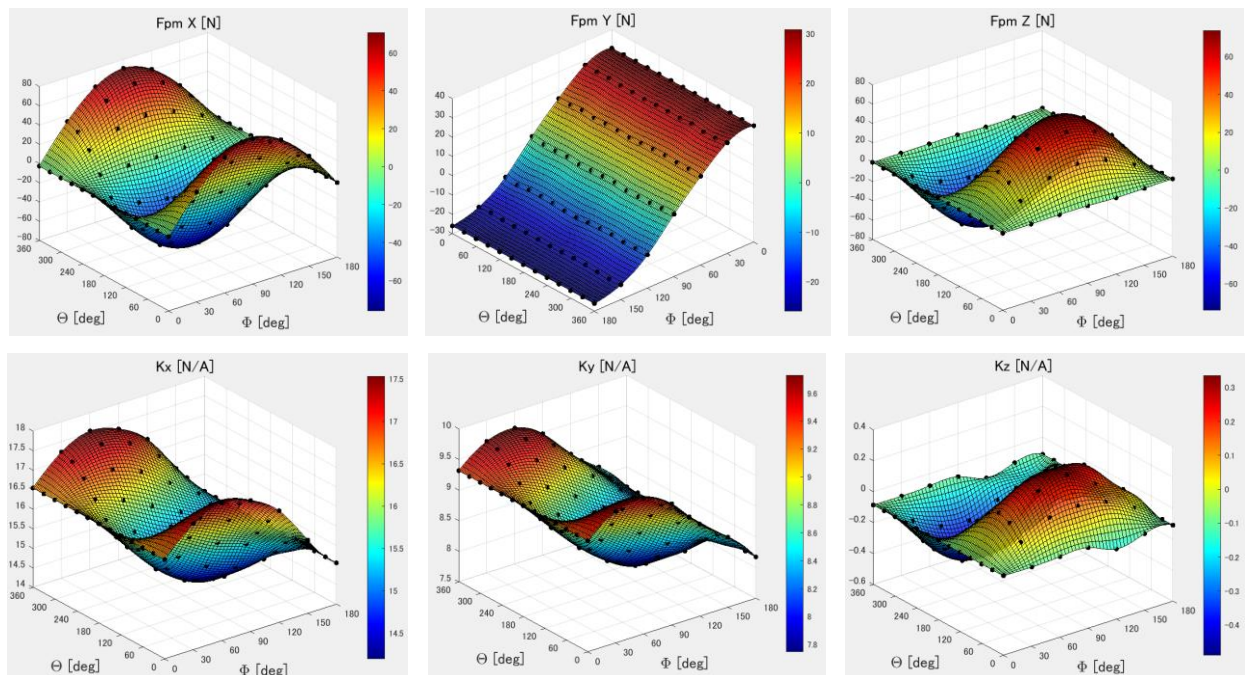


図3 ディテント力，コイル 1 の推力定数

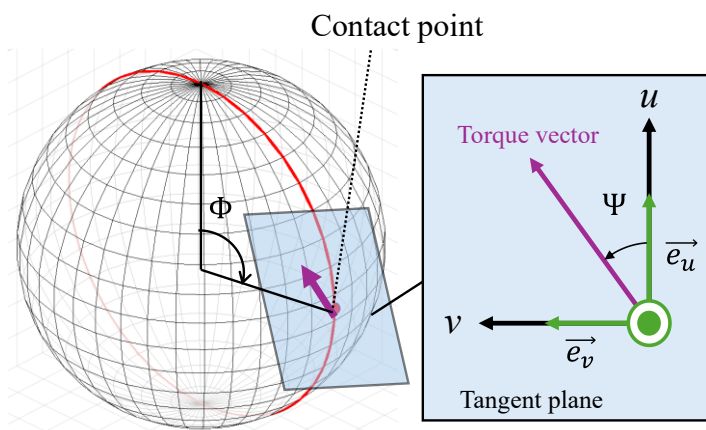


図 4 トルク特性計算条件

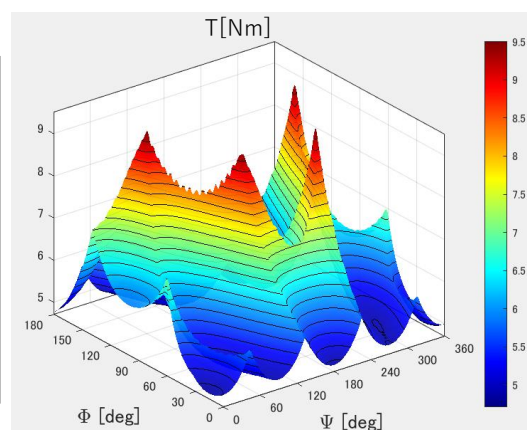


図 5 トルク特性

Z 軸方向では小さい。これはコイル 1 の配置に起因するものであり、Z 軸方向の推力定数が高いコイルも存在する。このことから、複数のコイルへの電流印加により任意の方向の推力が得られることがわかる。

上記の磁場解析で得た推力定数、ディテント力を用いて式(1),(2)に基づき、最大トルクを計算する。起磁力 336 AT 以下、(3)式を満たす、 Ψ で定義したトルクベクトル(図 4 紫矢印)の方向に最大トルクを発生させるように印加電流を決定した。 $\theta=0$ deg, $\Phi=0\sim 360$ deg の位置(図 4 赤線)に Swirler を配置し、 $\Psi=0\sim 360$ deg とする。摩擦係数 μ を 1 とした。図 5 に最大トルク計算結果を示す。図 5 を見ると、4.71~9.44 Nm の範囲でトルクが得られ、既存の電磁球面モータの水準(数 Nm)よりも大きくなった。一方で、Swirler 位置やトルク発生方向に依存して最大トルクは変化しているため、広範囲で大トルクを発生させるための最適設計が今後必要と思われる。

4. 試作機を用いた動作試験

図 6 に示す試作機を製作した。コイルは 1 個当たり 672 turns, 約 $12\ \Omega$ となり、ヨークとして SS400 と SUY を用いた。磁石としてネオジウム磁石を用いた。その他の支持部・Rotor などは 3D プリンタで製作した。全長は 190x190x106mm であり、総重量は 12kg である。また、swirler の重量は 2.8 kg である。本試作機は動作原理検証用であるため、今後軽量化設計する予定である。

本試験では単純な電流印加により試作機の動作を確認する。まず、コイル 4 相をそれぞれ直列に接続し、2 つのコイルグループを形成する。それから、安定化電源 2 台を各コイルグループそれぞれに接続する。トグルスイッチで各コイルグループの印加電流を -0.42, 0, 0.42A に切り替え、平面方向で Swirler が揺動するように電磁力を与える。その際の Swirler, Rotor の挙動をビデオカメラで撮影する。動作試験の結果、印加電流の切り替えに応じて Swirler が揺動していた。図 7 に示す通り Rotor は Swirler の揺動に応じて回転していた。今後、8 相コイルにそれぞれアンプと制御器を接続し、独立的な電流制御により最大トルクを生成させる。それから、トルク特性を実測し、解析結果と比較する。

5. まとめ

本研究では、ロボット関節や加工機械などへの応用に向けた高トルク多自由度駆動の実現のために、揺動球の径方向磁力を積極的に活用する球面モータを提案した。解析結果によると、球面モータとしては高水準の最大 9.6Nm 程度のトルクを達成した。動作試験を通じて、実機においても基本動作(揺動運動・揺動運動から回転運動への変換)可能であることを示した。今後は、軽量化・高推力化のための最適設計、実機での制御実装・トルク評価を実施する予定である。

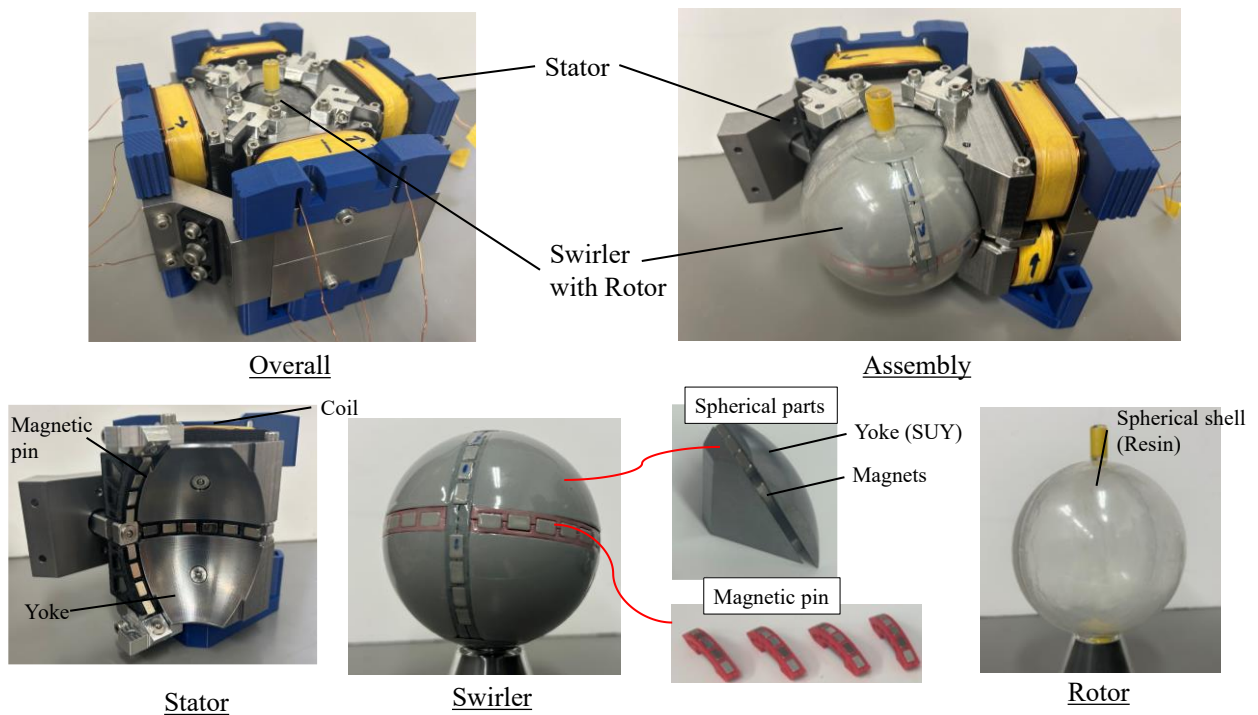


図 6 試作機

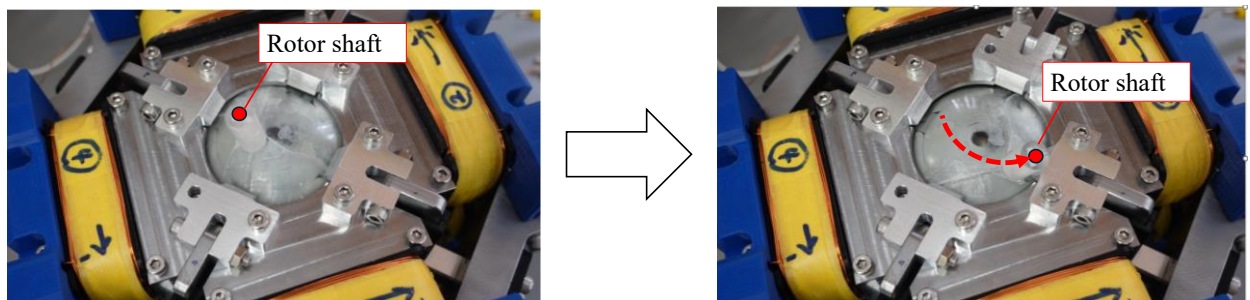


図 7 動作試験の様子

謝辞

本研究は（公益財団法人）天野工業技術研究所 2025 年研究助成を受けて実施されました。

参考文献

- 1) 矢野智明, 前野隆司, “球面モータ” 日本ロボット学会誌, Vol.21, No.7, pp.740~743, 2003
- 2) 平田勝弘, “多自由度球面アクチュエータとロボット駆動への応用” 生産と技術, Vol.71, No.2, pp.72~76, 2019
- 3) 部矢明, 平田勝弘, 吉元崇倫, 太田智浩 “手振れ補正用 3 自由度球面アクチュエータの提案” 日本 AEM 学会誌, Vol.25, No.2, pp.273~278, 2017
- 4) 澤拓真, 平田勝弘, 宮坂史和, 新口昇, 山田弘昭, 宮坂智海, 山口翼, “多軸の独立駆動が可能な球面アクチュエータの特性解析” 日本 AEM 学会, Vol.33, No.2, pp.131~136, 2025
- 5) 利根川浩一, 五福明夫, 笠島永吉, 柴田光宣, 矢野智昭, “全方向に均一に減速可能な球面減速機の開発” 日本 AEM 学会, Vol.29, No.2, pp.401~407, 2021
- 6) L. Chen, A. Thabuis, Y. Fujii, A. Chiba, M. Nagano, and K. Nakamura, “Principle and Analysis of Radial-Force-Based Swirling Actuator for Low-Speed High-Torque Applications” IEEE transaction on Industry Applications, Vol.58, No.2, pp. 1963~1975, 2022
- 7) M. Miyake, K. Suzumori, and K. Uzuka, “Design and Evaluation of Electromagnetic Wobble Motor” J. Robot. Mechatron., Vol. 24, No. 3, pp. 480~486, 2012