

## 多自由度球面アクチュエータとロボット駆動への応用



研究ノート

平田 勝弘\*

Multi-DOF Spherical Actuator and Application to Robot Drive

Key Words : Multi-DOF, Actuator, Electromagnetic Actuator, Sensing, Torque Control

### まえがき

近年、産業用ロボット、ヒューマノイドロボット、ドローンなど複雑な動きができる多自由度システムが我々の身の回りに普及してきた。これらのロボットは複数の1自由度アクチュエータを用いて実現されている。回転モータ、直動モータなどの電磁アクチュエータを用いて、ヒューマノイドロボットなどの多自由度システムを構成する場合、減速機、リンク機構を用いて、出力にモータを直列につなげるシリアルリンク方式が主に用いられている。この方式は産業用ロボットなどでも用いられており一般的であるが、自由度の増加に伴って、部品点数の増加、制御の複雑化などの課題が存在する。

それに対して、多自由度アクチュエータは、モータの構造を三次元的に拡張し、1台で3自由度の動作が可能なアクチュエータで、人間の手首のような動きを実現できる次世代のアクチュエータである。1自由度アクチュエータを多自由度アクチュエータで置換することによって、前述の課題を解決できるだけでなく、減速機とリンク機構を用いないことによる低摩擦、高バックドライバビリティ等の利点も期待できる。特に、1台で球面上を駆動できる球面電磁アクチュエータの研究は2000年頃から世界中で行われており、実現に対する期待は非常に高い。

本稿では、球面電磁アクチュエータの研究の現状

と課題について明らかにするとともに、その課題についての取り組みとロボットへの搭載の可能性について議論する。

### アクチュエータの現状

世界各国で発表されている多自由度球面電磁アクチュエータおよび、それらの適用先について紹介する。駆動原理は適用先によって異なっているが、高トルク・高効率な性能であることから同期アクチュエータが主流となっており、その代表的なアクチュエータについて説明する。

シェフィールド大学のJ. Wangらによって開発された3自由度球面電磁同期アクチュエータを図1に示す。本アクチュエータは小型ロボットへの適用を目的としており、外径は120mm、最大トルクは0.4Nm、可動範囲は傾き方向に45度、回転方向に360度回転することが可能である。可動子は4極の永久磁石、固定子は8個の空芯コイルを有し、4相の電流制御によって駆動する。空芯コイルを有しているため、コギングトルクが発生せず、制御性が向上する反面、コイルが生成する磁束は鉄芯コイルに比べて小さくなるため、出力トルクは低い。

可動子の位置センシングは、固定子内部によって設置されたホール素子とイメージセンサの2種類の



\* Katsuhiko HIRATA

1958年4月生まれ  
大阪大学・工学部・機械工学科 (1982年)  
現在、大阪大学 工学研究科  
教授 工学博士 アクチュエータ、制御、  
メカトロニクス  
TEL : 06-6879-7533  
FAX : 06-6879-7533  
E-mail : mr.khirata@gmail.com



図1 3自由度球面電磁アクチュエータ (Sheffield 大学)

情報を用いている。ホール素子によって検出する可動子の移動とコイルによる磁界変化と、イメージセンサによって検出する可動子の色情報を用いて（可動子は北半球が白く、南半球が黒く塗られている）、可動子位置を検出している。

次に、アーヘン工科大学の K. Kahlen らによって開発された3自由度球面電磁同期アクチュエータを図2に示す。本アクチュエータは大型工作機械に適用するために開発され、可動子の外径だけで400 mmと大型であり、傾き方向に60度、回転方向に360度回転することが可能である。また球面アクチュエータはモータと異なり、無数の回転軸を有し、無数の方向へトルクを出力する必要があるが、本アクチュエータは任意の方向に最低でも40Nmと、比較的大きなトルクを発生させることが可能である。可動子の永久磁石は96極、固定子には112個の鉄

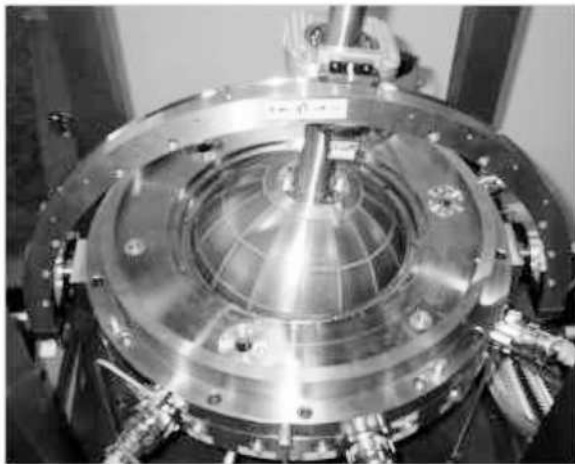


図2 3自由度球面電磁アクチュエータ (Aachen 工科大学)

芯コイルを有している。

可動子の位置センシングは3つのロータリエンコーダを用いている。アクチュエータの出力にガイドを設置し、可動子の移動を3軸周りの回転に分解することで、3軸周りの回転を検出する。この方法ではモータと同様の分解能で高精度の位置検出が可能であるが、アクチュエータ以外に3軸の回転に分解する機構を有する必要がある、システムとして大型化してしまう。

また、大阪大学の平田らによって開発された3自由度球面電磁同期アクチュエータを図3に示す。本アクチュエータは、ヒューマノイドロボットの手首関節適用のために開発され、固定子外径は150 mm、可動子外径は90 mm、最大トルクは1.7 Nm、可動範囲はX、Y軸周りに±10度、Z軸周りに±180度となっている。

センシング手法に関しても、イメージセンサ、ホール素子など様々な方式で検討されているが、累積誤差の発生、センシングシステムの大型化などの課題が残っている。

### ロボット駆動へ向けた課題への取り組み

前章では、現在世界中で研究開発されている多自由度球面電磁アクチュエータについて紹介した。これらのアクチュエータは盛んに研究開発が行われているが、実用化には至っておらず、解決すべき課題がある。本章では多自由度球面電磁アクチュエータとそのトルク制御、位置センシングなどの最前線の取り組みと可能性について議論する。

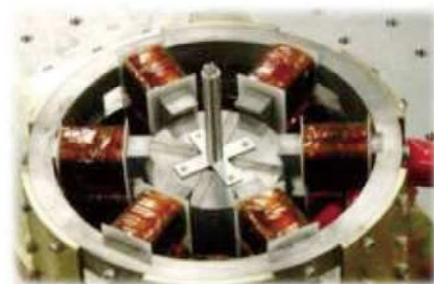
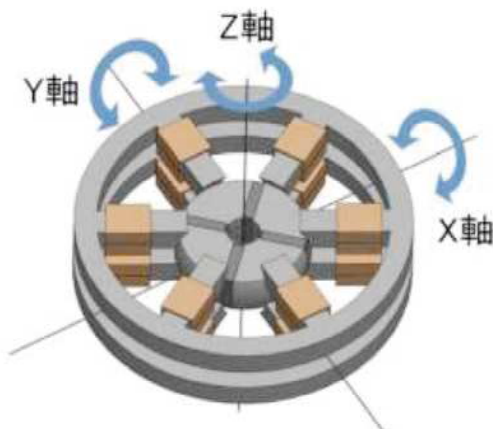


図3 3自由度球面電磁同期アクチュエータ (大阪大学)

(1) アクチュエータの高トルク密度化とトルク制御

多自由度球面電磁アクチュエータは、減速機とリンク機構を用いずに多自由度駆動が可能であるため、部品点数を削減でき、なおかつ高いバックドライバビリティを有する。同時に、モータのように出力トルクを減速機によって増大する手法を、多自由度球面電磁アクチュエータは用いることができず、アクチュエータ単体で用途に応じたトルクを出力する必要がある。

産業総合技術研究所の矢野らは球面アクチュエータに適用できる球面減速機を開発した。この減速機はアクチュエータ出力球に対して、新たに球状物体を複数配置することで、出力トルクを増大している。通常の減速機と同様にトルクは減速比分増加するが、同時に駆動範囲も減速比分減少する。球面誘導モータのように無限回転できる場合には有効であるが、回転角度に制限があるアクチュエータでは適用が難しい。また可動子球に対して最低でも2個以上は球

状物体を垂直に設置する必要があるため、システムとして大型化する。

大阪大学の平田らによって可動子が固定子の外側に位置する、アウターロータ構造を採用した、3自由度球面電磁同期アクチュエータが開発された(図4)。本アクチュエータはインナーロータ型アクチュエータと比べて、トルク発生部であるエアギャップと回転中心の距離を長くとれるため、高トルク化が期待できる。可動子外径は90mm、固定子外径は78mmで、最大トルクは1.6Nm、傾き方向に38度、回転方向に360度回転することが可能である。可動子と固定子の内部構造を図5に示す。可動子の永久磁石は60極の瓦型磁石を有しており、磁石間に非磁性体の磁石固定部を設けバックヨークに接着されている。また磁石と磁石固定部表面には球殻状の樹脂が設置されている。固定子は32極の磁極とコイルを有している。磁極間にはクランピングスクリーンが外径方向に向かって設置されている。球面可動子は、固定子から外側に向かって設置されたクランピングスクリーンを、可動子内面に設置された樹脂(POM)上を滑らせることにより支持されている。

またこのアウターロータ型アクチュエータに関して、図6および下式で表される全体トルクの重ね合わせ、各磁極で発生するトルクの和が、磁極全体で発生するトルクと等しくなることと、メタヒューリスティックな最適化手法である遺伝的アルゴリズムを組み合わせて、固定子磁極配置の最適化により高トルク密度化を図っている。

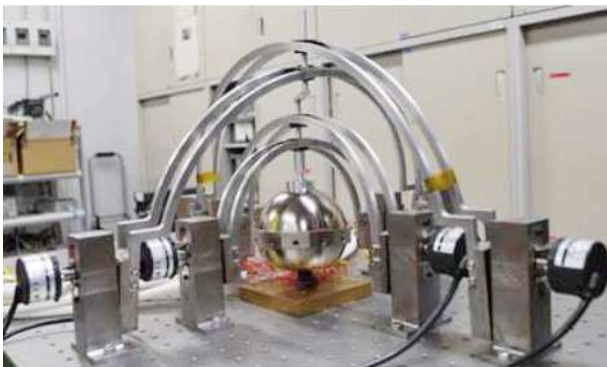


図4 3自由度球面電磁アクチュエータ (大阪大学)

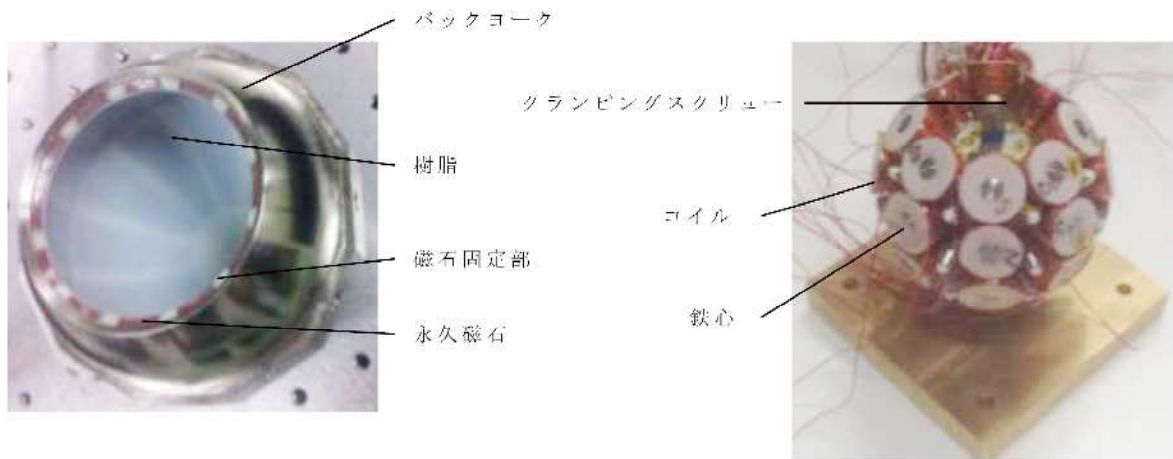


図5 可動子、固定子内部

$$\begin{bmatrix} T_{ex_x} \\ T_{ex_y} \\ T_{ex_z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{1x} & T_{2x} & \dots & T_{16x} \\ T_{1x} & T_{2x} & \dots & T_{16x} \\ T_{1x} & T_{2x} & \dots & T_{16x} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ \vdots \\ i_{16} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (1)$$

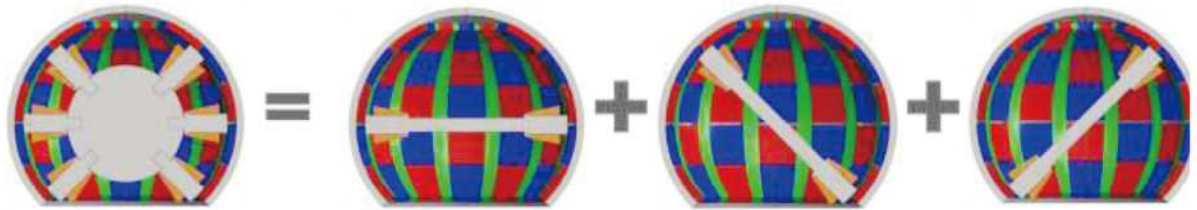


図6 トルクの重ね合わせ模式図

本手法ではあらかじめ、図6右側で示しているような単純磁極モデルの全姿勢における電流に対するトルクのマッピングデータを取得しておけば、図6左側のような複数の磁極を有するモデルにおいてのトルク特性を予測できることを利用している。すなわち最も時間のかかる三次元有限要素法による磁場解析を行うのは磁極1本モデルに対してのみであるため、様々な磁極配置のアクチュエータ特性を数値計算のみで予測することが可能である。また高トルク化へ向けて、磁極配置の探索においては遺伝的アルゴリズムを採用しており、効率よく最適磁極配置を探索することが可能となっている。

**(2) 3自由度位置センシングシステムの開発**

先行研究のアクチュエータでは、ホール素子とイメージセンサの併用、出力にガイドを設けてロータリエンコーダで検出する方法、イメージセンサで検出する方法が採用されていた。可動子姿勢変化および励磁電流の変化によって生成される位置情報を獲得する手法では変化する磁界が複雑で、多数のホール素子を用いるか、他のセンサを併用する必要がある。出力にガイドを設ける方法では、アクチュエータ外部にエンコーダを設置する必要があり、システムの大型化を招く。イメージセンサを用いる場合では、原理上の累積誤差が発生し、可動子の絶対位置が検出できないといった問題を抱えている。

多自由度球面電磁アクチュエータの小型軽量化というメリットを最大限に活用するためには、センシ

ングシステムとして小型軽量で、なおかつ可動子の絶対位置検出を行う必要がある。

そこで、カラーセンサを用いて、色情報から角度情報に変換するセンシング手法が提案されている。カラーグラデーション方式では、可動子全周にわたって徐々に変化する色付けを行うことにより、マッピングデータとの照合を行うことによってセンシングを行う。可動子位置の絶対位置検出ができるというメリットを有する反面、環境変化に弱く、マッピングデータ作成時と環境が変わってしまうと、検出精度に影響する。

カラーエンコーダ方式は、規則性を有するパターンを可動子表面に無数に配置し、検出した色情報の変化から位置情報を獲得する方式である。相対位置検出しかできないが、環境変化に強い。大阪大学の平田らは、球状可動子に色パターンを塗布して実験したことが報告されている。図7に示すように、色付けした球状可動子をモータで駆動させ、随時光電センサによって色変化をモニタすることで、角度センシングを試みている。結果として精度1度で位置検出が可能であることを確認されている。色情報検出に用いているレンズのスポット径は0.1mmと非常に小さいため、より細かいカラーパターンを塗布することができれば、さらに高精度で三次元位置センシングできる可能性を有している。球面などの複雑な形状に精度よく印刷できる技術が求められる。

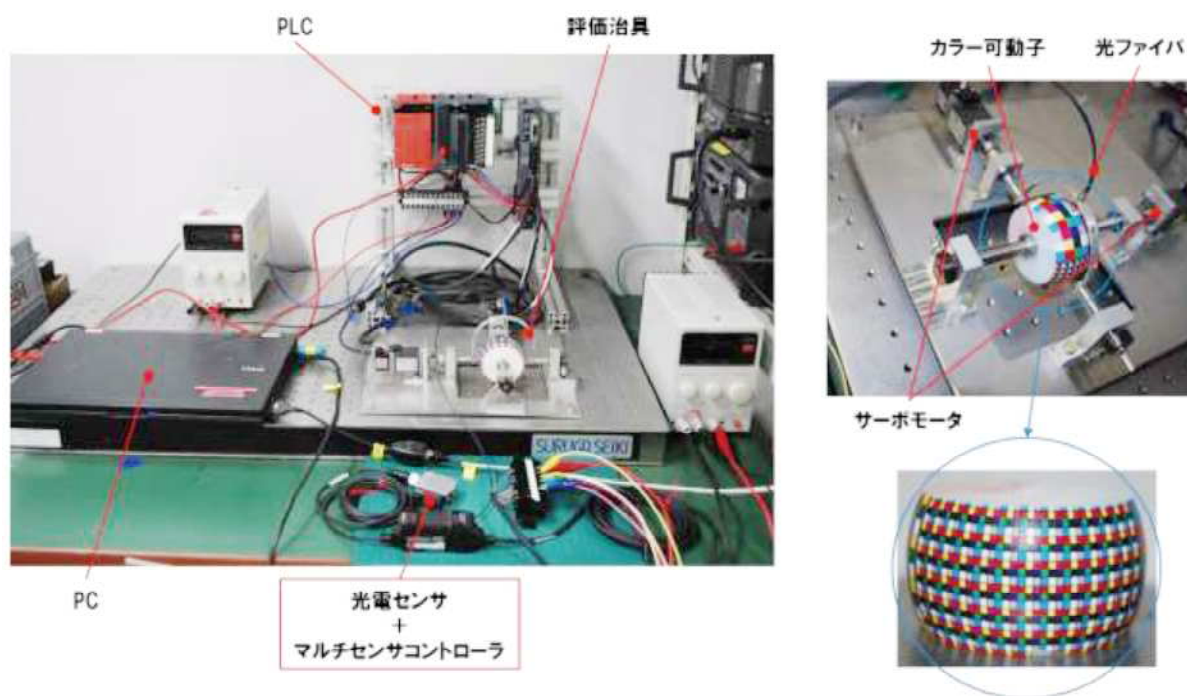


図7 カラーエンコーダ方式評価システム

## まとめ

本稿では多自由度球面電磁アクチュエータの開発とロボット駆動への応用の可能性について述べた。1自由度電磁アクチュエータを用いた多自由度システムが抱える課題について明らかにし、多自由度アクチュエータを用いた場合のメリットについて述べた。

現在世界中で研究されている多自由度球面電磁アクチュエータの先行研究事例について紹介し、解決すべき課題について明らかにするとともに、その解決へ向けての最新の多自由度球面電磁アクチュエータ構造、トルク制御法、センシング法について紹介した。これらの要素技術の構築によってロボットへの搭載へ向けて理想的なアクチュエータが実現できるものと考えている。

## 参考文献

[1] J. Wang, K. Mitchell, G. W. Jewell and D. Howe, "Multi-Degree-of-Freedom Spherical Permanent

Magnet Motors," IEEE Proceedings of the International Conference on Robotics & Automation, pp. 1798 - 1805, May 2001

[2] L. Kahlen, I. Voss, C. Priebe and R. W. D. Doncker, "Torque Control of a Spherical Machine With Variable Pole Pitch," IEEE Trans. on Power Electronics, vol. 19, pp. 1628 - 1634, Nov 2004

[3] 前田 修平, 平田 勝弘, 池尻 昌平, トウ 明宇, イメージセンサを用いた3自由度球面電磁アクチュエータのフィードバック制御に関する研究, 平成22年電気学会全国大会, 5 - 044, pp. 71 - 72, 2010.03

[4] 矢野 智昭, 球面モータの研究動向, 近畿大学次世代基盤技術研究報告, vol. 5, 145 - 152, 2014

[5] 西浦 悠介, 平田 勝弘, 堺谷 洋, 新口 昇, 3自由度アウター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 (産業応用部門誌), vol. 136, No. 3, pp. 232 - 237, 2015