

■ レビュー ■

球面モータの研究動向

Research and Development of Spherical Motor

次世代基盤技術研究所*1 特任教授 矢野 智昭
Tomoaki Yano

In this paper, the history of spherical motor development is reviewed. The history shows that there are a lot of application areas for the spherical motor and the spherical motor technology reaches the practical development stage now. Then, recent research results of our group are reported. Our project has two goals. One is to establish an academic framework of the spherical motor theory by extending the design theory of the conventional motor. Another one is to develop practical spherical motors. The future of the spherical motor is also discussed.

Keywords: Motor, Multi DOF, Spherical, R and D, Polyhedron

1. はじめに

「ものを動かし、操る」アクチュエータ技術は、現代のあらゆる科学・産業の基盤となる技術である⁽¹⁾。力が強く、パワーが大きく、効率が良く、制御がしやすく、軽いアクチュエータを求めて、研究開発が行われてきている⁽²⁾。

しかしながら、実用になっているほとんどのアクチュエータは、その運動が回転もしくは直動の1自由度に制限されている。したがって、ロボットの関節など多自由度の運動を行うためには自由度数と同じ数のアクチュエータが必要になる。人間と同じ7自由度の腕機構を構成すると、アクチュエータを7台直列につなぐ必要がある。すると手先のアクチュエータが肩側のアクチュエータの負荷になるため、肩側のアクチュエータはその質量が雪だるま式にふくれあがり、腕機構の総質量は可搬重量と比較して大きなものになる⁽³⁾。

いっぽう、人間の肩関節や手首関節はそれぞれが1関節で3方向の回転運動が可能になっている。したがって3関節で7自由度の運動が行え、把持できる質量に対して腕の質量は比較的小さくなる。

人間の肩関節のような動きをするアクチュエータの開発は昔からの夢であり、1980年代にはすでに多くの特許が出願されている⁽⁴⁾⁻⁽⁶⁾。

1台で人間の肩関節のような動きを実現するアクチュエータを球面モータと呼ぶ。本論文では、1980年代から現在に至る球面モータ開発の歴史と現状をまとめ、今後

の展望について考察する。

2. 球面モータ開発の歴史

2.1 1980年代

1983年に日本ロボット学会の設立と経済産業省の大型プロジェクト「極限作業ロボット」がスタートしたことに見られるように、ロボットブームが起こった年代である。ロボットが工場にはじめて設置された1980年は「ロボット元年」と呼ばれている。

1980年代はロボットの関節駆動を意識して多くの特許が出願された。矢野は、経済産業省の大型プロジェクト「自動縫製システムの研究」における自動縫製用腕機構の研究で、アクチュエータが直列に連なる非効率に気づき、人間の肩関節のようなアクチュエータとして、「3次元モータ」をはじめとする一連の特許を出願した⁽¹⁷⁾⁻⁽²¹⁾。

一連の特許出願と前後して、1985年頃からロボット腕機構の関節駆動を目的とした球面駆動モータの研究開発事例の発表が盛んに行われるようになった⁽²²⁾。

NTTの金子らは球面3自由度DCサーボモータを試作した⁽²³⁾。ステータに3組の電機子巻線を巻き、X、Y、Zの各軸周りの回転を制御する電流を重ね合わせることで、2組の永久磁石で構成されるロータの回転軸の方向を制御する。動作範囲はZ軸中心に $\pm 15\text{deg}$ の円錐内で、出力軸周りに200rpmで回転しつつ回転軸の方向決めができる。

Georgia工科大学のLeeらは可変リラクタンス型3自由度球面モータの構造を提案した⁽²⁴⁾。ロータに多数の永久磁石、ステータに多数の電機子巻線を埋め込み、それぞれの永久磁石と電機子巻線のペアに働く力を距離の関

*原稿受付 2014年5月12日

*1 〒739-2116 東広島市高屋うめの辺1番

E-Mail t.yano@hiro.kindai.ac.jp

数としてあらかじめ測定しておき、力の総和が所望のトルクになるようにそれぞれの電機子巻線に流す電流を計算する。最適設計のためのシミュレーションを行った。

ベル研の Benjamin らは小型 2 自由度球面モータを開発した⁽²⁵⁾。一組の永久磁石が作る磁界中に可動部を設け、その 3 軸周りにコイルを巻いて、それぞれのコイルに電流を流すことにより標準位置、上下、左右にロータを回転させる。繰り返し位置決め精度が 0.15deg で、0.015kg のものを駆動できる。本体は 0.16kg で CCD カメラを中心部に搭載してロボットアイを構成した。

矢野らは球面誘導モータおよび球面同期モータを試作した⁽²⁶⁾。3 次元空間を張る方向に 3 組の電機子巻線を配置し、電機子巻線に流す正弦波電流の振幅と位相差を変えて回転磁界の回転軸方向を制御することが特徴で、ロータを誘導子にすれば誘導モータ、永久磁石にすれば同期モータが構成できる。最大トルクは 0.2Nm で、600rpm で回転しつつ Z 軸中心に±10deg の円錐内で回転軸の方向決めができる。矢野らはステッピングモータを 3 台入れ子状に組み合わせた球面ステッピングモータも試作した⁽²⁷⁾。Z 軸中心に±45deg の動作範囲を有し、最大トルク 0.093Nm、位置決め精度 0.026deg で任意の方向に出力軸を静止させることができる。

ロボットに組み立て作業を行わせるためには手首をやらわかくして、わずかな位置決め誤差で対象物に過大な力が加わるのを防ぐ必要がある。ロボットの工場進出に伴い、電磁力でコンプライアンスを持たせたコンプライアンス手首機構の研究も活発化した。

東京大学の樋口らは磁気軸受で浮揚させた軸を磁力で駆動する非接触 5 自由度手首機構 MEISTER を開発した⁽²⁸⁾。MEISTER は並進±0.6mm、回転±0.7deg と狭い動作範囲ながら位置決め精度 1 μ m、出力 100N を達成した。

IBM の Hollis らは非接触 6 自由度手首機構を開発した⁽²⁹⁾。固定子、可動子ともに正六角柱の形状で、固定子の各面に電機子、可動子の各面に永久磁石を配置し、6 個の電機子に流す電流を制御することで並進 3 自由度と回転 3 自由度の 6 自由度を実現した。動作範囲は狭いが 1 μ m 以下の精度で位置決めができる。

以上の 2 種類の手首機構はフィードバックゲインを変えてコンプライアンスを変えることができるのが特徴で、ペグ挿入などの作業に適している。多自由度手首機構の研究は一分野を形成し、研究発表が活発に行われた⁽³⁰⁾。

この時期、ペグ挿入のための可変コンプライアンス手首機構の研究は成功を収めたが、ロボットマニピュレータの肩関節のように高トルクを必要とする用途では 1 軸モータの組み合わせに匹敵する性能を達成することができなかった。コンプライアンス手首機構は可動範囲の拡

大が困難だった。球面アクチュエータ開発の難しさが改めて認識され、1995 年頃から矢野ら以外の研究発表はほとんど行われなくなった。

2.2 2000 年代

2000 年代にはいると、計算機的能力が格段に良くなり、Georgia 工科大学の Lee らが提案した、電機子巻線と永久磁石のそれぞれに働く吸引力の計算を実時間で行ってアクチュエータを制御することが可能になった。

このころ、ヒューマノイド型ロボットやペットロボットが登場し、ロボットの指、手、腕、腰、首、足首をはじめとする関節の駆動や目の駆動用に適したアクチュエータとして球面アクチュエータが再び注目を浴びるようになった。さらに、内視鏡や手術支援装置、光学機器の較正やレーザ追尾システム機器の可動部が人間の肩関節のような球面多自由度駆動を要求するようになり、ロボットの関節駆動以外の用途を目的とした球面アクチュエータの研究開発も行われるようになった。

圧電素子をはじめとする、電磁アクチュエータと異なる駆動原理のアクチュエータの研究開発が活発になり、これらの駆動原理を用いた球面アクチュエータの研究開発も活発に行われるようになった⁽³¹⁾。

(a) 電磁アクチュエータの主な研究開発事例

Johns Hopkins 大学の Stain らは外殻に 16 個の電磁石、ロータに 24 個の永久磁石を配置した球面モータを試作した⁽³²⁾。Aachen 工科大学の Kahlen らはステータに 96 個の電磁石、ロータに 48 組の永久磁石を配置した球面ステッピングモータを試作し、115rpm で出力トルク 40Nm を得た⁽³³⁾。DSP ボードを 96 枚使用している。

武蔵工業大学の海老原らはロータにアルミを塗布した球面誘導モータを試作した。Z 軸周りに 1000rpm、X,Y 軸周りに 60rpm で回転し、回転中の軸の方向決めを行った⁽³⁴⁾。Louvain 大学の Dehez らもロータを薄い球殻とした球面誘導モータを試作した。14000rpm で 0.15Nm のトルクを得ている⁽³⁵⁾。

矢野らは、半弓状ステッピングモータ上に回転軸が直交する半弓状ステッピングモータを入れ子状に搭載した球面ステッピングモータおよび AC サーボモータを試作した⁽³⁶⁾。試作した球面モータはいずれも 75mm 角で位置決め精度および出力トルクはそれぞれステッピングモータが 0.03deg、0.03Nm、AC サーボモータが 0.16deg、0.008Nm である。

(b) 学会、研究講演会

電磁型以外の駆動原理のアクチュエータや、球面アクチュエータの研究開発の活発化を受けて、さまざまな学会がアクチュエータの特集を組むようになった⁽³⁷⁾⁻⁽⁴⁰⁾。

日本機械学会機素潤滑設計部門では、2004 年に院生の

教科書向けの単行本「アクチュエータ工学」⁽⁴¹⁾、2011年に専門家向けの「アクチュエータ研究開発の最前線」⁽⁴²⁾を出版した。

日本油空圧学会(現日本フルードパワーシステム学会)から日本音響学会まで様々な学会に散らばっていたアクチュエータ研究者を結集して、科学研究費補助金特定領域研究 438「ブレイクスルーを生み出す次世代アクチュエータ研究」(領域代表者樋口俊郎(東大))(2004-2009)が行われ、アクチュエータの研究が一気に加速した。研究成果は単行本で出版されている⁽⁴³⁾。

電気学会産業応用部門でも2002年4月にリニアドライブ技術委員会の傘下に多次元ドライブシステム調査専門委員会を設置し、以後現在まで調査専門委員会による調査・啓蒙活動が継続して行われている。すでに球面モータに関連する調査報告書が4冊刊行された⁽⁴⁴⁾⁽⁴⁷⁾。2015年には電気学会技術報告「多自由度新世代アクチュエータの性能評価」および“Multi-Degree-of-Freedom Actuator”(Springer)の出版が予定されている。

この頃から国内外の研究講演会で多自由度アクチュエータ関連のオーガナイズドセッションが組まれるようになってきた。

国際会議ではICRA, IROS, Speedam, LDIA, ICEM, ISEFなど、国内ではSEAD, MAGDA, 電気学会, 日本機械学会, 日本AEM学会, 日本ロボット学会などで多様な企画が行われ、さまざまな構造のアクチュエータの研究発表が行われている⁽⁴⁸⁾。

2.3 2010年代

関係者の努力により球面モータが認知されるようになってきた。幅広いアプリケーションへの応用が考えられるようになってきた。球面モータを展示会や研究所公開日に出版すると、訪問された方から具体的な応用の提案をいただく機会が増えてきた。技術相談や研究室見学、講演依頼などの問い合わせや、具体的な応用を目指した共同研究の問い合わせも増えてきた。

アプリケーションを明確に設定した研究開発が行われるようになった。

(a) 産業応用

矢野らは球面ステッピングモータをウエハステージの歳差運動駆動および検査装置のレーザ光反射ミラーの駆動に使用するウエハ全自動検査装置の提案を行った⁽⁴⁹⁾。

電気自動車の車輪を球面モータで構成すると、切り返し操作を行わずに直接車体を横方向に移動させることや、その場で車体の向きを変えることができる。球面車輪の回転軸を傾げるだけで車の進行方向を変えることができるのでステアリング機構が不要になる。出力が小さくても、小回りが必要なフォークリフトや、地域コミュニタ

一の用途に利用できる。

Georgia工科大学のLeeらは電気自動車の車輪駆動を想定して、高速で回転するアクチュエータの回転軸方向をオープンループで制御する球面車輪リラクタンスマータを試作した⁽⁵⁰⁾。回転子に上下2段16個の突極を、固定子に上下2段20個の電機子巻線を配置し、突極と電機子巻線のそれぞれに働く電磁力を計算してモータの制御を行っている。Leeらは回転子の突極を永久磁石に置き換えて、工作機械用の球面駆動ステージも試作している。設計から性能測定までを詳細にまとめた単行本を出版している⁽⁵¹⁾。

Hanyang大学のChoらも電気自動車用球面モータを試作している。ステータの上段と下段に60deg間隔で6極の電機子巻線を配置し、ロータは出力軸回りに90deg間隔でN極とS極の永久磁石を交互に配置している⁽⁵²⁾。

Southern Scientific Centre of Russian Academy of ScienceのKochubeyらは電気自動車車輪駆動用球面誘導モータの駆動特性を解析している⁽⁵³⁾。ステータ内径0.7m、ロータ外径0.6mとして、車軸回りですべり0.05のときに1200Nmのトルクが得られるとしている。

東北学院大学の熊谷は、3台のモータで球面車輪を摩擦駆動する機構の駆動部をリニア誘導モータの駆動部に置き換えた球面誘導モータを試作している⁽⁵⁴⁾。可動子の姿勢検出にマウスのセンサを3個使用している。直径246mmの可動子を300rpmで駆動でき、出力トルクは4Nmである。任意の軸回りの回転と任意の姿勢における静止保持が可能である。

(b) ロボット

大阪大学の平田らは、ロボットの関節駆動用球面モータの仕様を直径90mm、出力トルク2Nm、可動範囲-25deg-25degと定め、多様な構造の球面モータを試作している⁽⁵⁵⁾。電磁場・モーション連成解析による最適設計を行い、試作実験でその設計どおりの特性が得られたことを確かめる手法により開発を効率的に行っている。

(c) センサ

Darmstadt大学を中心とするグループがNASAとの共同開発により、ボーイング747に搭載し成層圏で観測する大型赤外線望遠鏡の光軸を3方向にトラッキングする球面モータを開発している⁽⁵⁶⁾。

矢野らは非接触三次元座標計測装置に用いるレーザ追尾システムのレーザ光反射ミラーの球面駆動に球面アクチュエータを採用し、対象物体を追尾しながらミラー中心から対象物体までの距離をサブミクロンの精度で測定することに成功している⁽⁵⁷⁾。

(d) 宇宙

Swiss Center for Electronics and Microtechnology社

の Onillon らは宇宙船の姿勢制御用リアクションスフェアを開発した⁽⁵⁸⁾。質量 14.1kg, 入力電力 70w で最高回転数 6000rpm, 最大トルク 6Nm, 角運動量 27Nms である。

(e) 医療福祉

慶応大学の前野は、共振振動の異なる圧電素子を組み合わせてロータを 3 軸周りに回転させる小型球面アクチュエータを試作し、グリップの付け根が球面運動する能動鉗子の駆動に応用した⁽⁵⁹⁾。

東京農工大の遠山は超音波アクチュエータの保持・駆動トルクの大きさを生かしてロボットの関節駆動用超音波球面アクチュエータを開発した⁽⁶⁰⁾。

東京農工大の森島らは心筋細胞の増殖をコントロールすることにより自在の形状に作成可能な技術を用いて、バイオアクチュエータ型多自由度アクチュエータを試作した⁽⁶¹⁾。化学エネルギーだけで駆動し、かつ細胞自体を部品としているので微小構造物や流体の駆動といった力学的機能の集積化が可能になる。これらの特長を活かした人工臓器の実現を目指しており、世界初の心筋細胞駆動マイクロポンプの試作に成功している。

岡山大学の脇元らは、大腸内視鏡を能動駆動する多自由度ラバーアクチュエータを開発している⁽⁶²⁾。

岡山大学の五福らは、球面モータの可動子を中空構造にした攪拌機を試作した⁽⁶³⁾。

(f) マイクロアクチュエータ

小型アクチュエータの分野では、電磁型以外の駆動原理による球面アクチュエータが活発に研究されている。

超音波球面モータ⁽⁶⁴⁾⁽⁶⁵⁾、磁歪球面アクチュエータ⁽⁶⁶⁾、機能性流体多自由度アクチュエータ⁽⁶⁷⁾などが幅広く研究されている。

3. 球面モータ研究の将来展開

本節では、矢野らの研究の現状報告と目的について述べ、球面モータの将来を展望する。はじめに、矢野が提案した、多面体にもとづく球面モータの構造と駆動原理を簡潔に述べる⁽⁶⁸⁾。

3.1 多面体にもとづく球面モータ

図 1(a) に回転モータの基本となる構造を示す。回転子に永久磁石を N 極と S 極が隣りあうように 4 個、固定子に電機子巻線を 3 個配置する。電流を流す電機子巻線を切り替えることにより回転子を回転させることができる。回転子の 4 個の永久磁石、固定子の 3 個の電機子巻線は、それぞれ正方形と正三角形の頂点に位置しているのでこれを図 1(b) のように簡略化する。

図 1(b) を三次元空間に拡張すると可動子は正六面体、固定子は正八面体となり図 2 を得る。

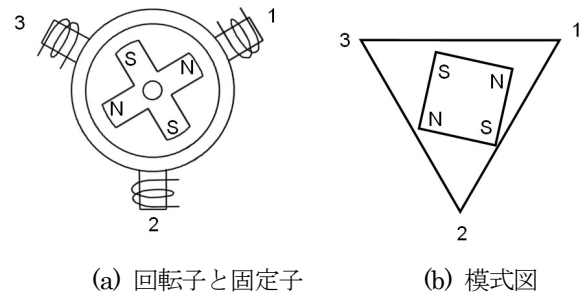


図 1. 回転モータの基本構造

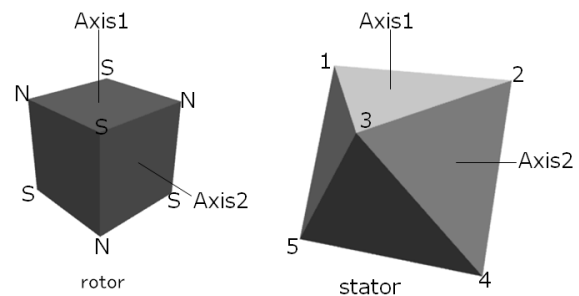


図 2. 球面モータの模式図

図 2 を AXIS1 方向から見た投影図も AXIS2 方向から見た投影図も図 1(b) と同じになる。したがって、1 軸モータの制御電流を図 2 の固定子の電機子巻線 1,2,3 に順番に流すと可動子が AXIS1 回りに、電機子巻線 2,3,4 に順番に流すと可動子が AXIS2 回りに回転する。

投影図が図 1(b) と同じになる軸はもう一つある。したがって、このモータは可動子を 3 方向の軸回りに回転させることができる。

電機子巻線 1,2,3 と 4,5,6 に同時に電流を流せば出力トルクが 2 倍になる。ドライバは通常の回転モータのドライバに電機子巻線の組合せを切り替えるスイッチを接続すれば良い。3 軸回りの駆動特性は同一になる。PID 制御やマイクロステップ駆動など通常のモータの制御がそのまま使用できる。エアギャップや磁路形成が 1 軸モータと同じなら出力特性は 1 軸モータと同じになる。

正多面体は 5 種類、半正多面体は変形多面体を除くと 11 種類存在する。これらの多面体の組み合わせでも球面モータを構成できる。矢野らは、可動子が切頂八面体、固定子が正十二面体を基本とする球面モータの試作・実験も行っている⁽⁶⁹⁾。

3.2 多面体にもとづく球面駆動システム

球面モータの駆動原理の実証実験は比較的簡単に行える。いっぽう、実用的な球面モータを設計・試作するには、以下の要素技術の開発が必要になる。

(a) 設計・解析ツール

電磁場・モーション連成解析ソフトウェアの性能が向上し、通常のモータは与えられた仕様に対してシミュレーションで最適設計が行える。球面モータの最適設計には 3 次元空間における電磁場・モーション連成解析が必要であるが、現状ではまだ難しい。

(b) 支持機構

1 軸モータのように出力軸をベアリングでがっちり固定することができないので、球面モータに適した可動子の支持機構の開発が必要になる。可動子を球体にして 3 個の球体ベアリングで支持する方法、空気圧（動圧、静圧）や磁気浮上による支持、ジンバル機構による支持、すべり面を低摩擦にしたすべり面支持、転がり軸受が提案されている。

(c) センサ

可動子の姿勢や出力トルクを検出する。1 軸モータ用のエンコーダやトルクセンサは、ジンバル支持の場合のみ使用できる。マウスの検出部を用いた姿勢センサ、CCD カメラを用いた姿勢センサ、ホール素子を用いた姿勢センサ、電機子電流を利用した姿勢センサが提案されている。トルクセンサの提案は行われていない。

(d) 制御

センサ信号を用いたフィードバック制御を行うには、1 次元の制御理論を 3 次元空間に拡張する必要がある。

(e) 減速機

1 軸モータをロボットの関節駆動など高トルクを必要とする用途に用いるには高減速比の減速機が必須である。球面モータは 1 軸モータの特性を超えられない以上、高トルクを必要とする用途では減速機の開発が必須になる。

(f) 評価装置

姿勢制御誤差、速度トルク特性など 1 軸モータの特性

に加えて駆動方向の干渉度など、多自由度システム特有の評価項目を測定する装置が必須になる。

矢野らは、これら要素技術の開発にも多面体幾何学が応用できることに着目し、球面駆動システムの研究開発を通して多面体幾何学を基礎とした新たな学問体系を構築すること、および従来のモータ理論を 3 次元空間に拡張して体系化することを目的に研究を進めている。多面体幾何学と球面駆動システムの関係を図 3 に示す。

3.3 多面体にもとづく球面駆動システムの開発状況

矢野らが開発してきた球面モータの論文をまとめ、球面モータ理論の体系化をおこなった⁽⁷⁰⁾。

設計・開発ツールに電磁場・モーション連成解析ソフトウェア MAGNET7 を採用し、シミュレーション結果と実験結果の誤差が生じる要因を追求している⁽⁷¹⁾。

支持機構は空気浮上、磁気浮上、球体ベアリングの試作実験を行った結果、可動子のフィードバック制御を行う場合、支持機構と可動子の間に摩擦がある方が早く安定するため、現状では球体ベアリングを使用して駆動実験を行っている。

センサはマウスを 2 台使用した可動子の姿勢センサ⁽⁷²⁾、ホール素子を使用した絶対姿勢センサ⁽⁷³⁾、画像処理によるセンサ⁽⁷⁴⁾を試作した。

試作したセンサを使用してフィードバック制御による可動子の位置決め実験を行っている⁽⁷⁵⁾。可動子の目標姿勢と現在姿勢の誤差を用いて 3 次元に拡張した PID 制御を行い、可動子の 3 軸回りの姿勢制御に成功している。

減速機は、可動子の回転を 3 個の小球を介して出力球に伝達する装置を試作して、可動子の回転方向と出力トルクに対する出力球の回転方向と出力トルクの関係測定している。本年度は球面駆動システムの評価装置を組み上げる予定になっている。

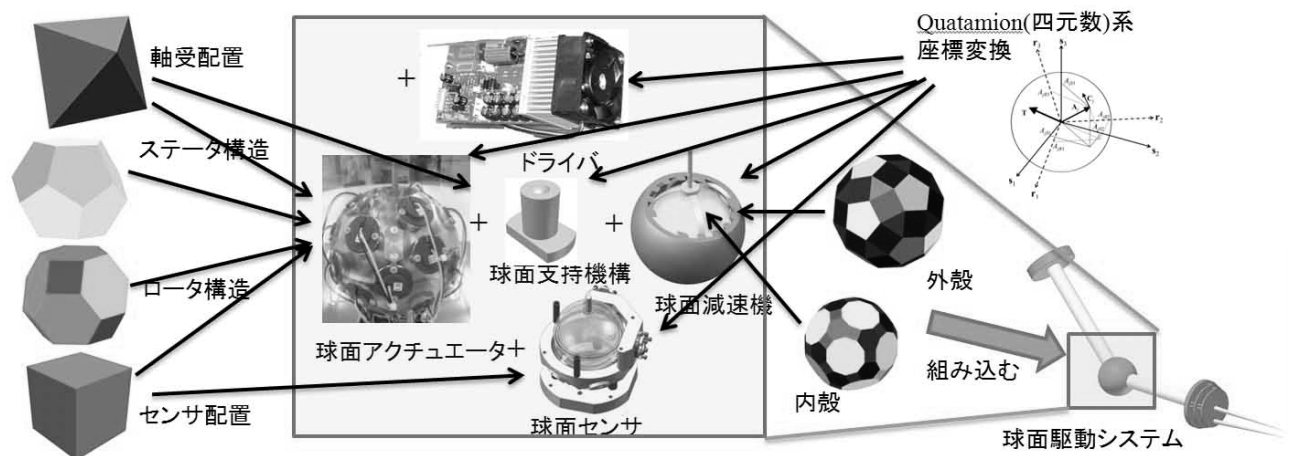


図 3. 科研費基盤 A 24246032 「多面体幾何学にもとづく球面駆動システムの研究」(2012.4-2016.3)の概念

3.4 将来展望

1自由度モータと同等の性能の球面モータは、1自由度モータと比較して以下の特長を有している。

- (a) 多自由度システムを小型・軽量化する
- (b) 多自由度システムの制御を容易にする
- (c) 位置決め誤差が少なく、超高精度化が可能
- (d) 限られた空間で多自由度をダイレクト駆動できる
- (e) 多自由度システムのマイクロ化が容易

球面モータは原理的には1自由度モータと同等の性能が出るが、工作精度や組み付け精度を高めるのが困難で、磁気回路の構成も難しく、試作品の出力は一桁少ないのが現状である。

DARPA のロボットチャレンジ開催、Google のロボット分野への参画、安倍総理のロボット革命発言と、ロボットを取り巻く環境が激変している。ものづくりの分野では3Dプリンタが注目され、国家プロジェクトが走り始めた。医療機器開発も活発になってきている。これらの機器はいずれも球面モータの有力な応用先である。もちろん家電製品、自動車関連機器、工作機械、宇宙関連機器も有力な応用先である。

環境分野では2015年初頭に予定されているIPCCの第5次最終報告書発表を待たずに、IPCCから地球温暖化ガスの排出量の大幅な削減と回収を直ちに行わないと未来が壊滅的になるという非常に厳しい将来予測と警告がなされている。

モータを複数台使用しているシステムのほとんどはモータを球面モータに置き換えることが可能である。日本の電力消費の50%以上をモータが消費している。球面モータが普及すれば、多自由度システムに使用するモータの台数が大幅に減り、地球温暖化ガス削減に貢献する。

このように、1自由度モータと同等の性能の球面駆動システムの開発が強く望まれている。支持機構をはじめとする要素技術の開発は順調に進んでいる。圧電、磁歪、機能性流体などの新原理アクチュエータの開発も活発に行われており、球面駆動に拡張可能である。

一刻も早い実用化を目指してひきつづき高性能球面モータの開発を進めていく所存である。

6. まとめ

球面モータ開発の初期から現在の状況を概観し、矢野らの研究の現状と目標、将来について述べた。

球面モータの研究は、電気機器の理論体系を3次元空間に拡張し体系化するという学術的側面と、広く普及すれば機器の高性能化と省エネルギー・省資源を同時に達成するという工業的側面を併せ持っている。

本報告の読者の、研究への参画を期待している。

謝辞

本研究の一部は、文部科学省科学研究費基盤研究(A)24246032“多面体幾何学にもとづく球面駆動システムの研究”の助成を受けて行った。ここに謝意を表す。

参考文献

- (1) 文部科学省特定領域研究 438 ブレイクスルーを生み出す次世代アクチュエータ研究, 研究概要 <http://yokota-www.pi.titech.ac.jp/Acto%20Files/Actuator-index.html>.
- (2) 樋口俊郎, “次世代ニューアクチュエータの展望”, 日本ロボット学会誌, 21巻, 7号, (2003), pp.698-701
- (3) Yano, T. and Kaneko, K., “Basic Consideration of Actuators with Multi DOF Having an Identical Center of Rotation”, J. Robotics and Mechatronics, Vol.7, No.6, (1995), pp.458-466
- (4) Rosheim, “Wrist Tendon Actuator”, U.S. Patent 4804220, (1989)
- (5) Kimura et al., “Wrist Mechanism for Industrial Robot”, U.S. Patent 4594918, (1986)
- (6) Miles, “Electrical Machines and Apparatus for Rotation Around Multiple Axes”, U.S. Patent 4719381, (1988)
- (7) Vachtsevanos, G. et al, “Spherical Motor Particularly Adapted for Robotics”, U.S. Patent 4739241, (1988)
- (8) Foggia et al, “Electro-Mechanical Converter with Several Degrees of Freedom”, U.S. Patent 4634889, (1987)
- (9) Do Mau Lam., “Dispositif D'orientation sans frottements solides, et application a un vehicule spatia”, 仏特許 2535479, (1982)
- (10) “球面モータ”, 特開昭 59-162763, (1984)
- (11) “球面パルスモータ”, 特開昭 59-222069, (1984)
- (12) “スパイラルパルスモータ”, 特開昭 59-222070, (1984)
- (13) “球面双ステップリング”, 特開昭 56-28460, (1981)
- (14) “位置定め装置”, 特開昭 56-28093, (1981)
- (15) “ステッピング・モータ”, 特開昭 59-17860, (1984)
- (16) “球面モータ”, 特開昭 59-162762, (1984)
- (17) “3次元モータ”, 特許 1946377号, (1984)
- (18) “3自由度直流モータ”, 特許 2005224号, (1985)
- (19) “3軸駆動ユニット”, 特許 1685370号, (1985)
- (20) “3次元モータの回転磁界発生装置”, 特許 2587217号, (1986)
- (21) “3次元モータの回転磁界発生装置”, 特許 2611180

- 号, (1994)
- (22) 矢野智昭, “多自由度アクチュエータ”, 日本ロボット学会誌, Vol.15, No.3, (1997), pp.330-333
- (23) Kaneko, K.Yamada,I. and Itao,K, “A Spherical DC Servo Motor With Three Degrees of Freedom”, Trans. ASME Dynamic Systems, Measurement, and Control,(1989), pp.398-402
- (24) Lee,K.M. and Kwan,C.K., “Design Concept : Development of a Spherical Stepper for Robotic Applications”, IEEE Trans. R and A, Vol.7, No.1, (1991), pp.175-181
- (25) Gosselin,C.M. and Hamel,J.F., “The agile eye: a high-performance three degrees of freedom camera-orienting device”, Proc. IEEE ICRA,(1994), pp.781-786
- (26) 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, (1993),pp.107-114
- (27) Yano,T. Kaneko, M. and Sonoda, M., “Development of a synchronous motor with three degrees of freedom”, Theory and Practice of Robots and Manipulators, Springer - Verlag, (1995), pp.275-280
- (28) Tsuda,M., Higuchi,T. and Fujiwara,S., “Magnetic Levitation Servo for Flexible Assembly Automation”, J.Robotics Research, Vol.11, No.4, (1992), pp.329-345
- (29) Hollis,R.L.,Salcudean,S.E. and Allan,A.P., “A Six-Degree-of-Freedom Magnetically Levitate Variable Compliance Fine-Motion Wrist:Design, Modeling, and Control”, IEEE Trans. R and A, Vol.7, No.3,(1991), pp.320-332
- (30) Roth,R.B. and Lee,K.M., “Design Optimization of a Three Degrees-of-Freedom Variable-Reluctance Spherical Wrist Motor”, ASME J. Engineering for Industry, Vol.117,(1995),pp.378-388
- (31) 矢野智昭, 前野隆司, “球面モータ”, 日本ロボット学会誌, Vol.21, No.7, (2003), pp.740-743
- (32) Stein,D. Chirikjian,G.S., “Experiments in the Communication and Motion Planning of a Spherical Stepper Motor”, Proc. ASME 2000 Design Engineering Technical Conf. and Computer and Information in Engineering Conf., DET00/MECH-14115, (2000),pp.1-7
- (33) Kahlen, K. and Doncker, R. W., “Current regulators for multiple-phase permanent magnet spherical machines”, Proc. IEEE Industrial Application, (2000),pp.2011-2015
- (34) 田中飛鳥, 和多田雅哉, 鳥居肅, 海老原大樹, “多自由度アクチュエータの提案と設計”, 第 11 回 MAGDA コンファレンス講演論文集, (2002), pp.169-172
- (35) Dehez,B., Grenier,D. and Raucent,B., “Two Degree of Freedom Spherical Actuator for Omnimobile ROBOT”, Proc. IEEE ICRA,(2002), pp.2381-2386
- (36) Yano,T. and Suzuki,T., “Basic Characteristics of the Small Spherical Stepping Motor”, Proc.IEEE IROS, (2002),pp.1980-1985
- (37) 矢野智昭, “多自由度アクチュエータ”, 日本 AEM 学会誌,Vol.4,No.2,(2006),pp.197-202
- (38) 矢野智昭, “多自由度アクチュエータ”, 電気学会誌,Vol.127,No.5,(2007),pp.294-296
- (39) 矢野智昭, “球面電磁モータ”, 日本機械学会誌,Vol.111,No.1072,(2008),pp.190-191
- (40) 矢野智昭, “多自由度アクチュエータ”, 精密工学会誌,Vol.77,No.9,(2011),pp.836-839
- (41) アクチュエータシステム技術企画委員会, “アクチュエータ工学”, 養賢堂, (2004)
- (42) 樋口俊郎, 大岡昌博監修, “アクチュエータ研究開発の最前線”, 株式会社エヌ・ティー・エス, (2011)
- (43) Editor: Higuchi, T., Suzumori,K.,Tadokoro,S., “Next- Generation Actuators Leading Breakthroughs”, Springer, (2010)
- (44) 多次元ドライブシステム調査専門委員会, “多次元ドライブシステムの可能性を探る”, 電気学会技術報告,Vol.1029,(2005)
- (45) 多自由度モータとその要素技術調査専門委員会, “多自由度モータとその要素技術”, 電気学会技術報告,Vol.1081,(2007)
- (46) 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”, 電気学会技術報告,Vol.1140,(2008)
- (47) 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”, 電気学会技術報告, Vol.1265,(2012)
- (48) 研究関連講演会一覧
<https://staff.aist.go.jp/t.yano/data/conference/conf2014.html>
- (49) “基板検査装置およびそのシステム”,特許 3641688号, (1995)
- (50) Lee,K.M. and Joni,J., “Concept Development and

- Design of a Spherical Wheel Motor (SWM)", Proc. IEEE ICRA,(2005), pp.3663-3668
- (51) Yan,L., Chen,I.M., Lim,C.K., Yang,G., and Lee, K.M., "Design, Modeling and Experiments of 3-DOF Electromagnetic Spherical Actuators (Mechanisms and Machine Science)",Springer, (2011)
- (52) Cho,C., Kang,D., Kim,S.,Won,S.,Lee,J., et.al., "Using Mechanical Method of Torque Simulation for Reducing Calculation Time of Permanent Magnet Spherical Wheel Motor", Proc.ICEM, (2008), pp.3112-3115
- (53) Kochubey,T., and Zentner,J., "Investigation of Active Spherical Wheels based on Induction Motor Principle", Proc LDIA'11, (2011),pp.LIM15-1-6
- (54) Kumagai,M., and Hollis,R.L., " Development and Control of a Three DOF Spherical Induction Motor",Proc.IEEE ICRA,(2013),pp.1520-1525
- (55) 平田勝弘, "大阪大学の球面アクチュエータ",次世代アクチュエータ原理と設計法", 科学技術出版株式会社, (2013), pp.114-151
- (56) Anders,M., Binder,A. and Suess,M., "A Spherical Linear Motor as Direct Drive of an Airborne Optical Infrared Telescope", Proc. LDIA, Vol.1,(2005), pp.528-531
- (57) 矢野智昭, 高辻利之, 大澤尊光, 鈴木健生, 本村洋一, 板部忠喜, "サブミクロンの測定精度を有する小型2軸球面モータ型レーザ追尾距離測定装置の開発", 電気学会論文誌E, Vol.126, No.4,(2006), pp.144-149
- (58) Onillon,E., Chetelat,O., Rossini,L., Lisowski,L., Droz,S., and Moerschell,J., "Reaction Sphere for Attitude Control", Proc.European Space Mechanisms and Tribology Symposium, (2009)
- (59) Park,S.,Takemura,K.,Maeno,T., "Development of Multi-DOF Actuator for Surgical Tools", Proc.ICENCE,(2003), pp.3039-3046
- (60) 深谷直樹, 和田博, 菊地保広, 古屋信幸, 遠山茂樹, "超音波モータを用いた人工の腕の開発", ライフサポート, Vol.12,No.4, (2000),pp.131-136
- (61) Morishima, K., Tanaka, Y., Shimizu,T., Yamato, M., Kikuchi,A., Okano, T., and Kitamori,T., "Bio-Actuated Micro pump Using Cardiomyocytes Sheet", Proc. NGALB,(2006), pp.71-74
- (62) 脇元修一, 尾崎健, 鈴森康一, "大腸内視鏡挿入支援を目指したラバーチューブアクチュエータの設計と基礎駆動特性", 日本ロボット学会誌,Vol. 29, No.7, (2011),pp. 619-625
- (63) Shan,W., Gohuku,A., Shibata,M., Yano,T., and Kamegawa,T. "A Stirrer Driven by a Spherical Stepping Motor", Electrical Review Journal, Vol.2012, No.6, (2012),pp.48-51
- (64) Lu,B., Aoyagi,M., Takano,T., and Tamura,H., "Examination of Sandwich-Type Multidegree-of-Freedom Spherical Ultrasonic Motor", J. Applied Physics, Vol.49,(2010), pp.07HE24-1-07HE24-7
- (65) 高橋博, 西村修, 額田秀記, "3 自由度球面圧電モータの開発",精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (2008),pp.929-930
- (66) 上野敏幸, 坂本龍介, 山田外史, "磁歪材料を用いた3軸球面モータの特性評価", 日本AEM学会誌, Vol.20, No.1,(2012), pp.181-186
- (67) 吉田和弘, 山本悟史, 嚴祥仁, 横田眞一, "高周波交流圧力源を用いた多自由度マイクロアクチュエータシステムの開発", 日本機械学会機素潤滑設計部門講演会講演論文集,(2014),pp.135-136
- (68) Yano,T., "Proposal of polyhedron based spherical stepping motors", Proc.SPEEDAM,(2008), pp.1433-1438
- (69) Sasaki,R., Gofuku,A., Yano,T., Wada,Y., and Shibata,M., "Rotation control of a 14-12 spherical stepping motor", Proc. MAGDA ,(2011), pp.42-47
- (70) 矢野智昭, "球面電磁モータの構造に関する研究", 学位論文,東京大学,(2012)
- (71) Adachi K., Gofuku A., and Yano T., "Simulation of rotation behavior of a 14-12 spherical motor", Proc. Speedam,(2014)
- (72) Yano,T., Kasashima,N., and Ashida,K., "Development of a posture sensor for the spherical motor", J. JSAEM,Vol.21, No.3,(2013),pp.458-463
- (73) 横家大貴, 五福明夫, 矢野智昭, 笠島永吉, "電磁駆動式球面モータの姿勢計測評価",SEAD26 講演論文集, (2014)
- (74) 笠島永吉, 芦田極, 矢野智昭, "電磁球面モータの開発(第4報)-電磁石の多極化手法とロータ画像モニタリング法について-", 精密工学会春季大会講演論文集, (2014)
- (75) 笠島永吉, 矢野智昭, 芦田極, "球面モータの開発(第2報:ロータの姿勢検出とフィードバック制御)", 日本機械学会論文集,Vol.80,No.809,(2014),pp.1-19