

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 3 日現在

機関番号：34419

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24246032

研究課題名(和文)多面体幾何学にもとづく球面駆動システムの研究

研究課題名(英文)Spherical Drive System based on the Polyhedron Geometry

研究代表者

矢野 智昭 (YANO, Tomoaki)

近畿大学・次世代基盤技術研究所・特任教授

研究者番号：90358218

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 35,400,000円

研究成果の概要(和文)：多面体幾何学にもとづいて球面モータの制御理論を構築し、一般的な電機機械システムの設計・解析・制御理論に展開した。トルクや材料特性をスカラー量としているモータの設計・解析・制御理論3次元ベクトル空間に拡張した。球面センサ、球面支持機構、球面減速機を多面体幾何学にもとづいて設計・試作し、球面アクチュエータと組み合わせて球面駆動システムを構築し、基礎実験により理論を検証した。球面駆動システム評価装置を用いて球面駆動システムの駆動特性を測定し、回転ベクトルの次元縮退現象など平面の1次元減速機では考えられなかった新しい現象を発見した。

研究成果の概要(英文)：A spherical motor control theory is developed based on the polyhedron geometry. And extend the theory to the design, analysis, and control theory of the conventional electromechanical systems. Extend the conventional motor design, analysis, and control theory which handles the torque and material characteristics as the scalar quantity into the three dimensional vector space. Based on the polyhedron geometry, spherical posture sensor, spherical rotor support mechanism, and spherical speed reducer are designed and developed. A spherical drive system is developed and the developed control theories are demonstrated by the basic experiments. Developed spherical drive system performances are tested by the developed spherical drive system test bed. A novel phenomenon, for example, motion vector degeneration is observed, which is not observed through the test of one degree-of-freedom speed reducer.

研究分野：アクチュエータ工学

キーワード：機械要素 アクチュエータ 球面 球対称 幾何学 球面減速機 姿勢センサ

1. 研究開始当初の背景

1台で人間の手首のような動きを実現する球面アクチュエータが実用化すれば従来のモータ3台を1台の球面アクチュエータで置き換えることができる。したがって、多自由度システムの小型・軽量化、省資源・省エネルギー化、誤差の減少による高精度化が実現する。

球面モータが実用化すればロボットをはじめとする多自由度システムの設計法に革命をもたらすため、研究開発当初、国内外で超音波をはじめとする様々な構造の球面アクチュエータが研究されはじめていた。いっぽう、これらのアクチュエータのほとんどが、駆動原理の提案と検証が行われている段階であり、実用化に向けて解決すべき課題が山積していた。

球面アクチュエータの研究は駆動原理の提案とその実証に重点が置かれており、球面センサや球面支持機構の研究はほとんど行われていなかった。

球面アクチュエータの駆動原理の提案では、球体を緯度経度により四角形的に分割する考えでは球面モータの特性が駆動方向により異なり、特定の回転軸から外れて駆動すると急激に特性が劣化する。このため、多くの研究が行き詰まっていた。

課題提案者は、多面体幾何学を導入することにより、球面アクチュエータの構造を球対称にし、この行き詰まりを打開することに成功した。

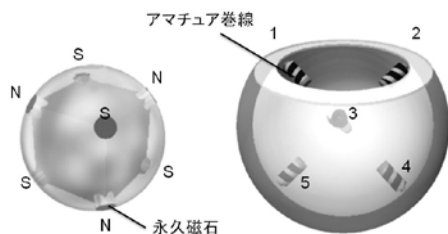


図1 球面モータのロータとステータ

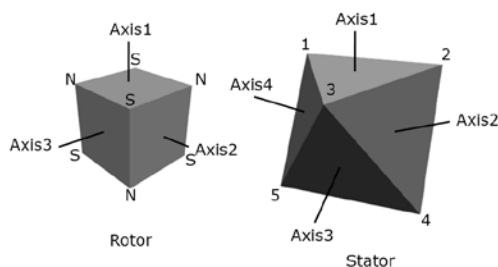


図2 模式図と回転軸

多面体幾何学にもとづく球面モータの構造の一例を示す。ロータに内接する正六面体の頂点に永久磁石、ステータに内接する正八面体の頂点にアマチュア巻線を配置する構造の球面モータを考える(図1)。図1の基本となる正六面体と正八面体を図2に

示す。図2をAxis1方向から見ると、ロータに内接する正方形の頂点に永久磁石、ステータに内接する正三角形の頂点にアマチュア巻線を配置した構造になっている。この構造は平面アクチュエータと同じであり、平面アクチュエータと同一の制御方法でアマチュア巻線1,2,3に電流を流すとロータをAxis1回りに制御できる。図2をAxis2方向から見てもロータに内接する正方形の頂点に永久磁石、ステータに内接する正三角形の頂点にアマチュア巻線を配置した構造になっており、アマチュア巻線2,4,3に電流を流すとロータをAxis2回りに制御できる。正六面体は3本、正八面体は4本の対称軸を有している(図2)。したがって、平面アクチュエータと同一の制御方法で、ロータを各対称軸回りに制御することができ、その特性は選んだ軸の組み合わせに関係なく同一になる。

正六面体にもとづいて構成したロータと正八面体にもとづいて構成したステータを組み合わせた球面モータを図3に示す。

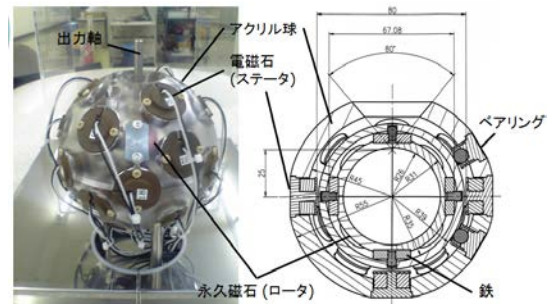


図3 正六面体と正八面体にもとづく球面モータ

2. 研究の目的

1台で人間の手首のような動きを実現する球面アクチュエータは、出力軸が一定方向から外れると急激に特性が劣化する問題を有していた。ロータおよびステータを多面体にもとづいて設計した球面アクチュエータは特性が球対称になり、上記の問題を解決した。多面体幾何学が多自由度システムの特性を対称に設計する鍵である。

本課題では、多面体幾何学にもとづいて球面センサ、球面支持機構、球面減速機を設計・試作し、球面アクチュエータと組合せて球面駆動システムを構築する。さらに、トルクや材料特性をスカラー量としている従来のモータの設計・解析・制御理論を3次元ベクトル空間に拡張する。

さらに、球面駆動システムの設計・解析・制御方法を分析し、多面体幾何学を、一般的な電機機械システムの設計・解析・制御理論に展開する方針を導く。

3. 研究の方法

以下の2項目の大きな研究目標を達成するモデルケースとして球面駆動システムを組

み上げる。

(1) 多面体幾何学を、一般的な電機機械システムの設計・解析・制御理論に展開する。

(2) トルクや材料特性をスカラー量としているモータの設計・解析・制御理論を3次元ベクトル空間に拡張する。

多面体幾何学を基本とする構造の球面センサ、球面支持機構、球面減速機を設計・試作し、球面アクチュエータと組み合わせて球面駆動システムを構築する。従来のモータの制御理論を球面駆動システムの制御理論に拡張し、球面駆動システムの性能評価実験で評価する。各構成要素の設計・試作段階において多面体幾何学を設計に応用した過程および従来のモータの設計・解析・制御理論を3次元ベクトル空間に拡張した過程を分析・評価し、汎用化する。

研究目標を達成するモデルケースとして、球面センサ、球面支持機構、および球面減速機を設計・試作し、球面アクチュエータと組合せて、最終的に球面駆動システムを構築する。球面駆動システムと多面体幾何学および理論構築の関連を図4に示す。

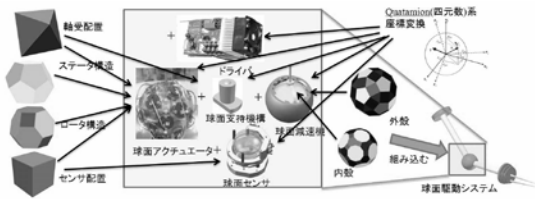


図4 多面体幾何学の球面駆動システム要素開発への応用例

#### 4. 研究成果

(1) 多面体幾何学を、一般的な電機機械システムの設計・解析・制御理論に展開する。

図3に示したように、球面駆動システムの構成要素であるセンサ、支持機構、減速機の構造を設計するにあたり、センサ、支持機構、および減速機のパーツ配置を多面体幾何学にもとづいて行くとその特性を球対称にでき、全方向の特性を同一にすることができる。

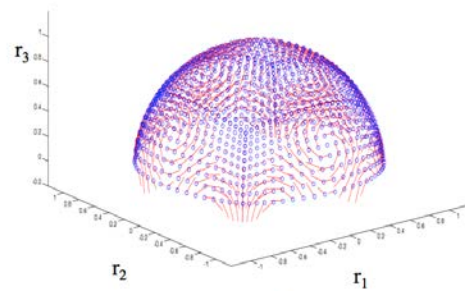
この基本的な考えにもとづいて各構成要素を設計・試作・評価し、特性が球対称になることを確認した。

(2) トルクや材料特性をスカラー量としているモータの設計・解析・制御理論を3次元ベクトル空間に拡張する。

球面モータのロータ姿勢表現に3行3列の基底の取り替え行列を用いることにより、ワールド座標からステータ座標、ロータ座標、センサ座標、減速機の各球体座標への返還が容易に行えるようになり、トルクや材料特性を3次元空間内のベクトルならびにテンソル量として取り扱う理論体系の基礎を確立し

た。

これにより、ロータ座標系におけるアマチュア巻線の位置に対してロータに働くトルクベクトルを記述したトルクマップを作成するだけで、基底の取り替え行列を用いた座標変換によりロータの任意の姿勢に対して任意の方向で任意の大きさを持つトルクを発生するアマチュア電流の組み合わせを容易に計算できるようになった。トルクマップの例を図5に示す。



上半分表示

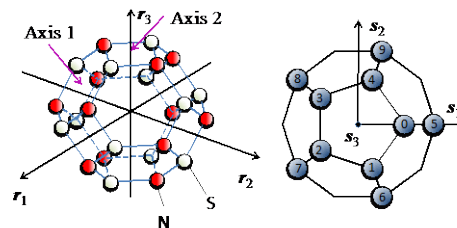
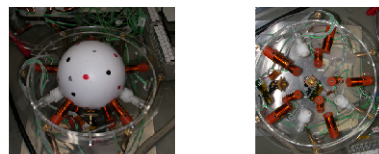
図5 球面モータのトルクマップの例

基底の取り替え行列を用いることで、位置フィードバック制御を正確に行えるようになった。本制御方式で3次元PID制御を行う電流値を求めたところ、各軸回りに個別にスカラー量の位置フィードバック制御を行う電流値が、大きな誤差に対しては適切ではなかったことが判明した。本課題で開発した3次元空間におけるPIDフィードバック制御は多自由度システムの正確なフィードバック制御法として適用可能である。

基底の取り替え行列を基本とする座標表現およびセンサ座標表現は矢野の学位論文、トルクマップにもとづく球面モータの制御方法は笠島の学位論文で体系づけられている。

#### (3) 球面モータの制御方法の研究

トルクマップを用いたセンサフィードバック制御により3次元空間内で自由に位置決めできることを確認した。



(a) Permanent magnets on the rotor (b) Electromagnets on the stator

図6 ロータが切頂八面体、ステータが正十二面体にもとづく球面モータ

ロータを位置決めするアマチュア電流の組み合わせは多数存在する。したがって、その中から最適なアマチュア電流の組み合わせを選定する最適化問題が重要になる。

本研究では線形計画法および電流ノルム最小法による電流最適化手法を提案し、それぞれの手法の評価を行った。

ロータが切頂八面体、ステータが正十二面体にもとづく構造の球面モータ(図 6)を用いて、垂直軸回りの回転に対して線形計画法と電流ノルム最小法によりアマチュア電流を決定した結果を図 7 に示す。

アマチュア電流の自乗和を比較すると線形計画法にもとづく電流 (lin. prog.) は、ノルム最小法にもとづく電流 (min. norm) より電流の自乗和が大きくなっていることがわかる。これより、ノルム最小法にもとづくアマチュア電流決定方法が電流の自乗和が少ない制御を行えることがわかる。

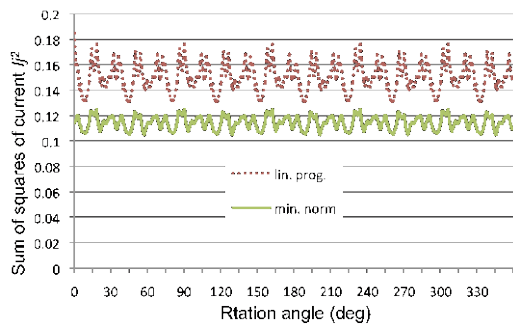


図 7 線形計画法とノルム最小法の比較

#### (4) 3次元姿勢センサ

マウスの光学センサを 2 個使用した姿勢センサ(図 8)、ホールセンサアレイを使用した姿勢センサ(図 9)、イメージセンサを用いた姿勢センサを開発し、性能試験を行った。



図 8 光学センサを使用した姿勢センサ

図 8 において 2 個の光学マウスのセンサをロータの中心に向かって配置し、それぞれの計測値からロータ姿勢を 3 行 3 列の基底の取り替え行列で表現する。これにより、ロータの目標姿勢との誤差を計算してフィードバック制御を行うことができた。

図 9 では 66 個のホール素子をロータの中心に向かって配置している。66 個のホール素子のうち 2 ないし 3 個がロータ上の永久磁石の磁束を検出する。磁束を検出したホール素子の位置情報からロータの姿勢を推定する

ことができる。

イメージセンサは、ロータ上に描画したマーカーを CCD カメラで読み取ってロータ姿勢を求める方法である。

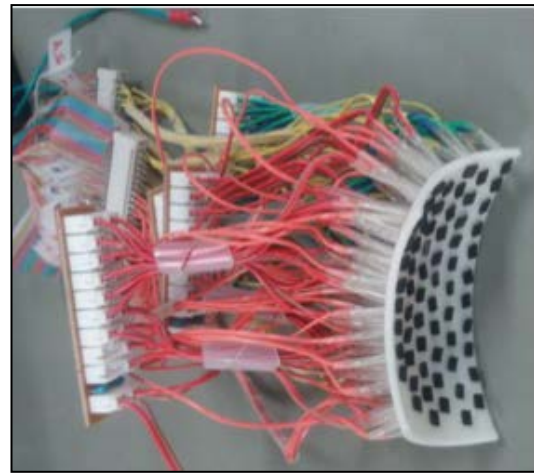


図 9 ホール素子アレイ姿勢センサ

実験の結果、各センサの位置分解能は 1deg であった。CCD カメラは、ロータの絶対姿勢を求めることができるが、ロータ姿勢を全く異なる姿勢と間違えることがある。光学センサは相対姿勢センサなので計測誤差が蓄積する。光学センサと CCD カメラの組み合わせ、もしくはホール素子センサアレイ単独による姿勢センサを構築できることがわかった。

#### (5) 球面減速機



図 10 球面減速機の原理モデル

電磁アクチュエータの出力トルクは入力電流に比例するため、高トルクモータは大電流を必要とする。したがって従来のモータを使用して高トルク駆動を行う場合、モータを高速回転させて減速機により回転を下げ、トルクを増幅している。ヒューマノイドロボットの肩関節は 70Nm 以上のトルクを必要とするが、質量 300g で減速比 120 倍の波動減速機を組み込むことでこれを達成している。

球面モータは駆動原理が電磁モータと同じなので出力トルク/質量比は 1 軸モータと同レベルが限界である。したがってヒューマノイドロボットの肩関節駆動では球面減速機が必要になる。

本研究課題では球面減速機の減速メカニズムを解明する目的で図 10 に示す球面減速機の原理モデルを試作し、減速メカニズムを解明した。

球面減速機は球面モータのロータに小球 3 個が接し、小球 3 個の上部に設置した出力球に小球を介して球面モータの運動とトルクが伝達される構造となっている。

球面減速機は減速比を 1:100 以上に設定するのが理想であるが、本研究では回転速度とトルクの伝達のしかたを解明する目的で減速比を大きく取る構造とはなっていない。

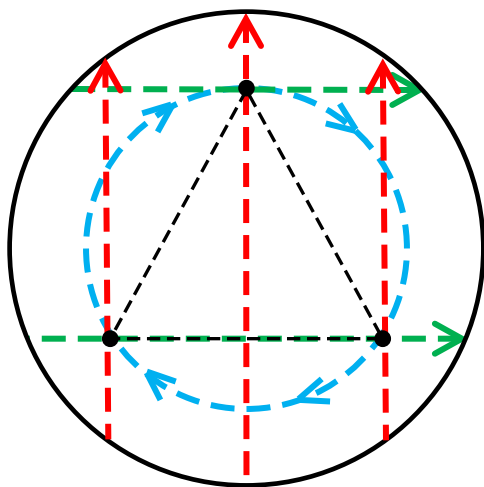


図 11 球面減速機の色度模式図

図 11 に球面減速機の色度模式図を示す。色度模式図は球面減速機を含む球面駆動システムを真上から見て投影した図式となっている。球面モータのロータおよび出力球の回転中心は図 11 の円の中心上にある。

内側の正三角形の頂点にある黒丸は球面モータのロータと小球が接する点を示している。それぞれの黒丸は小球と出力球が接する点とも一致している。

図 11 においてそれぞれの矢印はロータが矢印方向に回転した時のそれぞれの小球の回転方向と回転角速度を表している。

摩擦が均一の場合、出力球の角速度は各小

球の角速度の平均と考えると、右向き矢印を X 軸回り、上向き矢印を Y 軸回り、円形矢印を Z 軸回りの回転とすると、各軸回りの小球の角速度の平均の比は式(1)で表すことができる。

$$X : Y : Z = 29.87 : 29.97 : 18.84 \quad (1)$$

式(1)より、球面モータの回転方向により出力球の回転角速度が異なることがわかる。

ロータの回転角速度を横軸、出力球の回転角速度を縦軸に取った測定結果を図 12 に示す。

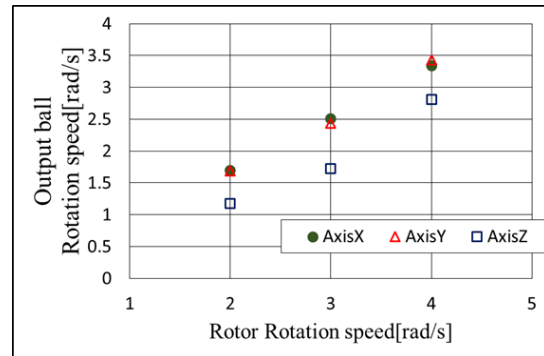


図 12 ロータ角速度に対する出力球の回転角速度

図 12 において X, Y, Z 軸周りの回転角速度の比は 30:30:20 であり、式(1)の理論値とよく一致している。

平面の摩擦車あるいは歯車の噛み合いでは回転角速度の比は半径比に反比例するが、球面減速機では駆動球と出力球の半径が等しい場合でも回転方向によって回転角速度が異なることがわかる。

球面減速機は特定の回転軸周りにはトルクが伝達しない場合があることもモデル解析から判明した。

球面減速機は拘束条件により駆動球の 3 次元方向の運動に対して出力球の運動方向が 2 次元に縮退する場合がある。

球面減速機は平面減速機から類推できない挙動を示すことがモデル解析と実験結果からわかってきた。

平面減速機は多様な構造が提案されているが、基本的な構造を 3 次元空間に拡張することが可能な構造が多い。また、多面体幾何学にもとづいた 3 次元方向の減速機の斬新な構造を新たに検討中である。

3 次元方向の減速機が実現すれば、ロボットの肩関節駆動に 3 個のモータと 3 台の減速機を使用していたところを 3 個のモータと 1 台の球面減速機、もしくは球面アクチュエータ 1 個と 1 台の球面減速機の使用で実現可能になる。

球面減速機は研究当初に考えていたより複雑で、実用技術としても科学的観点からも非常に斬新な研究テーマになることがわか

った。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 17 件)

①笠島永吉、矢野智昭、芦田極、球面モータの開発(第2報:ロータの姿勢性検出とフィードバック制御)、日本機械学会論文誌、80 巻 809 号、2014、pp.1-19、査読あり

②矢野智昭、笠島永吉、芦田極、Development of a posture sensor for the spherical motor、日本 AEM 学会誌、21 巻 3 号、2013、pp. 458-463、査読あり

③笠島永吉、矢野智昭、芦田極、球面モータの開発(任意姿勢における任意トルクの発生法)、日本機械学会論文誌 C、78 巻 792 号、2012、pp. 2860-2869、査読あり

[学会発表] (計 46 件)

①五福明夫、安達和輝、矢野智昭、A Simulation Study of Driving Technique of Electro-Magnets to Increase Rotation Torque of 14-12 Spherical Motor、10<sup>th</sup> International Symposium on Linear Drives for Industrial Applications、2015. 7. 28、Aachen, Germany

②大城戸優太、五福明夫、矢野智昭、球面モータにおける球面減速機構に関する研究、第 23 回 MAGDA コンファレンス in 高松、2014. 12. 5、サンポートホール高松(香川県高松市)

③笠島永吉、芦田極、矢野智昭、五福明夫、Posture monitoring method of multi-degree-of-freedom spherical motor by using image processing、9<sup>th</sup> International Workshop on Microfactory、2014. 10. 8、Oahu Island、U. S. A.

[図書] (計 4 件)

①矢野智昭他、電気学会、電気工学ハンドブック第 7 版、2013、2706(752-754)

②矢野智昭他、科学技術出版株式会社、新世代アクチュエータの原理と設計法、2013、282(66-114)

③矢野智昭他、電気学会、電気学会技術報告 1265号 新世代アクチュエータの多自由度化可能性、2013、69(3-4、9-11、67)

[産業財産権]

○出願状況 (計 2 件)

名称：球面モータの制御方法

発明者：笠島永吉、矢野智昭、芦田極

権利者：産総研

種類：特許

番号：特願 2013-039773

出願年月日：2013 年 2 月 28 日

国内外の別：国内

名称：MULTIPLE POLE SPHERICAL STEPPING MOTOR AND MULTIPLE POLE SPHERICAL AC SERVO MOTOR

発明者：Tomoaki YANO

権利者：AIST

種類：Patent

番号：13/813280

出願年月日：2013 年 5 月 23 日

国内外の別：国外(米国)

○取得状況 (計 1 件)

名称：MULTIPLE POLE SPHERICAL STEPPING MOTOR AND MULTIPLE POLE SPHERICAL AC SERVO MOTOR

発明者：Tomoaki YANO

権利者：AIST

種類：Patent

番号：9 1 7 8 3 9 3

取得年月日：2015 年 7 月 11 日

国内外の別：国外(米国)

[その他]

①矢野智昭学位論文「球面電磁モータの構造に関する研究」東京大学(工学) 217740 2012 年 10 月 18 日

②笠島永吉学位論文「電磁型球面モータの制御方法に関する研究」岡山大学(工学)15301 甲第 5152 号 2015 年 3 月 25 日

③球面モータの動画(YOUTUBE AIST CHANNEL)  
[https://www.youtube.com/watch?v=\\_HhkIEUoZws](https://www.youtube.com/watch?v=_HhkIEUoZws)

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

矢野 智昭 (YANO, Tomoaki)

近畿大学・次世代基盤技術研究所・特任教授

研究者番号：9 0 3 5 8 2 1 8

(2) 研究分担者

五福 明夫 (GOFUKU, Akio)

岡山大学・自然科学研究科・教授

研究者番号：2 0 1 7 0 4 7 5

(平成 25 年度から平成 27 年度)

笠島 永吉 (KASASHIMA, Nagayoshi)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・先進製造プロセス研究部門・主任研究員

研究者番号：4 0 3 5 6 7 6 2

芦田 極 (ASHIDA, Kiwamu)

独立行政法人産業技術総合研究所・先進製造プロセス研究部門・研究グループ長

研究者番号：1 0 3 5 6 3 6 3

(平成 24 年度から平成 25 年度)