

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 2 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2014～2016

課題番号：26289077

研究課題名（和文）球面関節アクチュエータを内蔵した人間型ロボットの研究

研究課題名（英文）Study on a spherical actuator for humanoid robots

研究代表者

平田 勝弘（HIRATA, Katsuhiko）

大阪大学・工学（系）研究科（研究院）・教授

研究者番号：00403139

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 12,400,000円

研究成果の概要（和文）：球面関節アクチュエータとしてアウトロータ型3自由度球面アクチュエータの開発を実施した。これまでは、3自由度球面アクチュエータのトルク特性を評価することは難しく、球面アクチュエータ同士の比較ができていなかった。しかし、トルクマップを用いて評価する手法を提案し、任意の可動子姿勢におけるトルクを評価できるようになった。さらに、3-RRRパラレルリンク機構を用いて、球面アクチュエータの実機のトルクマップを鎖交磁束から求める方法を提案し、有限要素解析から得られたトルクマップと良好に一致することを確認した。また、可動子位置センシング技術として、カラーセンサを用いた手法を開発した。

研究成果の概要（英文）：We developed a 3-degree-of-freedom (3-DOF) outer rotor type spherical actuator for spherical joints. It was difficult to evaluate the torque characteristics of the 3-DOF spherical actuator, and to compare among spherical actuators. In this research we developed an evaluation method using a torque map, and realized a torque evaluation at a given position. In addition, we proposed a method to create a torque map of a real machine using magnetic fluxes, and they showed a good agreement with a computed torque map. Finally, a position sensing method using color maps were developed.

研究分野：電磁アクチュエータ

キーワード：球面アクチュエータ

1. 研究開始当初の背景

産業用ロボットは、自動車・電子部品分野等の生産現場において溶接、組立や搬送といった様々な用途で広く活躍している。近年、これらの生産現場における製造過程の複雑化により、ロボットには多自由度の駆動が求められている。現在、一般に普及しているモータは、回転型モータとリニアモータであるが、これらはいずれも一自由度駆動を行うアクチュエータであるため、多自由度の動作ではこれらのモータを複数組み合わせることによって実現されている。そのため、構造の大型化や重量の増加、また変換メカニズムを介することによる位置決め精度の低下等の問題を抱えている。これらの問題を解決するために、一台で多自由度駆動が可能な多自由度アクチュエータが注目され、開発が進められている。多自由度アクチュエータの実現によって駆動機構が簡素化されることで、小型・軽量化が果たされるとともにこれまでの多自由度駆動システムでは両立することが難しかった位置制御と力制御の高速化が期待できる。

電磁力を利用した多自由度球面アクチュエータの開発は 1990 年代後半から盛んに行われるようになり、これまでに同期モータ、ステッピングモータや誘導モータの駆動原理を利用したアクチュエータが報告されている。特に、球面同期アクチュエータは任意軸周りにトルクを制御可能なトルク発生式が開発されており、その制御性の高さから多くの研究機関が注目し開発に取り組んでいる。

2. 研究の目的

球面アクチュエータは無数の姿勢を実現できる特長によって、網羅的な特性を検証することができず、局所的な姿勢のみでアクチュエータの特性を議論することとどまっている。このような背景から、各研究機関によってアクチュエータを評価する姿勢が様々であり、他機関で得られた知見が各々のアクチュエータへ反映しにくい状況にある。また、実機での検証試験が難しいという課題も残されている。一般的なモータの場合、試験対象のモータのシャフトに駆動用のモータを接続することで誘起電圧測定試験、負荷試験を実施可能である。一方、球面アクチュエータの場合、無数の軸周りへの試験方法が確立されていないこと、球面アクチュエータと同様の回転を実現するための負荷装置が確立されていないことにより実機特性を検証することが難しく、解析モデルの特性値でしか評価できない状況にある。

そこで本研究ではこれらの課題の解決方法として、大域的なトルク特性の検証方法（トルク領域法）及び実機のシステム同定方法の提案を行った。トルク領域法は、各姿勢においてアクチュエータが発生可能なトルクを領域として表現し、その領域を特性の評価値（トルクポテンシャル）として用いるこ

とにより、多自由度アクチュエータの特長である「無数の軸周りにトルクを発生できること」を活かした評価方法である。そして、局所的な評価だけであったこれまでの球面アクチュエータに大域的な評価方法（トルク領域法）を適用し、静トルク特性を明らかにした。また、システム同定ではトルク領域法に必要なトルク定数マップを同定するための実験方法を提案し、平行機構を負荷装置として採用して、実機検証試験により提案評価システムの有効性を示した。

3. 研究の方法

(1) トルク領域法による大域的な評価

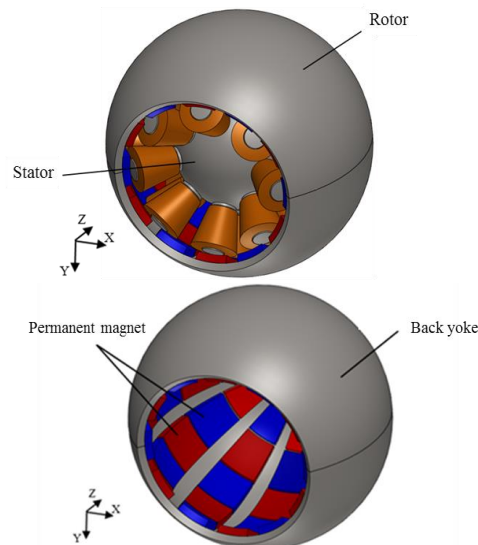


図1 アウターロータ型 3自由度球面アクチュエータ

図1に示すアクチュエータを評価例として示す。可動子の永久磁石は経度方向に 22.5 度間隔、緯度方向に 30 度間隔で極が切り替わるよう配置されている。また、固定子磁極は 30 度間隔で配置された磁極群を Z 軸周りに 45 度おきに 8 つ配置することで構成されている。このアクチュエータにおいて、z 軸周りの回転角度がゼロのときのトルクポテンシャルを図2に示す。緯度 16deg, 軽度 45, 135, 225, 315deg において、最大トルクが得られることがわかる。

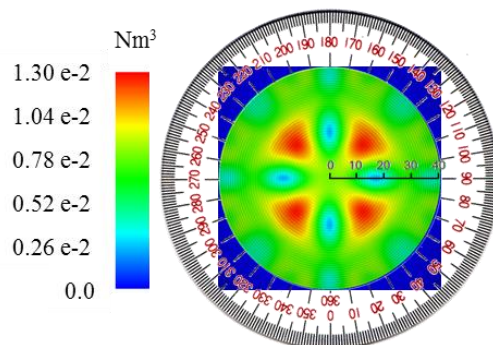


図2 トルクポテンシャル (Z 軸周り 0deg)

(2) 球面アクチュエータのシステム同定
 ここでは、測定すべきトルク定数が無数にあるという課題と、定常回転できない軸周りのトルク定数が存在するという2つの課題を解決し、球面アクチュエータのトルク定数マップを実機上で同定するシステムについて述べる。このシステムと(1)で述べたトルク領域法を組み合わせることで、これまで困難だった実機上での大域的な球面アクチュエータの評価が可能となる。

実機上で可動子を強制回転させた際に得られる鎖交磁束の変化によってトルク定数マップを求める。一般的に、モータのトルク定数を求める場合、可動子を強制回転させ、定速の状態でもコイルに発生した誘起電圧と角速度を用いる。しかし、球面アクチュエータではシャフトや銅線の干渉により定常回転が不可能な軸の回転がある。そのため、定常回転によって得られた誘起電圧と角速度を用いてトルク定数を算出するのは困難である。そこで、本研究では鎖交磁束を用いてトルク定数を算出する。この方法により可動子の回転速度によらず、トルク定数を算出することが可能である。一例として、図1のアクチュエータの緯度軸周りのトルク定数マップを図3に示す。

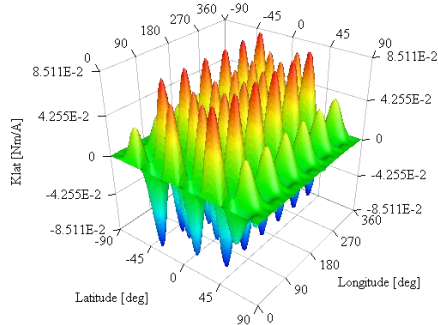


図3 トルク定数マップ

(3) パラレル機構を用いた実機評価

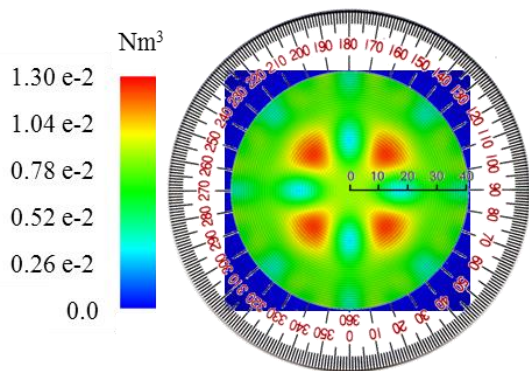


図4 トルクポテンシャル(測定値)

これまで実機で確認することが困難だった球面アクチュエータの大域的な特性を検

証する。実機試験をするためには球面アクチュエータ可動子を強制回転させるための負荷装置が必要である。そこで本研究では、球面アクチュエータと同様の自由度を有する3-RRRパラレル機構を負荷装置として採用した。実機のトルクポテンシャルを図4に示すが、FEM解析で求めたノミナルモデル(図2)と同様の傾向を示すトルク特性が得られ、ピーク値が4%程度(モデル化誤差0.8%含む)低下することが確認できた。

4. 研究成果

膨大な評価点を有する球面アクチュエータのトルク特性を網羅的に確認する評価方法及びそれを実機に適用するためのシステム同定方法を開発するという目的が達成された

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5件)

- ① Y. Sakaidani, K. Hirata, N. Niguchi, S. Maeda, Experimental Verification of Feedback Control of a 2-DOF Spherical Actuator, IEEE Trans. Magn., 査読有, Vol. 50, No. 11, 2014
- ② S. Maeda, K. Hirata, N. Niguchi, Characteristics Verification of an Independently Controllable Electromagnetic Spherical Motor, sensors, 査読有, Vol. 14, 2014, pp. 10072-10080
- ③ 西浦悠介, 平田勝弘, 大矢桂資, 堺谷洋, 新口昇, 遺伝的アルゴリズムを用いた三自由度球面アクチュエータの磁極配置最適化, 日本AEM学会誌, 査読有, Vol. 23, No.2, 2015, pp. 332-337
- ④ 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, 査読有, Vol. 36, No. 3, 2016, pp. 232-237
- ⑤ 高原一品, 平田勝弘, 新口昇, 西浦悠介, 堺谷洋, 藤原優文, 他事尤度球面動機アクチュエータの定電力下における静特性評価手法の提案, 電気学会論文誌D, 査読有, Vol. 136, No. 11, 2016, pp. 907-912

[学会発表](計20件)

- ① 西浦悠介, 平田勝弘, 大矢桂資, 堺谷洋, 新口昇, 三自由度球面アクチュエータの子銀具トルクモデル化, 電気学会マグネティックス・リニアドライブ合同研究会, 2014
- ② 西浦悠介, 平田勝弘, 大矢桂資, 堺谷洋, 新口昇, 遺伝的アルゴリズムを用いた三自由度球面アクチュエータの磁極配置最適化, 第23回MAGDAコンファレンス in 高松, 2014
- ③ J. Chu, N. Niguchi, K. Hirata, Design and Analysis of a New Spherical Actuator, IEEE International Magnetics Conference, 2015
- ④ Y. Nishiura, K. Hirata, K. Oya, Optimization of Stator Pole Arrangement for 3-DOF Spherical Actuator Using Genetic Algorithm, IEEE

International Magnetics Conference, 2015

⑤ Y. Nishiura, K. Oya, K. Hirata, 3-DOF Outer Rotor Electromagnetic Spherical Actuator, IEEE International Magnetics Conference, 2015

⑥ Y. Nishiura, K. Hirata, Y. Sakaidani, N. Niguchi, Torque Control of 3-Degree-of-Freedom Spherical Actuator with Cogging Torque Compensation, 17th International Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics, 2015

⑦ 西浦悠介, 平田勝弘, 大矢桂資, 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, 電気学会回転機・リニアドライブ・家電・民生合同研究会, 2015

⑧ 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の位置制御, 電気学会回転機・リニアドライブ合同研究会, 2015

⑨ 雨堤智也, 平田勝弘, 西浦悠介, 堺谷洋, 新口昇, 3 自由度球面アクチュエータにおける制御電流の少相化の検討, 電気学会リニアドライブ研究会, 2016

⑩ 西浦悠介, 平田勝弘, 堺谷洋, 藤原優文, 新口昇, 多自由度球面同期アクチュエータの評価手法について, 電気学会リニアドライブ研究会, 2016

⑪ 堺谷洋, 平田勝弘, 新口昇, 補助ヨーク設置型回転二自由度アクチュエータの特性解析, 第 28 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム, 2016

⑫ 早川駿, 平田勝弘, 新口昇, 堺谷洋, 色情報を用いた三次元位置センシング手法の提案, 電気学会回転機・リニアドライブ・家電・民生合同研究会, 2016

⑬ 高原一晶, 平田勝弘, 新口昇, 西浦悠介, 堺谷洋, 3 自由度球面同期アクチュエータのトルク領域法を用いた固定子磁極配置の最適化, 電気学会回転機・リニアドライブ・家電・民生合同研究会, 2016

⑭ 雨堤智也, 平田勝弘, 西浦悠介, 堺谷洋, 新口昇, 低相数 3 自由度球面同期アクチュエータの開発, 電気学会回転機・リニアドライブ・家電・民生合同研究会, 2016

⑮ 堺谷洋, 平田勝弘, 新口昇, 回転 2 自由度差動結合型アクチュエータのヨーク数に関する検討, 電気学会回転機・リニアドライブ・家電・民生合同研究会, 2016

⑯ Y. Sakaidani, K. Hirata, N. Niguchi, Comparison of a 2-DOF Differentially Coupled Actuator with and without Auxiliary yokes, the XXIIth International Conference on Electrical Machines, 2016

⑰ 高原一晶, 平田勝弘, 新口昇, 西浦悠介, 堺谷洋, 多自由度球面同期アクチュエータの許容電流に着目したトルク領域法, 第 25 回 MAGDA コンファレンス, 2016

⑱ 堺谷洋, 平田勝弘, 新口昇, 二自由度差動結合型アクチュエータの補助ヨークに関する検討, 第 25 回 MAGDA コンファレンス, 2016

⑲ 早川駿, 平田勝弘, 新口昇, 堺谷洋, カラーセンサを用いた三次元位置センシング手法の提案, 電気学会リニアドライブ研究会, 2017

⑳ 堺谷洋, 平田勝弘, 新口昇, 回転 2 自由度差動結合型アクチュエータの実機検証, 電気学会リニアドライブ研究会, 2017

〔図書〕(計 1 件)

① 平田勝弘ほか, 技術情報協会出版, アクチュエータの新材料, 駆動制御, 最新応用技術, 2017, 536 (393-403)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

名称 :
発明者 :
権利者 :
種類 :
番号 :
出願年月日 :
国内外の別 :

○取得状況 (計 0 件)

名称 :
発明者 :
権利者 :
種類 :
番号 :
取得年月日 :
国内外の別 :

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1)研究代表者

平田 勝弘 (HIRATA, Katsuhiko)
大阪大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号 : 00403139

(2)研究分担者

()

研究者番号 :

(3)連携研究者

新口 昇 (NIGUCHI, Noboru)
大阪大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号 : 60614039

(4)研究協力者

()