

令和 2 年 6 月 20 日現在

機関番号：12701

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17H03211

研究課題名（和文）クロスカップル形円筒二自由度埋込磁石同期モータの開発

研究課題名（英文）Development of Cross-Coupled Tubular 2-DOF Interior Permanent Magnet Synchronous Motor

研究代表者

下野 誠通 (Shimono, Tomoyuki)

横浜国立大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：90513292

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,800,000円

研究成果の概要（和文）：本研究課題では、研究代表者が提案したクロスカップル形円筒二自由度表面磁石リニアモータの動作原理を発展させることで、更なる高性能化および高推力/トルク密度化を目指した研究を推進した。特に、ハルバツハ磁石配列を適用した表面磁石二自由度リニアモータと埋込磁石二自由度リニアモータの試作開発に成功した。前者では、ハルバツハ磁石配列を周回方向と軸方向に対して三次元的に適用することで鎖交磁束が増大し、推力およびトルクが増大することを示した。後者では、リラクタンس推力/トルクを活用し、高出力化が実現できることを示した。これらの試作機を用いた駆動実験により、モーションシステムとしての有用性実証まで達成した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究を実施した結果、円筒二自由度リニアモータの高性能化のための、永久磁石とフラックスバリアに関する三次元構造設計についての新たな学術的知見を得ることができた。また本研究では、モーションシステム応用における試作モータの実用性まで実証することができた。これらの得られた成果は、人間支援システム用途を指向したモータ研究という新しい学術分野の開拓や、産業ロボットや工作機械など産業システムの革新的な機能向上あるいは性能改善に繋がることが期待される。

研究成果の概要（英文）：In this research, the principle of cross-coupled tubular two degrees-of-freedom (DOF) surface permanent magnet (SPM) motor was expanded for realization of high performance and high force/torque density. Firstly, a two-DOF SPM motor with Halbach array was developed. It was shown that thrust force and rotational torque can simultaneously be increased thanks to the three-dimensional magnets arrangement based on Halbach array both in axial direction and circumferential direction. Secondly, a two-DOF interior permanent magnet (IPM) motor was developed. It was shown that generation of reluctance force/torque can contribute to the increasement of thrust force and rotational torque. The decoupling between thrust motion and rotational motion was also achieved. From the experiments on these prototypes, the validity of the developed motors as motion system was also demonstrated.

研究分野：メカトロニクス

キーワード：電気機器工学 モーションコントロール 制御工学 モータドライブ パワーエレクトロニクス

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

近年、少子高齢化の進展を受け、ロボット技術は産業分野から医療・介護福祉を始めとする様々なサービス分野にも広く導入されることが強く望まれている。しかしながら、ロボット市場は依然として製造業等の産業分野が主となっており、残念ながら人間支援等のサービス分野への拡大は遅々として進んでいないのが実状である。この理由の一つとして、従来のロボット技術が人間支援用途に必要な機能を十分には獲得できていないことが挙げられる。これまでの産業ロボットや工作機械が主に有している精密な位置決め機能は、外乱に対してのロバスト性を確保するものである。一方で、人間支援においてはロボットが外部環境に対して柔らかく接触するコンプライアンス機能も同時に有している必要がある。前者は外力に対して硬い速度(位置)制御によって齎される機能であり、後者は柔らかい(反作用)力制御によって齎される機能である。これらの二つの双対な機能は、速度(位置)制御と力制御の両者を内包する「リアルハプティクス技術」によって、初めて同時かつ独立にロボットに与えうる。

これまでの研究成果から、力触覚技術をロボットに実装するためには、ロボットの駆動系には力伝達性と逆駆動性(バックドライバビリティ)に富むダイレクトドライブモータを用いることが最も望ましいとの知見を得ていた。しかし、従来の工業用モータは決して人間支援ロボット用途を想定してデザインされておらず、多自由度システムを実現する際に市販モータをそのまま利用した場合には、システムの肥大化と複雑化が大きな問題となっていた。そこで、この問題を解決するために、研究代表者らは様々な独創的な特殊モータの開発研究を推進してきた。特に、多自由度システムへの応用においては、直動運動と回転運動を同時かつ独立に実現する表面磁石型のクロスカップル形二自由度ダイレクトドライブモータの試作開発に成功した(図1)。このモータは、ラジアル方向に着磁したセグメント磁石をシャフト表面に市松模様に配置した固定子と、二組の三相交流巻線を螺旋状にたすきがけた可動子(クロスカップル形と呼称している)から成る構造をしている。たすきがけされた外側螺旋状巻線と内側螺旋状巻線によってそれぞれ発生するローレンツ力の和差により、直動運動と回転運動とを実現する駆動原理となっている。



図1 クロスカップル形円筒  
二自由度表面磁石モータ

このクロスカップル形二自由度モータの動作原理を発展させ、更なる高性能化および高推力/トルク密度化を実現するための研究課題を構想したところ、新たに埋込磁石型のクロスカップル形二自由度モータの開発研究に挑戦する必要があるとの認識に至った。以上が、本研究開始当初の背景である。

### 2. 研究の目的

本研究では、三年間の研究期間内において、二自由度モータの更なる高性能化および高推力/トルク密度化を目指し、新たに埋込磁石型のクロスカップル形二自由度モータを試作開発することを目的とする。開発モータの数理モデルから得られる理論値、電磁界解析による数値結果、駆動実験から得られる出力特性を比較することで、開発技術の妥当性を確認する。さらに、運動制御実験を実施することで、モーションシステムへの応用可能性まで実証することを最終目標とする。

### 3. 研究の方法

本研究では、三年間の研究期間内において上記の研究目的を達成するために、次の具体的な三つの研究計画を段階的に遂行する。

#### (1) 研究計画A：埋込磁石型二自由度モータの数理学研究

埋込磁石型のクロスカップル形二自由度モータの数理モデル化研究を行う。特に、二自由度モータにおいてリラクタンس力を援用し高出力化を実現するための、磁石とフラックスバリアに関する径方向と軸方向の3次元設計について検討を深める。設計したモータモデルに対して電磁界解析を行うことでモータ特性について検証し、得られた解析結果をモータ試作の詳細設計に反映させる。

#### (2) 研究計画B：埋込磁石型二自由度モータの試作と実験検証

研究計画Aで得られた知見を基に、実際に埋込磁石型の二自由度モータの試作を行う。光学式のリニアエンコーダとロータリーエンコーダ、および評価用の6軸力覚センサを実装したモータ試験機を製作し、試作モータの性能評価実験を行う。構築した数理モデル、電磁界解析結果、実験結果を比較し、開発モータの動作原理を実証する。

#### (3) 研究計画C：埋込磁石型二自由度モータの運動制御実装

埋込磁石型の二自由度モータのためのモーションコントロール研究を実施する。径方向と軸方向の磁束干渉や実機の製作誤差に起因する直動動作と回転動作の干渉を抑圧する制御手法を開発し、高精度な位置/角度制御および力/トルク制御を達成する。開発した運動制御手法を試作モータに実装し最終評価実験を行うことで、モーションシステムへの応用可能性まで実証する。

### 4. 研究成果

#### (1) 埋込磁石型二自由度モータの開発

研究期間初年度の平成29年度では、埋込磁石型のクロスカップル形二自由度モータの基本モデルについて検討を行った。このモデルを数理的に表現することで、リラクタンス力およびリラクタンストルクの発生原理について確認した。さらに電磁界解析ソフトウェアを用いた有限要素解析を行うことで、モータ電気角、印加電流、発生推力/トルクの間関係を綿密に調査した。数値解析結果から、同磁石量を有する表面磁石型のクロスカップル形二自由度ダイレクトドライブモータに比べて、埋込磁石型の考案モータの方が発生トルクを向上させることができることを確認した。これらの結果を踏まえ、原理実証を行うためのモータ試作機の設計に着手した。

続いて平成30年度では、埋込磁石型のクロスカップル形二自由度モータの詳細モデルについて検討を深め、リラクタンス力およびリラクタンストルクを活用するためのフラックスバリアの三次元設計を行い、電磁界解析を行った。解析結果から、最適な電流位相角の理論値を導出した。特に、実機試作において加工製作を容易にするためのモジュール構造を考案し、モータ可動子と固定子の分割モデルを構築した。これらの研究過程において、埋込磁石型クロスカップル型二自由度ダイレクトドライブモータでは、位置センサおよび回転角度センサを一切用いないセンサレス制御が実現可能であるとの見通しを得た。

研究期間最終年度の平成31年度では、クロスカップル形二自由度モータの推力/トルク方程式について、表面磁石型と埋込磁石型の双方に適用可能になるようにリラクタンス力/トルクの発生について考慮した形で一般化させ、提案モータの数理学表現を確立した。そして、クロ

スカップル構造に基づいた埋込磁石二自由度モータの試作開発を完了した(図2)。本試作機の駆動実験を行い、モータ特性の評価を行うとともに、得られた実験結果と、理論式に基づく計算結果、有限要素解析結果との比較を行った。その結果、これら三つのデータが概ね一致することを確認し、提案モータの原理実証を達成した。さらに、試作モータに運動制御理論を実装し実験を行うことで、提案モータのモーションシステムとしての有用性まで明らかにすることができた。また、クロスカップル形埋込磁石二自由度モータのセンサレス制御に関する理論研究も進め、シミュレーション結果からその実現可能性を示すことができた。

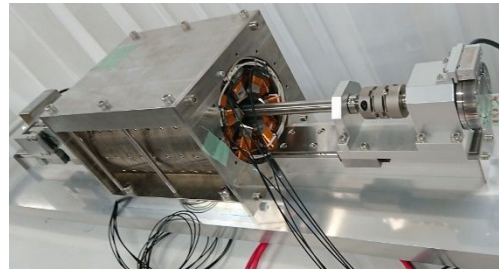


図2 クロスカップル形円筒二自由度埋込磁石モータの試作機

### (2) ハルパツ八磁石配列を適用した表面磁石型二自由度モータの開発

本研究では、表面磁石型のクロスカップル形二自由度モータの性能向上にも取り組み、ハルパツ八磁石配列を適用したモデルを新たに考案した。軸方向および周方向の磁石配列の組み合わせ、および磁化方向の異なる磁石の体積割合を考慮して電磁界解析を行い、結果を比較したところ、軸方向あるいは周方向の単一方向のみにハルパツ八磁石配列を適用するよりも、両方向に対してハルパツ八磁石配列を同時に適用することによって、モータ全体の出力向上に大きな効果があることを確認した。そして、ハルパツ八磁石配列を適用した表面磁石型のクロスカップル形二自由度モータを実際に試作し(図3)、電磁界解析結果との比較を行った。実験結果が解析値と概ね一致することを確認し、考案モータの有用性を実証することができた。



図3 ハルパツ八磁石配列を適用した二自由度表面磁石モータの試作機

### (3) 成果のまとめ

前述の通り、本研究の遂行により、独創的な埋込磁石型二自由度モータに関する設計論を確立することができたと共に、表面磁石型の二自由度モータの高性能化に関する知見を得ることができた。得られた研究成果は、学術論文誌論文1編、国際会議発表論文3編、国内会議発表論文3編、および特許出願1件という形で結実した。また、埋込磁石型の二自由度モータ開発の研究過程においては、当初想定していなかったセンサレス制御の実現という新たな研究テーマの発見もあった。今後は、埋込磁石型二自由度モータ試作機から得られた実験結果を纏めて学術論文誌への論文投稿を行うと共に、センサレス制御アルゴリズムを実装し検証する予定である。また、考案した二自由度モータの駆動原理については更なる多自由度化への応用が期待できるとの見通しを得たため、多自由度モータの開発研究へと発展させ、次の研究課題として挑戦したいと考えている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Yoshiyuki Hatta and Tomoyuki Shimono	4. 巻 Vol. 9, No. 2
2. 論文標題 Analysis and Experimental Verification of Cross-coupled 2-DOF SPM Motor with Halbach Array	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEJ Journal of Industry Applications	6. 最初と最後の頁 177-190
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） <a href="https://doi.org/10.1541/ieejjia.9.177">https://doi.org/10.1541/ieejjia.9.177</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Yoshiyuki Hatta, Tomoyuki Shimono, and Yasutaka Fujimoto
2. 発表標題 Design and Analysis of Interior Permanent Magnet Two Degrees of Freedom Motor Based on Cross-Coupled Structure
3. 学会等名 International Electric Machines and Drives Conference, IEMDC2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 八田禎之, 下野誠通, 渡辺真志, 石川勝己
2. 発表標題 ハルバツハ配列を用いた表面磁石クロスカップル型二自由度モータの解析
3. 学会等名 電気学会産業応用部門リニアドライブ研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yoshiyuki Hatta, Tomoyuki Shimono, Masashi Watanabe, Katsumi Ishikawa
2. 発表標題 Analysis of The Cross-Coupled Two-Degree-of-Freedom Motor with Coil Back Yoke
3. 学会等名 IEEJ international workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization (SAMCON2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yoshiyuki Hatta, Tomoyuki Shimono
2. 発表標題 Analysis of Interior Permanent Magnet Two Degrees of Freedom Motor Based on Cross-Coupled Structure
3. 学会等名 International Power Electronics Conference (IPEC-Niigata 2018, ECCE Asia) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 八田禎之, 下野誠通
2. 発表標題 埋込磁石型クロスカップル二自由度モータにおけるセンサレス制御のための位置推定方法
3. 学会等名 電気学会マグネティクス/リニアドライブ合同研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 八田禎之, 藤本康孝, 下野誠通
2. 発表標題 磁気ねじ構造に基づいたラジアルギャップ型二自由度モータの検討
3. 学会等名 電気学会交通・電気鉄道/リニアドライブ合同研究会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 埋込磁石型モータ、位置推定装置および位置推定方法	発明者 下野誠通、八田禎之、藤本康孝	権利者 横浜国立大学
産業財産権の種類、番号 特許、特願2019-088203	出願年 2019年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

下野研究室  
<http://www.tsl.ynu.ac.jp/index.html>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	河村 篤男  (Kawamura Atsuo)  (80186139)	横浜国立大学・大学院工学研究院・名誉教授   (12701)	
研究分担者	藤本 康孝  (Fujimoto Yasutaka)  (60313475)	横浜国立大学・大学院工学研究院・教授   (12701)	
研究分担者	溝口 貴弘  (Mizoguchi Takahiro)  (80759308)	地方独立行政法人神奈川県立産業技術総合研究所・「力を感じる医療・福祉介護次世代ロボット」プロジェクト・研究員 (任期有)   (82718)	