

平成 29 年 6 月 19 日現在

機関番号：12701

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26289071

研究課題名(和文)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開発

研究課題名(英文)Development of a Cross-Coupled Two Degrees of Freedom Direct-Drive 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) 12,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では、研究代表者が考案した円筒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設計試作を行った。そして、提案モータの理論モデルの構築、電磁界解析および実機実験による性能評価と原理実証、運動制御の実装実験を達成することができた。この結果、医療支援ロボット等のモーションシステムへの応用可能性までを示すことができた。このように三年間の研究期間において、当初予定していた研究内容の全てを完遂することができた。

研究成果の概要(英文)：In this research, a tubular cross-coupled two degrees of freedom direct-drive motor was developed. The mathematical model of the proposed motor was established. The validity of it was confirmed from FEM analysis and experiments on the prototype. The motion control algorithm for this motor was also presented. As a result, the utility of the proposed motor from the viewpoint of application to motion system was demonstrated. The research plan could perfectly be accomplished.

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 ハブ
ディクス

1. 研究開始当初の背景

近年、内視鏡外科の発展による患者の身体的負荷の少ない高度医療の実現が注目されている中、極めて繊細で高難度な低侵襲性手術を実行可能な手術支援システムの開発が希求されている。現在普及している手術支援システムはギアやワイヤを駆使した精密な運動実現に特化する構造を有し、操作性にも優れている一方で、力触覚フィードバック機能を備えていないがために、体内の狭隘な空間での脆弱な組織を対象とした繊細で微妙な力加減を要する手術への適用は極めて困難となっている。したがって、より一般的な外科手術支援に適用可能な力触覚フィードバック機能を有するシステムの開発が強く求められている。

本研究課題の申請者は、鋭敏な力触覚フィードバックを実現する制御技術に精通しており、医学者と共同で様々な医療支援システムの試作開発を行ってきた実績がある。しかし、力触覚フィードバック性能を損なうことなくシステムの多自由度化を如何にして実現するかが、この世界最先端の力触覚技術の実用化における重要課題の一つとなっている。

2. 研究の目的

これまでの研究成果から、アクチュエータの基本性能が力触覚フィードバック性能に対して決定的な役割を果たすことを明らかにしており、ギアやクランク、ボールねじなどの機械的運動変換機構を用いると共振周波数や摩擦等によりフィードバック帯域の確保が困難であるため、ダイレクトドライブモータが極めて有用であるとの知見を得ている。しかし、ダイレクトドライブモータによってシステムの多自由度化を実現する際に、産業用マニピュレータのようにモータを単に直列に配置すると、システムの肥大化と複雑化が大きな問題となる。鋭敏な力触覚フィードバック機能を有する多自由度医療用触覚鉗子システムの実現には、革新的なダイレクトドライブモータの開発が必要不可欠であるとの考えに至った。

そこで、2011年より新しいダイレクトドライブモータの開発研究に着手し、低侵襲性外科手術における鉗子のピッチ自由度とヨー自由度をダイレクトドライブで実現する円周運動が可能な円弧形リニアモータの試作開発に成功するなど、医療用触覚鉗子システムの多自由度化に向けた大きな成果を得ている。

これらの研究実績を踏まえ、円弧形リニアモータによって構築されるプラットフォーム上に搭載する医療用触覚鉗子システムのエンドエフェクタ部への構想を膨らませたところ、狭隘空間において低侵襲性外科手術に要求される多様な運動機能を同時かつ独立に発現するためには、直動運動と回転運動を実現する二自由度ダイレクトドライブモ

ータの開発が抜本的な解決策になるとの認識に至った。そこで本研究課題では、直動運動と回転運動を実現する円筒形二自由度ダイレクトドライブモータの試作開発を達成することを目的と定めた。

3. 研究の方法

本研究課題では、三年間の研究期間内において、次のAからCの具体的な三つの研究計画を遂行することで、研究目的を確実に達成することを目指した。

(1) 研究計画A. 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設計試作

開発するモータは、ラジアル方向に着磁したセグメント磁石を市松模様配置した固定子と、二つの三相交流巻線を螺旋状にたすきがけした可動子から構成される極めて独創性に富む構造を有している。このモータの綿密な数理的解析を行い、試作モデルを設計する。そして、試作機を実際に開発し、実験による性能評価と有用性実証を行う。

(2) 研究計画B. クロスカップル構造の可動子を協調的に駆動するためのモータドライブ技術の開発

開発する二自由度モータにおいて直動運動と回転運動を同時かつ独立に実現する原理は、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を和差演算し利用する点にある。したがって、内外の螺旋状巻線を協調的に励磁する必要があるため、これを実現するモータドライブ技術を開発し、試作機を用いて原理実証する。

(3) 研究計画C. 直動運動と回転運動を同時かつ独立に実現するモーションコントロール技術の開発

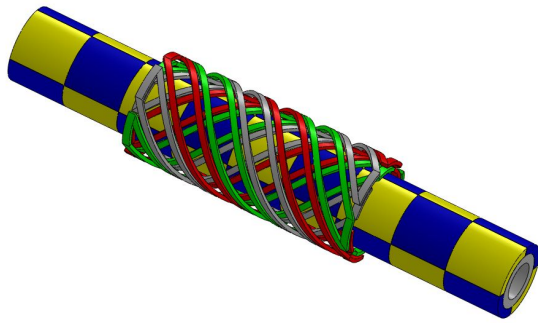
開発する二自由度モータの直動運動と回転運動において精密な位置/角度制御と高精度な力/トルク制御を実現するための、ロバストな運動制御技術を開発し実験実証する。

4. 研究成果

本研究では、三年間の研究期間において、下記の(1)から(3)の研究成果を段階的に得ることができた。

(1) 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設計試作

本研究課題で試作を行った円筒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構造を図1に示す。図1(a)は提案モータの外観CAD図であり、可動子となるシャフト部にC型セグメント永久磁石がN極とS極で交互に市松模様となるよう配置されている。そして、固定子となるコイル部には、右回り螺旋と左回り螺旋の二種類の巻線が内外に配置されている。内外の螺旋状巻線はU相、V相、W相の三相構造となっており、永



(a) モータ CAD 図



(b) 試作機
図1 提案モータ

久磁石に対して対角線方向に配置されており、互いに直交するよう配置される。したがって、内外の螺旋状巻線が励磁される時、フレミングの左手の法則に従い二つのローレンツ力が発生する。この二つのローレンツ力の和差が推力もしくはトルクとしてモータの運動生成に寄与し、独立な直動運動と回転運動を実現することとなる。

このモータ構造に基づいて試作した実機を図1(b)に示す。本試作機はネオジム永久磁石を貼付したシャフト部と、光造形で製作した螺旋上に溝を掘ったボビンに三相巻線を巻いたコイル部からなる。また、直動方向の変位と回転方向の周回変位とを計測する二つのオプティカルエンコーダと、出力を計測する6軸力センサとを備えている。この試作機を用いて、モータ特性の評価実験と、運動制御実験とを続けて行った。

(2) 提案モータ試作機の駆動実験と特性評価

提案モータでは、内外の螺旋状巻線をそれぞれ独立に同時に励磁する必要があるため、インバータが二つ必要となる。これらを一つの制御器で駆動するためのモータドライブ装置を製作し、モータの特性評価試験を行った。

特性評価試験では、二種類の螺旋状巻線それぞれに対して、二つのインバータで独立に励磁を行い、推力のみを発生させる駆動実験

とトルクのみを発生させる駆動実験を行った際の推力値とトルク値を6軸力センサによって計測した。その結果、推力とトルクとを同時かつ独立に発生可能であることを確認し、試作機においては推力定数 3.35 N/A、トルク定数 0.0631 Nm/A との結果を得た。

また、提案モータの電圧方程式および推力/トルク方程式を導出し、理論式に基づいた計算値と、電磁界解析ソフトウェア JMAG を用いた有限要素解析による解析値との比較を行ったところ、概ね理論値、解析値、実験値とが一致することを確認した。これらの結果より、提案モータが独立かつ同時に推力とトルクとを発生し、二自由度を有するモータであることが実証された。

(3) 提案モータのモーションコントロール

本研究課題での最終段階として、提案モータの運動方程式を導出し、モーションコントロールまで実現した。

提案モータはそれぞれの螺旋状巻線によって螺旋方向に力が発生するため、モータの本来の運動軸は螺旋方向に設定される。二つの力の和差により、直動運動と回転運動とが実現されるため、これらは所謂作業空間として定義される。すなわち、提案モータはこの和差座標変換を構造として内包している。したがって、モータの螺旋運動を定義する運動方程式と、作業空間での運動を定義する方程式とを立式することができる。

モーションコントロール研究では、まず螺旋運動において外乱に対してロバストな加速度制御を実現するための外乱オブザーバの導入方法を検討し、精密な位置/回転制御手法を考案した。試作機を用いた運動制御実験により、外乱に対して頑強な動作が実現できていることを確認した。

次に、人間支援ロボット等への応用を見据えて、力/トルク制御手法の検討を行った。反力/反トルク推定オブザーバの理論を応用することで、力センサを用いずに高帯域での力/トルク制御を実現する制御手法を考案した。試作機を用いた実験により、高精度な制御が実現できていることを確認した。

(4) まとめ

以上の通り、三年間の研究期間において、提案する円筒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設計試作、理論モデルの構築、電磁界解析および実機実験による性能評価と原理実証、運動制御の実装実験までを達成した。このように、当初予定していた研究内容の全てを完遂することができた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

Mototsugu Omura, Tomoyuki Shimono, and Yasutaka Fujimoto, Thrust Characteristics Improvement of a Circular Shaft Motor for Direct-Drive Applications, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 51, no. 5, pp. 3647-3655, September 2015. 査読有
DOI: 10.1109/TIA.2015.2421275

〔学会発表〕(計 11 件)

Tomoyuki Shimono, Shodai Tanaka, and Yasutaka Fujimoto, Force Control of Tubular Two-DOF Cross-Coupled Motor, Mechatronik2017, March 2016. Dresden (Germany)

Shodai Tanaka, Tomoyuki Shimono, and Yasutaka Fujimoto, Verification of Robust Position Control on a Cross-Coupled 2-DOF Direct Drive Actuator, The 41th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON2015), November 2015. パシフィコ横浜 (神奈川県横浜市)

田中翔大, 下野誠通, 藤本康孝, 円筒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直動と回転の同時性と独立性に関する実験評価, 第33回日本ロボット学会学術講演会, 2015年9月. 東京電機大学(東京都足立区)

Hiroshi Asai, Tomoyuki Shimono, Mototsugu Omura, and Yasutaka Fujimoto, Development of a Haptic Platform Driven by Semicircular Linear Motors, The 1st IEEJ International Workshop on Sensing, Actuation, and Motion Control (SAMCON2015), March 2015. 名古屋工業大学(愛知県名古屋市)

Shodai Tanaka, Tomoyuki Shimono, and Yasutaka Fujimoto, Optimal Design of Length Factor for Cross-Coupled 2-DOF Motor with Halbach Magnet Array, IEEE International Conference on Mechatronics, ICM2015, March 2015. 名古屋工業大学(愛知県名古屋市)

Hiroshi Asai, Mototsugu Omura, Tomoyuki Shimono, and Yasutaka Fujimoto, Bilateral Control of a Half-circle-shaped Tubular Linear Motor with Disturbance Model Based on Trigonometric Function of Two Variables, The 7th International Conference on Information and Automation for Sustainability, (ICIAfS2014), December 2014. Colombo (Sri Lanka)

Mototsugu Omura, Tomoyuki Shimono, and Yasutaka Fujimoto, Thrust Characteristic Comparison between Axial Magnetization and Quasi-Halbach Magnetization of Circular Shaft Motor, 2014 10th France-Japan/ 8th Europe-Asia Congress on

Mecatronics, November 2014. 首都大学東京(東京都八王子市)

Shodai Tanaka, Tomoyuki Shimono, and Yasutaka Fujimoto, Development of a Cross-Coupled 2DOF Direct Drive Motor, The 40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON2014), October 2014. Dallas (U.S.A.)

田中翔大, 下野誠通, 藤本康孝, 推力/トルク向上のためのハルバツハ配列磁石によるクロスカップル形二自由度モータの設計, 第32回日本ロボット学会学術講演会, 2014年9月. 九州産業大学(福岡県福岡市)

山口柊平, 田中翔大, 野崎貴裕, 下野誠通, 藤本康孝, クロスカップル形平面二自由度ダイレクトドライブモータの設計と基礎解析, 第32回日本ロボット学会学術講演会, 2014年9月. 九州産業大学(福岡県福岡市)

Mototsugu Omura, Tomoyuki Shimono and Yasutaka Fujimoto, Thrust Characteristics Improvement of a Circular Shaft Motor for Direct-Drive Applications, International Power Electronics Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IPEC2014), pp. 1685-1690, May 2014. 広島国際会議場(広島県広島市)

〔その他〕

ホームページ

<http://www.tsl.ynu.ac.jp/index.html>

6. 研究組織

(1) 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: 90413292

(2) 研究分担者

河村 篤男 (KAWAMURA, Atsuo)

横浜国立大学・大学院工学研究院・教授
研究者番号: 80186139

藤本 康孝 (FUJIMOTO, Yasutaka)

横浜国立大学・大学院工学研究院・教授
研究者番号: 60313475