

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 19 日現在

機関番号：12701

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2011～2013

課題番号：23686046

研究課題名(和文) 低侵襲性外科手術シミュレータのための多自由度鉗子型ハプティックシステムの開発研究

研究課題名(英文) Research and Development on Multi-Degrees-of-Freedom Haptic Forceps for Surgical Simulator

研究代表者

下野 誠通 (Shimono, Tomoyuki)

横浜国立大学・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) 21,000,000円、(間接経費) 6,300,000円

研究成果の概要(和文)：研究過程において、力覚フィードバック性能を損なうことなく鉗子型ハプティックシステムの多自由度化を実現するためには、新しいダイレクトドライブアクチュエーション技術の開発が必要であるとの認識に至った。そこで、鉗子のピッチ動作とヨー動作を実現するための、円弧形シャフトモータの試作開発を行った。電磁界解析ソフトウェアを用いた数値解析結果と、試作機に対する実験結果から、ダイレクトドライブでの円周運動が実現できており、ハプティックシステムへ実用するために十分な推力特性を獲得できたことを確認した。高推力円弧形シャフトモータを実装した二自由度プラットフォームを開発し、新しいアクチュエーション技術を確立した。

研究成果の概要(英文)：In order to realize an innovative forceps system with high haptic transmission function, it was found that a new direct-drive actuation technology should be developed. In this research, a new half-circle-shaped linear motor was developed. This motor can provide pitch motion and yaw motion of a medical forceps. From the magnetic field analysis and the experiment on the prototype, it was confirmed that the developed system could achieve a circumference motion along a circle. The improved prototype showed enough thrust characteristics. Finally, a two-degrees-of-freedom platform based on the high-thrust circular shaft motor was developed. Then, the fundamental actuation technique based on the developed motor was established.

研究分野：モーションコントロール、ハプティクス、電気機器工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電力工学・電力変換・電気機器

キーワード：ハプティクス モーションコントロール 制御工学 電気機器工学 リニアモータ パワーエレクトロニクス

### 1. 研究開始当初の背景

近年の内視鏡外科の発展により患者の身体的負荷の少ない高度な医療が実現されつつあるが、高難度であるために実行できる外科医が限られており、低侵襲性外科手術の普及が重要課題となっている。したがって、低侵襲性外科手術シミュレータの高度化が求められているが、力触覚技術がその鍵であることが明らかとなっており、その実現は焦眉となっている。このような背景から、低侵襲性外科手術の高度なトレーニングが実行可能な手術シミュレータを実現するための、力覚フィードバック機能を有する多自由度システムの開発が強く望まれている。

### 2. 研究の目的

本研究では、低侵襲性外科手術の高度なトレーニングが実行可能な手術シミュレータを実現するための、力覚フィードバック機能を有する多自由度鉗子型インタフェースと、その運動制御技術の開発を目的とする。

この目的達成に向け、三年間の研究期間において以下の三つの開発研究テーマを遂行する。

- (1) 多自由度鉗子型ハプティックシステムの設計開発
- (2) 多自由度鉗子型ハプティックシステムのモーションコントロール技術の開発
- (3) 広帯域触覚フィードバックを実現するモーションドライブ技術の開発

### 3. 研究の方法

上述の本課題における三つの具体的な開発研究テーマ毎に、平成 23 年度から平成 25 年度までの三年の研究期間において実際に遂行した研究方法の概要について述べる。

- (1) 多自由度鉗子型ハプティックシステムの設計開発

平成 23 年度においては、内視鏡外科手術における外科医の動作を実現するためにハプティックシステムに必要な可動範囲、必要な把持力の最大値などの要求仕様を精査した。そして、鉗子の開閉機能と直動機能を有するマルチ駆動マスタ・スレーブ一体型二自由度ハプティック鉗子 (図 1) の試作開発を行い、動作性能評価試験を実施した。その結果、力覚フィードバック特性を損なうことなく鉗子システムのさらなる多自由度化を実現するためには、新しいアクチュエーション技術の開発研究が不可欠であるとの知見を得た。

平成 24 年度においては、前年度の研究成果を受け、多自由度鉗子型ハプティックシステム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ための、円弧形シャフトモータの設計試作を行った。また、円弧形シャフトモータの基本特性の評価実験を実施するために、円弧形シャフトモータ試験装置 (図 2) を併せて試作した。電磁界解析ソフトウェアを用いた数値解析と試作機の

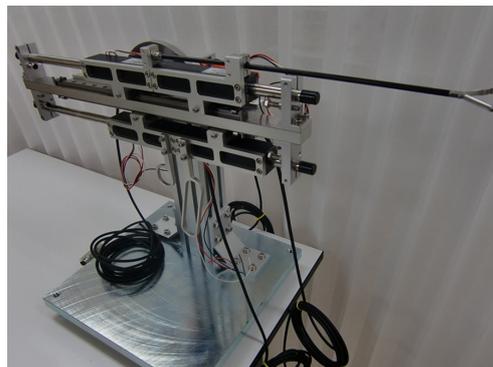


図 1 マルチ駆動マスタ・スレーブ一体型二自由度ハプティック鉗子

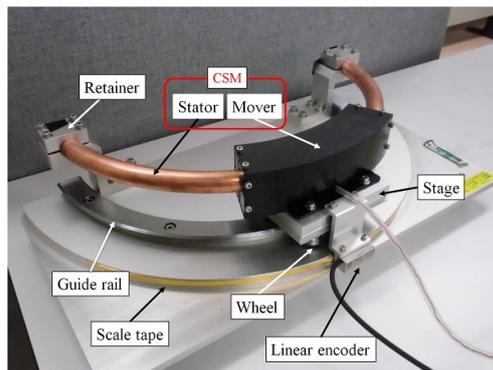


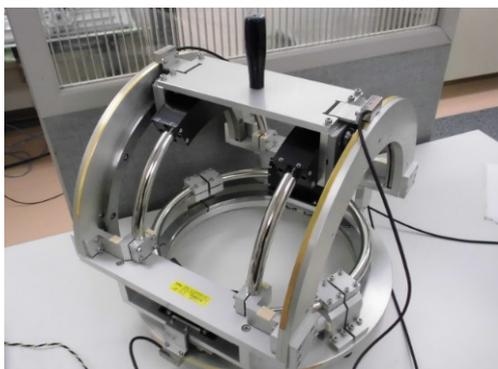
図 2 円弧形シャフトモータ試験装置 (一号機)

基本特性評価実験から、試作したアクチュエータは実世界ハプティクスへの応用が十分可能であるとの結論を得た。

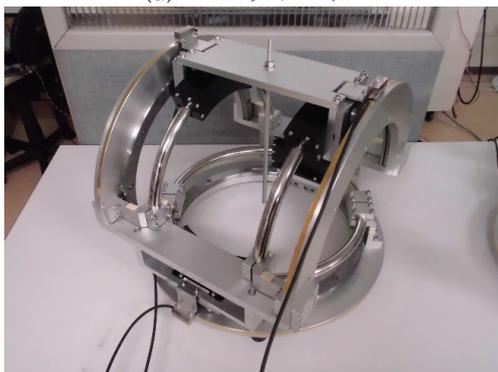
平成 25 年度ではまず円弧形シャフトモータの改良研究に着手した。円弧形の固定子パイプ内への装入に適した断面が台形形状をした円筒ネオジム磁石を設計試作し、可動子部のコイルと固定子部のネオジム磁石との間のギャップ設計についても改良を行うことで、円弧形シャフトモータの高推力化を実現した。電磁界解析ソフトウェアを用いた数値解析結果と、試作した新構造の円弧形シャフトモータに対する基礎実験結果から、多自由度鉗子型ハプティックシステムへの実用に向けて、十分に高い推力特性を獲得できたことを確認した。これらの結果を受け、年度末においては高推力円弧形シャフトモータを実装した二自由度バイラテラルプラットフォーム (図 3) を開発し、鉗子型ハプティックシステムの多自由度化を実現するための新しいアクチュエーション基礎技術を確立した。

- (2) 多自由度鉗子型ハプティックシステムのモーションコントロール技術の開発

平成 23 年度においては、試作したマルチ駆動マスタ・スレーブ一体型二自由度ハプティック鉗子のための運動制御技術の研究を行った。スケーリング項を導入した機能に基づくバイラテラル制御手法を試作機に実装することで、特定の機能のみを増幅し発現できることを実験的に明らかにした。結果とし



(a) マスタシステム



(b) スレーブシステム

図3 二自由度バイラテラルプラットフォーム

て、鉗子という道具の高機能化が実現できることを確認した。

平成 24 年度では、多自由度ハプティックシステムとシミュレータ環境との間での双方向インタラクションを実現するモーションコントロール技術に関する研究を実施した。双方向力覚フィードバック機能を有するバイラテラル制御システムと、視覚的動作支援を提供するシミュレータ環境とを統合することで、実世界ハプティクスにおける拡張現実感を実現することに成功した。シミュレータ環境からの仮想反力のハプティックシステムへの実装実験を行い、開発技術の有用性を確認した。

円弧形シャフトモータという新しいアクチュエータの試作開発に成功するという研究開始当初には想定していなかった大きな研究成果を平成 24 年度において得たことを受け、平成 25 年度では円弧形シャフトモータのモーションコントロール技術の開発研究を行った。ロバストな角度制御、力センサを用いない広帯域での力制御、2 台の円弧形シャフトモータ間での力覚フィードバック制御が実現できることを、試作機を用いて実験実証した。

(3) 広帯域触覚フィードバックを実現するモーションドライブ技術の開発

本研究課題の進捗過程において円弧形シャフトモータの試作開発という新たな成果を得たことを受け、平成 24 年度からは特に円弧形シャフトモータの駆動技術に関する研究を実施した。円弧形シャフトモータはダ

イレクトドライブでの円周運動を実現するが、システムの構成上、実際のモータ運動半径とエンコーダの運動測定半径との間には違いが生じる。このとき、モータ駆動においては、両者の半径比を考慮した仮想的な磁極間距離に基づいた制御系設計が必要となる。そこで、円弧形シャフトモータのための仮想的な磁極間距離に基づいた駆動手法を開発し、汎用モータドライバを用いた実験により駆動を達成した。

#### 4. 研究成果

##### (1) 主たる成果

本研究課題では、「5. 主な発表論文等」に後述する通り、多くの成果を得ることができた。中でも、円弧形シャフトモータの試作開発の成功が最も独創的で卓越していると考えるため、本報告書ではこの成果に主眼を置いて述べることにする。

最初に試作開発を行った円弧形シャフトモーター号機の構造を図 4 に示す。固定子部は円弧形に曲げ加工を行った銅パイプ、円筒形の永久磁石、スペーサとしての鉄片から構成されている。リング状の永久磁石 3 つと鉄片 3 つを一セットとして、N 極同士および S 極同士がセット間で向き合うようにパイプ内に装入した。可動子部はケース、巻線用ボビン、巻線から構成されている。円弧形モータを実現するため、ケースやボビンも円弧形状に加工をして製作した。ボビンには 6 スロットあり、UVW 巻線を 2 組用意しスター結線することで、3 相 2 極構造となるように設計した。このモーター号機に対する電磁界解析ソフトウェアを用いた解析結果を図 5 に示す。円弧の法線方向に磁束が発生している様子が見える。実際にモータの試作を行い(図 2)、推力特性試験を行った。その結果を図 6 に示す。結果からわかるように、電流に対して円弧接線方向に発生する推力が線形の応答を示しており、各角度においても均一な推力発生が実現できていることが観測された。試作一号機の推力定数は 7.50 N/A であった。

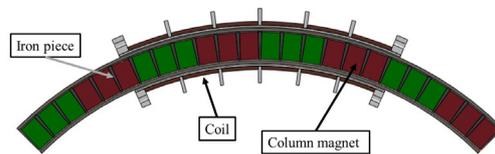


図 4 円弧形シャフトモーター号機の構造

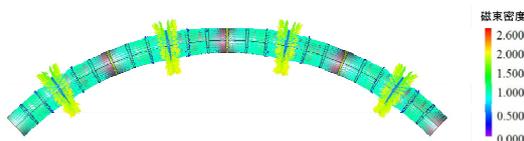
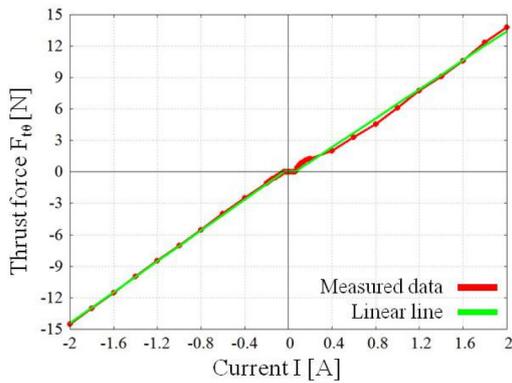
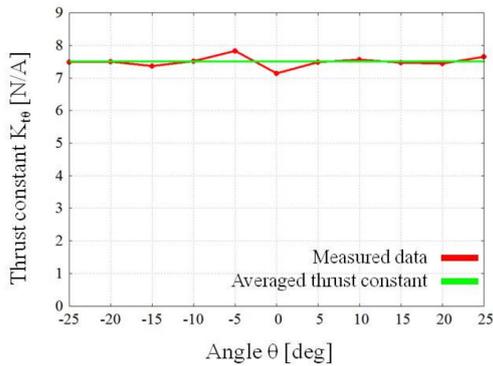


図 5 円弧形シャフトモーター号機の電磁界解析結果



(a) 円弧形シャフトモーター号機の中心位置での推力試験結果



(b) 円弧形シャフトモーター号機の各角度における推力定数の測定結果

図6 円弧形シャフトモーター号機の推力特性試験結果

次に、円弧形シャフトモータの高推力化を実現するため、二号機の設計試作を行った。固定子内部の鉄片を排除し、断面が台形状の永久磁石を設計試作することで、部品点数の低減と推力リップルの低減、磁束密度向上による高推力化などを図った。さらに、巻線の巻数を2倍に増加させた。円弧形シャフトモータ二号機の構造を図7に示す。また、電磁界解析ソフトウェアを用いた解析結果を図8に示す。図5と比べると、磁束密度の分布が大きく広がっている様子がわかる。このモデルに対して、固定子パイプをステンレスに変更し、内部の磁石を特注設計試作して、実際に製作を行った(図9)。

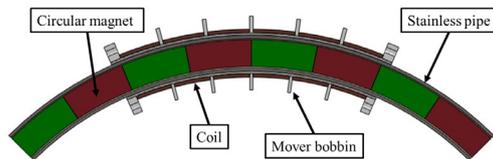


図7 円弧形シャフトモータ二号機の構造



図8 円弧形シャフトモータ二号機の電磁界解析結果

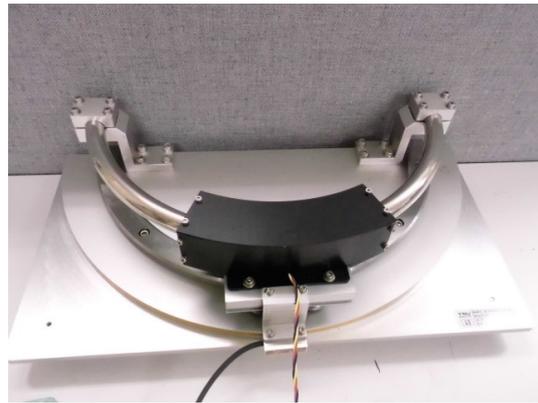
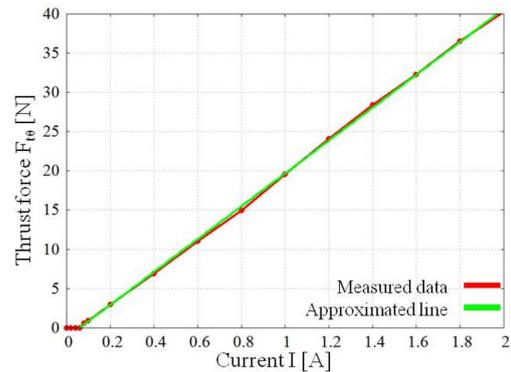
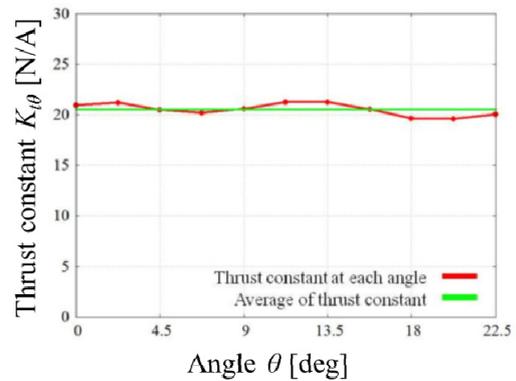


図9 円弧形シャフトモータ試験装置(二号機)



(a) 円弧形シャフトモータ二号機の中心位置での推力試験結果



(b) 円弧形シャフトモータ二号機の各角度における推力定数の測定結果

図10 円弧形シャフトモーター号機の推力特性試験結果

そして、推力特性試験を実施したところ、図10のような結果が得られた。推力定数は20.9 N/Aであり、巻数が2倍に増えたことを考慮すると、リング状の永久磁石から断面が台形状の円筒磁石に磁石形状を改良することで、約1.5倍の推力/体積比を得ることができた。最後に、図3に示した通り、円弧形シャフトモータ駆動による二自由度四軸バイラテラルプラットフォームを開発し、新しいアクチュエーション技術の基礎を確立できたことを示した。

## (2) 国際的インパクト

国際会議 IECON2013 で発表した円弧形シャフトモータの試作開発に関する論文の内容紹介記事と概要スライドが、IEEE Industrial Electronics Society の IE Technology News (<http://iee-ies.org/index.php/pubs/iten/latest>) に推薦を受けて掲載されるなど、国際的にも高い評価を得た。

## (3) 今後の展望

本研究課題を遂行する中で、ハプティック鉗子システムの多自由度化には、革新的なダイレクトドライブモータの開発が不可欠であるとの認識に至った。そして、本研究課題においては、鉗子のピッチ動作とヨー動作を実現する円弧形シャフトモータと、それに基づく二自由度プラットフォームの試作開発に成功した。この過程において、鉗子の直動動作とロール動作とを同時かつ独立に実現する二自由度ダイレクトドライブモータの開発という新たな着想を得た。この新規テーマについては、平成 26 年 4 月より基盤研究 (B) として既に研究を開始しており、独創的なダイレクトドライブモータ技術に基づいた多自由度ハプティック鉗子の実現を今後も継続的に目指す。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 3 件)

①富樫 信之, 山下 徹, 下野 誠通, 元井 直樹, 小田 尚樹, “作業空間オブザーバに基づく推定等価質量を用いた運動制御手法の有効性検証”, 電気学会論文誌産業応用部門誌, Vol. 134-D, No. 2, pp. 115-126, 2014. (査読有り)

DOI: 10.1541/ieejias.134.115

②Tomoyuki Shimono, Yoshiyuki Hatta, and Naoki Motoi, “Total Harmonic Distortion and Content Rate of Spatial Modal Information for Haptic Parallel Motion Analysis,” AUTOMATIKA, Vol. 54, No. 1, pp. 39-48, 2013. (査読有り)

DOI: 10.7305/automatika.54-1.300

③八田 禎之, 下野 誠通, “離散フーリエ級数展開に基づく運動モード分解”, 電気学会産業応用部門誌, Vol. 132-D, No. 3, pp. 366-372, 2012. (査読有り)

DOI: 10.1541/ieejias.132.366

[学会発表] (計 3 4 件)

① M. Omura, T. Shimono, Y. Fujimoto, “Thrust Characteristics Improvement of a Circular Shaft Motor for Direct-Drive Applications,” Proceedings of the 2014 International Power Electronics Conference (IPEC2014), pp. 1685-1690, 2014 年 5 月 20 日, 広島

② N. Togashi, T. Shimono, N. Motoi, and N. Oda, “Experimental Comparison of Design Methods for Equivalent Mass Matrix in Motion Control System Based on Workspace

Observer,” Proceedings of the IEEE 13th International Workshop on Advanced Motion Control, (AMC2014-Yokohama), pp. 669-674, 2014 年 3 月 16 日, 横浜

③ M. Omura, T. Shimono, and Y. Fujimoto, “Development of a Half-Circle-Shaped Tubular Permanent Magnet Machine,” Proceedings of the 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON2013), pp. 6112-6117, 2013 年 11 月 12 日, ウィーン (オーストリア)

④ T. Shimono, H. Ohkubo, C. Morito, Y. Hasegawa, Y. Sakurai, and S. Ishii “Experimental Evaluation for Individual Physical Function of Upper Limb Based on FEMS Theory,” Proceedings of IEEE Humanitarian Technology Conference (HTC2013), pp. 19-22, 2013 年 8 月 27 日, 仙台

⑤ T. Kenmochi, N. Motoi, T. Shimono, and A. Kawamura, “A Motion Control Method of Dual Arm Robot Based on Environmental Modes,” Proceedings of IEEE International Conference on Mechatronics (ICM2013), pp. 458-463, 2013 年 2 月 28 日, ヴィツェンツァ (イタリア)

⑥ N. Togashi, T. Shimono, and N. Motoi, “Performance Improvement of Bilateral Control with Multi-Degree-of-Freedom based on Disturbance Observer Design,” Proceedings of IEEE International Conference on Mechatronics (ICM2013), pp. 558-563, 2013 年 2 月 28 日, ヴィツェンツァ (イタリア)

⑦ H. Ohkubo and T. Shimono, “Motion Control of Mobile Robot by Using Myoelectric Signals Based on Functionally Different Effective Muscle Theory,” Proceedings of IEEE International Conference on Mechatronics (ICM2013), pp. 785-790, 2013 年 2 月 28 日, ヴィツェンツァ (イタリア)

⑧ T. Shimono and T. Yamashita, “A Suppression of Cut-off Frequency Fluctuation Based on Workspace Observer with Estimated Equivalent Mass for MDOF Bilateral System,” Proceedings of IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM2012), pp. 320-325, 2012 年 7 月 11 日, 高雄 (台湾)

⑨ N. Togashi, T. Shimono, and N. Motoi, “Manipulability Servoing Control in Null Space for Redundant Bilateral Control System with Different Degrees of Freedom,” Proceedings of IEEE International Workshop on Advanced Motion Control (AMC2012), pp. 1-6, 2012 年 3 月 26 日, サラエボ (ボスニア・ヘルツェゴヴィナ)

⑩ T. Shimono, Y. Hatta, and N. Motoi, "Total Harmonic Distortion of Haptic Modal Information for Analysis of Human Fingertip Motion," Proceedings of IEEE International Workshop on Advanced Motion Control (AMC2012), pp. 1-6, 2012年3月26日, サラエボ (ボスニア・ヘルツェゴヴィナ)

⑪ H. Ohkubo, T. Shimono, and N. Motoi, "Experimental Validation of Performance of Disturbance Observer Based on Comparison between Motion Control Frequency and Carrier Frequency," Proceedings of IEEE International Workshop on Advanced Motion Control (AMC2012), pp. 1-6, 2012年3月26日, サラエボ (ボスニア・ヘルツェゴヴィナ)

⑫ Y. Hatta, T. Shimono, and N. Motoi, "An Arrangement Identification Method for Parallel Multi-Degrees-of-Freedom Teleoperation Systems Based on Levenberg-Marquardt Method," Proceedings of IEEE International Workshop on Advanced Motion Control (AMC2012), pp. 1-6, 2012年3月25日, サラエボ (ボスニア・ヘルツェゴヴィナ)

⑬ T. Shimono, N. Togashi, N. Motoi, and A. Kawamura, "Manipulability Servoing in Null Space for Bilateral Motion Control of Redundant Manipulators," Proceedings of the 37th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON2011), pp. 168-173, 2011年11月9日, メルボルン (オーストラリア)

〔図書〕 (計0件)

なし

〔産業財産権〕

○出願状況 (計0件)

なし

○取得状況 (計0件)

なし

〔その他〕

ホームページ等

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

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

下野 誠通 (SHIMONO, Tomoyuki)

横浜国立大学・工学研究院・准教授

研究者番号：90513292

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

なし