

機関番号：12701

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2009 ～ 2010

課題番号：21760218

研究課題名（和文） 微小触覚情報記録のためのマイクロハプティクス技術の開発研究

研究課題名（英文） Research and Development on Micro Haptics Technology
for Recording of Imperceptible Haptic Information

研究代表者

下野 誠通 (SHIMONO TOMOYUKI)

横浜国立大学・工学研究院・助教

研究者番号：90513292

研究成果の概要（和文）：

本課題では、鋭敏な触覚フィードバックに基づく微細動作に対する工学的支援の実現を目指し、マイクロ／ナノメートル領域での高精度制御性能を有するハプティクス技術の開発研究を遂行した。本課題において得られた成果としては、主として次の五点が挙げられる。(1) マイクロハプティックシステムの試作開発を行った。(2) 触覚伝達特性に対する評価指標を新たに定義し、可変伝達率を考慮した新しい双方向制御手法を開発した。(3) 並列多自由度を有するハプティックシステムのための、離散フーリエ級数展開に基づく運動モード分解理論を確立した。(4) 異構造ハプティックシステムのための触覚情報伝達技術を開発した。(5) 実時間ネットワーク上での触覚伝送が可能な実験環境を構築した。

研究成果の概要（英文）：

This project aimed at the realization of engineering support for microscopic motion on the basis of haptic feedback control technique. Then, the research on new haptics technology which has high control performance in micrometer / nanometer scale was driven. The research achievements can be summarized as the following five points. (1) A prototype of micro haptic system was developed. (2) The performance index for haptic communication characteristic was newly defined. Then, a new bilateral control method taking variable transmission ratio into account was developed. (3) A new theory for motion modal decomposition based on discrete Fourier series expansion was established. (4) A new control technique for haptic communication between systems with different configuration was developed. (5) The experimental system for the network-based real-time haptic communication was developed.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	2,200,000	660,000	2,860,000
2010 年度	1,300,000	390,000	1,690,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：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

1. 研究開始当初の背景

今日までの科学技術の進歩によって、人間が持つ五つの感覚情報のうち、聴覚情報と視覚情報は様々な電気機器とネットワークを通じて、人工的に伝達、記録および再現することが可能である。このことが今日の情報化社会において巨大な産業を創出すると同時に、我々の生活を様々な形で支援していることは周知の事実である。しかしながら、聴覚情報および視覚情報に基づく人間支援の多くは、個人の非接触動作に対する支援ばかりであり、周囲環境との物理的インタラクションを伴った接触動作に対する直接的な支援の実現には至っていない。我々の日常行為の多くは周囲環境との接触を伴ったものであり、個人が満足に行為を遂行するためには触覚情報あるいは力覚情報が極めて不可欠な感覚情報となる。しかしながら今日までに、実際の触覚情報を伝達し、記録する工学技術が完成されているとは言い難い。したがって、将来の情報化社会において、個々人に対する身体的支援サービスを提供するためには、触覚情報および力覚情報を制御する新たな工学技術の開発が必要である。このような背景から、実際の触覚情報のリアルタイム伝送、デジタル記録、工学的再現に関する最先端科学技術である実世界ハプティクス技術の発展が強く望まれている。

2. 研究の目的

本研究では、鋭敏な触覚フィードバックに基づく微細動作に対する工学的支援の実現を目指す。そのための基礎技術として、マイクロ/ナノメートル領域での高精度制御性能を有するハプティクス技術を開発することを目的としている。

研究代表者はこれまでの基礎研究において、双方向力覚フィードバック技術を利用することで、ハプティックシステムが接触する環境の力覚動特性情報を数値データとして記録することに成功している。また、微小環境と人間の操作環境とをハプティックシステムを通じて工学的に繋ぎ、フィードバックされる力覚情報と人間の動作とを、任意に設計される伝達比に応じて拡大/縮小して伝送するためのマイクロ/マクロバイラテラル制御を開発してきた。しかしながら、これまでに開発した技術は一自由度に限定されたハプティックシステムにおける力覚情報技術に留まっているため、上記の目的を達成するためには、多自由度ハプティックシステムにおける鮮明な実世界触覚情報伝送と記録を実現するための、マイクロハプティクス技術を新たに開発する必要がある。

したがって、これまでに得られた学術的知見と成果を発展させ、新たなマイクロハプテ

ィクス技術を開発するために、本課題では以下の三つの具体的な開発研究目標を掲げている。

- (1) 多自由度マイクロハプティックシステムの試作開発
- (2) 多自由度マイクロハプティックシステムによる鋭敏な微小触覚情報伝達のための運動制御手法と可変伝達率理論の開発
- (3) マイクロハプティックシステムによる鋭敏な触覚情報記録技術の開発

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目標毎に、研究方法の概要について述べる。

- (1) 多自由度マイクロハプティックシステムの試作開発

これまでの実世界ハプティクスに関する研究成果により、鮮明な力覚情報を人工的に伝達・記録するためには、システムに実装する双方向制御手法のみならず、ハプティックシステム自体もまた、時間的かつ空間的な透明性を有する必要があるとの知見を得た。この知見を基に、平成21年度においてはまず始めに、高い透明性を有した多自由度マイクロハプティックシステムの設計と試作を行う。研究期間内において新たに開発したハプティクス技術の実証実験には、この多自由度マイクロハプティックシステム試作機を用いる。

- (2) 多自由度マイクロハプティックシステムによる鋭敏な微小触覚情報伝達のための運動制御手法と可変伝達率理論の開発

多自由度ハプティックシステムを通じた微細動作に対する工学的支援を実現するためには、システム内での時間的および空間的な触覚情報変換が必要となる。これを実現するものが可変伝達率である。そこで平成21年度から平成22年度にかけて、触覚フィードバック性能と時間的分解能、空間的分解能、および可変伝達率との関連性について調査する。この結果を受けて、平成22年度には、システム全体の複雑な運動を独立かつ物理的意味を持った要素へと分解し、記述することが可能な運動モード分解理論を確立する。これらの成果を発展させることで、多自由度システムの制御系設計の見通しを明るくし、鮮明な微小触覚情報伝達を実現することを目指す。

- (3) マイクロハプティックシステムによる鋭敏な触覚情報記録技術の開発

接触環境や人間動作に関する触覚情報のデジタル記録のための基礎技術研究を実施する。平成21年度では、接触環境の触覚動特性の抽出手法や触覚情報に基づいた人間動作の認識・解析手法の基礎研究を行う。

また平成22年度では、平成21年度に開発した触覚情報のデジタル記録技術を発展させ、抽出データからの触覚情報の再現手法に関する研究を行う。

4. 研究成果

本課題において得られた成果としては、主として次の五点が挙げられる。

- ・マイクロハプティックシステムの試作開発
- ・可変伝達率を考慮した新しい双方向制御手法の開発
- ・並列多自由度ハプティックシステムのための運動モード分解理論の確立
- ・異構造ハプティックシステム間での触覚情報伝達の実現
- ・時間分解能が異なるサブシステム間でのリアルタイム触覚伝送実験の実施

(1) マイクロハプティックシステムの試作開発

高い触覚伝達特性を有したマイクロハプティックシステムの機構設計と試作機の開発を行った。ハプティックシステム内の摩擦やギアの介在および機構の遊び等といった機械的要因が、触覚伝達特性を劣化させることがこれまでの研究より明らかになっているため、本試作機ではアクチュエーション部にシャフトモータと低摩擦のリニアスライドから構成されるダイレクトドライブ方式を採用した。また、力信号の測定には力センサを用いず、外乱オブザーバによる広帯域な力センサレス制御を実装することで、DCから200Hz以上の周波数帯域での伝送性能を実現した。また、 $0.1\mu\text{m}$ および $0.01\mu\text{m}$ という高い空間分解能を持つ光学式エンコーダを実装することで、高精度制御が可能なシステムを構築した。マイクロハプティックシステム試作機を駆動する制御装置も併せて新たに製作し、RTAI上で時間分解能0.1msの実時間制御実験を行うことで、試作機の運動制御性能の評価を行った。

(2) 可変伝達率を考慮した新しい双方向制御手法の開発

力覚伝達特性に対する評価指標を新たに定義し、この性能評価指標に基づくことで可変伝達率を考慮した新しい双方向制御系を設計した。本制御系には、加速度次元情報のフィードバックループが新たに付加されており、この制御ループによって可変伝達率を実装した場合において力覚伝達特性が向上する可能性があることを理論的に示した。また、試作機を用いた検証実験により、その有効性を確認した。

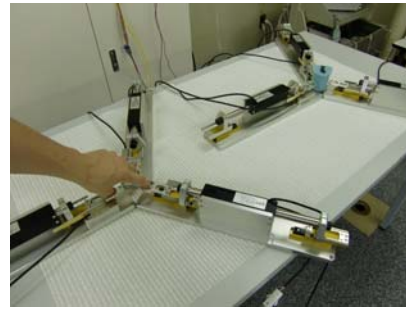
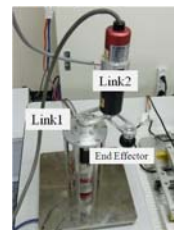


図1 並列多自由度を有するマイクロハプティックシステム試作機

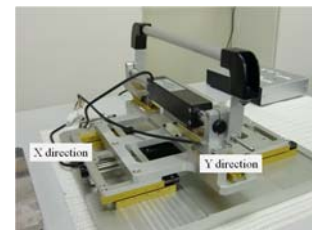
(3) 並列多自由度ハプティックシステムのための運動モード分解理論の確立

並列多自由度を有するハプティックシステムの運動を、物理的意味を持った独立な運動要素に分解表現するための、離散フーリエ級数展開に基づく運動モード分解理論を確立した。本理論によって、①複雑な並列多自由度システムの運動を、空間的な直流成分と交流成分との組み合わせとして、簡単な実数演算のみで記述できること、②システムの配置が空間的な対称性を有していない場合にも運動モード分解が適用可能であること、を示した。また、試作したマイクロハプティックシステムを並列多自由度化した実験機を用い、これらの有用性を実証した(図1)。

(4) 異構造ハプティックシステム間での触覚情報伝達の実現
構造が異なるハプティックシステム間での触覚情報伝達技術を開発した。それぞれのシステムの運動学を考慮したハプティックエネルギー変換を達成することで、異構造システム間でも鋭敏な触覚伝送が可能であるとの知見を得た。二自由度を有する異構造型ハプティックシステム試作機を用いた実験により、開発技術の有効性を確認した(図2および図3)。

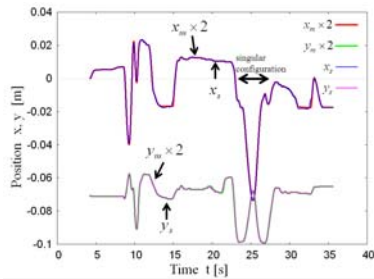


(a) シリアルリンク型サブシステム

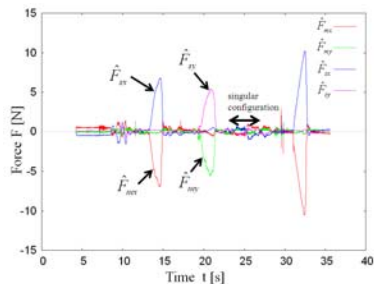


(b) X-Yテーブル型サブシステム

図2 二自由度異構造ハプティックシステム



(a) 手先効果器先端における位置応答
(位置追従の実現)



(b) 手先効果器先端における力応答
(作用・反作用の法則の人工実現)

図3 異構造ハプティックシステムでの
触覚伝送実験結果

(5) 時間分解能が異なるサブシステム間でのリアルタイム触覚伝送実験の実施

マイクロハプティックシステム試作機にインターネットを利用した通信制御系を実装することで、実時間ネットワーク上での触覚伝送が可能な実験環境を構築した(図4)。また、ハプティックシステム間の時間分解能が異なる場合には、特有の追従誤差と力フィードバック性能の劣化が生じることを実験的に明らかにした。さらに、これらの触覚伝送性能劣化を改善するモード空間外乱オブザーバを開発し、その有用性を実験実証した。

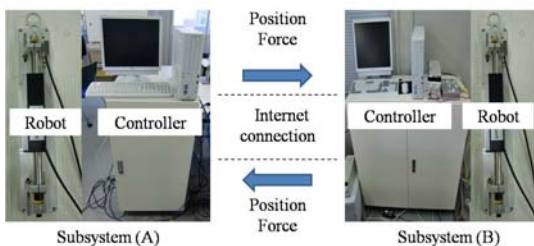


図4 インターネットを利用した
マイクロハプティックシステムの実験環境

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1件)

① 山下徹, 下野誠通: “異構造型マスタ・スレーブシステムにおける力センサレスバイラテラル制御に関する一考察”, 電気学会論文誌産業応用部門誌, 査読有, Vol. 131-D, No. 6, 2011 (掲載決定)

[学会発表] (計17件)

① Yoshiyuki Hatta and Tomoyuki Shimono, “Estimation Method of Arrangement of Sensing Points based on Discrete Fourier Series Expansion,” Proceedings of IEEE International Conference on Mechatronics, ICM2011, 13th April, 2011, Istanbul Technical University, Turkey

② 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”, 平成23年電気学会産業計測制御研究会, IIC-11-120, 2011年3月9日, 千葉工業大学

③ 能勢陽太郎, 下野誠通, “異なる時間分解能を有するサブシステム間触覚通信のためのモード空間外乱オブザーバ”, 平成23年電気学会産業計測制御研究会, IIC-11-033, 2011年3月8日, 千葉工業大学

④ 富樫信之, 下野誠通, “冗長性を有する異構造バイラテラルシステムの運動制御に関する一考察”, 平成23年電気学会産業計測制御研究会, IIC-11-045, 2011年3月8日, 千葉工業大学

⑤ Yoshiyuki Hatta and Tomoyuki Shimono, “Bilateral Motion Control based on Spatial Frequency Decomposition with Discrete Fourier Series Expansion,” Proceedings of the 8th France-Japan and 6th Europe-Asia Congress on Mechatronics, EAM2010, pp. 29-34, 22nd November, 2010, Keio University, Yokohama

⑥ 下野誠通, “力覚フィードバック制御技術とその医療支援応用”, 計測自動制御学会中部支部電機計測制御技術ワーキングセミナー, 電気学会東海支部新世代パワーエレクトロニクス技術の新展開, 2010年11月19日, 名古屋工業大学

⑦ 下野誠通, 八田禎之, “身体機能の延伸支援に向けた実世界ハプティクス”, 第28回日本ロボット学会学術講演会, 2K1-6, pp. 1-4, 2010年9月23日, 名古屋工業大学

⑧ 下野誠通, 山下徹, “異構造システム間でのハプティックインタラクションのための作業空間に基づくバイラテラル制御”, 第28回日本ロボット学会学術講演会, 1K1-3, pp. 1-4, 2010年9月22日, 名古屋工業大学

⑨ 八田禎之, 下野誠通, “異配置型バイラ

テラルシステムのための離散フーリエ級数展開に基づくモード制御”，第28回日本ロボット学会学術講演会，1K3-2，pp. 1-4，2010年9月22日，名古屋工業大学

⑩ 山下徹，下野誠通，“異構造型バイラテラルシステムのための等価質量推定値を用いた作業空間オブザーバに基づく遮断周波数変動抑制”，平成22年度電気学会産業応用部門大会，Vol. 2，pp. 433-438，2010年8月26日，芝浦工業大学

⑪ Tomoyuki Shimono，Kazuyoshi Nezu，and Mitsuo Aboshi，“Variable Contact Force Control based on Reaction Force Control with Adjustment Ratio,” Proceedings of the IEEJ 2010 International Power Electronics Conference - ECCE Asia -, IPEC-Sapporo 2010，pp. 2545-2550，24th June，2010，Sapporo

⑫ Tomoyuki Shimono and Atsuo Kawamura，“Realization of Bilateral Haptic Communication between Different DOF Systems based on Clarke Transformation,” Proceedings of the 11th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control，AMC2010，pp. 703-708，24th March，2010，Nagaoka University of Technology，Nagaoka

⑬ ルシン，下野誠通，“RLS アルゴリズムを用いた環境インピーダンス推定に基づく環境識別”，平成22年度電気学会産業計測制御研究会，IIC-10-152，2010年3月9日，東京農工大学

⑭ 山下徹，下野誠通，“異構造型マスタ・スレーブシステムにおける力センサレスバイラテラル制御に関する一考察”，平成22年度電気学会産業計測制御研究会，IIC-10-025，2010年3月8日，東京農工大学

⑮ 八田禎之，下野誠通，“ハイブリッド行列に基づくスケーリング項を付加したバイラテラル制御に関する一考察”，平成22年度電気学会産業計測制御研究会，IIC-10-026，2010年3月8日，東京農工大学

⑯ Tomoyuki Shimono and Kouhei Ohnishi，“Identification of Contact Condition based on Modal Motion Stiffness by Bilateral Motion Control,” Proceedings of the 35th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society，IECON '09，pp. 3126-3131，3rd November，2009，Porto，Portugal

⑰ 下野誠通，“医療福祉支援のための実世界ハプティクス技術”，第27回日本ロボット学会学術講演会，1H1-08，pp. 1-4，2009年9月15日，横浜国立大学

〔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・助教
研究者番号：90513292

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし