

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 26 日現在

機関番号：12701

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K13922

研究課題名(和文)位置と力の同時推定による超小型感触ディスプレイの実現

研究課題名(英文)Realization of very small haptics display under simultaneous estimation of force and position

研究代表者

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の成果の特徴は以下である。(1)表面感触提示器の基本構成要素となる1次元アクチュエータのセンサレス化に取り組むとともに回路改善や周波数フィルタ導入による推定の高速化を行い、位置推定のカットオフ周波数が10Hz程度まで向上した。(2)この要素アクチュエータを2つ用いて、位置と力のバイラテラル(マスター・スレイブ)制御システムを構築した。(3)複数台のアクチュエータの振る舞いに関して理論解析を行い、基本特性を解析した。(4)2次元アクチュエータの実験器を製作したが、サイズが大きくなった。(5)幅4mm、横4mmで高さ28mm、推力約50mNの2固定子1移動子型のリニアアクチュエータを試作した。

研究成果の概要(英文)：The essence of this research can be summarized as follows. (1) As a unit element of the 2D surface haptics actuator, a new position senseless scheme was proposed, and the fast estimation of force and position was realized by the improvement of filters and circuits. As a result the cut off frequency of approximately 10 Hz was achieved as for the position response. (2) A bilateral control of the position and force was realized using two of unit elements of above mentioned haptics actuators. (3) A theoretical analysis of the plural actuators is performed and the basic characteristics are clarified. (4) A prototype of 2D actuator was constructed, but the size became large. (5) As for candidate of a small actuator, one stator and 2 stators type small actuator was experimentally constructed. The size is 4 mm length, 4 mm width and 28 mm height.

研究分野：工学

キーワード：アクチュエータ ハプティクス バイラテラル

1. 研究開始当初の背景

人間は皮膚表面で知覚される触覚によって、接触物体を認識し、日々の多様な作業をこなしている。そのため、視覚通信（テレビ等）や聴覚通信（電話等）に次ぐ第3の通信として、触覚通信が切望されている。しかし、世界各国で触覚提示装置の研究開発が盛んに進められているものの、アクチュエータの小型化が課題となり、表面触覚の提示には至っていない。

申請者はこれまでにパワーエレクトロニクスを中心とした機械エネルギーと電気エネルギーの双方向変換に関する研究（文献1：河村 篤男，横山 智紀，船渡 寛人，星 伸一，吉野 輝雄：“パワーエレクトロニクス学入門 - 基礎から実用例まで -”，コロナ社，2009.）を基盤に、触覚通信に関する研究（文献2：元井 直樹，下野 誠通，久保 亮吾，河村 篤男：“操作性向上のための機能分解による異自由度ロボット間バイラテラル制御”，日本ロボット学会誌，Vol. 31，No. 7，pp. 651-658，2013.）を推進している。これらの研究背景より、デバイスの小型化が触覚通信の突破口であり、位置・力センサレスな超小型デバイスの創出が必要不可欠であるとの着想に至った。

2. 研究の目的

人間は皮膚表面で知覚される触覚によって、接触物体を認識し、多様な作業をこなしている。世界的に触覚提示装置の研究開発が進められているが、アクチュエータの小型化が課題となり、表面触覚の提示には至っていない。本研究では、アクチュエータのインダクタンス変化によって状態を推定するという新原理と、それによるセンサレス化・超小型化という斬新なアイデアのもと、位置と力を同時制御可能な2次元表面触覚提示器の実現にチャレンジする。目標達成のため A. 超小型軽量1次元センサレスアクチュエータの実現、B. 2次元表面触覚提示器の製作、C. 複数アクチュエータの統合運動制御理論の確

立に取り組む。本装置の実現は、触覚を取り扱う新たな分野を切り開く学術的突破口となりうる。また、インタフェース機器として巨大な新市場を生むことが予想される。

3. 研究の方法

●第一期（平成27年度）では2次元表面触覚提示器の構成要素となるA. 超小型軽量1次元センサレスアクチュエータの開発に取り組む。上述したセンサレス化の新理論を検証するとともに実証実験を実施する。●第二期（平成28年度前期）では1次元アクチュエータのさらなる小型化を進めるとともに、統合を行い、B. 2次元表面触覚提示器の製作に取り組む。●第三期（平成28年度後期）では複数台の1次元センサレスアクチュエータからなる2次元表面触覚提示器を用いて、C. 複数アクチュエータの統合運動制御理論の確立に取り組む。アクチュエータ間の非干渉化と、連携した運動制御を行うことで、高精細な平面触覚の伝達を実現する。また、最終的に評価試験を実施する。

4. 研究成果

平成27年度では、表面触覚提示器の基本構成要素となる1次元アクチュエータのセンサレス化に取り組むとともに、回路改善や周波数フィルタ導入による推定の高速化を行った。本研究課題は、“駆動用の低周波信号に高周波信号を重畳することで得られるインダクタンス値より位置の推定を行う”という新原理に基づいている。

具体的には、1個のソレノイドアクチュエータに対し、まず基本性能試験を実施した。直流電圧と高周波電圧を重畳してソレノイドに印可し、測定した電流から直流値と交流値をFFTを用いて分離した。提案している理論式により、交流のインダクタンスを推定計算した。この値は実測値と比較して精度の高い推定値となっていることを確認した。ただし、直流電流値により、磁束の飽和が生じ、インダクタンスは一定ではないので、その補正手法を提案し実装した。また、直流電流と

吸引力の関係の実測データから、直流電流値がわかれば吸引力が高い精度で求まることを確認した。これにより、電流値の検出から、ロータの位置と吸引力が1ミリ秒のサンプル周期で推定できることを確認した。また、周波数特性の測定データによれば、位置推定のカットオフ周波数は約 30 Hz、力の推定のカットオフ周波数は、数 Hz であることを実験で確認した。

次に、この要素アクチュエータを2つ用いて、位置と力のバイラテラル（マスター・スレイブ）制御システムを構築した。その性能測定結果、表面触覚器の要素としての基本性能を有することを実験的に確認した。

H28年度は、位置と力のバイラテラル（マスター・スレイブ）制御システムの高性能化を進めた。周波数特性を向上させるには、ソレノイドの摩擦係数が一番効いていることが分かったので、その改善を行った。

複数台のアクチュエータの振る舞いに関しては、2次元的に隣り合うアクチュエータに仮想的なばねがある場合を想定して、理論解析を行った。形としては、波動方程式が求まった。さらに、5×5でシミュレーションを行い、波の伝搬などを確認した。

次に、2次元アクチュエータの1次実験器を製作したが、サイズが大きくなり、2次元ハプティクス機器としてはさらなる小型化が求められるとの結論になった。

そこで、昨年度後半から準備を進めていた小型リニアアクチュエータの研究も並行して進めた。幅4mm、横4mmで高さ28mmの2固定子1移動子型のリニアアクチュエータを試作した。1mmのストロークを通して約50mNの力を実測した。

2年間の成果をまとめると、以下になる。

(1) 表面感触提示器の基本構成要素となる1次元アクチュエータのセンサレス化に取り組むとともに、回路改善や周波数フィルタ導入による推定の高速化を行った。(2) この

要素アクチュエータを2つ用いて、位置と力のバイラテラル（マスター・スレイブ）制御システムを構築した。(3) 複数台のアクチュエータの振る舞いに関して理論解析を行った。(4) 2次元アクチュエータの実験器を製作したが、サイズが大きくなった。(5) 幅4mm、横4mmで高さ28mm、推力約50mNの2固定子1移動子型のリニアアクチュエータを試作した。

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 3件)

- [1] Sho Masuyama, Takuya Noguchi, Atsuo Kawamura, “Electromagnetic Linear Actuator with Two Stators and One Rotor for Tactile Display”, IEEJ Journal of Industry Applications”, Vol.6, No.2, pp.160-164, 2017 (DOI:10.1541/ieejia.6.160) (査読あり)
- [2] S.Nagai, T. Nozaki, A.Kawamura, “Environmental robust position control for compact solenoid actuators by sensorless simultaneous estimation of position and force”, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 63, No. 8, pp. 5078-5086, 2016. (DOI: DOI: [10.1109/TIE.2016.2546847](https://doi.org/10.1109/TIE.2016.2546847)) (査読あり)
- [3] S. Nagai, T. Nozaki, A. Kawamura, “Real-time sensorless estimation of position and force for sinusoidal actuators”, IEEJ Journal of Industry Applications”, Vol.5, No.2, pp.32-38, 2016 (DOI:10.1541/ieejia.5.32) (査読あり)

[学会発表] (計 4件)

- [1] Sakahisa Nagai and Atsuo Kawamura :

“Realization of bilateral control by compact solenoid actuators without position and force sensors”, 2016 IEEE 14th International Workshop on Advanced Motion Control (AMC2016, Auckland, New Zealand), No. 460, pp. 180-185, April 22, 2016.

[2] Sakahisa Nagai and Atsuo Kawamura, “Simulations of 2D Tactile Display Using Compact Solenoid Actuators,” The 2nd IEEJ International Workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization, (SAMCON2016, Tokyo, Japan), No. 1076, March 7, 2016

[3] Sakahisa Nagai, Takahiro Nozaki, and Atsuo Kawamura (Yokohama National University): “Real-time Position Sensorless Estimation of and Force of Solenoid Actuator for Haptic Devices”, 17th Conference on Power Electronics and Applications, (EPE'15 - ECCE Europe, Geneva, Switzerland), pp. 1-9, 134, Panel B3.1, Sept. 8, 2015.

[4] 永井栄寿 , 野崎貴裕, 河村篤男 : “磁気回路モデルを用いた小型ソレノイドアクチュエータのセンサレス位置推定, 平成 27 年電気学会産業応用部門大会 (大分) , No. 3-84, pp. III-397-III-398, 2015 年 9 月 2 日

[その他]

ホームページ等

www.kawalab.dnj.ynu.ac.jp

6. 研究組織

(1) 研究代表者

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