

平成 30 年 6 月 20 日現在

機関番号：13102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05934

研究課題名(和文)任意物体の精細な触覚情報を保存・再現する高臨場感触シミュレータの開発

研究課題名(英文) Development of a Fine Haptic Simulator for Storage and Reproduction of Real-world Objects

研究代表者

横倉 勇希 (Yokokura, Yuki)

長岡技術科学大学・工学研究科・助教

研究者番号：70622364

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：マイクとスピーカ、カメラとディスプレイに代表される様々な音響映像・画像機器に関する研究開発が大きく進んだことで、あらゆる状況における視聴覚情報の保存と再生が可能となったが、人間には視覚と聴覚のみならず触覚・力覚器官も備わっているにも関わらず、未だ方今の科学技術では触覚・力覚情報については扱え切れていないのが現状である。そこで本研究では、非線形な力学的特性を考慮した触覚保存・再現アルゴリズムを開発し、さらに、モータ駆動用低雑音・高精度・高効率なダイオードクランプリニア増幅器を開発した。本技術の確立により、産業分野や医療分野、介護福祉分野において有用な高臨場感触シミュレータが実現可能となる。

研究成果の概要(英文)：In this research, we developed the fine reproduction system for the environmental haptic sensations of target objects. In order to overcome the problems of conventional systems, we proposed a new reproduction system of haptic sensations based on momentum control. Moreover, we proposed a new diode-clamped linear amplifier (DCLA) topology using only n-channel MOSFETs. Because the DCLA uses multilevel topology and active state of MOSFETs, noise levels of output voltage of the proposed DCLA is lower than general pulse width modulation(PWM) inverters. Additionally, this research also proposed a method of voltage feed-back control, which is capable of compensating crossover distortion of the DCLA. The output voltage of the DCLA has crossover distortion that causes the increase of voltage error and total harmonic distortion. Therefore, we achieved the very fine, low noise, high efficiency motor drives. The effectiveness of the proposed method is confirmed by experiments and analysis.

研究分野：Motion control, Power electronics, Haptics

キーワード：Force control Impedance control Momentum control Admittance control Linear amplifier

1. 研究開始当初の背景

音声や画像を扱う技術が発展し、視聴覚情報の保存と再現が可能となっているが、触覚情報の保存と再現の研究については十分になされているとは言い難い状況にある。そこで、我々の研究グループでは、人間の触覚器官に働きかける触覚情報に関する技術開発を行っており、これまでに物体感触を保存し、再現する手法の研究開発を実施している。

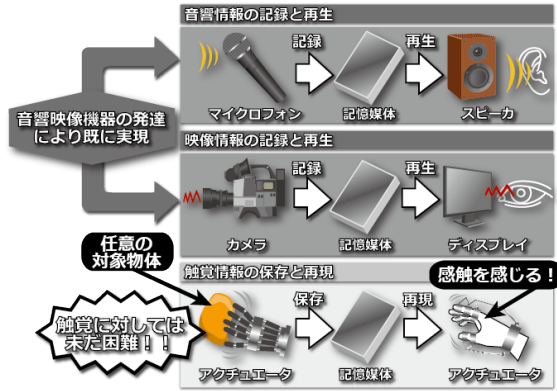


図1 音声，画像，触覚の保存と再現

触覚保存フェーズでは、任意物体に対してモータによって力を加えて変形させ、得られた力と位置を様々な解析手法を用いた上で、触覚情報として記憶媒体に保存し、感触が格納される。再現フェーズでは、記憶媒体に格納された力とオペレータの手先位置に従ってモータを駆動し、オペレータの触覚器官を刺激することで感触を伝える。すなわち、モータが対象物体の物理特性を模擬し、感触を再現する。本手法により、感触の保存と再現がある程度までは可能であることが確認され、音声や映像と同様に、触覚感覚も情報として取り扱える確証が得られていた。

2. 研究の目的

前節で述べたように、感触の保存と再現がある程度までは可能になっていたものの、実世界の様々な物体の触覚情報の保存と再現については、対象物体の複雑さに加え、アクチュエータ制御システムの制御性能が課題となり、困難を極めていた。そこで本研究では、新しい触覚解析・制御アルゴリズムによって実現し、加えてダイオードクランプリア増幅器(DCLA)を用いたモータ駆動手法を開発することで、従来から問題であった力制御性能を大幅に向上させる。最終的には、提案技術により産業・医療分野において有用な高臨場感触覚シミュレータを開発する。

3. 研究の方法

実世界の任意物体の感触の保存と再現に際して以下の2つの課題が明らかとなった。

- 課題1 剛性と粘性が位置で複雑に変化
- 課題2 力制御系の制御性能の問題

課題1 に対しては、対象物体の非線形バネ特性を考慮した物理モデルに基づく力応答

の解析、保存・再現アルゴリズムを開発することで解決した。課題2 に対しては、産業界で一般的に用いられている従来の力制御系の制御帯域が狭いために起こる問題であるため、力応答を力指令に広い周波数帯に亘って高速に追従させるための技術開発に尽力した。上記課題に対して、新しく提案する手法の有効性を理論的観点および実機実験の双方から検証し、触覚感覚の再現性の大幅な向上に有用であることを明らかにした。

4. 研究成果

触覚感覚の高精細な保存と再現のためには、研究目的で述べたように対象物体の環境剛性が位置に従って複雑に変化する問題と力制御系の制御性能に起因する問題の2つの課題を解決する必要がある。そこで、「非線形バネ特性を考慮した感触保存・再現アルゴリズムの開発」と「広帯域力制御系のためのモータ駆動手法の開発」によってそれぞれ解決を目指した。

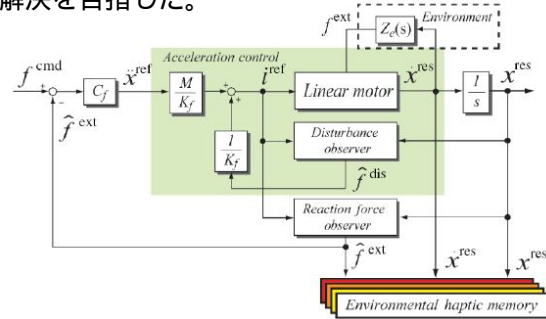


図2 触覚保存フェーズの制御ブロック図

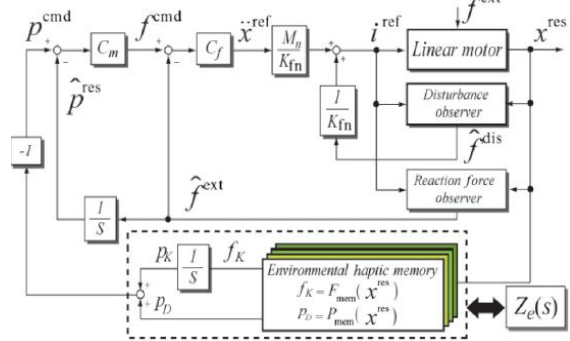


図3 本研究で新たに提案した触覚再現フェーズの制御ブロック図

前述の課題1 については、まず、対象物体の位置と力の取得アルゴリズムを検討した。図2 に示す保存フェーズの力制御系によって取得した物体の力情報から、バネ成分が発生させる剛性力と粘性摩擦成分が発生させる粘性力とに離散周波数変換(DFT)に基づいて分離し、「力の生データ」から触覚情報を保存する手法を開発した。再現フェーズにおいては、高精度な感触再現のための運動量制御について検討を行った。単純な力制御ではなく、図3 に示すように力制御系を内部ループに持つ運動量制御系を新たに提案し、微分演算に起因する雑音を抑制し、正確な触覚情報

をオペレータに呈示可能となることを明らかにした。

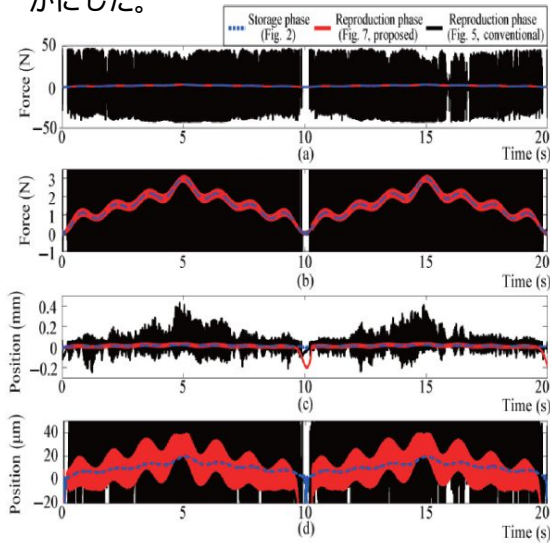


図4 触覚保存と再現フェーズの実験結果

図4に触覚の保存と再現の実験結果を示す。図中の上2段が力、下2段が位置であり、青破線が保存フェーズを示す。黒線は従来手法を示しており、力と位置が再現できていないことが分かる。一方で、赤線は提案手法を示しており、運動量制御系によって微分ノイズが劇的に抑制できていることが確認できる。従って、本研究開発によって高精度な触覚の保存と再現が可能となった。

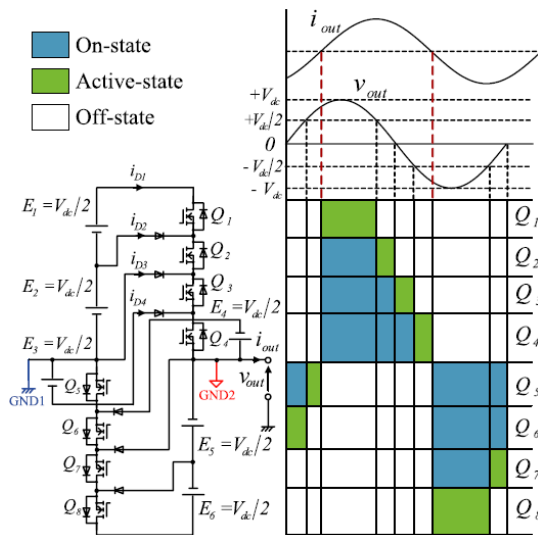


図5 本研究で新たに提案したDCLA

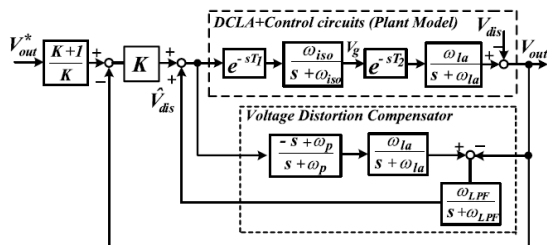


図6 本研究で新たに提案したDCLA用電圧ひずみ補償器付き電圧制御系のブロック図

課題2の「広帯域力制御系のためのモータ

駆動手法の開発」では、図5と6に示す低雑音・高精度・高効率なDCLAと電圧ひずみ補償法を開発した。従来の交流サーボモータの駆動に用いられるパルス幅変調(PWM)インバータでは、スイッチングノイズが発生し、力制御系の帯域が制限され、結果的に繊細な触覚情報の保存と再現が困難になる。一方、DCLAはMOSFETの飽和領域と能動領域を適宜利用する構成となっており、スイッチングノイズが一切出力されないため低雑音である。また、電源を多段に構成することでMOSFETの電力損失を抑制し、従来のリニアアンプよりも高い電力効率を持つ。PWMインバータの場合ではキャリア周波数により帯域が制限されるが、DCLAではPWM動作は行われなため制限されず、広帯域で且つ高効率・低雑音なモータ駆動が可能となった。

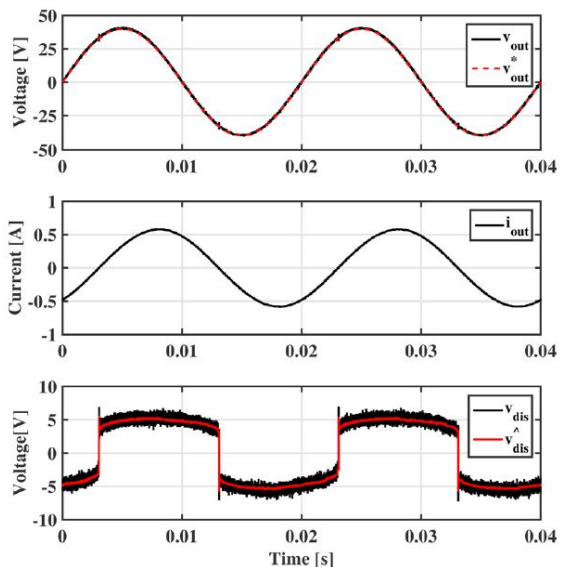


図7 提案DCLAと制御系の実験結果

図7にRL負荷をDCLAに接続した実験結果を示す。出力電圧および電流ともに極めて綺麗な正弦波が得られていることが分かる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計4件)

1. Y. Asai, Y. Yokokura, K. Ohishi : "Fine Force Reproduction of Environmental Haptic Sensations Based on Momentum Control," IEEE Trans. on Ind. Electron., Vol. 63, No. 7, pp. 4304-4313, Jul. 2016. DOI: 10.1109/TIE.2016.2531019
2. Y. Yokokura, Y. Asai, K. Ohishi : "Fine Reproduction of Haptic Sensations for High-Stiffness Environment Considering Mechanical Admittance," IEEJ J. Ind. Appl., Vol. 5, No. 6, pp. 439-440, Nov. 2016. DOI: 10.1541/ieejia.5.439
3. Y. Asai, Y. Yokokura, and K. Ohishi : "Mechanical Admittance Realization

Control Based on Feedforward Compensation for Fine Realization of Impedance," IEEJ J. Ind. Appl., Vol. 6, No. 2, pp. 83-90, Mar. 2017.

DOI: 10.1541/ieejia.6.83

4. 河井 伸哉, 横倉 勇希, 大石 潔, 芳賀 仁 : 「n 型 MOSFET のみを用いたダイオードクランプリニアアンプとクロスオーバー歪み補償法」, 電学論 D , Vol. 138-D, No. 2, pp. 141-149, Feb. 2018.

[学会発表](計 14 件)

1. Y. Asai, Y. Yokokura, K. Ohishi, "Storage and reproduction of environmental haptic sensations considering resolution of encoder," JSME/ASME Joint Conf. on Micromechatronics for Inform. and Precision Equipment MIPE, 2015
2. Y. Asai, Y. Yokokura, K. Ohishi, "Superiority of Admittance Control System in Mechanical Impedance Implementation of High-Stiffness Environment," The 13th IEEE Int. Conf. on Ind. Inform. INDIN, 2015
3. Y. Asai, Y. Yokokura, K. Ohishi, "Reproduction of Haptic Sensations For High-Stiffness Environment Considering Mechanical Admittance," The 41th Annual Conf. of the IEEE Ind. Electron. Society , 2015
4. Y. Yokokura, K. Ohishi, K. Saito, A. Shimamoto, Y. Yamamoto, "Verification of Load-Side Acceleration Control for a 2-Inertia Resonant System with a Torsion Torque Sensor," The IEEE/SICE Int. Sym. on Sys. Integration SII, 2015
5. Y. Asai, Y. Yokokura, K. Ohishi, "Mechanical Admittance Control Based on Feedforward Compensation for Fine Realization of Impedance," The 2nd IEEJ Int. Workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization SAMCON, 2016
6. Y. Kawai, Y. Yokokura, K. Ohishi, K. Saito, A. Shimamoto, "High Back-drivable Pseudo I-PD Torque Control Using Load-side Torque Observer With Torsion Torque Sensor," The 14th IEEE Int. Workshop on Advanced Motion Control AMC, 2016
7. Y. Yokokura, K. Ohishi, Y. Kawai, "Load-side Acceleration Control of a 2-Inertia Resonant System for Fine Torque Servoing," The 25th IEEE Int. Sym. on Ind. Electron. ISIE, 2016
8. Y. Kawai, Y. Yokokura, K. Ohishi, P. Boonwong, "High-Robust Acceleration Control Using Force and Position

Sensors Integrated Disturbance Observer," The 42th Annual Conf. of the IEEE Ind. Electron. Society IECON, 2016

9. Y. Yokokura, K. Ohishi, "Single Inertialization of a 2-Inertia System Based on Fine Torsional Torque and Sensor-based Resonance Ratio Controllers," The IEEE Int. Conf. on Mechatronics ICM, 2017
10. Y. Kawai, Y. Yokokura, K. Ohishi, T. Miyazaki, "Design Strategy of MIMO System Based on Bidirectional Drivability Matrix," The 3rd IEEJ Int. Workshop on Sensing Actuation Motion Control and Optimization SAMCON, 2017
11. Y. Yokokura, K. Ohishi, "Robust Stability Analysis of Load-side Inertia Variation in Torsion Torque Control with a Resonance Ratio Controller," The 3rd IEEJ Int. Workshop on Sensing Actuation Motion Control and Optimization SAMCON, 2017
12. Y. Kawai, Y. Yokokura, K. Ohishi, P. Boonwong, "Analysis and Realization of Robot Actuator Based on Bidirectional Drivability Matrix," The 20th World Congress The Int. Fed. of Autom. Cont. IFAC, 2017
13. Y. Yokokura, K. Ohishi, "Fine Torsion Torque Control for Vibration Suppression of Load-side Acceleration and Its Internal Stability," The 4th IEEJ Int. Workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization SAMCON, 2018
14. Y. Kawai, Y. Yokokura, K. Ohishi, Toshimasa Miyazaki, "Forward-back and Back-forward Drivable Controls for Human-robot Interaction," The 15th IEEE Int. Workshop on Advanced Motion Control AMC, 2018

[その他]

ホームページ等 <http://sidewarehouse.net>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

横倉 勇希 (YOKOKURA, Yuki)

長岡技術科学大学・電気電子情報工学専攻・助教

研究者番号 : 70622364

(2) 研究分担者

大石 潔 (OHISHI, Kiyoshi)

長岡技術科学大学・技術科学イノベーション専攻・教授

研究者番号 : 40185187