

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 19 日現在

機関番号：13102

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25820101

研究課題名(和文)人間の感覚帯域を完遂する高精細広帯域な力覚情報の保存と再現

研究課題名(英文)High-precision and Wideband Storage and Reproduction of Human Motion

研究代表者

横倉 勇希 (Yokokura, Yuki)

長岡技術科学大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：70622364

交付決定額(研究期間全体):(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文): 操作者の動作の保存と再現を可能とするモーションコピーシステムには未だ多くの課題があり,本研究では周波数帯域と正確性に対して解決を図った。力覚情報を漏れなく保存・再現するためには広帯域な力制御系と高速な電流制御が必須となる。また, PWMインバータはスイッチングノイズを生じるため, モータ推力に雑音が入り力覚の保存・再現の正確性が損なわれる。そこで本研究では, 電力効率のみを重視したPWMインバータではなく, ダイオードクランプリニアアンプ(DCLA)を開発し, 電流制御および力制御への有用性を理論面および実機実験により検証し, 広帯域な電流制御と高精細な力制御が可能であることを確認した。

研究成果の概要(英文): Motion-copying system, which is capable of storing and reproducing motions of human operators, still has problems with regard to frequency bandwidth and accuracy of motion representation. A wideband force control system and very fast current controller are required in order to completely store and reproduce haptic information. In this research, diode-clamped linear amplifiers(DCLAs) for low-noise and fine sensorless force control were developed. The typical pulse width modulation(PWM) inverters are not suitable for driving a motor precisely, due to switching noise. In particular, a force control system using the PWM inverter cannot generate low-noise and fine precise force. On the other hand, by using DCLAs, the problems such as the power efficiency, the current noise, and the force noise were solved. By the theoretical analysis, the simulations, and the experiment, the validity of the force control using DCLAs was verified.

研究分野: モーションコントロール, ハプティクス, パワーエレクトロニクス

キーワード: 力制御 電流制御 ダイオードクランプリニアアンプ モーションコピーシステム 実世界ハプティクス
モーションコントロール

1. 研究開始当初の背景

(1) 研究背景

今日では、音声および画像関連技術は十分に成熟しており、視聴覚情報の保存や再現、伝送、共有を行うことが可能となっている。一方で、人間には視覚、聴覚、嗅覚、味覚そして触覚・力覚の五つの感覚器が備わっており、人間はこの五感からの情報すべてに基づいて、様々な複雑な作業をこなしている。視覚情報および聴覚情報については大変多くの研究開発が行われているものの、触覚・力覚に関する研究は十分になされているとは言い難い状況にある。現代技術を駆使して構成された高度なロボットが、現代社会において依然として人間の作業者の完全な代替物とはなりえていない原因は、従来のロボットは物体との接触を伴う作業を苦手とするところにある。換言すれば、触覚・力覚関連技術が未熟なためにロボットが一般社会に浸透していけないということである。

(2) 従来研究

そこで、研究代表者はこれまでに実世界の力覚情報の保存と再現に焦点を当てて研究を行っており、人間の操作者の動作の保存と再現を実現するモーションコピーシステムを提案している。図1にモーションコピーシステム概念図を示す。モーションコピーシステムはモーション保存システムとモーション再現システムの2つのシステムで構成され、前者は人間の作業者の位置と力を記憶装置に保存し、後者は保存されたデータに従い、位置のみならず力までも再現する。本システムを用いることで、再現される位置および力は保存された位置および力と同一にすることが可能である。再現時の位置と力の双方を保存時と完全に合致させる本技術は世界的にも類なきものである。モーションコピーシステムを用いることで、時間と空間を越えて操作者の力加減および動作の保存と再現をこれまでの研究により実現した。

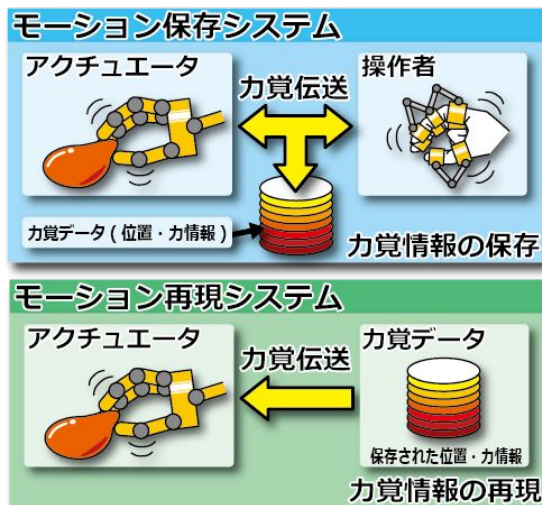


図1 モーションコピーシステム概念図

2. 研究の目的

しかしながら、研究代表者がこれまでに提案してきたモーションコピーシステムには未だ数多くの課題があり、動作の保存・再現の周波数帯域と再現動作の正確性の問題の解決が本研究課題の目的である。

従来研究により、人間の触覚器官の帯域は400 Hz であるといわれており、触覚・力覚情報を漏れなく保存・再現するためには400 Hz の帯域を持つ力制御系が必須となる。そのような広帯域な力制御系を実現するには、モータ駆動のための電流制御の広帯域化が重要となる。また、動作再現の正確性については、一般的に用いられているパルス幅変調(Pulse Width Modulation, PWM)インバータはスイッチングノイズを発生させるため、モータの発生推力に雑音が混入し、力覚の保存・再現が不明瞭となる問題がある。すなわち、本研究の主目的は、力制御系の制御性能を向上させることにあり、その結果として、高精細広帯域な力覚情報の保存と再現を目指した。

3. 研究の方法

高精細且つ広帯域な力制御を実現するための本研究での提案手法は、大きく分けて二つに大別できる。一つ目はダイオードクランプリニアアンプと呼ばれる電力増幅器を用いるパワーエレクトロニクスの観点からの手法である。二つ目の手法は広帯域力制御であり、これはモーションコントロールの観点からの提案法である。それぞれの手法を以下に述べる。

(1) ダイオードクランプリニアアンプ

これまで、モータ駆動にはD級増幅器に分類されるPWMインバータが用いられてきた。バイポーラトランジスタやMOSFETの飽和領域のみを利用しスイッチとして使用することで、デバイスで生じる損失を抑制するためである。しかしながら、スイッチング動作により雑音が生じ、高精度な制御には適さない。一方のB級増幅器は雑音が少ないものの、デバイスの能動領域での利用により大きな損失が発生し、省電力なモータ駆動は困難となる。そこで本研究では、現在主流となっている電力効率のみを重視したPWMインバータではなく、力制御のための、まったく新しい設計概念に基づくダイオードクランプリニアアンプ(Diode-Clamped Linear Amplifier, DCLA)を開発した。

B級電力増幅器

従来から用いられている電力増幅器の種類の一つにB級電力増幅器と呼ばれるものがある。図2に電界効果トランジスタ(Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor, MOSFET)で構成された一般的なB級増幅器を示す。入力電圧が正のとき、

下側の MOSFET はオフ状態となり、上側の MOSFET は能動状態となる。従って、MOSFET は抵抗器の一種となり、発熱を生じ、電力損失が発生する。B 級増幅器の場合の電力効率は、力率が 1 のときでは 78.5% となり、次節で述べる D 級増幅器に比べ、B 級増幅器の電力損失は大きい。

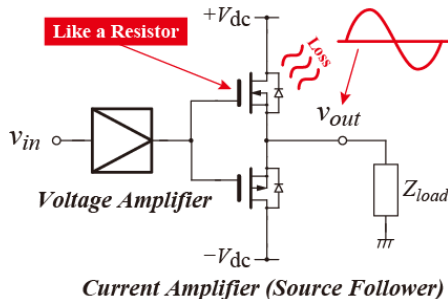


図 2 B 級電力増幅器

しかしながらその一方で、B 級増幅器はリニア増幅器に分類されており、クロスオーバー歪は発生するものの、出力電圧と出力電流に雑音は原理的に含まれず、高精細なモータ制御に適する。ただし、B 級増幅器は省エネルギーの観点からモータ駆動に適さない問題がある。

PWM インバータ

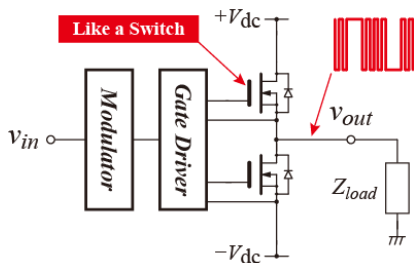


図 3 PWM インバータ(D 級増幅器)

図 3 に PWM インバータ(D 級増幅器)の回路図を示す。PWM インバータにおいて、MOSFET は飽和領域での動作しか行われないため、スイッチと等価であり、原理的に電力損失は発生しない。一般的には、90%以上の電力効率が達成できる。しかしながら、PWM のスイッチング動作により電流に雑音が生じ、結果としてモータ推力に雑音が含まれる。このような理由から、D 級増幅器に分類される PWM インバータは高性能なモーションコントロールには適さない。

DCLA による電流制御と力制御

図 4 にダイオードクランプリニアンプの回路図を示す。多段に分割された直流リンク電圧はショットキダイオードを介して MOSFET のドレインに供給される。DCLA はソースフォロアとして働き電圧増幅率は 1 であるので、電力増幅器入力段に電圧増幅器が必要である。DCLA の理論的な電力効率は、段数によって変化し、4 段の場合では 84.2%、

14 段のときには 93.4% であり、その電力効率は PWM インバータと比較しても遜色のないものとなっている。

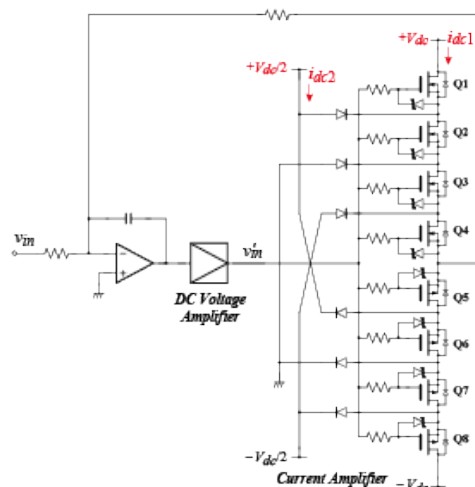


図 4 ダイオードクランプリニアンプ

また、DCLA は出力電圧に依存して、飽和領域と線形領域を適宜利用する動作となるため、PWM のスイッチング動作は行われず、電流雑音が極めて少ないことが利点である。さらに、DCLA の使用により、電流制御系は PWM の三角波キャリア周波数からの制約を受けず、並列演算を得意とするプログラマブルゲートアレイ(Field Programmable Gate Array, FPGA)による高速演算に最適である。従って、B 級電力増幅器や PWM インバータではこれまで不可能であった広帯域で且つ高効率・低雑音なモータ駆動が可能となる。

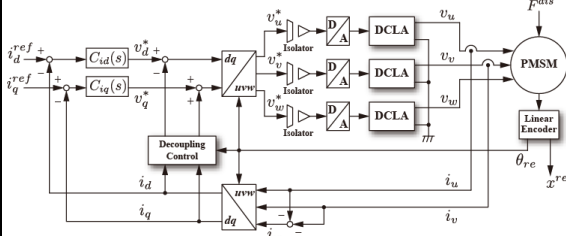


図 5 DCLA を用いた電流制御系

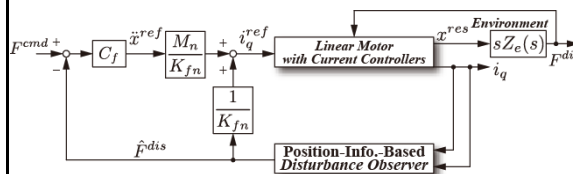


図 6 DCLA を用いた力制御系

図 5 に DCLA を用いた電流制御系を示す。PWM インバータと比較して、DCLA は電圧指令値に従って極めてスムーズな 3 相電圧を発生でき、DCLA によって出力できる電流応答にはスイッチングノイズが含まれない。また、図 6 に図 5 の電流制御系を内部に含んだセンサレス力制御系を示す。モータ推力は外乱オブザーバによって推定し、フィードバックされる。DCLA を用いることで、高精細な推力が生成できる。

(2) 広帯域力制御とモーションコピーシステム
 本研究課題では、力制御の広帯域化の方法として、加速度オブザーバを用いた力制御手法を提案している。図7に従来の力制御系を、図8に提案する力制御系を示す。

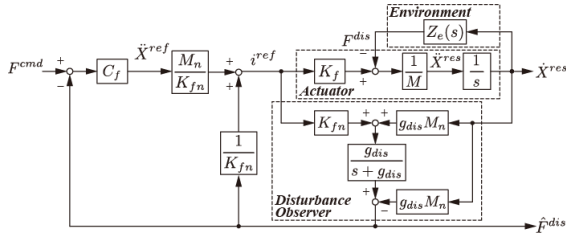


図7 従来の力制御系

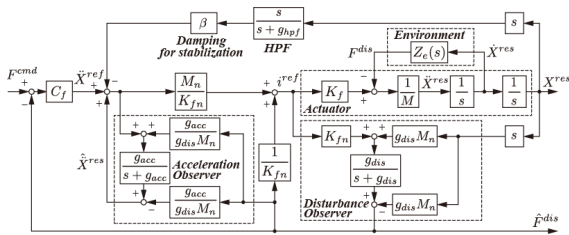


図8 提案する力制御系

従来の力制御では、モータが発生する実際の力応答値は所望の力指令値に追従しないことが理論的に明らかとなっている。そこで、本研究では、加速度オブザーバを用いてモータの加速度をセンサレスで推定し、望まれない推力を打ち消すことで、力応答値を力指令値に追従させることが可能となる。力制御の追従性能が改善されることから、結果として、力制御の広帯域化が可能となる。

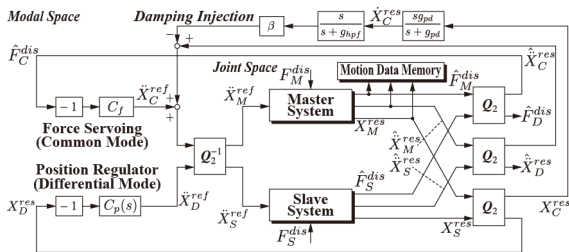


図9 提案法を用いたモーション保存システム

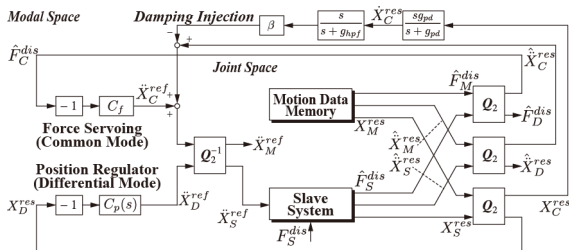


図10 提案法を用いたモーション再現システム

図9および図10に図8の提案する力制御系を応用したモーション保存システムとモーション再現システムを示す。加速度オブザーバの推定加速度を利用することで、力制御の追従性が増し、操作者の動作をこれまでより正確に保存・再現できるようになる。

4. 研究成果

本研究では、DCLAの電流制御および力制御への有用性を理論面および実機実験により検証し、広帯域な電流制御と高精度な力制御が可能であることを確認した。また、広帯域力制御により、人間の操作者の動作を従来よりも高精度に再現できることを明らかにした。以下にそれぞれの研究によって得られた代表的な数値シミュレーション結果と実機実験結果を示す。

(1) ダイオードクランプリニアンプ

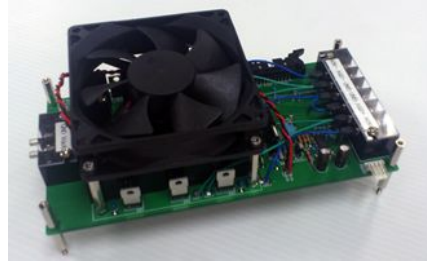


図11 本研究で開発したDCLA(1相分)

図11に開発したDCLAの1相分の回路モジュールを示す。このDCLAを3台用意することで、3相の表面磁石型同期モータを駆動する。DCLAはコンプリメンタリタイプのnチャンネルMOSFET 2SK1530とpチャンネルMOSFET 2SJ201を用い、55,856のロジックエレメントを持つALTERA EP3C55F780C8Nによって電流制御演算が行われる。電流制御および力制御に対する有効性を実機実験により検証した。

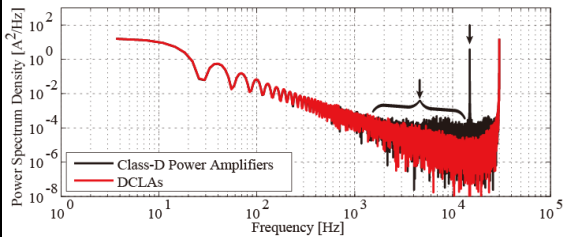


図12 電流応答のパワースペクトル密度

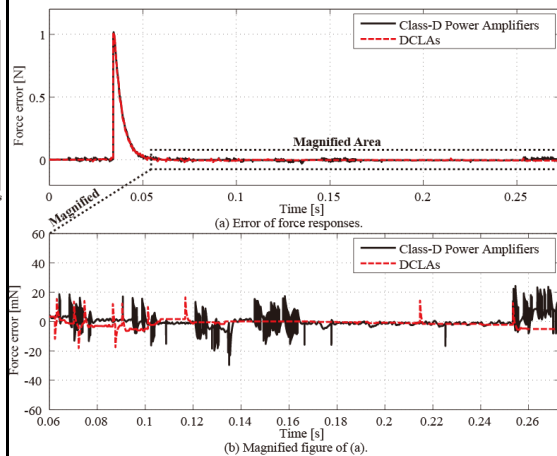


図13 力制御実験における力誤差波形

図 12 は、PWM インバータ(D 級電力増幅器)から出力された電流(黒線)と、DCLA から出力された電流(赤線)の比較実験結果を示しており、DCLA の使用によって劇的に電流雑音が減少していることが確かめられる。

図 13 は接触対象物体をアルミブロック(A5052)としたときの力制御の実験波形であり、所望の力指令値から実際の力応答値を減算したもので、すなわち力誤差の波形を示している。従来の PWM インバータ(D 級電力増幅器)を用いた場合(黒線)よりも、DCLA を用いた場合(赤線)の方が、力の誤差が減少していることが分かる。従って、DCLA によって高精細な力制御が可能であることを明らかとした。

(2) 広帯域力制御とモーションコピーシステム

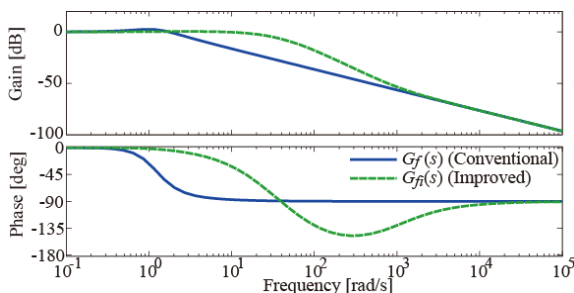


図 14 力制御系の周波数特性(数値解析)

図 14 に力制御系の力指令値から力応答値までの周波数特性の数値解析結果を示す。青実線は従来法を、緑破線は提案手法を表しており、提案手法により力制御の周波数特性を大幅に広帯域化できていることが分かる。

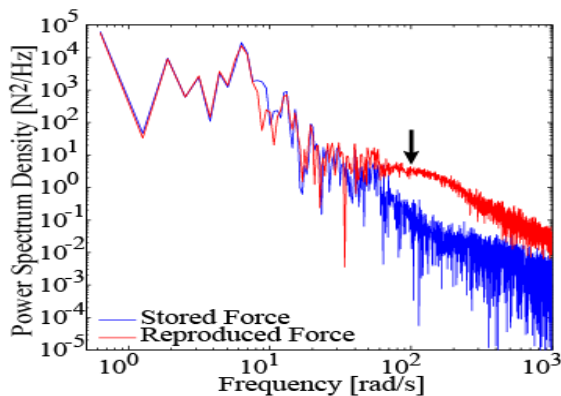


図 15 従来のモーションコピーシステムの実験結果

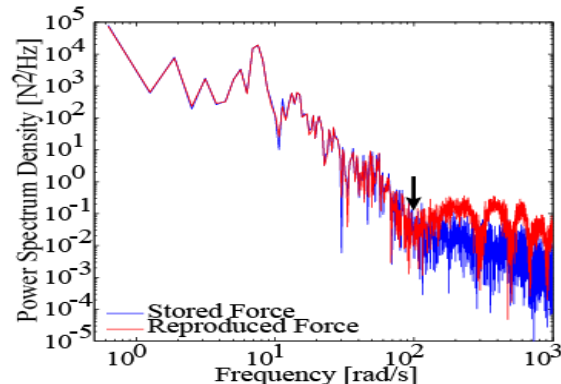


図 16 提案するモーションコピーシステムの実験結果

図 15 は従来のモーションコピーシステムの実験結果を示し、図 16 は図 9 および図 10 に基づいて構成された提案するモーションコピーシステムの実験結果をそれぞれ示している。各図の青線は保存フェーズにおける操作者の力を示し、赤線は再現フェーズにおけるモータの発生推力を表す。結果から明らかなように、従来に比べ、提案手法の方が広帯域に亘って操作者の力加減を再現出来ていることが確かめられる。

以上のことから、高精細且つ広帯域な力覚情報の保存と再現を本研究では目指し、そしてそれが可能であることを実証した。今後は、さらなる広帯域化を目標とし、繊細で複雑な人間の動作・力覚情報を人間の完全なる制御下に置くことをねらっていく。

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 4 件)

T. T. Phuong, K. Ohishi, Y. Yokokura, C. Mitsantisuk : "FPGA-based High-Performance Force Control System with Friction-Free and Noise-Free Force Observation," IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 61, No. 2, pp. 994-1008, Feb. 2014.
DOI: 10.1109/TIE.2013.2266081

T. T. Phuong, K. Ohishi, Y. Yokokura: "Motion-Copying System Using FPGA-based Friction-Free Disturbance Observer," IEEJ Journal of Industry Applications, Vol. 3, No. 3, pp. 248-259, May. 2014.
DOI: 10.1541/ieejjia.3.248

Y. Yokokura, K. Ohishi: "Fine Sensorless Force Control using Diode-Clamped Linear Amplifiers," IEEJ Journal of Industry Applications, Vol. 3, No. 3, pp. 277-285, May. 2014.
DOI: 10.1541/ieejjia.3.277

Y. Yokokura, K. Ohishi, S. Katsura: "Fine Force Reproduction Based on Motion-Copying System using Acceleration Observer," IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 61, No. 11, pp. 6213-6221, Nov. 2014.
DOI: 0.1109/TIE.2014.2308142

[学会発表](計 3 件)

Thao Tran Phuong, Kiyoshi Ohishi, Yuki Yokokura : "Motion-Copying System of a Different Master-Slave Mechanism with Variable Reproduction Speed," The IEEE International Symposium on Industrial Electronics ISIE 2014-ISTANBUL, Jun. 2014.

DOI: 10.1109/ISIE.2014.6864967

Yuki Yokokura, Kiyoshi Ohishi : “Best fit Sensorless Force Control System considering Environmental Stiffness Variation,” The 40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society IECON 2014-DALLAS, Oct. 2014

DOI: 10.1109/IECON.2014.7048890

Yuki Yokokura, Kiyoshi Ohishi, Kotaro Saito, Atsushi Shimamoto : “Torque Control of Geared Motor with Load-side Torque Sensor using Acceleration Observer,” The 1st IEEJ international workshop on Sensing, Actuation, and Motion CONTROL SAMCON2015-NAGOYA, Mar. 2015.

URL: <http://www2.iee.or.jp/~diic/samcon/>

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.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： 7 0 6 2 2 3 6 4