

令和 5 年 6 月 16 日現在

機関番号：53701

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2022

課題番号：21K14129

研究課題名（和文）カベース2チャンネル型バイラテラル制御による人間動作の抽出・学習と上達

研究課題名（英文）Extraction, learning and improvement of human motion by force-based two-channel bilateral control

研究代表者

長津 裕己（Nagatsu, Yuki）

岐阜工業高等専門学校・その他部局等・准教授

研究者番号：60804987

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,500,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、カベース2ch.バイラテラル制御(FBC)を、人間動作抽出のための冗長自由度を有するシステムの位置/力ハイブリッド制御に拡張することに成功した。さらに、FBC特有の制御構造に着目し、力覚センサと状態観測器の双方の力覚情報を用いた力制御によるダイレクトティーチングにより、FBCに基づいた動作再現システムと同程度の再現精度を有するシステムの実現にも成功した。これらのシステムに対し、FBCに基づく動作再現制御のための補償器を適用することで、FBCによって得られる記録動作データ・再生動作データ間の高い透明性を失うことなく未知の対象への適応性が向上し、“上達”につながると考えられる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

我が国や諸外国では少子高齢化が進行しつつあり、労働人口の減少等の課題に対して、ロボットによる人間の代替技術が求められている。さらに、熟練者の技能の継承は重要な課題である。これらの課題に対し、本研究を通じて、熟練動作を含む人間の動作を、力情報のみに基づいて伝送、記録、再生するための基盤となる理論と技術を確立することに成功したといえる。さらに、これまで二機で一对のバイラテラルロボットシステムを用いていた動作のティーチングと再生システムにおいて、力覚センサを活用することで一機のロボットシステムのみでも同程度の性能を有するシステムを実現することに成功し、低コスト化にも貢献することができたといえる。

研究成果の概要（英文）： This study succeeded in extending force-based two-channel bilateral control (FBC) to position/force hybrid control of a system with redundant degrees of freedom for human motion extraction. Furthermore, by focusing on the control structure unique to FBC, a system with the same degree of reproduction accuracy as a motion reproduction system based on FBC was also successfully realized by using direct teaching through dual loop force control using information from both the force sensor and the state observer. By applying a compensator for motion reproduction control based on FBC to these systems, adaptability to unknown targets without losing high transparency obtained by FBC between recorded motion data and reproduced motion data is expected to be increased, and it is considered to lead to “improvement”.

研究分野：制御工学

キーワード：制御工学 力制御 知能ロボティクス 知能機械 機械学習

1. 研究開始当初の背景

先進諸国では少子高齢化が進行しつつあり、ロボットによる人間の行為の代替技術が求められている。特に、熟練技術者のもつ技能の後世への継承は重要な課題である。人間の動作情報の記録や再生に関してはこれまでに多くの研究がなされてきている。しかし、それらの多くは動作を構成する情報のうち、軌道の情報や視覚情報に基づいたものがほとんどであり、熟練技能者のもつ繊細な力加減も継承するにはこれらの要素だけでは困難である。

このような課題に対して、遠隔操作技術のひとつであるバイラテラル制御に基づいた人間動作の記録・保存および学習に関する研究が行われ始めてきている。バイラテラル制御はマスタシステム(MS)およびスレーブシステム(SS)の二対のロボットにより構成されており、MSを人間が操作し、マスタ・スレーブ間で位置情報と力情報を伝送し制御することで、SSがMSの動作に追従して対象への動作を実行する。このとき、操作者は対象からの力覚フィードバックを得ながら操作を行うことができる。また、マスタ・スレーブ構造を採用することにより、操作者が加える作用力情報と対象環境からの反作用力を分離して抽出することが可能となる。バイラテラル制御を介した動作における位置情報と力情報を保存し、それらを指令値としてSSを駆動することで人間動作の再生(繰り返し)を実現することが可能となる。また、バイラテラル制御を介して得られた位置と力情報を学習することで、未知の対象への動作の汎化を目指す研究も行われ始めている。

2. 研究の目的

先述のように、ロボットにより人間の熟練動作を獲得するためには、力加減も含めた動作情報の抽出とその情報量を低減すること、および未知(未学習)の対象へ適応する必要があるといえる。そこで本研究では、力情報のみを伝送する2チャンネル型バイラテラル制御(Force-based two-channel Bilateral Control: FBC)に基づいた人間の動作情報の抽出・学習および動作再生の適応性の向上による“上達”の実現に向けた研究を行う。力情報のみを伝送すると同時に力情報のみを抽出・保存し、動作再生を行う。力情報から、未知(未学習)の対象への適応を実現する力指令値と等価位置指令値を導出し、その結果得られた指令値を元にSS(ロボット)が動作再生時に生じた未知の外乱に対して自律的に適応して動作を実現させる。さらに、動作再生のための補償制御器により、未知の対象に対して適応するだけでなく自律的に“上達”することで高精度・高精度な動作を実現するための原理を明らかにすることを本研究の目的とする。

3. 研究の方法

まず、動作の保存および再生を行うためのマスタ・スレーブシステムを製作し、動作を伝送・記録するためのFBCシステムを構築する。これにより、FBCを介した動作記録システムおよび記録した力情報に基づいた動作再生システムを構築するとともに、動作再生のための補償制御器を導入することで、FBCによる動作記録・再生システムの適用範囲を拡張するとともに、未知の対象への適応性を向上させる方法を検討する。

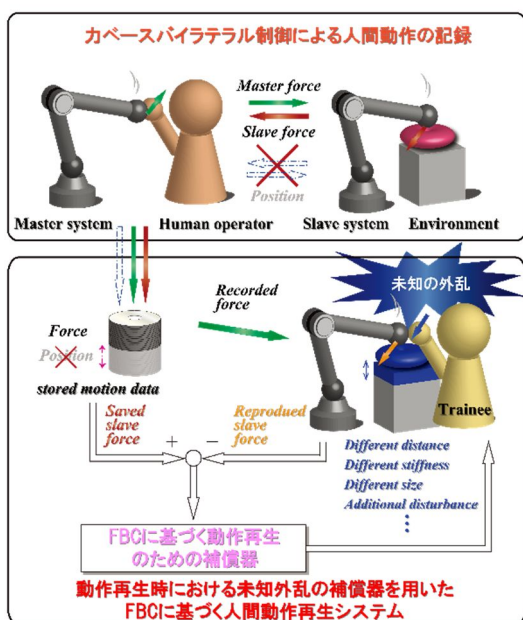


図1. 動作再生補償器を導入した FBC に基づく人間動作再生システムの概要図

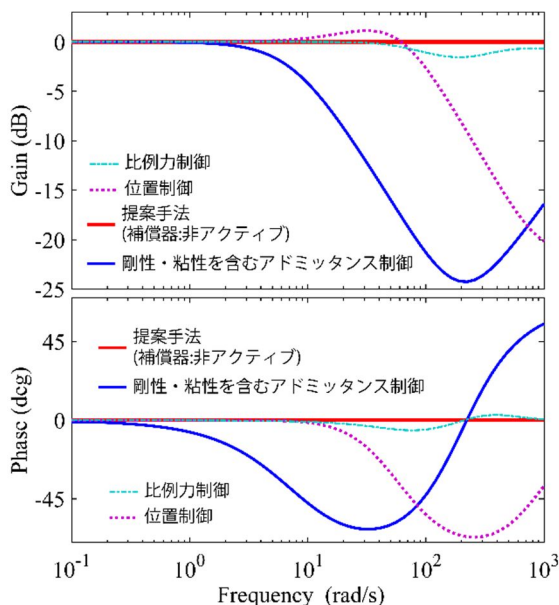


図2. 記録動作から出力動作までの周波数応答

4. 研究成果

(1) 多自由度ロボットを用いて、FBC に基づいた動作の記録、再生システムを構築し、これまでに導出した FBC に基づく動作再生システムのための補償器 (図 1) の性能について検証と解析を行った。その結果、補償器を動作再生システムに導入することにより、図 2 および図 3 に示すように、FBC によって得られる記録動作データ・再生動作データ間の高い透明性を失うことなく、動作再生時のみに生じる外乱に対する制御剛性を零 (柔軟な接触力の再生システム) から無限大 (ロバストな軌道情報の再生システム) まで任意の値に調整することが可能となることを確認した。他方、位置制御や力制御、あるいは FBC 内のアドミッタンスに粘性や剛性を追加することによって動作再生システムの制御剛性を調整しようと試みた場合、FBC によって得られた記録動作データと再生動作データの間の透明性が低下してしまい、動作の記録時と再生時でシステムに加わる外乱が同じであったとしても再生精度が劣化してしまう。これらに対し、FBC ベースの動作再生システムのための補償器は、動作再生時のみに生じる外乱をフィードフォワード的に補償することが可能なため、動作の再現性に影響を与えることなく制御剛性を独立に調整することができる。これにより、動作再生時のみに生じる外乱が存在する未知の対象環境への適応性の向上が期待できる。

なお、これらの成果を纏めたものを、今後、IEEE の論文誌に投稿する予定である。

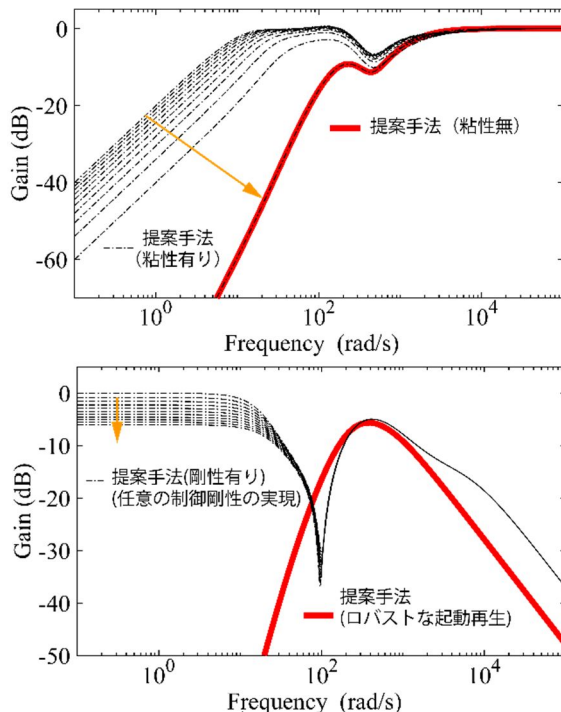


図 3. 力応答および位置応答における未知外乱抑圧特性

(2) さらに、図 4 に示すように、トルク制御ではなく、一般的に広く用いられている PID 制御器による位置制御器又は PI 制御器による速度制御器によって制御されるロボットに、FBC を直接適用するための手法を導出することにも成功した。従来の位置と力の 2 種類の情報を伝送する 4 チャンネル型バイラテラル制御をそれらの位置・速度制御型ロボットに適用しようとする場合、トルク制御型ロボットに実装された通常の 4 チャンネル型のバイラテラル制御器と比べて積分器の数が増えるため、応答特性が変化してしまう。これに対し、FBC はアドミッタンス制御型の力制御に基づいており、位置制御または速度制御システムとの親和性が高いため、本手法は、トルク制御型ロボットにおける性能を劣化することなく、位置・速度制御型ロボットに適用することが可能である。本手法により FBC による動作情報の抽出および動作再生システムの適用範囲を拡張することができる。

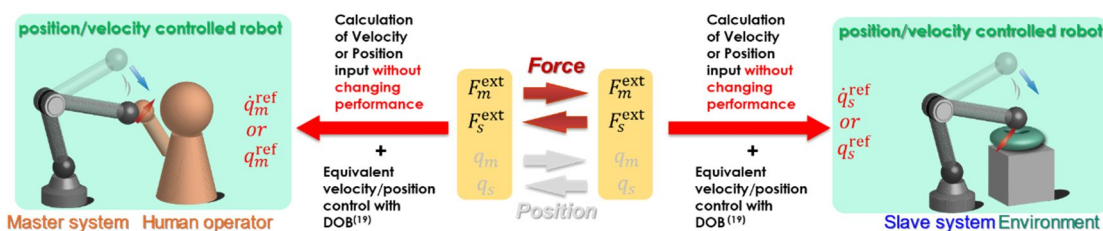


図 4. FBC の位置/速度制御型ロボットへの適用手法の概要図

(3) 冗長自由度を有するシステムの位置/力ハイブリッド制御への FBC の拡張も行うことができた。図 4 に示すように、冗長自由度を活用することができるようになれば、障害物回避やサブタスクの実行などに加えて人間が行う巧な動作の抽出と再生も可能となる。本研究では、冗長システムの位置・力ハイブリッド制御における外乱推定器と外乱補償制御を、2 チャンネル構造を維持したまま FBC に適用するとともに、アドミッタンス制御型力制御にける等価的な弾性力フィードバックを適用することで、FBC の操作性を損なうことなく安定度を向上する手法を導出することに成功した。これにより、冗長自由度を有する FBC システムにおいても、逆運動学の簡略化に起因する零空間からの干渉力等の外乱の抑圧、および慣性力に起因する操作力の低減を同時に実現することが可能となった。図 5 に示すように、他の手法が振動的、あるいは大きな操作力を生じているのに対し、提案手法は最も安定度が高く、操作力も小さく抑えられている。

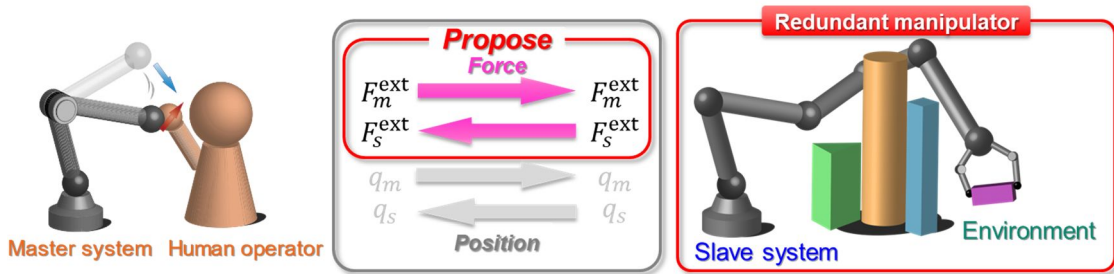


図 5. FBC の冗長システムの位置・力ハイブリッド制御への拡張の概要図

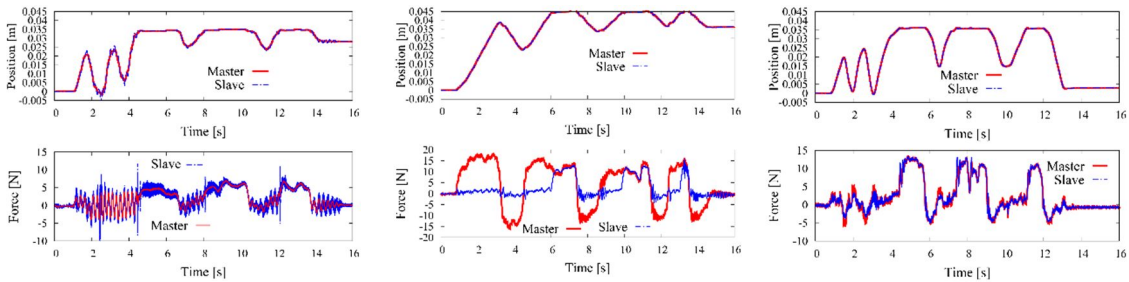


図 6. 冗長システムにおける実験結果 (左)等価弾性力フィードバックなし (中)仮想粘性有 (右)提案手法

(4) 従来のロボットへの動作のティーチング方法として、装置やロボットに対して直接人間が動作を行う方法(programing by human demonstration)が存在している。Robot programming by human demonstration の手法として、ロボットへ動作を直接手づたえで教示するダイレクトティーチング手法が開発されてきている。

ダイレクトティーチングの多くは、力制御(ゼロ力/トルク制御)あるいはインピーダンス制御により、ロボットに直接動作を教示し、その動作の軌道情報を用いてロボットに動作を生成させる方法が主だったものである。しかし、ダイレクトティーチングシステムでは、操作者の作用力と環境からの反作用力を分離することができないため、これに伴い接触力の再生が困難である。

これに対し、FBC も含むパラレル制御を介して間接的に動作を教示して再生する方式では、マスタロボットで操作者の加える作用力を、スレーブロボットで対象環境から返される反作用力を計測することで、作用力と反作用力を分離することができるため、接触力の高精度な再生も可能である。また、動作の再生時において、スレーブロボットの入出力関係は、対象環境が同じであれば動作のティーチング時とまったく同じになるため、力加減も含めて正確な動作再生が可能となる。しかし、マスタ・スレーブロボットの二機で一對のロボットシステムが必要となってしまう。

これらと対照的に、本研究は力制御のみにより力覚伝送を行うという FBC の構造に着目し、力覚センサと状態観測器による 2 種類の力覚情報を用いたデュアルループアドミッタンス制御型力制御によるダイレクトティーチングにより、FBC に基づいた動作再生システムと同程度の動作の再生精度を有するシステムの実現にも成功した。本研究では人間の操作力をオブザーバにより推定し、環境からの反作用力は力覚センサにより計測している。アドミッタンス制御に基づくデュアルループ力制御を導入することで、FBC と等価な構造を有するダイレクトティーチングシステムを構築することが可能となる。このシステムにより、作用力と反作用力の二つの力覚情報

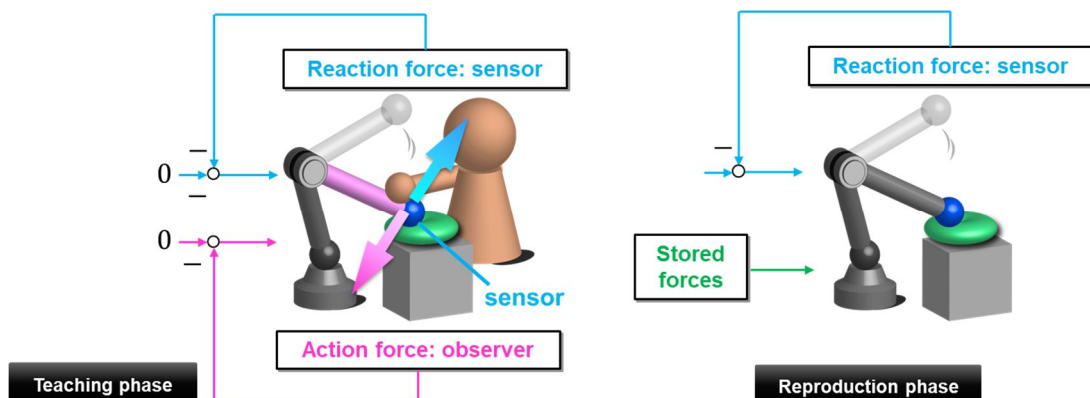


図 7. FBC の構造に基づくデュアルループアドミッタンス制御型力制御を用いたダイレクトティーチングによる動作記録・再生システムの概要図

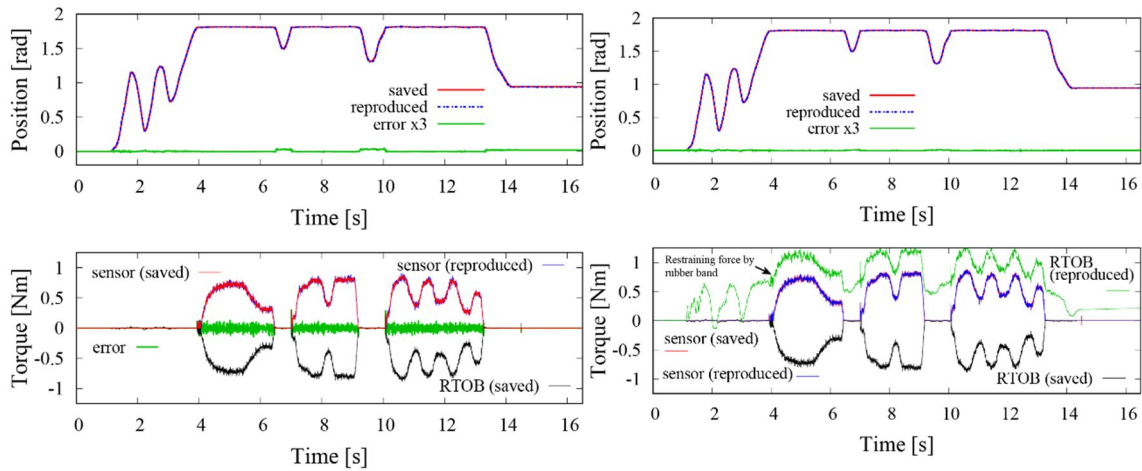


図7. 提案手法によるダイレクトティーチングにより記録した動作の再生実験の結果
 (左) 記録時と同じ環境下での再生(右) ゴムバンドによる負荷を印加した状況下での再生

のみを記録しておくことで、FBCに基づく動作再生システムと等価な構造を有する動作再生システムを実現することが可能となる。さらに、図7に示すように、本システムは接触対象に対しては、センサからの力覚フィードバックにより柔軟な接触を実現しつつ、接触点以外に印加される外乱に対しては、ロバストな位置制御となるため、未知の対象および環境における適応性が高いといえる。

このように、適用範囲が拡張されたFBCに対して、BCに基づく動作再生制御のための補償器を適用することで、FBCによって得られる記録動作データ・再生動作データ間の高い透明性を失うことなく未知の対象への適応性が向上し、“上達”につながると考えられる。今後はLong Short Term Memory ネットワークなどを活用し、力情報から人間の動作全体の時系列データを学習・予測することで、未知の対象や外乱に対する適応能力をさらに向上することを目指す。

<引用文献>

Yuki Nagatsu and Hideki Hashimoto, "Force-based Two-channel Bilateral Control for Position/Velocity Controlled Robots," 2022 IEEE 17th International Conference on Advanced Motion Control (AMC), Padova, Italy, 2022, pp. 181-186, doi: 10.1109/AMC51637.2022.9729256.

Yuki Nagatsu, "Application of Force-Based Two-Channel Bilateral Control for Position/Force Hybrid Control of Redundant Systems," 9th IEEJ International Workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization (SAMCON2023), 2023, pp. 166-171.

Yuki Nagatsu, "Direct Teaching of Motion for Robots Based on Equivalence to Motion Reproduction System Using Force-Based Two-Channel Bilateral Control," 9th IEEJ International Workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization (SAMCON2023), 2023, pp. 640-645.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Yuki Nagatsu; Hideki Hashimoto
2. 発表標題 Force-based Two-channel Bilateral Control for Position/Velocity Controlled Robots
3. 学会等名 2022 IEEE 17th International Conference on Advanced Motion Control (AMC) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yuki Nagatsu
2. 発表標題 Application of Force-Based Two-Channel Bilateral Control for Position/Force Hybrid Control of Redundant Systems
3. 学会等名 The 9th IEEJ International Workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization (SAMCON2023) (
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yuki Nagatsu
2. 発表標題 Direct Teaching of Motion for Robots Based on Equivalence to Motion Reproduction System Using Force-Based Two-Channel Bilateral Control
3. 学会等名 The 9th IEEJ International Workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization (SAMCON2023) (
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------