

令和 3 年 6 月 28 日現在

機関番号：32641

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2020

課題番号：18K13780

研究課題名（和文）マルチモーダル機械学習に基づいた人間・ロボットによるスキル継承制御

研究課題名（英文）Skill inheritance control by human and robots based on multi-modal machine learning

研究代表者

長津 裕己（Nagatsu, Yuki）

中央大学・理工学部・助教

研究者番号：60804987

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では人間・ロボットによるスキル継承制御の実現に向けた研究を遂行した。スキル継承制御において重要かつ不可欠な広帯域なマルチセンサ情報に基づく力覚情報の計測・制御手法を開発した。また、スキル継承制御を冗長自由度を有するシステムへ拡張する際に必要となる位置/力ハイブリッド制御系のための加速度次元に基づく外乱相殺制御の性能・安定性解析を実施した。また、マスタ・スレーブシステム間の力情報のみの伝送に基づいたバイラテラル制御による動作の保存・再現手法を考案した。これにより、スキル継承制御の実現において、軌道を保存する必要が無くなるため、取得および解析すべき情報量を削減することが期待できる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ロボットによる人間の代替技術が求められており、熟練技術者のもつ技能の継承は重要な課題である。本研究の過程で得られた成果は、ロボットによる人間の代替を行う上で重要な力覚情報の計測・制御の広帯域化・高精度化に貢献する。さらに、これまでにロボットを介した人間動作の抽出と再現には位置と力の計測と制御が必要と考えられてきたが、本研究で考案した力情報のみの伝送によるバイラテラル制御に基づく動作の抽出と再現手法により、位置情報が冗長な情報であるということを示唆する結果を得た。これにより、力情報を基盤としたロボットによる動作の抽出、再現および継承のための新たなフレームワークが構築されることが期待できる。

研究成果の概要（英文）：In this research, we carried out research toward the realization of skill inheritance control by humans and robots. We have developed a Wide-band force measurement and control method based on multi-sensor information, which is important and indispensable for skill inheritance control. We also analyzed the performance and stability of disturbance cancellation control based on the acceleration dimension for the position/force hybrid control system required for extending skill inheritance control to a system with redundant degrees of freedom. We also devised a method for saving and reproducing the human motion by bilateral control based on the transmission of only force information between the master and slave systems. As a result, it is not necessary to save the trajectory in the realization of skill inheritance control, and it can be expected that the amount of information to be acquired and analyzed can be reduced.

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

近年、多くの国で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現に関してはこれまでも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、位置や軌道の情報あるいは視覚情報のどちらか一方に基づくものがほとんどであった。他方、近年では人間の動作情報の中でも力覚情報を扱う研究も活発に行われ始めている。力覚情報を用いることで、記録や再現を行うことのできる動作の範囲が広がったが、対象環境が保存時と全く同じものに限定されるなど、汎用性に乏しいのが現状である。つまり、諺にある「弘法筆を選ばず」という機能の実現が困難となっている。また、本来人間は視覚と力覚の情報双方を利用して対象に対して動作を行っているが、ロボットを用いた動作再現において、これらの情報を統合した方法は未だ明らかになっていない。さらに、取得した動作情報をロボットからに対して再び呈示することも技能の継承には重要となると考えられる。しかし、現在の動作再現手法では、一旦取得された動作情報の時系列データのみでの呈示となってしまう、摩耗や取り換えなどによって道具が変化した場合や対象が変化した場合などの状況に対応できず、動作の呈示においても汎用性が低いものとなっている。このように、これまでの動作再現方法では、環境の種類に応じて蓄積された動作情報から適切な動作を選択して再現することや、あるいは未知の対象に対して新たな動作を生成するような機能は実現されていない。つまり記録された動作情報の拡張性がないといえる。また、ロボットから人への動作の教示を考えると、取得された時系列データに基づく単一な作業しか人間に呈示することができないため、技能の教示に柔軟性や拡張性がないといえる。

2. 研究の目的

人からロボットへ教示された動作の再現および記録された熟練者の動作のロボットによる訓練者への呈示において、環境の変化や被教示者の違いに対して柔軟で拡張性のある動作教示と継承を実現するためには、視覚あるいは力覚のみの情報を用いるのではなく、これらを統合することで得られるマルチモーダルな情報に基づく動作および対象環境の識別・分類・予測を行う必要があると考えられる。そこで、本研究は人間・ロボットによるスキル継承制御の実現に向けた研究を遂行する。蓄積された動作情報と、対象環境の情報に基づいて、動作再現のための指令値を生成し、逐次的に環境変化に適応しながらその指令値を実現する制御構造を構築することを目指す。これにより、人からロボットへ教示された動作再現の汎用性を拡張する。さらに、この新しい対象環境へと拡張された動作情報に基づいてロボットから被教示者に対して動作教示を実現する。このように、人間からロボット、ロボットから人間へと動作を教示し、さらにロボットから教示を受けた人間がロボットを介して動作を記録する、というようにスキルを継承させるシステムを実現する。なお、本研究では動作の保存および教示システムとして、遠隔操作で用いられるマスタ・スレーブ構造を採用することにより、教示者および被教示者の加える作用力情報と対象環境からの反作用力の分離を実現する。

3. 研究の方法

まず、動作の保存および再現を行うためのマスタ・スレーブシステムを製作し、動作を伝送し記録するためのバイラテラル制御系について検討を行う。そして、記録された動作から適切な動作を選択および統合して再現するための指令値の生成方法および動作再現制御系の構築の方法論を明らかにする。さらに、新しい環境に適応した動作を、ロボットから人間(被教示者)へ逆に呈示する制御系の構造について検討する。

4. 研究成果

(4-1) マルチセンサ情報に基づく人間動作の抽出のための力覚の推定・制御の広帯域化と拡張

広帯域な力覚情報の推定と制御は、スキル継承制御において重要かつ不可欠である。また、動作化粧制御の適用範囲を拡張するには様々なシステムにおいて広帯域かつ高精度な力覚制御を実現する必要がある。本研究ではフレキシブルアームなどの柔軟構造を有するシステムに対しても、マスタ・スレーブシステムに基づく動作保存方法が、ロボットに直接手づたえで動作のティーチングを行う方法と比べて有用であるという知見を得ることができた。また、柔軟システムにおける駆動側に搭載した加速度センサおよび位置センサを用いたマルチセンサ情報に基づく負荷側センサレス力推定手法を開発することに成功した。さらに、倒立振り子などを含む劣駆動系における力制御を含む動作の保存・再現制御の適用についても検討を行うことができた。また、力覚センサの情報と、位置センサの情報をを用いる状態観測器によって推定されたマルチセンサベースの力覚情報を統合することにより、減速機付きアクチュエータにおいてもバックドライバビリティ(逆駆動性)を確保しつつ、広帯域な力覚情報のセンシングおよび制御を実現する手法を提案し、その有効性を確認した。

(4-2) 冗長系における位置/力ハイブリッド制御系のための外乱相殺制御の性能・安定性解析

スキル継承制御の構成要素となる動作保存・再現システムに用いられる位置・力ハイブリッド制御を、冗長自由度を有するシステムへ拡張した際の性能向上法について検討を行った。位置・力ともに加速度次元へ統一した情報を用いた外乱観測器を適用した制御系の性能および安定性解析を実施し、力制御系の性能向上と冗長システム特有の外乱である零空間からの干渉力の抑制を同時に実現することが可能であることを示し、図1に示す実機による実験により確認した。

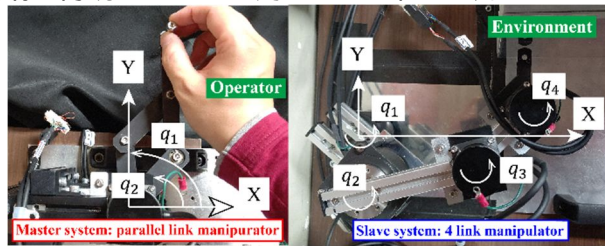


図1 本研究で開発した冗長自由度を有するマスタ・スレーブシステム

(4-3) 力情報のみを伝送するバイラテラル制御による動作保存・継承制御の実現

スキル継承制御の基本となる動作保存・再現制御について、従来の位置/力ハイブリッド制御に基づく4チャンネル型バイラテラル制御の構成要素である力制御器をアドミッタンス制御型の力制御に置き換え改良することにより、力情報のみの伝送によりマスタ・スレーブシステムの軌道の同期と力の作用反作用の法則の人工実現を達成することが可能な力ベースバイラテラル制御系 (Force-based Bilateral Control System: FBCS) を開発した。バイラテラル制御系の性能指標である操作性と再現性の観点から、FBCSの性能を解析した結果、従来の位置と力を用いる4チャンネル型制御系と等価な性能を有することを確認した。図2に示す本研究で開発した実験機を用いて、FBCSの有効性を確認する実験を行った。その結果を図3に示す。同図から、本研究で提案するFBCSは、力情報のみしか伝送していないにもかかわらず、従来の位置/力ハイブリッド制御型のバイラテラル制御と同等の応答を示していることが確認できる。また、FBCSのむだ時間系への適用についても検証を行った結果、マスタ・スレーブシステムのロカル制御系において、力を人工的に遅らせてフィードバックすることで力覚伝送が可能であることを確認した。さらに、二慣性共振系との相似性に基づいた安定化手法を提案し、操作性の低下を抑えつつ安定性の向上を達成した。そして、従来の動作再現制御と同様に、本研究で提案したFBCSを介して動作を実行した際のマスタシステムの力情報を記録し、その情報と再現時のスレーブシステムの反作用力情報から指令値を生成することで、保存動作を再現することに成功した(図4)。特に、本再現制御系はアドミッタンス制御に基づく力制御系と等価になるので、対象環境の大きさや硬さが変化した際においても接触力がロバストに再現される。さらに、動作抽出時にマスタシステムだけではなく、スレーブシステムの力情報も記録し、これらの情報から指令値を生成して入力すると、軌道の情報をロバストに再現することが可能となることも確認した(図4右)。このように、記録したマスタシステムの力情報と、スレーブシステムの力情報の組み合わせによって指令値を変更することで、再現時における対象環境の変化や外乱に対して柔軟に適応しかつロバストに新たな動作を実行することが可能となる。つまり、軌道の情報は動作の再現において冗長な情報であることが明らかになった。これにより、スキル継承制御の実現において、軌道を保存する必要がなくなるため、取得および解析すべき情報量を削減することが期待できる。

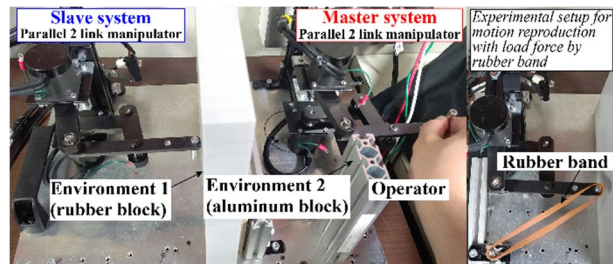


図2 本研究で開発した平行リンク型2自由度マスタ・スレーブシステム

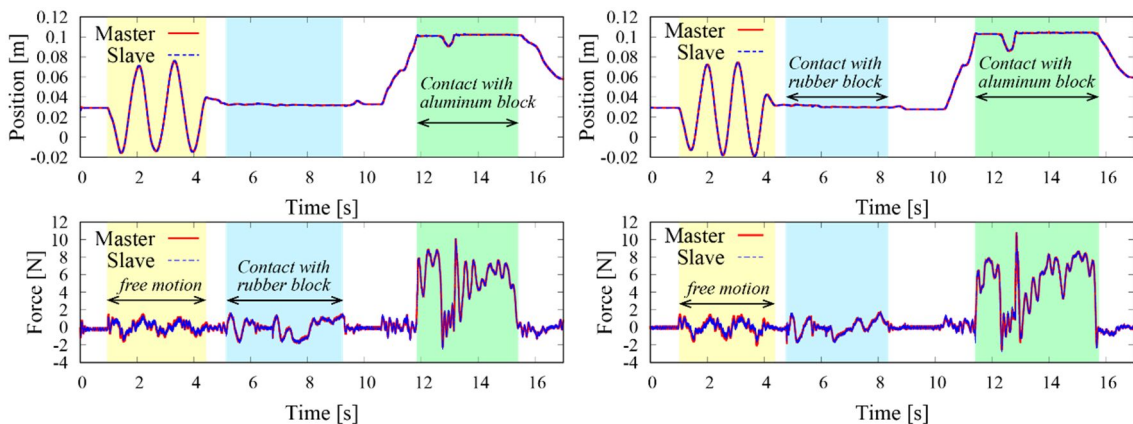


図3 位置/力ハイブリッド制御型(左)とFBCS(右)の実験結果

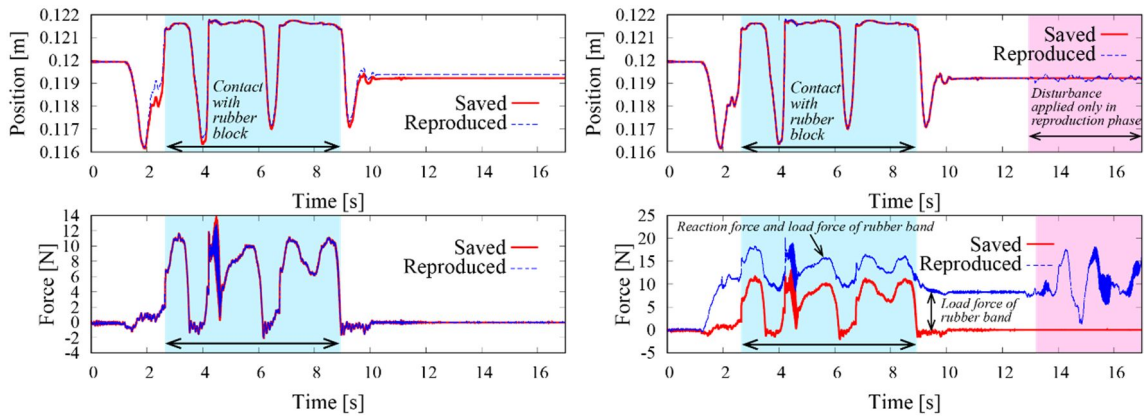


図4 動作再生時のスレーブの力情報をフィードバックした動作再現結果(左)および動作記録時のスレーブの力情報を用いた動作再現結果(右)

さらに、提案する FBCS に基づいた動作再現制御系のための、対象環境の変化による外乱を抑制する補償器を導出した。本補償器を含む動作再現制御系は FBCS に基づいた構造を有しているため、軌道の情報を用いず、動作の再現性を損なうことなく軌道または力を高精度に再現することが可能となる。図5に示すように、本補償器をマスタ・スレーブシステム双方に実装した動作再現制御システムを用いて、新たな対象環境に対して訓練者が手づたえで動作の訓練を行うことでスキルを習得し、さらにその動作を記録することでスキルの継承が実現できると考えられる。

また、FBCS を 1 対 1 から多対多のマルチラテラル制御システム(MCS)へ拡張可能であることを見出した。これら FBCS および FMCS により、ネットワークを介して動作の保存および再現を実施することが可能となるため、スキル継承のためのオンライントレーニングなどへの応用も期待できる。

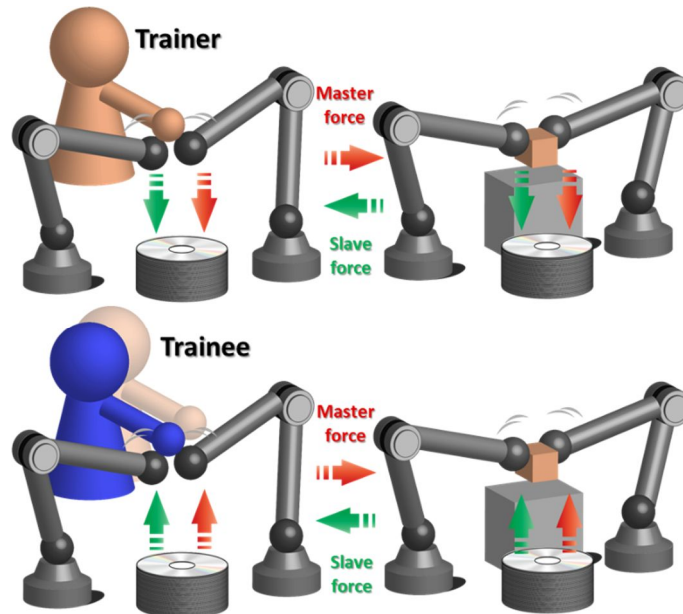


図5 補償器をマスタ・スレーブシステム双方に実装した動作再現制御システムによるスキル継承制御の概要図

<参考文献>

佐渡啓太, **長津裕己**, 橋本秀紀, "柔軟構造を有するマスタ・スレーブシステムにおける人間動作の保存と再現における検討", ロボティクス・メカトロニクス講演会 2019, 2019年6月.

Yuki Nagatsu and Hideki Hashimoto, "Load-Side Sensor-less Disturbance Estimation Based on Integration of Motor-Side Velocity and Acceleration Information for Flexible Manipulators," 2019 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), pp. 1415-1420, Jul., 2019.

Yuki Nagatsu and Hideki Hashimoto, "Force Control for Vehicle Robot With Inverted Two-wheeled and Stable Travelling Modes," IECON 2019-45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, pp. 207-212, Oct., 2019.

長津裕己, 松下幸寛, 松原央堯, 村越司昂, 橋本秀紀, "倒立二輪・安定走行モードを有する移動ロボットの柔軟着地制御," 精密工学会誌, Vol. 86, No. 4, pp. 281-288, 2020.

Yuki Nagatsu and Hideki Hashimoto, "Friction and Noise Suppression for Force Control System Based on Integration of Observer and Force Sensor Information," ROBOMECH Journal, Vol. 7, No. 1, pp. 1-16, 2020.

Yuki Nagatsu, Seichiro Katsura, and Hideki Hashimoto, "Acceleration-based Disturbance Observer for Hybrid Control of Redundant Systems," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Early Access, 2020.

Yuki Nagatsu and Hideki Hashimoto, "Bilateral Control by Transmitting Force Information with Application to Time-delay Systems and Human Motion Reproduction," *IEEJ Journal of Industry Applications*, Vol. 10, No. 2, pp. 165-177, 2021.

Yuki Nagatsu and Hideki Hashimoto, "Stabilization for Bilateral Teleoperation by Transmission of Force Information Using Equivalent Torsional Force Feedback," 6th IEEJ International Workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization (SAMCON2021), SS4.2, pp. 178-183, Mar., 2021.

Yuki Nagatsu and Hideki Hashimoto, "Multilateral Haptic Feedback Control by Transmission of Force Information," 2020 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), pp. 1718-1723, Jul., 2020.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Nagatsu Yuki, Katsura Seiichiro, Hashimoto Hideki	4. 巻 -
2. 論文標題 Acceleration-based Disturbance Observer for Hybrid Control of Redundant Systems	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Industrial Electronics	6. 最初と最後の頁 1~1
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TIE.2020.3034844	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Nagatsu Yuki, Hashimoto Hideki	4. 巻 10
2. 論文標題 Bilateral Control by Transmitting Force Information with Application to Time-delay Systems and Human Motion Reproduction	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEJ Journal of Industry Applications	6. 最初と最後の頁 165~177
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1541/ieejjia.20004757	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 NAGATSU Yuki, MATSUSHITA Yukihiro, MATSUBARA Hironori, MURAKOSHI Kazutaka, HASHIMOTO Hideki	4. 巻 86
2. 論文標題 A Soft Landing Control for Vehicle Robot with Inverted Two-Wheeled/Stable Traveling Mode	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of the Japan Society for Precision Engineering	6. 最初と最後の頁 281~288
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2493/jjspe.86.281	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Nagatsu Yuki, Hashimoto Hideki	4. 巻 7
2. 論文標題 Friction and noise suppression for force control system based on integration of observer and force sensor information	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ROBOMECH Journal	6. 最初と最後の頁 1~16
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1186/s40648-020-00157-2	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 7件）

1. 発表者名 Yuki Nagatsu, Hideki Hashimoto
2. 発表標題 Stabilization for Bilateral Teleoperation by Transmission of Force Information Using Equivalent Torsional Force Feedback
3. 学会等名 7th IEEJ International Workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization (SAMCON2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuki Nagatsu, Hideki Hashimoto
2. 発表標題 Multilateral Haptic Feedback Control by Transmission of Force Information
3. 学会等名 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yuki Nagatsu, Hideki Hashimoto
2. 発表標題 Bilateral Haptic Feedback for Different Working Ranges by Transmission of Force Information
3. 学会等名 13th International Conference on Human System Interaction HSI 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yuki Nagatsu and H Hashimoto
2. 発表標題 Bilateral Control by Transmission of Force Information with Application to Time-delay System and Human Motion Reproduction
3. 学会等名 the 6th IEEJ International Workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization (SAMCON2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yuki Nagatsu and H Hashimoto
2. 発表標題 Force Control for Vehicle Robot With Inverted Two-wheeled and Stable Travelling Modes
3. 学会等名 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, IECON2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 長津裕己、橋本秀紀
2. 発表標題 モード座標変換の概念に基づく力情報のみを伝送する バイラテラル制御による動作の保存・再現
3. 学会等名 第20回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会(SI2019)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yuki Nagatsu, Hideki Hashimoto
2. 発表標題 Load-Side Sensor-less Disturbance Estimation Based on Integration of Motor-Side Velocity and Acceleration Information for Flexible Manipulators
3. 学会等名 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yuki Nagatsu, Yukihiro Matsushita, Kazutaka Murakoshi, Hideki Hashimoto
2. 発表標題 Switching Control of Personal Vehicle with Two wheels and Three Wheels Modes
3. 学会等名 The IEEJ International Workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization (SAMCON2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 長津 裕己(中央大学), 村越 司昂, Meysar Zeinali, 橋本 秀紀
2. 発表標題 等価制御入力の推定値を用いたスライディングモード制御に基づく 倒立二輪ビークルのロバスト制御
3. 学会等名 第19回 公益社団法人 計測自動制御学会 システムインテグレーション部門講演会 S12018
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

受賞 (1件) Best paper award in the area of Robotics and HSI in Robotics (13th International Conference on Human System Interaction HSI 2020, Tokyo, Japan, June 6-8, 2020)

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
---------	---------