

令和 6 年 6 月 26 日現在

機関番号：57301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K04542

研究課題名（和文）熟練者による技巧的動作を基にした人型ロボットの高速・高効率な運動生成

研究課題名（英文）Generation of fast and efficient motions for humanoid robots based on human skill

研究代表者

中浦 茂樹 (Nakaura, Shigeki)

佐世保工業高等専門学校・機械工学科・教授

研究者番号：20323793

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）：様々な分野への人型ロボットの導入が望まれるが、従来の軌道計画による運動制御では熟練者と同様の運動を実現することは難しい。そこで熟練者の技巧的動作に注目し、実動作の観察・計測をもとに運動の特徴を抽出し、その特徴量のみを出力零化制御を用いて陽に制御することで、結果として現れるゼロダイナミクスにより自然で滑らかな運動を生成することを目的としている。実社会への応用が期待できる具体的な技巧的動作として、複雑な拘束があるフラフープ運動、外環境との相互作用があるトランポリン運動、不安定な転がり運動があるローリングバランス運動を取り上げ、実動作の計測による運動の解析や機械システムによる動作の実現に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

急速な少子高齢化に伴い、様々な分野での人手不足が深刻化している。その解決方法の1つとして人型ロボットの導入が挙げられるが、従来の人型ロボットは人間のような繊細で滑らかな動作の実現は難しく、人間環境下への導入にはまだ適していない。そこで本研究課題では、人間が行う複雑で繊細な運動に着目し、ロボットでも実現させることを目標とした。これは、人間が行う複雑な動作の生成において、出力零化制御という制御理論の有効性を示す基礎研究として、また、ロボットに作用する様々な外力を利用しながら運動を行うことで、ロボットの機動性および柔軟性の向上が期待でき、人型ロボット導入の際の足掛かりを提案できると考えている。

研究成果の概要（英文）：The adoption of Humanoid Robots into various fields is desired. However, conventional motion control methods based on trajectory planning have limitations in performing the same motion as skilled humans. In first, to make sure of key features in skillfull human's motions observation and measurement for those real motions are carried out. Then the goal of this research is to generate natural and smooth movements utilizing the zero dynamics that arise as a result of output zeroing control where the feature of dexterous human motion is controlled explicitly. In this research three specific skillful motions are selected; Hula hooping, which involves complex constraints; trampoline jumping, which involves interaction with the external environment; and rolling balance, which involves an unstable rolling motion. Through the measurement experiments of these movements the analysis of those motions is achieved and the realization of rolling balance is accomplished by mechanical robotic system.

研究分野：制御工学

キーワード：出力零化制御 ゼロダイナミクス 熟練者の技巧的動作 ローリングバランス運動 フラフープ運動 トランポリン運動 実動作の運動解析

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C-19、F-19-1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

人手不足が深刻化する現在の日本において、問題を解決する一つの方策が人間社会そのものへの人型ロボットの導入であると思われるが、これまでの軌道計画によるロボット制御では実社会にロボットを溶け込ませて活躍させることは極めて困難である。実社会において必要とされる人型ロボットの動作は、やはり人間らしい滑らかなものが要求される。

産業用ロボットは軌道計画による制御が主流であり、不測の事態への対応や外乱抑制の機能を有していたとしても、基本的にはシーケンシャルな動きが実現されているのみである。本応募研究課題で取り上げるような、人間が全身を使って行う巧みな運動は、軌道計画により実現される動作に比べて非常に素早く複雑なものとなっている。軌道計画によるロボット制御は、各関節の軌道を事前に関数として表現することが必要であるが、複雑な動作であればあるほどその表現が困難なものとなり、駆動する関節の数が多くなるほど動作が破綻することを防ぐためにその軌道の最適性を保証しておくことも要求される。

2. 研究の目的

人間らしい滑らかな動作の実現として、これまでに様々な人間の技巧的運動の実現を試みてきた。これらの研究では、劣駆動系における受動関節を効果的に利用することで、運動の滑らかさを表現できることに着目し、劣駆動系による人間の技巧的動作の実現を行っている。この制御手法の核心をなすことは、劣駆動系に存在するゼロダイナミクスであり、結果としてそのゼロダイナミクスを望みの動作とするためには、出力零化制御における出力関数の設定が重要となる。しかし、その出力関数の選択の指標が明確に示されていないのが現状である。

そこで、本研究課題では、熟練者による技巧的動作を基にした人型ロボットの高速度・高効率な運動生成を取り上げる。出力零化制御を行うことで現れるゼロダイナミクスによる結果としての運動を決定する出力関数の設定を議論するためには、単純な動作ではなく熟練者の技巧的動作の方がより運動の特性を引き出しやすいと思われる。そして、そのような運動を実現する制御方策の提案と、提案する手法の妥当性を確認するための検証実験を行うことを目的とする。

3. 研究の方法

具体的な熟練者の技巧的動作として、複雑な拘束を有するフラフープ運動や、外環境との相互作用を有するトランポリン運動、不安定な転がり拘束を有するローリングバランス運動を取り上げることとする。これらの運動は、人間らしい滑らかな動作であるとともに、その動作の本質は実社会への応用が大いに期待できるものである。また、出力関数の選択に向けて、実際の動作の観察・計測をもとに生体力学の観点からこれらの運動の特徴を抽出しようとする試みは、本研究課題の学術的創造性といえる。

実際の動作の観察・計測には、高速度カメラ4台を用いた計測環境により行う。これにより、被験者の運動を多くの角度から計測することができる。また同じ計測環境により、フラフープ運動やトランポリン運動といった異なる運動を計測対象とすることで、相互に運動の特徴を比較し、新たな視点に立った動作の解析を行うことが期待できる。また、それぞれの運動において、熟練者による洗練された動作と初心者の無駄を多く含む動作との比較も行っていく。この比較により、動作の違いを顕著に確認することができた場合、そこに滑らかな動作による高速度・高効率な運動を行うための鍵があると推測することができる。この特徴量を、出力零化制御における出力関数の設定に活かすことができれば、結果として得られるゼロダイナミクスにより生成される運動は無駄の無い滑らかなものとなり、既存のロボット制御における軌道計画によるものとは異なり、高速度・高効率な運動が生成されることが期待できる。

実際の動作の解析により得られた特徴量を基に、運動を実現するための最低限の自由度とダイナミクスを有する制御モデルを検討していく。考案するモデルの妥当性の検証には、モデルを基に逆シミュレーションを行うことで得られる数値データを3Dモデルとして可視化する。この3Dモデルの動きが自然で滑らかな動作を示す場合に、考案する制御モデルが技巧的な動作を実現するに当たり有効であるといえる。

制御系の構築は、前述の通り実際の動作の観察・計測により得られた特徴量を活かした出力関数を設定することから行う。そして、この出力関数を出力零化制御により零化することで、結果として得られるゼロダイナミクスが、周期的なフラフープ運動や発散的なトランポリン運動、揺動的なローリングバランス運動を実現することを試みる。

4. 研究成果

4.1 フラフープ運動

人間が行うフラフープ運動を計測するにあたり、計測環境の構築を行った。計測には、株式会社ライブラリーの高速度カメラ、Radish/3Dというリアルタイムビデオトラッキングシステムを用いた。人間が行うフラフープ運動を計測するにあたり、計測環境の構築を行った。フープに取り付けたマーカーは、人間の後方に移動することや、他のマーカーと重なることでカメラの死角に入り込み、追跡困難となることが考えられる。この問題については、Radish/3Dの機能の一つ

である剛体モードを使用し、フープに取り付けた全てのマーカーを一つの剛体として捉えることで、マーカーがカメラの死角に入っても追跡を継続することが可能となった。実際の計測環境としては、図1に示すように4台の高速カメラで被験者が運動する様子を撮影する。被験者には、図2に示すように、体幹部に2個、フープ部に8個のマーカーを取り付けている。

計測中の被験者の運動を観察すると、体幹下部に取り付けたマーカーに比べて、体幹上部に取り付けたマーカーの変位が少ない傾向が得られた。そこで接触点が上昇する際の、体幹部の軌跡について $X-Z$ 、 $Y-Z$ 平面についてそれぞれ観察した。 $X-Z$ 平面において、図3に示す体幹部を横から見た際の軌跡は、上部のマーカーを頂点とした三角形のようになっている。また、 $Y-Z$ 平面について、図4を見てみると、 Y 軸方向の運動が小さいことがわかる。 Y 軸方向を拡大した図5を見ると、接触点の高さ付近である100cmでくびれが出来ていることがわかった。

実際の人間がフラフープ運動をする様子を観察・計測した結果、フラフープ運動において、接触点が上昇する際の体幹部における運動の形状に特徴を持っていることを発見した。つまり、前後に並進運動を行っていると考えていたポールの運動が、実は振り子のようにある点を中心に円錐を描くように運動することで、接触点を上昇させていたことがわかった。

以上より、計測環境の構築、及びフラフープ運動におけるポール上昇時の特徴についての考察を行うことができた。これまで、並進運動を行っていると考えていた体幹部の動きが実際の運動を計測することで全く異なっていることを発見することが出来た。

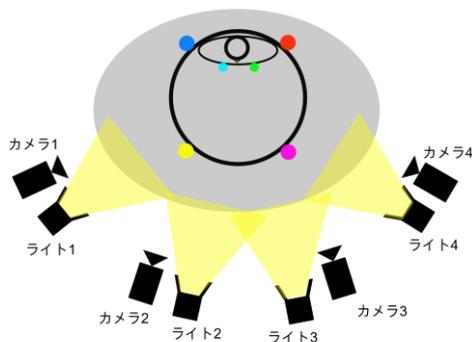


図1 計測環境の様子

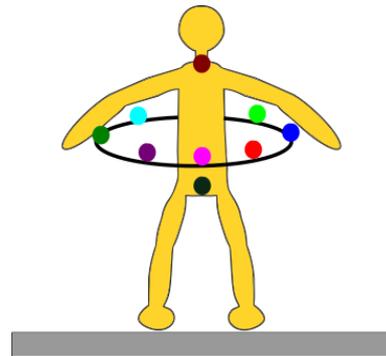


図2 被験者とフープへのマーカーの取り付け

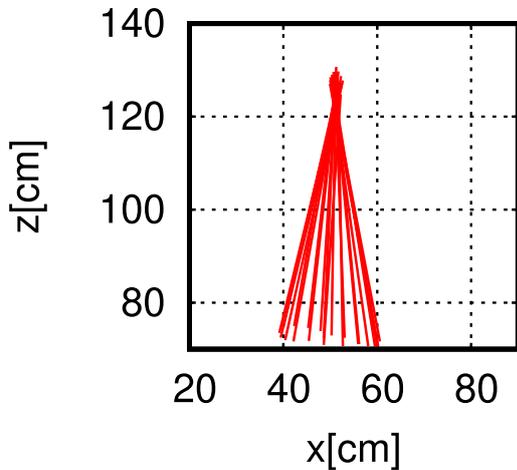


図3 $X-Z$ 平面における体幹部の運動の軌跡

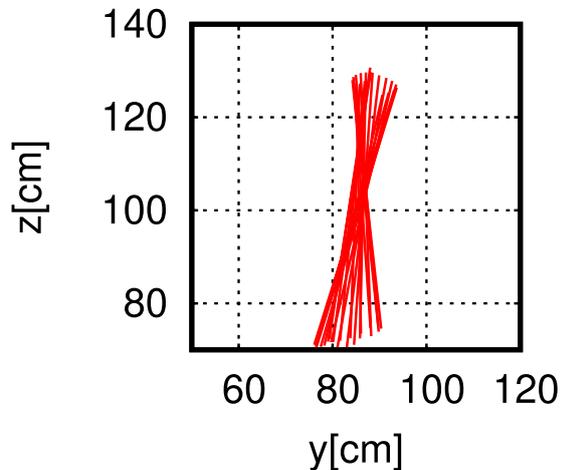


図4 $Y-Z$ 平面における体幹部の運動の軌跡

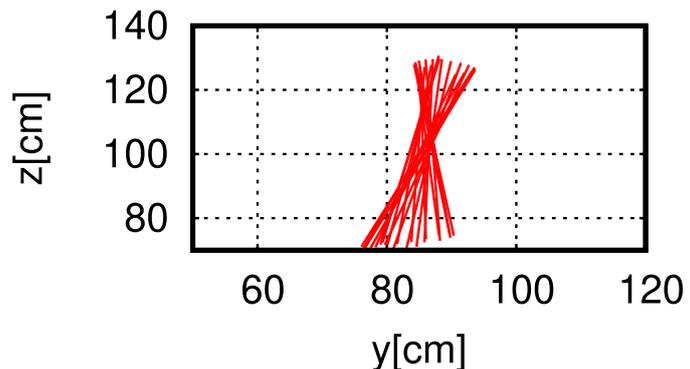


図5 図4の拡大図

4. 2 トランポリン運動

図6に示す直径 3.2m のトランポリンのモデル化を図7のように行った。このモデルでは、9つの質点と12本のバネがつながれており、質点の質量を m_i 、バネ定数を k_i とする。また、今回のモデル化においてバネが内部減衰 d_i を持つと考える。また、それぞれの質点の一般化座標は $q_i = [x_i, y_i, z_i]^T$ となっている。このモデルは初期段階のため、減衰係数以外のすべてのパラメータを線形と仮定している。このモデルの特徴は、以下の通りである。

- 72本のバネを4本で表現しているため、 k_1 はバネ1本のバネ定数の18倍と等しくなる。
- マットの中心から縁までを半径 r とした時、 $r/2$ 位置に m_2 がある。
- トランポリンの中心部分はメッシュ構造しているため、互いの質量に影響を与えることが想定される。そこで、 m_1 と m_2 は k_3 と k_4 でお互いにつながっている。

実験方法として、図8に示す計測環境において、4台の高速度カメラにてトランポリンに取り付けたマーカーの3次元座標の変化を計測した。また、シミュレーション方法として、測定された高さから重りが落下し、重りとトランポリンのマットが衝突する瞬間に重りの落下速度を、落下点の質量の速度に代入することとしている。重りは、マットの中心の質量 m_1 に高さ0.377mから、中心からずれた場所の質量 m_2 に0.605mから落下した。

トランポリンの中心の質量 m_1 に10kgの重りを落下させた実験結果とシミュレーション結果の比較においては、それぞれの振幅と収束値が近かった。その様子を図9に示す。しかし、シミュレーション結果の振動周期が遅れており、落下させる重りが軽くなるとその傾向が顕著に現れるため、パラメータに非線形性があると考えられる。また、トランポリンの中心からずれた場所の質量 m_2 に10kgの重りを落下させた実験結果とシミュレーション結果の比較においては、それぞれの振幅と収束値が遠かった。その様子を図10に示す。

以上より、計測実験環境の構築、並びにトランポリンのモデル化を試みた。バネ定数を線形と仮定してシミュレーションすることで、現実に近いトランポリンの挙動を得ることができた。



図6 トランポリンの全景

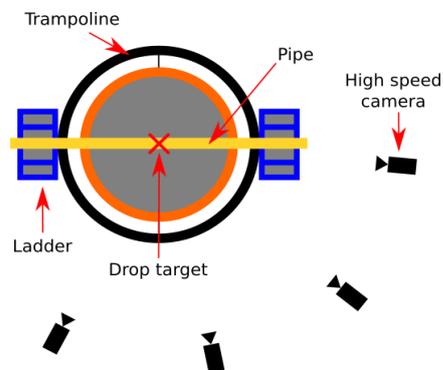


図8 計測実験環境の構成

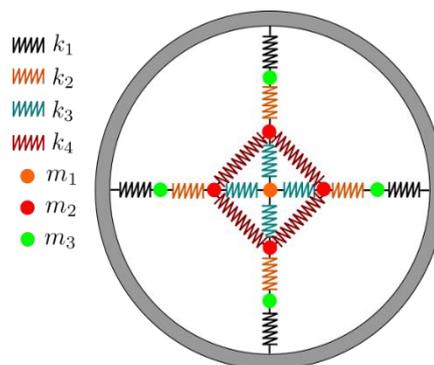


図7 トランポリンのモデル化

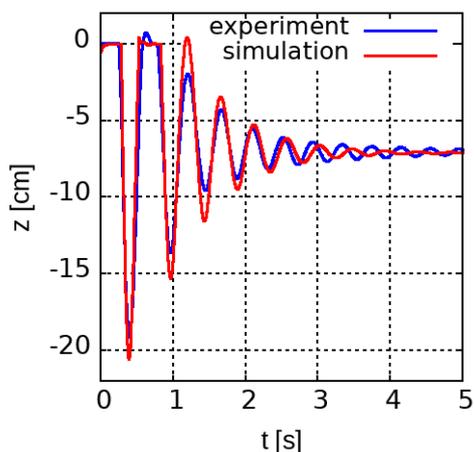


図9 m_1 に対する結果の比較

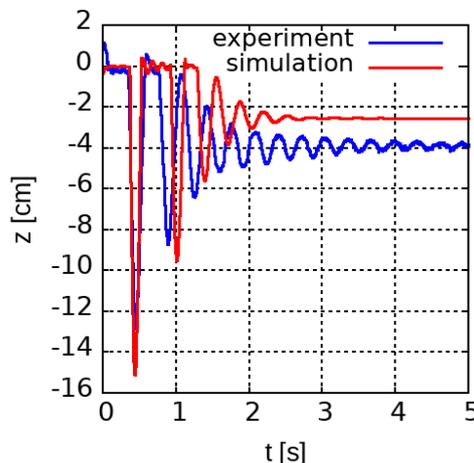


図10 m_2 に対する結果の比較

4. 3 ローリングバランス運動

人間の体を振子に置き換えたローリングバランスモデルを図11に示す。人間がローリングバランスを行う動作解析から、人間がこの動作を行う際、胸付近に不動点が生じることが確認された。これに基づき、振子上の一点の x 方向変位を出力関数に設定し、出力零化による制御シミュレーションと実証実験を行った。また、図11に基づく実験装置の概観を図12に示す。各マーカーを高速カメラでリアルタイムトラッキングを行い、各種状態を算出して制御している。

図13にシミュレーション結果を示す。人間が行う動作のように、各状態が揺動しながらバランスを保っていることがわかる。また、図14に示す実験結果では、約2分間の安定化運動を生成できた。各状態がそれぞれ小さく揺動しながら長時間姿勢を維持していることがわかる。また、図15に示す実験結果では、準周期運動を単純化する摂動を加えて制御を行った。この実験では安定性の評価のために、約7.5s付近で板に外乱を加えた。外乱発生後も周期的な揺動運動が現れており、摂動によって自然な揺動を生成できたことが確認できる。

以上より、提案手法によってローリングバランスの自然な揺動を生成できたといえる。

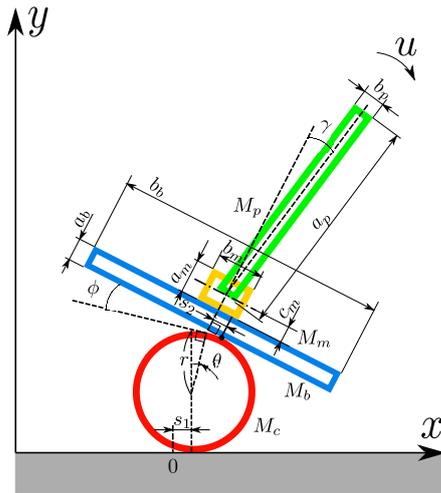


図11 ローリングバランスモデル

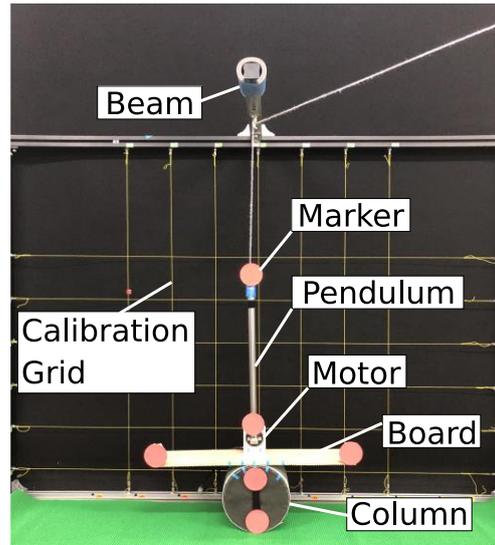


図12 実験装置の概観

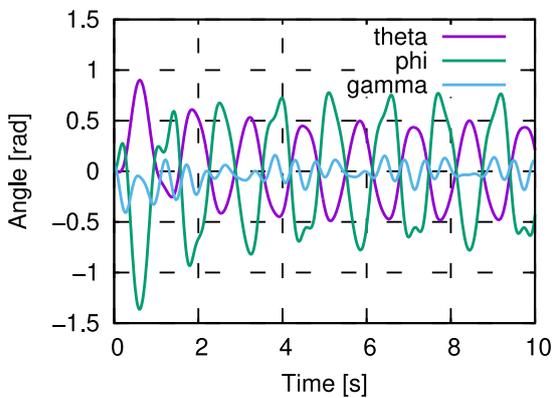


図13 シミュレーション結果

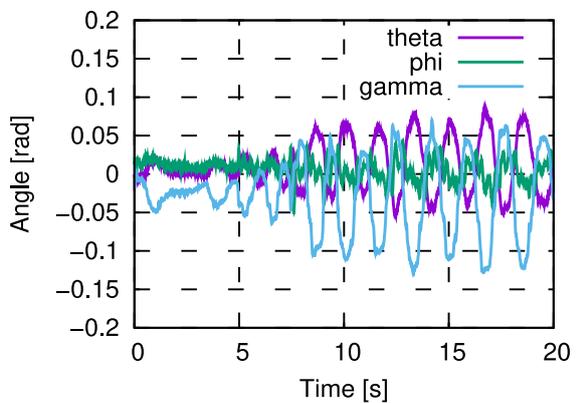


図15 入力に摂動を加えた実験結果

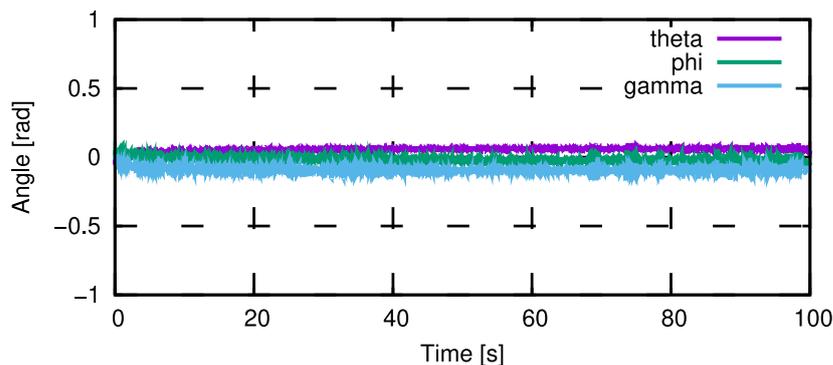


図14 実験結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

| |
|---|
| 1. 発表者名 Battumur Danzan, 武藤 涼太郎, 中浦 茂樹 |
| 2. 発表標題 トランボリンの跳躍運動の計測・解析によるモデリング |
| 3. 学会等名 第10回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|---------------------------------------|
| 1. 発表者名 吉永 貴津那, 中浦 茂樹 |
| 2. 発表標題 強化学習を用いたローリングバランスの安定化運動の生成 |
| 3. 学会等名 第10回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|-------------------------------------|
| 1. 発表者名 永田篤樹, 中浦茂樹 |
| 2. 発表標題 フラフープの持続回転運動に関するダイナミクス解析 |
| 3. 学会等名 第8回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|-------------------------------------|
| 1. 発表者名 江口賢大, 中浦茂樹 |
| 2. 発表標題 トランボリンを用いた跳躍動作の計測と運動解析 |
| 3. 学会等名 第8回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 大平英二, Battumur Danzan, 中浦茂樹 |
| 2. 発表標題 トランポリンを用いた跳躍動作の計測と運動解析 |
| 3. 学会等名 日本機械学会九州支部 第52回学生員卒業研究発表講演会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 横山葵翔, 横田瑞喜, 中浦茂樹 |
| 2. 発表標題 深層学習を用いた倒立振子の振り上げ安定化制御実験 |
| 3. 学会等名 日本機械学会九州支部 第52回学生員卒業研究発表講演会 |
| 4. 発表年 2021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 |
|---------|---------|
|---------|---------|