

令和 5 年 6 月 12 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04376

研究課題名(和文) 人力ロボティクスに基づく協働ロボットの実現のための基礎技術開発と統合

研究課題名(英文) Fundamental technical development and integration towards realization of human-powered cooperative robots

研究代表者

菅原 雄介 (Sugahara, Yusuke)

東京工業大学・工学院・准教授

研究者番号：60373031

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)：本研究では、人力協働ロボットによる実作業の実現を目標とし、多自由度化と高精度化のための機構と制御系の研究を行った。具体的には、リハビリテーションへの応用に向けた3自由度人力ロボットの開発、および入力軸回転数感応式アシスト動力遮断装置の動力学モデルの構築、操作者の運動負荷適正化手法の研究として回生クラッチを用いた人力駆動式パーソナルモビリティの設計検討、操作者の運動負荷推定法、医療福祉応用のための安全化技術に関する研究として、受動機構の操作力に対する運動特性の評価、集束超音波治療における押当力計測系の構築を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

操作者が動力を加えて駆動する「人力機械」は世に多くあるが、そのロボット化の方法論が議論された例はなかった。本研究の類似研究は世界にほとんどなく、本研究の成果により人力ロボティクスの更なる展開すなわち人力機械の知能化・ロボット化が可能になるという学術的意義がある。このことは同時に、手軽に利用でき多機能性と本質的安全性、健康増進/リハビリテーション機能、環境親和性を兼ね備える、これまでにないタイプのロボットシステムの実用化につながるという社会的意義もある。

研究成果の概要(英文)：Toward the realization of practical task by the human-powered cooperative robot, especially the assembly task assistance and the self-rehabilitation assistance, study on the mechanism and control for multi-DOF motion and improvement of accuracy were conducted. Specifically, the development of the 3-DOF human-powered robot for rehabilitation, dynamic modeling and design of input-speed-sensitive assist power interruption system, investigation toward the design of human-powered personal mobility vehicle using the regenerative clutch, development of the operator's exercise load estimation method, investigation on the evaluation of motion characteristics of passive mechanism driven by operational force, and development of a pressing force measurement system in focused ultrasound therapy were conducted.

研究分野：ロボット工学，機構学

キーワード：ロボティクス 人間機械システム ロボット機構

1. 研究開始当初の背景

Goswami, Peshkin らが 1990 年代に提案した **Passive Robotics** は、動力を持たないロボットを提案する画期的なコンセプトであった。ロボットは操作者が押し引きする力のみにより駆動され、システムは制動力を操作することで多様な知的運動を実現する。ロボットにとって最大の危険源であるアクチュエータをもたず、また原理的には操作者が力を加えない限り動作しないため、ロボットの本質的安全性の実現に有利であると考えられ注目されてきた。

このコンセプトに基づくシステムは、Peshkin らのグループの他、平田らにより数多く提案され大きな成果を挙げており、また樋口の PAS-Arm, Troccaz らの手術支援用アーム PADyC, 手術用手台ロボット EXPERT や iArmS もこの理念を共有する技術といえる。

ただしこれらに共通するのは、人の加える力とロボットが発生する制動力の合力で運動を発生するため、人がエンドエフェクタに直接力を加えることを前提とすることである。このため人がロボットを介して外部の環境と接触したり人の加える力がロボットを介して外部に出力されるような構造ではこの手法はそのまま利用できない。

一方、自転車などの人力車両、手動リフトなどに代表されるように、人間の運動を動力源として用いる機械は数多い。これら人力機械を、人力駆動のままその運動を制御する事ができれば、ロボット技術の応用により衝突・転倒回避や制振制御などの知的動作が可能となり能動安全化や多機能化を実現できる可能性がある。しかしながらこれらは先に述べたような、人間の加える力がシステムを介して外部に出力される構造であるため、**Passive Robotics** の研究成果は直ちに適用できない。これまでこういった「人力機械の知的制御」の方法論が議論された例はこれまでほとんどなかった。

そこで申請者らは、人間機械協調の新たなコンセプト「**Human-Powered Robotics**」を着想した。これは、操作者が機械的に加える動力により駆動されながらもシステムの運動を制御できる機構と制御系を開発することで「**知能化された人力機械**」すなわち人力機械としての本質的安全性とロボットシステムとしての多機能性を両立する人間-ロボットシステムを実現しようとするものである。これに基づけば、動力を持たないため本質的安全性の実現に有利であり、かつロボット技術により能動的にも安全で多機能なシステムを実現できる。

このためには、操作者が入力する動力を用い、動力流れの制御により関節角のサーボ制御を行う手法の開発が課題であった。申請者らはこれまでに、一対のパウダクラッチを用い操作者がハンドルを回す動力で駆動される 1 自由度機構やペダリングにより左右両輪の駆動を行う倒立振り子式モビリティを試作した。またパウダクラッチに比して制御性能とエネルギー効率の良い「回生クラッチ」とこれを用いた 1 自由度関節駆動機構も開発しており、第 1 段階の技術開発をほぼ終えた。

2. 研究の目的

本研究では、人力協働ロボットによる実作業の実現のための技術開発と統合を行う。特に組立作業支援ロボットとリハビリテーションロボットの二種類の人力協働ロボットの実現を目標とし、多自由度化と高精度化のための機構と制御系の開発、操作者の運動負荷適正化手法の開発、および医療福祉応用のための安全化技術の開発を行う。これらを統合することで実作業に適用できる人力協働ロボットを開発し、もってロボットとしての多機能性と人力機械としての本質的安全性を兼ね備えるシステムの設計論を構築することを目的とする。

3. 研究の方法

本研究は次章に示す複数の研究開発項目に分かれて実施した。

4. 研究成果

4. 1 多自由度化と高精度化のための機構と制御系の開発

4. 1. 1 リハビリテーションへの応用に向けた 3 自由度人力ロボットの開発

ロボットを使ったリハビリテーションには需要があり、安全性の担保が求められる。既存のロボットシステムでは様々な手法で安全性の担保が試みられているが、その多くが能動的な動力を保有しているため、制御装置が故障した際の安全性の担保が大きな課題である。ここで、使用者が加える動力により駆動されながらもその運動がコンピュータで制御されるシステムを実現する「**Human-Powered Robotics**」のコンセプトは、ロボットを使ったリハビリテーションに応用するうえで、本質的に安全性を担保できるという点で有用であると考えられる。

ここでは「**Human-Powered Robotics**」のコンセプトに基づき、本質的安全性を担保しながら上肢のリハビリテーションを行うことをタスクとして想定する 3 自由度人力駆動ロボットアーム (図 1)

を開発した。

まず機能的要求を、人力駆動で駆動されながらコンピュータで制御された運動を出力できること、人力動力が使用者の下肢から供給されること、使用者の腕の重さも含めたロボットアームにかかる重力を補償できること、空間内での3自由度の位置決めを実現できること、従来研究の課題であった駆動系の機械的損失低減と安全性の担保を両立できること、と定めた。

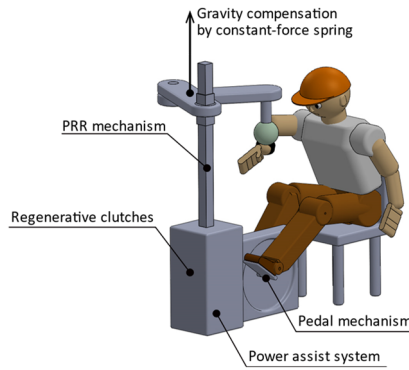


図 1 コンセプトイメージ

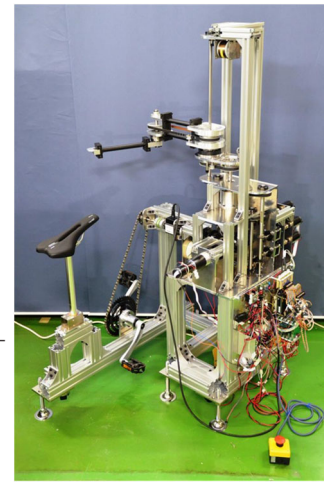


図 2 試作機 THR80

次に、機能的要求を満たす動作原理のコンセプトとして、回生クラッチを6台用いた駆動トルクの制御、ペダルを介した人力動力の供給、定荷重ばねを用いた重力補償、PRR機構による空間内での3自由度の位置決め制御、摩擦力と慣性力のバランスを利用して人力動力の非供給時にアシストモータの動力伝達を物理的に切り離すパワーアシストシステム、を考案した。

ここで、定荷重ばねを用いて人の腕の重さも含めたロボットアームにかかる重力を補償すると、人力動力の非供給時にロボットアームが鉛直上向きに上昇してしまい危険であるため、これを防止するために差動歯車と無励磁作動形電磁ブレーキを組み合わせた鉛直運動拘束を提案した。

これらの有効性を実験的に確認するために、試作機(図2)を開発し、これを用いた実験を行った。まず、提案するパワーアシストシステムの有効性を確認した。次に、出力節に外力が加えられない状況で実験を行い、位置制御性能を確認した。さらに、出力節に外力が加えられる状況で実験を行い、重力補償の有効性を確認した。最後に、リハビリテーション動作を想定した目標軌道を与えて実験を行い、開発したロボットアームのリハビリテーションへの応用の可能性を示した。

4. 1. 2 入力軸回転数感応式アシスト動力遮断装置の動力学モデル

「人力ロボティクス」のコンセプトに基づくロボットは、操作者が動力供給を停止するとロボットも停止するという点で本質的な安全性を有している。過去の研究から機械的損失を補償するためにパワーアシストを用いることが有効であることがわかったが、このことは人力駆動ロボットのもつ本質的な安全性を損ねることになる。そこで前項のロボットの開発において、機械的損失の補償と本質的な安全性の担保を両立するために、人力動力の供給停止時にロボットからパワーアシスト動力を遮断する入力軸回転数感応式アシスト動力遮断装置(図3)が開発された。しかし、この装置の

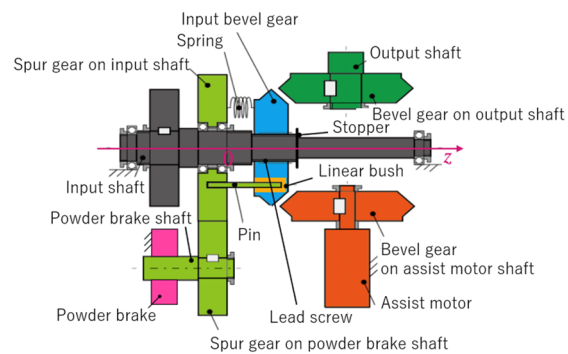


図 3 入力軸回転数感応式アシスト動力遮断装置

運動は定性的にしか明らかになっておらず、どのような条件で動力が切り離されるのかが不明であった。そこでここでは、この入力軸回転数感応式アシスト動力遮断装置について、その力学モデルを導出し、これに基づく最適設計を行うことを目的とした。

はじめに装置の運動状態を3つのフェーズに分類し、さらにそれぞれのフェーズにおいて装置を一体となって運動する部品ごとに分割し、各部品において成立する運動方程式や各部品間において成り立つ拘束条件を立式し、力学モデルを導出した。このモデルは入力として入力軸の角変位やアシストモータのアシストトルクを与えることで解くことができる。

試作機を用いた実験により、アシストモータ駆動後に入力軸に供給されるトルクが加えたアシストトルク分だけ低減されることを確認し、パワーアシストの有効性を定量的に検証した。また、実験結果と同条件で行ったシミュレーションの結果を比較したところ、動力の接続と伝達を行うフェーズではシミュレーションは実験結果と非常によく一致していることがわかり、動力の遮断を行うフェーズでは実験結果と概ね同じ傾向を示していることがわかった。これにより導出した力学モデルの妥当性が確認できた。また、このシミュレーションより、装置に取り付けられたばねのばね定数やパウダブレーキによって調整可能な制動力、動力が遮断される時の入力軸の角加速度と動力が遮断されるまでの時間との関係を検証した。

4. 2 操作者の運動負荷適正化手法の開発

4. 2. 1 回生クラッチを用いた人力駆動式パーソナルモビリティの設計

人力駆動式パーソナルモビリティへの応用に関して、回生クラッチを用いた倒立振り型パーソナルモビリティの開発を開始した。研究代表者らが以前に開発した倒立振り型パーソナルモビリティ KMM74 は駆動系に使用したパウダクラッチの制御性能の悪さから倒立状態の維持に成功したのは数秒程度であった。これに対しここでは研究代表者らがこれまでに開発した回生クラッチを利用したパーソナルモビリティの開発を目指し、このための回生クラッチの運転範囲の定式化に取り組んだ。回生クラッチの運転範囲は以前の研究で明らかにしているが、これを正転側・逆転側の2台分組み合わせると関節駆動機構を構成した場合(図4)の運転範囲を定式化することを目的とした。

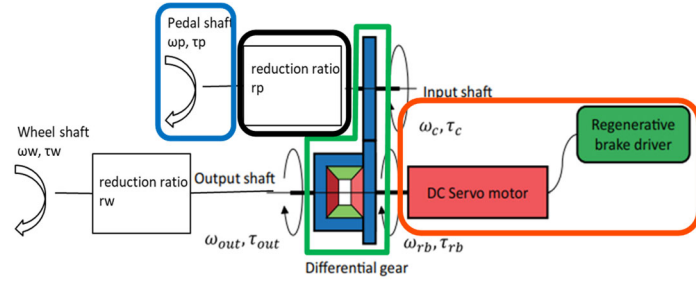


図4 回生クラッチ2台による関節駆動機構の模式図

まず、文献より、健康な男性が一定時間ペダリング動力を発生できる時間は200Wのとき1時間程度であること、また特にトレーニングを行っていない人の快適なペダリングケイデンスは150Wのとき70rpmであることを参考に、供給動力を150W、70rpmと設定した。

次に、回生クラッチの特性を表す式に加え、電源電圧の制限とドライバ許容電流の制限を新たに考慮して、人力駆動関節機構の運転範囲を算出した。これを図示すると図5のようになり、倒立維持・走行時の出力軸のふるまいをここに収まるように設計することが可能になった。

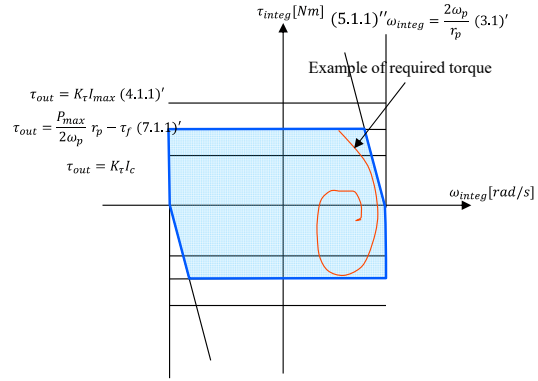


図5 関節駆動機構の運転範囲の一例

4. 2. 2 操作者の運動負荷推定のための計測デバイスの開発

操作者の運動負荷を適正にするために、本研究項目では操作者の運動負荷状況推定に必要な情報を計測可能なペダルを開発した。図6に製作したペダルを示す。本装置は圧力センサとジャイロおよび加速度センサを備える。圧力からペダリング中に発生する操作者の踏力を推定し、ジャイロおよび加速度センサの計測情報によりケイデンスおよびペダルの姿勢を推定する。踏力推定については有限要素解析により有効性を確認した(図7)。

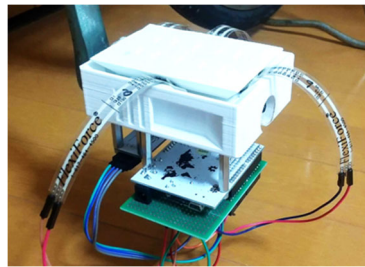


図6 動力推定ペダル

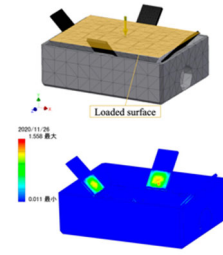


図7 FEA検証

4. 2. 3 操作者の運動負荷推定手法の構築

前節で開発したペダルにより推定されるペダリングに係る情報を元に操作者の運動負荷を推定する手法を構築した。システムに入力される動力だけでなく、操作者自身の脚部を駆動するための動力も運動負荷となる。そのため、4.2.1節で述べたように運動負荷を評価するために、入力する動力だけでなくケイデンスが重要となる。

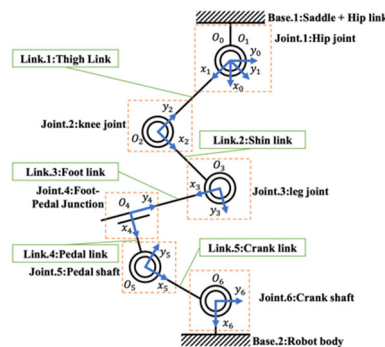


図8 負荷推定モデル

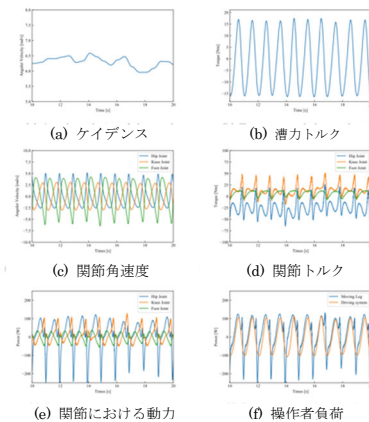


図9 負荷推定実験

本研究項目では、図8に示すように操作者の脚部と入力ペダルおよびクランクを剛体リンク系としてモデル化し、動力学的な計算より運動負荷を推定する手法を構築した。本手法ではシステムに入力される動力と脚部駆動のための動力をそれぞれ分離して推定可能である。前節のペダルを自転車に適用し、検証した結果を図9に示す。本実験により提案手法によりペダル運動に係る情報および操作者の運動負荷が推定できていることが示された。

4. 3 医療福祉応用のための安全化技術の開発

4. 3. 1 受動機構の操作力に対する運動特性の評価

集束超音波の照射による癌治療において、照射に用いるトランスデューサはロボットにより支持されているが、位置決めの際に術者がトランスデューサおよびロボットを手で直接動かす必要がある。その際の操作性向上のため、人が手で直接力を加えることで駆動される多自由度の受動機構をロボットに導入する提案がなされているが、このような機構について違和感無く操作できるようにするための設計法は明らかでない。

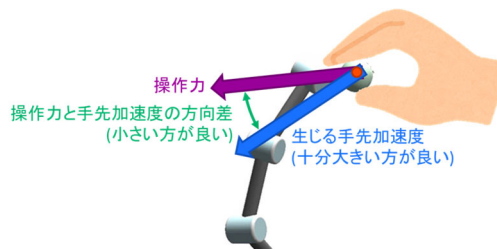


図 10 多自由度受動機構に人が力を加えた際の動作の特性

ここでは、受動機構に人が操作力を加えた際の動作の特性 (図 10) について、機構の力学モデルを基に、操作性と関係があると考えられる特性の定式化と、これに基づいた力学モデルと作業領域に固有の評価指標を提案することを目的とした。

まず、ロボットマニピュレータモデルの運動方程式を基に、手先部分に人が操作力を加えることで駆動される受動機構の力学モデルの定式化を行った。このモデルでは全ての関節を受動関節とし、各関節ではクーロン摩擦によるトルクが発生するものとした。次に、ロボットマニピュレータの動特性評価についての先行研究より、操作性と関係すると考えられる動特性について検討し、これに基づきリンクにかかる重力や摩擦が機構の手先に発生させる加速度と、操作力とそれにより発生する手先加速度の方向差に着目し、これらの特性を表す評価指標を力学モデルから導いた。また、これらの評価指標が示す値は機構のコンフィギュレーションに依存するため、これらの式を基に、機構の力学モデルおよび作業領域に固有の評価指標をそれぞれ提案した (図 11)。

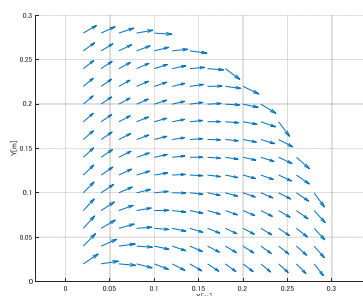


図 11 2R シリアルロボットの hand 加速度にクーロン摩擦が与える影響の一例

これらの提案について検証するために、2 自由度のシリアル機構およびパラレル機構の力学モデルを用いたシミュレーションを行い、指標がコンフィギュレーション毎に示す値を図として表現することで (図 12)、モデルのパラメータの変化が動特性に与える影響、シリアル機構とパラレル機構における動特性の差異、受動機構の設計指針として考えられることについて考察した。

これらの提案について検証するために、2 自由度のシリアル機構およびパラレル機構の力学モデルを用いたシミュレーションを行い、指標がコンフィギュレーション毎に示す値を図として表現することで (図 12)、モデルのパラメータの変化が動特性に与える影響、シリアル機構とパラレル機構における動特性の差異、受動機構の設計指針として考えられることについて考察した。

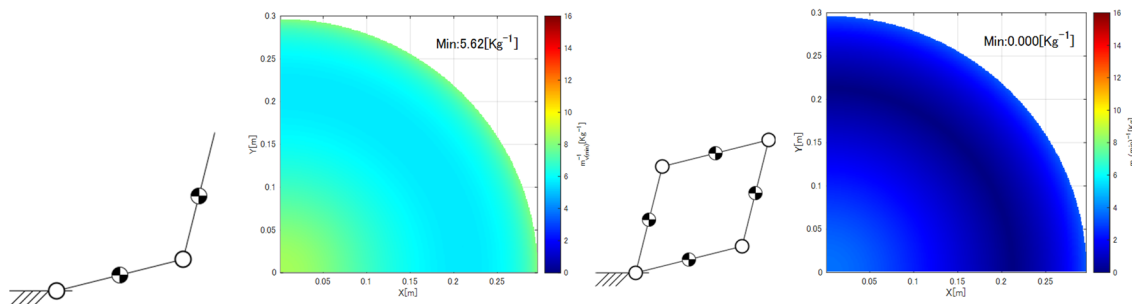


図 12 操作力と垂直に生じる手先加速度の比のシリアル機構とパラレル機構の比較

4. 3. 2 集束超音波治療における患者押当力計測系の構築

集束超音波の照射による癌治療において、照射に用いるトランスデューサはロボットにより支持されているが、実際の治療では患者の患部とトランスデューサの間に音の通り道 (アコースティック・ウィンドウ) を作る必要がある。アコースティックウィンドウは水と同等の音響インピーダンスを持つ物質で満たすことが重要であり、本研究では脱気水を満たしたシリコン製の水袋をトランスデューサに取り付け、患者に押し当てることでアコースティックウィンドウを確保する方式を採用する。超音波を減衰させることなく体内へ伝達させるためには、この水袋を患者体表へ適切な力 (圧力) で接触させる必要があるが、その力については明らかになっていない。そこで、適切な接触力を実験的に計測するための計測系を構築した。具体的には、128ch の HIFU トランスデューサに脱気水を含んだ水袋を装着し、さらにトランスデューサとそれを支持する 6 自由度ロボットの間にかセンサ (新東工業, ZYX100A102) を備えた実験系を製作した。この試験系を用いて、計量計 (AND, SH-20K) を用いた精度評価試験を行ったところ、精度は目標値の 5% 以内に収まることが分かった。この実験系を用いることで、適切な接触力を求めるための超音波照射実験が可能になり、力学シミュレーションへのフィードバックが行える他、安定した治療プロトコルの構築も可能となる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 八木達也, 菅原雄介, 武田行生, 呂超, 二瓶美里
2. 発表標題 高齢者向けモビリティのためのペダリング運動負荷システム（楕円軌道ペダル機構の制御法と性能評価）
3. 学会等名 第42回バイオメカニズム学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 八木達也, 菅原雄介, 松浦大輔, 武田行生, 二瓶美里, 西畑智道, 鎌田実, 遠藤央
2. 発表標題 高齢者向けモビリティのペダリング運動負荷システム（筋骨格シミュレーションに基づく楕円軌道ペダル機構と負荷パターンの設計）
3. 学会等名 第38回日本ロボット学会学術講演会講演予稿集
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 内呑優希, 塚本航平, 菅原雄介, 遠藤央, 岡本淳, 武田行生
2. 発表標題 人カロボティクスの研究（第12報, 人力感応式アシストパワー遮断装置の提案と原理検証）
3. 学会等名 第40回日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 菅原雄介, 八木達也, 二瓶美里, 武田行生
2. 発表標題 高齢者向けモビリティのためのペダリング運動負荷システム（楕円軌道ペダルを用いた介入実験）
3. 学会等名 LIFE2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yusuke Sugahara
2. 発表標題 On the Drive System of Robots Using a Differential Mechanism
3. 学会等名 The 6th IFTOMM Asian Mechanisms and Machine Science Conference (AsianMMS2021) (招待講演) (国際学会)
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
研究分担者	岡本 淳 (Okamoto Jun) (10409683)	東京女子医科大学・医学部・非常勤講師 (32653)	
研究分担者	遠藤 央 (Endo Mitsuru) (50547825)	東京工業大学・工学院・特任准教授 (12608)	

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