

令和 3 年 6 月 10 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2017～2020

課題番号：17H02135

研究課題名（和文）膝関節外傷と障害の予防法開発に向けた荷重下水平方向の下肢筋力評価と強化法の開発

研究課題名（英文）Development of horizontal direction lower limb muscle strength evaluation and strengthening method in closed kinetic chain for the development of preventive methods for knee trauma and overuse injury.

研究代表者

木村 佳記 (Yoshinori, Kimura)

大阪大学・医学部附属病院・理学療法士

研究者番号：00571829

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,800,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、膝外傷・障害予防とリハビリテーションに貢献するため、荷重下での両脚への水平方向の抵抗による下肢筋力評価と強化方法の開発を目指し、ER流体（Electrorheological Fluid）を用いたトレーニング装置、コンピュータ制御ソフト、足部の自然な動きを妨げない足置き台、リアルタイムな運動姿勢評価/フィードバック手法を開発した。トレーニング装置は両脚運動への耐久性を有し、対象者の円滑な筋力発揮を可能とした。制御系ソフトウェアは速やかな負荷方向の反転や負荷速度の変更を実現した。本システムは、健康人を対象とした生体実験において有害事象なく機能した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

立位の荷重状態（閉鎖運動連鎖）において、両脚に水平方向の負荷を同時に与えるトレーニング手法とそれを実現する装置からなるトレーニングシステムは過去に報告がなく、本研究成果は新たなリハビリテーション科学およびトレーニング科学における下肢筋力の評価/トレーニング方法論、機械工学における機械構造と制御理論を提供した。本トレーニングシステムを基盤とし、様々な運動形態における生体運動力学を解析し、膝関節への不要な負荷を回避して筋負荷を効果的に高める方法を抽出することにより、従来の方法論にはなかった新たなトレーニングの創出と、これらを応用した幅広い対象の外傷・障害予防、機能回復の科学への貢献が期待される。

研究成果の概要（英文）：In order to contribute to the prevention and rehabilitation of knee trauma and overuse injury, this study aimed to develop a method for evaluating and strengthening lower limb muscle strength by horizontal resistance to both legs in closed kinetic chain. We developed a training device using ER (electrorheological) fluid and computer-controlled software, a tread swing that does not interfere with the natural movement of the foot, and a real-time posture evaluation / feedback method. The training device has durability against both leg exercises and enables the subject to smoothly exert his / her muscle strength. The control system software has realized quick reversal of the load direction and change of the load speed. This system worked without adverse events in biological experiments on healthy subjects.

研究分野：バイオメカニクス

キーワード：トレーニング装置（ロボット） 膝関節 前十字靭帯 外傷予防 障害予防 ER流体 リハビリテーション closed kinetic chain

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、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

研究代表者らは、片脚スクワット中に遊脚側の下肢を抵抗に抗して後方や側方に移動する運動(抵抗レッグリーチ)は、支持側下肢の強化に必要な筋負荷は高まるが、膝前十字靭帯(anterior cruciate ligament: ACL)に有害な前方剪断力や外反力は抑制することを報告した。次に、Electro-Rheological Fluid (ER 流体) プレーキを用いたトレーニング装置(ERIK)を開発し(平成21-23年度、基盤研究(C))、抵抗レッグリーチにおける等速度制御下での下肢筋力の測定と強化を可能とした。さらに、アクティブ制御(位置・速度・装置の能動的な力発揮を制御)による多彩なトレーニング負荷を実現した(平成24-27年度、基盤研究(B))。しかし、スポーツ外傷として頻度の高い方向転換やストップ動作、高齢者が膝関節痛を訴える歩行や階段などの日常生活動作は、両脚支持から前後左右への開脚によって片脚へ重心を移動する動作であるが、従来の装置ではそのような両脚同時のトレーニングは難しい。そこで、これらの外傷・障害の予防に向けて、両脚に前後左右の並進方向の負荷を適切に与え、膝関節への有害な負荷なく安全に筋力を評価・強化する装置や方法が必要と考えた。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、スポーツ選手から高齢者まで幅広い対象の膝関節外傷・障害予防とリハビリテーションに貢献するため、立位荷重下での両脚への並進方向の抵抗による下肢筋力評価とトレーニング方法を開発することである。このため、前後左右の並進方向の負荷を両脚に個別の強度で与え、床反力をコントロールして膝関節に不要な内外反や回旋の力を低減しながら荷重下での下肢筋力(駆動力)を計測・強化できるトレーニング装置とコンピュータ制御ソフトを開発する。本装置を用いて両脚での開閉脚や前後交差運動に同時の抵抗を与え、運動実施者の筋力に適したシンプルで安全かつ効果的なトレーニング手法を確立する。

### 3. 研究の方法

#### (1) 平成29年度

先行研究で開発した片脚トレーニング装置(ERIK)の構成図を基に作成した両脚トレーニング装置の構成案から、装置仕様の検討、制御機構の考案を開始し、基本設計を完了した。しかし、当初の予測に反して仕様に適したマイコンが市販品になく、制御機構の詳細設計と製作が行える業者の選定が必要となり、補助金を平成30年度に繰り越して計画を続行した。

#### (2) 平成30年度

1号機の詳細設計とハードウェアの製作を完了したが、ソフトウェアの外注先での調整が遅延し、装置の完成も遅延した。その間、足部の自然な動きを妨げず、膝関節への負荷を低減するように揺動する足置き台の開発と製作を行った。その機構はプーリ直径の差を利用する差動機構である。足置き台の推力とストロークを揺動運動の動力とし、2つのプーリの直径差から推進方向のストロークに応じた揺動角度が決定され、プーリ径の調節により揺動角度を調節できるように設計した。

#### (3) 令和元年度

1号機と2号機のハード/ソフトウェアを完成して統合した。しかし、電気系統のトラブルの対策に時間を要し、制御系ソフトウェアの充実が図れず、装置の制御は簡潔なものにとどまった。1号機において、特性試験装置を用いて足置き台を含めた評価試験を実施した。EBMOの基礎

特性を実験的に求め、その発生力を測定した。その後、健常人において左右開閉脚運動や下肢前後交差運動などのトレーニング動作による使用試験を行った。

#### (4) 令和2年度

令和2年度は、電気系統のトラブルを改善し、生体運動に適したハードウェアの調整、制御系ソフトウェアの改善と拡充を図った。これに並行して、様々な施設での使用や社会実装時のマンパワー不足に備え、トレーニング実施中の姿勢を実時間で計測・評価し、不適切な運動姿勢の該当関節を運動実施者にフィードバックする、運動姿勢評価およびフィードバック手法を開発した。その後、健常人において、等負荷制御下での閉脚・開脚運動・前後交差運動の抵抗運動を実施し、研究分担者らが開発したウェアラブルな歩行解析システム(M3D歩行解析システム、テック技販社製)を用いて運動力学的データを収集した。

### 4. 研究成果

#### (1) 平成29年度

新規開発した両脚トレーニング装置(EBMO: Equipment for bilateral movement training with a horizontal resistance force provided by ER fluid)の内部構造の概要を図1に示す。EBMO

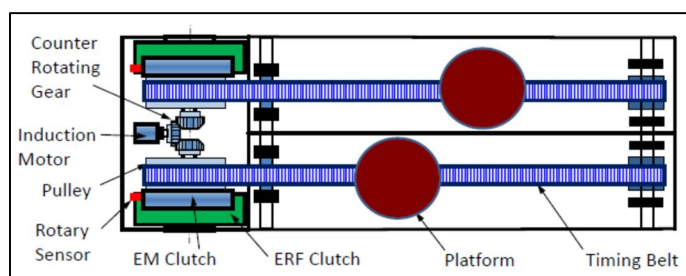


図1 EBMOの内部構造概要

はER流体クラッチを負荷器としている。モータの動力をかさ歯車で配分した後、ERクラッチの制御により足置き台の並進力を制御して負荷とする。装置上には、レールおよびレール上をスライドする足置き台があり、タイミングベルトが接合されている。タイミングベルトはプーリーを介してERクラッチに繋がっており、制御されたトルクがその台に伝達される。EBMOはERIKより大きなERクラッチを用い、また高速にON/OFFを切り替えられる電磁クラッチ(EM Clutch)を直列に配置して共に制御することにより、大きな負荷制動力を発揮しながらも、基底抵抗力は抑制して高速運動を伴うトレーニングに対応できるようにした。

#### (2) 平成30年度

EBMO(図2)は、本体機構、レール部、制御BOXからなり、本体ボックスに手持ちコントローラや制御用パソコンが接続される。開発した足置き台は、足置き台の移動に連動して、ロールおよびヨー方向に踏面が回転する(図3)。足置き台の踏面角度を姿勢に応じて適宜変化させることで、前後交差運動では自然歩行に近い姿勢を再現でき、また左右開閉脚運動では下肢の開脚に伴う膝関節の側方への負荷を軽減させることが可能と考えられた。

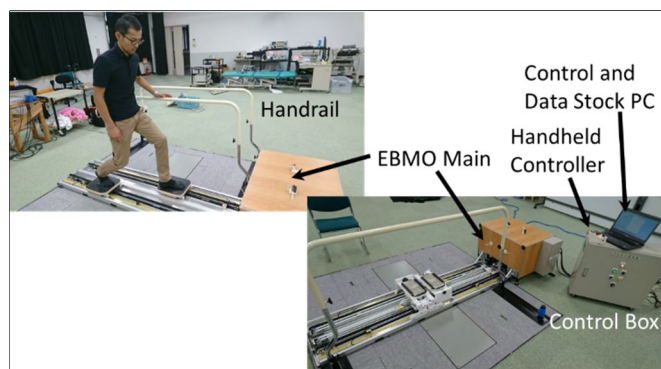


図2 EBMOの外観

### (3) 令和元年度

ER クラッチに印加する電圧 $V$ に対するEBMOの発生力 $F$ の関係を図4に示す。0kV のものを除き、次に示す二次関数でモデル化できる。

$$F = 107V^2 + 59.9V + 27.8$$

同式より、0kV のときの抵抗値は27.8N となり、当初の仕様(20N以下)

を満たせない。一方、同図の0kV の値は、ER クラッチと直列につながる電磁クラッチも切断した時の値で、このときの抵抗力は12.6N であり、電磁クラッチも同時に制御することで、確かに基底抵抗力を小さくでき、要求仕様を満たした。

健常人における使用実験において、図5に示す左右開脚運動(上) 前後交差運動(下) など下肢をスライドさせながら抵抗を与える運動形態が実施可能であった。

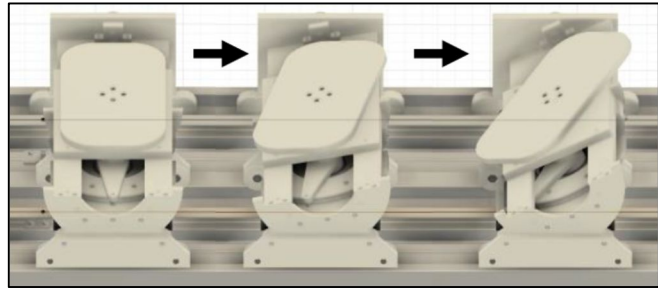


図3 EBMOの足置台における揺動

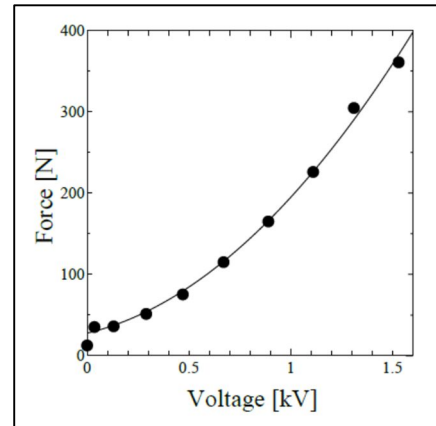


図4 EBMOの電圧-力特性

### (4) 令和2年度

トレーニング装置1号機のソフトウェアを完成させ、2号機のハードウェア・ソフトウェアともに完成し、統合した。足置き台は、使用試験の結果をもとに詳細設計を見直してレール部への設置性を向上させ、振動や片側の浮きを大幅に軽減させ、運動実施者の不快感を改善した。また、いくつかの電気系統およびソフトウェアの不具合を解消し、速やかな負荷方向の反転や負荷速度の変更を実現した。ただし、エンコーダ関係などいくつかの電気系統の不具合が解消できていないため、全てのトレーニング動作の実現には至っていない。

トレーニング装置の開発に並行して、カメラにより運動中の姿勢を計測し、理想的な運動姿勢に対するズレを実時間で評価して、トレーニング実施者にフィードバックするシステムを開発した。股、膝、足関節の角度を各トレーニングの姿勢ごと(良姿勢、不良姿勢)に求めておき、実際のトレーニング中にはその部分だけを図6のように強調して見せることで、トレーニング実施者の認知負荷を低減しつつ、修正すべき箇所を有効に教示できるシステムになった。図7は、右膝に有意な差異がある場合の一例である。



図5 EBMO使用試験における動作



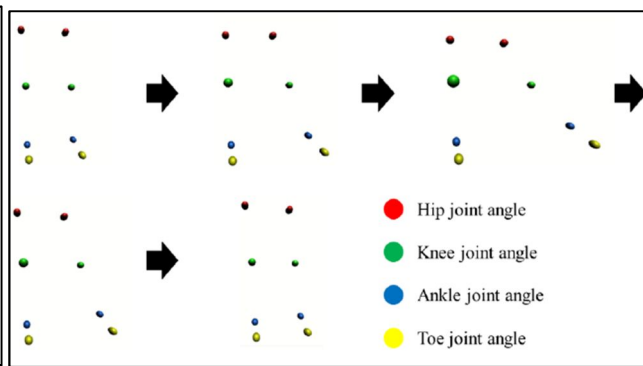
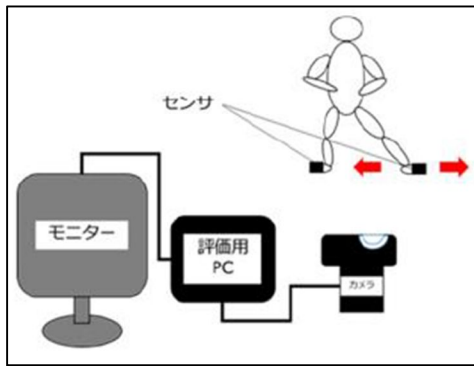


図6 トレーニング姿勢のフィードバックシステム概要

図7 側方レッグリーチ運動時の関節位置の変化

その後、健常人による運動試験において、歩行とは異なる運動形態ではあったが、図8のようにウェアラブル歩行解析システムによる計測に成功し、床反力および関節運動のデータを収集し、関節モーメントも算出できた。解析の結果、荷重状態における下肢の内外転抵抗運動については、今回の設定では仮説に反して膝関節の外反角度と外反モーメントに与える影響は小さかった。今後、様々な足置台の揺動速度や角度による運動力学的変化を調べる必要がある。

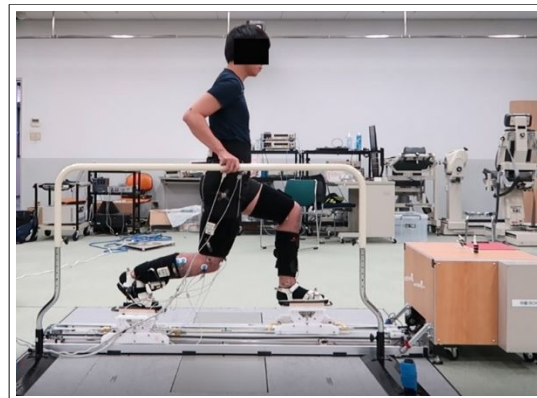


図8 生体運動試験の様子

<引用文献>

- [1]木村佳記, 小柳磨毅, 他:側方への抵抗レッグリーチ動作における支持脚の運動解析. 臨床バイオメカニクス31:445-452,2010
- [2] Koyanagi, K., Kimura, Y., et al: Development of an isokinetic exercise equipment for the lower limb: ERIK, Proceedings of the 12th International Conference on Motion and Vibration Control, 2D13, 2014
- [3] Yamamoto, Y., Koyanagi, K., Kimura, Y., Koyanagi, M., Inoue, A., et al: Verification of device type of strength training machine using ER fluid brake, Proceedings of the 2014 IEEE/SICE International Symposium on System Integration, 779-784, 2014

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5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 1件）

1. 著者名 Ken'ichi Koyanagi, Yoshinori Kimura, Maki Koyanagi, Akio Inoue, Takumi Tamamoto, Kei Sawai, Tatsuo Motoyoshi, Hiroyuki Masuda, Toru Oshima	4. 巻 vol. 5
2. 論文標題 ERIK: an isokinetic exercise device for the lower limbs.	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Robomech J	6. 最初と最後の頁 15
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1186/s40648-018-0112-z	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 玉本拓巳、小柳健一、木村佳記、小柳磨毅、井上昭夫、増田寛之、本吉達郎、澤井圭、大島徹	4. 巻 none
2. 論文標題 下肢筋力トレーニング装置における足置台揺動機構の提案	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 日本ロボット学会予稿集	6. 最初と最後の頁 3A3-01
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
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 Ken'ichi Koyanagi, Yoshinori Kimura, Maki Koyanagi, Akio Inoue, Takumi Tamamoto, Kei Sawai, Tatsuo Motoyoshi, Hiroyuki Masuda, Toru Oshima, Hiroyuki Masuda, Toru Oshima	4. 巻 none
2. 論文標題 Comparison of Load Profiles in a Resistive Single Leg Squat	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of the 2018 12th France-Japan and 10th Europe-Asia Congress on Mechatronics	6. 最初と最後の頁 326-331
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/MECATRONICS.2018.8495735	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 小柳健一、木村佳記、小柳磨毅、井上昭夫、玉本拓巳、澤井圭、増田寛之、本吉達郎、大島徹	4. 巻 none
2. 論文標題 下肢等速性筋力トレーニング装置ERIK	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 第23回ロボティクスシンポジウム 予稿集	6. 最初と最後の頁 239-242
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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 Takumi Tamamoto, Ken'ichi Koyanagi, Yoshinori Kimura, Maki Koyanagi, Akio Inoue, Tomoaki Murabayashi, Kei Sawai, Tatsuo Motoyoshi, Hiroyuki Masuta, Toru Oshima	4. 巻 none
2. 論文標題 Tread-surface Swing Mechanism of Lower Limbs Strength Training Device	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proc. of 2019 IEEE/SICE International Symposium on System Integrations	6. 最初と最後の頁 417-421
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 -

〔学会発表〕 計12件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 K. Koyanagi, Y. Kimura, A. Inoue, M. Koyanagi, T. Tamamoto, K. Noda, T. Tsukagoshi and T. Oshima
2. 発表標題 EBMO: Equipment for Bilateral Movement Training with a Horizontal Resistance Force Using an ER Fluid Brake
3. 学会等名 17th International Conference on Electrorheological Fluids and Magnetorheological Suspensions (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小柳健一, 木村佳記, 小柳磨毅, 玉本拓巳, 澤井圭, 増田寛之, 本吉達郎, 大島徹
2. 発表標題 単眼RGB-Dカメラを用いた筋力トレーニング中の運動姿勢計測の試み
3. 学会等名 日本機械学会2019年度年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 玉本拓巳, 小柳健一, 木村佳記, 小柳磨毅, 井上昭夫, 増田寛之, 本吉達郎, 澤井圭, 大島徹
2. 発表標題 下肢筋力トレーニング装置における足置台揺動機構の提案.
3. 学会等名 第36回日本ロボット学会学術講演会 (RSJ2018)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Ken'ichi Koyanagi, Yoshinori Kimura, Maki Koyanagi, Akio Inoue, Takumi Tamamoto, Kei Sawai, Tatsuo Motoyoshi, Hiroyuki Masuda, Toru Oshima, Hiroyuki Masuda, Toru Oshima
2. 発表標題 Comparison of Load Profiles in a Resistive Single Leg Squat
3. 学会等名 2018 12th France-Japan and 10th Europe-Asia Congress on Mechatronics (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takumi Tamamoto, Ken'ichi Koyanagi, Yoshinori Kimura, Maki Koyanagi, Akio Inoue, Tomoaki Murabayashi, Kei Sawai, Tatsuo Motoyoshi, Hiroyuki Masuda, Toru Oshima
2. 発表標題 read-surface Swing Mechanism of Lower Limbs Strength Training Device
3. 学会等名 2019 IEEE/SICE International Symposium on System Integrations (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小柳健一, 木村佳記, 小柳磨毅, 井上昭夫, 玉本拓巳, 澤井圭, 増田寛之, 本吉達郎, 大島徹
2. 発表標題 下肢等速性筋力トレーニング装置ERIK
3. 学会等名 第23回ロボティクスシンポジア
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 小柳健一, 木村佳記, 小柳磨毅, 井上昭夫, 玉本拓巳, 澤井圭, 増田寛之, 本吉達郎, 大島徹
2. 発表標題 歩行を模擬した目標速度曲線を用いた下肢筋力トレーニング
3. 学会等名 第38回バイオメカニズム学術講演会 (国際学会)
4. 発表年 2017年



1. 発表者名 松波恭平, 小柳健一, 玉本拓巳, 野田堅太郎, 塚越拓哉, 大島徹
2. 発表標題 多変量解析を用いた下肢筋力トレーニング時の姿勢評価
3. 学会等名 第21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
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 松波恭平, 小柳健一, 玉本拓巳, 野田堅太郎, 塚越拓哉, 大島徹
2. 発表標題 下肢筋力トレーニングにおける足先の角度変化の算出
3. 学会等名 2020年度電気・情報関係学会北陸支部連合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小柳健一, 木村佳記, 井上昭夫, 玉本拓巳, 村林知明, 小柳磨毅, 野田堅太郎, 塚越拓哉, 大島徹
2. 発表標題 EBMO: ERクラッチを用いて両脚へ同時に負荷を与える筋力トレーニング装置
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大塚崇平, 塚越拓哉, 野田堅太郎, 小柳健一, 大島徹, 玉本拓巳
2. 発表標題 筋活動による筋音・筋電の比較と筋疲労の評価
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 松波恭平, 小柳健一, 玉本拓巳, 野田堅太郎, 塚越拓哉, 大島徹
2. 発表標題 下肢筋力トレーニングにおける機械学習を用いた姿勢評価方法の検討
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2020
4. 発表年 2020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	中田 研 (Nakata Ken)  (00283747)	大阪大学・医学系研究科・教授  (14401)	
研究分担者	向井 公一 (Mukai Kouichi)  (00353011)	四條畷学園大学・リハビリテーション学部・准教授  (34444)	
研究分担者	前 達雄 (Mae Tatsuo)  (10569734)	大阪大学・医学系研究科・特任教授(常勤)  (14401)	
研究分担者	小柳 磨毅 (Koyanagi Maki)  (20269848)	大阪電気通信大学・医療健康科学部・教授  (34412)	
研究分担者	小柳 健一 (Koyanagi Kenichi)  (30335377)	富山県立大学・工学部・教授  (23201)	

## 6. 研究組織 (つづき)

	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	玉本 拓巳 (Tamamoto Takumi) (30800908)	富山県立大学・工学部・助教  (23201)	
研究分担者	武岡 健次 (Takeoka Kenji) (50342184)	武庫川女子大学短期大学部・健康・スポーツ学科・准教授  (44523)	
研究分担者	辻内 伸好 (Tsujiuchi Nobutaka) (60257798)	同志社大学・理工学部・教授  (34310)	

	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
研究協力者	井上 昭夫 (Inoue Akio)		
研究協力者	多田 周平 (Tada Shuhei) (30774608)	大阪大学・医学部付属病院・理学療法士  (14401)	
研究協力者	中江 徳彦 (Nakae Naruhiko)		
研究協力者	山田 大智 (Yamada Daichi)		

6. 研究組織（つづき）

	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
研究協力者	武 靖浩  (Taka Yasuhiro)		
研究協力者	下村 和範  (Shimomura Kazunori)		
研究協力者	杉山 恭二  (Sugiyama Kyouji)		
連携研究者	伊藤 彰人  (Ito Akihito)  (60516946)	同志社大学・理工学部・教授    (34310)	
連携研究者	境 隆弘  (Sakai Takahiro)  (60353009)	大阪保健医療大学・保険医療学部・教授    (34449)	
連携研究者	田中 則子  (Tanaka Noriko)  (20290380)	大阪電気通信大学・医療健康科学部・教授    (34412)	

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