

令和 4 年 6 月 20 日現在

機関番号：13903

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K12878

研究課題名(和文)脳卒中麻痺手のテーラーメイドリハビリのためのプログラム作成支援システム

研究課題名(英文) Program creation support system for tailor-made rehabilitation of stroke paralyzed hands

研究代表者

森田 良文 (Morita, Yoshifumi)

名古屋工業大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：00241224

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)：慢性期における脳卒中片麻痺者の手指運動機能回復のための3つのニューロリハビリデバイスのIoT化を図り、それぞれのデバイスから得られる情報に基づき回復効果を向上させるためのリハビリプログラム作成支援システムの開発を目指した。しかし、度重なる新型コロナウイルス感染拡大のため脳卒中片麻痺者による被験者実験が実施できなかった。そのため、より治療効果の高いデバイスに改良し、また健常者と脳卒中片麻痺を有する研究員によるデバイスの設定パラメータと身体状態の関係について知見を蓄えた上で、脳卒中片麻痺による被験者実験の計画を策定した。2022年度以降、この被験者実験を実施し、当初の目的を達成する予定である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

手指の回復改善に着目して手指リハビリのための3つのIoT化デバイスを完成した。健常者ならびに脳卒中片麻痺を有する研究員による被験者実験から、回復効果を得るためのデバイスの使用条件など様々な知見を得た。これに基づいて、脳卒中片麻痺者を対象とした被験者実験のための実験計画を策定した。今後、被験者実験を実施することで、将来的には、患者一人一人の身体状態に適したリハビリプログラムの作成支援から回復効果を向上させることが可能となることが期待される。さらに、これまで困難とされてきた麻痺手を回復させることが出来ることで、患者のQOL(生活の質)が改善されるばかりでなく、要介護度の改善にもつながると考える。

研究成果の概要(英文)：We aimed to develop an IoT-based rehabilitation system for three previously developed neurorehabilitation devices for recovery of hand motor function of hemiplegic stroke survivors in the chronic phase, and to develop a rehabilitation program creation support system to improve the recovery effect based on the information obtained from each device. However, due to the repeated spread of COVID19, the experiment could not be conducted on stroke survivors with hemiplegia. Therefore, we improved the device to be more effective for treatment, and formulated a plan for experiments on test subjects after accumulating knowledge on the relationship between the device setting parameters and physical condition of healthy subjects and a researcher with hemiplegia due to stroke. Based on this plan, we plan to conduct experiments on test subjects by the end of FY2022 to achieve our initial goal.

研究分野：リハビリテーション工学

キーワード：リハビリテーション トレーニング デバイス 手指 運動麻痺 脳卒中

### 1. 研究開始当初の背景

我が国の医学の進歩から、日本人の脳卒中による死亡率は年々下がっているものの、高齢社会、食の欧米化、運動不足などから脳卒中の患者数は増加している。そこで、近年、自主的な反復学習により運動パターンを脳に再学習させるための治療法が開発されている。これにより、一度傷ついた脳でも、脳の可塑性によって回復することが分かってきた。同じく研究分担者によって、脳卒中片麻痺患者（以降、脳卒中患者）の60%を占める重度患者に対して、運動機能を回復させるための徒手療法（療法士が直接患者の身体に触れて治療する施術）が開発されている。しかし、脳の再学習には莫大な反復訓練が必要であり、療法士にとってこの徒手療法は時間的、身体的負担が大きい。このため、徒手療法をロボットに代替させることが期待されている。一方、脳卒中患者の運動機能を回復させるためのロボットが世界中で研究開発されている。しかし、それらのロボットでも重度患者の症状として呈する共同運動パターン（単一の運動を分離して行うことができず、他の筋の運動と共同してある一定のパターンに沿って運動すること）や痙性麻痺（運動に関係ない筋肉の異常な筋緊張）の回復は期待できない現状がある。とりわけ、慢性期の手指の運動機能の回復は困難とされているが、日常生活における手指の運動機能はQOL（生活の質）に大きくかわることから、回復ニーズが高いことを、脳卒中片麻痺当事者らとの懇談から確認している。そこで研究分担者は図1に示す麻痺手の回復のためのトレーニングとして、トレーニングを阻害する痙性麻痺の減弱の治療、正常な筋収縮を促通するトレーニング、机上課題として物体把持トレーニングを繰り返すことを徒手により実施し、成果を上げている。さらに、研究代表者と～を支援するニューロリハビリデバイス（以降、デバイス）を共同で開発し、一定の成果が得られ、学会発表や展示会出展も行っている。しかしこれらのデバイスは個別の研究テーマとして深化させてきたが、横断的な研究がなされておらず、「麻痺手の運動機能の回復にとって、これらのデバイスをどのように活用すれば最大の回復効果が得られるのか」の問いに対する答えが明らかでなかった。

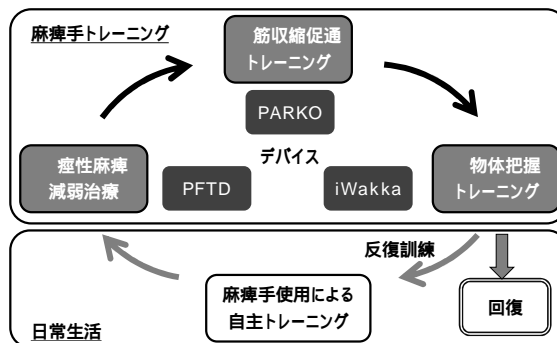


図1 麻痺手トレーニングの流れとデバイスの関係

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、麻痺手の運動機能回復のための3つのデバイスを統合したトレーニングにおいて、回復効果の向上を目指し、患者一人一人に適したリハビリプログラム作成支援システムの開発である。そのために、図2に示すようにデバイスの設定パラメータ、運動機能の評価、および身体状態などのデータに基づいて療法士に設定パラメータの提案を行う更新アルゴリズムを開発する。なお、回復効果の向上とは、より短い時間で同程度に回復させること、より高いレベルで回復させることである。

本申請における具体的な目的は下記2つである。

- (1) 各デバイスの有する機能の設定パラメータを変化させた時、トレーニング中および後の患者の身体状態がどのように変化するのか、それらの関連性を明らかにする。
- (2) 回復効果を最大限に発揮するデバイスの設定パラメータの更新アルゴリズムを見出す。

### 3. 研究の方法

前述の二つの具体的な目的を達成するための、当初の方法を以下に示す。

- ・2019年度は、個々のデバイスの改良（表1参照）により、麻痺手の運動機能回復リハビリのための支援システムの基本構成の構築を行う。iPadを用いて設定・計測・通信機能をデバイスに与えることでIoT化を図る。
  - ・2020年度は、脳卒中片麻痺者による被験者実験によりデータ収集を行う。
  - ・2021年度は、脳卒中片麻痺者による被験者実験を継続しながら、収集データの解析から支援システムの更新アルゴリズムを開発する。
- なお、脳卒中片麻痺者とは、治療入院を終え、麻痺を抱えながらも社会的に健常な人を指す。

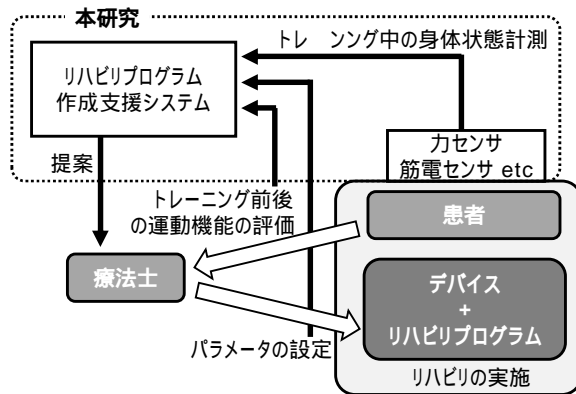


図2 リハビリトレーニングにおける本研究の位置付け

表1 デバイスの機能の設定パラメータと改良点

デバイス	機能の設定パラメータ	改良点
痙性減弱 治療デバイス PFTD	1. 往復運動の速度 2. 往復運動の変位 3. 往復運動の継続時間 (MP 関節の屈伸のため)	1. 力センサの開発 2. 力センサと筋電センサの組込 (治療中の痙性麻痺のモニタのため) 3. iPadを用いたIoT化
筋収縮促進 トレーニング デバイス PARKO	1. 発揮力の方向 2. 運動に対する抵抗力	1. 力センサの開発 2. 力センサと筋電センサの組込 (トレーニング中の痙性麻痺と発揮力の モニタのため) 3. 負荷抵抗機構の追加 4. iPadを用いたIoT化
把握力調整能力 トレーニング デバイス iWakka	1. 目標把握力のパターン 2. 機能的電気刺激の周波 数と強度	1. iPadを用いたIoT化

#### 4. 研究成果

2020 年度に脳卒中片麻痺者による被験者実験を計画して実施予定であったが、新型コロナウイルスの感染拡大による度重なる延期のため、研究期間内に実施は出来なかった。そこで、全てのデバイスにおいて当初の改良に加えて回復効果向上のための改良を実施した。また、健常者および1名の片麻痺患者による被験者実験を行った。これらの成果を以下にまとめる。

##### (1) 痙性減弱治療デバイス PFTD (PDFin に名称変更) の改良と有効性検証

脳卒中の後遺症として痙縮があり、手足を自由に動かすことができなくなる。また、運動麻痺による筋の不動により、筋硬直、拘縮、線維化による筋短縮、萎縮等の非神経性的変化が生じ、筋の粘性が増加、筋緊張を増加させる原因となる。そこで、痙縮や筋短縮に対するリハビリ方法として研究分担者が開発したピストンテクニックという徒手療法がある。このピストンテクニックを模擬する Piston Device for Finger (PDFin)を開発した。本研究で改良した PDFin を図3に示す。PDFin は駆動部、制御部、固定装具から構成される。駆動部はギヤ付 DC モータとクランク機構から構成され、固定装具は往復運動を行う。固定装具はクランク機構の可動部先端と接続した。固定装具は蝶番による回転の1自由度を有する。使用時は手を固定装具にマジックベルトで固定する。クランク機構の往復運動の周波数は 8.8Hz、振幅は 0.00125m である。

本研究では IoT 化のために二つのセンサ(作用力センサと関節角度センサ)を開発して PDFin に搭載した。作用力センサの測定範囲を 0~40kg である。作用力センサには4つの一軸ビーム型ロードセルを図4に示すように配置した。一方、関節角度センサは固定装具の回転自由度の角度を計測し、関節角度を算出することを可能にした。従来の固定装具を使い、それにセンサを取り付けることからワイヤ式変位計測を採用して製作した。ポテンショメータの角度からワイヤの変位を求め、ポテンショメータとワイヤの取り付け位置から関節角度を算出する。開発したセンサを図5に示す。二つのセンサの測定値はマルチファンクションデバイス(National Instruments, USB-6211)を介して PC に取り込んで作用力と関節角度の計算を行った。この処理と画面表示に DAQExpress (National Instruments) を用いた。計測サンプリングは 1000Hz である。

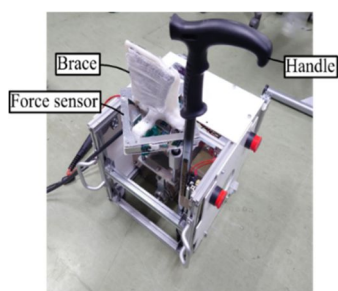


図3 PDFin

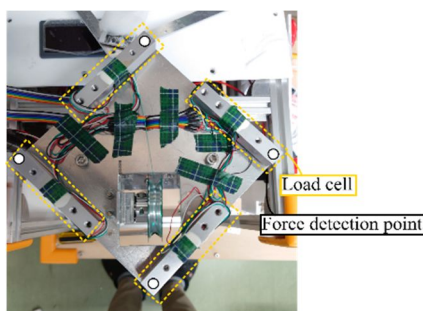


図4 作用力センサとその内部

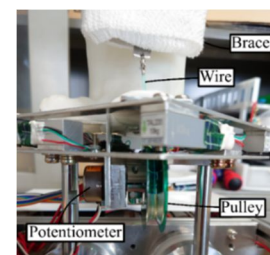


図5 関節角度センサ

健常者 6 名を対象として PDFin の安全性と有用性を検証した。日本整形外科学会の参考可動域より MP 関節と手関節の可動域制限をそれぞれ 45°と 70°とすると、それぞれ 3 名と 1 名に可動域制限を認めた。MP 関節と手関節のそれぞれに対して PDFin を使用した。PDFin の使用時間はそれぞれ 5 分間とした。使用開始時の関節角度は、被験者毎に使用前の P-ROM (他動的関節可動域)とした。使用前後に親指を除く四指の MP 関節の伸展と手関節の背屈の A-ROM (自動的関節可動域)と P-ROM の検査を実施した。MP 関節の伸展、手関節の背屈の P-ROM について、PDFin 使用前後の比較から、どちらの関節においても有意に向上が確認された(図6)。ただし、MP 関節については4指の合計値とした。関節可動域の拡大は一時的な筋の柔軟性の改善によるものとする。同様に、A-ROM の結果(図7)から、どちらの関節においても有意に向上が確認された。以上、PDFin を用いることで関節可動域の改善効果が確認されたことから有用性を確認した。一方、アンケート結果から痛み等の健康上の被害が無いことから安全性も確認した。

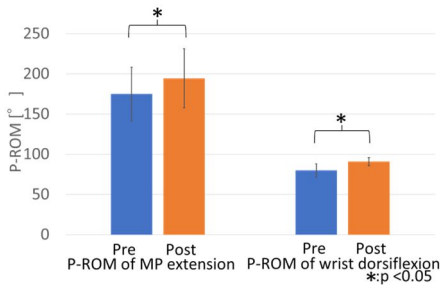


図6 A-ROM testの結果

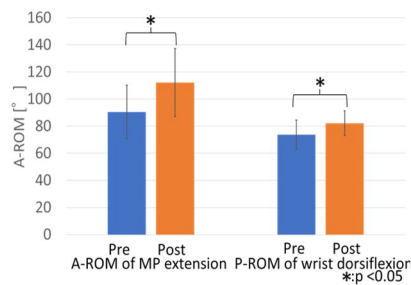


図7 P-ROM testの結果

さらに、デバイス使用中の作用筋肉のテンションの有無と改善効果について考察を行い、脳卒中片麻痺者による被験者実験のプロトコル策定に有益な知見も得られた。研究終了後(2022年度)に、この知見を生かした脳卒中片麻痺者による被験者実験を行う予定である。

(2) 筋収縮促通トレーニングデバイス PARKO (iPARKO に名称変更)

脳卒中後、痙縮と呼ばれる後遺症が手指に現れると手指が常に屈曲した状態になる。これにより手を開くことができなくなり、片麻痺者の QOL を低下させている。そのため痙縮を減弱し、手を開く運動機能を回復させる必要がある。片麻痺者の多くは浅指屈筋など手指を屈曲させる筋が常に働いているため、手指を伸展させる作用のある総指伸筋を鍛えなければならない。総指伸筋は手指の伸展を繰り返すことで鍛えることができるが、手を開くことができない片麻痺者にはその他の動作で総指伸筋の筋活動量を増加させる必要がある。そこで、研究分担者は手指伸筋促通手技と呼ばれる徒手治療法を開発した。この促通手技を模倣したのが手指伸筋促通トレーニングデバイス iPARKO である。本研究で改良した iPARKO の外観と使用時の手指を図 8, 9 に示す。使用方法は、手指関節を過伸展の状態では患者の手と 4 指はそれぞれ iPARKO の手固定板と指サックに固定される。患者自ら手指を前方に動かしながら 4 指の指先でばねを介して押付板を押す。この時、押付板からの反力を指先が受けることになり、総指伸筋の筋活動量が増加する。また、指先が受ける反力と手を前方向に動かす時の手に働く力を測定するために、それぞれビーム型ロードセルと 6 軸力覚センサを取付け、デバイスの IoT 化を図った。

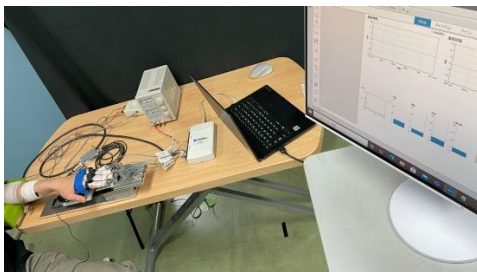


図8 iPARKO

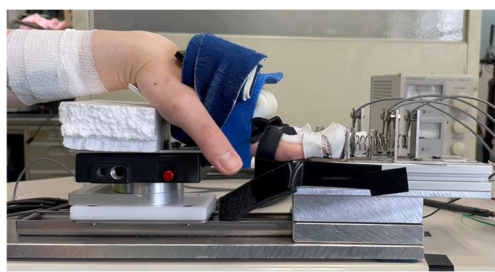


図9 iPARKO 使用時の手指の姿勢

iPARKO を用いた被験者実験から以下の知見を得た。

- 1) 手を開く動作ではなくても iPARKO を使用すれば手を開く動作時(最大随意筋収縮時)の 84 ~ 96 % の筋活動量を得られることを健常者 2 名に対して確認した。
- 2) 健常者 16 名を対象に、筋活動量を増大させる iPARKO の使用条件を明らかにするために、MP 関節の角度と総指伸筋の筋活動量の関係、指先負荷と総指伸筋の筋活動量の関係を調査した。前者より MP 関節が過伸展位になるほど総指伸筋の筋活動量が増大すること、一方、浅指屈筋の筋活動量は減少傾向にあることを確認した。浅指屈筋の発火は、脳卒中片麻痺者のトレーニングの妨げとなるので少ないほうが良いとされる。後者の調査より、指先負荷の増加に伴い総指伸筋の筋活動量が増加することが明らかとなった。
- 3) 脳卒中片麻痺を有する研究員 1 名を対象に iPARKO を適用した結果、安定して促通効果が得られることを確認した。指先負荷と力による作用力を解析することで健常者とは異なる手の動かし方、力の掛け方であることも解明した。

以上の知見から、脳卒中片麻痺者が iPARKO を使用する場合、トレーニング効果が得られるよう総指伸筋の筋活動量を多くするためには、MP 関節を最大過伸展位にすることが望ましく、指先負荷は可能な範囲で大きい方が良くと推測される。研究終了後(2022年度)に、この知見を生かした脳卒中片麻痺者による被験者実験を行う予定である。

2)の準備実験として行った結果を以下に示す。健常学生 5 名を対象に、MP 関節の角度と総指伸筋、浅指屈筋の筋活動量の関係を調査した。過伸展位での MP 関節の他動的関節可動域 (P-ROM) は個人差があるので、被験者毎の P-ROM に対して 0, 25, 50, 75, 100% の 5 つの角度 (%P-ROM) で測定した。指先でばねを押す際、2 秒間のばね押付け、2 秒間の脱力の合計 4 秒間を 1 試行とし、合計 11 試行を 1 セットとして実施した。ばね押付けの力、すなわち指先負荷の指示値は 10 N とした。被験者はモニタ画面で指先負荷の大きさを確認しながら、指示値になるようにばねを押した。使用手は左手(全員非利き手)とした。%P-ROM が 0 のときの筋活動を 1 とした総指伸筋と浅指屈筋の筋活動量を図 10, 11 に示す。それぞれの値は 11 セットの平均値である。MP 関節が過伸展位になるほど総指伸筋の筋活動量が増大することを確認した。被験

者 No.1 と No.2 においては 75%までは増加傾向が認められた。一方、浅指屈筋の発火量は、MP 関節が過伸展位になるほど減少傾向にあることを確認した。5 名の平均は 62%の減少であった。

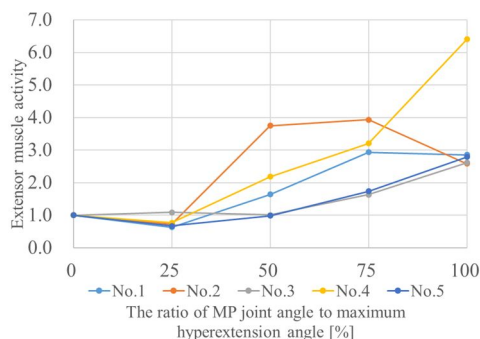


図 10 MP 関節角度 (%P-ROM) と総指伸筋の筋活動の関係

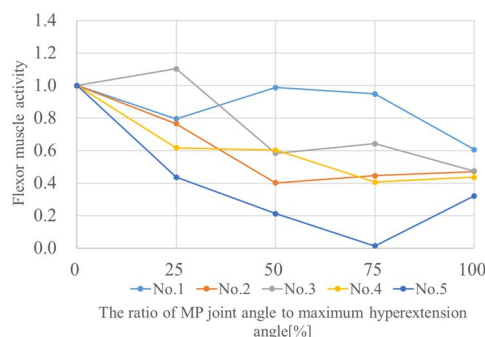


図 11 MP 関節角度 (%P-ROM) と浅指屈筋の筋活動の関係

(3) 把握力調整能力トレーニングデバイス iWakka の開発と有効性検証

日常生活においてコップを持つ、箸やフォークを使うなど手は重要な役割を果たしている。そのため脳卒中などで手が麻痺したり手を怪我したりすると日常生活に支障をきたす。手指は第二の脳とも言われ、巧緻動作(手先の細かい動き)では脳が活性化することが知られている。研究代表者は、最大出力に満たない把握力で物の形・大きさ・材質に応じて把握力を調節する能力を把握力調整能力(Adjustability of Grasping Force: AGF)として定義し、把握力調整能力評価トレーニングデバイス iWakka を開発した。iWakka は把握体 Wakka と把握力測定デバイスからなる。Wakka は弾性特性を有する。iWakka による評価とトレーニングでは、患者は Wakka を握りながら 0 から 400 g の範囲で変化する目標把握力に合わせるように把握力を調整する。AGF は、把握力の測定値と目標値との平均絶対誤差として評価する。本研究において、IoT 化のためサーバ版 iWakka を開発した。この iWakka は本研究以外、例えば在宅認知機能トレーニングなどに活用された。また、脳卒中片麻痺患者にとって把握動作のみならず、手指によるピンチング動作のトレーニングの必要性が判明したので、iWakka-pinch を開発した。以下にその成果を示す。

Wakka の開放側に 2 枚のピンチ板を取り付けることで、iWakka-pinch (図 12) を完成させた。iWakka-pinch では 0~180g のピンチ力のトレーニングを可能とするようにピンチ板を設計した。患者がピンチ力を調整しながら iPad の画面に表示されたピンチ力を目標値に追従させることで APF (Adjustability of Pinching Force) の評価とトレーニングを行う。iWakka-pinch の有効性を検証するために脳卒中片麻痺患者のリハビリに活用した。トレーニング方法については手指機能の改善を目的とした課題を行う前に iWakka-pinch を使ったトレーニングを実施した。iWakka-pinch によるトレーニング効果を確認するため、このトレーニングを行わない期間をベースラインとして定めた。ベースライン期(A 期)とトレーニング期(B 期)はともに 4 日間とした。被験者は脳出血により右半身麻痺を呈した 50 代の女性である。トレーニング効果を測るため、各期間の前後で FMA(Fugle-Myer Assessment)による評価を行った。各期間における FMA のスコアを図 13 に示す。FMA のスコアが A 期では 31 から 31 と変化しなかったのに対し、B 期では 32 から 38 と 6 ポイント上がった。特に肩/肘/前腕の項目で 23 から 26、手指の項目で 2 から 5 と改善が見られた。介入することで FMA の改善効果が見られた。



図 12 iWakka-Pinch

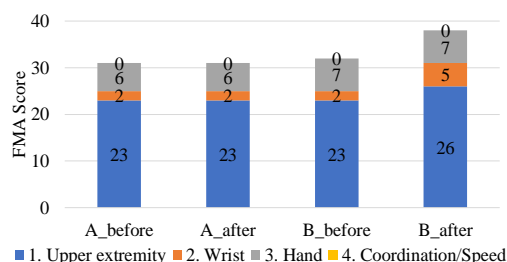


図 13 iWakka-Pinch によるトレーニングの効果

(4) 手指関節非侵襲ゴニオメータの開発

当初計画には無かったが、手指リハビリのトレーニング前後において手指関節可動域を効率的に測定する必要があったことから、Depth カメラを用いた非侵襲手指関節ゴニオメータを開発した(右図)。現状では、親指を除く 4 指を対象とし、カメラと被験者の手の位置関係がある条件を満たして撮影された場合に限って、関節角度の測定誤差は 2 度程度であった。

(5) 今後の課題

本研究で策定した実験プロトコールに基づいて脳卒中片麻痺者による被験者実験を、研究分担者の協力も得ながら 2022 年度に実施予定である。一回目は 2022 年 5 月を予定している。



5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 1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 森田 良文	4. 巻 Vol. 36, No.2
2. 論文標題 専門職との協働で開発するリハビリ支援機器	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 リハビリテーション・エンジニアリング	6. 最初と最後の頁 112-115
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.11501/11229407	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 Huu-Hieu Quang, Yoshifumi Morita, Noritaka Sato, Makoto Takekawa	4. 巻 -
2. 論文標題 Digital testing device to measure the active range of motion of finger joints using an RGB-D camera	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Biomechanical Science and Engineering	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1299/jbse.21-00337	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15件（うち招待講演 0件/うち国際学会 6件）

1. 発表者名 Huu-Hieu Quang, Yoshifumi Morita, Noritaka Sato, Makoto Takekawa
2. 発表標題 Active Range of Motion Digital Testing Device of Finger Joints Using an RGB-D Camera
3. 学会等名 2021 Japan-Poland International Workshop on Technologies Supporting Rehabilitation and Medical Services（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Ai Nakamura, Zhou Peichen, Yoshifumi Morita, Hirofumi Tanabe
2. 発表標題 Finger Extensor Facilitation Training Device "iPARKO": Analysis of increased muscle activity in a hemiplegic person
3. 学会等名 2021 21st International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS 2021)（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Ai Nakamura, Shota Ishigaki, Yoshifumi Morita, Hirofumi Tanabe
2. 発表標題 Relationship between Metacarpophalangeal Joint Angle and Muscle Activity of Healthy Persons while Using the Finger Extensor Facilitation Training Device
3. 学会等名 International Consortium for Rehabilitation Robotics (ICORR2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 西谷萌, 大森啓士, 森田良文, 戸嶋和也, 田丸司
2. 発表標題 ピンチ力調整能力評価トレーニングデバイスiWakka-Pinchの開発, - 脳卒中片麻痺患者の上肢トレーニングへの適用 -
3. 学会等名 令和3年度電気・電子・情報関係学会東海支部連合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 森田良文
2. 発表標題 柔らかさを利用した把握力調整能力評価トレーニングデバイスiWakka の応用
3. 学会等名 第22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(SI2021)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 水野蒼麻, 森本舜, 森田良文, 田邊浩文
2. 発表標題 手指関節用ピストンデバイスPDFinの健常者における安全性と有用性の検証
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'22
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中村愛, 石垣彰太, 森田良文, 田邊浩文
2. 発表標題 手指伸筋促進トレーニングデバイス iPARKO による指先への負荷と筋活動の関係
3. 学会等名 LIFE2022, 第21回日本生活支援工学会大会, 日本機械学会 福祉工学シンポジウム2022, 第37回ライフサポート学会大会
4. 発表年 2022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	田邊 浩文  (Tanabe Hirofumi)  (00769747)	湘南医療大学・保健医療学部リハビリテーション学科作業療法学専攻・教授    (32728)	

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