

令和 5 年 6 月 22 日現在

機関番号：77103

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19K04303

研究課題名（和文）受動型直交座標系新規3次元上肢リハビリ支援システムとその各種リハビリ手法との融合

研究課題名（英文）Fusion of New Passive Orthogonal-coordinate-type 3D Rehabilitation Support System for Upper Limbs and Various Rehabilitation Methods

研究代表者

古荘 純次（Furusho, Junji）

一般財団法人ファジィシステム研究所・研究部・特別研究員

研究者番号：70107134

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：脳卒中を主な対象とする力覚の提示にブレーキを用いた新規な直交型1次元、2次元、3次元の上肢リハビリ支援システムの研究開発を行った。

1次元システムについては、鏡面对称型非麻痺側補助システム、同側型非麻痺側補助システムの研究開発を行った。2次元システムについては、2次試作機まで研究開発を行った。3次元システムについては、機構の理論解析、および重要な機構の開発を行ったが、3次元システムの開発に至らなかった。

1次元システム、2次元システムでは、ゲーム性のあるリハビリ訓練ソフトを研究開発した。コロナがなかなか収まらなかったため、臨床評価には至らなかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

脳卒中の治療に関する医療費は、全医療費の約1割をしめる。脳卒中を主な対象とする上肢リハビリ支援システムの本格的実用化は社会的な意義が大きい。力覚の提示にはアクチュエータを用いないでブレーキを用いており、本質安全性を有し、医療機器としてクラス となる。

1次元システムについては、軽量コンパクトな同側型非麻痺側補助システム、鏡面对称型非麻痺側補助システムの研究開発を行った。開発したシステムは、医療従事者でなくとも扱え、かつ訓練意欲を維持しやすい自宅用のリハビリ機器としても使うことができる。リハビリでは、つらい訓練を行う必要があるが、動機づけと楽しさがあるシステムである。

研究成果の概要（英文）：We researched novel orthogonal 1-dimensional, 2-dimensional, and 3-dimensional upper limb rehabilitation support systems using brakes for stroke. For the 1 dimensional system, research and development was conducted on a mirror-symmetric rehabilitation support system by non-paretic side and an ipsilateral rehabilitation support system by non-paretic side. Regarding the 2-dimensional system, we also conducted research and development of a second prototype. As for the 3-dimensional system, the theoretical analysis of the mechanism and the development of the important mechanism were performed, but the development of the 3-dimensional system was not achieved.

For the 1-dimensional and 2-dimensional systems, we researched and developed rehabilitation training software with game feel. Because the coronavirus did not subside, clinical evaluation was not conducted.

研究分野：メカトロニクスおよびVR技術を用いたリハビリテーション

キーワード：リハビリ支援システム 脳卒中 上肢 力覚提示 ブレーキ 健側補助 動機付け ゲーム性

1. 研究開始当初の背景

脳卒中患者に対する医療費は、医療費全体の1割弱であり、リハビリへのメカトロニクス機器の導入が望まれている。上肢の機能障害は下肢の機能障害に比べて回復が難しいが、上肢機能の回復は日常生活動作（ADL）の改善に大きく関わるため、上肢に対する機能回復トレーニングの重要性は高い⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾。しかし、現状では、その回復トレーニングも、セラピストの技術に依存することが多い。

リハビリ支援システムの導入により、患者の状態を定量的に評価することが可能となるだけでなく、適切な運動を誘発し、繰り返しその運動を行うことにより、正しい運動が学習できる。また能動的な運動の誘発に、コンピュータの進歩により近年大きく発達したバーチャルリアリティ技術を導入することにより、適切な運動を誘発すると考えられる。

2. 研究の目的

現在までに開発されている大部分のリハビリ支援システムは、アクチュエータを用いており、高価な安全システムを必要としている。研究代表者の古荘らは、ブレーキを用いた上肢リハビリ支援システムを研究開発してきた⁽⁴⁾⁻⁽⁷⁾。ブレーキを用いた上肢リハビリ支援システムは、本質的安全性を有し、医療機器としては、クラスIとなる。ブレーキを用いた直交型上肢リハビリ支援システムでは、把持部の運動方向の逆方向の力覚が必ず提示できる。本研究は、力覚の提示にブレーキを用いた3次元、2次元、1次元の直交座標型システムの研究開発を目的とする。

さらに、1次元システムでは、軽量コンパクトで、医療従事者でなくとも扱え、かつ訓練意欲を維持しやすい上肢リハビリ支援システムの研究開発も目的とする。

3. 研究の方法

1次元システムについては、軽量コンパクトであり、自宅用のリハビリ機器としても使うことができるように、デザインに注力し、研究開発を行った。また、リハビリでは、つらい訓練を行う必要があるため、動機づけ(Motivation)と楽しさ(Pleasure)が必要である。そこで、1次元システムでは、ゲーム性のあるリハビリ訓練ソフトの研究開発を行った。

2次元システムでは、最初に、多くの種類があるリニアガイドの選択を行った。次に、1次元試作機を研究開発した。次に、タイミングベルトの配置等の機構設計に力をいれ、最終システムを研究開発した。その結果、摩擦抵抗が大幅に減少した。2次元システムでも、ゲーム性のあるリハビリ訓練ソフト開発を行った。

3次元システムの研究開発は、理論解析及び数値計算に重点を置いて進めた。機構開発に関しては、システムにとって重要な基本的な機構の研究開発を行ったが、3次元システムの開発にはいたらなかった。また、リハビリ訓練ソフトの開発まで進まなかった。

4. 研究成果

1次元システム、2次元システム、3次元システムの順に説明する。

(1) 1次元システム

鏡面对称型非麻痺側補助システムの研究開発を行った。開発した1次元リニア型上肢リハビリ支援システムを図1に示す。このシステムでは、ベルト・プーリにより、機構的に左右のハン

ドルを連動させた鏡面对称運動を実現している。そのため、非麻痺側（健側）の腕で片側のハンドルを動かすと、もう一方のハンドルに固定した麻痺側の腕は、鏡面对称に左右に動かされる。このように、非麻痺側の補助によって麻痺側のリハビリ運動を実現する。また、1次元システムの基本機構を図2に示す。

ブレーキを併用することで運動に負荷を加えることができ、患者の回復の度合いに合わせてリハビリができる。このハンドルの動きはポテンショメータにより取得でき、これを用いて映像と対応させたリハビリ訓練ゲームを製作することで、リハビリ効果を視覚化し、より訓練意欲を持続しやすいシステムにした。

麻痺側上肢のリハビリにおいては、麻痺側上肢のリーチ運動、メトロノームに合わせた両上肢の繰り返し運動、目的志向型運動、イメージ訓練などを積極的に繰り返し行うことが強く勧められている。また、鏡面運動は正確な左右対称の動作によって固有感覚からのフィードバックが与えられ、運動学習が行われることにより有意な改善がみられるとされている⁽⁸⁾。

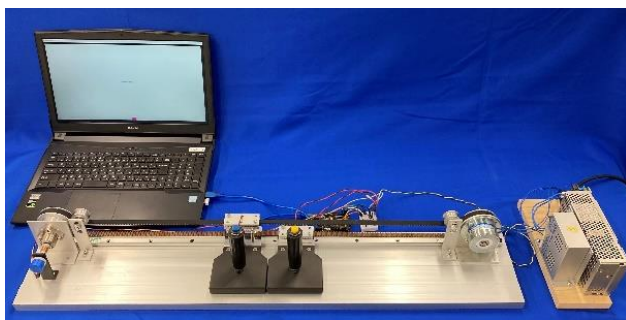


図1 鏡面对称型非麻痺側補助システム



図2 1次元システムの基本機構

開発したリハビリ支援システム（図1）の大きさは、幅 900mm×奥行 160mm×高さ 120mm、重さは 5.13kg となっている。本体には、ハンドルの位置を取得するためのポテンショメータおよびゲームに使用するためのボタンスイッチ（両把持部の上部）が設置されている。ポテンショメータの位置情報およびボタンの押下の有無は、Arduino を通じて PC に送られる。PC で受け取った値を使用して、Processing 言語でゲームを実行している（図3参照）。また、Arduino にはブレーキ専用コントローラが接続されており、ブレーキ力を制御することができる。

施設で使われている大型機器に比べて安価、小型で、重量も手で持ち運びができる程度に抑えられている。また、パッシブ型であるため安全性も高く、自宅でも扱いやすい。

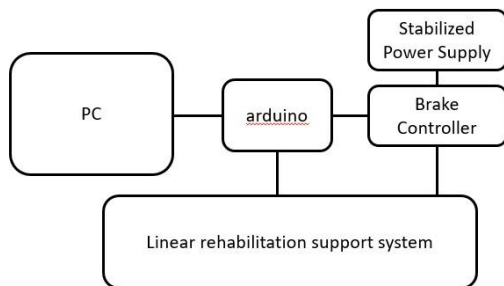


図3 制御システム

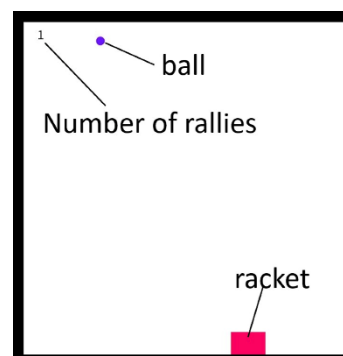


図4 スカッシュゲーム

開発したリハ訓練ソフトは、ハンドルの位置を操作するラケットの位置と対応させたスカッシュゲームである（図4）。画面内で跳ね返ってくるボールに対して、四角で表示されたラケットをボールに当たる位置まで移動させ、ラケットの範囲内でボールが当たった場合、あるいは打球ボタンを押すことで、打ち返す。打ち返した回数を画面内に表示しており、スコアを確認することができる。表示されるラケットは、麻痺側を表示させ

ている。これは、患者に麻痺側を意識して主体的に運動させる目的がある。装置を使用する際、ハンドルをつかむことが難しい場合はハンドルに麻痺側を固定させる。その際は把持部を動かしたり、スイッチを押したりすることも難しい状況であることが予測されるため、必要に応じて非麻痺側(健側)で補助しながら使用する。

本リハビリ支援システムにはパウダーブレーキ OPB-10N (小倉クラッチ) を使用した。ブレーキのコントローラの指令端子に PWM を付与した際にかかる負荷力や、その応答速度についての性能評価を行うために、ハンドルに力センサを取り付け、時間とハンドルの速度を計測した。

以上の (1) 節の研究は、研究協力者の東京都立大学武居直行研究室と研究代表者の古荘純次との共同研究として行った。

(2) 2次元システム

1次試作機を開発したが、把持部の移動に最大で約 3kgf 必要であり、力覚提示装置としては、実用的でなかった。そこで、次の原因が操作性悪化を誘発しているのではないかと考えた。

- i. 傘歯車の伝達効率が悪い
- ii. 使用している歯付きベルトが長尺すぎる

傘歯車の撤廃 (要因 i の解決)、ベルトの短尺化 (要因 ii の解決) を考慮して設計を行い、2次試作機を開発した (図 5)。2次試作機では、システムの摩擦が低減し、正確な力覚提示ができるようになった。

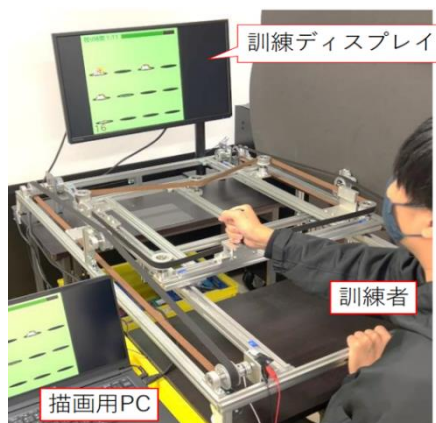


図 5 2次元リハビリ支援システム



図 6 リハ訓練ソフト「モグラ叩き」

図 5 で実施されているリハ訓練ソフトは「モグラ叩き」である。図 6 に訓練画面を示す。ランダムに出現するモグラ (画面中ではハリネズミ) を叩くゲームである。モグラの位置に手先が来たことをポテンショメータで判断し、パウダーブレーキにてブレーキ力を発生させることによって、モグラを叩いた感覚を提示することが出来る。

以上の (2) 節の研究は、研究分担者の大阪工業大学原口真研究室と研究代表者の古荘純次との共同研究として行った。

(3) 3次元システム

最初に、代表的な 2 自由度差動ベルト駆動ロボット H-BOT を対象として、マルチボディシステムダイナミクスを用いて内部機構を含む運動方程式の導出と動的非干渉化設計を行った。主たる結果は以下の通りである。

- ① 移動プーリを含むベルト-プーリ機構の拘束条件式と、ループベルトによる過拘束性を排除する方法を提案し、マルチボディシステムダイナミクスの微分代数方程式を数式計算ソフトウェアである Mathematica 上で数式計算し、H-BOT の運動方程式の数式解を導出した。
- ② 付加慣性および付加粘性により、H-BOT の動的非干渉化設計方法を提案した。現実的な数値パラメータを用いた数値モデルに対して、具体的な付加慣性および付加粘性の設計方法を提案した。

③ H-BOTの数値計算モデルをNumericalMBDの一つであるSimscapeMultibodyを用いて作成し、提案した動的非干渉化設計の有効性を検証した。

4自由度差動ベルト・差動ネジ駆動パラレルロボットについて、Double-H SMGの動力学設計のために、Simscape Multibodyを用いて動的シミュレータを開発した。動的な低干渉化設計を施し、開発したシミュレータを用いて効果を検証した。

本研究のシステムは、差動ネジ機構を応用することが特徴である。差動ネジ機構とは、リードが異なる2組のナット-ネジ機構を直列あるいは並列に組み合わせることにより、2入力の回転運動を回転-並進運動に変換する2入力2出力機構である。

リハビリロボット制御装置の開発にかんしては、RealTime Linux上で動作するLinuxCNCを用いてリハビリ支援システムを動作させ、コンプライアンス制御を実装してその有効性を検証した。

3次元直交座標リハビリ支援システムの基礎研究として、2次元直交座標リハビリ支援システムの研究開発を行った。ロボット本体の低慣性化のために、金属部品を樹脂部品(3Dプリンタ)に、また、SUS(ステンレス)構造部品をアルミ構造部品へ設計変更した。またネジ摺動部の設計変更を行い、低摺動差動ネジ機構を開発した。

以上の(3)節の研究は、研究分担者の近畿大学原田孝研究室と研究代表者の古荘純次との共同研究として行った。

(4) 回転型リンクシステムにおける力覚における慣性力の影響

上肢リハビリ支援システムにおける慣性力の影響及びその影響の低減についても検討を行った。慣性力の影響について定量的に評価する方法を提案した。次に、それを用いて慣性力を低減する方法を示した。この研究は、研究協力者の東京都立大学武居直行研究室と研究代表者の古荘純次との共同研究として行った。

(5) 臨床評価

コロナがなかなか収まらなかったため、臨床評価には至らなかった。そこで、科研終了後の臨床評価を目指している。

参考文献

- (1) 古荘純次, 小柳健一, 他: 三次元上肢リハビリ訓練システムの開発 (第1報), 日本ロボット学会誌, Vol. 23, No. 5, pp. 629-636 (2005). (Open Access)
- (2) 宮越浩一, 道免和久, 小山哲夫, 古荘純次, 小柳健一: 脳卒中片麻痺患者に対する上肢機訓練装置の使用経験, リハビリテーション医学 (日本リハビリテーション医学会誌), Vol. 43, No. 6, pp. 347-352 (2006).
- (3) 古荘純次, 他: (解説) 上・下肢リハビリテーション, 福祉機器へのロボット技術の適用, 総合リハビリテーション Vol. 35, No. 5, pp. 439-445 (2007).
- (4) 古荘純次: (巻頭言) 上肢リハビリテーション支援ロボットとその本格的実用化, 総合リハビリテーション, 38巻, 12号, pp. 1117 (2010).
- (5) 古荘純次, 池田博康: (総説) リハビリ・介護とメカトロニクス, 日本機械学会誌 2016年1月特集号「リハビリ介護とメカトロニクス」, Vol. 119, No. 1166, pp. 4-7 (2016).
- (6) J. Furusho and N. Takesue: (Review) Research and Development of Rehabilitation Systems for Upper-Limbs "PLEMO" Series, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol. 31, NO. 1, pp. 35-44 (2019). (Open Access)
- (7) Naoyuki Takesue, Junji Furusho, et al.: Analysis of Displayable Force Region at Passive-type Force Display with Redundant Brakes -Development of Rehabilitation System for Upper Limbs PLEMO-Y (Redundant)-, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol. 30, No. 6, pp. 880-891, (2018). (Open Access)
- (8) 一般社団法人日本脳卒中学会 脳卒中ガイドライン委員会: "脳卒中治療ガイドライン 2009", pp. 307, (2009).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 2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 原田孝 | 4. 巻 88 |
| 2. 論文標題 マルチボディシステムダイナミクスを用いた2自由度平面差動ベルト駆動ロボットの動的非干渉化設計 | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 日本機械学会論文集 | 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/transjsme.21-00367 | 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 小田邦彦、原口真、菊池武士、古荘純次 | 4. 巻 93 |
| 2. 論文標題 （解説）VR技術を用いた小脳性運動失調に対するアプローチ（上肢運動機能評価トレーニング機器の研究開発） | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 脳神経内科 | 6. 最初と最後の頁 89-94 |
| 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 原田孝, 中村 悠人 | 4. 巻 86 |
| 2. 論文標題 マルチボディ運動学に基づく2自由度差動ネジ機構の構造の総合 | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 日本機械学会論文集 | 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/transjsme.20-00155 | 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 1件）

| |
|---|
| 1. 発表者名 島田珠希、武居直行、古荘純次 |
| 2. 発表標題 非麻痺側補助による鏡面運動型上肢リハビリ支援システムの開発(1A1-E12) |
| 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 2023 愛知県・名古屋市 |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 花井高太、市川直理、原口真、古荘純次 |
| 2. 発表標題 直交リニアガイドを用いた上肢機能訓練システムおよびその操作性評価(1P2-F18) |
| 3. 学会等名 第23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 S12022 千葉県・千葉市 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 原田孝、古荘純次 |
| 2. 発表標題 Simscape Multibodyを用いた4自由度作動ベルト・差動ネジ駆動パラレルロボットの動力学解析(S113-08) |
| 3. 学会等名 日本機械学会 2022年度年次大会 富山県・富山市 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 古荘純次 |
| 2. 発表標題 上肢リハビリ支援システムPLEMOシリーズにおける新規システムの研究開発（回転 plus リニア型システム、およびリニア型システム）(2A2-C02)) |
| 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 2022 北海道・札幌市 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 古荘純次 |
| 2. 発表標題 力覚提示システム・位置入力システム・リハビリ支援システム等 における慣性力の影響に関する基礎研究 リンク型システムにおけるその評価および特性改善方法(CA1-C01) |
| 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2021 大阪府（オンライン講演会） |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 原田孝、古荘純次 |
| 2. 発表標題 マルチボディダイナミクスを用いた 4 自由度差動ベルト・差動ネジ駆動パレルロボットの力学解析(1P2-H05) |
| 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2021 大阪府（オンライン開催） |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 古荘純次 |
| 2. 発表標題 リンク型の位置入力システム・力覚提示システムやリハビリ支援システム等における慣性力の影響に関する基礎研究（その評価方法および特性改善方法の提案）（講演番号:3411） |
| 3. 学会等名 日本機械学会関西支部第96期定時総会講演会 大阪府（オンライン開催） |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 原田 孝 |
| 2. 発表標題 マルチボディダイナミクスを用いた差動ベルト駆動ロボットの力学解析 (3E1-3) |
| 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 福岡県（オンライン開催） |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Takeaki Watanabe, Yuri Ode, Naoyuki Takesue and Junji Furusho |
| 2. 発表標題 Comparative Investigation of Configuration of Brakes in Passive-type Force Display System |
| 3. 学会等名 Proc. IEEE/SICE International Symposium on System Integrations (SII 2020)(Hawaii) (国際学会) |
| 4. 発表年 2020年 |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

Researchmap 古荘純次
https://researchmap.jp/Furusho_Junji
古荘純次大阪大学名誉教授のリハビリ関係のホームページ
<http://www.eonet.ne.jp/~furusho-reha22/index.html>
(一財) ファジィシステム研究所の古荘純次の個人ページ
http://fisi.cird.or.jp/personal_page/furusho/index.html
日本学術振興会 科研費 古荘純次
<https://nrid.nii.ac.jp/nrid/1000070107134/>
J-GLOBAL 古荘純次
https://jglobal.jst.go.jp/detail?JGLOBAL_ID=201801020398857029

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 | 池田 篤俊 (Ikeda Atsutoshi) (20609903) | 近畿大学・理工学部・准教授 (34419) | |
| 研究分担者 | 川平 和美 (Kawahira Kazumi) (20117493) | 鹿児島大学・医歯学総合研究科・客員研究員 (17701) | |
| 研究分担者 | 菅 俊光 (Suga Toshimitsu) (40288816) | 関西医科大学・医学部・教授 (34417) | |
| 研究分担者 | 畑迫 健一 (Hatasako Kenichi) (30735527) | 産業技術短期大学・その他部局等・教授 (44519) | |
| 研究分担者 | 原田 孝 (Harada Takashi) (80434851) | 近畿大学・理工学部・教授 (34419) | |

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 | 森岡 周 (Morioka Shu) (20388903) | 畿央大学・健康科学部・教授 (34605) | |
| 研究分担者 | 原口 真 (Haraguchi Makoto) (80467547) | 大阪工業大学・工学部・講師 (34406) | |

| | 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 | 武居 直行 (Takesue Naoyuki) (70324803) | 東京都立大学・システムデザイン研究科・教授 (22604) | |
| 研究協力者 | 石田 圭二 (Ishida Keiji) (20446157) | 福井医療大学・保健医療学部・教授 (33404) | |

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 |
|---------|---------|
| | |