

令和 5 年 5 月 19 日現在

機関番号：82723

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2022

課題番号：19K20745

研究課題名（和文）股関節離断者のためのオープンソース・ロボット義足の開発

研究課題名（英文）Development of an open-source robotic prosthesis for hip disarticulation amputees

研究代表者

植山 祐樹 (Ueyama, Yuki)

防衛大学校（総合教育学群、人文社会科学群、応用科学群、電気情報学群及びシステム工学群）・システム工学群・准教授

研究者番号：30710800

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）：下肢切断者のうち股関節部を欠損した股関節離断者を対象に、義足歩行時における身体的な負担を低減するロボット義足を開発し、全ての股関節離断者がロボット義足を安価かつ手軽に製作、および利用することが可能な技術基盤の創出を目的とする。そのために、ロボット義足による歩行をモーションキャプチャによって計測し、股関節離断者がロボット義足を使用することで、股関節に発生する負荷が減少し、左右の歩容の対称性が維持されることを明らかにした。また、義足歩行のシミュレーション結果からロボット義足の設計を行い、既存の義足と互換性を有し、かつ軽量のロボット義足を開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまでに実施されてきたロボット義足の研究では、その多くが膝関節または足首関節の欠損者を対象とした大腿義足または下腿義足であり、股義足として機能するものはほとんど存在しない。そもそも、股義足の使用者は世界的にも少なく、ロボット義足の開発は採算に見合ったものにはならないと考えられる。そこで、本研究では、股義足使用者に対するロボット義足の有効性を示し、新たに3Dプリンタによる製作を前提としたロボット義足を開発する。また、既存の義足構成部品との互換性を維持することで、製作コストを抑え、市場原理に左右されることなく、ロボット義足の普及を目指している。

研究成果の概要（英文）：The goal of this project was to develop a robotic prosthetic leg to reduce the physical burden of walking with a prosthetic leg for hip disarticulation amputees. We then measured gait movements with a robotic hip disarticulation prosthesis using motion capture and found that the use of the robotic prosthesis reduced the load generated on the hip joint and maintained symmetry in left-right gait. In addition, we have designed and developed a newer robotic prosthesis based on a simulation result of the prosthetic gait. The robotic prosthesis is lightweight and compatible with existing non-powered prostheses.

研究分野：ロボティクス

キーワード：股義足 ロボット義足 歩行分析 強度解析 深層強化学習 代謝コスト

1. 研究開始当初の背景

義足は切断部位に応じて名称および構造が異なっており、使用者の使用感または予算等に応じて、モジュール化された構成部品を組み合わせることで製作される(図1)。そのうち、股義足は、股関節が欠損した股関節離断者が使用するものであり、残存する運動機能が限定されることから、リハビリテーションによる歩行動作の獲得には困難が伴う。また、股義足による歩行は身体的負担も大きく、健常者の2倍以上のエネルギーが必要とされる。しかし、股関節離断者の割合は下肢切断者のうちの約2%程度と極めて少ないことから、研究開発投資に見合った十分な需要が見込めず、これまでに股義足または股関節離断者を対象とした研究は多くはない。加えて、世界全体で人口の約0.06%の下肢切断者に対して、股関節離断者または片側骨盤切断者の割合はそのうちの2%程度に過ぎず、これまでに股義足、またはその使用者を対象に実施された研究は、その他の義足と比較すると極めて少ない。また、それらの研究で得られた結果についても、標本数の少なさによる妥当性の検証が十分でないことが問題とされている。

一方で、近年では下肢切断者の身体的負担の軽減、および歩容の改善を目的としたロボット義足の研究が国内外において進められているが、それらにおいても膝上または膝下で下肢を切断した大腿切断および下腿切断者が主な対象であり、股義足使用者を対象としたロボット義足の報告はほとんど存在しない。しかし、股義足による歩行は身体負担が大きく、義足によって補填される運動機能も限られていることから、義足をロボット化した際の恩恵を強く享受できる可能性が高い。実際、股義足の膝関節のみを電子制御化することで、歩行時のエネルギー代謝が10%以上改善することが報告されており、片麻痺患者を対象とした研究では、股関節の動作が歩容および歩行時のエネルギー代謝に大きく関与していることが指摘されている。したがって、股義足のロボット化により、義足の膝関節および股関節の運動をモータによって支援することで、歩容および身体的負担の両面において劇的な改善が期待できると考えられる。

2. 研究の目的

下肢切断者のうち股関節部を欠損した股関節離断者を対象に、義足歩行時における身体的な負担を低減するロボット義足の開発を目的とする。そのために、(1)股関節離断者を対象としたロボット義足の有効性の検証、(2)ロボット義足設計のための義足歩行シミュレータの構築、および(3)オープンソース化に適したロボット義足の設計および開発、の3点を実施する。

これらにより、ロボット義足による歩行の効果を明らかにし、ロボット義足を安価かつ手軽に製作、および利用することが可能な技術基盤を創出する。

3. 研究の方法

本研究では、これまでに関節離断者を対象に開発したロボット義足の効果の検証に加え、ロボット義足の開発を進めるための義足歩行シミュレータの開発を行う。そして、それらの結果を反映させることで、新たなロボット義足の設計および強度解析を行う。

(1) ロボット義足の効果の検証

健常者が股義足を使用できるようにする模擬義足を製作し(図2A)ロボット義足(図2B)による歩行との比較を行った。その際、トレッドミル上を一定速度で歩行してもらい、身体運動データを慣性式モーションキャプチャで計測した。さらに、計測した運動データを筋骨格モデルにフィティングさせることで、床反力および股関節に発生する関節接触力の動力

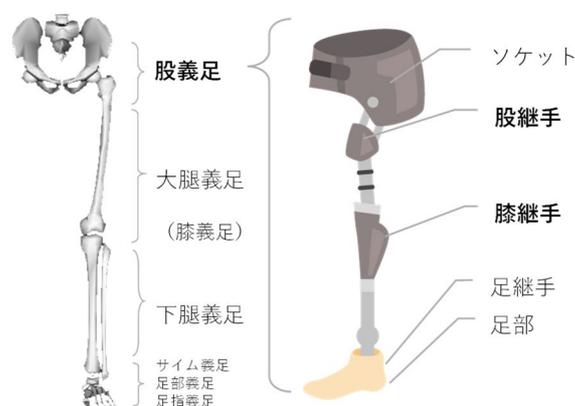


図1. 切断部位に応じた義足の種類、および股義足の主な構成部品。右はカナダ式股義足。

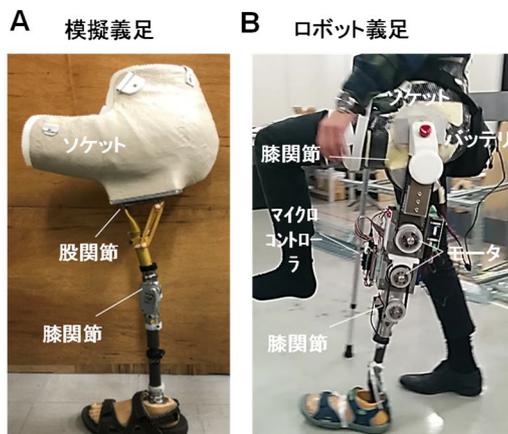
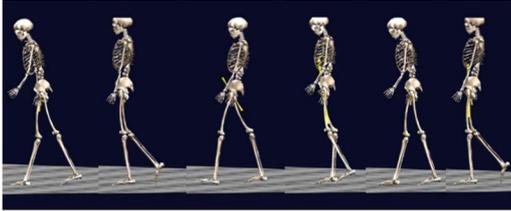


図2. 健常者による評価実験に使用した股義足の(A)模擬義足、および(B)ロボット義足。

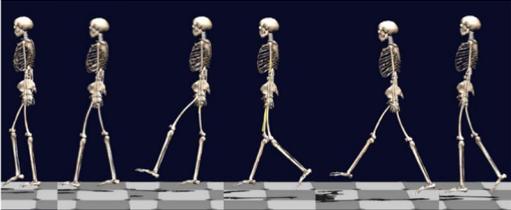
模擬義足

A

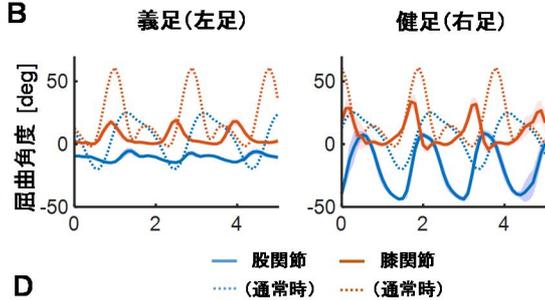


ロボット義足

C



B



D

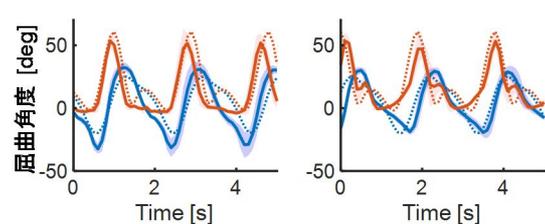


図3. 模擬義足(上段:(A)～(B))およびロボット義足(下段:(C)～(D))使用時の歩容。(A)(C) モーションキャプチャによる計測データを0.4秒ごとの人体骨格図で示す。(B)(D) 股および膝関節の屈曲角度(平均 $\pm 95\%$ 信頼区間)。左右はそれぞれ義足および健足のものを示す。

学パラメータを推定した。

さらに、呼気ガス分析装置を用いて、模擬義足およびロボット義足による歩行時の酸素消費量から代謝コストの比較を行う実験も実施した

(2) ロボット義足の歩行シミュレーション

ロボット義足の設計ツールとして、股義足による歩行を再現可能なシミュレータを開発した。その際、ヒトの骨格を模擬したヒューマノイドロボットの動力学モデルに対して Deep deterministic gradient (DDPG) と呼ばれる深層強化学習モデルを適用することで、義足による歩行動作を生成した。

(3) 新規ロボット義足の設計および強度解析

ロボット義足の効果に関する評価実験および義足歩行シミュレーションの結果から、オープンソース化可能な義足を新たに設計および製作し、3次元CADを用いたシミュレーションによる強度解析を実施した。

4. 研究成果

3章の研究の方法で示した3項目について、その研究成果を以下に述べる。

(1) ロボット義足の効果の検証

モーションキャプチャによって計測した身体運動データに対して動力学解析を実施した。その結果、模擬義足の使用時には上体が前傾し(図3A)、股関節および膝関節ともに義足側の関節角度の変化が小さかった(図3B)。また、健足側の股関節は屈曲することなく、ほぼ伸展した状態となる。これは股義足の利用者において見られる特徴と一致する。一方で、ロボット義足を使用した場合には上体が直立し(図3C)、股関節および膝関節の角度は通常の歩行とほぼ同様であった(図3D)。

また、床反力および股関節接触力では、模擬義足およびロボット義足のいずれにおいても健足側の値が大きくなる傾向が見られた(図4A、B)、ただし、床反力においてその差は有意ではなかった(図4C)。また、股関節接触力がロボット義足では非有意となるのに対し、模擬義足では健足が義足よりも有意に大きかった(図4D)。通常、股関節接触力の体重に対する最大値の割合は健常者で4～5倍程度なのに対し、模擬義足の健足では7倍以上となっており、健足に大きな負荷がかかっていることを示している。

以上より、動力を有していない通常の義足を使用した際には、義足を使用している反対側の足において、関節間に生じる負荷を意味する関節接触力が股関節において義足側の足に対して有意に大きくなるのに対し、ロボット義足を使用することで、関節接触力を軽減され、義足側の足と義足を使用していない足の関節接触力の対称性が維持されることが明らかとなった。その結果、義足使用時に生じる身体的負荷を軽減し、健常者と同様な自然な歩容を実現することが可能になると考えられる。

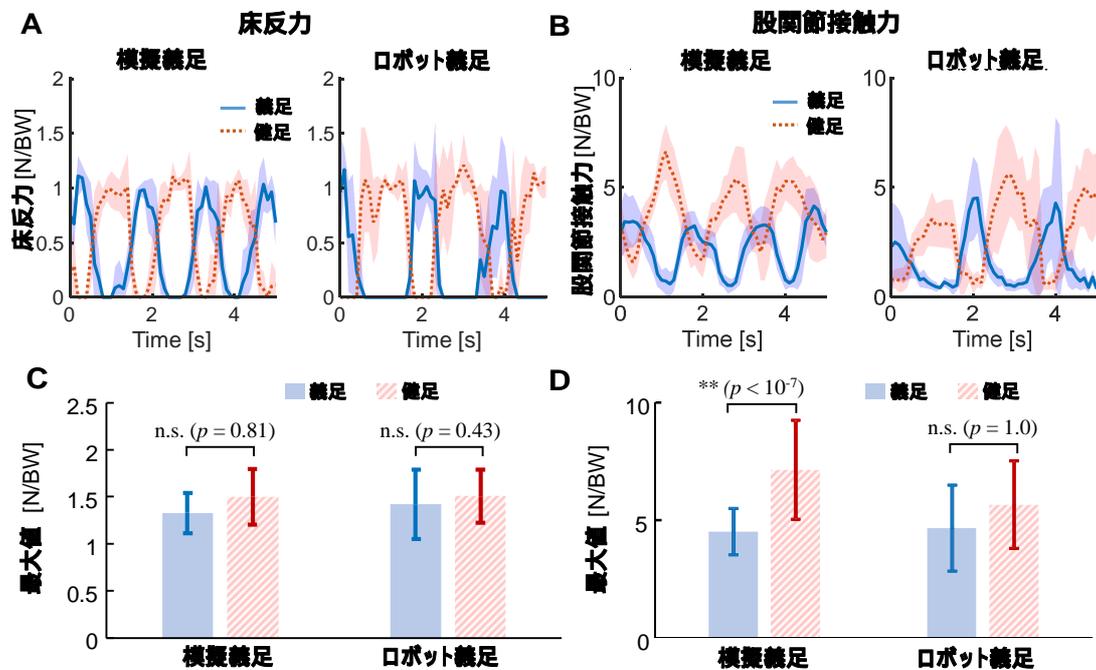


図 4. 義足歩行時における床反力および股関節接触力。それぞれの力は体重に対する荷重の割合として示す (N/Body weight [BW])。 (A) 床反力および (B) 股関節接触力の時間変化 (平均 \pm 95% 信頼区間)。 (C) 床反力および (D) 股関節接触力の最大値 (平均 \pm 標準偏差)。 (C) ~ (D) ‘**’, ‘n.s.’ はそれぞれウェルチの t 検定による統計的な有意および非有意を意味し、対応する p 値を括弧内に示す。

また、呼気ガス分析装置を使用し、模擬義足とロボット義足を使用した際の酸素消費量を計測した (図 5A)。その結果、模擬義足よりもロボット義足の方がより多くの酸素を消費しており、代謝コストが高い可能性が判明した (図 5B)。これは、ロボット義足の重量が模擬義足よりも大きいことが強く影響しているためだと考えられる。



図 5. 義足歩行時の代謝コスト分析。(A) 実験時の様子。(B) 酸素消費量の比較。

(2) ロボット義足の歩行シミュレーション

義足による歩行を再現するために、10 自由度を有するヒューマノイドモデルを対象に、DDPG による学習を通して任意の評価関数を最適化する動作を生成した (図 6A)。対象とするヒューマノイドモデルは、左右の股、膝、および足首にそれぞれ冠状面に対する 1 自由度の能動関節を有している。左右の上肢には、肩関節の冠状面および矢状面に自由度を有しているが、本研究では受動関節とした。また、センサにより足裏の接触力、胸部の位置および姿勢、各関節の角度および角速度、ならびに移動方向が検知可能とする。下肢の左右 6 つの能動関節はトルクによって制御され、その参照軌道は DDPG による学習によって獲得される。さらに、本モデルの左下肢の股、膝および足首の各関節を能動関節から受動関節に置き換えることで股義足による義足歩行を再現した。

通常時および義足使用時を想定した条件下において、設定した評価関数を最適化する歩行の学習を行った。通常時では、左右の下肢が均等に動作し、健常者の歩容と類似した結果が得られた (図 6B、上)。また、義足歩行では、義足を前方に振り出すために、健足側がつま先立ちになる伸び上がり歩行と呼ばれる義足使用者特有の歩容が確認された (図 6B、下)。さらに、これらのシミュレーションから義足歩行時のエネルギー消費量を検証したところ、エネルギー消費量の変化には義足の重量が強く影響を与えることが明らかとなった。

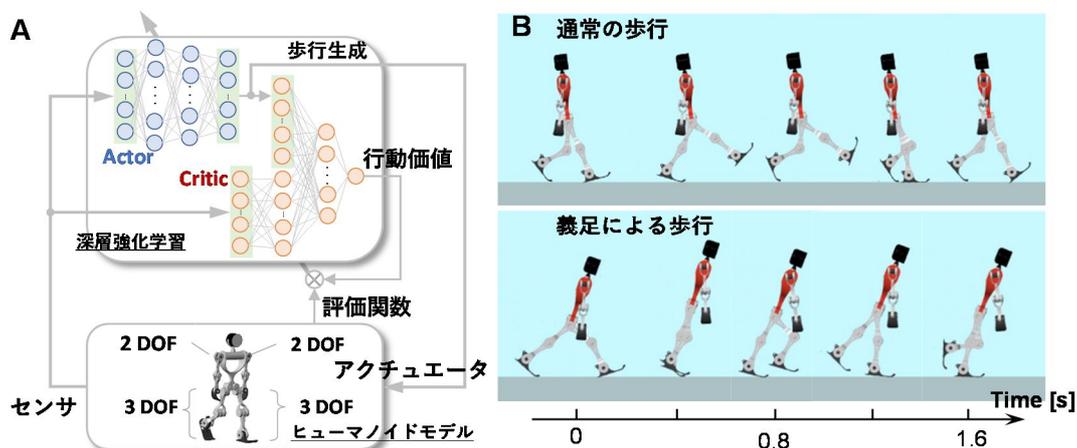


図 6. 義足による歩行シミュレーション。(A) シミュレーションによる歩行生成モデルの概略図。(B) 学習された歩行動作における 0.4 秒間隔のスナップショット。上が通常の歩行であり、下が義足による歩行の様子を示す。

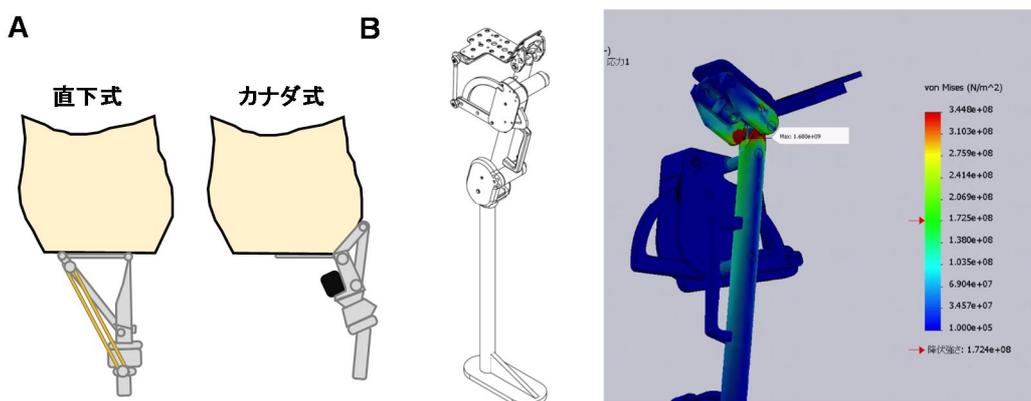


図 7. ロボット義足の新規開発。(A) 股継手の形式。(B) 開発されたカナダ式ロボット義足および強度解析。

(3) 新規ロボット義足の設計および強度解析

新たに開発したロボット義足は、既存のロボット義足とは異なり、現在主流となっているカナダ式股義足と呼ばれる股義足の形状との互換性を有しているものとした(図 7A)。そうすることによって、股義足使用者が普段使用しているソケットおよび股継手と呼ばれる義足の取り付け具をロボット義足に対してもそのまま利用することができると考えられる。また、ロボット義足の検証実験および義足歩行のシミュレーション結果から、その代謝コストを改善するためにはロボット義足の軽量化が必要である。そこで、カナダ式股継手との互換性、および軽量化を新たなロボット義足に求める要件とした。

これらの要件に基づき、ロボット義足を設計および開発した(図 7B)。また、3次元 CAD によるシミュレーションを実施し、その動作を確認するとともに、その強度解析を実施した。新たに開発したロボット義足では、ソケットとの接続をカナダ式としたことで、これまでに開発したロボット義足よりも身体との接地部が小さく、そこで使用者の体重を支える必要があるため、歩行時の強度に不安があった。しかし、3次元 CAD による強度解析を実施した結果、ロボット義足は歩行に十分耐えうる強度を有しており、走行等のより負荷の大きな運動も実現できる可能性があることが明らかとなった。今後、制御システムを構築し、動作実験を行う予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4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 2件）

1. 著者名 Ueyama Yuki	4. 巻 11
2. 論文標題 Costs of position, velocity, and force requirements in optimal control induce triphasic muscle activation during reaching movement	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 1-14
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41598-021-96084-2	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 Ueyama Yuki, Harada Masanori	4. 巻 in press
2. 論文標題 Effects of first- and third-person perspectives created using a head-mounted display on dart-throwing accuracy	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Virtual Reality	6. 最初と最後の頁 1-9
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s10055-021-00562-x	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 Ueyama Yuki, Kubo Tsutomu, Shibata Masaaki	4. 巻 34
2. 論文標題 Robotic hip-disarticulation prosthesis: evaluation of prosthetic gaits in a non-amputee individual	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Advanced Robotics	6. 最初と最後の頁 37-44
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1080/01691864.2019.1705908	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 植山祐樹, 久保勉	4. 巻 43
2. 論文標題 ロボット股義足の開発：股関節接触力の推定による身体負荷の評価	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 臨床バイオメカニクス	6. 最初と最後の頁 33-37
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6件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Toru Kurihara, Yuki Ueyama, Masanori Harada
2. 発表標題 Effects of a Robotic Hip Prosthesis on Energy Metabolism: A Pilot Case Study in a Non-amputee Individual
3. 学会等名 2022 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 栗原徹, 植山祐樹, 原田正範
2. 発表標題 深層強化学習を用いたシミュレーション環境におけるロボット股義足の歩行位相に基づく制御
3. 学会等名 第45回日本神経科学大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 栗原徹, 植山祐樹, 原田正範
2. 発表標題 ヒューマノイドモデルと深層強化学習を用いた義足歩行の再現
3. 学会等名 2021年電気学会産業応用部門大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 植山祐樹, 栗原徹, 原田正範
2. 発表標題 ロボット股義足の開発
3. 学会等名 第48回日本臨床バイオメカニクス学会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 植山祐樹
2. 発表標題 VR装置を使用したダーツ投てき時の1人称視点と3人称視点の比較
3. 学会等名 第1回車両特性デザイン部門委員会（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yuki Ueyama, Masanori Harada
2. 発表標題 A third-person view may improve performance of precise aiming in dart-throwing
3. 学会等名 第43回日本神経科学大会
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
---------------------------	-----------------------	----

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