

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 6 月 25 日現在

機関番号：53801

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2020

課題番号：18K18409

研究課題名（和文）検査者の手技・経験・感覚を変換する創発協調ロボット制御の確立

研究課題名（英文）Emergent Cooperative Robot Control to Convert Examiner's Procedures, Experiences, and Senses

研究代表者

青木 悠祐 (Aoki, Yusuke)

沼津工業高等専門学校・電子制御工学科・准教授

研究者番号：70584259

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,700,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、超音波診断における医師の手技・経験・感覚を変換する創発協調ロボット制御の確立を目的に、まず筋骨格系障害のリスク低減を目的とした負荷可視化システムを構築した。シンデレラ仮説に基づいた収縮強度と周波数解析による筋疲労評価を行い、新たな指標として収縮強度増減率を定義することで検査者ごとの疲労解析が可能となった。次に、モーションキャプチャによるプローブ位置・姿勢計測と取得断層像を組み合わせた超音波検査教育システムを提案した。最後に、超音波診断支援ロボティクスを構築し、協調動作時の検査者負荷を計測、生体信号解析することで設置環境・個人差による協調動作への影響を定量評価できるようになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で示した「どの位置にプローブを当てるとどんな断層像が得られる」といった空間把握能力のロボットへの実装は、協調ロボティクスにおいて「どのような大きさ・向きの力を加えればロボットが思い通りに動くのか」のような人とロボットの位置関係を頭の中で変換する能力、すなわち人の意図推定へと繋がる価値がある。また、総合診療領域における超音波検査POCUSへの関心が高まっている一方、超音波教育に課題が残る現状に対して、本研究の成果であるプローブ走査手技を計測し、取得断層像と関連付けたデータベースを構築、その手技を再現するロボットの存在は研修医へのトレーニング効果を発揮するといえる。

研究成果の概要（英文）：In this study, we constructed a load visualization system to reduce the risk of musculoskeletal disorders, with the aim of establishing an emergent cooperative robot control that converts the physician's technique, experience, and senses in echography. Next, we evaluated muscle fatigue using contraction strength and frequency analysis based on the Cinderella hypothesis, and by defining the rate of increase or decrease in contraction strength as a new index, we were able to analyze fatigue for each examiner. Also, we proposed an ultrasound education system that combines the measurement of probe position and posture by motion capture with the acquisition of tomographic images. Finally, we constructed an echography assisted robotics system, and by measuring the load on the examiner during cooperative motion and analyzing biological signals, we were able to quantitatively evaluate the effects of installation environment and individual differences on the cooperative motion.

研究分野：医用ロボティクス

キーワード：超音波診断支援ロボティクス 協調動作 負荷計測 超音波検査教育 筋電位解析 モーションキャプチャ 断層像処理

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。

1. 研究開始当初の背景

超音波診断は低侵襲で、患者に対する負担が小さく、装置が小型・安価、画像取得の自由度が高いという利点がある。しかしその反面、超音波プローブ(以下プローブ)の走査には専門的な知識や経験的な探査手技が必要となり、目的の断層像取得と情報抽出が検査者に依存するという問題がある。そのため、プローブ走査をロボットが補助する検査支援システムが注目され、P.Abolmaesumi et al.[IEEE Trans. on R&A, 2002], N.Koizumi et al.[JRM, 2004]をはじめ、国内外問わず数多く報告されてきた。しかしながら、プローブ走査をロボットが代行するシステムは、他のロボティクス研究では議論されない問題を抱えている。それは、プローブ走査をする際、当然のことながら患者が痛みを訴えないように適切な力で体表面上をなぞり動作しながら断層像を取得するが、所望の断層像を取得するためには患者に多少痛みをこらえてもらう一面を兼ね備えていることにある。すなわち、プローブ反力に基づいた力サーボ系と、取得断層像に基づいたビジュアルサーボ系が共存するシステムを構築しなければならないが、より鮮明な断層像を取得するためにプローブを体表面に押し込む行為と適切なプローブ反力を維持する行為を両立しなければならない。そして、この両立に加え、人とロボットの協調動作のための熟練検査者の経験・感覚のフィードバックが求められている。

このような背景のもと、申請者は当該研究に関連して「遠隔検査支援」「自動検査支援」「協調検査支援」システムの構築に取り組み、成果を発表してきた。しかしながら、日本において超音波診断支援ロボットが販売に至るケースはいまだなく、研究室内の議論の域を出ていない。これは申請者の開発してきたロボットを含め、超音波診断手技をロボットが代行・再現するレベルに達していないと言わざるを得ない。この解決には「通常診断時の検査者のプローブ走査を経験・感覚レベルまで計測し」、「通常診断時と違和感ないレベルでロボットが協調動作する」ことが求められる。そこで本研究ではこのレベルでのシステム実現を目指す。

2. 研究の目的

本研究では、超音波診断における医師や検査技師の手技・経験・感覚を変換する創発協調ロボット制御を確立することを目的とする。

申請者がこれまで提案してきた創発的医療支援システム[研究課題番号:15K16341]は「ロボットによるプローブ走査支援」と「検査者・患者の両方に優しい超音波診断方法の提示」の2つから構成される。これにより患者側支援のみならず、患者のための支援が結果として医師側の支援、負担軽減につながる、またその逆も起こりうるような創発環境の構築を大きな狙いしている。本研究ではこの概念に加え、「どの位置にプローブを当てるとどんな断層像が得られる」「この位置から次の検査部位を抽出するにはプローブをどのように動かせばよい」といった空間把握能力を示すメンタルローテーション能力のロボットへの実装、更に遠隔検査支援においては「手元のコントローラをどのように動かせば、遠隔地のロボットが思い通りに駆動するのか」、協調検査支援においては、「ロボットが把持するプローブにどのような大きさ・向きを加えればロボットが思い通りに動くのか」のような検査者とロボットの位置関係を頭の中で変換する能力、すなわち検査者の意図の推定およびロボットへの実装を行う。本研究は「通常診断時におけるプローブ走査と同じ感覚で」ロボットと協調検査することによる肉体的・精神的負担軽減の実現を可能にする点に独自性があることを強調する。更に、熟練検査者のプローブ走査時の経験・感覚を「プローブ走査の意図」として計測、ロボットの実装することで未熟検査者へのトレーニング効果が期待できる。

3. 研究の方法

本研究では次の2点について研究を行った。

I. 熟練検査者のプローブ手技・経験・感覚は定量化できるのか？

超音波診断における手技を計測する場合、プローブ座標系と断層像座標系が存在する。この際、断層像情報の変化に対して、プローブ位置・反力をどのように変化させるのか、この関係性を変換行列で定義し、定量化を行う。この定量化した指標をロボットに実装し、熟練検査者の手技再現を行う。通常診断時におけるプローブ走査軌跡、筋電センサによる肉体的負荷を計測し、検査技師によるプローブ走査のコツ、疲れにくい姿勢等の支援方法を提示するシステムを構築する。また、これらの情報をシースルー型HMDに投影し、診断情報の重畳表示による断層像取得支援システムを構築し、未熟検査者へのトレーニングシステムとする。

II. 通常診断時の検査者のプローブ走査の意図はロボットとの協調検査によっても再現可能なのか？

プローブ走査支援実験を行い、ロボット支援の価値を定量的に検証する。具体的には、無理な姿勢でプローブを保持することによる手首・腕・腰への肉体的負担、プローブを長時間保持することによる精神的負担がロボットによる支援を行うことで軽減するか否かを評価する。これに

より、「通常診断時におけるプローブ走査と同じ感覚で」「通常診断時よりも検査者の負荷を抑えることができ」従来の断層像取得を支援、更に超えるプローブ走査手技を可能とする創発協調ロボット制御系を構築する。

4. 研究成果

(a)筋骨格系障害のリスク低減を目的とした負荷計測システムのための要因分析

まず、超音波診断時の筋疲労解析において新たな評価指標である収縮強度増減率を示し、検査者の疲労可視化による身体的負担の軽減を目的として、シースルー型ヘッドマウントディスプレイ OST-HMD(Optical See-Through Head Mounted Display)を用いて、リアルタイムで収縮強度増減率と断層像を重畳表示する診断支援システムを構築した。

検査者の疲労を定量的に表すために、本研究では筋肉の収縮時に発生する微弱な電気信号である筋電に着目した。力の発生の有無は筋の収縮強度で示すことができ、最大随意収縮(Maximum Voluntary Contraction : MVC)と周波数解析を用いた筋疲労評価は広く行われている。しかし、これまで行われてきた多くの研究は 30%MVC 以上の高収縮強度であり、周波数解析による徐波化(低周波帯域の増加)により評価されている研究が多く 30%MVC 以下の筋疲労に着目した研究は少ない。

そこで、図 1 に示すように模擬腹部を対象としたプローブ押し込み実験を行い、筋骨格系障害の要因分析としてシンデレラ仮説に基づいた収縮強度と周波数解析による筋疲労評価を行った。今まで研究例の少なかった 15%MVC 以下の低収縮強度に着目し、周波数解析を行い速波化(高周波帯域の増加)を示すことが出来た。これにより 15%MVC 以下では疲労を速波化、30%MVC 以上では疲労を徐波化で評価するといった評価指標の選定が可能となった。

更に、筋電位から収縮強度増減率(Percent change strength of voluntary contraction:%CSOVC)による評価指標を新たに提案した。前述の徐波化や速波化による評価指標では疲労の評価までは到達できなかった課題に対して、収縮強度増減率を用いることで全員に共通した筋疲労評価を行い、筋骨格系障害の対策を講じることが可能となった。

そして、図 2 に示す筋電センサによる計測結果と OST-HMD を用いた生体情報表示システムを構築した。図中の Support Window は収縮強度増減率と断層像を Web へライブストリーミング配信することで検査者視点への重畳表示が可能となった。このシステムを使用し、断層像を重畳表示することでモニタを注視することによる筋骨格系障害のリスクが減り、プローブと断層像を同時に見る事が可能となった。これにより未熟者でも臓器とプローブの走査方向の相対的な位置関係の把握が容易になり、所望の断層像の取得を素早く行うことが可能となった。

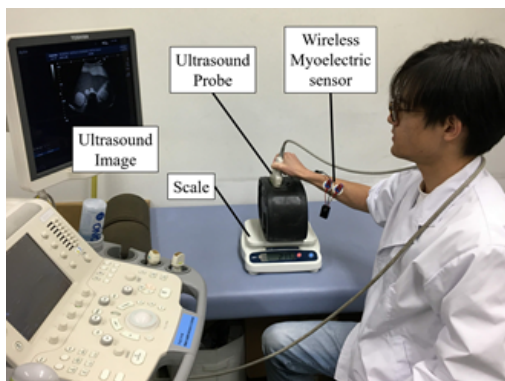


図 1 プローブ走査時における疲労計測実験

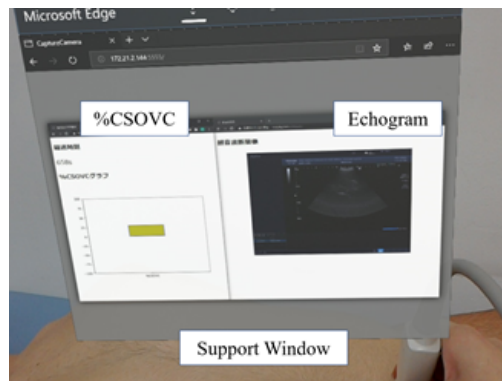


図 2 OST-HMD による診断支援システム

(b)モーションキャプチャを用いた超音波検査教育システムの構築

本テーマでは、Motion Capture (以下 Mocap) とハンドトラッキングモジュール ultraleap (以下 Leap)を用いて断層像データとプローブ走査軌跡を組み合わせた超音波検査データベースを構築するとともに、Leap によるプローブ位置計測に基づいたマッチングシステムを提案した。具体的には図 3 に示すように、初学者向けの超音波検査教育システムを想定し、模擬腹部、実患者を対象とした検証実験および精度検証を行った。

超音波データベース構築のフローチャートを図 4 上に示す。Mocap によってプローブ位置・姿勢を取得し、取得した位置・姿勢情報と、超音波断層像を合わせて記録する。これらのデータを用いて近似最近傍探索の学習を行い、超音波データベースを構築する。超音波マッチングシステムフローチャートを図 4 下に示す。トレーニング時には図 3 に示すように、Leap にて取得したプローブ走査を行う手の座標から、プローブの位置姿勢を取得してデータベースに参照、構築したデータベースから近似最近傍探索を用いた画像判断システムでマッチングさせ、断層像表示を行っている。

そして実際に防衛医科大学の医師による胆嚢の超音波診断を行い、データベース構築およびマッチングシステムの検証実験を行った。実験の結果、マッチング時にプローブ走査した位置に対応した断層像を正しく表示させることに成功した。キャリブレーションを行い、計測システムの設置位置に自由度を持たせることが今後の課題である。現状のシステムでは未熟者が熟練者の手技を学ぶ方法がないため、ロボットを用いて協調動作することで熟練手技を力覚的に提示するシステムの構築を行う予定である。

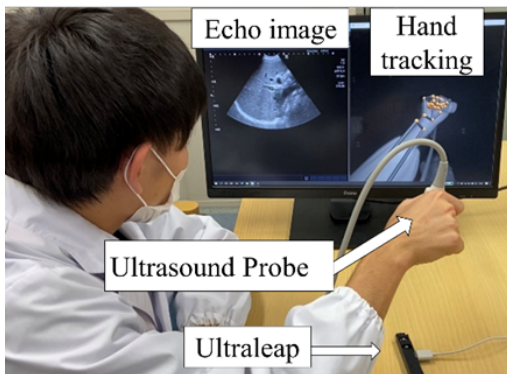


図3 データベースマッチングによる超音波教育

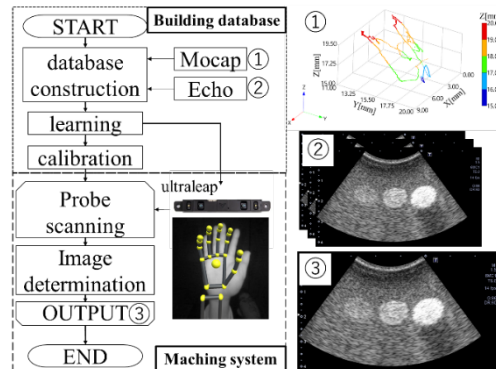


図4 超音波トレーニングシステム構成

(c) 協調動作のためのプローブ走査手技再現システムの構築

次に、図5に示す超音波診断支援ロボティクス EARS(Echography Assisted Robotics, 以下 EARS)を新たに構築した。EARS システムには Torobo Arm(東京ロボティクス(株))を採用し、協調動作時のマニピュレータ関節角度を計測しておくことで、順運動学解析によりプローブ先端位置・姿勢を算出可能となったことから、これまで Mo-cap を利用していたプローブ位置計測が検査者と協調動作するロボットで賄うことができるようになった。

また、協調動作による診断支援を行う際に検査者に違和感を与えないプローブ把持機構の開発を目的として、プローブの持ち方や把持機構の把持箇所による影響について考察した上で把持機構を開発した。図6に示すプローブ把持部を用いて、協調動作時における制御パラメータが人に与える影響を考察するために、サーボパラメータを変更しながら、ロボットと検査者の協調動作実験を実施し、生体計測計測に基づく解析を行った。この際、その際、動かしやすさの新しい指標として協調随意収縮(Coordinated Voluntary Contraction:CVC)を提案し、評価実験を行った。これにより、ロボット設置位置や検査者が椅子に座る位置など、設置環境による協調動作への影響に加えて、個人差の影響を比較できるようになった。今後は実患者を対象に社会実装を計画している。

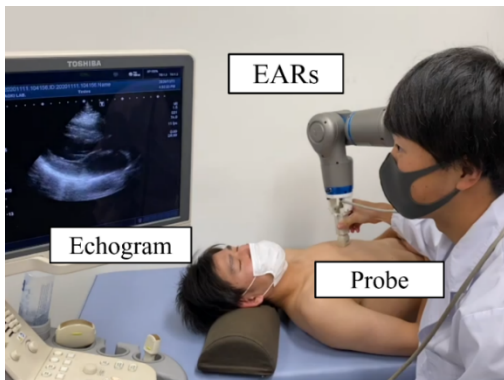


図5 超音波診断支援ロボティクス EARS

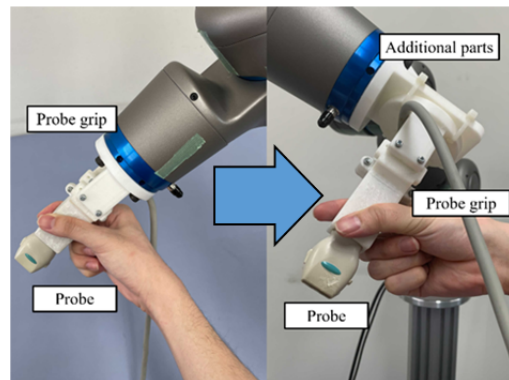


図6 様々な診断体位に対応した把持機構の開発

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2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 1件）

1. 著者名 青木悠祐, 大沼巧, 小谷進, 牛丸真司, 香川真人	4. 巻 39
2. 論文標題 ロボットのいる生活をテーマとする社会実装ロボット教育の実践	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本ロボット学会誌	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) なし	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 Kenta Tanaka, Motoyasu Sano, Yumi Horimai, Hideyoshi Horimai, and Yusuke Aoki,	4. 巻 33
2. 論文標題 Geometric correction method applying the holographic ray direction control technology	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Robotics and Mechatronics	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) 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22件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 杉山矢紘, 部谷若菜, 三浦凜太郎, 青木悠祐
2. 発表標題 超音波診断支援のためのOST-HMDを用いた負荷可視化・視線誘導システムの構築
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 石川仁, 三浦凜太郎, 田中哲太, 青木悠祐
2. 発表標題 協調動作による超音波診断支援のための違和感を与えないプローブ把持機構の検討
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

1. 発表者名 三浦凜太郎、深谷祥平、田中哲太、青木悠祐
2. 発表標題 超音波診断支援ロボットによる協調動作のためのプローブプランニング
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 佐野元康、田中哲太、田中健太、青木悠祐
2. 発表標題 超音波断層像処理とプローブ位置・姿勢情報を組み合わせた臓器3次元形状推定
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 大村陸、青木悠祐
2. 発表標題 超音波診断における筋骨格系障害のリスク低減を目的とした負荷計測システムのための要因分析
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 大淵康弘、青木悠祐、橋本賢一、佐野あずさ、藤田直也、小山正剛、大野洋介、川本博嗣、柳川錬平、田中祐司
2. 発表標題 モーションキャプチャを用いた超音波教育システム構築に向けての予備的研究
3. 学会等名 第52回日本医学教育学会大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 部谷若菜、三浦凜太郎、青木悠祐
2. 発表標題 超音波診断におけるメンタルローテーション能力の計測と体内情報可視化システムの構築
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2019 in Hiroshima
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 三浦凜太郎、部谷若菜、青木悠祐
2. 発表標題 OST-HMDを用いた断層像重畳表示による超音波診断支援システムの構築
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2019 in Hiroshima
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田中健太、田中哲太、青木悠祐
2. 発表標題 超音波断層像処理に基づくプローブ走査パラメータの推定
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2019 in Hiroshima
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田中哲太、青木悠祐
2. 発表標題 超音波診断における体動・プローブ走査補償のための特徴量抽出
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2019 in Hiroshima
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐野元康、田中哲太、田中健太、青木悠祐
2. 発表標題 超音波診断における臓器追従を目的とした体動補償システムの構築
3. 学会等名 富士山麓アカデミック&サイエンスフェア2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 杉山矢紘、部谷若菜、大村陸、三浦凜太郎、青木悠祐
2. 発表標題 超音波診断支援のためのOST-HMDを用いた視線誘導システムの構築
3. 学会等名 富士山麓アカデミック&サイエンスフェア2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 深谷祥平、石川仁、三浦凜太郎、田中哲太、青木悠祐
2. 発表標題 検査者のプローブ走査手技を支援する超音波診断支援ロボットの設計
3. 学会等名 富士山麓アカデミック&サイエンスフェア2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高橋元太、吉村大地、青木悠祐
2. 発表標題 超音波診断・治療補助ロボットReDATによる協調動作のための操作力・生体信号計測に基づく意図推定
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2018 in Kitakyushu
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 部谷若菜、赤池郁也、青木悠祐
2. 発表標題 超音波診断支援のためのメンタルローテーション能力の可視化
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2018 in Kitakyushu
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 田中哲太、大山拓真、白井達也、青木悠祐
2. 発表標題 超音波診断における臓器追従のためのビジュアルフィードフォワード制御系の提案
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2018 in Kitakyushu
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 田中健太、田中哲太、青木悠祐
2. 発表標題 超音波断層像処理に基づく体動補償システムの構築
3. 学会等名 富士山麓アカデミック&サイエンスフェア2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 三浦凜太郎、青木悠祐
2. 発表標題 OST-HMDを用いた超音波診断支援システムの構築
3. 学会等名 富士山麓アカデミック&サイエンスフェア2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 関原柊、青木悠祐
2. 発表標題 可操作度を考慮した協調動作を可能とする超音波診断支援ロボットの設計
3. 学会等名 富士山麓アカデミック&サイエンスフェア2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 田中哲太、青木悠祐
2. 発表標題 ロボットによる超音波診断支援のための体動・プローブ走査補償系の構築
3. 学会等名 第19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 2018年

1. 発表者名 高橋元太、青木悠祐
2. 発表標題 超音波診断・治療補助ロボットによる協調動作のための検査者データ解析に基づく意図推定
3. 学会等名 第19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 2018年

1. 発表者名 部谷若菜、青木悠祐
2. 発表標題 超音波断層像処理による音響窓可視化を用いた診断支援システムの構築
3. 学会等名 第19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 2018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
---------	---------