

令和 5 年 10 月 24 日現在

機関番号：34316

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K12131

研究課題名（和文）バイオリン演奏ロボットにおける演奏フィードバックシステムの構築と評価

研究課題名（英文）Building and Evaluation of Performance Feedback System for a Violin-playing Robot

研究代表者

渋谷 恒司 (Shibuya, Koji)

龍谷大学・先端理工学部・教授

研究者番号：20287973

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,800,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、バイオリン演奏ロボットの演奏フィードバックシステムの構築を行った。具体的には、まずソフトロボットのアイデアを用いた機構で弓圧調節可能な右ハンドを製作した。次に、それを用いて、演奏後に徐々に弓圧を調節する、弓圧フィードバックシステムを構築した。実験の結果、本システムを用いることで音圧のばらつきが減少し、ほぼ一定の音圧で演奏することを確認した。また、強化学習を用いて、楽譜から簡単な楽曲の2小節分の弓の動きを決定するシステムを構築した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究結果により、人間とロボットとのコミュニケーション研究へ一定の貢献ができたと考えている。特に、演奏パラメータを評価して、次の演奏へ生かすアルゴリズムは、他の作業でも応用ができると考えられる。また、開発した右ハンドは、いわゆるソフトロボットの考え方を応用しており、この分野にも貢献できたものと考えている。

研究成果の概要（英文）：In this study we built a system for a performance feedback system of a violin-playing robot. First, we fabricated a robotic right hand that can adjust the bow force, taking advantage of an idea from the soft robotics. Then, we built a system that can adjust the bow force after the performance, by evaluating the bow force. As a result of the experiment, we confirmed that the system can reduce the fluctuation of the sound pressure value. In addition, we also built a system using reinforcement learning, which can determine the bow movement for a simple musical piece with two bars.

研究分野：ロボット工学

キーワード：バイオリン演奏 演奏フィードバック ヒューマノイドロボット 強化学習

### 1. 研究開始当初の背景

近年、人間との円滑なインタラクションの実現を目指したロボットの開発が盛んであるが、現状ではロボットの人間とのインタラクション能力は十分とは言えない。この理由として、ロボットの表現能力が十分でないことが挙げられる。ロボットの表現力を向上させることは、ロボット側からの発信能力を高めることにつながり、ロボットの人間とのインタラクション能力の向上に役立つと考えている。しかし、ロボットの表現手法について確立された理論や手法はまだない。なお、本研究では、「表現」とはロボットから意図や印象を外部へ表出することを意味する。

本研究に関連する近年の研究として、高西らによる人間との共演を目指したフルートロボット、中川らによる文楽人形を題材にしたロボットの動作生成のデザインに関する研究がある。フルートロボットは共演者の音や動作によるキューで共演者とのインタラクションを行うが、表現手法の確立まで踏み込んではいない。また、文楽人形の研究は様々な感情を表現するための動作を明らかにするものだが、動作が抽象的であることや、その動作理解には日本文化の理解が必要であろう。このようなロボットの表現に関する研究は増加しており、国内だけではなく、国際的にもますます重要度が増すと予想される。

バイオリン演奏や楽器演奏ロボットに関する研究は、1980年代の加藤・菅野らによる電子オルガン演奏ロボットをはじめに、近年でも前述のフルートの他、高西らによるサクソフォン演奏ロボット、Kimらによるバイオリン演奏ロボットの研究が国内外でなされている。フルート以外の楽器演奏ロボットの研究は、「良い音」を出すための物理的パラメータを明らかにすることを主な目的としていて、表現手法の確立を目指したものだとは言えない。また、トヨタ自動車がバイオリン演奏ロボットを開発しているが、これは学術的な研究ではない。

本研究では、これまでに人間型バイオリン演奏ロボット(図1)を製作した。そして楽譜から演奏動作を自動的に決定するアルゴリズムの構築とその評価を最終目的として研究を行ってきた。西洋音楽において楽器演奏者は、即興演奏等を除き、楽譜から演奏を構築していく。そこには演奏者の身体的な技能とともに、音楽に関する感性的な能力が問われる。演奏を構築する過程において、音楽的には望ましくても、身体運動の制約から選択できない演奏や、無理しても音楽的に望ましい演奏を選択する場合もあると考えられる。このような場合も含め、「どのように演奏を構築していくべきか」が、本研究における最終的な学術的問いである。

### 2. 研究目的

本申請では、上述の最終目標を達成するため、「バイオリン演奏ロボットで生成された音や演奏パラメータを評価し、演奏中および演奏後の演奏パラメータ変更を可能にする、演奏フィードバックシステムを構築すること」を研究目的とした。楽器演奏を含め、インタラクションするロボットにはフィードバックが欠かせないが、本研究では、この点についてこれまで十分に考慮してこなかった。なお、ここで「演奏パラメータ」とは、弓圧、弓速、弓の運動方向等、バイオリン演奏を規定する物理的パラメータのことである。

図2に本研究で提案している、楽譜から演奏までのモデル図を示す。人間の演奏者は演奏に必要な情報を楽譜から得るが、音色等の楽譜のみでは得られない情報も補っている。例えばバイオリン演奏では、弓を動かす方向が異なっても、同じ音を生成することが理論的には可能である。演奏者は前後の弓の動きで選ぶと考えられるが、それを超えて望ましい音を生成する弓の動かし方を選択することもあると考えられる。この際、補った音色等の情報を用いていると考えられる。そして、演奏者は生成された音を聞いて、その音の評価し演奏を変更していると考えられる。この変更は、演奏中に逐次なされるものと、演奏後に演奏を変更するものがある。

は演奏中に音を目標値に近づけるフィードバック過程、は練習を通じて演奏を作り上げていくフィードバック過程と考えられる。本研究では主に、のフィードバック過程を構築することを目的とした。演奏後のフィードバックを実現する一つの

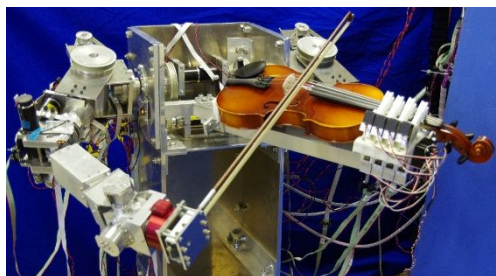


図1 バイオリン演奏ロボット

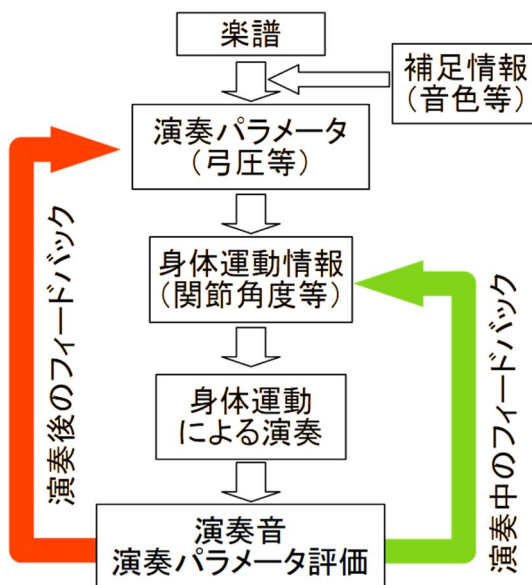


図2 楽譜から演奏までのモデル

手段として、楽譜から演奏動作を自動的に導出するシステムを、機械学習の一種である強化学習を用いて構築することも目指した。

この研究を進めることで、ロボットのエンターテインメント性が向上し、本研究で追及している表現手法に関する理論やモデル化につながると考えられる。また、ヒューマン・ロボット・インタラクションの分野に大きく貢献できると考えられる。

本研究の特徴として、ロボットにより実際の楽器を演奏することが挙げられる。電子的に合成された音でもこうした研究は可能ではあるが、動作生成過程が含まれていないため、身体運動の制約も含めた人間やロボットの演奏生成過程の考察にはつながらないとする。

### 3. 研究方法

#### 3.1 ハードウェアの向上による演奏音の改善

バイオリン演奏ロボットによる生成音のさらなる音質向上を目指し、弓を把持するロボットの右ハンドの開発を行った。これまで本研究では、弓を右ハンドに固定しており、弓が弦と接触しているとき弓が振動し、音質の低下を招いていた。そこで、指の腹の部分に空洞を有し、それをシリコン膜で覆った指を製作した(図3)。空洞は3か所あり、1個のレギュレータで内部の空気圧を調整する。このため、3つの空洞すべてが同じ空気圧である。空洞内の空気圧を上昇させることで膜が膨らみ、弓を柔らかく把持することが可能である。実験の結果、図4のように、新たに開発した右ハンドを用いることで、弓の減衰比を増やすことに成功した。これにより、図5のように、演奏時の弓の振動を抑えることに成功した。左指については、これまで指の間隔を調整可能かつバイオリンの指版を押さえることの可能なハンドを製作した。これにより、より適切な音質での演奏が可能になったと考えられる。

弓把持機構については、さらに改善を試みた。新に試作したハンド(図6)の動作原理は図3のものと同様であるが、違いは、空洞の数が4個(示指、中指、環指、および小指に相当する部分に1個ずつ)である点と、レギュレータを4個用いているので、空洞内部の空気圧を個別に調整できることである。図7は、その原理図である。各指の空洞内部の空気圧を変化させることで、弓元で弾くときと弓先で弾くときで空気圧を変化させることで、より弓圧を細かく調整できるのではないかと考えられる。具体的には、図7(a)のように示指の空気圧を増加させると弓圧は上昇し、小指の空気圧を増加させると、弓圧は減少すると考えられる。

図6の右ハンドを用いてロボットに演奏させたところ、示指と小指の空気圧調整で、演奏中に弓から弦にかける力を変化させることに成功した。結果の一例を図8に示す。これは、示指のみの空気圧増加、小指のみの空気圧減少、および両者を組み合わせた方法で、弓圧を上昇させたときの結果である。この図に示すように、示指の空気圧を上昇させれば弓圧が増加し、小指の空気圧を上昇させると弓圧が減少する、という関係があること、それらの関係がほぼ比例であることが分かった(図8)。

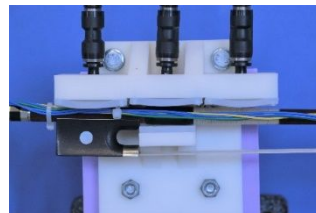


図3 弓把持機構

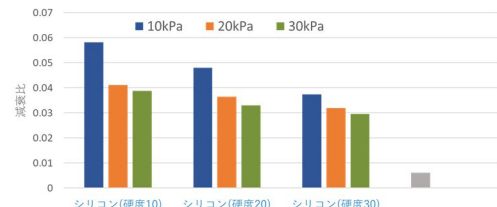
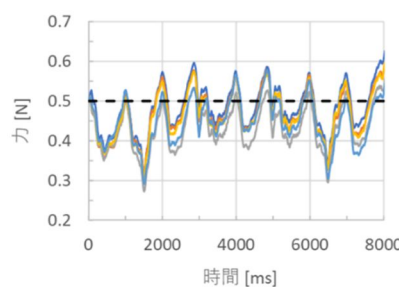
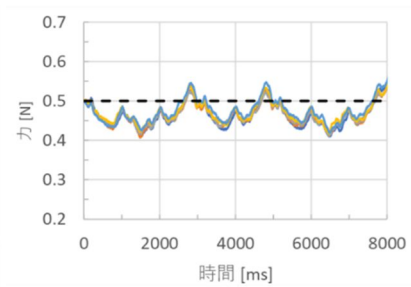


図4 弓の減衰比



(a)旧型把持機構



(b)新型把持機構

図5 演奏時の弓圧

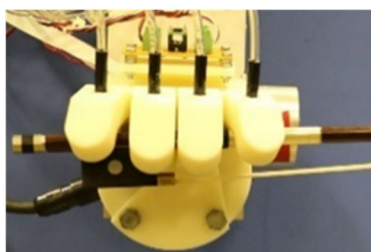
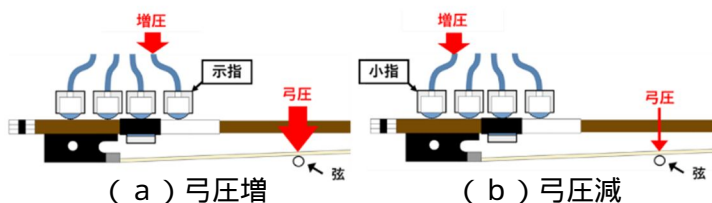


図6 試作した4本指ハンド

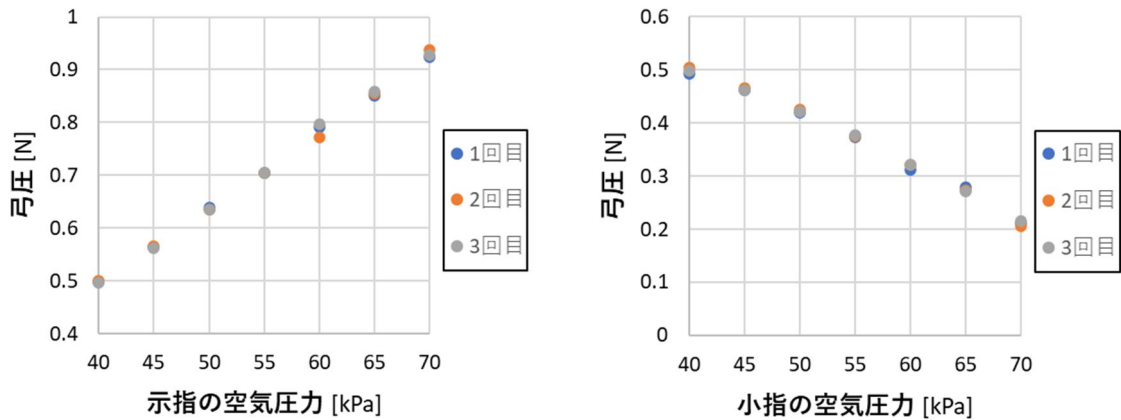


(a) 弓圧増

(b) 弓圧減

図7 弓圧調節方法の概要





( a ) 示指 ( b ) 小指  
 図8 示指と小指の空洞の空気圧と弓圧の関係の一例

### 3.2 弓圧フィードバックシステムの構築

図8で示した結果は静的な実験結果であった。そこで次に、演奏中におけるフィードバックシステムの構築を目指した。理想的には演奏中に音を評価し、逐次演奏パラメータを変更することが必要だと考えられるが、本研究ではまず、バイオリン演奏中の弓圧調節システムの開発を行った。弓圧は音質に大きく影響するパラメータであるため、間接的に演奏音のフィードバックにつながると言える。

図9に構築したアルゴリズムの概念図を示す。バイオリン演奏ロボットは、下げ弓と上げ弓を交互に連続的に複数回演奏する。下げ弓と上げ弓1回ずつで1周期とし、その周期は  $k$  とする。現在時刻の弓圧  $P_t$  を手首に取り付けた6軸力センサで計測する。空気圧の指令値を出してから、実際にその圧力となるまでの遅れ時間を  $d$  として、時刻  $t+k-d$  における空気圧  $P_{t+k-d}$  の指令値を次式により計算する。

$$P_{t+k-d} = P_t + (\text{目標弓圧} - \text{現在弓圧})K_p$$

ここで、 $K_p$  は比例ゲインである。これにより、次の回の演奏において、指令値が修正され、目標の弓圧に近づく。この調整方法は、一度弾いた後で把持力を変えて弓圧を調節するので、人間でいえば練習過程に相当するといえる。

弓圧フィードバックシステムのうち、空洞内の空気圧を変化させるのを、示指のみ、小指のみ、示指と小指両方、および弓圧フィードバックシステム無しの3パターンで実験し、その際の音圧を計測し、各周期での音圧の二乗平均誤差(RMS)を算出した。その結果を図10に示す。この図より、示指による弓圧調節や、示指と小指両方による弓圧調節の場合、RMS値が徐々に減少していることがわかる。これに対して、弓圧フィードバック無しだと、演奏音のRMSはほぼ一定である。これは、次第に演奏音圧のばらつきが減少し、一定の音圧で演奏することができてくることを示している。この実験結果から、ことから、演奏回数を重ねるにしたがって演奏時の弓圧変動が抑えられ、ひいては、音圧をほぼ一定にすることができたといえる。

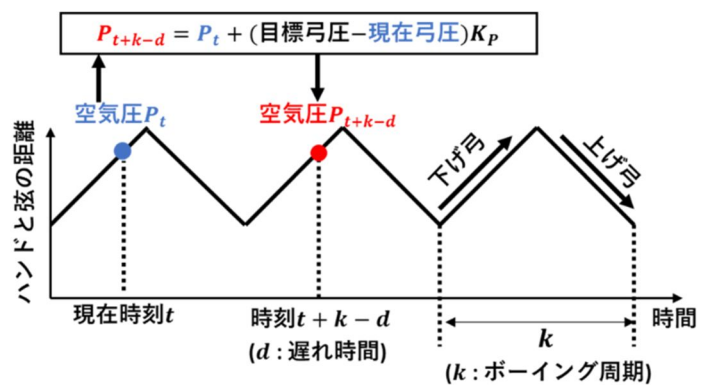


図9 弓圧フィードバックシステムの概要

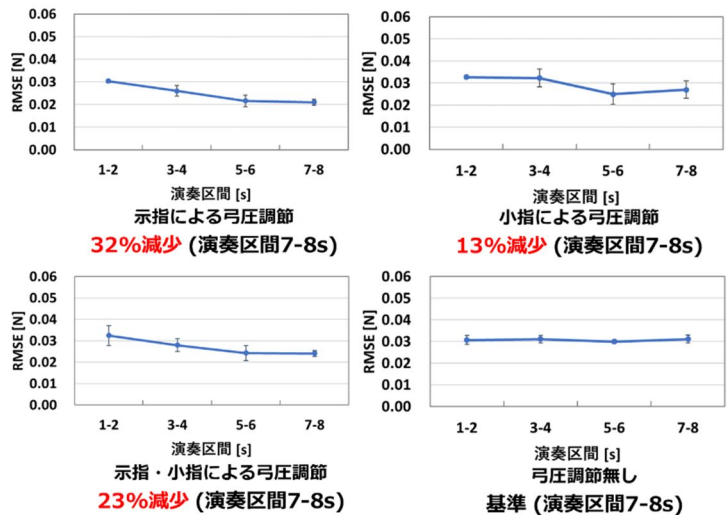


図10 弓圧フィードバックシステムの実験結果

### 3.3 強化学習による楽譜から演奏動作生成

演奏後フィードバックシステム構築の第一歩として、強化学習を用いた演奏動作決定方法について検討した。強化学習を支配するパラメータとして、学習率、ランダム行動確率、ランダム行動確率を0としてシミュレーションを行った。シミュレーションでは、目標音圧に近い演奏動作を生成できたときに報酬を大きくしている。その結果、以下のことが明らかとなった。(1) 学習率は0.5が、累積報酬が高くなる。(2) 目標音圧の変化による強化学習への影響は小さい。

強化学習による演奏動作決定過程の構築においては、これまで学習が成功したときの最大の報酬を1000、失敗したときの報酬を-100としていたが、これらをそれぞれ1と-1に変更してシミュレーションを行った。その結果、学習の失敗回数が減り、学習の成功確率が上昇することが確認できた。また、これまで楽曲「むすんでひらいて」の第3、4小節のみを対象としていたが、これを第1～4小節に拡大してシミュレーションを行ったところ、学習が可能であることを確認した。

次に、楽譜から自動的にバイオリンのボーイング方向を決定する過程を、機械学習手法の1つである強化学習を用いた手法で実現することを試みた。学習回数の点から実機を用いた学習は現実的ではない。そこで、シミュレーションで学習した知識を実機に転用することを考え、その手法として転移学習を導入した。そして、シミュレーション上で転移学習を適用することで、実機での学習が可能かどうかを検証した。新たにDeep Q-Networkのシステムを新たに構築し、バイオリン演奏ロボットの運動計画に適応した。シミュレーション実験の結果、転移学習により学習が効率的に行え、今後の実機適応に向けたシステムの構築ができた。

### 4. 研究成果

研究期間を通じ、以下のような研究成果を得られた。

- (1) 人間型ロボットによるバイオリン演奏音の向上を目指し、一定の音圧を生成できるようなハードウェア開発に成功した。
- (2) 向上した演奏音を用いて、目標となる音圧を生成できるような演奏音フィードバックシステムの構築に成功した。
- (3) 強化学習を用いた演奏動作の自動決定システム構築とその実機への適用への道筋をつけることができた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1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 西村郁哉, 福原裕志, 渋谷恒司	4. 巻 vol.40, No.10
2. 論文標題 強化学習によるバイオリン演奏ロボットの動作生成 ~ 割引率と探索率の弓運動への影響 ~	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 日本ロボット学会誌	6. 最初と最後の頁 924-927
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7210/jrsj.40.924	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11件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 西村郁哉, 福原裕志, 渋谷恒司
2. 発表標題 強化学習によるバイオリン演奏ロボットの動作生成 ~ 割引率と探索率の弓運動への影響 ~
3. 学会等名 第39回日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 西田大輝, 渋谷恒司
2. 発表標題 バイオリン演奏ロボットの開発 演奏音の再現性向上 を目指した右ハンド開発-
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 (Robomech2021)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 渋谷恒司, 福住光梨, 西田大輝
2. 発表標題 バイオリン演奏ロボット左ハンドの性能評価
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2021 (Robomech2021)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 西村郁哉, 堀米賢蔵, 渋谷恒司
2. 発表標題 強化学習によるバイオリン演奏ロボットの動作生成 ~報酬の影響と小節数の拡張~
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(Robomech2022)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 西田大輝, 渋谷恒司
2. 発表標題 バイオリン演奏ロボットの開発 右ハンドによる弓圧制御システムの開発
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(Robomech2022)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Koji Shibuya, and Daiki Nishida
2. 発表標題 Design of Violinist Robot 's Right Hand for Bow Hold with Inflatable Soft Mechanism
3. 学会等名 The 19th International Conference on Ubiquitous Robots (UR 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Koji Shibuya, Kento Kosuga, and Hiroshi Fukuhara
2. 発表標題 Bright and Dark Timbre Expressions with Sound Pressure and Tempo Variations by Violin-playing Robot
3. 学会等名 29th IEEE International Conference on Robot and Human Interactive Communication (RO MAN, 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 西田大輝, 渋谷恒司
2. 発表標題 バイオリン演奏ロボットの開発-演奏音の再現性向上を目指した右ハンド開発-
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス 講演会 2021 in Osaka
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 渋谷恒司, 福住光梨, 西田大輝
2. 発表標題 バイオリン演奏ロボット左ハンドの性能評価
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス 講演会 2021 in Osaka
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 堀米賢蔵, 渋谷恒司
2. 発表標題 強化学習を用いたバイオリン演奏ロボットの動作決定～学習パラメータの学習成功率への影響～
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス 講演会 2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 園偉彩也, 渋谷恒司
2. 発表標題 イオリン演奏ロボットの開発 フィンガリング用ワイヤ駆動方式指モデルの改良
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス 講演会 2023
4. 発表年 2023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
---------	---------