

令和 6 年 5 月 30 日現在

機関番号：32612

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20H02121

研究課題名（和文）触感再現の客観・定量評価に関する研究

研究課題名（英文）Objective and Quantitative Assessment of Reproduction of Tactile Feeling

研究代表者

三木 則尚（MIKI, NORIHISA）

慶應義塾大学・理工学部（矢上）・教授

研究者番号：70383982

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は、触覚ディスプレイによる触感の再現を定量的に、客観的に評価する手法を確立することである。三木らは、触覚刺激により生起される事象関連電位を用いた触覚の特性評価のため、事象関連電位の高精度計測、解析手法を提案、その有効性を実証した。石塚らは、神経モデルと皮膚モデルを提案、これらを接続し、触覚受容器野の応答を再現することが可能な皮膚-神経モデルを構築した。また触覚研究の資する定量的触覚実験が可能な触覚サンプルおよび新奇触覚ディスプレイを開発するとともに、自然言語処理、機械学習、生成AIを用いた新たな触覚研究手法を提案、その有効性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の学術的意義は、事象関連電位ならびに、皮膚変形・神経モデルを用いる触覚評価手法を構築した点である。本手法を用いることで、主観的かつ定性的な実験評価が可能となり、触覚モデルの理解、構築が容易になる。また、触覚実験を支援する触覚サンプルや触覚ディスプレイを開発するとともに、触覚研究の律速となる被験者実験を回避可能な、自然言語処理、機械学習、生成AIを用いた新たな手法を提案した。触覚研究のブレークスルーにつながることを期待される。

研究成果の概要（英文）：This research aimed to develop the methodology to evaluate the replicated tactile sensation quantitatively and objectively. Since the oddball tasks of tactile stimuli involves errors in the trigger detection, the conventional summation averaging cancels out not only the noise but also the ERP. Compensation of the trigger mismatch and data augmentation are proposed by Miki's group and are verified to be effective in accurate detection of ERP. Ishizuka's group successfully simulated the response of tactile receptors by modeling the neurons and the skins. In addition, the tactile samples and the tactile displays were newly developed while natural language processing, machine learning, and generative AI were successfully incorporated into the tactile research.

研究分野：人間工学

キーワード：触覚 触覚ディスプレイ 事象関連電位 皮膚変形 自然言語処理 機械学習

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

触覚ディスプレイによる触感の呈示技術は、次世代の VR/AR のコンテンツにおける臨場感の向上や、マスタスレイブ技術を通じた高精度な遠隔操作に不可欠である。触覚ディスプレイにより任意の触感を呈示するためには、触覚ディスプレイへの入力信号 呈示される触感導出、という順問題だけでなく、呈示したい触感 ディスプレイへの入力信号、という逆問題を解かなくてはならない。

申請者らのグループは、リアルな触感再現のためには触覚ディスプレイの解像度が必要不可欠と考え、専門とするマイクロ・ナノ工学を駆使し、高解像度な新奇触覚ディスプレイを開発してきた。一方で、触感が、定性的にオノマトペや、定量的ではあるが被験者の主観に依り個人差の大きな SD 法により表現されることが、触感再現の逆問題の困難さにつながっていると考えた。そこで、物理特性が明らかな触覚サンプルを介在させれば、触覚ディスプレイが呈示するバーチャルな表面と、触感の両方を定量化でき、定量的に触覚ディスプレイと触感の順・逆問題を解けると考えた。MEMS 技術を用いた触覚サンプルや触覚ディスプレイの開発、機械学習を用いた逆問題の解法などの研究等を行ってきたが、その中で、触覚ディスプレイが呈示する触感と、触覚サンプルの触感の類似性、すなわち再現性を定量的に、かつ客観的に評価する指標が存在していない、という「問い」に直面した。Osgouei らは触覚ディスプレイとサンプルとの触感の類似性が 60%程度と報告したが[R.H. Osgouei, et al., Trans Haptics, 2018]、主観評価では評価における個人差が大きく、またアンケート調査は実験後の集計時間がかかり非効率である。触感の再現性を客観的かつ定量的に評価できれば、順・逆問題を効率的に、かつ高い確度で解くことができるはずである。

2. 研究の目的

以上の背景を踏まえ、本研究の目的は、触覚ディスプレイ 触感の順問題・逆問題を高確度かつ効率的に達成するために、特に、触覚ディスプレイによる触感の再現を定量的に、客観的に評価する手法を確立することである。

触感は、表面との接触による皮膚変形 触覚受容器への刺激 脳内での処理 触感認知、というプロセスにより惹起されている。そこで申請者らは被験者の主観に依存せず簡易に評価を行う方法として、(1)脳波事象関連電位による触感再現評価手法の確立ならびに(2)皮膚変形シミュレーションによる触感再現評価手法の確立とともに、最終的に(3)触覚における順・逆問題のコンプリートによる触感の人工的再現を目指す。

3. 研究の方法

(1) 脳波事象関連電位による触感再現評価 (三木)

脳波事象関連電位 (ERP) は、認知レベルでの刺激の逸脱、違和感を反映する。申請者らのグループは開発したキャンドル型微小針電極を用いることで、音声のオドボール課題における ERP の高感度検出に成功している。触覚サンプルを標準刺激、触覚ディスプレイを逸脱刺激としたオドボール課題において、再現性が高いとき、すなわち標準刺激と逸脱刺激に差がないとき、ERP の差が小さくなるはずであり、すなわち再現性が評価できる。ヒト弁別閾を超える差を有するサンプルを用いた予備実験では、ERP が検出された。本研究項目では触覚刺激による ERP、特に刺激時のトリガーにずれがある場合の ERP 高精度検出、ならびにこれを用いた触覚評価を行う。

(2) 皮膚変形シミュレーションによる触感再現評価（石塚）

触感が、変形を受けた皮膚内部の触覚受容器への刺激により生起されるのであれば、皮膚変形が等しいとき、触感が再現されているはずである。分担者の石塚が開発した有限要素法解析による皮膚断面の変形シミュレーションを用い、触覚ディスプレイによる皮膚変形と、触覚サンプルによる皮膚変形を比較する。尚、皮膚変形の再現性と、触感の再現性は非線形な関係であることが予想される。皮膚変形における特徴量を導出するとともに、この非線形性について実験的に導出する。

(3) 触覚ディスプレイ 触感の順問題・逆問題を解く（三木・石塚）

(1)、(2)の成果を活用し順問題・逆問題を解く。尚、触覚ディスプレイはこれまでに開発した触覚ディスプレイを用いるが、新たに VR システムへの応用に適した新奇ディスプレイも検討する。また触覚に関する基礎研究も並行して行っていく。

4. 研究成果

上述した(1)、(2)、(3)ならびに(4)触覚における基礎研究において、新たな知見の獲得、新たな手法、機構の提案を行うことができた。

(1) ERP について

オドボール課題における ERP 検出では、ノイズ除去、トリガータイミングのずれのために加算平均を行うことで ERP を抽出する。しかし、触覚刺激においては、トリガー検出の精確さに問題が生じると考えられる。トリガーがずれた状態で加算平均すると、ERP 信号が消失してしまう。そこでこの問題を解決するために、逸脱刺激時の脳波の相関により、トリガータイミングのずれを補正する手法を提案した。ただし、ノイズの影響により、ERP の相関が十分に取れないことが明らかになった。そこで、あらかじめ複数の逸脱刺激時の脳波を加算平均し、ノイズがある程度低減された ERP 同士で、トリガーを変化させながら相関を取り、もっとも相関が大きいときに、真のトリガーが一致していると判断した。トリガーを合わせた上で、加算平均を行う。最初に加算平均する ERP の数であるが、1 もしくは総逸脱刺激数の場合はトリガーがずれたまま加算平均している。一方で、最初に加算平均の数が多いとトリガーのずれのために ERP が小さくなり相関がとれず、一方で少ないとノイズの影響を低減できない。よって最適な最初に加算平均数がある。実験的には、2 から 4 が適していると導出された。さらに、最初に加算平均のための ERP 選択において、その組み合わせによりデータオーグメンテーションができることが明らかになった。トリガー補正ならびにデータオーグメンテーションにより、Fig. 1 に示すように、従来の加算平均のみでは抽出できなかった ERP、特に P300 を検出することに成功した[1]。この ERP 検出手法と、凹凸幅を精密に制御した触覚サンプル、さらには視覚刺激を組み合わせ、ヒト触覚閾値、またその閾値が視覚によるクロスモーダルによりどう変化するのか、研究を遂行中である。

(2) 皮膚変形について

脳活動計測と連携して使用することが可能な皮膚モデルと触覚受容器野の神経活動モデル（SA、RA、PC）を組み合わせた数理モデルの構築を行なった。有限要素法解析を用いた皮膚変形計算のための計算モデルを構築し、皮膚の変形を計算する。そして、その計算によって導出される触覚受容器の位置におけるミーゼス応力を積分発火モデルに代入することによって神経活動を計算する。

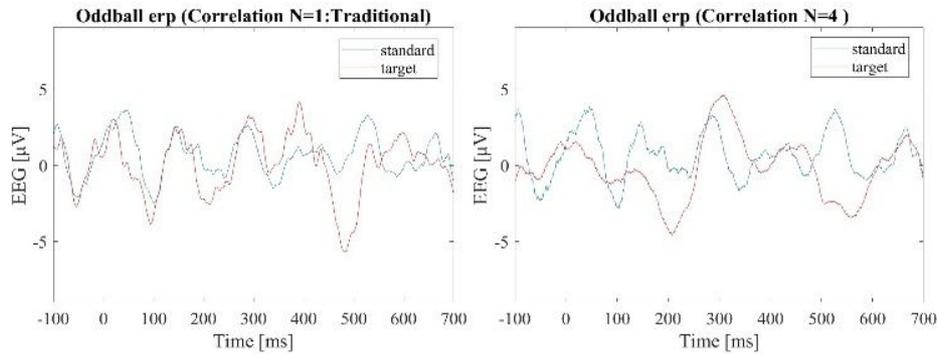


Fig. 1 トリガー補正ならびにデータオーグメンテーションによる ERP 検出

既存の研究で示されている寸法を参考に層構造を有する皮膚の断面モデルを作製し、有限要素法解析のソフトウェアに取り込んで要素を作製した。そして、それらの要素に対して物性値を設定した。選定したパラメータやモデル形状の妥当性を評価するために、0.05 mm の直径のプローブを用いて皮膚に 1 mm の変位量を与えた際の皮膚の変形量を評価した。振動に対する触覚受容器の応答は既知である。皮膚に直径 1 mm のプローブで振動を与えた際の皮膚内部の触覚受容器の位置におけるミーゼス応力を計算し、それを積分発火モデルに代入した。既知である発火頻度の実測値と計算された発火頻度を一致させるためにパレート最適解を用いて、積分発火モデル内の未定数を決定した。

皮膚の変形量は既存の研究や実測と比較して、同程度の変形であった。そのため、今回のモデルで用いた皮膚の形状や物性値は妥当であったと考えられる。このモデルを用いて神経モデルのパラメータの決定を行うこととした。

パレート最適化によって得られたパラメータを用いて、最適化に使った正弦波に対する触覚受容器野の応答が再現できているかを確認した。その結果、最適化に用いた 20-300 Hz の正弦波に対する応答をよく再現できていることが確認できた。特に 100 Hz 以上の正弦波に対する応答は既存研究のモデルよりも優れており、提案するモデルが既存モデルよりもよく触覚受容器野の特性を再現できていることが確認された。また、最適化に用いていない、Diharmonic や Noise といった振動に対する触覚受容器野の応答も再現できており、作製したモデルが汎化できていることが確認できた [2]。

(3) 新たな触覚ディスプレイについて

新しい触覚ディスプレイとして、低沸点液体を封入したパウチ型アクチュエータを提案した。気液相変化を利用することで、大きな体積変化、変位を実現できる。パウチ型アクチュエータでは、乏しい伸縮性や、サイズの大きさが過大であった。本研究では、ラテックスゴムの微細コーティングプロセスを開発することでこれらを解決し、これまでにない小さいサイズのアクチュエータを実現した [3]。また、パウチ型アクチュエータ研究の発展として、伸びやすい熱可塑性フィルムを用いてパウチアクチュエータの研究を行った。パウチアクチュエータ内部の伸びやすさを局所的に制御することによって、曲がるパウチアクチュエータを実現した [4]。

気液相変化アクチュエータは、比較的低温での駆動が可能で、また自身のコンプライアンスを利用することで、安全な接触を可能とする。そこで、握手を高確度に再現できる気液相変化アクチュエータを用いたロボットハンドを開発した[5]。握手した際に触れる箇所、付与される力分布について検討を行い、3つの気液相変化アクチュエータを用いることで、握手感の提示に成功した。

将来的な触覚ディスプレイ、センサのプラットフォームとなるロボットハンドの研究を行った。例えば、ブレッドボードのように回路を変更可能な形で試作できるプロトハンドがあれば、触覚ディスプレイ、センサの配置や、連携について詳細な検討を行うことができる。透明高分子を構造体に、自在に変形可能な液体金属を血管のように配置した流路内に封入することで、電子回路を抜き差し可能なプロトハンドの開発に成功した [6]。

(4) 触覚研究の新たなアプローチ・基礎知見

従来の触覚実験においては、被験者が物理的に対象サンプルを触る必要があり、被験者の数、属性に限界があった。そこで発想を変え、人々の触覚に関する大量のデータが蓄積されている言語コーパスにおける触覚関連オノマトペ間の相関を、自然言語処理により導出した。これにより、触覚特性を、被験者実験なしで導出することが可能になった。この成果は触覚研究における新たな手法を提案するもので、ブレークスルーをもたらすと予想される[7]。

逆問題の解法を効率良く検出するため、微細加工技術を利用した触覚実験用サンプルの開発 [8]、またこれを用いた触覚実験結果の機械学習による触覚ディスプレイ 触感関係のモデル化を行った[9]。

参考文献

- [1] A. Ayane, S. Suzuki, H. Ishizuka, T. Hiraki, and N. Miki, Innovative strategy for resolving trigger time discrepancy in ERP recording, IEEE EMBC 2024, July 2024.
- [2] H. Ishizuka, S. Kitatuchi, M. Nakatani, H. Yoshimura, F. Shimokawa, Computational 2D model simulating neural responses of a single tactile unit to vibrotactile stimuli, Journal of Biomechanical Science and Engineering, 2024 (in print).
- [3] S. Hirai, T. Nagatomo, T. Hiraki, H. Ishizuka, Y. Kawahara, N. Miki, Micro elastic pouch motors: elastically deformable and miniaturized soft actuators using liquid-to-gas phase change, IEEE Robotics and Automation Letters, 6, 5373-5380, 2021.
- [4] S. Yamamoto, H. Ishizuka, T. Hiraki, S. Ikeda, I. Oshiro, Strain Sensorization of a bladder of expanding pouch actuator using liquid metal, Sensors and Materials, 2024 (in print).
- [5] S. Yamaguchi, T. Hiraki, H. Ishizuka, N. Miki, Handshake feedback in a haptic glove using pouch actuators, Actuators, 12, 51, 2023.
- [6] S. Yamaguchi, N. Nakano, T. Hiraki, H. Ishizuka, N. Miki, ProtoHando: solderless prototyping of electrical circuits on a soft artificial hand with liquid metal, IEEE Sensors Letters, 7, 1-4, 2023.
- [7] T. Nagatomo, T. Hiraki, H. Ishizuka and N. Miki, Unsupervised learning enables extraction of tactile information from text database, IEEE Access, 11, 101155-101166, 2023.
- [8] K. Yanagibashi, N. Miki, Micromanufactured tactile samples for characterization of rough and dry tactile perception, Micromachines, 13, 1685, 2022.
- [9] S. Yamanaka, T. Nagatomo, T. Hiraki, H. Ishizuka, N. Miki, Machine-learning-based fine tuning of input signals for mechano-tactile display, Sensors, 22, 5299, 2022.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計11件（うち査読付論文 10件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Yamamoto S, Ishiuzka H, Hiraki T, Ikeda S, Oshiro O	4. 巻 -
2. 論文標題 Strain Sensorization of a Bladder of Expanding Pouch Actuator Using Liquid Metal	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Sensors and Materials	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 -

1. 著者名 Ishizuka H, Kitaguchi S, Nakatani M, Yoshimura H, Shimokawa F	4. 巻 -
2. 論文標題 Computational 2D Model Simulating Neural Responses of a Single Tactile Unit to Vibrotactile Stimuli	5. 発行年 2024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） 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 -

1. 著者名 Yamanaka S, Nagatomo T, Hiraki T, Ishizuka H, Miki N	4. 巻 22
2. 論文標題 Machine-Learning-Based Fine Tuning of Input Signals for Mechano-Tactile Display	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Sensors	6. 最初と最後の頁 5299 ~ 5299
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/s22145299	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 Yanagibashi K, Miki N	4. 巻 13
2. 論文標題 Micromanufactured Tactile Samples for Characterization of Rough and Dry Tactile Perception	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Micromachines	6. 最初と最後の頁 1685 ~ 1685
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/mi13101685	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 Yamaguchi S, Hiraki T, Ishizuka H, Miki N	4. 巻 12
2. 論文標題 Handshake Feedback in a Haptic Glove Using Pouch Actuators	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Actuators	6. 最初と最後の頁 51 ~ 51
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/act12020051	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 Yamaguchi S, Nakano N, Hiraki T, Ishizuka H, Miki N	4. 巻 7
2. 論文標題 ProtoHand: Solderless Prototyping of Electrical Circuits on a Soft Artificial Hand with Liquid Metal	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEE Sensors Letters	6. 最初と最後の頁 1 ~ 4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/LSENS.2023.3244751	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 Ishizuka H, Kitaguchi S, Nakatani M, Yoshimura H, Shimokawa F	4. 巻 -
2. 論文標題 Computational Models for SA, RA, PC Afferent to Reproduce Neural Responses to Dynamic Stimulus Using FEM Analysis and a Leaky Integrate-and-Fire Model	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 arXiv:2208.00615	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) 10.48550/arXiv.2208.00615	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 Hirai S, Nagatomo T, Hiraki T, Ishizuka H, Kawahara Y, Miki N	4. 巻 6
2. 論文標題 Micro Elastic Pouch Motors: Elastically Deformable and Miniaturized Soft Actuators Using Liquid-to-Gas Phase Change	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Robotics and Automation Letters	6. 最初と最後の頁 5373 ~ 5380
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/LRA.2021.3075102	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 Nagatomo T, Hiraki T, Ishizuka H, Miki N	4. 巻 11
2. 論文標題 Unsupervised Learning Enables Extraction of Tactile Information from Text Database	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 101155 ~ 101166
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ACCESS.2021.3130277	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 Kawazoe M, Miki N	4. 巻 30
2. 論文標題 Tactile samples with variable surface textures to investigate tactile perception characteristic	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Micromechanics and Microengineering	6. 最初と最後の頁 105011
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6439/ab9f59	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 Hirai S, Nagatomo T, Hiraki T, Ishizuka H, Kawahara Y, Miki N	4. 巻 6
2. 論文標題 Micro Elastic Pouch Motors: Elastically Deformable and Miniaturized Soft Actuators Using Liquid-to-Gas Phase Change	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Robotics and Automation Letters	6. 最初と最後の頁 5373-5380
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/LRA.2021.3075102	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8件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 Tuang Trung Pham, Hoang Hiep Ly, Hiroki Ishizuka, Junichi Chikazoe
2. 発表標題 Individualized Recurrent Neural Network as an Encoding Model of Human Haptic Shape Recognition
3. 学会等名 Asia Haptics 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 金子征太郎、石塚裕己、梶本裕之
2. 発表標題 皮膚色変化を用いた皮膚内部応力分布計測手法の予備的検討
3. 学会等名 第60回日本生体医工学会大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 阿曾寛之、三木則尚、長友竜帆、平木剛史、石塚 裕己
2. 発表標題 クロスモーダル効果を応用したスマートフォンによる触感呈示の研究
3. 学会等名 第12回マイクロ・ナノ工学シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鈴木竣策、三木 則尚
2. 発表標題 ERP 検出を用いた視触覚間におけるクロスモダリティの定量評価
3. 学会等名 第12回マイクロ・ナノ工学シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鈴木 竣策、三木 則尚
2. 発表標題 触覚刺激に関する ERP 検出におけるトリガーの制御
3. 学会等名 第11回マイクロ・ナノ工学シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山口晴也, 三木則尚
2. 発表標題 NOVEC7000 流体を用いた触覚グローブにおける握手の再現
3. 学会等名 第11回マイクロ・ナノ工学シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中野夏海, 三木則尚
2. 発表標題 液体金属を作動流体とした人工筋アクチュエータにより駆動する手のひら触覚センサの開発
3. 学会等名 第11回マイクロ・ナノ工学シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 金子征太郎, 石塚裕己, 梶本裕之
2. 発表標題 皮膚色変化を用いた皮膚内部応力分布計測手法の予備的検討
3. 学会等名 第60回日本生体医工学会大会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

三木研究室HP
www.miki.mech.keio.ac.jp

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	石塚 裕己 (Ishizuka Hiroki) (40784418)	大阪大学・大学院基礎工学研究科・助教 (14401)	

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