

令和 5 年 5 月 7 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02109

研究課題名（和文）土砂のマクロ的性質のリアルタイム推定に基づく油圧ショベルの自動掘削動作の実現

研究課題名（英文）Autonomous Excavation of Hydraulic Excavator Based on Real-Time Estimation of Macroscopic Properties of Soil

研究代表者

永谷 圭司（Nagatani, Keiji）

東京大学・大学院工学系研究科（工学部）・特任教授

研究者番号：80314649

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、土砂の性質の推定手法と、これを用いた油圧ショベルの自動掘削動作の生成手法を提案した。まず、土の表面画像から土内部の水分量の時系列変化を予測する機械学習のフレームワークを構築し、4種類の土壌において90%の精度で分類可能であることを実証した。さらに、周囲気温を入力パラメータに加えることで、予測精度が向上することを確認した。次に、土砂のマクロ的性質と土砂形状を用いた油圧ショベルの自動掘削動作計画/再計画の提案を行った。動力学シミュレータと最適化手法を用いて、土壌の密度に応じた効率的な掘削軌道の生成を提案した。この手法は、シミュレーションならびに実建機を用いて、有用性を確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

熟練の油圧ショベルオペレータは、掘削を行う際、土砂の形状のみならず、無意識のうちに土砂の性質を逐次推定し、掘削動作に反映している。このような掘削動作の自動化を機械で実現するため、本研究では、土砂の性質の推定手法と油圧ショベルの自動掘削動作の生成手法を提案し、シミュレーションならびに実建設機械を用いて、その有用性を確認した。このような動作を機械に自動で行わせることは、対象となる土砂が変形するために大変困難であり、ロボットの自律動作獲得のためのマイルストーン動作の一つである。また、同時に、現在の社会問題の解決に直接結びつくことが期待できる結果であるとも言える。

研究成果の概要（英文）：This study proposed a method for estimating soil properties and generating automatic excavation operations for hydraulic shovels based on the estimated properties. First, a machine learning framework was constructed to predict the time series changes in soil moisture inside the soil from surface images. The framework demonstrated that it could classify four soil types with 90% accuracy. Additionally, it was confirmed that the prediction accuracy could be improved by adding ambient temperature as an input parameter. Next, a proposal was made for automatic excavation operation planning/replanning using the macroscopic properties and shape of the soil. An efficient excavation path was proposed based on the soil density estimated from 3D point cloud measurement of the excavation target and optimization algorithm using a dynamic simulator. The usefulness of the above method was confirmed through simulations and practical experiments with an actual construction excavator.

研究分野：フィールドロボティクス

キーワード：自動掘削 建設機械

## 1. 研究開始当初の背景

土木建設業では、少子高齢化による熟練工不足ならびに労働環境の改善が、大きな問題となっている。これを解決するため、国土交通省は、ICTの全面的な活用を中心とした*i-Construction*と呼ばれる施策を進めており、建設生産システム全体の生産性向上を目指している。その先には、建設現場から人を排除した、土木工事の完全自動施工が目標として存在し、それに向けた研究開発が、様々な研究機関や建設会社で行われている。しかしながら、土木工事において、油圧ショベルによる土砂の自動掘削動作一つをとっても、実用に耐え得るところまで至っていない。その主要原因は、対象環境が土砂であり、掘削によって、土砂の形状が逐次変動するため、単純な動作の繰り返しでは、掘削が上手く進まないという点にある。

仮に土砂の性質が理解できれば、掘削時の土砂の移動が予想できるため、油圧ショベルの自動掘削動作の生成が可能となることが期待できる。そこで、現在、(A)テラメカニクスによる機械と土砂の関係の理解、ならびに、(B)機械学習による熟練オペレータの動作解析、の2つのアプローチで、油圧ショベルによる自動掘削動作の実現が試みられている。しかしながら、どちらのアプローチにも問題が存在するため、これらの技術の延長線上では自動掘削が実現できず、新たなアプローチが必要であると研究代表者は考えた。なお、この土を掘るとい動作を機械に自動で行わせることは、対象となる土砂が変形するために大変困難であり、ロボットの自律動作獲得のためのマイルストーン動作の一つであると同時に、現在の社会問題の解決に直接結びつくことが期待できるテーマであるとも言える。

## 2. 研究の目的

本研究の大目標は、油圧ショベルによる地盤の自動掘削動作の実現であり、これを実現するため、本研究の目的を、土砂の性質の推定手法と油圧ショベルの自動掘削動作の生成手法の提案とした。現在、自動掘削を実現するために決定的に不足しているのは、土砂のマクロ的性質の推定ならびに、その推定を用いた動作計画であると、研究代表者は考える。熟練の油圧ショベルオペレータは、掘削を行う際、土砂の形状のみならず、無意識のうちに土砂の性質を逐次推定し、掘削動作に反映していると考えられる。言い換えれば、熟練オペレータは、主に視覚情報を元に、継続的な土砂の性質の推定と、時々刻々と変化する土砂形状に対する継続的な動作の再計画を行っている。そこで、本研究では、以下の手順で土砂の自動掘削を行う手法を提案する。まず、油圧ショベルによる土砂の掘削中、搭載したセンサを用いて、土砂の三次元計測を逐次行う。次に、土砂形状の変化より、土砂の崩れ易さや硬さといった土砂のマクロ的性質を推定する。さらに、この性質と計測した土砂形状を合わせて動作の再計画を行い、掘削を行う。ここで提案する手法については、シミュレータならびに、実油圧ショベルを用いて実験を行い、提案手法の有用性を確認する。

## 3. 研究の方法

本研究の目的である油圧ショベルによる自動掘削動作の実現を目指し、本研究では、以下に示すサブテーマを設定し、研究を進めてきた。

### (1) 対象環境の三次元土砂計測手法

掘削時の土砂形状の三次元計測手法について検討を進めた。計測対象とする土砂は、バケツに入った土砂または、放土した後の土砂山である。この計測は、デバイスの性能にも大きく依存するため、複数のLiDARを試用し、最適な土砂形状取得の手法の検討を進めた。

### (2) 掘削土砂のマクロ的性質および反力推定

土中水分量推定については、機械学習を用いて、土の表面画像から土内部の水分量の時系列変化を予測する2段階のフレームワークを構築した(図1)。まず、第1段階として、RGB-IRカメラを用いた土壌表面画像を入力、水分量計による土壌表面の水分量を出力としたCNN改変モデルを構築した。腐葉土、軽石、パーライト、黒土の4種類の土壌に対し、水分量を8分割して、土壌表面画像を取得した(図2)。これらの画像データセットからCNN改変モデルを訓練した。さらに、第2段階として、第1段階で推定した土壌表面水分量から土壌内部の水分量をLSTMにより推定するモデルを構築し、特に外部の気温も同時に計測し時系列入力データを与えるというフレームワークを構築した。

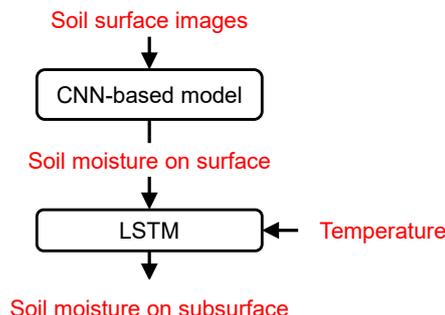


図1 土壌水分量推定モデル

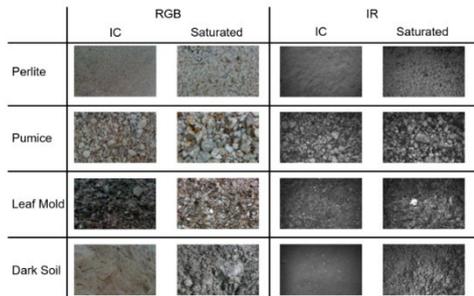


図 2 初期状態・飽和状態の RGB/IR 画像



図 3 排土実験装置

また、土壌水分量に対する掘削反力の変化については、最も簡易かつ代表的な掘削現象の 1 つである排土現象に注目した。まず、図 3 に示す実験装置により、土壌含有水分量（飽和度）を変化させながらブレードによる排土実験をおこない、力覚センサによる排土反力を計測した。加えて、これら実験を模擬した個別要素法（DEM）シミュレーションを実施し、DEM における支配パラメータを導出した。

### (3) 土砂形状と土砂のマクロ的性質を用いた油圧ショベルの掘削動作計画／再計画

本研究では、土の状態を考慮した自動掘削を実現する手法を提案した。この提案手法の流れを、図 4 に示し、概略を以下に記す。

- ① 掘削対象の地形の 3 次元点群計測を行う。
- ② 計測された 3 次元点群データを用いて掘削対象の土の状態を推定する。この状態推定では、土量変化率と呼ばれる指標を用いて、掘削対象の土の密度を推定する。土量変化率とは、土の膨らみの度合いを表す指標であり、掘削前の土の体積に対する掘削後の土の体積の比率で計算される。この土量変化率が大きいほど、掘削対象の土の密度が大きいことが知られているため、土量変化率を用いることで掘削対象の土の密度を推定することが可能である。

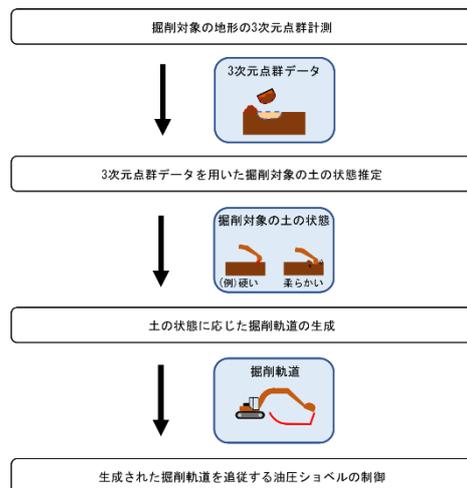


図 4 自動掘削の流れ

- ③ 推定された密度をインプットに、その土の密度に応じた効率的な掘削軌道を生成する。土の密度に応じた効率的な掘削軌道生成を実現するため、提案手法では、動力学シミュレータ（Vortex Studio）を使用する。このシミュレータは、土質力学に基づいた土の挙動を再現でき、密度を含む土の条件も、容易に変更可能である。よって、このシミュレータを用いることで、掘削対象の密度を変更しながら、特定の密度における効率的な掘削軌道の組を事前に取得しておくことが可能となる。この効率的な掘削軌道の組から推定された密度に適した軌道を選択することによって、掘削対象の土に応じた掘削動作を実行することが可能となる。

- ④ 最後に生成された掘削軌道を追従する油圧ショベルの制御を実行する。

また、本研究では、掘削を行う際に生ずる土砂のこぼれにも着目し、土の状態を考慮した土砂のこぼれを低減する自動掘削を実現する手法についても提案した。この手法の概略を以下に記す。

- ① 上記のシミュレータを用いて、こぼれ率の低い掘削軌道を遺伝的アルゴリズムで探索する。この際、適切な掘削軌道を得るため、(A)十分な掘削体積を確保するために、掘削体積に下限を設定、(B)油圧ショベルの転倒防止のため、掘削中に油圧ショベルが傾かないこと、(C)バケットの底の破損を防止するためバケットの底はバケットの刃先の軌跡よりも常に上にあること、という制約を設ける。なお、油圧ショベルの掘削軌道は、挿入、横引き、すくい の 3 段階に分割する。具体的には、挿入と横引きで刃先は直線運動、すくいでは、バケットの口が水平になるまで回転軸を中心にバケットの単純な円運動を行う。その後バケットを垂直に持ち上げるものとする。
- ② 上記の遺伝的アルゴリズムによる探索は、柔らかい土砂、中間の土砂、硬い土砂のそれぞれの条件において実施し、それぞれ、掘削動作を生成する。
- ③ 得られた掘削動作を実現する関節の動きを実機に搭載し、動作を行う。

## 4. 研究成果

### (1) 対象環境の三次元土砂計測手法

本研究では、主に、油圧ショベルに対するセンサの取付け位置に関する検討が主となったが、作業対象近傍に設置することで、土砂形状を精度良く取得することができることが分かった。ただし、バケット近傍へのセンサの配置は、土砂による汚れ等によるセンシング能力低下が問題となるため、ここには、トレードオフが存在する。

### (2) 掘削土砂のマクロ的性質および反力推定

土壌の表面水分量推定について、構築した手法によって、いずれの土壌においても概ね 90 %程度の精度で分類可能であることを実証した。RGB 画像、IR 画像での精度が若干異なることも明らかとなり、対象となる土壌によって適したカメラ画像を用いる必要があることが明白となった。さらに、土壌内部の水分量推定、特に時系列変化についても、周囲気温を LSTM への入力パラメータとして加えることによって予測精度が向上することが明らかとなった。4 種類の土壌に対する代表的な予測結果を図 5 に示す。本研究では、これら 4 種類の土壌について深さ 50 mm と 100 mm の 2 ケース、さらに気温条件を変えた 8 ケース、カメラ画像を RGB、IR という 2 つ、計 128 ケースについて予測実験を行った。その結果、予測精度を示す二乗平均平方根誤差は、1 ケースを除いてすべてのケースで 1.0%未満となり、高精度での土壌内部水分量の時系列予測に成功した。

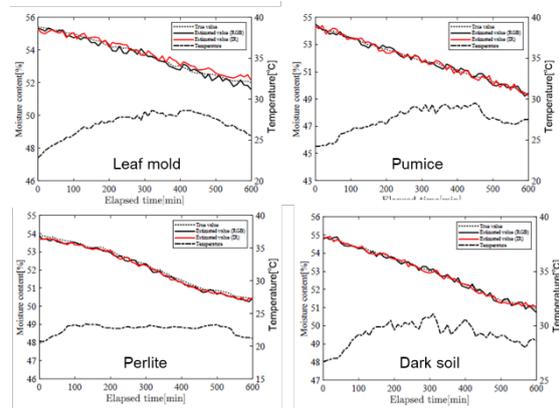


図 5 土壌内部水分量の時系列予測結果例 (土壌深さ：100 mm)

土砂水分飽和度を 0~100%まで変更した排土実験の力学データに対応する個別要素法 (DEM) による数値シミュレーションを実施した (図 6)。DEM における土砂水分量を模擬する支配パラメータとして、粒子間の付着力モデルにおけるスケールングファクタと付着間距離に注目し、これらを土砂性質のマクロ指標とした。さらに、実験における力学データとの比較をおこない、これらパラメータ数値と土砂水分量との関連性について定量的な同定を達成した。これにより、ある飽和度を DEM で模擬する場合のチューニング手法の端緒を得ることができ、さらに、上述の成果である土砂の内部水分量同定を連携させることによって、画像データから排土反力の推定が可能となることが示唆された。

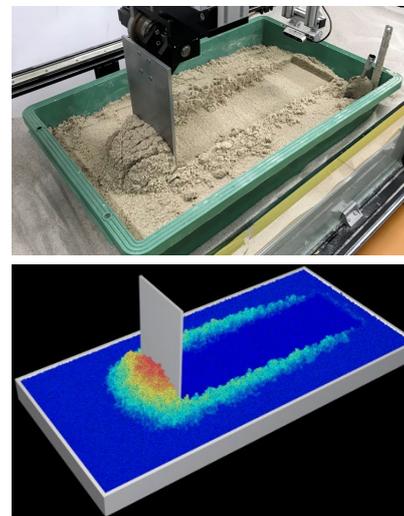


図 6 排土実験 (上) と DEM シミュレーション (下)

### (3) 土砂形状と土砂のマクロ的性質を用いた油圧ショベルの掘削動作計画/再計画

提案した土の状態を考慮した自動掘削を実現する手法について、物理シミュレーションならびに実機を用いて動作検証を行い、有用性を確認した。以下に、検証結果について記す。

シミュレータには、土質力学に基づいた土の挙動が再現可能である、前述の Vortex Studio を採用した。この環境において、柔らかい土砂 (Soft Soil)、中間の土砂 (Medium Soil)、硬い土砂 (Hard Soil) といった 3 つの条件の土に対し、シミュレーション環境における掘削効率を比較した。この結果を図 7 に示す。この図の縦軸は、各密度条件における掘削効率 (=掘削土量/消費エネルギー) を示す。この図に示すように、提案手法を用いることで、全ての条件において掘削効率が向上した。具体的には Soft Soil の場合に 32.6%, Medium Soil の場合に 15.8%, Hard Soil の場合に 75.9% 掘削効率が向上した。

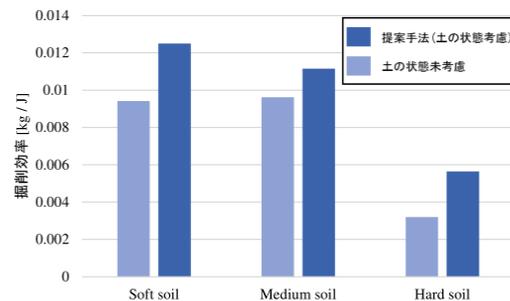


図 5 掘削効率の比較

上記の手法について、実機の油圧ショベルを用いた検証試験を実施した。実機は、土木研究所が有する自動制御が可能な 12t の油圧ショベル (ZAXIS 120) である。実験環境を図 8 に示す。掘削エリアは 2 箇所設定し、それぞれ軟らかい土と硬い土を設置した。掘削エリア、放土エリアには、RGB-D センサをそれぞれ設置し、三次元土砂計測を行うことで、掘削前の土の体積に対する掘削後の土の体積の比率である土量変化率を求めることとした。これにより、土砂の密度推定を行った。

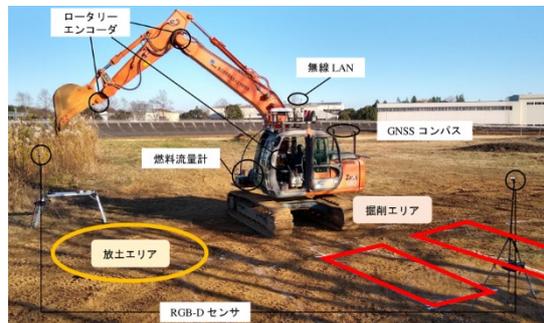


図 6 フィールド実験装置の全体像

本実験では、掘削効率の評価を行うため、掘削動作実行時の燃料消費量を測定することとした。具体的には、燃料タンクから油圧アクチュエータの燃料ポンプに流れる軽油の量を測定することで、掘削効率の評価を行うこととした。

実験の結果、1 回目の土の状態を考慮しない掘削動作と、提案手法を用いて掘削軌道を変更した場合の 2 回目の掘削効率では、提案手法を用いることで 27.7%掘削効率が向上した。この掘削効率を構成する掘削土量と消費エネルギーの値を個別に見ると、提案手法を用いることによって、消費エネルギーが大きく減少したことが分かった。以上より、実機実験を用いて、提案手法の有用性を示すことができた。

また、土の状態を考慮した土砂のこぼれを低減する自動掘削を実現する手法についても、物理シミュレーションならびに実機を用いて動作検証を行い、有用性を確認した。以下に、動作検証結果について記す。

シミュレータには、上記の自動掘削に利用したものと同様に、土質力学に基づいた土の挙動が再現可能である Vortex Studio を採用した。探索するパラメータは、バケットの挿入距離、挿入角度、横引き距離、バケットを手前に引く動作である Back motion (右図 9) を始めるタイミングと Back motion の長さ、Back motion の傾きの計 6 つとした。対象とする土砂の種類は、loam と clay の 2 つの種類を想定し、それぞれ Soft, Medium, Hard の 3 種類の硬さとした。

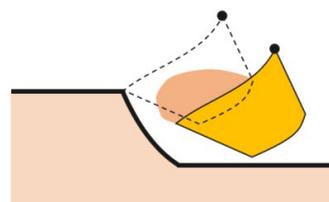


図 7 Back Motion

それぞれの条件において、シミュレータで得た土砂のこぼれ率 (放土量に対するこぼれた土量の割合) を図 10 に記す。ここで、標準掘削とは、土砂の硬さを考えない掘削方法、最適化ありとは、Back motion を含めない動作において、パラメータを最適化したもの、のこりが Back motion を含めた提案手法である。このグラフより、土砂の種類によらず、標準掘削の掘削軌道の土砂のこぼれが、最も多いことがわかる。一方、提案手法である Back motion ありで最適化した動作のこぼれ率が最も小さいことが見てとれる。

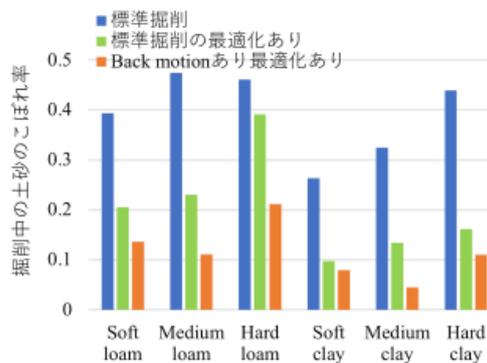


図 8 掘削中の土砂のこぼれ率

続いて、本提案手法についても、実機の油圧ショベルを用いた検証試験を実施した。ここで使用する実機も、土木研究所が有する自動制御が可能な 12t の油圧ショベル (ZAXIS 120) である。実験環境は、概ね図 8 と同様である。実験の結果、実機を用いた動作においても、標準掘削と比較し、Back motion ありで最適化した動作のこぼれ率が小さくなった。以上より、実機実験を用いて、提案手法の有用性を示すことができた。

さらに、本研究では、旋回中の土砂のこぼれを減少させる手法についても提案を行った。これは、掘削時に Soil manipulation と呼ぶ動作を挟むことで、旋回中に落下する可能性のあるバケットの端に存在する土砂を、落下しない位置に移動させるものである。ここでは、詳細は記さないが、この動作を入れることで、旋回中の土砂のこぼれも低減できることが、シミュレーションならびに実機実験を通じて確認できた。

以上より、提案した土砂のマクロ的性質の推定手法ならびに、土砂推定を用いた油圧ショベルの掘削動作計画について、シミュレーションならびに実機を用いて、その有用性を確認することができた。

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 0件）

1. 著者名 Tomoya Goto and Genya Ishigami	4. 巻 33
2. 論文標題 CNN-Based Terrain Classification with Moisture Content Using RGB-IR Images	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Robotics and Mechatronics	6. 最初と最後の頁 1294-1302
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.20965/jrm.2021.p1294	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5件（うち招待講演 0件／うち国際学会 1件）

1. 発表者名 桂知弘，谷島諒丞，濱崎峻資，永谷圭司，山下淳，淺間一
2. 発表標題 油圧ショベルによるこぼれに着目した自動掘削軌道の生成
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 桂知弘，谷島諒丞，濱崎峻資，永谷圭司，山下淳，淺間一
2. 発表標題 旋回中の土砂のこぼれに着目した油圧ショベルの掘削動作の提案
3. 学会等名 第22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 2021年

1. 発表者名 Katsuma S, Yajima R, Hamasaki S, Chun P-J, Nagatani K, Yamauchi G, Hashimoto T, Yamashita A and Asama H
2. 発表標題 Excavation Path Generation for Autonomous Excavator Considering Bulking Factor of Soil
3. 学会等名 International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 永谷圭司, 勝間慎弥, 濱崎峻資, 谷島諒丞, 全 邦釘, 山下 淳, 小澤一雅, 山内元貴, 橋本 毅
2. 発表標題 土量変化率を考慮した油圧ショベルによる自動掘削と建設機械の標準プラットフォームの開発
3. 学会等名 第2回 i-Constructionの推進に関するシンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 勝間慎弥, 谷島諒丞, 濱崎峻資, 全邦釘, 永谷圭司, 山内元貴, 橋本毅, 山下淳, 淺間一
2. 発表標題 土質に応じた動作生成が可能な自動掘削のための3次元計測情報を用いた土質推定
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
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
研究分担者	谷島 諒丞 (Yajima Ryosuke) (10869598)	東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・特任助教  (12601)	
研究分担者	石上 玄也 (Ishigami Genya) (90581455)	慶應義塾大学・理工学部(矢上)・准教授  (32612)	
研究分担者	濱崎 峻資 (Hamasaki Syunsuke) (10849003)	東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・特任助教  (12601)	

#### 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
---------	---------