

令和 6 年 6 月 10 日現在

機関番号：14701

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03978

研究課題名（和文）剛柔両部品に適用可能なロボットシステムによる組立作業の難度評価手法の構築

研究課題名（英文）Construction of an Evaluation Method of Difficulty in Assembly Tasks by Robotic Systems Applicable to Rigid and Flexible Parts

研究代表者

土橋 宏規（Dobashi, Hiroki）

和歌山大学・システム工学部・准教授

研究者番号：50634490

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、対象部品の剛柔に依らない、ロボットシステムによる組立作業の難度の定量的評価手法の構築を目的として、基礎的検討を行った。

具体的には、典型的な柔軟部品の組み付け作業の分析を経て、剛柔両部品を対象とした一般的な組立作業を想定し、難度とそれに影響しうる難度要素の候補との因果関係を仮定した。そして、実機実験から収集したデータに基づき、多変量解析の手法を用いて因果関係の分析を行ったが、適切な結果が得られず、難度評価手法の構築には至らなかった。検証の結果、分析対象のデータの偏りなどが示唆されたため、さらなるデータ収集に向け、記録動画に基づくロボットシステムによる組立作業の時間分析手法を提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、剛体部品を対象とした組立作業に限らず、次世代ロボット生産システムでの実現が求められているような、柔軟部品も対象としたより一般的な組立作業を対象に、ロボットシステムによる組立作業の難度を議論しており、これが従来研究とは異なる本研究の大きな特色となっている。

目的としていた難度評価手法の構築には至らなかったが、実機検証を通して、特に柔軟部品の組立作業においては、柔軟部品の硬さ/柔らかさや組み付け時に必要となる伸縮率などのパラメータが難度に影響を与えることが分かった。本研究の成果は、今後、ロボットシステムによる剛柔両部品を対象とした組立作業の難度の探究の

研究成果の概要（英文）：In this research, we conducted a fundamental study aiming at constructing a method to quantitatively evaluate difficulty in assembly tasks by robotic systems regardless of rigid or flexible parts.

Specifically, following an analysis of typical assembly tasks of flexible parts, we hypothesized causal relationships between the difficulty and difficulty elements which possibly affect it, assuming general assembly tasks with both rigid and flexible parts. Then, we analyzed the causality based on collected data from real robotic experiments using a multivariate analysis method but did not obtain proper results and thus could not construct an evaluation method of difficulty. Because verification results implied that the collected data are biased, aiming for more data collection, we proposed a time analysis method of assembly tasks performed by robotic systems based on recorded videos.

研究分野：ロボット工学

キーワード：組立作業の難度 難度要素 ロボットシステム 柔軟部品 多変量解析 作業時間分析 タスクボード
競技 World Robot Summit

1. 研究開始当初の背景

近年、次世代ロボット生産システムの研究・開発を促進するため、経済産業省と国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）が主催する World Robot Summit（WRS）ものづくりカテゴリー「製品組立チャレンジ」や、アメリカ国立標準技術研究所（NIST）が主催する“Robotic Grasping and Manipulation Competition: Manufacturing Track”など、製造業分野のロボット技術を競う国際競技会が開催されている。しかし、競技課題である工業製品の組立作業の難度は、競技設計時には客観的に評価されておらず、競技課題をロボットシステムとその要素技術の研究・開発における明確なベンチマークとして活用することが難しい。

組立作業の難度評価の従来手法として、作業中の部品の位置・姿勢に生じ得る不確かさに基づくものや、組み付けに必要となる部品の接触状態の遷移のしやすさに基づくもの、作業時の部品と使用する工具の空間的余裕に基づくもの、ロボットハンドによる部品の把持・操作のしやすさに基づくものなどが提案されている。しかし、いずれも剛体部品の組立作業を対象としたものであり、次世代ロボット生産システムによる実現が期待されているような柔軟部品を含む組立作業には、適用することができない。

2. 研究の目的

本研究では、ロボットシステムによる組立作業の難度（実質的な難度）を、図1に例示するように構造化して考える。すなわち、組立作業の実質的な難度は、作業内容固有の難度、つまり、目的とする本質的な作業内容自体（図1の例では「部品Aを部品Bに組み付ける」ことを指し、これをどのようなハードウェアと作業戦略で行うかは加味しない）の難度と、使用するハードウェアと作業戦略が掛け合わされたものとして捉える。このような考え方の下で、剛柔両部品の組立作業の難度に影響を及ぼす要素（以下、難度要素）を明らかにし、さらにその影響の度合いを定量的に評価する手法の構築を、本研究の目的とする。

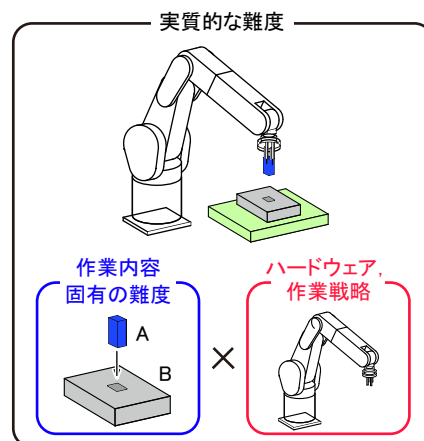


図1：組立作業の難度の構造化例

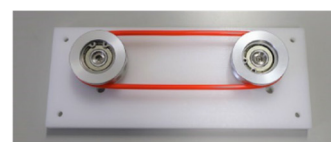
3. 研究の方法

(1) 柔軟部品の組立作業における難度要素の検討

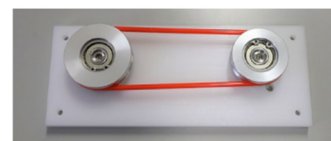
剛体部品にはない柔軟部品に特有の性質として、部品の形状が変化することが挙げられる。この特性が、剛体部品に比べて柔軟部品の組立作業を難しくしている主な要因である。これを踏まえ、本研究では部品の変形を考慮して、柔軟部品の組立作業の作業内容固有の難度に関する難度要素を検討する。

検討に際しては、柔軟部品を含む工業製品の典型例として、図2に示すような二つのプーリに柔軟な丸ベルトを組み付けられたもの（ベルト・プーリユニット）を想定する。この製品の組立作業では、丸ベルトを、組み付け前の状態から適切に変形させながら二つのプーリにかける必要がある。これに影響する丸ベルトの長さ、丸ベルトの硬さ／柔らかさ（ヤング率）、各プーリの径、プーリ間距離といったパラメータが難度要素の候補として考えられる。一方、丸ベルトをプーリにかける際に要求される、組み付け精度に影響する難度要素としては、丸ベルトの断面の径とプーリの溝の径が候補として考えられる。

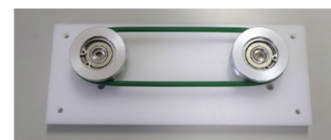
以上を踏まえて、図2(a)に示す製品を基準モデルとし、同図(b)に示すようにプーリの直径を変更したものや同図(c)に示すように丸ベルトの材質を変更したもの、さらに図3に示すようにプーリの溝径の異なるものなど、複数種の製品を対象とした丸ベルトの組み付け実験を、実際のロボットシステムを用いて行い、上述の候補から難度要素として位置付けるべきものを決定する。ただし、実機検証に際しては、ハードウェアと作業戦略は一通りに固定する。また、基準モデルから各種パラメータの値を変更した際の組み付け作業の成否を確認し、成否の変化が生じた場合に当該パラメータを難度要素と位置付けることとする。



(a) 基準モデル



(b) プーリ直径変更モデル



(c) ベルト材質変更モデル

図2：ベルト・プーリユニット

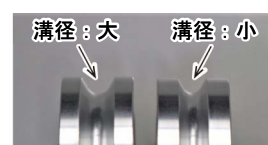


図3：溝径の異なるプーリ

(2) 難度要素の候補および組立作業の難度との因果関係の検討

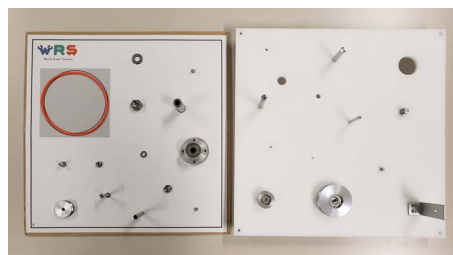
上述の(1)では、第一段階としてベルト・プーリユニットにおける柔軟部品の組み付け作業を対象とした検討を行うが、本研究の目標を見据えると、剛柔両部品を含む、より一般的な組立作業を対象として、難度要素を網羅的に明らかにする必要がある。また、一般的な組立作業における難度要素は数多く存在し、組立作業の難度との因果関係が複雑である可能性を考慮すると、最終的な定量的評価に向けて、あらかじめ個々の難度要素の候補と組立作業の難度との因果関係をモデル化しておくことが有効であると考えられる。

そこで、一般的な組立作業を想定し、上述の(1)の検討結果も踏まえながら難度要素の候補を網羅的に洗い出すとともに、各候補と組立作業の難度との因果関係を仮定し、それをパス図として表現する。なお、因果関係の見通しをよくするため、典型的な組立作業が、大きく「部品の把持」、「部品の向きの変更（姿勢遷移）」、「組み付け」の三つのサブタスクに分けられると考えたうえで、個々のサブタスクの難度を「把持難度」、「姿勢遷移難度」、「組み付け難度」と定義し、難度要素の候補はそれらに影響しうるものとして洗い出すこととする。また、組立作業の難度は、個々の部品に対する各難度を総合したものと位置付けることとする。

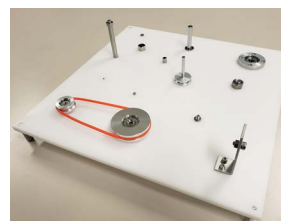
(3) 組立作業のデータ収集および難度要素の候補と組立作業の難度との因果関係の解析

難度要素の候補が組立作業の難度に与える影響を定量的に評価するためには、各候補の値を様々に変化させた場合の、組立作業の結果（例えば、その成否ならびに所要時間）のデータをあらかじめ収集し、それらを用いて多変量解析を行う必要がある。

そこで、実際にロボットシステムを用いて組立作業を実施し、上記(2)で述べた把持などのサブタスクに対する成否ならびに作業の所要時間のデータを収集する。ただし、対象とする組立作業は、一般的な組立作業での典型的な作業要素（例えば軸状部品の挿入など）が多く含まれる WRS 2018 の「タスクボード競技」（図 4 (a) の左側のマット上に供給された種々の部品を同図右側のタスクボードに組み付け、最終的に図 4(b) に示した状態にする）、およびその類似タスクとする。さらに、収集したデータを用いて、上記(2)でパス図として表現する難度要素の候補と組立作業の難度について多変量解析を行い、難度要素の抽出、ならびにその影響の度合いの定量化を目指す。



(a) 組立前の状態



(b) 組立後の状態

図 4：WRS 2018 のタスクボード

(4) 組立作業のデータ収集に向けた作業時間分析手法の検討

上述の(3)におけるデータ収集は、装置の都合上、ロボットシステムを構成するハードウェア（特にロボットアーム）に係る難度要素の候補の値の変更に制約があるなどの理由から、実施できる実験内容が限定的となり、したがって難度要素の候補の数に照らすと、収集できるデータ量が十分ではない可能性がある。一方、データ収集のために有効利用できる可能性のあるものとして、WRS 2018 および WRS 2020 のタスクボード競技における、各参加チームの競技記録が挙げられる。ただし、競技記録は、具体的には競技中のロボットシステムの動作の様子が撮影された動画（競技動画）であり、難度要素の候補と組立作業の難度との因果関係の解析に必要な種々の作業工程にかかる時間については、競技動画を分析して取得する必要がある。しかしながら、ロボットシステムによる組立作業の作業時間分析手法は従来研究では確立されていないため、まずはそうした手法を構築する必要がある。

そこで、ロボットシステムによる組立作業の様子を記録した動画に基づいて、部品の把持や操作（姿勢遷移を含む）、工具の使用／交換に要する時間を計測する手法を検討する。

4. 研究成果

(1) 柔軟部品の組立作業における難度要素の抽出

図 5 に示すように、産業用ロボットアームおよび産業用ロボットハンド（いずれも事前に動作内容をプログラム済み）を用いて、難度要素の候補の値が異なる複数種類のベルト・プーリユニットの丸ベルトの組み付け実験を行い、作業の成否の違いが生じるかを確認した。その結果、丸ベルトの長さ、ヤング率、各プーリの径、プーリ間距離のそれぞれを変更した際には組み付け作業の成否に違いが生じ、したがって、少なくともこれらが難度要素となることが確認できた。

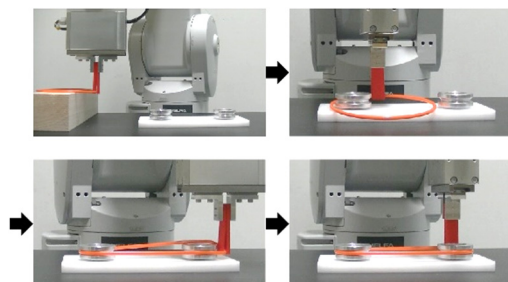


図 5：丸ベルトの組み付け実験

なお、組み付け作業の失敗の原因は、二つ目のプーリへの組み付け時に、丸ベルトを引張るために加えた力の反作用力によってロボットハンドの指がたわみ、安定した把持が維持できなくなることであった。本実験では、ロボットシステムを構成するハードウェアには変更を加えなかったが、上述の結果から、例えばロボットハンドの指のサイズを太くなるように変更し、たわみにくいものとするすることで、組み付け作業が成功する可能性があると考えられる。これは、そうしたハードウェアに関するパラメータが、難度要素となりうることを意味する。

(2) 難度要素の候補と各種作業難度との因果関係のモデル化

2節では、組立作業の難度(実質的な難度)の構造化例として、作業内容固有の難度と、使用するハードウェアならびに作業戦略との掛け合わせで組立作業の難度が表現されるものを示した。しかし、検討を進めていく過程で、作業内容固有の難度については、使用するハードウェアおよび作業戦略をある程度具体的に想定しなければ、評価することができないという考えに至った。これを踏まえて組立作業の難度の構造を再考し、図6に示すように、難度要素は部品の寸法および特性、組立作業に使用するハードウェア、作業戦略の三種類に大別され、各種の複数の難度要素が関係し合って実質的な難度が規定されると考えることとした。なお、本来はこれらに加えて、作業環境に関わる難度要素(例えば、障害物の影響や、部品の位置を認識する際の照明条件など)が存在する可能性があるが、本研究では前述の三種類の難度要素が支配的であるとして、作業環境に関わる難度要素は議論の対象外とする。

そのうえで、3節の(2)で定義した把持難度、姿勢遷移難度、組み付け難度のそれぞれについて、上述の各種の難度要素の候補を網羅的に洗い出し、さらに個々の定量的な表現方法を提案した。また、各種の難度は、各作業工程の所要時間およびその成否として実測されるものとした。

以上を踏まえ、個々の難度要素の候補と各種難度との因果関係を仮定し、これを表現するパス図を作成した。例として、単一部品を対象とした組み付け難度に関するパス図を、図7に示す。ここで、図中の左端の列に並べたものが難度要素の候補であり、部品の寸法および特性、ハードウェア、作業戦略の種類に応じて矩形の枠線を青、赤、緑で色分けしている。ただし、ロボットハンドの指と部品との摩擦係数といった、部品あるいはハードウェア単独では規定されないものについては、双方に関するものとして枠線を紫としている。

(3) 組立作業のデータ収集および難度要素の候補と各種難度との因果関係の解析

多変量解析に必要となる、各難度要素の候補の値と各作業工程の所要時間ならびにその成否のデータ収集のため、WRS 2018のタスクボード競技のタスク、およびその類似タスクを例題として、剛柔両

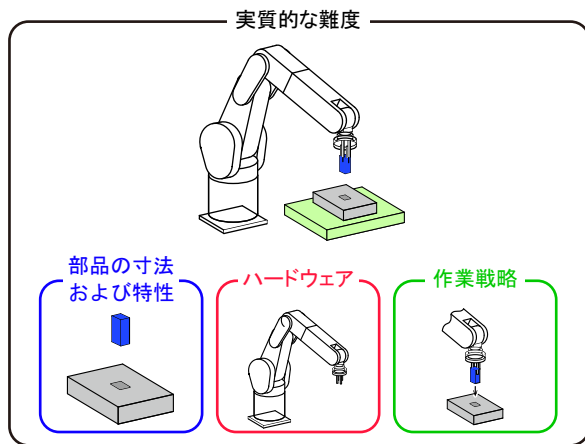


図6：組立作業の難度の構造化(再考)

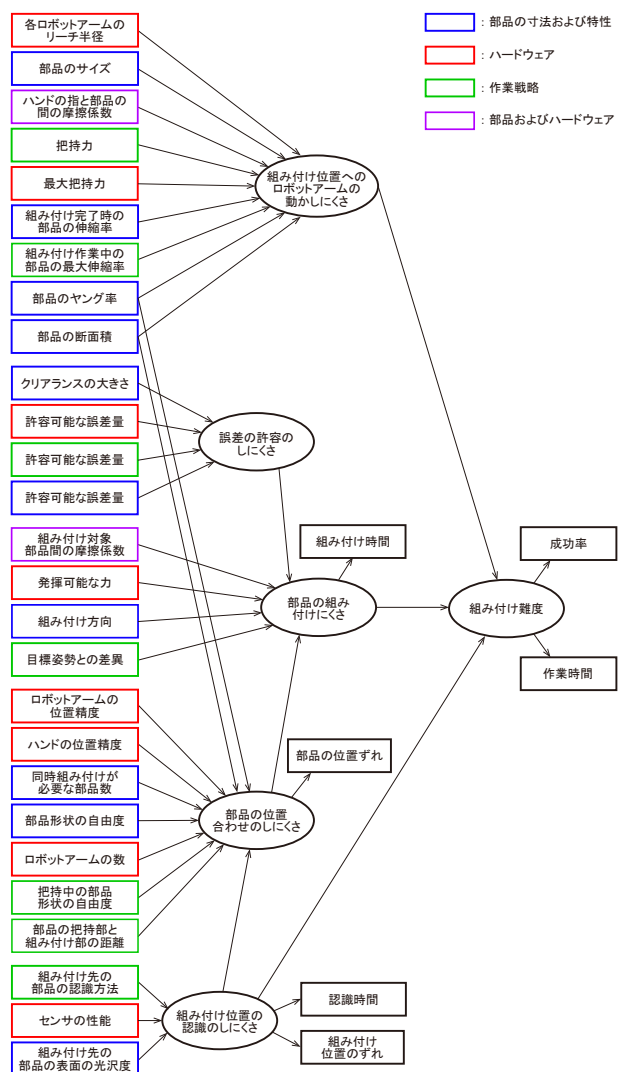


図7：難度要素の候補と組み付け難度との因果関係を表現したパス図

部品を含む複数の組立作業を実際のロボットシステムを用いて行った。ただし、実験装置の都合上、姿勢遷移を除く、把持と組み付けの二種類の作業工程のみを対象とするとともに、難度要素の候補についても検証可能なものに限定することとした。

続いて、上述の実験を通して収集したデータに基づき、把持難度と組み付け難度のそれぞれについて共分散構造分析を試みた。しかしながら、いずれの難度についても適切な分析結果を得ることができず、難度要素の候補と各種難度との因果関係を明らかにすることができなかった。使用するデータを一部除外したうえで改めて分析するなど、原因究明に向けた検証を行った結果、実施した実験内容が限定的であることもあり、収集したデータに偏りがあること、また、上記(3)で述べたパス図の作成時に仮定した因果関係に、適切でない部分が含まれる可能性があることが原因であるという結論に至った。

(4) 組立作業の動画に基づく作業時間分析手法の提案と例題を対象とした分析

組立作業のデータ収集のための作業時間分析手法の構築に向け、はじめに、ロボットによる組立作業における主たる要素作業が、個々の部品の把持／操作(部品の位置決め(姿勢遷移を含む)や組み付けなどを含む)、電動ドライバなどの工具の使用／交換、カメラなどの視覚センサによる部品の認識などであるとした。そのうえで、各作業が実行中であるか否かを、ロボットによる組立作業の記録動画から、分析者の主観に依らず、客観的に判断できるようにするため、ロボットの先端と対象部品の接触状態などに基づいた、各作業の定義を提案した。続いて、組立作業の動画に基づく作業時間分析手法として、ロボットによる組立作業の記録動画を1フレームごとに観察し、上述の各要素作業の定義に該当するフレームの数、すなわち、各要素作業が行われていると判断されるフレーム数を取得し、それを記録動画のフレームレートで除することで、各要素作業にかかる時間を算出する手法を提案した。

さらに、例題として WRS 2018 および WRS 2020 のそれぞれで実施されたタスクボード競技をとりあげ、各競技の参加チームの組立作業の記録動画に上述の手法を適用して実際に分析を行い、個々の部品に対する各作業の所要時間と、その成功率を明らかにした。図8、9は、分析対象とした WRS 2018 のタスクボード競技の記録動画の一部を例示したものである。

作業時間分析の結果、上述の(3)において難度要素の候補とした部品形状の対称性の高さや使用するロボットの台数が、作業時間の短縮に寄与していることが分かった。例えば、図8、9は異なる二つの参加チームが同一部品(ベアリングホルダ)の把持／操作を行っている様子を示しているが、図8のチームは1台のロボット(単腕)で組み付けに向けた部品の姿勢遷移を行っているのに対し、図9のチームは2台のロボット(双腕)での持ち替えによって部品の姿勢遷移を行っており、同部品の把持／操作にかかる時間は、後者のチームが前者のチームの半分未満であった。また、上述の(3)においては考慮していなかった工具の使用が作業の成功率の向上に影響していることも、分析結果から定量的に明らかとなった。

しかしながら、上述の(3)でも想定したように、組立作業の難度には非常に多くの難度要素が存在しているため、WRS のタスクボード競技を対象とした作業時間分析から収集したデータのみでは、難度要素の候補と組立作業の難度との因果関係を分析するのに十分とは言えない。本研究の目的を達成するためには、柔軟部品の組立作業を含む、ロボットによる実際の組立作業のさらなるデータ収集が重要かつ必須の課題である。

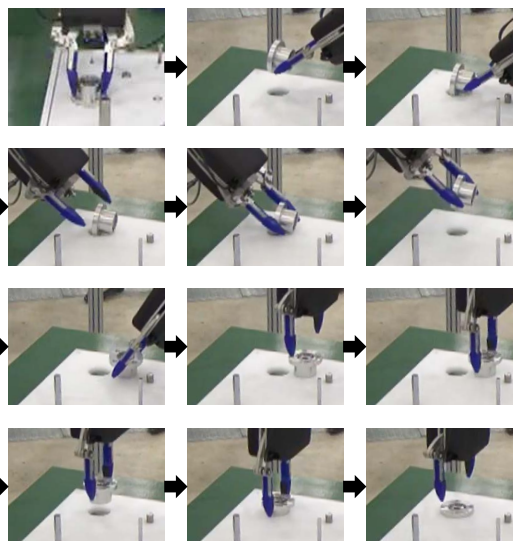


図8：単腕での姿勢遷移を経た部品の組み付け



図9：双腕での持ち替えによる部品の姿勢遷移

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 Dobashi Hiroki, Ogawa Koki, Shibata Mizuho, Uemura Wataru, Yokokohji Yasuyoshi	4. 巻 37
2. 論文標題 Analysis of the performance of robotic assembly systems considering the usage of tools or jigs for the task-board task in the WRS 2018	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Advanced Robotics	6. 最初と最後の頁 1329 ~ 1346
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1080/01691864.2023.2263064	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2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 村川涼、土橋宏規
2. 発表標題 ロボットによる組立作業における難度要素と難度との因果関係の検討
3. 学会等名 第40回日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 村川涼、土橋宏規
2. 発表標題 丸ベルトのプーリへの組付作業における難度要素の検討
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

〔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
研究協力者	村川 涼 (Murakawa Ryo)	和歌山大学・大学院システム工学研究科・学生 (14701)	

6. 研究組織（つづき）

	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
研究協力者	小河 航輝 (Ogawa Koki)	和歌山大学・大学院システム工学研究科・学生 (14701)	

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