

令和 4 年 6 月 14 日現在

機関番号：16301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04312

研究課題名（和文）建築物への直接吸着と走行移動が可能な新しいドローンの設計と制御方法

研究課題名（英文）Design and Control Algorithm of Novel Drone Capable of Adhering Directly to and Moving on Buildings

研究代表者

李 在勲（Lee, Jae Hoon）

愛媛大学・理工学研究科（工学系）・教授

研究者番号：00554411

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、飛行やホバリングだけでなく、建物の天井や壁面への吸着が可能な新しいドローンを提案した。プロペラガードを吸盤として活用する方法を提案し、最適な形状を導出した。また、負圧式吸着機構を用いて天井面および壁面への吸着動作が可能なドローンを製作し検証実験を行った。さらに、鉄鋼構造物への吸着のために吸着力のON・OFF切替が可能な磁気式車輪機構を設計した。最適設計を通して両車輪が駆動輪である磁気吸着車輪の試作機を製作し、ドローンに搭載して検証実験を行った。応用研究として、小型慣性センサを用いた人間の動作認識、可変剛性メカニズムのモデリングなどの研究を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ドローンにおいて建築物は衝突の対象であると同時に、場合によっては調査対象である。しかし、既存のドローンでは建築物への直接接触方法が不十分であったため安全飛行に対する障害物として認識された。本研究では、ドローンが直接建築物の天井面や壁面に接触や吸着できるようにする方法を提案した。この技術によってドローンの活用方法がさらに広げられ、飛行中の回避すべき障害物であった建築物について新しい対応が可能になる学術的意義を持つ。

従って、老朽化が早く進んでいる社会インフラや様々な工場現場などにおいて、直接接触し吸着した状態で点検作業を行うなどのような新しいドローンの活用が期待される。

研究成果の概要（英文）：In this research, a new drone which is capable of not only flying and hovering but also adhering to the ceiling and wall surfaces was proposed. A method to utilize a propeller guard as a suction plate was invented and its optimal shape was derived. Besides, a drone system installed with the designed suction plate was developed and examined through experimental works. Moreover, for adhering to iron frames, a magnetic wheel mechanism embedded with switching function of magnetic attraction force was designed. After optimization, a testing machine of magnetic wheel mechanism was manufactured. And it was tested with a drone system embedded with the magnetic wheel mechanism. As applications of essential technologies, research about human activity recognition utilizing small IMU sensor and variable stiffness mechanism was carried out.

研究分野：ロボット工学

キーワード：吸着ドローン 負圧式吸着機構 磁気吸着車輪

### 1. 研究開始当初の背景

ドローンは、速やかな飛行と安定したホバリングが可能であるため、様々な分野において調査および点検手段として注目されている。高いところからの撮影や被災地における調査、老朽化したインフラの点検作業などにドローンの応用範囲が広がりつつある。そのために、最近のドローンの分野では3次元地図作成と位置推定、障害物認識と衝突回避、自律飛行制御などのようなナビゲーションに関する研究が活発に行われている。

従って、現在のドローンにおいて環境側に存在する建築物は回避しなければならない障害物と見なされる。しかしながら同時にその建築物は調査の対象でもあるため、老朽建築物の打撃検査のように直接接触による調査活動が必要な場合が多く存在する。

それにもかかわらず、ドローンは「接触に弱い」ことや「壁面への吸着は困難である」という根本的な問題点が解決されてないため、固定物への接触や相互作用に関する研究は未だ進んでいない。寧ろ飛行動作のみに活動が制限され、外部のガードや衝突回避制御などが安全を保つための一般的な対策として採用されている。

従ってドローンをより効果的に活用するために、建築物に接近し安定した接触状態を維持する方法が必要である。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、壁面や構造物への直接吸着と走行機能を有する新しいドローンと制御方法を開発し、ドローンによる固定物との接触と相互作用の解決策を提案することである。既存の方法としては、切替が可能な円型吸盤や特殊な爪機構を用いる例があるが、適用可能な壁表面の状態に制限がある。また、ホバリング状態を維持しながら機体に搭載した機構やロボットアームで環境側の物体を操作する方法も提案されているが、作業中に安定した位置と姿勢の維持が困難であり、バッテリーの制約のために長時間の作業が難しい問題がある。一方で、壁面走行が可能なロボットも提案されているが、飛行機能が無いため高いところまでの速やかな移動と角部の乗り越えが困難な弱点がある。

そこで本研究では、一般的な建築物の様々な壁面と鉄鋼部への吸着と走行が可能な新しいドローンを提案する。

### 3. 研究の方法

建物の壁面や鉄鋼構造物への吸着と離脱が可能なドローンの開発のために、負圧式吸着機構と磁気式吸着機構の開発を行う。また、それぞれの吸着機構について試作機を製作して性能実験を行った後に、試作機を搭載したドローンを製作して吸着および離脱実験を通して検証を行う。さらに、関連技術について応用研究を実施する。

### 4. 研究成果

#### (1) 負圧式吸着機構の開発

負圧式吸着機構について、壁面吸着時に吸版の役割を果たすプロペラガードの分析実験を行った。壁面との距離とプロペラガードの形状による吸着力とエネルギー効率への影響を解明した。プロペラガードが壁面に接しているときに最大の吸着力が得られそのエネルギー効率が高く、離れるほど吸着力とエネルギー効率が減少する。また、プロペラガードの面積が大きかつプロペラとガードの間隔が小さいときに吸着力とエネルギー効率が增加する。図1に実験装置を、図2に吸着力およびエネルギー効率の実験結果を示す。



図1. 負圧式吸着機構の実験装置

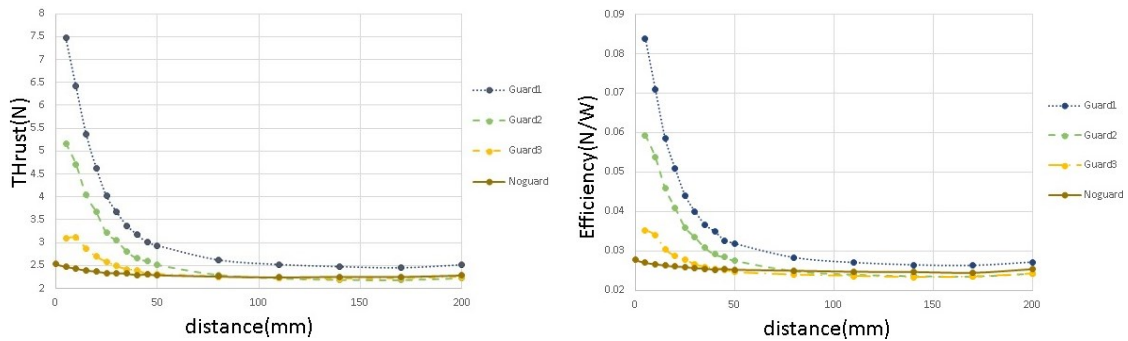


図2. 壁面との距離に対する吸着力 (左) とエネルギー効率 (右) の変化

(2) 負圧式吸着機構を用いたドローンの開発

天井面だけでなく壁面での吸着と移動が可能なドローンを開発した。上面全体をプロペラガードとして設計し天井面への吸着を可能にし、さらに側面には受動関節で連結した小型の吸着機構を搭載して壁面への吸着が出来るように設計した。壁面吸着の際は、先ず側面方向で吸着した後、機体を上昇させることで受動関節周りの回転で機体全体が壁面に吸着できる。その試作機を製作し、実験を通して天井面と壁面での吸着と移動が可能であることを確認した。図3に実験の様子を示す。

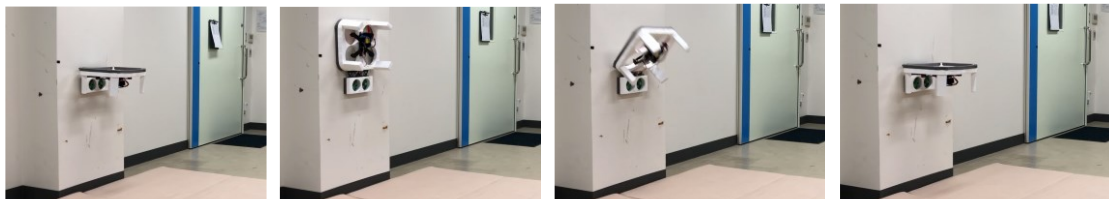


図3. 負圧式吸着機構を装着したドローンの壁面吸着および離脱実験の様子

(3) 磁気吸着機構の開発

鉄鋼構造物への吸着を実現する方法として、永久磁石を用いた磁気式吸着駆動輪の設計と製作を行った。飛行から鉄鋼部に吸着するだけでなく、吸着状態から再び離脱し飛行するために磁気吸着力のON/OFF切替機能が必要である。この機能を実現するために3つの設計案を提案した。先ず、複数の永久磁石を用いて円形のハルバッハ配列(Halbach array)に配置することで、磁気吸着力のON/OFF切替が可能な車輪を設計した。次は、2枚重ねた円形磁石を車輪の表面に複数個装着する設計案であり、重ねた磁石の一つを回転させることで磁気吸着力の切替を実現した。また、異なる極性を持つように2枚の車輪の間に2つの磁石を配置して、片方の磁石を回転させることで吸着力の切り替えを可能にした。

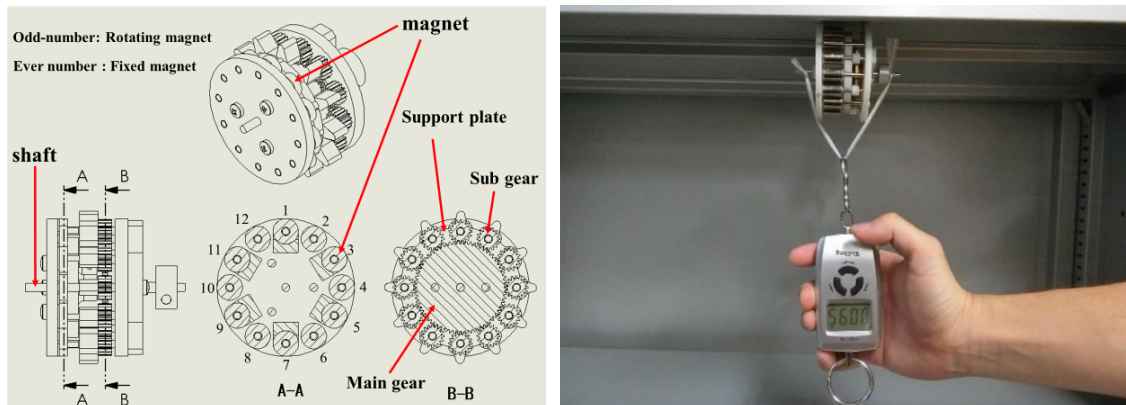


図4. ハルバッハ配列(Halbach array)に基づく磁気吸着車輪の設計 (左) と試作機を用いた吸着力実験の様子 (右)

設計案を基に計算機シミュレーションと試作機作成を行い、実験を通して解析と検証を行った。ハルバッハ配列(Halbach array)に基づく磁気吸着車輪の設計と製作した試作機を用いた吸着力実験の様子を図4に示す。この設計では磁石を回転させることで吸着力の強度の調整が可能であるが完全にゼロに減少させることはできないため、離脱時に鉄鋼物から離れることが困難であった。

次に、車輪の表面に複数個装着する設計案では、磁石2枚を重ねた各磁石部において内部の磁石を回転させることによって吸着力の切替が可能である。しかし、磁石と磁石の間の部分で吸着



したときに吸着力が減少する短所がある。

軟磁性材料の両車輪の間に2枚の磁石を配置した設計案では、両磁石が同じ極性であるときは車輪全体が磁石となって吸着力が発生する。また、片方の磁石を回転させて両磁石が互いに反対の極性を持つようにすると車輪内部に磁気回路が形成され、外部の鉄鋼物に対する吸着力がゼロに減少する。この設計案について磁気分析ソフトウェアであるFemtetを用いて計算機シミュレーションを行った。図5に示したシミュレーションの結果から、吸着力ONの時は車輪全体が磁石となって磁気回路が鉄鋼物まで形成され、吸着力OFFの時は車輪内部のみでの磁気回路となることが分かる。この設計案について最適化と軽量化を重ねて図6の試作機を製作した。試作機は両車輪駆動用モータと吸着力切り替え用モータを含めた全体の質量が240gであり、吸着力ONの時の平均吸着力が12.3kgf、OFF時の吸着力は0.2kgfである。

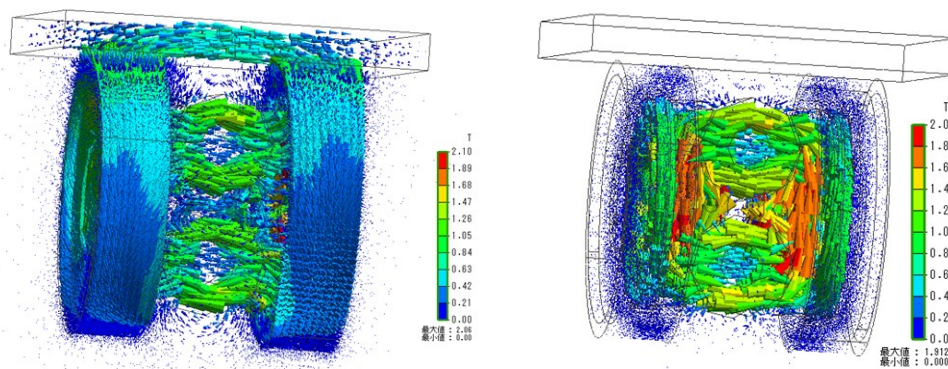


図5. Femtetを用いた磁界密度分布解析結果  
(左：両磁石が同じ極性で吸着力ONの場合、右：両磁石が互いに反対極性で吸着力OFFの場合)

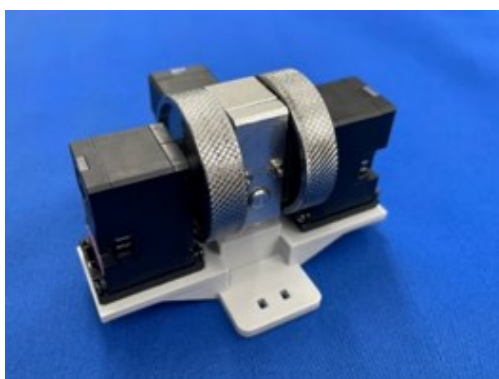


図6. 磁気吸着車輪の試作機

#### (4) 磁気吸着車輪を搭載したドローンの開発

軟磁性材料の両車輪の間に2枚の磁石を配置した設計案を基に製作した磁気吸着車輪を搭載したドローンを開発し、実験を通して天井の鉄鋼物への吸着と離脱が遠隔操作によって行えることが確認できた。その実験の様子を図7に示す。磁気吸着車輪の各車輪はそれぞれ別のサーボモータによって駆動され、吸着しながら前進後進と旋回移動を行うことが可能である。



図7. 磁気吸着車輪を搭載したドローンの試作機を用いた実験の様子

(5) その他応用研究

ドローンの姿勢を実時間で計測する小型慣性センサと人工知能を用いて人間の動作を認識する方法を開発した。身体の腰部に装着した単一慣性センサからの加速度および角速度データを用いて、歩行や跳躍、階段昇降、走行などの中でどのような動作を行うのか認識する方法を提案し検証実験を行った。また、筆記用具に装着した小型慣性センサと力センサからの計測データと人工知能を用いて筆記動作から書いた文字を認識するアルゴリズムを開発した。さらに、吸着時に衝撃を減少させる可変剛性メカニズムの応用として、可変剛性機構における非線形特性のモデルの導出とロボットアームへの応用研究を行った。

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 Alemayoh Tsige Tadesse, Lee Jae Hoon, Okamoto Shingo	4. 巻 21
2. 論文標題 New Sensor Data Structuring for Deeper Feature Extraction in Human Activity Recognition	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Sensors	6. 最初と最後の頁 2814 ~ 2814
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/s21082814	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 Ohe Tatsuya, Alemayoh Tsige Tadesse, Lee Jae Hoon, Okamoto Shingo	4. 巻 15
2. 論文標題 Feedforward operational stiffness modulation and external force estimation of planar robots equipped with variable stiffness actuators	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Intelligent Service Robotics	6. 最初と最後の頁 179 ~ 192
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s11370-022-00412-y	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15件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 9件）

1. 発表者名 Shota Kinoshita, Jae Hoon Lee, Shingo Okamoto
2. 発表標題 Design and Analysis of Lightweight Permanent Magnetic Wheels for Inspection Drone
3. 学会等名 International Conference on Consumer Electronics (IEEE ICCE) 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Masaaki Shintani, Jae Hoon Lee, Shingo Okamoto
2. 発表標題 Digital Pen for Handwritten Alphabet Recognition
3. 学会等名 International Conference on Consumer Electronics (IEEE ICCE) 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yohsuke Iguchi, Jae Hoon Lee, Shingo Okamoto
2. 発表標題 Enhancement of Fall Detection Algorithm Using Convolutional Autoencoder and Personalized Threshold
3. 学会等名 International Conference on Consumer Electronics (IEEE ICCE) 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shinya Kawabata, Jae Hoon Lee, Shingo Okamoto
2. 発表標題 Obstacle Avoidance Navigation Using Horizontal Movement for a Drone Flying in Indoor Environment
3. 学会等名 2019 International Conference on Control, Artificial Intelligence, Robotics & Optimization (ICCAIRO) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kodai Nohara, Jae Hoon Lee, Shingo Okamoto
2. 発表標題 Experimental Evaluation of Adhesion Plate and Development of Novel Drone Capable of Adhering to Ceiling and Wall
3. 学会等名 2019 International Conference on Control, Artificial Intelligence, Robotics & Optimization (ICCAIRO) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shota Kinoshita, Jae Hoon Lee, Shingo Okamoto
2. 発表標題 Research of Wheels Capable of Magnetic Adhesion for Mounting on a Drone During Inspections
3. 学会等名 The 24th International Symposium on Artificial Life and Robotics 2020 (AROB 2020) pp.555-559 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 河端 晋哉、李 在勲、岡本 伸吾
2. 発表標題 自己位置推定機能を搭載したドローンの 屋内環境における位置制御および障害物回避
3. 学会等名 第20回システムインテグレーション部門講演会 (SI2019) , pp.3038-3041
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 野原 広大、李 在勲、岡本 伸吾
2. 発表標題 吸着用ガードを装着したプロペラの吸着力の測定実験
3. 学会等名 第20回システムインテグレーション部門講演会 (SI2019) , pp.3064-3065
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 安倍 紀乃弥、李 在勲、岡本 伸吾
2. 発表標題 一組の二重反転プロペラを有するドローンの開発と制御実験
3. 学会等名 日本機械学会中四国支部学生会 第50回学生員卒業研究発表講演会, 10a2
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Tatsuya Ohe, Tsige Tadesse Alemayoh, Jae Hoon Lee, Shingo Okamoto
2. 発表標題 External Force Estimation of a Planar Robot with Variable Stiffness Actuators
3. 学会等名 International Conference on Ubiquitous Robots (UR) 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年



1. 発表者名 Yudai Mizuta, Yohsuke Iguchi, Jae Hoon Lee, Shingo Okamoto
2. 発表標題 System Architecture of an Autonomous Drone for Inspection Tasks in Indoor Environment
3. 学会等名 The 27th International Symposium on Artificial Life and Robotics 2022 (AROB 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takumi Watanabe, Yohsuke Iguchi, Jae Hoon Lee, Shingo Okamoto
2. 発表標題 Development of an Inspection Drone Capable of Driving on the Ground
3. 学会等名 The 27th International Symposium on Artificial Life and Robotics 2022 (AROB 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 渡部拓海、井口瑤介、李在勲、岡本伸吾
2. 発表標題 地上での走行が可能なドローンの開発
3. 学会等名 計測自動制御学会四国支部学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 水田裕大、井口瑤介、李在勲、岡本伸吾
2. 発表標題 屋内巡視点検用自律飛行ドローンのシステム構築
3. 学会等名 計測自動制御学会四国支部学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 三好翔太、李在勲、岡本伸吾
2. 発表標題 磁気吸着可能なドローンの開発と制御
3. 学会等名 日本機械学会中国四国学生会第52回卒業研究発表会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計3件

産業財産権の名称 支持脚装置	発明者 李在勲、木下翔太、 岡本伸吾	権利者 愛媛大学
産業財産権の種類、番号 特許、特願2021-036332	出願年 2021年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 学習システム、推論システム、学習方法、コンピュータプログラム、学習モデル、および 筆記具	発明者 李在勲、新谷将晃、 岡本伸吾	権利者 愛媛大学
産業財産権の種類、番号 特許、特願2021-029768	出願年 2021年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 関節角度学習推測システム、関節角度学習システム、関節角度推測装置、関節角度学習方 法、およびコンピュータプログラム	発明者 李在勲、アレマヨウ ツィゲ タデッセ、 岡本伸吾	権利者 愛媛大学
産業財産権の種類、番号 特許、特願2022-029326	出願年 2022年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔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	河端 晋哉  (Kawabata Shinya)	愛媛大学・大学院理工学研究科・大学院生  (16301)	
研究協力者	野原 広大  (Nohara Kodai)	愛媛大学・大学院理工学研究科・大学院生  (16301)	

## 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	木下 翔大  (Kinoshita Shota)	愛媛大学・大学院理工学研究科・大学院生  (16301)	
研究協力者	安倍 紀乃弥  (Abe Kinoya)	愛媛大学・工学部機械工学科・学部生  (16301)	
研究協力者	新谷 将晃  (Shintani Masaaki)	愛媛大学・大学院理工学研究科・大学院生  (16301)	
研究協力者	井口 瑤介  (Iguchi Yohsuke)	愛媛大学・大学院理工学研究科・大学院生  (16301)	
研究協力者	渡部 拓海  (Watanabe Takumi)	愛媛大学・工学部機械工学科・学部生  (16301)	
研究協力者	水田 裕大  (Mizuta Yudai)	愛媛大学・工学部機械工学科・学部生  (16301)	
研究協力者	三好 翔大  (Miyoshi Shota)	愛媛大学・工学部機械工学科・学部生  (16301)	
研究協力者	アレマヨウ ツィゲ タデッセ  (Alemayoh Tsige Tadesse)	愛媛大学・大学院理工学研究科・大学院生  (16301)	

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	大江 達也  (Ohe Tatsuya)	愛媛大学・大学院理工学研究科・大学院生    (16301)	

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