

令和 6 年 6 月 18 日現在

機関番号：21401

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H02321

研究課題名（和文）エネルギー自給型の自律走行ロボット群による超精密選択除草技術の開発

研究課題名（英文）Development of ultra-precision weeding technology using a system for unmanned-ground-vehicles driven by solar power

研究代表者

山本 聡史（Satoshi, Yamamoto）

秋田県立大学・生物資源科学部・准教授

研究者番号：20391526

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,500,000円

研究成果の概要（和文）：ソーラーパネルを搭載したエネルギー自給可能な自律走行ロボットにより、ダイズとソバの自動除草作業を行い、1haほ場を繰り返しくまなく走行できることを確認した。しかし、雑草の生育に間に合わず、適期の除草を行うための手法を確立するには至らなかった。そこで、バッテリー駆動のラジコン草刈機を改造してダイズほ場で自動除草作業を実施した。その結果、確実に除草ができる反面、ダイズの葉を巻き込み、損傷したことから、能率と精度を両立する除草機構が必要と考えられた。また、雑草の検出技術では、セマンティックセグメンテーションモデルを構築し、少ない画像データとラベルからセグメンテーション精度の改善を実現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ロボット農機の完全無人化について盛んに研究されているが、周囲の作業員や障害物を確実に検知する安全性確保が課題である。本研究では、軽量・低コストなエネルギー自給型の自律走行ロボットにより、安全性が確保された完全無人の除草体系の確立を目指した。除草の作業適期への対応が困難であったが、小型ロボットをほ場で運用するノウハウや、深層学習による雑草検出、ほ場の三次元再構築について成果を得ることができた。

研究成果の概要（英文）：We developed an autonomous robot equipped with solar panels to perform automated weeding of soybean and buckwheat, and it was confirmed that the robot could repeatedly move through a 1-hectare field. However, it was not possible to establish a method for timely weeding because the operating speed was not sufficient compared with the growth speed of weeds. Therefore, a battery-powered radio-controlled mower was modified to perform automatic weeding in a soybean field. As a result, while the weeding was reliable, the soybean leaves were entangled and damaged, suggesting the need for a weeding mechanism that is both efficient and accurate. For the weed detection technology, a semantic segmentation model was constructed to improve segmentation accuracy from a small amount of image data and labels.

研究分野：農業機械

キーワード：農業ロボット 自律走行 自動除草 三次元再構築

1. 研究開始当初の背景

スマート農業が注目を集める中、研究開始当初、ロボットトラクタの実証が各地で進められていた。ユーザは、自動化の効果を確認しつつも、「人の監視を必要としない完全無人作業が実行できればさらに大幅な省力化が可能ではないか？」との期待を膨らませていたが、ロボットトラクタの周囲の作業や障害物を確実に検知する安全性確保が大きなハードルになっていたため、オペレータが遠隔監視しながらロボットトラクタが無人状態で完全自律走行を行う「安全性確保レベル3の自動化(農林水産省, 2018)」は、研究段階であった。

一方、土地利用型の畑作業では、播種、除草、防除など、耕うん整地作業と比較して大きな動力を必要としない作業も少なくない。欧米の農業先進国では、作物と雑草を自動識別し、選択除草を行う自律走行型の畑地用ロボットが実用化されつつあった(保田ら, 秋田県立大学 web ジャーナル A, 2020)。これらの除草ロボットは、機体重量 200 kg~800 kg 程度とトラクタに比べて格段に軽量であり、電気を動力源とし、人が運転するためのキャビンはなく、ほ場内での完全無人作業を前提としていた。

こうした海外の情勢に注目しながら、2020年に150Wのソーラーパネルを搭載した機体重量約50kgの超軽量自律走行ロボットを試作した。約3万円のRTK-GNSS受信機を2台搭載して位置と方位を高精度に検出するなど、これまでにない低コストのロボットであった。2か月間、太陽光のみをエネルギー源として、ほ場での自律走行試験を実施した。朝9時から夕方17時まで走行した後、夜間は停止するという単純なタイマー設定により稼働した結果、晴天が続いた数日間、ソーラーパネルだけでエネルギーを自給しながら9時から17時までほ場を走行速度1km/h程度の低速で自動走行することを確認した。

このような自動化技術の展開を踏まえると、将来の農業シーンでは、耕うん、整地、心土破碎など大きな動力を要する作業は、無人トラクタと有人運転トラクタの協調作業により行い、それ以外の比較的所要動力の低い作業は、大きな事故や被害につながらない多数の小型・軽量・低コストのロボット群がほ場を動き回り、エネルギーを自給しながら完全無人作業を行うことにより、大幅な省力化・確実な安全性確保・二酸化炭素排出量の劇的な削減が実現すると予想された。

2. 研究の目的

本研究の目的は、申請者らが2020年に試作したエネルギー自給型の軽量自律走行ロボットをベースに軽量・低速・低コストロボット群により、超精密選択除草作業を完全無人で行うために必要な技術を明らかにすることである。具体的には、ソーラーパネルを搭載した完全無人のエネルギー自給型自律走行ロボット群による高精度な除草作業を行うため、最初に、自律走行ロボットによりほ場内を隈なく走行し、ほ場における生育初期の雑草の検出と位置を正確に求める。次に、雑草の位置に基づき、作業計画を作成し、ロボットによる選択除草を実施する。このように、検出と除去作業を分けて実施することにより、除草作業の高精度化を実現する。

3. 研究の方法

1) 自律走行ロボットの改良

高精度な自動除草作業を実施するため、作物の位置を正確に把握する必要がある。そこで、エネルギー自給型の自律走行ロボットに手押し方式の播種機(向井工業・HS-300LH)を取りつけ、秋田県立大学アグリイノベーション教育研究センター(AIC)の70m×130mの区画で3日間かけて条間0.84m、80列のダイズの自動播種作業を実施し、作業経路を記録した。その作業経路に基づき、条間を走行する除草作業用の経路を生成した。さらに、AICの小区画ほ場22m×36mにおいて、条間0.6m、29列のソバの自動播種作業を行い、同様に除草作業経路を生成した。

ロボットハンドによる選択除草にトライする前に、より簡易な除草手法を検討した。最初に固定されたティンレーキ(キューホー製)による除草を試みたが、ロボットの走行速度が0.3m/s未満であることを踏まえ、より大きなインパクトで雑草に作用する方式が適すると考えられた。そこで、ブラシローラを用いたホバークラフト方式の水田除草ロボット(保田ら, 2017)のブラシローラを用いた除草作業機を試作した(図1)。駆動モータは30Wで、ブラシローラは直径630mm、材料は線径1.6mmのグラスファイバをポリプロピレンで被覆した線径2.2mmのもので、水田ではイネを損傷せずに生育初期の雑草の根を浮かせる作用を実現していた。なおブラシローラはグラスファイバを固定した幅15mmのモジュールを積層したものであり、用途に応じてモジュールを取り外し、作業幅を調整できた。ブラ



図1 ブラシローラを搭載した様子

シは左右に2台設置し、各ブラシローラの作業幅は36cm、中央のスペースを10cmとして、全体の作業幅は、ダイズでは82cm、ソバで58cmであった。当初はタイミングベルトを用いたが、ブラシローラによる振動でベルトが浮き、モータが空回りしたことから、チェーンプロケットによる動力伝達に変更した。

2) 深層学習による雑草検出技術の研究

画像処理を用いた雑草検出では、RTK-GNSSを備えたドローンにより地上高1.5mでダイズの作物列を動画で撮影し、深層学習により雑草とダイズの判別を試みた。具体的には、2種類のGAN(Generative adversarial networks)から構成されるセマンティックセグメンテーションモデルを構築した。本モデルは、少ない画像データとラベルからセグメンテーション精度の改善を実現するものである。

作物データを拡張してセグメンテーションを行うための提案手法の全体構造を図2に示す。大局的に本手法は、2種類の敵対的生成ネットワーク(Generative Adversarial Networks: GAN)とセマンティックセグメンテーションのネットワークから構成される。ノイズを活用してデータ量を拡張するGANには、拡張性能、計算負荷の観点より、条件あり変換モデルとしてpix2pixHD、条件なし変換モデルとしてCUT(Contrastive learning for Unpaired image-to-image Translation)を用いた。pix2pixHDとCUTのネットワーク構造を図3に示す。両ネットワークとも、GANと同様、エンコーダとデコーダから構成される砂時計型の処理構造が取られており、空間情報の次元を圧縮しながら、チャンネル方向に特徴が表現される。

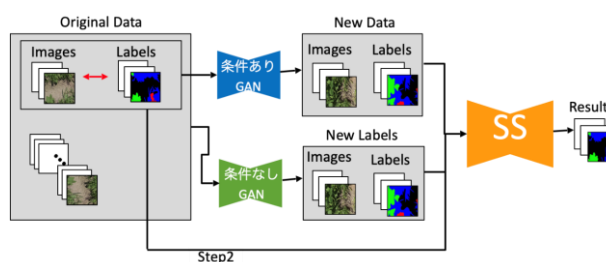


図2 GANとセマンティックセグメンテーションに基づく提案手法の全体構成

は、2種類の敵対的生成ネットワーク(Generative Adversarial Networks: GAN)とセマンティックセグメンテーションのネットワークから構成される。ノイズを活用してデータ量を拡張するGANには、拡張性能、計算負荷の観点より、条件あり変換モデルとしてpix2pixHD、条件なし変換モデルとしてCUT(Contrastive learning for Unpaired image-to-image Translation)を用いた。pix2pixHDとCUTのネットワーク構造を図3に示す。両ネットワークとも、GANと同様、エンコーダとデコーダから構成される砂時計型の処理構造が取られており、空間情報の次元を圧縮しながら、チャンネル方向に特徴が表現される。

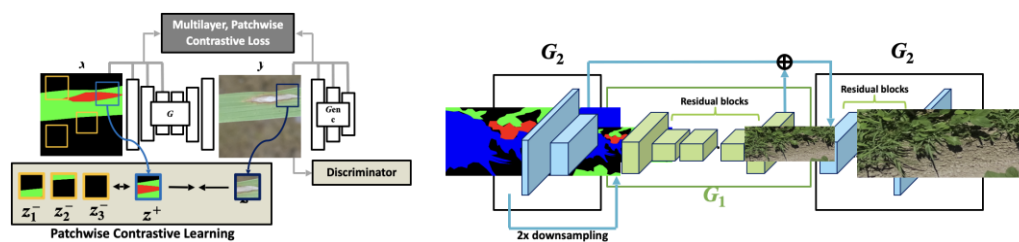


図3 pix3pixHD(左)とCUT(右)のネットワーク構成

大豆の葉と雑草から構成されるデータセットは、背景、大豆の葉、雑草1(イネ科)、雑草2(それ以外)の4カテゴリにアノテーションされている。また、使用する画像は動画から切り出しており、サンプリング周期を5秒とし、特徴分布の連続性による学習精度への影響に考慮している。学習する際には、入力画像として1枚の画像を6分割し使用している。合計300枚の画像データを用意し、学習、検証、テストにはそれぞれ、200枚、50枚、50枚と振り分けている。いもち病のデータセットは、背景、稲の葉、病変部位の3カテゴリでアノテーションされている。各画像は6240×4160pixelの高解像度で撮影された。学習する際には480×360pixelで分割し使用している。合計119枚の画像データを用意し、学習、検証、テストにはそれぞれ、70枚、20枚、29枚に振り分けている。

3) ほ場の三次元再構築手法の研究

ほ場の三次元モデル生成では、ドローン搭載型LiDAR(GreenValley International社LiAirV70)を用いて空撮した結果、一般的な空撮ドローンのフォトグラメトリよりも格段に高精度なほ場地形の三次元情報を得られることを確認した。このシステムを用いて、大規模区画の三次元情報を取得し、解析する手法を検討した。また、最新の三次元再構築手法であるNeRF:Neural Radiance Fieldsの適用について調査した。

4. 研究成果

1) 自律走行ロボットの改良

ダイズ播種作業では、RTK-GNSSのMoving base機能を使用し、高い直進性を実現できた(図4)。自動除草作業の結果、ブラシローラをアップカット方向に回転させることにより、ダイズの損傷を軽減しながら土壌の表層を攪拌できた。また、ブラシローラを畑地に適用する場合、作業機の高さ制御が重要であることがわかった。雑草の根を露出させ、ブラシでひっかけて駆除するため、土壌の表層1cmをブラシで掃く作用を考えていたが、走行時のロボットのピッチ運動により、ブラシが地面に届かない空転と、ブラシが地面に突き刺さって大きな抵抗になる過負荷直

前のモータ停止を繰り返した。7月上旬には雑草がある程度生長し、本格的な除草作業が可能になった。7月中旬にはブラシでの除草が難しい状況で、ブラシが地面に接触する前にモータの負荷が大きくなる場合があった。そこで、ブラシローラを駆動するモータの負荷が150%以上になると作業機を上げる方向に動かして負荷を軽減し、150%未満であれば作業機を下げる方向にピニオンラックを動かす制御を組み込んだ。その結果、ブラシローラの空転と停止を大幅に削減できたが、ブラシの抵抗が左右均一でない場合、ロボットの走行制御に影響を受け、蛇行運転するようになった。操舵ゲインを小さくすることで蛇行は収まったが、今度は地面の凹凸に速やかに反応できず、直進性が低下したように観察された。このロボットのソーラーパネルは定格出力150Wであるが、ブラシローラを用いた場合、晴天でも電力が不足し、作業開始時に400Whのバッテリーがフル充電でないで終日作業を行えない場合があったことから、作業負荷が少なく、除草効果が高い手法を検討する必要があると考えられた。

ソバの小区画ほ場では、1台のロボットで繰り返し除草した結果、雑草が大きく生長する前にブラシローラで除去できた。しかし、ブラシローラにより作物の損傷が生じ、イネには損傷を与えないブラシローラでも、ソバやダイズなど葉の形状が幅広い場合の適用性が課題であることを確認した。小区画ほ場での走行距離は19kmであったが、排水性が良くない場所でクローラがスタックするなど、走行性に関する改善点が明らかになった。

ブラシローラを搭載したロボットでは、150Wのソーラーパネルが唯一のエネルギー供給源であり、走行に定格出力50Wのモータ2台で計100Wを消費するため、重量約6.5kgの手押し播種機を動作させるのは問題ないものの、ある程度成長した雑草に対し、物理的な除草に必要なエネルギーの確保が難しいことを改めて確認した。そこで、市販の電動ラジコン草刈機(ササキコーポレーション社製・RS400-M2)を改良し、エネルギー自給型の自律走行ロボットと同じ航法技術を用いて、1haダイズほ場で自動草刈作業を実施した。ラジコン草刈機の機体幅845mmを踏まえて広めに播種した条間を速度0.3m/sで走行させた結果、2台のRTK-GNSSを用いたムービングベース方式の測位と方位検出が良好であれば発芽直後のダイズを損傷なく走行できたが、測位状況が良くないと蛇行して欠株が生じ、横幅が大きく生長したダイズの葉を巻き込む現象が散見された。さらに、雑草の生育が旺盛な6月は除草適期が非常にシビアであり、市販の草刈機を改造したロボットを用いても、生育初期の除草適期を逃すと雑草の生長を止められず、最終的に収穫が全く見込めない事態となることが判明した。草刈ロボットの台数を増やすことがもっとも効果的な対応策であるが、できるだけ少ない台数で広い面積をカバーするためには、ほ場全体のどの部分で雑草が発生しているかという情報を正確に把握する必要があると考えられた。

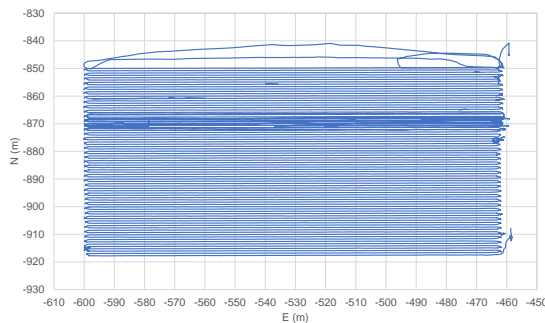


図4 ダイズ播種作業の軌跡

2) 深層学習による雑草検出技術の研究

ダイズ画像の各データセットにおけるpix2pixHDとCUTによるデータ拡張結果を図5に示す。各データセットに対し、pix2pixHDについては、いずれの画像群への変換も違和感の少ない結果が得られた。一方、CUTの結果については、Image2Label (I2L)の生成はできるものの、Label2Image

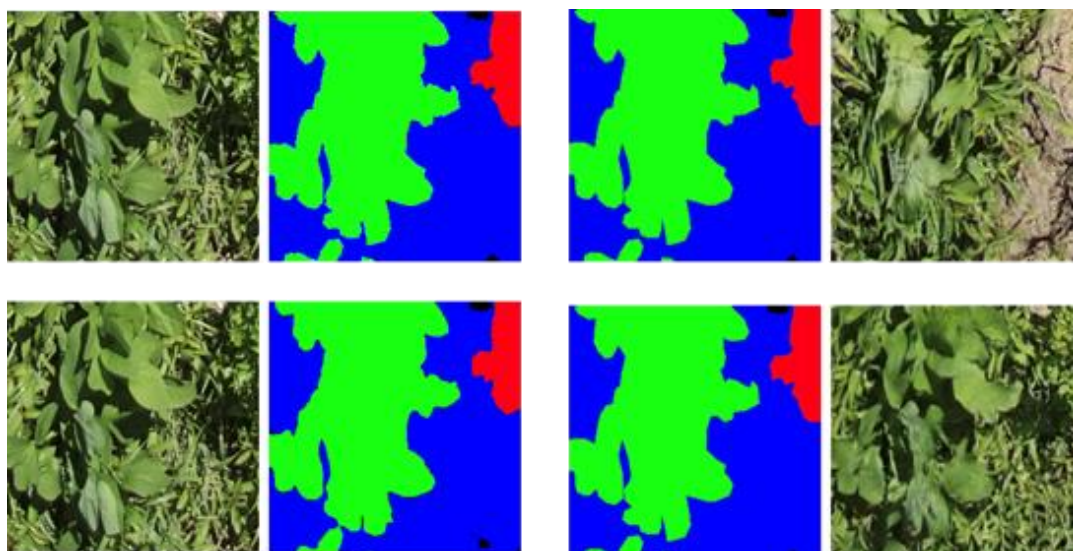


図5 ダイズ画像のデータ拡張結果 (左2枚: pix2pixHD、右2枚: CUT)

(L2I)にはカテゴリ間の不一致が多数発生した。L2I に対する FID の値と I2L に対する IoU の値を示す。I2L の変換に対し 0.23 と低い。これは、条件なし変換に基づくモデル構造が原因と考えられる。CUT は、L2I の変換後、新ラベルを生成し、旧ラベルと新ラベルのドメイン内における特徴ベクトルの距離を損失関数として学習している。すなわち、ラベルから画像の生成経過よりも、ラベルと新ラベルの類似度を重視して学習したと考えられる。

3) ほ場の三次元再構築手法の研究

ドローン搭載型 LiDAR センサとバックパック型 LiDAR センサによりほ場の詳細な三次元情報を取得し、カラーカメラの画像データを照合することにより、色情報を有するポイントクラウドを構築した。この三次元情報を用いてほ場の地面と植物を分離し、これまで開発したダイズと雑草を識別する深層学習による画像処理技術を適用することにより、高精度な雑草検出手法を確立する見込みが得られた。このドローン搭載型 LiDAR センサによりほ場の色付き三次元情報を取得し、ある程度大きくなった雑草は検出できるようになったものの、生育初期の雑草の検出は解像度が不足して依然として困難であった。これまでのエネルギー自給型自律走行ロボットの研究により、雑草の生育が旺盛な 6 月ではわずかな雑草発見の遅延が大きな収量減の原因となることがわかったので、マルチスペクトルドローンと LiDAR 搭載ドローンの併用など、できるだけ効率的に大規模ほ場を隈なくスキャン可能な手法の必要性を再確認した。

一方、深層学習を用いた三次元再構築アルゴリズム NeRF により、LiDAR では検出できない植物の細い茎や薄い葉が、これまでとは格段に向上したレベルで再現できた (図 6)。



図 6 NeRF による三次元再構築

この NeRF による三次元再構築は、高性能なグラフィックボードを搭載した PC 上で NeRF Studio を用いて生成したが、約 2 時間を要した。一方、スマートフォンのアプリを用いて 5 分程度で簡易に同等以上の三次元モデルを再構築できるようになっている (図 7)。

今後、こうした加速度的なデジタル技術の進歩を把握しながら、より正確で簡易なほ場の三次元再構築手法について検討を進める。

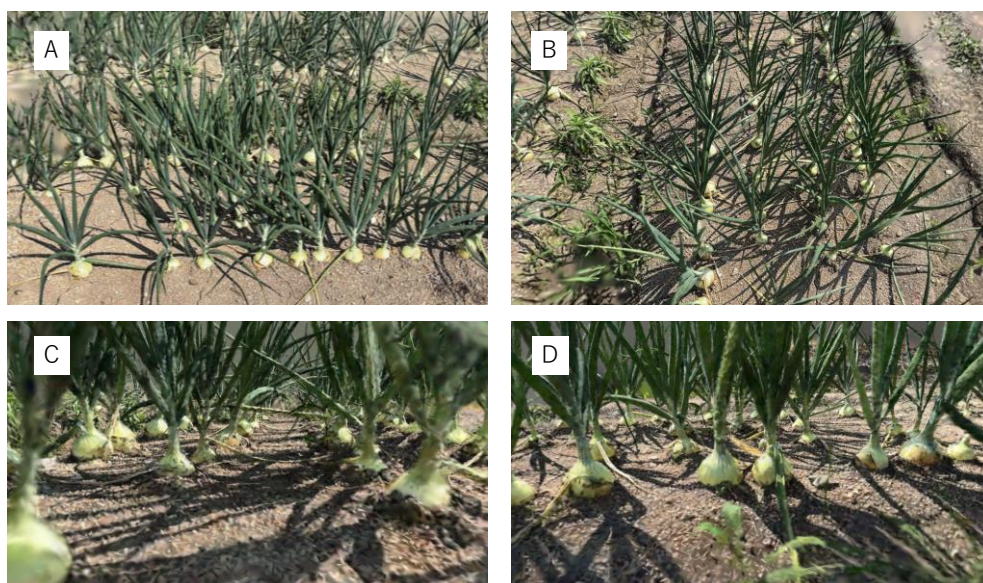


図 7 iPhone のアプリ Scaniverse により撮影・生成したタマネギほ場の 3D モデル
A: 正面俯瞰画像、B: 側面俯瞰画像、C: 条方向近接画像、D: 列方向近接画像

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 山本聡史, 西村洋, 保田謙太郎, Alin Khaliduzzaman
2. 発表標題 ラズベリーパイを用いた低コスト農業ロボットの試作（第1報） - 低コストRTK-GNSS受信機と組み合わせた自律走行制御 -
3. 学会等名 農業食料工学会東北支部大会
4. 発表年 2022年～2023年

1. 発表者名 山本聡史・佐々木一樹・西村洋・保田謙太郎
2. 発表標題 エネルギー自給型の超軽量除草ロボットに関する研究（第2報）
3. 学会等名 農業食料工学会東北支部大会（オンライン）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐々木一樹・山本聡史・西村洋・保田謙太郎
2. 発表標題 エネルギー自給型無人走行ロボットによる播種作業と除草作業の完全無人化に関する研究
3. 学会等名 農業食料工学会東北支部大会（オンライン）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 K. Takahashi, H. Madokoro, S. Yamamoto, Y. Nishimura, S. Nix
2. 発表標題 Domain Adaptation for Agricultural Image Recognition and Segmentation Using Category Maps
3. 学会等名 17th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS), Hybrid (Jeju, Korea) (国際学会)
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 分担者	保田 謙太郎 (Yasuda Kentaro) (00549032)	秋田県立大学・アグリイノベーション教育研究センター・准教授 (21401)	
研究 分担者	間所 洋和 (Madokoro Hirokazu) (10373218)	岩手県立大学・ソフトウェア情報学部・教授 (21201)	
研究 分担者	西村 洋 (Nishimura Yo) (70391513)	秋田県立大学・アグリイノベーション教育研究センター・特任教授 (21401)	

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
---------	---------