

令和 6 年 6 月 12 日現在

機関番号：33111

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2020～2023

課題番号：20H00572

研究課題名(和文)対人運動技能の制御・学習則の解明

研究課題名(英文)Control and learning principle for interpersonal motor skill

研究代表者

山本 裕二 (Yamamoto, Yuji)

新潟医療福祉大学・心理・福祉学部・教授

研究者番号：30191456

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 34,900,000円

研究成果の概要(和文)：対人運動技能について、社交ダンス、野球型対人競技、ネット型対人競技を対象に行動実験と数理モデルによるシミュレーション、ロボットへの実装等異分野融合のアプローチで検討した。社交ダンスのような対人協調が必要とされる場合には、二者の上手な協調によって単独で行うよりも大きな動きが可能となることが明らかになった。また、対人競争の場合には、他者に自らの行動を予測させることによって、結果的に他者の予測を裏切ることが可能となる戦略を用いていることが明らかになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来個人の運動技能の制御・学習則にのみ焦点が当てられてきたところを、対人運動技能に拡張したことに大きな学術的意義がある。その理論的背景として、力学系理論があり、環境ではなく、他者との相互作用に着目したことに意義がある。また、このことによって、従来経験則でしかなかった対人運動技能の学習や指導にもつながらる知見が得られたことが社会的意義として大きい。

研究成果の概要(英文)：Interpersonal motor skills were investigated in ballroom dancing, baseball-type interpersonal competitions and net-type interpersonal competitions by means of behavioural experiments, simulations using mathematical models and implementation in robots, using an interdisciplinary approach. In cases where interpersonal co-ordination is required, such as ballroom dancing, it was found that the successful co-ordination of two players enables greater movements than would be possible by a single player. In the case of interpersonal competition, it was found that the participants used a strategy in which they allowed others to predict their own behaviour, which in turn enabled them to betray the predictions of others.

研究分野：スポーツ心理学

キーワード：対人・集団ダイナミクス 駆け引き 切磋琢磨 対人運動技能

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

本研究では、これまで個人の運動技能の制御・学習についてのみ研究が行われ、未知であった対人運動技能の制御・学習を明らかにすることを目的としていた。そして、研究計画の段階では、対人運動技能として競技ダンスに着目し、二者連携の制御則と学習則を、熟達者面接、熟達者・初心者比較実験から数理モデルを立て、ロボットに実装することを目指した。しかしながら、2020年の2月以降の新型コロナウイルス感染症の拡大によって、人を対象とした面接や実験は大きな制約を受け、研究開始から3年近くは競技ダンスの行動実験を行うことはできなかった。そこで、これまでに収集した野球型、ネット型対人運動技能に関するデータの再分析等を行い、研究計画とは異なるアプローチを採用せざるを得なかった。

2. 研究の目的

これまで未知であった眼前の他者との連携や駆け引きでは何かどのように制御されているのか、また切磋琢磨によってお互いが成長し続ける仕組みは何かという、対人運動技能の制御則と学習則を、スポーツ科学・数理科学・ロボティクスの異分野が融合して解明する。特に、二者が物理的につながり連携しつつ、複数ペアが一つのフロアで駆け引きを行う競技ダンスを中心に採り上げ、対人運動技能の制御・学習則をスポーツ科学・数理科学・ロボティクスの異分野融合により解明する。具体的には、調査と行動実験から熟達者の対人運動技能の制御と学習過程に規則性を見つけ、数理モデルを構築して制御・学習の本質を理解し、ロボットに実装してその妥当性を検証する。これは、スポーツの指導現場に対人運動技能を系統的に鍛える理論的根拠を提供し、さらにはヒトと切磋琢磨して成長するロボットの開発、教育現場や高齢社会における人々の社会性向上にも資するものである。

3. 研究の方法

研究対象とした課題は、大きく分けて5種類で、二者の協調課題として競技ダンス、二者の競合課題として、野球型、ネット型、格闘技型、集団型対人競技を対象とした。また、格闘技型対人競技を模した衝突ゲーム課題を考案した。

1) 競技ダンスに関しては、当初、熟達者・初心者の比較行動実験を予定していたが、コロナ禍で研究開始から3年目までは行動実験は行えず、数理モデルの開発とロボットへの実装、シミュレーション実験のみを行わざるを得なかった。2) 野球型対人競技に関しては、コロナ禍前に行っていた実験結果の再分析を行い、二者の関係が非対称の場合の対人技能の特徴を分析した。3) ネット型対人競技では、打球コースの規則性とコート上の動きを、結合混合ダイナミクスの観点から分析した。4) 格闘技型対人競技では、剣道において、フェイントを入れて打突する場合とフェイントがない場合の打突動作を、課題開志の二者間距離を変えて検討した。5) 集団型対人競技では、自転車競技のポイントレース中の集団が分離と結合を繰り返す動態を検討した。6) 衝突ゲーム課題を用いて、同じ相手と対戦を繰り返していく中で、どのように方略が変化するかを実験的に検討するとともに、強化学習の一種であるQ学習でシミュレーションを行い学習則を検討した。

4. 研究成果

1) 競技ダンス

まず、図 1 に示すような両腕を持ち、車輪で移動するロボットをプラットフォームとして、2 体を連結して、方向調整制御とリズム調整制御を組み入れた数理モデルを開発した (Fukuhara, Kano, Yamamoto, Kobayashi, & Ishiguro, 2021).

左右の方向制御 \bar{x}_i は以下のように定義した.

$$\bar{x}_i = V \cos \psi_i (1 + \sin \phi_i), \quad (1)$$

ここで V は周期的な速度の大きさ、 ψ_i は動きの方向を決める位相振動子、 ϕ_i は速度を決める位相振動子を表す.

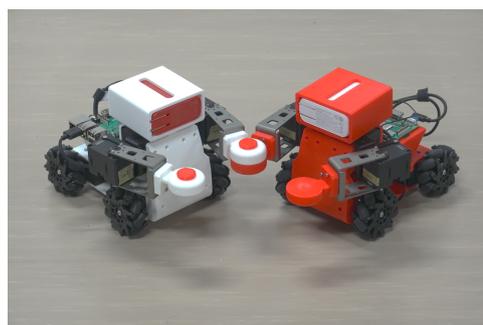


図 1 ダンスロボット (WalzBots)

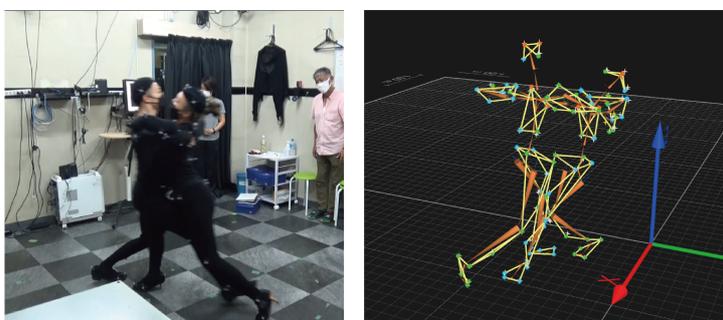


図 2 プロダンサーのナチュラルターンの動作計測

図 2 は、プロのダンサーにナチュラルターンを踊っていただき、その様子をモーションキャプチャーカメラで計測した際のものである。計測の結果、単独でナチュラルターンを行うよりは、二者で行った方が、ステップ幅が伸長することが明らかになった。

そこで、図 3 に示すような、二者をつなぐ力を仮定し、お互いに引き合うことによって、より後傾姿勢をとることのできるモデルを作るとともに、リード→フォロ→リフォロという二者の連携パターンも考慮することで、より滑らかで大きなステップ幅を安定して繰り返すことができることがシミュレーションより明らかになった (Fukuhara, Akimoto, Kano, Kobayashi, Yamamoto, Kijima, Yokoyama, & Ishiguro, 2023).

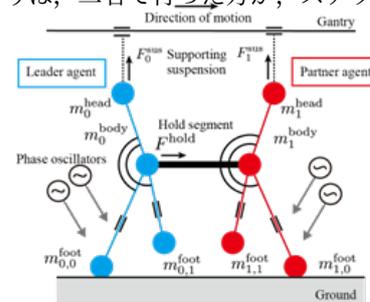


図 3 寄り添う二者のダンスモデル

2) 野球型対人競技

野球型対人競技では、ソフトボールの投手の投球動作速度だけを変更し、ボール速度は一定にした刺激映像を作成し、その映像を見て投球速度の知覚、判断、実際の打撃動作を行ってもらったところ、投球動作速度が速いとボールの速度が速いと知覚し、動作もそれに合わせて早くに始動していることが明らかになった (Takamido, Yokoyama, & Yamamoto, 2021).

また、投球されたボールが早いと判断した場合には、投手の投球動作に合わせて、打者の準備動作の開始が早くなり、遅いと判断した場合には、準備動作の開始が遅くなるとともに、インパクトのタイミングも遅れることが明らかになった (Takamido, Yokoyama, & Yamamoto, 2022).

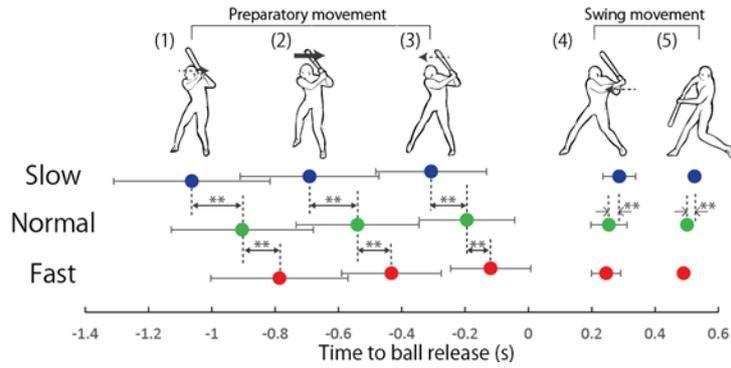


図4 投手の投球速度を変更した実験結果

3) ネット型対人競技

ネット型対人競技では、ソフトテニスのシングルの試合における打球コースとコート上の動きを解析し、打球コースには規則性があり、その規則性に応じてコート上の動きに履歴現象がみられることが明らかになった(図5)。

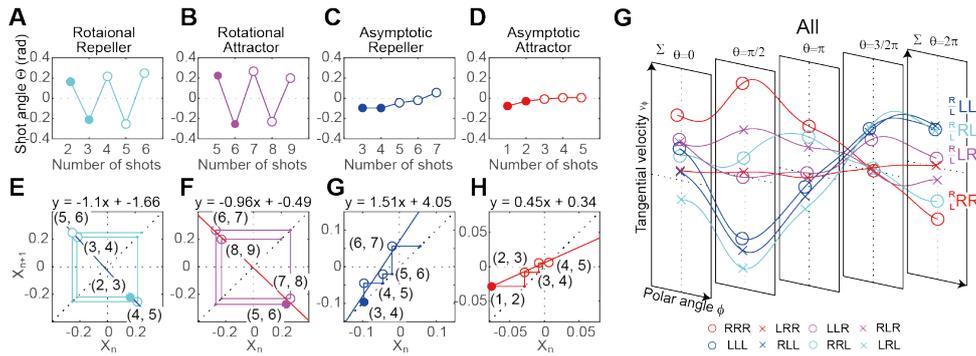


図5 打球コースの規則性とそれに応じた動きに残る履歴現象

さらにその打球コースの規則性は、熟練者ほど左右交互に近く、中級者はよりランダムに近いことがシミュレーションから明らかになった(図6)。

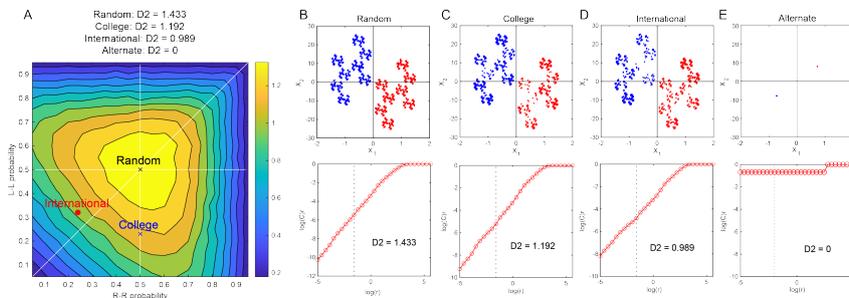


図6 熟練者・中級者の打球コースの規則性の違い

4) 格闘技型対人競技

剣道において、フェイント（偽装）動作を入れて打突に行く場合と、フェイント動作を入れずに打突に行く場合の剣先の動きを比較検討した結果、フェイントを入れた場合には、課題開始時の二者間距離に応じて、フェイント（偽装）動作の中で相手との距離を詰めて打突に入っていることが明らかになった。つまり、フェイント動作は単なる偽装だけのために行っているのではなく、偽装をしながら二者間距離を詰めて、打突の成功性を高めているといえる。また、フェイント動作を入れない場合でも、二者間距離に応じて、相手方向へ詰める動き、いわゆる隠蔽動作を行っていた。さらに、打突にかかる運動時間を計測したところ、フェイント動作を入れた方が、フェイントを入れない場合よりも打突にかかる時間が短くなっていた。これらのことから、フェイント動作を入れる入れないにかかわらず、二者間距離に応じて相手との距離を詰める隠蔽動作は行われており、フェイント動作を入れた場合にはさらにその偽装動作の中で相手との距離を詰めることで、打突の運動時間も短くして成功率を高めているといえる（奥村・木島・山本，2022）。

5) 集団型対人競技

集団型対人競技として、自転車競技のポイントレースにおける集団の形成動態について分析した。ポイントレースは決められた周回でポイントを競うルールなので、その周回の前後で集団の分離や再結合が観察できる。そして、集団の数と主集団の密度から4つの状態を定義できることを明らかにした（Okumura, Yokoyama, & Yamamoto, 2022）。

さらに、集団が分離する場合と再結合する場合では、先頭選手の数とその後続の主集団の速度との速度差によって、履歴現象がみられることが明らかになった（Okumura, Yokoyama, & Yamamoto, 2023）。つまり、自転車競技における集団動態は自己組織的であるといえる。

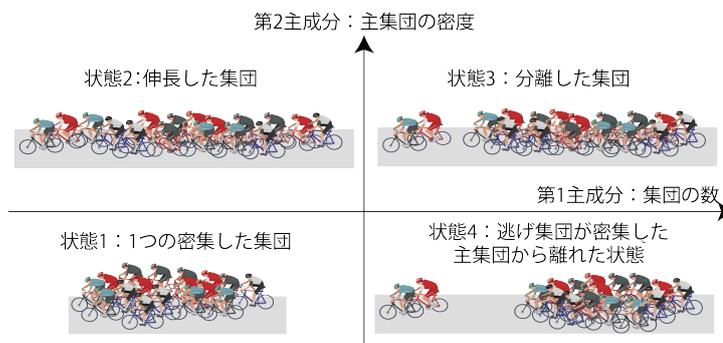


図7 ポイントレースにおける集団の分類

6) 衝突ゲーム課題

対人運動技能の学習則を探るために、対戦を繰り返し、さまざまな方略が出てくるであろう手押し相撲のようなゲーム課題を開発した。この課題は、ジョイスティックを用いて、呈示された自分の円を操作し、相手の円を押し出す、あるいは相手の円の動きをかわして、相手を土俵に見立てた大きな円の外に出すという課題である。操作する円は慣性を持たせているために、すぐに移動方向が切り替わらない。つまり、入力ベクトルと出力である速度ベクトルには遅延が生じるように設計されている。この課題を用いて、同じ対戦相手と50試合を行い、戦略の変化を検討した。さらに、学習則を検討するために、勝った側は同じ戦略をとり、負けた側はそれを破る戦略を探すという作業仮説に基づき、機械学習の一種であるQ関数の更新を組み込んだ学習モデルを考案した。そして、二者ともにこの同じ学習則で学習をさせたところ、勝敗は拮抗していたが、その後片方だけが学習を継続するようにすると、学習を継続した側の勝率が8割程度の一定値に収束していった（山地・福原・小林・木島・山本・石黒・加納，2024）。

今後さらに、実際の行動実験を継続し、学習則の再検討を行うことが課題である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Takamido Ryota, Yokoyama Keiko, Nakamoto Hiroki, Ota Jun, Yamamoto Yuji	4. 巻 18
2. 論文標題 Interpersonal coordination analysis in bat-and-ball sports under a real game situation: Asymmetric interaction and delayed coupling	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 PLOS ONE	6. 最初と最後の頁 e0290855
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1371/journal.pone.0290855	査読の有無 無
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 Okumura Fumihiko, Yokoyama Keiko, Yamamoto Yuji	4. 巻 13
2. 論文標題 Descriptive Parameters and Its Hysteresis of the Group Separation and Recombination in Bicycle Points Races: Leader's Velocity and Speed Difference between Leader and Main Group	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Applied Sciences	6. 最初と最後の頁 1315 ~ 1315
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/app13031315	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 Okumura Fumihiko, Yokoyama Keiko, Yamamoto Yuji	4. 巻 22
2. 論文標題 State transitions among groups of cyclists in cycling points races	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 European Journal of Sport Science	6. 最初と最後の頁 790 ~ 798
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/17461391.2021.1905077	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 Takamido Ryota, Yokoyama Keiko, Yamamoto Yuji	4. 巻 81
2. 論文標題 Hitting movement patterns organized by different pitching movement speeds as advanced kinematic information	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Human Movement Science	6. 最初と最後の頁 102908 ~ 102908
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.humov.2021.102908	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 Takamido Ryota, Yokoyama Keiko, Yamamoto Yuji	4. 巻 92
2. 論文標題 Effect of Manipulating Advanced Kinematic Information on Hitting Movement Prediction, Perception, and Action	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Research Quarterly for Exercise and Sport	6. 最初と最後の頁 747 ~ 759
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/02701367.2020.1773375	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 -

〔学会発表〕 計14件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 山本裕二
2. 発表標題 個人運動スキルから対人運動スキルへ 複雑さに潜む規則性を求めて
3. 学会等名 日本体育・スポーツ健康学会第73回大会 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 山地聡史・福原洸・小林亮・木島章文・山本裕二・石黒章夫・加納剛史
2. 発表標題 Bumper ballから探る対人運動技能の学習則
3. 学会等名 第36回自律分散システム・シンポジウム
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Yuji Yamamoto, Keiko Yokoyama, Motoki Okumura, Akifumi Kijima, & Kazutoshi Gohara
2. 発表標題 How control unpredictable others in court-net sports
3. 学会等名 International Workshop on Team and Multiagent Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Akira Fukuhara, Rinta Akimoto, Kano Takeshi, Ryo Kobayashi, Yuji Yamamoto, Akifumi Kijima, Keiko Yokoyama, and Akio Ishiguro
2. 発表標題 Interpersonal coordination mechanism via assistive hold in ballroom dancing
3. 学会等名 Society of Instrument and Control Engineers (SICE) 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 奥村基生・木島章文・山本裕二
2. 発表標題 剣道の打撃においてフェイント動作はなぜ有効なのか
3. 学会等名 日本体育・スポーツ健康学会第72回大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山本裕二・横山慶子・奥村基生, 木島章文
2. 発表標題 ネット型競技における切替混合ダイナミクス
3. 学会等名 日本体育・スポーツ健康学会第72回大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山本裕二・横山慶子・奥村基生, 木島章文・郷原一寿
2. 発表標題 ネット型スポーツにおける対人運動技能 - 規則性と不規則性のはざま -
3. 学会等名 日本スポーツ心理学会第49回大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 秋元凜太・福原洸・加納剛史・横山慶子・木島章文・小林亮・山本裕二・石黒章夫
2. 発表標題 社交ダンスにおける対人協調制御メカニズムの理解に向けた一考察
3. 学会等名 第35回自律分散システム・シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 秋元凜太・福原洸・加納剛史・小林亮・山本裕二・石黒章夫
2. 発表標題 社交ダンスにおけるリーダー・フォロワー間協調制御メカニズムの理解に向けた一考察
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yuji Yamamoto, Keiko Yokoyama, Motoki Okumura, Akifumi Kijima, Kazutoshi Gohara
2. 発表標題 Two-coupled Switching Hybrid Dynamics in Court-Net Sports
3. 学会等名 9th Asian South Pacific Association of Sports Psychology International Congress 202 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Motoki Okumura, Akifumi Kijima, Yuji Yamamoto
2. 発表標題 Experienced Players and Novices in Kendo Can Discriminate a Good Preparatory Posture from Worse Ones
3. 学会等名 9th Asian South Pacific Association of Sports Psychology International Congress 2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 福原洸・加納剛史・小林亮・山本裕二・石黒章夫
2. 発表標題 ロボットよ，ワルツを踊れ：社交ダンスに学ぶロボット間リズム協調制御メカニズム
3. 学会等名 第33回自律分散システム・シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Akira Fukuhara, Takeshi Kano, Ryo Kobayashi, Yuji Yamamoto, and Akio Ishiguro
2. 発表標題 Robots Dancing Waltz: Toward understanding inter-person coordination mechanism underlying ballroom dance
3. 学会等名 The 9.5th international symposium on Adaptive Motion of Animals and MachinesVirtual (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山本裕二・横山慶子・奥村基生・木島章文
2. 発表標題 対人運動技能としてのテニスの返球角度系列に潜む規則性
3. 学会等名 日本体育・スポーツ健康学会第71回大会
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	木島 章文 (Kijima Akifumi) (10389083)	山梨大学・大学院総合研究部・教授 (13501)	

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
研究分担者	福原 洸 (Fukuhara Akira) (10827611)	東北大学・電気通信研究所・助教 (11301)	
研究分担者	横山 慶子 (Yokoyama Keiko) (30722102)	名古屋大学・総合保健体育科学センター・准教授 (13901)	
研究分担者	島 弘幸 (Shima Hiroyuki) (40312392)	山梨大学・大学院総合研究部・教授 (13501)	
研究分担者	小林 亮 (Kobayashi Ryo) (60153657)	広島大学・統合生命科学研究科(理)・名誉教授 (15401)	
研究分担者	加納 剛史 (Kano Takeshi) (80513069)	東北大学・電気通信研究所・准教授 (11301)	
研究分担者	石黒 章夫 (Ishiguro Akio) (90232280)	東北大学・電気通信研究所・教授 (11301)	
研究分担者	奥村 基生 (Okumura Motoki) (90400663)	東京学芸大学・教育学部・准教授 (12604)	

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