

令和 2 年 6 月 30 日現在

機関番号：10101

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H04683

研究課題名（和文）運動学習に対する安静時脳活動の影響とニューロフィードバックによる促進

研究課題名（英文）Influence of resting state brain activity and neurofeedback on motor learning

研究代表者

小川 健二 (Ogawa, Kenji)

北海道大学・文学研究院・准教授

研究者番号：50586021

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 15,500,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、安静時脳活動が運動学習に果たす役割を機能的核磁気共鳴画像法（fMRI）で検討した。運動学習課題としてMRI内で視覚追従運動を用いた。まず、感覚運動野の脳活動パターンから運動学習試行とコントロール試行との識別を行い、次にその識別器を学習前後の安静時脳活動パターンに対して適用した。その結果、学習後の安静時において運動学習時と同じ脳活動パターンが再現されることが明らかとなった。次に安静時脳活動を計測し、ニューロフィードバックとして学習時の脳活動との類似度を、被験者に視覚的にリアルタイムに提示した。その結果、ニューロフィードバックにより運動時と類似した活動に誘導可能である点が示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

運動学習において、学習後に休憩期間を置くことが運動成績の向上や運動記憶の固定化を助ける現象が多く、行動実験から示されてきたが、休息中の安静時脳活動が学習に及ぼす影響は不明であった。本研究から、学習後の安静時においては運動学習時と同じ脳活動パターンが再現されていることを明らかにし、従来は主に個別に研究されてきた安静時脳活動と運動学習との関連性を示したことで、オフライン学習の神経基盤を明らかにすることに繋がった。また、ニューロフィードバックを用いて学習時と同じ脳活動パターンを誘導できる可能性を示した点は、運動学習のみならず効果的な学習システムの構築への発展も期待できる。

研究成果の概要（英文）：This study aimed to investigate the relationship between the resting-state brain activity and motor learning using fMRI. The visuomotor tracking was used in the MRI scanner as a motor learning task. We first trained the classifier to discriminate between motor learning trials versus control trials using the activation patterns within the primary sensorimotor cortex, then applied the trained classifier to the resting-state activity before/after the motor learning sessions. The result showed a significant increase in the number of volumes classified as the task in the post-learning rest-period compared with those for the pre-learning period. Our finding revealed the reactivation of task-related patterns in the primary sensorimotor cortex for visuomotor learning. In addition, we provided the similarity of activities with the motor learning period as a neurofeedback score and found an increase in similarity during the neurofeedback period.

研究分野：認知神経科学

キーワード：認知神経科学 感覚運動制御 脳機能イメージング

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

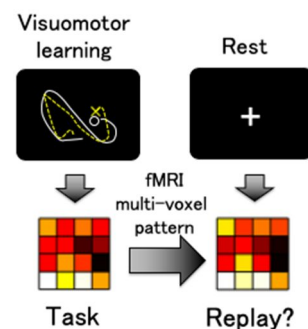
1. 研究開始当初の背景

ヒトは学習によって柔軟に多様な運動スキルを獲得することができる。運動学習において、学習時のみならず学習後の睡眠あるいは休憩(覚醒時の安静)が、運動成績の向上や記憶の固定化に役立つ点が示唆されている(e.g, Shadmehr & Brashers-Krug, 1997)。例えば、新しい運動を学習した直後に比べて一定の休憩期間を置いた後で成績が有意に上昇することや、新たな運動スキルからの干渉を受けにくくなることが示されている。このような現象はオフライン学習と呼ばれ、多くの行動実験から示唆されている普遍的な現象である(e.g, Robertson et al., 2004)。しかし、安静時における脳活動がどのように運動記憶の形成に対して正の影響を及ぼすかについての脳内機序は不明である。

一方で近年、安静時脳活動ネットワーク(Resting State Network: RSN)が着目されており、従来はノイズだと考えられていた安静時脳活動が機能的役割を持つ点が多くの研究から示されてきている(e.g, Raichle, 2006)。例えば視覚学習を行った視野に対応する低次視覚野の安静時活動が、学習に応じて変化するという報告(Lewis et al., 2009)や、安静時脳活動が視覚における事前分布(内部モデル)を表現するとする動物研究(Berkes et al., 2011)も存在する。一方で運動学習においては、訓練後に感覚運動ネットワークが広く再活性化するという報告(Albert et al., 2009)はあるものの、特定の運動記憶との対応、さらに行動成績との因果関係は不明である。

2. 研究の目的

本研究は、機能的核磁気共鳴画像法(fMRI)とマルチボクセルパターン分析を用いて、運動学習前後の覚醒安静期の脳活動について分析を行った。まず、(1)運動学習後の安静時において、運動学習時と類似した脳活動パターンが生じているかを、オフライン分析にて検討した。さらに、(2)ニューロフィードバック(脳活動パターンをリアルタイムで被験者にフィードバックし、望ましい方向に導く技術)を用いて、特定の脳活動パターンの誘導が可能であるかを検討した。



3. 研究の方法

(1) 運動学習前後の安静時活動の分析

まず、運動課題前後の安静時脳活動の計測と解析を行った。実験には、健常成人42名(平均年齢22.7歳)が参加し、半数の21名は右手、残りの21名は左手でジョイスティックを操作した。

運動学習課題として視覚追従運動を用いた。被験者は、スクリーン上をランダムに動き回るターゲットを、ジョイスティックを使ってトラッキングする課題(12秒間)を行った。その際、カーソルの運動方向と実際の手の運動方向との間に回転変化を導入することで、新規な視覚運動環境での学習とした。またコントロール課題として、直前に被験者本人の行った運動学習試行の視覚的なりプレイが呈示され、それを受動的に眺める試行(12秒間)を実施した。その実際の運動学習後に、再度安静にした状態での脳活動を計測した。最後に、事後テストとして同じ運動課題を実施した(図1)。全ての課題はMRIスキャナの中で実施した。

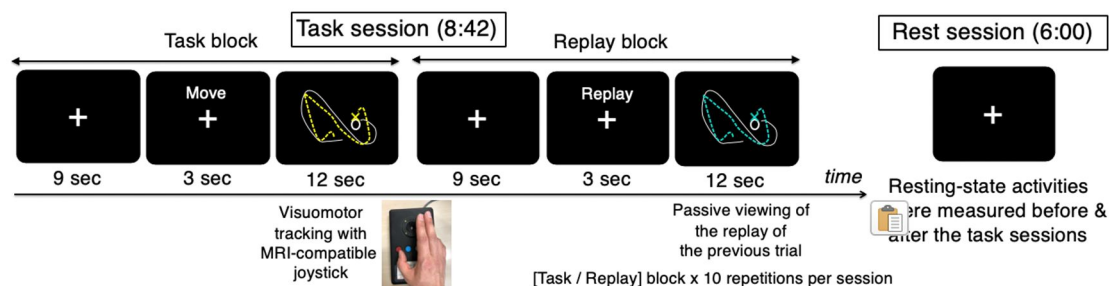


図1: 課題の流れ

分析時では、使用した手と同側および対側の一次運動野(precentral)および一次体性感覚野(postcentral)を関心部位とし、fMRIで計測したボクセルパターン活動を抽出した。そして、まず運動学習セッションでの脳活動パターンを用いて、課題セッション中の運動学習試行とリプレイ試行との識別が可能かを試みた。次に、上記で訓練した識別器を、学習前後の安静時脳活動パターンに対して適用することで、運動学習前後での安静時活動パターンの変化を検討した(図2)。また、上記の識別分析に加えて、ボクセルパターンの同士の類似度を分析するRepresentational Similarity Analysis(RSA)も実施し、安静時脳活動と運動学習時の脳活動との類似性を検証した。

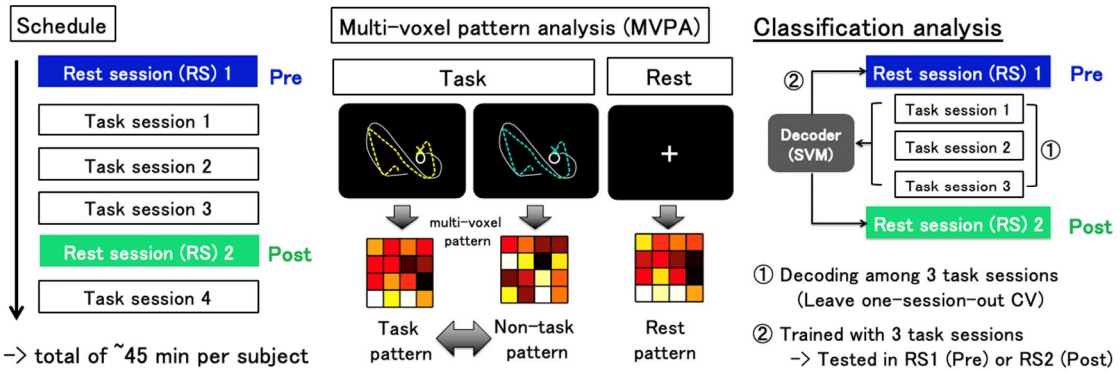


図 2 : マルチボクセルパターン分析を使った識別分析の手順

(2) ニューロフィードバックによる活動パターンの誘導

次に(1)で明らかとなった安静時脳活動を、運動学習後にニューロフィードバックを使って誘導することが可能かを試みた。実験には、健康成人 24 名 (平均年齢 22.8 歳) が参加し、全員が右手でジョイスティックを操作した。

実験では、まず(1)と同じ視覚追従運動を 1 セッション行ってもらい、次に実際の運動実行は行わない状態でニューロフィードバックを 3 セッション実施した。撮像された fMRI 画像ファイルは、リアルタイムで分析用 PC に転送され、頭部の位置補正および信号処理を行った上、関心部位の脳活動パターンが抽出された。関心部位は、使用する手と対側の一次運動野とし、現在の脳活動パターンと運動学習時の脳活動パターンとの類似度がリアルタイムに計算され、それをニューロフィードバック・スコアとして被験者に呈示した。スコアは折れ線グラフとして画面上に連続的に呈示され、fMRI の撮像インターバルである 2 秒に一度更新された。またスコアを上昇させる期間中は画面に「UP」という文字を呈示し、被験者にはスコアのグラフを上げるように教示した (12 秒間)。それ以外の期間には「REST」という文字を呈示し、安静にするよう指示した (12 秒間)。

4. 研究成果

(1) まず、運動学習セッションでの脳活動パターンを用いて、運動学習試行とリプレイ試行を識別したところ、高い精度 (平均 90%以上) で識別が可能であり、特に同側より対側部位での識別精度が高かった。次に、学習前後の安静時脳活動パターンに対して識別器を適用したところ、運動学習前と比べて運動学習後で、学習時と類似した脳活動パターンの増加が観察された。さらに、この結果は同側では生じず、対側の関心部位に選択的であった (図 3、4)。また、RSA においても識別分析と同様に対側部位に選択的な類似度の増加が見られた。このことは、運動学習後の安静時においても学習時と同じ脳活動パターンが再現されていることを示唆する結果である。さらに運動学習前後で、行動パフォーマンス (追従誤差の低下) と識別精度の変化を比較したところ、有意な正の相関が見られた ($r = 0.59, p < 0.01$)。このことは運動学習後の安静時活動と学習パフォーマンスとの関連を示すものである。

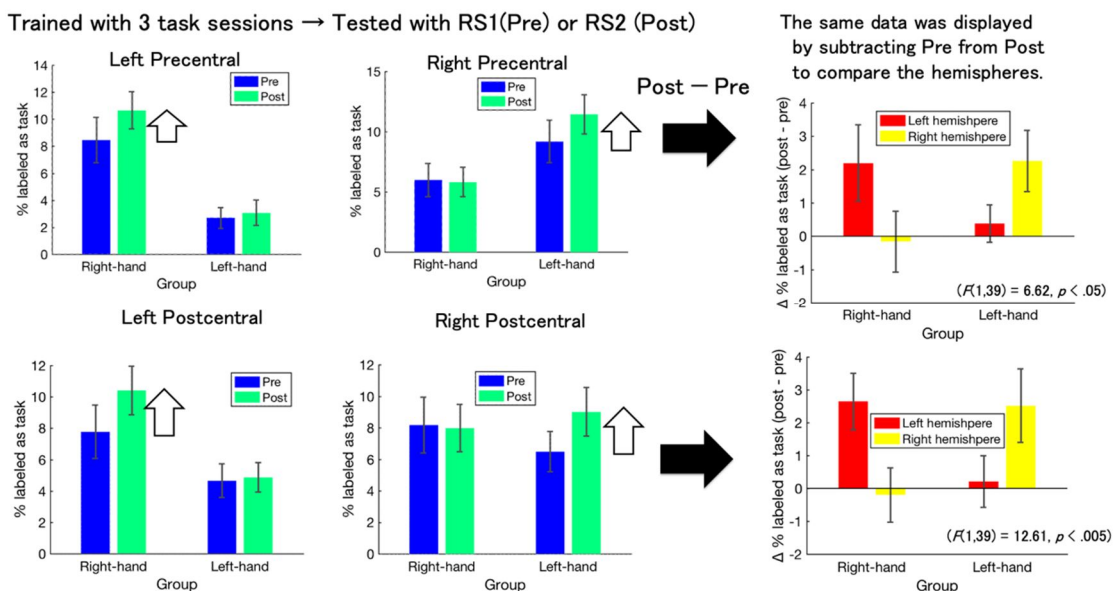


図 3 : 運動学習前後での識別精度の変化 (上段 : 一次運動野 ; 下段 : 一次体性感覚野)

Example of MVPA decoded labels: Left-Postcentral of Right-hand group

(■ labeled as task volume)

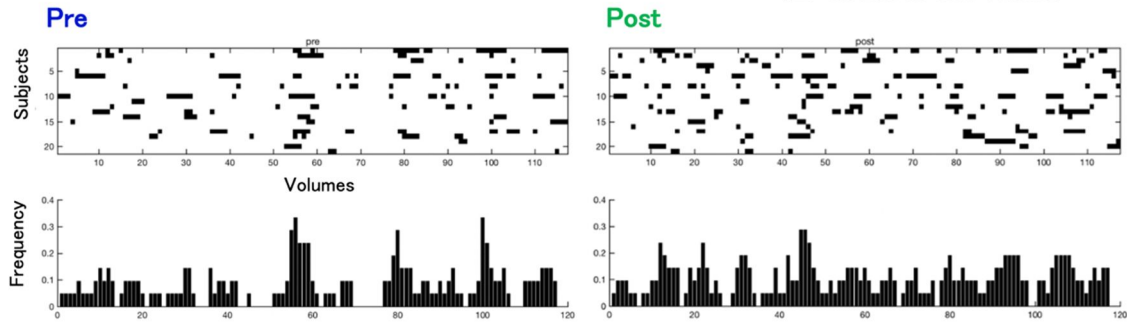


図4：右手グループの対側体性感覚野において、運動課題に類似性が高いと識別された fMRI ボリューム（黒色）の時系列（上段）と頻度（下段）。左列が運動学習前、右列が運動学習後の安静時脳活動

(2) fMRI 信号の血流動態反応の遅れを考慮し、指示から 2 ボリューム（4 秒）後の脳活動を分析対象とした。ニューロフィードバック・スコアを分析したところ、スコアを増加させるよう指示した期間（UP）において、安静期間（REST）と比べてスコアの有意な増加が見られた（図5）。このことは、被験者は実際には運動実行を行っていないにもかかわらず、運動学習時と類似した脳活動を生成することが可能であったことを示唆する結果である。一方で、ニューロフィードバックを実施した 3 セッション間におけるスコアの変化、およびスコアの増減と運動学習成績の関連性は本分析からは示されなかった。今後、ニューロフィードバックのスケジュールや提示方法、被験者の方略等に対してさらなる検討が重要であると考えられる。

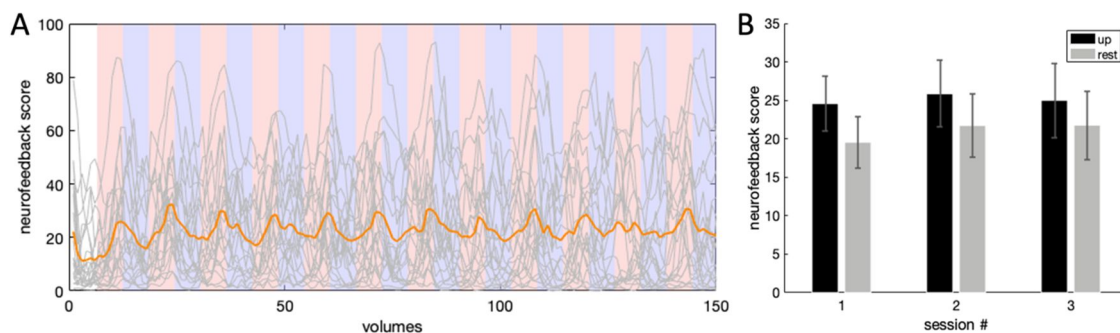


図5：(A) 1セッションにおけるニューロフィードバック・スコアの時系列変化。灰色線は各被験者の値、オレンジ線はその平均を示す。薄赤色の区間はスコアを増加させるよう指示した期間（UP）、薄青色の区間は安静にするよう指示した期間（REST）を示す。(B) 3セッションにおけるUP期間（黒色）とREST期間（灰色）におけるニューロフィードバック・スコア

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Ohata Ryu, Asai Tomohisa, Kadota Hiroshi, Shigemasu Hiroaki, Ogawa Kenji, Imamizu Hiroshi	4. 巻 30(7)
2. 論文標題 Sense of Agency Beyond Sensorimotor Process: Decoding Self-Other Action Attribution in the Human Brain	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Cerebral Cortex	6. 最初と最後の頁 4076 ~ 4091
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/cercor/bhaa028	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 Iwabuchi Toshiki, Ohba Masato, Ogawa Kenji, Inui Toshio	4. 巻 55
2. 論文標題 Incongruence of grammatical subjects activates brain regions involved in perspective taking in a sentence-sentence verification task	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Neurolinguistics	6. 最初と最後の頁 100893 ~ 100893
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jneuroling.2020.100893	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 -
1. 著者名 Ogawa Kenji, Mitsui Kaoru, Imai Fumihito, Nishida Shuhei	4. 巻 202
2. 論文標題 Long-term training-dependent representation of individual finger movements in the primary motor cortex	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 NeuroImage	6. 最初と最後の頁 116051 ~ 116051
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.neuroimage.2019.116051	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 -
1. 著者名 Hu Zhengfei, Yang Huixiang, Yang Yuxiang, Nishida Shuhei, Madden-Lombardi Carol, Ventre-Dominey Jocelyne, Dominey Peter Ford, Ogawa Kenji	4. 巻 13
2. 論文標題 Common Neural System for Sentence and Picture Comprehension Across Languages: A Chinese-Japanese Bilingual Study	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Frontiers in Human Neuroscience	6. 最初と最後の頁 380
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3389/fnhum.2019.00380	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 該当する

1. 著者名 Shibata Hiroshi, Ogawa Kenji	4. 巻 687
2. 論文標題 Dorsal premotor cortex is related to recognition of verbal and visual descriptions of actions in the first-person perspective	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Neuroscience Letters	6. 最初と最後の頁 71 ~ 76
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.neulet.2018.09.025	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 -

1. 著者名 Cai Chang, Ogawa Kenji, Kochiyama Takanori, Tanaka Hirokazu, Imamizu Hiroshi	4. 巻 172
2. 論文標題 Temporal recalibration of motor and visual potentials in lag adaptation in voluntary movement	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 NeuroImage	6. 最初と最後の頁 654 ~ 662
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.neuroimage.2018.02.015	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 -

1. 著者名 Mealier Anne-Laure, Poiteau Gregoire, Mirliaz Sol?ne, Ogawa Kenji, Finlayson Mark, Dominey Peter F.	4. 巻 8
2. 論文標題 Narrative Constructions for the Organization of Self Experience: Proof of Concept via Embodied Robotics	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Frontiers in Psychology	6. 最初と最後の頁 1331
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) doi: 10.3389/fpsyg.2017.01331	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 該当する

〔学会発表〕 計11件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 6件)

1. 発表者名 Yang H., Yang Y., & Ogawa K.
2. 発表標題 Effects of neurofeedback on the activities of the motor-related areas using execution and imagery
3. 学会等名 25th annual meeting of The Organization for Human Brain Mapping (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ogawa K., Yang H., Imai F., & Imamizu H.
2. 発表標題 Awake reactivation in the primary sensorimotor cortex after visuomotor learning in humans.
3. 学会等名 25th annual meeting of The Organization for Human Brain Mapping (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Zhengfei H., Nishida S., Yang Y., Madden-Lombardi C., Ventre-Dominey J., Dominey PF., & Ogawa K.
2. 発表標題 Common neural system for sentence comprehension across languages: A Chinese-Japanese bilingual study.
3. 学会等名 26th annual meeting of the Cognitive Neuroscience Society (CNS) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ogawa K.
2. 発表標題 Principles of fMRI multivariate analysis and its applications in cognitive neuroscience
3. 学会等名 The Conference of Data Science, Statistics & Visualisation (DSSV2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 今井史, 小川健二
2. 発表標題 動的視覚イメージの身体的要素と運動シミュレーションの関係
3. 学会等名 日本イメージ心理学会第19回大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 今井史, 小川健二
2. 発表標題 イメージ内容の実現性、身体性が視覚イメージ鮮明性に及ぼす効果
3. 学会等名 日本イメージ心理学会第19回大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小川健二
2. 発表標題 他者の立場に立って考えることの神経基盤.
3. 学会等名 京都大学こころの未来研究センター 認知科学セミナー (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 西田周平, 小川健二
2. 発表標題 感覚運動皮質における指運動の実行と観察間での共有表象
3. 学会等名 日本認知心理学会第16回大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Ogawa K., Imai F., Shinozaki J., Nagahama H., Sakurai Y., & Nagamine T.
2. 発表標題 Role of the precentral cortex for kinesthetic motor imagery: fMRI multivariate decoding of finger movements.
3. 学会等名 47th annual meeting of the Society for Neuroscience. (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Imai F., Ogawa K., Nihashi J., & Abe J.
2. 発表標題 Neural representational similarity of individual finger movements: the study including a skilled piano player who suffered from focal hand dystonia.
3. 学会等名 6th Conference of the Asia-Pacific Society for the Cognitive Sciences of Music (APSCOM) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 楊惠翔・小川健二
2. 発表標題 ニューロフィードバックが視覚運動学習に与える影響
3. 学会等名 北海道心理学会第64会大会
4. 発表年 2017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	今水 寛 (Imamizu Hiroshi)		