

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 17 日現在

機関番号：10101

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26540059

研究課題名(和文) 動作主体感を生み出す脳内機構の操作的検証

研究課題名(英文) Investigation of neural mechanisms for sense of agency by using neurofeedback

研究代表者

小川 健二 (OGAWA, Kenji)

北海道大学・大学院文学研究科・准教授

研究者番号：50586021

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、fMRIニューロフィードバックを利用し、脳の感覚運動学習に関わる神経表象、および学習に付随する運動主体感の操作を試みた。まず研究代表者の所属機関に新規導入されたMRI装置に対して、新たにfMRIのリアルタイム処理系およびフィードバック・システムを構築した。そのシステムを使って実験参加者は感覚運動学習時の感覚運動領域の脳活動パターンを変化させた。本研究からニューロフィードバックにより感覚運動領域における脳活動パターンの操作が可能である点が示された。

研究成果の概要(英文)：This study aimed to investigate the neural mechanisms of sensorimotor control and associated changes in sense of agency by using neurofeedback. First, a setup of real-time processing as well as feedback presentation system of fMRI was made to a newly introduced MRI machine within our research center. Using this real-time system, fMRI neurofeedback experiments were conducted, in which the participants regulated their brain activation patterns guided by with their neurofeedback score. This study showed that the participants could regulate their brain activity of the sensorimotor cortex involved in motor learning and sense of agency.

研究分野：認知神経科学

キーワード：脳機能イメージング 感覚運動制御

1. 研究開始当初の背景

我々は変化する環境や身体に対して常に学習・適応することで適切な運動を生成することが出来る。さらに運動を行う際には、我々の脳は常に多くの運動と感覚情報を受け取っているが、特定の感覚入力が自分の運動の結果生じたものなのか(感覚フィードバック情報、または再求心性入力と呼ぶ)、あるいは他人が生成したものなのかを容易に区別することが出来る。このような自分と他人との区別、すなわち「自己分離」の機能は、自身の主観的な身体感覚、さらには「自己」という概念を構成する基盤であると考えられる。また、統合失調症や主に頭頂葉の脳損傷患者では、自分が生成した動作に対し、それを他人が起こしたものと錯覚する現象も知られている(例として、他人の症候群)。本研究は、脳の感覚運動学習・適応に関わる神経表象やメカニズム、さらに学習に付随する主観的な自己の身体意識を生み出す脳内機構について検討を行った。

従来のfMRI研究は、ある課題を行っている時に脳のどこが活動するかということを示すのみで、その脳活動がどのような情報を表現・処理しているかは不明であった。一方で本研究では、脳活動を実時間で本人に提示して脳活動を変化させ、認知や行動変化を検証することで、認知機能と神経基盤との因果性の検証を試みた。

近年の多変量解析法や機械学習を基盤とした脳情報解読(デコーディング)技術の発展により、特に機能的核磁気共鳴画像法(functional magnetic resonance imaging : fMRI)の脳活動パターンの中から、従来よりも詳細な情報を解読することが可能となってきている。我々の先行研究からも、脳情報解読(デコーディング)法を使って感覚運動野の脳活動パターンから獲得した個々の運動スキルを解読することに成功している(Ogawa & Imamizu, 2013)。本研究はこれらの研究背景を基に、新たにニューロフィードバックを使って被験者と脳活動との間に閉回路を導入することで、感覚運動制御に関わる特定の脳情報を操作できるかを検討する。

2. 研究の目的

本研究は、脳の感覚運動学習に関わる神経表象、および学習に付随して変化する主観的な自己の運動意識を生み出す脳内機構について、fMRIを使ったニューロフィードバックを使って検証を行なうことを目的とした。まずヒトが過去の経験から既に獲得した運動記憶の神経表象について解明した。また新しい運動学習後に生じる動作主体感(sense of agency for action)に着目し、その脳内基盤を解明した。

3. 研究の方法

まずfMRIを使って、使用する手とは独立に実験参加者が既に習熟した運動記憶(道具

の使用)を脳活動パターンから解読可能かを検討した。さらにfMRIで計測した脳活動を実時間で実験参加者本人に呈示すること(ニューロフィードバック)により、実験参加者が感覚運動制御に関わる脳部位の活動パターンを自発的に変化させることができるかを検討した。またニューロフィードバックによって、実際に新しい運動学習・適応を操作(促進や抑制効果)することができるのか、さらには主観的に感じる動作主体感が操作可能かを検証した。

実験設備として、研究代表者が所属する北海道大学中央研究部門に平成27年度から新たに導入されたfMRI装置(Siemens社製Prisma 3T)において、MRIスキャナ内で簡単な指運動課題を行うことが可能な実験環境を整備した。さらに本システムを使った脳機能イメージングデータの収集と分析、さらに下記に述べるニューロフィードバック・システムの構築を行った。

(1) 高次の運動表象のfMRIデコーディング

ヒトはさまざまな道具を適切に使いこなすことが出来る。このような道具使用に関する知識は過去の感覚運動経験を使って脳内で運動記憶(手続き型記憶、あるいは内部モデル)として獲得されているものと思われる。またこのような運動記憶は使用する手に個別に貯えられているのではなく、手には独立した高次の運動表象として貯えられていると考えられる。その例として、主に左頭頂葉損傷によって生じる観念運動失行では、使用する手に関わらず道具使用のパントマイムができないという症例が見られる。

そこで本研究は、このような高次の運動表象に対するデコーディング可能性を調べるために、使用する手に依存しない道具のパントマイム運動の解読が可能かを検証した。実験では視覚提示された道具のパントマイムという単純な動作を健常参加者に行なってもらい、その際の脳活動データをfMRIで計測した。そして参加者が、どのパントマイム動作を行っているかをマルチボクセル・パターン(デコーディング)方法で識別するとともに、識別器が右手・左手の違いを汎化して判定可能かを検証した。

健常成人12名(平均25歳)が本実験に参加した。刺激は3種類の道具(はさみ、かなづち、かぎ)を用いた。1ブロック(12秒)内では、同じ刺激を固視点のみの提示(1秒)をはさんで2秒間隔で6回提示した。参加者は刺激提示のタイミングに合わせて、パントマイムを行った。使用する手は右手あるいは左手を用い、前者では道具を写真で、後者では文字で提示した。実行中の脳活動をfMRIにて計測した。

(2) fMRIニューロフィードバックによる脳活動操作

ニューロフィードバックを実現するため

のシステムとなる fMRI リアルタイム処理・提示経路を、ハードウェアおよびソフトウェアの両面から新たに構築した。具体的には、MRI 装置で撮像した脳機能データ(DICOM ファイル)を、ほぼリアルタイムで別コンピュータに転送し、そのコンピュータ上で画像および統計的処理を行った上で、その結果をスキャナ内の実験参加者に提示するという一連のシステムを構築した。さらにニューロフィードバック用のコンピュータ上で、任意の脳活動のフィードバック指標(数値またはグラフ)を任意のタイミング(課題中または課題後、および連続的または断続的)に被験者に返すためのプログラムを作成した。併せて刺激提示のプログラムと連動させて、リアルタイムに刺激に反映させるプログラムを構築した。

さらに本実験系を使って、実際に被験者にニューロフィードバックを与えた。実験参加者には、まず新規な感覚運動学習(Ogawa & Imamizu, 2013)を行わせた。その際の運動学習に関連すると思われる脳部位(運動野や頭頂葉)の活動パターンを使ってデコーダーを訓練した。次に、参加者に運動イメージ課題を行わせ、事前に行った運動学習時の脳活動パターンとの類似性をリアルタイムで分析し、ニューロフィードバックを与えた。そして実験参加者が運動野や頭頂葉の脳活動パターンを自発的に変化させることが可能であるか、さらにその後の行動指標(運動パフォーマンスや動作主体感)に対しても影響を与えるかを確認した。

4. 研究成果

(1) 高次の運動表象の fMRI デコーディング

まず左手と右手それぞれの脳活動についてパントマイム動作の解読を行った。その結果、対側の一次感覚運動野の活動パターンから、実行中のパントマイム種類を解読することが出来た。さらに右手の場合には、両側の低次視覚野の活動パターンから同様にパントマイムの種類を解読できた。前者は低次の運動パターンの違い、後者は視覚入力自体の違いに起因するものと考えられる。次に、左右手に共通した活動パターンを調べるため、左手実行時の脳活動パターンを使って解読器(デコーダ)を訓練し、その解読器が右手の脳活動パターンに汎化可能か(また逆に右手から左手への汎化が可能か)を検討した。その結果、左側の後部頭頂皮質の活動パターンを使うと、そのような使用する手に非依存な汎化が可能であった。本結果は、左後部頭頂皮質における左右手に共通した習熟した道具使用行為の神経表象を示唆する。

本結果は、頭頂葉損傷で生じる道具使用の障害である観念運動失行の例とも一致するものであり、脳機能イメージングを使って頭頂葉における不変な運動スキルの表象の存在を示すものである。このような頭頂葉にお

ける効果器(手)とは独立した身体表象は、動作主体感等の身体意識の基盤となるものと考えられる。本成果について学会発表を行うとともに、現在国際誌に論文投稿(改稿)中である。

(2) fMRI ニューロフィードバックによる脳活動操作

新規の感覚運動学習に対するニューロフィードバック実験の結果、実験参加者はニューロフィードバックによって提示した学習時の自身の脳活動パターンをある程度生成することが可能であった。またニューロフィードバック後の運動パフォーマンスや動作主体感に対しても影響を与えている点が見られた。本成果については現在追加分析および発表準備中である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計2件)

Kim S*, Ogawa K., Lv J., Schweighofer N., & Imamizu H., (2015) Neural substrates related to motor memory with multiple timescales in sensorimotor adaptation, PLOS Biology, 13(12): e1002312. (*共同筆頭著者)、査読有

小川健二 (2014) ミラーシステムと社会認知ネットワーク, 神経心理学会誌, 30(4), 277-283, 査読無

[学会発表](計9件)

小川健二 (2016) 運動の学習と認識に関わる神経表象: モデルベース fMRI とデコーディングによる検討, 日本認知科学会知覚と行動モデリング(P&P)研究分科会 [3月18日, 明治大学(東京都中野区)]

小川健二 (2015) fMRI デコーディングによる行為認識の神経表象の解明 [12月9日, 国立障害者リハビリテーションセンター(埼玉県所沢市)]

小川健二 (2015) 使用する手に非依存の道具使用行為の神経表象: fMRI デコーディングによる検討, 第39回日本神経心理学会 [9月10-11日, 札幌市教育文化会館(北海道札幌市)]

小川健二, 今水寛 (2015) 複数の感覚運動学習の神経表象とニューロフィードバックによる学習促進, 第9回 Motor Control 研究会 [6月26-28日, 京都大学(京都府京都市)]

小川健二 (2015) fMRI デコーディングによる感覚運動学習に関わる神経機構の解明, 第2回認知科学・認知神経科学セミナー [6月25日, 追手門学院大学(大阪府茨木市)]

Ogawa K. (2015) fMRI decoding of

observed actions in the parietal and premotor cortex. International Symposium on Experimental Brain Research [3月24日, 北海道大学脳科学研究教育センター(北海道札幌市)]

今水寛, 小川健二, 大畑龍 (2015) 脳情報復号化による運動情報の抽出, 第1回身体性システム領域シンポジウム [3月9-11日, 花巻温泉ホテル千秋閣(岩手県花巻市)]

小川健二 (2015) ニューロフィードバックによる感覚運動学習の促進, 日本心理学会若手の会運営委員による研究交流会 [3月4日, 日本心理学会事務局(東京都文京区)]

小川健二 (2014) fMRIを使った運動学習の神経基盤の解明, 北海道心理学会第61回大会 [11月30日, 小樽商科大学札幌サテライト(北海道札幌市)]

〔図書〕(計1件)

小川健二 (2015) 「学習する脳と時間」 in 田山忠行(編)「時を編む人間 -人文科学の時間論-」北海道大学出版会, pp. 31-56.

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://cogpsy.let.hokudai.ac.jp/~ogawa-lab/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小川 健二 (OGAWA KENJI)

北海道大学・大学院文学研究科・准教授
研究者番号: 50586021

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし