

令和 5 年 6 月 12 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2022

課題番号：19K07794

研究課題名(和文) 身体所有感の神経基盤の研究 サルにおけるラバーハンド錯覚モデルの確立

研究課題名(英文) Neuronal mechanisms of body ownership-a study of rubber hand illusion in macaque monkey

研究代表者

勝山 成美 (Katsuyama, Narumi)

京都大学・ヒト行動進化研究センター・特定助教

研究者番号：00291906

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：自分の手や足を自身の身体の一部と感ずることを身体所有感という。身体所有感は身体的な自己の基盤として重要であるが、それが脳内でどのように表象されているのかはわかっていない。そこで本研究では、身体所有感の神経基盤を調べるため、サルを使った動物モデル系の確立を目指した。サルの右手を遮蔽し、目の前に手の画像を呈示して画像に所有感を誘導した。画像では、手の位置を遮蔽された本物の手の位置と異なるようにした。遅延期間の後、右手で到達運動を行なわせ、標的からの到達点のずれを調べることで、画像に対する所有感の誘導を間接的に評価することを試みた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

身体部位の所有感、手や体を使った動きや感覚受容にとって重要であるだけでなく、自己と他人との区別や、身体的自己の基盤ともなる重要な脳機能である。しかし、それが脳内でどのように表象されているのかは不明な点が多い。本研究で得られる成果は個人の身体所有感だけでなく、自己と他者の区別の神経基盤の解明にも貢献することが期待される。

研究成果の概要(英文)：A feeling that the body parts, such as hands, legs, and head, etc., belong to our own body is referred to as body ownership. Many studies have suggested that body ownership may be a foundation not only for sensation and motion, but also self-consciousness (bodily-self). The purpose of the study is to establish an animal model of body ownership for future investigation of neuronal mechanisms underlying it. A macaque monkey was trained in a touch task. In the delay period before the touch, the ownership of the hidden hand of the monkey was transferred to an image of monkey hand presented on a display, in which the position of the hand was different from that of the hidden hand. Monkey was rewarded if it touched on a hidden touch screen after a cue. The deviation of the touch point from the target was analyzed as a measure of the transferred hand ownership to the hand image.

研究分野：神経科学

キーワード：身体所有感 ラバーハンド錯覚 到達運動 マカクザル

1. 研究開始当初の背景

自分の手や足が自己の身体の一部であるという感覚を身体所有感という。身体所有感は、触覚や固有感覚、および視覚など、複数の感覚情報が統合されて成り立つと考えられている。このことを端的に示すのが、ラバーハンド錯覚である。被験者の手を遮蔽し、それとは異なる場所に置かれた模型の手を注視してもらい、模型の手と遮蔽された手に同じタイミングで触覚刺激を与えると、模型の手が自分の手のように感じられるようになるとともに、手の位置感覚が本物の（遮蔽された）手から模型の手の位置に移動する。また、それに伴って触覚刺激を本物の手ではなく模型の手の上を感じるようになる (Botvinick and Cohen, 1998)。このことは、手の所有感には固有の肉体だけでなく体外の物体にも拡張しうることを、またそれに伴って触覚もその対象に移ることを示している。

人間ではラバーハンド錯覚が身体所有感のモデルとして広く研究されてきたが、その神経基盤は必ずしも明らかではない。サルの頭頂連合野である 5 野には、上肢が特定の姿勢をとる時に皮膚を刺激すると反応する神経細胞が存在する。このような細胞は、触覚とともに上肢の姿勢をモニターしていると考えられている (Sakata, 1975)。その後、同じ 5 野の姿勢選択性細胞には、サルの手を遮蔽してその姿勢を変えても、元の場所に置かれたサルの剥製の手を見ると反応するものがあることが見いだされ (Graziano et al., 2000)、このような細胞が、手の所有感が模型の手にシフトする現象の神経基盤である可能性が示唆された。しかしこの研究では、サルの手と模型の手にラバーハンド錯覚を誘導させるための触覚刺激を与えていない。さらに、サルが剥製の手に所有感を感じているかについてはまったく調べていない。そのため、この研究だけでは身体所有感の神経基盤を調べるためのモデルとしては不十分である。

2. 研究の目的

そのため本研究では、身体所有感の神経基盤を調べるため、まずサルにおけるラバーハンド錯覚モデルを確立することを目的とする。Botvinick と Cohen による最初のラバーハンド錯覚の報告では、模型の手を自分の手と感ずる現象の評価に 2 つの方法を使っている。ひとつは、被験者に

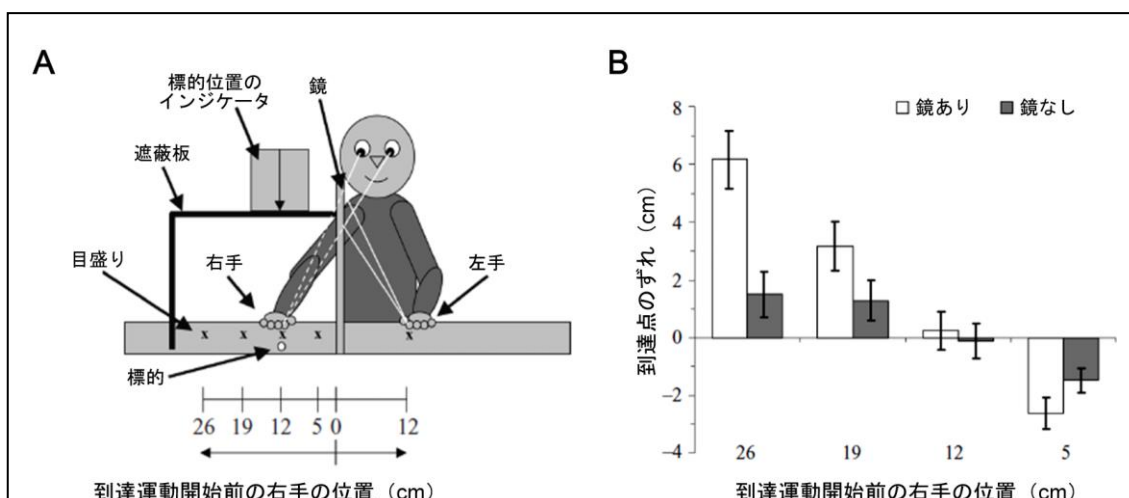


図 1 Mirror visual feedback を用いた到達運動課題

A: 鏡の前に左手を、裏に右手を置き、右手を遮蔽する。鏡を注視していると、左手の鏡像が右手のように感じられるようになる。その後、インジケータで示された位置に向かって右手で到達運動を行なう。B: 標的からの右手の到達点のずれは、到達運動開始前の右手の位置によって有意に変化する。鏡がないと、このずれは生じない。Holmes et al. (2004)を改編した。

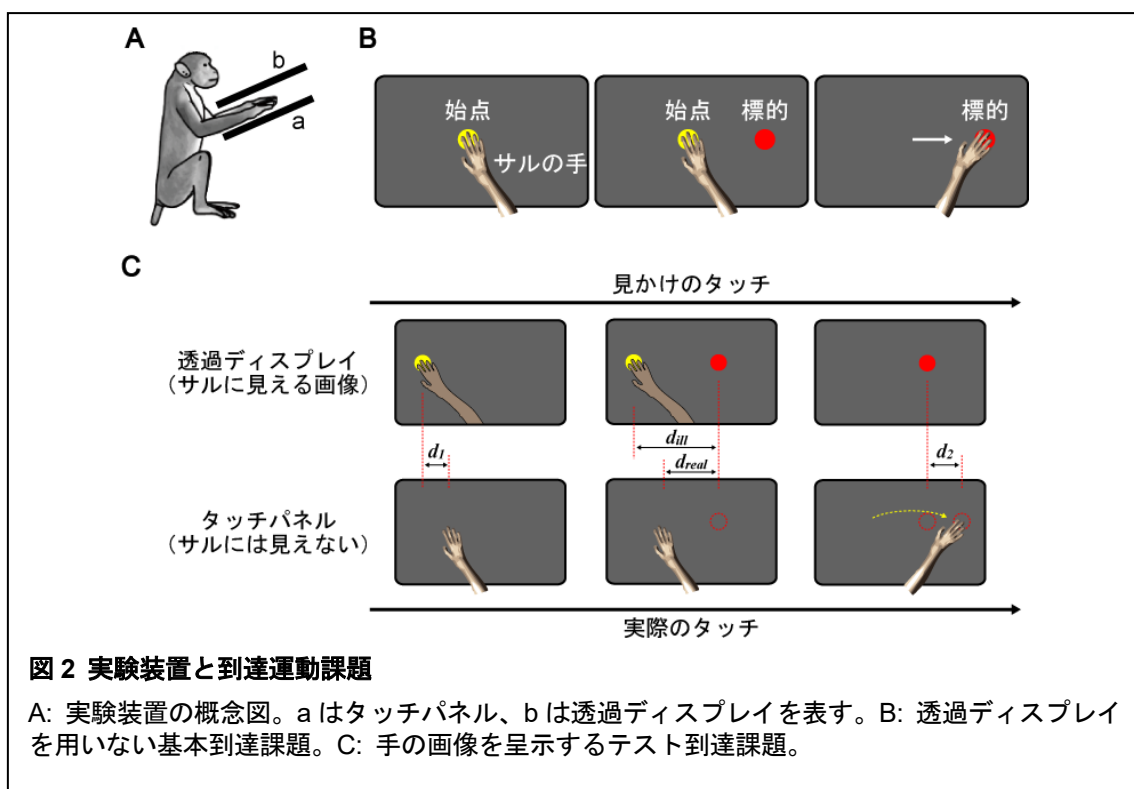
よる言語報告である。もうひとつは、手の位置感覚（固有感覚）の変化（*proprioceptive drift*）である。研究参加者は閉眼状態で、手の位置感覚のみを頼りに遮蔽された自分の腕が机の上のどこにあるかを指示する。するとラバーハンド錯覚が生じている時の手の位置は、錯覚前に比べて有意に模型の手の方にシフトする。これが *proprioceptive drift* である。その後の研究で、言語報告による手の所有感と、*proprioceptive drift* による固有感覚の変化とでは神経基盤が異なるという議論もあるが (Rohde et al., 2011)、サルは言語報告ができないため、本研究では後者の *proprioceptive drift* を応用することで、手の所有感を評価する。

この目的のため、本研究では先行研究でヒトの身体図式を評価するために用いられた、*mirror visual feedback* (MVF) を利用した到達運動課題 (Holmes et al., 2004; 2005) を応用する。MVF とは、鏡の両側に左右の手を置き、鏡に映った手の像を注視していると、それが鏡の背後にあるもう一方の手のように知覚される現象である。MVF によって左手の鏡像が右手のように感じられるようになった後、右手で標的に向かって到達運動を行なうと、本人は標的にタッチしたつもりでも、右手の到達点は標的の位置からずれてしまう (図 1)。左手の鏡像を注視することでそれが右手であるかのように身体図式が変化するが、到達運動を始める前の鏡に対する左手と右手の位置が異なっていると、右手の位置感覚も実際の位置から見かけの位置に更新される。その状態で到達運動を行なうと、右手から標的までの距離が見かけの距離に影響されるため、到達点が標的からずれると考えられる (Holmes et al., 2004; 2005)。本研究では、この実験パラダイムを二ホンザルに応用することを試みた。

3. 研究の方法

実験装置

サルの前に静電容量方式のタッチパネル (SkinFit 24 インチ、フィジオテック社、図 2A の a) を設置し、サルとタッチパネルの間に透過ディスプレイ (シルバーアイ社、図 2A の b) を置く。透過ディスプレイが透過モードの時、サルはタッチパネル上の手を見ることができるが、非透過モードの時は見ることができない。タッチパネル上のタッチ位置と、透過ディスプレイのモード



切替え等は、Matlab (The MathWorks, 米国) をプラットフォームとするソフトウェア Psychtoolbox (<http://psychtoolbox.org/docs/TouchInput>) で制御した。

到達課題

まず、サルに基本到達課題を訓練する。この段階では、透過ディスプレイは外しておく。タッチパネルに始点 (図 2B の黄色い円) が呈示されたら、サルに右手でそこをタッチさせる (図 2B、左)。遅延期間の後、標的 (図 2B、中央の赤い円) を呈示する。サルは始点が消えたら標的に向かって到達運動を行ない (図 2B、右)、標的上で手を 1 秒間保持したら、液体報酬が与えられる。

基本到達課題を習得したら、タッチパネルの上に透過ディスプレイを設置し、画像を用いたテスト到達課題を行なう。一回の試行の開始時には、透過ディスプレイを透過モードにする。タッチパネルに始点が呈示されたら、サルはそこを右手でタッチする。ここまでは、基本となる到達課題と同じである。テスト到達課題では、ここで透過ディスプレイを非透過モードに切り替えるとともに、始点をタッチしているサルの右手の画像を呈示する。サルには本物の手は見えず、画像の手しか見えない。この時、画像の始点をサルの視野内で実際とは異なる位置に呈示する。たとえば、下の図では距離 d_1 だけ左側にあるように提示している (図 2C、左)。遅延期間の後、透過ディスプレイに標的を呈示する (図 2C、中央)。始点が消えたらサルは標的への到達運動を行なう。この時、透過ディスプレイの画面を黒い背景画像に切り替える。したがって、サルはテスト到達運動を、右手の固有感覚のみに頼って行なうことになる。タッチパネル上では、始点と標的間の距離は d_{real} だが、サルが見ている透過ディスプレイ上の見かけの距離は d_{ill} となり、この場合は $d_{ill} > d_{real}$ となる (図 2C、中央)。そのため、到達運動の到達点はタッチパネル上で想定される標的位置より右側に d_2 だけずれることが予想される (図 2C、右)。このようにして、試行ごとに画像中の d_1 を変え、その結果として得られる到達点のずれ d_2 との関係性を調べる。もし画像の手に所有感が誘導されているならば、 d_1 と d_2 との間には相関関係が見られることが予想される。

4. 研究成果

まず、透過ディスプレイがない状態でサルに基本到達課題を訓練した。タッチパネル上に始点が呈示されたら、サルは右手をその上に置く。遅延期間の後、標的が呈示される。サルは始点が消えたら標的に向かって到達運動を行ない、1 秒間タッチを保持したら液体報酬が与えられる。その結果、サルは最大 10 秒間の遅延があっても正確に標的をタッチすることができるようになった。

次に、サルとタッチパネルの間に透過ディスプレイを配置した。試行の開始時にはディスプレイを透過モードにしてタッチパネルが見えるようにし、サルが始点にタッチしたら非透過モードにしてサルの手の画像を呈示した。

サルの手の画像を呈示後、サルが遅延期間中に始点へのタッチを保持することができた試行で、到達運動を試みた。その結果、サルは到達運動を行なうものの、標的から離れたところをタッチしてエラーになる試行が多かった。サルが実際にタッチした部位と標的との関係 (図 2 の d_2)、さらにその試行で呈示した画像上の始点の位置 (図 2 の d_1) との関係性を調べたが、全体的に到達点は標的より始点に近く、 d_1 との相関は見いだされなかった。この原因として、遅延期間中に呈示される画像の問題が考えられた。透過ディスプレイは自発発光しないため、透過モードでは背後から光源をあてる必要がある。当初の実験では、サルの手の画像として実験で使用したサルで撮像した腕の写真を用いたが、画像の中で色の薄い部分 (腕本体で反射光のあるところ、また腕の輪郭で体毛のけばの部分) はディスプレイの背後が透けて見えてしまっていた。そのため背後にある本物のサルの手がうっすらと見えていたため、画像の手に対する所有感の誘導が起きにくかったと考えられた。そのため、背景光の強さと角度をいろいろ変え、ディスプレイの背景が見え

づらくなる条件を模索した。しかし、光量を落とすと背景の透けは減るものの画像そのものが見づらくなり、光量を上げるとサルの手の本体部分も透けて見えてしまい、到達課題の結果は変化しなかった。

このジレンマを解決するため、写真ではなく画像ソフトウェアで描いたサルの手を呈示した。絵を用いると、手と背景の境界部分もベタ塗りになるため、写真のようにディスプレイの背後が透けて見えなくなることが期待された。この条件で到達運動課題を試みたが、結果は写真を用いた時と変わらなかった。その理由として、絵ではリアリティが欠けることが考えられたため、再び写真を使用することを検討することにした。ただし、それには上で書いたような腕の輪郭部分の透けを解決する必要がある、その検討に予想外の時間を要することになった。

検討の結果、透過ディスプレイの背後に、遮光ガラスを重ねる方法を試すに至った。遮光ガラスは、日本板硝子製のウム・スマートウィンドウ FUM2 を用いた。この製品は、外部電源によって透過ディスプレイのように透過モードと非透過モードを切り替えることができる。透過モードでは72%の光を通し、非透過モードでは全体が曇りガラスのようになり、8%の光を通すことができる。この遮光ガラスを透過ディスプレイの背後に配置した。まず、透過ディスプレイと遮光ガラスの両方を透過モードにしたところ、若干曇りはあるものの、これらを通してタッチパネルに呈示した始点や標的を視認することができた。次に、透過ディスプレイと遮光ガラスをともに非透過モードにし、透過ディスプレイにサルの手腕の写真を呈示したところ、遮光ガラスがあるため画像全体は暗くなったが、サルの手腕と始点は視認でき、懸案だった腕の輪郭部分の透けもかなり改善された。この装置を使い、サルに到達課題の再訓練を行なっている。残念ながらこの報告書を提出する時点（2023年6月1日）では結果を得るに至っていないが、今後も当初の目的を達成するため、実験を継続する。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計0件

〔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
--	---------------------------	-----------------------	----

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