

基礎論文

両前腕の表示位置の操作による身体表象の変化に利用される
手がかりの検討松室 美紀^{*1} 小林 晶¹ 岡松 育夢¹ 江波戸 傑¹ 柴田 史久¹ 木村 朝子¹Cues used to modify limbs position in body representation when displayed arms are
manipulatedMiki Matsumuro^{*1} and Hikari Kobayashi¹ Ikumu Okamatsu¹ Takeru Ebato¹ Fumihisa Shibata¹ Asako Kimura¹

Abstract – Training with distorted vision has been shown to change posture information in a body representation. We investigated an interaction in a change of symmetric body parts in the body representation, both upper limbs. Two cues that made clear the positional relationship between both hands were tested to whether these facilitated the representation change: (1) whether the participants move both hands simultaneously, and (2) whether the participants move both hands to the same point. The results of our experiments showed that the representation of both hands was changed with neither cue but not facilitated by either of the cues.

Keywords : body representation, proprioception, symmetric body parts, cues for representational change

1 はじめに

ユーザの身体の動きを操作対象に反映する方法は、アバタや遠隔ロボットの直感的な操作方法であり、広く用いられている [1]。この操作方法では対象が自身の動きに同期する等、一定の条件が揃うことにより、対象に身体所有感が生じる [2, 3, 4]。つまり、ユーザが対象を自身の体（の一部）であるように感じることがある。この時、自身の身体がどのような形、姿勢であるかという脳内の表現（表象）にも影響が及ぶ。

このような、自身の身体がどのようなものか、現在どのような状態、姿勢であるかなどの身体の情報統合した脳内の表象を身体表象と呼ぶ [5]。身体表象は視覚、固有受容感覚（関節や筋など）等の複数のモダリティからの情報を統合して、常に更新されている。上記の様に自身の身体以外の対象に身体所有感が生じた状況などでは、この更新の際に実際の身体とは異なる表象が生成される。有名な例として、ラバーハンドイリュージョンが挙げられる [6]。実際の手を隠し、隣にゴムでできた手を置き、両者を同時にブラシで触ることを繰り返すと、ゴム手が自身の手である様に感じられる。その時、自身の手がどこにあるかを回答させると、実際の位置よりもゴム手側へ移動した位置が回答される。これは固有受容感覚ドリフトと呼ばれ、固有受容感覚からの情報が自身の手であると感じているゴム手の視覚的な位置に引きずられ、実際とは異なる

位置に手を感じてしまう。ゴム手の代わりにアバタやロボットの手を使用しても同様の現象が確認されている [2, 3]。さらに、全身のアバタを用いた同様の手続きでも、アバタを自身の身体のように感じ（フルボディイリュージョン）、自身の位置をずれて知覚してしまう [7]。

その他にも、様々な方法で身体表象の操作が行われている。身体部位の位置に関してだけでも、以下の通り、視覚、聴覚等の情報を用いた研究がなされている。視覚であれば、視点の位置を操作することにより、身体サイズを錯覚させている。このような操作で、歩き方まで変化することが示されている [8, 9]。また、聴覚情報を用いた操作も行われている。参加者が床をタップした際の音を、実際よりも遠い位置からフィードバックすると実際よりも腕が長く知覚される [10, 11]。

これらの先行研究は、自身の身体の形状と異なるアバタやロボットを操作する際に身体表象の変化が役立つ可能性を示す。人間は固有受容感覚からの情報を得られるため、目を閉じていても鼻を触ることや、両手を合わせることができるが、ロボットやアバタを操作する場合、ユーザが受け取ることのできる感覚情報は限られており、そのような行動は難しい。これまでの研究は、人間の固有受容感覚情報は視覚情報に影響されて変化しやすいことを示している [12, 13]。そこで、事前に固有受容感覚からの情報と操作対象の姿勢、形状が近づくように、自身の身体表象を変化させておくことにより、スムーズな操作が実現できる。

^{*1}立命館大学^{*1}Ritsumeikan University

しかしながら、身体表象がどのように形成、更新されるのかはまだ全てが明らかにされていない。特に先行研究では、手を中心とする身体の一部位かフルボディイリュージョンのように身体全体を操作している。一方で、アバターやロボットは人間と同じ形状をしているとは限らず、その複数の部位を同時に操作する。そのため、身体の一部位がどのように関連しながら、または、独立して表象が形成されているかは重要な検討点である。

我々は先行研究で、対称的な身体部位である両腕を対象とし、身体表象の変化における部位間の相互作用について調べている [14]。片方の腕の身体表象が変化するように視覚情報を用いた操作を加えると、操作を加えていない腕も操作された腕と同様の変化を見せることを示した。つまり、身体の構造に関する知識が身体表象の更新に利用されている。一方、両腕を身体の構造の知識に沿わないよう操作した場合は、操作に沿った変化が起こった。これより、視覚情報があれば、人間の身体の構造に逆らう変化も起こること、視覚情報がない身体部位は、視覚情報のある部位に対し身体の構造の知識に合わせた変化をすることが示された。

我々の研究では、参加者に身体表象における手の高さが変化するように操作した視覚情報を提示し、手を動かす課題を行わせた。この課題中、参加者は各手の視覚情報と固有受容感覚情報を得ることができる。各手の視覚情報と固有受容感覚情報がずれているため、固有受容感覚の対応づけに変化が起き、自身の手の位置の知覚が変化する。では、同時に得られる反対側の手の感覚情報も対応づけられて、この変化に用いられているのだろうか？先行研究では、視覚的に同じ位置へ両手を同時に動かしていたため、両手の視覚、固有受容感覚情報を統合しやすかったと考えられる。同じ位置へと動かした時の各手の固有受容感覚情報が同時に得られるため、両手がどのような時に同じ高さとなっているかという情報を両手で対応づけて基準として利用できる。本研究では、この同時性と視覚的同位性の身体表象の変化への影響、変化に必須か否か、または、必須ではないが変化を促進するのかを検討する。

2 実験概要

実験手続きや課題は、我々の先行研究 [14] を踏襲する。実験は操作前の身体表象を測定するプレテスト、身体表象の操作を行うトレーニング、操作後の身体表象を測定するポストテストの3つのフェーズからなる。テスト時の課題は、指合わせと呼ばれ、図1のように顔の前で肘を伸ばし両手の人差し指を同じ高さで合わせるというものである。間に挟まれるトレーニングでは、手が表示される位置が上下方向へずらされた映像

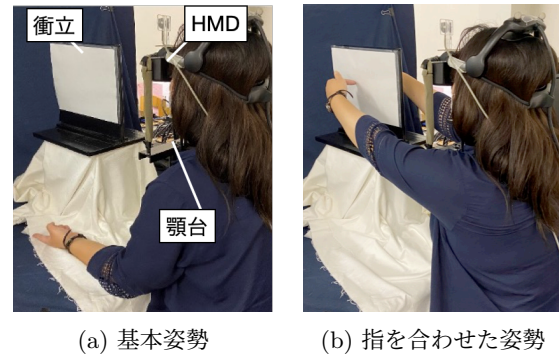


図1: 指合わせ課題中の姿勢
Fig. 1 Postures during test task.

を観察しながら、目標物へ指を合わせる課題を行った。

上で記したように、先行研究 [14] のトレーニングでは、身体表象における手の垂直位置の変化を促進するであろう2つの手がかりが得られるように目標物を表示していた。つまり、両手を視覚的に同じ高さへ同時に動かすよう設定された。そこで本研究では、同時性、視覚的同位性が共にある条件として、先行研究のデータ [14] を利用し、残りの3条件、同時性あり・同位性なし、同時性なし・同位性あり、同時性なし・同位性なし、を同様の手続きを用いて実施する。同時性がある場合は両手を同時に動かし、ない場合は各手を交互に動かすこととする。また、視覚的同位性がある場合は両手を異なる高さへ動かし、視覚的同位性がない場合はそれぞれの手を異なる高さへ動かすこととする。

全条件の身体表象の変化量を比較することにより、同時性と同位性が身体表象の変化に与える影響を検討する。同時性と同位性のいずれか、または両方が含まれているときに変化量が多い場合、その要因が変化を促進していると考えられる。また、同時性と同位性が共にない条件で変化が起きなかった場合は、同時性、および/または、同位性は身体表象の変化のための必須条件となる。

3 実験 1

トレーニングにおける、両手の動きの同時性と視覚的同位性の影響を検討するため、先行研究 [14] で行っていない3条件を実施し、変化量の比較を行う。

3.1 使用機材

参加者はHMD (head mounted display) を装着した状態で全ての課題を行う。ビデオスルー型 HMD (Canon, HM-A1) および MREAL Platform System (Canon, MP-110) を使用した。参加者の頭の位置は視覚実験用顎台 (NAMOTO, TKD-UK1) により、固定された。後に説明するテストで使用する衝立は、自作したものである。

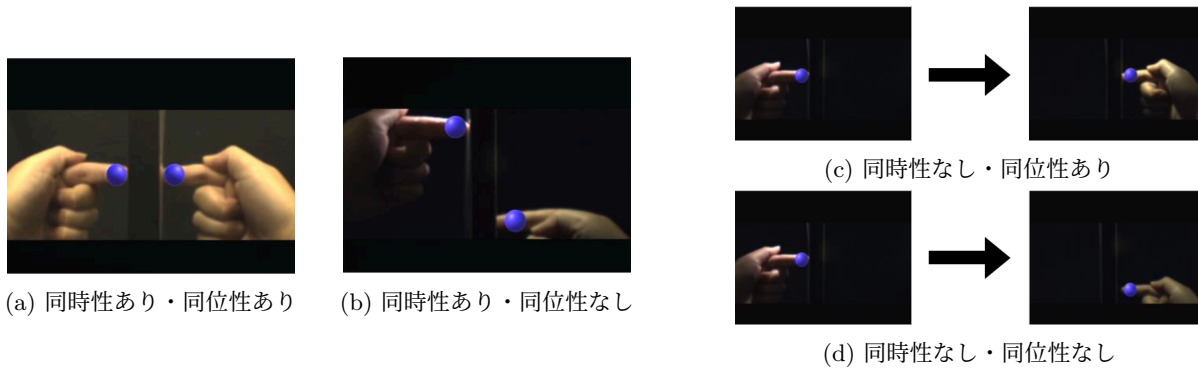


図 2: 各条件での仮想球の表示位置

Fig. 2 Virtual balls in each condition.

3.2 課題

上述の通り、各条件はプレテスト、トレーニング、ポストテストの順で行った。プレ、ポストテストの課題は図 1 の指合わせである。HMD が暗転した状態で、参加者は目を閉じ、両手の人差し指を顔の前で同じ高さで合わせるよう求められた。参加者は始めに、図 1a のように人差し指のみを伸ばした状態で、机の上に両手を置く。そして、実験者の合図により、肘を伸ばしたまま両手をあげ、ちょうど良い高さへ達したと感じたら動きを止め、手首を内側へ曲げる。その後、手の高さは変えずに、図 1b のように人差し指が衝立に当たるまで手を内側へ動かす。衝立により両手が遮られるため、高さの正確性のフィードバックは得ることができなかった。衝立にはカーボン紙が設置されており、強く押すことにより、参加者の手の位置が記録された。

トレーニングでは、HMD に図 2 のように仮想の球が表示された。参加者はテスト課題と同様の動きで、仮想の球に人差し指で触れることを求められた。なお、手を内側へ動かす前の過程は HMD に表示されない範囲で行われた。そのため、手が視野に入った時点で、目標の球と位置がずれていた場合は修正を許可した。ただし、手を衝立へ向けて動かし始めたのちは、高さの調整は許可しなかった。参加者は衝立に指が触れたら動きを止め、3 秒後に仮想の球が消えたら、触る際の動きを逆にたどり、机上へと手を戻した。参加者が基本姿勢に戻ったことを確認したのち、次の球を表示させた。トレーニングにおける実際の手の位置は記録せず、実験者が目視にて球に触れたことを確認した。

ここで、HMD に表示されない位置での手の持ち上げを求めたのは、運動の学習を防ぎ、かつ、参加者に映像のずれを意識させないためである。手の位置を観察しながら手を動かすことで、参加者は運動と手の位置の対応づけを行なってしまい、目的とする身体表象の変化が妨害される可能性が高い。さらに、机からの主観的な移動量と HMD に表示され始めるタイミング

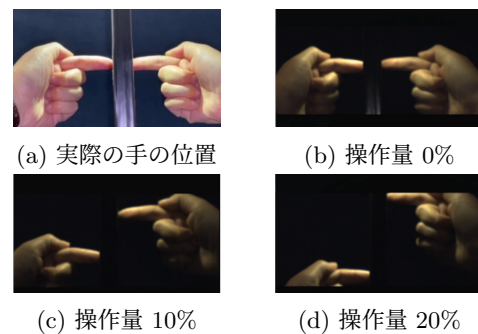


図 3: 各操作量における表示位置の変化

Fig. 3 Displayed hands in each manipulation.

から、映像のずれの大きさが推定できる。すると、ポストテスト時に参加者がトレーニングでのずれを勘案に入れた行動をとってしまう。手を持ち上げている間に手を観察しないことで、これらを防ぐことができる。

3.3 操作

トレーニング中に表示される手の表示位置を操作した。HMD の左目に対応するカメラから得られた画像を左右半分に分割した¹。そして、右半分を上へ、左半分を下へずらして表示した。この操作により、左右の手が実際の位置から上下にずれて表示されることとなる。HMD の縦の幅を 100% とし、画面の各側をそれぞれ 10%、20% ずらす 2 条件と、ずらさない 0% 条件を設定した。図 3 は各操作の適用された映像を示している。画像をずらすことにより生じた空白を、黒い帯で隠すため、20% 以上ずらすと手が観察できなくなる。10% のズレが約 2cm に相当し、両手をずらすために、左右の手が実際にはあっている時、10% 条件では表示される両手の間に約 4cm のズレが生じる。

トレーニング中の条件の操作は、図 2 のように仮想の球を表示させる位置や順番により行った。同時性

¹ 予備実験により、どちらの目のカメラでもパフォーマンスに変化がないことを確認している

表 1: 参加者の情報

	性別		平均年齢 括弧内は <i>SD</i>	利き手		利き目	
	男	女		右	左	右	左
実験 1							
同時性あり・同位性あり	21	2	21.91 (0.880)	19	4	12	11
同時性あり・同位性なし	16	4	21.00 (1.049)	17	3	11	9
同時性なし・同位性あり	16	4	20.95 (1.023)	18	2	11	9
同時性なし・同位性なし	15	5	21.75 (1.449)	18	2	12	8
実験 2	11	11	21.64 (0.881)	21	1	17	5

がある場合は、球は衝立の左右に同時に表示され、参加者には両手で同時に球に触れることを求めた。同時性がない場合は、球は衝立の左右に交互に表示され、表示された側の手で球に触れるよう求めた。また、視覚的同位性がある条件では、左右の球は操作された画面上で同じ高さに表示され、ない条件では異なる高さに表示された。同時性がない時は、連続する 2 つの試行（左右の手が一回ずつ）の球の高さを操作した。球が表示される高さは、予め画面の縦幅を 5 等分した 5ヶ所が設定されており、各位置から 1 回ずつ、ランダムな順で選択された。同位性がない場合の 2 つの球の距離は、各距離が各参加者の各条件で同じ回数だけ表示されるよう設定された。

3.4 方法

参加者

各条件で 20 名のデータを集めた。性別、年齢、利き手、利き目の情報を表 1 にまとめて示す。利き目の測定にはローゼンバッハ法 [15, 16] が用いられた。後の分析では、利き手、利き目の結果への影響はなかったため、その別を問わず分析を行った。複数の参加者が複数の条件に参加していた。いずれか 1 条件に参加した参加者が 18 名、2 条件に参加した参加者が 6 名、3 条件に参加した参加者が 10 名、全ての条件に参加した参加者が 5 名であった。全参加者が全条件を行っていないため、参加者間計画として分析を行う。参加者間計画の方が有意差が出にくいことを考慮すれば、この扱いは問題ないと考えられる。矯正を含め、全参加者が正常視力を有した。

手続き

初めに実験の簡単な説明を行い、参加同意書に署名をした参加者のみが実験へと参加した。続いて、実験中の手順の説明、椅子や顎台の位置の調整、および、手の動かし方の練習の後、実験を開始した。

プレテストを行う前に、参加者は HMD を装着せず、手を観察しながら、指合わせ課題を 2 回行った。これは、前の条件により生じた身体表象のずれをキャンセルするためである。続いて、参加者はプレテストとして、何も観察せずに指合わせ課題を 3 回行ったのち、

トレーニング課題を行った。3 種類のずれ (0%, 10%, 20%) のうち、いずれかのずれが適用された画面を観察しながら、トレーニングが行われた。上述の通り、5ヶ所に球が表示されるため、同時性がある条件では両手を同時に 5 回、同時性がない条件では各手をそれぞれ 5 回球に合わせた。同時性がない条件では、左手から課題を始めた。トレーニング終了後、参加者はポストテストとして、プレテストと同様に指合わせを 3 回行った。プレテストの終了後、参加者は HMD を外し、身体所有感に関する質問紙に回答した。実験中に見ている右手（左手）を自分の物であると感じたかを、全くそう思わない (−3) からとてもそう思う (+3) の 7 件法で回答させた。回答後、参加者は 5 分間の休憩を与えられ、その間、自由に体を動かすことができた。各フェーズ間で、実験者が準備を行う 30 秒以下の短い時間があつたが、その間は HMD が暗転された状態で、机の上に手を置き、目を閉じて待機させた。以上の手続きを各条件の全てのずれ条件で行った。

分析

まず、プレテスト、ポストテストの左右の手の垂直位置のずれ（垂直誤差）を算出した。垂直方向のみの操作を行ったため、奥行き方向は分析の対象としない。垂直誤差は、左手の人差し指の垂直位置から右手の人差し指の垂直位置を引いたものとする。よって、両手の人差し指を同じ高さに合わせると垂直誤差は 0、左手の位置が高い場合は正の値、右手の位置が高い場合は負の値となる。各テストの 3 回の測定結果を平均した値を用いた。

身体表象の変化は、プレテストからポストテストへの垂直誤差の変化から分析する。ポストテストの垂直誤差からプレテストの垂直誤差を引くため、ポストテストで左手をより上方に、そして（または）、右手をより下方へ動かしした場合、変化量は正の値となり、その逆の場合は負の値となる。実験では、右手が実際より上へ、左手が実際より下へ表示されるように操作したため、それに合わせて、身体表象が変化したならば、指を合わせるために、右手をより下方へ、左手をより上方へ動かそうとする。よって、垂直誤差の変化量は

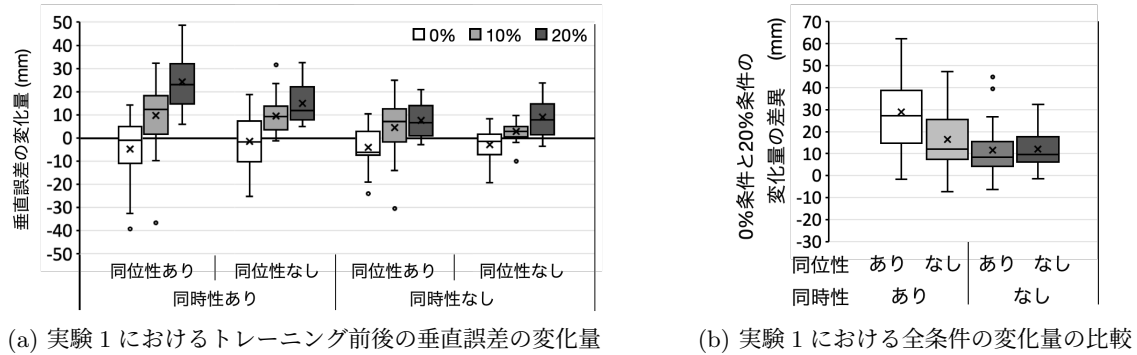


図 4: 実験 1 における身体表象の変化量の結果

Fig. 4 Modification of arm position in body representation in Experiment 1.

正の値となるはずである。

HMD の装着による視覚情報の変化によって生じる身体表象の変化は、0%条件の結果に反映される。よって、映像をずらした 2 条件の垂直誤差の変化量が 0%条件より大きかった場合、映像の操作により身体表象の変化が生じたといえる。なお、身体所有感の得点は、条件ごとに -3 から +3 点で採点した。

複数の指標において、結果が正規分布をしていなかったことが Shapiro-Wilk 検定により示されたため、統計検定にはノンパラメトリック検定を用いる。第一に、各条件におけるずれの大きさの垂直誤差の変化量への影響を分析する。視覚情報の変化に伴って、身体表象が変化するため、ずれが大きいくほど変化量も大きくなることが予測される。各条件で、各参加者は全てのずれ条件を遂行しているため、分析にはフリードマン検定を用い、ずれの大きさの効果が有意であった場合、ウィルコクソンの符号順位検定を用い条件間の比較を行う。

第二に、トレーニングの内容により身体表象の変化量に差異があったかを分析する。ずれのない 0%条件の垂直誤差の変化量を基準とし、ずれの大きい 20%条件の垂直誤差の変化量から 0%の変化量を引いた値を比較する。この際、先行研究 [14] のデータも含め、4 条件（同時性あり・同位性あり、同時性あり・同位性なし、同時性なし・同位性あり、同時性なし・同位性なし）の比較とする。分析には、クラスカル・ウォリス検定を用い、トレーニング内容の効果があつた場合、マン・ホイットニーの U 検定を用い条件間の比較を行う。多重比較の有意水準の調整には、いずれもホルムの方法を用いた。

3.5 結果

図 4a にプレテストからポストテストへの垂直誤差の変化量を示す。なお、同時性あり・同位性ありの条件は、先行研究 [14] のデータを利用している。残りの 3 つの条件で変化量を分析したところ、全ての条

件で、ずれの大きさの効果が有意であつた ($\chi^2(2) > 12.500, ps < 0.005, \eta^2s > 0.300$)。多重比較の結果、全ての条件で、0%条件より 10%、20%条件で変化量が有意に大きかった ($ps < 0.035, rs > 0.500$)。10%条件と 20%条件の間の変化量の差異は、同時性があり、同位性がない条件で有意傾向 ($p = 0.083, r = 0.388$)、同時性がなく、同位性がある条件で有意差はなく ($p = 0.255, r = 0.251$)、同位性がない条件で有意であつた ($p = 0.030, r = 0.555$)。先行研究 [14] でも同様の結果が得られたため、全ての条件で、身体を表示位置の操作による身体表象の変化が生じたことが示される。

続いて、各トレーニング課題を直接的に比較するために、20%条件の変化量から 0%条件の変化量を引いた値を図 4b に示す。分析の結果、トレーニング課題の効果が有意であつた ($\chi^2(3) = 16.100, p = 0.001, \eta^2 = 0.846$)。同時性、同位性が共にあるトレーニングにおいて、同時性のない 2 条件よりも有意に ($ps < 0.005, rs > 0.365$)、同位性のみがない条件よりも有意傾向で ($p = 0.063, r = 0.266$)、変化量が大きかった。他の条件間には有意な差はなかった ($ps > 0.780, rs > 0.125$)。以上より、同時性と同位性が共にある場合に身体表象の変化が最も促進されることが考えられる。

最後に図 5 に各条件における、各手の身体所有感の結果を示す。同時性と同位性が共にない条件の左手において、ずれの大きさの効果が有意傾向であつたものの ($\chi^2(2) = 5.760, p = 0.056, \eta^2 = 0.144$)、得点は全体的に高かった。なお、先行研究 [14] の同時性と同位性が共にある条件では、ずれの大きさにより有意（傾向）に身体所有感得点に変化していた。

3.6 考察

以上の結果は同時性と同位性がある条件で変化量が大きいことを示す。よって、両手を動かす際に同時性と同位性が共に揃うことが身体表象の変化に寄与することが示唆された。しかし、実験のトレーニングの課題における手の動きは、テストの課題における手の動

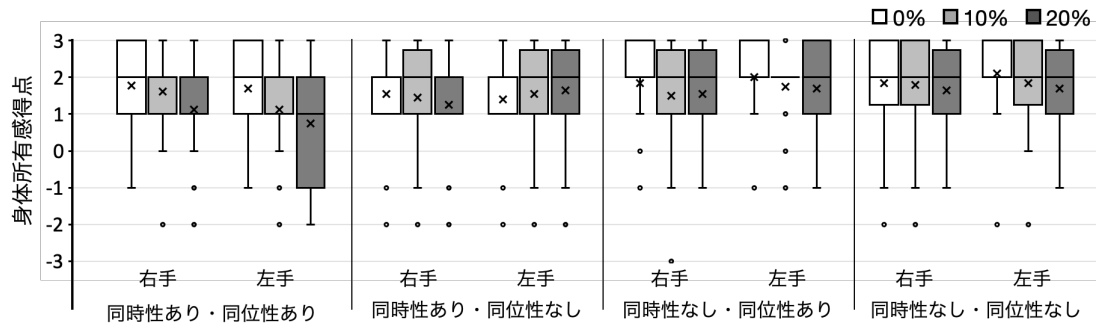


図 5: 実験 1 における各条件の各手における身体所有感得点

Fig. 5 Body ownership score of each hand in each condition in Experiment 1.

きと非常に類似していた。つまり、課題の達成に必要なとされる筋肉とその使い方が同じであった。そのため、指を合わせる課題に特有の運動、筋肉の動かし方を学習しただけであり、身体表象そのものは変化していないのではないかという疑義が残る。

特に、同時性、同位性が共にある条件では、高さの違いはあるものの、トレーニング課題でも両手の人差し指を同じ高さに合わせていた。このトレーニングとテストの課題の類似性の高さにより、他の条件よりも変化量が大きかっただけである可能性がある。また、他の条件も、指を内側へ動かすという基本的な動きはトレーニングとテストで共通していたため、これらの類似性をなくした場合、トレーニング前後で垂直誤差が変化しない可能性もある。そこで、実験 2 ではテスト課題としてトレーニングとは異なる筋肉とその動かし方が必要とされる課題を用い、実験 1 の結果が再現されるかを確認する。

4 実験 2

トレーニング課題とテスト課題の類似性を減らすため、テスト課題を変更した。基本的な実験の流れは、実験 1 と同様である。

4.1 使用機材

実験 1 と同様の HMD、顎台を使用した。後に説明する新しいテスト課題では、手の高さを測定するために、2 台の 60 cm まで測定可能なデジタルノギス（シワ測定）を立てて用いた。

4.2 課題

実験 1 と同様、各条件はプレテスト、トレーニング、ポストテストの順で行った。プレ、ポストテストの課題を、図 6 に示す高さ合わせの課題に変更した。2 つの測定器を用意し、参加者の頭程度の高さに測定部をセットする。参加者は HMD が暗転した状態で、目を閉じ、両手を測定部に乗せる。そして、実験者の合図の後、手が胸の前で同じ高さになるよう、測定部を下へと押していく。目標の高さへと達したと感じたら、



図 6: 実験 2 におけるテスト課題

Fig. 6 Test task in Experiment 2.

参加者は実験者に合図を送り、その際の測定部の机からの距離を測定した。

トレーニングは、実験 1 とほぼ同様であり、HMD に表示される仮想の球に人差し指で触れることを求めた。テストとの類似性を減らすために、手を上下させる過程を削除した。つまり、参加者はトレーニング開始と共に、両手を持ち上げ、トレーニング中に手を机に戻すことなく、仮想の球に触れることを続ける。参加者は、始めに、HMD に表示されない位置で手を持ち上げる。仮想の球が表示されたら、そのまま見えない位置で高さを調整した後、手を内側へ動かす。実験 1 と同様に、手が視野に入った時点で、目標の球と位置がずれていた場合は修正を許可した。参加者は衝立に指が触れたら動きを止め、3 秒後に仮想の球が消えたら、そのままの高さで HMD の表示範囲の外に達するまで、外側へと手を動かした。映像の操作やトレーニング中に表示される球の高さは実験 1 と同様である。

4.3 方法

参加者

22 名が実験に参加した。全ての参加者が全ての条件を遂行した。参加者の情報は表 1 に示す。実験 1 同様、利き手、利き目の結果への影響はなかったため、

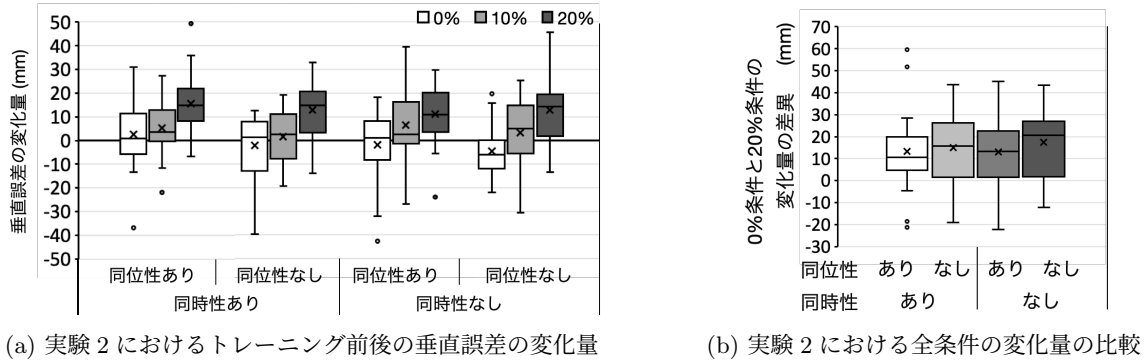


図 7: 実験 2 における身体表象の変化量の結果

Fig. 7 Modification of arm position in body representation in Experiment 2.

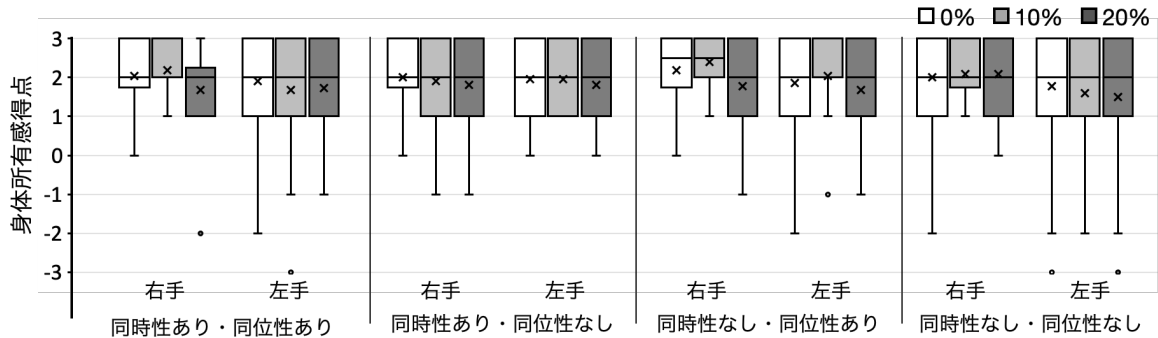


Fig. 8 Body ownership score of each hand in each condition in Experiment 2.

後の分析では、その別を問わず分析を行った。

手続き

上述の課題の内容の変更以外は実験 1 と同一である。ただし、参加者内計画での実施であったため、各参加者の条件の順番はカウンターバランスが取られた。

分析

分析対象、分析方法は参加者内計画であるため、全ての分析でフリードマン検定とウィルコクソンの符号順位検定を用いたこと以外は、実験 1 と同様である。

4.4 結果

図 7a にプレテストからポストテストへの垂直誤差の変化量を示す。4 条件のそれぞれで、ずれの大きさの効果を分析した結果、全ての条件でその効果が有意であった ($\chi^2(2) > 10.000, ps < 0.007, \eta^2s > 0.230$)。多重比較の結果、全ての条件において、20%条件における変化量が 0%条件における変化量より有意に大きかった ($ps < 0.009, rs > 0.635$)。さらに、同時性のある 2 条件では、10%条件よりも 20%条件における変化量が有意に大きかった ($ps < 0.025, rs > 0.555$)。また、図 7b に示した 20%条件の変化量から 0%条件の変化量を引いた値は、条件による効果は有意ではなかった ($\chi^2(3) = 1.960, p = 0.580, \eta^2 = 0.030$)。

最後に、身体所有感得点を図 8 に示す。各条件におけるずれの大きさの効果は、同時性、同位性が共にあ

る条件の右手で有意傾向であった ($\chi^2(2) = 5.620, p = 0.060, \eta^2 = 0.128$)。また、同時性がなく、同位性がある条件の右手で有意であり ($\chi^2(2) = 8.190, p = 0.017, \eta^2 = 0.186$)、10%条件より 20%条件で身体所有感が有意に低かった ($p = 0.030, r = 0.555$)。とはいえ、他の各条件、各手ではずれの大きさの影響は有意ではなく、効果が有意（傾向）であった条件も含め、身体所有感得点の平均は 1.5 点以上で、ほとんどの条件では 1.7 点以上の比較的高い得点であった。

4.5 考察

実験 1 と同様に、同時性、同位性の有無に関わらず、ずれの大きさの効果が有意であり、映像の操作により身体表象の変化が起こったことが示された。しかし、実験 1 とは異なり、同時性、同位性の有無が変化量の大きさに影響することはなかった。そこで、実験 1 と実験 2 の結果の差異を明確にするため、両実験の結果を直接比較する。

5 実験 1 と実験 2 の比較

両実験は課題の違いと参加者間内の違いはあるものの、同じ手続きを用いており、指標は同じものとなっている。そこで、両実験の各条件間で 20%条件から 0%条件を引いた変化量を比較し、身体表象の変化量に差異があるかを分析する。条件ごとにマン・ホイッ

トニーのU検定を実施した結果、同時性、同位性が共にある条件でのみ、実験1の変化量の方が実験2の変化量より有意に大きかった ($p = 0.005, r = 0.419$)。他の条件では、実験間の変化量の差異は有意ではなかった ($p_s > 0.130, r_s < 0.235$)。以上より、実験間の差異は同時性と同位性が共にある条件の変化量が、実験2において実験1よりも小さかったために生じたことが示される。

6 総合考察

本研究は、両腕の表示位置を操作し、身体表象における両腕の位置の操作を試みた。操作された映像を観察しながら課題を行う際に、両腕を同時に動かすか（同時性）、および、同じ位置へ動かすか（同位性）を変更し、対称的な部位の身体表象の更新に、それらの情報が利用され、変化が促進されるかを検討した。実験の結果、いずれの課題を用いた条件でも、表示位置を操作することにより身体表象の変化が生じた。一方、トレーニング中の課題とテスト課題の類似性が高い実験1では、同時性と同位性がそろった条件のみ変化が促進され、類似性が低い実験2では、それら2つの変化量への影響はなかった。

全ての条件で、身体表象の変化が生じたという結果は、身体の構造と異なる身体表象の変化を示した我々の先行研究[14]の結果と一致するものである。トレーニングとテストの課題の運動の共通性を削除しても、変化が生じた点は、単に腕の動かし方を学習したのではなく、身体表象の変化が起きたことを示し、知見をより強固なものとする。また、先行研究[14]の実験結果は、片手の視覚情報のみを操作した状態で与えると、視覚情報が与えられていない手の表象も操作にそって変化することを示していた。この結果を踏まえると、本研究の交互に手を動かす条件では、互いに変化を打ち消しあい、最終的な変化量が小さくなる可能性も考えられた。しかし、実験2の結果、それらの条件に両手を同時に動かす条件との差異は見られなかった。これは、バラバラにでも視覚情報が与えられれば、その影響が強く働くことを示す。ただし、本研究では、片手ずつ交互に行っていたため、例えば、右手を5試行行った後に左手を行うなど、各手を別々にトレーニングすると、後に行われた手の表象に影響される可能性もあり、今後の検討が必要である。

実験後の参加者のコメントでは、身体の構造そのものが変化した（e.g., 左腕が低い位置から生えている）というコメントはなかった。よって、本実験における変化は、特に固有受容感覚情報を空間内の本来とは異なる位置に対応づける変化であった。つまり、例えば、顔の前に手を持ってきた際に固有受容器官から得られ

る情報を、視覚情報から得られた実際より低い位置へと対応づけを更新していたということである。このような固有受容感覚の変化は、逆さめがねの研究に代表される複数の研究により調べられている[17, 18]。しかし、それらの研究は、片手だけまたは全身の構造を保ったままでの変化を検討している。本研究は、身体の構造（両腕の対称性）と異なる変化を行い、変化に利用される情報を明らかにしようとしたという点で新しい。

一方、予測していた、同時性、同位性の効果は実験1でのみ部分的に生じ、実験2ではそれらの影響はなかった。実験1の同時性と同位性を共に有する条件で観察された変化の促進は、トレーニングとテストの課題の類似性によるものであると考えられる。2つの実験の比較においても、この条件でのみ変化量が大きかった。以上の結果は、両腕の身体表象の変化において、同時性と同位性が変化の促進要因とならないことを示す。

手が（視覚的に）同じ高さになる時、つまり、手の高さの基準となる時の情報があれば、その分、変更が容易になると考えられ、この結果は予想に反したものであった。本実験で、この手がかりが変化を促進しなかった原因として、参加者が意識的に身体表象の変化を起こそうとしていなかった、つまり、映像がずれていて、そのずれの中で課題をうまくできるようになるという目標が与えられていなかったためであると考えられる。他の固有受容感覚の調整に関する先行研究では、自身の手の動きと視覚的な手の動きが大きくずれており、与えられた課題の達成のために、意識的な努力を伴い修正を行うことがほとんどである[17, 19]。Mazzoni and Krakauer[20]は、顕在的な手がかりが、潜在的な固有受容感覚の変化を妨害する可能性を示している。

本実験では、参加者にずれを教示せず、参加者自身の手が表示されている映像をリアルタイムで操作し、提示していた。そのため、多少の違和感を覚えた参加者はいるものの、大きな負荷を要することなく、簡単にトレーニングを実行できていたことがコメントで言及されていた。また、図5, 8に示される通り、いずれの実験でも参加者は高い身体所有感を持った状態で課題を遂行できていた。以上より、本実験は比較的潜在的な身体表象の変化を対象としており、顕在的な手がかりである同時性と同位性が変化を促進しなかったと考えられる。よって、今後の課題として、参加者が意識的に変化を起こそうとする条件との比較は、顕在的な変化のプロセスと、潜在的な変化のプロセスの差異を明らかにするだろう。

予測した手がかりによる変化の促進は生じなかった

が、本研究におけるトレーニングを通した身体表象の変化は、アバタやロボットの遠隔操作における身体表象に着目したトレーニングの可能性を示す。本実験では、参加者自身の前腕の映像を操作したため、身体所有感も高く、少ない試行で変化が起こっていた。これに基づくと、事前に参加者自身の一人称視点映像を用いて、身体表象を操作しておけば、アバタやロボットへの自然な移行が可能であると考えられる。また、本実験では目を閉じている時の動きが変化していたことから、身体表象そのものを変化させておけば、視界が悪い中での遠隔操作も容易にできるはずである。ただし、本実験での変化量は映像の操作量より小さいことには注意が必要である。例えば、10%条件では操作されたそれぞれの手の位置が約2 cm ずつ操作されるが、変化量の大きい実験1の同時性、同位性が共にある条件でも、ポストテストでの両手のずれは平均1.5 cm 程度であった。操作量と変化量の関係に関しては、今後の検討が必要である。

7 結論

本研究では、対称的な身体部位である左右の前腕の身体表象の変化に影響する要因を探るため、変化の基準となる点が獲得しやすくなるであろう2つの要因を操作して、変化量を比較した。操作した要因は、表示位置を操作した状態で行う課題で両前腕を同時に動かすか（同時性）、同じ位置へ動かすか（同位性）である。実験の結果、それら2要因が変化を促進することではなく、操作時の課題と測定時の課題の類似性の影響が大きかった。しかし、それらの要因が共にない場合でも表示位置の操作された画像を観察しながら課題を行うことで、身体表象の変化が生じた。本実験の設定では、比較的潜在的に変化が起こっていたと考えられるため、顕在的な手がかりの影響が小さかった可能性がある。今後は、参加者の課題中の知識の影響を含め、身体表象の変化に影響する要因を明らかにしていく必要がある。

謝辞

本研究はJSPS 科研費JP20K19853の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] Matthew Field, David Stirling, Fazel Naghdy, and Zengxi Pan. Motion capture in robotics review. In *2009 IEEE international conference on control and automation*, pages 1697–1702. IEEE, 2009.
- [2] Daniele Romano, Elisa Caffa, Alejandro Hernandez-Arieta, Peter Brugger, and Angelo Maravita. The robot hand illusion: Inducing proprioceptive drift through visuo-motor congruency. *Neuropsychologia*, 70:414–420, 2015.
- [3] Maria V Sanchez-Vives, Bernhard Spanlang, Antonio Frisoli, Massimo Bergamasco, and Mel Slater. Virtual hand illusion induced by visuomotor correlations. *PLoS ONE*, 5(4):e10381, 2010.
- [4] Antonella Maselli and Mel Slater. The building blocks of the full body ownership illusion. *Frontiers in Human Neuroscience*, 7:83, 2013.
- [5] Glenn Carruthers. Types of body representation and the sense of embodiment. *Consciousness and Cognition*, 17(4):1302–1316, 2008.
- [6] Matthew Botvinick and Jonathan Cohen. Rubber hands ‘feel’ touch that eyes see. *Nature*, 391(6669):756, 1998.
- [7] Bigna Lenggenhager, Tej Tadi, Thomas Metzinger, and Olaf Blanke. Video ergo sum: manipulating bodily self-consciousness. *Science*, 317(5841):1096–1099, 2007.
- [8] Parastoo Abtahi, Mar Gonzalez-Franco, Eyal Ofek, and Anthony Steed. I’m a giant: Walking in large virtual environments at high speed gains. In *CHI ’19: Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pages 1–13. Association for Computing Machinery, 2019.
- [9] Eike Langbehn, Gerd Bruder, and Frank Steinicke. Scale matters! analysis of dominant scale estimation in the presence of conflicting cues in multi-scale collaborative virtual environments. In *2016 IEEE Symposium on 3D User Interfaces (3DUI)*, pages 211–220. IEEE, 2016.
- [10] Ana Tajadura-Jiménez, Aleksander Väljamäe, Iwaki Toshima, Toshitaka Kimura, Manos Tsakiris, and Norimichi Kitagawa. Action sounds recalibrate perceived tactile distance. *Current Biology*, 22(13):R516–R517, 2012.
- [11] Ana Tajadura-Jiménez, Manos Tsakiris, Torsten Marquardt, and Nadia Bianchi-Berthouze. Action sounds update the mental

(2022 年 5 月 28 日受付)

representation of arm dimension: contributions of kinaesthesia and agency. *Frontiers in Psychology*, 6:689, 2015.

- [12] Pierre Bourdin, Matteo Martini, and Maria V Sanchez-Vives. Altered visual feedback from an embodied avatar unconsciously influences movement amplitude and muscle activity. *Scientific Reports*, 9(1):1–9, 2019.
- [13] Marc O Ernst and Martin S Banks. Humans integrate visual and haptic information in a statistically optimal fashion. *Nature*, 415(6870): 429–433, 2002.
- [14] 松室美紀, 小林晶, 江波戸傑, 柴田 史久, and 木村朝子. 身体表象における対称的な身体部位の表象形成. 認知科学, in press.
- [15] Guntram Kommerell, Christina Schmitt, Miriam Kromeier, and Michael Bach. Ocular prevalence versus ocular dominance. *Vision Research*, 43(12):1397–1403, 2003.
- [16] Olga Seijas, Pilar Gómez de Liaño, Rosario Gómez de Liaño, Clare J Roberts, Elena Piedrahita, and Ester Diaz. Ocular dominance diagnosis and its influence in monovision. *American Journal of Ophthalmology*, 144(2): 209–216, 2007.
- [17] Erin K Cressman and Denise YP Henriques. Sensory recalibration of hand position following visuomotor adaptation. *Journal of Neurophysiology*, 102(6):3505–3518, 2009.
- [18] 吉村 浩一. 3つの逆さめがね：変換された見えの世界への冒険. ナカニシヤ出版, 改訂 edition, 1997.5 1997.
- [19] Ahmed A Mostafa, Danielle Salomonczyk, Erin K Cressman, and Denise YP Henriques. Intermanual transfer and proprioceptive recalibration following training with translated visual feedback of the hand. *Experimental Brain Research*, 232(6):1639–1651, 2014.
- [20] Pietro Mazzoni and John W Krakauer. An implicit plan overrides an explicit strategy during visuomotor adaptation. *Journal of Neuroscience*, 26(14):3642–3645, 2006.

[著者紹介]

松室 美紀 (正会員)



2008 年お茶の水女子大学文教育学部卒業. 2013 年名古屋大学大学院情報科学研究科博士後期課程 単位取得退学. 博士 (情報科学). 名古屋大学大学院情報科学研究科心理・認知科学専攻研究員を経て, 2021 年より, 立命館大学情報理工学部助教. 推論, 機器使用時のユーザの認知プロセスに興味があり, 認知アーキテクチャを用いた認知プロセスのシミュレーション, 心理実験を用いた研究に従事している.

小林 晶



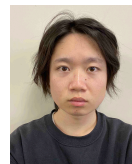
2020 年立命館大学情報理工学部情報コミュニケーション学科卒業. 2022 年同大学 情報理工学研究科情報理工学専攻修士課程修了. VR・MR 使用時にユーザが自身と異なる身体を操作した場合, ユーザが持つ身体表象にどのような影響を与えるのかに興味があり, VR・MR にて操作する手足の位置変更による行動変化を分析する研究に従事. 修士 (工学).

岡松 育夢



2021 年立命館大学情報理工学部情報理工学科実世界情報コース卒業. 現在同大学情報理工学研究科情報理工学専攻博士前期課程 在籍. 学士 (工学).

江波戸 傑



立命館大学大学院情報理工学研究科情報理工学専攻博士前期課程に所属. VR・MR と認知の相互作用に興味があり, VR・MR にて四肢の表示位置を操作した場合の身体表象への影響を分析する研究に従事. 学士 (工学).

柴田 史久 (正会員)



1996 年大阪大学大学院基礎工学研究科博士前期課程修了. 1999 年同研究科博士後期課程修了. 大阪大学産業科学研究所助手を経て, 2003 年より立命館大学理工学部助教. 同大学情報理工学部准教授を経て, 2013 年より同教授. モバイルコンピューティング, 複合現実感等の研究に従事. 博士 (工学).

木村 朝子 (正会員)



1996 年大阪大学基礎工学部卒. 1998 年同大学院基礎工学研究科博士前期課程修了. 同大学助手, 立命館大学理工学部助教, 科学技術振興機構さきがけ研究員等を経て, 2009 年 4 月より立命館大学情報理工学部准教授. 現在, 同 教授. 実世界指向インタフェース, 複合現実感, マルチモーダル・クロスモーダルインタフェースの研究に従事. 博士 (工学).