



身体が表示位置が身体表象に与える影響の分析 (3)

—不連続な前腕モデルを用いた検討—

Analysis of the Effect of Displayed Position of Body Parts on Body Representation (3)
—An Investigation Using a Discontinuous Forearm Avatar—

秋葉直人¹⁾, 森田磨里絵²⁾, 柴田史久¹⁾, 木村朝子¹⁾

Naoto AKIBA, Marie M. MORITA, Fumihisa SHIBATA, and Asako KIMURA

1) 立命館大学大学院 情報理工学研究科 (〒567-8570 大阪府茨木市岩倉町 2-150)

2) 大阪工業大学 情報科学部 (〒573-0196 枚方市北山 1-79-1)

概要: 本研究では, VR アバタの腕の一部を透過し, 身体の視覚的連続性を操作した際の身体表象変化を検討した. 実験では, 手先のみが提示されるアバタを用い, 手の位置を実身体からずらした状態で身体動作を行った後, 腕の身体表象変化を測定した. その結果, 透過の有無によらず身体表象の変化が生じ, 身体部位の連続性に関する知識が身体表象形成に寄与する可能性が示された.

キーワード: 身体表象, 身体の連続性, VR アバタ

1. はじめに

1.1 身体表象

人間は, 自分の身体がどのような姿勢を取り, どのような大きさや形状をしているかという全般的な知識やイメージを持っており, このような自分の身体に関する心的表象を身体表象と呼ぶ[1]. 身体表象は非常に柔軟に変更されるものであり, 視覚や皮膚感覚, 筋肉・腱・関節などの固有受容器から得られる固有受容感覚など, 複数の感覚器官の情報を脳内で統合することによって更新される.

ラバーハンド錯覚[2]やロボットハンド錯覚[3]などの先行研究の結果から, 視覚や触覚などから得られる感覚情報や実身体の動きとの同期によって体性感覚ドリフトが発生し, 身体表象を実際の身体と異なる位置へと変化させることが可能である. また, 人間は身体表象を元に行動を決定していることが知られており, 身体表象が変化すれば人間の行動や動作も変容する[4].

1.2 本研究の目的

身体表象の形成には, 視覚や体性感覚などの感覚器官から得られるボトムアップな感覚入力だけでなく, 長期的な経験から構築された身体の形状や構造に関するトップダウンな知識も影響を及ぼしている. 例えば先行研究では, ゴムの手を 90 度回転させて提示すると, 同期した視触覚刺激が与えられてもラバーハンド錯覚が生じないことが示されている[5]. このことは, ゴムの手が通常の身体とは異なる位置に配置されていることで, 身体の姿勢に関する

知識を活用できないため, ゴムの手に対して身体表象を形成することができなかったと説明できる.

本研究では, 身体の構造に関する知識のうち, 特に「身体は連続した構造をもつ」という身体の連続性に着目し, 身体表象の形成におけるトップダウンの知識の効果について検討を行う. すべての身体部位は全てつながっており, 1 つの身体を構成していることから, 身体の連続性に関する知識は安定的な身体表象を形成するために活用されている可能性が考えられる. これまで, VR 空間上の特定の身体部位の位置を実身体からずらして表示し, その後の動作の変容を調べることによって, 身体が表示位置が身体表象に与える影響を検討する実験が行われてきた[6][7]. しかし, これらの研究は連続した身体を前提として実施されており, 身体の連続性が身体表象に対してどのような影響を及ぼしているのかについては検討されていない. 本研究では, アバタの右腕の手首から肩までの部分を透過させた不連続な前腕モデルを採用し, 視覚的に不連続性が身体表象の変化にどのような影響を及ぼすのかを検討した.

2. 実験

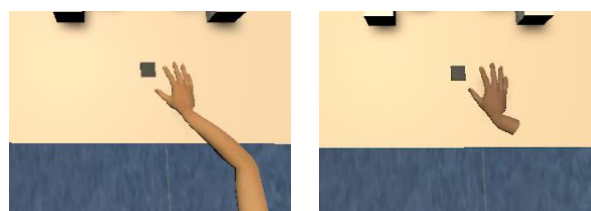
本研究では, 右腕の前腕モデルの表示位置を変更した状態でトレーニングを行い, その後のポストテストで右腕・左腕・右脚・左脚の身体表象を測定し, 不連続な前腕モデルを提示することによる身体表象変化への影響を分析した.



(a) ずれなし

(b) ずれあり

図 1: ずれ条件. トラックの位置は実際の参加者の身体位置を指し, ずれなしとずれありの実際の参加者の身体位置は同じである.



(a) 連続モデル

(b) 不連続モデル

図 2: 前腕モデル条件



図 3: Vive Pro の外観



図 4: Vive Tracker (2018) の外観

表 1: Vive Pro の仕様

画面解像度	2880×1600 (1440×1600 / eye)
視覚野	110 度
パネル方式	デュアル AMOLED
リフレッシュレート	90Hz

表 2: Vive Tracker (2018) の仕様

サイズ	Φ99.65mm×42.27mm
重量	89g
FOV	270°

表 3: HMD 管理用 PC の仕様

CPU	Intel® Core i7-7700 4.20 GHz
メモリ	32 GB
OS	Windows 10 Education
グラフィックボード	NVIDIA GeForce GTX 1060 6GB

2.1 実験参加者

実験には 20 名 (男性 8 名, 女性 12 名) が参加した. 平均年齢は 19.63 歳 ($SD = 1.739$) であった. 利き手は 20 名全員が右手, 利き足は右足 19 名, 左足は 1 名, 利き眼は右眼 13 名, 左眼 7 名であった. 矯正を含め, 全実験参加者が正常視力を有した. また, 参加者のヘッドマウントディスプレイ (HMD) を装着した VR 経験の有無を調査した結果, 経験あり 7 名, 経験なし 13 名であった.

2.2 実験条件

本実験では, 4 つの条件でトレーニング課題を行い, 各条件下で身体表象の変化が生じるか否かを検討した. 課題の実施条件は, 2 つのずれ条件 (ずれあり, ずれなし; 図 1) と 2 つの前腕モデル条件 (連続モデル, 不連続モデル; 図 2) を組み合わせた 4 条件で実験を行った. ずれなし条件では, アバタの右腕の仮想モデルを実身体の右腕と同じ位置に提示し, ずれあり条件では右腕の仮想モデルを実身体の右腕よりも 10cm 右側にずらして提示した. 連続モデル条件では, アバタの右腕の仮想モデルが手先から肩までが視覚的につながっているモデルを提示し, 不連続モデル条件では, 右腕の仮想モデルの手首から肩までの部分を透過したモデルを提示した. 連続モデルと不連続モデルとで,

参加者の腕の動きのモデルへの反映のさせ方は同じであった. 実験では, 各トレーニング課題において異なる条件を発生させていることを実験参加者に教示しなかった.

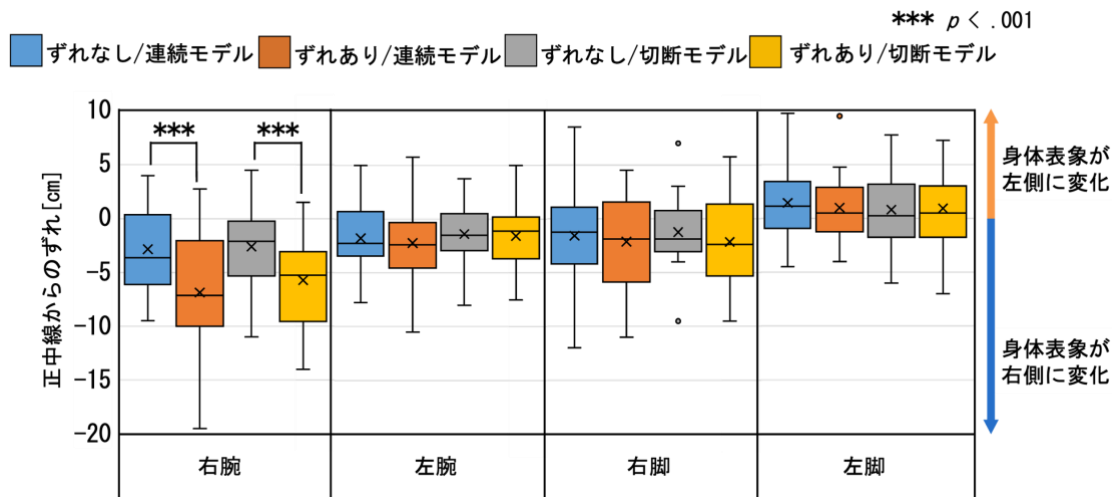
2.3 実験環境

トレーニング課題の際に必要な映像を投影するために Vive Pro を使用した (図 3, 表 1). また, 実験参加者の右腕・腰・右脚の位置を取得するために, 3 個の Vive Tracker (2018) を使用した (図 4, 表 2). また, 実験で使った PC の仕様は表 3 の通りである.

2.4 手続き

実験参加者はトレーニング課題を開始する前に事前準備を行った. 事前準備では HMD を装着せず, 実験者が指定した部位 (右腕・左腕・右脚・左脚) の位置を確認しながら動かす課題を行うことで, 実験参加者の身体表象を実身体と同じ位置へとリセットした.

事前準備の後, 実験参加者は HMD を装着し, 4 つのトレーニング条件のうちの 1 条件でトレーニング課題を行った. トレーニング課題では, VR 空間内で実験参加者の目の前に配置した 5 つの白い立方体のうち, 赤色に変化した 1 つにアバタの右手で触れ, その後初期位置に右手を戻す動作を 30 回繰り返すよう求めた. トレーニング終了時



には "Finish" という文字が画面上に表示した。

トレーニングの後は身体表象の変化を確認するためのポストテストを行った。ポストテストはトレーニング課題と同様、HMD を装着したままで行った。実験参加者には、目を閉じた状態であらかじめ教示した基本の姿勢を取り、実験者が指定した部位（右腕・左腕・右脚・左脚）を自身の正中線に移動させるよう求めた。身体部位を移動させる際は、肘や膝を伸ばしたまま移動させるよう教示した。実験参加者が正中線だと感じた位置に身体部位を移動させた後、手の中指または足の親指が正中線からどれだけずれたかを測定した。測定は、各部位につき 1 回ずつランダムな順序で実施した。以上の手続きを 1 試行とし、各トレーニング条件につき 2 試行ずつ、計 8 試行を行った。

2.5 指標

本実験では、ポストテストにおける各部位の正中線からのずれの平均を身体表象変化の指標とした。実験参加者から右にずれた場合を正の値、左にずれた場合を負の値として測定した。ずれの値が負である場合、実験参加者の身体表象は右に変化したと解釈できる。これは、右腕の身体表象が実身体より右側に変化したとき、実身体は身体表象上の右腕よりも左側にあり、実験参加者が認識する右腕を正中線に到達させると、実際の右腕は正中線よりも左側に来るためである。なお、ずれ条件においてアバタの右腕の仮想モデルは肘や膝を伸ばした状態で横方向のみに移動させたため、本実験では前後方向の身体表象変化については測定しなかった。

2.6 結果

各トレーニング条件における正中線からのずれの値を図 5 に示す。Shapiro-Wilk 検定を行った結果、右腕・左腕・右脚・左脚それぞれの身体部位において全てのトレーニング条件が正規分布に従わなかった。そのため、各身体部位に対して整列ランク変換を施した分散分析(ART ANOVA)を、ポストテストで測定した身体部位（右腕・左腕・右脚・左脚）ごとに行った。その結果、右腕については、ずれ条件の主効果が認められたが ($F(1, 19) = 43.46, p < .001, \eta^2 =$

0.433), 前腕モデル条件の主効果と交互作用は認められなかった(前腕モデルの主効果: $F(1, 19) = 1.12, p = 0.291, \eta^2 = 0.020$, 交互作用: $F(1, 19) = 0.18, p = 0.672, \eta^2 = 0.003$)。右腕のずれ条件間の差について、Wilcoxon 符号順位検定を用いた多重比較を行ったところ、ずれあり条件がずれなし条件に比べて有意に小さいことを確認した ($Z = 0.99, p < .001$, 平均値: ずれなし条件 = -2.72; ずれあり条件 = -6.30)。この結果は、右腕の身体表象が実験参加者から見て右側に約 3.6cm 変化したことを示している。また、左腕・右脚・左脚については、2 つの要因の主効果および交互作用は認められなかった。この結果は、身体表象の変化はトレーニングを行った部位にのみ発生し、その変化にはずれ条件の有無のみが影響を及ぼすということを示唆している。

3. 考察

全ての身体部位において、前腕モデル条件の主効果およびずれ条件との交互作用は認められなかった。このことは、前腕が視覚的に断絶した不連続なモデルであっても、連続モデルと同等の身体表象変化が生じることを示している。身体部位の視覚的な繋がりの有無にかかわらず、身体表象は柔軟に維持・更新できる可能性がある。

不連続な身体に対して身体表象が正常に更新された要因として、多感覚統合による補間処理が考えられる。序論で述べたように、身体表象は視覚や固有受容感覚などの複数の感覚情報を統合することで構築される[1]。本研究の不連続モデルは右腕の手首から肩までの部分が不可視であったものの、手先部分の視覚的な挙動は実験参加者の実際の運動と同期していた。この手先の視覚と運動の強い同期が確保されていれば、脳は既存の身体に関する知識に基づき、不連続な前腕部分の存在を補完できる可能性が考えられる。腕が不連続であるという視覚的な不自然さは、身体表象の形成に関わる情報として採用されず、手先から得られる視覚・運動情報が優先して多感覚統合に用いられた結果、連続した身体と同様に身体表象が更新されたといえる。一方、ずれ条件においては主効果が確認され、右腕の身

体表象が右側に約 3.6cm 変化した。この結果は、ラバーハンド錯覚等の先行研究[2][3]と同様に、視覚情報と実身体の動きの同期によって体性感覚ドリフトが発生したことを示している。この身体表象の変化は操作を行った右腕にのみ生じ、他の部位（左腕・両脚）には影響を及ぼさなかった。これは、不連続な身体に対する身体表象の更新が身体全体の座標系を歪めるような移動・変形によって辻褃を合わせているのではなく、対象の身体部位に局所的に作用することを示唆している。

4. 結論

本研究では、視覚的に不連続な前腕モデルが身体表象の変化にどのような影響を及ぼすのかを検討した。実験結果から、人間はアバタの腕の連続性に関わらず、手先における視覚と運動の同期さえ保たれていれば、透明身体に対しても柔軟に身体表象を維持・更新できることが明らかとなった。

謝辞 本研究は、本研究は、JSPS 科研費（24K21069・22KK0158）の助成を受け実施された。

参考文献

- [1] Carruthers, G.: Types of body representation and the sense of embodiment, *Consciousness and cognition*, 17, pp. 683-703, 2008.
- [2] Botvinick, M., Cohen, J.: Rubber hands 'feel' touch that eyes see, *Nature*, Vol. 391, No. 6669, pp. 756, 1998.
- [3] Caspar, E. A., Cleeremans, Haggard, P.: The relationship between human agency and embodiment, *Consciousness and Cognition*, Volume 33, Pages 226-236, 2015.
- [4] Warren WH Jr.: Perceiving affordances: visual guidance of stair climbing, *J Exp Psychol Hum Percept Perform*, pp. 683-703, 1984.
- [5] Tsakiris M., Haggard P.: The rubber hand illusion revisited: visuotactile integration and self-attribution, *J Exp Psychol Hum Percept Perform*, pp. 80-91, 2005.
- [6] 松下彩夏, 江波戸傑, 小林晶, 松室美紀, 柴田史久, 木村朝子: 身体が表示位置が身体表象に与える影響の分析—四肢間での位置知覚の転移の検討—, *日本認知科学会第 40 回大会発表論文集*, O3-002, pp. 37-40, 2023.
- [7] 秋葉直人, 松下彩夏, 森田磨里絵, 松室美紀, 柴田史久, 木村朝子: 感覚情報の確からしさが身体表象に与える影響の分析—視覚と固有受容感覚に着目した検討—, *日本認知科学会第 42 回大会発表論文集*, P2-44, pp. 493-496, 2025.