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～

Analysis of the Effect of Sensory Certainty on Body Representation —Focusing on Visual and Proprioceptive Cues—

秋葉 直人[1]，松下 彩夏[1]，森田 磨里絵[2]，松室 美紀[3*]，柴田 史久[1]，木村 朝子[1]，
Naoto Akiba, Ayaka Matsushita, Marie M. Morita, Miki Matsumuro,
Fumihisa Shibata, Asako Kimura,

[1]立命館大学大学院情報理工学研究科，[2]立命館情報理工学部，[3]立命館大学OIC総合研究機構
[1]Graduate School of Information Science and Engineering, Ritsumeikan University,
[2]College of Information Science and Engineering, Ritsumeikan University,
[3]Research Organization of Open Innovation and Collaboration, Ritsumeikan University
akiba@rm2c.ise.ritsumei.ac.jp（秋葉）

概要

身体表象とは，人間が自身の身体について持つイメージである．本研究では，個人内での感覚モダリティの確からしさと身体表象との関係を，視覚と固有受容感覚に着目し検討した．実験では，身体部位を視覚的にずらして表示したときの身体表象の変化と，個人の固有受容感覚の正確性を測定した．その結果，固有受容感覚が正確でない個人ほど身体表象が変化し，個人内での相対的な確からしさが身体表象変化に影響することを示した．

キーワード：身体表象，proprioceptive recalibration，人工現実感，multimodality

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ものであるかという心的表象を持っており，任意の瞬間における自分の手足の位置や角度の状態を脳内でイメージすることが可能である．本研究では，このような身体に関するイメージを身体表象と呼ぶ．身体表象は各感覚器から得られる情報や経験に応じて更新され続けるものであり（Carruthers, 2008），非常に高い柔軟性を持つ．

複数の感覚モダリティから得られる情報は，各情報の確からしさに基づき重み付けされたうえで統合され知覚されると考えられており（Ernst & Banks, 2002），身体表象の形成においても各感覚情報の確からしさによる影響を受ける可能性が高い．松下他（2023）は，身体において対照的な部位である両腕・両足に注目し，身体部位の表示位置を実際の身体の位置から変更することによる身体表象への影響を検討した．バーチャルリアリティ（VR）空間内で仮想の腕を実際の腕とは異なる位置に表示した状態で身体動作を行ったところ，身体表象が仮想の腕の方向に変化することを確認した．この結果は，固有受容感覚（筋肉や関節などの固有受容器から得られる伸縮や角度などにより得られる，身体の位置とその動きの感覚）よりも視覚情報のほうが高く重み付けされたため，身体表象が仮想の腕の方向に誘導されたと解釈できる．

1.2. 本研究の目的

本研究では，個人内での各感覚モダリティの確からしさが身体表象の形成に与える影響について検討する．先行研究では，視覚刺激にノイズを付加したり（Ernst & Banks, 2002），ターゲット周辺に妨害刺激を配置するなど（Körding & Wolpert, 2004），外的な刺激操作により確からしさを操作していた．しかし，感覚モダリティの精度といった個人内の特性も，各感覚情報の確からしさに関係していると考えられる．そこで本研究では，視覚と固有受容感覚に着目し，個人内での各感覚モダリティの正確性と身体表象との関係を明らかにすることを目的とする．本研究では，感覚モダリティの正確性を測定し，それをその感覚の確からしさの指標とする．VR 空間内で，仮想モデルの腕を実際の腕の位置とは異なる位置に表示したときの身体表象の変化の度合いと，各個人の固有受容感覚の正確さを測定し，その関係を確認することで，個人内での視覚と固有受容感覚の重み付けが身体表象の形成を説明可能か否か検討する．

松下他（2023）では，身体表象変化を誘導するために参加者に身体動作を行わせる際，動作開始の時点で仮想の腕を実際の腕から離れた位置に表示していた．し

* 現所属：（株）ホンダ・リサーチ・インスティチュート・ジャパン

かし，固有受容感覚が正確である場合は，実際の腕と仮想の腕の位置のずれに気づきやすく，身体表象が仮想の腕の方向に誘導されにくかった可能性が否定できない．そこで本研究では，時間経過に伴い仮想の腕が徐々に移動する条件を設定する．仮想の腕を徐々にずらすと視覚的な変化が小さいため，固有受容感覚が正確な場合でも身体表象が変化しやすくなると予測される．

2. 実験

実験では，仮想モデルの右腕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する身体表象変化測定と，視覚に依存しない状況下で実験参加者が認識している右手の位置について指し示させ，そのずれの量を測定することで固有受容感覚の正確性の個人差を測定する固有受容感覚測定の 2 つで構成されていた．トレーニングは身体表象変化測定の前にのみ実施し，固有受容感覚測定の前には実施しなかった．トレーニング・身体表象変化測定と，固有受容感覚測定はそれぞれ別日に実施した．

2.1. 方法

2.1.1. 参加者

実験には 20 名が参加した．男性 17 名，女性 3 名であった．平均年齢は 21.75 歳 (SD = 0.967) であった．利き手は右手 19 名，左手 1 名，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，20 名全員が経験ありと回答した．

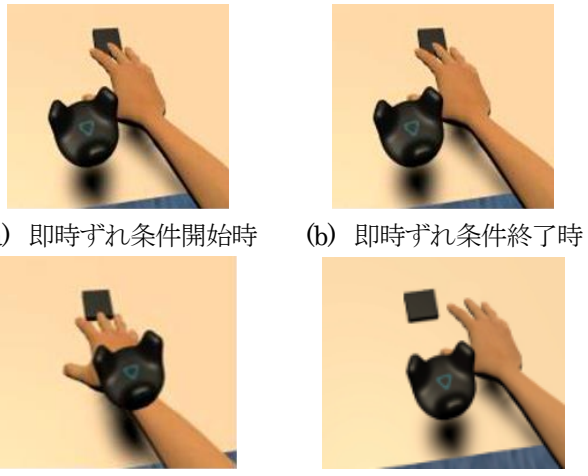
2.1.2. トレーニング条件

身体表象変化測定におけるトレーニング時には，右腕の仮想モデルが実際の右腕の位置と同じであるずれなし条件，トレーニング開始時に右腕の仮想モデルが実際の右腕の位置よりも 10cm 右に表示される即時ずれ条件，トレーニング中に仮想モデルの右腕が実際の右腕の位置から徐々に 10cm 右側に変化する条件漸次ずれ条件の 3 条件を設定した（図 1）．実験では，各トレーニング条件で腕の表示位置に違いがあることは参加者に教示しなかった．

2.1.3. 手続き

身体表象変化測定では，実験参加者が VR 空間内で各トレーニング条件下で身体動作を行ったあと，身体表象の変化を測定するポストテストを行った．事前準備として，参加者は HMD を装着せず，実験者が指定した部位（右腕・左腕・右脚・左脚）を確認しながらトレーニング時と同様の動作を行った．次に，HMD を装着し，3 つのトレーニング条件のうちの 1 条件で，VR 空間内で参加者の目の前に配置された 5 つの白い立方体の内，赤く変化した 1 つに触れることを 45 回繰り返すトレーニングを行った．トレーニング終了時には，“Finish” という文字が画面上に表示された．その後，参加者は HMD を装着したまま目を閉じ，予め教示した基本の姿勢をとり，実験者が指定した部位（右腕・左腕・右脚・左脚）を正中線に移動するよう求めた（ポストテスト）．ポストテストでは，参加者の手の中指または足の親指と正中線からのずれの大きさを，各部位につき 1 回ずつランダムな順序で測定した．以上の手続きを 1 試行とし，各条件 3 試行ずつ，計 9 試行行った．

固有受容感覚測定では，目視せずに自身の右手があると知覚した位置と実際の右手の位置のずれを計測した．参加者は目を閉じて右手を板の上に置き，実験者は参加者の右手を覆うように机の上に台を置いた（図 2）実験者が参加者の右手が置かれた板を所定の位置に移動させたあと，参加者には右手中指を知覚した位置を台の上から左手人差し指で指し示させた．参加者が示した右手中指の位置と，実際の右手中指の位置とのず



(a) 即時ずれ条件開始時　(b) 即時ずれ条件終了時
(c) 漸次ずれ条件開始時　(d) 漸次ずれ条件終了時

図 1 即時ずれ条件と漸次ずれ条件の実験の様子．
トラッカーの位置は実際の参加者の身体位置を指す．

れを測定した. 参加者の右手中指は, 正中線から -20cm, -10cm, 0cm, 10cm, 20cm の 5 箇所のいずれか 1 箇所に移動させ, 各位置につき 1 回ずつ測定を行った. 所定の位置への移動順はランダムであった.

2.2. 指標

身体表象変化測定では, トレーニング条件ごとに 3 回ずつ行われるポストテストでの正中線からのずれの平均を, 各身体部位におけるずれの大きさとした. 参加者から見て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, 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際よりも右に変化したとき, 表象上の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あるためである. なお, 仮想モデルの右腕は横方向にのみ変化させたため, 前後方向の変化については考慮しないものとした.

固有受容感覚測定では, 参加者が知覚した右手中指の位置と実際の右手中指の位置のずれの 5 箇所の測定位置での平均を, 各参加者の固有受容感覚の正確性とした. 前後方向のずれについては考慮せず, 右手中指からの左右方向のずれの絶対値の平均を算出した.

2.3. 結果

身体表象変化測定におけるずれ条件間での行動比較の結果を図3に示す. Shapiro-Wilk 検定を行った結果, 一部の条件（左腕-漸次ずれ条件）が正規分布に従わなかった ($p < .05$). 各身体部位に対してフリードマン検定を行ったところ, 右腕について有意な主効果が認められた ($\chi^2(2) = 11.01$, $p < .05$). 右腕におけるトレーニング条件間の差をウィルコクソンの符号順位検定を用いて比較したところ, ずれなし条件と即時ずれ条件との間 ($Z = 3.56, p < .01$) と, ずれなし条件と漸次ずれ条件との間 ($Z = 3.39$, $p < .01$) で有意差を確認した. この結果は, 即時ずれ条件と漸次ずれ条件において右腕の身体表象が右に変化したことを示している.

身体表象変化測定の即時ずれ条件と漸次ずれ条件で測定したずれの値と, 固有受容感覚測定で測定したずれの値との相関分析の結果を図 4, 図 5 に示す. 相関係数は, 右腕の即時ずれ条件 ($r = -0.415, p = 0.069$), 右腕の漸次ずれ条件 ($r = -0.434, p = 0.056$), 右脚の即時ずれ条件 ($r = -0.403, p = 0.077$), 右脚の漸次ずれ条件 ($r =$

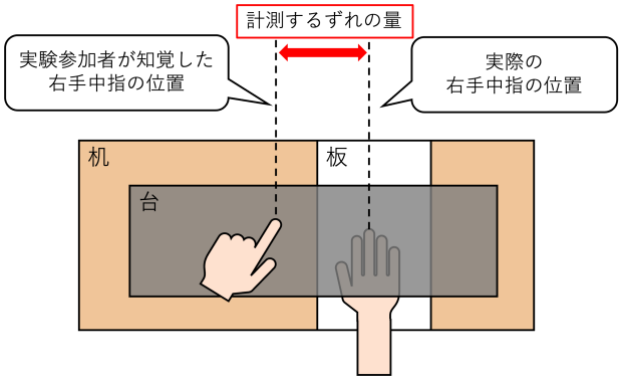


図 2 固有受容感覚測定におけるずれの大きさの測定方法

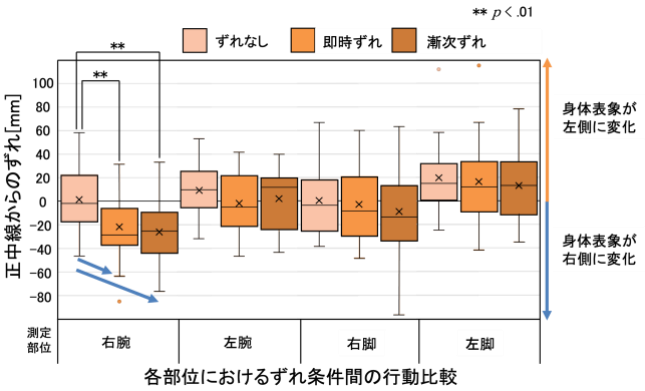


図 3 身体表象変化測定におけるずれ条件間での行動比較

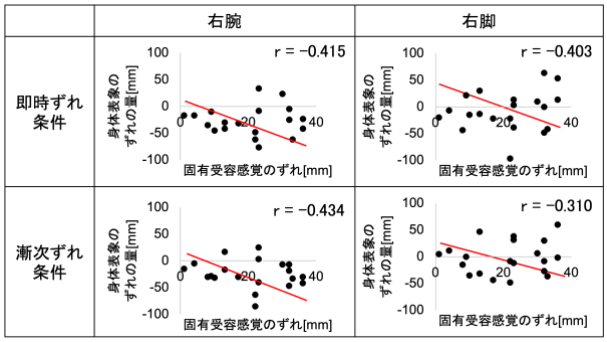


図 4 右半身の固有受容感覚の正確性と即時ずれ条件・漸次ずれ条件の相関

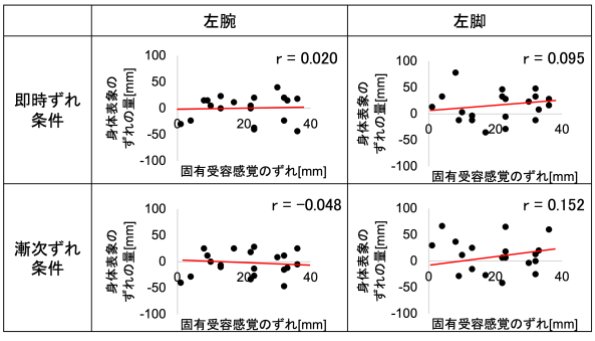


図 5 左半身の固有受容感覚の正確性と即時ずれ条件・漸次ずれ条件の相関

-0.310, p = 0.182)では負の相関が確認され，左腕の即時ずれ条件 (r = 0.020, p = 0.934)，左腕の漸次ずれ条件 (r = -0.048, p = 0.839)，左脚の即時ずれ条件 (r = 0.095, p = 0.690)，左脚の漸次ずれ条件 (r = 0.152, p = 0.521) では相関が認められなかった．この結果は，右腕と右脚の身体表象は固有受容感覚が正確でない参加者ほど右に変化し，左腕と左脚では身体表象に対する固有受容感覚の影響が少ないことを示している．

3. 考察

本研究の目的は，個人内での各感覚モダリティの確からしさが身体表象の形成に与える影響について，視覚と固有受容感覚に着目し検討することであった．右腕については，固有受容感覚の正確性と身体表象の変化量に負の相関が認められた．この結果は，固有受容感覚が正確でないほど身体表象が視覚に誘導されることを示している．固有受容感覚の正確性が低い個人においては，視覚のほうが固有受容感覚よりも確からしさが相対的に高く，感覚情報の統合の際に視覚の重み付けが高くなっていると考えられる．すなわち，内的な確からしさが身体表象の形成における各感覚モダリティの重みを調整していると言える．

漸次ずれ条件は仮想の腕の視覚的変化が小さいことから，固有受容感覚が正確な個人においても身体表象の変化量が大きくなると予測していたが，即時ずれ条件と漸次ずれ条件のどちらにおいても身体表象の変化量は同程度であった．両条件間で身体表象の変化量に差がなかった理由として，仮想の腕と実際の腕の表示位置に空間的なずれはあれど，どちらもトレーニング時に同様の動作を行っていたことが挙げられる．トレーニング開始時は 2 つの条件間で必要な動作量に違いがあったものの，どちらも仮想の腕で赤い立方体に触るという動作を行っていた．どちらも同じような動作でのトレーニングを行っていたため，身体表象の変化が同程度であった可能性が考えられる．トレーニング時に両条件で異なる動作が獲得されるような課題を採用することで，仮想の腕のずらし方による身体表象への影響を検証できると考えられる．

本研究では，トレーニング後の身体表象変化に対するずらし方の影響は確認されなかったが，トレーニング中の適応過程では違いが生じる可能性がある．固有受容感覚の時間経過に伴う変化についてはすでに研究が行われている（Ruttle et al., 2016）．先行研究で用いられている手法を応用することで，ずらし方が身体表象変化の過程への影響を検討できる可能性がある．

右腕と右脚については，固有受容感覚の正確性と身体表象変化に負の相関が認められたが，左腕と左脚については相関が認められなかった．右脚，左腕，左脚は，身体表象変化測定時に身体表象の有意な変化が確認されず，身体部位の視覚的操作も行っていなかったが，右半身または左半身の身体部位によって相関の傾向が異なるという結果が得られた．本研究では右腕の位置を仮想的に変化させたため，右半身は身体の表示位置を変更した側の半身であり，左半身は身体の表示位置を変更していない側の半身であること分類することができる．この点を考慮すると，身体表象に関わる視覚的な操作を直接的に行った半身とそうでない半身という左右半身の別でも，身体表象の形成を決定づける各感覚モダリティの重み付けが異なるのかもしれない．この点については，更に検証が必要である．

4. 結論

本研究では，個人内での相対的な感覚情報の確からしさと身体表象の形成との関係を，視覚と固有受容感覚に着目し検討した．実験結果から，固有受容感覚が正確でない実験参加者ほど視覚的な腕の方向に身体表象が変化する傾向があることを示し，個人内での各感覚モダリティ間の相対的な確からしさによって身体表象形成の重み付けが変わることを明らかにした．

謝辞

本研究は，JSPS 科研費（22KK0158）の助成を受け実施された．

文献

Ernst, M. O., & Banks M. S. (2002). Humans integrate visual and haptic information in a statistically optimal fashion. *Nature, 415,* 429-433.

Carruthers, G. (2008). Types of body representation and the sense of embodiment. *Consciousness and cognition*, *17*, 683-703.

Körding, K., & Wolpert, D (2004). Bayesian integration in sensorimotor learning. *Nature, 427*, 244–247.

松下彩夏・江波戸傑・小林晶・松室美紀・柴田史久・木村朝子 (2023). 身体の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*, 37-40.

Ruttle, J. E., Cressman, E. K., 't Hart, B. M., & Henriques, D. Y. (2016). Time course of reach adaptation and proprioceptive recalibration during visuomotor learning. PLoS One, 11(10), e0163695.