



結合身体における自分が操作する腕に対する 所有感の左優位性

Left arm dominance of illusory body ownership for a left-right joint body

Hapuarachchi Harin¹⁾, 北崎 充晃¹⁾
Harin Hapuarachchi, and Michiteru Kitazaki

1) 豊橋技術科学大学 (〒441-8580 愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘 1-1, harinmanujaya@gmail.com, mich@cs.tut.ac.jp)

概要: 2人のユーザーが1つのアバターの左と右の半身を操作する結合身体システムを構築し、自分が操作する腕と相手が操作する腕の身体性(身体所有感、行為主体感、脅威刺激に対する皮膚電位反応)を計測した。その結果、自分が操作する腕の身体性が相手の操作する腕よりも高く、自分が操作する腕では左腕が右腕よりも身体所有感が強かった。これは、身体性認知における右半球皮質の優位性が左腕の身体所有感を高めたためと推察される。

キーワード: 自在化身体、身体所有感、行為主体感、結合身体、共有身体

1. はじめに

視覚と触覚の統合や視覚と身体運動の同期性を利用して、人以外の物体やバーチャルアバター、ロボットなどに対して身体所有感錯覚を誘発することができる[1,2]。そして、バーチャルリアリティ(VR)を用いると、「一人一身体」の制約を超えて、複数のユーザーが一つのアバターを共有して複雑な作業を行うことも可能になる。共有身体アバター(2人で操作するアバターで、2人の動きを平均化することでアバターの動きを決定する)に関する研究がいくつか報告されている[3,4]。一人でアバターを操作する場合や、共有身体アバターを操作している個人の動きよりも、共有身体アバターのリーチング動作は、より直線的で滑らかになる[4]。つまり、二人で1つのアバターを操作する時に、無意識的に共有身体アバターの動作を最適化していることが示唆されている。

筆者らは、二人がアバターの左右半身を独立に制御する結合身体アバター(joint avatar)を開発した(図1)。このような結合身体アバターを用いることで、2人以上の力を合わせてマルチタスクの効率を上げたり、障害を持ったVRユーザーを補完し合いながら支援したりすることができる。

しかし、このような結合アバターに対する身体性を高めるためには、身体性に影響を与える要因を特定することが重要である。これまで我々は、二人の身体を物理的につなげて、片方が動く時にその動きの一部が他方に伝わる力覚フィードバックが身体所有感および行為主体感に影響を与えることを示した[5]。

本研究では、左右の手足を2人で操作できる結合身体アバターの両手を使って、3種類のリーチングタスクを行う実験を行い、パートナーの目的の可視性と左右身体の違いの効果を調べることを目的とした。



図1 結合身体アバターの概念図

2人が一緒に何かをする場合(共同行為)、相手が何を知覚しているか、何が目的なのかを知るという共同注意が重要である[6]。そこで、我々は、参加者が目的を共有している場合、および、パートナーの目的を知っている場合に、パートナーが操作する腕への所有感が向上すると仮定した。この仮説を検証するために、結合身体アバターの左右の手が到達する目標が異なる場合よりも同一の目標の方が身体所有感が高くなるか、また、異なる2つの目標を用いた場合には、パートナーの目標が見える場合に見えない場合よりも身体所有感が高くなるかどうかを調べた。

身体所有感については、大脳皮質の左半球よりも右半球が優位であることが示されており、ラバーハンド錯覚が右

半球に支配されている左手において強いという報告もある[7]。そこで、自分が操作する腕、パートナーが操作する腕について、左右の違いが生じるかについても検討することを目的とした。

2. 方法

2.1 参加者

実験の目的を知らない20人の被験者が10のペアになって参加した。本実験は、豊橋技術科学大学人を対象とする研究倫理審査委員会の承認を得て、その規則に基づいて実施された。全ての被験者実験同意書を理解・合意し、署名したのちに実験に参加した。

2.2 装置

被験者2名の動きはモーションキャプチャシステム（Vicon Bonita10, カメラ12台, 1024×1027ピクセル, 250fps）により計測された。モーションキャプチャデータを同一仕様の2台のコンピュータで受信し、両被験者のヘッドマウントディスプレイ（HMD: HTC VIVE Pro Eye, 片眼1440×1600ピクセル, 90×110deg, 90Hz refresh）に対応したバーチャル空間とアバターを提示した。バーチャル環境および実験課題は、Unity（2017.4.1f1）を用いて作成した。皮膚コンダクタンス反応（SCR）の記録には、BIOPAC MP160とワイヤレスPPGおよびEDAアンプ（BN-PPGED）を使用した。ワイヤレス送信機（BN-PPGED）は各被験者の手首に装着された。左中指と薬指の遠位指節に2本の使い捨て電極（EL507）を貼付した。2本のリードケーブル（BN-EDA-LEAD2）で無線送信機と電極をつないだ。SCRデータは1000Hzで記録された。

2.3 刺激と条件

実験は3つの条件から構成された。各セッションにおいて、ペアのある被験者は結合身体アバターの左側を、もう一人は右側を実験中ずっと操作した。被験者は、一人称視点からその結合身体アバターを観察した。3つの条件を「共通目標」条件、「異目標：可視」条件、「異目標：不可視」条件と名付けた。共通目標条件では、結合身体アバターの前に1つの黄色い目標が現れ、被験者は共同アバターの両手で一緒に目標に触れるように指示された。異目標：可視条件では、アバターの前に2つの目標（青と赤）が現れ、被験者はアバターの右手では青のターゲットに、左手では赤のターゲットに触れるように指示された。異目標：不可視条件は、基本的には異目標：可視条件と同じであるが、各被験者にはパートナーの目標が見えなかった。目標はすべて直径5cmの球体で、各条件ともアバターが目標に触れると200ms後に消去された。消去後、2秒後に次の目標が出現した。各セッションは参加者1人あたり100回のルーチングで構成され、各セッションの最終試行では、アバターの左手か右手にナイフが刺さる刺激が表示された。

2.4 手続き

実験は6セッション（3条件×2繰り返し）で構成された。各条件の2回の繰り返しでは、一方の繰り返しの最後

に左手が刺され、もう一方の繰り返しでは右手が刺された。セッションの順序は、各被験者ペアについてランダムに行われた。各セッション終了後、被験者は主観評定のためのアンケートに回答した。アンケートは、先行研究[8]に基づくものであった。その回答をもとに、「担当腕」（被験者が操作する結合身体アバターの腕）と「非担当腕」（パートナーが操作する結合身体アバターの腕）について身体所有感と行為主体感のスコアを算出した。ナイフ出現から0-10秒間の皮膚コンダクタンスの最大値と最小値の差をセッションごとについて記録し、分析した。

3. 結果

3.1 身体所有感

20名の被験者のデータについて、整列順位変換を用いた二元配置反復測定分散分析（ART-ANOVA[9]）を実施した（担当条件：担当腕・非担当腕 × 3つの目標条件：共通目標、異目標：可視、異目標：不可視）。その結果、担当条件と目標条件の間に有意な交互作用が見られた（ $F(2,38)=7.622, p=0.002, \eta^2=0.286$ ）。目標条件に関する有意な単純主効果は、非担当腕でのみ見られた（ $F(2,38)=9.292, p<.001, \eta^2=0.328$ ）。Tukey事後検定により、身体所有感は、共通目標条件では異目標：不可視条件と比較して有意に高く（Ownership: $p=.0015$ ）、異目標：可視条件では異目標：不可視条件と比較して有意に高い（Ownership: $p=0.0021$ ）ことが確認された（図2上）。

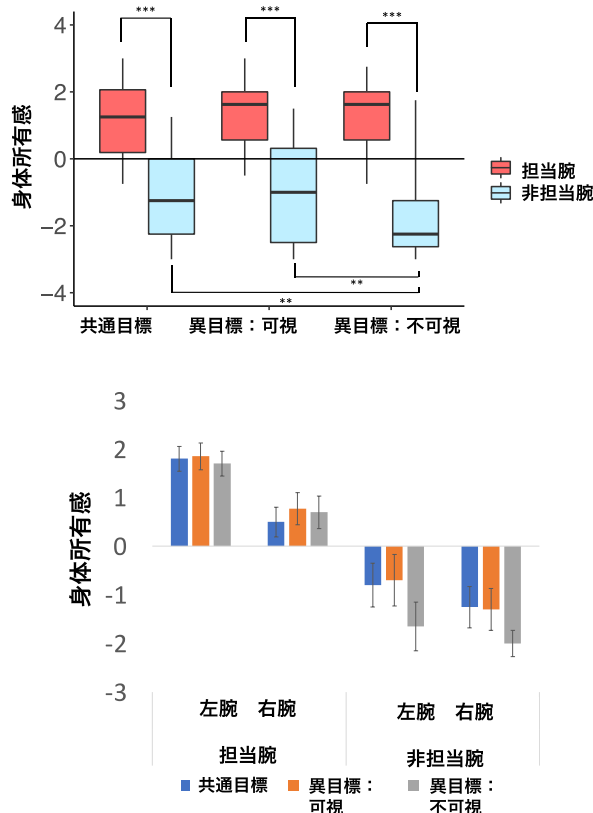


図2 身体所有感の結果：(上) 20人での解析、(下) 10ペアによる左右腕の違いに着目した解析

左右腕の違いを検討するために、10 ペアのデータを用いて、整列順位変換を用いた三元配置反復測定分散分析を実施した(担当条件:担当腕・非担当腕 x 3つの目標条件:共通目標、異目標:可視、異目標:不可視 x 担当腕の左右)。その結果、担当腕条件の主効果 ($F(1,9)=405.76, p<.001, \eta^2=.978$)、目標条件と担当腕条件の間の有意な交互作用 ($F(2,81)=5.876, p=.004, \eta^2=.127$) が認められた。また、担当腕条件とその左右の役割の間にも交互作用があった ($F(1,81)=6.894, p=.010, \eta^2=.078$)。つまり、担当腕条件において、結合身体アパターの左腕を担当する被験者は、右腕を担当する被験者に比べて、担当腕に対する身体所有感が有意に高かった($F(1,49)=23.234, p<.001, \eta^2=0.322$) (図2下)。

3.2 行為主体感

20 名の被験者のデータについて、身体所有感と同様に整列順位変換を用いた二元配置反復測定分散分析を実施した。その結果、目標条件と担当腕条件の間に有意な交互作用が見られた ($F(2,38)=8.141, p=0.001, \eta^2=0.300$)。目標条件に関する有意な単純主効果は、非担当腕でのみ見られた ($F(2,38)=0.211, p=0.011, \eta^2=0.211$)。Tukey 事後検定により、行為主体感は共通目標条件では異目標:不可視条件と比較して有意に高く ($p=.0181$)、異目標:可視条件では異目標:不可視条件と比較して有意に高い ($p=0.0308$) ことが示された (図3上)。

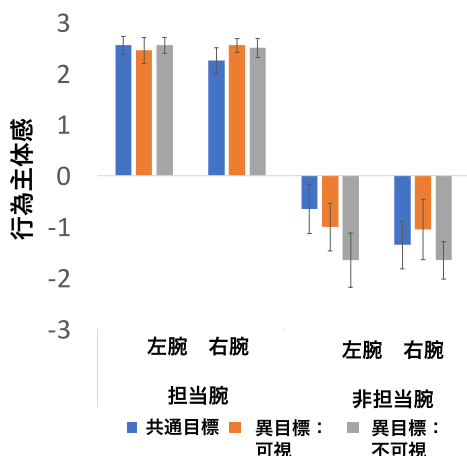
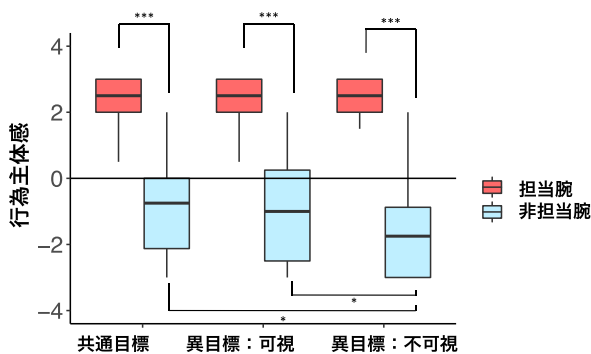


図3 行為主体感の結果:(上)20人での解析、(下)10ペアによる左右腕の違いに着目した解析

左右腕の違いを検討するために、10 ペアのデータを用いて、整列順位変換を用いた三元配置反復測定分散分析を実施した(担当条件:担当腕・非担当腕 x 3つの目標条件:共通目標、異目標:可視、異目標:不可視 x 担当腕の左右)。その結果、担当腕条件の主効果が有意であった ($F(1,9)=322.64, p<.001, \eta^2=.973$)。目標条件と担当腕の間の交互作用は有意傾向であった ($F(2,81)=3.001, p=.055, \eta^2=.069$)。ただし、有意な単純主効果はなかった。

3.3 皮膚コンダクタンス反応

皮膚コンダクタンス反応として、セッションオン最後にナイフが出現してから10秒間の最大値から最小値を引いたものを算出して分析した。20名の被験者のデータについて、二元配置反復測定分散分析を行ったところ、非担当腕よりも担当腕の方がSCRが高かった ($F(1,19)=6.8201, p=.017, \eta^2=.264$)が、目標条件による差はなかった(図4)。交互作用もなかった。10ペアのデータを用いた左右での違いの分析についても、行為主体感と同様に左右での違いは見られなかった。

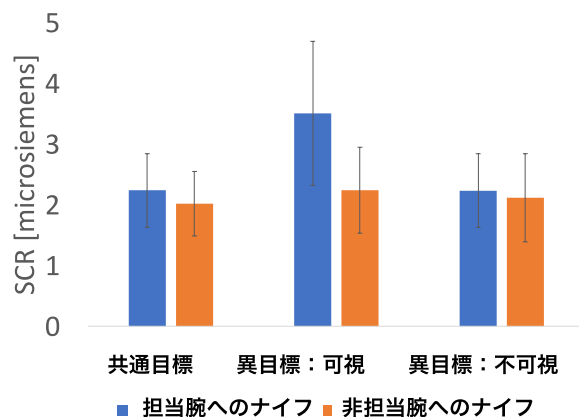


図4 SCRの結果:左から共通目標、異目標:可視、異目標:不可視。エラーバーは標準誤差。

4. 考察

目標が同じ場合、および目標が異なってもパートナーの目標が見える条件では、パートナーの異なる目標が見えない条件と比較して、非担当腕に対する身体所有感と行為主体感が高いことが示された。ただし、共通目標条件と異目標:可視条件の間では、非担当腕に対する身体所有感・行為主体感に有意な差はみられなかった。しかし、このことは、パートナーの目的を知ることができれば、課題目標の共有・分割に関わらず、パートナーが制御する腕に対してもある程度の身体性が生じることを示唆している。ただし、身体所有感・行為主体感ともにその絶対値は低く、それらが生じたと言うよりも、他者に操作されている感覚が減少したという方が妥当であろう。

生理指標である皮膚コンダクタンス反応は、担当腕・非担当腕の効果はあるものの、目標条件間の差が無かった。したがって、非担当腕に対する目標条件の効果は少ない可能性がある。

身体所有感についてのみ、左側の腕を担当する被験者は、自分が担当する腕に対して右側を担当する被験者よりも高い身体所有感を報告した。このことは、身体所有感が大脳皮質右半球で支配的であることと一致する。ただし、今回は被験者群間の比較であり、今後、実験計画を新しくした被験者内要因での検討が必要である。

謝辞 本研究は、JST ERATO Grant Number JPMJER1701 (稲見自在化身体プロジェクト)およびJSPS 科研費 (JP 20H04489) の補助を受けて行われた。

参考文献

- [1] M. Botvinick, Cohen J. Rubber hands 'feel' touch that eyes see. *Nature*, 391(6669), 756, 1998.
- [2] K. Kilteni, R. Groten, M. Slater, M. The sense of embodiment in virtual reality. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 21(4), 373-387, 2012.
- [3] R. Fribourg, N. Ogawa, L. Hoyet, F. Argelaguet, T. Narumi, M. Hirose, A. Lécuyer, A. Virtual co-embodiment: evaluation of the sense of agency while sharing the control of a virtual body among two individuals. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2020.
- [4] T. Hagiwara, G. Ganesh, M. Sugimoto, M. Inami, M. Kitazaki. Individuals prioritize the reach straightness and hand jerk of a shared avatar over their own. *iScience*, 23(12):101732, 2020.
- [5] HAPUARACHCHI HARIN, GOWRISHANKAR GANESH, 北崎充晃(2020).左右身体の統合による共有身体の身体性, 日本バーチャルリアリティ学会, 3C3-4.
- [6] N. Sebanz, H. Bekkering, G. Knoblich. Joint action: bodies and minds moving together. *Trends in Cognitive Sciences*, 10(2), 70-76, 2006.
- [7] S. Ocklenburg, N. Rüter, J. Peterburs, M. Pinnow, O. Güntürkün. Laterality in the rubber hand illusion. *Laterality*, 16(2), 174-187, 2011.
- [8] T. C. Peck, M. Gonzalez-Franco. Avatar embodiment. a standardized questionnaire. *Frontiers in Virtual Reality*, 1:44, 2021.
- [9] J. O. Wobbrock, L. Findlater, D. Gergle, J. J. Higgins. The aligned rank transform for nonparametric factorial analyses using only ANOVA procedures. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (pp. 143-146), May 2011.