



# 手指の共有身体アバタの身体性に担当割合が及ぼす効果

鳥海智志<sup>1)</sup>, 井上康之<sup>2)</sup>, 勝俣安伸<sup>3)</sup>, 萩原隆義<sup>4)</sup>, 北崎充晃<sup>1)</sup>

Satoshi TORIUMI, Yasuyuki INOUE, Yasunobu KATSUMATA, Takayoshi HAGIWARA and Michiteru KITAZAKI

1) 豊橋技術科学大学大学院工学研究科 情報・知能工学専攻(〒441-8580 愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘 1 番地 1,

toriumi.satoshi.db@tut.jp, mich@tut.jp)

2) 富山県立大学 情報工学部情報システム工学科 (〒939-0398 富山県射水市黒河 5180, inoue.yasuyuki@pu-toyama.ac.jp)

3) 沼津工業高等専門学校 制御情報工学科 (〒410-8501 静岡県沼津市大岡 3600, katsumata.yasunobu@numazu-ct.ac.jp)

4) 長野工業高等専門学校 工学科 情報エレクトロニクス系 (〒381-8550 長野県長野市徳間 716,

t\_hagiwara@nagano-nct.ac.jp)

**概要:** 複数人が 1 つの身体を操作するバーチャル共同体化が研究されている。その 1 つに、2 人の動きを重み付け平均し、1 つのアバタに反映する共有身体がある。本研究では手指の共有身体を対象に、各操作者の担当割合を変化させた場合の身体性について、質問紙による主観評定と脅威刺激に対する生理指標(SCR)により評価した。結果、担当割合が大きくなるほど身体所有感と行為主体感が高くなったが、SCR に有意な差はみられなかった。

**キーワード:** 身体性認知、拡張身体、共有身体、バーチャル共同体化

## 1. 序論

バーチャルリアリティ (VR) 空間における人間拡張の一種として、2 人またはそれ以上の人が協力して 1 つの身体を動かす、バーチャル共同体化(virtual co-embodiment)が研究されている[1][2]。その中の 1 つに、2 人の動きを重み付け平均して 1 つの身体に適用する、共有身体がある。共有身体は、運動技能の学習・継承への応用が期待されており、通常の身体を用いて学習した場合と比較して学習効率が向上することが示されている[3]。他にも、手話学習への応用[4]や、学習者と教師役の担当割合を適用的に変化させる学習手法[5]なども提案されている。

Fribourg らは、各操作者の担当割合が対称または非対称である共有身体において、担当割合による行為主体感への影響について検討している[1]。一方で、身体所有感については、各操作者の担当割合が対称(50%ずつ)である共有身体のみを対象として調べており、担当割合が非対称である場合の身体性については検討されていない。Hagiwara らは、担当割合の違いが身体所有感と行為主体感に概ね相関するが、担当割合よりも高く評価されることを示している[6]。一方、Kodama らは、タスク中に担当割合が動的に変化する共有身体を身体性を調べており、担当割合が固定された共有身体と比較して身体性に有意な差がないことを報告している[5]。

多くのバーチャル共同体化研究では、手のリーチングなど、

手と腕全体を動かす課題を対象としている。一方、手は通常 5 本の指を有し、精緻な動作に適していることから、手芸を始めたとする高度な技能の実行に用いられている。さらに、近年の HMD にはハンドトラッキング機能が標準的に搭載されており、手指の微細な動きを VR 空間内で容易に活用することが可能となっている。しかしながら、手指のバーチャル共同体化についてはほとんど研究されていない。

そこで我々は、手指を対象とする共有身体の手当割合が、身体所有感・行為主体感に及ぼす影響を調べることにした。身体所有感については、質問紙による主観評定に加え、皮膚コンダクタンス反応 (SCR: Skin Conductance Response) による生理指標によっても評価することとした。具体的には、共有身体の手当割合が高くなるほど SCR も強くなり(H1)、身体所有感・行為主体感の主観評定も高くなる(H2)と仮定した。

## 2. 方法

### 2.1 参加者

30 人(15 ペア)の大学生(女性 4 名、男性 26 名、平均年齢 22.71 歳、標準偏差 1.18)が実験に参加した。すべての参加者は正常な視力(矯正視力)を有し、精神疾患がないと申告した。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実施した。

## 2.2 装置

コンピュータ (Intel Core i9-13900 5.6GHz, NVIDIA GeForce RTX4070Ti, RAM 32GB, Windows11 Home 64bit) を 2 台用い、それぞれにヘッドマウントディスプレイ (HTC ViveProEye, 1440[width]×1600[height]) とモーションキャプチャグローブ装置 (Manus Quantum Metagloves) を接続し、ローカルなネットワーク環境で通信を行った。実験の制御や刺激の生成は Unity(2022.3.22f1) で行った。2 つのシステムの同期には、Unity のネットワークライブラリ Mirror Networking(ver 89.0.0) を用い、安定した 90Hz の同期を確認して実験を行った。モーションキャプチャグローブの位置は、手の甲につけたトラッカー (HTC Vive Tracker3.0) で計測した。二人の参加者はともに、右手のグローブのみを装着し、机の上に肘を置いた状態 (前腕を自由に動かせる状態) で、自らの右手の位置にあるアバタハンドを観察した。皮膚コンダクタンス反応 (SCR) の計測は、生体信号収集システム (BIOPAC MP160) とワイヤレス PPG/EDA アンプ (BN-PPGED) を用い、電極用ゲル (GEL101A) を塗布した中指と薬指の末節骨部に電極 (EL507) を貼り付けて行った。

## 2.3 刺激と条件

Unity シーン上に 7.5m×7.5m の部屋を作成し、常に参加者の頭部から 1.7m 前方となる位置に、対戦相手となるアバタを配置した。2 人の参加者は共有身体アバタを用い、協力して 1 つの身体を動かし、前方のアバタを相手に後出しじゃんけんを行った。各参加者には、後出しじゃんけんに勝つよう教示した。試行開始と同時に、対戦相手アバタのじゃんけんアニメーション (グー・チョキ・パー) がランダムに再生された。各アニメーションは 10s とし、1 試行につき 15 回じゃんけんを行った。また、各参加者の手を出すタイミングを揃えるため、各アニメーションにおいて対戦相手アバタが手を振り下ろす際に、合図となる効果音を提示した。対戦相手アバタは 1 回のじゃんけんにおいて、手を出す前に 3 回手を振り下ろした。各試行の最後のじゃんけん (15 回目) で手を出した際 (アニメーション開始後 8s)、共有身体アバタの指先に釘が刺さる刺激を提示し、SCR によって参加者の驚愕反応を測定した。また、脅威刺激を提示する際に、共有身体アバタが参加者の視界から外れないようにするため、参加者の肘を基準とし、水平方向に左へ 12 cm、垂直方向に上へ 22.5 cm、および奥方向へ 28.5 cm の位置に、赤色半透明の直方体 (ターゲット) を提示した。このターゲットは、じゃんけんの手を出す際の目標地点とするよう教示し、共有身体アバタの手指が接触すると一時的に消失し、手が離れると再び表示されるように設定された。

本実験では、共有身体を担当割合条件を 5 条件 (0%, 25%, 50%, 75%, 100%) 設定し、繰り返しの計 5 試行をランダムな順序で行った。

## 2.4 手続き

参加者は椅子に座り、右肘を机に置き、HMD を通じて一人称視点から、自らの実際の手の位置にあるアバタハン

ドを観察した。参加者はペアで実験に参加したが、実験中は互いに会話などのやり取りをしないように伝えた。

本試行を行う前に、参加者が課題の意図を理解しているか確認するため、練習試行を行った。練習試行は本試行と同じタスクとし、両参加者ともに担当割合条件は 100% (単独身体) とした。練習試行は、後出しじゃんけんタスクを最低 5 回かつ、対戦相手に連続で 3 回勝つまで繰り返し行った。

本試行では、各試行の最後に脅威刺激が提示されたあと、身体所有感・行為主体感・釘への脅威に関する主観評定を実施した。身体所有感・釘への脅威は 7 段階のリッカート尺度 (-3~+3)、行為主体感は Visual Analog Scale (VAS, 0~1) で測定した。設問は以下の通りである。

1. バーチャルハンドが自分の手のように感じた (身体所有感)
2. バーチャルハンドを全くコントロールできなかった (0%), バーチャルハンドを完全にコントロールできた (100%) (行為主体感)
3. 釘が落ちてきた時、脅威を感じた (釘への脅威)

## 3. 結果

以下の分析項目はすべて、はじめに Shapiro-Wilk 検定によって正規性を満たしているかどうか検定を行った ( $\alpha=0.05$ )。その結果、すべての項目において、一部のデータが正規性を満たさなかった ( $p<0.05$ ) ため、被験者内要因の一元配置分散分析を行うノンパラメトリック検定であるフリードマン検定を行った。

### 3.1 皮膚コンダクタンス反応 (SCR)

各参加者の SCR は、各試行における脅威刺激提示後 10s 間の最大値と、脅威刺激提示前 5s の平均値の差によって算出した。

フリードマン検定の結果、各条件間に有意差はなかった ( $\chi^2(4) = 4.514, p=0.341, \text{Kendall's } W=0.081$ )。

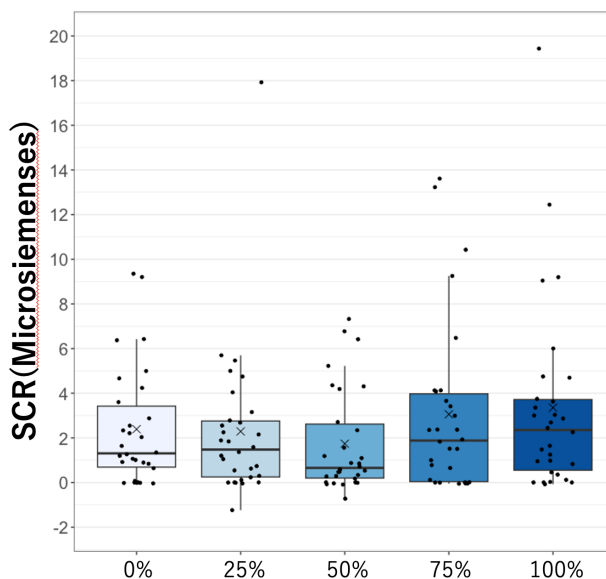


図 1 SCR の結果。×は平均値。

### 3.2 身体所有感

フリードマン検定の結果、各担当割合条件間に有意な差が見られた( $\chi^2(4) = 86.206, p < .001$ , Kendall's  $W = 0.718$ )。事後分析として、各担当割合条件間を比較するために、holm 法による補正を適用した Conover 検定を行った。結果、すべての条件のペア間において有意差がみられ( $p_{holm} < 0.01$ )、担当割合が大きいほど身体所有感も高かった。

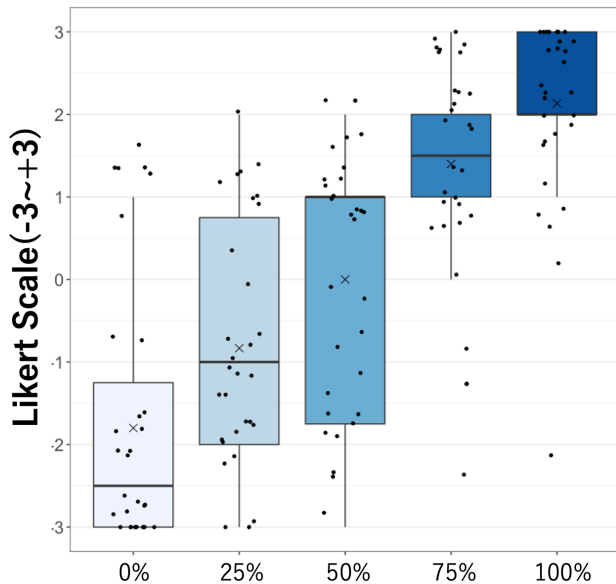


図2 身体所有感に関する主観評価の結果。

×は平均値。

### 3.3 行為主体感

フリードマン検定の結果、各担当割合条件間に有意な差が見られた( $\chi^2(4) = 92.812, p < .001$ , Kendall's  $W = 0.773$ )。事後分析として、各担当割合条件間を比較するために、holm 法による補正を適用した Conover 検定を行った。結果、すべての条件のペア間において有意差がみられ( $p_{holm} < 0.05$ )、担当割合が大きいほど行為主体感も高かった。

また、各条件における行為主体感の評価が、実際の担当割合と異なるか検証するため、ウィルコクソンの符号付順位検定を行った。結果、0%、25%、50%条件において、実際の担当割合よりも行為主体感の評価が有意に高かった: 0%( $V = 276, p < 0.001, r = 5.17$ ), 25%( $V = 400, p < 0.001, r = 0.66$ ), 50%( $V = 317, p < 0.05, r = 0.32$ )。また、担当割合 100%条件(通常の身体と同じ)においては、実際の担当割合よりも行為主体感の評価が有意に低かった( $V = 0, p < 0.001, r = 0.60$ )。

### 3.4 釘への脅威

フリードマン検定の結果、各担当割合条件間に有意な差が見られた( $\chi^2(4) = 24.046, p < .001$ , Kendall's  $W = 0.200$ )。事後分析として、各担当割合条件間を比較するために、holm 法による補正を適用した Conover 検定を行った。結果、以下の5組の条件間に有意な差がみられた: 0%-75%( $p = 0.007$ ), 0%-100%( $p < .001$ ), 25%-75%( $p = 0.050$ ), 25%-100%( $p = 0.003$ ), 50%-100%( $p = 0.007$ )。

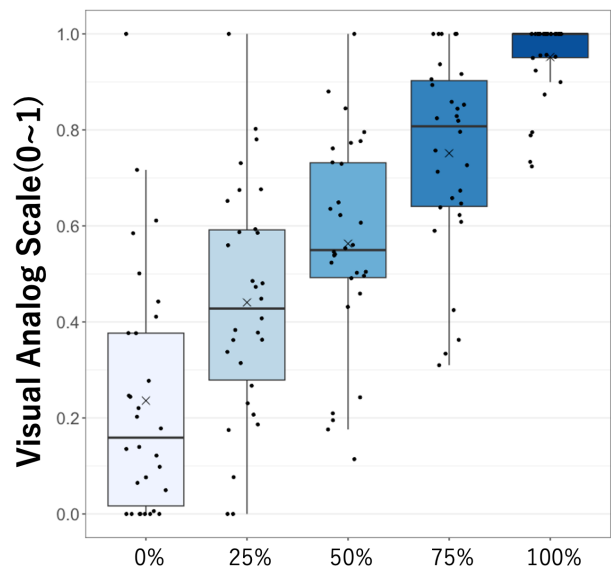


図3 行為主体感に関する主観評価の結果。

×は平均値。

## 4. 考察

仮説 H1 は、各担当割合間の SCR に有意な差がみられなかったため、支持されなかった。一方で、有意水準には達しなかったものの、担当割合 50%条件において SCR が低下する傾向がみられた。この傾向に関しては、担当割合が非対称(25%または 75%)である条件下では、共有身体の動きがいずれか一方の参加者の動作に近くなるため、通常の身体動作との乖離が小さく、身体感覚に対する違和感が小さくなった可能性がある。これに対し、担当割合が対称(50%)である条件では、Jerk が小さくなり、動きが滑らかになるなどの運動機能上の利点が示されている[5]。しかし、そのような通常の身体とは異なる運動特性が、身体との不一致感を高め、結果として SCR の低下傾向につながった可能性が示唆される。

一方、仮説 H2 は主観評価の結果より、担当割合が高くなるほど身体所有感・行為主体感が高くなったため、支持された。この結果は、担当割合が対称な共有身体と単独身体の身体性を比較した、先行研究の結果とも一致する[1]。また、行為主体感に関する結果から、参加者は自身の担当割合を実際の割合よりも過剰に評価することが示された。これは、本研究において各参加者の目標が同一であるタスクを採用したことが要因だと考えられ、先行研究における知見とも一致する[5]。

本研究では、手指の共有身体アバタにおいて、各操作者の担当割合が身体性に与える影響を検討した。一方で、本研究では、指先の精緻な動きを伴うタスクにおけるパフォーマンスの評価は実施していない。先行研究においては、担当割合が対象または非対称である場合のタスクパフォーマンスへの影響が報告されている[1]、それらは手や腕全体の動作を対象としている。したがって、今後の研究においては、指先の微細な運動を必要とするタスクに着目し、その遂行における担当割合の影響を評価する必要があるだろう。

謝辞 本研究は、JSPS 科研費（JP22KK0158, JP23K17460）の補助を受けて行われた。

### 参考文献

- [1] Fribourg, R., Ogawa, N., Hoyet, L., Argelaguet, F., Narumi, T., Hirose, M., & Lécuyer, A. (2020). 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*, 27(10), 4023-4038.
- [2] Hagiwara, T., Ganesh, G., Sugimoto, M., Inami, M., & Kitazaki, M. (2020). Individuals prioritize the reach straightness and hand jerk of a shared avatar over their own. *iScience*, 23(12): 101732.
- [3] Kodama, D., Mizuho, T., Hatada, Y., Narumi, T., & Hirose, M. (2023). Effects of Collaborative Training Using Virtual Co-embodiment on Motor Skill Learning. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 29(5), 2304-2314.
- [4] Katsumata, Y., Inoue, Y., Toriumi, S., Ishimoto, H., Hapuarachchi, H., and Kitazaki, M. (2023). Shared avatar for hand movement imitation: Subjective and behavioral analyses. *IEEE Access*, 11, 96710-96717.
- [5] Kodama, D., Mizuho, T., Hatada, Y., Narumi, T., & Hirose, M. (2023, March). Effect of Weight Adjustment in Virtual Co-embodiment During Collaborative Training. In *Proceedings of the Augmented Humans International Conference 2023* (pp. 86-97).
- [6] Hagiwara, T., Sugimoto, M., Inami, M., & Kitazaki, M. (2019, March). Shared body by action integration of two persons: Body ownership, sense of agency and task performance. In *2019 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)* (pp. 954-955). IEEE.