



# 片側上肢の一部を他者に委譲した融合身体における Embodiment の評価

李 曉彤, 畑田 裕二, 葛岡 英明, 鳴海 拓志<sup>1)</sup>

Xiaotong Li, Yuji Hatada, Hideaki Kuzuoka, Takuji Narumi

1) 東京大学 (〒 113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1, {xiaotong,hatada,kuzuoka,narumi}@cyber.t.u-tokyo.ac.jp)

**概要:** VR 環境で複数のユーザが同時に一つのアバタを共有するシステムは融合身体と呼ばれ, 各ユーザの全身の姿勢を加重平均する手法や, 身体を左右や上下に分割して担当者を割り当てる部位選択などの手法が考案されてきた. 本研究では, 右上肢 (指や腕) の一部の動作を他者に委譲する部位選択型の融合身体を実装し, 物体運搬タスクを通じてその体験がユーザの Embodiment に与える影響について評価する. 実験の結果, 指の動作だけを他者に委譲した場合は, 腕の動作だけを委譲した場合よりも上肢全体の Embodiment への影響が小さいことが示唆された.

**キーワード:** Embodiment, 身体所有感, 行為主体感, 融合身体

## 1. はじめに

身体化 (Embodiment) とは, ある環境における実身体とは異なる身体表象であるアバタを, まるで自分の身体であるかのように感じ, 扱える状態だとされる [1]. Embodiment の実現には, 自己がそのアバタの位置に存在していると感じる自己位置感覚に加えて, その身体が自分のものであると感じる身体所有感, ある身体動作を引き起こしたのが自分自身であると感じる行為主体感が重要だと考えられている. VR 心理学ではこれまで, さまざまな身体特性のアバタを活用して Embodiment の条件が探求されてきた.

そうした特殊な身体体験の一つに, VR 環境において複数のユーザの動きを 1 つのアバタに反映させる融合身体 (Co-Embodiment) がある [2]. 融合身体は, 二人のユーザの姿勢を特定の加重平均に基づいて統合する加重平均型と, 身体部位ごとにユーザを割り当て操作を分担させる部位選択型の 2 種類が知られている. 加重平均型の融合身体は, アバタの動きにおける自身の寄与率が過大評価する傾向が知られており, 師匠の動きを自身の動きとして習得する必要がある身体スキル学習への応用が期待されている [3]. 部位選択型の融合身体研究では, 上下半身または左右半身を二人のユーザで分担操作するシステムが開発され, 身体所有感や行為主体感の評価が行われてきた [4, 5]. 例えば, 上下半身に分割された部位選択型の融合身体において, 下半身を担当する時の全身の身体所有感と行為主体感は, 上半身を担当する時より高いといった基礎的な知見が得られている.

本研究では, 全身を二分割する設定が主流であった先行研究に対して, 上肢 (肩関節から手指まで) をさらに腕と手指に分け, 上肢の一部または全部を他者に委譲する融合身体体験を構築した. さらに, 指と腕の双方の協調が必要な物体運搬課題を通じて, 片側上肢の一部を他者に委譲し

た融合身体体験におけるユーザの Embodiment とタスクパフォーマンスを評価した. 身体の中でも重要な役割を果たす利き手における部位選択型融合身体の性質を明らかにすることで, 融合身体の更なる活用の可能性を広げる.

## 2. 実験

### 2.1 参加者

参加者は 8 名 (全員が右利きの健常者, 男性 7 名, 女性 1 名) の大学生・大学院生であった. 週に 3 回以上 VR ゲームや VRSNS などの VR コンテンツを利用する人が 3 名, 週に 1-3 回程度利用する人が 2 名, 月に 1 回程度利用する人が 3 名であった.

### 2.2 システム構成

融合身体システムの構築はゲームエンジンである Unity (2019.4.28f1c1) を用いて行われた. システムは, 後述の通りにトラッキングされた二人のユーザの右上肢の動きを, 部位 (指・腕) ごとにバーチャルアバタの右上肢の動きとして反映する. 実験では, 参加者と共にアバタを操作するもう一人のユーザは実験実施者が担当した. 実験実施者の手指の動きおよび手首の位置・回転は Leap Motion (ultraleap 社) によって, 参加者の手指の動きは Manus VR DK2 (MANUS 社) を用いてセンシングされた. 手首の位置と回転を HTC Vive Tracker (HTC 社) を用いて取得した. 肘および肩関節の動きは, Unity のアセットである Final IK<sup>1</sup>を用いて, 手首の位置と回転から逆運動学に基づいて制御された. 参加者に VR 環境を提示する HMD (ヘッドマウンテッドディスプレイ) には HTC VIVE Pro (HTC 社) が使用された. VR 環境には, アバタの右手で把持することのできるバーチャル物体が置かれた. バーチャル物体の把持は, バーチャ

<sup>1</sup><https://assetstore.unity.com/packages/tools/animation/final-ik-14290?locale=ja-JP>

ル物体の付近に手があり、かつ右手の親指を除く四本の指を軽く握り込んだ形になった時に可能となる。手の形を崩すと、バーチャル物体は手から離れる。

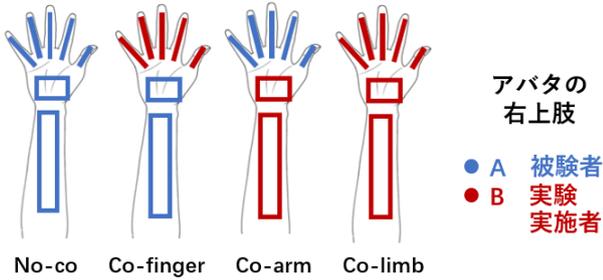


図 1: 部位選択型融合身体の 4 条件

2.3 実験条件

カウンタバランスに配慮した上で、参加者は以下の全ての条件の融合身体を体験した。参加者が身体部位 X (X は指:finger, 腕:arm, 上肢全体:limb のいずれか) の動きを制御できなくなり、実験実施者が代わりに制御する条件を Co-X と定義した。

- **No-co:** 融合を行わない。参加者の右上肢全体の動きがアバタの右上肢に反映された。
- **Co-finger:** 実験実施者の指の形と参加者の右腕の位置がアバタの右上肢に反映された。
- **Co-arm:** 参加者の指の形と実験実施者の右腕の位置がアバタの右上肢に反映された。
- **Co-limb:** 実験実施者の右上肢全体の動きがアバタの右上肢に反映された。

各条件において、担当している身体部位の動きの寄与率は常に 100%に保たれた。また、アバタの頭部の位置と姿勢には、HMD で取得した参加者の頭部の情報が反映された。

2.4 実験タスク

各条件において、参加者は図 2 に示した物体運搬タスクに取り組んだ。参加者は手を白い箱の近くで握り込むことにより、箱を把持することができる。白い箱を把持したまま赤い箱の上へ運び、手を開くことで白い箱を赤い箱の中に入れる。白い箱を赤い箱に入ると、2 分間の制限時間が尽きるまでは新しい白い箱が再び初期位置に出現する。このタスクは、指と腕の協調を必要としているため、指や腕を他者に委譲した際に生じる影響を観察しやすいと考え設定された。

2.5 評価指標

Virtual Embodiment Questionnaire (VEQ) の日本語バージョン<sup>2</sup>を用いて、アバタの指・腕・上肢それぞれに対する身体所有感と行為主体感が評価された。VEQ を本実験に適用するために、VEQ の項目に登場する「仮想身体」は「アバタの右手の指」や「アバタの右腕」や「アバタの右上

<sup>2</sup><https://rothnroll.de/download/VEQ-Questionnaire-jpJP4.pdf>

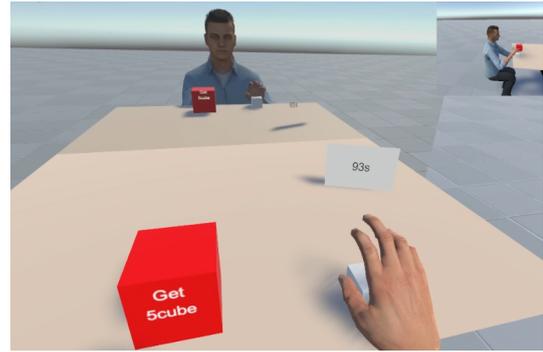


図 2: タスクの様子。参加者の正面には鏡が配置されており、自身の姿が観察できた。

肢」にそれぞれ置き換えられた。また、表 1 (Q1~Q2) に示した質問を用いて、各条件ごとのタスクの楽しさ・易しさが評価された。各条件での 2 分間に運ぶ白い箱の個数はタスクパフォーマンスとして記録された。全てのアンケート項目は 7 段階リッカート尺度 (1:まったく当てはまらない~7:完全に当てはまる) を用いて評価された。

Q	質問内容
1	タスクを行うのは楽しい
2	タスクを行うのは易しい

表 1: アンケートの内容

2.6 実験手順

参加者はまず実験についての説明を受け、同意書に署名した。続いて、実験の流れとバーチャル物体を把持する方法の説明を受け、HMD とトラッキングデバイスを装着し、チュートリアルとして No-co 条件でタスクを行った。チュートリアルが完了した参加者は、カウンタバランスに配慮した順番で No-co, Co-finger, Co-arm, Co-limb の 4 条件のもとで同じタスクを行った。各条件が完了するたびに、参加者は質問しに回答した。

3. 結果

図 3 に指, 腕, 上肢全体のそれぞれに対する身体所有感のアンケート結果を示す。各条件のスコアに対してフリードマン検定を行い、Bonferroni 法を用いて多重検定を行った。結果、指の身体所有感には条件間に有意差が見られなかった (図 3(a)) ( $\chi^2(3) = 5.42, p = 0.14, Kendall's W = 0.23$ )。腕の身体所有感には条件間に有意差が見られ ( $\chi^2(3) = 14.96, p = 0.0019, Kendall's W = 0.62$ )、下位検定により No-co と Co-arm 条件間 ( $p = 0.094$ ) および Co-finger と Co-arm 条件間 ( $p = 0.084$ ) に有意傾向が見られた (図 3(b))。上肢の身体所有感にも条件間に有意差が見られ ( $\chi^2(3) = 11.23, p = 0.011, Kendall's W = 0.47$ )、下位検定により No-co と Co-arm 条件間 ( $p = 0.085$ ) に有意傾向が見られた (図 3(c))。

図 4 に指, 腕, 上肢全体のそれぞれに対する行為主体感のアンケート結果を示す。各条件のスコアに対してフリー

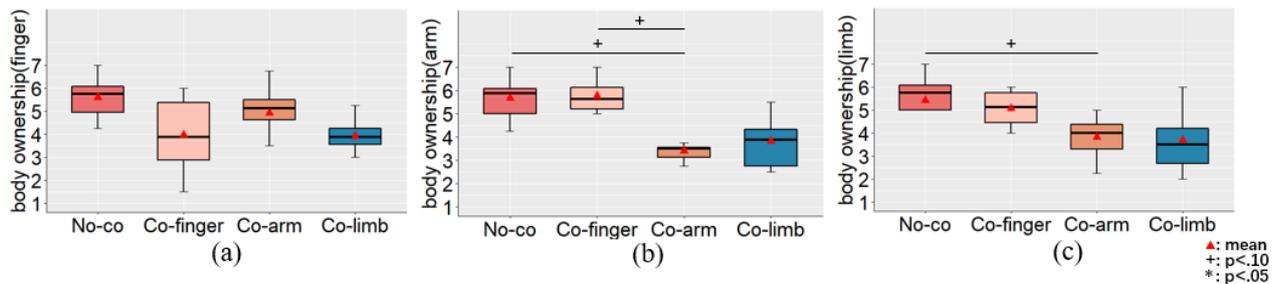


図 3: (a) 指 (b) 腕 (c) 上肢 に対する身体所有感

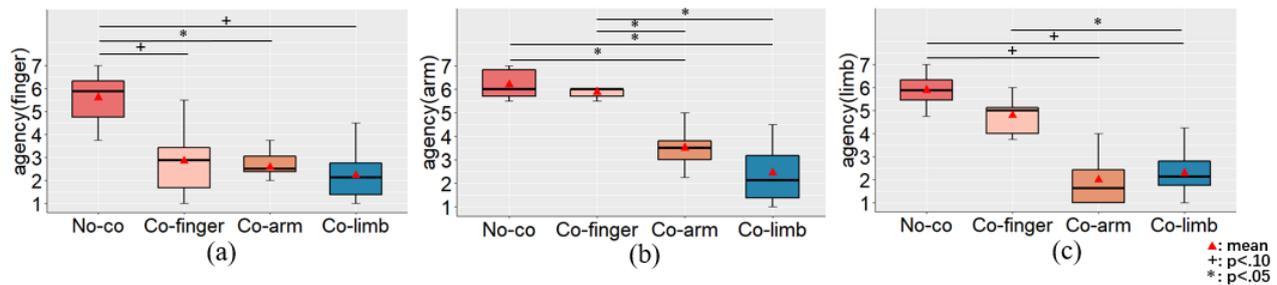


図 4: (a) 指 (b) 腕 (c) 上肢 に対する行為主体感

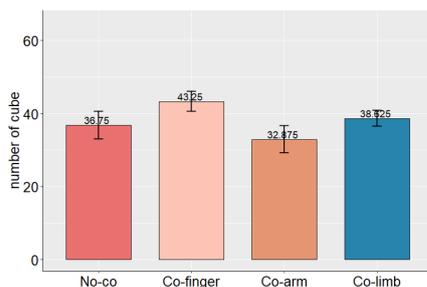


図 5: 各条件において 2 分間に白い箱を運ぶ個数の平均値と標準誤差

ドマン検定を行い、Bonferroni 法を用いて多重検定を行った。結果、指の行為主体感において条件間に有意差が見られ ( $\chi^2(3) = 15.30, p = 0.0016, Kendall's W = 0.64$ ), 下位検定により No-co と Co-arm 条件間 ( $p = 0.047$ ) に有意差が見られ, No-co と Co-finger 条件間 ( $p = 0.084$ ) および No-co と Co-limb 条件間 ( $p = 0.085$ ) に有意傾向が見られた (図 4(a))。腕の行為主体感においても条件間に有意差が見られ ( $\chi^2(3) = 15.30, p = 0.0016, Kendall's W = 0.86$ ), 下位検定の結果 No-co と Co-arm 条件間 ( $p = 0.047$ ), No-co と Co-limb 条件間 ( $p = 0.047$ ), Co-finger と Co-arm 条件間 ( $p = 0.047$ ), Co-finger と Co-limb 条件間 ( $p = 0.047$ ) に有意差が見られた (図 4(b))。上肢の行為主体感において条件間にも有意差が見られ ( $\chi^2(3) = 18.31, p = 0.00038, Kendall's W = 0.76$ ), 下位検定により Co-finger と Co-limb 条件間 ( $p = 0.047$ ) に有意差が見られ, No-co と Co-arm 条件間 ( $p = 0.085$ ) および No-co と Co-limb 条件間 ( $p = 0.083$ ) に有意傾向が見られた (図 4(c))。VEQ の変化と表 1 の Q1, Q2 と 2 分間に運ぶ白い箱の個数で評価するタスクパフォーマンスにフリードマン検定を行った結果、VEQ

の変化 ( $\chi^2(3) = 3.00, p = 0.39, Kendall's W = 0.125$ ) および表 1 の Q1 ( $\chi^2(3) = 7.13, p = 0.068, Kendall's W = 0.297$ ), Q2 ( $\chi^2(3) = 2.48, p = 0.479, Kendall's W = 0.103$ ) において条件間に有意差は見られなかった。また、タスクパフォーマンスにおいても条件間に有意差は見られなかった (図 5) ( $\chi^2(3) = 8.24, p = 0.041, Kendall's W = 0.343$ , 下位検定:  $p = 1, 1, 1, 0.846, 1, 1$ )。

#### 4. 考察

腕に対する身体所有感のスコア (図 3(b)) を見ると、上肢の中で腕の動きだけを制御できなくなる Co-arm 条件では、参加者が上肢全体の動きを問題なく制御できる No-co 条件や、指の動きを制御できなくなる Co-finger 条件に比べて、スコアが低く報告される傾向が見られた。これは、制御不可能な部位に対する身体所有感が低下したものと考えられる。一方で、上肢全体に対する身体所有感に関する結果 (図 3(c)) を見ると、Co-arm 条件では No-co 条件と比べて低い身体所有感が報告される傾向が見られたのに対して、Co-finger 条件においては Co-arm 条件の間に (図 3(b)) では見られたような有意差が認められなかった。これは、Co-finger 条件では指の動きを制御できなくなったことで上肢全体の身体所有感が一部損なわれ、Co-arm 条件では上肢の一部である指の動きの制御権が残っていたため、上肢全体の身体所有感が一部補完されたためだと考えられる。

行為主体感に関する結果 (図 4) を見ると、指に対する行為主体感 (図 4(a)) では指を制御できなくなる条件 (Co-finger) が、腕 (図 4(b)) に対しては腕を制御できなくなる条件 (Co-arm) が、上肢 (図 4(c)) に対しては上肢を制御できなくなる条件 (Co-limb) が、No-co 条件と比べて低く報告されることが示唆された。この結果は、行為の結果の予

測と実際に得られた視覚フィードバックの間に齟齬が検出された時、行為主体感が損なわれると説明する Comparator モデルに合致している [6]. また、指 (図 4(a)) に対する行為主体感においてのみ、指の動きを制御できなくなる Co-finger 条件が No-co 条件よりスコアが有意に低くなる傾向が見られ、その他の腕 (図 4(b)) や上肢 (図 4(c)) においては Co-finger 条件と No-co 条件との間に有意差は見られなかった. その一方で、腕を制御できなくなる Co-arm 条件では、腕 (図 4(b)) はもちろん、制御できたはずの指 (図 4(a)) や指を含んだ上肢全体 (図 4(c)) の行為主体感までもが No-co 条件より低くなる傾向が見られた. ここから、参加者は上肢の一連の行為において、指と腕を個別に認知するのではなく、両者が統合された上肢全体の行為として認知している可能性が示唆される. 本実験では、白い箱を掴む指の動きは固定的で参加者間のばらつきが少ないと考えられる一方で、箱を把持してから赤い箱に入れるまでの腕の運動経路は自由であり、参加者間でのばらつきが相対的に大きかったと考えられる. そのため、Co-finger 条件において指の動きを他者に制御されたとしても、運動予測と観察される動作の視覚的ギャップは、腕の動きを他者に制御された際のそれより小さく、行為主体感が相対的に損なわれにくかった可能性がある. 以上の結果から、動作が固定的で視覚的に占める割合の小さい身体部位 (本研究においては指) の動作は、全体の身体所有感や行為主体感への影響が小さいので、身体の一部を他者に移譲する部位選択型の融合身体における活用の幅が大きいと考えられる.

また制限時間内に赤い箱の中へ運び込んだ白い箱の個数について、4 条件間に有意差は確認されなかった. ただし、参加者からのコメントには「指が勝手に動く時は自分がしつかりやらなくても掴んでくれるから、楽だと思う」や「細かい指の動きが自動的にやれると助かる」といったものがあった. 実際、Co-finger 条件において運び込まれた箱の個数の中央値 (43.50) と平均値 (43.25) は、統計的には有意ではないものの、他の 3 条件に比べて高かった (図 5). この結果は、クレーンなどのオブジェクトの動作を集団で分担制御しながら作業することが、個人で同じ作業をするより高いパフォーマンスをもたらす group benefit と同様の効果である可能性がある. 例えばクレーンにおいては、水平と垂直方向のように二つの空間次元に分散した運動制御を行う場合、二者間で上手く協調することのハードルが低くなり、group benefit が促進される [7]. 物体運搬やピアノ演奏など、指と腕の両方の動作を必要とするタスクにおいては、上肢の一部の動作を他人に移譲する部位選択型融合身体を応用することで、パフォーマンスが向上する可能性が考えられる.

## 5. おわりに

本稿では、アバタの右上肢のうち、腕と指の一部や全部を他者に委譲する部位選択型の融合身体システムを構築した. 右上肢を使って行う物体運搬タスクを通じて Embodiment

やタスクパフォーマンスなどについて評価を行った. その結果、腕を他者に制御された場合の方が、指を制御された場合より、上肢全体の身体所有感や行為主体感が低減することが示唆された. 今後は、ピアノの演奏など、腕と指の両方の動作を必要とする複合的なタスクに部位選択型の融合身体を応用し、パフォーマンスやトレーニングの効果などを検証していきたい.

**謝辞** 本研究の一部は、JST ムーンショット型研究開発事業 (JPMJMS2013) および基盤研究 (S)(19H05661) の支援を受けて行われた.

## 参考文献

- [1] K. Kilteni, R. Groten, and M. Slater, "The sense of embodiment in virtual reality," *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, vol. 21, no. 4, pp. 373–387, 2012.
- [2] R. Fribourg, N. Ogawa, L. Hoyet, F. Argelaguet, T. Narumi, M. Hirose, and A. Lecuyer, "Virtual co-embodiment: Evaluation of the sense of agency while sharing the control of a virtual body among two individuals," *IEEE Transactions on Visualization Computer Graphics*, vol. 27, no. 10, pp. 4023–4038, 2021.
- [3] 伊東亮太, 小川奈美, 鳴海拓志, 廣瀬通孝, "融合身体を用いた身体スキル伝達に関する基礎調査," 第 25 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 2020.
- [4] 藤澤覚司, 上田祥代, 杉本麻樹, 稲見昌彦, 北崎充晃, "共有身体における身体所有感覚と行為主体感," 第 23 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 2018.
- [5] H. Hapuarachchi and M. Kitazaki, "Knowing the partner's objective increases embodiment towards a limb controlled by the partner," in *2022 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces Abstracts and Workshops (VRW)*, pp. 802–803, 2022.
- [6] 佐藤徳, "何が自己を自己たらしめるか? 運動主体感の研究から," *認知科学*, vol. 18, no. 1, pp. 29–40, 2011.
- [7] B. Wahn, A. Karlinsky, L. Schmitz, and P. König, "Let's move it together: A review of group benefits in joint object control," *Frontiers in Psychology*, vol. 9, 2018.