



融合身体下での動作における融合方法の比較 —位置平均方式とベクトル加算方式—

Comparison of Co-embodied Methods for Motion in Virtual Co-embodiment:
Body Position Averaging vs. Vector Summation

森田磨里絵¹⁾, 藤原侑史¹⁾, 中村哲朗²⁾, 松室美紀³⁾,
柴田史久¹⁾, 木村朝子¹⁾, 北川智利⁴⁾⁵⁾

Marie M. MORITA, Yuji FUJIHARA, Tetsuro NAKAMURA, Miki MATSUMURO,
Fumihisa SHIBATA, Asako KIMURA and Norimichi KITAGAWA

- 1) 立命館大学 情報理工学部 (〒567-8570 大阪府茨木市岩倉町 2-150)
- 2) 立命館大学 情報理工学研究科 (〒567-8570 大阪府茨木市岩倉町 2-150)
- 3) Department of Communication, Cornell University (Mann Library, 450, 237 Mann Dr, Ithaca, NY 14853, USA)
- 4) 立命館大学 BKC 社系研究機構 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)
- 5) 吉賀心理学研究所 (〒699-5502 島根県鹿足郡吉賀町田野原 107)

概要: 1 つの VR アバタを複数人が同時に操作する融合身体を用いると、各個人が単独で動作を行うよりも運動効率が高まることが知られている。本研究では、動作の融合方法として、ユーザらの身体位置の平均をアバタに反映される位置平均方式と、ユーザらの動作ベクトルを加算した結果をアバタに反映させるベクトル加算方式の違いが、融合身体下での自己身体の動作にもたらす効果を実験的に検討した。VR 空間内に表示されるターゲットにアバタの手で触れるリーチング課題を行ったところ、ベクトル加算方式で他者と融合したときの方が、自己の腕の動きがより直線的かつ滑らかになることが示された。

キーワード: 融合身体, 共同行為, 身体部位の位置の平均, ベクトル加算

1. はじめに

VR 空間内で、1 つのアバタを複数人で同時に操作するシステムを融合身体という[1] (図 1)。自己と他者とを融合する方法の 1 つとして、アバタの身体を自己と他者の身体部位の位置を平均した位置に表示する位置平均方式が挙げられる [1-5]。位置平均方式の融合身体を用いて他者と身体動作の練習を行うと、自分一人で身体動作を練習するよりも動作の学習効率がよく [2]、学習した動作の定着も良いことが明らかとなっている [3]。さらに、融合して動作を行っているときの自己身体の動作が、ひとりきりで動作を行っているときの動作よりも効率的になるなど [4][5]、融合身体が動作の学習や成績を向上させることが示されている。

融合身体を用いた場合に動作成績が向上する要因のひとつとして、融合するユーザ間で共同行為 (joint action) が成立していることが指摘されている。共同行為とは、2 人以上の個人が時間的・空間的に行為を調整することで環境に変化をもたらす社会的インタラクションと定義される [6]。共同行為の成立には 2 人以上の個人が互いに行為

を調整することが重要であると考えられており [6]、融合するユーザは他者の動作に基づき自己の動作を調節している可能性を示す研究も存在する [2][4][5]。このことから、他者との共同行為が成立しやすい状況であれば、融合身体を用いた動作成績が向上する可能性が考えられる。しかし、位置平均方式での他者との融合は、現実世界での共同行為場面に従っているとは言い難い。現実世界でテーブルを別の場所に運搬する場合、テーブルを 1 人で運ぶときよりも 2 人で運ぶときのほうが各個人にかかる運搬のための負担は少なくなる。つまり、行為者数に応じて、行為者 1 人あたりの負担は軽減される。一方で、位置平均方式の融合身体を用いた場合、アバタの身体はユーザらの身体部位を平均した位置に表示されるため、ユーザ数が増えても自分ひとりで運搬する場合と同じだけの動作量が必要となる。位置平均方式による融合身体は、ユーザ数に応じて動作負担が軽減されないという点が、現実世界での共同行為とは異なると考えられる。

そこで本研究では、より現実場面での共同行為に即した融合方法としてベクトル加算方式を採用する。ベクトル加

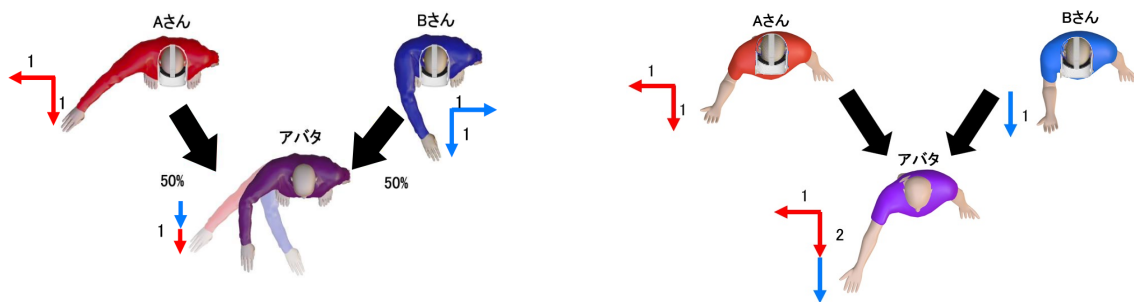


図 1. 位置平均方式（左）とベクトル加算方式（右）による融合身体イメージ

算方式では、ユーザらの動作のベクトルを加算した位置にアバタの身体部位を表示し、他者との融合を実現する。この方式を採用すると、ユーザ数の増加に応じてユーザ一人あたりの動作負担は軽減されるため、位置平均方式よりも現実での共同行為に近い融合方式であると言える。本研究では、ベクトル加算方式と位置平均方式を採用した融合身体システムを用いて他者と動作を行う。各方式における融合身体下での動作成績を比較することで、融合方式の違いがユーザ自身の身体動作にもたらす効果について明らかにすることを目的とする。

2. 方法

2.1 参加者

成人 22 名（11 組）が、2 人 1 組で実験に参加した。いずれの参加者も、矯正を含む健常な視力を持ち、右手での動作に支障がなかった。

2.2 実験環境

各参加者のシステムは、1 台の HMD（Meta Quest 2）と 1 組のコントローラ、1 台の PC で構成されていた。各参加者の 2 台の PC を有線接続し、各 PC にて取得した各参加者のコントローラ位置を PC 間で送受信することで、2 名の参加者のリアルタイムな融合を実現した。

実験で使用したアバタは、身長約 175 cm、腕の長さが約 70 cm であった。参加者の手首に装着したコントローラの位置にアバタの手首を表示した。アバタの基本姿勢は、VR 空間内に設置した椅子に座り、VR 空間内に設置したテーブルに両手を置いた状態とした。2 名の参加者は、それぞれこのアバタの一人称視点で VR 空間に没入した。

ターゲットは、1 辺が 5 cm の赤い立方体であった。ターゲットは、アバタの肩の高さから垂直方向に±45 度（35 cm）、アバタの身体の中線から水平方向に±70 度（65 cm）の楕円形の範囲内に呈示した。ターゲットは、この範囲内であらかじめ設定した 10 箇所の座標のうちいずれか 1 箇所にランダムに呈示した。

2.3 動作反映条件

課題実施時のアバタへの動作の反映条件として、融合の有無（融合、ソロ）と、反映方式（位置平均、ベクトル加算）を組み合わせた 4 条件を設定した。位置平均融合条件では、2 名の参加者のコントローラの位置を平均した位置を算出し、当該位置にアバタの手首を表示した。位置平均ソロ条件では、各参加者のコントローラ位置と同じ位置に

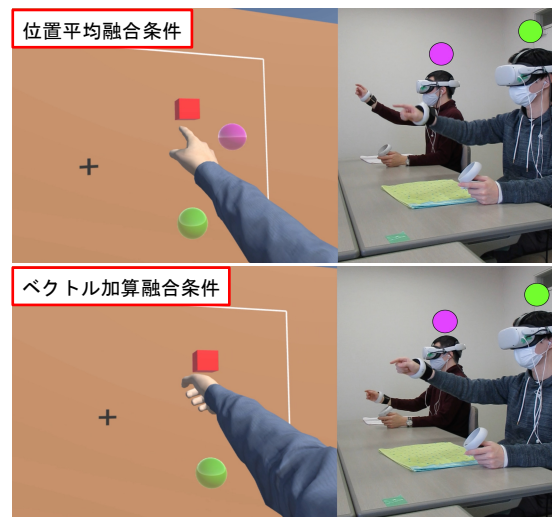


図 2. 位置平均融合条件（上）とベクトル加算融合条件（下）での課題実施中の様子。左図は参加者が観察する VR 空間内の様子を、右は課題実施中の参加者の様子を表す。紫と緑の球体は各参加者のコントローラの位置を、赤の立方体ターゲットを表す。

アバタの手首を表示した。ベクトル加算融合条件では、参加者ごとに現在のコントローラ位置とその直前のフレームにおけるコントローラ位置とのベクトルを算出し、2 名の参加者のベクトルを足し合わせた位置にアバタの手首を表示した。ベクトル加算ソロ条件では、参加者ごとに現在のコントローラ位置とその直前のフレームにおけるコントローラ位置とのベクトルを算出し、各参加者の自身のベクトルを 2 倍した位置にアバタの手首を表示した。

2.4 手続き

参加者は HMD とコントローラを装着した状態で椅子に座り、参加者自身の両手を現実世界のテーブルの上に置いた状態で実験に参加した。各試行では、4 つの融合条件のいずれかの条件下でアバタを操作し、VR 空間内に呈示されるターゲットにアバタの手で触れるリーチング課題を行った後、リーチング課題を行っていた時の行為主体感と身体所有感を評価させた。

参加者には、VR 空間内にターゲットが出現したら、自身の腕を動かしてアバタの腕を操作し、アバタの右手人差し指でターゲットに触れるよう求めた。ターゲットはアバタの指が触れると消滅し、3 秒後にまた新たなターゲットが呈示された。参加者は、各試行において、アバタの手を伸ばしてターゲットに触れること 40 回繰り返した。

リーチング課題終了後、課題中の動作に関する行為主

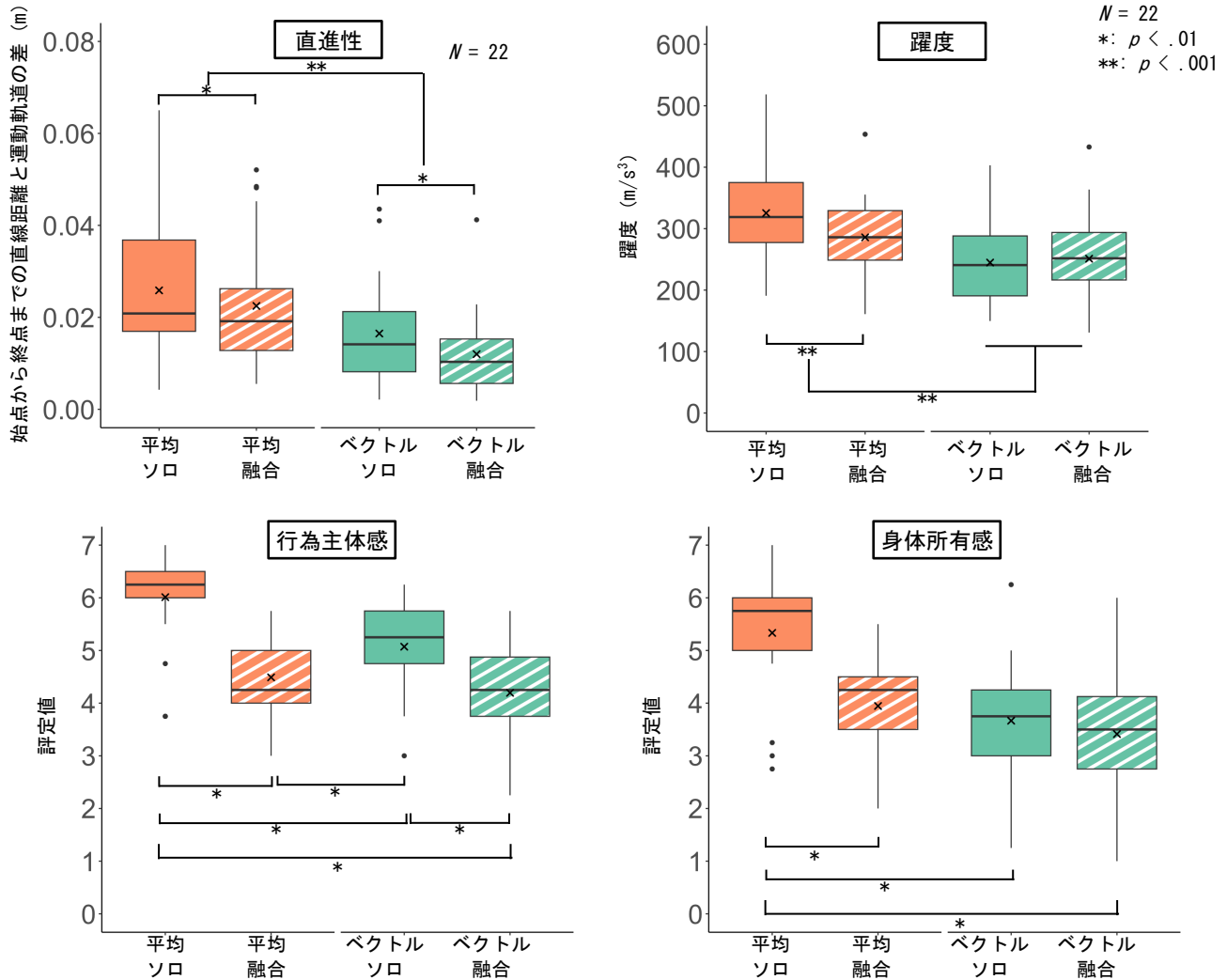


図 3. 直進性, 躍度, 行為主体感, 身体所有感の結果

体感と身体所有感を回答させた。行為主体感は「どの程度アバタの手を制御しているように感じましたか」、身体所有感は「どの程度あなたの見たアバタの身体があなた自身の体のように感じましたか」という質問で測定した。1を「全くそう思わない」、7を「非常にそう思う」として7件法で回答させた。

1ブロックでは、融合の4条件を1試行ずつ実施した。条件の実施順はランダムだった。実験では、ブロックを計4回行った。各融合方法の条件の試行は4試行ずつであり、参加者は合計16試行に参加した。ブロック間では2分間の休憩をとった。

3. 結果

リーチング課題実施時に記録した各参加者のコントローラの動きを分析した。リーチング課題の成績は、直進性（リーチングの始点からターゲットに触れるまでの直線距離と参加者の手の運動軌道の長さの差：値が小さいほど直進性が高い）、躍度（リーチング中の加速度変化率：値が小さいほど動きが滑らか）により評価した（図3）。

直進性に対し、整列ランク変換を施した反映方式2（一平均、ベクトル加算）×融合の有無2（融合、ソロ）の分散分析を行ったところ、反映方式の主効果と融合の有無の主効果が有意であった（反映方式： $F(1,63)=59.08, p<.001$,

融合の有無： $F(1,63)=9.31, p<.01$ ）。これらの交互作用は有意ではなかった（ $F(1,63)=0.004, p=.95$ ）。反映方式と融合の有無について、Holm法を用いた多重比較を行ったところ、位置平均方式よりもベクトル加算方式の方が有意に直進性が高く、融合した方がソロよりも有意に直進性が高かった（ $ps<.01$ ）。このことは、参加者は位置平均方式よりもベクトル加算方式のときに手をより直線的に動かしており、融合するとより動きが直線的になっていたことを示している。

躍度についても、整列ランク変換を施した 2×2 の分散分析を行ったところ、反映方式の主効果、融合の有無の主効果およびそれらの交互作用のいずれも有意であった（反映方式： $F(1,63)=104.06, p<.001$ 、融合の有無： $F(1,63)=6.86, p<.05$ 、交互作用： $F(1,63)=13.46, p<.001$ ）。交互作用が有意であったため、Holm法を用いた単純主効果検定を行ったところ、位置平均ソロ条件よりも位置平均融合条件で躍度が有意に小さかったが（ $p<.001$ ）、ベクトル加算ソロ条件とベクトル加算融合条件との間に有意差は確認されなかった（ $p=.35$ ）。このことは、参加者は、位置平均方式よりもベクトル加算方式のときに自身の手を滑らかに動かしていたことを示している。さらに、位置平均方式では他者と融合することで手の動きがより滑らかになるが、ベクトル加算方式の場合は他者との融合の有無にかか

わらず手の滑らかさは同程度であったことを示している。

行為主体感について、整列ランク変換を施した 2×2 の分散分析を行ったところ、反映方式の主効果、融合の有無の主効果およびそれらの交互作用のいずれも有意であった (反映方式: $F(1,63.00) = 18.29, p < .001$, 融合の有無: $F(1,63.83) = 81.20, p < .001$, 交互作用: $F(1,63.12) = 9.57, p < .005$)。交互作用が有意であったため、Holm 法を用いた単純主効果検定を行ったところ、位置平均ソロ条件が他の条件よりも最も行為主体感が高く ($ps < .001$)、位置平均方式とベクトル加算方式のいずれにおいても、融合のほうがソロよりも行為主体感が低く評価された ($ps < .001$)。位置平均融合条件とベクトル加算融合条件との間に有意差は確認されなかった。このことは、ソロの動作では位置平均方式のほうがベクトル加算方式よりも行為主体感が高く感じられること、いずれの反映方式においても他者と融合することで行為主体感が低下することを示している。

身体所有感についても整列ランク変換を施した 2×2 の分散分析を行ったところ、反映方式の主効果、融合の有無の主効果およびそれらの交互作用のいずれも有意であった (反映方式: $F(1,63.00) = 18.29, p < .001$, 融合の有無: $F(1,63.73) = 81.20, p < .001$, 交互作用: $F(1,63.84) = 9.57, p < .005$)。交互作用が有意であったため、Holm 法を用いた単純主効果検定を行ったところ、位置平均ソロ条件における身体所有感が最も高く ($ps < .001$)、位置平均融合条件・ベクトル加算ソロ条件・ベクトル加算融合条件の間に有意な身体所有感の差は確認されなかった。これらの結果は、位置平均方式では、他者と融合することで身体所有感が低下すること、ベクトル加算方式下ではソロでも融合でも身体所有感が低下することを示している。

4. 考察

本研究では、他者との融合を実現する方法として、ユーザの身体部位を平均した位置にアバタを表示する位置平均方式と、ユーザの動作ベクトルを加算した位置にアバタを表示するベクトル加算方式を採用し、融合方法の違いが融合身体下での身体動作にもたらす効果を比較した。

ベクトル加算方式の融合身体下では、位置平均方式の融合身体を用いる場合よりも直進性と躍度が向上していたことから、ベクトル加算方式での融合が各個人の身体動作の成績をより向上させると解釈できる。本研究では、行為者の数に応じて行為者一人あたりの動作負担が軽減するという現実場面での共同行為の特徴に着目し、これに即した融合方法としてベクトル加算方式を提案した。現実場面での他者との共同行為場面に近い方式を採用したことで、互いの動作の調節がしやすくなり、各個人の動作成績が向上した可能性が考えられる。また、どちらの反映方式においても、ソロよりも融合において直進性が向上した。このことは、どちらの反映方式においても、融合時は他者の動作に基づき自己動作の調節ができていたことを示唆する。

行為主体感および身体所有感、位置平均方式よりもベ

クトル加算方式において低下した。ベクトル加算ソロ条件では自己の動作ベクトルの 2 倍の位置に、ベクトル加算融合条件では 2 名のユーザの動作ベクトルを足し合わせた位置にアバタの手が表示されていたため、アバタの手の位置が自身の手の位置よりも遠くにあるように表示されていた。自身の手の位置とアバタの手の位置が一致していなかったことで、ベクトル加算ソロ条件においても行為主体感と身体所有感が低下したと考えられる。

本研究では、アバタへの動作の反映方式を 2 種類設定したが、いずれの反映方式においても、アバタからターゲットまでの距離は同一であった。したがって、ベクトル加算方式で課題を実施した場合は、位置平均方式よりも自身の腕を伸ばす距離が短かった。ベクトル加算方式において直進性や躍度が向上したのは、腕を動かす距離が短く、ターゲットに触れるまでの腕の動きが乱れづらかった可能性が考えられる。今後の研究では、ベクトル加算方式と位置平均方式でのターゲットまでの距離を操作し、どちらの方式においても腕の動作量が同程度となる状態で同様の課題を実施する必要がある。

謝辞 本研究は科研費・基盤研究 (S) 19H05661 の助成を受けたものである。

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] 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.
- [3] Takita, H., Hatada, Y., Narumi, T., & Hirose, M. (2023). Effects of Virtual Co-embodiment on Declarative Memory-Based Motor Skill Learning. *In ACM Symposium on Applied Perception 2023* (pp. 1-10)
- [4] Hagiwara, T., Ganesh, 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
- [5] 中村哲朗, 森田磨里絵, 郷原皓彦, 松室美紀, 柴田史久, 木村朝子, 北川智利: 融合身体における二者間の相互作用 -リアルタイムでの融合と事前記録との融合の比較-, 第 27 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 3C1-2
- [6] Sebanz, N., Bekkering, H., & Knoblich, G. (2006). Joint action: bodies and minds moving together, *Trend in Cognitive Sciences*, Vol. 10, No. 2, pp. 70 - 76