



融合身体を用いた全身運動における鏡の効果

岡時生¹⁾, 後藤拓海¹⁾, 櫻井翔¹⁾, 野嶋琢也²⁾, 広田光一¹⁾

Tokio OKA, Takumi GOTO, Sho SAKURAI, Takuya NOJIMA, and Koichi HIROTA

1) 電気通信大学 大学院 情報理工学研究科

(〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1, {tokio_oka, goto.takumi, sho, hiroya@vogue.is.ucc.ac.jp})

2) 電気通信大学 大学院 情報理工学研究科 (〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1, tnojima@nojilab.org)

概要: 融合身体(複数人の動作データを融合したアバタ)を用いる時, 実身体と融合身体の動作に差が生じる. 特に全身動作を行なう時, 鏡等がなければ融合身体の動作の把握と融合相手の動作の推定が難しくなる. 一方, 全身の動作の差が明確に知覚されると, 融合身体への身体所有感や行為主体感が低下する可能性がある. 本研究では, 融合身体を用いて全身運動を行なう際, 鏡の有無によって融合身体及びその動作に対する知覚の違いを検証し, 鏡を用いることが適していることを明らかにした.

キーワード: 融合身体, 身体所有感, 行為主体感, 鏡

1. はじめに

Head mounted display (HMD) を用いた Virtual reality (VR) において, 自分の代替身体(アバタ)を用いる場合がある. アバタは基本的に 1 人で操作するものであるが, 複数人で 1 つのアバタを操作することも可能である. 本稿では, 複数人で操作するアバタを融合身体[1] (或いは共有身体[2], 本研究では融合身体で統一する), 融合身体を用いる VR 体験を融合身体 VR と呼称する.

融合身体概念の提案[1]に端を発し, 融合身体を用いるユーザ間での身体スキル伝達効果の調査[3]や, 融合身体への行為主体感を向上する手法の検証[4]が行われてきた. 先行研究[1][3]では, ユーザが他者の動作と融合した融合身体に対し強い行為主体感(アバタの動作が自分の意思によるものであるという認識)を生起することによって, 身体図式(身体部位の位置関係, 姿勢, 動作に必要な各部位の運動量)をユーザ自身から融合身体へと更新する可能となり, 身体運動学習に活用できると期待された. また, これらの研究では, 視点を一人称視点とし, 手のみを対象とした融合身体 VR のタスクが設計され, 動作の融合は手に対してのみ施されていた[1][3][4]. そのため, 被験者は融合身体の手やその手で操作する VR 上の物体に注視していたと考えられ, 一人称視点のみであっても融合身体の動作を視界に捉えることは容易であったと考えられる. 一方で, 融合身体を全身運動に用いる場合, 一人称視点のみでは常にアバタの全身を視界に捉えることは難しい. 先行研究では融合身体を用いた身体運動学習には動作を視認し, その動作に強い行為主体感が生起される必要があると指摘されている[1][3]. よって, 融合身

体を用いた全身運動において, 全身の視認を容易とする手段が必要である.

実世界でも VR でも, 一人称視点で操る身体の全身を視認するツールとして多く用いられるのは鏡である. 一人称視点の融合身体 VR においても, 常に正面(一定の方向)に向いている様なタスクであれば, 鏡によって全身の動作を視認しやすくなると考えられる. 一方で VR 上の鏡像に対する身体所有感の先行研究[5]では実身体と鏡像の動作が同期している条件では, 非同期の条件と比較して身体所有感が有意に高いことが報告された. このことから, 鏡によって融合身体と実身体の動作の差を明確に認識された時, 身体所有感(アバタが自分の身体であるという認識)や行為主体感(アバタを自分が動かしているという感覚)が低下する可能性がある. これらの感覚が低下する場合, 融合身体を身体運動学習に用いることが適切かは分からない.

本研究では, 一人称視点での融合身体 VR において, 鏡の有無による融合身体全身動作の視認の成否からユーザの動作に生じる影響と, 身体所有感および行為主体感に生じる影響の調査を目的とする.

2. 実験

上記の融合身体 VR タスクにおける鏡の影響として, 先行研究をもとに表 1 に示す 3 つの仮説を立てた. 先行研究[3]において, 手のみの融合という限定した条件であれば, 融合身体が通常のアバタより行為主体感を有意に低

下させることはなかったと報告された。全身の融合身体であって、融合身体をしっかりと視認可能な場合においても、融合身体には自身の動作が部分的に反映されているため、身体所有感や行為主体感が低下することはないと考え、H1, H2 を立てた。鏡によって全身の視認が容易になるだけでなく、同じ融合身体の部位について融合身体自体と鏡像の2つを観察可能となることによって、融合相手の動作の読み取りが正確になると考え、仮説 H3 を立てた。上記目的を達成する上で、本研究では、融合相手の動作に被験者が追従するリーチングタスク（追従タスク）を対象に、以下の仮説を検証するための実験を行なった。追従タスクを対象としたのは、追従タスクであれば相手の動作を読み取って自身の動作に反映させる必要が生じ、被験者と融合相手の手足の位置の差を計測することによって動作の読み取りの正確性を評価できると考えたためである。

表 1: 仮説

H1	鏡の有無は、融合身体に対する身体所有感に影響を与えない
H2	鏡の有無は、融合身体に対する行為主体感に影響を与えない
H3	融合身体 VR において鏡を利用した場合の方が鏡を利用しない場合と比較して、融合身体から正確に融合相手の動作を読み取れる

2.1 実験環境

実験には VR 空間を視認させるための HMD として HTC VIVE PRO (HTC Corporation), 全身をトラッキングするモーションキャプチャカメラ (Prime X13 18 台 (Motive, OptiTrack, NaturalPoint, Inc)) を用いた。また、実験の VR 環境の構築には Unity (Version 2019.4.18f) を使用し、アバター作成には VRoid Studio (ピクシブ株式会社) を使用した。

融合身体となるアバターには、実験者を務めた 24 歳男性の動作を事前に記録したデータ (教師データ) と被験者のリアルタイムの動作データを合成して付加した。記録したデータを用いたのは、被験者間で条件を揃えるためである。融合箇所は頭、腰、両手、両足であり、それぞれの位置と回転を 1:1 で融合した。回転は Unity の Quaternion の線形補完で融合した。融合箇所以外の部位の動作は Inverse Kinematics によって計算しアバターに適用した。一人称視点を成立させるため、HMD に出力するための VR 上のカメラの位置は教師データの HMD の位置と被験者の動作データの HMD の位置の平均値を用いた。

2.2 実験条件

実験ではアバターを認識する手段として、一人称視点のみ (OF 条件), 一人称視点と鏡 (FM 条件), 鏡のみ (OM 条件) の 3 条件を用意した。各条件下の融合身体および VR 環境の様子を図 1 に示す。

2.3 評価項目

実験では被験者の主観評価として条件毎のリーチングタスク後のアンケート (条件毎アンケート) と、全条件終了後のアンケート (終了後アンケート) をとった。また、各条件における被験者の動作データとして、タスク中、各フレームでの被験者の手足の位置座標も計測した。アン



図 1: OF 条件 (左), FM 条件 (中央), OM 条件 (右) の概念図

ケート内容を表 2, 表 3 に示す。Qa1, Qa2, Qa4, Qb3, Qb4 の回答方法は 7 段階リッカート尺度とし、評価値は Qa1, Qa2 は 1 (感じなかった) から 7 (感じた), Qa4 は 1 (しにくかった) から 7 (しやすかった), Qb3 は 1 (酔わなかった) から 7 (酔った), Qb4 は 1 (全く残らなかった) から 7 (非常に残った) とした。Qa3 の回答方法は自分 (%) : 他者 (%) とし, Qa5, Qa6, Qb5, Qb6 の回答方法は自由記述とした。Qb1, Qb2 の回答方法は 3 つの条件から 1 つを選択する選択方式とした。

表 2: 条件毎アンケート項目

番号	項目
Qa1	アバターは自分の身体であると感じましたか?
Qa2	アバターは自分の意図によって動いたと感じましたか?
Qa3	どのくらい他者の動きが混ざっていると感じたか
Qa4	アバターを操作しやすかったですか?
Qa5	何を見て手足の移動タイミングと移動方向を判断しましたか?
Qa6	その他気づいたこと

表 3: 終了後アンケート項目

番号	項目
Qb1	手足の移動タイミングと移動方向の判断が最も簡単だったのはどの条件でしたか?
Qb2	手足の移動タイミングと移動方向の判断が最も難しかったのはどの条件でしたか?
Qb3	酔いは感じましたか?
Qb4	アバターの顔は印象に残りましたか?
Qb5	バタの見た目について全体的にどのような印象を受けましたか?
Qb6	その他気づいたこと

2.4 実験手順

まず、被験者を実験室に招き、実験の目的を「動作が融合したアバターを用いた際の作業効率の検証」と伝え、実験の趣旨および内容を説明した。その上で、本実験参加への同意を得た被験者に限り、融合身体と実験環境に慣れてもらうための実験練習に移行した。

実験練習では、被験者に HMD を装着させ、指定の位置に立たせた上でアバターが自身の動きに追従しているかを確認させた。確認後、リーチングタスク練習を開始した。タスク開始と同時に、黒い円 (外周半径 0.10 m, 内周半径 0.07 m) が被験者の正面に 3 行 4 列で計 12 個、足元に 2 行 4 列で計 8 個表示された。円の中心同士の間隔は 0.3 m であった。被験者には、融合身体の動作に基づいて融合相手がどの手足を用いてどの円にタッチしているか、或いはタッチしようとしているかを判断し、同じ手足を用い

て同じ円にタッチさせた。この時、教師データは 10 秒に 1 回、手又は足を移動させ円にタッチした。教師データの各手足は円に 3 回ずつタッチし、合計 12 回手足を移動させた。1 回のタスク練習は 130 秒で終了した。タスク練習終了後、被験者は条件毎アンケートに回答した。タスク練習とアンケートを 1 セットとして 3 条件下で実施した後、実験本番に移行した。

実験本番では実験練習と同様に、3 条件下でリーチングタスクとアンケートを実施した。本番中は動作データを計測した。3 つの条件が終了した後、被験者は終了後アンケートに回答した。本実験は被験者内計画で実施した。

3. 結果

実験には 22 歳から 24 歳の 6 人の被験者（男性、年齢 22.5 ± 0.8 SD）が参加した。

実験本番のアンケート結果は一元配置分散分析を用いて分析した。条件毎アンケートの Qa1（身体所有感）、Qa2（行為主体感）、Qa3（合成比率の判断）、Qa4（操作感）の結果を図 2 に示す。ただし、Qa3 は自分側（被験者側）の合成比率を処理した。分析の結果、全てに有意差は得られなかった（Qa1: $F(2, 10)=0.05, p=.95, \text{effect size } f=0.10$; Qa2: $F(2, 10)=0.15, p=.86, \text{effect size } f=0.17$; Qa3: $F(2, 10)=0.46, p=.64, \text{effect size } f=0.30$; Qa4: $F(2, 10)=1.79, p=.22, \text{effect size } f=0.60$ ）。また、Qa1 の各条件間の平均の差の 95% 信頼区間は、OF-FM 条件間で $[-1.5, 1.2]$ 、OF-OM 条件間で $[-1.5, 1.5]$ 、FM-OM 条件間で $[-1.2, 1.5]$ と推定された。Qa2 の各条件間の平均の差の 95% 信頼区間は、OF-FM 条件間で $[-1.7, 1.1]$ 、OF-OM 条件間で $[-1.8, 1.5]$ 、FM-OM 条件間で $[-1.3, 1.7]$ と推定された。これより、鏡を用いることによってアバタに対する身体所有感と行為主体感が 95% 信頼区間で（7 段階リッカート尺度における）1.5 以上低下しないことが確認された。一方で、同等性マージンを ± 0.75 とした場合、身体所有感と行為主体感に各条件間で同等性は認められなかった。また、合成比率についてはどの条件においても自分側を低く見積もる傾向があることが示された。

終了後アンケートについて、Qb1（動作の判断が最も容易な条件）の結果は FM 条件を選択した被験者が 4 人、OM 条件を選択した被験者が 2 人であった。一方、Qb2（動

作の判断が最も困難な条件）の結果は全員（8 人）が OF 条件を選択した。これは、鏡があると動作判断が容易と評価されたことを示す。Qb3（酔い）の結果は 3.2 ± 1.8 SD、Qb4（アバタの顔の印象）の結果は 4.0 ± 1.8 SD であった。

手と足の計測データについて、以降の分析には 3 つの条件（条件要因）と手足（部位要因）の 2 つを要因とする二元配置分散分析を用いた。教師データと被験者データの各部位の位置の差を図 3 に示す。ただし、手については被験者の正面に提示された円と平行な面（XY 平面）上の位置の差を求め、足については地面と平行な面（XZ 平面）上の位置の差を求めた。分析の結果、交互作用、各要因の主効果に有意差は得られなかった（交互作用: $F(2, 10)=3.1, p=.13, \eta^2=0.08$; 条件要因: $F(2, 10)=1.2, p=.35, \eta^2=0.04$; 部位要因: $F(1, 5)=1.0, p=.37, \eta^2=0.04$ ）。教師が最初に円にタッチするために動き始めた時刻から最後に円をタッチするために動いた時刻に 10 秒加算した時刻までの時間における、被験者の手の XY 平面上の速度の絶対値と足の XZ 平面上の速度の絶対値を算出した。速度は 0.05 秒毎の移動距離から算出した。算出した速度の絶対値の各条件における平均値を図 4 に示す。分析の結果、交互作用及び 2 つの要因の主効果が有意であった（交互作用: $F(2, 10)=12.5, p=.00, \eta^2=0.03$; 条件要因: $F(2, 10)=7.8, p<.01, \eta^2=0.05$; 部位要因: $F(1, 5)=22.1, p<.01, \eta^2=0.58$ ）。条件要因の単純主効果は部位要因が手の水準の場合のみ有意であった（手水準: $F(2, 10)=9.7, p<.00, \eta^2=0.20$; 足水準: $F(2, 10)=1.8, p<.22, \eta^2=0.16$ ）。部位要因の手水準における条件要因について多重比較を行った結果、OF 条件は他の 2 つの条件より速度の絶対値の平均が有意に高いことが示された（OF-FM 間: $p=.02$; OF-OM 間: $p=.03$; FM-OM 間: $p=.27$ ）。部位要因の単純主効果は条件要因の全ての水準で有意であった（OF 条件水準: $F(1, 5)=23.3, p=.00, \eta^2=0.64$; FM 条件水準: $F(1, 5)=25.5, p=.00, \eta^2=0.70$; OM 条件水準: $F(1, 5)=14.6, p=.01, \eta^2=0.58$ ）。以上より、鏡を用いない際に、被験者の手の位置が安定しないことが示された。

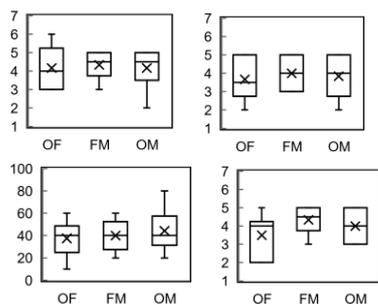


図 2: アンケート Qa1 (左上), Qa2 (右上), Qa3 (左下), Qa4 (右下) の回答

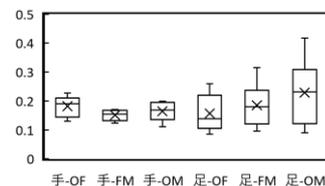


図 3: 教師と被験者の手足の位置の差

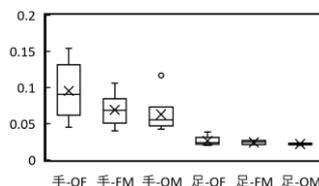


図 4: 被験者の手足の速度の絶対値の平均

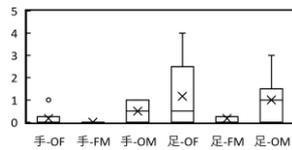


図5: 被験者が教師の動作を見落とした回数

被験者の位置データより、手足の位置について、ある時刻における位置とその時刻から10秒後の位置の差(10秒間隔の位置差)を算出し、教師が手足を円に動かした時刻から同じ手足を別の円に動かした時刻までの間に、算出した位置差に0.15m(円の間隔の半分)以上の値が存在しない場合、被験者が教師の動作を見落としたものとしてカウントした。見落とし回数を図5に示す。見落とし回数について手足と実験条件を要因とし整列ランク変換と二元配置分散分析を用いて分析を行った結果、交互作用には有意差が得られなかった($F(2, 25)=1.1, p=.36, \text{partial } \eta^2=0.08$)。条件要因では有意差が得られた($F(2, 25)=5.3, p=.01, \text{partial } \eta^2=0.30$)。一方で手足要因において有意差は得られなかったが、有意傾向は見られた($F(1, 25)=4.0, p=.06, \text{partial } \eta^2=0.30$)。このことから、一人称視点と鏡を同時に使用することによって教師データの動作を見落としにくくなることが示された。

4. 考察

全条件間で身体所有感及び行為主体感の評価値に同等性が認められなかったことから、H1, H2は支持されなかった。ただし、全条件間の有意差も認められなかったことは、H1, H2は否定されていないことを併せて意味する。これについて、本実験においては被験者数が6人であることによる同等性検定、あるいは有意差検定の過誤の可能性がある。また、同等性検定における同等性マージンは先行研究[6][7]において統一されたものではなく、本研究においては下限から上限の幅が7段階リッカート尺度における間隔の25%として定義したが、この同等性マージンが適切か否かについても議論の余地がある。

教師データと被験者データの手足の位置の差が非有意であったことから、H3も支持されなかった。融合身体における融合部位の位置は自身と融合相手の間の位置となる。本実験の様に融合相手が停止している時間がある場合、自身の身体的位置を知覚する体性感覚等と視認された融合身体的位置が融合相手の位置を推定する手がかりとなりうる。しかし、本実験では融合身体の原理の説明や、長時間融合身体を使用する準備はしなかったため、被験者は融合身体から相手の位置を推定する方法を理解していなかった可能性が高い。そのため、融合身体を視覚的に捉えても教師の動作を正確に読み取ることが困難であり、H3が支持されなかったと考えられる。

他方、速度の絶対値の平均値から、鏡を用いない場合は被験者の手の位置が安定しないことが分かった。この理由として考えられるのは、足元を視界に入れるために生じる

頭部の動きの違いである。一人称視点のみの場合、融合身体のは頻りに視線を真下に向けなければ視界に入りにくいいため、足元を見るには頭部を動きが大きくなる。一方、鏡がある場合は真下を直視せずとも足元を視界に捉えやすくなるため、一人称視点のみよりも頭部の動きが小さくなり、手の位置が安定したと考えられる。

5. おわりに

本研究において、H1, H2, H3は全て支持させることはなかった。一方で、主観評価Qb1, Qb2の結果や見落とし回数、速度の絶対値の平均から、融合身体の動作を把握するためには一人称視点のみではなく、鏡も同時に使用することによって、足元が視認しやすくなり、動作判断も行いやすくなると考えられた。そして、鏡を用いることによって身体所有感や行為主体感が有意に低下することは確認されなかった。以上より、融合身体VRというアバタの動作を視認する必要がある状態において、特に全身運動を行う場合、一人称視点のみでアバタを提示する方法より一人称視点と鏡を同時に使用しアバタを提示する方法が適していると示唆された。

本研究では鏡による効果が一部明らかとなったものの、身体所有感や行為主体感に対する影響については有意差も同等性が確認できなかった。また、被験者の融合身体そのものに対する理解が実験結果を左右する可能性も示唆された。今後は、今回の結果を踏まえ検証する予定である。

謝辞 本研究はJSPS基盤研究(S)(JP19H05661)の支援を受けて行われた。また、実験は電気通信大学の倫理審査委員会の承認(管理番号20068号)を受けて実施した。

参考文献

- [1] R. Fribourg, et al.: Virtual Co-Embodiment: Evaluation of the Sense of Agency while Sharing the Control of a Virtual Body among Two Individuals, IEEE VR'20 TVCG, 2020.
- [2] 藤沢ら: 共有身体における身体所有感と行為主体感, 第23回VRSJ大会論文集, 33E-5, 2018
- [3] 伊東ら: 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VRSJ大会論文集, 3C3-7, 2020.
- [4] 児玉ら: 身体融合時の動的な寄与率制御による行為主体感向上, 第26回VRSJ大会論文集, 1C3-4, 2021.
- [5] M. González-Franco, et al.: The contribution of real-time mirror reflections of motor actions on virtual body ownership in an immersive virtual environment, IEEE VR'10, pp. 111-114, 2010.
- [6] 小柳ら: Liquid Hand Illusion 液体に対する身体所有感の生起に関する研究, 第24回VRSJ大会論文集, 2C-05, 2019.
- [7] 小柳陽光, 大村廉: 飛行体験における没入感向上のための鳥アバタへの身体所有感の生起可能性の検討, 日本VR学会論文誌, Vol.22, No.4, pp.513-522, 2017.