



教師・生徒アバタの視覚フィードバックの付加が 融合身体の運動学習に及ぼす影響

井上大地, 橋本健, 峯大典, 橋浦健太, 谷川智洋, 鳴海拓志, 葛岡英明

東京大学 情報理工学系研究科 (〒 113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1,

{daichi,hashimoto,mine,hashiura,tanikawa,narumi,kuzuoka}@cyber.t.u-tokyo.ac.jp)

概要: 加重平均型の融合身体は運動の習得を促すが, 学習後に生徒が一人で融合時の動作を再現するのが難しいという課題がある. 原因として, 融合中に教師の動作が先行し, 生徒の動作が十分に教師と同期できないことが考えられる. 本研究では, 既存の融合身体に教師・生徒アバタの動作の視覚フィードバックを付加する二条件の実験を実施し, 学習時の動作の同期や学習効果への影響を調べた. 実験の結果, 教師アバタの視覚フィードバックを付加することで学習時の課題成績が向上したが, 教師アバタに注意を向けすぎることによって学習後の動作再現性には課題が残った.

キーワード: 融合身体, 運動学習, デュアルタスク, 視覚フィードバック

1. はじめに

運動学習は, スポーツやリハビリテーション, エンターテインメントなど多岐にわたる分野で重要な役割を果たしている. 近年では, バーチャルリアリティ (VR) 技術の発達により, 身体運動の学習環境も大きく変化している. VR を用いた動作トレーニングシステムは, 生徒が教師の動作を 1 人称視点で観察することを可能にし, 正確な動作を素早く学習することを支援する. Yang らは, VR 空間で教師のモーションデータと学習者のアバタを重ね合わせ, 運動の差異を視覚化する Just Follow Me を開発した [1]. これは教師の動きをトレースするように体を動かすことで, 教師の体の動かし方を自分の身体で再現することができた. しかしながら, この方法では動きの模倣に偏り, 長期的なスキルの定着ができないという課題がある.

この問題を解決するため, 教師と学習者が同一のアバタを共有し, 共同で動作する「融合身体」という新たなアプローチが開発された [2]. これにより, 言語化しにくい微細な動作を学習者が直接体感しながら学習を行うことが可能になった. 実際, 教師と学習者が均等の割合で操作する状態のもとでの学習が, 模倣や単独学習に比べて学習速度の向上に寄与することが明らかにされている [3].

一方で, この融合身体は運動学習を促進させるものの, 学習後に生徒が一人で運動する際に課題の成績が急落する課題がある (図 1 参照). この原因として, 学習時に教師と生徒の動作が乖離し, 生徒の動作が十分に教師と同期できていないことが考えられる. これを解決する手法として, 既存の融合身体に教師アバタを提示する Just Follow Me (JFM)[1] を付加し, 生徒に教師との動作の乖離を意識させることが有効であると考えられる.

本研究では, 融合中の生徒への教師との動作の同期の手がかりとして, 教師や生徒のアバタを表示することで, 学

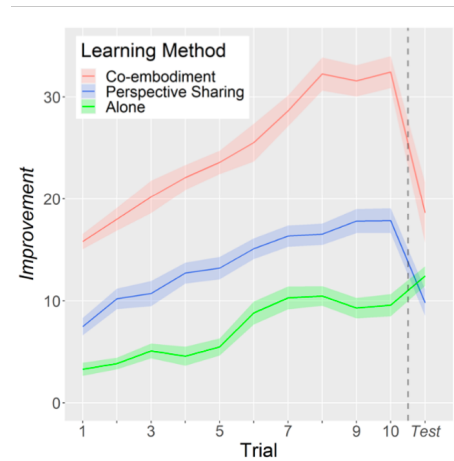


図 1: Kodama ら [3] による融合身体でのデュアルタスクの課題成績の折れ線グラフ. 縦軸が課題成績, 横軸は何試行目かを示す. 融合身体条件のテスト段階で課題成績が急落している.

習時の両者の動作の同期や運動学習の効果が改善されると考え, 検証を行った.

本研究の主な貢献は (1) デュアルタスクを例に融合身体アバタへの教師・生徒アバタの付加によるパフォーマンスや動作の同期の増減を確認したこと, (2) 融合身体アバタへの教師アバタの付加は学習時の成績を向上させるが, 学習時に生徒が自らの動作に注意を払って課題を遂行しなければ運動学習の効果を上げるものではない可能性を示したこと, の二つである.

2. 実験

2.1 参加者

20 名 (男性 14 人・女性 6 人, 21-25 歳, 平均年齢 23.4 歳) が実験に参加した. 参加者のうち, VR 空間への没入経

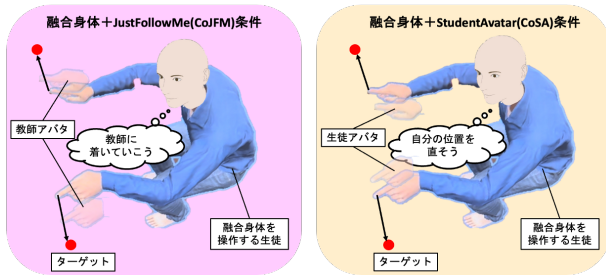


図 2: 二条件での実験の様子。教師・生徒アバタを付加することで融合身体中の動作の同期を促す。

験が全くない者が 17 名，月に 1 回程度の者が 2 名，月に複数回の者 1 名であった。

2.2 融合身体の数値法と 2 条件のフィードバック方法

融合身体アバタには Kodama ら [3] の計算方法を利用した。融合身体アバタの位置ベクトルは参加者である生徒と実験実施者である教師の位置ベクトルの平均として算出した。同様に融合身体アバタの手の姿勢についても生徒と教師のクォータニオンの平均をとることで算出した。位置や姿勢の情報の取得は実験参加者がアバタ操作のために把持した Meta Quest 2 Controller によって行った。また，Just Follow Me (JFM) /Student Avatar(SA) 条件ではそれぞれ融合身体アバタに加え，教師/生徒の手の座標と姿勢を反映した半透明な手のアバタを表示した（図 2 参照）。

2.3 実験タスク

参加者は実験タスクとして左右の指先で同時に異なる図形を描くデュアルタスクを行った。融合身体アバタから見て左手側に正五角形の頂点，右手側に正七角形の頂点の位置に球オブジェクトを配置した。デュアルタスクでの 1 試行は 30 秒間であり，課題開始直後に左右の五，七角形のいずれかの頂点に赤いターゲットが表示された。参加者はその点に左右の指先に触れたのち，五角形は一つ飛ばし，七角形は二つ飛ばしで連続的に頂点を結ぶことで左右の手で五芒星と七芒星を同時にえがくように手を動かした。休憩時間は 30 秒であり，ターゲットは表示されず，参加者は次の試行に向けて休憩を行った。

2.4 実験条件

本実験は，以下の 4 条件を参加者間計画で実施した。

- 融合身体+JustFollowMe (CoJFM) 条件：参加者は融合身体に加え，教師の手の位置と姿勢を反映した教師アバタを同時に見ながらタスクを行った。
- 融合身体+StudentAvatar (CoSA) 条件：参加者は融合身体に加え，参加者自身の手の位置と姿勢を反映した生徒アバタを同時に見ながらタスクを行った。

これら二つの条件と，Kodama ら [3] によって計測された以下の二つの条件におけるパフォーマンスを比較する。

- 融合身体 (Co) 条件：参加者は融合身体を用いてタスクを行った。
- 視界共有 (FP) 条件：参加者は自らの手の位置と姿勢

を反映した生徒アバタと教師の手の位置と姿勢を反映した教師アバタを用いてタスクを行なった。

2.5 実験手順

実験は 1 名ずつ行った。事前に参加者は融合身体+Just-FollowMe 条件または融合身体+StudentAvatar 条件に割り当てられた。参加者は研究内容や個人情報保護に関する説明を受けたのちに，実験参加への同意書へ署名を行った。次に，事前アンケートに答え VR ヘッドセットを装着し，実験タスクに関する説明を受けた。実験試行はチュートリアル，ベースライン，学習，テストの 3 段階に分けられた。チュートリアルでは実験に用いる VR 環境に慣れるため，学習やテスト時と同様の環境で試行は行わず融合身体アバタで動きや課題の確認を行った。ベースラインとして非融合状態で 1 試行を行ったのち，学習で融合状態の各条件での試行を 5 回繰り返し，1 分の休憩をとって再度 5 回の施行を行った。テストでは参加者は非融合状態で 3 回の施行を行った。試行後には VR ヘッドセットを外し事後アンケートに回答した。また，課題や VR 体験，融合アバタへの所見について半構造化インタビューを行なった。

2.6 評価方法

デュアルタスクの課題成績を測る指標として，以下の項目を測定した。まず，チュートリアルの直後に行なった試行の成績をベースラインとした。第二に，各試行 10 回の課題成績からベースラインを引いたものを Improvement と定義し，学習効果の測定に用いた。第三に，学習定着の指標として，テスト段階の 3 回の試行のうち最大改善度のものをテストスコアと定義し，参加者の運動学習の効率の指標として用いた。最後に，学習効果の継続の程度を示す指標として，融合を解除した際にどれだけ課題成績が低下するかを Performance drop と定義した。Performance drop は学習段階の最後の Improvement からテストスコアを差し引いて算出した。また，教師と生徒の手の動きがどれくらい同期しているかや離れているかを評価するため，Hand distance (教師と生徒の左右の手の位置のユークリッド距離の 1 試行での平均) を求め，その遷移や Performance drop との相関を調べた。なお，デュアルタスクは VR 空間の XY 同一平面内で行う課題であり，参加者によって Z 軸方向のずれが生じている場合があるため，Hand distance を求める際には XY 平面内での距離を求めた。

2.6.1 仮説

以下に本実験の仮説を挙げる。

H1: 学習段階において，CoJFM 条件の Improvement は Co 条件の Improvement より高い

教師アバタの視覚フィードバックは，生徒に対して正しい動作の手がかりを与えるため，学習段階においてより効率的に動作を改善できると考えられる。

H2-1: CoJFM 条件の Hand distance は Co 条件の Hand distance より小さい

H2-2: CoJFM 条件の Performance drop は Co 条件の Performance drop より小さい。

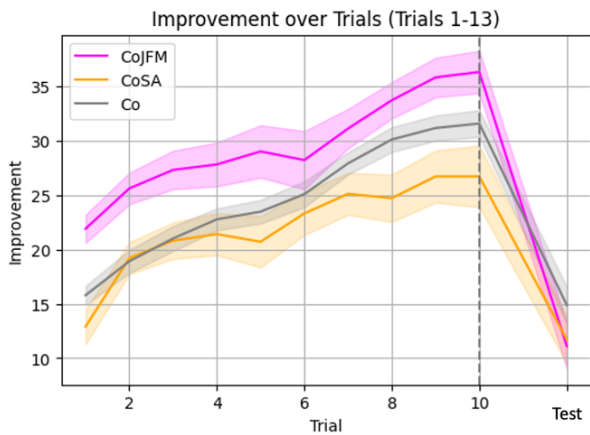


図 3: Improvement の折れ線グラフ。縦軸に学習段階の Improvement, 横軸に何試行目かを示す。エラーバンドは標準偏差を示す。

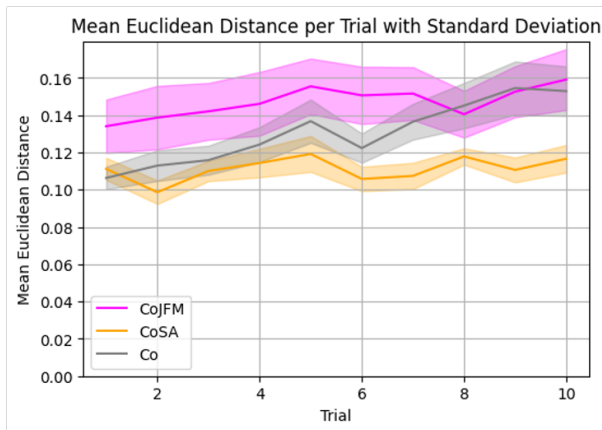


図 4: Hand distance の折れ線グラフ。縦軸に教師と生徒の左右それぞれの手先距離の平均 (m), 横軸に何試行目かを示す。エラーバンドは標準偏差を示す。

教師アバタの視覚フィードバックが生徒に対して正しい位置との誤差を意識させるため、より教師アバタと同期した動作を促し、より効率的な運動学習が可能になると考えられる。

H3-1: CoSA 条件の Hand distance は Co 条件の Hand distance より小さい

H3-2: CoSA 条件の Performance drop は Co 条件の Performance drop より小さい。

生徒アバタの視覚フィードバックは、生徒に自らの姿勢と融合身体アバタとの誤差の手がかりを与えると考えられる、

3. 結果

3.1 運動学習

3.1.1 Improvement

図 3 は条件ごとの Improvement とテストスコアの遷移を表す折れ線グラフである。正規性の仮定に違反しなかったため (Shapiro-Wilk の正規性検定の結果, すべての条件で $p > .05$), Improvement について参加者間因子の実験条件 (3 levels: CoJFM, CoSA, Co) \times 参加者内因子の試行回数 (10

levels: 1 回目, 2 回目, ..., 10 回目) で 2 要因混合計画の分散分析 (Two-way ANOVA) を行なった。二元配置分散分析の結果, 学習方法の主効果 ($F(2, 24) = 89.69, p < .001, \eta^2 = 0.25$) と試行の主効果 ($F(1, 24) = 342.50, p < .001, \eta^2 = 0.38$) が有意であった。また, 学習方法と試行の間に有意な交互作用効果 ($F(2, 24) = 3.05, p = .066, \eta^2 = 0.01$) が見られた。事後分析として, Tukey の HSD 検定を行った。その結果, CoJFM 条件は, Co 条件よりも高い傾向を示し ($p = .071$), **H1** に関して有意傾向が見られた。また, 以下の比較において有意な差が認められた:

- CoJFM 条件は, CoSA 条件よりも有意に高い Improvement を示した ($p < .01$)。

これらの結果から, CoJFM 条件が Improvement に対して強い効果を持ち, 試行回数の進行に伴って改善が見られることが示唆された。

3.1.2 Hand distance

図 4 は条件ごとの Hand distance の遷移を表す折れ線グラフである。正規性の仮定に違反しなかったため, Improvement と同様の 2 要因混合計画の分散分析を行なった。二元配置分散分析の結果, 実験条件の主効果が有意であることが示された ($F(2, 24) = 97.24, p < .001, \eta^2 = 0.39$)。試行回数の主効果も有意であった ($F(1, 24) = 54.90, p < .001, \eta^2 = 0.15$)。さらに, 実験条件と試行回数の交互作用効果も有意であることが示された ($F(2, 24) = 13.54, p < .001, \eta^2 = 0.08$)。事後解析として Tukey の HSD 検定を行った結果, 全ての組み合わせで有意な差 ($p < .05$) が確認され, Hand distance について $CoSA < Co < CoJFM$ の順で大きくなることが示された。これにより, **H2-1** を支持せず, **H3-1** を支持する結果となった。

3.2 運動学習の保持

3.2.1 Performance drop

正規性の仮定に違反しなかったため (Shapiro-Wilk の正規性検定の結果, すべての条件で $p > 0.05$), Performance drop について参加者間因子の実験条件 (3 levels: CoJFM, CoSA, Co) とする一元配置分散分析 (One-way ANOVA) を行なった。一元配置分散分析の結果, 実験条件の主効果が有意であることが示された ($F(2, 37) = 6.29, p < .01$)。事後分析として Tukey の HSD 検定を行った結果, 以下の比較において有意な差が認められた:

- CoJFM 条件は, Co 条件よりも有意に高い Performance drop を示した ($p < .01, d = -1.47$)。
- CoJFM 条件は, CoSA 条件よりも有意に高い Performance drop を示した ($p < .05, d = -1.16$)。

また, Co 条件と CoSA 条件の間には有意な差が認められなかった ($p = .56, \text{Cohen's } d = -0.23$)。

CoJFM 条件は他の条件と比較して高い Performance drop を示し, **H2-2** と **H3-2** を支持しない結果となった。

4. 考察

学習段階の Improvement の実験条件での主効果が有意であり、CoJFM 条件で Improvement に有意傾向が見られたことから、本実験で実装した、融合身体に教師アバタを付加した条件が従来の融合身体より学習段階での課題成績を向上させるものであった可能性がある。実験後に実施した口頭アンケートでも「教師アバタに指示をしてもらうのはわかりやすかった」「よく導いてくれた」など、教師アバタを手がかりに学習が行われたことを示唆する回答が得られた。しかし、CoJFM 条件において Hand distance は Co 条件より大きく、融合身体への教師アバタの付加が学習時の教師と生徒の動作を Co 条件より乖離させることを意味しており、仮説とは異なる結果となった。この理由として、本条件では教師アバタと融合身体アバタのみが視覚的に表示されているため、生徒の自己受容感覚と視覚的な手の位置が異なり、自己受容感覚による位置修正が難しく、誤差が膨らんだと考えられる。実験後の口頭インタビューの「位置があやふや」、「融合相手がふわふわした感じで、自分のアバタの位置が定まらなかった」という回答がこれを示唆する。一方、生徒のアバタが視覚的に表示されている CoSA 条件において Hand distance は Co 条件より有意に小さかった。この理由は生徒自身の位置の視覚的手がかりが自己受容感覚による位置修正を促すためだと考えられ、口頭インタビューの「自分の手を融合の手に重ねていくイメージ」という回答がこれを示唆している。加えて、複雑な共同作業では、同期ではなく補完的な行動が運動学習を促すことも知られており [4]、Hand distance の減少が運動学習の効率化に寄与するかは検証を要する。また、CoJFM 条件の Performance drop も Co 条件より大きく、運動学習が Co 条件より定着しておらず、 $d = -1.47$ と、こちらも仮説とは異なる向きに大程度の効果量が確認された。この理由として、教師アバタが融合身体アバタよりもターゲットにより近い位置にあるため、生徒が注意を教師アバタのみに割いて追従を行っていたことで、学習時に十分に課題方策について思考できなかったことが考えられる。実験後の口頭インタビューの「一緒に練習した時はついて行っているだけであまり考えていなかった」という回答がこれを示唆する。一連の結果は、教師アバタの視覚フィードバックを付加することは、学習時の課題成績を向上させるが、生徒が自ら十分に思考しながら課題を遂行する妨げになることを示す。より効率的な融合身体の運動学習のためには、視覚フィードバックにより生徒自身の位置を修正しようという注意を別の場所に向ける必要があると考える。

5. おわりに

本研究では、加重平均型の融合身体において学習後の動作の定着に関する問題に対処するため、教師・生徒アバタの視覚フィードバックを付加した2つの条件について検証を行った。実験では、融合身体条件 (Co)、融合身体+Just Follow Me 条件 (CoJFM)、融合身体+Student Avatar 条件

(CoSA) を比較した。結果、以下のことが示された: CoJFM 条件は、学習段階での成績向上に寄与する一方で、教師アバタの視覚フィードバックが学習後の動作再現性を低下させることが確認された。逆に、CoSA 条件は生徒自身の手の位置を視覚的に確認できるため、動作の同期が促進した。今後は、融合身体アバタへのフィードバックの最適な利用方法を探求や共同作業中の脳活動計測を用いた更なる解析による融合比率の効果的な変化等、運動学習の効率化の実現を目指したい。

謝辞 本研究の一部は科研費 基盤研究 (A) (24H00706) および JST ムーンショット型研究開発事業 (JPMJMS2013) の支援を受けて行われた。

参考文献

- [1] Yang, U. and Kim G. J. "Implementation and evaluation of "just follow me": An immersive, VR-based, motion-training system." *Presence* 11.3 (2002): 304-323.
- [2] Fribourg, R. et al. "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 (2020): 4023-4038.
- [3] Kodama, D. et al. "Effects of collaborative training using virtual co-embodiment on motor skill learning." *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 29.5 (2023): 2304-2314.
- [4] Wallot, S. et al. "Beyond synchrony: joint action in a complex production task reveals beneficial effects of decreased interpersonal synchrony." *PloS one* 11.12 (2016): e0168306.