



融合身体を用いたトレース課題遂行時の身体運動学習効果

児玉大樹¹⁾, 瑞穂嵩人¹⁾, 畑田裕二¹⁾, 鳴海拓志¹⁾, 廣瀬通孝¹⁾

1) 東京大学 (〒 113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1, {d.kodama,takato,hatada,narumi,hirose}@cyber.t.u-tokyo.ac.jp)

概要: 二者の動作の加重平均をアバタに反映する融合身体では, 複雑なタスクを精度高く遂行できるだけでなく, 他者の存在によりユーザがスキルを効率的に獲得できることが期待されている. 本研究では, 自動で動くターゲットを指先で追従するトレース課題を対象に融合身体を用いた運動学習の持つ特性を調べた. その結果, 融合身体では追従パフォーマンスおよび学習効率が低下するものの, 融合身体を用いて獲得したスキルは非融合身体でも発揮できることを確認した.

キーワード: 融合身体, 運動特性, 運動学習, トレース課題

1. はじめに

身体運動スキルの学習時に, 教師が学習者にインタラクティブにフィードバックを与えることで学習効率を高める研究が盛んに行われている. 例えば, 視覚フィードバックを使用した手法としては伊東ら [2] が二者が共同でバーチャル身体 (アバタ) を操作する融合身体を用いるものを, 触覚フィードバックを使用した手法として Kager ら [1] が教師と学習者の位置の差を力覚提示する手法を提案しており, こうした教師と学習者の共同操作を実現する系では練習中のパフォーマンスが向上する効果が確認されている. 他方, 教師からのフィードバックを止めて独力でスキルを発揮した際に, 初めから一人で学習を行っていた場合に比べてパフォーマンスが低くなることも確認されており, 既存手法はスキル定着に問題がある. Kager らは, この理由として教師がタスクを遂行してくれる安心感から学習者が積極的にタスクに参加せず, 学習量が少なくなった可能性を挙げ, 学習者自身が積極的にスキル発揮に貢献していると感じさせることでスキル定着が早まる可能性を示唆している.

一方, 非熟練者同士が融合身体を利用して共同で物体を操作した場合にも, 一人で物体を操作した場合より高いパフォーマンスを発揮できることが報告されている [3]. これは, ユーザが実身体から得られる深部感覚よりも視覚フィードバックに重きを置いて動作を修正をしたこと [3] や, 相手から課題に関連する追加情報を得ることでさらなる動作修正を行ったこと [4] によると考えられる. これらを鑑み, 本研究では共同操作で学習したスキルが定着しない問題を解決するため, 教師と学習者が共同操作を行うのではなく, 学習者 2 人が共同でスキル学習を行うことによるスキル学習効率化手法を提案する. 本稿では融合身体を例に, 共同操作を行うことで学習時に高いパフォーマンスを発揮しつつ, 相手との習熟度に差がないことで両者が積極的にスキル学習を行うと考えて行った検証について報告する. 本研究の主な貢献は (1) トレース課題を例に融合身体におけるパフォーマンスの低下および自己効力感の向上を確認したこと, (2) 融合身体を用いたスキル学習によって得たスキルを一人でも発揮できる可能性を示したことで, の 2 つである.

2. 関連研究

2.1 融合身体

融合身体とは, 複数エージェントの動作が 1 つのアバタに反映されるシステムである [5]. 融合身体にはユーザの動作の反映方法によって様々な種類が存在する [2]. 本稿では多くの研究で用いられている反映方法として, 二人のユーザの動作の平均をアバタに反映する手法を扱い, これを単に融合身体と呼ぶ. 伊東らは教師と学習者が融合身体を用いる場合のスキル学習効果を検証したが, スキル伝達効率は向上しなかった [2]. 原因の一つとして伊東らは学習者が教師動作を追従することに注意を向け, 学習が阻害された可能性を挙げている. 他方, 学習者同士で融合を行うと, 積極的に動作意図を考えスキル学習効率化が行われる可能性もある. Hagiwara らは非熟練者同士が融合する場合に着目し, ランダム位置に現れるターゲットに右手で触れるタスクを用いて融合身体での身体運動特性を計測した [3]. 結果, 参加者は実身体の腕の動きではなく融合身体アバタの腕の動きを最適化するように動くことが示唆された. また, 融合身体を用いることでアバタの手の運動軌道 (スタート位置からターゲット位置まで) が最適化され, より直線的になることを示した. 本研究で扱うトレース課題においても, 単独でスキル発揮をするよりも非熟練者同士で融合してスキルを発揮した方がパフォーマンスが高くなるか検証した.

2.2 トレース課題における共同物体操作

自動で動くターゲットに追従してカーソルを動かすタスクをトレース課題という. トレース課題においては, 集団で互いに力覚フィードバックを与えながら行うと追従のパフォーマンスが高まることが知られている [4]. Ganesh らは, 参加者同士の手の位置の差を力覚として提示するシステムを開発し, 参加者と共同操作者の習熟度の差に関わらず, 共同作業により追従パフォーマンスが向上することを示した [4]. また, Kager らは, Ganesh らと同様のシステムを用い, 共同操作者の熟練度によるスキル定着度の違いを調べた [1] 結果, 練習段階でのパフォーマンスは熟練者と共同作業をした方が高かったものの, トレーニング後に単独で動作を行うテスト段階でのパフォーマンスは非熟練者と

共同作業をした方が高いことが示された。本稿では、視覚フィードバックのみを用いる融合身体においても力覚フィードバックを与えるのと同様のパフォーマンス向上が成り立つかをトレース課題を用いて調査した。

3. 実験

3.1 参加者

9組18名(男性7組・女性2組, 22-48歳, 平均年齢26.6歳, 右利き)が実験に参加した。参加者のうち, VR空間への没入経験が全くない者が1名, 数回程度の者が12名, 日常的にVRを用い十分な経験がある者が5名であった。

3.2 融合身体構成法

融合身体の計算方法をVR環境内の絶対座標系で説明する。参加者の手の位置ベクトルを $x_{participant}$, 共同実験参加者の手の位置ベクトルを x_{dyad} と置くと, 融合身体アバタの手の位置ベクトル x_{shared} は

$$x_{shared} = \frac{x_{participant} + x_{dyad}}{2} \quad (1)$$

と計算できる。同様にして, 参加者の手の姿勢を表すクォータニオンを $q_{participant}$, 共同実験参加者の手の姿勢を表すクォータニオンを q_{dyad} とすると, 融合身体アバタの右手の姿勢を表すクォータニオン q_{shared} は

$$q_{shared} = \frac{q_{participant} + q_{dyad}}{2} \quad (2)$$

と計算できる。融合身体アバタの手の位置は参加者が両手に持つ Meta Quest 2 Controller¹から取得した値を基に計算した。頭部位置は融合せず, 参加者が装着した Meta Quest 2が取得した位置をそのまま反映させた。これは, 頭部位置を融合すると視点が自身の意図と異なるように動き, ひどく酔うことが確認されたためである。

3.3 実験タスク

参加者は実験タスクとして指先でターゲットを追従するトレース課題を行った。トレース課題での1試行は準備期間, 試行期間, 休憩期間の3段階に分けられた。準備期間は5秒間であり, スタート位置にターゲットが表れ, 参加者はアバタの指先を球に近づけることで試行期間への準備を行った。試行期間は30秒間であり, ターゲットが自動で動き始め, 参加者は指先がターゲットに近くなるように追従を行った。休憩時間は15秒間であり, 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。融合身体条件では休憩期間では融合を行わず, 試行期間が始まる1秒前に融合を再開した。これは, 試行期間開始時の参加者の実身体の手の位置と融合身体の手の位置との差を減らすためである。トレース課題の様子を図1に示す。

Ganeshら[4]を参考に, ターゲットの動きは以下のようにマルチサイン関数で定義した(単位はcm)。

$$x(t) = 7.5 \sin 1.8t + 8.5 \sin 3.8t + 6.25 \sin 1.82t + 10.75 \sin 3.8t \quad (3)$$

¹<https://store.facebook.com/jp/quest/products/quest-2/?utm.content=33976>

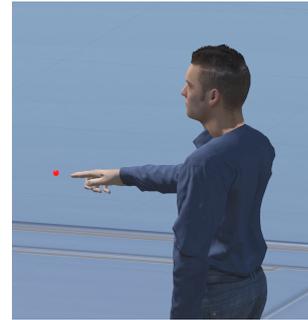


図1: トレース課題の様子。参加者は自動で動くターゲットと指先の距離が近くなるように追従を行う。

$$y(t) = 7.5 \sin 1.1t + 8 \sin 3.6t + 9.5 \sin 2.5t + 12 \sin 1.48t + 1 \quad (4)$$

$$z(t) = 50 \quad (5)$$

試行時間 t は0秒~40秒の範囲で定義され, この40秒のうち30秒がランダムに選択されて1試行の軌道となった。

3.4 実験条件

本実験は, 以下の3条件を参加者間計画で実施した。

- 融合身体条件: 参加者は融合身体を用いて試行した。
- 非融合身体条件: 参加者は一人で試行した。
- 軌跡平均条件: 非融合身体条件での参加者2名の動作軌跡を平均した。

軌跡平均条件を用意したのは, Hagiwaraら[3]の実験で融合身体を用いることで単独でタスクを遂行した際の軌跡の平均よりも軌道が直線的になることが確認されており, 同様の効果が確認されるか検証するためである。

3.5 実験手順

実験は2名1組ずつ行った。各組は事前に融合身体条件または非融合身体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, 実験参加同意書への署名を行った。次に, 参加者は実験タスクに関する説明を受けた。融合身体条件での参加者はこれに加え, 融合身体に関する説明を受けた。実験試行はチュートリアル, 学習, テストの3段階に分けられた。チュートリアルでは計3回の試行を行った。非融合身体条件では, 参加者は非融合状態での試行を3回行った。融合身体条件では, 参加者は非融合状態での試行を1回行った後, 融合状態での試行を2回行った。この際, 軌跡の学習を防ぐため, ターゲットの軌跡は逆再生された。学習では, 参加者は各条件での試行を20回繰り返し, 5分の休憩を取ったのち, 再度20回の試行を行った。テストでは参加者は非融合状態で試行を3度繰り返し, 試行後には自己効力感アンケートに回答した。

3.6 評価方法

タスクパフォーマンスを測る指標として, 追従度(各試行においてターゲットとアバタの指先との距離の平均値)を算出した。サンプリングレートは0.02sであった。学習40試行の追従度の推移を学習中のパフォーマンス, テスト3試行の追従度をスキル定着度の指標として条件間で比較した。

また、予備実験の自由回答式インタビューの結果、融合身体条件において参加者が追従度を過剰評価する傾向が見られたため、定量評価のために自己効力感を計測した。参加者は、学習（前半 20 回）、学習（後半 20 回）、テスト時のそれぞれについて、全試行が終了した後に以下の質問に 0 から 30 の実数をアンケートに記入した。

Q: トレース課題で指先がターゲットに触れていた時間は平均何秒程度だと思いますか（0～30 秒）

3.6.1 仮説

Hagiwara ら [3] は、融合身体でのリーチング動作は単独でリーチングを行った際の動きの平均より直線的でなめらかとなることを報告した。また、Ganesh ら [4] は、共同作業において相手の動作による力覚フィードバックを与えるとトレース課題のパフォーマンスが向上することを示した。本研究では Ganesh らの知見が融合身体にも適用できると考え、以下のように仮説を立てた。

H1: 学習中の追従度は、融合身体条件の方が非融合身体条件および平均身体条件より高くなる

また、融合身体を用いた際に参加者が積極的にタスク遂行に加担することで、獲得したスキルを一人でも発揮できるようになると考えられる。そこで以下の仮説を立てた。

H2: 融合身体条件における学習の最後の三回の追従度の平均値とテストでの追従度の平均値に差がない

3.6.2 結果

図 2 に追従度の折れ線グラフを示す。Spapiro-Wilk 検定で正規性が認められたため、実験条件（3 levels：融合、一人、軌跡平均）× 学習中の試行回数（40 levels：1 回目、2 回目、…、40 回目）で 2 要因混合計画の分散分析を行った。実験条件の主効果が有意でなく ($F(2, 16) = 1.62, p = .23, \eta_p^2 = 0.19$)、学習中の試行回数の主効果は有意であった ($F(39, 624) = 2.42, p < .05, \eta_p^2 = 0.14$)。実験条件と試行回数の交互作用は有意でなかった ($F(78, 624) = 0.39, p = 1.00, \eta_p^2 = 0.05$)。学習中の試行回数の主効果が有意であったため、下位検定として 1 回目の学習試行と 40 回目の学習試行について対応のある t 検定を行った。結果、1 回目より 40 回目の方が有意に追従度が高かった ($t(16) = 3.61, p < .05$)。

スキル学習度を検証するため、融合身体条件および非融合身体条件における学習の最後の三回の追従度の平均値とテストでの 3 回の追従度の平均値を算出し、Spapiro-Wilk 検定で正規性を確認した後、2 要因混合計画の分散分析を行った。結果、実験条件の主効果 ($F(1, 16) = 2.41, p = .014, \eta_p^2 = 0.13$) および試行の主効果 ($F(1, 16) = 0.03, p = .86, \eta_p^2 = 0.002$) はともに有意でなかった。実験条件と試行の交互作用は有意でなかった ($F(1, 35) = 0.00, p = 1.00, \eta_p^2 = 0.00$)。

図 3 に自己効力感のアンケート結果を示す。Spapiro-Wilk 検定で正規性が認められたため、実験条件（2 levels：融合・非融合）× 試行（3 levels：学習前半・学習後半・テスト）で 2 要因混合計画の分散分析を行った。実験条件の主効果

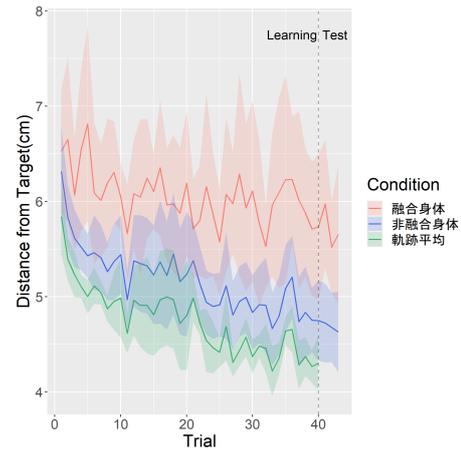


図 2: 追従度の折れ線グラフ。縦軸にターゲットと指先との距離の平均値 (cm)、横軸に何試行目かを示す。エラーバンドは標準誤差を示す。

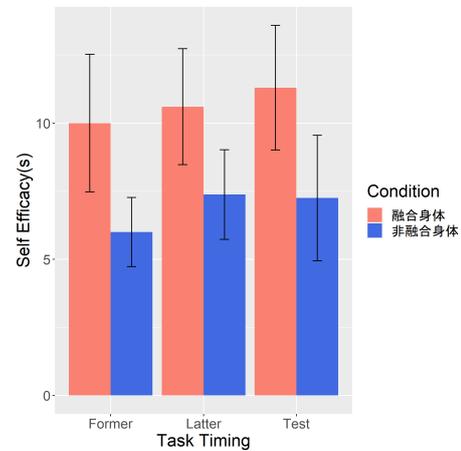


図 3: 自己効力感の棒グラフ。縦軸にアバタの指先がターゲットに触れていたと参加者が感じていた時間、横軸に学習前半 (Former) か、学習後半 (Latter) か、テストか (Test) を示す。エラーバーは標準誤差を示す。

($F(1, 16) = 1.86, p = .19, \eta_p^2 = 0.10$) および試行の主効果 ($F(2, 32) = 0.682, p = .51, \eta_p^2 = 0.04$) はいずれも有意でなかった。実験条件と試行回数の交互作用も有意でなかった ($F(32, 312) = 0.082, p = 0.92, \eta_p^2 = 0.01$)。

図 4 にペアの 2 人の指先の距離の平均を示す。Spapiro-Wilk 検定で正規性が認められたため、実験条件（2 levels：融合・非融合）× 学習中の試行回数（40 levels：1 回目、2 回目、…、40 回目）で 2 要因混合計画の分散分析を行った。実験条件の主効果が有意で ($F(1, 7) = 22.29, p < .05, \eta_p^2 = 0.76$)、学習中の試行回数の主効果は有意でなかった ($F(39, 273) = 0.68, p = .93, \eta_p^2 = 0.09$)。実験条件と試行回数の交互作用は有意でなかった ($F(39, 273) = 0.65, p = 0.95, \eta_p^2 = 0.08$)。

4. 考察

学習中の試行回数での追従度の主効果が有意であり、1 回目と 40 回目の追従度に有意な差があることから、本実験で実装したトレース課題が学習を行うことで追従度が向上するものであったと考えられる。実験後の口頭アンケートで

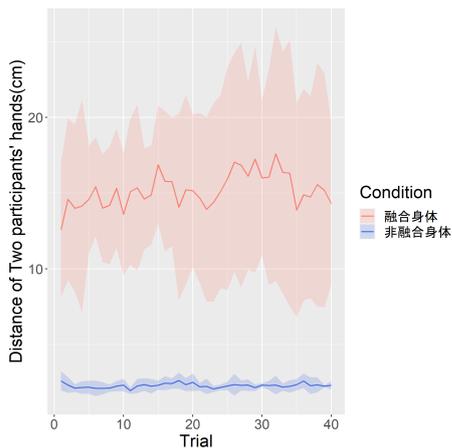


図 4: ペアになった参加者二人の実身体の指先の平均距離の折れ線グラフ。縦軸にペアの二人の指先の距離の平均値 (cm), 横軸に試行回数を示す。エラーバンドは標準誤差。

も「曲がるタイミングを覚えた」「手とターゲットとの位置ズレを上手く修正できるようになった」など、学習が行われたことを示唆する意見が複数あった。

融合身体条件とその他の条件間で追従度に有意差は見られなかったため、H1 は支持されない結果となった。さらに、効果量 $\eta_p^2 = 0.19$ であり、仮説とは異なる向き（平均身体条件, 非融合身体条件, 融合身体条件の順に追従度が低下する）に大程度の効果量が確認された。学習の最後とテストを比較しても、非融合身体が融合身体より追従度が高くなる向きに効果量 $\eta_p^2 = 0.13$ が得られ、仮説と異なる向きに中程度の効果量が確認された。実験後の口頭アンケートから、このような結果になった理由が 2 つ考えられる。第 1 に、今回は視覚的な位置のみを融合しているため、深部感覚と視覚的な手の位置が異なり、深部感覚による情報を位置修正に利用することができなかった点が考えられる。「融合身体ではターゲットだけでなくアバタの手的位置も注意深く見る必要があった」という意見がこのことを示唆する。今後は、深部感覚の提示や相手との位置の差を力覚フィードバックとして返すなど、視覚以外のインタラクションを検討する必要があると考えられる。他方、融合身体では「手ブレが少なくなり安定して手を動かすことができた」という意見があった。これは、自身と相手の手ブレが打ち消し合うことで生じた感覚であると考えられる。実際、自己効力感の結果から効果量 $\eta_p^2 = 0.10$ と、融合身体の方が非融合身体に比べて高くなる向きに中程度の効果量が確認され、参加者は融合身体条件で上手に手を動かせたと感じたことが示唆される。しかし、融合身体条件における追従度が低いことを考慮すると、上手に手を動かしているという慢心が学習意欲の低下や集中力の低下につながり追従度が下がった可能性が考えられる。

融合身体条件でのペアの 2 人の手の距離は非融合身体条件でのペアの 2 人の手の距離より有意に離れていたため、融合身体と非融合身体ではタスク遂行時の実身体の手の動かし方が異なっていたことがわかる。スキル定着を見ると、学習の最後とテストに有意差が確認されなかったため、H2 が

支持される結果となった。これは、融合身体を用いて学習を行った際に身体図式 [6] が更新されたためだと考えられる。身体図式とは、自己身体認知による無意識的な身体像のこと [6] で、その更新により、環境が変化しても同様にスキルを発揮できるようになると考えられている。身体図式の更新には強い行為主体感が必要であるとされている [7]。今回のタスクは目的が共有されることで行為主体感が強まりやすく [5], 身体図式が更新され、非融合状態でも発揮できるスキルを獲得できたと考えられる。実験後の口頭アンケートでも、「1 人でもスムーズにトレース課題を行うことができた」「最初は 1 人であることに違和感を感じたがすぐ慣れた」といった意見があった。

5. おわりに

本研究では、自動で動くターゲットを指先で追従するトレース課題を用いて融合身体または 1 人で学習を行い、2 人の学習者が融合身体を用いた場合の身体学習効果を調査した。実験では、融合身体を用いる融合条件, 1 人で課題を行う非融合条件, 非融合条件での参加者の運動軌跡の平均を取る軌跡平均身体条件を比較した。結果、融合身体を用いることで、追従度が下がる可能性、自己効力感が向上する可能性、スキルが定着し非融合時にも同様なスキルを発揮できる可能性が示された。今後は力覚提示を行うことや、位置や加速度などを用いたさらなる解析により、スキル学習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 (S) (19H05661) 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] S. Kager et al.: The effect of skill level matching in dyadic interaction on learning of a tracing task, Proc. of ICORR '19, 824–829, 2019.
- [2] 伊東亮太ら: 融合身体を用いた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, pp. 1–4, 2020
- [3] T. Hagiwara et al.: Individuals prioritize the reach straightness and hand jerk of a shared avatar over their own. *Iscience*, pp. 101732, 2020
- [4] G. Ganesh et al.: Two is better than one: Physical interactions improve motor performance in humans. *Scientific reports*, Vol. 4, No. 1, pp. 1–7, 2014
- [5] 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 Transactions on Visualization and Computer Graphics*, vol. 27, No. 10, pp. 4023–4038, 2021
- [6] 嘉戸直樹ら: 運動学習はここまでわかった. *関西理学療法*, Vol. 8, pp. 49–52, 2008.
- [7] M. D'Angelo et al.: The sense of agency shapes body schema and peripersonal space. *Scientific reports*, Vol. 8, No. 1, pp. 1–11, 2018