



力覚的融合身体の実現に向けた基礎的検討

鈴木嵩茂¹⁾, 橋本健¹⁾, 中村拓人¹⁾, 鳴海拓志¹⁾, 葛岡英明¹⁾

Takashige Suzuki, Takeru Hashimoto, Takuto Nakamura, Takuji Narumi, Hideaki Kuzuoka

1) 東京大学 (〒 113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1,

{takashige, hashimoto, n.takuto, narumi, kuzuoka}@cyber.t.u-tokyo.ac.jp)

概要: 熟練者と学習者が同一のアバタを使用する融合身体を利用した運動学習は学習効率や技能定着を向上させることが示されている。他方、融合身体が効果を生むにはアバタが利用者の視野内に収まる必要があり、適用可能なタスクに制約がある。本研究では力提示を利用した融合身体を提案し視野外の運動への適用を図るために、身体装着型力提示装置 SomatoShift を用いた融合アバタの視覚提示と力提示が利用者に与える影響について調査し、力提示が動作開始速度を速める効果と、反射反応が起きた際に動作方向の伝達が困難になる現象を確認した。

キーワード: 融合身体, 力覚, ウェアラブル, 教育, 遠隔支援

1. 序論

融合身体は、2人以上がVR空間内で姿勢の加重平均をとった同一のアバタを共有するシステムであり、共同作業や運動学習に効果を発揮する [1, 2]。他方、融合身体が効果を生むにはアバタが利用者の視野内に収まる必要があり、手を直視するタスクにのみ適用できるという強い制約がある。そこで融合身体が適用可能なタスクの種類の拡大や更なる効率化のため、身体装着型力提示装置を用いた視覚情報に依存しない誘導手法を組み合わせることを提案する。本研究ではこの提案手法の実現に向けて、力覚提示が動作指示の効率に与える影響を明らかにすることを目的とし、既存の融合身体の研究で扱われていた視覚的な動作誘導手法に力提示を加えた時の影響を比較調査した。

2. 関連研究

VR空間内で動作指示を行う手法として、半透明アバタを用いる手法がある [3]。利用者の身体に重ねて表示することで、熟練者の高度な動作を遠隔指示するにも有用であることが明らかになっている [4]。また Fribourg らの提案した融合身体は、2人の姿勢を平均した融合アバタを共有して利用することで、熟練者の動作が効率的に学習者へ伝達される [1, 2]。しかし、これらの手法はアバタを目視することが前提となっているため、四肢が可視範囲に出入りするような技能には適用できないという問題がある。

他方、身体装着型装置による触力覚フィードバックは視野外の動作指示にも適用でき、バイオリンの弓の操作の練習に振動を用いた例や [5]、マイムの伝達に外骨格装置による力提示を用いた例がある [6]。これらの例にあるように、利用者の認知資源を必要としない物理的な力を提示すると装置が大きくなり、動作の自由度が下がるという問題があり、タスクの種類の多様化という目的に反する。そこで本研究では、Hashimoto ら [7] が新しく開発した小型かつ物理的な力を提示可能な SomatoShift を用いる。

3. 力提示システム

本研究では、力提示を身体装着型装置で行うために Hashimoto ら (2023) の SomatoShift [7] を利用した。Soma-

toShift はコントロールモーメントジャイロ機構と加速度センサを利用することで、着用者の動作に合わせた力提示を行う機能を持つ。本実験では着用者が提示力を感じやすいよう手の甲に SomatoShift を装着し、伸ばした人差し指に垂直な平面に含まれる上下左右の方向とその中間の方向の計 8 方向へ人差し指先端を向けるような回転力を提示した。また全ての方向に同等の力を提示する必要があったため、加速度センサを用いずフィードフォワード制御で一定の力を提示するようにした。

実験中に SomatoShift は、PC からシリアル通信の送信される指令に応じて 0.2 秒間一定方向に一定の大きさで力を提示後、0.5 秒かけてジャイロモーメントを相殺しながらフライホイールを回転させ次の出力に備え (準備フェーズ)、再び PC から指令があった時に 0.2 秒間一定方向一定出力の力提示を行う。一度に提示できる角力積は一定であるため、提示する力が知覚するのに十分大きく、かつ持続するよう、提示時間を 0.2 秒に設定した。また、2 回の力提示の間で行った準備フェーズの時間は、フライホイールの向きを変える際に生じる慣性力や振動が大きくならない範囲で、なおかつ次の力提示に間に合うように調整した結果、0.5 秒に設定された。

以上の時間調整を行った上で出力を確かめるために、力センサ (ワコーテック WEF-6A200-4-RCD) に SomatoShift を日本人男女の平均的な手¹をモデルにしたマウントで装着し、本実験で用いた 8 方向×8 方向の力提示 64 通りを各 10 回試験した (図 1, 2 参照)。その結果、SomatoShift が意図した方向±15°以内の精度で回転力を提示でき、また 1 回目と 2 回目の力提示の間にある準備フェーズでは意図しない力が提示されないことを確認した。

4. 実験手法

本実験では、力提示デバイスが着用者の動作に影響を与え、動作を指示できるか確かめるため、次の仮説の検証を行った: (H1) 力提示により、動作の開始速度は速くなる。

¹河内まき子, 2012: AIST 日本人の手の寸法データ。
<https://www.airc.aist.go.jp/dhrt/hand/index.html>

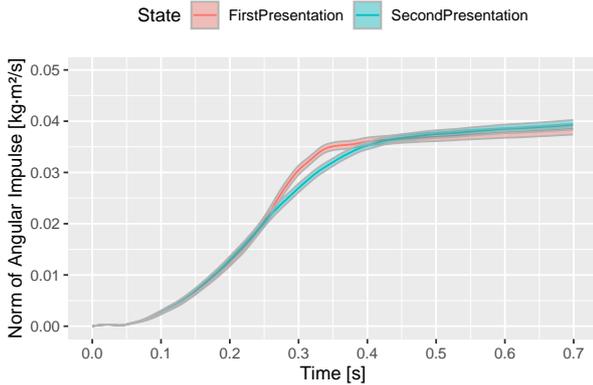


図 1: SomatoShift で提示した角力積の時間推移の平均値と 95%信頼区間 (1 回目: 赤, 2 回目: 青).

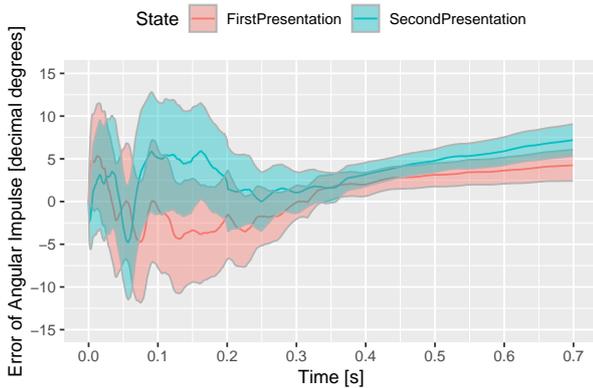


図 2: SomatoShift で提示した角力積の提示角度を基準とした時の誤差の時間推移の平均値と 95%信頼区間 (1 回目: 赤, 2 回目: 青).

(H2) 力提示により, 動作中の進路変更は速くなる. (H3) 力提示のみで, 融合身体と同じ精度の動作指示は可能である.

以上を検証するため, 融合アバタを視覚的に提示するのみの Only Co-Embodiment (以下 **OnlyCE**) 条件, 半透明なアバタで見本動作を示すのみの Only Semi-Transparent Guide (以下 **OnlySTG**) 条件, SomatoShift による力提示で動作指示を行い視覚情報は提示しない Only Haptic (以下 **OnlyHaptic**) 条件, および上記 2 種類の視覚情報提示に力提示を組み合わせた Haptic Co-Embodiment (以下 **HapticCE**) 条件と Haptic Semi-Transparent Guide (以下 **HapticSTG**) 条件を実装し, 静止または動作中に新しい動作が指示された時の軌道を参加者内で比較した.

4.1 参加者

本実験には 18 歳以上の健常者を募集したところ, 7 人 (全員男性, 平均年齢: 23.9, SD=1.3) が参加した. また参加者は全員右利きかつ VR 機器の使用経験があった. また参加者の内 2 人が裸眼で, 残り 5 人は日常的に利用している眼鏡を着用したまま参加した.

4.2 手順

まず実験監督者 (第一著者) は参加者に, スライドショーを用いて実験で行う動作タスクと全条件の説明を行った. また説明の後には動作タスクの練習をするため, 参加者は実験監督者と向かい合って椅子に座り, 右手を実験監督者の左手の鏡合わせとなるように動かすのを, 目視で速度の差



図 3: 装着デバイス.

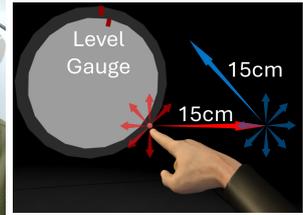


図 4: 方向指示タスク.

が分からなくなるほど円滑に動かせるようになるまで (約 5 回) 繰り返すことで, 適切な動作速度を学んだ. そして動作タスク本番に入るまえに, 参加者は実験監督者の発言を復唱することで, 動作時に注意する点を確認した.

続く動作タスクの本番において, 参加者はヘッドマウントディスプレイ (Meta Quest Pro, 以下 HMD) の装着 (眼鏡の利用者はその上から) に加えて, 右手の甲に SomatoShift を装着し, 両手に HMD 付属のコントローラを持ち, ノイズキャンセリングヘッドフォン (Sony WH-1000XM4) を装着した (図 3). そして椅子に座りながら, ランダムな順で 5 条件のタスク (次節参照) に取り組んだ. 各条件の前には較正として, 参加者が右手人差し指を右肩の前の任意の場所に挙げ, そこを動作開始地点とするように設定を行った. 全 5 条件を終えた後には, 口頭インタビューを行った.

4.3 動作タスク

動作タスクは, 融合身体の先行研究 [2] で運動学習の効率向上が確認された状況を鑑みて, 前額面に平行な面 (以降作業平面と呼ぶ) 上で指示に従いながら人差し指の先を動かすタスクをデザインした (図 4 参照). 参加者の右手および人差し指の位置を, 右手に握られたコントローラおよび Link 接続された Unity プログラムによって計測した上で, 以下のタスクを実施した.

参加者は右肩前に設置された直径 1cm の白球が, 赤くなることで試行の開始に気づき, その球に人差し指の先端で触れ続けて 2 秒間待機する. 待機中, 参加者は球が白く変色することで指先端で球に接触できていることを認識し, また球の奥に前額面と並行になるよう設置された円板形インジケータが, 右手の向きと同期して回転するのを見ることで, 右手の甲 (SomatoShift) が水平になっていることを確認する. 待機時間の終了後, 右手が水平 $\pm 10^\circ$ であることが確認された場合, 上下左右およびその中間の 8 方向のいずれかに指を動かす指示が提示される.

前述の通りこの動作指示は, 視覚的に提示されるものと, SomatoShift で提示する力の最大 2 種類が含まれる. OnlyCE および HapticCE 条件で視覚提示される融合アバタは, 目標方向に秒速 15cm で動く軌道を目標軌道とした上で, 融合アバタを教師役がその軌道に近づけるような動作をさせるよう, 統制をとるため自動制御したものを提示した. この制御は, 参加者および融合アバタの人差し指先端と目標軌道のフレーム k での位置ベクトルをそれぞれ $\mathbf{p}_{trainee}[k], \mathbf{p}_{ce}[k], \mathbf{p}_{target}[k] \in \mathbb{R}^2$, 更新周期を $\Delta t[s]$ とした時, 次の式で融合アバタの位置を更新することで行った.

$$\begin{aligned} \mathbf{p}_{ce}[k+1] = & (1 - \alpha)\mathbf{p}_{ce}[k] + \alpha\mathbf{p}_{target}[k] \\ & + \beta(\mathbf{p}_{trainee}[k] - \mathbf{p}_{trainee}[k-1]) \end{aligned} \quad (1)$$

Where:

$$\alpha = 4\Delta t$$

$$\beta = 0.5$$

この時、 α は教師が行うであろう目標軌道へ向かう修正動作のゲインを表しており、具体的な値は人間との融合身体で実験をしたことのある第一著者が違和感の無いように調整して決定した。また β は融合比率 50%を示しており、参加者の動作速度が融合身体に 50%加算される。教師の意図として加算される成分は 1 次遅れに相当するため、本実験の低速度の目標軌道のようなランプ入力に対しては誤差が残ったままとなる。よって参加者には、あくまで融合アバタが伝えるのは動作方向の指示であり、参加者自身が積極的に動作するように伝えた。

一方、OnlySTG および HapticSTG 条件では、半透明のアバタを重ねて 2 人分表示した。各アバタの人差し指先端が参加者の現在位置と目標軌道を指し、首の位置は参加者の首の位置と一致するように、アバタの姿勢を Unity アセットの FinalIK(逆運動学を行うプログラム)を用いて計算した。なお半透明アバタは作業平面上を 15cm 移動した後に停止し、次の動作指示の内容が予測されないよう参加者の到達を待つようになっていた。しかし、本実験では 2 回目の動作指示を参加者の移動中に提示する必要があったため、参加者は半透明アバタの見本動作が止まっても、自身の動作が止まることがないように一定速度で追い越すつもりで動かす様、重ねて指示を行った。また OnlyHaptic, HapticCE, HapticSTG 条件で提示する力には、3. 章で設計したものを採用した。

参加者は、上記の動作指示により右手を動かす方向を判断し、一定速度で動かした。そして動作開始位置から移動した距離が作業平面上に射影した大きさが 15cm を超えた時、2 回目の動作指示を提示した。この時の目標軌道は参加者が 1 回目の移動を完了した位置を起点に、1 回目と同様の 8 方向のいずれかに秒速 15cm で動かすものとした。

そして 2 回目の指示後に作業平面上に投射した移動距離が 15cm を超えた時に、チャイム音を再生し、開始地点の白球の色を赤くすることで試行が終わったことを知らせた。

以上の 2 回の動作を 1 試行とし、指示方向の組み合わせ計 $8 \times 8 = 64$ 試行に参加者は連続で取り組んだ。移動距離 15cm および移動速度 15cm/s は参加者が理解しやすく、かつ腕に負担がかかりにくいという条件で選定されたが、依然として参加者の筋力によっては実験中の疲労蓄積が想定された。そのため参加者には腕を動かし辛く感じた場合に、1 試行を終えてチャイム音が聞こえた後、開始地点の球に触れる前に休憩するよう伝えた。

4.4 測定項目

参加者アバタと融合アバタの人差し指の軌道を作業平面上に投射し、動作開始点を基準とした距離と角度を、動作指示の提示時刻から移動距離が 15cm に到達するまでの間、

Unity 上で記録した。記録した全てのデータは周期が 1ms となるよう線形補完を行い、角度データは指示方向が 0° となるように前処理した角度誤差データとして扱った。そして、仮説検証を行うために次の処理を行った：(H1) 動作の開始の速さの指標として、1 回目の動作データ (初期状態：静止) から、動作指示開始後に移動距離が 1.5cm 以上、かつ角度誤差の絶対値が $45/2^\circ$ 未満となるまで要した時間を取得し、条件間で比較した。(H2) 動作中の進路変更の速さの指標として、2 回目の動作データ (初期状態：1 回目の動作指示に従い移動中) から、1 回目と 2 回目の指示方向が一致するデータを取り除き、動作指示開始後に移動距離が 1.5cm 以上、かつ角度誤差の絶対値が $45/2^\circ$ 未満となるまで要した時間を取得し、条件間で比較した。(H3) 動作指示が可能であるかの指標として、動作終了時の角度誤差の絶対値が $45/2^\circ$ 未満となった割合を、OnlyCE, OnlyHaptic, HapticCE 条件の間で比較した。H1 と H2 で距離の条件を加えた理由としては、動作指示がなされた直後では開始地点付近で指先が振動しており、偶然正しい方向に指が向いている場合を動作の開始としてみなさないためである。そして条件間の比較については、One-way ANOVA で条件間に有意な差があるか検定後、下位検定として多重に t 検定を行った。なお、ANOVA の前提となっている残差の正規性が確認されなかった場合は、Friedman 検定で条件間に有意な差があるか確認後、下位検定として Dwass, Steel と Critchlow, Fligner の手法に基づいた多重検定を行った。なお、多重検定の際は Holm 法による補正を行った。

また H3 では指示内容が伝達されたかを測るために、動作終了時のデータを比較し、H1, H2 と同様に条件間の差を調べる検定と、下位検定としての多重比較を用いた。

5. 結果

H1 について静止時からの動作の開始速度が条件間で異なるか確認するため、全体で有意な差があるか検定した。ANOVA を実施するために、分散分析モデルを作成し残差の正規性を検定したところ、正規分布に従わなかったため ($p < 0.05$)、代わりに Friedman 検定を行った。その結果として、条件間に有意な差が見られた ($p < 0.0001$)。下位検定として多重比較を行ったところ、力提示を行った条件 (OnlyHaptic, HapticCE, HapticSTG) でその他の条件 (OnlyCE, OnlySTG) よりも有意 ($p < 0.05$) に動作開始時間が早くなることが分かった (図 5 参照)。以上より、力提示により動作の開始速度が速くなるという H1 は支持された。

H2 について動作中の進路変更の速度が条件間で異なるか確認するため、全体で有意な差があるか検定した。ANOVA の結果、条件間に有意な差があることが分かったため ($p < 0.05$)、下位検定として多重比較を行ったところ、有意な差は OnlySTG と HapticCE との間のみ存在することが分かった ($p < 0.05$)。以上より、力提示により進路変更が速くなるという H2 は支持されなかった。

H3 について静止時および動作中に動作指示がされた時、融合アバタ提示と力提示で同程度の成功率で角度を伝えら

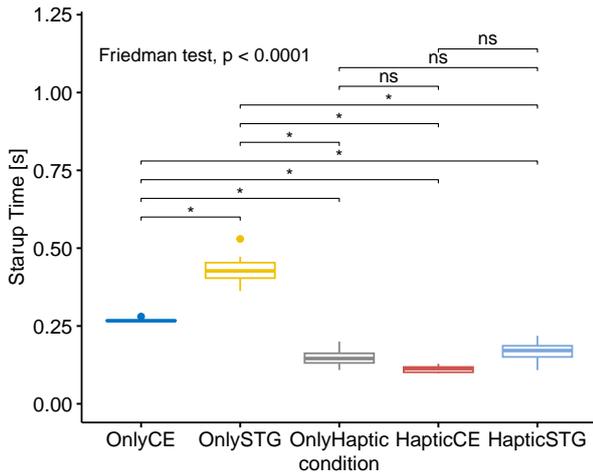


図 5: 静止時から動作開始に要した時間の比較. アスタリスクは $p < 0.05$ であることを示す.

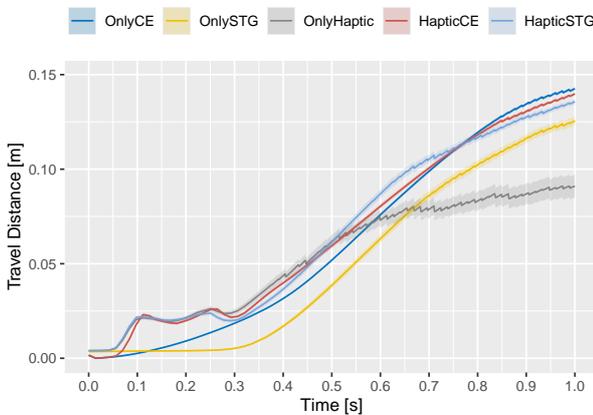


図 6: 初期位置からの移動距離の時間推移. 力提示のあった 3 条件で約 0.1 秒後 (提示時刻の 50ms 後) から反射反応が発生している.

れるか確認するため, OnlyCE, OnlyHaptic, HapticCE 条件全体で有意な差があるか検定した. 下位検定まで行った結果, 静止時および動作中の両方で, OnlyHaptic 条件での成功率が他の 2 条件より有意に低くなることを確認された (静止中: $p < 0.01$, 動作中 $p < 0.0001$). 以上より, 力提示のみで融合身体と同様の動作指示が可能であるという H3 は支持されなかった.

6. 考察

H1 が支持された一方で H2 が支持されなかった原因として, 動作中の SomatoShift による力提示の分かりにくさが挙げられる. 複数の参加者から「(動作中の) トルクの跳ね方が全ての方向で違う」「(2 回目の) 提示方向が反対であれば分かった」「なんとなくデバイスが動いているとは思ったが, 方向までは分からない」といった意見があり, 動作中でも明確に分かる力提示のデザインが必要であることが示唆された. 今後は, 移動中の着用者に提示される力を事前計測に加えてデバイスの改善をする必要がある.

H3 が支持されなかった原因として, 前述した提示方向の分かりにくさに加えて, 力の提示時間の短さが挙げられる. 参加者の内 1 人が「反射が発生して逆方向に指示されているように感じた」と述べ, 測定データにも人間が認知した

上で反応する 105ms 前にその動作が見られることから (図 6 参照), 短時間の力提示で反射が発生し参加者の方向識別に悪影響があったことが示唆された [8]. 今後は, 提示する時間長や, 視覚情報と組み合わせる場合は提示タイミングを調整する必要がある.

7. 結論

本研究は, 融合身体を視野外の運動にも適用できるよう力提示を組み合わせる手法を提案し, 効率的な動作指示の達成を試みた. 融合アバターや半透明アバターによって視覚的に提示される方向指示の有無に, 身体装着型装置の力提示による方向指示の有無を組み合わせ比較したところ, 力提示によって静止時の動作開始速度を上げられることが分かった. 一方, 本研究でデザインした力提示手法では, 動作中の進路変更の高速化や, 指示方向を利用者に伝えることが困難であることが分かった. 実験参加者の意見より提示した力に問題があることが分かったため, 今後は力提示手法の改善を行う.

謝辞 本研究の一部は科研費 基盤研究 (S)(19H05661), 基盤研究 (A)(24H00706), JST ACT-X (JPMJAX22KD), JST ムーンショット型研究開発事業 (JPMJMS2013) および東京大学知能社会国際卓越大学院プログラムの支援を受けて行われた.

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 TVCG*, Vol. 27, No. 10, p. 4023 – 4038, October 2021.
- [2] D. Kodama, et al. Effects of collaborative training using virtual co-embodiment on motor skill learning. *IEEE TVCG*, Vol. 29, No. 5, pp. 2304–2314, 2023.
- [3] U. Yang, et al. Implementation and evaluation of just follow me: An immersive, vr-based, motion-training system. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, Vol. 11, pp. 304–323, 2002.
- [4] M. Faridan, et al. Chameleoncontrol: Teleoperating real human surrogates through mixed reality gestural guidance for remote hands-on classrooms. In *Proceedings of the 2023 CHI conference on human factors in computing systems*, pp. 1–13, 2023.
- [5] J. V. D. Linden, et al. Buzzing to play: lessons learned from an in the wild study of real-time vibrotactile feedback. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human factors in Computing Systems*, pp. 533–542, 2011.
- [6] A. Maekawa, et al. Naviarm: Augmenting the learning of motor skills using a backpack-type robotic arm system. In *Proceedings of the 10th Augmented Human International Conference 2019*, pp. 1–8, 2019.
- [7] T. Hashimoto, et al. Somatoshift: A wearable haptic display for somatomotor reconfiguration via modifying acceleration of body movement. In *ACM SIGGRAPH 2023 Emerging Technologies*, pp. 1–2. ACM, 2023.
- [8] Stuartk Card, THOMASP MORAN, and Allen Newell. The model human processor- an engineering model of human performance. *Handbook of perception and human performance.*, Vol. 2, No. 45–1, 1986.