



自己データから他者データへの補間を用いた 身体融合手法に関する予備的検討

A Preliminary Study on Body Integration Method Using Interpolation from Self-Data to Other-Data

萩原隆義¹⁾, 脇坂崇平²⁾, 湯川光³⁾, 田中由浩³⁾, 南澤孝太²⁾

Takayoshi HAGIWARA, Sohei WAKISAKA, Hikari YUKAWA, Yoshihiro TANAKA and Kouta MINAMIZAWA

1) 長野工業高等専門学校 (〒 381-0041 長野県長野市徳間 716, t.hagiwara@nagano-nct.ac.jp)

2) 慶應義塾大学 (〒 223-8526 横浜市港北区日吉 4-1-1, wakisaka, kouta@kmd.keio.ac.jp)

3) 名古屋工業大学 (〒 466-8555 名古屋市昭和区御器所町, yukawa.hikari, tanaka.yoshihiro@nitech.ac.jp)

概要: 複数人で 1 つのアバターを操作する身体融合研究では、熟練者データとの融合が運動学習効率を向上させることが明らかになっている。本研究では、自分データとの融合から、他者データへの融合を滑らかに切り替える手法を提案し、運動学習について予備的検討を行った。自分・他者データのための融合と比較した結果、タスクの失敗回数が減少する傾向が見られた。熟練データへ段階的に移行することでスムーズな学習が期待できる。

キーワード: collaborative avatar, cybernetic avatar

1. はじめに

バーチャルアバターやロボットを用いて、複数人の身体運動や感覚を融合する「身体融合」とよばれる研究が興隆している。バーチャルアバターの右腕に 2 人が融合して操作するシステム [1] では、2 人の目標と運動軌跡の両方が一致している場合に、操作している感覚が増加することが明らかになっている。また、身体融合アバターを用いてバーチャル空間でリーチングタスクを行った研究 [2] では、融合アバターの運動が滑らかで直線的になるとともに、操作しているユーザ自身の運動も同様に滑らかで直線的になることが明らかになっている。身体融合アバターを用いた運動学習に関する研究も行われており、初心者が教師と一緒に 1 つのアバターに融合することにより、1 人で学習する場合よりも運動能力の学習効率が向上することや [3], 学習した技能の長期保持を促進する効果も示されている [4]。より実際の使用を想定して、融合する 2 人の運動反映割合を動的に変化させる手法や [5], 指を融合することによって手話を学習する研究も行われており [6], 身体融合時の方が学習成績が向上することが明らかになっている。

バーチャルアバターを用いた融合だけでなく、実空間でリアルタイムに 2 人を身体融合することによって、協調して作業を行うという研究が行われている。1 つのロボットアームに参加者 2 人を融合するシステム [7] が開発されており、1 人で操作する場合と同等の行為主体感と身体所有感が生起し、タスク時間が減少することやタスク精度が向上することが明らかになっている。また、身体融合時には参加者 2 人

の運動が同期する傾向があることも示されている。さらに、同様のシステムを用いて、2 人の参加者の役割が意思決定に与える影響についても研究が行われている [8]。このように、身体融合により、1 人でロボットアームを操作する場合とは異なる認知や運動戦略が生起することが示唆されている。

これまでの身体融合研究では、リアルタイムに参加者 2 人を融合する手法と、あらかじめ記録した教師役のデータと融合する手法が用いられてきた。これらの手法は、学習者が操作に慣れていない段階では、ある程度の習熟度に引き上げることが可能であるが、融合相手や教師役データが動作の主導権を握りがちになると考えられる。また、熟練者の動きを初心者が学習するということは、技能を伝えるという観点から重要であるが、身体融合に慣れていない段階やロボット操作に慣れていない段階では、自分の意図との不一致が生じ、主体感低下につながるのではないかと考えられる。そこで本研究では、あらかじめ記録した自分自身のデータとの融合から、他者のデータとの融合へ滑らかに補間するという手法を開発し、運動学習について予備的検討を行った (図 1)。操作に慣れていない段階では、癖や特徴がすでに含まれている自分のデータと融合することで、身体融合に適応することが容易になると考えられる。また、慣れに応じて他者のデータに徐々に切り替えることにより、スムーズに自分の動作に取り込むことが可能になるのではないかと考えられる。

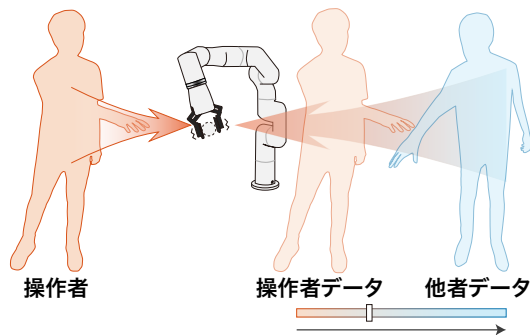


図1: 自分のデータから他人のデータへ滑らかに補間するコンセプトイメージ

2. 自己から他者データへの補間を用いた身体融合

本研究では、操作者の運動とあらかじめ記録されたデータとを任意の割合で統合し、1つのロボットアバターに身体化するシステムを開発した。ロボットアームの先端には物体把持を行うためのグripperを取り付け、先端位置と回転は、操作者とあらかじめ記録されたデータの手の位置と回転に任意の割合を乗じた値をそれぞれ足し合わせることで計算した。データは、時系列データとして記録し、記録時と同じフレームレートで再生された。操作者がロボットアバターを操作するために、位置と回転をトラッキングするための再帰性反射マーカーが配置された、手の甲に装着するインタフェースと、親指と人差し指で把持するグripper制御用のインタフェースを使用した。

自分データから他者データへの補間については、タスクの試行数に合わせて10段階とした。位置と回転は以下の式に従い、 $\cos$ 補間を行った(式1~3)。ここで、 n は試行数(0~9)、 n_{max} は最大試行数(9)を表す。 pos_{data} は補間したデータの位置(x, y, z)を、 rot_{data} は回転($roll, pitch, yaw$)を示す。自分のデータ(pos_{self})と他者データ(pos_{other})に任意の割合(w)を乗じることで、操作者が融合する補間データを計算した。

$$w = \frac{1 - \cos(\frac{n}{n_{max}}\pi)}{2} \quad (1)$$

$$pos_{data} = pos_{self} * (1 - w) * pos_{other} * w \quad (2)$$

$$rot_{data} = rot_{self} * (1 - w) * rot_{other} * w \quad (3)$$

グripperの開閉については、あらかじめ決められたタスクに合わせてタイミングを調整した補間を行った。本予備的検討では、障害物を避けてブロックを掴み、別のブロックの上に載せるというピックアンドプレースタスクを用いた。このタスクを「初期位置から障害物を避けてブロックの位置に移動」「ブロックを掴む」「ブロックを掴んだまま別のブロックの位置に移動する」「掴んでいるブロックを別のブロックの上に載せる」「初期位置に戻る」という5つの工程に分割した(図2)。自分データと他者データをそれぞれの工程に切り分け、各タイミングの差を計算し、試行数に合わせて10段階に分けた。10段階に分けたタイミングの差を分節化した自分のデータ長に足していくことで、最終

的な補間後のデータ長を計算した(図3)。次に、2つのデータを同じ長さになるようにリサンプリングし、以下の式に従ってタスクの試行数に合わせて重みづけを行い、足し合わせた(式4)。ここで、 $grip_{data}$ は補間したグripperデータ、 $grip_{self}$ と $grip_{other}$ はそれぞれ自分と他者のグripperデータを示す。

$$grip_{data} = grip_{self} * (1 - \frac{n}{n_{max}}) + grip_{other} * \frac{n}{n_{max}} \quad (4)$$

最後に、足し合わせたデータを補間後のデータ長にリサンプリングし、全ての工程をまとめることで、補間されたグripperの開閉データを作成した。

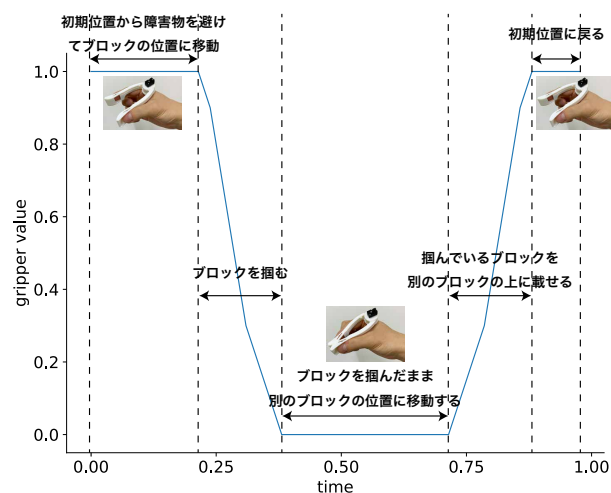


図2: 5つの工程に分割したイメージ

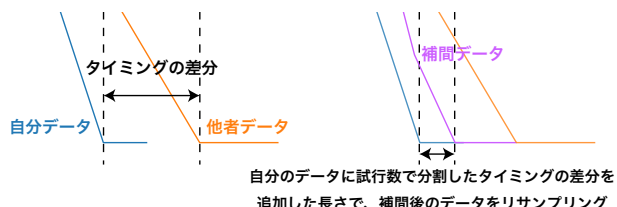


図3: タイミングを調整した補間のイメージ

3. 予備的検討

本システムの効果を調べるための予備的検討として、障害物を避けてブロックをつかみ、別のブロックの上に置くというタスクを行った。参加者とデータの反映割合はそれぞれ50%ずつとし、それらを足し合わせることでロボットの動きとした。補間を用いた融合条件(Interpolation)との比較のため、融合前後に1人で操作する条件(SoloPre, SoloPost)、事前に記録した自分自身のデータとのみ融合する条件(IntegrationSelf)、事前に記録した他人のデータとのみ融合する条件(IntegrationOther)でトライアルを行った。参加者には条件を明示しなかった。Interpolation条件では、タスクに十分慣れている実験者のデータを他者データとした。

20名の参加者(男性16名、女性4名、平均年齢30.95歳、SD = 9.29)が、インフォームド Consentのもと実験同意書

に署名を行い実験に参加した。全ての参加者は、初めに Solo 条件 (Solo_{Pre}) を行い、自分のデータを記録するフェーズを挟み、どちらかの Integration 条件 (Integration_{Self} もしくは Integration_{Other}) を行ったあと、もう 1 つの Integration 条件 (Integration_{Other} もしくは Integration_{Self}) を行い、補間を用いた融合条件 (Interpolation) を行った後、再度 Solo 条件 (Solo_{Post}) を行った。Integration 条件の順番は、参加者ごとにカウンターバランスをとった。

各試行で参加者は、ロボットアバターの正面に置かれた障害物を右側から回り込むようにして避け、前方に置いた 1 個の赤いブロック (ブロック A) を掴み、その手前にあるブロック (ブロック B) の上に乗せるタスクを行った。1 試行は 20 秒の制限時間を設けた。このタスクを各条件で 10 回行い、運動データと失敗回数を計測した。ここで、タスクの失敗は、ブロック A をブロック B の上に乗せることができなかった場合 (時間内に乗せることができなかった場合を含む) と定義した。

失敗回数のデータは正規分布に従わなかったため (Shapiro-Wilk test, $p < .05$), ART (Aligned Rank Transformation [9]) を用いた一元配置分散分析を行い、条件間の多重比較には Kenward-Roger の自由度近似 [10] を行った Tukey 法を使用した。その結果、要因の主効果が見られた ($F(4, 76) = 8.47, p < .001, \eta_p^2 = 0.31$, 図 4)。多重比較の結果、融合条件である Interpolation, Integration_{Self}, Integration_{Other} 条件では、Solo 条件よりも失敗回数が減少することが示された (Solo_{Pre} – Integration_{Self}: $t(76) = -4.02, \text{adj.} p = .0013, d = -1.27$; Solo_{Pre} – Integration_{Other}: $t(76) = -4.13, \text{adj.} p < .001, d = -1.31$; Solo_{Pre} – Interpolation: $t(76) = -5.15, \text{adj.} p < .001, d = -1.63$; Solo_{Post} – Interpolation: $t(76) = -3.15, \text{adj.} p = .019, d = -1.00$)。また、失敗回数は Interpolation 条件において少なくなる傾向が見られた。

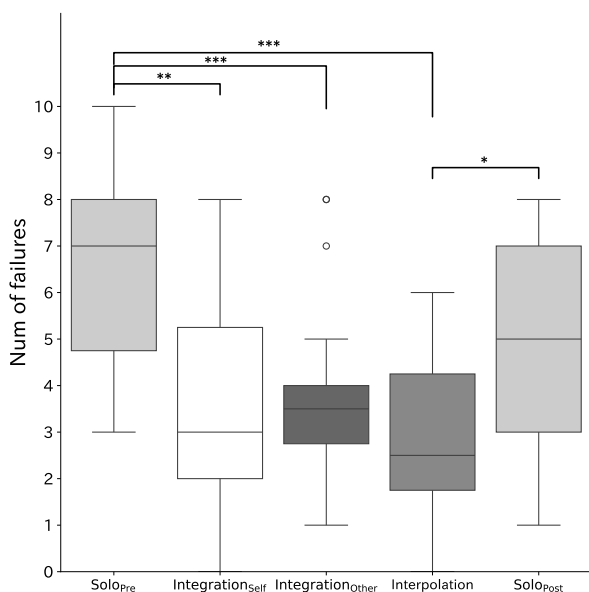


図 4: タスクの失敗回数 (* $p < .05$, ** $p < .01$, *** $p < .001$)

4. 考察

1 人で操作する場合よりも、身体融合の場合の方がタスクの失敗回数が減少することが示された。また、自分のデータから他者データへの補間条件では失敗回数が少なくなる傾向が見られた。自分のデータから他者データへと滑らかに補間することにより、自分の癖や特徴を含んだデータで融合に慣れた状態から、スムーズに他者データとの融合に移行できるのではないかと考えられる。今回の予備的検討では、試行ごとに融合データが変化することにより参加者が混乱することを避けるため、Interpolation 条件の順番を固定していた。そのため、学習効果により失敗回数が減少する傾向が見られた可能性がある。しかし、Integration_{Other} 条件での他者データと、Interpolation 条件での他者データは別のものを使用していることや、Solo_{Post} 条件において失敗回数が増加していることから、単なる学習効果だけではない可能性があるが、これらはより詳細な実験が必要になる。

Interpolation 条件において、参加者にはどのようなデータ処理が行われているのかを明示しなかった。数人ほどデータの変化に気づく参加者がおり、「自分のデータと他者データが混ざっている」と明示的にコメントした参加者が 1 名いた。こうした参加者は自分の運動に対するイメージや感覚が鋭いのではないかと考えられ、どのような手法により他者の運動を学習しやすくなるかについて検討する必要がある。

今回の実験では、試行数によって徐々に自分のデータから他者データへと切り替える手法を採用した。参加者ごとに慣れの段階や熟達度は異なるため、単に繰り返しの回数で変化させるのではなく、運動データなどから評価して調整する手法がより効果的な融合につながるのではないかと考えられる。また、参加者によっては「自分のデータとはうまく合わせられるが、他者データと合わせることが難しい」という場合や、その逆も考えられる。こうした参加者の特性によって、自分のデータから他者データへの補間に要する時間を長くすることや、運動の反映割合を調整することが必要になるのではないかと考えられる。

5. まとめ

身体融合の手法として、あらかじめ記録された自分自身のデータとの融合から、他者データへの融合へと段階的に補間した場合における効果について検討した。この手法によって、タスクの失敗回数が減少する傾向が見られたとともに、1 人で操作する場合よりも身体融合の場合の方が失敗回数が減少することが示された。本システムが運動学習や、他者の技能を習得する場合にどのような影響を与えるかについては今後の検討課題である。

謝辞 本研究は、JST ムーンショット型研究開発事業 Cybernetic being プロジェクト (JPMJMS2013) の支援を受けて行われた。

参考文献

- [1] Rebecca Fribourg, Nami Ogawa, Ludovic Hoyet, Ferran Argelaguet, Takuji Narumi, Michitaka Hirose, and Anatole Lécuyer. 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, 2021.
- [2] Takayoshi Hagiwara, Gowrishankar Ganesh, Maki Sugimoto, Masahiko Inami, and Michiteru Kitazaki. Individuals prioritize the reach straightness and hand jerk of a shared avatar over their own. *iScience*, 23(12):101732, 2020.
- [3] Daiki Kodama, Takato Mizuho, Yuji Hatada, Takuji Narumi, and Michitaka Hirose. Effects of collaborative training using virtual co-embodiment on motor skill learning. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 29(5):2304–2314, 2023.
- [4] Haruto Takita, Yuji Hatada, Takuji Narumi, and Michitaka Hirose. Effects of virtual co-embodiment on declarative memory-based motor skill learning. In *ACM Symposium on Applied Perception 2023*, SAP '23, New York, NY, USA, 2023. Association for Computing Machinery.
- [5] Daiki Kodama, Takato Mizuho, Yuji Hatada, Takuji Narumi, and Michitaka Hirose. Enhancing the sense of agency by transitional weight control in virtual co-embodiment. In *2022 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR)*, pages 278–286, 2022.
- [6] Yasunobu Katsumata, Yasuyuki Inoue, Satoshi Toriumi, Hiroki Ishimoto, Harin Hapuarachchi, and Michiteru Kitazaki. Shared avatar for hand movement imitation: Subjective and behavioral analyses. *IEEE Access*, 11:96710–96717, 2023.
- [7] Takayoshi Hagiwara, Takumi Katagiri, Hikari Yukawa, Itsuki Ogura, Ryohei Tanada, Takumi Nishimura, Yoshihiro Tanaka, and Kouta Minamizawa. Collaborative avatar platform for collective human expertise. In *SIGGRAPH Asia 2021 Emerging Technologies*, SA '21 Emerging Technologies, New York, NY, USA, 2021. Association for Computing Machinery.
- [8] Kenta Hashiura, Takayoshi Hagiwara, Giulia Barbareschi, Sohei Wakisaka, and Kouta Minamizawa. “together with who?” recognizing partners during collaborative avatar manipulation. *ACM Trans. Appl. Percept.*, 21(4), November 2024.
- [9] Jacob O. Wobbrock, Leah Findlater, Darren Gergle, and James J. Higgins. The aligned rank transform for nonparametric factorial analyses using only anova procedures. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '11, page 143–146, New York, NY, USA, 2011. Association for Computing Machinery.
- [10] Michael G. Kenward and James H. Roger. Small sample inference for fixed effects from restricted maximum likelihood. *Biometrics*, 53(3):983–997, 1997.