



# 身体融合ロボットアバターにおける 役割分担割合と主体感および操作感の関係調査

Study on Relationship between Ratio of Role Assignment and  
Sense of Ownership and Operability in a Collaborative Avatar

小倉樹<sup>1)</sup>, 岨野太一<sup>2)</sup>, 大澤博隆<sup>3)4)</sup>, 湯川光<sup>1)</sup>, 萩原隆義<sup>5)</sup>, 南澤孝太<sup>5)</sup>, 田中由浩<sup>1)</sup>

Titsuki OGURA, Taichi SONO, Hirotaka OSAWA, Hikari YUKAWA, Tkayoshi HAGIWARA,  
Kouta MINAMIZAWA and Yoshihiro TANAKA

- 1) 名古屋工業大学 (〒 466-8555 愛知県名古屋市昭和区御器所町, i.ogura.373@nitech.jp, yukawa.hikari@nitech.ac.jp, tanaka.yoshihiro@nitech.ac.jp)
- 2) 慶應義塾大学大学院理工学研究科 (〒 223-0061 神奈川県横浜市港北区日吉 3-14-1, taichisono0420@keio.jp, osawa@iit.tsukuba.ac.jp)
- 3) 慶應義塾大学理工学部管理工学科 (〒 223-0061 神奈川県横浜市港北区日吉 3-14-1)
- 4) 筑波大学システム情報系知能機能工学域 (〒 305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1)
- 5) 慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科 (〒 223-8526 横浜市港北区日吉 4-1-1, hagiwara@kmd.keio.ac.jp, kouta@kmd.keio.ac.jp)

**概要:** 筆者らは、複数人が 1 台のロボットアバターを操作する身体融合に関する研究を行なっている。これまで操作開始前に各操作者が受け持つ制御割合や、位置や姿勢といった動作上の役割をどちらが分担するかなどを設定して融合していたが、これを統合して操作中に変化させることで、主体感や操作性の向上が期待できる。本研究では、2 人で身体融合ロボットアバターを操作している際に、位置と姿勢の融合割合を任意に変化できるシステムを構築し、積み木作業を対象にして主体感や操作性との関係を調べた。

**キーワード:** ロボットアバター, 身体融合, 融合割合変化

## 1. はじめに

近年、ロボットアバターに関する技術が注目されている。ロボットアバターとは、腕を伸ばす、物体を掴むといった身体的な動作や、視覚や聴覚などの感覚の取得をロボットを介して行うことができる技術である。これにより、操作者は遠隔地に自分の分身を作り出し、その場に自分がいるような感覚で作業を行うことができる [1]。ロボットアバターに関して様々な用途に向けた研究が行われており、障害を持つ人々が観光を行うためのロボットアバターの開発 [2] や寝たきりの人でも仕事が可能になるアバターワーク [3]、介護者支援システムへの導入の提案 [4] などが存在している。これらの事例が示すように、その場にいなければできなかった作業がロボットアバターによって空間や時間などの制約が取り除かれ、リアルタイムで行うことが可能になると期待されている。

筆者らはロボットアバターの拡張として、複数人が 1 台のロボットを操作することによって 1 人では困難な作業の実現や 2 人の技能を融合する身体融合に関する研究を行っている。これまでに運動共有と役割分担という 2 つの身体融

合の様式を提案してきた [5]。運動共有は各操作者がロボット全体の操作を数割ずつ受け持つ。1 台のロボットアーム操作を複数人で共有することにより、アームの動作が安定することを観測した。役割分担は各操作者が位置操作や姿勢操作、把持動作といった役割をそれぞれで分担して受け持つ。これによりそれぞれの仕事に集中することによる精度の向上や、1 人では不可能な動作の実現を図る。

本研究では、この身体融合ロボットアバターの操作性と主体感の向上を目的に操作中に位置および姿勢の融合割合をそれぞれシームレスに変化させるシステムを提案する。割合を変化させる方法に関しては、どのような調整が有効かはまだ判明していない。そこで、まず外部から操作者の制御割合を変化させることができるデバイスを作成し、実際にロボットアバターを操作する人とは別に、第三者がタスク中に制御割合を変化させるシステムを開発した。融合割合調整器とシステムの概念図を図 1 に示す。本研究では、このデバイスを用いて主体感を維持しながら高い操作性が得られる割合を調査する。

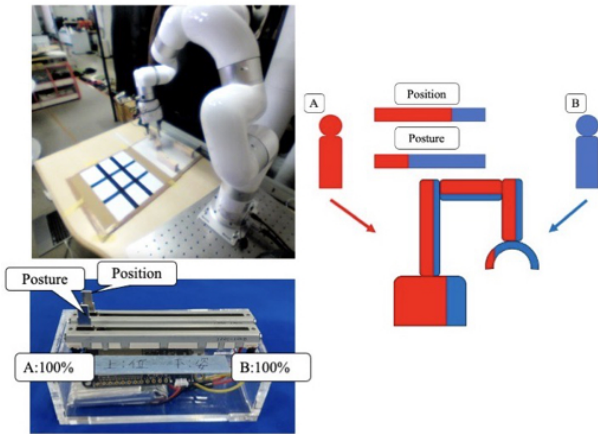


図 1: 身体融合の方式

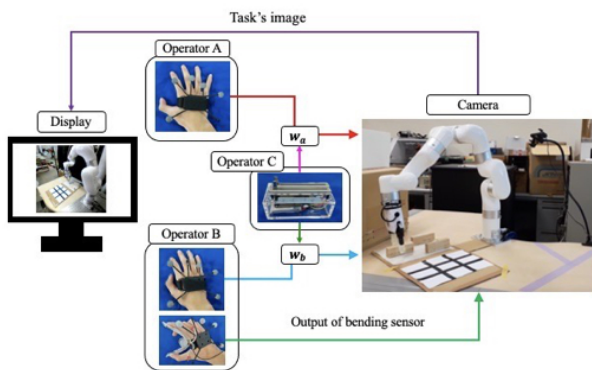


図 2: システム図

2. システムの概要

2.1 ロボットアバター

本研究で使用する、2人で役割分担して操作するロボットアバターのシステムを図2に示す。ロボットアーム (xArm7, Ufactory) を、2人の操作者が手に装着した剛体の位置と姿勢をモーションキャプチャ (OptiTrack, Acuity) で読み取ることで制御する。ロボットアームのサンプリング周波数は約 200Hz となっている。把持操作には曲げセンサ (FS-L-0055-253-ST, Spectra Symbol) を利用している。曲げセンサを組み込んだデバイスを人差し指と親指で挟んで曲げることで物をつまむ動作に応じてグリッパーが開閉する。

2.2 融合割合の操作

本研究においては2人の操作者の融合割合をスライダー型可変抵抗 (スライドボリューム RS □□1 シリーズ) を用いて操作する。マイコンボードで値を取得し、UDP 通信により制御割合がリアルタイムに反映される。作成した融合割合調整器は図1に示されている通りである。上部のスライダーではロボットの位置制御を、下部のスライダーでは姿勢制御の割合を 0~100% で操作することができる。この値を1人の操作者の操作が反映される割合とし、この値を1から引いた値がもう1人の操作者の操作が反映される割合とした。操作者をそれぞれ  $a, b$  とする。位置と姿勢に対する1人の操作者の制御割合を  $w_{a1}, w_{a2}$ , もう1人の操作

者の制御割合を  $w_{b1}, w_{b2}$  とすると、以下のように表せる。

$$w_{a1} = 1 - w_{b1} \tag{1}$$

$$w_{a2} = 1 - w_{b2} \tag{2}$$

2.2.1 位置制御の割合

上記の提案に基づくと、各操作者の剛体の位置に制御割合を掛けて足し合わせることで融合が可能となる。しかし、単純に足すだけでは割合の変化時に剛体の位置がロボットの現時点の座標に足されるため、勝手に位置が動いてしまうという問題があった。そのため、剛体の移動分のみに割合をかけてロボットの現在位置に足し続けることで、剛体の座標が変化した時のみロボットの位置に反映されるようにした。ロボットの座標を  $(x, y, z)$ , 位置ベクトルを  $\mathbf{P}$  とし、 $i$  番目のサンプリング時の位置ベクトルをとるとロボットの位置は以下の式で表せる。添え字は操作者  $a, b$  を示す。

$$\mathbf{P}_{(i+1)} = w_{a1}(\mathbf{P}_{a(i+1)} - \mathbf{P}_{ai}) + w_{b1}(\mathbf{P}_{b(i+1)} - \mathbf{P}_{bi}) \tag{3}$$

2.2.2 姿勢制御の割合

姿勢制御に関しても roll 角を  $\phi$ , pitch 角を  $\theta$ , yaw 角を  $\psi$  (いずれも単位は degree) とし、姿勢ベクトルを  $\mathbf{R}$  とし、 $i$  番目のサンプリング時の姿勢ベクトルをとるとロボットの姿勢は以下の式で表せる。添え字は操作者  $a, b$  を示す。

$$\mathbf{R}_{(i+1)} = w_{a2}(\mathbf{R}_{a(i+1)} - \mathbf{R}_{ai}) + w_{b2}(\mathbf{R}_{b(i+1)} - \mathbf{R}_{bi}) \tag{4}$$

ただし、モーションキャプチャ上では剛体の姿勢をクォータニオンで表しているため、プログラム上の計算ではクォータニオンの回転行列 [6] で差分を計算してからその差分をオイラーに変換し、制御割合をかけてからクォータニオンに戻して計算している。

3. 評価実験

主体感を維持しながら高い操作性が得られる融合割合を検討した。主操作者とサポーター役による身体融合に対して、主操作者が主体感を残したままパフォーマンスを上げることができる位置と姿勢の制御割合を探索する評価実験を行った。

3.1 実験環境

実験参加者の位置関係を図3に示す。各実験に対して2名の被験者とサポーター役となる1名の実験者が参加した。実験者はロボットアームの操作に慣れており、一貫したサポートルールを設けた。被験者のうち1名はロボットアームの主操作者となり、サポーターと身体融合して積木を把持して積み上げた。また、把持操作も主操作者が行った。主操作者はロボットアーム後方に設置したカメラ映像をディスプレイを通して見た。もう1名の被験者はスライダー操作者となり、主操作者と同じ映像を映しているディスプレイを見ながらスライダーを操作した。被験者はお互いの姿は見えず、サポーターのみロボットアームを直接見ること

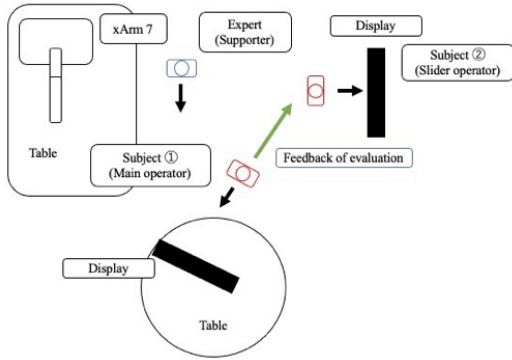
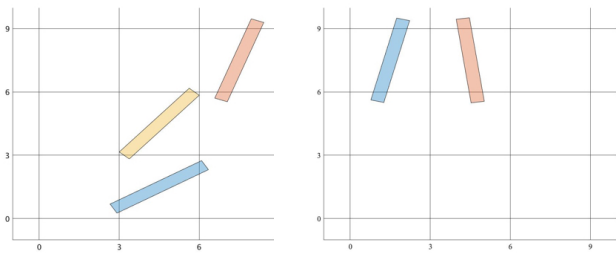


図 3: 実験参加者の位置関係



(a) 例 1

(b) 例 2

図 4: タスク目標の例

ができた。

3.2 タスク課題

まず主操作者はタスク目標を出力するプログラムを起動する。出力結果の 2 例を図 4 に、積木の初期地点および積み場所を図 5 に示す。プログラムを起動すると、9 つのスペースのいずれかに積木を示すマークが  $-60^\circ$  から  $60^\circ$  のランダムな角度で表示される。この時、目標は主操作者以外には見せないようにする。

図 4 は図 5 の左側に対応している。被験者はサポーターと身体融合した状態でロボットアーム全体を映すカメラ映像を見ながら、出力された位置、角度で積木を配置する。位置は、積木の中央の黒点が指定されたスペース内にあるか、線を踏んでいれば良いとした。

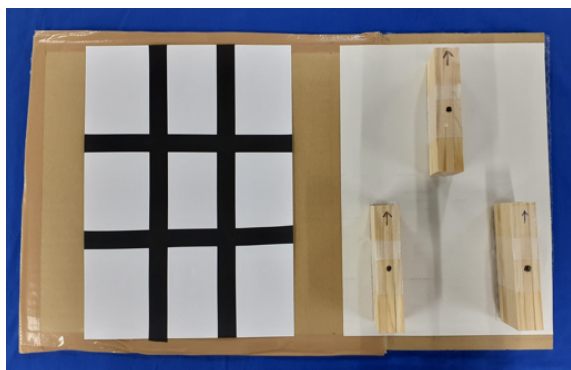


図 5: タスクの場所

この時図 4(a) のように積木が 3 つ出力された場合はその通りに 3 つの積木を配置する。図 4(b) のように積木が 2 つ出力された場合は 3 つ目の積木を先においた 2 つの積木の上に好きな角度で置く。

3.3 タスク手順

板上の積木 (KAPLA,  $7.8\text{mm} \times 23.5\text{mm} \times 117.7\text{mm}$ ) を養生テープで 5 つ結びつけ、下に梱包材を貼り付けた積木を把持して積み上げるタスクを行った。タスク開始時のスライダーは位置、姿勢のいずれも 50 % ずつに設定した。主操作の被験者は 1 回のタスク終了ごとに評価アンケートに回答した。タスク中に被験者間でのコミュニケーションは行わなかったが、1 回のタスク終了時に、主操作者がそのタスク中に感じた感触を評価アンケートの結果とともにスライダー操作の被験者に伝えた。アンケートの内容は以下の通りである。

- 1) ロボットアームを自分が操作しているように感じましたか? (操作主体感)
- 2) ロボットアームを自分の手のように感じましたか? (身体所有感)
- 3) サポーターの協力を感じましたか? (連帯感)
- 4) 遂行中にタスクを進めやすかったですか? (システムの性能評価)
- 5) 結果に満足していますか? (最終評価)

これらのアンケートに 7 段階評価で回答してもらい、スライダー操作者は 1), 4), 5) の数値を最大化するように意識しながら次の回にスライダーを操作した。

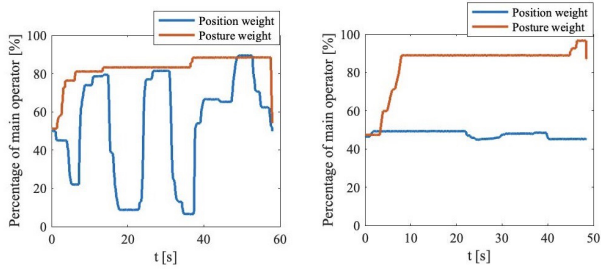
実験はまずスライダーを操作せず、50 % ずつのまま練習として 3 回行い、その後、テストとして 6 回行なった。被験者は 3 名 (2 グループ、男性 2 名、女性 1 名、21~24 歳) とし、1 回目の実験で主操作者となった被験者は次の実験でスライダー操作を担当した。

3.4 実験結果および考察

各タスクにおける成功個数を図 6 に、評価アンケートの結果を図 7 に、タスク中の主操作者の制御割合の変化の例を図 8 に示す。図 8 より、全体として、位置制御の割合は約 50 % ずつ、姿勢制御割合は主操作者側が大きくなるような形に収束しつつある。これは、タスク目標を把握しているのが主操作者だけであることが影響していると考えられる。積み木の移動に関して把持するポイントは 3 つ、把持後は必ず 9 つのいずれかのポイントに移動するため、サポーターが主操作者の意図を予測しやすくなり、サポーターの位置制御割合が大きくなったと考えられる。一方、タスク目標は主操作者しか知らないために、積み木の角度は主操作者が操作しなければ思い通りの結果を出すことができないために、主操作者の姿勢制御割合が大きくなったと考えられる。

図 6 より、どちらのグループも 5 回目と 6 回目は成功個数が多くなっており、タスクのパフォーマンスが





(a) 1回目の試行結果 (グループ1) (b) 5回目の試行結果 (グループ1)

図 8: 制御割合の変化

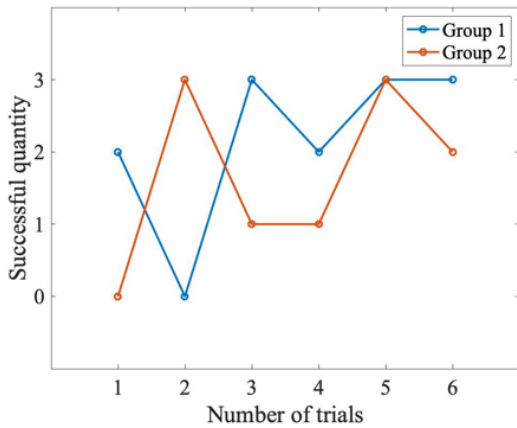


図 6: 成功個数

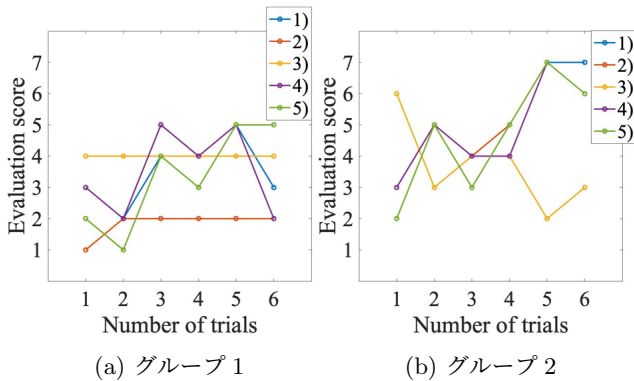


図 7: タスクの評価

ある程度上昇したと考えられる。また、図7より、どちらのグループも最大化を目指した評価項目は上昇傾向にあると分かる。

なお、スライダー操作者から姿勢割合を全て主操作者に移したところ、姿勢の動きが激しくなりすぎたと感じ、それ以降は移す量を減らしたという意見が得られた。今後、スライダーの操作量決定にこのような別の評価指標の介入をどのように扱うのかを考慮する必要があると考えられる。また、本実験においては人間の感覚で定性的に制御割合を操作したため、動作指標を持つ操作者に制御割合が多く移るとは限らず、ロボットアームが動けなくなってしまう場合等があった。

動作が予測しやすい場合は 50 %程度の割合がよいとすれば、ロボットの動作に応じて自動的に制御割合を変化させることでより効果的な戦略を見出せる可能性がある。

4. まとめ

本研究では1台のロボットアバターを介した複数人の身体融合について、融合割合をシームレスに変化させることによるロボットアバターの操作性と主体感の向上を検討した。

主操作者とサポーターによる身体融合について、姿勢制御の割合は主操作者側を大きくし、位置制御の割合は50%ずつにすることでタスクパフォーマンスや主体感の向上を図ることができる可能性を示した。評価項目や評価方法についてより深く考察し、被験者を増やして実験を行いたい。また、ロボットアームの動作を元に制御割合を自動で変化させることも検討したい。

謝辞 本研究は JST ムーンショット型研究開発 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] 妻木勇一：遠隔コミュニケーションとテレロボティクス—ロボットアバターの最前線—, 日本ロボット学会史, Vol. 30, No. 6, pp.606–608, 2012.
- [2] Chong Wing Cheung, Tai Ip Tsang, Kin Hong Wong: Robot avatar: A virtual tourism robot for people with disabilities, International Journal of Computer Theory and Engineering, Vol. 9, No. 3, pp.229–234, 2017.
- [3] Kazuaki Takeuchi, Yoichi Yamazaki, Kentaro Yoshifuji: Avatar work: Telerwork for disabled people unable to go outside by using avatar robots "OriHime-D" and its verification, HRI '20: Companion of the 2020 ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction, pp. 53–60, 2020.
- [4] 遠藤沙莉：介護者支援システム GCSS とアバターエージェント, 第 53 回自動制御連合講演会, 2010.
- [5] Takayoshi Hagiwara, Takumi Katagiri, Hikari Yukawa, Itsuki Ogura, Ryohei Tanada, Takumi Nishimura, Yoshihiro Tanaka, Kouta Minamizawa: Collaborative Avatar Platform for Collective Human Expertise, SA '21 Emerging Technologies: SIGGRAPH Asia 2021 Emerging Technologies, 2021.
- [6] 矢田部学：クォータニオン計算便利ノート, MSS 技報, Vol. 18, 2007.