



ロボットアバターを介した身体融合における 役割分担に関する基礎検討

A Basic Study of Role Sharing in Body Integration through a Robotic Avatar

片桐拓海¹⁾, 小倉樹¹⁾, 棚田亮平¹⁾, 西村匠生¹⁾, 湯川光¹⁾, 南澤孝太²⁾, 田中由浩¹⁾

Takumi KATAGIRI, Itsuki OGURA, Ryohei TANADA, Takumi NISHIMURA,

Hikari YUKAWA, Kouta MINAMIZAWA, and Yoshihiro TANAKA

1) 名古屋工業大学大学院 工学研究科 (〒 466-8555 愛知県名古屋市長和区御器所町

t.katagiri.753@nitech.jp, i.ogura.373@nitech.jp, r.tanada.550@nitech.jp,

t.nishimura.502@nitech.jp, yukawa.hikari@nitech.ac.jp, tanaka.yoshihiro@nitech.ac.jp)

2) 慶應義塾大学大学院 メディアデザイン研究科 (〒 223-8526 神奈川県横浜市港北区日吉 4-1-1 kouta@kmd.keio.ac.jp)

概要: 本研究では、一台のロボットアームに対して二人が身体機能を分担して制御することで、身体融合を実現するシステムを提案する。把持操作などの作業を対象にして一人でロボットアームを制御した場合と比較し、二人による身体融合の効果を考察する。また、操作者間の連携のために触覚フィードバックの導入を検討し、操作性や認知特性に与える影響について検討する。

キーワード: サイバネティックアバター, 融合身体, 役割分担, 触覚フィードバック

1. はじめに

ロボットアバターとは、人間が自身の動きをロボットに反映させ、自分の分身（アバター）として制御する技術である。この技術を用いて遠隔地に配置したロボットを制御し、その時の視覚、聴覚、触覚などの感覚情報を体感することで、自分は実際にその場所に行くことなく、まるでその場に居るかのような体験をしたり、人が立ち入れない環境で作業を遂行したり [1] できる。

ロボットアバターの制御方法としては、モーションキャプチャなどで測定した操作者の運動情報を基にしたもの [2] やコントローラを使用したもの [3]、非侵襲的 BCI (Brain Control Interface) として操作者の脳波を用いたもの [4] など、用途、使用環境に応じて様々である。アバターでは、自身の身体を超えて動作を実現することも可能である [5]。本研究では、複数人がアバターを介して融合し、作業を行うことができるシステムの開発を目的とする。Hagiwara ら [6] は、サイバー空間におけるバーチャルアバターを対象として、二人の操作者の腕の動きを共有して一人のアバターを制御するシステムを開発し、身体共有によって運動パフォーマンスが向上することを示唆している。このような身体融合の技術を実世界において実現できれば、異なる身体的スキルを持つ複数人の技能をロボットアバター上で融合し、操作支援や技能伝承、動作拡張などを通じ、現状のロボットアバターで活用が見込まれている対象をさらに広げた共創的応用が期待できる。一方、融合の方法や、融合したロボットアバター操作に重要な運動や感覚のフィードバックにつ

いては十分に議論がなされていない。

そこで本研究では、一台のロボットアームに二人が接続し、身体融合を実現するシステムを提案する。特に、制御方法としては、Hagiwara らの実空間への展開である運動の分担、および新たな身体融合として役割の分担を提案し、ここでは役割分担について述べる。運動の分担については、文献 [7] を参照されたい。役割分担では、一つの方法として、位置制御と姿勢制御の分担を検討した。それぞれを分担することで各々の操作に集中でき、関節の可動域制限から一人では困難な運動や姿勢の実現が期待できる。本稿では、基礎実験として、プリミティブな作業を対象とし、一人でロボットアームを制御した場合と比較して、二人による身体融合の効果を考察する。また、操作者間での連携のために触覚フィードバックの導入を検討し、操作性や認知特性に与える影響について検討する。

2. 身体融合システム

提案する身体融合システムの概要を図 1 に示す。アバターとなるロボットとしては 7 自由度ロボットアーム xArm7 (UFACTORY 社) を使用した。光学式モーションキャプチャ (OptiTrack, Acuity 株式会社) を用いて、操作者 A, B それぞれの右手の甲に定義した剛体 1, 2 の位置と姿勢の情報を取得した。得られた情報に対して、剛体 1 の位置情報と剛体 2 の姿勢情報をそれぞれ xArm7 のエンドエフェクタの位置・姿勢情報となるように制御した。グリップ部

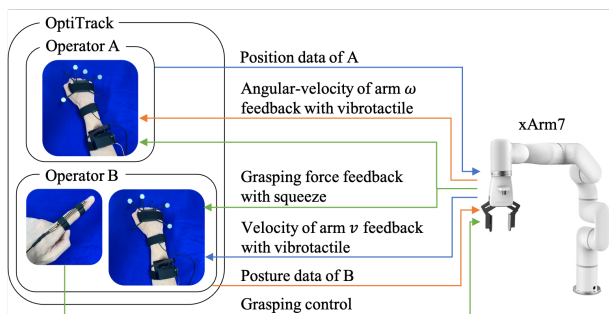


図 1: 身体融合システムの概要

253-ST) を使用し、センサを装着した姿勢を担当する操作者 B の指の曲げ伸ばし動作と連動してグリッパーが開閉するようにした。

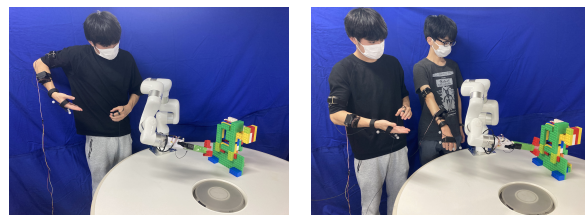
また、操作者同士で連携をとりタスクをスムーズに行うために、操作者間での運動と感覚に関する情報の共有が必要だと考え、ウェアラブル触覚提示デバイスによる情報フィードバックを加えた。人間は触覚（深部感覚も含む）と運動が双方向の関係にあり、巧みな物体操作には欠かせない。自身でロボットを操作する場合は、運動情報は自身で認識しているため、フィードバックは基本的に不要である。一方、複数人でロボットアームを動かす場合、他者が行った運動を視覚的に共有はできるものの、触覚を通しては体感できない。そこで本研究では、より直感的に相手の動きを認識できスムーズな連携につながると考え、相手の運動情報を触覚フィードバックを介して認識するシステムを構築した（図 1 参照）。操作者 A にフィードバックする情報としては、操作者 B の姿勢制御に伴う情報としてエンドエフェクタの回転角速度情報 ω [rad/s] を、操作者 B にフィードバックする情報としては操作者 A の位置制御に伴う情報としてエンドエフェクタの速度情報 v [mm/s] をそれぞれ採用した。位置と姿勢の時間変化のノルム（スカラー量）を、速度および回転角速度情報として求め、周波数 200 [Hz] のキャリア波（正弦波）に対して、それぞれの値の変化に応じて振幅変調させた振動を生成することで、操作者の手首に装着した振動デバイスを用いて振動提示した。また、グリッパーの内側に薄膜圧力センサ（xuuyuu, RP-C10-ST）を貼付し、物体を把持した際の把持力を操作者 A、B 双方に圧迫刺激によりフィードバックした。把持力提示デバイスは DC サーボモータとゴム紐から構成されており、力センサの出力値が大きくなるにつれてモータが回転し、ゴム紐による締め付け力が強くなる。

3. 効果検証実験

3.1 実験概要

位置と姿勢の制御を要するプリミティブなタスクとして、「ブロックを壁面の穴に通すタスク（以下、穴通し）」、および「コースに沿ってリングを運ぶタスク（以下、リング運び）」を対象とした。各タスクの詳細を以下に示す。

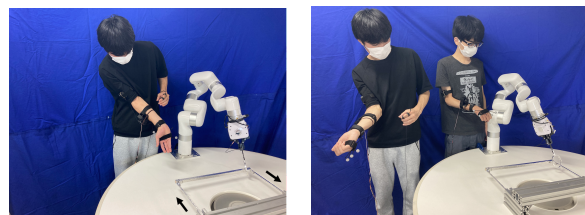
- 穴通し：ロボットアームの左斜め前方に垂直に立てら



(a) 一人

(b) 分担（左：姿勢／把持制御、右：位置制御）

図 2: 穴通しタスクを行っている様子



(a) 一人

(b) 分担（左：姿勢／把持制御、右：位置制御）

図 3: リング運びタスクを行っている様子

れた壁面の穴に、アームを用いて把持したブロックを右側から通すタスクである。壁面には、姿勢制御の必要性を考慮し、特定の向きでのみブロックを通せるように L 字型の穴が空いている。

- リング運び：ロボットアームを用いてリング付きの棒を把持し、角材を四角く結合して作成したコースに沿ってゴールまでリングを通すタスクである。コースの途中に設けられた 2 箇所のみ角では、位置を微妙に調整しながらの姿勢制御が求められる。

3.2 実験結果

各タスクを一人、または提案する手法で二人で分担して行った実験の様子を、それぞれ図 2(a), (b) および図 3(a), (b) に示す。

一人でタスクを行った場合、両タスクとも、操作者には関節の可動域的に無理な体勢が求められる（図 2(a) および図 3(a) 参照）。穴通しでは、ブロックの向きを調整した体勢のまま姿勢を変えずに水平に腕を動かす必要があり、タスクの遂行が極めて困難であった。またリング運びでは、2 回目の角を曲がる際に制御している腕が可動域限界に達し、それ以上のタスク遂行が出来なくなってしまった。関節が柔らかく、辛うじて曲がれたとしても、その姿勢を維持したままゴールまでさらに前方に動かす必要があり、一人で本タスクを完遂することはできなかった。

続いて、位置と姿勢の制御を二人の操作者により分担してタスクを行った。図 2(b) および図 3(b) において、左側の人が姿勢制御と把持制御を、右側の人が位置制御を担当した。穴通しに関して、一人の場合と比較してスムーズにタスクを遂行しており、正確性が上がった印象を受けた。関節可動域の制約から一人では完遂することができなかったリング運びは、役割分担したことでリングをゴールまで難なく運ぶことができた。

4. 考察

4.1 役割分担

役割分担によって両タスクをスムーズに遂行できた理由としては、二つのことが考えられる。一つ目は、操作者が各々の操作に集中できたということである。役割分担したことで、姿勢制御の人は、腕の位置を自由に換え、自分にとって楽な体勢で手の姿勢を維持することができるようになった。また位置制御の人は、自分の手の姿勢を気にすることなく腕を水平に動かすことだけに集中できるようになった。つまり、操作者一人当たりの認知的な負担が減ったことで、正確な制御につながり、スムーズにタスクを完遂できたのだと考えられる。二つ目は、分担によって人間の可動域を超えた操作ができるようになったということである。役割分担することで、姿勢制御の人は自分の腕の位置を気にする必要がなくなる。つまり、位置を変えて姿勢の可動域を広げたり、手首中心の制御だけでなく、肩を中心に腕全体を動かしたり、身体ごと向きを変えるように回転したりして剛体の姿勢を制御出来るようになる。これらにより操作者は、楽な体勢かつ本来一人では困難な姿勢でロボットアームを制御することができ、一人では遂行できなかったタスクの完遂につながったと考えられる。このことは、人が入れられないような入り組んだ環境でのロボットアバターを介した身体融合の可能性を示唆している。

4.2 触覚フィードバック

実験後の被験者からの感想で、「触覚フィードバックによって自分の腕がロボットアームと一体化しているように感じた」という意見があった。また、「操作中に振動を感じることでもう一人の操作者がアームを制御していることが分かり、操作者同士で連携をとっている感じがした」という意見もあった。これらは、今回提案したフィードバックシステムが、ロボットアームを介した操作者同士の身体融合に有効であることを示唆していると考えられる。また、「把持力提示デバイスによって腕が締め付けられていると、物体を把持していることを視覚情報だけでなく体感的に認識することができ、安心感を持ってタスクを遂行することが出来た」という意見もあった。遠隔操作ロボットで多く見られるように、触覚情報のフィードバックも操作に対して有効であったと考えられる。

一方、フィードバックの直感性や精度については検討が必要である。今回、「タスクに集中し過ぎるとフィードバックに意識が向かなくなってしまう」という意見や、「フィードバックからはアームの動きを認識し難かった」といった意見もあった。本稿で検証した二つのタスクでは、ロボットアームをゆっくり動かして慎重に制御する場面が多く、それによって振動フィードバックの強弱変化が感じ難くなってしまったことが主な原因として考えられる。また、今回提案した触覚フィードバックシステムでは、操作者に提示する情報としてエンドエフェクタの速度情報と回転角速度情報を採用し、共にスカラー量として扱った。スカラー量から分かる情報としてはロボットアームが動いているか否か、

および動きの勢いなどが挙げられるが、振動の提示位置を増やすなどしてベクトル量をフィードバックすると、動作方向まで分かるようになり、よりロボットアームや他者の動きを認識し易くなるのではないかと考えられる。さらに、今回操作者は、ロボットアームの後ろに立って、三人称視点でアームの動きを確認しながらタスクを行った。そこで、ロボットアームの隣にステレオカメラを設置するなどして、一人称視点でタスクを行うことで、アームに対する身体所有感が増大し、操作時の触覚フィードバックに対する認識力が向上するのではないかと考えられる。

5. おわりに

本稿では、一台のロボットアームを二人の操作者が役割分担して制御するシステムを提案し、一人でロボットアームを制御した場合と比較して、二人による身体融合の効果を検証した。また、操作者間でのスムーズな連携のために、双方の運動に伴う情報の触覚フィードバックを検討し、操作性や認知特性への影響について考察した。役割分担によって各々の操作に集中できるようになり、タスクの正確性が向上すると共に、人間の可動域を超えた姿勢での作業が可能となった。触覚フィードバックに関して、操作者間での連携や操作性へのポジティブな影響があった一方で、その提示方法について更なる改善の余地があることが示唆された。

今後は、本稿で得られた知見を基に、役割分担および触覚フィードバックによる効果に関して、より定量的な評価を行っていきたい。また、人やロボットの運動に伴う情報の触覚フィードバックの方法について、更に深く検証していきたい。

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] O. Khatib, X. Yeh, G. Brantner, B. Soe, B. Kim, S. Ganguly, H. S. Stuart, S. Wang, M. Cutkosky, A. Edsinger, P. Mullins, M. Barham, C. Voolstra, K. Salama, M. L'Hour, and V. Creuze, "Ocean one: a robotic avatar for oceanic discovery", *IEEE Robotics & Automation Magazine*, Vol. 23, pp. 20-29, 2016.
- [2] B. Fang, F. Sun, H. Liu, and D. Guo, "A novel data glove using inertial and magnetic sensors for motion capture and robotic arm-hand teleoperation", *Ind. Robot*, Vol. 44, pp. 155-165, 2017.
- [3] M. Ito, Y. Funahara, S. Saiki, Y. Yamazaki, and Yuichi Kurita, "Development of a cross-platform cockpit for simulated and tele-operated excavators", *J. Robot. Mechatron.*, Vol. 31, No. 2, pp. 231-239, 2019.
- [4] J. Meng, S. Zhang, A. Bekyo, J. Olsoe, B. Baxter, and B. He, "Noninvasive electroencephalogram

based control of a robotic arm for reach and grasp tasks”, *Scientific Reports*, Vol. 6, 2016.

- [5] T. Obo, R. Hase, K. Kobayashi, K. Sueta, T. Nakano, and D. Shin, “Cognitive modeling based on perceiving-acting cycle in robotic avatar system for disabled patients”, *2020 International Joint Conference on Neural Networks*, Vol. , pp. 1-6, 2020.
- [6] T. Hagiwara, G. Ganesh, M. Sugimoto, M. Inami, and M. Kitazaki, “Individuals prioritize the reach straightness and hand jerk of a shared avatar over their own”, *iScience*, Vol. 23, 2020.
- [7] 萩原隆義, 片桐拓海, 湯川光, 田中由浩, 南澤孝太: ロボットアバターを介した身体融合における運動共有の基礎検討, 第26回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 2021.