



拡張身体の身体化に関する研究

— 第一報：装着型ロボットアームの能動制御と手先方向提示による身体幅感覚への影響 —

西田野々香¹⁾, 岩崎悠希子¹⁾, 加藤史洋¹⁾, Ganesh Gowrishankar²⁾, 岩田浩康¹⁾

Nonoka NISHIDA, Yukiko IWASAKI, Fumihiko KATO, Gowrishankar GANESH, and Hiroyasu IWATA

1) 早稲田大学 創造理工学研究科 (〒 162-0056 東京都新宿区若松町 2-2, nishida-nonoka@akane.waseda.jp)

2) UM-CNRS Laboratoire d'Informatique, de Robotique et de Microelectronique de Montpellier (LIRMM)
(161, Rue Ada, Montpellier, France, ganesh.gowrishankar@lirimm.fr)

概要: 装着型の拡張身体ロボットアームの開発において, 身体の幅・形が装着前と変わった状態であっても周囲と衝突しないように動き回れることが望ましい. ロボットを自分の身体として認識すれば身体幅感覚に介入できると考え, 装着型ロボットへの身体性誘発の手法として Agency と Ownership の誘発をめざした制御・フィードバックシステムを開発した. 提案手法により身体幅の認識がロボットアーム側へ広がる可能性が示唆された.

キーワード: 拡張身体, 身体性, 身体幅感覚

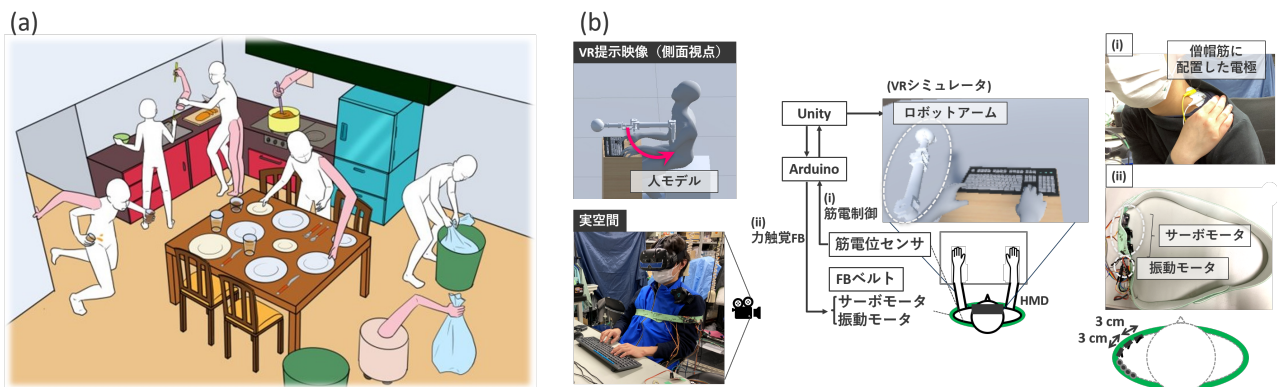


図 1: (a)【第三の腕】の将来展望, (b)Agency, Ownership 誘発をめざした筋電制御・力触覚 FB システム

1. はじめに

人間の身体の可能性を広げる拡張身体ロボットが提案されている.【第三の腕】[1]は, 日常生活のデュアルタスクを自在に行うことをめざしたロボットアーム型拡張身体である(図 1(a)).【第三の腕】のような拡張身体を装着すると装着者の身体の幅が変化する. 拡張身体を身体領域として認識し周辺環境と衝突せずに動き回れる必要がある. 本研究は拡張身体を自分の身体として認識するためのシステムの開発および評価を行うことを目的とする.

先行研究において, 生来の身体の身体性の一部を身体ではない物体に転写する方法(ラバーハンド錯覚[2]など)が検討されている. しかし, 生来の身体図式を維持しながら【第三の腕】のような追加の身体部位に身体性を誘発する方法は確立されていない. 身体性の構成要素は Agency (行

為主体感), Ownership (所有感), Location (自己位置感覚)だとされている[3]. 追加型の拡張身体は既存の身体図式に組み込まれておらず, 位置の整合性によって誘発される Location を定義できない. Agency と Ownership を誘発することで, 追加型の拡張身体を自分の身体として認識できるようになるという仮説を立てた. 本論では追加型の拡張身体に Agency と Ownership を誘発することをめざしたシステムを開発する.

拡張身体への身体性誘発効果の確認手段のひとつとして身体幅感覚の変化に着目する. 人間が道具を持ったときに肩幅の知覚が道具まで拡張されるとする知見がある[4]. 提案システムを使用して拡張身体を装着すると身体幅の感覚が拡張身体まで拡張されると予想し, システム使用前後の身体幅感覚の変化を検証する.

2. Agency, Ownership 誘発のためのシステム

図1(b)に提案システムの構成を示す。本システムは Agency 誘発のための筋電制御システム (図1(b)(i)), Ownership 誘発のための力触覚フィードバック (FB) デバイス (図1(b)(ii)) によって構成される。本研究は拡張身体ロボットアーム (実機) を装着して制御および感覚 FB を行うことをめざしている。システム検証の第一段階として【第三の腕】の実機を VR シミュレータに再現したモデル (以下, VR アーム) を用いて実験を行う (図1(b))。【第三の腕】の実機全長は 70 cm である。VR アームは左肩に装着し, 肩に最も近い Yaw 軸を回転軸とする。

2.1 筋電制御システム (Agency 誘発)

操作意図とその結果を同期させることで対象物体に Agency が誘発されることが示唆されている [5]。追加型の拡張身体に Agency を誘発することをめざし, 操作同期を実現する筋電制御システムを設計した。本システムでは, 僧帽筋上部の能動的な収縮による筋電位変動と, VR アームの回転開始タイミングを同期させる。僧帽筋は通常, 意識的に収縮させる頻度が低く, 僧帽筋を収縮させても既存の身体図式の身体性を阻害しにくいと考えた。肩の挙上を意識的に行い, 僧帽筋を能動的に動かすことで, VR アームの操作信号とする。筋電位取得には筋電位センサ MyoWare™ Muscle Sensor (AT-04-001) を使用した。

筋電制御システムの使用手順は次のとおりである。(1) 電極を僧帽筋の 2 か所と手首の 1 か所に設置する。(2) キャリブレーションを行い, 閾値を設定する。(3) 筋電位が閾値以上になると VR アームが回転し始める。

2.2 力触覚 FB デバイス (Ownership 誘発)

身体性の転写対象物体に生じうる感覚と自身へのフィードバックを同期させることで Ownership が誘発されるという知見がある。追加型の拡張身体に Ownership を誘発することをめざし, VR アームの感覚を同期させて実環境で再現する FB ベルトを開発した。FB ベルトは左の上腕の肩付近に巻き付けて使用する。ベルトにはサーボモータ 3 つと振動モータ 4 つが取り付けられている。VR アームの角度を 30° ごとに 1 つのサーボモータに割り当てる。VR アームの方向に応じたサーボモータのホーンを回転させて肩に締め付け力を発生させ, VR アームを支えるモーメントを模した力を提示する。また, VR アームが外部の物体と接触した際に振動モータが一斉に振動し, VR アームの方向に対応するサーボモータがさらに押し込み力を働かせる。各モータは Arduino MEGA により制御した。

3. 検証試験

提案システムを用いて操作同期, FB 同期としたときの Agency, Ownership 誘発可能性および身体幅感覚への影響を検証する試験を行った。12 名の被験者 (男性 11 名, 女性 1 名, 平均年齢 24.3 歳, SD = 3.8) が実験に参加した。

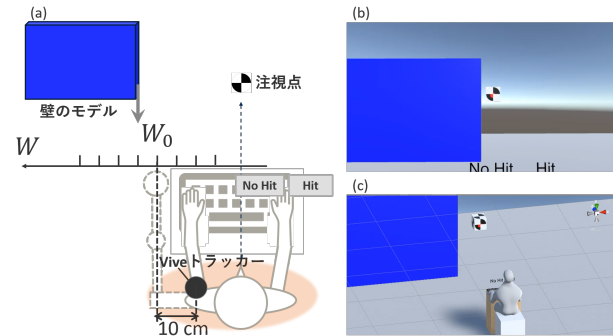


図 2: (a) 身体性検証フェーズにおける座標設定, (b) 被験者への提示映像, (c) VR シミュレータの俯瞰映像

3.1 試験環境と試験条件

試験は図1(b)に示す VR シミュレータ環境で行った。映像提示には頭部搭載型ディスプレイ (HTC VIVE) を用いた。被験者の左肩に VIVE トラッカーを固定し, それに従わせて VR アームを表示した。試験条件は操作同期・FB 同期条件と操作非同期・FB 非同期条件の 2 条件とした。非同期条件では筋電位入力と無関係に VR アームが動き, VR アームの位置および衝突タイミングと無関係に FB が提示された。

3.2 身体性誘発フェーズ

拡張身体に身体性を誘発することをめざし, VR アームの操作と FB の体験を行った。はじめの 3 分間で操作と FB を確認してもらい, 続く 3 分間で VR シミュレータ内の風船を模したオブジェクトをロボットアームを操作して割るタスクを課した。VR アームの表示位置は, 逐次取得される VIVE トラッカーの位置から肩幅方向へ 10 cm 離れた位置とした (図 2(a))。

3.3 身体性検証フェーズ

身体性誘発タスクの直後に拡張身体を外し, そのとき拡張身体に何らかの意識の変容が生じていたとすると, 外した後も拡張身体装着時の身体幅の感覚が残っているのではないかと予想した。拡張身体の見視情報を提示してしまうと視覚によって判断すると考えられるため, VR アームを非表示とした。被験者の前方 2 m から高さ 2 m, 幅 5 m, 奥行き 0.1 m の壁のモデルが速度 1.75 m/s で発射される。壁は被験者の手前 1 m で徐々に透明になる。正面に表示されている注視点を見ながら, 接近してくる壁が自分の身体に当たるか, 当たらないかを回答してもらった。図 2(a) に示すように, 壁の右端の発射位置 W は VR アームを表示した位置 W_0 から 3 cm 間隔で設定し,

$$W = W_0 + \{0.12, 0.09, 0.06, 0.03, 0, -0.03, -0.06, -0.09\} \text{ [m]} \quad (1)$$

の計 8 点とした。

3.4 試験手続き

試験では各試験条件について Pre テストとして身体性検証フェーズを実施した。続けて身体性誘発フェーズを実施し, Post テストとして再び身体性検証フェーズを実行した。

各条件終了後に主観評価を行った。試験条件の実施順はランダムとした。

4. 結果

4.1 主観評価

図3の左に主観評価の結果を示す。質問項目はLongoらの研究[6]を参照し下記のQ1からQ5を設定した。Agencyを尋ねたQ1とQ2, Ownershipを尋ねたQ3, Q4, Q5の項目について、7段階のリッカートスケール(1:全くそう思わなかった~7:完全にそう思った)の平均値を求め主観評価スコアとした。ウィルコクソンの符号順位検定の結果、同期条件は非同期条件と比較してAgencyとOwnershipの主観評価スコアが有意に高くなった($p < 0.01$)。

- Q1 自分が見ているアームを動かすことができた
- Q2 自分が見ているアームをバルーンの位置に動かすことができた
- Q3 ロボットアームが自分の身体の一部のように感じた
- Q4 ロボットアームが自分の身体のように感じた
- Q5 ロボットアームが自分のものであると感じた

4.2 身体幅感覚の評価

衝突判定タスクの結果の解析方法について述べる。各被験者について壁発射位置8点の「当たる」と答えた平均の確率をプロットし、シグモイド関数で近似して心理測定曲線とした。

$$J = \frac{1}{1 + e^{-a(\delta - b)}} \quad (2)$$

ここで、 J は「当たる」と回答した割合を示し、 $J = 0$ は「当たらない」、 $J = 1$ は「当たる」と回答したことを表す。パラメータ a は感度、 b は決定境界、 δ は被験者の肩から壁の発射位置の水平距離を表す。各被験者のPre, Postの衝突判定テストそれぞれについて衝突判定の回答を心理測定曲線で近似した。心理測定曲線上で「当たる」と答えた確率が0.5となる点を衝突判定境界として、Pre, Postの衝突判定テストの衝突判定境界の変化の差をタスク前後の身体幅感覚の変化とした。ただし、被験者の肩に取り付けたトラッカーの位置ずれを補正するため、HMDとトラッカーの距離のPre, Postそれぞれの平均値を計算し、HMDを基準とした座標系に直した。被験者12名のうち、衝突判定境界の変化の差が異常値であった1名の被験者を解析の対象から除いた。図3は同期条件と非同期条件における3分間の衝突判定テストにおける身体幅のずれの $N=11$ の試験結果を示したものである。判定境界のずれの差は、VRアーム側へ平均で2.98 cm ずれていた。ウィルコクソンの符号順位検定の結果、両条件の平均の差は有意傾向であった($p = 0.0674$)。誘発タスク直後の3分間において、同期条件のほうが非同期条件よりもVRアーム使用後の衝突判定境界がVRアーム側に広がる傾向にあったことが示唆された。

5. 考察

主観評価の結果より、操作同期とフィードバック同期によりAgencyとOwnershipが誘発されることが確認された。身体幅感覚の変化については、同期条件と非同期条件の差が有

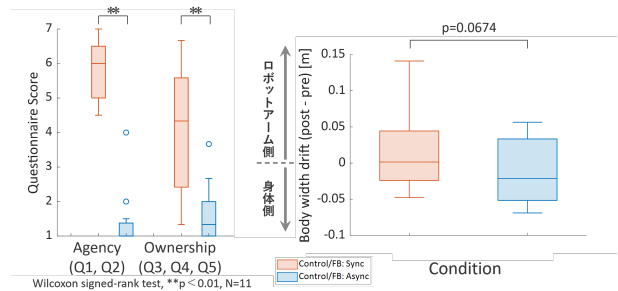


図3: 主観評価の結果(左)と身体幅感覚の変化(右)

意傾向にとどまった。その原因のひとつとして、Ownershipの主観評価のばらつきが大きかったことからフィードバック同期によるOwnership誘発が不十分だった可能性が考えられる。Ownershipをより強く誘発するために次のようなことが考えられる。(1)フィードバックを改善する。(2)フィードバックに対する注意を向ける。(3)装着時間を長くする。(1)について、本実験は検証の第一段階としてVRシミュレータを用いて行った。ロボットアームの重量やモーメントを感じられないことが身体化を阻害している可能性が考えられる。今後、ロボットアームの実機を装着してVRシミュレータと実機を連動させ、腕が振り回されるリアルな感覚をフィードバックすることをめざす。(2)について、本実験の身体性誘発に用いたバルーンタスクでは、視覚情報を頼りにロボットアームを操作すればよく、必ずしもFBに注意を払う必要がなかった。ラバーハンド錯覚の誘発フェーズにおいて、被験者にラバーハンドを注視するよう指示し視触覚刺激を同期して与えることが身体性誘発に有効であるとされている。追加型の拡張身体/body化においても、拡張身体を注視しながら同期した視触覚刺激を受けることが身体性誘発に効果的である可能性が考えられる。(3)について、関連研究として、追加の指ロボットを1日あたり2~6時間、5日間装着すると手の脳内表現が変化する可能性が示されている[7]。追加の腕についても1週間程度連続して装着することで拡張身体の新しい感覚が定着する可能性が考えられる。

最後に本研究の身体性検証フェーズに用いた衝突判定タスクの妥当性について考察する。本テストでは身体幅の肩幅方向への連続的な広がりのみを評価した。ロボットアームを自分の身体と感じていたとき、それを外したあとも感覚が残り、身体幅がロボットアームへ向かって横方向に連続的に拡張すると予想したためである。しかし身体幅が連続的に拡張していなかった可能性も考えられる。身体と外界の物体との直接的な相互作用が行われる身体周辺の空間は身体近傍空間(peripersonal space)とよばれ、手や顔、胴体などの身体部位のモジュールごとに存在することが示唆されている[8]。ロボットアームのエンドエフェクタを強く意識していた被験者は、エンドエフェクタに身体近傍空間が広がっていた可能性が考えられる。連続的ではなく離散的な身体幅感覚の広がりを評価できるタスクを考案する必要がある。

6. むすび

本研究では拡張身体の身体化の定量的指標として身体幅を提案し、衝突判定タスクにより評価を行った。その結果操作同期・FB同期条件において Agency, Ownership が有意に誘発され、身体幅感覚がロボットアーム側へ広がる可能性が示唆された。今後フィードバックと身体性誘発タスクを改善し身体幅感覚がより変化する条件を探っていく。

謝辞 本稿は、科学技術振興機構戦略的創造研究推進事業 ERATO JPMJER1701 および早稲田大学グローバルロボットアカデミア研究機構の支援を受けたものである。実験に協力いただいた早稲田大学 王卓毅氏、半田匠氏に感謝する。

参考文献

- [1] 岩崎悠希子, 渡辺貴文, 岩田浩康, “随意操作が可能な【第三の腕】に関する研究 —第一報:顔面ベクトルによる目標物指示性のVR内における検証—,” 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2016.
- [2] Botvinick, M., Cohen, J., “Rubber hands ‘feel’ touch that eyes see,” *Nature*, vol. 391, pp. 756, 1998.
- [3] Kilteni, K., Groten, R. and Slater, M., “The Sense of Embodiment in Virtual Reality,” *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, vol. 21-4, pp. 373–387, 2012.
- [4] J. B. Wagman and K. R. Taylor, “Perceiving affordances for aperture crossing for the person-plus-object system,” *Ecological Psychology*, vol. 17, no. 2, pp. 105–130, 2005.
- [5] 梅沢昂平, 鈴木悠汰, Gowrishankar Ganesh, 宮脇陽一, “拡張身体部位に対する自己身体所有感の行動指標を用いた評価,” 第11回多感覚研究会, 2019.
- [6] M. R. Longo, F. Schüür, M. P. M. Kammers, M. Tsakiris, and P. Haggard, “What is embodiment? A psychometric approach,” *Cognition*, vol. 107, no. 3, pp. 978–998, 2008.
- [7] P. Kieliba, D. Clode, R. O. Maimon-Mor, and T. R. Makin, “Robotic hand augmentation drives changes in neural body representation,” *Science Robotics*, vol. 6, no. 54, 2021.
- [8] A. Serino et al., “Body part-centered and full body-centered peripersonal space representations,” *Scientific Reports*, vol. 5, 2015.