

遠隔操作ロボットの操作体験による自己身体感と脳活動の変化 Changes in the Sense of Embodiment and Brain Activity caused by Operating a Telepresence Robot

小島 直大[†], 水町 有里奈[†], 肥後 克己[‡], 嶋田 総太郎^{††}
Naohiro Kojima, Yurina Mizumachi, Katuki Higo, Sotaro Shimada

[†] 明治大学大学院理工学研究科, [‡] 明治大学研究・知財戦略機構, ^{††} 明治大学工学部

[†] Graduate School of Science and Technology, Meiji University,

[‡] Organization for the Strategic Coordination of Research and Intellectual Properties, Meiji University,

^{††} School of Science and Technology, Meiji University

ce251033@meiji.ac.jp

概要

テレプレゼンスロボットは新たな遠隔コミュニケーション手段として注目されている。本研究ではその操作訓練体験が身体化感覚に与える影響を fNIRS とアンケートにより検討した。その結果、右腕を挙げる動作映像視聴時の背側運動前野の活動増加および主観評価との正の相関が確認された。テレプレゼンスロボットの操作訓練体験は、操作者にとってロボットを「もうひとつの身体」として捉える感覚の形成に寄与する可能性がある。

キーワード：テレプレゼンスロボット, 身体化感覚, fNIRS, バックプロジェクション

1. 背景

テレプレゼンスロボット[1]は、物理的な場所や時間の制約を越えた新たなコミュニケーション手段として注目されている。例えば、テレプレゼンスロボット「OriHime」は、障害や病気などにより外出が困難な人々に対して遠隔でのカフェでの就業機会を与えるなど、テレプレゼンスロボットの社会的意義を示す代表的な事例となっている[2]。



図1 テレプレゼンスロボット「OriHime」

では、テレプレゼンスロボットによるコミュニケーションにおいて、利用者はロボットに身体化感覚 (sense of embodiment) を感じることができるのだろうか。

身体化感覚とは、利用者が外部の対象 (たとえばロボット) に対して、あたかもそれが自分自身の身体であるかのように感じる主観的な体験であり、身体所有感や運動主体感といった感覚を含む複合的な概念である。これまでの研究では、外部の物体に対して身体化感覚が錯覚的に生じると、その対象に起きた変化が自身の身体にまで影響を及ぼす「バックプロジェクション」という現象が報告されている。例えば、参加者が身体化感覚を感じているラバーハンドの指が突然動かされた場合、運動野の脳活動に伴って参加者の指も動くことがわかっている[3]。バックプロジェクションは、参加者が外部の物体に対して身体化感覚を抱いているときにのみ起こるとされ、単なる他者の動作観察に伴うミラーニューロンシステムの活動とは区別される (より詳細な議論については文献[4]を参照してほしい)。本研究では、テレプレゼンスロボットの動きを観察したときにこの現象が生じるかどうかを検討した。

2. 実験

実験では、テレプレゼンスロボットを用いたカフェサービスの訓練を行った群 (操作群) と、ロボットを操作せずに同様の訓練を行った群 (統制群) を比較した。本研究では、操作群においてのみ身体化感覚が高まり、これに伴ってバックプロジェクションが生じるという仮説を立てた。参加者として、健康な大学生 36 名を操作群 (n=18; 男性 13 名、女性 5 名) と統制群 (n=18; 男性 14 名、女性 4 名) に無作為に割り当てた。実験は 4 日間にわたり実施された。1 日目 (訓練前) および 4 日目 (訓練後) にはロボットが挨拶を交わすように右腕を挙げる動作映像 (図 2) を視聴させ、身体化感覚に関するアンケートと機能的近赤外分光法 (fNIRS) を用いた脳活動計測を実施した。なお、映像はロボットの背側

を見ており、自身の身体部位と一致するように撮影したものを使用した。



図2 右腕を挙げる動作映像

2,3日目には遠隔での操作訓練を行い、実験室には実験者とロボットを、遠隔室には被験者と操作用端末をそれぞれ配置した(図3)。2日目には、ロボットの操作訓練を行った。操作群はロボットの視点から鏡を通して自分自身の身体を確認し、実際に操作をしながら腕や首の動きを練習した。統制群では、事前にロボット視点で鏡を見ながら操作をした画面の録画を使用して、動作の確認を行った。なお、遠隔操作については、挨拶を交わすように右腕を挙げる動作や、拍手をするように両腕を動かす動作などがある。3日目には、カフェでの接客を模した操作訓練を行った。

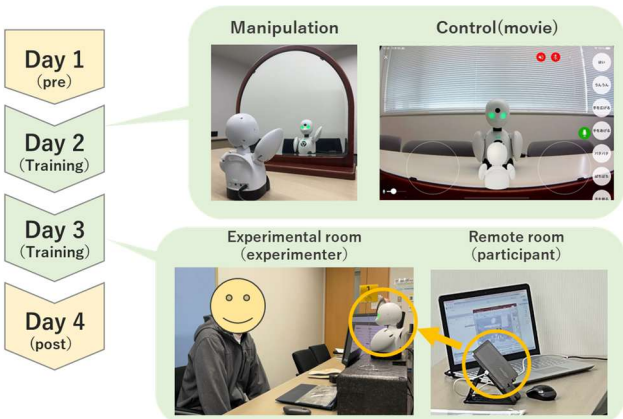


図3 実験の流れと操作訓練の風景

脳活動の評価では、腕の運動に重要であるとされる背側運動前野[5]に着目した。解析には酸素化ヘモグロビン (oxy-Hb) 変化を指標として一般線形モデル (GLM) 解析[6][7]を行い、タスクに関連した脳活動の指標として、条件間の t 値を比較した。

3. 実験結果

fNIRS データについて整列ランク変換[8]を用いた二元配置分散分析(操作要因: 操作群—統制群×時間要因: 1~4日目)を行ったところ、有意な交互作用が認められた ($F(1, 34)=4.74, p=0.036, \eta_p^2=0.12$; 図4)。下位検定として、対応のあるデータに対しては Wilcoxon の符号付き順位検定、対応の無いデータに対しては順位和検定を用いて、各条件間の差を検討した。その結果、操作群ではトレーニング後で脳活動が有意に高くなったことが確認され ($V=39, p=0.043, r=0.34$)、またトレーニング後においては操作群の脳活動が有意に大きいことが認められた ($V=250, p=0.005, r=0.47$)。さらにトレーニング前後におけるアンケートスコアの変化量と脳活動の変化量との間には、正の相関が確認された ($r=0.4, p=0.0043$; 図5)。

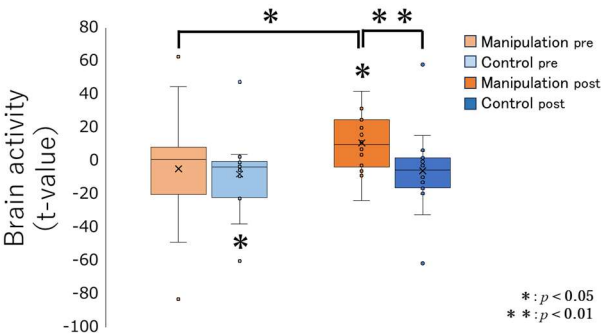


図4 fNIRS データ (背側運動前野) の
二要因分散分析

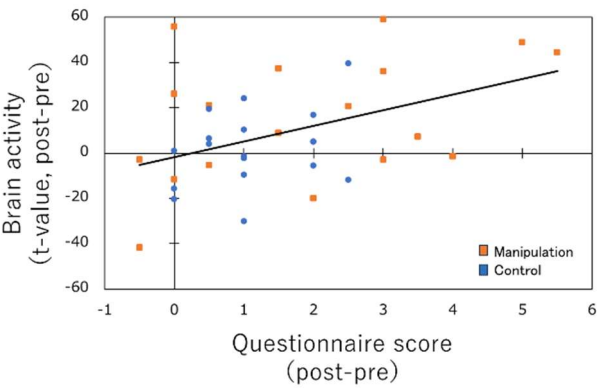


図5 訓練前 (Day1) と訓練後 (Day4) における
身体化感覚のアンケートスコア変化と
背側運動前野の活動変化の相関関係

4. 考察

本研究では、テレプレゼンスロボットの操作訓練体験が身体化感覚に与える影響を、主観的評価と脳活動の両面から検討した。その結果、操作群ではロボットの動作観察時に背側運動前野が有意に活性化し、身体化感覚に関するアンケート評価の変化量とも正の相関が認められた。これは、操作経験を通じてロボットの動作が自己の運動意図と結びつき、ロボットを自らの身体として捉える「身体化感覚」が形成されたことにより、視覚的な刺激が運動系の活動として表出したものと考えられる。本研究の結果は、ラバーハンド錯覚において身体化された手の運動が、被験者自身の手の動きを無意識に誘発する「バックプロジェクション」現象を報告した我々の先行研究[3]とも対応しており、遠隔操作によって形成された身体化感覚が脳活動レベルの反応として現れる可能性を示唆している。また、Farizon ら [9] が示したように、視覚・触覚刺激を通じたロボット観察が身体化感覚を高めるという報告とも一致している。

以上の結果から、テレプレゼンスロボットの操作訓練体験は、操作者にとってロボットを「もうひとつの身体」として捉える身体化感覚の形成に寄与する可能性があると考えられる。この知見は今後の遠隔操作技術やインターフェース設計に対して有用な示唆を提供するものである。

文献

- [1] Tachi, S. (2019). *Forty years of telexistence: From concept to TELESAR VI*. In Y. Kakehi & A. Hiyama (Eds.), *Proceedings of the 2019 International Conference on Artificial Reality and Telexistence / Eurographics Symposium on Virtual Environments* (pp. 1–8).
- [2] OryLab Inc. (2021). *Avatar Robot Café DAWN 2021*. Retrieved December 17, 2024, from <https://dawn2021.orylab.com/en/>
- [3] Shibuya, S., Unenaka, S., Zama, T., Shimada, S., & Ohki, Y. (2018). Spontaneous imitative movements induced by an illusory embodied fake hand. *Neuropsychologia*, *111*, 77–84. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2018.01.023>
- [4] Shimada, S. (2022). Multisensory and sensorimotor integration in the embodied self: Relationship between self-body recognition and the mirror neuron system. *Sensors*, *22*(13), 5059. <https://doi.org/10.3390/s22135059>
- [5] Hoshi, E., & Tanji, J. (2000). Integration of target and body-

part information in the premotor cortex when planning action.

Nature, *408*, 466–470. <https://doi.org/10.1038/35044075>

- [6] Friston, K. J., Frith, C. D., Turner, R., & Frackowiak, R. S. (1995). Characterizing evoked hemodynamics with fMRI. *Neuroimage*, *2*(2), 157–165. <https://doi.org/10.1006/nimg.1995.1018>
- [7] Schroeter, M. L., Bücheler, M. M., Müller, K., Uludağ, K., Obrig, H., Lohmann, G., ... & von Cramon, D. Y. (2004). Towards a standard analysis for functional near-infrared imaging. *NeuroImage*, *21*(1), 283–290. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2003.09.054>
- [8] Wobbrock, J. O., Findlater, L., Gergle, D., & Higgins, J. J. (2011). The Aligned Rank Transform for Nonparametric Factorial Analyses Using Only ANOVA Procedures. *Proceedings of the ACM Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '11)* (pp. 143–146).
- [9] Farizon, D., Dominey, P. F., & Ventre-Dominey, J. (2021). Insights on embodiment induced by visuo-tactile stimulation during robotic telepresence. *Scientific Reports*, *11*, Article 22718. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-02091-8>