



複数身体を介して遅延制御対象に運動主体感を生起させる手法

高田一真¹⁾, 近藤亮太²⁾, 杉本麻樹³⁾

1) 沖縄科学技術大学院大学 (〒 904-0495 沖縄県国頭郡恩納村字谷茶 1919-1, k.takada@oist.jp)

2) 東京大学 (〒 113-8654 東京都文京区本郷 7 丁目 3-1, ryota.kondo@vr.u-tokyo.ac.jp)

3) 慶應義塾大学 (〒 223-8522 神奈川県横浜市港北区日吉 3-14-1, sugimoto@ics.keio.ac.jp)

概要: 自己の身体運動と制御対象の間に遅延が生じると、我々の運動主体感は減衰することが先行研究から明らかになっている。本研究では、遅延のある制御対象に運動主体感を生起させるために、自己身体と遅延の生じる制御対象の間に複数の異なる遅延を与えた身体を配置し、視覚的に運動を伝播させる手法を提案する。本手法を検証するために、バーチャルリアリティ環境下でのリーチング課題を実施し、運動主体感を測定する指標として主観的評定と意図的結合を用いた。結果、本研究の実験条件においては運動の伝播は必ずしも遅延のある制御対象に対する運動主体感を生起させるわけではないことが示唆された。

キーワード: 運動主体感, 遅延, 複数身体

1. はじめに

運動主体感 (Sense of Agency) は、自分の意思によって身体や道具を制御し、環境に変化を起こしたことを知覚する主観的な感覚 [1] である。運動主体感は自己運動だけでなく、その運動を通じて環境にある道具を適切に制御する際に重要な役割を果たしている [2, 3]。一方で、運動主体感は様々な要因によって容易に減衰する感覚でもある。その主要な要因一つが、自己運動と制御対象の間に生じる遅延である [4, 5, 6]。例えば、Ismail らは実験を通じて、自己運動と制御結果に約 590ms の遅延が生じると、運動主体感が減衰することを示唆している [7]。こうした遅延が遠隔地にあるロボットの制御やバーチャルリアリティ (VR) 空間でのアバター操作に生じる場合、それらを自己身体の一部のようにスムーズに操作することは難しい。

本研究では、複数身体を用いた視覚的な運動伝播表現により、遅延が生じる離れた制御対象に対しても運動主体感を生起させる手法を提案する。我々は VR 空間で本手法を実装し、運動主体感の生起を検証する実験を実施した。VR 空間には、参加者の運動がリアルタイムで反映されるアバター (以降、自己アバター)、その運動が 600ms 遅れて反映されるアバター (以降、遅延アバター) が離れた配置にされ、自己アバターと遅延アバターの間に複数のバーチャルアバターが配置されている (図 1)。自己アバターの右隣にあるアバターには動きが 150ms 遅延して反映され、その右隣に配置されたアバターには動きが 300ms、さらにその右側のアバターには動きが 450ms 遅延して反映される。即ち、自己アバターと遅延アバターの間に複数のアバター (以降、補完アバター) は、自己運動が遅延アバターに伝播する様子を視覚的に提供し、自己運動が反映される過程を補完する役割を果たす。我々は、この補完アバターによって、遅延アバターに運動主体感が生起すると仮説を立てた。本



図 1: 補完アバターは自己アバターと遅延アバターの間に配置され、遅延アバターまで運動が伝播する様子を提供する。

稿では、この仮説を検証するための実験を紹介し、その結果について議論する。

2. 実験

我々はまず、予備検討において、体感時間の短縮が観察されたため、実験では意図的結合 (Intentional Binding, 以降、IB) [8] を用いて遅延アバターの運動主体感について検証した。本実験は、慶應義塾大学理工学部生命倫理委員会によって承認されたプロトコルに基づいて実験参加者の同意を得て実施した (倫理審査番号: 2023-088)。

2.1 実験環境

実験は 24 台のモーションキャプチャカメラ (Optitrack PrimeX22: 14 台, Prime 17W: 6 台, Prime13: 4 台) が配置されたスペースで実施された。実験参加者はモーションキャプチャスーツとヘッドマウントディスプレイ (HTC Vive Pro Eye, 以降 HMD) を装着、VR コントローラを把持し、Unity によって実装された VR 空間内で実験課題に取り組んだ。参加者の全身運動は、スーツとカメラを通



図 2: 参加者が取り組むリーチング課題。遅延アバターの右側に出現するターゲットに、なるべく素早く到達する。

じて VR 空間内のアバターにリアルタイムで反映され、同空間に配置された鏡で視認できた。

2.2 実験参加者

実験の目的を知らない 34 名（男性 23 人、女性 11 人、20–40 歳、平均年齢 25.56 歳、左利き 2 人）が参加した。参加者は実験課題に取り組むにあたって正常な視力、また運動能力を有していた。参加者は実験を受ける前に実験担当者から実験手順・リスクについて十分な説明を受け、実験参加にあたっての同意書に署名した。署名後、モーションキャプチャスーツと HMD を装着し、実験課題に取り組んだ。

2.3 実験デザイン

我々の仮説、補完アバターによって遅延アバターに運動主体感が生起することを検証するために、VR 空間内でのリーチング課題を設計した。課題では、赤いターゲットが遅延アバターの右側に出現し、遅延アバターの右腕でターゲットになるべく素早く到達することが求められた（図 2）。提示されるターゲットの位置は 3 箇所あり、各試行で提示される位置はランダムに選ばれた。

補完アバターによる運動主体感の伝播を調査するために、実験では補完アバターあり条件と補完アバターなしの 2 条件を設けた。補完アバターありの条件では、参加者の自己アバターと遅延アバター（600ms 遅延）の間に 3 体の補完アバターが配置された（図 2 下）。それぞれの補完アバターには 150ms 間隔で遅延して参加者の運動が伝播した。補完アバターのない条件では、自己アバターと遅延アバターの間には何も配置されなかった（図 2 上）。

参加者は各試行においてターゲットに到達した後、「ターゲットに到達する運動が自分の運動のように感じた」という質問に対して -3（全く同意しない）から +3（強く同意する）の 7 段階で評価した。この評価の後、参加者はターゲット

に到達するまでにかかった時間を、把持するコントローラのボタンを押す長さで報告した。IB は、参加者がターゲットに到達するまでに要した実際の経過時間から、参加者がボタン押しで報告した主観的な体感時間を引いて算出したエラー値で分析する。もし、補完アバターによって遅延アバターに運動主体感が生起するならば、運動主体感は補完アバターありの条件で評価が高くなり、エラー値はより大きな正の値を示すはずである。

2.4 実験手順

実験は練習ブロックと本番ブロックの 2 ブロックで構成された。

2.4.1 練習ブロック

練習ブロックでは、実験参加者が VR 空間内での運動と課題の答え方に順応するために、自己アバターでリーチング課題を行うことが求められた。練習ブロックでは遅延アバターや補完アバターは表示されず、自己アバターの右側にターゲットが出現した。参加者はリーチング課題に 3 試行（ターゲットの位置: 3 種）取り組み、7 段階で運動主体感を報告した後、ターゲットに到達するまでの時間を報告した。

2.4.2 本番ブロック

本番ブロックでは、補完アバターの有無を条件として、遅延アバターの右側に出現するターゲットに右手で到達するように求められた。参加者一人あたり、30 試行（ターゲットの位置: 3 種 x 10 試行）x 2 ブロック（補完アバターあり・なしをカウンターバランス順）のリーチング課題に取り組み、各試行で運動主体感と体感時間を報告した。また、各条件の全試行が終了した後、実験参加者へ短いインタビューを実施した。

2.5 結果

運動主体感の評価と体感時間のエラー値の分布を図 3 に示す。運動主体感の評価には、ウィルコクソン符号順位検定を実施した。結果、補完アバターの有無で遅延アバターに対する運動主体感に有意差は観察されなかった ($z = .843$, $p = .405$, $r = .173$)。体感時間のエラー値には、対応のある t 検定を用いて分析を実施した。結果、補完アバターの有無で体感時間のエラー値に有意差は観察されなかった ($t(33) = -0.798$, $p = .430$, $d = -0.137$)。

2.5.1 運動主体感と IB の相関

運動主体感と IB、すなわち体感時間と経過時間のエラー値の相関関係を図 4 に示す。結果、補完アバターありの条件では従属変数の分散はほとんど説明されず ($R^2 = .002$)、効果量は非常に小さかった ($f = .047$)。また、補完アバターなしの条件においても従属変数の分散はほとんど説明されず ($R^2 = .029$)、効果量は非常に小さかった ($f = .171$)。これは、両条件においても運動主体感と経過時間のエラー値に相関関係がないことを示している。

2.5.2 インタビュー

ここでは、各条件の全試行後に実施したインタビューで得られたコメントの内、いくつかを紹介する。補完アバター

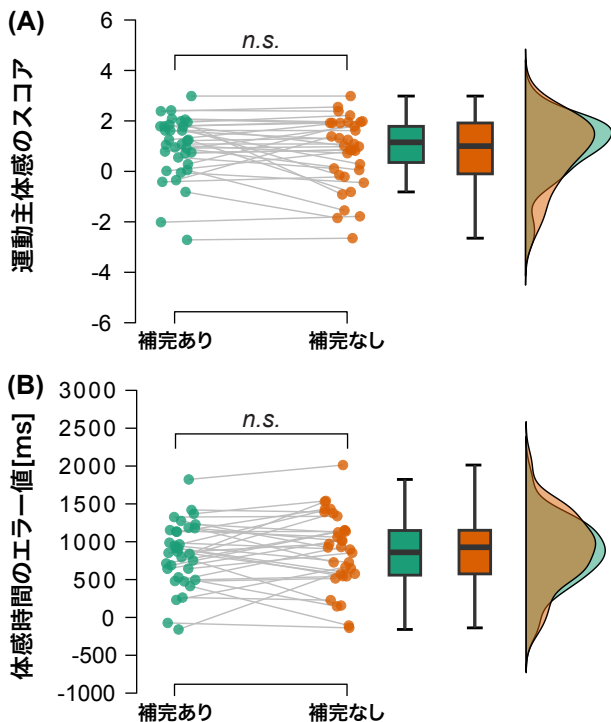


図 3: (A) 運動主体感の主観評定の分散, (B) 経過時間と体感時間から算出されたエラー値の分散.

ありの条件では、「動きが運動していてターゲットが取りやすかった (P5)」、「間のアバターが多かったので入ってくる情報が多く、ターゲットに触れるのが困難だった (P27)」、「ターゲットに触れることを失敗したときの軌道修正がしやすく、運動の予測がしやすかった。(P7)」、「触れる前からターゲットに触れることが予想できた。(P32)」といった意見が得られた。補完アバターなしの条件では、「ターゲットまでの距離感が分かりづらかった (P22)」、「右側のアバターが別の人のように感じ、体感時間を長く感じた (P33)」、「違和感なくターゲットに触れた (P18)」、「こちらのほうが奥行きがわかりやすかった。こちらのほうが自分がやってる感が低かった。(P17)」といった意見が得られた。

3. 考察

本研究では、複数の補完アバターが遅延アバターに対する運動主体感の生起に与える影響を調査した。実験の結果、補完アバターの有無は運動主体感の生起に影響を与えないことが示唆された。この主な要因として、補完アバターへの注意の分散が考えられる。

インタビュー結果から、補完アバターの存在により情報量が増加し、補完アバターに注意が引き寄せられ遅延アバターとターゲットの位置関係把握が困難になることが明らかになった。先行研究では、運動主体感を持つ対象に注意が引き寄せられることが示されている [2, 3]。このことから、運動主体感が遅延アバターだけでなく補完アバターそれぞれに分散し、補完アバターへの運動主体感が持続したために、遅延アバターに対する運動主体感が低下した可能性がある。補完アバターなしの条件では注意が分散しないため、

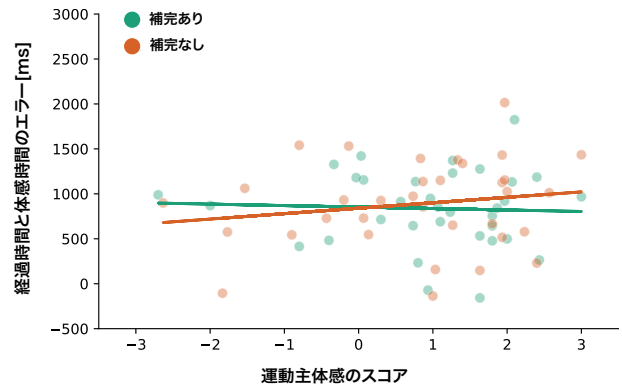


図 4: 運動主体感の強さと IB 効果の分布と回帰直線。

参加者の運動主体感がある程度生じたと考えられる。さらにインタビューから、両条件において一度の運動でターゲットに到達することが困難である参加者が見受けられたことから、到達の成否も運動主体感に寄与している可能性が高い。

IB の参加者間での分散も、補完アバターによる情報量の増加と視覚的注意の分散が要因と考えられる。先行研究では、入力と結果の時間差が大きいほど IB は強くなるが運動主体感は減衰することが示唆されている [9]。本実験でも同様の傾向が見られたが、逆の傾向を示す参加者も観察された。これは、参加者の注意の向け方によって変化する可能性が高い。また、視覚的情報量の多さ、すなわち高い認知負荷が体感時間の短縮につながる [10] ことから、補完アバターの有無によって IB の生起メカニズムが異なる可能性がある。補完アバターありの条件では視覚的情報量、なしの条件では参加者が感じる遅延の大きさが IB に影響を与えたと考えられる。

4. 結論

本研究では、複数の補完アバターによる運動の伝播を介して遅延アバターに運動主体感を生起させる手法を開発し、その有用性を実験を通じて検証した。結果、遅延アバターのみの条件と比較して補完アバターは必ずしも有意差のある運動主体感を生起させるだけでなく、注意の分散を引き起こす可能性があること、また補完アバターの有無で IB の生起メカニズムが異なることが示唆された。今後は、それぞれの補完アバターに対する運動主体感やその持続時間、また視覚的注意の傾向などを実験を通じて明らかにしたい。また、補完アバターによる運動伝播に加減速や透明化といった表現を導入することで注意の分散を抑制し、運動主体感を遅延アバターに帰属させることが必要である。本手法と実験を通じた知見は、遅延が生じる制御対象のためのインタフェース設計や、複数身体を用いたインタラクションの新たな設計指針に寄与することが期待される。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 JP22K17938 の助成を受けた。

参考文献

- [1] Gallagher, I., I. 2000. “Philosophical Conceptions of the Self: Implications for Cognitive Science.” *Trends in Cognitive Sciences* 4 (1): 14–21.
- [2] 温 文, 浜田 裕幸, 鈴石 陽介, Acer Chang, 運動主体感は人間にとって何を意味するのか?, *基礎心理学研究*, 2023, 42 卷, 1 号, p.53-64,
- [3] Wen, Wen, and Hiroshi Imamizu. 2022. “The Sense of Agency in Perception, Behaviour and Human-machine Interactions.” *Nature Reviews Psychology* 1 (4): 211–22.
- [4] Farrer, C., G. Valentin, and J. M. Hupé. 2013. “The Time Windows of the Sense of Agency.” *Consciousness and Cognition* 22 (4): 1431–41.
- [5] Wen, Wen. 2019. “Does Delay in Feedback Diminish Sense of Agency? A Review.” *Consciousness and Cognition* 73 (August): 102759.
- [6] Rohde, Marieke, and Marc O. Ernst. 2016. “Time, Agency, and Sensory Feedback Delays during Action.” *Current Opinion in Behavioral Sciences* 8 (April): 193–99.
- [7] Ismail, Mohamad Arif Fahmi, and Sotaro Shimada. 2016. “‘Robot’ Hand Illusion under Delayed Visual Feedback: Relationship between the Senses of Ownership and Agency.” *PloS One* 11 (7): e0159619.
- [8] Moore, James W., and Sukhvinder S. Obhi. 2012. “Intentional Binding and the Sense of Agency: A Review.” *Consciousness and Cognition* 21 (1): 546–61.
- [9] Wen, Wen, Atsushi Yamashita, and Hajime Asama. 2015. “The Influence of Action-Outcome Delay and Arousal on Sense of Agency and the Intentional Binding Effect.” *Consciousness and Cognition* 36 (November): 87–95.
- [10] Ichikawa, Makoto, and Masataka Miyoshi. 2020. “Perceived Duration Depends upon Target Detection in Rapid Serial Visual Presentation Sequence.” *I-Perception* 11 (6): 2041669520981996.