



バーチャル空間の自然な動作の丁寧さと 自己身体可視性との関係

Relationship between the carefulness of usual motion and self-body visibility in VR

湯村颯悟¹⁾, 尾上凌太¹⁾, 蒲池みゆき²⁾

Sogo YUMURA, Ryota ONOE, and Miyuki G. KAMACHI

- 1) 工学院大学大学院 工学研究科 (〒192-0015 東京都八王子市中野町 2665-1, em22026@ns.kogakuin.ac.jp)
2) 工学院大学 情報学部 (〒163-8677 東京都新宿区西新宿 1-24-2, miyuki@cc.kogakuin.ac.jp)

概要: 自然な動作を VR でも現実と同様に行うために、「自分の身体」を視覚的にリアルに再現する必要性についてはいまだ十分な議論がなされていない。本研究は、一人称 VR 体験において自分の身体の見えやすさに着目し、全身が見える場合と完全に見えない場合で、普段何気なく行っているモノを掴んで動かす動作の「丁寧さ」を調査した。丁寧さは、動かした後のモノの位置が指定された位置からどれだけ離れているかという動作の正確性を定量的に解析し評価した。身体が可視状態の時に動作がより正確になっていることが実験により明らかになり、丁寧な動作における自己身体の見えやすさの重要性が示唆された。

キーワード: 自己身体の見えやすさ, 身体可視性, 動作変化

1. はじめに

近年、VR は現実で見慣れた自己の身体とは形状やテクスチャの異なる身体を一人称視点で体験し、現実の身体から解放され「なりたい自分」になることができるツールとして注目されている。好みのアバタを新しい自分の身体だと認識できる身体表現の自由度の高さを用いて、アバタの属性の差異による精神的な態度変化の研究が進んでいる。例えば、性別の異なる身体を自己身体と認識した場合、自己の本来の性別に対して疑問を抱くことが示されている[1]。さらに、アバタの肌色を変化させた場合に、人種に対する偏見を軽減させることが報告されている[2]。また、身体を透明にして全身を不可視にすることで同様に精神的な態度の変化が見られる。全身を透明化すると大衆の目の前に晒された時のストレスを緩和することができる[3]。このように、VR 空間上の自己身体認識は現実社会の自己の位置付けに関して再認識をもたらすほど重要であると言える。

異なる自己身体の見えやすさを通じて現実社会の自己を認知的に拡張することが可能である一方で、精神的な態度が変化することによって現実と同様の体験ができなくなってしまう可能性は否めない。例えば、アバタによって変化した態度が起因し、VR 空間内外の行動や動作に無意識に影響を及ぼすリスクが挙げられる。VR と現実の動作知覚のズレは意図しない動作を誘発しやすくなる危険性がある。

つまり態度変化の要因となる「身体の見えやすさ」は、VR 空間における動作の現実味を補完する重要な要素の一つとなり得ることが推測できる。しかしながら、現実と同様の体験を VR に再現するにあたり、一人称視点で視認できる「自分の身体」を視覚的にどれだけリアルに再現する必要があるかということに関しては未だ十分に議論が進んでいない。身体の見えやすさの再現ではなく、可視性に着目すると、現実の動作を伴い VR 空間で平均台渡りをする際、全身が見える場合は見えない場合と比べ課題遂行時間が短くなり平均台を渡る歩数が減少した[4]。また、モノを掴み移動させるといった日常的な動作では、全身が見える場合、見えない場合に比べ課題遂行に時間がかかることが示され、全身の見えやすさが動作の「丁寧さ」を引き起こす要因である可能性を示唆した[5]。この先行研究[5]の実験は、動作の客観的な評価を課題遂行時間や加速度変化に着目し時間データを軸に解析していたが、より動作の正確性を測るための空間的な解析には至っていなかった。

そこで本研究では、一人称視点で視認する身体の見えやすさが、普段何気なく行っている動作の丁寧さに影響を与えるか空間データを元に調査する。具体的には、身体の見えやすさを全身が見える場合と見えない場合に変化させ、一見すると全身の見えやすさが影響しないと想定されるモノを掴んで動かすという自然かつ単純な動作の正確性に影響を及ぼすか実験的に明らかにする。動作の丁寧さを調査するにあ

たり、動かした後のモノの位置が指定した位置からどれだけ距離的に離れているかに着目し、その正確性を丁寧さが表れる評価尺度として客観的に解析する。また、運動実験をするにあたり身体の見えに合わせた把持対象となるモノの見えと、掴んだモノを置く位置となるターゲットの見えに関しても見える場合と見えない場合で可視性を操作した。これにより、身体の見え以外の要因による動作の正確性への影響を考慮した総合的な解析につなげ、真に身体の見えによる丁寧さへの影響を調査可能となる。もし身体の見え変化が動作の正確性に影響を与えるのであれば、掴んで動かしたモノの最終位置とターゲットの中心との距離が身体の見えによって変化し、全身が見える時とそうでない時で距離の差がみられると仮説を立てた。

2. 自己身体可視性の変化を伴った運動実験

実験では、バーチャル空間の自己身体となるアバタの可視性を全身が見えるか見えないかの2段階に分け、バーチャル空間内で「トラックを掴み指定の位置（ゴール）に動かす」という単純な課題を行い、その際の最終的なトラック位置を解析データとして動作の正確性を明らかにする。

実験にあたり、身体の見え変化だけでなく課題遂行時の把持対象となるトラックの見えをなくす条件と、掴んだトラックを置くために指定したゴールの見えをなくす条件およびその両方を見えをなくす条件を設定した。トラックおよびゴールの見えをなくすことにより、正確な動作の手がかりとなりうる視覚的な要素を組み合わせた総合的な解析を計画した。

2.1 実験協力者

実験協力者は健常な視力を有し、運動機能に以上がない平均22.0 ($SD = 1.49$) 歳の男性10名が実験に参加した。実験協力者の平均身長は171cm ($SD = 6.23$)であった。なお、実験協力者にはあらかじめ同意書および教示文にて実験内容の説明を行ない、「工学院大学ヒトを対象とする研究に関する倫理審査委員会」による審査により承認を得た。

2.2 実験環境

現実空間に高さ110cm、机面長辺62cm、短辺43cmで構成される机を配置し、机上には台座(長辺9cm×短辺6cm)を机面の右短辺から2cm離れた位置に設置した。そして台座の上に把持対象となるトラック(HTC社 VIVE Tracker 3.0)を初期位置として配置し、以上の現実環境をVR空間に時間的・空間的に再現した。VR空間の机上には青いリング(内輪直径12cm)を中心が左短辺から14cm離れた位置に配置した。VR空間の視覚呈示にはHMD(HTC社 VIVE Pro 2)を使用した。現実の運動情報のトラッキングに関しては頭部をHMD、両肘、腰、両足を5つのトラックでトラッキングするフルトラッキングシステムを採用した。両手に関してはモーションキャプチャコントローラ(UltraLeap社 Leap Motion Controller)をHMDのフロントカメラの位置に搭載しトラッキングした。以上の運動情報をVR空間の自己身体(アバタ)へ適用する際は各種プ

ラグイン(Valve Corporation社 SteamVR Unity Plugin, DMM社 DMM VR Connect β: DVRSDK, UltraLeap社 UltraLeap Plugin for Unity)を組み合わせ実装した。

2.3 刺激

視覚刺激として、実験中の自己身体(アバタ)を3Dモデル生成ソフトウェア(MeshCapade社 Meshcapade Me)により生成した。生成時には身体情報を使用し、具体的には身長・体重・胸囲・腹囲・臀部の周囲長・股下の高さ・肩の長さ・上腕の長さ・前腕の長さ・首の太さ・太腿の周囲長・足首の太さ・腕の太さを必要とした。手指運動のトラッキングを正確にアバタに適用するため、生成したアバタの両手部を透明化し、ハンドモデル(UltraLeap社 LowPolyHands)を接合した。

2.4 手続き

実験は初めに実験準備、そのあとで運動実験を行った。

実験準備では、まず3Dモデル生成ソフトウェアを用いたアバタの生成に必要な実験協力者の身体情報を得るため、テーラージェャーで実験協力者の身長と体重以外の身体部位を測定した。身長と体重に関しては実験協力者から口頭で実験者に伝えた。次に、実験協力者は頭部にHMD、両肘、腰、両足の5点にトラックを装着し、実験環境の映像を視覚呈示された。実験協力者は、3Dモデル生成ソフトウェアで生成された3DモデルをアバタとしてVR空間上で操作した。生成される3Dモデルが自身の現実の身体形状を再現したアバタであることを認識した上で、そのアバタに十分に慣れるまでVR空間上で自由に操作を続けた。アバタに慣れた後、課題遂行の手順を間違えないよう練習試行を複数回行った。

運動実験では、まず実験協力者が自身の身体の見え方をHMDから一人称視点で確認し、現実の動作に合わせてアバタが動いていることを確認した。確認した自己身体に慣れるまでその場で自由に身体を動かし、慣れたタイミングで、実験環境の机のそばまで移動した。次に机上右手前はしに配置された白い正方形のエリアに右手の中指の先端をかざし正方形の色を赤色に変えた状態を保ち待機した(図1の①)。手をかざす際は机面から手を浮かせた状態でかざした。この状態を試行開始の初期状態とした。実験者のスタートの合図で実験協力者は机面右側に配置されたトラックを停留や逆行をしないように、自然かつスムー

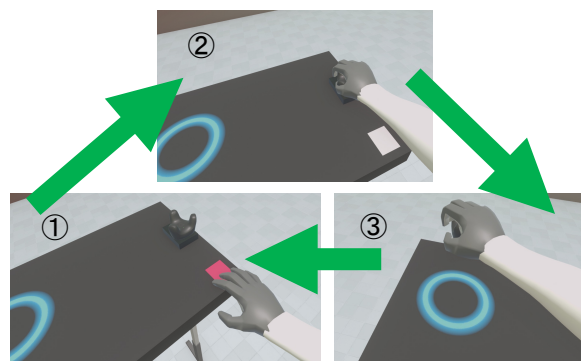


図1: 運動実験時の課題遂行手続き

ズに掴んだ(図1の②)。その後、掴んだトラックを机面左側に設置されているゴール(青いリング)の内側に置いた(図1の③)。掴んだトラックをゴールに置く際も、停留や逆行をすることなく、自然かつスムーズに置きに向かった。トラックをゴールに置いた後は再び手を白い正方形にかざす初期状態に戻り、正方形が赤色に変化した状態を保ち待機した。実験参加者は一度ゴールにおいたトラック(ゴールに置いたタイミングでVR空間から消失したトラック)が再び机右側の位置に見えたらトラックを掴んだ。以上、初期状態からスタートし、トラックを掴みゴールにおいた後、再度初期状態に戻ることを連続で15回繰り返して行った。実験協力者は1セッション15試行の繰り返いを6セッション行い、協力者一人当たり合計で90試行、課題に取り組んだ。各セッションの初めには必ず自己身体の状態を確認する時間を設定し、協力者がVR空間の操作に慣れた後にセッションを開始した。

運動実験の条件は全身が見えるALL条件と全身が見えないNONE条件の2条件とした(図2)。また、試行開始時(初期状態からトラックを掴みにいく瞬間)にトラックが消失するTracker-off条件、ゴールが消失するGoal-off条件、トラックとゴールの両方が消失するBoth-off条件の3条件を加えた(図3)。以上の身体の見えやすさに関する条件と課題遂行時のオブジェクトの見えやすさに関する条件を組み合わせた6条件全てを実験協力者に行ってもらった被験者内実験を実施した。条件間の順序効果は身体の見えやすさ2条件に関してカウンターバランスをとり、オブジェクトの見えやすさに関する条件に関しては完全ランダム化した。

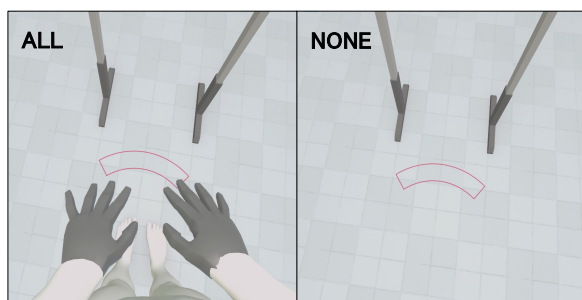


図 2: 身体可視性の条件

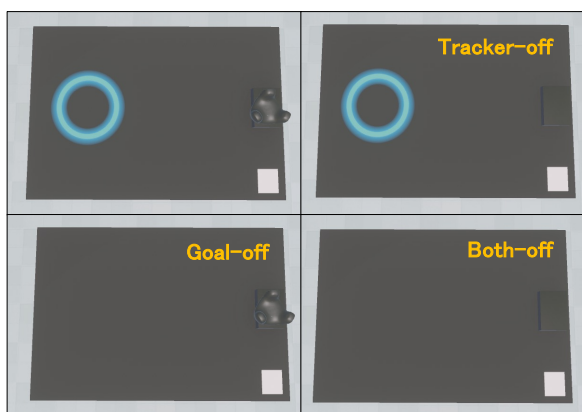


図 3: VR空間におけるトラック等の配置およびオブジェクト可視性の条件

2.5 結果

掴んだトラックをゴールに置き終えた際に得られるVR空間上のトラックの空間座標を解析対象のトラック位置とした。机面に平行な左右方向をx軸、前後方向をz軸、机面に垂直な上下方向をy軸と設定した。課題後の机面上の位置に主眼をおいているため、トラックのy軸座標は解析の対象から除外した。また、課題の手順を間違え、ゴールにトラックを置いた後、台座にトラックが戻る(台座の上でトラックがリポップする)前にトラックを掴みに行った場合を解析データから除いた。そして掴んだトラックをゴールに置く際にトラックのトラッキングが正常に行われず、トラックを動かしている最中にゴールに置いた判定になった場合も解析データから省いた。

実験協力者ごとの各条件におけるトラック最終位置とゴールの中心との平均距離を算出した。条件は身体可視性(ALL条件, NONE条件)とオブジェクト可視性(Tracker-off条件, Goal-off条件, Both-off条件)を組み合わせた6条件とした。

6条件ごとのトラックの最終位置とゴール中心との平均距離を図4-aに示し、身体可視性および、オブジェクト可視性でまとめた平均距離を図4-bと図4-cにそれぞれ示す。身体の見えやすさとオブジェクトの見えやすさにおける水準間の平均距離の差と交互作用の有無を見るため、身体(2)とオブジェクトの見えやすさ(3)に関して2要因分散分析を行った。結果として、身体の見えやすさによりトラックとゴールの平均距離に有意な主効果($F(1,9) = 7.784, p = .021$)がみられた。これにより、身体が見えない場合よりも見える場合の時にトラックとゴールとの距離が近くなるのがわかり、身体が見えやすさされている際の動作の正確性が高いことが示された。さらに、オブジェクトの見えやすさにおいても平均距離に有意な主効果($F(1.255, 11.296) = 8.986, p = .009$)がみられた。オブジェクトの見えやすさにおいてBonferroni法による多重比較を行ったところ、Tracker-offとGoal-off($p = .036$)、Tracker-offとBoth-off($p = .042$)の間に有意な差がみられ、トラックの見えやすさが消える場合よりもゴールが見えやすさする場合に、トラックとゴールとの距離が離れていることが明らかになった。このことから、正確にモノを置く際のゴールは視覚的な手がかりとして重要であることが示された。一方で、身体の見えやすさとオブジェクトの見えやすさの交互作用はみられなかった($F(2, 18) = .245, p = .785$)。

2.6 考察

運動実験の結果から、全身の見えやすさ不可見がモノを掴んで動かすという自然な動作の正確性に影響を与えることが示された。これは自己身体の見えやすさによる態度の変化と、視覚的な手先の見えやすさが空間知覚の手がかりとして働いたことによる影響であると考えられる。運動実験のセッションの初めには必ず、実験協力者が自身のVR空間内での身体を確認し、全身が見えやすさしているか完全に見えやすさしていないかを十分に認識した上で課題を遂行した。また、運動実験におけるオブジェクトの見えやすさの3条件はゴールが見えやすさする場合

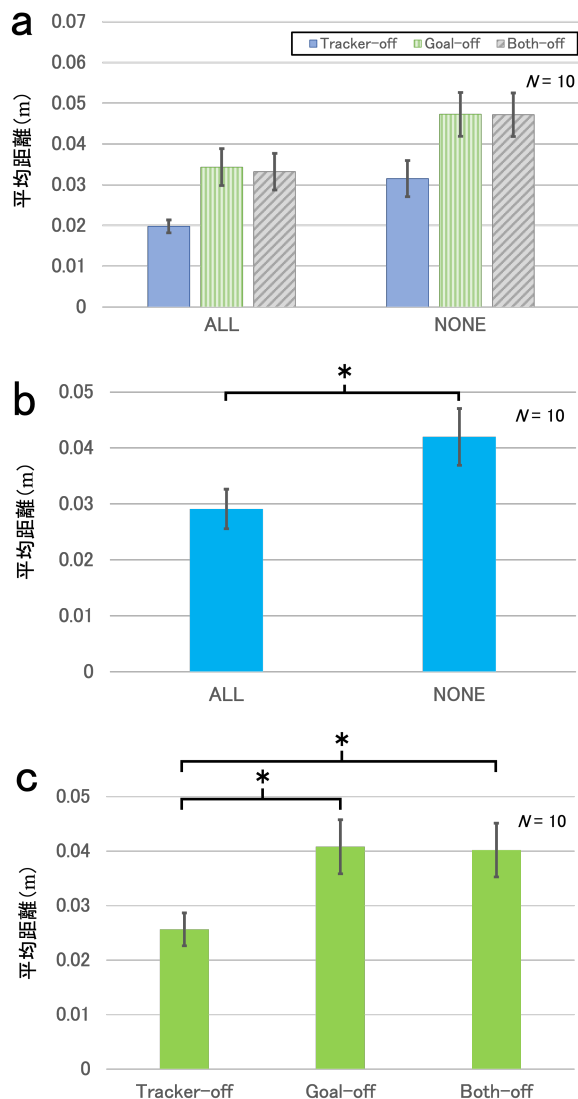


図 4: トラックの最終位置とゴール中心との平均距離
(a:全条件における平均距離, b:身体可視性ごとの平均距離, c:オブジェクト可視性ごとの平均距離)
(* $p < .05$, 誤差線は標準誤差)

があるとしても毎回の試行でゴールの位置が変わらないよう設定した。そのため、一度掴んだトラックを毎回決まった方向の決まった位置に置く課題となっていた。つまり動作方向とゴール位置が決まっているため、全身の見えに関係なく一定の動作で課題遂行が可能であった。しかしながら、身体が見えない場合はトラックを掴みにいく際、上手く掴むことに集中し、一度掴んでからはゴールに正確に置くための意識が薄れたこと（正確に置こうという態度の欠落）が動作の正確性の差に影響したと考えられる。また、掴んだトラックを動かしている最中とゴールにトラックを置く際、VR空間における自身の手や腕の見えがゴールの見えない時のゴール位置の推定手がかりになったことも予想される。

また、実験結果から、オブジェクト可視性において、トラックが消えた場合の平均距離は他の2条件に比べ短く、

最も正確に動作ができていることも明らかになった。これは、ゴールの中心にトラックを正確に置く際の視覚的な手がかりとしてゴールの見えが重要であることを示唆している。一方で、ゴールが消える条件とトラックとゴールが両方消える条件との間で差が見られなかったことから、トラックの見えは動作の正確性に影響を及ぼさなかった。身体可視状態の手や腕が正確性の手がかりになる可能性をふまえると、トラックも十分視覚的な手がかりとなりうるはずであるため、トラックと自己身体の見えに関する詳細な調査が今後の展望として考えられる。

3. まとめ

本研究は、身体の見えがトラックを掴んでゴールまで動かし置くという単純で自然な動作の丁寧さに影響を及ぼすかを調査した。丁寧さの評価のため、トラックとゴールの中心との距離を動作の正確性と定義し、VR空間で運動実験を実施した。実験の結果、身体の見えが動作の正確性を高めた。また、ゴールの見えが正確な動作を行う上で視覚的な手がかりとなることが確認できたが、トラックの見えが視覚的な手がかりとなりえなかった結果に関して自己身体の見えとあわせて詳細な調査を続けるべきだと考察した。

謝辞 本研究はJSPS研究費（課題番号20H00608）の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] Pawel Tacikowski, Jens Fust, H.Henrik Ehrsson: Fluidity of gender identity induced by illusory body-sex change; Scientific Reports, Vol.10, Article No.14385, pp.1-14 (2020).
- [2] Domna Banakou, Parasuram D. Hanumanthu, Mel Slater: Virtual embodiment of white people in a black virtual body leads to a sustained reduction in their implicit racial bias; Frontiers in Human Neuroscience, Vol.10, Article No.601, pp.1-12 (2016).
- [3] Arvid Guterstam, Zakaryah Abdulkarim, H. Henrik Ehrsson: Illusory ownership of an invisible body reduces autonomic and subjective social anxiety responses; Scientific Reports, Vol.5, Article No.9831, pp.1-8 (2015).
- [4] Stefan Pastel, Chien-Hsi Chen, Katharina Petri, Kerstin Witte: Effects of body visualization on performance in head-mounted display virtual reality; PLoS ONE, Vol.15, No.9, pp.1-18 (2020).
- [5] 湯村 颯悟, 蒲池みゆき: 自己身体の見えがVR空間内の運動パフォーマンスに及ぼす影響; 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.27, No.4, pp.291-300 (2022).