



VRChat 上での実験空間構築と身体化感覚の計測

近藤亮太¹⁾, 櫻田国治^{1,2)}, 小柳陽光¹⁾, 谷川智洋¹⁾, 廣瀬通孝¹⁾

1) 東京大学 (〒 113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1, ryota.kondo, oyanagi@vr.u-tokyo.ac.jp,

kuniharu.sakurada@star.rcast.u-tokyo.ac.jp, tani, Hirose@cyber.t.u-tokyo.ac.jp)

2) 慶應義塾大学 (〒 223-0061 神奈川県横浜市港北区日吉 3 丁目 1 4 - 1, kuniharu.sakurada@keio.jp)

概要: アバタがユーザの運動に同期して動くことで身体化感覚が生起する。しかし、実験室実験では 5 分程度のアバタ学習にとどまっておき、長期間学習した際の身体化感覚は明らかとなっていない。本研究では、VRChat 上に実験空間を構築し、既にアバタを長期間使用している VRChat ユーザの身体化感覚を計測することで、長期的なアバタ使用が身体化感覚に及ぼす効果を調べた。

キーワード: 身体化感覚, アバタ, メタバース

1. はじめに

メタバースでは、アバタを通してなりたい自分になることができる。これを実現する上で重要なのが、アバタに自分がなったという感覚(身体化感覚)である。例えば、ユーザがメタバース内のアバタを操作するとき、アバタが自身の身体であるかのような感覚(身体所有感)、アバタの動作が自分自身のものであるかのような感覚(行為主体感)、そして自分がアバタの位置にいるような感覚(自己位置感覚)が生起する。これらの 3 つの感覚は、アバタの身体化感覚の重要な要素だと述べられている [1]。これらの中でも身体所有感は、わずか 5 秒の同期運動や静止観察で誘発されることが知られている [2, 3]。そのため、実験室での身体学習は最大でも 5 分程度に限られている。しかし、先行研究におけるアバタへの身体化感覚は、アバタがあたかも自分のようであるという「錯覚」にすぎず、実際には自分が本当にアバタになったとは感じていない。一方で、メタバース内でアバタを何千時間も使用しているユーザは、アバタ学習を何千時間も行ってきたとみなすことができる。その結果、これまでよりも強い身体錯覚や、身体錯覚のレベルを超えてアバタを本当に自分の身体と感じている可能性がある。本研究では、メタバースユーザの身体化感覚に着目し、それを制御及び計測する空間を構築した。そして、実際にメタバースユーザを呼び、長期的なアバタ使用が身体化感覚に与える影響を調べた。

2. 方法

2.1 開発環境

メタバース上で身体化感覚を操作する実験を行うために、VRChat をプラットフォームとして採用した。実験用のメタバース空間は、VRChat 内のワールドとしてアップロードした。このワールドの開発には、Unity 2022.3.22f1 および VRChat SDK 3.7.0 を使用した。身体化感覚を操作する機能は、VRChat SDK のプログラミング言語である Udon スクリプトを用いて実装した。ユーザのアバタに直接干渉

することは困難であったため、ユーザのアバタに同期して動くパペットモデルをワールド内に実装し、パペットの動きや位置を変更することで身体化感覚を操作した。パペットは Final IK¹ プラグインを用いた逆運動学 (IK) によって操作した。

2.2 身体化感覚の操作

メタバースにおいて、身体化感覚の 3 つの要素を操作する方法を実装することで、身体化感覚を調べる実験が可能となる。身体所有感及び行為主体感はユーザの身体とアバタ間の運動の同期性が重要であり、身体所有感は 290 ms、行為主体感は 590 ms を超える遅延では発生しない [4]。この閾値の時間差を活用した Matsumiya [5] は、遅延時間を 500 ms に設定することで、行為主体感が生じるが身体所有感は生じない状況を実験で作り出している。そして、自己位置感覚は身体所有感の生じたアバタの位置にドリフトする [6, 7] ため、アバタの位置をユーザの身体と異なる場所にシフトさせ、それに身体所有感を誘発することで操作が可能である。

2.2.1 遅延による身体所有感と行為主体感の操作

身体所有感および行為主体感を操作する方法として、ユーザの動作とパペットモデルの同期に時間遅延を実装した。ユーザのアバタの骨格位置および回転データを保存し、定義したフレーム後にその情報がパペットに反映されるようにした (図 1)。さらに、実験空間の UI でパペットの遅延部位を選択できるよう実装した (図 2)。ただし今回の実験では、遅延時にすべての部位を選択した。遅延時間の設定は、パラメータを入力する UI により適宜変更できた。

2.2.2 位置オフセットによる自己位置感覚の操作

自己位置感覚の操作は、ユーザアバタとパペットモデル間の座標オフセットによって実装した (図 3)。オフセットを反映したパペットは、ユーザ前方に出現した。そして、ユーザの動きに同期して動かすことで、ユーザの自己位置感覚

¹<https://assetstore.unity.com/packages/tools/animation/final-ik14290?locale=ja-JP>

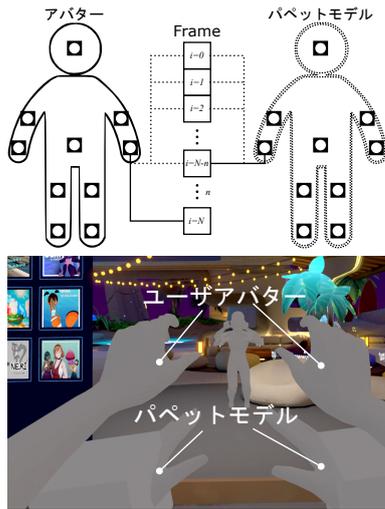


図 1: 遅延の衣装。パペットモデルの現在のフレーム ($i = N$) における IK ターゲットは、ユーザアバタの n フレーム前の座標と回転を参照する。

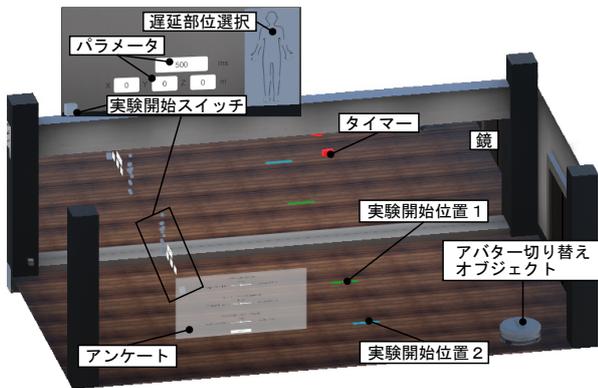


図 2: メタバース上の実験空間

を操作した。オフセットの値は、パラメータを入力する UI により自由に変更できた (図 2)。ただし、今回の実験ではオフセットを入れる場合は 2m とした。

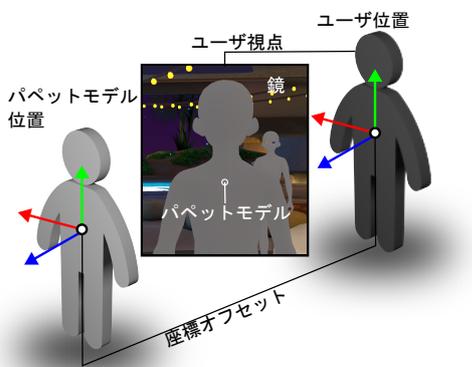


図 3: 自己位置感覚を操作するための座標オフセット

2.3 身体化感覚の計測

パペットモデルを通じて体験される身体化感覚を測定するために、Udon スクリプトを使用してアンケート機能を実装した。ユーザはレーザーポインタを使ってリッカート尺度のバーを動かすことで回答した。各ユーザの回答結果は、Unity 開発環境で事前に登録された実験者ユーザのログファイルに出力された。

3. 実験

3.1 参加者

12 名の VRChat ユーザ (平均プレイ時間 1158 時間 \pm 686 SD) が実験に参加した。7 名が頭、両手、腰、足の位置から全身の運動を IK で生成するフルボディトラッキングで参加し、残り 5 名が頭及び両手の位置から全身の運動を IK で生成する 3 点トラッキングで参加した。フルボディトラッキング及び 3 点トラッキングは VRChat 上であらかじめサービスとして実装されているものを用いた。すべての実験はオンライン上で行われた。

3.2 刺激と条件

参加者はワールド側で実装したパペットを鏡の前で動かした。実験では運動条件として、パペットが参加者の運動に同期して動く遅延 0ms 条件、500ms 遅れて動く条件、1000ms 遅れて動く条件、参加者もパペットも動かない静止条件の 4 つがあった。加えて視点条件として、アバタの頭の位置に視点がある 1 人称視点 (1PP) 条件と、アバタの 2m 後方に視点がある 3 人称視点 (3PP) 条件があった。

3.3 手続き

参加者が VRChat ワールドに入ると、ユーザ名及びアンケートの収集に関する同意書が提示された。参加者は同意後、ワールドの奥に進み、前方に鏡がある部屋 (図 2) に移動した。その部屋に入った後、ユーザは透明なアバタに着替えた。これは、パペットがユーザ本来のアバタと重なって表示されてしまうことを防ぐためである。パペットが正常に動作するか確認したあと、実験を開始した。実験者がボタンを押すとパペットが提示され、参加者の動きに同期または非同期に動いた。実験条件の操作は、ワールド内で実験者が UI に遅延時間や視点位置の入力を行うことで操作した。参加者は 1 分間鏡の前で毎秒流れる音に合わせて両手を交互に上へ挙げた (静止条件を除く)。手を挙げる動きは右手から開始するよう教示した。各試行の最後にはアンケートに回答した (表 1)。鏡の前の運動とアンケートの組み合わせを合計 8 回行った (4 つの運動条件 \times 2 つの視点条件)。

4. 結果

アンケートの各質問結果に対してフリードマン検定を行った。その結果、すべての質問項目で主効果が見られた (Q1: $p < .001$; Q2: $p < .001$; Q3: $p < .001$) ため、コノバーの検定による下位検定を実施した。多重比較時の p 値はボンフェローニ法によって補正した。

表 1: アンケート

| | | |
|----|------------------------|--------|
| Q1 | アバタが自分の身体のように感じた | 身体所有感 |
| Q2 | 自分の身体のようにアバタをコントロールできた | 行為主体感 |
| Q3 | 自分の身体がアバタの位置にあるように感じた | 自己位置感覚 |

4.1 身体所有感

アバタがユーザの動きに同期して動く (0ms 条件) ことで、視点に関わらず 1000ms 遅延のある条件よりも身体所有感が強くなった (1PP-0s vs. 1PP-1000ms: $p = .041$; 3PP-0s vs. 3PP-1000s: $p = .036$)。一方で予想と異なり、遅延が 0ms と 500ms の間にはどちらの視点でも有意差が見られなかった (1PP-0ms vs. 1PP-500ms: $p = 1.00$; 3PP-0ms vs. 3PP-500ms: $p = .25$)。視点の比較では、遅延なく同期している場合、1 人称視点と 3 人称視点の間で身体所有感の強さに有意差はなかった ($p = 1.00$)。

4.2 行為主体感

視点に関わらず、アバタがユーザの動きに同期して動くことで、1000ms 遅延のある条件よりも行為主体感が強くなった (1PP-0s vs. 1PP-1000ms: $p = .003$; 3PP-0s vs. 3PP-1000s: $p < .001$)。予想通り行為主体感においては、視点に関わらず、遅延が 0ms と 500ms の間に有意差が見られなかった (1PP-0ms vs. 1PP-500ms: $p = .14$; 3PP-0ms vs. 3PP-500ms: $p = .99$)。一方で、遅延なく動く条件と静止条件間には、3 人称視点でのみ有意差が見られた (1PP-0s vs. 1PP-静止: $p = .17$; 3PP-0s vs. 3PP-静止: $p = .004$)。

4.3 自己位置感覚

運動が同期しているとき、1 人称視点のほうが 3 人称視点よりも自己位置感覚が強くなった ($p < .001$)。静止条件においても同様の結果となった ($p = .04$)。1 人称視点では、全体的に自己位置感覚が強く、条件間に有意差は見られなかった。

5. 考察

本研究では、メタバース上で身体化感覚を計測するための空間を構築し、身体化感覚の実験的な操作が正常に機能しているか調べた。メタバースプラットフォームでの実装は、SDK の制約があり、実装の自由度が低くなるが、アバタの身体性操作に関しては、アバタの動きに遅延をいれることや、視点の変更など、これまでの実験室実験と同等の環境が開発可能であることが明らかとなった。本研究では、ユーザ本来のアバタの代わりにワールド側で実装したパペットを用いた。これは、ユーザ側のアバタに介入することは技術的に困難であるためである。そのため、実験者が用意した様々なアバタをユーザに着てもらい、身体化感覚を計測することはできるが、ユーザが普段使用しているアバタを用いての実験はできないのが現状である。

5.1 身体所有感

実装面ではこれまで同様に実験ができることを確認したものの、実験結果に関しては先行研究と一部異なるものとなった。身体所有感の項目では、500ms の遅延がある場合においても 0ms との間に有意差が見られなかった。これは 290ms を超える遅延があると、所有感が低下することを示した研究 [4] と異なる結果である。先行研究は手のみであり、本研究は全身であった。実験では腕のみを動かしていたため、下半身はユーザの視覚情報と固有受容感覚が一致する状態となっていた。視覚情報と固有受容感覚の情報が一致していれば、静止観察のみで所有感が生起する研究 [8] もあり、下半身に所有感が生起した結果、予想よりもアバタ全体の所有感が強くなったと考えられる。加えて、今回実験に参加した VRChat ユーザは平均 1000 時間以上プレイしており、長時間アバタを学習している。そして、日頃からネットワークの遅延や高負荷な映像の処理によって、遅れて動くアバタに慣れている。そのため、遅延するアバタに対しても、違和感なく自分だと感じることはできたのではないだろうか。

5.2 行為主体感

一方で、行為主体感は先行研究 [4] と同様に、500ms の遅延では行為主体感は維持されており、1000ms の遅延では弱くなった。所有感のみ遅延があっても生起していたことと、VRChat ユーザが遅延に慣れていることを考えると、遅延の閾値が上がっている可能性がある。たとえば、日頃から遅延のある環境に慣れていたことで遅延の閾値が 300ms ほど上がっていれば、身体所有感の閾値は 590ms、行為主体感の閾値は 890ms となり、今回の結果のように身体所有感も行為主体感も 500ms の遅延条件下では生起することになる。ただし、本研究では遅延を計測していないため、推察の域を出ない。

5.3 自己位置感覚

1 人称視点では、全体的に自己位置感覚が強かった。ユーザの身体位置とアバタの位置が 1 人称視点では一致しているため、妥当な結果である。一方で、3 人称視点で所有感がある場合においても、自己位置感覚は強くならなかった。3 人称視点のように、前方にあるアバタに所有感が生じると、自己位置が前方へドリフトすることが知られている [6, 7] ためである。先行研究においても、自己位置の変化は少しずれる程度に留まっているものの、遅延して動く条件との間にも有意差がなかったのは予想外の結果である。これまでの自己位置感覚計測の多くは行動指標であり、今回はアンケートを用いていた。行動指標はユーザの意識しない変化も計測できるが、アンケートではその点が難しい。今回、自己位置がずれているかは尋ねておらず、アバタの位置に自分の身体があるように感じたかのみ尋ねていたため、その僅かな自己位置の変化を汲み取れていなかった可能性が高い。今後、行動指標を計測する機能をワールドに実装することで、この点を明らかにしたい。

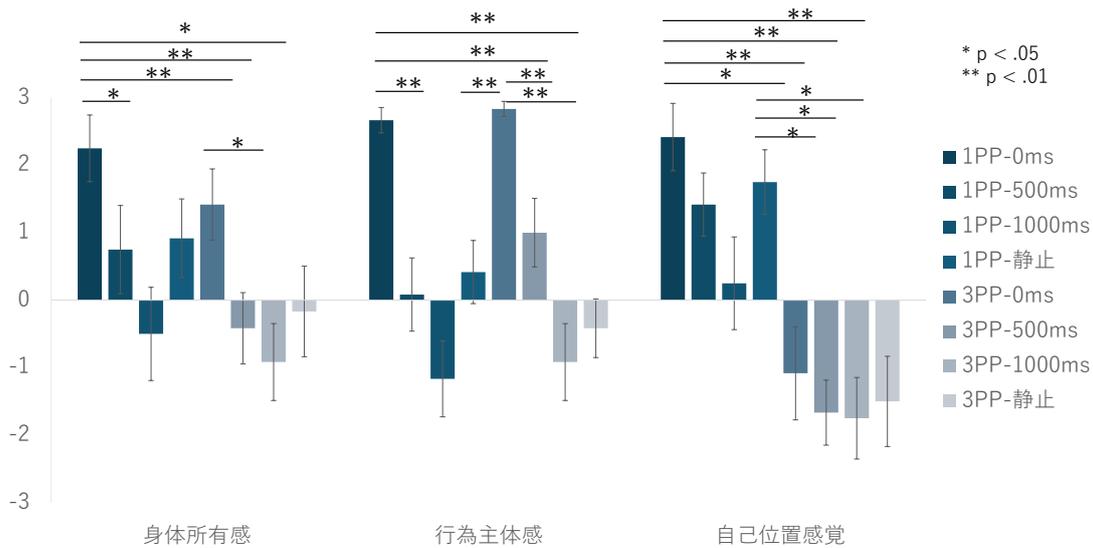


図 4: アンケート結果。エラーバーは SE。

6. おわりに

本研究では、メタバース上で身体化感覚を計測するための空間を構築し、身体化感覚の実験的な操作が正常に機能しているか調べた。その結果、アバタの身体性操作に関しては、アバタの動きに遅延をいれることや、視点の変更など、これまでの実験室実験と同等の環境が開発可能であることが明らかとなった。一方で、身体化感覚に関するアンケートは一部先行研究と異なる結果となった。メタバースにはネットワークの遅延が当然あり、今回の結果はそれが影響していると考えられる。今後は、ユーザがメタバースを遊んでいるだけで自然にデータが取れる状態を目指す。それによって、実験室実験では難しい、メタバースというフィールドで長時間アバタを学習したユーザの研究が進められるだろう。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 JP22K17938 の助成を受けた。

参考文献

[1] Konstantina Kilteni, Raphaella Groten, and Mel Slater. The sense of embodiment in virtual reality. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, Vol. 21, No. 4, pp. 373–387, 2012.

[2] Samantha Keenaghan, Lucy Bowles, Georgina Crawford, Simon Thurlbeck, Robert W Kentridge, and Dorothy Cowie. My body until proven otherwise: Exploring the time course of the full body illusion. *Con-*

sciousness and Cognition, Vol. 78, p. 102882, 2020.

[3] Ryota Kondo and Maki Sugimoto. Effects of virtual hands and feet on the onset time and duration of illusory body ownership. *Scientific reports*, Vol. 12, No. 1, p. 11802, 2022.

[4] Mohamad Arif Fahmi Ismail and Sotaro Shimada. ‘robot’ hand illusion under delayed visual feedback: Relationship between the senses of ownership and agency. *PloS one*, Vol. 11, No. 7, p. e0159619, 2016.

[5] Kazumichi Matsumiya. Awareness of voluntary action, rather than body ownership, improves motor control. *Scientific reports*, Vol. 11, No. 1, p. 418, 2021.

[6] Bigna Lenggenhager, Tej Tadi, Thomas Metzinger, and Olaf Blanke. Video ergo sum: manipulating bodily self-consciousness. *Science*, Vol. 317, No. 5841, pp. 1096–1099, 2007.

[7] Estelle Nakul, Nicolas Orlando-Dessaints, Bigna Lenggenhager, and Christophe Lopez. Measuring perceived self-location in virtual reality. *Scientific Reports*, Vol. 10, No. 1, p. 6802, 2020.

[8] Mark Carey, Laura Crucianelli, Catherine Preston, and Aikaterini Fotopoulou. The effect of visual capture towards subjective embodiment within the full body illusion. *Scientific reports*, Vol. 9, No. 1, p. 2889, 2019.