



VR アバター操作のための微細入力と 全身触覚提示による身体所有感維持手法の検証

Development and Evaluation of a Method for Maintaining Body Ownership
in VR Avatar Control Using Subtle Input and Full-Body Haptic Feedback

白川 太地¹⁾, 脇坂 崇平¹⁾, 花光 宣尚¹⁾²⁾, 平尾 悠太朗³⁾, 橋本 健⁴⁾,

新居 英明¹⁾, Tanner Person¹⁾, 南澤 孝太¹⁾

Taichi SHIRAKAWA¹, Sohei WAKISAKA¹, Nobuhisa HANAMITSU^{1,2}, Yutaro HIRAO³,

Takeru HASHIMOTO⁴, Hideaki NII¹, Tanner PERSON¹ and Kouta MINAMIZAWA¹

1) 慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科 (〒 223-8526 横浜市港北区日吉 4-1-1,
{t.shirakawa, wakisaka, hanamitsu, nii, tannerperson, kouta}@kmd.keio.ac.jp)

2) Enhance Experience Inc. (〒 153-0042 東京都目黒区青葉台 2-3-1, nobu@enhance-experience.com)

3) 奈良先端科学技術大学院大学 (〒 630-0192 奈良県生駒市高山町 8916 - 5, yutarohirao@gmail.com)

4) ソニーコンピュータサイエンス研究所 (〒 141-0022 東京都品川区東五反田 3-14-13, hashimoto@csl.sony.co.jp)

概要: 本研究は、身体を動かさずに微細な力入力でアバターを操作する状況において、全身触覚提示を用いて身体所有感を維持する手法を提案する。身体所有感の維持には、力入力で表現される動作意図と身体感覚の一致が重要であると考え、親指操作による移動と下肢への触覚提示を組み合わせたプロトタイプを構築した。また、座位での VR アバター操作において、本手法が身体所有感の維持に寄与するかを予備実験で検証した。

キーワード: 微細入力インタフェース, 触覚提示, 身体所有感

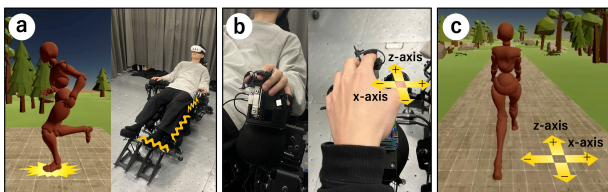


図 1: 着座ユーザに歩行・走行感覚を提供する提案インタフェース。(a) アバターの足接地動作と、足踏みに同期した下肢への振動提示。(b) 触覚椅子に設置した指先力入力デバイスと、親指による移動入力。(c) 親指の押す方向と力の大きさに応じたアバターの 2 次元平面内の移動。

1. はじめに

VR アバターは、遠隔環境やデジタル空間においてユーザの身体的・認知的能力を補完・拡張する技術として、業務・教育・娯楽など多様な分野で活用が広まりつつある。その実用化にあたっては、アバターを単なる映像として扱うのではなく、身体の一部のように自然に操作できることが求められ、操作のしやすさと身体所有感を両立するインタフェース設計が重要となる。

今後、VR アバターの応用が進むにつれ、利用目的や環境に応じてユーザが複数のアバターを柔軟に使い分ける場面が

増えると考えられる。例えば、大型アバターによる重量物の搬送、小型アバターによる精密作業、飛行型アバターによる広域監視など、アバターに求められる運動能力は大きく異なる。人型アバターにおいては、歩行や走行などの基本動作に加え、ダンスや飛行といった多様な運動様式が想定される。アバター活用が多様化する中で、各運動様式においても身体所有感を維持する操作インタフェースの設計が求められる。

しかし、従来の操作インタフェースは各運動様式に特化した設計が多く、ユーザは動作を切り替える都度、新たなデバイスや操作方法を習得する必要がある。操作の切り替えに伴う身体的・認知的な負担は、身体所有感を損ない、動作の正確性や作業効率が低下する可能性がある。

本研究では、アバターの運動様式が変化しても身体所有感を維持できる統一的な操作インタフェースの設計を試みる。提案手法では、微細入力と全身触覚フィードバックの二つの要素を掛け合わせ、一貫した操作感と身体所有感の維持を目指す。微細入力は、ユーザの身体動作を最小限に抑え、特定の動作に依存しない抽象度の高い入力方式により、多様な運動様式に柔軟に対応できると考える。また、全身触覚フィードバックは、ユーザの運動意図に対応する運動感覚を生成し、知覚と制御の整合性を高める。これにより、意図した動作がアバターに正確に反映され、対応する感覚が提示

されることでフィードバックループが成立し、動作の種類にかかわらず身体所有感の維持が可能になると考えている。

将来的には、多様な運動様式に対応可能な統一操作インタフェースの実現を目指しているが、本研究ではその第一歩として、「歩行・走行」といった基本移動に焦点を当て、プロトタイプの開発と初期検証を行った。これらの動作は多くのアバタ活用に共通し、身体感覚の研究とも関連が深いため、評価対象として適していると考え、今後は、他の運動様式への拡張も段階的に検討していく予定である。

2. 関連研究

本研究に関連する先行研究は、(i) 最適化型アバタ操作インタフェース、(ii) 低負荷入力インタフェース、(iii) 多感覚同期と身体所有感の3つの領域に大別される。以下では各領域の知見を概観し、本研究の位置づけを明らかにする。

2.1 最適化型アバタ操作インタフェース

無限床型トレッドミルによる歩行・走行体験 [1]、モーションキャプチャを用いたVRダンス表現 [2]、羽型デバイスと送風による飛行体験 [3] など、専用デバイスを用いた手法は、いずれも特定の移動や動作様式に最適化されており、高い没入感と身体感覚の再現を可能にしている。

2.2 低負荷入力インタフェース

身体動作を最小限に抑えつつアバタを制御する手法として、さまざまな入力源を活用したアプローチが提案されている。指先入力によるアバタの連続制御と多様な触覚フィードバックの実現 [4]、表面筋電 (EMG) を用いた身体的制約下での操作 [5]、脳波 (EEG) による神経疾患リハビリへの応用 [6]、および全身力入力と筋電センサを組み合わせた操作インタフェース [7] などが挙げられる。これらのシステムでは、単一の操作系で特定タスクや複数タスクに対応する試みも報告されている。

2.3 多感覚同期と身体所有感

アバタ操作における身体所有感の形成には、多感覚情報の統合が重要である。視覚・触覚・固有感覚の同期によって身体所有感が誘導されることが示されており [8]、この身体所有感は、感覚間の時間的ズレに対する許容範囲を拡大する効果もある [9]。さらに、足部への振動によって実際に動かずとも歩行感覚を再現できることや [10]、音響と触覚を組み合わせることで、非人型アバタへの身体所有感も高められると示されている [11]。

2.4 本研究の位置づけ

これらの研究は、(i) 高没入な操作体験、(ii) 低負荷な入力方式、(iii) 身体所有感の向上をそれぞれ実現している。

しかし、(i) の手法は特定動作に最適化されているため、異なる移動様式への柔軟な適応が困難であり、切り替え時に連続的な身体所有感の維持が難しい。(ii) の手法は操作負荷の低減に優れるものの、多様な移動様式間で一貫した操作感と所有感を提供する設計には至っていない。また、(iii) の研究は感覚統合による所有感誘導に貢献しているが、操作系との整合性や複数移動モードへの応用性は限定的である。

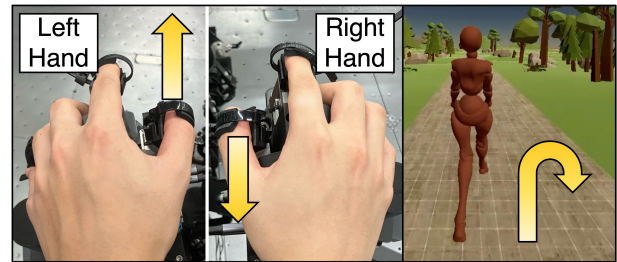


図 2: 両手の Z 軸入力によるアバタの旋回動作

これらの限界を踏まえ、本研究では、異なる移動様式を切り替えても身体所有感が持続される統一的な操作インタフェースの設計を目指す。まず人型アバタの水平移動に焦点を当て、低負荷入力と多感覚提示を統合したインタフェースの妥当性を予備的に検証する。

3. システム設計

本章では、指先の力入力による移動制御と、両足への振動を核としたマルチモーダル・フィードバックを統合した、汎用操作インタフェースの実装について述べる。

3.1 入力インタフェース

図 1b に示すように、入力インタフェースには、親指 (3 軸)、人差し指 (3 軸)、小指 (1 軸) の計 7 自由度の力覚センサ (ロードセル) を備えた指先力入力デバイスを用いる [4]。

両手の親指から得られる各軸方向 (X, Y, Z) の力をそれぞれ合算し、入力として用いる。得られた Z 軸 (前後) および X 軸 (左右) の押圧力に応じてアバタの移動方向を決定し、入力の強さに比例して移動速度と移動距離を連続的に変化させる (図 1c)。歩行と走行の遷移には、あらかじめ設定した力の閾値を適用している。さらに、両手の Z 軸入力が設定閾値を超え、かつ互いに逆方向 (例: ユーザから見て、左手が奥、右手が手前) の場合に限り、アバタは手前側 (この例では右手) へ引く動作として旋回するよう設計している (図 2)。

3.2 出力フィードバック

図 1a に示すように、触覚フィードバックには、全身振動触覚の提示が可能な「Synesthesia X1」全身触覚椅子を用いる [12]。本研究では、足裏の 2 チャンネル、ふくらはぎの 4 チャンネルを使用し、片足あたり計 6 チャンネル、両足で合計 12 チャンネルを使用した。

歩行・走行時に、アバタの足裏が接地するタイミングに応じて、以下の 2 つの振動伝播パターンを同時に生成する (図 3)。(1) かかと→つま先方向への伝播、(2) かかと→ふくらはぎ方向への伝播である。かかとのアクチュエータには 130Hz の搬送波を用いて鋭い衝撃感を強調し、つま先およびふくらはぎのアクチュエータには 80Hz の搬送波を用いて身体共鳴的な感覚を提示する。両脚には同一の触覚設計を適用し、移動速度に応じて振動フローも比例的に変化するように調整した。振動の強度や遅延時間も主観評価を繰

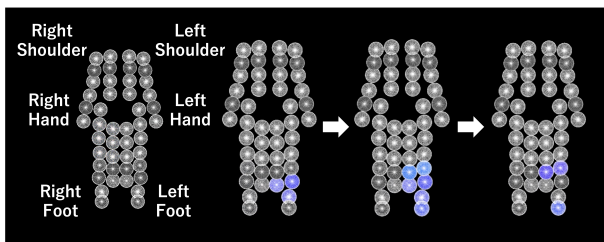


図 3: 歩行時触覚提示の時空間マップ (左足)．アバタの足裏接地に合わせて、かかとからつま先・ふくらはぎ方向への振動が同時に伝播する．

り返してチューニングし、視触覚の整合性を最適化した。

また、移動速度に応じて縦方向のカメラシェイクを加え、足音はバイノーラル音響として提示する．これらの提示タイミングは、力入力の大きさに比例して変化する．視覚・聴覚・触覚は 10ms 以内に同期させている．

3.3 システム全体構成

本システムは、VR 空間 (Unity)、力入力、触覚提示、および視聴覚出力の各要素をリアルタイムに連携させた統合型構成である．力入力は、センサデバイスからの信号が有線シリアル接続を通じて直接 Unity に取り込まれる仕組みである．デバイスは、全身触覚椅子の両手部にある振動子の上に固定されており、安定した力入力が可能となっている．VR 空間は Unity 上に構築されており、アバタの位置や速度、環境との接触情報を取得し、それらの情報を TouchDesigner に送信する．これにより、全身触覚椅子のアクチュエータに対する三次元的な触覚マッピングが動的に生成される．ユーザは HMD とヘッドフォンを装着し、全身触覚椅子に座った状態で、指先のみを用いてアバタを操作する．

4. ユーザ体験設計

本章では、ユーザが本システムを用いてどのように VR 空間内で移動体験を行うのか、そのインタラクションの設計方針について述べる．

4.1 二次元口コモーション体験

ユーザは両手親指の押圧ベクトルを 1 本の統合的な入力として用い、前後・左右移動と旋回を同時に制御できる．例えば、斜め前方右方向への押圧により、斜めに前進する動作が実現される．また、押圧の強度に応じて、前後移動と旋回 (例：右旋回) を同時に行うことができる．

歩行動作への遷移に関わる入力の閾値を小さく設定することで、ユーザは明示的なモード切替や複雑な操作を意識せずに、身体の延長のようにアバタを操作できる．これにより、移動および方向転換が直感的かつ連続的にできるユーザ体験が実現されている．

視覚・聴覚・触覚の三感覚フィードバックを同期させることで、「入力→アバタの移動→感覚提示」という明確な因果関係を形成することで、身体所有感が高まると仮定した．特に速度上昇時には、触覚による振動発火速度が比例的に増加し、走行状態への移行を、視覚と触覚の両面から自然

に伝えるよう設計している．

視点については、ユーザは一人称視点および三人称追従視点の 2 種類を状況に応じて自由に切り替えることができる．三人称視点では、自身と周囲の相対位置を把握しやすく、広域的な状況認識を補助する．加えて、環境内に配置された鏡面反射を通じて、ユーザはアバタの動作を外部視点から確認することができ、自らの入力、アバタの挙動、および触覚フィードバックとの対応関係を視覚的に把握できる．

本システムでは旋回時の回転角度を調整することで、過度な視覚刺激を抑え、VR 酔いの軽減を図っている．

5. 予備的検討

本章では、提案する汎用的操作インタフェースがユーザに身体所有感を与え、視点や移動モードが変わっても自然に操作できるかを自由使用の中で観察した．特に、指先の力入力の操作性と多感覚フィードバックの連動が与える影響に着目した．

5.1 参加者

本実験には、年齢 20～40 歳の VR 経験者である成人男性 3 名が参加した．うち 1 名は主にゲーム用途での利用経験を持ち、2 名は VR コンテンツの開発経験があった．視覚および平衡機能障害の既往はなかった．

5.2 環境

実験は、3 章「システム設計」で述べた構成および出力デバイスと同一環境で実施した．一人称視点と三人称視点は参加者の希望に応じて実験者が切り替え、鏡面視点はフィールド内に常時表示されていた．

5.3 手順

参加者は HMD とヘッドフォンを装着し振動椅子に座り、約 2 分間のキャリブレーションを実施した．続いて、7 分間の自由探索タスクを行った．平地と鏡を備えた VR 環境内を視点モードを任意に切り替えながら移動した．タスク終了後には、感想や気づきを自由インタビューで収集し、発言内容を先行研究の評価項目に基づいて分類・分析した．

5.4 結果

実験中およびタスク後の自由インタビューを通じて、参加者から操作体験に関する多様な発言が得られた．移動中の身体感覚については、「振動があることで、走っているような感覚になった」との発言があり、椅子の振動が移動と結びついて捉えられていた．また、三人称視点や鏡面視点では、「自分の動きと振動の連動を感じることができた」と語られ、視点を切り替えながらも、自身の動作との一致を認識する様子が見られた．操作に関しては、「親指操作に慣れるのに時間がかかったが、慣れると細かな速度調整が可能と感じた」との意見があり、初期には試行的な動作が見られたが、次第に繊細な力加減による操作に変化していった．一方、「回転するときに酔ってしまう」との報告もあり、視界の変化を伴う動作中に身体的不快感を訴える場面があった．以上の発言や行動から、視点やフィードバックの違いに応じて参加者の体験が変化していた様子が示された．

6. 考察

本実験の結果から、身体所有感を維持することのできた要因として、ユーザが「入力 → アバタ移動 → 触覚振動」という一連の因果関係を直感的に理解できたことが挙げられる。その結果、ユーザは自身の意図が VR 空間に即座に反映されると感じ、身体所有感の形成に寄与したと考えられる。

また、鏡面視点と一人称視点を切り替えることで、アバタ挙動と身体感覚の対応関係を確認し、身体所有感の補正に役立った。

さらに、かかとからふくらはぎに伝わる触覚振動がユーザに「前へ進んでいる感覚」を生み出した。本観察結果は、歩行・走行の感覚を厳密に再現することよりも、「入力→前進→振動」という一連のフィードバックの一致が、結果的に身体所有感の形成に寄与した可能性を示唆する。

一方で、視点のみが即時に回転し、身体側には回転に伴う感覚が提示されなかったため、視覚情報と前庭感覚との間に不一致が生じ、これが VR 酔いの一因となったと考えられる。

7. 結論と今後の課題

本研究では、指先の力入力と全身触覚椅子を統合した統一インタフェースを試作し、着座姿勢のまま歩行・走行を連続操作できる自由探索タスクにおいて、身体所有感が持続する可能性を観察した。参加者は「入力→移動→触覚」という一連の流れを知覚し、操作と感覚の連動を容易に把握できた。また、初期段階では一人称視点のみではアバタの動きが把握しづらいものの、三人称視点や鏡面視点で動作を確認することで、その後の一人称視点における身体所有感が明確になる傾向が見られた。ただし、本結果は少人数による自由探索と主観報告に基づくものであり、その汎用性や信頼性を高めるには、統制実験の実施に加え、先行研究に基づく定量的な評価手法を導入して主観的報告を裏付ける必要がある。

今後は、地上移動に加えて上空俯瞰など異なる移動モードにおいても、統一インタフェースで身体所有感が持続されるかを検証する。また、旋回時に見られた軽度の酔いに対しては、横方向への触覚提示や視野の段階的な変化などを組み合わせることで、前庭感覚との整合性を高める工夫が求められる。

これらの検証を通じて、装置を替えずに複数の動作モードを切り替えながらも身体所有感を保てる統一インタフェースの実用性を高め、視点や移動様式の頻繁な切り替えが求められる遠隔操作環境への応用可能性を今後の拡張実験を通じて検証していく予定である。

謝辞

本研究は、JST ムーンショット研究開発プログラム（JP-MJMS2013）の助成を受けたものである。また、Synesthesia Lab との共同研究によって実施された。

参考文献

- [1] Wehden, L.-O. et al. (2021). The slippery path to total presence: How omnidirectional virtual reality treadmills influence the gaming experience. *Media and Communication*, 9(1), 5–16.
- [2] Chan, J. C. P. et al. (2011). A virtual reality dance training system using motion capture technology. *IEEE Trans. Learning Technologies*, 4(2), 187–195.
- [3] Rheiner, M. (2014). Birdly an attempt to fly. *ACM SIGGRAPH Emerging Technologies*.
- [4] Hashimoto, T. et al. (2024). Selfrionette: A fingertip force-input controller for continuous full-body avatar manipulation and diverse haptic interactions. *Proc. UIST*, 17:1–14.
- [5] Shindo, M. et al. (2024). Exploring potential of electromyography-based avatar operation using residual muscles of ALS individuals: Case study on avatar DJ performance. *Extended Abstracts of CHI*, 1–7.
- [6] Wen, D. et al. (2021). Combining brain-computer interface and virtual reality for rehabilitation in neurological diseases: A narrative review. *Ann. Phys. Rehabil. Med.*, 64(1), 101404.
- [7] Imanaga, T. et al. (2022). Research on motion-less VR: Comparison of muscle outputs between motion using developed system and natural motion. *Proc. SHI*.
- [8] Kiltner, K. et al. (2015). Over my fake body: Body ownership illusions for studying the multisensory basis of own-body perception. *Front. Hum. Neurosci.*, 9, 141.
- [9] Maselli, A. et al. (2016). The sense of body ownership relaxes temporal constraints for multisensory integration. *Sci. Rep.*, 6(1).
- [10] Amemiya, T. et al. (2017). Vibration on the soles of the feet evoking a sensation of walking expands peripersonal space. *Proc. WHC*.
- [11] Vargas, M. F. et al. (2023). Now I wanna be a dog: Exploring the impact of audio and tactile feedback on animal embodiment. *Proc. ISMAR*.
- [12] Person, T. et al. (2024). The malleable-self experience: Transforming body image by integrating visual and whole-body haptic stimuli. *SIGGRAPH Emerging Technologies*.