



着座状態での入力手法が VR 空間における 階段昇降感に与える影響の分析

廣末裕太¹⁾, 片岡佑太¹⁾, 柴田史久¹⁾, 木村朝子¹⁾

Yuta HIROSUE, Yuta KATAOKA, Fumihisa SHIBATA and Asako KIMURA

1) 立命館大学 (〒 567-8570 大阪府茨木市岩倉町 2-150)

概要:

VR 空間の階段昇降では, 上下の自己移動感や段差感の提示が重要である. 本研究では, 座位で VR 階段昇降を行う入力手法として, ジョイスティック, ボタン, 腕振り, 足上げ, 踏み込みの 5 手法を比較した. 参加者は各手法を用いて昇段・降段課題を行い, 階段昇降感を評価した. その結果, 脚や腕の動作を伴う足上げ, 踏み込み, 腕振りは, ジョイスティックやボタンより高い階段昇降感を示した. 本結果は, 座位での VR 体験において, より高い階段昇降感を伴う移動体験を設計するための知見を提供する.

キーワード: 移動感覚, 階段昇降感, 表面筋電位

1. はじめに

HMD (Head-Mounted Display) を用いた VR (Virtual Reality) 体験では, 利用者が仮想環境内をどのように移動するかが, 没入感や快適性に大きく影響する. そのため, 歩行, テレポーターション, コントローラ操作, ジェスチャを用いた入力など, 多様な VR ロコモーション手法が研究されてきた [1]. 一方で, これらの研究の多くは平面上の水平移動を主な対象としており, 階段昇降のように垂直方向の移動を伴う体験については, なお検討の余地がある.

階段昇降では, 単なる前後移動だけでなく, 上下方向の自己移動感や段差を越える感覚が重要となる. これまでも, 物理的な段差や受動触覚 [2], 平地歩行と仮想階段方向の対応付け [3], 物理的な階段や専用の昇降デバイス [4][5] などを用いて, 階段や垂直移動を提示する手法が検討されてきた. これらの手法は高い没入感を生じさせる可能性がある一方で, 体験空間や安全性の確保, 専用装置の準備などの制約を伴う. これに対し, 座位で実際の移動を伴わずに階段昇降感を提示できれば, 限られた空間での VR 体験や, 立位での移動を伴わないロコモーションへの応用が期待できる. しかし, 座位において, どのような入力手法が階段昇降感を高めるのかは十分に明らかではない. 特に, 手指による操作や, 上肢動作, 下肢動作といった身体関与の違いが, 階段昇降感に与える影響については検討が必要である.

そこで本研究では, 座位で VR 階段昇降を行うための入力手法として, ジョイスティック, ボタン, 腕振り, 足上げ, 踏み込みの 5 手法における階段昇降感を比較する. 本研究の貢献は, 実歩行や段差を用いない VR 階段昇降において, 身体関与の異なる入力手法を比較し, 階段昇降体験に適した入力設計の基礎的な知見を提供する点にある.

2. VR 階段昇降システム

2.1 実験装置

本研究で用いた VR 階段昇降システムでは, 座位で行われた入力動作を, VR 空間内の階段を 1 段昇降する視点移動へ変換した. システムは Unity (2022.3.41f1) 上に構築し, 参加者には HMD (VIVE Focus Vision) を通して一人称視点の仮想階段環境を提示した. 入力が検出されると, 昇段時には前方および上方向へ, 降段時には前方および下方向へ VR 空間内の視点を遷移させた (図 1).

1 段ごとの視点遷移は, 実験条件として設定したテンポに基づき制御した. 入力手法ごとに移動量や移動時間を変えるのではなく, 階段 1 段分の遷移を, 異なる入力手法から呼び出す構成とした. これにより, 入力動作そのものは異なっても, VR 空間で提示される昇段・降段運動を条件間で共通化した. また, アバタの手部はコントローラの位置姿勢に追従させて提示し, 脚部は入力が検出されるたびに階段 1 段分の昇段または降段アニメーションを提示した.

2.2 入力手法

比較対象の入力は, ジョイスティック, ボタン, 腕振り, 足上げ, 踏み込みの 5 手法である. ジョイスティックは, 左右コントローラ (VIVE Focus Vision Controllers) のスティックを同時に前方へ倒す入力である. 本操作は連続的であるが, 他の手法と同様にテンポに基づき 1 段単位で視点遷移させた. ボタンは, 左右コントローラのトリガを交互に押す入力である. 腕振りは, コントローラを持った腕振りによる上肢動作の入力である. 足上げは, 足に装着したトラッカ (VIVE Ultimate Tracker) の上方向速度に基づいて足上げ動作を検出する下肢入力である. 踏み込みは, 筋電計 (MuscleBIT) より取得した外側広筋の活動を MVC で正規化し, 所定の閾値を超えた際に検出する下肢入力である.

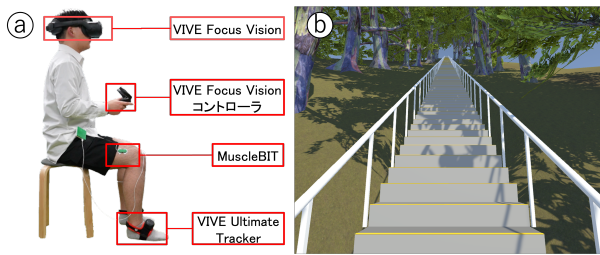


図 1: 実験のセットアップ: (a) 参加者の装着物, (b) 身長 170 cm の参加者における一人称視点

3. 実験

3.1 実験条件と手順

実験には男性 30 名が参加し、入力手法 5 水準と昇降方向 2 水準の参加者内 2 要因計画で行った。各条件では、座位のまま 100 段の VR 階段を昇段または降段した。昇段および降段のテンポは、予備実験から得られた各方向の自然な速度に基づき、昇段 100 BPM, 降段 110 BPM を採用した。参加者は 5 入力手法 × 2 昇降方向の計 10 条件を行い、参加者間で条件順をカウンターバランスした。

実験説明と書面同意を行った後、参加者には HMD, コントローラ, トラッカ, 筋電計を装着させた。次に MVC を測定した上で、各入力手法を練習させた。その後、10 条件の本試行を行い、各条件後に階段昇降感に関する質問紙に回答させた。参加者は背もたれのない丸椅子に座って実験を行った。実験時間は約 60–90 分であり、条件間には HMD を外して休憩を設けた。

3.2 評価指標と分析方法

参加者は条件ごとに、本研究で作成した 14 項目の階段昇降感に関する質問紙 (Stair Locomotion Questionnaire: SLQ) に回答した。SLQ は Presence Questionnaire [6] を参考にした項目と、階段昇降体験に関する独自項目から構成される。本稿では、階段昇降感に直接対応する 5 項目である「操作の自然さ」「実体験との類似」「階段昇降感の説得力」「上下移動感」「階段らしさ」の分析結果を報告する。「階段らしさ」は、移動感覚が坂道と階段のどちらに近いかを 1 (坂道をなめらかに上っている/下っている感覚に近い) –7 (一段ずつ階段を上っている/下っている感覚に近い) で回答させ、その他は 1 (全くそう思わない) –7 (非常にそう思う) の 7 件法で回答させた。

評価値は順序尺度であるため、分析には Aligned Rank Transform (ART) ANOVA を用いた [7]。入力手法の主効果が有意であった場合の事後比較には ART-C を用い、Holm 補正を適用した。交互作用が有意でない場合には、入力手法の主効果に対する事後比較の結果を報告する。

4. 実験結果

図 2 に、入力手法および昇降方向ごとの結果を示す。入力手法の主効果は、操作の自然さ ($F(4, 261) = 29.96$), 実体験との類似 ($F(4, 261) = 84.05$), 階段昇降感の説得力 ($F(4, 261) = 43.91$), 上下移動感 ($F(4, 261) = 7.55$), 階

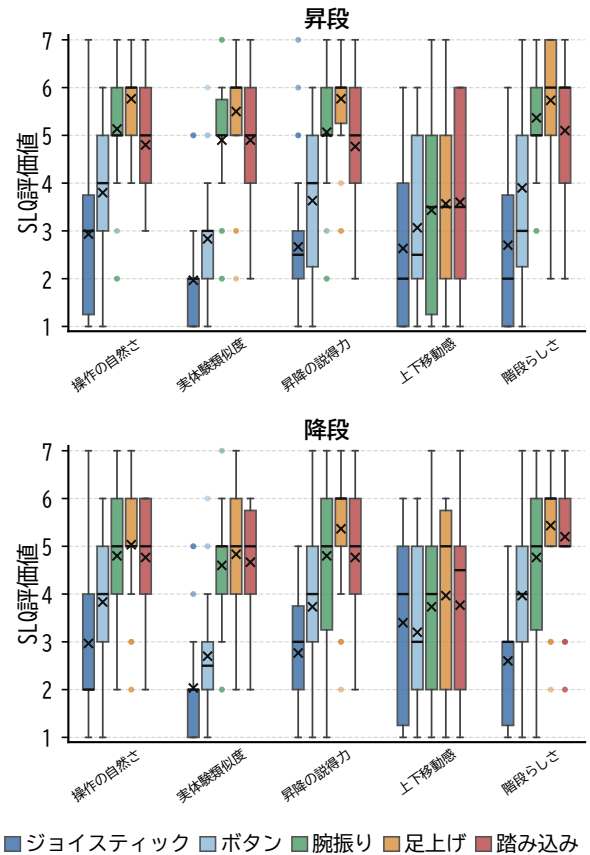


図 2: 入力手法および昇降方向別の SLQ 評価値

段らしさ ($F(4, 261) = 49.08$) の全てで有意であった ($p < .001$)。昇降方向の主効果は、操作の自然さ ($F(1, 261) = 5.24$, $p = .023$), 実体験との類似 ($F(1, 261) = 6.38$, $p = .012$), および上下移動感 ($F(1, 261) = 11.40$, $p < .001$) で有意であり、操作の自然さと実体験との類似は昇段, 上下移動感では降段で評価が高かった。階段昇降感の説得力 ($F(1, 261) = 1.57$, $p = .211$) および階段らしさ ($F(1, 261) = 1.59$, $p = .209$) では、昇降方向の主効果は有意ではなかった。また、入力手法と昇降方向の交互作用は、いずれの項目でも有意ではなかった。

入力手法の主効果に対する ART-C の結果、操作の自然さ、実体験との類似、階段昇降感の説得力、および階段らしさでは、腕振り、足上げ、踏み込みの各手法が、ジョイスティックおよびボタンより有意に高い評価を示した ($p < .001$)。上下移動感では、足上げがジョイスティック ($p < .001$) およびボタン ($p = .008$) より有意に高く、踏み込みがジョイスティック ($p < .001$) およびボタン ($p = .021$) より有意に高かった。腕振りはジョイスティックより有意に高かった ($p = .008$) が、ボタンとの差は非有意であった ($p = .162$)。

以上より、階段昇降感の説得力および階段らしさでは、上肢または下肢の動作を伴う腕振り、足上げ、踏み込みの入力手法が、ジョイスティックやボタンによる手指操作より高い評価を示した。また、上下移動感では、足上げおよび踏み込みが手指操作より高い評価を示し、腕振りはジョイスティックより高い評価を示した。

5. 議論

階段昇降感の説得力および階段らしさでは、腕振り、足上げ、踏み込みが、ジョイスティックおよびボタンより高く評価を示した。本システムでは、入力手法によらず VR 空間内における 1 段分の視点遷移を共通化していたため、これらの評価差には、移動を生じさせる入力動作の違いが関係したと考えられる。実歩行や物理段差を伴わない座位であっても、入力動作と実際の階段昇降に関連する身体動作との類似性が、階段昇降感の説得力や階段らしさを高めた可能性がある。また、操作の自然さおよび実体験との類似でも同様に、身体動作を伴う手法が手指操作より高く評価されたことから、入力動作の違いは操作の自然さや実体験との類似にも影響したと考えられる。

上下移動感では、足上げおよび踏み込みが、ジョイスティックおよびボタンより高く評価された。これらの 2 手法は入力方法が異なるものの、いずれも下肢動作を入力に用いる点で共通している。そのため、階段昇降に係る身体部位を動かすことが、身体位置の上下変化を感じる手がかりになった可能性がある。一方、腕振りはジョイスティックより高く評価されたものの、ボタンとの差は有意ではなかった。したがって、身体動作を伴う入力手法が、手指操作よりも一貫して上下移動感を高めたとは言えない。一方で、足上げおよび踏み込みはいずれも手指操作より高く評価されたことから、上下移動感に対しては、下肢動作を用いた入力の効果がより明確に示されたと考えられる。

入力手法と昇降方向の交互作用は、いずれの質問項目でも有意ではなかった。このため、入力手法による評価差が昇段と降段で有意に異なることは示されなかった。ただし、これは昇段と降段における入力手法の影響が同一であることを示すものではない。また、操作の自然さ、実体験との類似、上下移動感では昇降方向の主効果が認められた。本実験では、予備実験から得られた各方向の自然なテンポとして昇段 100 BPM、降段 110 BPM を採用したため、これらの昇降条件間の差には、提示テンポの違いが含まれる可能性がある。

以上の結果から、座位における VR 階段昇降において入力に一定の身体動作を伴わせることで、階段昇降感を高められる可能性が示唆された。特に、足上げや踏み込みのような下肢動作を用いた入力は、上下移動感を支える入力方法の候補となる。また、腕振りについても、階段昇降感の説得力や階段らしさを高める入力手法の候補となる。一方で、階段昇降感だけでなく、長時間の体験を行う際の身体的な負担や快適性などは、今後評価する必要がある。

6. まとめ

本研究では、実歩行や物理段差を用いない座位での VR 階段昇降において、身体関与の異なる 5 種類の入力手法を用いて階段昇降感を比較した。その結果、腕振り、足上げ、踏み込みのような身体動作を伴う入力は、ジョイスティックやボタンと比較して、階段昇降感の説得力および階段らし

さにおいて高く評価された。また、足上げや踏み込みは、上下移動感においてもジョイスティックおよびボタンより高く評価された。これらの結果は、実移動を伴わない座位型の VR 体験において、階段昇降感を支える入力手法を設計するための基礎的知見を提供するものである。

参考文献

- [1] M. Al Zayer, P. MacNeilage, and E. Folmer: Virtual Locomotion: A Survey, *IEEE Trans. on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 26, No. 6, pp. 2315–2334, 2020.
- [2] R. Nagao, K. Matsumoto, T. Narumi, T. Tanikawa, and M. Hirose: Ascending and Descending in Virtual Reality: Simple and Safe System Using Passive Haptics, *IEEE Trans. on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 24, No. 4, pp. 1584–1593, 2018.
- [3] M. Seo and H. Kang: Toward Virtual Stair Walking, *The Visual Computer*, Vol. 37, No. 9–11, pp. 2783–2795, 2021.
- [4] J.-H. Cheng, Y. Chen, T.-Y. Chang, H.-E. Lin, P.-Y. C. Wang, and L.-P. Cheng: Impossible Staircase: Vertically Real Walking in an Infinite Virtual Tower, *Proc. IEEE Virtual Reality and 3D User Interfaces*, pp. 50–56, 2021.
- [5] Q.-T. Le, D.-N. Huynh, T. Q. Tran, M. Fjeld, W. Stuerzlinger, M. Zank, M.-T. Tran, and K.-D. Le: RedirectedStepper: Exploring Walking-In-Place Locomotion in VR Using a Mini Stepper for Ascents, *Proc. of the 2025 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, Article 614, pp. 1–17, 2025.
- [6] B. G. Witmer and M. J. Singer: Measuring Presence in Virtual Environments: A Presence Questionnaire, *Presence*, Vol. 7, No. 3, pp. 225–240, 1998.
- [7] J. O. Wobbrock, L. Findlater, D. Gergle, and J. J. Higgins: The Aligned Rank Transform for Nonparametric Factorial Analyses Using Only ANOVA Procedures, *Proc. SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 143–146, 2011.