

ジェスチャに基づく VR ロコモーション手法の比較調査 (2) —歩行体験と歩行速度に与える影響—

北浦悠佑^{1,a)} 服部圭吾^{1,b)} 中村文彦^{1,c)} 片岡佑太^{1,d)} 柴田史久^{1,e)} 木村朝子^{1,f)} 森尚平^{2,g)}

概要：バーチャルリアリティ (VR) では、広大な仮想空間を自由に移動できる。しかし、現実での体験空間の広さを越えた移動にはロコモーション手法、つまり実際の移動量をより広い空間にマッピングする機構が必要となる。様々な手法が存在する中で、没入感と安全性を保つために着座状態で行う手法が検討されている。現実世界の歩行動作では、左脚右脚または左腕右腕の動作が対になって前進する。そこで我々は、歩行のテンポと移動量の計測データをもとに、VR デバイスからの左右対での入力信号をテンポに変換し、歩行速度を算出するアルゴリズムを定義した。これを踵上げ、腕振り、握りこみの入力動作に適用するとともに、各々を比較する3つの実験を行った。実験の結果、踵上げ動作はユーザに好まれた一方で、腕振り動作と比較して自分が歩行しているという臨場感が低く、フラストレーションが高くなった。腕振り動作は、ロコモーション手法として自然な動作であり、ユーザに高い臨場感を与えた。握りこみ動作は、身体的要求が低い一方で、臨場感が低くなった。ただし、テンポが速くなると身体的要求は最も高くなった。また、入力手法ごとに期待される歩行速度を調査したところ、腕振り動作が最も速く、次いで握りこみ動作が速い結果が得られた。このことから、入力手法に適した歩行速度を設定する必要があることが明らかになった。

キーワード：Virtual Reality (VR), ロコモーション, Natural User Interface (NUI), 臨場感, 歩行速度

1. はじめに

バーチャルリアリティ (VR) は広大な空間を構築できるが、ユーザが存在する物理空間には制約がある。そのため、VR システムはユーザが仮想空間内で自由に移動できるようなロコモーションシステムを提供する必要がある [1]。ロコモーションシステムには、ユーザの実際の歩行を仮想空間に直接マッピングする手法 [2][3] とユーザの入力を基に間接的に移動量を計算し仮想空間にマッピングする手法 [4][5] がある。後者には、テレポートやジョイスティックを使用した移動 [4]、さらにはジェスチャを利用した移動 [5] が含まれる。

間接的に移動量を計算する手法では、入力に基づいて移動量を決定する関数が必要となる。テレポートやジョイス

ティックを用いた移動では、ユーザが実際には静止した状態で、移動距離を指定することで位置を変化させる手法が一般的である。一方で、ジェスチャを利用した移動は、足踏み動作や腕を振る動作など、自然なユーザインタフェース (Natural User Interface; NUI) による移動を可能にする。NUI は没入感が高く、直感的な入力手法として用いられ、VR 酔いのリスクを軽減する効果も期待されている [6]。しかし、ジェスチャベースの手法には、ユーザがロコモーション中に初期位置からドリフトし、障害物に接触するという安全面での課題がある [7]。

着座状態での VR ロコモーションは、この問題を回避するための直接的な解決策であると同時に、長時間の使用に適した選択肢である。ただし、この方法では身体の一部の動作が制限される場合がある。例えば、足踏み動作は足を高く上げる必要があり、腕を振る動作は椅子の背もたれや肘掛けと干渉することが挙げられる。また、キャストがない場合、方向転換が制限される課題も存在する [8]。こうした課題を踏まえ、既存研究では、着座状態での移動を最小限の身体運動で実現する方法に着目し、それらを他のコントローラベースの手法と比較するアプローチが多く取られてきた [9][10]。

¹ 立命館大学

² シュトゥットガルト大学

a) yu-kita@rm2c.ise.ritsumei.ac.jp

b) hattori@rm2c.ise.ritsumei.ac.jp

c) f-naka@fc.ritsumei.ac.jp

d) y-katao@rm2c.ise.ritsumei.ac.jp

e) fshibata@is.ritsumei.ac.jp

f) asa@is.ritsumei.ac.jp

g) s.mori.jp@ieee.org

しかし、これまでの着座状態における NUI を用いたロコモーションの研究で、身体部位を使用した入力手法間での比較や、入力手法による疲労感や臨場感の違いに焦点を当てた研究はほとんど見られない。さらに、各々の入力手法において、身体を動かすテンポが操作感、疲労感や臨場感に影響を与えるかどうかについても明らかではない。そこで本研究では、左右の入力テンポに基づいた歩行アルゴリズムを定義し、それを用いて異なる身体動作部位での動作が、疲労や臨場感に及ぼす影響を評価することを目的とする。具体的には、着座状態における「踵上げ」「腕振り」「握りこみ」の3種類の動作を評価した。踵上げと腕振りは、歩行を模した動作であり、握りこみは四肢を動かさない状態でも歩行をイメージさせ、疲労を引き起こす可能性のある動作として採用した。

本論文では、実験1において臨場感、主観的作業負荷の指標で各入力動作の特徴を、実験2では普通の歩行と全速力での歩行を行わせた場合に入力動作ごとにテンポがどのように変わるのかを調査する。その過程で、ユーザが期待する歩行速度が入力手法によって異なる可能性が示唆されたので、実験3では各入力動作に適した仮想空間における歩行速度を調査する。

2. 関連研究

NUIに基づくVRロコモーション手法の研究では、各種身体動作を用いた入力手法の提案・開発や、NUIごとの特性（自然さ、没入感、ユーザ負荷、酔いなど）の評価が進められてきた。本章では、各ロコモーション手法における評価観点を整理し、本研究が着目する点について説明する。

2.1 立位状態での NUI による VR ロコモーション

立位状態での NUI によるロコモーション手法には、歩行動作そのものをその場で行う Walk in Place (WIP) [11] や足踏み [12]、腕振り [13]、握りこみ [14] などが提案されている。

このような NUI に対して、Chek ら [5] は、立位状態での入力手法の比較を行っている。この研究では、頭の動き、腕振り動作、足踏み動作、全身動作という4種類の方法を比較した。その結果、シミュレーション酔いの発生頻度が最も高いのは腕振り動作であり、最も低いのは足踏み動作であることが確認されている。しかし同時に、立位状態は空間的制約や安全性の課題があり、特に足踏み動作では物理的な壁との衝突リスクも指摘している。

一方 Nilsson ら [15] は、自然さ、存在感、意図しない位置ずれに関して、従来の WIP 法、腕振り動作、足踏み動作の違いを比較した。その結果、WIP 法と腕振り動作は足上げ動作よりも自然であると評価され、特に WIP 法はエネルギー消費や筋肉負荷の点で自然な歩行に近い手法であり、意図しない位置のドリフトも小さいことが示唆された。

2.2 着座状態での NUI による VR ロコモーション

着座状態での NUI によるロコモーション手法には、立位と同様の動作を着座で行う方法に加えて、身体の傾きや体重移動などをセンシングする方法などが提案されている。

Alexandra ら [16] は、体を傾けることで歩行を行う体重移動手法を入力としたロコモーション手法を提案した。この研究では、ジョイスティック手法との比較が行われ、体重移動手法では臨場感が高く、空間の認識能力が高いと報告された。

また、Liwei ら [9] は、靴型デバイスにモーションセンサを取り付けることで、足の動作を入力としたロコモーション手法を提案した。この研究では、体重移動手法とジョイスティック手法との比較が行われ、足の動作による入力は、臨場感が高い一方で、移動の効率性が低い結果となった。しかし、着座での NUI によるロコモーション手法については、ジョイスティックのようなコントローラを用いた入力手法との比較はなされているものの、NUI 同士での比較はなされていない。

そこで、本研究では入力位置が安定する着座状態での NUI に基づくロコモーション手法を比較する。歩行時の入力動作として、足を使った動作と手を使った動作を採用する。まず、足を上げる動作を検討したが着座では身体的負担が大きいため、踵上げ動作を採用した。また手を使った動作は、腕振り動作に加えて、同操作の最小動作として握りこみ動作も採用した。

3. 歩行アルゴリズム

前述の3種類の入力動作による歩行を実現するために、身体の左右部位からの入力を対として、その入力テンポを基に仮想空間を移動する歩行モデルを定義した。

人の歩行速度は、足を動かす速さ、歩幅の大きさによって決定される。ここで、足を動かす速さは入力のテンポに該当する。我々は、ユーザの入力のたびに1歩進むことを想定した。現在の入力テンポ T に基づく歩行速度を計算する関数 $V(T)$ を仮定すると、1歩で進む距離は、1歩の時間間隔 Δt を使って、式 (1) と計算できる。

$$d_{step} = V(T)\Delta t \quad (1)$$

したがって、 $V(T)$ を定義し、その瞬間の入力テンポ T を検出し、1歩の時間間隔 Δt を算出することが目標となる。

文献 [17], [18], [19] では、成人男性の歩行速度と歩調 C [steps/min] の関係が曲線的に単調増加することが示されており、このときの歩行速度と歩調の関係式は式 (2) と示された。

$$V(T) = 9.5 \times 10^{-4} \times C^{2.38} \quad (2)$$

このとき、歩調 C と入力テンポ T [input counts/min] は共

に1分間あたりの動作であるため、これらは対応していると解釈できる。したがって、 V [m/min] (すなわち、 $V(T)$) に対して再定式化し、 C を T に置き換える。本研究で使った、歩行速度と入力テンポの関係式は式 (3) である。

$$V(T) = 9.5 \times 10^{-4} \times T^{2.38} \quad (3)$$

また、左右入力の時間間隔が1歩の時間間隔に対応しているため、1歩の時間間隔 $\Delta t[\text{min/step}]$ は入力テンポ T を用いて式 (4) となる。

$$\Delta t[\text{min/step}] = 1/T \quad (4)$$

この時間間隔を超えるまで、ユーザはフレームごとにも移動を続ける。以上より、入力テンポと1歩で進む距離の関係は式 (5) と表すことができる。

$$d_{\text{step}} = 9.5 \times 10^{-4} \times T^{1.38} \quad (5)$$

4. 実験概要

入力手法ごとの動作とロコモーションの関係を明らかにするために、3つのユーザ実験を行った。本章では、実験の目的、実験装置、および実験条件について概要を述べる。

4.1 実験の目的

実験1: 着座状態で3つの入力手法の臨場感や作業負荷の特性を明らかにする。本実験では、4種類の入力テンポを用いた歩行時の臨場感、主観的作業負荷に関するデータを収集する。

実験2: 各入力手法に適した入力テンポを確認する。実際に歩行している想定、または全速力で歩行している想定で仮想空間を移動し、そのときの入力回数とゴール到達時間を測定することで、各入力手法を使って歩行する際の入力テンポの違いを確認する。

実験3: 参加者が期待する具体的な歩行速度を入力手法ごとに特定する。実験では、歩行アルゴリズムを用いず、異なる入力テンポでの期待歩行速度を定量的に確認する。

4.2 実験装置

実験で用いたコンピュータは、OS: Windows 10 Pro, CPU: Intel Core i5-14400F, メモリ: 16GB, グラフィックス: NVIDIA GeForce RTX 4060 である。HMDはVive Pro Eyeを使用し、トラッカーはVive Tracker, コントローラはVive Controllerを用いた。

仮想空間の構築にはUnity 2021.3.25f1を使用し、都市モデルとしてZENRIN City^{*1}を採用した。実験では、図1に示すような直線歩道を歩行させた。この直線歩道はStartからEndまでが距離100[m]である。

^{*1} ZENRIN City, <https://www.zenrin.co.jp/contents/product/service/3d/asset/>

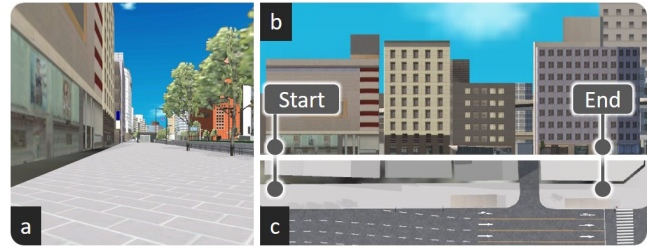


図1 仮想空間 (a) 一人称視点の様子 (b) 仮想空間の側面 (c) 仮想空間の俯瞰

表1 歩行速度に対応した入力テンポ

速度ラベル	遅い	並足	早い	早足
歩行速度 [m/min]	60	84	120	150
入力テンポ [BPM]	103	119	138	152

4.3 実験条件

入力手法: 実験参加者は丸椅子に座り、肘を曲げて手を前に出す姿勢を基本姿勢として、踵上げ、腕振り、握りこみの3種類の入力動作を実施した。本研究では、図2のように以下の動作を左右交互に繰り返すことで入力とした。

- 踵上げ動作: 片方の足の踵を上げて、もう一方の足の踵を下げる
- 腕振り動作: 片腕を前に出し、もう一方の腕を後ろに下げる (交互に前後に振る)
- 握りこみ動作: 片手でコントローラを握り、もう一方の手を離す

踵上げ動作と腕振り動作の入力は、足に装着した2つのVive Trackerと手に持った2つのVive Controllerで検出した。踵上げ動作ではVive Trackerを95[cm/s]、腕振り動作ではVive Controllerを35[cm/s]の速度で左右交互に動かすことで入力した。これらの速度は、関連研究[5]における足踏み動作と腕振り動作の入力を検出するための、最小速度と最大速度の中央値を採用した。握りこみ動作では、手の平でVive Controllerのサイドにあるグリップボタンを左右交互に握り込むことで実現した。

入力テンポ: 本研究では、103, 119, 138, 152, 300[BPM]の入力テンポを使用した。103, 119, 138, 152[BPM]は、それぞれのテンポを歩調と見た場合、60, 84, 120, 150[m/min]の歩行速度に対応しており、これらは人の歩行速度を分類した際の遅い速度、並足、早い速度、早足に該当する(表1)[20]。これらの速度に対応する入力テンポとして103, 119, 138, 152[BPM]を実験に採用した。300[BPM]は、踵上げ動作、腕振り動作、握りこみ動作を全速力で行った際の限界値として設定した。この値は、事前に行った実験で実験参加者が最大限の速さで動作を行った際に得たデータに基づく。



図 2 入力手法. (a) 踵上げ：足の踵を交互に上げ下げする動作, (b) 腕振り：両腕を前後に自然に振る動作, (c) 握りこみ：コントローラのボタンを左右交互に握る動作.

5. 実験 1

5.1 目的・内容

本実験では、3 種類の入力手法が歩行時の臨場感および疲労感に与える影響を調査する. 使用した入力手法は、踵上げ動作、腕振り動作、握りこみ動作の 3 種類である.

実験では、無作為に選定した入力手法を用いて、仮想空間内で 400 [m] の歩行タスクを実施した. 入力テンポは 103 [BPM] を除外した 119, 138, 152, 300 [BPM] の 4 種類を設定し、100 [m] ごとに異なるテンポを適用した. 400 [m] の歩行タスクは 100 [m] ごとに分割されており、図 1 の Start から End は、この 100 [m] の一例を示している. 103 [BPM] を除外した理由は、すべての入力手法において体感する歩行速度が遅く、作業負荷が必要以上に高まるとともに、歩行感覚が低下すると判断したためである. 歩行中はメトロノームを使用して入力タイミングを提示し、テンポに基づいた動作を行わせた.

実験参加者は 24 名 (平均年齢 21.5 歳, 標準偏差=0.77, 女性 6 名) で VR の使用経験は「これまでに数回体験したことがある」が 18 名, 「週に 2~3 回程度使用している」が 6 名であった. 実験の所要時間は約 1 時間 10 分であった.

評価方法は、NASA-RTLX[21][22] を用いた主観的作業負荷と、Witmer and Singer Questionnaire[23] を改変した 18 項目の臨場感質問票 (付録 A・1) を用いて行った.

NASA-RTLX は 6 項目を最大 100 点で評価し、臨場感質問票は全く当てはまらない (1)~非常に当てはまる (7) の 7 段階リッカート尺度を用いた.

5.2 手順

実験の手順を以下に示す.

- (1) 参加者は各入力手法に慣れるための練習を実施.
- (2) 実験者が 3 つの入力手法からカウンターバランスを踏まえて選定し、参加者に伝える.
- (3) 無作為に選定された入力テンポで、参加者が 100 [m] を歩行.
- (4) (3) を 4 回 (入力テンポ 4 条件) 繰り返す.
- (5) 質問票 (主観的作業負荷と臨場感) に回答.

表 2 臨場感の分析結果

	踵上げ, 腕振り	踵上げ, 握りこみ	腕振り, 握りこみ
PQ1	$p = 0.002$	$p = 0.039$	$p = 0.168$
PQ2	$p = 0.009$	$p = 0.359$	$p = 0.014$
PQ3	$p = 0.073$	$p = 0.558$	$p = 0.136$
PQ4	$p = 0.065$	$p = 0.005$	$p = 0.001$
PQ6	$p = 0.758$	$p = 0.013$	$p = 0.014$
PQ8	$p = 0.024$	$p = 0.024$	$p = 0.001$
PQ10	$p = 0.051$	$p = 0.062$	$p = 0.958$
PQ11	$p = 0.005$	$p = 0.273$	$p = 0.028$
PQ12	$p = 0.009$	$p = 0.482$	$p = 0.068$
PQ17	$p = 0.073$	$p = 0.073$	$p = 0.832$

(6) 約 3 分間休憩.

(7) (2) ~ (6) を 6 回 (入力手法 3 条件 $\times$ 2 回) 繰り返す.

5.3 結果

5.3.1 臨場感

図 3 は、Witmer and Singer Questionnaire (改変) の 18 個の質問結果を示している. フリッドマン検定の結果, PQ1, 2, 3, 4, 6, 8, 10, 11, 12, 17 において条件間で有意な差が見られた. 有意差が認められた項目について, Holm 補正を用いた Wilcoxon の符号付順位検定による事後分析を実施した (表 2) .

5.3.2 主観的作業負荷

図 4 は、各入力手法の NASA-RTLX スコアの 6 つのサブスケールを 100 点に換算したスコアと全体のスコアを示している. フリッドマン検定により、身体的要求 ($\chi^2(2) = 14.225, p = 0.001$), 作業成績 ($\chi^2(2) = 9.215, p = 0.010$), フラストレーション ($\chi^2(2) = 8.630, p = 0.013$) に対して有意な結果となった. 事後分析は、Holm 補正を用いた Wilcoxon の符号付順位検定を用いて実施した. 身体的要求は踵上げより握りこみで有意に低く ($p = 0.002$, Cohen の $r = 0.643$), 腕振りより握りこみで有意に低かった ($p = 0.003$, Cohen の $r = 0.721$). 作業成績は踵上げより腕振り有意に低く ($p = 0.014$, Cohen の $r = 0.598$), 踵上げより握りこみで有意に低かった ($p = 0.043$, Cohen の $r = 0.480$). 努力は踵上げより腕振りで有意に低かった ($p = 0.007$, Cohen の $r = 0.627$).

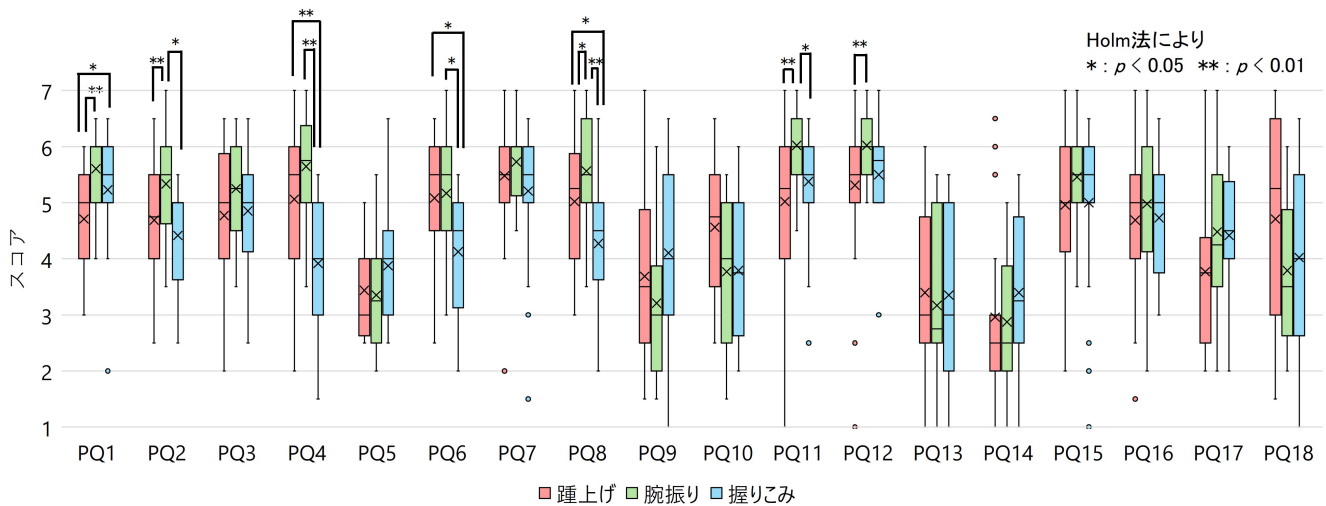


図 3 実験 1 の臨場感に関するアンケートの結果

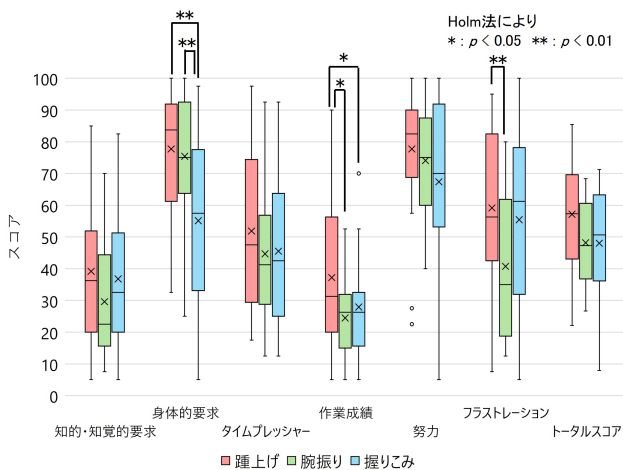


図 4 実験 1 の NASA-RTLX の結果

5.4 考察

跳上げ動作は、PQ1「あなたは移動をどの程度コントロールできましたか？」について腕振り、握りこみと比較して有意に低い結果であり、作業成績について腕振り、握りこみと比較して有意に高い結果となった。この結果より、跳上げ動作は他の手法と比較して、自分で移動をコントロールできたという感覚が小さいことがわかる。実際の歩行であれば大腿部を動かすが、跳上げ動作は下腿部しか動かさず、実際の歩行とは異なる動作であるため、歩行感を感じるが少し違和感もあるというコメントが得られた。一方で、PQ6「バーチャル環境での体験は、実世界での体験とどの程度整合性があったように感じましたか？」の評価が高いことからわかるように、実世界に近い感覚で歩行できることから跳上げ動作を好むとコメントした参加者は多かった。

腕振り動作は、PQ2「バーチャル環境とのインタラクションはどの程度自然なように思えましたか？」、PQ8「バーチャル環境の中で動き回っている感覚はどの程度あ

なたにとって説得力のあるものでしたか？」、PQ11「バーチャル環境での体験にどの程度早く慣れましたか？」について跳上げ、握りこみと比較して有意に高い結果であり、NASA-RTLX の「フラストレーション」について跳上げと比較して有意に低い結果となった。腕振り動作は、実際の歩行に使用する動作の一部であるため、実際に歩いているような感覚が高くなったと考える。

握りこみ動作は、PQ4「バーチャル環境の中で動き（移動）を制御する方法はどの程度自然でしたか？」、PQ6「バーチャル環境での体験は、実世界での体験とどの程度整合性があったように感じましたか？」、PQ8「バーチャル環境の中で動き回っている感覚はどの程度あなたにとって説得力のあるものでしたか？」において、跳上げ、腕振りと比較して有意に低い結果となった。この結果より、握りこみ動作は、VR空間内の移動手段としての自然さは他の手法と比べて低いことがわかる。

また、NASA-RTLX の「身体的要求」の結果から、握りこみは跳上げと腕振り動作と比べて身体的負荷が小さいことがわかる。ただしコメントでは、300 [BPM] のようにテンポが速くなると握りこみが一番身体的負荷が大きかったという声が多かった。

6. 実験 2

6.1 目的・内容

本実験では、「歩くような速度での入力」、「全速力での入力」の 2 種類の入力テンポ条件で、3 種類の入力手法（跳上げ動作、腕振り動作、握りこみ動作）を使用した場合の具体的な入力テンポを調査する。

実験では、無作為に選定された入力手法を用いて仮想空間内で 100 [m] の歩行タスクを実施した。歩行経路は 50 [m] の直線であり、50 [m] の歩行により入力テンポを切り替え、再び同じ直線を歩行させた。

実験時間は約 10 分で、24 名の参加者（平均年齢 21.5 歳、標準偏差 0.77、女性 6 名）が参加した。参加者のうち、18 名は「これまでに数回 VR を体験したことがある」、6 名は「週に 2,3 回程度使用している」と回答した。評価項目は、50 [m] を歩行する際の入力回数と、その歩行時間から算出した入力テンポである。

6.2 手順

- 実験の手順を以下に示す。
- (1) 参加者は各入力手法に慣れるための練習を実施。
 - (2) ランダムに選定された 1 つの入力手法を割り当て。
 - (3) 参加者には「歩くような速度」または「全速力」のテンポ条件をランダムに指示。
 - (4) 指示されたテンポ条件に従い、割り当てられた入力手法で 50 [m] を歩行。歩行終了後、テンポ条件を切り替え、再び 50 [m] を歩行。
 - (5) 約 3 分間休憩。
 - (6) (2) ~ (5) を 3 回（入力手法 3 条件）について繰り返す。

6.3 結果

図 5 は、各入力手法において各テンポ条件で実際に計測された入力テンポを示している。フリードマン検定により、歩くような速度 ($\chi^2(2) = 9.250, p = 0.010$)、全速力 ($\chi^2(2) = 24.333, p < 0.001$) に対して有意な結果となった。

事後分析では Holm 補正を用いた Wilcoxon の符号付順位検定を実施した。歩くような速度は踵上げより腕振りで有意に低く ($p = 0.043$, Cohen の $r = 0.472$)、握りこみより腕振りで有意に低かった ($p = 0.034$, Cohen の $r = 0.519$)。全速力は踵上げより腕振りで有意に低く ($p = 0.001$, Cohen の $r = 0.694$)、握りこみより踵上げで有意に低く ($p = 0.036$, Cohen の $r = 0.432$)、握りこみより腕振りで有意に低かった ($p < 0.001$, Cohen の $r = 0.851$)。

6.4 考察

腕振り動作は、他の入力手法と比較して入力テンポが有意に遅かった。全速力のときにこの差はより大きくなり、握りこみ > 踵上げ > 腕振りの順にテンポが遅くなった。この結果は、腕振り動作は 1 回の入力に要する時間が長く、握りこみ動作は移動を必要とせず速く入力できたためと考えられる。このように、入力動作が異なると自然と入力する際のテンポそのものも変わってくるのがわかる。

7. 実験 3

7.1 目的・内容

本実験では、異なる入力手法を用いて特定のテンポで歩行した際、入力手法ごとに期待される仮想空間内での歩行（移動）速度を上下法によって明らかにする。使用した入力手法は踵上げ動作、腕振り動作、握りこみ動作の 3 種類

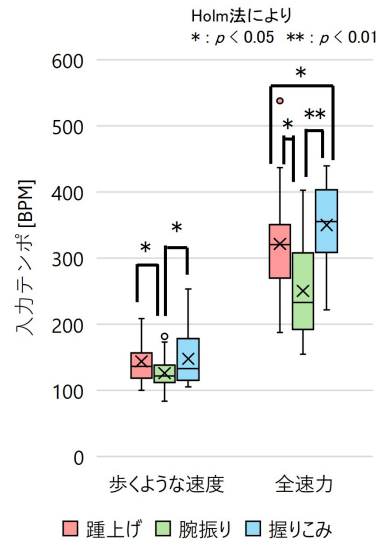


図 5 実験 2 の結果

表 3 入力テンポ毎に設定した歩行速度

入力テンポ [BPM]	103	119	138	152	300
最低速度 [m/min]	22.6	31.6	45.1	56.4	98.6
最高速度 [m/min]	159.6	223.4	319.2	399.0	802.5

であり、入力テンポは 103, 119, 138, 152, 300 [BPM] の 5 種類とした。

無作為に選定されたテンポと入力手法を用い、動作に基づく期待される歩行速度に対して、仮想空間で実際に歩行した際の速度の遅速を報告するタスクを繰り返して行った。実験では、前半 5 秒間は暗闇の中を歩行してバイアスを排除し、期待される歩行速度を想像させた。後半 5 秒間は仮想空間を一定の歩行速度で歩行し、その速度の遅速を回答させた。

歩行速度は、各テンポごとに設定された最低速度と最高速度 (表 3) のいずれかからランダムに開始した。回答に基づいて速度が更新され、次の試行が実施された。この速度更新は式 (6) に従った。更新された歩行速度 V' 、現在の歩行速度 V 、増減量 Δw を示す。

$$V' = (1 \pm \Delta w) \times V \tag{6}$$
$$\Delta w = 0.15$$

実験の所要時間は約 1 時間 40 分であり、12 名（平均年齢 21.8 歳、標準偏差 0.71、女性 1 名）が参加した。参加者のうち、7 名が「これまでに数回体験したことがある」、5 名が「週に 2,3 回程度使用している」と回答し、VR の使用経験を有していた。

本実験の評価は、上下法によって得られた歩行速度を基準とした。一つの入力手法と入力テンポの組み合わせについて、上昇系列の下降系列の各 3 回ずつ歩行速度を記録した。これらの 6 つの歩行速度の平均値を、該当する入力テンポおよび入力手法で期待される歩行速度と定義する。

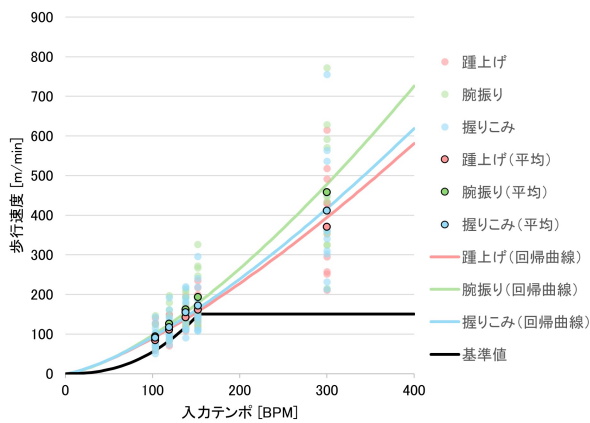


図 6 入力テンポと期待する歩行速度

7.2 手順

実験の手順を以下に示す。

- (1) 参加者は各入力手法に慣れるための練習を実施。
- (2) 実験者が入力手法と入力テンポを無作為に決定。
- (3) 実験者が上昇系列または下降系列を無作為に決定。
- (4) 参加者が指定されたテンポで動作を実施。
- (5) 参加者が暗闇の中で期待する歩行速度を想像 (5 秒間)。
- (6) 参加者が仮想空間を歩行 (5 秒間)。
- (7) 参加者が期待する歩行速度に対する遅速を回答。
- (8) 実験者が回答に基づき歩行速度を更新。
- (9) (3) ~ (8) を歩行速度が収束するまで実施。
- (10) 参加者が約 3 分間休憩。
- (11) (2) ~ (10) を 15 回 (入力手法 3 条件 × 入力テンポ 5 条件) 繰り返す。

7.3 結果

入力手法ごとに累乗近似した期待歩行速度を図 6 に示す。図 6 の黒い基準値の線は、現実世界の人の歩行をもとに 3 章で定義した歩行アルゴリズムによるテンポと歩行速度の関係を、色の付いた実線は計測されたデータから求めた近似曲線である。1 要因分散分析 (ANOVA) を行った結果、入力手法の間に有意な差は見られなかった。

7.4 考察

実験の結果、入力テンポが速くなると入力手法ごとに期待される歩行速度が変わってくるのがわかる。有意差はないものの、どの入力テンポにおいても、腕振り動作が最も速い期待歩行速度を示し、次いで、握りこみ動作、踵上げ動作の順となった。一方で、図 6 の歩行アルゴリズムから算出される基準値 (黒いライン) は今回計測された踵上げ、腕振り、握りこみのいずれの近似曲線よりも下に位置しており、仮想空間で期待される歩行速度が現実世界の歩行よりも速いことが示唆された。

実世界では着座状態で歩くことは不可能であり、着座で

行う動作は本来の歩行とは異なる速度期待を生む可能性がある。本実験では、着座での動作入力が行われたことから、立位での実際の歩行と異なる結果が生じたことが考えられる。この仮説を明らかにするためには、今後、立位と着座での期待速度の違いについても確認する必要がある。

また、仮想空間では理論上無限に歩行速度を上げることが可能であり、現実世界で期待される歩行速度とは異なる基準が生まれる。特に、高いテンポ (300 [BPM]) の場合、この仮想空間の特性が顕著に影響したと考えられる。

HMD の視野角は人間の視野角よりも狭いため、視覚的な情報が遅く感じられた可能性がある。仮想空間では移動速度が遅く知覚されやすい [24] ため、Caramenti らの研究 [25] でも、全画面、中心視野、周辺視野の 3 条件の視野で視覚的な移動速度が遅く知覚され、特に中心視野の場合に有意に移動速度が遅く知覚されたと報告された。この視覚的特性が、仮想空間での速度知覚に影響を及ぼし、実世界よりも速い期待歩行速度を生じさせた可能性がある。

以上のような要因を踏まえると、仮想空間での歩行速度を調整するアルゴリズムや設計は、仮想空間の特性とユーザの動作特性を考慮して再定義する必要がある。特に、入力手法ごとの期待される歩行速度とテンポとの関係を反映した動的な調整が重要となる。

また、腕振りは他の入力より大きな動作で行うため、期待歩行速度がより速くなった可能性もある。ユーザが仮想空間での歩行速度を知覚する際、動作のダイナミズムが重要な役割を果たしている可能性についても今後検討が必要である。

8. むすび

本稿では、NUI に基づく VR ロコモーション手法の入力特性を明らかにするため、踵上げ、腕振り、握りこみの 3 つの動作を比較調査した。実験では、臨場感・主観的作業負荷、入力テンポ、および入力テンポごとに期待される歩行速度の評価実験を行った。踵上げ動作はユーザに好まれる一方で、腕振り動作と比較して自分が歩行しているという臨場感が低く、フラストレーションが高くなった。腕振り動作は、ロコモーションとして自然な動作であり、ユーザに高い臨場感を与えた。握りこみ動作は、身体的要求が低く楽な入力である一方で、臨場感が低くなった。ただし、テンポが速くなると身体的要求は最も高くなった。さらに、入力手法ごとに期待する歩行速度を調査したところ、腕振り動作が最も速い結果となり、入力手法ごとに適した歩行速度を設定する必要性を示唆する結果となった。

参考文献

- [1] Doug A. Bowman, et al.: 3D user interfaces: theory and practice (2004).

- [2] Ivan E. Sutherland: A head-mounted three dimensional display; Seminal Graphics: Pioneering Efforts That Shaped the Field, **Vol.1**, pp.295-302 (1998).
- [3] Eurographics Jonathan, et al.: Redirected Walking; Proceedings of Eurographics (2001).
- [4] Moloud Nasiri, et al.: Changes in Navigation over Time: A Comparison of Teleportation and Joystick-Based Locomotion; ACM Trans. Appl. Percept. **Vol.20** (2023).
- [5] Tan Chek Tien, et al.: Understanding User Experiences Across VR Walking-in-place Locomotion Methods; Proceedings of the 2022 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (2022).
- [6] Niels Christian Nilsson, et al.: Natural Walking in Virtual Reality: A Review; **Vol.16** (2018).
- [7] Yun Suen Pai, et al.: Armswing: using arm swings for accessible and immersive navigation in AR/VR spaces; pp.189-198 (2017).
- [8] Shohei Mori, et al.: Point & Teleport with Orientation Specification, Revisited: Is Natural Turning Always Superior?; Journal of Information Processing, **Vol.31**, pp.392-403 (2003).
- [9] Liwei Chan, et al.: Seated-WIP: Enabling Walking-in-Place Locomotion for Stationary Chairs in Confined Spaces; Proceedings of the 2024 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (2024).
- [10] Renato Alexandre Ribeiro, et al.: Investigating Virtual Reality Locomotion Techniques with Blind People; Proceedings of the 2024 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (2024).
- [11] Jeremy D. Wendt, et al.: GUD WIP: Gait-Understanding-Driven Walking-In-Place; 2010 IEEE Virtual Reality Conference (VR), pp.51-58 (2010).
- [12] Mel Slater, et al.: Taking steps: the influence of a walking technique on presence in virtual reality; **Vol.2**, pp.201-219 (1995).
- [13] Morgan McCullough, et al.: Myo arm: swinging to explore a VE; Proceedings of the ACM SIGGRAPH Symposium on Applied Perception, SAP '15, pp.107-113 (2015).
- [14] Bhuvanewari Sarupuri, et al.: Trigger Walking: A low-fatigue travel technique for immersive virtual reality, 2017 IEEE Symposium on 3D User Interfaces (3DUI), pp.227-228 (2017).
- [15] Niels Christian Nilsson, et al.: The Perceived Naturalness of Virtual Locomotion Methods Devoid of Explicit Leg Movements; Proceedings of Motion on Games, MIG '13, pp.155-164 (2013).
- [16] Alexandra Kitson, et al.: NaviChair: Evaluating an Embodied Interface Using a Pointing Task to Navigate Virtual Reality; Proceedings of the 3rd ACM Symposium on Spatial User Interaction, SUI '15, pp.123-126 (2015).
- [17] D. W. GRIEVE, et al.: The relationships between length of stride, step frequency, time of swing and speed of walking for children and adults; Ergonomics, **Vol.9**, No.5, pp.379-399 (1966).
- [18] 山崎昌広 他: Stereotyped pattern of lower limb movement during level and grade walking on treadmill.; The Annals of physiological anthropology, **Vol. 3**, No. 4, pp. 291-296 (1984).
- [19] 山崎昌広: 日本人の歩行; 佐藤方彦 (編): 日本人の生理; pp.138-155, 朝倉書店 (1988).
- [20] 山崎昌広: 空間と人間行動; 乾正雄 他 (編): 新建築学大系; 第 11 巻, p.167, 彰国社 (1982).
- [21] Sandra G. Hart, et al.: Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of Empirical and Theoretical

Research; Peter A. Hancock, et al.: Human Mental Workload; **Vol. 52**, pp. 139-183 (1988).

- [22] 芳賀繁 他: 日本語版 NASA-TLX によるメンタルワークロード測定; 人間工学, **Vol.32**, No.2, pp.71-79 (1996).
- [23] Bob G. Witmer, et al.: Measuring Presence in Virtual Environments: A Presence Questionnaire; Presence: Teleoperators and Virtual Environments, **Vol.7**, No.3, pp.225-240 (1998).
- [24] Martina Caramenti, et al.: Matching optical flow to motor speed in virtual reality while running on a treadmill; PLOS ONE (2018).
- [25] Martina Caramenti, et al.: Influence of the Size of the Field of View on Visual Perception While Running in a Treadmill-Mediated Virtual Environment; Frontiers in Psychology, **Vol.10** (2019).

付 録

A.1 実験 1 臨場感に関する評価項目

表 A.1 Witmer and Singer Questionnaire (改変)

PQ1: あなたは移動をどの程度コントロールできましたか?
PQ2: バーチャル環境とのインタラクションはどの程度自然なように思えましたか?
PQ3: バーチャル環境の視覚的な面が没入感にどれくらい影響していましたか?
PQ4: バーチャル環境の中で動き(移動)を制御する方法はどの程度自然でしたか?
PQ5: あなたの視覚・運動感覚などの多様な感覚から受け取っている情報はどの程度一貫性がなかったり、関連がないように感じましたか?
PQ6: バーチャル環境での体験は、実世界での体験とどの程度整合性があったように感じましたか?
PQ7: あなたが行った行動に対する反応として次に何が起きるかを予測できましたか?
PQ8: バーチャル環境の中で動き回っている感覚はどの程度あなたにとって説得力のあるものでしたか?
PQ9: バーチャル環境とのインタラクションに用いる移動手法はどれくらい気が散るものでしたか?
PQ10: あなたの行動と期待される結果との間にどの程度の遅延があったように感じましたか?
PQ11: バーチャル環境での体験にどの程度早く慣れましたか?
PQ12: 体験の終了時に、バーチャル環境での移動にどの程度習熟したように感じましたか?
PQ13: HMD の映像面での品質は課したタスクやそれに必要な活動を行うのにどの程度妨げになったり気が散ったりしましたか?
PQ14: デバイスは課したタスクやほかの活動の遂行をどの程度妨げましたか?
PQ15: 「移動手段」よりも、課されたタスクやそれに必要な行動にどの程度集中できましたか?
PQ16: 時間感覚を忘れてしまうほど実験タスクに没頭していませんか?
PQ17: 入力テンポに対して移動速度は自然なように感じましたか?
PQ18: 指定されたテンポで入力するのは難しかったですか?