



## ジェスチャに基づく VR ロコモーション手法の比較調査

北浦悠佑\*<sup>1</sup> 中村文彦\*<sup>1</sup> 片岡佑太\*<sup>2</sup> 柴田史久\*<sup>1</sup> 木村朝子\*<sup>1</sup> 森尚平\*<sup>3</sup>

### Comparisons of Gesture-Based Virtual Reality Locomotion Approaches

Yusuke Kitaura\*<sup>1</sup>, Fumihiko Nakamura\*<sup>1</sup>, Yuta Kataoka\*<sup>2</sup>,  
Fumihisa Shibata\*<sup>1</sup>, Asako Kimura\*<sup>1</sup>, Shohei Mori\*<sup>3</sup>

**Abstract** – Virtual reality (VR) applications require effective control mechanisms for users to move through vast virtual spaces. Locomotion in VR is an important research area, and a natural and intuitive interface to move around is required. This study investigates gesture-based locomotion interfaces in limited spaces or a seated condition. We compare approaches that use heel-raising, arm-swinging, and gripping motions that convert input tempo into walking speed. The results show that VR motion sickness is rarely observed in any of the approaches, the heel-raising motion is preferred the most, the arm-swinging motion is considered natural, and the gripping motion has low loads at a low tempo but high loads at a high tempo.

**Keywords** : VR, Locomotion, Gestures, Sense of Presence, Simulator Sickness

#### 1. はじめに

多くの VR アプリケーションでは、ユーザが広大な仮想空間を移動・横断するために、何らかの制御機構が必要とされている。そのため、VR 空間の移動を行うロコモーションは VR において重要な研究分野である [1]。VR 空間で自然なロコモーションを実現するには、いくつか重要な課題が存在する。その一つが、無限大に広がる可能性のある仮想空間と、通常ははるかに小さい有限の現実空間の間にある大きさの不一致である。VR が日常生活で日常的に利用されるようになると、この環境の不一致に対処できるインタラクション技術が必要不可欠となる。

解決方法の一つとして、その場で行うことができる VR ロコモーション手法を使用する方法がある。ユーザは限定された物理的領域にとどまりながら、無限の仮想領域内を歩き回ることができる。実際の歩行動作の一部である腕振り動作や足踏み動作を入力とするジェスチャベースの VR ロコモーション手法も有用である。足踏み動作は、実際の歩行動作に近いので、歩行経験が自然に知覚される可能性があることが示唆されている [2]。腕振り動作でも同様に、比較的自然的な歩行体験が実現できると示唆された [3]。

一般にジェスチャベースの VR ロコモーション手法

では、視覚刺激と現実の動きが比較的一致するため、ジョイスティックベースでの移動時に生じやすいシミュレーション酔いが起きづらい [3] [4]。しかし、立位でのジェスチャベースでの入力には、制限のある空間での使用を想定しているにも関わらず身体を大きく動かす必要がある、足踏みの最中に徐々に移動してしまうといった理由で安全性が低いことが問題になっている。そこで、本研究では、制限のある空間で行うことができるジェスチャベースのロコモーションを安全に行える座位状態で行った時のシミュレータ酔い、主観的作業負荷、臨場感について比較を行い、次のことを明らかにした。

- 全ての入力手法でシミュレータ酔いはみられなかった。
- 主観的作業負荷に関して、全ての条件において握りこみ動作の速いテンポでの入力が一番負荷が高く、握りこみ動作の遅いテンポでの入力が一番負荷が低い結果となった。
- 歩行動作としての自然さは腕振り動作が最も高い結果となった。
- 踵上げ動作は動作としての自然さが高く、ユーザから最も好まれる結果となった。

#### 2. 関連研究

ジェスチャベースの VR ロコモーション。ジェスチャベースの VR ロコモーション手法には、踵上げ動作や腕振り動作が含まれる。物理的に静止した状態で、身体を使って一般的な歩行動作の一部を入力とするジェ

\*1: 立命館大学大学院 情報理工学研究科

\*2: 立命館大学 OIC 総合研究機構

\*3: グラーツ工科大学

\*1: Graduate School of Information Science and Engineering, Ritsumeikan University

\*2: Open Innovation & Collaboration Research Organization, Ritsumeikan University

\*3: Graz University of Technology

スチャベースのVRロコモーション手法は、一般に視覚情報と前庭の感覚との齟齬を抑えることができるためシミュレーション酔いが発生しづらい [4].

**足踏み動作.** 足踏み動作を用いた入力は、概念的に現実の歩行に近い動作を追跡する。この手法は、便利で安価に使用することができる [5], ボタンを押すことで移動を行う手法と比較して、仮想空間で「そこにいる」という感覚を高めることができる [6], ユーザが特定の場所に移動する必要があるタスクにおいてパフォーマンスという点で実際の歩行に匹敵する可能性がある [7] といった利点がある。

**腕振り動作.** 腕振りのトラッキングに基づくインタフェース [8] は歩行バイオメカニクス [9] に基づいており、実装が簡単で高い精度を示す。例えば, Myo アーム [8] はウェアラブルアームバンドを使用し, 内臓の慣性計測ユニットから加速度と姿勢データを使用して腕の振りを追跡する。Myo アームは, 腕振り動作から仮想空間での移動に変換することに成功し, 実際の歩行に似た近く動作を実現することが示された。

**ジェスチャベースのVRロコモーション手法の比較.** Chek らの研究 [4] では, 立位の状態で頭を動かす動作, 腕振り動作, 足踏み動作, 全身の動作の4種類のジェスチャでのロコモーションの比較を行った。この研究では, シミュレーション酔いに関して腕振り動作の条件で最も酔いが見られ, 足踏み動作の条件で酔いが最も見られない結果となった。好みに関しては, 足踏み動作が最も肯定的であると回答された。しかし, 立位でのジェスチャは実験の参加者は空間的に制限されているような感じがした, 安全でないといった感情を強調し, 空間的な警戒心が必要であると回答された。特に, 足踏み動作において, 動作をするにつれて物理的な壁にぶつかりそうになるほど現実の入力位置がずれたと報告された。

そこで, 本研究では入力位置が安定する座位状態でのジェスチャベースのVRロコモーション手法を比較する。本研究で比較を行ったジェスチャは, 踵上げ動作, 腕振り動作, 握りこみ動作の3つの入力手法である。足踏み動作ではなく, 踵上げ動作を採用した理由は, 座位状態で身体を動かすにあたって, 足を地面から完全に離す足踏み動作は長時間行うことは肉体的負荷が大きく困難であると考えたためである。また, 握りこみ動作は, 腕振り動作を最小限の動作に抑えた動作として採用した。

### 3. 歩行アルゴリズムとジェスチャ入力

#### 3.1 歩幅の算出

実際に歩くとき, 歩調を調節することで移動速度を調整することができる。例えば, 早足で移動すれば速

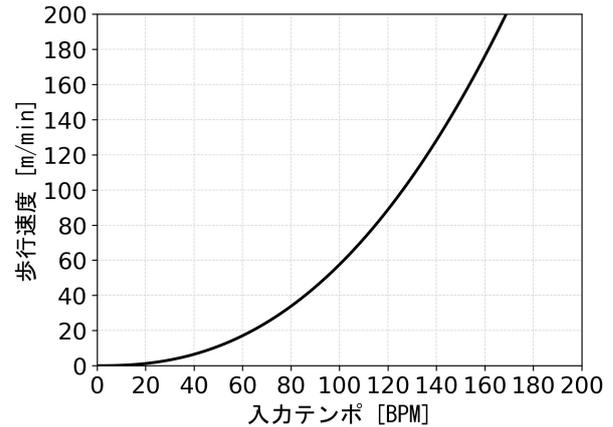


図1 入力テンポと歩行速度の関係  
Fig.1 Relationship between Input Tempo and Walking Speed.

い速度で移動できる。本研究で作成した歩行アルゴリズムは, 同じように早いテンポで動作することで, 早い速度での移動を行えるものである。本研究では, 実際の歩行の右左と足を出して歩く時間と右左と入力する時間 (例えば, 腕振り動作であれば右左と腕を振る時間) が同じであるとして歩行アルゴリズムを作成した。

本稿では  $I(n)$  を  $n$  回目の入力した時間,  $T$  を入力テンポ [BPM],  $V$  を歩行速度 [m/min],  $L$  を一歩分の距離 [cm],  $C$  を歩調 [steps/min],  $P$  を一歩あたりの時間 [min] とする。また, ここでの入力テンポは (1) 式から入力を入力テンポへ変換する。

$$T = \frac{1}{I(n) - I(n-1)} \quad (1)$$

VR空間の歩行には, 一歩分の距離を歩行速度と一歩あたりの時間を用いて, 与えられた歩行速度で一歩あたりの時間移動することで実装を行う。この実装を行うために, 入力テンポから歩行速度と一歩あたりの時間を算出する。

歩行速度に関して, 人間の歩行速度は速度の増大に伴って歩幅と歩調が曲線的な増加を示すことが知られている [10,11]. 成人男性について歩調は歩行速度から (2) 式の回帰式で算出できることが示されている [12].

$$C = 18.59 \times V^{0.42} \quad (2)$$

そこでこの式を用いて入力テンポを歩行速度に変換する。(2)式において, 歩行速度について解き, 歩調と入力テンポが等しいとすると (3) 式となる (図1).

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

一歩あたりの時間は, 歩調の逆数で求められる。また, 歩調と入力テンポは等しいことより一歩あたりの時間は (4) 式となる。

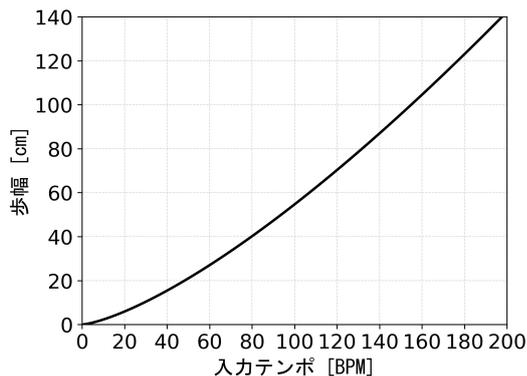


図2 入力テンポと歩幅の関係  
Fig. 2 Relationship between Input Tempo and Stride Length.

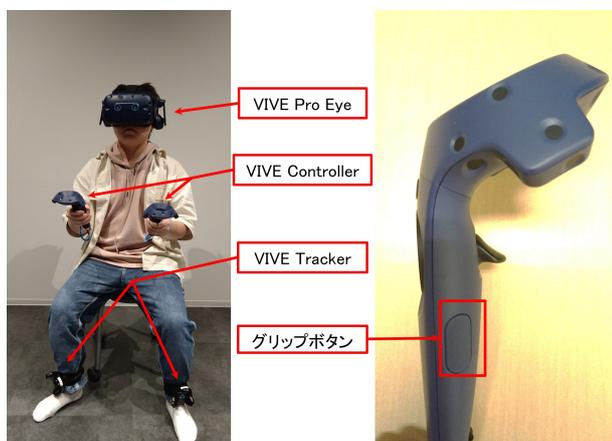


図3 実験に用いたデバイス  
Fig. 3 Devices Used in the Experiment

$$P = \frac{1}{T} \quad (4)$$

以上から、一步分の距離は入力テンポから (5) 式で計算される (図 2)。

$$L = 9.5 \times 10^{-2} \times T^{1.38} \quad (5)$$

この歩行アルゴリズムにより、速いテンポでの入力では速い速度で移動することができ、遅いテンポの入力では遅い速度での移動を行うことができる。

### 3.2 ジェスチャ入力

本研究で使用したジェスチャは座位状態での踵上げ動作、腕振り動作、握りこみ動作の3種類の動作である。座位を採用した理由は、立位での入力では特に足踏み動作で立ち位置が徐々にずれてしまい限られた範囲では危険であるためである。踵上げ動作を採用した理由は、座位での足踏み動作は、肉体的負荷が高く長時間行うことが困難であるためである。握りこみ動作は、腕振り動作の最小限の動作として採用している。腕振り動作には、前腕を上下に振る動作と、上腕を前後に振る動作がある。本研究のジェスチャは、踵上げ

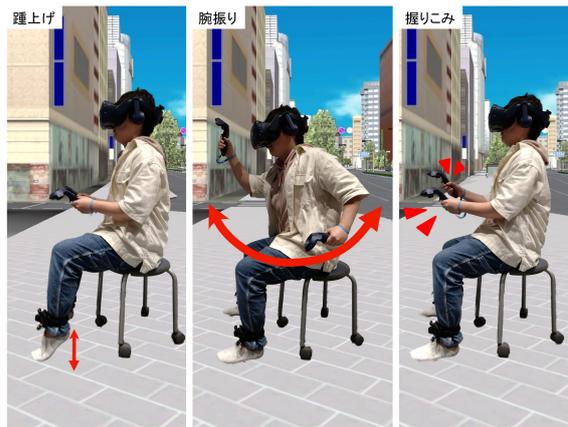


図4 入力手法  
Fig. 4 Input Method.

動作を踵を上下に動かす動作、腕振り動作を上腕を前後に振る動作、握りこみ動作を左右交互に握る動作とした (図 4)。

### 3.3 システム構成と実装

本研究で使用した PC は、CPU に Intel Core i5-9400、GPU に NVIDIA GeForce RTX 3060 Ti を使用した。HMD は VIVE Pro Eye を使用し、トラッカーは VIVE Tracker を、コントローラは VIVE Controller を使用した (図 3)。VR 環境の構築には、ゲームエンジンである Unity 2021.3.25f1 を使用した。VR 空間として、3D 都市モデルの ZENRIN City [13] を使用した。歩行アニメーションに関しては Unity Technologies Japan [14] の公式キャラクタであるユニティちゃん [15] の歩行アニメーションを使用した。

本研究で使用した踵上げ動作、腕振り動作の入力の検出には足に取り付けた2つの VIVE Tracker と手に持った2つの VIVE Controller を使用した。踵上げ動作は VIVE Tracker を左右交互に 95 [cm/s] の速度で移動することで入力とした。握りこみ動作は VIVE Controller を左右交互に 35 [cm/s] の速度で移動することで入力とした。これらの速度は関連研究 [4] の足踏み動作と腕振り動作の入力を検知する最低速度と最大速度の中央値を採用した。また、握りこみ動作には VIVE Controller のグリップボタン (図 3) の押し込みを使用した。このグリップボタンが左右交互で押し込まれることにより入力とする。

## 4. 実験

### 4.1 目的・内容

本実験の目的は、踵上げ動作、腕振り動作、握りこみ動作でのロコモーションの特性を明らかにすることである。実験は、座位でコントローラを握る姿勢を基本姿勢として行った。実験条件は、入力手法として踵上げ動作、腕振り動作、握りこみ動作の3条件を、入



図5 実験で使用した仮想空間

Fig. 5 Virtual Environment Used in the Experiment.

表1 シミュレータ酔いに関する質問票  
Table 1 Simulator Sickness Questionnaire.

SQ1	一般的な不快感がある
SQ2	疲労感がある
SQ3	眼が疲れている
SQ4	眼の焦点がぼける
SQ5	頭痛がする
SQ6	頭が重い
SQ7	眼がかすむ
SQ8	(眼を閉じた状態で)フラットするようなめまい感がある
SQ9	自分や周囲が回転するようなめまいがある

カテンポとして 103, 152, 300 [BPM] の 3 条件である。決定された入力テンポは歩行前に事前に実験参加者に知らされ、指定された入力テンポの感覚が分かるように、入力のタイミングで音が鳴るようになっており、実験参加者には音に合わせて入力するように指示している。実験タスクは、ランダムに決定された入力手法と入力テンポで 100 [m] 直進移動を行うことである。実験参加者が見ている映像は一人称視点である。実験で用いた歩行経路の鳥観図と側面図を図 5 に示す。実験の評価としてシミュレータ酔い、主観的作業負荷、臨場感に関する質問を行った。質問には VR Questionnaire Toolkit [16] を用いて VR 画面上で回答させた。シミュレータ酔いには Virtual Reality Sickness Questionnaire (VRSQ) [17, 18](表 1) を使用し、9 項目の質問になし (0)~激しく感じる (3) の 4 段階で回答させた。また、主観的作業負荷については NASA-TLX [19, 20](表 2) を使用し、100 点を最高点とした 6 項目の質問に回答させた。臨場感については Witmer and Singer Questionnaire [21] を改変したもの (表 3) を使用し、16 項目の質問に全く当てはまらない (1)~非常に当てはまる (7) の 7 段階のリッカート尺度で回答させた。

#### 4.2 条件

本実験では図 6 のように最低速度と最高速度を設定している。これらの最低速度、最高速度は人間の歩行の遅い速度が 60 [m/min], 早足の速度が 150 [m/min] とされている [22] ことから、これらの値を用いている。これは歩行速度をこれらの最低速度から最大速度の範囲内に抑えるためである。

表2 主観的作業負荷に関する質問票  
Table 2 Subjective Workload Questionnaire.

WR1	どの程度の知的・知覚的活動(考える, 決める, 計算する, 記憶する, 見るなど)を必要としましたか
WR2	どの程度の身体的活動(押す, 引く, 回す, 制御する, 動き回るなど)を必要としましたか
WR3	仕事のペースや課題が発生する頻度のために感じる時間的切迫感ほどの程度でしたか?
WR4	作業指示者(またはあなた自身)によって設定された課題の目標をどの程度達成できたと思いますか
WR5	作業成績のレベルを達成・維持するために、精神的・身体的にどの程度一生懸命に作業しなければなりませんでしたが
WR6	作業中に、不安感、落胆、いらいら、ストレス、悩みをどの程度感じましたか

表3 臨場感に関する質問票  
Table 3 Sense of Presence Questionnaire.

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	バーチャル環境の中で動き(移動)を制御する方法はどの程度自然でしたか?
PQ4	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される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?
PQ5	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つたように感じましたか?
PQ6	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?
PQ7	バーチャル環境の中で動き回っている感覚ほどの程度あなたにとって説得力のあるものでしたか?
PQ8	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?
PQ9	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つたように感じましたか?
PQ10	バーチャル環境での体験にどの程度早く慣れましたか?
PQ11	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?
PQ12	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つたり気が散つたりしましたか?
PQ13	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?
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したか?

103, 152, 300 [BPM] の 3 つの入力テンポで比較を行う。これらのテンポは、入力テンポと歩行速度の関係 (3) 式と人の歩行の最低速度、最高速度より導いた (表 4)。300 [BPM] は各入力手法で全力で入力した際の入力テンポから、すべての手法で入力できる限界

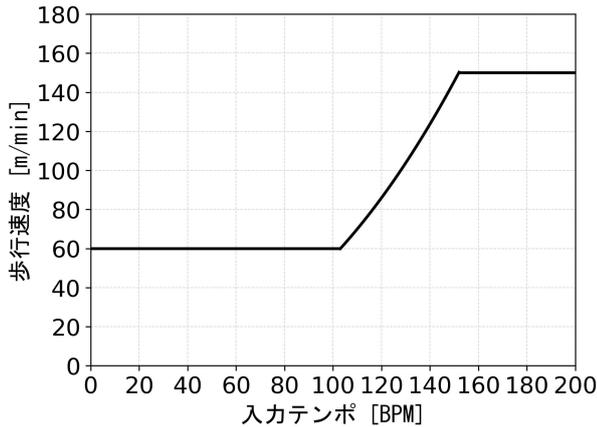


図6 実験での入力テンポと歩行速度の関係  
Fig.6 Relationship between Input Tempo and Walking Speed in Experiments.

表4 歩行速度と入力テンポ  
Table 4 Walking Speed and Input Tempo.

	最低速度	最高速度
歩行速度 (m/min)	60	150
歩調 (steps/min)	103	152

値を使用した。

### 4.3 手順

実験では事前に各入力手法、入力テンポを組み合わせた条件について、入力手法を十分に練習させた。練習後はランダムに決定された条件を元に100 [m] 移動するタスクを行わせた。タスク終了後、体験した条件に対して、酔い、主観的作業負荷、臨場感について、HMD 上に表示された合計 31 項目の質問に回答させた。回答後、疲労感や酔いがなくなるまで、最低1分以上休憩させ、残りの条件についてもすべてのパターンで繰り返し行わせた。実験終了後、実験全体についてのコメントを聴取した。実験は1時間程度であった。一連の手順は下記の通りである。

- (1) 各条件（入力手法、入力テンポ）について十分に練習を行わせる
- (2) ランダムに条件を決定する
- (3) 提示した条件でタスクを行わせる
- (4) 体験した条件に対する質問に回答させる
- (5) 疲労感、酔いがなくなるまで休ませる（1分以上）
- (6) 残りの条件についても (2)～(5) を繰り返す
- (7) コメントを聴取する

### 4.4 結果

実験結果の図に示している G は握りこみ動作、A は腕振り動作、L は踵上げ動作を数字は入力テンポを表す。具体的には、G103 は握りこみ動作を 103

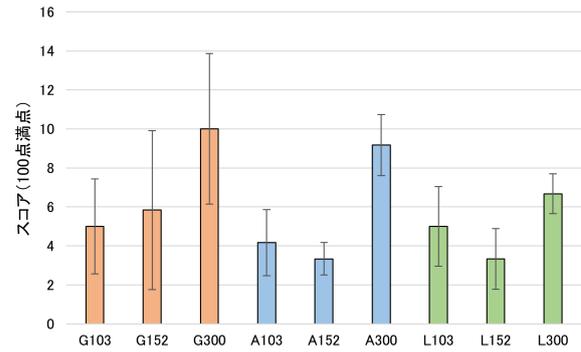


図7 VRSQの結果  
Fig.7 VRSQ Results.

[BPM] で行った際の結果を表す。エラーバーは標準誤差を示す。

#### 4.4.1 シミュレータ酔い

酔いに関して VRSQ の結果は図7のようになった。この結果より、全条件で平均スコアが10点以下となっており、最高点100点に対して十分低い結果となり、すべての入力手法でシミュレータ酔いは見られなかった。これは他のジェスチャベースのVR ロコモーション手法の結果とも一致している [4]。また、握りこみ動作に関しては、入力テンポが速くなるにつれて、酔いのスコアが単調増加している。これに対して、腕振り動作、足踏み動作での入力は入力テンポが152 [BPM] の時が一番低いスコアとなっている。入力手法全体として、入力テンポ300 [BPM] がスコアが一番高い、すなわち酔いやすいという結果となった。

#### 4.4.2 主観的作業負荷

主観的作業負荷に関して、NASA-RTLX の結果は図8のようになった。握りこみ動作は、入力テンポが速くなると、負荷が単調増加する傾向がみられた。また、腕振り動作、足踏み動作においては、入力テンポが152 [BPM] のとき主観的作業負荷が小さい結果となった。身体動作を伴う入力手法である腕振り動作と足踏み動作の入力テンポ103 [BPM] を比較すると足踏み動作がスコアが高い傾向がみられる。また、サブスケールにおける身体的要求の結果は図9、フラストレーションの結果は図10のようになった。身体的要求の傾向から、実際の歩調である103から152 [BPM] の間では握りこみ動作の負荷が小さい結果となった。また、速いテンポでは身体的要求が高くなる傾向がみられる。図10のフラストレーションの結果をみると、入力テンポ103 [BPM] の足踏み動作は高いスコアが示された。

#### 4.4.3 臨場感

臨場感についての一部の結果を図11～17に示す。質問「あなたは移動をどの程度コントロールできました

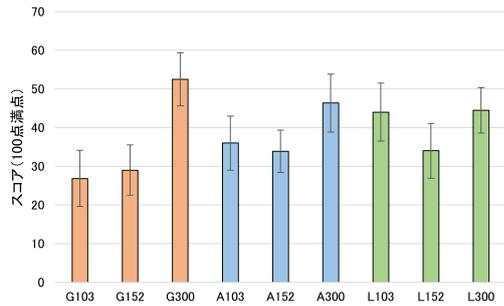


図 8 NASA-RTLX の結果  
Fig. 8 NASA-RTLX Results.

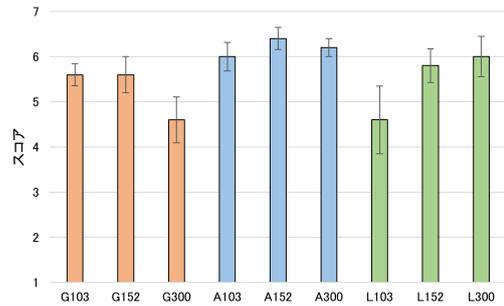


図 11 PQ1 の結果  
Fig. 11 Result of PQ1.

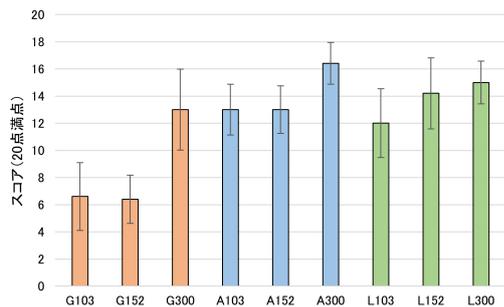


図 9 身体的要求の結果  
Fig. 9 Result of Physical Demands.

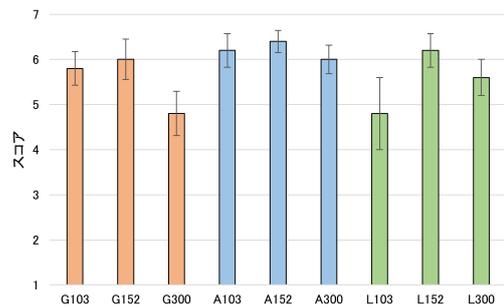


図 12 PQ10 の結果  
Fig. 12 Result of PQ10.

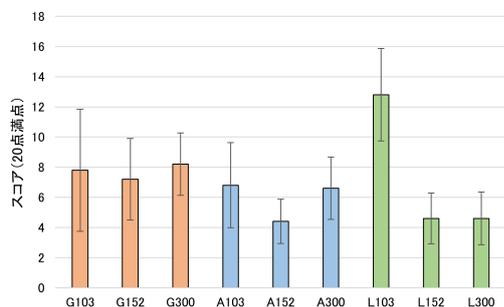


図 10 フラストレーションの結果  
Fig. 10 Result of Frustration.

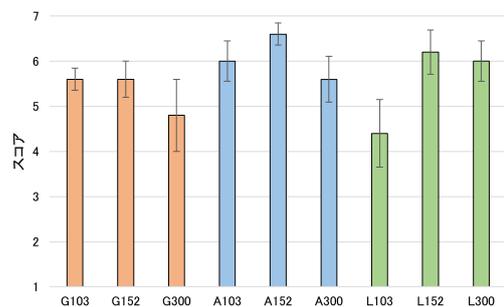


図 13 PQ11 の結果  
Fig. 13 Result of PQ11.

か?(図 11)」「バーチャル環境での体験はどの程度早く慣れましたか?(図 12)」「体験終了時に、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?(図 13)」に関して、300 [BPM]での握りこみ動作と 103 [BPM]での足踏み動作ともに入力手法内で、スコアが下がる傾向にあった。また、質問「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?(図 14)」「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?(図 15)」に関して、握りこみ動作が、他の身体動作を伴う入力手法である腕振り動作、足踏み動作と比較してスコアが低い傾向にあった。質問「バーチャル環境での体験は、実世界での体験どの程度整合性があつたように感じましたか?(図 16)」に関して、103 [BPM]の

足踏み動作が他の条件と比較して、低いスコアとなった。質問「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?(図 17)」に関して、握りこみ動作では 300 [BPM]が、腕振り動作と足踏み動作では 103 [BPM]が一番スコアが高い結果となった。

#### 4.5 コメント聴取

本実験の参加者のコメントから「踵を上げるだけの動作のため、足を地面から上げる動作の方が疲れそう」「遅いテンポが酔いやすい」「ボタンはカチカチ音が気になる」「300 [BPM]の握りこみ動作は難しく、普段行わない動作でリアル感がない」「腕振り動作はどのテンポであっても入力しやすかった」「速いテンポでは

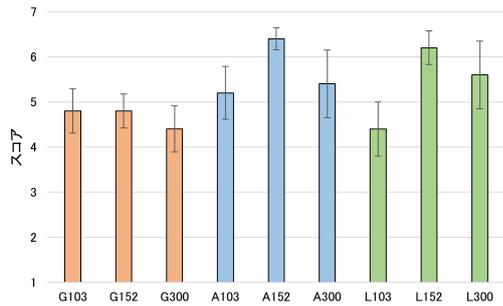


図 14 PQ2 の結果  
Fig. 14 Result of PQ2.

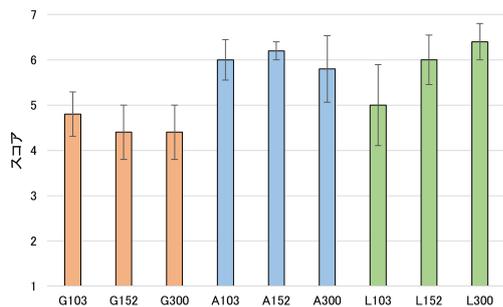


図 15 PQ3 の結果  
Fig. 15 Result of PQ3.

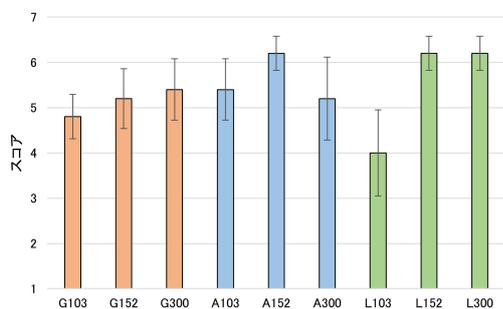


図 16 PQ5 の結果  
Fig. 16 Result of PQ5.

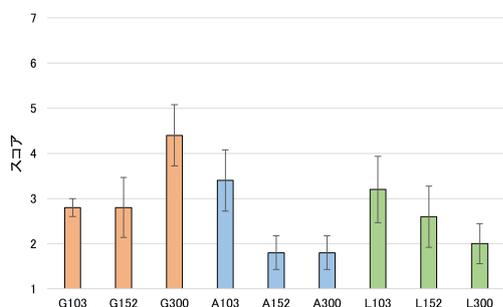


図 17 PQ4 の結果  
Fig. 17 Result of PQ4.

すぐに終わるため全く酔わなかった」などが挙げられた。入力手法の好みに関するアンケートでは、足踏み動作が一番好みであると答えた人が多かった(4名)。

入力テンポに関するアンケートでは、152 [BPM] が最も好まれた(5名)。

#### 4.6 考察

今回の実験ではシミュレータ酔いは報告されなかった。このことから、シミュレータ酔いによる他の項目への影響は少ないと考えられる。

主観的な作業負荷に関して、握りこみ動作の遅いテンポでの入力が特に身体的要求で低い値となった。また、足踏み動作の103 [BPM]での入力でフラストレーションが高かったことから、身体動作を伴う入力が必要以上に遅いテンポでの入力は煩わしく、テンポを下げた入力を採用する場合には注意が必要であることがわかる。これらのことから、ゆっくり移動したい場合には負荷が少ない握りこみを採用したほうが良いと考えられる。

臨場感に関して、質問「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?(図14)」において、踵上げ動作と腕振り動作が評価が高く、握りこみ動作は低い結果となった。これは、踵上げ動作や腕振り動作は実際の歩行に近い動作をしているためであると考えられる。また、実験参加者の入力手法としては、踵上げ動作が最も好まれた。そのため、ユーザにとって踵上げ動作は座位状態での入力で自然に歩くために適している入力手法である。

#### 5. むすび

本研究では、入力テンポを歩行へ変換する歩行アルゴリズムを定義し、座位状態での踵上げ動作、腕振り動作、握りこみ動作の比較を行う実験を実施した。実験では3つの入力手法と3つの入力テンポ(103, 152, 300 [BPM])を組み合わせた合計9条件で行った。その結果、酔いに関しては、どの条件であっても低いスコアとなり、コメントからも酔いは見られなかった。主観的な作業負荷に関しては、遅いテンポでの握りこみ動作は負荷が小さいものの、300 [BPM]になると格段負荷が大きくなる傾向が見られた。下位尺度の身体的負荷も遅いテンポでの握りこみ動作は負荷が小さい結果となった。臨場感に関して、踵上げ動作は、103 [BPM]では他の条件と比較して、移動のコントロール性、入力の自然さ、現実での移動との整合性が低い傾向にあった。一方で152, 300 [BPM]での入力は、入力の自然さ、習熟度が高い傾向にあった。腕振り動作は、他の入力手法と比較して、移動・入力の自然さが全体的に高い傾向にあった。握りこみ動作は、他の入力手法と比較して、入力の自然さ、動き回っている感覚が低い傾向にあった。

今後の展望として、歩行アルゴリズムの改良が挙げられる。本実験では、入力テンポを歩行速度に変換す

る際に、一定値よりも歩行速度が下回らないもしくは、上回らないように下限と上限を設定した。その結果、特に上限以上の握りこみのテンポの入力では、想像している以上に歩行速度が遅いというコメントがあった。そこで、各入力手法にマッチした入力テンポと歩行速度を対応付けるような歩行アルゴリズムの改良により、より扱いやすいVR ロコモーション手法の開発が見込めると考えられる。

### 参考文献

- [1] Luca,M., Seif,H., et al.: Locomotion Vault: The Extra Mile in Analyzing VR Locomotion Techniques; Proceedings of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, (2021).
- [2] Nilsson,N., Serafin,S., et al.: apping-In-Place: Increasing the naturalness of immersive walking-in-place locomotion through novel gestural input; 2013 IEEE Symposium on 3D User Interfaces (3DUI), pp.31-38, (2013).
- [3] Pai,Y., Kunze,K.: Armswing: using arm swings for accessible and immersive navigation in AR/VR spaces; Proceedings of the 16th International Conference on Mobile and Ubiquitous Multimedia, pp.189-198, (2017).
- [4] Tan,C., Foo,L., 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).
- [5] Feasel,J., Whitton,M., Wendt,J.: LLCM-WIP: Low-Latency, Continuous-Motion Walking-in-Place; 2008 IEEE Symposium on 3D User Interfaces, pp.97-104, (2008).
- [6] Slater,M., Usoh,M., Steed,A.: Taking steps: the influence of a walking technique on presence in virtual reality; ACM Transactions on Computer-Human Interaction (ACM Trans. Comput.-Hum. Interact.), **Vol.2**, No.3, pp.201-219, (1995).
- [7] Williams,B., Bailey,S., et al.: Evaluation of walking in place on a Wii balance board to explore a virtual environment; ACM Transactions on Applied Perception (ACM Trans. Appl. Percept.), **Vol.8**, No.3, (2011).
- [8] McCullough,M., Xu,H., et al.: Myo arm: swinging to explore a VE; Proceedings of the ACM SIGGRAPH Symposium on Applied Perception, pp.107-113, (2015).
- [9] Park,J.: Synthesis of natural arm swing motion in human bipedal walking; Journal of Biomechanics, **Vol.41**, No.7, pp.1417-1426, (2008).
- [10] Grieve,D., Gear,R.: 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).
- [11] Yamasaki,M., Sasaki,T., et al.: Stereotyped pattern of lower limb movement during level and grade walking on treadmill; The Annals of Physiological Anthropology = Seiri Jinruigaku Kenkyukai Kaishi, **Vol.3**, No.4, pp.291-296, (1984).
- [12] 山崎: 日本人の歩行; 佐藤 (編): 日本人の生理; pp.138-155, (1988).
- [13] ZENRIN City: <https://www.zenrin.co.jp/content/product/service/3d/asset/>
- [14] Unity Technologies Japan: <https://unity3d.jp/>
- [15] Unity Chan official Website: <https://unity-chan.com/>
- [16] Feick,M., Kleer,N., et al.: The Virtual Reality Questionnaire Toolkit; Adjunct Proceedings of the 33rd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, pp.68-69, (2020).
- [17] Kim,H., Park,J., et al.: Virtual reality sickness questionnaire (VRSQ): Motion sickness measurement index in a virtual reality environment; Applied Ergonomics, **Vol.69**, pp.66-73, (2018).
- [18] 氏家: 映像酔い映像情報メディア学会誌, **Vol.69**, pp.66-73, (2018).
- [19] Hart,S., Staveland,L.: Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of Empirical and Theoretical Research; Advances in Psychology, **Vol.52**, pp.139-183, (1988).
- [20] 芳賀, 水上: 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).
- [21] Witmer,B., Singer,M.: Measuring Presence in Virtual Environments: A Presence Questionnaire; Presence: Teleoperators and Virtual Environments, **Vol.7**, No.3, pp.225-240, (1998).
- [22] 山崎: 空間と人間行動; 渡辺, 穂山, 乾 (編): 新建築学大系; 環境心理, **Vol.11**, p.167, (1982).