

# ヘッドマウントディスプレイを利用した 全方位型歩行シミュレータの開発

佐々木 大晴<sup>\*1</sup>, 辛島 光彦<sup>\*2</sup>

## Development of Omni-Directional Pedestrian Simulator Using Head Mounted Display

by

Taisei SASAKI<sup>\*1</sup> and Mitsuhiko KARASHIMA<sup>\*2</sup>

(received on Apr. 28, 2022 & accepted on Jul. 15, 2022)

### あらまし

本研究では映像表示にヘッドマウントディスプレイ (HMD)、歩行デバイスとして全方位型トレッドミル (ODT) を採用し、全方向に進行可能な歩行シミュレータを開発した。このシミュレータではユーザの歩行動作を ODT 経由でコンピュータへ入力し、開発したアプリケーションにより歩行動作に合わせた VR 視野映像が生成され、その映像を歩行動作に対するフィードバック視野映像として HMD から出力させた。またシミュレータでは地形に 3D 都市モデルを利用し、実在する地形での歩行シミュレーションを可能とした。加えて開発シミュレータの有効性を検討するため、実験を通じてシミュレータがユーザに与える速度感覚や距離感覚について現実環境との比較を行った。

### Abstract

We developed the simulator on which the user could walk omni-directionally. The simulator was mainly consisted of a head mounted display (HMD), an omni-directional treadmill (ODT) as walking platform, and a simulating application installed on to the personal computer. The user's walking movements were measured through the ODT and input to the computer, and then the simulating application created VR images. Consequently, the user could see the VR images through the HMD as feedback corresponding to one's own walking. 3D city models were adopted as a 3D geodata for the simulation, and it was able to simulate the real terrain. Furthermore, users' senses of speed and distance were compared between the real and the simulated environments through the experiments.

**キーワード:** 歩行シミュレータ, HMD, 全方位型トレッドミル, 3D 都市モデル

**Keywords:** Pedestrian Simulator, HMD, Omni-Directional Treadmill, 3D City Model

## 1. はじめに

歩行者の歩行動特性に関する研究では、対象とする歩行環境における実際の歩行実験を通じて行われるのが主流であるが、公道における歩行実験には安全上、倫理上の制約が伴う。

例えば、上山 (2019) は歩行実験を通じて、地図アプリケーションの利用を対象とした歩きスマホ中の歩行動特性についての研究を行っているが、実験は被験者の安全確保の観点から歩行者天国や公園を利用して行われている<sup>1)</sup>。

このように歩行動特性に関わる危険性を検討するような研究では、安全上、倫理上の制約により限られた条件でしか歩行実験を行えないため、自動車や自転車などさまざまな交通要因が混合した一般の交通環境における歩行動特性の知見を得ることは難しい。一方、歩行者の行動を記録・観察してその行動特性を探索的に分析する研究<sup>2), 3)</sup>もあり、そのような場合には安全性に起因する問題を生じな

いこともある。

つまり、歩行者行動特性に関する研究においては、仮説検証型のある特定の歩行動特性を明らかにするための実験では、安全面や倫理面への配慮が研究実施の制約となる場合がある。そのような制約を取り除くための手段として歩行シミュレータを活用した実験が期待される。しかし、現在まで歩行者を対象としたシミュレータとしては、交差点などの極めて限定されたエリアにおける、道路横断のような限定されたシチュエーションをモデル化したもの<sup>4), 5)</sup>を除けばほとんど活用されていない。

Niels らは既存の歩行シミュレータに関する研究を調査している<sup>6)</sup>。この研究では既存の歩行シミュレータをシミュレータが利用できるスペースが現実環境よりも狭い場合の歩行動作の入力方式をもとに分類している (Fig. 1)。

Proxy gestures は特定の身体動作を歩行動作としてシミュレータへ入力する方法である。主に腕振りが Upper-body gestures, その場での足踏みが Lower-body gestures と呼ばれる。モーションキャプチャや感圧センサ、加速度センサなどで体の動きを認識し、コンピュータで歩数をカウントすることで歩行速度を計算する仕組みが多く利用されている<sup>2), 3)</sup>。

Redirection techniques では入力された歩行パラメータを補正することによって、現実空間よりも大きな空間を再現する。現実空間上の座標をトラッキングし、シミュレータ

\*1 情報通信学研究科情報通信学専攻 修士課程

Graduate School of Information and Telecommunication Engineering, Course of Information and Telecommunication Engineering, Master's Program

\*2 情報通信学部経営システム工学科 教授

School of Information and Telecommunication Engineering, Department of Management System Engineering, Professor

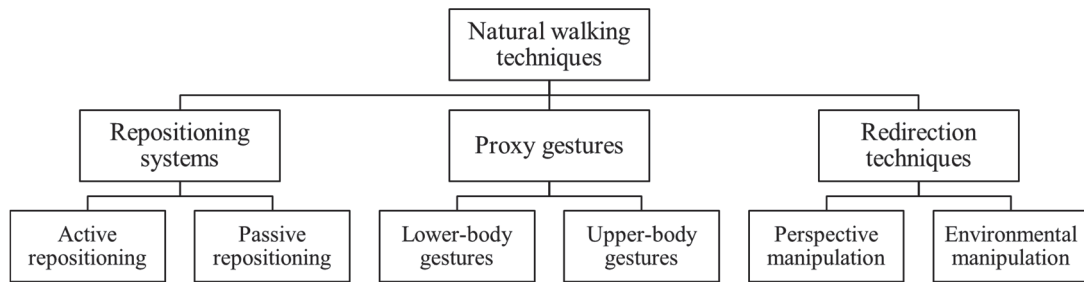


Fig. 1 Classification of walking techniques by Niels et al<sup>6)</sup>

へ入力する。単位時間あたりの移動距離や移動方向を補正し、映像に反映させる。例えば、現実での移動距離をシミュレータでは2倍にしたり、現実で180度の旋回をシミュレータでは90度として入力したりする。

**Repositioning systems** を採用した歩行シミュレータとしては、水戸部らは改造した電動のトレッドミルとプロジェクター、スクリーンなどを用いたもの<sup>7)</sup>がある。また、Sasakiらは自走式トレッドミルと3枚のディスプレイを活用し、シミュレーション可能な範囲が比較的大きいシミュレータを開発した<sup>8)</sup>。Powellらは電動トレッドミルとヘッドマウントディスプレイ（HMD, Head Mounted Display）を組み合わせたシミュレータを用いて、シミュレーション中の速度感覚を評価している<sup>9)</sup>。

**Proxy gestures** や **Redirection techniques** を採用したシミュレータは、比較的小規模なシステムを構築できる一方、正確に歩行パラメータを取得し、視覚情報としてフィードバックすることが難しい。一方、**Repositioning systems** はベルトコンベアのように回転するベルトや滑らかな床の上を歩行し、センサから取得した歩行パラメータをシステムへ入力する方式である。そのため、比較的大掛かりな設備を必要とするが、他の方式よりも正確に歩行パラメータを取得することが期待できる。

以上で挙げたような従来のシミュレータは以下の要件の内、何らかを満たせないような制約がある。そこで本研究では、以下のすべての要件を満たす歩行シミュレータの開発を目的とした。これらの要件を満たすことで、シミュレータ上で地図を利用するような、広域でのシミュレーションが可能となる。

1. 水平・垂直ともに360度の映像表示が可能
2. ハードウェアによる歩行範囲の制限が無い
3. ユーザは水平方向の全方位へ歩行できる
4. 動的な任意の速度で歩行できる（歩行速度は固定されず、ユーザの動作により連続的に変化する）
5. 実在する地形でのシミュレーションが可能

さらに、シミュレータ上の歩行と、現実空間上の歩行を実験から比較することにより、開発したシミュレータの有効性を検討する。

## 2. シミュレータの開発

本研究で開発するシミュレータは無限な平面の再現と全方位への歩行、任意の速度での歩行、実在する地形でのシミュレーションが可能なものを目指した。シミュレータの開発では、HMD や ODT などの使用機材を選定した後に、

コンピュータで起動する映像処理のアプリケーションを開発した。

### 2.1 使用機材の選定

水平・垂直ともに360度の映像表示が可能なものとして、現在流通しているものではHMDが代表的である。また、無制限な範囲の歩行と動的で任意な速度での歩行、全方位への歩行を実現できる方法は、Nielsらによる分類（Fig. 1）では**Repositioning system**が適している。その中でも歩行デバイスから直接進行方向をシステムへ入力できる方式は、全方位型トレッドミル（ODT, Omni-Directional Treadmill）を使用した**Passive repositioning**である。したがって、本研究のシミュレータでは主にHMDとODT、映像処理のためのコンピュータを使用した。

#### (1) HMDの選定

HMDは「VRゴーグル」と呼ばれることもあり、2016年頃から一般家庭向けの発売が本格化した。現在は複数のメーカーが製造しており、主に

- (i) 映像処理機構を内蔵しているもの
- (ii) PCで映像処理を行ってHMDに出力するもの
- (iii) スマートフォンを装着するもの

の3種類が流通している。この中でも(i)のタイプにはヘッドセットと独立した赤外線センサを用いたトラッキングによって、絶対座標での頭部位置のトラッキングが可能なのがある。(ii)および(iii)のタイプは加速度センサによる方向の識別が主流であるため、現実空間上の絶対座標を取得することが難しい。したがって、身長個人差や頭部の上下動を考慮できる歩行シミュレータに利用するHMDは、(i)映像処理機構を内蔵しているものが適していると判断した。

以上の理由から本研究ではHTC社のVive Cosmos EliteをHMDとして採用した。ヘッドセットには3.4インチ（1440×1700ピクセル、90Hz）のディスプレイが2つ設置されており、水平方向の視野角は110度である。トラッキング可能な範囲は約3.5m四方の正方形となっており、本研究のシミュレータはこの範囲に収まることになる。

#### (2) ODTの選定

**Repositioning system**として活用される歩行デバイスはいくつか存在しているが、中でも最も多く流通しており、使用経験のある人が多いものは電動のトレッドミルであろう。主にトレーニングやリハビリ用途で活用され、電気エネルギーで回転するベルトの上を歩行または走行する。ベルトの回転速度はユーザ自身で設定できるものが多いが、基本的に歩行中の動的な速度変更はできず、ベルトの回転速度

に合わせて歩行・走行する。電動のトレッドミルに近い形式のものとして自走式トレッドミルがある。電力が不要であり、自身の歩行速度にベルトの回転速度を動的に合わせることができる。歩行中はアンバランスな体勢となるため、両手はハンドルを握っている必要がある。

近年、主に VR ゲーム向けのコントローラとして ODT が流通し始めている。これは通常の自走式トレッドミルと同様に動的な任意の速度で歩行できる。さらに、歩行面がベルトではなく、全方位への歩行が可能となっている。腰を固定するタイプが多く、手でハンドルを握る必要もないため、現実環境での歩行感覚に近い動作を実現できるといえる。したがって、本研究のシミュレータで歩行デバイスとして利用するものは ODT に決めた。

ODT のメーカーは中国の KAT VR 社やアメリカの Virtuix 社、オーストリアの Cyberith 社が代表的である。この中でも、KAT VR 社の KAT Walk mini は現在流通している多くの HMD と互換性があり、開発用の SDK が公開されている。また、ODT の歩行面は平らなものよりも、すり鉢状に窪んでいるもののほうが現実に近い歩行感覚が得られるとされており<sup>10)</sup>、KAT Walk mini はこの点でも適しているといえる。したがって、本研究で使用する ODT は KAT Walk mini とした。

KAT Walk mini はセンサが内蔵された床上を歩行することで歩行速度を出力する。また、歩行面と接続した 2 本の支柱の回転によって、進行方向を出力する。

## 2.2 アプリケーションの開発

本研究で HMD と ODT を利用したシミュレータにおいて、システム上のデータは Fig. 2 のように流れる。

Fig. 2 のコンピュータでは ODT で取得した歩行パラメータを視覚フィードバックとして使用する映像へ変換している。この際に使用するアプリケーションは Unity (ver. 2018.4.36f1) で開発した。Vive Cosmos Elite と KAT Walk mini を使う場合、VR 映像の処理に Steam VR を使う必要があり、Unity はこの条件を満たしているため、選択した。

まず、新規作成したプロジェクトへ Steam VR Plugin と KAT Walk mini の SDK、地形データをインポートした。地形データにはゼンリン社の 3D 都市モデルデータを使用した。本研究で使用した範囲は東京の新宿駅東口付近の約 6.25 km<sup>2</sup> である。

使用するデータを Unity で読み込んだ後、各オブジェクトを地形データ上に配置した。さらに、物理演算や衝突判定の対象とし、オブジェクトのすり抜けを防止した。

ODT はユーザの歩行速度や進行方向といった歩行パラメータをアプリケーションへ入力する。アプリケーションでは Steam VR Plugin に含まれる仮想的なカメラが、歩行

パラメータに合わせて、地形データ上を移動する。この仮想的なカメラは VR 空間内のユーザの視野映像の中心点となる。そのカメラに写った映像が HMD を通してユーザへリアルタイムに提示される。これによって開発したシミュレータの仕組みは Fig. 2 で示したデータの流れの通りである。

仮想的なカメラの位置は ODT から入力される歩行パラメータのほか、現実空間上の HMD の絶対座標によっても移動する。水平方向では ODT の歩行面を基準とし、前後左右に頭を動かした場合にはそれに連動してカメラも移動する。また、垂直方向では歩行面を基準とし、ユーザの身長や歩行時の上下動に連動してカメラが移動する。つまり、ユーザの体型や歩行動作を個別にキャリブレーションすることなく使用が可能である。

開発したシミュレータを使用している様子を Fig. 3 に、ユーザが見ている映像の一例を Fig. 4 に示す。



Fig. 3 Image of user walking on the simulator



Fig. 4 User's field image

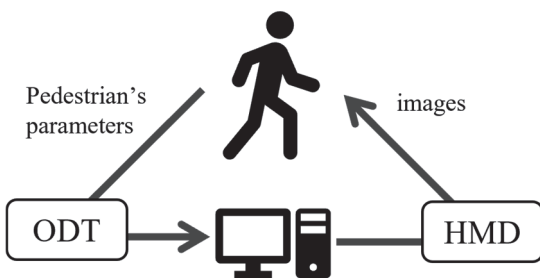


Fig. 2 A data flow of proposal simulator

## 3. シミュレータ有効性検討実験

### 3.1 実験概要

開発したシミュレータの有効性を検討するために、開発したシミュレータ上の歩行と現実環境の歩行とを比較する実験を行った。実験は溝口らによる自転車のシミュレータの研究<sup>11)</sup>を参考に、歩行中の速度感覚と距離感覚を比較し

た。

速度感覚についての実験では、現実環境、開発シミュレータ、ODT のみの歩行（映像なし）、HMD のみの映像提示（身体動作なし）の 4 条件にて、歩行時の速度に関するデータを測定した。また、距離感覚についての実験では、現実環境と開発シミュレータの 2 水準にて歩行時の前方の距離感覚を測定した。

現実環境での実験は東海大学高輪キャンパス内の実験コース（Fig. 5）にて行った。屋外での実験は明るさや天候の影響を排除するため、雨が降っていない午前 10 時から午後 4 時の時間帯で行った。その他の水準（条件）の実験は東海大学高輪キャンパス内の実験室にて実施した。

なお、本研究は東海大学「人を対象とする研究」に関する倫理委員会の審査を受け、承認された（承認番号:21111）。

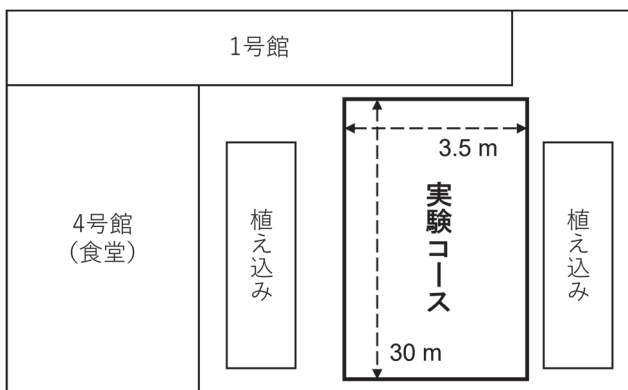


Fig. 5 Experimental course of the real environment

### 3.2 被験者

本実験では 20 名の健常な歩行が可能な者（18~24 歳。男性 16 名、女性 4 名）を被験者として用いた。実験では HMD を使った VR 映像を視聴するため、VR 酔いなどの身体的不調を引き起こす可能性がある。被験者には事前にその可能性を説明するとともに、不調が生じた場合には実験を直ちに中断および中止することを告知し、被験者に実験参加の同意を得た上で実験を実施した。

### 3.3 実験手順

実験ではすべての被験者が以下に示す実験 A から実験 F の順に実施した。

**実験A:** 現実環境で「普段通りの歩行」をしている際の、速度感覚や歩幅といった歩行パラメータを測定した。被験者は実験コース（Fig. 5）にて 30m の歩行を 3 回実施した。この際被験者には自身が「普段通りの歩行速度」と感じる速度で歩行するよう依頼した。この実験では各被験者の 30m 歩行に要した時間と歩数を測定し、現実環境における各被験者の平均歩行速度、SL（Step Length：歩幅）、SPM（Steps/Minute：1 分間あたりの歩数）を算出した。

**実験B:** この実験は現実環境で前方の距離感覚を測定する実験である。被験者には実験コース（Fig. 5）にて、スタート地点からターゲットへ向かって歩行を始め、自身とターゲットとの間の距離が指示された距離になったと感じた地点で立ち止まるように依頼した（Fig. 6）。被験者が指示された距離は 5m、10m、15m、

20m の 4 つで、各被験者は各指示距離について 1 度ずつ計 4 回実施した。また、指示距離は順序効果の影響を排除するため被験者間でカウンターバランスを施した。この実験では、現実環境における各被験者の立ち止まった被験者とターゲットの間の距離を「指示距離に対する回答距離」として測定した。



Fig. 6 Positional relation between the subject and the target in Experiment B

**実験C:** この実験は開発シミュレータで行う実験 A と同等の実験である。被験者は実験室にて、まずスムーズな歩行ができたと判断されるまでシミュレータでの歩行練習を行った。その後被験者は「普段通りの速度で屋外を歩く際の歩行速度と比べて、今のシミュレータの歩行速度はどう感じますか？」と尋ねられ、「同じように感じる」といった旨の回答が得られるまで歩行練習を行う。回答が得られたのち、実験 A と同様に 30m の歩行を 3 回実施した。各歩行後、シミュレータに組み込んだプログラムによって 30m 歩行に要した時間を測定するとともに、歩行の様相を撮影した動画から ODT 上の歩幅と歩数を測定し、シミュレータにおける各被験者の平均歩行速度、SL、SPM を算出した。

**実験D:** 開発シミュレータで前方の距離感覚を測定した。被験者にはシミュレータを使用して実験 B と同様に、スタート地点からターゲットへ向かって歩行を始め、自身とターゲットとの間の距離が指示された距離になったと感じた地点で立ち止まるように依頼した（Fig. 6）。被験者が指示された距離は 5m、10m、15m、20m の 4 つで、各被験者は各指示距離について 1 度ずつ計 4 回実施した。また、指示距離は順序効果の影響を排除するためカウンターバランスを施した。この実験では、各歩行後、シミュレータに組み込んだプログラムによって、立ち止まった被験者とターゲットの間の距離を「指示距離に対する回答距離」として測定した。

**実験E:** この実験では、シミュレータ上で映像なしで歩行する際の歩行パラメータを実験 A、C と同様に測定した。被験者は HMD を装着せずに ODT 上を実験 A と同様の歩行を 3 回実施した。なお HMD を装着していないため、被験者は歩行距離がシミュレータ上で 30m に達した時点で歩行停止を告げられた。各歩行後、シミュレータに組み込んだプログラムによって、30m 歩行に要した時間を測定するとともに、歩行の様相を撮影した動画から ODT 上の歩幅と歩数を測定し、映像なしで ODT 上を歩行した際の各被験者の平均歩行速度、SL、SPM を算出した。

**実験F:** 被験者が静止した状態において、HMD による VR 映像を視聴した際の速度感覚を測定した。まず実験 A

で測定した平均歩行速度を基準とし、その 0.2 倍、0.4 倍、0.6 倍、0.8 倍、1.0 倍、1.2 倍、1.4 倍、1.6 倍、1.8 倍の 9 段階の歩行速度で歩行している際の視野映像のうちのいずれか 1 つを被験者に提示した。被験者にはその速度が「普段通りの歩行速度」と比べて「速い」、「遅い」「ちょうどよい」のいずれかを回答するように依頼した。「ちょうどよい」の回答が得られるまで 1 段階ずつ歩行速度の異なる映像に（「速い」ならば 1 段階遅い歩行速度の映像に、「遅い」ならば 1 段階速い歩行速度の映像に）変更し、「ちょうどよい」の回答が得られるまで試行を繰り返し、得られた時点でその速度を記録した。実験は初めに提示する映像の速度として 0.4 倍、0.8 倍、1.2 倍、1.4 倍の 4 通りを設定し、各被験者にはそれぞれ速度について 1 度ずつ計 4 回実施してもらった。なお初めに提示する映像の速度は順序効果の影響を排除するために被験者間でカウンターバランスを施した。

#### 4. 実験結果

##### 4.1 速度感覚に関する実験の結果

実験 A, C, E, F によって測定した現実環境、シミュレータ、ODT のみの場合、HMD のみの場合における「普段通りと感じる歩行速度」での歩行パラメータ（歩行速度(WV: Walking Velocity), SL, SPM) を取得した。

各実験環境における「普段通りの歩行速度」と感じる速度(WV)を、被験者対応を考慮した 1 元配置分散分析によって比較した結果、それらの差は有意であった ( $F(3, 19) = 32.82, p < 0.01$ )。そこで Bonferroni 法による多重比較を行ったところ、Fig. 7 に示す環境間で有意差が見られた。

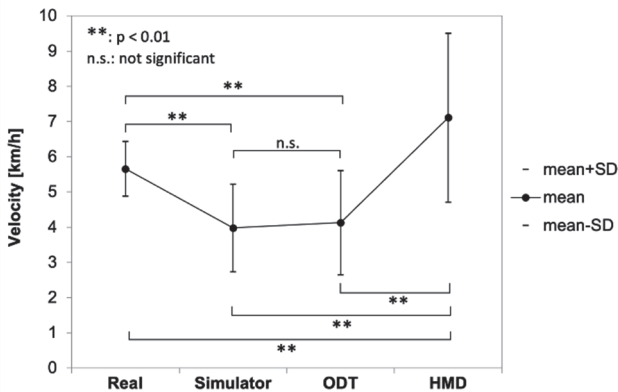


Fig. 7 Comparison of walking velocity between environments

実験 A, C, E で測定した SL について、被験者対応を考慮した 1 元配置分散分析により比較した結果、環境間に有意な差がみられた ( $F(2, 19) = 349.17, p < 0.01$ )。そこで Bonferroni 法による多重比較を行ったところ、Fig. 8 に示すように、現実環境での SL が他の環境よりも有意に大きいという結果が得られた。

SPM についても SL と同様、環境間に有意な差が見られ ( $F(2, 19) = 51.3, p < 0.01$ )、Bonferroni 法による多重比較を行ったところ、Fig. 9 に示すように、現実環境での SPM が他の環境よりも有意に大きいという結果が得られた。

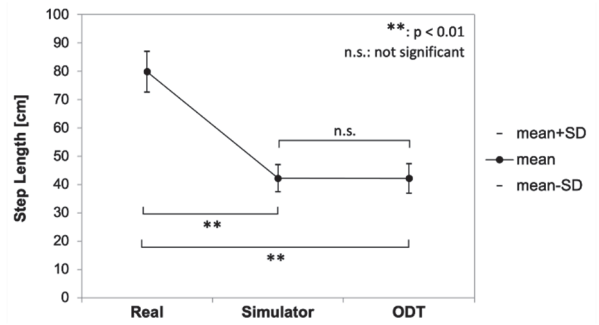


Fig. 8 Comparison of SL between environments

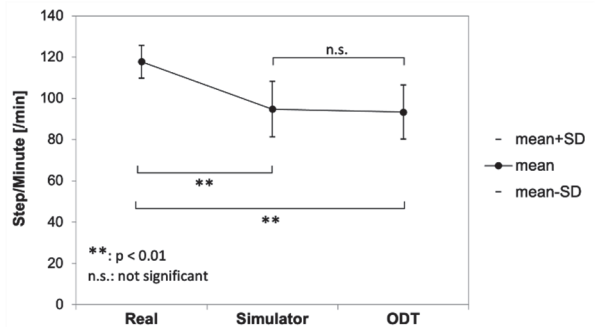


Fig. 9 Comparison of SPM between environments

##### 4.2 距離感覚に関する実験の結果

距離感覚についてシミュレータと現実環境を比較すると、シミュレータの場合の方が現実環境よりも有意に長い距離を回答したことがわかった (Table 1)。つまり、シミュレータで提示された映像では、被験者は現実環境よりも同じ距離を短く知覚する傾向があることが示唆された (Fig. 10)。

Table 1 Results of the one-way within-subjects ANOVA of the replied distances between the real and the simulated environments

Directed Distance	F (1, 19)	p-Value
5 m	15.066	$p < 0.01$
10 m	18.123	$p < 0.01$
15 m	20.527	$p < 0.01$
20 m	19.929	$p < 0.01$

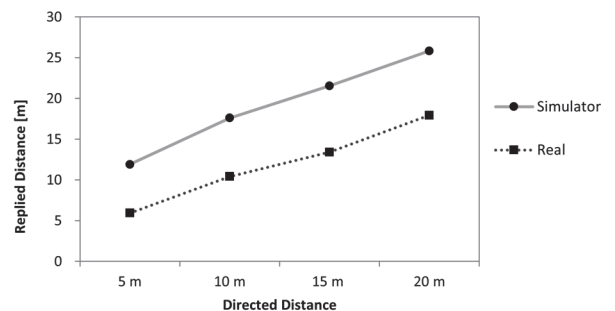


Fig. 10 Comparison of replied distances between the real and the simulated environments

## 5. 考察

### 5.1 速度感覚と距離感覚に生じたズレに関する考察

速度感覚に関する実験の結果から、Powell らの研究<sup>7)</sup>と同様に現実環境とシミュレータでは、現実環境のほうが有意に速く歩くことがわかった。ODT のみの場合は現実環境より遅いが、シミュレータとは差が認められなかった。つまり、ODT 上を歩行した場合、「普段通りの歩行速度」は現実環境よりも遅くなるといえる。

その原因として考えられるものとしてはまず、SL の差が挙げられる。速度に関する実験からシミュレータと ODT のみの場合は、いずれも現実環境より小さい SL で歩くことが示されている。本研究で使用した ODT (KAT Walk mini) の歩行面は半径が約 47 cm であり、中央に立った場合には歩行に有効な幅は現実環境の平均 SL (約 80 cm) を下回る。つまり、現実環境と同等の歩幅で ODT 上を歩行することは物理的に不可能となっている。そのため、歩幅が小さくなり、現実環境とシミュレータの歩行速度に差が生じたと考えられる。

一方、HMD による映像提示の実験では、現実環境よりも速い速度を「普段通りの歩行速度」と知覚する結果となった。この原因としては距離感覚のズレによるものが挙げられる。距離感覚に関する実験から、シミュレータでは現実環境と同じ距離を提示した場合、より長く再現する傾向が明らかとなった。この結果は森らの研究<sup>12)</sup>と同様であった。HMD (シミュレータ) では仮想空間の距離を実際よりも長く再現したことから、仮想空間上の距離を現実環境と同じと思われる速度 (普段通りの速度) で進むためには、所要時間を同一にする必要がある。その結果として、HMD を介した映像提示では現実よりも「普段通りの歩行速度」を速く知覚したと考えられる。

ここで、ODT 上歩行が現実環境よりも遅く、HMD による映像提示では速くなったことに着目すると、両者は逆の結果を示している。映像の速度が遅いと感じたのであれば、歩幅の制限があるにしろ、SPM を大きくしてシミュレータの歩行速度は上げることが想定できる。しかし、逆の結果が示された。この原因として、

- (i) 歩行速度を決定するための要素として視覚があまり重要ではない可能性
- (ii) シミュレータで体力的な負荷が現実環境と一致した速さを「普段通りの歩行速度」と判断した可能性

の 2 点について検討した。

(i) については人が日常生活で歩行速度を決定する要素として、視覚は重要ではないと考えられる。つまり、脚の動きや負荷といった身体感覚が歩行速度の決定に強く影響していると仮定すると、視覚による速度認知が不正確である原因と考えることができる。

(ii) は (i) の仮定によって、被験者が自身の歩行速度を視覚ではなく、体力的な負荷から判断したという仮定である。本実験で使用した ODT は歩行面がすり鉢状になっていることや、腰をベルトで固定する特性上、歩行時には斜面を登るように前かがみになる傾向が見られた。また、齋藤らによる電動トレッドミル歩行での活動量を測定した研究<sup>13)</sup>では、快適な速度でトレッドミル上と床上を歩行した場合、トレッドミルの方が快適歩行速度は遅いものの、歩行終了時の心拍数には差がないという結果が得られている。つまり、床上とトレッドミル上を同じ速度で歩行した場合には、トレッドミルの方が身体的負担は大きいということ

になる。

齋藤らによる研究<sup>13)</sup>では電動トレッドミルを使用しており、本研究で使用した ODT とは歩行特性に差がある可能性はあるものの、身体的負担の要因としては検討に値するであろう。したがって、ODT 上の歩行特性によって現実環境とシミュレータを同等の速度で歩行した場合には、シミュレータの方が大きな身体的負担を与える可能性が指摘できる。

このことから、シミュレータでは現実環境よりも大きな身体的負担が課されることで、身体的負担が現実環境と同様であると感じた速度を「普段通りの歩行速度」と認知する。その結果としてシミュレータでは普段通りの歩行速度は現実環境よりも遅くなると考えられる。

(i) と (ii) の原因は複合的に速度の知覚へ作用することも考えられる。ODT の歩行面の大きさが歩幅を制限すると、ユーザの歩幅は小さくなる。小さくなった歩幅で、より速い速度を目指すと歩数が増え、それに伴って身体への負担も増加する。このとき、速度決定の要素として視覚情報よりも身体的負担が重要であると仮定していることから、(i) と (ii) は歩行速度の決定へ複合的に作用するといえる。

### 5.2 歩行速度の補正

シミュレータと現実環境で「普段通りの歩行速度」に差が生じた原因としては主に、以下のような原因があると考えた。

- 歩行速度を身体感覚で判断している
- シミュレータでの SL が小さい

ODT 上の歩行速度に対して、HMD で映像の流れる速さであるオプティックフローを定数倍して速くすることによって、身体的な負担を軽減でき、かつ擬似的に SL を大きくすることができる。つまり、補正後のシミュレータで現実環境と同じ体力的負荷で歩いた場合には、シミュレータでの歩行速度が上昇して現実環境との差がなくなるという仮説を立てた。そこで、仮説を検証するため、歩行速度を補正した上で、実験 C と同様にシミュレータで「普段通りの歩行速度」を測定する追加実験を行った。速度の補正に使用する定数は現実環境とシミュレータでの歩行速度から求めた。

定数  $k$  は、被験者  $i$  の現実環境での歩行速度を  $a_i$ 、シミュレーションでの歩行速度を  $b_i$  として、以下の式により決定した。

$$k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{a_i}{b_i}$$

本研究の実験結果からは  $k = 1.53$  となったため、シミュレータを従来と同じ速度で歩いた場合にはオプティックフローが従来の 1.53 倍の速さとなるようシミュレータを調整した。

#### (1) 追加実験の方法

被験者は実験 A から F に参加した人から 3 名に参加を依頼した。

まず、被験者はオプティックフローを補正したシミュレータにて、十分に歩行の練習を実施した。その後、実験 C と同様にシミュレータ上で 30 m 歩行を 3 度測定した。

#### (2) 追加実験の結果と考察

追加実験で取得した速度のデータを対応のある一元配置

分散分析により現実環境と比較すると、Fig. 11 の通り帰無仮説は棄却され、両者に差があるとはいえないという結果が得られた ( $F(1,2) = 0.325, p > 0.10$ )。

したがって、この追加実験から、シミュレータでの歩行速度を補正することにより、シミュレータ上での歩行速度が現実環境へ近づく可能性が示唆された。

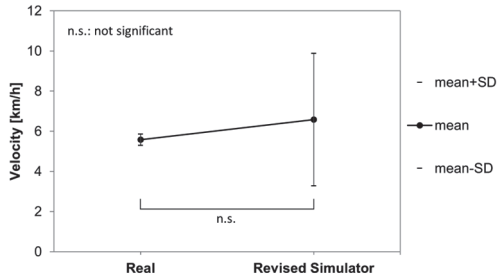


Fig. 11 Comparison of walking velocity between the real and the revised simulated environments

### 5.3 今後の課題

ODT 上歩行では実験を開始する前の練習に必要な時間に大きな個人差がみられた。早い場合では5分未満で十分な練習を終えた被験者がいた一方で、安定した歩行速度を維持するのに20分以上の練習が必要な被験者も存在した。これには被験者の身体能力や運動習慣などが影響した可能性が考えられるが、本研究ではそれらのデータを取得していないため、統計的な比較には至っていない。また、追加実験で使用した補正の定数は現実環境とシミュレータにおける歩行速度の比を被験者間で平均した値を採用した。しかし、歩行速度をはじめとする歩行パラメータには被験者間のばらつきがあるものの、本研究では一定の倍率で補正することが適切であるか否かの議論には至っていない。したがって、オプティックフローの補正方法についても検討の余地がある。

HMD を介した映像提示では距離感覚のズレから速度感覚のズレが生じたと考察した。距離感覚のズレは他の研究からも示されているため、シミュレータのHMDを使用して速度感覚の一致を目指すシミュレータはこのズレを前提とした設計が必要となるだろう。また、追加実験で使用した定数 $k = 1.53$ は Powell らの研究<sup>7)</sup>で示されたゲイン値1.55に近い値となった。Powell らは電動トレッドミルとHMDを組み合わせたシミュレータを用いた実験を行い、トレッドミルの速度を変化させながら適切なオプティックフローのゲイン値を調査した。Powell らのシミュレータと本研究のシミュレータには、トレッドミルとHMDを使用しているという共通点があり、この点については一考の余地があるといえる。

## 6. 結論

本研究では実在する地形でのシミュレーションが可能であることや、全方位への歩行と映像表示ができること、任意の速度でハードウェアの制限を受けることなく歩行できるといった要件を満たす歩行シミュレータの開発を研究目的とした。ODTやHMD、シミュレーションソフトなどから構成される全方位型歩行シミュレータを開発した。このシミュレータでは全方位への歩行と水平・垂直ともに

度の映像表示が可能な上、実在する地形で歩行のシミュレーションを行うことができる。

開発したシミュレータを用いて、実験から現実環境の有効性を確認する実験を行った。速度感覚と距離感覚に着目して実験を計画し、結果からシミュレータと現実環境の間には「普段通りの歩行速度」に違いがあることがわかった。また、距離感覚についても従来の知見と同様、シミュレータでは現実環境と同じ距離を提示した場合、より長く再現する結果となった。

シミュレータでの歩行速度が現実環境よりも遅くなった原因としては、ODTでSLが小さくなることや、ODTと現実環境での歩行に身体的負荷の違いがあること、視覚による速度の知覚が不正確であることなどが考えられた。

そこで、シミュレータで提示するオプティックフローの速さを定数倍で補正した上で追加の実験を行った。その結果、歩行速度に関して現実環境と補正したシミュレータの間に有意差がなかったことから、オプティックフローの補正によって速度感覚を現実環境に近づけられる可能性が示唆された。このことから、本研究で開発したシミュレータは、オプティックフローの補正を行うことにより、十分な有効性が示されることを期待できる。

## 謝辞

本研究はJSPS科研費（基盤研究（C））JP20K04988の助成を受けたものである。ここに記して謝意を表す。

## 参考文献

- 1) 上山智紀, 辛島光彦, “地図アプリケーションを利用した際の「歩きスマホ」を低減するための改良アプリケーションの提案” 東海大学紀要情報通信学部, Vol. 12, No. 1, pp. 26-34, 2019
- 2) Piotr Dollar, Christian Wojek, Bernt Schiele, and Pietro Perona, “Pedestrian detection: A benchmark” In 2009 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp. 304–311, 2009
- 3) Diego A. Escobar, Santiago Cardona, Gregorio Hernández-Pulgarín, “Risky pedestrian behaviour and its relationship with road infrastructure and age group: An observational analysis” Safety Science, Vol. 143, p. 105418, 2021
- 4) Ilja Feldstein, Andre Dietrich, Sasha Milinkovic, and Klaus Bengler, “A pedestrian simulator for urban crossing scenarios” IFAC-PapersOnLine, Vol. 49, pp. 239–244, 2016
- 5) Ilja Feldstein and Georg N. Dyszak, “Road crossing decisions in real and virtual environments: A comparative study on simulator validity” Accident Analysis & Prevention, Vol. 137, 2020
- 6) Niels Christian Nilsson, Stefania Serafin, Frank Steinicke, and Rolf Nordahl, “Natural walking in virtual reality: A review” Computer Entertainment, Vol. 16, No. 2, 2018
- 7) 水戸部一孝, 鈴木雅史, 吉村昇, “車道横断体験用シミュレータによる高齢歩行者交通事故の誘発要因の検討” 生体医工学, Vol. 49, No. 1, pp. 108-115, 2011
- 8) Sasaki Taisei and Karashima Mitsuhiro, “Development of simple and inexpensive pedestrian simulator in general traffic conditions” In HCI International 2020 - Posters, pp. 472–479. Springer International Publishing, 2020
- 9) Wendy Powell, Brett Stevens, Steve Hand, and Maureen Simmonds, “Blurring the boundaries: The perception of visual gain in treadmill-mediated virtual environments” Conference:

- Workshop on Perceptual Illusion in Virtual Environments (IEEEVR)At: Singapore, 2011
- 10) Kyle Hooks, Wesley Ferguson, Pedro Morillo, and Carolina Cruz-Neira, "Evaluating the user experience of omnidirectional vr walking simulators" Entertainment Computing, Vol. 34, p. 100352, 2020
  - 11) 溝口諒, 山中英生, "広視野型自転車シミュレータの実環境再現性に関する分析" 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol. 71, No. 5, pp. I\_737-I\_742, 2015
  - 12) 森建太, 石橋圭太, 岩永光一, "VR 空間の視対象の形・大きさ・距離が奥行き知覚に及ぼす影響" 人間工学, Vol. 55, pp. 1F3-3-1F3-3, 2019.
  - 13) 齋藤信夫, 武井圭一. "平地とトレッドミル上の快適歩行における歩行速度と活動量との関係" 理学療法学 Vol. 2005, pp. A0721-A0721, 2006