



# 簡易没入型 VR 歩行システムを用いた地面傾斜の知覚評価

## Perceptual Evaluation of Ground Inclination with a Simple Immersive VR Walking System

森崎慶人<sup>1)</sup>, 脇田 航<sup>1)</sup>

Keito MORISAKI and Wataru WAKITA

1) 広島市立大学大学院情報科学研究科 (〒731-3194 広島市安佐南区大塚東三丁目 4 番 1 号, morisaki@ics.info.hiroshima-cu.ac.jp)

**概要:** 本研究では, 我々が提案する進行方向に大腿部を支持することで歩行感覚を錯覚させる簡易没入型 VR 歩行システムにおいて, どの程度高臨場に地面傾斜を知覚できるかについて評価を行う。具体的には, 地面傾斜が-30~30 度と 10 度毎異なる 7 つのマップを用意し, 提案装置およびランニングマシンのそれぞれで傾斜感の知覚実験を行い, 臨場感, 疲労感, 爽快感についてアンケート評価を行った。この結果, 提案装置上においてランニングマシン同等の臨場感を知覚できるだけでなく, 上り下り両方の傾斜の知覚が可能であることが分かった。

**キーワード:** 人工現実感, VR 歩行システム, ロコモーションインタフェース, 傾斜知覚

### 1. はじめに

VR 空間内を歩き回る際, コントローラなどのボタン操作による移動方法が最も手軽であるが, 自身の身体動作とのズレが大きいほど VR 酔いを引き起こしやすい。解決策として, トレッドミル式[1]や足踏み式[2][3]等の様々な方式が研究されているが, いずれも一長一短があり最適解が存在しないのが現状である。この問題に対し, 我々は進行方向に大腿部を支持し, 歩行動作に応じた映像呈示によって歩行感覚を錯覚させる手法[4]を提案している。

実世界における歩行移動においては, 平面に限らず, 階段や坂道といった斜面を移動する状況が多く存在する。VR 空間内においても斜面の移動が実現できれば, 歩行感覚をより高臨場感に呈示することが期待できる。このような斜面を呈示する方法として, トレッドミル式[1]で実際に足場を上下させたり傾斜させたりする手法が提案されている。しかしトレッドミル式自体, 装置が大規模であり, 高コストであるため, 実用化が難しい。このため, コストをかけずに斜面を呈示できる手法が望ましい。

関連研究として, 錯覚によって階段を上り下りする無限階段[5]や, 坂道を歩く感覚を勾配に応じた歩行距離によって表現する手法[6]などが提案されている。低コストで斜面の感覚を呈示するためには, 錯覚による手法が有用だといえる。

そこで本研究では, 提案する歩行感覚呈示装置を用いて, 平面及び斜面を移動する映像を HMD で視覚呈示し, 主観評価実験を行う。具体的には, ランニングマシン及

び提案装置上で平坦及び斜面時に移動した際に感じた臨場感・疲労感・爽快感について 7 件法でアンケート評価を行った。

### 2. システム概要

図 1 に使用するシステムの概要図を示す。

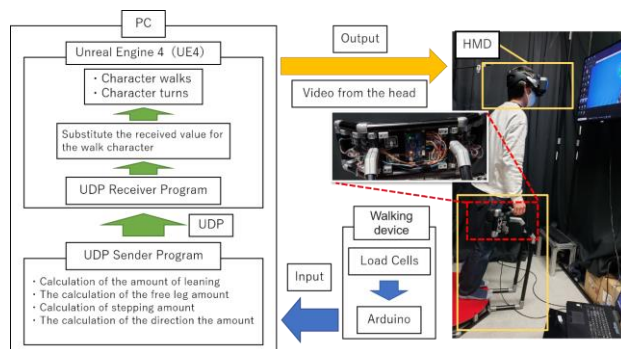


図 1: 簡易没入型 VR 歩行システム

提案する歩行装置は, 前進および旋回もしくは横移動に限定した構造となっており, ユーザの進行方向に対して大腿部を支持する。大腿部支持部はユーザの前方に固定配置し, ユーザの歩行動作を大腿部支持部に配置したロードセルで推定する。ロードセルは上部と下部に分けて配置することで, 進行方向や足の上がり具合, 体の預け具合を推定する。各ロードセルの値は Arduino に伝達され, Arduino からシリアル通信によって, PC 側の常駐ソフトウェアに

送られ、ユーザの体のもたれかかり具合を示す前傾具合、左右の足の遊脚具合、前進のための足踏み具合、横歩きや旋回を行うための移動ベクトルや進行角度を計算し、UDP 通信によって指定アドレスおよび指定ポートに対して推定した歩行動作を送信する。これらの値を取得するプログラムを作成することで、オリジナルのソフトウェアで歩行動作に応じたアバターの制御が可能となる。

本研究では Unreal Engine 4 (以後 UE4 とする) を用い、受信した各値はユーザの歩行特性に応じて補正し、操作するアバターの移動関数へ代入することでアバターの移動制御を行い、アバターの目線の映像を HMD に呈示する。

### 2.1 簡易没入型 VR 歩行システムにおける各種パラメータの算出

図 2 の番号①～⑧に示すように、大腿部支持部には荷重センサが計 8 つ取り付けられている。各番号から得られる値をそれぞれ、①= $u_1$ 、②= $u_2$ 、…、⑧= $u_8$ とおく。



図 2 : 荷重センサの配置

ユーザが本装置を用いて歩行動作をとる際、①～④から得られる平均値が前傾の値 ( $uAve$  とする) となり、以下の式で表わされる。

$$uAve = \frac{(u_1 + u_2 + u_3 + u_4)}{4} \quad (1)$$

大腿部支持部に体を預けた状態で下部センサのみに荷重をかけることは不可能であるため、遊脚具合は上部センサ値と下部センサ値のバランスで判定する。 $u_5 \sim u_8$ を補正した値をそれぞれ $u'_5 \sim u'_8$ と表す。補正の際にかける値を  $bGain$  とし、基準値を 3.0、 $u'_i < 0$  の時、 $u'_i = 0$  とする。

$$u'_5 = u_5 \times bGain - u_1 \quad (2)$$

$$u'_6 = u_6 \times bGain - u_2 \quad (3)$$

$$u'_7 = u_7 \times bGain - u_3 \quad (4)$$

$$u'_8 = u_8 \times bGain - u_4 \quad (5)$$

左足の遊脚具合の値を  $bLAve$ 、右足の遊脚具合の値を  $bRAve$  とすると、それぞれ以下の式で表わされる。

$$bLAve = \frac{(u'_5 + u'_6)}{2} \quad (6)$$

$$bRAve = \frac{(u'_7 + u'_8)}{2} \quad (7)$$

ユーザが大腿部支持部に体を預けた状態で足踏みすることで歩行動作判定となる。また、⑤～⑧の現フレーム(時刻  $t$ ) の遊脚具合の平均値  $bAve(t)$  は以下の式で表される。

$$bAve(t) = \frac{bLAve + bRAve}{2} \quad (8)$$

また、遊脚速度  $s(t)$  は以下の式で表わされる。

$$s(t) = bAve(t) - bAve(t - 1) \quad (9)$$

装置に体を預けた状態で足踏みすると、 $s(t)$  は急激な変動を繰り返すため、歩行中かどうかの判定をしやすくするため、 $s(t)$  の過去 5 フレーム分の移動平均値  $bMoveAve$  を以下の式で算出する。

$$bMoveAve = \frac{S(t-5) + S(t-4) + \dots + S(t-1) + S(t)}{6} \quad (10)$$

これらの値を常駐ソフトウェアから UDP 通信で指定 IP アドレスおよびポート番号の PC に送信し、送信先の UE4 側で受け取り、アバターの移動動作に反映させる。

## 3. 主観評価実験

### 3.1 実験環境

本研究では UE4 を用いて、傾斜が 0 度、 $\pm 10$  度、 $\pm 20$  度、 $\pm 30$  度の 7 種類のマップと透明のアバターを作成し、ランニングマシンと提案装置の 2 種類のデバイスで比較実験を行う。実験中の様子を図 3、被検者の HMD に出力する映像の様子を図 4 に示す。

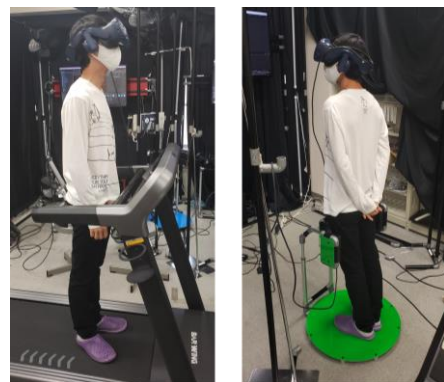


図 3 : ランニングマシン使用時の様子 (左) と提案装置使用時の様子 (右)



図4：傾斜0度（上），傾斜-30度（左），傾斜30度（右）のマップ

ランニングマシンは平坦時6km/hで動かし、映像の速度は6.184km/hとする。初速は0km/hであり、11秒かけて6.184km/hに到達する。映像の速度を少し早める理由として、映像から知覚する速度は本来の速度よりも少し速いため[7]、今回臨場感をより高めるために用いている。

現在の斜面を $\theta[\text{deg}]$ ( $-30 \leq \theta \leq 30$ )としたとき、歩行速度 $v[\text{km/h}]$ は以下で表される。

$$(\theta \geq 0) v = 6.184 \times \cos 2\theta \quad (11)$$

$$(\theta < 0) v = \frac{6.184}{\cos 2\theta} \quad (12)$$

提案装置の速度もランニングマシンと近い速度にするため、被験者から得られる移動平均値 (bMoveAve) を $x$ とし、被験者ごとに異なる増幅値を $a$ ( $a > 0$ )とした時の歩行速度 $v$ を以下の式で求める。

$$(\theta \geq 0) v = 6.184 \times ax \cos 2\theta \quad (13)$$

$$(\theta < 0) v = 6.184 \times \frac{ax}{\cos 2\theta} \quad (14)$$

傾斜感が知覚できるかどうかの評価項目として、歩行の臨場感、平面歩行時を基準としたときの疲労感の変化、および爽快感の3つの評価が考えられる。臨場感は、歩行装置としてのVR酔いがないかどうかに関わり、評価が高いほど現実での足を使った移動に近いことを意味する。疲労感については評価が高いほど平面歩行時に比べてより進む力が必要に感じていることを表し、上り坂の感覚を知覚出来ていると考えられる。爽快感は速い速度で駆け抜けた気持ちよく移動できると評価が高くなる。これは下り坂の感覚に関わり、平面歩行時よりも評価が高くなっていれば下り坂の感覚が知覚出来ていると考えられる。

このため、上り坂であれば疲労感が高く、爽快感が低くなり、下り坂であれば疲労感が低く、爽快感が高くなると考えられる。

### 3.2 実験手順

被験者は21～24歳の男性10名であり、VR経験者、未経験者が混合している。先にランニングマシンを使用したのち提案装置を使用するAグループ5名と、先に歩行装置を使用するBグループ5名の2グループに分ける。

ランニングマシンを使用する際、ランニングマシンが動き出すと同時に変化する映像を被験者に呈示する。提案装置を使用する際は、ユーザの歩行特性に応じてキャリブレーションし、被験者の好きなタイミングで自由に前に進んでもらう。

実験後の評価アンケートとして、下記の3項目を1～7の7件法(図5)で行う。

- ・項目1：歩行の臨場感は感じられたか
- ・項目2：平坦時に比べて、疲労感があったか
- ・項目3：爽快感はあったか

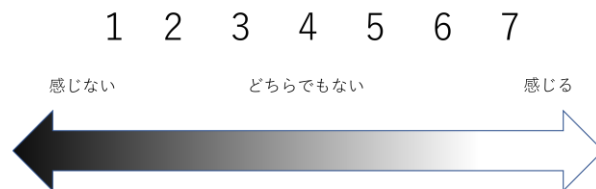


図5：7段階の評価指標

アンケートについては、事前にアンケート内容、坂道の種類を伝えた上、いずれも0度から始まり、徐々に角度を大きくして実験を行う。

### 3.3 実験結果・考察

各項目の結果について、被験者の中央値をグラフにしたものをそれぞれ図6～8に示す。

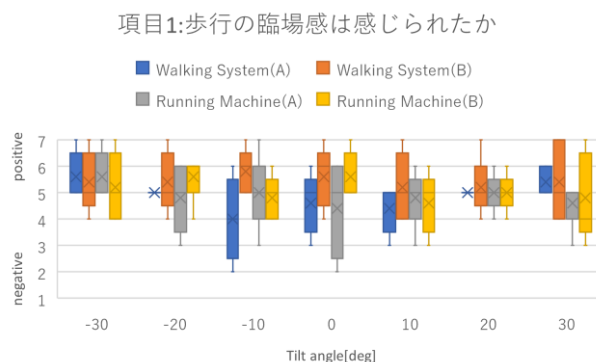


図6：項目1における中央値

図6から、どの場合も中央値は中間の4を超えていた。このことから、被験者は自分の足で移動しているという感覚が感じられていたことが推測できる。より臨場感を向上させるには、前進だけでなく、旋回動作や横移動なども評価する必要がある。

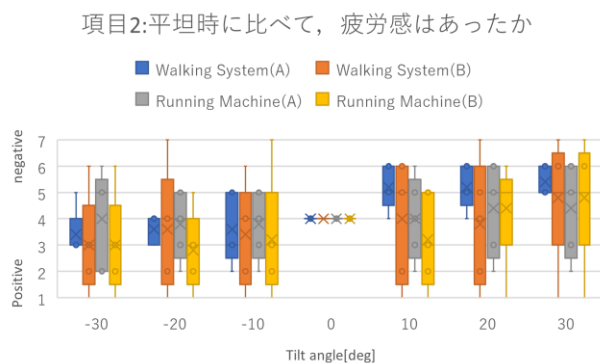


図7：項目2における中央値

図7から、平坦時は基準のためどのグループでも真ん中の4にしている。疲労感については、ばらつきはあるものの、下り坂の時は低く、上り坂の時は高く、傾斜角度に応じて変化していることがわかる。

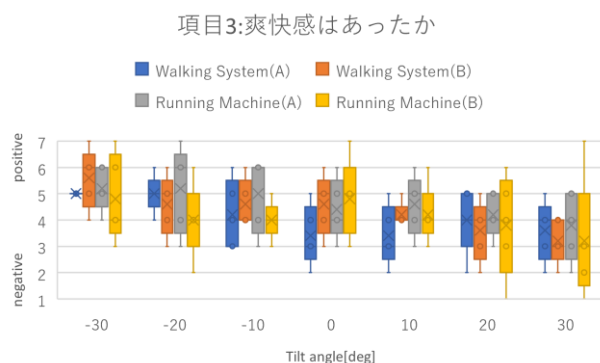


図8：項目3における中央値

図8から、全体的に-30度が最も高く、30度が最も低くなっている。爽快感に関しては下り坂の時は高く、上り坂の時は低く、傾斜角度に応じて明確に変化していることがわかる。

以上の3つの項目から、提案装置及びランニングマシン共に平面、傾斜の感覚が呈示できていたことがわかる。また、上り坂よりも下り坂の方がうまく呈示できていた。

実際に足で移動しているランニングマシンと提案装置とでは、そこまで評価の違いがなかったことから、提案装置は実際に自分の足での移動するときと変わらないくらいの臨場感の呈示が出来ていることがわかる。

データのばらつきについて、どの項目もばらつきは大きかった。これは、被験者の数が1グループ5名と、被験者数が少なかったことが原因だと考えられる。このため、今後は被験者数を増やして更なる評価実験を進めていく。

#### 4. むすび

本研究では、提案する歩行感覚呈示装置を用いて、平面及び斜面を移動する映像をHMDで視覚呈示し、主観評価実験を行った。具体的には、ランニングマシン及び提案装置上で平坦及び斜面時に移動した際に感じた臨場感・疲労感・爽快感について7件法でアンケート評価を行った。この結果、提案装置はランニングマシンと同等の臨場感をもたらすことが出来るうえ、傾斜感の知覚が可能であることがわかった。

今後の課題として、より被験者を増やして更なる評価実験を進めていくことが挙げられる。また、提案装置を用いた際に、どの程度の移動速度まで高臨場に知覚が出来るのかについて明らかにしていく。

**謝辞** 本研究は、JSPS 科研費 JP19H04158 の助成を受けたものである。

#### 参考文献

- [1] 野間春生：ロコモーションとバーチャルリアリティ、計測と制御、Vol.2, No.43, pp. 133-138, 2004.
- [2] J. Y. Kim and W. H. Lee: Walking Simulation for VR Game Character Using Remote Sensing Device Based on AHRS-Motion Recognition, in IEEE Access, vol.7, pp. 19423-19434, 2019.
- [3] 雨宮慎之助, 八木寿浩, 塩崎佐和子, 藤田欣也, 渡辺富士夫: 足踏式空間移動インタフェース(WARP)の開発と評価, TVRSJ, Vol. 11, No. 2, pp. 237-244, 2001.
- [4] Wataru Wakita, Tomoyuki Takano, and Toshiyuki Hadama: A Low-cost Omni-directional VR Walking Platform by Thigh Supporting and Motion Estimation, ACM VRST 2018, Posters and demos, Waseda University, Tokyo, Japan, Nov. 29, Dec. 1, 2018.
- [5] Ryohei Nagao, Keigo Matsumoto, Takuji Narumi, Tomohiro Tanikawa, and Michitaka Hirose: Infinite Stairs: Simulating Stairs in Virtual Reality based on Visuo-haptic Interaction, SIGGRAPH2017 Emerging Technologies, July, 2017.
- [6] Keigo Matsumoto, Takuji Narumi, Tomohiro Tanikawa, Michitaka Hirose: Walking uphill and downhill: redirected walking in the vertical direction, ACM SIGGRAPH 2017 Posters, Los Angeles, CA, USA, Jul. 2017.
- [7] 高幣 俊之, 野村 宜邦, 前田 太郎, 舘 暲: 歩行における視覚と運動感覚の整合性に関する研究, TVRSJ Vol.5 No.2 pp.831-836, 2000.