

仮想空間の登坂動作における視触覚間相互作用の検証

石河 竜太^{†1,a)} 井上 亮文^{†1} 星 徹^{†1}

概要: ヘッドマウントディスプレイを着用したユーザの実空間の動きを仮想空間のキャラクターに反映させる体験型 VR ゲームでは、仮想空間において起伏に飛んだゲームフィールドが提示されることが多い。しかし、実空間のプレイヤーは、仮想空間の起伏と一致しない平面上で歩行動作を行うことがほとんどである。本稿では、仮想空間の視覚的な路面提示と実空間の触覚的な路面提示との差が与える影響について調査する。実験では、ヘッドマウントディスプレイを着用したプレイヤーに対し、仮想空間内で勾配を持った斜面を視覚的に提示する。プレイヤーは、実空間で勾配を持った斜面上で歩行移動をし、仮想空間内を移動する。この視触覚間の勾配差がプレイヤーに与える影響について評価を行う。

Verification of Visuo-Haptic Interaction for Hill-Climbing Motion in Virtual Environment

RYUTA ISHIKAWA^{†1,a)} AKIFUMI INOUE^{†1} HOSHI TOHRU^{†1}

Abstract: Interactive/experience-based VR games display players rough terrain, such as slopes and steps, in the virtual game field. The players in the real world, however, have to take walking action on the flat floor. This difference can be considered to reduce the immersion of the players. In this paper, we investigate the effects of the difference between visual stimuli in the virtual environment and haptic stimuli in the real world. In the experiment, the subjects were showed a long slope in a virtual world through the head-mounted display. While the subjects were seeing the slope on the head-mounted display, they were also directed to take walking action on the slanted treadmill in the real world. We evaluated the immersion under varying conditions by changing the combination of the visual/virtual slope angle and the haptic/real treadmill angle.

1. はじめに

ヘッドマウントディスプレイ（以下、HMD）やモーションキャプチャの技術が向上したことにより、体験型バーチャルリアリティゲームが注目を集めている。体験型 VR ゲームでは、実空間で HMD を装着したプレイヤーの身体の動きと、HMD に表示される仮想空間のキャラクターの動きとが連動する。これにより、HMD 装着者は高い没入感を得ることができる。

体験型 VR ゲームの 1 つである「高所恐怖 Show」では、HMD 装着者は実空間においてぐらつく板の上を歩く。このとき、HMD に表示される仮想空間では、高層ビルの屋上間かけられた不安定な板の上を歩いているように見え

る。HMD で得られる視覚情報と、足の裏から伝わる触覚情報とがあわさることで、プレイヤーは高い没入感を感じることができる。

現状の一人称視点 3D ゲームでは、段差や坂など起伏に富んだ地形を移動することがほとんどである。この傾向は今後の体験型 VR ゲームにおいても共通すると考えられる。しかし、プレイヤーが HMD を装着して身体を動かす実空間の床部分は平面であることが多い。このとき仮想空間において表示されている地形が平面でない場合、視覚情報と触覚情報の差から没入感が低下してしまう。足に装着するデバイスを伸長させることで物理的な段差を提示する試みもあるが、頻出地形の 1 つである連続的な高低差（以下、斜面）に対応させることで、体験型 VR ゲームのユーザ体験をより魅力的なものにできる可能性がある。

我々は、プレイヤーにおける視覚と触覚との一体感が

^{†1} 現在、東京工科大学
Presently with Tokyo University of Technology
a) c0114046aa@edu.teu.ac.jp

ゲーム体験に与える影響を調べるため、様々なゲームインタフェースの研究に取り組んでいる [1].

本研究では、移動インタフェースの基礎的な検討の1つとして、仮想空間の登坂動作における視触覚間相互作用の検証を行う。坂の登坂を行う体験型 VR ゲームにおいて、HMD を通して視覚的に提示される斜面と、足元で触覚的に提示される斜面を様々な条件で組み合わせることで、ユーザの没入感がどのように変化するかを調査する。

2. 関連研究

福島らは、限られた空間内での全方位への無限歩行を可能とする、環型歩行感覚呈示装置 CirculaFloor[2] を開発した。本システムでは、座布団のような形状をした全方位移動ロボットを複数密着させて平面を形成する。ユーザがその平面上を歩行してその端に到達すると、ユーザ足元のロボットが進行方向と逆に移動し、ユーザの絶対位置を引き戻す。同時に、ユーザの後方にあるロボットが進行方向の前方足元へ移動する。このロボットは水平移動だけでなく高さも変化させることができるため、ユーザは限られた空間内で連続的な無限歩行が可能になる。

本システムでは、座布団のような形状をした全方位移動ロボットを複数密着させて平面を形成する。ユーザがその平面上を歩行し、その端に到達すると、ユーザが足元のロボットが進行方向と逆に移動し、ユーザの絶対位置を引き戻す。同時に、ユーザの後方にあるロボットが進行方向の床位置へ移動することで、歩行ができる

Schmidt らは、物理的に段差を提示するために靴型のデバイス Level Ups[3] を開発した。Level Ups は底に鉛直方向に動くアクチュエータが取り付けられている。ユーザが仮想空間内で段差を昇り降りすると、靴型デバイスの底部分が伸縮し、実空間でも段差を昇り降りする感覚が得られる。

長尾らは、視触覚間相互作用を用いて、物理的に段差を作り出すことなく上昇感覚が得られる手法 [4] を提案した。仮想空間で階段を登る際、足裏へ段差の縁が当たる場所に触覚刺激を与える。この手法によって、没入感と上昇感覚が優位に向上することが示された。また、被験者が知覚した段差の高さは触覚刺激よりも視覚情報に大きく影響されることが示唆された。

これらの研究は仮想空間で鉛直方向移動をする際、実空間で足裏へ触覚提示を与えることで没入感を増加させている。しかし、これらの研究は段差といった並行な地面上を移動しているため、斜面が考慮されていない。

これらの研究は、実空間において足裏に触覚を用いて段差を提示することにより、仮想空間における昇降感覚および没入感を上昇させている。しかし、これらが対象としている段差は勾配が非連続的に変化する地形であり、かつ、各段差の上面は水平である。実際のゲームにおいては、段

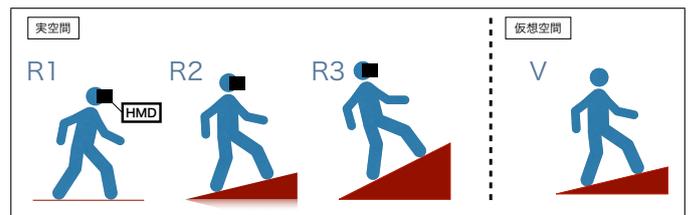


図 1 研究概要

差以外にも、勾配が連続的に変化する斜面も多く登場する。斜面において足で知覚する触覚は、足首の屈折角度のように、段差におけるそれとは異なる可能性がある。

3. 仮想空間の登坂動作における視触覚間相互作用の検証

ユーザは図 1-R1 のように実空間の平面上で歩行動作を行うと、図 1-V のような仮想空間での登坂移動が提示されてきた。しかし、関連研究 [3] [4] より、仮想空間での視覚提示と足裏への触覚提示が一致することで昇降感覚が増加することが指摘されている。

そこで本研究では、仮想空間で登坂動作をする際に図 1-R2 のように実空間でも足部に対して斜面を提示する。これによりユーザの登坂感覚・没入感を増加させることができると考えられる。

加えて、図 1-R3 のように、実空間と仮想空間との間の斜面提示角に差がある場合の没入感についても調査を行う。仮想空間で視覚的に提示する傾斜よりも実空間で触覚的に提示する傾斜が小さくても没入感が上昇すれば、移動インタフェースに対してわずかな変更を加えるだけで没入感を改善できる可能性がある。反対に、実空間で触覚的に提示する傾斜が仮想空間のそれと同等かそれ以上に必要な場合、コスト面・安全性の面から、傾斜操作を行わない方が望ましくなる可能性がある。

4. プロトタイプシステム

図 2 に実験システムを示す。本システムは歩行面の高さ及び勾配を変更可能なルームランナー（トレッドミル）、HMD、PC の 3 つで構成される。ユーザがルームランナー上で歩行動作を行うと、ルームランナーに取り付けられたロータリエンコーダが回転し、歩行距離を検出することができる。また、ユーザの左右の足には位置センサが取り付けられており、歩行動作を検出することができる。

HMD 内には斜面を含む仮想空間が表示されている。PC が歩行距離を検出すると、HMD 内での仮想空間において登坂動作が発生し、傾斜に沿って視点が移動する。また、歩行動作を検出すると、仮想空間の足元で左右の靴が歩行をする様子が表示される。

図 3 にプロトタイプシステムの全体像を、表 1 に利用機材の構成を示す。高さおよび傾斜の調整は木片をルーム

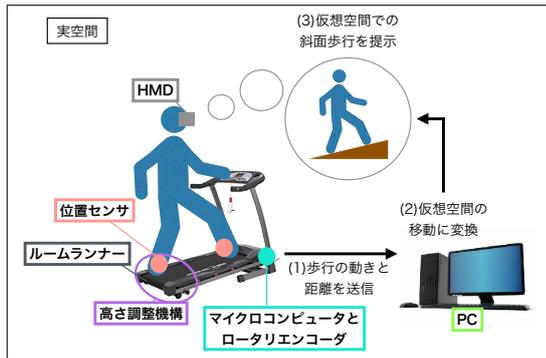


図 2 システム構成



図 3 プロトタイプシステムの全体図

表 1 プロトタイプシステムの構成要素

要素名	仕様
HMD	HTC Vive
位置センサ	HTC Vive Tracker
PC	WindowsPC
ルームランナー	コーポ コンパクトウェーカー
ロータリエンコーダ	OMRON E6B2-CWZ6C
マイクログンピュータ	mbed NUCLEO-F303K8
高さ調整機構	木材 80cm × 40cm × 2cm 1つ 木材 16cm × 9cm × 1.5cm 8つ 木材 14.5cm × 9cm × 0.8cm 6つ

ランナー下部に挟み込むことで実現した。16cm × 9cm × 1.5cm の木材 1つにつき、1°単位で調節可能である。しかし、ルームランナーの角度を変更させると、ルームランナーに取り付けられている手すりでは危険なため、外付けの手すりを作成した。実験時に被験者には位置センサのついた靴を履いてもらう。

ロータリエンコーダの取付箇所を図 4 に示す。ロータリエンコーダのギアとルームランナーのギアにはマジックテープを貼り付けた。これにより、ユーザがルームランナー上で激しい動作をしても安定して歩行を検出ができる。ロータリエンコーダは 3D プリンタで作成した固定機の中に格納されている。

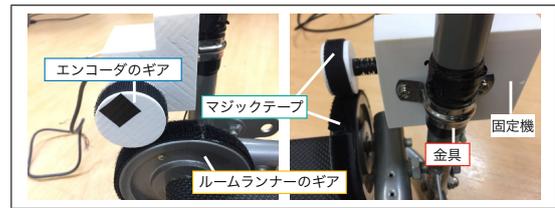


図 4 歩行距離検出部の構造

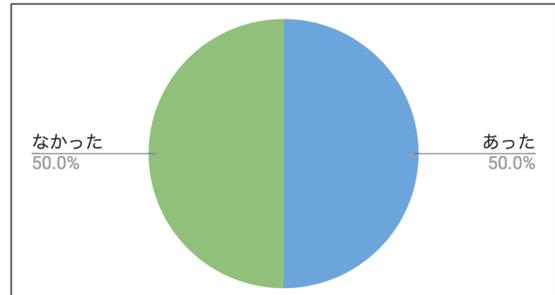


図 5 歩行スピードの違和感

5. 予備実験

実空間の移動距離と仮想空間の移動距離に違和感がないか性能評価を行った。

5.1 ルームランナーを使った仮想空間の移動の性能評価

5.1.1 実験方法

ルームランナーに乗って動いた実空間の移動距離と、仮想空間の移動距離のスケールが一致するように実装し、歩く際の違和感がないかをアンケート調査した。20 代の男性 12 名、女性 2 名の合計 14 名を対象に実験を行った。アンケート項目は以下の通りである。

- 歩行スピードに違和感を感じるか
- 歩幅に違和感を感じるか

5.1.2 結果及び考察

歩行スピードの違和感のアンケート結果を図 5 に示す。回答結果は 50.0%が違和感を感じ、50.0%が違和感を感じなかった。実空間と仮想空間とで移動距離のスケールを一致させていたが、50.0%が違和感を感じていた。これは、仮想空間の移動と実空間移動とで感じる歩行速度の感じ方に違いがあったとからと考えられる。

歩幅の違和感のアンケート結果を図 6 に示す。回答結果は 35.7%が違和感を感じ、64.3%が違和感を感じなかった。位置センサを用いて歩幅をトラッキングしていたが、35.7%が違和感を感じていた。これは、ユーザの歩行時、位置センサのついた靴をルームランナーなどにぶつけてしまい、位置センサーのトラッキングがずれて、仮想空間の靴の位置がずれてしまうのが問題として考えられる。

6. 評価

プロトタイプシステムを用いて、登坂動作についてのア

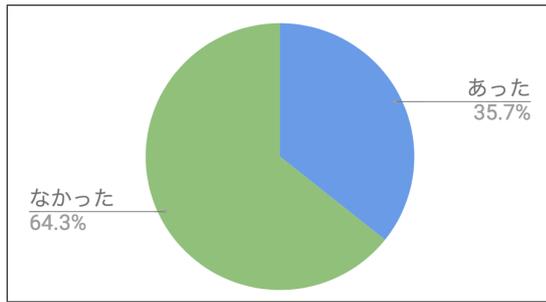


図 6 歩幅の違和感

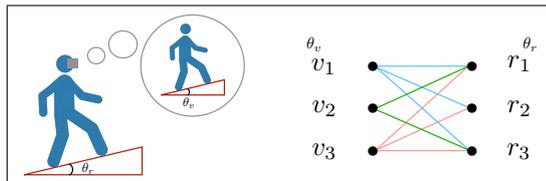


図 7 アンケート調査概要

アンケート調査を行った。

6.1 アンケート調査

6.1.1 実験方法

実空間の勾配と仮想空間の勾配を3種類ずつ設定し、それぞれの組み合わせでユーザが登坂動作をどのように感じるのかを検証した。評価実験を行うためのデモアプリケーションをゲームエンジンである Unity を用いて作成した。フィールドには、家、木、車が存在し、斜面の傾きは任意に動かすことができる。

アンケート調査の概要を図 7 に示す。実空間の斜面の勾配を θ_r 、仮想空間の斜面の勾配を θ_v とする。 θ_r は 0° 、 7.5° 、 20° の 3 段階、 θ_v は 0° 、 3.5° 、 7.5° の 3 段階の勾配を用いる。実空間の斜面の勾配は、ルームランナーの最大勾配が 7.5° であったため、安全面を考慮し、実験でも最大勾配を 7.5° とし、 0° と 7.5° の間の勾配として 3.5° を用いる。また、仮想空間の斜面の勾配は、最大勾配は世界で 1 番急な坂であるニュージーランドのボールドウィン・ストリートの 19° から 20° とし、実空間の勾配の 1 つである 7.5° を用いる。実際に可変した実空間の斜面を図 8 に示し、仮想空間の斜面を図 9 に示す。図 8 - ①はルームランナーの後方の接地面に木材を置くことで、 0° に調整した。図 8 - ②も同様にして、 3.5° に調節した。図 8 - ③は通常の状態の勾配である 7.5° の状態である。

仮想空間の 1 つの勾配に対して、実空間の 3 つの勾配を登る 3 つの組み合わせを 1 セットとして、残りの仮想空間の勾配にて計 3 セットのタスクを行った。1 セットのタスクが終わるごとにアンケートに回答してもらい、アンケートの回答が終わり次第、次のセットに移った。それぞれのタスクをタスク A、タスク B、タスク C として行い、それぞれのタスクを以下に示す。

- タスク A

- (1) 仮想空間 0%，実空間 0%
- (2) 仮想空間 0%，実空間 6.1%
- (3) 仮想空間 0%，実空間 13.1%

- タスク B

- (1) 仮想空間 6.1%，実空間 0%
- (2) 仮想空間 6.1%，実空間 6.1%
- (3) 仮想空間 6.1%，実空間 13.1%

- タスク C

- (1) 仮想空間 13.1%，実空間 0%
- (2) 仮想空間 13.1%，実空間 6.1%
- (3) 仮想空間 13.1%，実空間 13.1%

タスク内で実空間の勾配を変更する際、HMD の映像を止め、被験者は HMD を着用した状態でルームランナーから降り、実空間が見えない状態で実空間の勾配を変更させた。20 代の男性 12 名、女性 2 名の合計 14 名を対象に実験を行った。評価実験を行う際、タスクの順番及びタスク内の実空間の提示勾配の順番が評価に影響する可能性があるため、それぞれ無作為に行った。

実験を行うにあたり、以下の点について説明を行った。

- バーチャル空間内の坂道での移動を評価するための実験という実験目的
- 複数パターンの坂道の勾配について検証する
- 仮想空間の 20m 地点に車を設置された車の横まで移動するように指示

6.1.2 結果

タスク A の場合、実空間勾配 0% で 57.1% の被験者が違和感を感じた。

タスク B の場合、実空間勾配 0% で 23.0% の被験者、実空間勾配 6.1% で 30.0% の被験者が違和感を感じた。

タスク C の場合、実空間勾配 6.1% で 53.8% の被験者が違和感を感じた。

7. おわりに

本研究では、仮想空間の登坂動作における視触覚間相互作用の検証を行った。プロトタイプシステムを作成し、登坂動作する際、実空間と仮想空間との角度が違った場合を調査した。

謝辞

本研究の一部は JSPS 科研費 17K00284 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] Kajiyama, H., Inoue, A. and Hoshi, T.: SHAPIO: Shape I/O Controller for Video Games, *Proceedings of the 2015 Annual Symposium on Computer-Human Interaction in Play*, New York, NY, USA, ACM, pp. 565–570 (online), DOI: 10.1145/2793107.2810318 (2015).
- [2] 福島寛之, 矢野博明, 野間春生, 岩田洋夫: 全方位置移動口

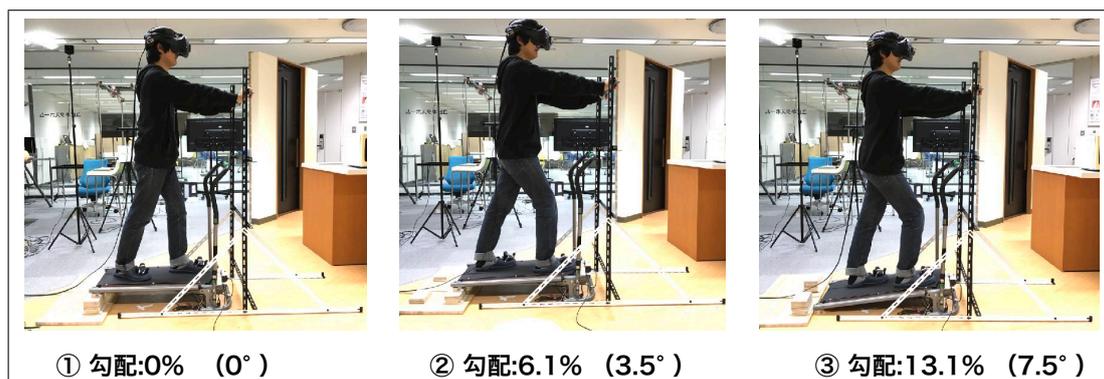


図 8 実空間の斜面

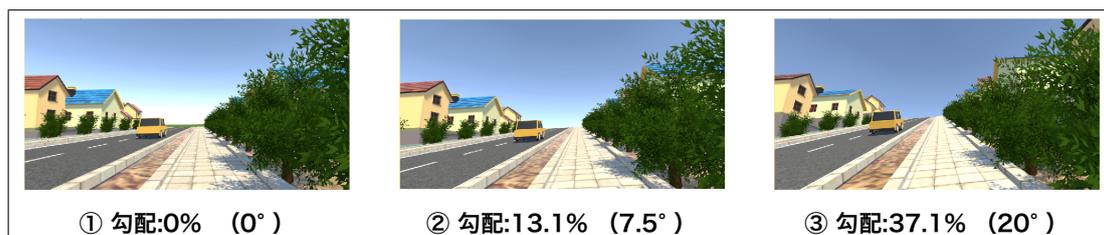


図 9 仮想空間の斜面

ポットを用いた歩行感覚呈示装置 CirculaFloor(「人と相互作用するロボット」特集), 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 11, No. 2, pp. 237-244 (2006).

- [3] Schmidt, D., Kovacs, R., Mehta, V., Umapathi, U., Köhler, S., Cheng, L.-P. and Baudisch, P.: Level-Ups: Motorized Stilts That Simulate Stair Steps in Virtual Reality, *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '15*, New York, NY, USA, ACM, pp. 2157-2160 (online), DOI: 10.1145/2702123.2702253 (2015).
- [4] 長尾涼平, 松本啓吾, 鳴海拓志, 谷川智洋, 廣瀬通孝: 視触覚間相互作用を用いた疑似上昇感覚提示の基礎検討, 技術報告 3 (2017).