

VRにおける仮想的な坂道昇降動作と視覚操作に対するユーザ評価

島村 僚^{1,a)} 粥川 青汰¹ 中塚 貴之¹ 宮川 翔貴¹ 森島 繁生^{2,b)}

概要：本研究では現実空間において平地を歩いているユーザに対し、ヘッドマウントディスプレイ（HMD）を用いて坂道を表示し、昇降させた際の知覚に関してユーザ評価を行った。広く普及しているHMDの多くは、使用環境としてリビングや実験室といった部屋を想定している。現実-仮想空間における移動量を一对一で対応させている限り、仮想空間での行動範囲は現実のルームスケールに限定される。特に鉛直方向への移動は、実際の階段を登るといった危険を伴う。そのため、HMDの表示方法を制御（以下、視覚操作）しユーザを誘導することで、仮想空間におけるデザインの自由度を拡張する取り組みがなされてきた。しかしながら、人間の知覚が大きく関わることもあり最適な視覚操作はいまだ提案されていない。本研究はケーススタディとして、平地を移動するユーザが仮想的な坂道を昇降する際の知覚をリアリティ・負荷感・高度変化感の3つの側面から調査した。ユーザ評価の結果、仮想空間内での頭部および足の移動量を変更することで、ユーザの身体へ負荷感を与える傾向があることを確認した。

1. 導入

バーチャルリアリティ（VR）体験の向上には、仮想空間への没入感が欠かせないユーザビリティの一つである。映像やセンサ技術といったVRに関連する技術は日々進歩を遂げており、現実とのギャップは埋まりつつある。バーチャル体験には一般に、ヘッドマウントディスプレイ（HMD）と呼ばれる頭部装着型デバイスとトラッカーと呼ばれる位置追跡デバイスが用いられる。これらのデバイスは、技術的制約により利用可能範囲が数[m] × 数[m]（以後、ルームスケールと呼ぶ）に限られている。そのため仮想空間と現実空間を1対1に対応付けてしまうと、仮想空間の大きさはルームスケールに束縛されてしまう。この事実は仮想空間のデザインの自由度を押し下げる大きな要因の一つとなっている。

この問題点を解決する手法として、仮想空間の大きさを水平方向 [1], [2], [3]、または垂直方向 [4], [5], [6] へ拡張する手法が研究されている。仮想空間を拡張するための既存研究は、(1) 視覚操作を用いた手法 [1], [2], [3], [5]：ユーザの視点や手足の位置に対して仮想空間と現実空間の間に差異を付与、(2) ハードウェアを用いた手法 [4], [7], [8]：身体にかかる負荷や触覚フィードバックをハードウェアを



図 1 VR における仮想的な坂道の昇降動作。

用いて再現、という二つの手法に大別される。

その中でも本研究では、視覚操作を用いて仮想空間内における坂道の昇降動作を表現し（図1）、昇降動作に対するユーザ評価を行なう。具体的には視覚操作として、ユーザの頭部および足の位置に関して（1）傾斜に合わせた高度変化を加える、（2）現実空間における移動量を定数倍した移動量を仮想空間に反映させる、という二点について評価を行なう。

さらに本研究では、以上の視覚操作を付与するシステムを実装し、実際に仮想空間内の坂道を昇降するタスクをユーザに与えることで仮想空間内における昇降動作のリアリティ、身体が感じる負荷感および高度変化感を調査する。本実験の調査結果から、(1) 仮想空間におけるユーザの移動量を現実空間の移動量より小さくすることで、ユーザに対して負荷を感じさせることが可能となる、(2) 坂道の

¹ 早稲田大学

² 早稲田大学理工学術院総合研究科

a) s-ryo@akane.waseda.jp

b) shigeo@waseda.jp

傾斜角度とユーザの知覚の間に相関関係は確認されなかつた、というフィードバックが得られた。

2. 関連研究

2.1 視覚操作を用いた仮想空間の鉛直方向への拡張手法

現実空間における水平方向の移動を、仮想空間における鉛直方向への移動に拡張することを目的として、視覚操作を用いることで平坦な現実空間とは異なる形状を持った仮想空間を表現する手法が研究されている [4], [5], [6]. Marchal ら [5] は、平坦な現実空間を移動するユーザの視点の位置、角度および速度を仮想空間内の形状に合わせて変更するシステムを提案した。評価実験によって、提案システムはユーザが仮想空間内の地形（凹凸の有無）を判別する上で有用であることを示した。しかしながら Marchal らの実験からは、平坦な現実空間と仮想空間の地形の違いから生じ得るユーザの知覚について調査が行われていない。そこで本研究では、仮想空間内に存在する坂道をユーザが昇降した際に感じ得る知覚（身体を感じる負荷、昇降動作のリアリティ、高度変化感）に注目してユーザ評価を行う。

仮想空間内の坂道を昇降する際に生じるユーザの知覚を調査した研究として、Matsumoto ら [6] の研究がある。Matsumoto らは、仮想空間における坂道の昇降を表現するために、(1) 坂道にあわせてユーザの頭部および足の位置を変更する、(2) 現実空間における移動量を定数倍した移動量を仮想空間に反映させる、という二つの視覚操作を行なった。特に (2) について Matsumoto らは、坂道を登る際は移動量を現実空間における移動量よりも小さく設定し、反対に降る際は移動量を大きく設定して実験を行なった。実験から、同じ角度の坂道を昇降する場合、移動量を変化させた時の方がユーザは急な坂道を感じる、という結果が得られた。本研究では、仮想的な坂道の昇降動作と視覚操作に対するユーザ評価を、以下に示す三点について Matsumoto らの調査からさらに拡大して行う。

1. ユーザの知覚に関する評価： Matsumoto らによる研究では、移動量を変更した際に通常の移動量の時と比べて坂道を急に感じるか否かという点のみ調査を行なっている。本研究では移動量の変化率を三段階設定し、それぞれに対して昇降時の身体を感じる負荷感、昇降動作のリアリティ、高度変化感の三つについてアンケート調査を行う。さらに得られた結果から、各質問事項と三段階の移動量の相関に関して考察を行う。
2. 坂道の角度とユーザの知覚の相関： Matsumoto らは登り坂と降り坂を二種類ずつ用意し、登り坂では移動量を小さく、降り坂では移動量を大きく設定する、という二つのコンディションで調査を行なっている。本研究では坂道の角度を登り降りそれぞれ三段階ずつ計六種類の坂道に対して実験を行い、前述のユーザの知覚に関して、仮想空間の坂道の傾斜角度との関係を議論する。

論する。

3. 実験参加人数の拡大： Matsumoto らの実験では 3 人の実験参加者に対して実験を行なった。本研究では 12 人の実験参加者に対して実験を行う。

2.2 ハードウェアを用いた仮想空間の拡張手法

ハードウェアを用いて仮想空間を鉛直方向に拡張するシステムが研究されている。Iwata ら [7] は、ユーザの進行方向とは逆向きに動く段差の上をユーザに歩かせることで、仮想空間における階段の昇降を表現した。Iwata らのシステムでは現実環境においても段差を昇降するため、段差の昇降に伴って生じる負荷をユーザに与えることが可能となる。また Nagao ら [4] は、仮想空間内の段差を昇降する際に、現実空間上に配置された突起をユーザに踏ませるシステムを提案した。階段の角に見立てた突起から得られる触覚フィードバックによって、現実の段差を昇降する感覚を与えることが可能となる。しかしながら、これらのハードウェアを使用した手法は、ユーザがハードウェアの動く速度や設置位置に合わせた移動しかできないという制約がある。

2.3 視覚操作を用いた身体機能の拡張手法

VR による視覚操作を用いた身体機能の拡張手法として、手や足の大きさを変更して表示するシステム [10], [11] や、現実空間とは異なる位置にユーザの手の位置を表示するシステム [9] が研究されている。これらの研究はシステムのユーザ実験を通して、ユーザの身体の位置や大きさにおいて現実空間と仮想空間の間に差異を持たせることができ、ユーザの知覚にどのような影響を与えるかを確認した。Jun ら [10] は、仮想空間内に表示する足の大きさが知覚する仮想空間の広さに影響を与えることを実験から明らかにした。また、Linkenauger ら [11] は、仮想空間内の手の大きさが知覚する仮想空間内の物体の大きさに影響を与えることを実験から明らかにした。

本研究では、(1) 傾斜に合わせた高度変化を加える、(2) 現実空間における移動量を定数倍した移動量を仮想空間に反映させる、という二つの視覚操作を加えるシステムを実装する。さらにシステムの評価実験を通して、視覚操作から生じた現実空間と仮想空間の間の差異がユーザの知覚どのように影響を与えるかを調査した。

3. 実験

本実験の目的は、平地を移動するユーザが仮想的な坂道を昇降する際に感じる知覚を調査することである。本実験では、仮想的な坂道を昇降する時、坂道の傾斜・頭部および足の移動量の変更が人の知覚にどのような影響を与えるかを調査した。本実験では、歩行能力や視力に問題がなく

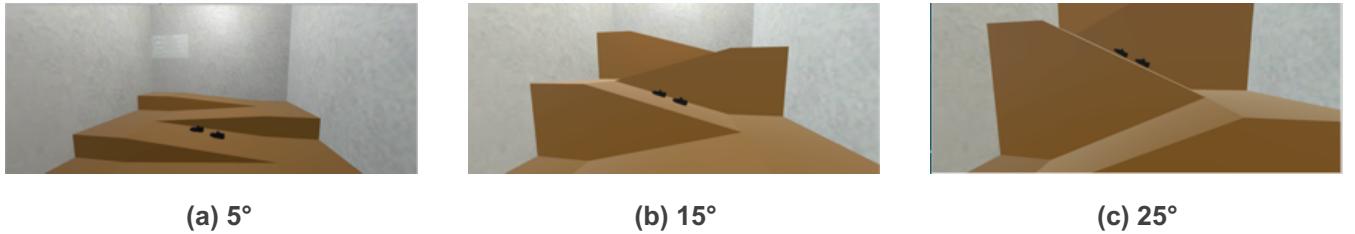


図 2 実験で使用した傾斜角度（三種類）。

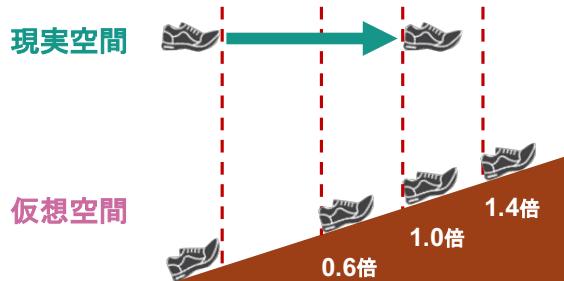


図 3 頭部および足の移動量の変更。

実験を遂行できる成人 12 名（男性 11 名、女性 1 名、21–26 歳）を実験参加者として募集し、システムのユーザ評価を行なった。

3.1 コンディション

本研究ではパラメータとして、(1) 坂道の傾斜角度、(2) 頭部および足の移動量の二つを用意した。本実験では六段階の傾斜角度、三段階の移動量を用意し、これらを組み合わせることで 18 種類のコンディションを用意した。

3.1.1 坂道の傾斜角度

本実験で用意した仮想空間は図 2 に示すような四つの坂道を含んだ密閉空間である。それぞれの坂道は水平な踊り場で繋がっている。また、一つの坂道の水平方向の長さは 2.4 [m]、踊り場の幅は 1.0 [m] である。本実験では、登り・降りそれぞれにおいて ±5°、±15°、±25°、計 6 通りの傾斜角度の坂道（図 2）を調査した。また、どの傾斜角度においても仮想空間内における坂道の水平方向の長さは 2.4 [m] に固定した。

3.1.2 頭部および足の移動量

頭部および足の移動量の変更とは、図 3 のように現実での移動量に定数倍を乗算し、これを仮想空間での移動量に反映することを指す。本実験では、0.6 倍、1.0 倍、1.4 倍の倍率を調査した。どの倍率においても、坂道の水平方向の長さ、踊り場の幅は固定した。

3.2 実装

図 4 に示した座標系において、トラッキングから得られた現実空間における座標 $(x_{real}, y_{real}, z_{real})$ と、仮想空間における表示位置 $(x_{virtual}, y_{virtual}, z_{virtual})$ を、以下の式

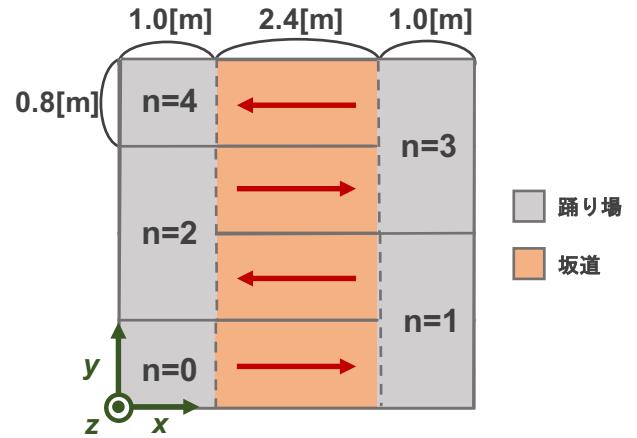


図 4 仮想空間を上から見た図（赤矢印は進行方向を、 n は n 番目の踊り場を表す）。

1–式 3 を用いて対応づける。

偶数番目の踊り場に位置するとき ($0 < x_{real} \leq 1$)

$$\begin{cases} x_{virtual} = x_{real} \\ y_{virtual} = y_{real} \\ z_{virtual} = z_{real} + H_i \end{cases} \quad (1)$$

坂道に位置するとき ($1 < x_{real} \leq 1 + \frac{2.4}{T}$)

$$\begin{cases} x_{virtual} = 1 + T(x_{real} - 1) \\ y_{virtual} = y_{real} \\ z_{virtual} = z_{real} + H_i + (x_{virtual} - 1)\tan\theta_i \end{cases} \quad (2)$$

奇数番目の踊り場に位置するとき ($1 + \frac{2.4}{T} < x_{real} \leq 2 + \frac{2.4}{T}$)

$$\begin{cases} x_{virtual} = 2.4 - \frac{2.4}{T} + x_{real} \\ y_{virtual} = y_{real} \\ z_{virtual} = z_{real} + H_i + 2.4\tan\theta_i \end{cases} \quad (3)$$

ただし、 θ_i 、 H_i はそれぞれ以下の式 4 および式 5 を満たす。

$$\theta_i = \begin{cases} \theta & (0 \leq y_{real} < 0.8) \\ -\theta & (0.8 \leq y_{real} < 1.6) \\ \theta & (1.6 \leq y_{real} < 2.4) \\ -\theta & (2.4 \leq y_{real} < 3.2) \end{cases} \quad (4)$$

$$H_i = \begin{cases} 0 & (0 \leq y_{real} < 0.8) \\ 4.8\tan\theta & (0.8 \leq y_{real} < 2.4) \\ 9.6\tan\theta & (2.4 \leq y_{real} < 3.2) \end{cases} \quad (5)$$

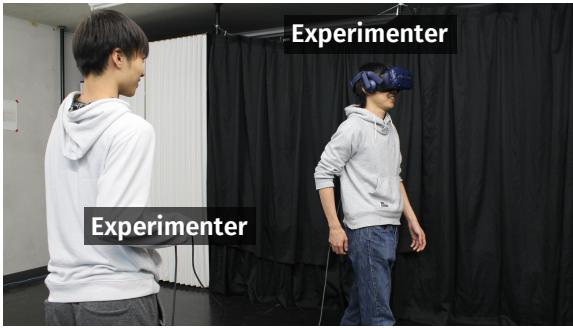


図 5 ユーザの知覚調査実験

また、 θ は仮想空間内に表示する坂道の角度を表し、 T は現実空間での移動量に対する仮想空間における移動量の比率を表す。本システムではユーザの頭部、右足、左足の位置を取得し、それぞれに対して式 1 式 3 を適用することで仮想空間における頭部、右足、および左足の表示位置を計算する。またユーザの足が坂道領域に位置する時は、坂道の傾斜角度 θ に合わせて表示する足の角度を変更する。

3.3 実験環境

本実験において実験参加者は、障害物のない $4 \text{ [m]} \times 6 \text{ [m]}$ の実験室内を、HTC VIVE Pro^{*1}（解像度：片目あたり 1440×1600 （横 × 縦）[pixel]、リフレッシュレート：90 [Hz]、視野角：110°）を装着して移動した。頭部および両足のトラッキングは HTC VIVE Pro に付属するトラッカを用いて行ない、HMD に表示される映像は、HTC VIVE Pro から有線で繋がったパソコン（CPU：Intel Core i7-7700HQ、GPU：NVIDIA GeForce GTX1070、メモリ：16GB）から Unity3D を用いて描画した。実験中は、暗幕で区切られたプレイエリアの外で休憩を取ることで、現実空間の構造を実験参加者に把握されないように配慮した。

3.4 実験の流れ

実験では六種類の傾斜それぞれに対して、三種類の異なる移動量を設定したコンディションの下で坂道を登るタスクを与える。実験中は実験参加者の補助および安全確保を行うために、最低一名の実験実施者を用意した（図 5）。一つのコンディションが終わるごとにアリティ、身体への負荷、高度変化感を調査した。三種類の移動量の使用順序は傾斜角度ごとにランダムに選択した。また、一種類の傾斜における三回のタスクが終了するごとに、三種類の移動量に対しての感想を尋ねる質問を含んだインタビューを実施した。六種類の傾斜角度の使用順序についてもユーザごとにランダムに選択した。実験の平均実施時間は 1.2 時間であり、二種類の傾斜に関する調査が終わるごとに 5 分の休憩を挟んだ。

^{*1} VIVE Pro, <https://www.vive.com/jp/product/vive-pro/>

3.5 評価指標

シミュレーションのアリティ評価の指標として一般的な [4], [5]SUS PQ[12] を用いて、仮想空間における昇降動作のアリティを評価した。また、身体にかかる負荷、高度変化感に関する主観評価を 7 段階のリッカート尺度を用いて調査した。アンケートから得られた結果に対し、 wilcoxon の符号順位検定（有意水準：5%）を用いてコンディション間のスコアに有意差が確認されるか検証した。さらに各コンディションにおけるユーザ評価について詳細なフィードバックを得るためにインタビューを実施した。

3.5.1 アリティに関するユーザ評価

一つのコンディションにおけるタスクが終了するごとに、アリティに関する評価を、SUS PQ[12] を用いて行った。SUS PQ は、以下に示した三つの質問（Q1-Q3）に対して同意するかどうかを七段階のリッカート尺度（全く同意しない場合を 1、強く同意する場合を 7）で回答する形で集計し、三つの評価点の平均を最終的な評価とする。

Q1 坂道の昇降時に自分がその場にいると感じた

Q2 タスクとして行なった坂道の昇降は、現実における坂道の昇降と似ていた

Q3 空間を主体的に移動することができた

3.5.2 負荷感、高度変化感に関するユーザ評価

また、一つのタスクが終了するごとに以下に示すように、坂道の昇降動作に伴う負荷感（Q4）および、高度変化感（Q5）について七段階のリッカート尺度で回答する形で集計した。

Q4 現実で平地を歩く時と比べて、どのくらいの負荷を感じましたか

（平地を歩く時と比較して、1：負荷が少なかった、4：同じ強さの負荷を感じた、7：大きな負荷を感じた）

Q5 坂道の昇降をして、どのくらい高度が変化した感覚がありましたか

（平地を歩く時と比較して高度変化の大きさは、1：小さかった、4：同じだった、7：大きかった）

3.5.3 インタビュー

一つの傾斜角度に対するタスクが終了するごとに、実験参加者に対して 10 分程度のインタビューを行なった。インタビューでは自由回答の形式で、Q1 から Q5 のアンケート結果に対するユーザからの詳細なフィードバックを集めた。

4. 結果と考察

4.1 身体にかかる負荷感

身体にかかる負荷感の結果を図 6 に示した。図 6 においてグラフの縦軸は身体にかかる負荷感の評価（七段階のリッカート尺度）の平均を、横軸は表示した坂道の傾斜角度を表す。正の傾斜角度は登り坂、負の傾斜角度は降り坂であることを表す。また、グラフ中の * および ** はウイ

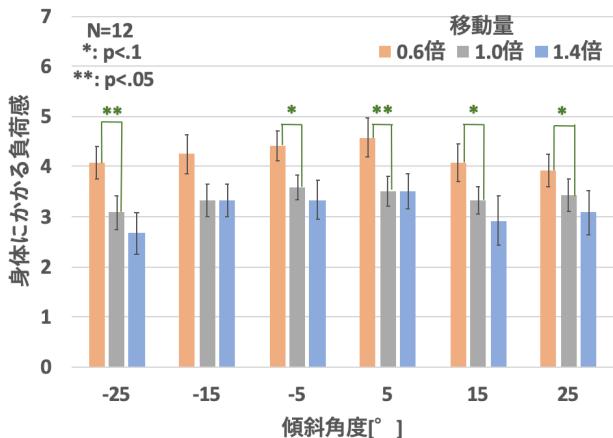


図 6 身体にかかる負荷感のユーザ評価の平均および標準誤差. * および ** はウィルコクソンの符号順位検定においてそれぞれ、有意水準が 10% および 5% の時に有意差が得られた結果を表す.

ルコクソンの符号順位検定においてそれぞれ、有意水準が 10% および 5% の時に有意差が得られた結果を表す. 図 6 から、通常の移動量 (1.0 倍) と比較した際、全ての傾斜に対して移動量を小さくした時 (0.6 倍) に負荷を強く感じ、移動量を実際より大きくした時 (1.4 倍) に負荷を弱く感じるという結果が得られた. また、それぞれの角度に対して移動量を変化させた時の負荷の違いをウィルコクソンの符号順位検定 (有意水準 : 10%) を用いて比較したところ、 -15° 以外の全ての傾斜角度において、1.0 倍の移動量と比較して 0.6 倍の移動量を与えた時が優位に負荷を強く感じるという結果が得られた. また、 -15° においては p 値 = 0.105 という結果が得られた. 一方、傾斜角度と身体にかかる負荷の間には相関関係は確認されなかった.

移動量を実際より小さくした時に負荷を強く感じ、移動量を実際より大きくした時に負荷を弱く感じる傾向が確認されなかったことから、仮想空間における移動量を変更することで身体にかかる仮想的な負荷をユーザに付与可能であることがわかった. 一方、 -15° においてのみ 1.0 倍の移動量と 0.6 倍の移動量比較した際に有意性が出なかった原因としてはデータ数が少なかったことが考えられる.

4.2 リアリティ

リアリティに関する主観評価結果を図 7 に示した. 図 7 から、通常の移動量においても、 25° のような急な傾斜でもリアリティが急落しないことが確認された. また、同じ移動量で傾斜角度が異なるコンディションにおいてウィルコクソンの符号順位検定を行なったところ、有意差は確認されなかった. また、実験中に行なったインタビューからも「現実空間が平坦だと気づいてから映像と現実の矛盾に気づき違和感が強まった」というフィードバックが得られた (12 人中 4 人). 一方で、今回設定した移動量 (0.6 倍

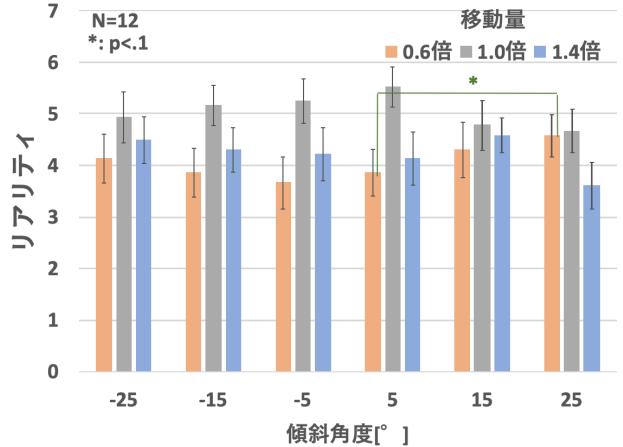


図 7 リアリティのユーザ評価の平均および標準誤差. * はウィルコクソンの符号順位検定において有意水準が 10% の時に有意差が得られた結果を表す.

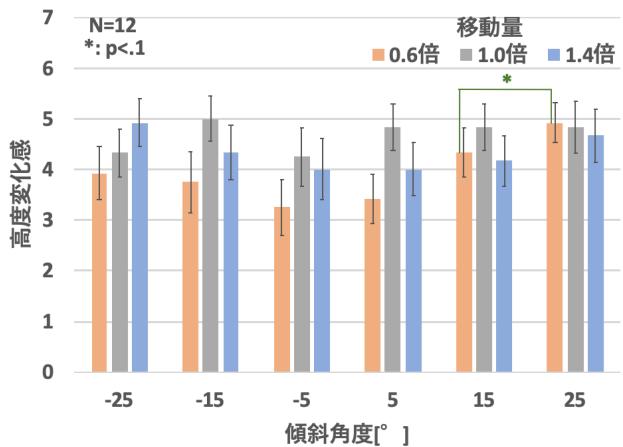


図 8 高度変化感のユーザ評価の平均および標準誤差. * はウィルコクソンの符号順位検定において有意水準が 10% の時に有意差が得られた結果を表す.

および 1.4 倍) において、傾斜角度が上がるほど、登り坂では移動量を実際より小さくした時に、降り坂では移動量を実際より大きくした時にリアリティが増大する傾向が確認された. 実際 0.6 倍の移動量における傾斜角度 5° と 25° のリアリティをウィルコクソンの符号順位検定を用いて比較したところ、 25° の方が優位にリアリティが向上するという結果が得られた.

$\pm 25^\circ$ のような急な坂でもユーザが感じるリアリティが急落しなかった原因として、ユーザが許容可能な傾斜角度の限界が $\pm 25^\circ$ 以上であったということが考えられる. また一方で、今回設定した移動量 (0.6 倍および 1.4 倍) において、傾斜角度とリアリティに相関関係が見られたことから、移動量を変化させることによって生じた負荷感が坂道昇降動作に対するリアリティ向上に寄与した可能性が考えられる. 今後は移動量のパラメタを増やして実験を行うことで、各傾斜角度に対して最適な移動量の推定を行なっていきたい.

4.3 高度変化感

高度変化感の結果を図8に示した。高度変化感についてもアリティと同様に、今回設定した移動量(0.6倍および1.4倍)において、傾斜角度が上がるほど、登り坂では移動量を実際より小さくした時に、降り坂では移動量を実際より大きくした時に高度変化感が増大する傾向が確認された。

今回設定した移動量(0.6倍および1.4倍)において、傾斜角度と高度変化感に相関関係が見られたことから、それぞれの傾斜角度において、最適な高度変化感を与える移動量が存在する可能性が考えられる。今後はアリティと同様、高度変化感についても、移動量のパラメタを増やして実験を行うことで、各傾斜角度に対して最適な移動量の推定を行なっていきたい。

5. 結論

本研究では平坦な現実空間を歩くユーザに対し、視覚操作によって仮想的な坂道を昇降させた際の知覚に関して調査を行った。知覚についてアリティ・負荷感・高度変化感の3つの側面から調査し、ユーザの移動量・坂道の傾斜角度との相関を調べた。実験の結果から、移動量の変更はユーザの身体に対し負荷感を与える傾向にあった。また今回の実験からは、傾斜角度とアリティの間に相関関係は確認されなかった。今後の課題として、実験への慣れや仮想空間における坂道のデザインといった実験パラメタを追加・検討し、仮想空間内の坂道を昇降する際の知覚調査をさらに進めていく予定である。

謝辞 本研究の一部は、JST ACCEL No. JPMJAC1602の支援を受けた。

参考文献

- [1] Qi Sun, et al., Towards Virtual Reality Infinite Walking: Dynamic Saccadic Redirection, *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 37(4):67:1–67:13, 2018.
- [2] Sharif Razzaque, et al., Redirected Walking, In *Eurographics*, 2001.
- [3] Mahdi Azmandian, et al., An Evaluation of Strategies for Two-user Redirected Walking in Shared Physical Spaces, *IEEE Virtual Reality (VR)*, 91–98, 2017.
- [4] Ryoei Nagao, et al., Ascending and Descending in Virtual Reality: Simple and Safe System using Passive Haptics, *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics (TVCG)*, 24(4):1584–1593, 2018.
- [5] Maud Marchalr, et al., Walking Up and Down in Immersive Virtual Worlds: Novel Interactive Techniques Based on Visual Feedback, *IEEE Symposium on 3D User Interfaces*, 19–26, 2010.
- [6] Keigo Matsumoto, et al., Walking Uphill and Downhill: Redirected Walking in the Vertical Direction, In *SIGGRAPH Posters*, 2017.
- [7] Hiroo Iwata, et al., Gait Master: A Versatile Locomotion Interface for Uneven Virtual Terrain, *Virtual Reality Conference, IEEE Virtual Reality (VR)*, 131, 2001.
- [8] Hiroo Iwata, et al., CirculaFloor, *IEEE Computer Graphics and Applications (CGA)*, 25(1):64–67, 2005.
- [9] Tiare Feuchtner, et al., Ownershift : Facilitating Overhead Interaction in Virtual Reality with an Ownership-Preserving Hand Space Shift, *ACM User Interface Software and Technology Symposium (UIST)*, 2018.
- [10] Eunice Jun, et al., Big Foot: Using the Size of a Virtual Foot to Scale Gap Width, *ACM Transactions on Applied Perception (TAP)*, 12(4):16, 2015.
- [11] Sally A. Linkenauger, et al., Welcome to Wonderland: The Influence of the Size and Shape of a Virtual Hand On the Perceived Size and Shape of Virtual Objects, *PLoS ONE*, 8(7):e68594, 2013.
- [12] Mel Slater, et al., Taking Steps: The Influence of a Walking Technique on Presence in Virtual Reality, *ACM Transactions on Computer-Human Interaction (TOCHI)*, 2(3):201–219, 1995.