

Vection 誘発映像と前進動作による 坂道シミュレーション

本岡 宏将¹ 呉 健朗² 大和 佑輝² 宮田 章裕^{1,a)}

受付日 2019年4月8日, 採録日 2019年10月3日

概要: 車椅子に不慣れな人は多くの場合, 屋外を移動することに不安を感じ, 坂道を通行する際には恐怖を感じることもある. このため, 彼らが車椅子に乗る感覚に慣れることなどを目的として, Virtual Reality を用いた車椅子シミュレータが数多く開発されてきた. しかし, 従来のシミュレータでは, コストと現実感がトレードオフの関係にあった. この問題を解決するために, 我々は, 電動車椅子の前進動作と HMD 上に表示された Vection 誘発映像を組み合わせた車椅子シミュレータを提案する. これは, 電動車椅子でバリアを通過する映像を HMD で表示し, 電動車椅子の前進動作の速度を HMD 上の映像に合わせながら変化させるアプローチである. 市中製品だけを用いて構築したプロトタイプシステムを用いた検証実験では, 坂道を通過する感覚を高めるための HMD と電動車椅子の挙動を明らかにした. 一方, HMD 上の映像視点が固定されているため, 実在する坂を通過しているかのような現実感には提供できていないことも判明した.

キーワード: 電動車椅子, シミュレータ, Vection 誘発映像

Slope Simulation Using Vection-inducing Movies and Forward Motion

KOUSUKE MOTOOKA¹ KENRO GO² YUKI YAMATO² AKIHIRO MIYATA^{1,a)}

Received: April 8, 2019, Accepted: October 3, 2019

Abstract: People who are less experienced with wheelchairs often feel uneasy about traveling outdoors, especially going through slopes. For this reason, many wheelchair simulators using virtual reality have been developed for them to get used to the feeling of piloting a wheelchair. However, conventional simulators have a trade-off relationship between cost and reality. To address this issue, we propose a VR-based wheelchair simulator using a combination of forward motions attainable by an electric-powered wheelchair and vection-inducing movies displayed on a head-mounted display. In our approach, the HMD displays a movie and the wheelchair simultaneously performs forward motions for specific scenarios. We developed a proof of concept using only consumer products and conducted evaluation tasks, identifying the behaviors of the HMD and the wheelchair that provide a richer experience. At the same time, a sense of reality is insufficiently provided by the current system due to a fixed-camera movie.

Keywords: electric-powered wheelchair, simulator, vection-inducing movies

¹ 日本大学文理学部
College of humanities and Sciences, Nihon University, Setagaya, Tokyo 156–8550, Japan

² 日本大学大学院総合基礎科学研究科
Graduate School of integrated Basic Sciences, Nihon University, Setagaya, Tokyo 156–8550, Japan

a) miyata.akihiro@acm.org

1. はじめに

車椅子に不慣れな人は多くの場合, 屋外を移動すること
に不安を感じ, 坂道を通行する際には恐怖を感じることも
あるという. このため, 彼らが手軽・安全に車椅子に乗る
感覚に慣れることなどを目的として, Virtual Reality (以

降, VR) を用いた車椅子シミュレータが数多く開発されてきた。VR ベースのアプローチは, 実際に坂道があるところまで移動したり, 坂道を模した練習用コースを作成したりしなくて済むという長所がある。しかし, 従来のシミュレータでは, コストと現実感がトレードオフの関係にあった。視覚フィードバックのみを提示するシミュレータは, 低コストで構築できるが, ユーザに動きのフィードバックを与えられず現実感に乏しいという欠点がある。一方で, 視覚・動きのフィードバックを提示するシミュレータは, ユーザに高い現実感を与えられるが, モーションプラットフォームなど的高額な装置が必要になるという欠点がある。求められる現実感用途により異なると思われるが, たとえば坂道を通る感覚に慣れる用途においては, 少なくとも坂道を通る感覚を提示できることが必要である。あるいは, ユーザがこれから通過予定の坂道を事前に体験して通過可能か否かを判断するといった用途においては, 実在するその坂を通過しているような現実感が得られることが求められるだろう。

このコストと現実感のトレードオフの問題を解決するために, 我々は, 低コストかつコンピュータ制御可能な電動車椅子と, 視覚誘導性の自己動作感覚の組合せに注目した。この着想に基づき, 我々は, 電動車椅子の前進動作を HMD 上に表示する Vection 誘発映像で拡張するバリアシミュレータを提案する。提案方式では, シミュレーションシナリオに沿って電動車椅子が動作を行う。このとき, 電動車椅子は前後方向に傾くなどの動作は行えない。そこで, HMD に Vection 誘発映像を表示することにより, ユーザは電動車椅子が前後に傾いた錯覚を得られ, 坂道を走行しているような感覚を体験できる。

本稿の貢献は次のとおりである。

- 市中製品だけを用いて, 視覚・動きのフィードバックの両方を低コストで提示する VR 車椅子シミュレータを提案したこと。
- 上記提案方式のプロトタイプシステムを実装し, 11 人の実験参加者に対して実験を行い, 坂道を通る感覚を高めるための HMD と電動車椅子の挙動を明らかにしたこと。

2. 関連研究

VR ベースの車椅子シミュレータは, 視覚フィードバックのみを提示するものと, 視覚フィードバックと動きのフィードバックの両方を提示するものの 2 種類に大別できる [1], [2]。

2.1 視覚フィードバックのみを行う例

視覚フィードバックのみを提示するシミュレータの長所は, システム構造がシンプルであるという点である。典型的な構成要素は, 椅子, ディスプレイ, ジョイスティック

の 3 つである。ユーザは椅子に座り, ジョイスティックを操作してディスプレイ上に表示される仮想空間内を移動する。いくつかのシミュレータは通常の PC ディスプレイに VR 空間を表示している。シミュレータの内容は, ユーザは車椅子と仮想オブジェクトとの衝突を避けるシミュレーションを行うというものが多い。その事例として, 重度の障害を持つ子供が, 電動車椅子を適切に操作できるようにするための車椅子シミュレータ [3] や, 重度の運動障害を持つ人が, 電動車椅子の運転技術を向上させるための車椅子シミュレータ [4], 複数の障害を持つ子供が, 車椅子の運転に慣れ親しむための車椅子シミュレータ [5] がある。一方, 近年低価格化が進む HMD を用いるシミュレータも少なくない。HMD を用いたシミュレータの典型的な構成要素は, 椅子, HMD, ジョイスティックの 3 つである。ユーザは椅子に座り, ジョイスティックを操作して HMD 上に表示される仮想空間内を移動する。その事例として, 車椅子を初めて利用する人が, 車椅子の運転技術を向上させるための車椅子シミュレータ [6] や, 車椅子の運転に慣れていない人が, 車椅子の運転技術を向上させるための車椅子シミュレータ [7] がある。また, 文献 [7] のシステムでは, ジョイスティックと実世界の車椅子が連動する。実世界の車椅子にはカメラが装着されており, カメラで撮影している映像が HMD に表示される。ユーザはこの映像を見ながらシミュレーションをすることができる。

2.2 視覚・動きフィードバックを行う例

視覚・動きフィードバックを提示するシミュレータの長所は, ユーザに高い現実感を与えることができる点である。現実世界では, 車椅子ユーザは加減速や坂の上り・下りを行う。この観点から, 視覚だけでなく動きのフィードバックを行うシミュレータの方が, よりユーザにリッチな体験を提供できるといえる。視覚・動きのフィードバックを行う事例として, 車椅子利用者が, 現実世界の動的な障害物に衝突する事故を防ぐためのシミュレーションシステムが開発されている [8]。このシステムは, HMD と手動車椅子で構築されており, 実世界の手動車椅子のハンドリムと仮想世界の車椅子が連動する。さらに, 手動車椅子を固定し, 車輪をモータで回転させることで, 斜面を車椅子で通過する様子を再現している。また, 一般的には, 車椅子シミュレータにおいて動きのフィードバックを提示するためには, 6 自由度で天板 (ユーザが乗る台) を制御する Stewart platform [9] が用いられる。このプラットフォームを用いる事例としては, HMD を併用したもの [10] や, 大型半球ディスプレイを併用したもの [11] がある。両者とも, 初心者が車椅子の操作に慣れることを目的としたシミュレーションシステムである。同様の 3 自由度のモーションプラットフォームと VR グラスを用いて, 車椅子利用者が日常的に直面するバリア通過時の困難を体感するシミュレ

ションシステムも提案されている [12]. このシステムは、ユーザがジョイスティックを操作することで、HMD 上に表示している映像が変化する. HMD 上に表示している映像が車椅子でバリアを通過する際、ユーザが座っているモーションプラットフォームが傾き、車椅子で斜面や段差などを通過する様子を再現している.

3. 研究課題

2章で紹介した既存研究は、コストと現実感がトレードオフの関係にある. 視覚フィードバックのみを提示するシミュレータは、PC ディスプレイや HMD などの低コスト機器で構築できるが、ユーザに動きのフィードバックを与えられず現実感に乏しい. 一方で、視覚・動きのフィードバックを提示するシミュレータは、ユーザに高い現実感を与えられるが、モーションプラットフォームなどの高額な装置が必要になる. すなわち、従来手法の問題点は、視覚と動きのフィードバックの両方を低コストで提示できないことである. 以上のことから、本稿では、視覚と動きのフィードバックを低コストで提示する車椅子シミュレータを実現することを研究課題として設定する.

4. 提案手法

3章で述べた研究課題を達成するために、我々は、
(1) 低コストかつコンピュータ制御可能な電動車椅子
(2) 視覚誘導性の自己動作感覚
 の2つに着目する.

(1) について、低コストかつコンピュータ制御可能な電動車椅子が市場に出回り始めている. たとえば、WHILL 社の製品 [13] は欧米・日本で 1,000 台以上の売り上げを達成している. この製品はシリアルケーブルか無線で接続した外部コンピュータから制御が可能である. このような電動車椅子を用いることで、高額なモーションプラットフォームを使わなくても、動きには多少制限があるが (例: 車椅子は自身で傾くことはできない) ユーザに高い現実感を提供できる可能性がある.

(2) について、視覚誘導性の自己動作感覚によりシミュレーションの現実感を高められる可能性がある. この感覚は Vection と呼ばれ、歴史的には静止したユーザが特定の視覚効果を受けることで身体が動いているように感じる感覚 [14] のことであったが、近年では複数感覚刺激により誘発される自己動作感覚を総じて Vection と呼ぶ動きもある [15]. 関連して、視覚と前庭感覚への複合刺激が自己動作感覚を強化するという報告 [16] や、ジョイスティックと連動する車椅子による前庭感覚刺激を複合することで、自己動作感覚を強化するという報告 [17], 投影スクリーンによる視覚刺激と、モーションプラットフォームによる直線方向の前庭感覚刺激を複合することで、直線方向の自己動作感覚を強化するという報告 [18], HMD に表示している

映像による視覚刺激と、垂直方向に振動する椅子による前庭感覚刺激を複合することで、垂直方向の自己動作感覚を強化するという報告 [19], 動く縞模様、傾く視野、欠ける視野による視覚刺激と、前方に走行する電動車椅子による前庭感覚刺激を複合することで、左右方向の自己動作感覚を強化するという報告 [20] がある. さらに、文献 [18] は、視覚刺激に合った前庭感覚刺激をすることで、モーションプラットフォームなど的高額な装置を必要とせず、低コストなシミュレータを開発することが可能であることも報告している. また、没入型ディスプレイによる視覚刺激と、回転のみの低自由度のモーションベースによる前庭感覚刺激を複合することで、ユーザに慣性力を体感させるシステム [21] もある. ここから、視覚と前庭感覚に同時刺激を行うことで、電動車椅子の限られた動きを、ユーザにはより多様な動きに感じさせられる可能性が示唆される.

(1), (2) に基づき、我々は、電動車椅子の前進動作を HMD 上に表示する Vection 誘発映像で拡張するバリアシミュレータを提案する. このシステムでは、HMD 上の映像と電動車椅子の動作がシナリオに沿って連動する. このとき、映像と車椅子動作の挙動は完全に一致したものではない. 電動車椅子が実際にはできない動作をしているかのように、映像が変化する. たとえば、シミュレータが平地から上り坂にさしかかるシーンを再現するとき、電動車椅子は等速運動に続いて減速運動を行う. 一方、HMD は平地から上り坂に移動する映像を表示する. これにより、Vection が生じ、電動車椅子は実際には傾斜などを行っていないが、まるで坂を上り始めたかのような自己身体感覚をユーザに与えられることが期待できる.

5. 実装

我々のシミュレータは、光学シースルー HMD, シングルボードコンピュータ (single-board computer, 以降 SBC), 電動車椅子からなる. 利用した装置は表 1 に示すとおり、市中製品のみである. 今回我々が使用する HMD は、ユーザがシミュレータ使用時に現実オブジェクトに気付かずに衝突しないよう、不透明型ではなく、光学シースルー型を採用した. 光学シースルー型では現実空間が視認できるためシミュレーションの効果に影響が生じることも考えられたが、本シミュレータを用いた予備実験 (実験参加者 11 名, 実験環境は 6.2 節と同じ) [22] を行ったところ、不透明型 HMD を用いた場合でも光学シースルー型 HMD を用いた場合でも、表 2 のシミュレーションタイプに関しては得られる体験に大きな差がないことを事前に確認している. SBC は電動車椅子の荷物入れに格納してある. 図 1 にシミュレータ外観を示す. 使用手順としては、ユーザは HMD を着用し、電動車椅子に座る. HMD は、画面上のポインタを操作するための無線式コントローラを備えている. ユーザはコントローラを用いて HMD 上でシミュレー

表 1 利用した装置

Table 1 Detailed list of hardware.

ハードウェア	製品名
光学シースルー HMD	Epson BT-300
シングルボードコンピュータ	Raspberry Pi 3
電動車椅子	WHILL Model CR

表 2 シミュレーションタイプ

Table 2 Simulation types.

タイプ	映像・動作の挙動
Flat > Up-slope	映像：平地→上り坂 動作：等速運動→減速運動
Flat > Down-slope	映像：平地→下り坂 動作：等速運動→加速運動

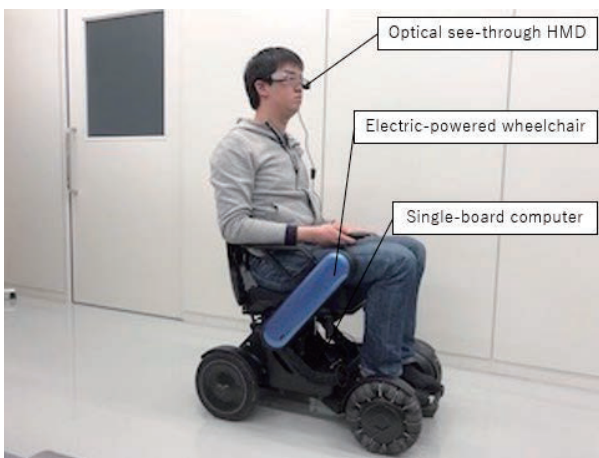


図 1 シミュレータの外観

Fig. 1 Simulater appearance.



図 2 HMD 上のシミュレーション制御インターフェース

Fig. 2 Interface for controlling simulation on the HMD.

シミュレーション種類を選択し、シミュレーション開始ボタン (図 2) を押下することで、オペレータなどの手を借りることなく自分自身でシミュレーションを開始できる。

現在実装できているシミュレーションタイプを表 2 に示す。Flat > Up-slope は、平地の走行に続いて坂を上るシーンをシミュレーションする。HMD 上の映像は平地から上り坂に変化する。この映像は、実際に電動車椅子で上り坂を通過しながら撮影したものである。電動車椅子の動

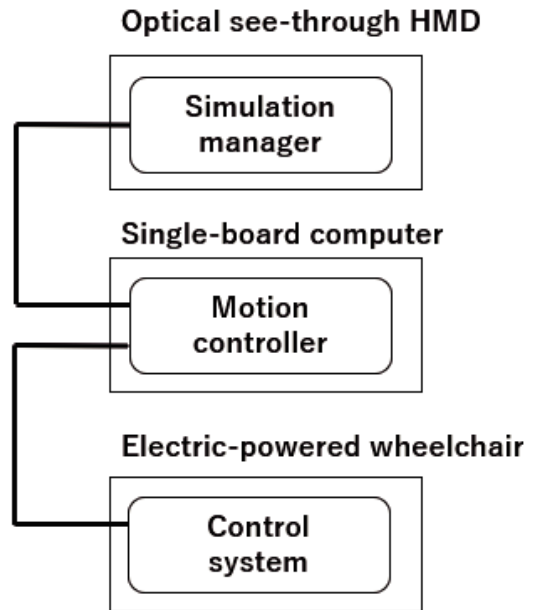


図 3 システム構成

Fig. 3 System configuration.

作は等速運動から、あたかも上り坂による影響を受けたように減速運動に変化する。Flat > Down-slope は、平地の走行に続いて坂を下るシーンをシミュレーションする。HMD 上の映像は平地から下り坂に変化する。この映像は、実際に電動車椅子で下り坂を通過しながら撮影したものである。電動車椅子の動作は等速運動から、あたかも下り坂による影響を受けたように加速運動に変化する。これらのシミュレーションを実現するためのシステム構成を図 3 に示す。各構成要素の役割は次のとおりである。

HMD : Simulation manager が動作する。SBC と無線接続する。Simulation manager は SBC にシミュレーション開始信号とシミュレーションタイプを送信する。シミュレーション開始信号を送信すると、シミュレーションタイプに該当する映像を再生する。

SBC : Motion controller が動作する。電動車椅子とシリアルケーブルで接続する。シミュレーション開始信号を受信すると、シミュレーションタイプに該当する動作情報を電動車椅子に送信する。

電動車椅子 : Control system が動作する。動作情報を受信すると、HMD の映像の再生開始と同時に動作を実行する。

ここで、上記のように上り坂シミュレーション時には電動車椅子を減速、下り坂シミュレーション時には電動車椅子を加速させるデザインについて補足する。簡潔にするため上り坂シミュレーションの場合で説明を行うが、下り坂シミュレーションの場合は方向が逆転するだけである。現実空間で車椅子に乗って平地から上り坂に移動する際は体が後傾するため、原理的には、重力加速度の影響によりユーザは後方に押し付けられる感覚が生じる。ここから、

上記実装とは逆のデザイン，すなわち，上り坂シミュレーション時には電動車椅子を加速させて，ユーザに後方に押し付けられる感覚を提示するデザインも考えられる．しかし，次の2点の理由により，今回は上り坂シミュレーション時には電動車椅子を減速させるデザインを採用した．1点目は，現実空間で平地から上り坂に移動する際，傾斜の影響で車椅子が減速するため，原理的には，慣性の法則によりユーザの体には前方に押し出される力も働くからである．すなわち，上述の重力加速度の影響を打ち消す方向に力が働く．2点目は，電動車椅子を加速させると，モータ音が大きくなり，ユーザは電動車椅子の加速に気付き，上り坂であるのに速度が上がるという不整合によりシミュレーション効果が低減するおそれがあるからである．

6. 実験1

6.1 実験目的

提案方式において坂道を通る感覚を高めるために，HMD上のVection誘発映像と電動車椅子の前進動作をどのように組み合わせれば良いか明らかにすることを実験目的とする．

6.2 実験参加者・実験環境

実験参加者は20代の学生11名(男性9人，女性2人)である．全員，下肢障害は有しておらず，日常的に車椅子を利用してない．実験参加者には，本実験への参加が任意であること，いつでも不利益なく参加を辞退できることを説明した．実験者は1回の試行が終わるたびに，実験参加者にVR酔いが無いことを確認した．実験は約8m四方の室内で行った．床は平坦であり，毛足の短いカーペットが敷いてあった．部外者は部屋にいっさい入れないようにし，安全は確保されていた．壁面は単調であり，外光が直接入らないようカーテンを引いて天井照明を灯した結果，室内の明るさは約300ルクスであった．実験風景を図4に示す．

6.3 実験手順

HMD上のVection誘発映像と電動車椅子の前進動作の組合せの効果を厳密に測定するために，シミュレータの操作ミスといった外的要因が混入しないように，実験者がシミュレータをコントロールした．実験条件は上り坂・下り坂に対して，それぞれ表3および下記に示すP1~P4を用意した．各条件とも，実在する同一の坂(傾斜約6.6°，傾きはほぼ一定)を上る/下るシーンを再現するシミュレーションである．現実空間において実際の平地・坂を電動車椅子で走行した際，平地での速度は約0.8m/sであるのに対し，上り坂での速度は約0.5m/s，下り坂での速度は1.6m/sであった．この状況をシミュレーションするために，電動車椅子の速度はこれらの値を再現するよう制御し，HMD上



図4 実験風景

Fig. 4 The experimental environment.

表3 実験条件

Table 3 Experimental conditions.	
実験条件	映像・動作の挙動
P1-up/down	映像：平地→上り坂/下り坂 動作：停止
P2-up/down	映像：平地→上り坂/下り坂 動作：等速前進
P3-up/down	映像：なし 動作：等速前進→加速/減速前進
P4-up/down	映像：平地→上り坂/下り坂 動作：等速前進→加速/減速前進



図5 実験映像(上：上り坂，下：下り坂)

Fig. 5 Experimental video (up:Up-slope, bottom:down-slope).

に表示する映像(図5)は実験者が視点位置にウェアラブルカメラを装着した状態で実際の坂を電動車椅子で上り/下りながら撮影した．実験参加者が見るHMD上の映像を模式的に表したものを図6に示す．固定視点の映像である

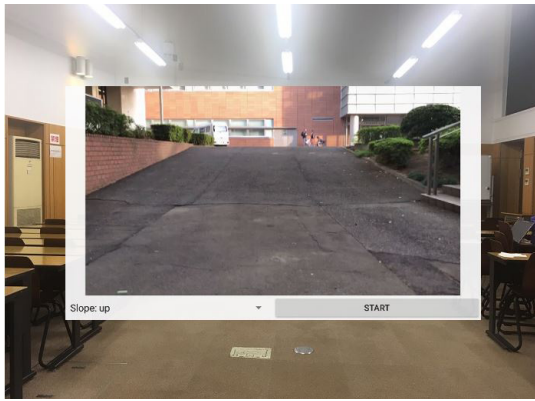


図 6 模式的に表した HMD 上の表示

Fig. 6 Depiction of the view through the HMD.

ため、首の動きと映像に不整合が生じないように、実験参加者には顔を正面に向けたままでいるよう指示した。

P1-up, P1-down : HMD 上の映像は平地の走行 (3 秒) の後、P1-up の場合は上り坂の走行 (3 秒)、P1-down の場合は下り坂の走行 (3 秒) が表示される。電動車椅子は静止したまま (6 秒) である。

P2-up, P2-down : HMD 上の映像は平地の走行 (3 秒) の後、P2-up の場合は上り坂の走行 (3 秒)、P2-down の場合は下り坂の走行 (3 秒) が表示される。電動車椅子は等速で前進 (6 秒) する。

P3-up, P3-down : 実験参加者は HMD を装着しない。電動車椅子は等速で前進 (3 秒) した後、P3-up の場合は減速しながら前進 (3 秒)、P3-down の場合は加速しながら前進 (3 秒) する。

P4-up, P4-down : HMD 上の映像は平地の走行 (3 秒) の後、P4-up の場合は上り坂の走行 (3 秒)、P4-down の場合は下り坂の走行 (3 秒) が表示される。電動車椅子は等速で前進 (3 秒) した後、P4-up の場合は減速しながら前進 (3 秒)、P4-down の場合は加速しながら前進 (3 秒) する。

各実験参加者には、ランダムな順に決定された各実験条件について、3 回ずつシミュレーションを体験させた。その際、彼らには、各実験条件を体験するたびに、上り坂・下り坂を通過している感覚が得られたか 5 段階のリッカート尺度 (5 : 非常に得られる, 1 : まったく得られない) で回答してもらい、VR 酔いをしたか否か回答してもらった。

6.4 実験結果

全試行において、VR 酔いをしたと回答した実験参加者はいなかった。以降、上り坂/下り坂を通過している感覚が得られたかに対する回答について説明する。

上り坂の実験条件に対する実験参加者の回答分布を図 7 に示す。P1-up, P2-up, P3-up, P4-up において 4 以上の回答をした実験参加者の割合は、それぞれ 0%, 13%, 0%, 63%であった。5%水準の Bonferroni 検定を行ったところ、

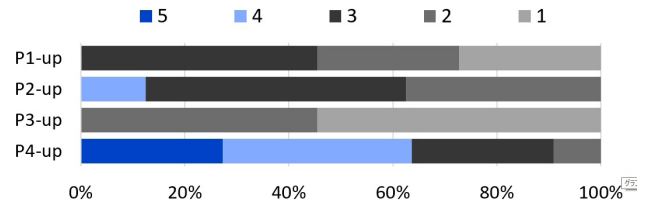


図 7 上り坂の回答分布 (N = 11, 1 : まったく得られない, 5 : 非常に得られる)

Fig. 7 Distribution of Likert-scale responses for the up-slope (N = 11, 1 = Strongly disagree to 5 = Strongly agree).

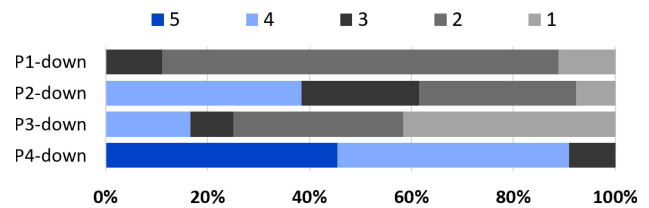


図 8 下り坂の回答分布 (N = 11, 1 : まったく得られない, 5 : 非常に得られる)

Fig. 8 Distribution of Likert-scale responses for the down-slope (N = 11, 1 = Strongly disagree to 5 = Strongly agree).

P2-up・P4-up 間を除くすべてのペア間で有意差を確認した。

下り坂の実験条件に対する実験参加者の回答分布を図 8 に示す。P1-down, P2-down, P3-down, P4-down において 4 以上の回答をした実験参加者の割合は、それぞれ 0%, 38%, 18%, 88%であった。5%水準の Bonferroni 検定を行ったところ、P1-down・P4-down 間、P1-down・P2-down 間、P2-down・P4-down 間、P3-down・P4-down 間で有意差を確認した。

P1~P4 の各条件について上り坂と下り坂に対する回答分布間 (例 : P1-up と P1-down の回答分布間) で 5%水準の t 検定を行ったところ、どの条件においても上り坂と下り坂の間に有意差は認められなかった。

6.5 考察

まず、本実験が適切に成立するか考察する。本実験は 6.3 節で述べた坂をシミュレーションするものであり、上り坂・下り坂の各シーンにおいて、HMD 上の映像は図 5 のように異なって表示され、電動車椅子の速度も異なるもの (上り坂 : 0.5 m/s, 下り坂 : 1.6 m/s) が提示された。ヒアリングにおいても、全実験参加者が、シミュレータが上り坂と下り坂で異なる挙動をしていたことに気付いていた。ここから、実験参加者は各実験条件を異なるものと認識できていたことを前提とすることができ、実験参加者の各実験条件への評価を比較することには妥当性があるといえる。以降、各観点について議論を深める。

複合刺激の必要性

上り坂・下り坂とも、P2・P4 (HMD と電動車椅子の両

方を利用)が、P1(電動車椅子が静止)とP3(HMDなし)よりも坂道を通している感覚が得ることができた。このことから、HMDによる視覚刺激と電動車椅子による前庭感覚への刺激の複合刺激が必要であることが示唆される。

速度変化の必要性

P2(速度変化無し)とP4(速度変化あり)の差に関して、上り坂の場合は有意差が認められなかったものの、下り坂では有意差が認められた。ここから、上り坂のシミュレーションには速度変化(加速/減速)は必要ではないが、下り坂のシミュレーションには速度変化が必要であることが示唆される。この傾向が普遍的なものであるか、実験参加者を増やして検証する必要がある。

上り坂と下り坂の違い

P1~P4の各条件において、上り坂と下り坂の間で実験参加者の坂道を通している感覚に有意差が認められなかったことから、坂の進行方向とシミュレーションの現実感には関係がないことが示唆される。ただし、今回は単一の坂に対する検証であったため、様々な角度の坂においても同様の傾向が見られるか、さらに検証を行う余地がある。

7. 実験 2

7.1 実験目的

実験1では、坂道を通する感覚を高めるためのHMDと電動車椅子の挙動を明らかにした。坂道を通する感覚が得られるだけでも車椅子シミュレータとしては一定の価値があると思われるが、利用シーンによっては、あたかも現地の坂に実際にいるような感覚が求められることもあるだろう。たとえば、これから通行予定の坂道の様子を事前に確認したいシーンなどがこれに該当する。

そこで本実験では、提案方式により、単に何らかの坂道を通する感覚が得られたかどうかだけでなく、実在する坂を実際に通過しているような現実感が得られたか否かを明らかにすることを実験目的とする。

7.2 参加者・実験環境

実験参加者は20代の学生5名(男性5人)である。全員、下肢障害は有しておらず、日常的に車椅子を利用していない。実験参加者への辞退に関する説明やVR酔いへの配慮、および、実験環境(8m四方の部屋)は実験1(6.2節)と同じである。

7.3 実験手順

最初に、実験参加者に電動車椅子に乗ってもらい、上り方向と下り方向に3回ずつ図5の坂道(シミュレーション時にHMD上に表示される坂道)を現実空間にて実際に通過してもらった。その後、7.2節の実験環境に移動して、彼らに提案方式の上り坂/下り坂シミュレーションを3回ずつ順不同に体験してもらった。提案方式の挙動は、

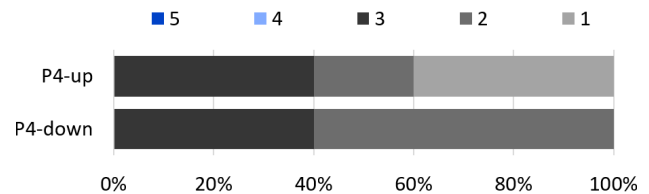


図9 現実感の回答分布(N=5, 1:まったく得られない, 5:非常に得られる)

Fig. 9 Distribution of Likert-scale responses for a sense of reality (N = 5, 1 = Strongly disagree to 5 = Strongly agree).

実験1において坂道を通している感覚が高く得られたP4-up/downである。シミュレーション1試行ごとに彼らに対し、事前に実際に通過した現実空間の坂道を思い出してもらい、提案方式によりその坂道を通しているような現実感が得られた程度を5段階のリッカード尺度(5:非常に得られる, 1:まったく得られない)で回答してもらい、VR酔いをしたか否かを回答してもらった。

7.4 実験結果

全試行において、VR酔いをしたと回答した実験参加者はいなかった。現実空間の坂道を通しているような現実感が得られたか否かに対する実験参加者の回答分布を図9に示す。上り坂(p4-up)、下り坂(p4-down)ともに、4以上の回答は0%であり、3以上の回答は40%であった。坂の上下方向の回答について5%水準のWilcoxonの符号順位検定を行ったところ、有意差は認められなかった。

7.5 考察

現在の提案方式の実装では、高い現実感を提供できていないとはいえない結果となった。この理由を考察するために、全実験参加者に対して半構造化インタビューを行ったところ、HMD上の映像視点が固定されているため現実感があまり高くないという意見が大半であった。この問題を解決するためには、全天球カメラでシミュレーションに用いる映像を撮影し、シミュレーション体験時に仮想空間中でユーザが任意の方向を向いても適切な映像が表示されるようにすることが必要であると考えられる。

8. おわりに

本稿では、従来のシミュレータがかかえるコストと現実感のトレードオフの問題を解決するため、市中製品のみを用いて、電動車椅子の前進動作をHMD上のvection誘発映像で拡張するバリアシミュレータを提案した。坂道を通している感覚について検証を行ったところ、HMD上に上り坂/下り坂の映像を提示すると同時に、電動車椅子を等速前進から減速/加速させた場合に効果がよく得られることを明らかにした。ただし、今回の検証においては、上

り坂においては速度変化は必要とは言い切れない結果であった。一方、現在の提案方式は、HMD上の映像の視点が固定されているため、現実空間の坂道を通過しているような現実感を提供できているとはいえないことも明らかになった。

今後の主要な課題は3点ある。1点目は、実験参加者や再現する坂の種類を増やし、今回の実験結果が普遍的なものであるか検証することである。2点目は、全天球カメラで坂道の映像を撮影することでシミュレーションの現実感を高めることである。3点目は、坂道以外に再現できるバリア種類を増やすことである。

謝辞 本研究はJSPS科研費JP19H04160の助成を受けて行われた。

参考文献

- [1] Thomas, P., Tamar, W., Shimon, R. and Evelyne, K.: Wheelchair Simulators: A Re-view, *Technology and Disability*, Vol.21, No.1-2, pp.1–10 (2009).
- [2] Abellard, P., Randria, I., Abellard, A., Khelifa, M.M.B. and Ramanantsizehena, P.: Electric Wheelchair Navigation Simulators: Why, When, How? *Mecha-tronic Systems Applications*, pp.161–186 (2010).
- [3] Desbonnet, M., Sara, L.C. and Rahman, A.: Development and Evaluation of a Virtual Reality based Training System for Disabled Children, *Proc. ICDVRAT 1998*, pp.177–182 (1998).
- [4] Morre, Y., Bourhis, G., Cosnuau, K., Blangy, G.G.E. and Rumilly, M.: ViEW, a Wheelchair Simulator for Driving Analysis, *Proc. ICVR 2015*, pp.100–105 (2015).
- [5] Rodriguez, N.: Development of a Wheelchair Simulator for Children with Multiple Disabilities, *Proc. VAAT 2015*, pp.1–4 (2015).
- [6] Headleand, C.J., Day, T.W., Pop, S.R. and Ritsos, P.D.: A Cost-effective Virtual Environment for Simulating and Training Powered Wheelchairs Manoeuvres, *Studies in Health Technology and Informatics*, Vol.220, pp.134–141 (2016).
- [7] Silva, Y.M., Simes, W., Tefilo, M.R.D.S. and Naves, E.L.M.: Training Environment for Electric Powered Wheelchairs Using Teleoperation Through a Head Mounted Display, *Proc. ICCE 2018* (2018).
- [8] 陳 連怡, 藤本英雄, 山田雅司: 仮想空間内車椅子訓練システムにおける操作感覚の実現と情報支援, 日本機械学会論文集 (C編) (2006).
- [9] Stewart, D.: A Platform with Six Degrees of Freedom, *Proc. UK Institution of Mechanical Engineers*, Vol.180, No.1, pp.371–386 (1965).
- [10] Sonar, A., Burdick, K.D., Begin, R.R. and Carroll, J.J.: Development of a Virtual Reality-based Power Wheel Chair Simulator, *Proc. ICMA 2005*, pp.222–229 (2005).
- [11] Niniss, H. and Inoue, T.: Electric Wheelchair Simulator for Rehabilitation of Persons with Motor Disability, *Proc. SVR 2006* (2006).
- [12] Panadero, C.F., Barquero, V.D.L.C., DelgadoKloos, C. and Nunez, D.M.: PhyMEL-WS: Physically Experiencing the Virtual World, Insights into Mixed Reality and Flow State on Board a Wheelchair Simulator, *Jnl. Universal Computer Science*, Vol.20, No.12, pp.1629–1648 (2014).
- [13] WHILL, available from (<http://whill.us>) (accessed 2019-03-31).
- [14] Dichgans, J. and Brandt, T.: Visual-vestibular Interaction: Effects on Self-motion Perception and Postural Control, *Handbook of Sensory Physiology*, Vol.8, pp.755–804 (1978).
- [15] Palmisano, S., Allison, R.S., Schira, M.M. and Barry, R.J.: Future Challenges for Vection Research: Definitions, Functional Significance, Measures, and Neural Bases, *Frontiers in Psychology*, Vol.6, No.193, pp.1–15 (2015).
- [16] Lawson, B.D., Sides, S.A. and Hickinbotham, K.A.: User Requirements for Perceiving Body Acceleration, *Handbook of Virtual Environments*, Chapter 7, pp.135–162 (2002).
- [17] Riecke, B.E.: Simple User-generated Motion Cueing Can Enhance Self-motion Perception (Vection) in Virtual Reality, *Proc. VRST 2006*, pp.104–107 (2006).
- [18] Riecke, B.E.: Visually Induced Linear Vection is Enhanced by Small Physical Accelerations, *Proc. IMRF 2006* (2006).
- [19] Wright, W.G., DiZio, P. and Lackner, J.R.: Vertical Linear Self-motion Perception during Visual and Inertial Motion: More Than Weighted Summation of Sensory Inputs, *Jnl. Vestibular Research*, Vol.15, No.4, pp.185–195 (2005).
- [20] 鈴木亮太, 中村優介, 福田悠人, 小林貴訓, 久野義徳: ベクシオンを用いたパーソナルモビリティの誘導, 情報処理学会インタラクシオン 2017 論文集, pp.122–126 (2017)
- [21] Hori, M., Kanbara, M. and Yokoya, N.: A Mixed Reality Telepresence System with Limited DOF Motion Base and Immersive Display, *Proc. ACE 2009*, pp.315–318 (2009).
- [22] 宮田章裕, 宇野広伸, 呉 健朗, 樋口恭佑, 篠崎涼太: Vection 誘発映像と低自由度動作による VR バリアシミュレーションの映像提示方式の比較, 日本バーチャルリアリティ学会 VR 学研報, Vol.23, No.CS-3, pp.25–30 (2018).



本岡 宏将 (学生会員)

日本大学大学文理学部情報科学科に在学。ヒューマンコンピュータインタラクシオンの研究に従事。



呉 健朗 (学生会員)

2018年日本大学文理学部情報科学科卒業。同年日本大学大学院総合基礎科学研究科博士前期課程に進学、現在に至る。2017年VR学会サイバースペース研究賞, 2018年情報処理学会GN研究賞, 山下記念研究賞。ヒューマンコンピュータインタラクシオンの研究に従事。



大和 佑輝 (学生会員)

2019年日本大学文理学部情報科学科卒業。同年日本大学大学院総合基礎科学研究科博士前期課程に進学，現在に至る。ヒューマンコンピュータインタラクションの研究に従事。



宮田 章裕 (正会員)

2005年日本電信電話株式会社入社。2008年慶應義塾大学大学院博士課程修了。2016年より日本大学文理学部情報科学科准教授。ヒューマンコンピュータインタラクションの研究に従事。情報処理学会2017年度・2018年

度論文賞。ACM, 日本バーチャルリアリティ学会, ヒューマンインタフェース学会, 日本データベース学会各会員。博士(工学)。本会シニア会員。