

Vection誘発映像と電動車椅子の挙動を 組み合わせた段差通過シミュレータの開発

令和5年度 卒業論文

日本大学 文理学部 情報科学科 宮田研究室

齊藤 孝樹

概要

車椅子に不慣れなユーザは屋外を走行するとき、様々なバリアの存在に不安を感じる。この不安を軽減させるために、屋外を走行する前に、ユーザが遭遇しうるバリア上を通過するのに慣れることを目的とした、車椅子で走行した時の感覚を体験できる Virtual Reality (VR) ベースの車椅子シミュレータが開発されてきた。しかし、従来のシミュレータは、シミュレーションを行うための金銭的成本と、実際に車椅子で走行しているという臨場感がトレードオフの関係にある。この問題を解決するために、先行研究では、Head-Mounted Display (以降、HMD) と電動車椅子を挙動を組み合わせた車椅子バリアシミュレータを開発してきた。先行研究のシミュレータでシミュレーションできるバリアは、縦断勾配と横断勾配のみであり、同程度に存在するバリアである段差をシミュレーションすることができていない。段差上を走行するとき、車椅子は段差を上る/下るで異なる挙動をする。段差を上るときは、車椅子の前輪/後輪が段差にぶつかることでユーザの体に振動が生じ、一瞬車椅子の前進運動が停止する動きを見せる。段差を下るときは、車椅子の前輪が段差を下ってから後輪が段差を下り切るまで、車椅子が加速する動きを見せる。この動きを再現するために、電動車椅子の速度変化に着目した。本研究では、HMD 上に段差を通過するバーチャル空間上の映像を流すと同時に、電動車椅子の速度を変化させることで、ユーザに車椅子で段差を通過した感覚を与えられるか検証を行った。本実験で用いた Vection 誘発映像は、実空間映像とバーチャル空間映像の2種類であり、それぞれ検証を行った。検証の結果、実空間映像を用いたシミュレータにおいて、ユーザに段差を通過した感覚を与られている傾向にあると言える。また、バーチャル空間映像を用いたシミュレータにおいて、ユーザに段差を通過した感覚を与えられることを確認した。本研究で用いた実空間映像とバーチャル空間映像のシミュレーションにおける効果は、同程度である可能性がある。本研究の貢献は、Vection 誘発映像と電動車椅子の挙動を機見合わせたシミュレータを実装したことおよび、シミュレータを用いてユーザに段差を通過した感覚を与えられるのか評価実験を行ったことである。

目次

第1章 序論	1
1.1 研究の背景	2
1.2 研究の目的	2
1.3 本論文の構成	3
第2章 VRベースの車椅子シミュレータに関する研究事例	4
2.1 PCモニター/VRヘッドセットからの視覚刺激のみを利用する車椅子シミュレータの研究事例	5
2.2 VRヘッドセットからの視覚刺激と専用機器の動きを利用した車椅子シミュレータの研究事例	6
第3章 研究課題	8
3.1 問題の定義	9
3.2 研究課題の設定	9
第4章 提案手法	11
4.1 HMD上に流すvection誘発映像	12
4.2 電動車椅子の挙動	12
第5章 段差通過シミュレータの実装	14
5.1 車椅子シミュレータの全体像	15
5.2 HMD上のvection誘発映像	16
5.2.1 実空間映像の作成方法	16
5.2.2 バーチャル空間映像の作成方法	16
5.3 電動車椅子の制御	17
第6章 評価実験	18
6.1 実験の目的	19
6.2 実験参加者・実験環境	19
6.3 実験条件	19
6.4 実験の手順	20
6.5 実験結果	21
6.5.1 上り段差のシミュレーション結果 (R-Sim)	22

6.5.2	下り段差のシミュレーション結果 (R-Sim)	22
6.5.3	上り段差のシミュレーション結果 (VR-Sim)	23
6.5.4	下り段差のシミュレーション結果 (VR-Sim)	23
6.6	考察	23
6.6.1	上り段差シミュレーションの考察 (R-Sim)	23
6.6.2	下り段差シミュレーションの考察 (R-Sim)	24
6.6.3	上り段差シミュレーションの考察 (VR-Sim)	24
6.6.4	下り段差シミュレーションの考察 (VR-Sim)	25
6.6.5	実空間映像とバーチャル空間映像の効果の比較	25
第7章	結論	28
	謝辞	30
	参考文献	32
	研究業績	35

目次

4.1	上り段差シミュレーションの映像	13
4.2	下り段差シミュレーションの映像	13
5.1	車椅子シミュレータ全体像	15
5.2	HMD 上で段差を上る際の実空間映像	16
5.3	HMD 上で段差を下る際の実空間映像	16
5.4	HMD 上で段差を上る際のバーチャル空間映像	17
5.5	HMD 上で段差を下る際のバーチャル空間映像	17
6.1	実験環境	19
6.2	事前アンケート結果 (R-Sim)	22
6.3	事前アンケート結果 (VR-Sim)	23
6.4	Q1:R-Sim 事後アンケート結果 (N=6)	24
6.5	Q1:R-Sim 事後アンケート結果 (N=5)	25
6.6	Q1:VR-Sim 事後アンケート結果 (N=10, *:p < 0.05)	26
6.7	Q1:VR-Sim 事後アンケート結果 (N=11, *:p < 0.05)	27

表 目 次

5.1	デバイスの名称	16
6.1	上り段差の実験条件 (R-Sim)	20
6.2	下り段差の実験条件 (R-Sim)	20
6.3	上り段差の実験条件 (VR-Sim)	20
6.4	下り段差の実験条件 (VR-Sim)	20
6.5	事前アンケート (R-Sim)	21
6.6	事前アンケート (VR-Sim)	21
6.7	事後アンケート (R-Sim)	21
6.8	事後アンケート	22

第1章 序論

1.1 研究の背景

屋外を走行するとき、車椅子に不慣れなユーザは様々なバリアの存在に不安を感じる。これを軽減させるためには、あらかじめバリア上を走行する訓練をすることが有効とされている [1]。このことから、実際に屋外を走行しているかのような感覚をユーザに与える Virtual Reality (以降, VR) ベースの車椅子シミュレータが開発されてきた。VR ベースの車椅子シミュレータは、実際にバリアが存在する場所まで移動することなくシミュレーションを行え、実空間上にバリアに模した練習用コースを作成することなくシミュレーションを行えるメリットがある。一方で、従来のシミュレータは、金銭的成本と実際にバリア上を走行しているような臨場感がトレードオフの関係にある。従来のシミュレータは2種類に大別でき、1つはPC モニタ/VR ヘッドセットからの視覚刺激のみフィードバックをするものと、VR ヘッドセットからの視覚刺激と専用機器による動きのフィードバックをするものがある。視覚刺激のみフィードバックをするシミュレータは、PC のような比較的安価なもので構築されているため、シミュレーションに要する金銭的成本が低い。一方で、動きのフィードバックがないことから、ユーザは実際にバリア上を走行しているような臨場感が得られにくい。視覚刺激と専用機器による動きのフィードバックをするシミュレータは、実際にバリア上を走行しているような感覚を得られやすい反面、大型装置などを常設する必要があるため、シミュレーションに要する金銭的成本が高い。この問題を解決するために、先行研究では、Head-Mounted Display (以降, HMD) に表示する Vection (複数感覚刺激により誘発される自己運動感覚) 誘発映像と、電動車椅子の動きを組み合わせたバリアシミュレータを開発してきた [2][3][4]。しかし、先行研究でシミュレーションできるバリアは坂道 (以降, 縦断勾配) と左右方向に傾斜のある道 (以降, 横断勾配) のみであり、これらと同程度に存在するバリアの1つである段差のシミュレーションができていない。段差は歩道と車道の境界部や、自動ドアや電車の車輪が通るレール部など、様々な場所に存在している。これらの段差は車椅子ユーザにとって危険な存在になることがある。たとえば、上り段差通過時には、車輪が段差にぶつかる際の衝撃で体が前のめりになる。一方、下り段差通過時には、車椅子が意図せず加速してしまうことがある。上り下り問わず、段差通過時にバランスを崩し、ユーザが車椅子ごと転倒してしまうこともある。このため、段差通過はシミュレーションすべき重要なシーンといえる。

1.2 研究の目的

1.1 節で述べた問題を解決するために、先行研究では [5]、HMD と電動車椅子を用いて段差を通過するシミュレーションの手法を提案した。しかし、この手法を用いたシミュレータの実装および評価実験が行われておらず、提案手法でユーザに段差を通過する感覚をユーザに与えられるのかが明らかになっていない。

本研究の目的は、Vection 誘発映像と電動車椅子の挙動を組み合わせた段差通過シミュレータの実装および、シミュレータを用いた評価実験を行い、ユーザに段差を通過する感覚を与えられるのかを明らかにすることである。

1.3 本論文の構成

本論文の構成は次のとおりである。

2章では、VRヘッドセットからの視覚刺激と専用機器の動きを利用した車椅子シミュレータの研究事例、PCモニター／VRヘッドセットからの視覚刺激のみを利用する車椅子シミュレータの研究事例について述べる。

3章では、本論文における問題の定義と研究課題について述べる。

4章では、本論文における提案手法を述べる。

5章では、HMDと電動車椅子を用いた車椅子シミュレータに関する実装について述べる。

6章では、HMDと電動車椅子を用いた車椅子シミュレータに関する評価実験・考察について述べる。

最後に7章にて、本論文の結論を述べる

第2章 VRベースの車椅子シミュレータ に関する研究事例

本章では、VR ベースの車椅子シミュレータに関する研究事例について述べる。これらは、バーチャル空間上にバリアのあるコースを作成し、作成したコース上を走行させる車椅子シミュレータという点で本研究に関連している。VR ベースの車椅子シミュレータは2種類に大別する事ができ、PC モニタ/ヘッドセットからの視覚刺激のみフィードバックを与えるものと、VR ヘッドセットからの視覚刺激と専用機器の動きのフィードバックを与えるものに分けられる。2.1 節では、PC モニタ/VR ヘッドセットからの視覚刺激のみを利用する車椅子シミュレータの研究事例について紹介する。2.2 節では、視覚と動きの両方にフィードバックを行う車椅子シミュレータに関する研究事例について紹介する。

2.1 PC モニタ / VR ヘッドセットからの視覚刺激のみを利用する車椅子シミュレータの研究事例

視覚刺激のみを利用する車椅子シミュレータは、典型的にはジョイスティックとPC モニタ/HMD などのVR ヘッドセット上に表示されるバーチャル空間上の車椅子の動きが連動することでシミュレーションを行う [6][7][8][9][10]。シミュレーションに用いる装置は、比較的安価であり金銭的なコストは低いが、バリア上を走行しているような感覚を得られにくいという特徴がある。文献 [6][7][8] は、PC モニタからの視覚刺激を用いた車椅子シミュレータの開発を行なっている。Nguyen らは、VR 上に車椅子を表示し、手動車椅子の日常的な操作を模擬した検証実験を行った [6]。検証の結果、VR 上の前輪モデルが、現実よりも早く旋回してしまうという問題を克服したことが示された。Archambault らは、VR 上の車椅子の動きが、実際の車椅子の動きの運転性能と同等であるのかについての比較実験を行った [7]。検証の結果、シミュレータでも実生活でも車椅子の動きが非常に似ていることから、シミュレータが電動車椅子を必要とするユーザのジョイスティック操作のトレーニングになる可能性が示された。Ugur らは、神経筋障害や反射障害を持つ障害者が、標準的な電動車椅子を適切に操作することが困難であることに着目し、視覚情報技術と効率的な動作制御設計を施したシミュレータを開発し、障害者の移動問題に貢献した [8]。具体的には、システムの主要な特性と動的挙動を示す車椅子の数理モデルを構築しシミュレーションを行った。シミュレーションの結果、精密なモーター制御を行うアルゴリズムを開発し、車椅子の位置と方向、直線変位、速度情報、外乱の影響を制御することが可能となった。文献 [9][10] は、HMD のようなVR ヘッドセットからの視覚刺激を用いた車椅子シミュレータの開発を行なっている。Silva らは、VR 空間上の車椅子をユーザが遠隔操作することで、HMD を介してリアルタイム映像のフィードバックをユーザに与える手法を提案している [9]。具体的には、ユーザがVR 空間上に映し出された電動車椅子を操作することで、実際に走行している感覚を得られるものとなっている。Ritsos らは、電動車椅子の操作時に起こりうるユーザの経験不足からくる危険を回避するために、VR 上で車椅子の操作技術を向上させるシミュレーションシステムを開発した [10]。具体的には、HMD 上に表示しているヴァーチャル空間上の車椅子とジョイスティックの動きが連動するシステムを開発した。システムによってユーザが、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事を可能とした。

2.2 VR ヘッドセットからの視覚刺激と専用機器の動きを利用した車椅子シミュレータの研究事例

視覚刺激と専用機器の動きの両方を利用するシミュレータは、PC モニタ/HMD からの視覚刺激と、モーションプラットフォームのような高額な専用機器の動きを連動させることで、実際に車椅子で走行しているような高い臨場感を得られるシミュレーションを行う。一方で、高額な専用機器を用いるぶん、金銭的コストが高いというデメリットがある。文献 [11][12] は、モーションプラットフォームの動きと VR ヘッドセットによる視覚刺激を用いた車椅子シミュレータの開発を行なっている。Panadero らは、車椅子利用者が日々直面する困難について健常者の認識を深めるために、HMD と 3 自由度のモーションプラットフォームを用いて、車椅子利用者が日常的に通る斜面や段差などのバリア通過時の様子を体感するシミュレーションシステムを開発した [11]。具体的には、ユーザはモーションプラットフォームに乗った状態で HMD 上に流される車椅子を走行している映像を見ることで、様々なバリアを走行している感覚を得られる。Vailland らは、VR 技術を利用して模擬的な車椅子の運転体験をさせる視覚、聴覚、運動に依存した、多感覚型電動車椅子シミュレータのユーザ中心設計を提案した [12]。シミュレータは、車椅子ユーザの座席と操作のニーズに適合していることが判明したが、シミュレータが提供するマルチモーダルフィードバックが、ユーザに与える影響について評価できていない。

文献 [13][14][15][16][17] は、車椅子の動きと VR ヘッドセットによる視覚刺激を用いた車椅子シミュレータを開発している。陳らは、視覚と動きのフィードバックを与えるシミュレーションを行える車椅子モデルを開発している [13]。具体的には、車椅子モデル車輪の回転速度と現実の車輪の回転角度を一致させるようにすることで、ユーザは斜面や越えられる程度の小段差上を走行する感覚を得られる。Yoshitake らは、電動車椅子の自律航法システムの評価のために、電動車椅子と VR ヘッドセットを組み合わせた VRoM を開発した [14]。VRoM を用いた評価実験の結果、モーションフィードバックを行うシミュレータとモーションフィードバックを行わないシミュレータとでは、自律航行中の快適さの主観的評価が異なることが判明した。具体的には、車椅子が横幅の異なる経路を移動する自律航法において、歩行者からどれだけ離れたかに対するユーザの知覚を向上させることが示された。Salimi らは、車椅子利用者の 2 次的障害の原因の一つである車椅子の操縦に着目し、VR 上で曲線的な車椅子の推進力をシミュレーションする 3 つの車椅子シミュレータを開発し、その有効性を検証した [15]。検証の結果、3 つのシミュレータはそれぞれ良好な妥当性と信頼性を示した。Vailland らは、運動機能が低下してきた人々が安全に電動車椅子を運転することが困難であることに着目して、あらゆる状況や障害に適応可能な VR ベースの車椅子シミュレータを開発した [16][17]。電動車椅子常用者 29 名を対象に臨場感とサーバーシクの観点からシミュレータが提供する体験の質を評価した結果、実際の電動車椅子と我々のシミュレータをそれぞれ使用した場合、実環境と仮想環境の両

方において、同程度の時間でタスクを完了することが示された。

第3章 研究課題

本章では、本研究における問題の定義と研究課題について述べる。

3.1 問題の定義

第2.1節で述べたVRベースの車椅子シミュレータは、金銭的成本とバリア上を走行しているような臨場感がトレードオフの関係にある。視覚刺激のみを利用する車椅子シミュレータは、PCモニター/VRヘッドセット等の数万円で揃えられる比較的安価な既製品で構築されているため、金銭的成本が低いというメリットがある。一方で、動きによる前庭覚刺激がないため、実際に車椅子で走行しているような感覚を得られにくいというデメリットがある [9][6][7][8][9][10]。VRヘッドセットからの視覚刺激と専用機器の動きを利用した車椅子シミュレータは、視覚刺激のみ与える車椅子シミュレータと比べて実際に車椅子で走行しているような臨場感を得られやすい。一方で、動きのフィードバックをするのに、高価なもので数千万円する大型装置や専用機器を必要とするため、金銭的成本が高いというデメリットがある [11][12][13][14][15][17]。

先行研究では金銭的成本と車椅子でバリア上を走行しているような臨場感がトレードオフ関係にあるという問題を解決するために、HMD上に流す Vection 誘発映像と電動車椅子の挙動を連動させることで、金銭的成本が低く車椅子で走行しているような臨場感の高い車椅子バリアシミュレータを提案してきた [18][4][2][19][20]。先行研究の車椅子シミュレータは、ユーザがHMDを装着した状態で電動車椅子に乗りシミュレーションを行う。具体的には、HMD上に車椅子でバリア上を走行しているような一人称視点の映像を流し、映像に合わせて電動車椅子の動きを制御する。ユーザは Vection 誘発映像による視覚刺激により前庭覚刺激が拡張され、実際にバリア上を走行しているような感覚をシミュレーションを体験することができる。現状先行研究の車椅子シミュレータは、縦断勾配/横断勾配をシミュレーションすることはできるが、段差を通過するシミュレーションはできていない。段差は、車道と歩道の境界部や踏切、自動ドアのレールなど市街地の至る所に存在している。これらの段差を車椅子ユーザが通過するとき、車椅子の車輪が段差にぶつかった際の振動により身体的な負担を生じたり、段差を下る時に車椅子の走行速度が加速して障害物に衝突する危険性が高まったりする。また段差を無理に乗り上げようとすることで、ユーザはバランスを崩してしまい転倒してしまうなどの危険もある。上記より、先行研究の車椅子シミュレータにおける問題は次のように定義できる。

問題：HMD上に流す Vection 誘発映像と電動車椅子の挙動を連動させた車椅子シミュレータは、縦断勾配/横断勾配と同程度に存在するバリアである段差上を走行するシミュレーションが行えていない。

3.2 研究課題の設定

3.1節で述べたように、HMD上に流す Vection 誘発映像と電動車椅子の挙動を連動させた車椅子シミュレータにおいて、縦断勾配/横断勾配と同程度に存在する段差上を走行

するシミュレーションが行えていないという問題がある。先行研究 [21] では、このシミュレータを用いて段差のある道を走行する感覚をユーザに与えるシミュレーション手法の提案を行った。しかし、提案手法を用いたシミュレータの実装及び評価実験を行えていない。

本研究では、HMD 上に流す Vection 誘発映像と電動車椅子の挙動を連動させた車椅子シミュレータにおいて、段差のある道を走行する感覚をユーザに与えられるのか明らかにすることを研究課題として設定する。

第4章 提案手法

本章では、本論文における提案手法を述べる。本研究に用いる車椅子シミュレータは、先行研究と同様にHMDと電動車椅子の挙動を連動させたものである。先行研究のシミュレータでは、ユーザがHMDを装着した状態で電動車椅子に乗ることでシミュレーションを行う。具体的には、HMD上に車椅子に乗った状態でバリア上を走行している一人称視点の映像を流し、映像に合わせて電動車椅子の動きを制御する。ユーザはvection誘発映像による視覚刺激により前庭覚刺激が拡張され、実際にバリア上を走行しているような感覚を体験することができる。先行研究のシミュレータを用いて、段差のある道を通る感覚をユーザに与えるために、HMD上に流すvection誘発映像と電動車椅子の挙動について検討する。

4.1 HMD上に流すvection誘発映像

坂道のシミュレーションでは、車椅子に乗って坂道を上り/下りする一人称視点の映像をHMD上に表示することで、実際に坂道を上り/下りしているような感覚をユーザに与えられることが確認された[22][3]。横断勾配のシミュレーションでは、車椅子に乗って横断勾配のある道を直進する一人称視点の映像をHMD上に表示することで、実際に横断勾配のある道を走行しているような感覚をユーザに与えられることが確認された[4]。段差通過のシミュレーションを目指す本研究においても、車椅子に乗って段差を上る/下る一人称視点の映像をHMD上に表示するアプローチをとる。

4.2 電動車椅子の挙動

車椅子ユーザが実空間において段差を通過する時、段差を上る/下る動きによって車椅子の挙動は異なる。

上り段差を車椅子が通過する時、車椅子の前輪/後輪が段差にぶつかった衝撃で一瞬車椅子の前進運動が停止する動きを見せる。車椅子で段差を上る時の挙動を図4.1に示す。車椅子が段差を上り切ると、車椅子は再び前進運動を行う。この動きを再現するために、映像上で車椅子の前輪/後輪が段差にぶつかると同時に、電動車椅子を急停止させる。その後、映像上で車椅子が段差を上り切ると同時に、電動車椅子の走行速度を平地走行時と等速になるまで加速させる。下り段差を車椅子が通過する時、車椅子の前輪が段差を下ると同時に車椅子は加速する。具体的には、車椅子の前輪が段差を下り始めた瞬間から後輪が段差を下り終わるまでの間、車椅子は一定に加速する。その後、車椅子の後輪が段差を下り切ると同時に、車椅子の走行速度は、平地走行時の速度になるまで減速する。車椅子で段差を下る時の挙動を図4.1に示す。この動きを再現するために、映像上で車椅子が段差を下り始めると同時に、電動車椅子の走行速度を加速させる。その後、映像上で車椅子が段差を下り切ると同時に、平地走行時と等速になるまで減速させる。下り段差シミュレーション時の電動車椅子の挙動を図4.2に示す。

このように本研究では、車椅子の速度変化に着目したアプローチで、シミュレータの開発を行う。

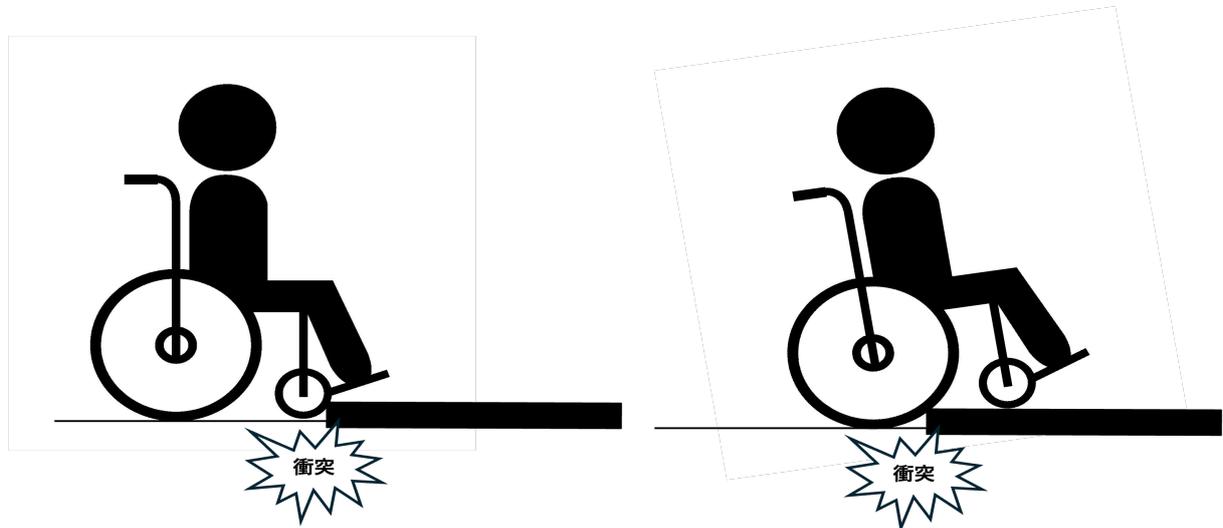


図 4.1: 上り段差シミュレーションの映像

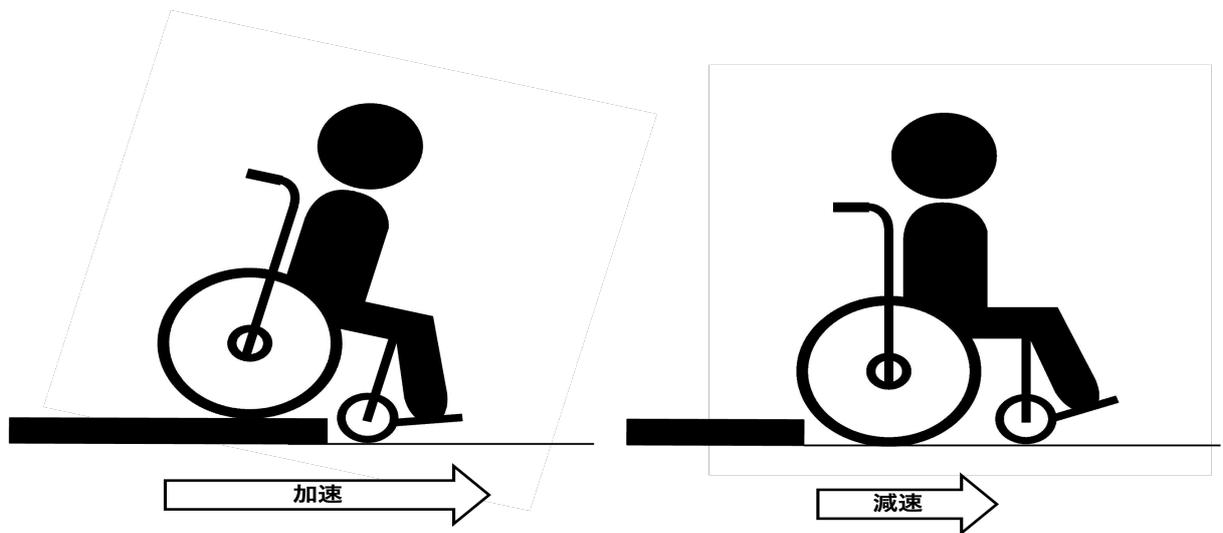


図 4.2: 下り段差シミュレーションの映像

第5章 段差通過シミュレータの実装

本章では、HMDと電動車椅子を用いた車椅子シミュレータの実装について述べる。5.1節では本研究の車椅子シミュレータの全体像についての説明を、5.2節ではHMD上に流すVection誘発映像についての説明を、5.3節ではシミュレーション時の電動車椅子の動きについての説明を行う。

5.1 車椅子シミュレータの全体像

本研究で用いる車椅子シミュレータの外観を図5.1、シミュレータに用いた各デバイスの名称を表5.1に示す。このシミュレータは、密閉型HMD（無線式コントローラ付き）、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。シミュレーションを実現するためのシステム構成を図??に示す。HMDとSBCは無線でWebsocket通信を行っており、SBCと電動車椅子は有線でシリアル通信を行なっている。HMDは、コントローラ操作を引き金に映像を再生し、それと同時にシミュレーション開始信号をSBCに送信する。シミュレータは、信号を受け取ったSBCが電動車椅子の挙動を制御することでシミュレーションを行う。シミュレータ使用時は、図5.1のようにユーザはHMDを装着した状態で電動車椅子に乗り、シミュレーションを行う。



図 5.1: 車椅子シミュレータ全体像

表 5.1: デバイスの名称

デバイス	名称
HMD	Meta Quest 2
SBC	Raspberry Pi4
電動車椅子	WHILL Model-CR

5.2 HMD 上の Vection 誘発映像

HMD 上には, Unity を用いて作成した段差を走行する一人称視点の動画を表示する. 表示する映像の作成方法は, 実空間映像とバーチャル空間映像で異なる.

5.2.1 実空間映像の作成方法

実空間映像は, あらかじめ段差を走行する動画を一人称視点で撮影し, Unity 上のオブジェクトに撮影した動画ファイルをアタッチすることで表示する. 実際に HMD 上に映し出す映像を図本研究では, 実空間映像を用いたシミュレータを R-Sim とする. 5.2, 5.3 に示す.



図 5.2: HMD 上で段差を上る際の実空間映像



図 5.3: HMD 上で段差を下る際の実空間映像

5.2.2 バーチャル空間映像の作成方法

バーチャル空間映像は, Unity 上に段差のある道を作成し, 作成されたコースを一人称視点で走行する映像を表示する. この時作成した段差の高さは, 国土交通省の段差の高さの規定に則り, 車椅子ユーザが乗り越えられる許容範囲である 2cm とした [23]. 実際に HMD 上に映し出す映像を図 5.4, 5.5 に示す. 本研究では, バーチャル空間映像を用いたシミュレータを VR-Sim とする.

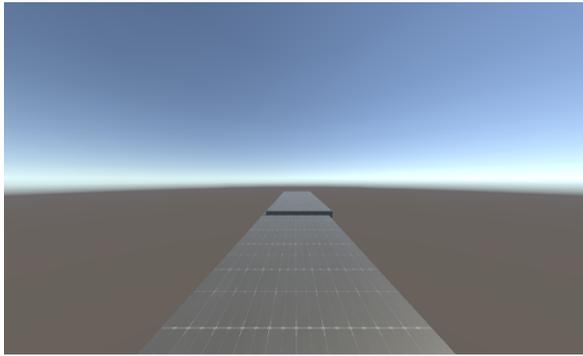


図 5.4: HMD 上で段差を上る際のバーチャル空間映像

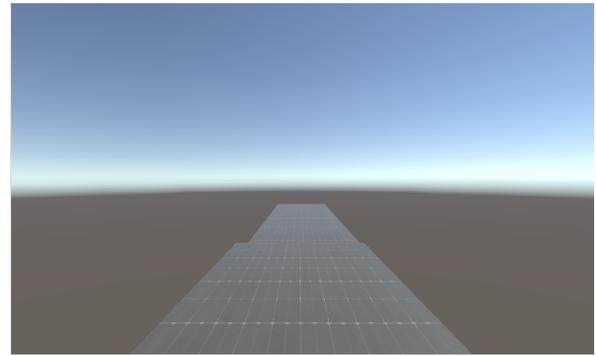


図 5.5: HMD 上で段差を下る際のバーチャル空間映像

5.3 電動車椅子の制御

電動車椅子は、HMD 上の Vection 誘発映像に合わせて速度変化させる。具体的には、映像上で車椅子が平地を走行する映像が流れている間は、電動車椅子を一定速度で走行させる。この時の速度は、先行研究 [20] に則って 0.8m/s とした。その後、映像上で段差上を走行すると同時に、電動車椅子の走行速度を変化させる。現実空間で段差上を走行させた時の車椅子の走行速度は、段差を上る/下る時で異なることから、電動車椅子の走行速度もそれぞれ異なる速度変化をさせる。具体的には、段差を上時は平地走行時の速度から一瞬停止させ、段差を下る時は平地走行時の速度から加速させる。映像上で段差を通過した後、再度平地走行時の速度に電動車椅子の走行速度を制御する。

第6章 評価実験

6.1 実験の目的

本実験の目的は、HMD上に流すvection誘発映像と電動車椅子の走行速度を変化させた時の動きを組み合わせた車椅子シミュレータで、段差を走行する感覚をユーザに与えられるのか明らかにすることである。

6.2 実験参加者・実験環境



図 6.1: 実験環境

本実験の参加者は、20代の学生であり、全員健常歩行者である。R-Simの実験参加者数は、上り段差のシミュレーションで6名、下り段差のシミュレーションで5名である。VR-Simの実験参加者数は、上り段差のシミュレーションで10名、下り段差のシミュレーションで11名である。実験参加者には、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。実験は、安全確保のために部外者が一切入れないようにした約8m × 8mの広さの部屋で行った。部屋の床は平坦であり、毛足の短いカーペットが敷いてあった。実験環境を図6.1に示す。本実験は、日本大学文理学部倫理委員会の許可のもと行われた。

6.3 実験条件

本実験で段差を通過した感覚をユーザに与える上で、HMD映像による視覚刺激と電動車椅子の挙動による前庭覚刺激の効果を検証するために、R-Simでは上り/下りシミュレーションで3つずつ計6つの実験条件を、VR-Simでは上り/下りシミュレーションで4つずつ計8つの実験条件を用意した。実空間映像のシミュレータの実験条件を表6.1, 6.2に、バーチャル空間映像のシミュレータの実験条件を表6.3, 6.4それぞれ示す。

表 6.1: 上り段差の実験条件 (R-Sim)

実験条件	HMD 映像	電動車椅子の動き
RU1	非表示	急停止・急発進あり
RU2	表示	急停止・急発進なし
RU3	表示	急停止・急発進あり

表 6.2: 下り段差の実験条件 (R-Sim)

実験条件	HMD 映像	電動車椅子の動き
RD1	非表示	加減速あり
RD2	表示	加減速なし
RD3	表示	加減速あり

表 6.3: 上り段差の実験条件 (VR-Sim)

実験条件	HMD 映像	電動車椅子の動き
VU1	非表示	急停止・急発進なし
VU2	非表示	急停止・急発進あり
VU3	表示	急停止・急発進なし
VU4	表示	急停止・急発進あり

表 6.4: 下り段差の実験条件 (VR-Sim)

実験条件	HMD 映像	電動車椅子の動き
VD1	非表示	加減速なし
VD2	非表示	加減あり
VD3	表示	加減なし
VD4	表示	加減あり

6.4 実験の手順

本実験は、上り段差のシミュレーションと下り段差のシミュレーションで2日に分けて行った。実験参加者には、実験に参加する前に事前アンケートに回答してもらった。R-Simにおける事前アンケートを表6.5、VR-Simにおける事前アンケートを表6.6に示す。実験の手順は次の通りに行った。

- Step 1:** 実験参加者は、車椅子に乗った状態で、実空間映像上の段差と同一箇所（図5.2, 5.3）である段差上を走行する。実験参加者は、任意の時間上る/下る感覚を体験する。
- Step 2:** 実験者は、実験参加者にシミュレータの操作方法を説明する。具体的には、デバイスの操作方法や、シミュレーションの開始方法を教示した。
- Step 3:** 実験者が順序効果を相殺するために無作為に選んだ1条件を、実験参加者は体験する。この時 R-Sim では2回続けて、VR-Sim では1度だけ体験してもらった

Step 4: 実験参加者は、1条件が終了するたびに実験後アンケート（表6.7, 6.8）に回答する。

Step 5: 全ての実験条件のシミュレーションが終了するまで Step 3~4 を繰り返し行う。

Step 6: 上り段差と下り段差のシミュレーションを2日に分けて Step 1~5 を行う。

表 6.5: 事前アンケート (R-Sim)

質問内容	回答項目
Q1 あなたは VR空間をどの程度の頻度で体験していますか？	1: ほぼ毎日, 2: 1週間に3日程度, 3: 1週間に1,2日, 4: 1ヶ月に1,2日程度, 5: 1年間に数日程度, 6: 体験したことは無い
Q2 どのようなデバイスで VR空間を体験していますか？	1: 密閉型HMD, 2: 透過型HMD, 3: スマートフォン, 4: 普段VR空間を体験していない, 5: その他 {記述式}
Q3 どのような場面で VR空間を体験していますか？	1: 研究, 2: 授業, 3: ゲーム, 4: ゲーム以外の娯楽, 5: その他 {記述式}

表 6.6: 事前アンケート (VR-Sim)

質問内容	回答項目
Q1 あなたは VR空間をどの程度の頻度で体験していますか？	1: ほぼ毎日, 2: 1週間に3日程度, 3: 1週間に1,2日, 4: 1ヶ月に1,2日程度, 5: 1年間に数日程度, 6: 体験したことは無い
Q2 どのようなデバイスで VR空間を体験していますか？	1: 密閉型HMD, 2: 透過型HMD, 3: スマートフォン, 4: PCディスプレイ, 5: その他, 6: 体験したことがない
Q3 どのような場面で VR空間を体験していますか？	1: 研究, 2: 授業, 3: ゲーム, 4: ゲーム以外の娯楽, 5: その他, 6: 体験したことがない
Q4 VRを用いた車椅子シミュレータを体験したことがありますか	1: はい, 2: いいえ
Q5 車椅子を利用したことがありますか	1: はい, 2: いいえ
Q6 手動車椅子と電動車椅子のどちらを利用しましたか	1: 手動車椅子, 2: 電動車椅子, 3: どちらも利用したことがない
Q7 車椅子の利用期間はどれくらいでしたか	1: 1ヶ月以内, 2: 3ヶ月以内, 3: 半年以内, 4: 1年未満, 5: それ以上, 6: 利用したことがない
Q8 車椅子を利用した目的を教えてください	任意記述

表 6.7: 事後アンケート (R-Sim)

質問内容	回答項目
Q 上り/下り段差を通過している感覚を得られましたか？	1: 得られない ~ 7: 得られた

6.5 実験結果

R-Sim の事前/事後アンケート結果を図6.2, 6.4, 6.5に, VR-Sim の事前/事後アンケート結果を図6.3, 6.6, 6.7に示す。

表 6.8: 事後アンケート

質問内容	回答項目
Q1 上り／下り段差を通過している感覚を得られましたか？	1：得られない～7：得られた
Q2 今回のシミュレーションについて感じたことをお書きください	

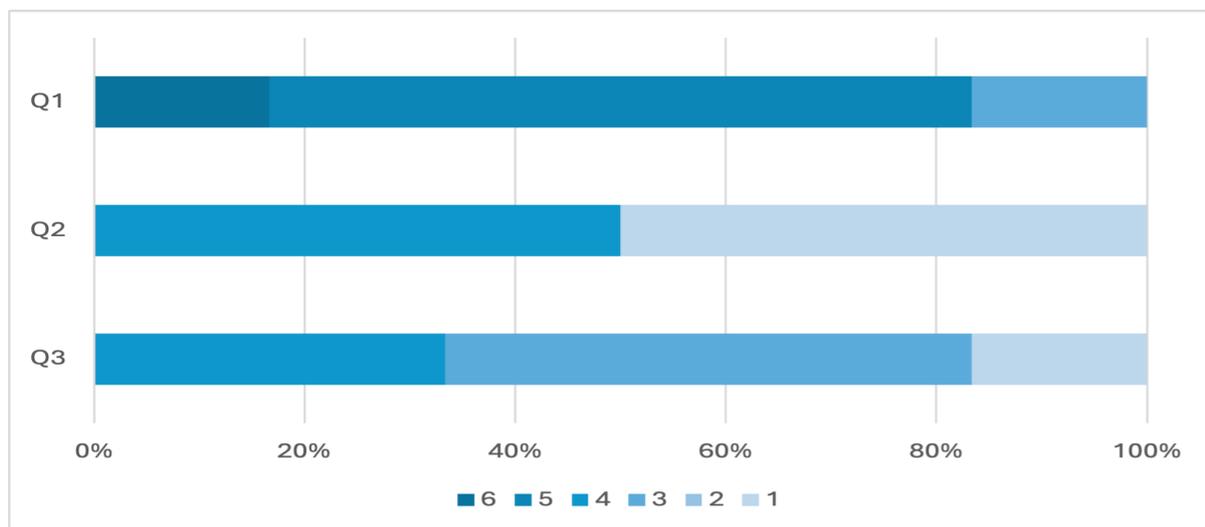


図 6.2: 事前アンケート結果 (R-Sim)

6.5.1 上り段差のシミュレーション結果 (R-Sim)

RU1 (HMD 映像なし・電動車椅子の急停止, 急発進あり) と RU2 (HMD 映像あり・電動車椅子の急停止, 急発進なし) では半数以上が3以下の回答をしているのに対し, RU3 (HMD 映像あり・電動車椅子の急停止, 急発進あり) では1名以外の参加者が5以上の回答をしている. 全条件間 (RU1-RU2間, RU1-RU3間, RU2-RU3間) で Wilcoxon の符号順位検定結果に Holm 補正を行った結果, Q1 の回答結果に有意差は確認されなかった.

6.5.2 下り段差のシミュレーション結果 (R-Sim)

条件4 (HMD 映像なし・電動車椅子の速度変化あり) と条件5 (HMD 映像あり・電動車椅子の速度変化なし) では条件5の4と回答した参加者以外全員が3以下の回答をしているのに対し, 条件6 (HMD 映像あり・電動車椅子の速度変化あり) では参加者全員が5以上の回答をしている. 全条件間 (RD1-RD2間, RD1-RD3間, RD2-RD3) Wilcoxon の符号順位検定結果に Holm 補正を行った結果, 全 Q2 の回答結果に有意差は確認されなかった.

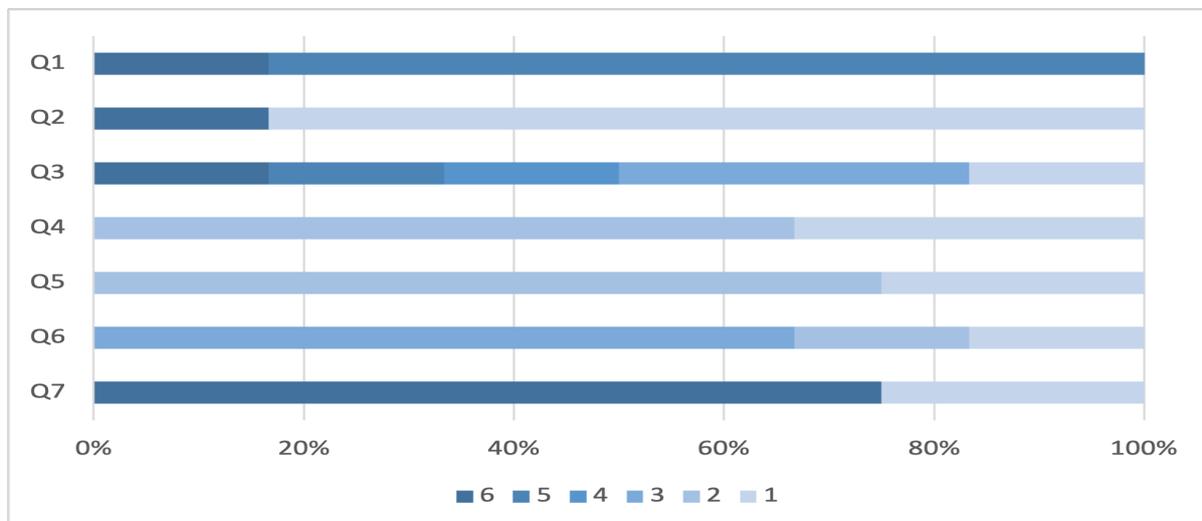


図 6.3: 事前アンケート結果 (VR-Sim)

6.5.3 上り段差のシミュレーション結果 (VR-Sim)

Q1の回答分布(図6.6)から、実験参加者が5以上と回答した割合が最も高い条件は90%のV-U4であった。全条件間でWilcoxonの符号順位検定結果にHolm補正を行った結果、VU4とその他の条件間(VU1-VU4間、VU2-VU4間、VU3-VU4間)にて5%水準の有意差が認められた。

6.5.4 下り段差のシミュレーション結果 (VR-Sim)

Q1の回答分布(図6.7)から、実験参加者が5以上の回答をした割合が最も高い条件は80%のVD4であった。全条件間でWilcoxonの符号順位検定の結果にHolm補正を行った結果、VD4とその他の実験条件間(VD1-VD4間、VD2-VD4間、VD3-VD4間)で5%水準の有意差が認められた。

6.6 考察

R-Sim, VR-Simの実験結果より、節6.6.1, 6.6.2, 6.6.3, 6.6.4段差を上る/下る感覚を与えられたのかについてを、節6.6.5で実空間映像とバーチャル空間映像の比較を行う。

6.6.1 上り段差シミュレーションの考察 (R-Sim)

段差を上っている感覚を与えられたのかについて考察する。RU1(HMD映像なし・電動車椅子の急停止, 急発進あり)とRU2(HMD映像あり・電動車椅子の急停止, 急発進なし)は、段差を通過している感覚を得られたかというアンケートに3以下を回答してい

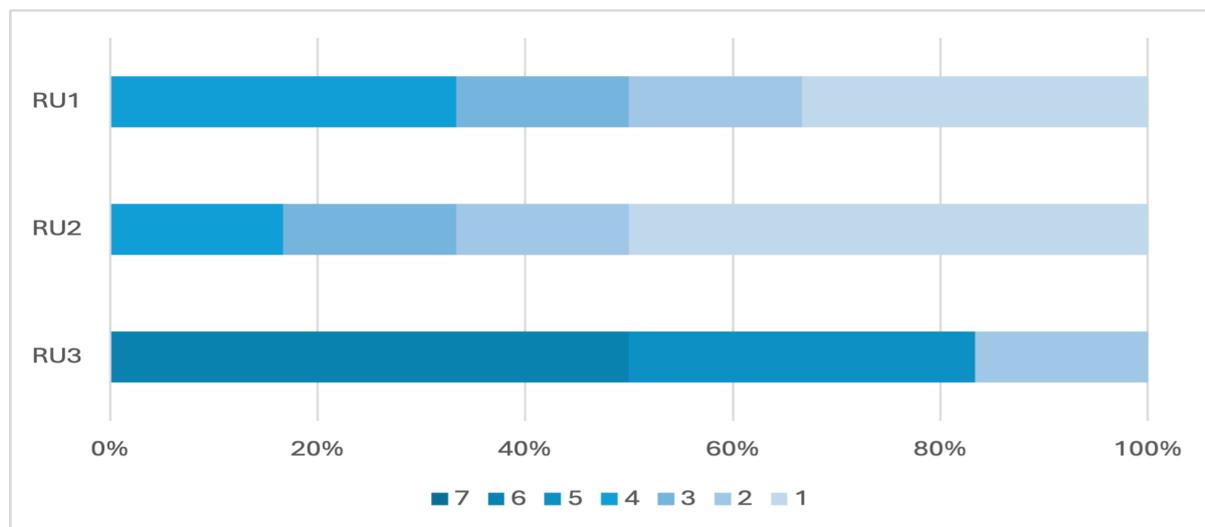


図 6.4: Q1:R-Sim 事後アンケート結果 (N=6)

る参加者の割合がそれぞれ60%, 80%以上であり, 段差を上る感覚を与えられなかった傾向にある. RU3 (HMD映像あり・電動車椅子の急停止, 急発進あり) は, RU1, 2との間に有意差は確認されなかったが, 80%以上の参加者が5以上の回答をしていることから, 段差を上る感覚をユーザに与えられている傾向にあると考えられる. しかし2と回答した参加者が1名おり, 段差を通過している感覚ではなく, 電動車椅子が急停止した感覚をそのまま感じたという回答をしていた. この参加者は, 日常的にHMDを利用しておらず, 年に1, 2回利用する程度であるが, 利用目的が研究であることから, 他の参加者に比べHMDの利用に慣れている可能性がある.

6.6.2 下り段差シミュレーションの考察 (R-Sim)

RD4 (HMD映像なし・電動車椅子の速度変化あり) と RD5 (HMD映像あり・電動車椅子の速度変化なし) は, 実験結果より上り段差と同様, 臨場感が低い傾向にあると言える. 一方でDR6 (HMD映像あり・電動車椅子の速度変化あり) は, 条件4, 5との間に有意差は確認されなかったが, 全ての参加者が5以上と回答していることから, 段差を下る感覚を与えられている傾向にあると考えられる.

6.6.3 上り段差シミュレーションの考察 (VR-Sim)

VU2-VU4, VU3-VU4間に注目すると, どちらの条件間においても有意差が確認されていることから, HMD映像による視覚刺激によって, 電動車椅子の動きによるユーザの前庭覚刺激を拡張されたことにより, ユーザは臨場感の高いシミュレーションを行えたと考えられる.

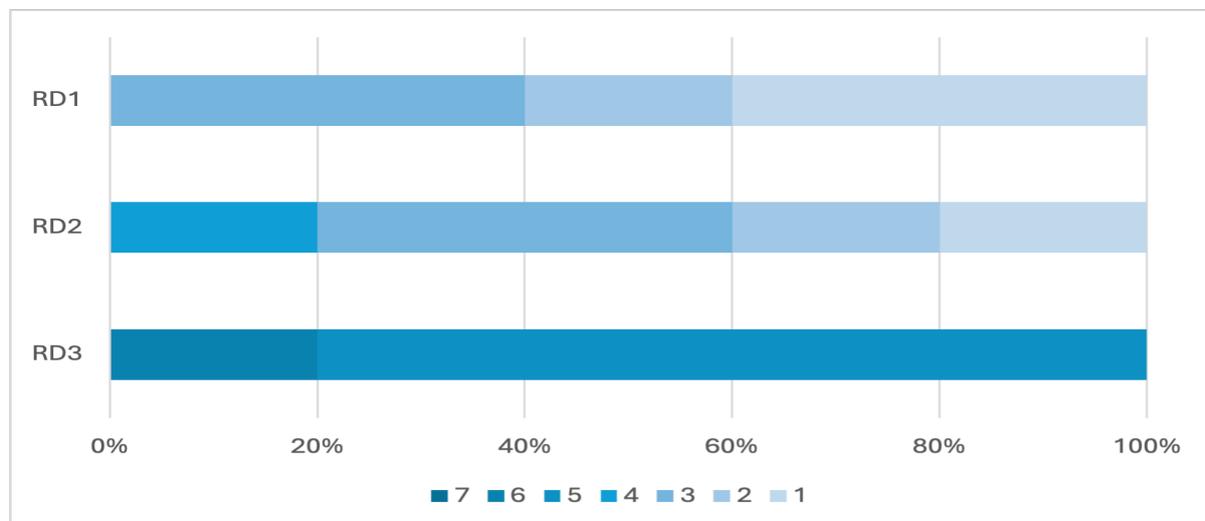


図 6.5: Q1:R-Sim 事後アンケート結果 (N=5)

6.6.4 下り段差シミュレーションの考察 (VR-Sim)

VD1-VD2, VD1-VD3 間に注目すると、どちらの条件間においても有意差が確認されていることから、HMD 映像による視覚刺激と電動車椅子の挙動による前庭覚刺激は、臨場感を向上させるうえで有効であると考えられる。VD2-VD4, VD3-VD4 間に注目すると、どちらの条件間においても有意差が確認されていることから、HMD 映像による視覚刺激によって、電動車椅子の動きによるユーザの前庭覚刺激を拡張されたことにより、ユーザはより段差を通過する感覚を得られたと考えられる。

6.6.5 実空間映像とバーチャル空間映像の効果の比較

R-Sim と VR-Sim の実験結果から、実空間映像とバーチャル空間映像の効果について比較していく。R-Sim の HMD 映像による視覚刺激を与える手法 (RU2, RU3, RD2, RD3) に注目する。RU2, RD2 の電動車椅子の挙動を変化させない手法において、半数以上の参加者は段差を上る/下る感覚を得られなかった傾向にある。一方、一部の参加者は映像を見るだけで、段差を上る/下る感覚を得ることができていることがわかる。これは、実際に存在する段差を走行する映像が流れることから、自身が実際にその箇所を車椅子で走行することを容易に想像することができた可能性がある。RU3, RD3 の実験結果より、視覚刺激以外に電動車椅子の挙動によってユーザは前庭覚を刺激されるため、より実際に存在する段差を走行した感覚を参加者に与えられた可能性がある。

VR-Sim の HMD 映像による視覚刺激を与える手法 (VU3, VU4, VD3, VD4) に注目する。VU3, VD3 の電動車椅子の挙動を変化させない手法において、半数以上の参加者は段差を上る/下る感覚を得られなかった傾向にある。一方、5 以上の解答をしている参加者は、両条件で 3 人いる。VU3 における Q2 の回答結果から、段差を上っていると回答し

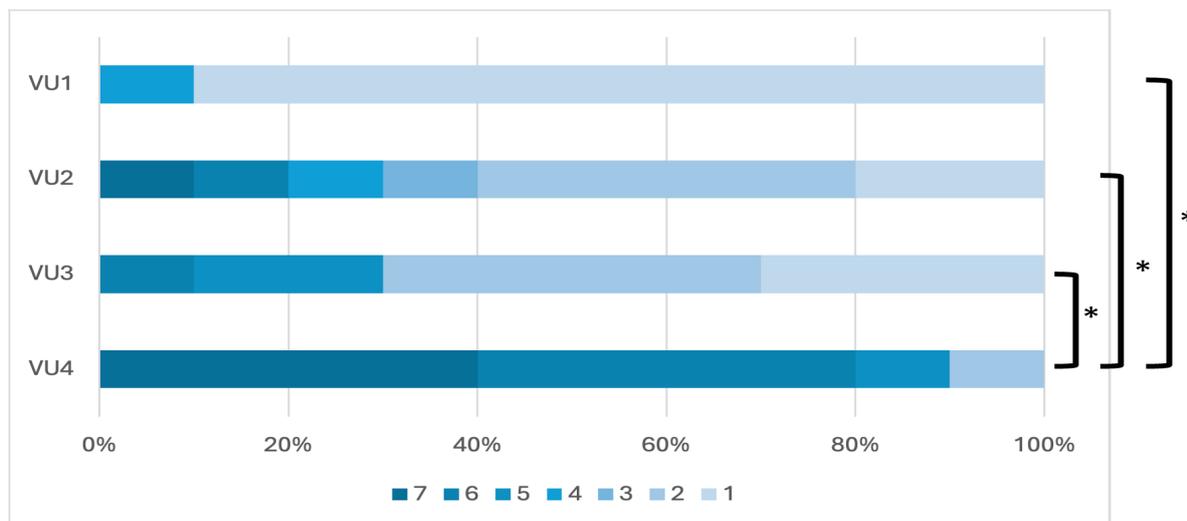


図 6.6: Q1:VR-Sim 事後アンケート結果 (N=10, *:p < 0.05)

ている参加者や、実際に段差を上るときに生じる揺れを感じたと回答している参加者もいた。これは、実際に参加者が段差を上る体験をしたときの振動により生じる視線移動と、映像上で車椅子が段差を上る際の視線移動が酷似していた可能性があると考えられる。VD3におけるQ2の回答結果から、段差を下っているように感じたと回答している参加者がいた。これは、実際に参加者が車椅子で段差を下る際の視線移動と、映像上で車椅子が段差を下る際の視線移動が酷似していた可能性があると考えられる。VU4, VD4の実験結果より、視覚刺激以外に電動車椅子の挙動によってユーザは前庭覚を刺激されるため、より実際に存在する段差を走行した感覚を参加者に与えられた可能性がある。

本節は、実空間映像とバーチャル空間の効果について述べた。どちらの映像も、電動車椅子の挙動と組み合わせることで段差を走行する感覚をより実験参加者に与えることができるということがわかる。また電動車椅子の挙動を組み合わせなくても、一部の実験参加者に段差を走行している感覚を与えられている傾向にあることがわかる。このことから、HMD上に流す映像が実空間映像とバーチャル空間映像のどちらも、段差を走行している感覚をユーザに与える上で同程度の効果を発揮する傾向にあると考えられる。

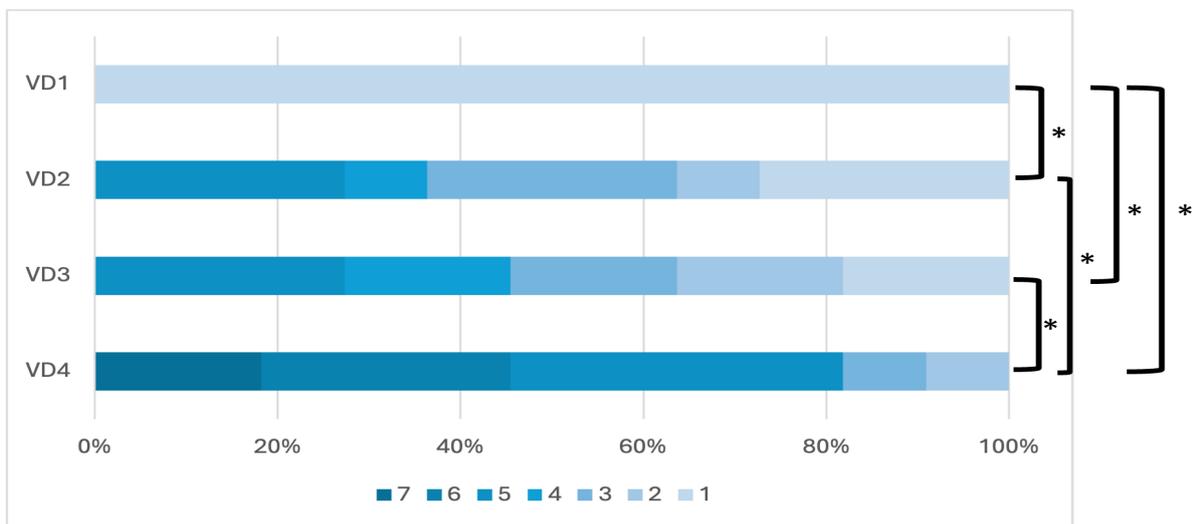


図 6.7: Q1:VR-Sim 事後アンケート結果 (N=11, *:p < 0.05)

第7章 結論

本論文では、HMD 上に表示する実空間映像/バーチャル空間映像による視覚刺激および、電動車椅子の速度の変化を併用することで、ユーザに段差を上る/下る感覚を与えられるのかそれぞれ検証を行った。R-Sim の実験結果から、段差を上る/下るシミュレーションのどちらにおいても有意差はなかったが、ユーザに段差を通過している感覚を与えられている傾向にあることがわかった。VR-Sim の実験結果から、段差を上る/下るシミュレーションのどちらにおいても 5%水準の有意差を確認することができた。HMD 上に表示する実空間映像/バーチャル空間映像による視覚刺激および、電動車椅子の速度の変化を併用することは、段差を通過する感覚をユーザに与える上で重要な要素だと考えられる。このとき実空間映像とバーチャル空間映像は、段差を走行している感覚をユーザに与えるシミュレーションにおいて、同程度の効果を発揮する傾向にあると考えられる。

本研究では、段差の高さを固定した条件で検証を行ったが、現実世界の段差の高さは様々である。異なる高さの段差についても同様の結果を得られるのか、段差の高さの違いを感じ取れるのかなどを引き続き検証を行っていく必要がある。また本実験の参加者は、R-Sim と VR-Sim で異なることから、実空間映像とバーチャル空間映像による効果の違いを正確に比較できていない可能性がある。今後は、実験条件をそれぞれ揃えた上で、改めて映像による違いがシミュレーションにどのように影響するのか調査していく。

謝辭

本研究は JSPS 科研費 JP19H04160 の助成を受けて行われたものである.

参考文献

- [1] Sara Arlati, Vera Colombo, Giancarlo Ferrigno, Rinaldo Sacchetti, and Marco Sacco. Virtual reality-based wheelchair simulators: A scoping review. *Assistive Technology*, 2019.
- [2] Akihiro Miyata, Kousuke Motooka, and Kenro Go. A wheelchair simulator using limited-motion patterns and vection-inducing movies. In *Proc. the 31st Australian Conference on Human-Computer-Interaction (OzCHI '19)*, pp. 508–512, 2019.
- [3] 本岡宏將, 呉健朗, 大和佑輝, 宮田章裕ほか. Vection 誘発映像と前進動作による坂道シミュレーション. *情報処理学会論文誌*, Vol. 61, No. 1, pp. 61–69, 2020.
- [4] 杉本隆星, 大河原巧, 板床海斗, 落合慶広, 宮田章裕. Vection 誘発映像と電動車椅子の円運動を組み合わせた横断勾配シミュレータの検証. *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, Vol. 28, No. 1, pp. 35–42, 2023.
- [5] 板床海斗, 本岡宏將, 大河原巧, 杉本隆星, 宮田章裕. 電動車椅子と hmd を用いた段差通過シミュレータの基礎検討. *情報処理学会インタラクティブ 2022 論文集*, Vol. 2020, pp. 731–733, 2022.
- [6] Viet Thuan Nguyen, Toufik Bentaleb, Chouki Sentouh, Philippe Pudlo, and Jean-Christophe Popieul. On a complete dynamical model of manual wheelchair for virtual reality simulation platform. In *2019 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (SMC '19)*, pp. 2417–2422, 2019.
- [7] Philippe S Archambault, Stéphanie Tremblay, Sarah Cachecho, François Routhier, and Patrick Boissy. Driving performance in a power wheelchair simulator. *Disability and Rehabilitation: Assistive Technology*, Vol. 7, No. 3, pp. 226–233, 2012.
- [8] Efgan Uğur, Tolgay Kara, and Abdulhafez Abdulhafez. Modeling and simulation of a wheelchair system with motion control. In *2021 5th International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT)*, pp. 237–242, 2021.
- [9] Yuri Silva, Walter Simões, Mauro Teófilo, Eduardo Naves, and Vicente Lucena. Training environment for electric powered wheelchairs using teleoperation through a head mounted display. In *2018 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE '18)*, pp. 1–2, 2018.

-
- [10] Panagiotis D Ritsos and W Nigel. A cost-effective virtual environment for simulating and training powered wheelchairs manoeuvres. *Proc. Med. Meets Virtual Reality NextMed/MMV*, Vol. 220, p. 134, 2016.
- [11] M Carmen Fernández Panadero, Valentín de la Cruz Barquero, Carlos Delgado Kloos, and David Morán Núñez. Phymel-ws: Physically experiencing the virtual world. insights into mixed reality and flow state on board a wheelchair simulator. *J. Univers. Comput. Sci.*, Vol. 20, No. 12, pp. 1629–1648, 2014.
- [12] Guillaume Vailland, Fabien Grzeskowiak, et al. User-centered design of a multisensory power wheelchair simulator: Towards training and rehabilitation applications. In *2019 IEEE 16th International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR '19)*, pp. 77–82, 2019.
- [13] 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*, Vol. 72, No. 718, pp. 1891–1899, 2006.
- [14] Hiroshi Yoshitake, Kazuto Futawatari, and Motoki Shino. A vr-based simulator using motion feedback of a real powered wheelchair for evaluation of autonomous navigation systems. In *13th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications*, pp. 26–29, 2021.
- [15] Zohreh Salimi and Martin Ferguson-Pell. Investigating the reliability and validity of three novel virtual reality environments with different approaches to simulate wheelchair maneuvers. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, Vol. 27, No. 3, pp. 514–522, 2019.
- [16] Guillaume Vailland, Yoren Gaffary, Louise Devigne, Valérie Gouranton, Bruno Arnaldi, and Marie Babel. Vestibular feedback on a virtual reality wheelchair driving simulator: A pilot study. In *2020 15th ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (HRI)*, pp. 171–179, 2020.
- [17] Guillaume Vailland, Louise Devigne, François Pasteau, Florian Nouviale, Bastien Fraudet, Émilie Leblong, Marie Babel, and Valérie Gouranton. Vr based power wheelchair simulator: Usability evaluation through a clinically validated task with regular users. In *2021 IEEE Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*, pp. 420–427, 2021.
- [18] 本岡宏將, 呉健朗, 大和佑輝, 宮田章裕ほか. Vection 誘発映像と前進動作による坂道シミュレーション. *情報処理学会論文誌*, Vol. 61, No. 1, pp. 61–69, 2020.
- [19] Takumi Okawara, Kousuke Motooka, Kazuki Okugawa, and Akihiro Miyata. Implementation of an authoring tool for wheelchair simulation with visual and vestibular

- feedback. In *2022 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces Abstracts and Workshops (VRW '22)*, pp. 754–755, 2022.
- [20] 大河原巧, 本岡宏將, 板床海斗, 杉本隆星, 宮田章裕ほか. 平地の vr 車椅子シミュレーションにおける移動距離の影響. *情報処理学会論文誌*, Vol. 64, No. 1, pp. 104–111, 2023.
- [21] 齊藤孝樹, 板床海斗, 杉本隆星, 大河原巧, 呉健朗, 宮田章裕. HMD と電動車椅子を用いた段差通過シミュレータの検証. *情報処理学会シンポジウム論文集, マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO '23)*, Vol. 2023, p. 876–881, 2023.
- [22] Akihiro Miyata, Hironobu Uno, and Kenro Go. Evaluation on a wheelchair simulator using limited-motion patterns and vection-inducing movies. In *2019 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*, pp. 1086–1087, 2019.
- [23] 国土交通省. 歩道の一般的構造に関する基準. <https://www.mlit.go.jp/kisha/kisha05/06/060203/03.pdf>.

研究業績

査読付き論文誌

- (1) 杉本隆星, 大河原巧, 齊藤孝樹, 呉健朗, 宮田章裕: 車椅子シミュレーションのためのオーサリングツールの検証. 情報処理学会論文誌, Vol.65, No.1 (2024 掲載予定).

研究会・シンポジウム

- (1) 齊藤孝樹, 板床海斗, 杉本隆星, 大河原巧, 呉健朗, 宮田章裕: HMD と電動車椅子を用いた段差通過シミュレータの検証, 情報処理学会シンポジウム論文集, マルチメディア、分散、協調とモバイル (DICOMO '23), pp.876-881 (2023 年 7 月).
- (2) 松井優季, 須賀美月, 齊藤孝樹, 木村悠児, 呉健朗, 森岡優一, 古野雅人, 宮田章裕: 発言量に基づいて可逆的に顔をぼかすビデオ会議システムの基礎検討, 情報処理学会シンポジウム論文集, マルチメディア、分散、協調とモバイル (DICOMO '23), pp.1666-1669 (2023 年 7 月).
- (3) 土岐田力輝, 古田瑛啓, 村山優作, 齊藤孝樹, 呉健朗, 宮田章裕: 視覚障害者誘導用ブロックの認識のしやすさを推定する手法の提案, 情報処理学会シンポジウム論文集, マルチメディア、分散、協調とモバイル (DICOMO '23), pp.1097-1102. (2023 年 7 月).
- (4) 呉健朗, 齊藤孝樹, 土岐田力輝, 松井優季, 宮田章裕: 文書の編集可否が校正作業に与える影響の調査, 情報処理学会研究報告コラボレーションとネットワークサービス (CN), Vol.2023 年 5 月-CN-120, No. 5, pp.1-5 (2023 年 5 月).
- (5) 齊藤孝樹, 杉本隆星, 藤本悠作, 呉健朗, 宮田章裕: Vection 誘発映像と電動車椅子を併用した段差通過シミュレータの改良. 情報処理学会コラボレーションとネットワークサービスワークショップ 2023 論文集, Vol.2023, pp.61-67 (2023).
- (6) 藤本悠作, 杉本隆星, 齊藤孝樹, 呉健朗, 宮田章裕: 強化学習による電動車椅子のバリアシミュレーションの基礎検討. 情報処理学会インタラクシオン 2024 論文集 (2024).
- (7) 松井優季, 須賀美月, 齊藤孝樹, 張宇航, 呉健朗, 古野雅人, 市川裕介, 宮田章裕: フィルタ条件による心理的負担への影響の基礎検討. 情報処理学会コラボレーションとネットワークサービスワークショップ 2023 論文集, Vol.2023, pp.154-155 (2023).
- (8) 竹田まり, 松井優季, 須賀美月, 齊藤孝樹, 呉健朗, 古野雅人, 市川裕介, 宮田章裕: 顔をぼかすビデオ会議システムに対する印象における性差の調査. 情報処理学会インタラクシオン 2024 論文集 (2024).

-
- (9) 土岐田力輝, 齊藤孝樹, 東直輝, 松井優季, 新山はるな, 呉健朗, 宮田章裕: 視覚障害者のスクリーンデバイス上における小説の読み方と移入の関係性の調査. 情報処理学会コラボレーションとネットワークサービスワークショップ 2023 論文集, Vol.2023, pp.84-85 (2023).