HMDと電動車椅子を組み合わせた横断勾配シミュレータの開発

令和4年度　卒業論文

日本大学　文理学部　情報科学科　宮田研究室

杉本　隆星

概要

車椅子に不慣れなユーザは屋外を移動するときに不安，疲労，ストレスを感じる．これらを軽減するために，車椅子で移動するときの感覚を体感できる Virtual Reality（VR）ベースの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 VR ベースの車椅子シミュレータは金銭的なコストと臨場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，先行研究では head-mounted display（HMD）と電動車椅子を組み合わせた車椅子シミュレータの提案を行ってきた．このシミュレータで再現されているバリアは坂道のみであり，横断勾配のある道の再現は行われていない．そこで，このシミュレータを用いて横断勾配の再現をするため，電動車椅子が円運動を行いユーザに遠心力を感じさせることで，自身の体が傾いていると錯覚させるアプローチが提案された．本研究では，HMD 上に横断勾配のある道を走行する一人称視点の映像を流し，電動車椅子が円運動を行う車椅子シミュレータの実装と，このシミュレータを用いて横断勾配を通過している感覚をユーザに与えられるか検証する．検証では，HMD 上の映像の有無・電動車椅子の円運動の有無を変えた各条件を比較し，HMD 上の映像と電動車椅子の円運動を組み合わせることの効果を検証する．検証の結果，HMD 上の映像と電動車椅子の円運動を組み合わせることで，横断勾配のある道を通過している感覚をユーザに与えられることを確認した．本論文の貢献は，横断勾配のある道を再現するために，HMD と電動車椅子を組み合わせた車椅子シミュレータの実装を行ったことと，そのシミュレータを用いて，ユーザに横断勾配のある道を通過している感覚を与えられことを明らかにしたことである．

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　視覚のフィードバックのみを提供するシミュレータに関する研究事例 . . . 5
2.2　視覚と動きの両方のフィードバックを提供するシミュレータに関する研究事例 6

第 3 章　研究課題 **7**
3.1　問題の定義 8
3.2　研究課題の設定 9

第 4 章　提案手法 **10**
4.1　HMD 上の Vection 誘発映像 11
4.2　電動車椅子の動作 11

第 5 章　HMD と電動車椅子を組み合わせた車椅子シミュレータの実装 **13**
5.1　車椅子シミュレータの全体像 14
5.2　HMD 上の映像の挙動 15
5.3　電動車椅子の挙動 16

第 6 章　評価実験 **17**
6.1　実験の目的 18
6.2　実験参加者・実験環境 18
6.3　実験条件 18
6.3.1　制御変数 19
6.3.2　独立変数 19
6.3.3　従属変数 20
6.4　実験の手順 21
6.5　実験の結果 21
6.6　考察 22

6.6.1 シーンの再現性 22
6.6.2 省スペース化の実現可能性 24

第 7 章 結論 **26**

謝辞 **28**

参考文献 **30**

研究業績 **32**

図 目 次

3.1 シミュレータの外観 9

4.1 電動車椅子の動きの一例 12
4.2 実際の横断勾配のある道を 通過するときの横方向の加速度 12
4.3 電動車椅子の円運動による 横方向の加速度 12

5.1 シミュレータの外観 14
5.2 HMD 上の映像 15

6.1 実験環境 18
6.2 Q1 の回答分布（N=10, *：p ＜ 0.05） 23
6.3 Q2 の回答分布（N=10, *：p ＜ 0.05） 24
6.4 Q3 の回答分布（N=10） 25

表 目 次

5.1 シミュレータに使用したデバイスの名称 15

6.1 実験条件の一覧 20
6.2 実験参加者への質問一覧 21

第1章　序論

1.1 研究の背景

車椅子に不慣れなユーザは屋外を移動するときに不安，疲労，ストレスを感じる．その中でも坂道や段差などのバリアを通過する際には，車椅子ユーザがバランスを崩してしまい，車道に転倒するといった思わぬ事故につながることがある．これらを軽減するためには車椅子シミュレータによる練習が有効である [1]．実際に坂道や段差などのバリアのある場所まで移動したり，バリアを模したコースを用意して練習を行うのは，車椅子ユーザの身体的危険や時間的コストがある．そこで，車椅子で移動するときの感覚を体感できる Virtual Reality（VR）ベースの車椅子シミュレータが数多く開発されてきた．

VR とは，みかけや形は原物そのものではないが，本質的あるいは効果としては現実であり原物であることを意味する．

VR ベースの車椅子シミュレータは，実際にバリアのある場所まで移動したり，バリアを模した練習用のコースを作成しなくても VR 空間で車椅子操作の体験ができるメリットがある．しかし，従来のシミュレータは，金銭的なコストと臨場感がトレードオフの関係にあった．視覚のフィードバックのみを与える車椅子シミュレータは，安価な既製品のみで構築できるため金銭的なコストが低いというメリットがあるが，動きのフィードバックが無いため臨場感が低いというデメリットがある．一方で，視覚と動きの両方のフィードバックを与える車椅子シミュレータは，臨場感が高いというメリットがあるが，大型装置を常設する必要があるため金銭的なコストが高いというデメリットがある．この問題に鑑みて先行研究では，head-mounted display（HMD）に表示される 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作を組み合わせた車椅子シミュレータを提案してきた [2][3][4]．しかし，先行研究で再現できているバリアは坂道のみであり，左右方向の傾斜（以降，横断勾配）のある道などの他のバリアの再現はできていないという問題がある．

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 [5] では，HMD と電動車椅子を用いた車椅子シミュレータを用いて横断勾配のある道を再現する手法の提案がされている．しかし，この手法を用いたシミュレータの実装が完了しておらず，実際にその手法で横断勾配のある道を通過する感覚をユーザに与えられるかが可能なのかが明らかとなっていない．

そこで，本研究では，Vection 誘発映像と電動車椅子の動作を組み合わせ横断勾配のある道を通過する感覚を再現する車椅子シミュレータの実装を行い，そのシミュレータの効果を調査するための実験を行うことで，横断勾配を通過している感覚をユーザに与えられることを明らかにすることを研究目的とする．

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，視覚のフィードバックのみを提供するシミュレータに関する研究事例に関する研究事例，視覚と動きの両方のフィードバックを提供するシミュレータに関する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 と電動車椅子を組み合わせ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 と電動車椅子を組み合わせ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，車椅子シミュレータに仮想空間を利用しているという点で本研究と関係している．また，VR ベースの車椅子シミュレータは，視覚と動きの両方のフィードバックを与えるものと視覚のフィードバックのみを与えるものの 2 種類に大別できる [6][7]．2.1 節では，視覚のフィードバックのみを提供するシミュレータに関する研究事例について紹介する．2.2 節では，視覚と動きの両方のフィードバックを提供するシミュレータに関する研究事例について紹介する．

2.1 視覚のフィードバックのみを提供するシミュレータに関する研究事例

視覚のフィードバックのみを与えるシミュレータは比較的安価な装置で構築できるため，金銭的なコストが低いという特徴がある．典型的にはジョイスティックと PC モニタ／HMD 上に表示されている VR 空間中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 [8][9][10][11][12]．

文献 [8][9][10] では，PC モニタを用いた車椅子シミュレータの開発が行われている．Desbonnet らは，重度の障害がある子供が，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を開発した [8]．PC モニタに表示している VR 空間には車などの動くオブジェクトがあり，ユーザは車椅子と動くオブジェクトとの衝突を避けるシミュレーションを体験できる．Rodriguez は，複数の障害がある子供が，車椅子の操作に慣れ親しむための車椅子シミュレータを開発した [9]．PC モニタに表示している VR 空間には，人や机などのバーチャルオブジェクトがあり，ユーザは車椅子とバーチャルオブジェクトとの衝突を避けるシミュレーションを体験できる．Morere らは，重度の運動障害がある人が，電動車椅子の操作技術を向上させるために，難易度の異なるシミュレーションの行える車椅子シミュレータを開発した [10]．シミュレーションの難易度は 7 段階用意されており，ユーザは単純な VR 環境から複雑な VR 環境まで，自身の能力に合わせて車椅子のシミュレーションを体験できる．

文献 [11][12] では，HMD を用いた車椅子シミュレータの開発が行われている．Sliva らは，車椅子の操作に不慣れなユーザの車椅子の操作技術を向上させることを目的とした車椅子シミュレータの提案をした [11]．このシステムでは，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 HMD に表示している映像を見ながら実世界の車椅子を遠隔操作できる．Headleand らは，車椅子を初めて利用する人が，車椅子の操作技術を向上させるためのシミュレーションシステムを開発した [12]．このシステムでは，ジョイスティックと HMD に表示している VR 空間上の車椅子が連動する．HMD に表示している VR 空間は 4 つのフロアがあり，ユーザはドアの開閉，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することができる．

2.2 視覚と動きの両方のフィードバックを提供するシミュレータに関する研究事例

視覚と動きの両方のフィードバックを与える車椅子シミュレータは，ユーザに動きのフィードバックも与えられるため，臨場感が高いという特徴がある．Arlati らは，種々の車椅子シミュレータの比較を行い，車椅子シミュレータの臨場感を高めるためには，ユーザの前庭覚を刺激するモーションプラットフォームなどを用いることが有効だとしている [1].

大型モーションプラットフォームを用いたシミュレータの事例がいくつかある [13][14][15][16]. Carmen らは，ユーザが装着した HMD 上の映像変化と 3 自由度で動作するモーションプラットフォームの動きが連動するシミュレータを開発した [13]．Sonar らは，ユーザの車椅子の操作技術に合わせたシミュレーションが可能な 6 自由度で動作するモーションプラットフォームベースの車椅子シミュレータを開発した [14]．このシミュレータはユーザの車椅子の操作技術を評価し，それに応じて HMD 上に表示される VR 空間中のコースや電動車椅子の動かしやすさが変化する．Niniss らは，車椅子を初めて操作する人が，事前に車椅子の操作技術を向上させるためのシミュレーションシステムを開発した [15]．このシステムは大型半球ディスプレイと 6 自由度で動作するモーションプラットフォームで構築されている．大型半球ディスプレイに表示しているバーチャル空間は実世界の建物を基に構築されたものであり，ユーザは高い臨場感を得られる．Vailland らは，視覚のフィードバックと動きのフィードバックを連動させ，車椅子シミュレーションの臨場感を高めるだけでなく VR 酔いを軽減させる車椅子シミュレータの開発を行っている [16]．このシミュレータでは HMD と，4 自由度で動作するモーションプラットフォームを使用している．陳らは， HMD と固定された手動車椅子を用いた車椅子シミュレータを用いて，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を開発した [17]．このシステムは，実世界の手動車椅子のハンドリムと仮想空間の車椅子が連動する．さらに，シミュレーションの状況に合わせて手動車椅子の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．

一方，モーションプラットフォームを用いずに前庭覚への刺激を試みる事例も存在する．Yoshitake らは，HMD と電動車椅子を用いた車椅子シミュレータを開発し，視覚フィードバックのみを与えるシミュレータよりも高い臨場感を実現できることを示した [18]．先行研究 [2][3][4][5] もこの分類に属し，HMD 上に映像を流すことによる視覚刺激と，プログラム制御可能な電動車椅子の動作による前庭覚刺激を組み合わせた車椅子シミュレータを提案してきた．このシミュレータを用いて，前後方向の坂道の再現や，シミュレーションにおける実空間で必要な面積を低減する手法について報告してきた．

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

2 章で紹介した VR ベースの車椅子シミュレータは，金銭的なコストと臨場感がトレードオフの関係にある．視覚のフィードバックのみを与える車椅子シミュレータ [8][9][10][11][12] は，PC モニタや HMD などの安価な既製品のみで構築できるため金銭的なコストが低いというメリットがあるが，動きのフィードバックが無いため視覚と動きのフィードバックを与える車椅子シミュレータと比べて臨場感が低い [18] というデメリットがある．一方で，視覚と動きの両方のフィードバックを与える車椅子シミュレータ [13][14][15][17] は，視覚のフィードバックのみを与える車椅子シミュレータと比べて臨場感が高いというメリットがあるが，モーションプラットフォームなどの大型装置を常設する必要があるため金銭的なコストが高いというデメリットがある．

VR ベースの車椅子シミュレータは，視覚刺激による自己運動感覚（Vection）が用いられている．Vection の例として，停車中の電車から他の電車が動き出すところを窓越しに見たとき，まるで自分が乗っている電車が動いたように感じることなどである．Vection は，歴史的には静止しているユーザが受ける感覚のことを指していたが，近年では複合感覚刺激による自己運動感覚も Vection と呼ばれている．

先行研究では，VR ベースの車椅子シミュレータは金銭的なコストと臨場感がトレードオフの関係にあるという問題を解決するため，HMD 上に流す Vection 誘発映像と電動車椅子の動作を組み合わせ，金銭的に低コストで臨場感の高い車椅子シミュレータを提案してきた [2][3][4][5]．この車椅子シミュレータでは，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．シミュレータの外観を図 3.1 に示す．具体的にはユーザが車椅子に乗って走行しているかのような一人称視点の映像を HMD 上に流し，それと同時に電動車椅子が走行することで，視覚と前庭覚の両方の刺激によりシミュレーションを行っている．先行研究 [2][3] では，前後方向の坂道を再現するシミュレーションにて，ユーザに高い臨場感を提示できることを明らかにした．先行研究 [4] では，シミュレーションの実空間で必要なスペースを削減する手法について報告した．

しかし，この車椅子シミュレータを用いて横断勾配のある道のシミュレーションができていない．横断勾配のある道は雨水排水や車両出入りを目的として市街地の歩道の至るところに設置されているが，車椅子ユーザにとっては重い荷物を持って通過する際などに，バランスを崩して車道側に転倒するなどの危険をはらむ存在でもある．上記より，こ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動作を組み合わせた車椅子シミュレータにおいて，横断勾配のある道のシミュレーションができていないこと．

図 3.1: シミュレータの外観

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動作を組み合わせた車椅子シミュレータにおいて，横断勾配のある道のシミュレーションができていないという問題がある．先行研究 [5] では，このシミュレータを用いて横断勾配のある道を再現する手法の提案を行ったが，この手法を用いたシミュレータの実装や，評価実験は行われていない．

本研究では，**HMD 上に流す Vection 誘発映像と電動車椅子の動作を組み合わせた車椅子シミュレータにおいて，横断勾配のある道を通過する感覚をユーザに与えられる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 [2][3][4][5] と同様の，HMD と電動車椅子を組み合わせたものである．この車椅子シミュレータでは，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．具体的にはユーザが車椅子に乗って走行しているかのような一人称視点の映像を HMD 上に流し，それと同時に電動車椅子が走行することで，視覚と前庭覚の両方の刺激によりシミュレーションを行っている．このシミュレータを用いて，横断勾配のある道を再現するための，HMD 上に流す Vection 誘発映像と電動車椅子の動作について検討を行う．

4.1 HMD 上の Vection 誘発映像

坂道のシミュレーションをした先行研究 [2][3] では，車椅子に乗って坂道を通過する一人称視点映像を HMD 上に表示することで臨場感が高まることが確認された．したがって，横断勾配のシミュレーションを目指す本研究においても，車椅子で横断勾配がある道を通過する一人称映像を HMD 上に表示するアプローチをとる．そして，VR 空間中で横断勾配のある道を走行している間は，HMD 上の映像が道の傾斜に合わせて傾くようにすることで，ユーザ自身の体が傾いていると錯覚させることを狙う．

4.2 電動車椅子の動作

車椅子ユーザが現実空間において横断勾配のある道を通過するとき，車椅子は左右どちらか一方に傾きながら前進する挙動となる．このとき車椅子ユーザは，前進する感覚と，重力により自身の体が横方向に引き寄せられる感覚の複合感覚を得ることになる．しかし，本研究で利用する電動車椅子を含め，通常の車椅子は左右に傾く機構を有していない．そこで本研究では，これらの複合感覚を提示するために，電動車椅子が円運動をするときにユーザが感じる遠心力を利用する．具体的には，HMD 上の映像で横断勾配のある道を通過するタイミングに合わせて，電動車椅子が円運動を行い身体の横方向に向かう遠心力を生じさせることで，まるで身体が左右に傾いているかのような感覚をユーザに提示することを狙う．シミュレーション時の実際の電動車椅子の動きの一例を図 4.1 に示す．円運動時の走行速度や回転半径は，車椅子ユーザが実際の横断勾配のある道を通過するときに横方向にかかる重力加速度の影響の理論値（図 4.2）と，電動車椅子の円運動による横方向の加速度の大きさ（図 4.3）が等しくなるように設定する．具体的には，実際の横断勾配のある道を通過するときに横方向にかかる重力加速度の理論値を F_1 とし，m=電動車椅子の重量，g=重力加速度（9.8），θ=横断勾配の角度とすると，F_1=$mgsin\theta$ となる．そして，電動車椅子の円運動による横方向の加速度の大きさを F_2 とし，v=電動車椅子の走行速度，r=電動車椅子の円運動の回転半径とすると，F_2=$m\frac{v^2}{r}$ となる．円運動時の走行速度や回転半径は，この F_1 と F_2 が等しくなるよう設定する．

図 4.1: 電動車椅子の動きの一例

図 4.2: 実際の横断勾配のある道を通過するときの横方向の加速度

図 4.3: 電動車椅子の円運動による横方向の加速度

第5章　HMDと電動車椅子を組み合わせた車椅子シミュレータの実装

本章では，本研究で用いる HMD と電動車椅子を組み合わせ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行い，5.2 節では HMD 上に流す映像の挙動，5.3 節では電動車椅子の挙動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，シミュレータに使用した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(無線式のコントローラ付き)，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．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っている．HMD は映像再生と同時にシミュレーション開始信号を SBC に送信し，それを受け取った SBC が電動車椅子の動作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には図 5.1 のように，ユーザは HMD を装着し電動車椅子に乗り，HMD と接続しているコントローラを用いて自身でシミュレーションを開始できる．

図 5.1: シミュレータの外観

表 5.1: シミュレータに使用したデバイスの名称

デバイス	名称
HMD	Oculus Go
SBC	Raspberry Pi4
電動車椅子	WHILL Model-CR

5.2 HMD 上の映像の挙動

HMD 上には，Unity を用いて VR 空間中に作成された横断勾配のある道を通過する一人称視点の CG 動画を表示する．具体的には，シミュレーションを開始すると VR 空間中では平地を一定距離走行し，その後横断勾配のある道を走行し，最後に平地を走行する一人称視点の映像が表示される．このとき，VR 空間中で横断勾配のある道を走行している間は，HMD 上の映像が道の傾斜に合わせて傾くことで，ユーザ自身の体が傾いていると錯覚させることを狙う．VR 空間中のコースは Unity を用いて作成しているため，VR 空間でのコースの長さ，横断勾配の角度の大きさ，そして走行速度を自由に設定できる．シミュレーションに用いる横断勾配のある道を図 5.2 に示す．

図 5.2: HMD 上の映像

5.3 電動車椅子の挙動

電動車椅子は，HMD 上の映像に合わせて直線運動や円運動を行う．具体的には，HMD 上で平地を走行している映像が流れている間は電動車椅子は直線運動を行い，HMD 上で横断勾配のある道を走行している映像が流れている間は電動車椅子は円運動を行う．これらの動きを決定するパラメータ（走行速度・回転半径）は規定の範囲で任意に設定できる．

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円運動の動作を組み合わせた車椅子シミュレータにおいて，横断勾配のある道を通過する感覚をユーザに与えられるか明らかにすることである．

6.2　実験参加者・実験環境

本実験の実験参加者は，20 代の学生 10 名であり，全員健常歩行者である．実験参加者には，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，この実験参加には金銭的な報酬がないことを説明した．実験者は 1 回の試行が終わるたびに，実験参加者に VR 酔いなどの体調不良が無いことを確認した．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．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，これらの条件に基づき，日本大学文理学部倫理委員会の許可のもと行われた．

図 6.1: 実験環境

6.3　実験条件

制御変数，独立変数，従属変数は次のとおりである．

6.3.1　制御変数

再現する横断勾配の角度 本実験で再現する横断勾配の角度の大きさを決めるために，事前に東京都内の横断勾配のある道を 7 箇所調査したところ，勾配角度の平均は約 3.5° であった．この調査に基づき，本実験で再現する横断勾配の角度の大きさは 3.5° とした．

VR 空間中の走行距離 シミュレーション時の VR 空間中のコースの走行距離は，実験環境の広さの制約から 7m とし，コースの最初の 2m は平地，次の 4m は横断勾配のある道，最後の 1m は平地とした．

VR 空間中の走行速度 HMD 上に表示する VR 空間中における電動車椅子の走行速度は，先行研究 [4] のものと同じ 0.80m/s とした．

6.3.2　独立変数

HMD 上の映像 非表示（黒い画面），横断勾配のある道を通過する映像の 2 種類を用意した．

実空間中の走行速度 標準速度（VR 空間中の走行速度と同じ 0.80m/s），低速度（0.54m/s，詳細は後述）の 2 種類を用意した．

実空間中の円運動有無 なし（直進のみ），ありの 2 種類を用意した．

実空間中の回転半径 標準半径（1.07m，詳細は後述），小半径（0.50m，詳細は後述）の 2 種類を用意した．

まず，標準半径について説明する．標準速度（0.80m/s）で円運動を行った際に遠心力によって生じる身体の横方向の加速度と，再現する横断勾配の角度（3.5°）だけ横方向に傾いた道を実際に通過するときに身体の横方向にかかる重力加速度の影響の理論値が等しくなるように標準半径を決定する．具体的には，物理法則により，標準半径が 1.07m の場合に上記条件が満たされる．以降，標準速度・標準半径を用いる実験条件を標準条件と呼ぶ．

次に，低速度・小半径について説明する．先行研究 [4] で論じたように，シミュレーションに要する実空間中のスペースは小さく済むことが望ましい．そこで，上記の標準半径の約半分の大きさを小半径（0.50m）とする．この場合，同様に物理法則に基づくと，再現する横断勾配の角度だけ横方向に傾いた道の再現のために必要な速度は物理法則より 0.54m/s と求まり，これを低速度とする．以降，低速度・小半径を用いる実験条件を省スペース条件と呼ぶ．

表 6.1: 実験条件の一覧

実験条件	再現シーン	HMD 映像	電動車椅子		
			走行速度	円運動有無	回転半径
C1	標準・左傾斜	非表示	標準速度	右回転	標準半径
C2		左傾斜	標準速度	なし	なし
C3		左傾斜	標準速度	右回転	標準半径
C4	標準・右傾斜	非表示	標準速度	左回転	標準半径
C5		右傾斜	標準速度	なし	なし
C6		右傾斜	標準速度	左回転	標準半径
C7	省・左傾斜	非表示	低速度	右回転	小半径
C8		左傾斜	低速度	なし	なし
C9		左傾斜	低速度	右回転	小半径
C10	省・右傾斜	非表示	低速度	左回転	小半径
C11		右傾斜	低速度	なし	なし
C12		右傾斜	低速度	左回転	小半径

再現シーン列の「標準」は標準条件,「省」は省スペース条件の意.

なお，HMD 上の映像・実空間中の回転方向は，シミュレーションする横断勾配の傾斜の方向*（左傾斜，右傾斜）に合わせて 2 セット用意した.

上記の独立変数を組み合わせ，表 6.1 のように 12 個の実験条件を設計した．C1-3 は標準条件による左傾斜シミュレーション，C4-6 は標準条件による右傾斜シミュレーション，C7-9 は省スペース条件による左傾斜シミュレーション，C10-12 は省スペース条件による右傾斜シミュレーションの条件グループである．HMD 上の映像による視覚刺激の効果，電動車椅子の動きによる前庭覚刺激の効果，これらの複合刺激の効果を検証できるよう，各条件グループはそれぞれ，(1)HMD 上の映像：非表示，円運動有無：あり，(2)HMD 上の映像：あり，円運動有無：なし，(3)HMD 上の映像：あり，円運動有無：あり，の 3 条件で構成されている．たとえば，C1-3 の条件グループにおいては，C1 が (1)，C2 が (2)，C3 が (3) に該当する．他の条件グループについても同様である.

6.3.3 従属変数

横断勾配を通過している感覚 横断勾配を通過している感覚が得られたと感じた程度.

感じた傾きの大きさ HMD 上の映像の傾きと比べた場合の，視覚以外で感じた横断勾配の傾きの大きさ.

感じた走行速度 HMD 上の映像中の走行速度と比べた場合の，視覚以外で感じた車椅子の走行速度.

*本実験では傾斜の方向が従属変数に及ぼす効果を直接検証しないため，傾斜の方向は独立変数に含めていない.

表 6.2: 実験参加者への質問一覧

質問内容	回答項目
Q1　横断勾配を通過している感覚を得られましたか？	1：得られない ～ 7：得られる
Q2　感じた傾きの大きさは HMD 上の映像と比べてどう感じましたか？	1：小さい ～ 4：同じ ～ 7：大きい
Q3　電動車椅子の走行速度は HMD 上の映像上の走行速度と比べどう感じましたか？	1：遅い ～ 4：同じ ～ 7：速い

横断勾配を通過している感覚は，提案手法によるシミュレーションの効果を総合的に検証するための指標である．感じた傾きの大きさ・走行速度は，HMD 上の映像による刺激と電動車椅子の動きによる刺激に不整合がないか検証するための指標である．いずれも，参加者は 7 段階のリッカート尺度で回答する．参加者に提示した質問文・選択肢を表 6.2 に示す．

6.4　実験の手順

本実験は次の手順で行った．

Step 1： 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．

Step 2： 実験者が表 6.1 の各実験条件から順序効果を相殺するために無作為に選んだ 1 条件のシミュレーションを，実験参加者は 2 回続けて体験する．

Step 3： 実験者は，シミュレーション終了後に実験参加者が電動車椅子の軌跡を停止地点の位置から推測できないように，HMD を外す前に電動車椅子をシミュレーション開始地点まで戻す．

Step 4： 実験参加者は，アンケート（表 6.2）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 Step2～4 を繰り返す．

6.5　実験の結果

Q1 の回答分布を図 6.2 に示す．HMD 上に映像を表示し，電動車椅子が円運動を行う条件（C3，C6，C9，C12）では，70%～90%の実験参加者が 5 以上（横断勾配を通過している感覚を得られた）の回答をした．再現シーンが同じ実験条件グループ内（すなわち，C1-3 内，C4-6 内，C7-9 内，C10-12 内）で Wilcoxon の符号順位検定を行なった結果，C1-C3 間，C4-C6 間，C5-C6 間，C8-C9 間，C10-C12 間，C11-C12 間で p 値（多重比較であるため Holm 法で調整した）がそれぞれ，0.041，0.017，0.017，0.017，0.017，0.018 となり，5%水準の有意差が認められた．

次に Q2 の回答分布を図 6.3 に示す．HMD 上に映像を表示しない実験条件（C1，C4，C7，C10）は，実験参加者が感じた傾きの大きさを HMD 上の映像と比較できないため，回答が存在しない．電動車椅子が円運動を行わない条件（C2，C5，C8，C11）では，80%〜90%の実験参加者が 3 以下（映像と比べて感じた傾きが小さい）の回答をした．一方で，電動車椅子が円運動を行う条件（C3，C6，C9，C12）では，30%〜40%の実験参加者が 5 以上（映像と比べて感じた傾きが大きい）の回答をした．再現シーンが同じ実験条件間（すなわち，C2-3 間，C5-6 間，C8-9 間，C11-12 間）で Wilcoxon の符号順位検定を行なった結果，C2-C3 間，C5-C6 間，C8-C9 間，C11-C12 間で p 値がそれぞれ，0.0053，0.024，0.014，0.0056 となり，5%水準の有意差が認められた．

最後に Q3 の回答分布を図 6.4 に示す．HMD 上に映像を表示しない実験条件（C1，C4，C7，C10）は，実験参加者が感じた走行速度を HMD 上の映像と比較できないため，回答が存在しない．C3 以外の条件では，4（同じ）という回答が半数以上であった．再現シーンが同じ実験条件間（すなわち，C2-3 間，C5-6 間，C8-9 間，C11-12 間）で Wilcoxon の符号順位検定を行なった結果，C2-C3 間，C5-C6 間，C8-C9 間，C11-C12 間で p 値がそれぞれ，0.12，0.23，0.11，0.58 となり，いずれの条件間にも 5%水準の有意差は認められなかった．

6.6　考察

6.6.1　シーンの再現性

本項では，標準条件を再現する実験条件（C1-6）について考察する．

電動車椅子の挙動が同じ（円運動あり）で HMD 上の表示が異なる条件間（すなわち，C1-C3 間，C4-C6 間）で Q1 の回答（横断勾配を通過している感覚が得られた程度）に有意差があったことから，HMD 上に映像を表示することが有効であると判断できる．一方で，HMD 上の映像の挙動が同じ（映像あり）で電動車椅子の挙動が異なる条件間（すなわち，C2-C3 間，C5-C6 間）では，Q1 の回答結果は C2-C3 間で有意差がなく，C5-C6 間では有意差があった．ここから，電動車椅子が円運動を行うことは，シーンの再現性を高める効果があることが示唆されるが，さらなる検証の必要があるとも言える．C2-C3 間（左傾斜シーン）と C5-C6 間（右傾斜シーン）で違いが見られた理由にはいくつか可能性があるが，実験参加者が電動車椅子に乗った際の姿勢に注目している．今回の実験では参加者は，HMD 上のアプリケーションでシミュレーション開始操作を行うための無線コントローラを右手に持ち，安全上の問題が発生した際にシミュレータを緊急停止できるよう電動車椅子の電源ボタンの上に左手を乗せていた．この姿勢の左右非対称性によるわずかな影響が上述の差を生じさせた可能性がある．しかし，省スペース条件における C8-C9 間（左傾斜シーン）と C11-C12 間（右傾斜シーン）では双方で Q1 の回答に有意差があるため，これが原因であると断ずることはできない．この点については，左右の手の役割を入れ替えた上で，より多くの参加者に対して実験を行って検証を行う必要がある．

図 6.2: Q1 の回答分布（N=10, *：p ＜ 0.05）

さらに，HMD 上の映像の挙動が同じ（映像あり）で電動車椅子の挙動が異なる条件間（C2-C3 間，C5-C6 間）について，感じられる傾きと速度について分析を深めたい．違和感が少ないシミュレーションを行うためには，HMD 上の映像が生じる視覚刺激と電動車椅子の動きが生じる前庭覚刺激には不整合がないことが望ましい．Q2 の回答（HMD 上の映像と比べて感じた傾きの程度）において，C2・C5（電動車椅子の円運動なし）では 4（傾きが同じと感じた）という回答が 10〜20%であるのに対し，C3・C6（電動車椅子の円運動あり）では 4 という回答が 50%であるため，電動車椅子が円運動を行うことは視覚刺激と前庭覚刺激の不整合を低減し，シミュレータによるシーンの再現性向上に貢献していると考えられる．しかし，C3・C6 では，30%の参加者が 5 以上（傾きが大きいと感じた）の回答をしており，これは遠心力が強くなりすぎないよう電動車椅子をより精密に制御することの必要性を示唆している．ただし，C3・C6 の回答には 3〜6 の幅があり，円運動によって参加者が感じる傾きには個人差がある．この個人差の原因を究明し，これを低減することが今後の課題である．一方，Q3 の回答（HMD 上の映像と比べて感じた走行速度の程度）に目を向けると，電動車椅子の円運動の有無は参加者が感じる速度には統計

図 6.3: Q2 の回答分布（N=10, *：$p < 0.05$）

的な差を生じなかったことが分かる．C3 以外の各条件では 4（速度が同じと感じた）という回答が半数以上を占めているため，今回の電動車椅子の走行速度は HMD 上の映像の挙動と概ね整合していたと判断できる．

6.6.2　省スペース化の実現可能性

本項では，標準条件を再現する実験条件（C1-6）と，省スペース条件を再現する実験条件（C7-12）の結果に基づいて，提案手法のシミュレーションを省スペースで実現することの可能性について考察する．

6.3.2 項で述べたように，標準条件・省スペース条件で参加者に生じる遠心力は物理現象としては同じである．しかし，円運動の回転半径の違いが電動車椅子の動きの滑らかさなどに影響する可能性も否めない．この観点から，Q1〜Q3 の回答結果について，標準条件グループ（C1-6）と省スペース条件グループ（C7-12）を比較すると，両条件グループ

図 6.4: Q3 の回答分布（N=10）

とも概ね似た傾向の回答分布となっていることが分かる．この傾向が普遍的なものであるかさらなる検証が必要であるが，Q1 では省スペース条件でも標準条件に近い回答が得られていることから，提案手法では実空間の走行速度・回転半径を HMD 上のそれらの半分程度にしてシミュレーションスペースの省スペース化を実現することは可能であると考えられる．

第7章　結論

本研究では，HMD 上に Vection 誘発映像（横断勾配を通過する一人称視点映像）を表示することによる視覚刺激と，プログラム制御可能な電動車椅子に円運動をさせることで生じる横方向の加速度による前庭覚刺激を組み合わせることで，横断勾配のある道を通過する感覚を提示する電動車椅子シミュレーション手法を提案し，この効果を検証した．10 名の参加者に対する実験の結果，提案手法が横断勾配を通過する感覚を提示できる可能性があること，実空間における速度を半分程度にしてもシミュレーションの効果は大きく低減しないことから省スペース化が可能であることを確認した．

本研究にはいくつか制約・今後の課題がある．まず，今回の検証は特定角度の横断勾配のみを対象としているため，他の角度の勾配や，途中で傾きが変化する道路を通過するシーンが再現できるか明らかではない．今後はより多様な形状のシミュレーションが実現できるか検証を行う予定である．また，シミュレーションする速度についても検証が不足している．速度が小さすぎる場合，実空間において当該速度で円運動を行っても十分な遠心力を生じさせられず，ユーザに横方向の加速度を提示できない可能性がある．再現できる速度の下限値について今後検証を行う必要がある．この速度の下限値を把握することができれば，シミュレーションスペースをどの程度省スペース化することができるのか明らかとなる．本研究での取り組みにより，将来的にこのシミュレータが，病院や介護施設でのリハビリテーションに使用されることを想定している．このような施設で 1 部屋だけ確保すれば，車椅子に関係する様々なシミュレーションができることが期待できる．

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP19H04160 の助成を受けたものである.

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*, Vol. 32, No. 6, pp. 294–305, 2019.

[2] Akihiro Miyata, Kousuke Motooka, and Kenro Go. A wheelchair simulator using limited-motion patterns and vection-inducing movies. In *Proc. 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. Vection 誘発映像と前進動作による坂道シミュレーショント. 情報処理学会論文誌, Vol. 61, No. 1, pp. 61–69, 2020.

[4] Kousuke Motooka, Takumi Okawara, Yuki Yamato, , and Akihiro Miyata. Real-world distance reduction in a virtual reality-based wheelchair simulation on flat surfaces. Proc. 23rd International Conference on Human-Computer Interaction (HCII ' 21), Lecture Notes in Computer Science, Vol. 12769, pp. 438–448, 2021.

[5] 大河原巧, 本岡宏將, 大和佑輝, 奥川和希, 宮田章裕. Vection 誘発映像を用いて傾きを提示する車椅子シミュレータの考察. マルチメディア，分散，協調とモバイルシンポジウム 2020 論文集, pp. 904–908, 2020.

[6] Thomas Pithon, Tamar Weiss, Simon Richir, and Evelyne Klinger. Wheelchair simulators: A review. *Technology and Disability*, Vol. 21, No. 1–2, pp. 1–10, 2009.

[7] Patrick Abellard, Iadaloharivola Randria, Alexandre Abellard, Mohamed Moncef Ben Khelifa, and Pascal Ramanantsizehena. Electric wheelchair navigation simulators: Why, when, how? In *Mechatronic Systems Applications*, pp. 161–186, 2010.

[8] Manuel Desbonnet, Sara L. Cox, and Abdur Rahman. Development and evaluation of a virtual reality based training system for disabled children. In *Proc. International Conference on Disability, Virtual Reality & Associated Technologies (ICDVRAT '98)*, pp. 177–182, 1998.

[9] Nancy Rodriguez. Development of a wheelchair simulator for children with multiple disabilities. In *Proc. 2015 3rd IEEE VR International Workshop on Virtual and Augmented Assistive Technology (VAAT '15)*, pp. 19–21, 2015.

[10] Yann Morere, Guy Bourhis, Kvin Cosnuau, Georges Guilmois Emmanuelle Blangy, and milie Rumilly. View, a wheelchair simulator for driving analysis. In *Proc. International Conference on Virtual Reality (ICVR '15)*, pp. 100–105, 2015.

[11] Yuri Silva, Walter Simoes, Mauro Tefilo, Eduardo Naves, and Vicente Lucena. Training environment for electric powered wheelchairs using teleoperation through a head mounted display. In *Proc. 2018 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE '18)*, pp. 1–2, 2018.

[12] Chris James Headleand, Thomas William Day, Serban R Pop, and Panagiotis D. Ritsos. A cost-effective virtual environment for simulating and training powered wheelchairs manoeuvres. In *Studies in Health Technology and Informatics*, pp. 134–141, 2016.

[13] Carmen Fernndez Panadero, Valentin de la Cruz Barquero, Carlos Delgado-Kloos, and David Moran Nunez. Phymel-ws: Physically experiencing the virtual world. insights into mixed reality and flow state on board a wheelchair simulator. *Universal Computer Science*, Vol. 20, No. 12, pp. 1629–1648, 2014.

[14] Ajay Sonar, K.D. Burdick, Ryan R. Begin, and James J. Carroll. Development of a virtual reality-based power wheel chair simulator. In *Proc. IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA '05)*, pp. 222–229, 2005.

[15] Hafid Niniss and Takenobu Inoue. Electric wheelchair simulator for rehabilitation of persons with motor disability. In *Proc. SIGGRAPH Video Review (SVR '06)*, 2006.

[16] Guillaume Vailland, Fabien Grzeskowiak, Louise Devigne, Yoren Gaffary, Bastien Fraudet, Émilie Leblong, Florian Nouviale, François Pasteau, Ronan Le Breton, Sylvain Guégan, Valérie Gouranton, Bruno Arnaldi, and Marie Babel. 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.

[17] 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.

[18] 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 *Proc. 13th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications (AutomotiveUI '21)*, pp. 26–29, 2021.

研究業績

査読付き論文誌

(1) 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 (2023 掲載予定).

(2) 大河原巧, 本岡宏將, 板床海斗, 杉本隆星, 宮田章裕: 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 (2023 掲載予定).

研究会・シンポジウム

(1) 杉本隆星, 大河原巧, 板床海斗, 宮田章裕: HMD と電動車椅子を用いた横断勾配シミュレータの実装, 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 (DICOMO2022), Vol.2022, pp127–132 (2022 年 7 月).

(2) 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ション 2022 論文集, pp.731–733 (2022 年 3 月).

受賞

(1) マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO2022) シンポジウム ヤングリサーチャー賞, HMD と電動車椅子を用いた横断勾配シミュレータの実装, 受賞者: 杉本隆星 (2022 年 7 月).