

令和6年度 修士学位請求論文

VR車椅子シミュレーション
における直線距離を伸ばすための
リダイレクションの研究

指導教員 宮田 章裕 教授

日本大学大学院 総合基礎科学研究科
地球情報数理科学専攻 宮田研究室

6123M10 杉本 隆星

論文提出日 2025年2月19日

概要

現実空間における移動を伴うバーチャルリアリティ（VR）アプリケーションでは、ユーザに気付かれないように現実空間のユーザの移動経路を操作することで、物理空間よりも大きなVR空間を歩行体験させることを可能にする Redirected walking という手法がある。車椅子に乗車して行う乗車型VRシミュレーションでも同様の取り組みが行われているが、従来のリダイレクションの手法は、基本的にはユーザに気付かれない程度にVR空間を回転させるアプローチであるため、VR空間中で直進し続けながら現実空間では90度以上曲がるといったように、VR・現実の両空間でユーザの動きを大幅に変えることは困難であった。

そこで本研究では、この問題の部分的な解決を狙い、VR空間中で直進し続けながら現実空間では大きく曲がらなければならない状況において、ユーザが感じる違和感を低減する手法の確立を目指す。この目標を達成するために、VR車椅子シミュレーションにおいて、現実空間で電動車椅子が急カーブを曲がるタイミングで、VR空間中に横断勾配がある道を直進するシーンを Head mounted display（HMD）に提示するリダイレクション手法を提案した。提案手法の効果を検証するために、22名の実験参加者に対して調査した結果、提案手法は臨場感が高く、違和感が少ないリダイレクションを実現できる可能性が確認できた。本論文の貢献は、VR空間中で直進し続けながら現実空間では大きく曲がらなければならない状況において、ユーザが感じる違和感を低減する手法の確立に向けた基礎的知見を獲得したことである。

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	関連研究	4
2.1	VR 車椅子シミュレーションに関する研究事例	5
2.1.1	視覚のフィードバックのみを提供するシステムに関する研究事例	5
2.1.2	視覚と動きのフィードバックを提供するシステムに関する研究事例	6
2.2	リダイレクションに関する研究事例	8
2.2.1	RDW に関する研究事例	8
2.2.2	車椅子シミュレーションに適用した研究事例	8
第3章	研究課題	10
3.1	問題の定義	11
3.2	研究課題の設定	11
第4章	提案手法	12
4.1	アプローチ	13
4.2	VR 空間に横断勾配を導入するリダイレクション	14
第5章	車椅子シミュレータの実装	17
5.1	車椅子シミュレータの全体像	18
5.2	HMD 上の映像	19
5.2.1	タイトル画面	19
5.2.2	シミュレーション画面	19
5.3	電動車椅子の挙動	20
第6章	評価実験	23
6.1	実験の目的	24
6.2	実験参加者・実験環境	24
6.3	実験条件	25
6.3.1	制御変数	25

6.3.2	独立変数	25
6.4	評価指標	26
6.5	実験の手順	26
6.6	実験の結果	27
6.7	考察	28
第 7 章 結論		32
参考文献		34
研究業績		38

目 次

2.1	歩行リダイレクション	8
2.2	車椅子リダイレクション	9
4.1	ユーザが感じる遠心力	13
4.2	横断勾配のある道	14
4.3	提案手法のコンセプト	15
4.4	ユーザからみた重力の横軸方向成分	15
4.5	電動車椅子の円運動による遠心力	16
5.1	車椅子シミュレータの外観	18
5.2	システムのフロー	19
5.3	タイトル画面	20
5.4	実験条件反映画面	20
5.5	VR 空間で平地直進路を通過中の HMD 映像	21
5.6	現実空間の軌跡と VR 空間の視界の関係（現実空間で左回転する場合）	22
5.7	現実空間の軌跡と VR 空間の視界の関係（現実空間で右回転する場合）	22
6.1	実験環境	24
6.2	VR 空間のシミュレーションコースの内訳	26
6.3	Presence Questionnaire の回答分布（N=22）	30
6.4	Simulator Sickness Questionnaire の回答分布（N=22）	31

表 目 次

5.1	車椅子シミュレータに使用したデバイスの名称	18
6.1	実験条件の一覧	26
6.2	臨場感を計測するための質問一覧	27
6.3	VR 酔いを計測するための質問一覧	28

第1章 序論

1.1 研究の背景

日本バーチャルリアリティ学会によると、バーチャルリアリティ（VR）は、次のように定義されている [1].

バーチャルリアリティ（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。バーチャルの反意語は、ノミナル（nominal）すなわち、名目上のという言葉であり、バーチャルは決してリアル（real）と対をなす言葉ではない。バーチャルは、virtueの形容詞であり、virtueはその物をその物として在らしめる本来的な力という意味からきている。つまり、それぞれのものには本質的な部分があり、それを備えているものがバーチャルなものである。バーチャルリアリティは、人間の能力拡張のための道具であり、現実世界の本質を時空の制約を超えて人間に伝えるものである。

VRを活用したアプリケーションには様々なものがある。この中には、ユーザが現実空間を実際に歩いたり動いたりすることで、VR空間内でも同様に移動や操作が行われるような、現実空間での移動を伴うVRアプリケーションが存在する。この種のアプリケーションは、現実空間よりもVR空間の方がはるかに広大であることが多いため、現実空間のスペースの制約を克服しようとする取り組みが古くから行われてきた。中でも、Redirected walking [2] はもっとも典型的な手法である。これは、ユーザに気付かれない程度にVR空間を回転させることで、現実空間におけるユーザの歩行方向を変更させ、物理空間よりも大きなVR空間を体験させることを可能にする手法である。

上述のアプリケーションの派生形として、ユーザが現実空間にて車椅子に乗り移動しながら、VR空間内を体験するような、現実空間で車椅子の移動を伴うVRアプリケーションも存在する。この種のアプリケーションは、VRを利用することで車椅子用の物理的なコースを構築する必要がない。さらに、車椅子操作に不慣れなユーザがリハビリテーションや、トレーニングを行い車椅子の操作に慣れることだけでなく、車椅子ユーザに配慮した建物を建てるなど建築の設計での利用も想定されている。現実空間で車椅子の移動を伴うVRアプリケーションにおいても、Redirected walking 同様の取り組みが行われている [3]。しかし、基本的にはユーザに気付かれない程度にVR空間を回転させるアプローチであるため、たとえばVR空間中で直進し続けながら現実空間では90度以上曲がるといったように、VR・現実の両空間でユーザの動きを大幅に変えることは困難である。

1.2 研究の目的

現実空間で車椅子の移動を伴うVRアプリケーションでは、VR空間中で直進し続けながら現実空間では90度以上曲がるといったように、VR・現実の両空間でユーザの動きを大幅に変えることは困難という問題がある。この問題を部分的に解決することを狙い、乗車型VRシミュレーションにおいて、VR空間中で直進し続けながら現実空間では大き

く曲がらなければならない状況にて、ユーザが感じる違和感を低減する手法の確立を目指す。これによって、物理的制約の都合で現実空間では曲がらなければいけない場合も、VR空間では不必要に曲がらずに直進し続けることができ、シミュレーションコースの自由度を高める効果が将来的に期待できる。本研究では、自動制御された電動車椅子と Head-mounted display (HMD) を用いて、上述の手法を満たす VR 車椅子シミュレータを実装し、シミュレーションの臨場感・違和感の観点から基礎的知見を得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、VR 車椅子シミュレーションに関する研究事例と、リダイレクション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、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、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 関連研究

本研究は、乗車型 VR シミュレーションにおいて、VR 空間中で直進し続けながら現実空間では大きく曲がらなければならない状況にて、ユーザが感じる違和感を低減するリダイレクション手法の確立を目指すものである。本章では、この研究に関する事例について述べる。2.1 節では、VR 車椅子シミュレーションに関する研究事例について紹介する。これらは、車椅子シミュレータに VR 空間を用いているという点で本研究と関係している。2.2 節では、リダイレクションに関する研究事例について紹介する。これらは、VR 車椅子シミュレーションにリダイレクション手法を取り入れているという点で本研究と関係している。

2.1 VR 車椅子シミュレーションに関する研究事例

VR ベースの車椅子シミュレータは、視覚のフィードバックのみを提供するものと、視覚と動きのフィードバックを提供するものの2種類に大別できる [4, 5]。視覚のフィードバックのみを提供するシステムに関する研究事例については、2.1.1 項で紹介する。視覚と動きのフィードバックを提供するシステムに関する研究事例については、2.1.2 項で紹介する。

2.1.1 視覚のフィードバックのみを提供するシステムに関する研究事例

本項では、視覚のフィードバックのみを提供する車椅子シミュレータに関する研究事例について述べる。視覚のフィードバックのみを提供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 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 [6–12]。Hamilton ら [13] は、車椅子シミュレーションにおいてユーザに視覚フィードバックを与えるために使用するデバイスの比較を行った。この調査では、デスクトップスクリーン・HMD・ビデオプロジェクターのそれぞれを用いた車椅子シミュレータを作成し比較を行っている。検証の結果、ユーザにかかる精神的負荷や身体的負荷といった作業負荷について比較すると、デスクトップスクリーンを用いたシミュレータは、最もシミュレーションの作業負荷が少なく、ほかのデバイスと比べて長時間のシミュレーションに適している。さらに、HMD を用いたシミュレータはユーザがモチベーションを維持しやすいが、ほかのデバイスと比べて最も作業負荷が高いため、長時間のシミュレーションには向いていない。

文献 [6–9] 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。Rodriguez [6] 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。PC モニタに表示された 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。検証の結果、子供たちはシミュレータに対して好奇心をもっており、4 人中 2 人の子供は、画面とジョイスティックに集中していたが、他の子どもは気が散りやすい傾向にあった。Morere ら [7] は、重度の運動障害がある人が電動車椅子の操作技

術を習得することを支援するために、難易度の異なるシミュレーションが行える車椅子シミュレータを開発した。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た環境で車椅子のシミュレーションを体験できる。検証の結果、ユーザは段階的に複雑なVR環境の車椅子シミュレーションを体験することで、着実に車椅子の操作に慣れたことをMorereらは報告している。Bigrasら[8]は、視覚のフィードバックを与える車椅子シミュレータに、音や衝撃といったフィードバックを追加することを提案している。これらの拡張フィードバックを追加することで、ユーザのパフォーマンスが向上するかどうか、ユーザがシミュレーションで習得したスキルを実際に車椅子を操作したときに活かすことができるか検証した。その結果、シミュレータを利用したユーザは、その後のVR空間で車椅子を操作するタスクにおいて、タスクの完了時間と車椅子がオブジェクトに衝突する回数が改善された。Martinsら[9]は、車椅子での日常生活の動作のトレーニングに焦点を当てたマルチモーダル電動車椅子シミュレータを提案している。このシミュレータは3つのシナリオ（障害物コース、アクセシビリティランプコース、エレベータコース）を体験でき、入力インタフェースは3種類（ジョイスティック、筋電図、視線追跡）ある。パイロットテストの結果、ユーザは上記の3つの操作方法のそれぞれで車椅子の操作スキルが向上し、実験が進むにつれシミュレータの操作に自信がつくことが明らかとなった。

文献[10–12]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[10]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。このシステムでは、ユーザの手元にあるジョイスティックと、遠隔地にある実世界の電動車椅子が連動する。実世界の電動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に表示されている映像を見ながら実世界の電動車椅子を遠隔操作できる。このシミュレータは、ユーザと電動車椅子の距離が2596km離れていてもトレーニングを行えることができ、様々な都市にいるユーザに役立つシミュレータである可能性を示した。Headleandら[11]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。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行える。Johnら[12]は、市販のデバイスを用いた車椅子シミュレーションの実装を行い、それが実際の電動車椅子の操作技術向上に効果があるかどうか検証した。その結果、シミュレーションを体験したユーザは実際の電動車椅子の操作技術が向上した。さらに、ユーザに対するトレーニングとしてHMDを利用した車椅子シミュレーションは、操作技術の向上に効果的であると報告した。

2.1.2 視覚と動きのフィードバックを提供するシステムに関する研究事例

本項では、視覚と動きのフィードバックを提供する車椅子シミュレータに関する研究事例について述べる。

Arlati ら [14] は、VR ベースの車椅子シミュレータに関連するレビューを行っている。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。Stewart [15] は、6 自由度で天板（ユーザが乗る台）を制御する Stewart Platform を開発している。これは、天板と土台を6つの伸縮可能な脚で連結させることで、天板の動きをコントロールしている。この Stewart Platform を利用した VR 車椅子シミュレータが提案されている [16]。Sonar ら [16] は、車椅子ユーザのトレーニングを目的とした車椅子シミュレーションの開発を行っている。このシミュレータは、HMD と Stewart Platform で構成されている。ユーザがジョイスティックを操作することで、VR 空間上の電動車椅子と Stewart Platform が連動する。HMD 上に表示される映像については、ユーザの車椅子操作のスキルに応じて表示するコースを変更することができる。つまり、ユーザの車椅子操作のスキルが向上するにつれて、VR 空間のコースの難易度を上げることができる。同様の大型モーションプラットフォームを用いた車椅子シミュレータも存在する [17,18]。Carmen ら [17] は、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できる車椅子シミュレータの開発を行っている。このシミュレータでは、ユーザがジョイスティックを操作すると、装着している 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。Vailland ら [18] 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。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が使用されている。さらに Vailland ら [19] は、文献 [18] のシミュレータを用いて、車椅子ユーザを対象に VR/現実空間での電動車椅子の運転を行わせ、パフォーマンスの比較を行った。その結果、VR/現実空間の両方の条件にて、ユーザが同様の時間でタスクを完了したことが報告されている。

一方、大型の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 [20] 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た。このシミュレータは、HMD に現実空間の電動車椅子の位置と姿勢を認識させることで、HMD 上の VR 空間と現実空間の電動車椅子の動きをリンクさせている。シミュレーション中は、VR 空間上の電動車椅子の動きに合わせて電動車椅子を動かすことで、ユーザに動きのフィードバックを与える。評価実験では、VR 空間内のユーザの正面にいる歩行者を横方向に避けるシミュレーションにおいて、視覚フィードバックのみを与えるシミュレータと主観的評価に差が出るかどうか検証した。その結果、HMD と電動車椅子を用いた車椅子シミュレータの方が、ユーザにとって効果的であることが確認された。先行研究 [21–25] はこの分類に属し、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。先行研究では、この車椅子シミュレータを用いて、前後や左右方向に傾いている道や、段差の再現や、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。

2.2 リダイレクションに関する研究事例

2.2.1 RDW に関する研究事例

かつては、現実空間中の移動がバーチャル空間中の移動に反映されるタイプの没入型 VR では、VR 空間と同じ広さの現実空間が必要であった。Razzaque ら [2] は、この問題を解決するために Redirected walking (RDW) を提案した。RDW では、VR 空間をユーザに気付かれない程度に少しずつ回転させることで、現実空間に障害物がない方向にユーザを移動させることができる (図 2.1)。この原理により、VR 空間の再現に必要な現実空間のスペースを削減できる。

RDW は現実空間で歩行を行う没入型 VR では重要な技術であり、ベーシックな RDW を発展させる形で、ユーザの移動経路を曲げる手法、歩行速度を調整する方法、歩行の回転を補正する方法などが検討されてきた [26, 27]。Steinicke ら [28] は、現実空間と VR 空間の間で方向転換の角度や移動距離を異ならせた場合、ユーザがその違いを認識できる範囲を究明した。Bolling ら [29] は、ユーザが長時間 VR 体験を続けると脳が VR 空間に適応することに着目し、現実空間と VR 空間の方向転換の角度を時間経過とともに大きくする試みを行った。Thomas ら [30] は、ユーザを現実空間の障害物から遠ざける反発力と、ユーザを VR 空間のゴールに引き寄せる引力を組み合わせたモデルを提案し、障害物が多い物理空間でも長距離の VR 歩行体験ができる可能性を示した。

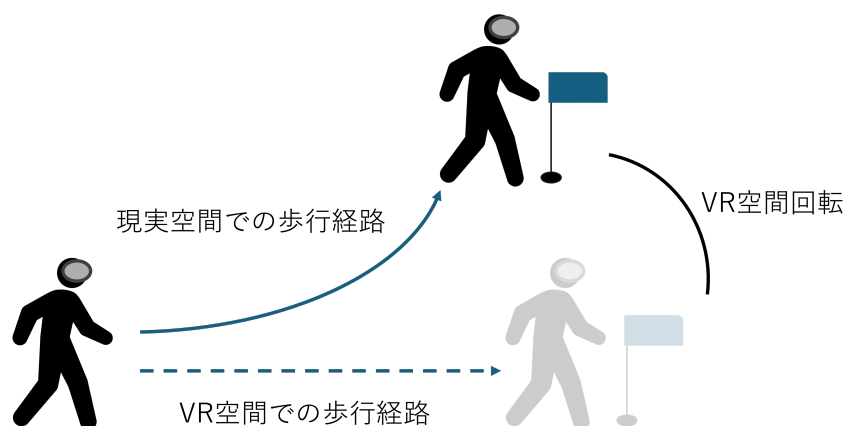


図 2.1: 歩行リダイレクション

2.2.2 車椅子シミュレーションに適用した研究事例

このような VR 空間内の微小な刺激によって現実空間のユーザの移動方向などを制御するテクニック (リダイレクション) は、歩行以外のコンテキストにも適用されてきた。特に目立つのが、車椅子を用いた VR シミュレーションへのリダイレクションの適用である。図 2.2 では、ユーザは HMD を装着した状態で電動車椅子に乗っており、電動車椅子

に搭載されているジョイスティックを操作し移動する。VR空間をユーザに気付かれない程度に少しずつ回転させることで、現実空間のユーザの移動経路は無意識に変更される。

Bruder ら [3] は、ユーザが VR 空間内を長距離移動する場合は、歩行だけでなく何らかの車両に乗る必要性を主張し、電動車椅子にもリダイレクションが適用できるか検証を行った。歩行時と車椅子利用時のそれぞれに適したリダイレクションパラメータを究明したことで、彼らは両方の移動手段を円滑に組み合わせた VR 体験の可能性を示せたといえよう。Fiore ら [31,32] は、VR 空間の回転に加え、電動車椅子のステアリングも制御することで、リダイレクション時に生じる違和感の低減を目指した。Motooka ら [23] は、現実空間における電動車椅子の速度を、VR 空間中の移動速度よりもわずかに遅くすることで、相対的に長い距離の直線移動シミュレーションを実現した。ここまでの事例は電動車椅子にフォーカスしているが、Sassi ら [33] は、HMD 上に提示する VR 空間の回転を制御することで、自走式車椅子に対してもリダイレクションが有効であることを示した。

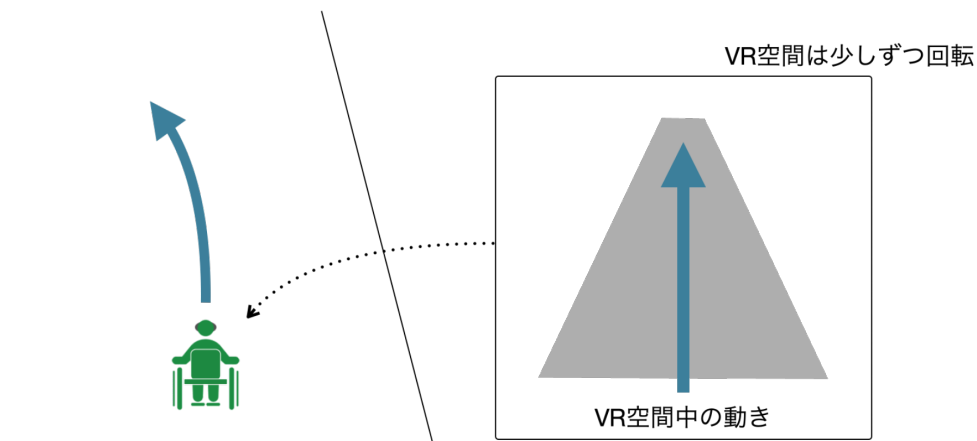


図 2.2: 車椅子リダイレクション

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

ユーザが車椅子などの車両に乗り、VRを利用してシミュレーションを行う乗車型VRシミュレーションに関する研究が存在している。たとえば、電動車椅子を利用したVRシミュレーション [16–20] は、車椅子操作に不慣れなユーザを主な対象としており、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、現実空間の電動車椅子は移動を伴うため、シミュレーションを行うためのスペースは実際の環境に依存するという問題がある。

この問題を解決するために、VRシミュレーションでは、限られた現実空間の範囲において、ユーザに広大なVR空間内を自然に移動していると錯覚させることを目的としたリダイレクションという技術を利用した研究がある。このリダイレクションを利用したRDW [2, 26, 27] は、ユーザに気付かれない程度にVR空間を回転させることで、現実空間におけるユーザの歩行方向を変更させ、物理空間よりも大きなVR空間を体験させることを可能にする。

このRDWのテクニックは、車椅子などの車両を伴うVRシミュレーションにおいても適用されている [3, 31–33]。しかし、このアプローチは基本的にはユーザに気付かれない程度にVR空間を回転させるアプローチであるため、VR空間中で直進し続けながら現実空間では90度以上曲がるといったように、VR・現実の両空間でユーザの動きを大幅に変えることは困難である。よって、本研究における問題は、VR車椅子シミュレーションにおいて、VR・現実の両空間でユーザの動きを大幅に変化することは困難であることだと定義できる。

3.2 研究課題の設定

3.1節で述べたように、VR車椅子シミュレーションにおいてVR空間中で直進し続けながら現実空間では90度以上曲がるといったように、VR・現実の両空間でユーザの動きを大幅に変えることは困難であるという問題がある。本研究では、この問題の部分的な解決を狙い、VR空間中で直進し続けながら現実空間では大きく曲がらなければならない状況においてユーザが感じる違和感を低減する手法の確立を研究課題として設定する。この研究課題が達成されることで、VRシミュレーションの分野において、現実空間のスペース問題を克服する新たなリダイレクション手法を確立でき、VR車椅子シミュレーションの開発に貢献できると考えられる。具体的には、物理的制約の都合で現実空間では曲がらなければいけない場合も、VR空間では不必要に曲がらずに直進し続けることができ、シミュレーションコースの自由度を高める効果が期待できる。

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。

4.1 アプローチ

3.2 節で設定した研究課題を達成するために、VR 空間中で直進し続けながら現実空間では大きく曲がらなければならない状況において、ユーザが感じる違和感を低減する手法を検討する。車椅子シミュレーションでは、現実空間の限られたスペースに起因する直線距離の制約があることから、現実空間の車椅子が直線に進み続けることはできないため、カーブを行い曲がらなくてはならない。このときの現実空間の車椅子のカーブは、方向転換をするために 90 度以上曲がるような動きである。ユーザは、この動きの影響により遠心力を感じる（図 4.1）。しかし、没入型 VR 空間で直進中に、現実空間で車椅子が 90 度以上のカーブをして方向転換をしてしまうと、ユーザの視覚情報と、ユーザが感じる遠心力との間に不整合が生じる。そこで、現実空間においてユーザが横方向に力を感じながら前進するような、横方向に傾いた直進路である横断勾配に着目する。横断勾配は、雨水排水や車両出入りを目的として歩道や車道などに設置されている。国土交通省は、勾配の大きさを標準として 2% 以下と定めている [34]。東京都福祉局は、車乗り入れ部のすりつけ勾配（段差を回避するための勾配）を 15% 以下にするよう定めている [35]。本研究では、現実空間における車椅子の方向転換時に、VR 空間の直進路に横断勾配を導入する。

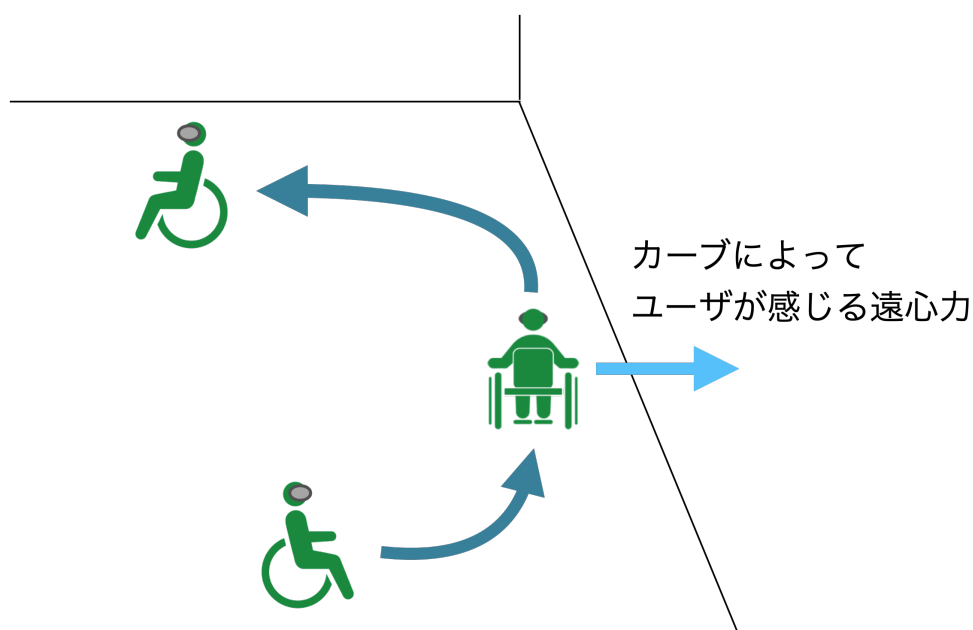


図 4.1: ユーザが感じる遠心力



図 4.2: 横断勾配のある道

4.2 VR空間に横断勾配を導入するリダイレクション

本研究では、現実空間における方向転換時に、VR空間の直進路に横断勾配を導入する手法を提案する。本研究における提案手法のコンセプトを図4.3に示す。現実空間でプログラム制御された電動車椅子が左（右）方向の急カーブを曲がるタイミングで、VR空間中では右方向（左方向）に傾く横断勾配を提示する。これにより、右方向（左方向）に発生する遠心力と視覚情報の整合性がとれ、ユーザが感じる違和感の低減が期待でき、本研究の研究課題の達成に有効であると考えられる。

なお、この手法の実現のために、先行研究 [24] の車椅子シミュレータを利用する。この車椅子シミュレータは、HMDを用いた視覚フィードバックと、プログラム制御された電動車椅子を用いた前庭感覚へのフィードバックを組み合わせることで、進行方向に直行する傾斜（横断勾配）を通過する感覚を提示できる。

本研究のシミュレーションの原理を詳細に説明する。シミュレーションにおいて、VR空間上の車椅子が横断勾配を走行するタイミングで、現実空間の電動車椅子は、左（右）方向の急カーブを曲がる。このときの急カーブの挙動は、電動車椅子が方向転換をするために円運動の動きを行うものとする。円運動時の走行速度や回転半径は、車椅子ユーザが現実空間の横断勾配のある道を通過するときに、ユーザからみた重力の横軸方向成分の理論値（図4.4）と、電動車椅子が円運動をするときの遠心力（図4.5）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ユーザからみた重力の横軸方向成分の理論値を F_1 とし、 m =電動車椅子の重量、 g =重力加速度、 θ =横断勾配の

角度とすると、 $F_1 = mgsin\theta$ となる．そして、電動車椅子が円運動をするときの遠心力を F_2 とし、 m =電動車椅子の重量、 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．

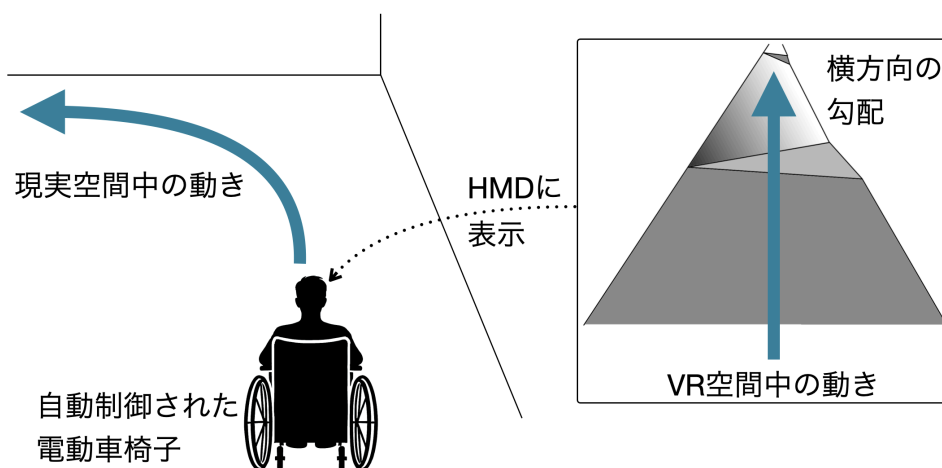


図 4.3: 提案手法のコンセプト

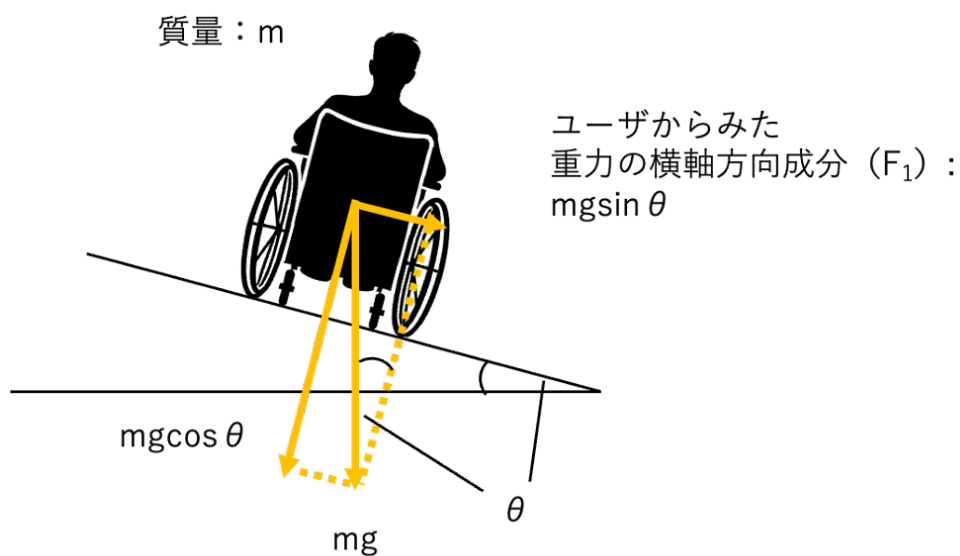


図 4.4: ユーザからみた重力の横軸方向成分

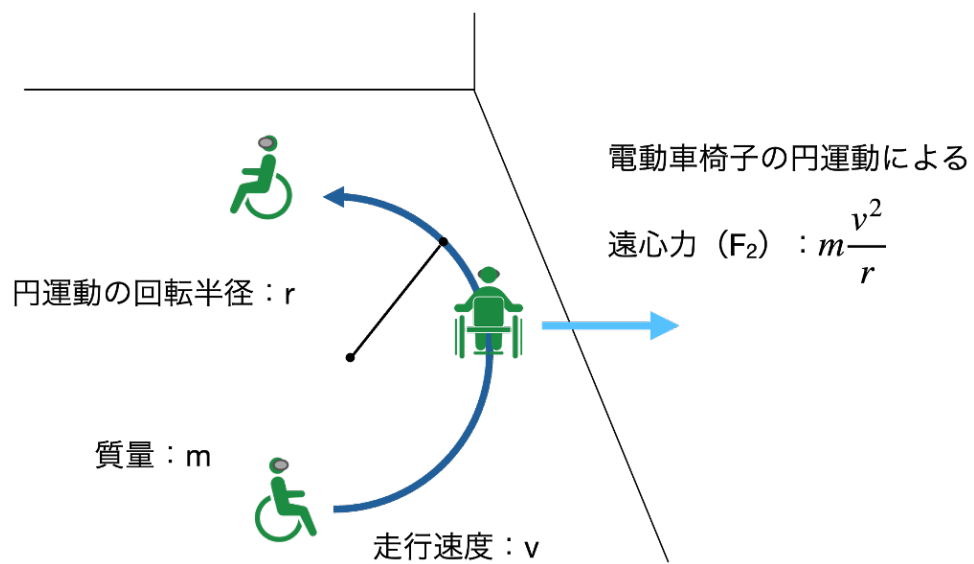


図 4.5: 電動車椅子の円運動による遠心力

第5章 車椅子シミュレータの実装

本章では，本研究で用いる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，5.2 節では HMD 上に流す映像，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，シングルボードコンピュータ（Single-board computer，以降 SBC），無線式のコントローラ付きの密閉型 HMD（Meta Quest 2），電動車椅子（WHILL Model CR）からなる．ユーザは HMD を装着した状態で電動車椅子に乗り，HMD と接続している無線式のコントローラを操作する．



図 5.1: 車椅子シミュレータの外観

表 5.1: 車椅子シミュレータに使用したデバイスの名称

デバイス	名称
SBC	Raspberry Pi 4
HMD	Meta Quest 2
電動車椅子	WHILL Model CR

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．シミュレーションにおける，システムの処理の流れを図 5.2 に示す．HMD 上のシミュ

レーション制御部はUnity（バージョン2021.3.19f1）、VR映像表示部は、C#（バージョン9.0）、SBC上の電動車椅子制御部はPython（バージョン3.7.1）を用いて実装した。

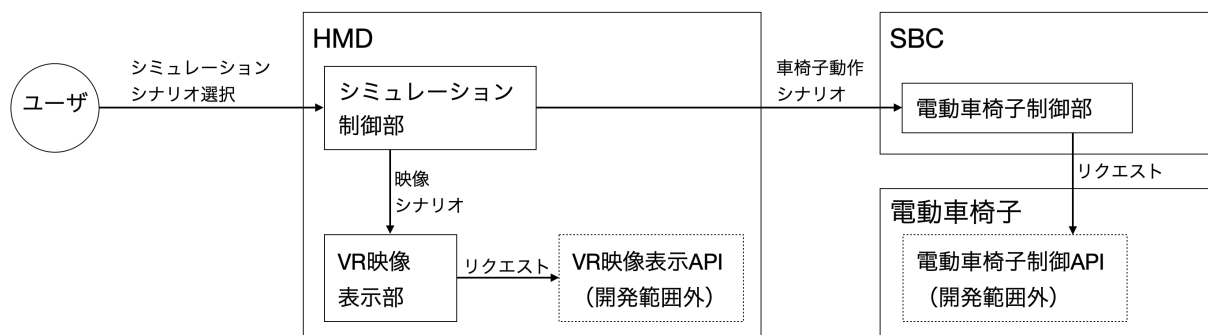


図 5.2: システムのフロー

5.2 HMD 上の映像

本節では、本研究の車椅子シミュレーションで用いる HMD 内のシミュレーション制御アプリケーションの説明を行う。

5.2.1 タイトル画面

HMD に流す映像は、Unity を利用して作成する。ユーザは、HMD と接続している無線式のコントローラを用いて、HMD 内のシミュレーション制御アプリケーションを操作することで、シミュレーションを開始することができる。図 5.3 は、アプリケーションを開いたときに表示される最初の画面である。実験者が SBC に接続している PC から、実験条件にラベリングしている数字を Websocket 通信で送信すると、図 5.4 のように HMD 上の画面が更新される。この状態からコントローラのボタンを押すことで画面が切り替わり、車椅子シミュレーションの映像が再生される。

5.2.2 シミュレーション画面

シミュレーション画面では、VR 空間中に作成された横断勾配の直進路を走行する一人称視点の映像が流れる。HMD 上に流す VR 空間のシミュレーションコースの一部を図 5.5 に示す。今回は、平地の直進と右方向（左方向）の横断勾配の直進が VR 空間にて交互に繰り返される実装を行った。VR 空間で横断勾配を走行するとき、視界は道の傾斜に合わせて傾く。VR 空間のシミュレーションコースは Unity を用いて作成しているため、VR 空間における背景、コースの長さや幅や材質、横断勾配の角度の大きさ、そして車椅子の走行速度を自由に設定できる。



図 5.3: タイトル画面



図 5.4: 実験条件反映画面

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か円運動を行う。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う。一方で、HMD 上で横断勾配の直進路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。これらの電動車椅子の動きを決定するパラメータ（走行速度・回転半径・直線距離）は、規定の範囲で任意に設定できる。VR 空間中で平地・右方向の横断勾配が繰り返される場合の、現実空間における電動車椅子の軌跡を図 5.6 に示す。VR 空間中の横断勾配が左方向である場合は、現実空間における軌跡は逆方向となる（図 5.7）。

現実空間における電動車椅子の軌跡について詳しい説明を行う。本研究で利用する電動車椅子にはジョイスティックが搭載されており、ユーザがジョイスティックを直接操作することで操作できる。他にも、ジョイスティックの動きを制御する SetJoystick [36] というコマンドを利用することで、電動車椅子の動きを制御できる。本研究では、電動車椅子を自動制御するために SetJoystick というコマンドを利用した。SetJoystick を利用するためには、JOY_FRONT と JOY_SIDE という 2 つの引数を指定する必要がある、両引数と

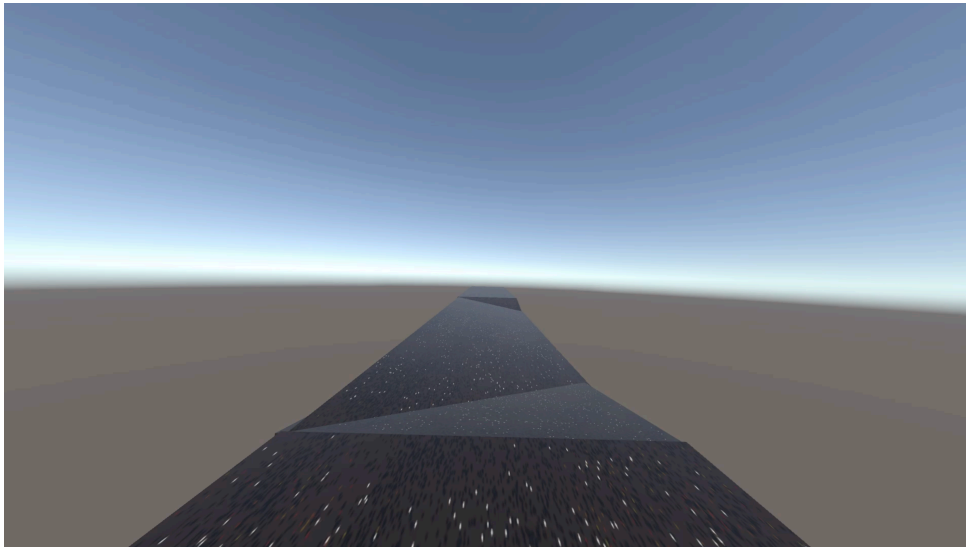


図 5.5: VR 空間で平地直進路を通過中の HMD 映像

も-100～100 の値をとる．第 1 引数の JOY_FRONT に正の値を入力すると電動車椅子は前進し，負の値を入力すると電動車椅子は後退する．第 2 引数の JOY_SIDE に正の値を入力すると電動車椅子は右回転し，負の値を入力すると電動車椅子は左回転する．どちらの引数においても 0 を入力すると，電動車椅子は前後進／左右回転のいずれも行わない．現実空間における電動車椅子のシミュレーションの軌跡は，SetJoystick を利用してハードコーディングで実現したものである．

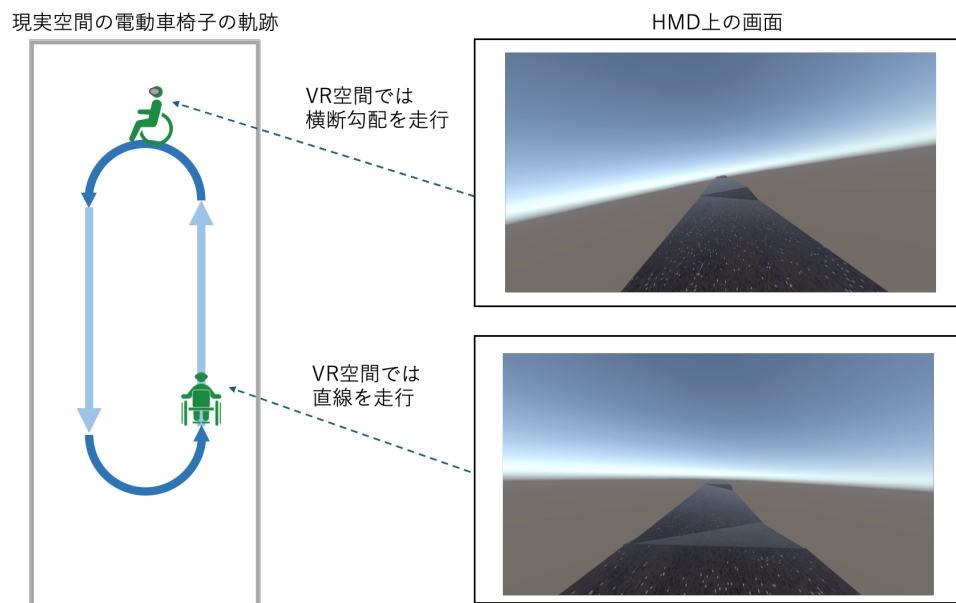


図 5.6: 現実空間の軌跡と VR 空間の視界の関係（現実空間で左回転する場合）

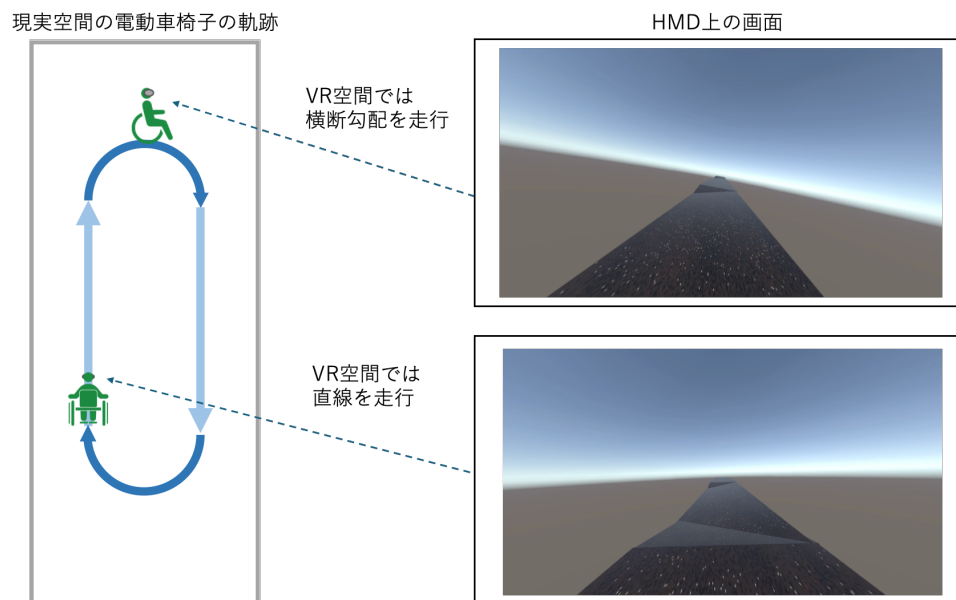


図 5.7: 現実空間の軌跡と VR 空間の視界の関係（現実空間で右回転する場合）

第6章 評価実験

6.1 実験の目的

本実験の目的は、VR空間で直進中に現実空間で大きな方向転換を行う際、VR空間中に横断勾配がある道を提示することで、ユーザが感じる違和感を低減できるか否か検証することである。

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22名(男性18名、女性4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。本実験は、安全確保のために部外者が一切入れないようにした約10m×4mの広さの部屋で行った(図6.1)。床は平坦であり、毛足の短いカーペットが敷いてあった。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

本実験は、被験者内計画で行った。制御変数、独立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13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、本実験でのVR空間中の横断勾配の勾配角度は 3.5° とした。

VR空間中の電動車椅子の走行距離 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18mとした。具体的には、コースの最初と途中で2回ずつ出現する平地と横断勾配は4m、最後に出てくる平地は2mとした(図6.2)。

VR空間中の電動車椅子の走行速度 HMD上に流れるVR空間中における電動車椅子の走行速度は、先行研究[21]のものと同一0.80m/sとした。

現実空間中の電動車椅子の走行速度 VR空間中の走行速度と同じ0.80m/sとした。

現実空間中の電動車椅子の回転半径 1.07m(詳細は後述)とした。

現実空間中の電動車椅子の回転半径について説明する。走行速度(0.80m/s)で円運動を行った際に生じる遠心力と、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ユーザからみた重力の横軸方向成分の理論値が等しくなるように回転半径を決定した。これらのことを踏まえると、 $9.8 * \sin 3.5^\circ = \frac{(0.8)^2}{r}$ という等式が成り立つように回転半径を決定する。具体的には、回転半径が1.07mの場合に上記条件が満たされる。

6.3.2 独立変数

VR空間映像 平らな直進路を提示する映像と、横断勾配がある直進路を提示する映像の2種類を用意した。

HMD上の映像と現実空間の電動車椅子による円運動の回転方向は、シミュレーションを行う横断勾配の傾斜の方向*(左傾斜, 右傾斜)に合わせて2種類用意した。これらに基づいて、表6.1のように4個の実験条件を設計した。以降、条件C1・C3を用いる手法をベースライン手法、条件C2・C4を用いる手法を提案手法と呼ぶ。

*本実験では傾斜の方向が実験結果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。

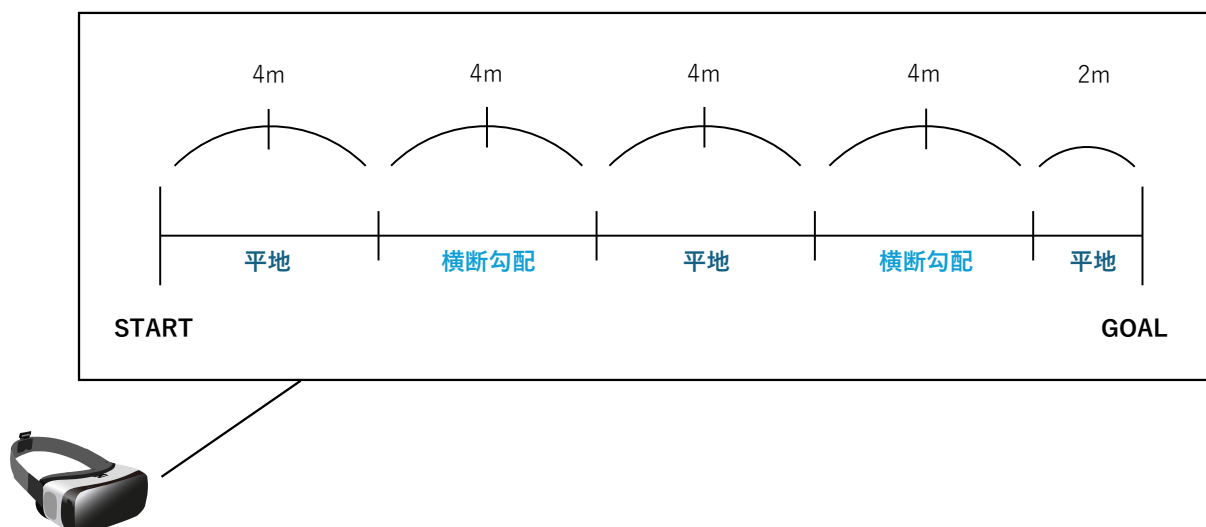


図 6.2: VR 空間のシミュレーションコースの内訳

表 6.1: 実験条件の一覧

実験条件	現実空間の 電動車椅子の円運動	VR 空間の シミュレーションコース
C1	左回り	平地のみ
C2		平地+横断勾配 (右傾斜)
C3	右回り	平地のみ
C4		平地+横断勾配 (左傾斜)

6.4 評価指標

本実験では、リダイレクション時に実験参加者が違和感を感じた程度を、Presence Questionnaire [37] (以降, PQ) と Simulator Sickness Questionnaire [38] (以降, SSQ) で測定する。PQ は表 6.2 の質問を用いてシミュレーションの臨場感を評価するものであり、実験参加者は7段階のリッカート尺度で回答する。以降、PQ への回答 (自由記述による回答理由を含む) を求めるアンケートを実験後アンケート 1 と称する。SSQ は表 6.3 の質問により、吐き気、眼精疲労、めまいの程度を評価するものであり、実験参加者は実験参加者は 0, 1, 2, 3 の 4 段階のスコアで回答する。回答されたスコアの合計値が VR 酔いの程度を表す総合スコアとなる。以降、SSQ への回答 (自由記述による回答理由を含む) を求めるアンケートを実験後アンケート 2 と称する。

6.5 実験の手順

本実験は次の手順で行った。

表 6.2: 臨場感を計測するための質問一覧

質問内容	回答方法
PQ1. VR 環境の視覚的な側面はどの程度あなたを VR 環境に引き込みましたか？	1: 引き込まれなかった～7: 引き込まれた
PQ2. VR 環境内の移動を制御する仕組みはどの程度自然でしたか？	1: 自然でない～7: 自然である
PQ3. VR 環境での体験は現実世界での体験とどの程度一致していると感じましたか？	1: 一致していない～7: 一致している
PQ4. VR 環境内を移動する感覚はどの程度魅力的でしたか？	1: 魅力的でない～7: 魅力的である
PQ5. VR 環境の体験にどの程度没頭できましたか？	1: 没頭できない～7: 没頭できた
PQ6. VR 環境での体験にどのくらい早く慣れましたか？	1: 慣れなかった～7: すぐに慣れた
PQ7. 視覚ディスプレイの質は与えられたタスクや必要な行動を行う上でどの程度邪魔になったり気を散らせたりしましたか？	1: 邪魔である～7: 邪魔でない
PQ8. 制御装置は割り当てられたタスクの遂行や他の活動の妨げになりましたか？	1: 妨げになった～7: 妨げにならなかった
PQ9. VR 環境の体験中にタスクや環境に完全に集中していると感じた瞬間はありましたか？	1: 全くそう思わない～7: とてもそう思う
PQ10. VR 環境での各感覚（視覚，聴覚，触覚など）から感じられる情報に整合性はありましたか？	1: 全くそう思わない～7: とてもそう思う

Step 1: 実験参加者は、実験者の監督のもと電動車椅子に乗って実際に横断勾配を走行し、そのときの感覚を覚える。

Step 2: 実験者が表 6.1 の各実験条件からラテン方格法に従って選んだ 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、2 種類のアンケート（表 6.2，表 6.3）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 2～4 を繰り返す。

6.6 実験の結果

実験後アンケート 1 における PQ1～PQ10 の回答分布を図 6.3 に示す。提案手法（C2・C4）では、70%以上の実験参加者が全ての質問に対して 5 以上の回答をした。現実空間の

表 6.3: VR 酔いを計測するための質問一覧

質問内容	吐き気	眼精疲労	めまい	回答方法
SSQ1. 全体的な不快感	✓	✓		0: なし, 1: 少しある, 2: ある, 3: 大いにある
SSQ2. 疲労感		✓		
SSQ3. 頭痛		✓		
SSQ4. 目の疲れ		✓		
SSQ5. 目の焦点が合わない		✓	✓	
SSQ6. 唾液が増加している	✓			
SSQ7. 汗をかいている	✓			
SSQ8. 吐き気	✓		✓	
SSQ9. 集中できない	✓	✓		
SSQ10. 頭が重い			✓	
SSQ11. 視界がぼやける		✓	✓	
SSQ12. 目を開けた状態でふらふらする			✓	
SSQ13. 目を閉じた状態でふらふらする			✓	
SSQ14. (回転するように感じる) めまいがする			✓	
SSQ15. 胃の不快感	✓			
SSQ16. げっぷが出る感覚がある	✓			

電動車椅子の円運動回転が同じ実験条件グループ（すなわち、C1-C2 間、C3-C4 間）で Wilcoxon の符合順位検定を行った結果、PQ1～PQ10 にて C1-C2 間で p 値がそれぞれ、0.014, 0.0018, 0.00025, 0.0038, 0.000072, 0.0040, 0.0089, 0.0075, 0.016, 0.0000048 となった。このことから、PQ1～PQ10 にて C1-C2 間で 5%水準の有意差が認められた[†]。さらに、PQ1～PQ6, PQ10 にて C3-C4 間で p 値がそれぞれ、0.0011, 0.000082, 0.000091, 0.0016, 0.0016, 0.00074, 0.000072 となった。このことから、PQ1～PQ6, PQ10 にて C3-C4 間で 5%水準の有意差が認められた。

実験後アンケート 2 における SSQ1～SSQ16 の回答分布を図 6.4 に示す。C1～C4 の中央値はそれぞれ、4.0, 3.5, 5.0, 3.0 であった。現実空間の電動車椅子の円運動回転が同じ実験条件グループ（すなわち、C1-C2 間、C3-C4 間）で t 検定を行った結果、C1-C2 間でのみ有意差が認められた。

6.7 考察

まず、臨場感の観点から考察したい。上述のとおり、実験後アンケート 1 で実施した PQ 測定結果（図 6.3）では、すべての質問項目において 5 以上の肯定的な回答数は提案手法（C2・C4）の方が多く、ほとんどの項目で有意差も認められた。特に、PQ3（VR 環境での体験は現実世界での体験とどの程度一致していると感じましたか）に対する 5 以上の回答は、ベースライン手法の C1・C3 でともに 18%であるのに対し、提案手法の C2 で 86%, C4 で 91%であったことから、提案手法が現実世界における経験と整合する効果を提供で

[†]本実験では、円運動方向が同じ 2 条件間の比較のみを行うので、多重検定の問題は生じない。以降も同様である。

きていたと考えられる。これらのことから、現実空間で車椅子を急カーブさせる状況において、VR空間で平坦な直進路を提示し続けるよりも、横断勾配がある直進路を提示した方が臨場感が高まると判断できる。

一方で、PQ7～PQ9についてはC3-C4間のみ有意差が認められなかった。PQ7・PQ8は使用したデバイスの品質に関する質問であり、ここに有意差が認められなかったことは提案手法の価値判断にあまり影響しないと考えている。ただし、PQ9（VR環境の体験中にタスクや環境に完全に集中していると感じた瞬間はありましたか？）にて、C1-C2間（左回り）で有意差があり、C3-C4間（右回り）で有意差がなかったことは議論の余地がある。この違いは偶然生じたものかもしれないが、使用した電動車椅子や環境の特性に起因する可能性も否定はできない。つまり、何らかの物理的要因により、実験システムが左回りに動くときと右回りに動くときに、回転方向以外の物理的な差異が生じた可能性はないとは言い切れない。あるいは、没入型VR空間において、ユーザの集中度が回転方向によって変わるのであれば大変興味深い現象であるが、残念ながら今回の実験はその可能性を十分に議論する材料を提供できず、実験の主目的からも若干外れてしまう。この現象については、今後究明することとしたい。

VR酔いの観点からは条件間で特筆すべき差はなかった。実験後アンケート2で実施したSSQ測定結果（図6.4）では、C1-C2間のみで有意差が認められたものの、そもそも全条件においてSSQのスコアの中央値が4～5程度と、無視できるくらいの軽微なVR酔い[39]しか生じていなかった。ただし、車椅子の速度や回転角度をより大きくした場合、条件間でより大きな差が生じる可能性は排除できない。

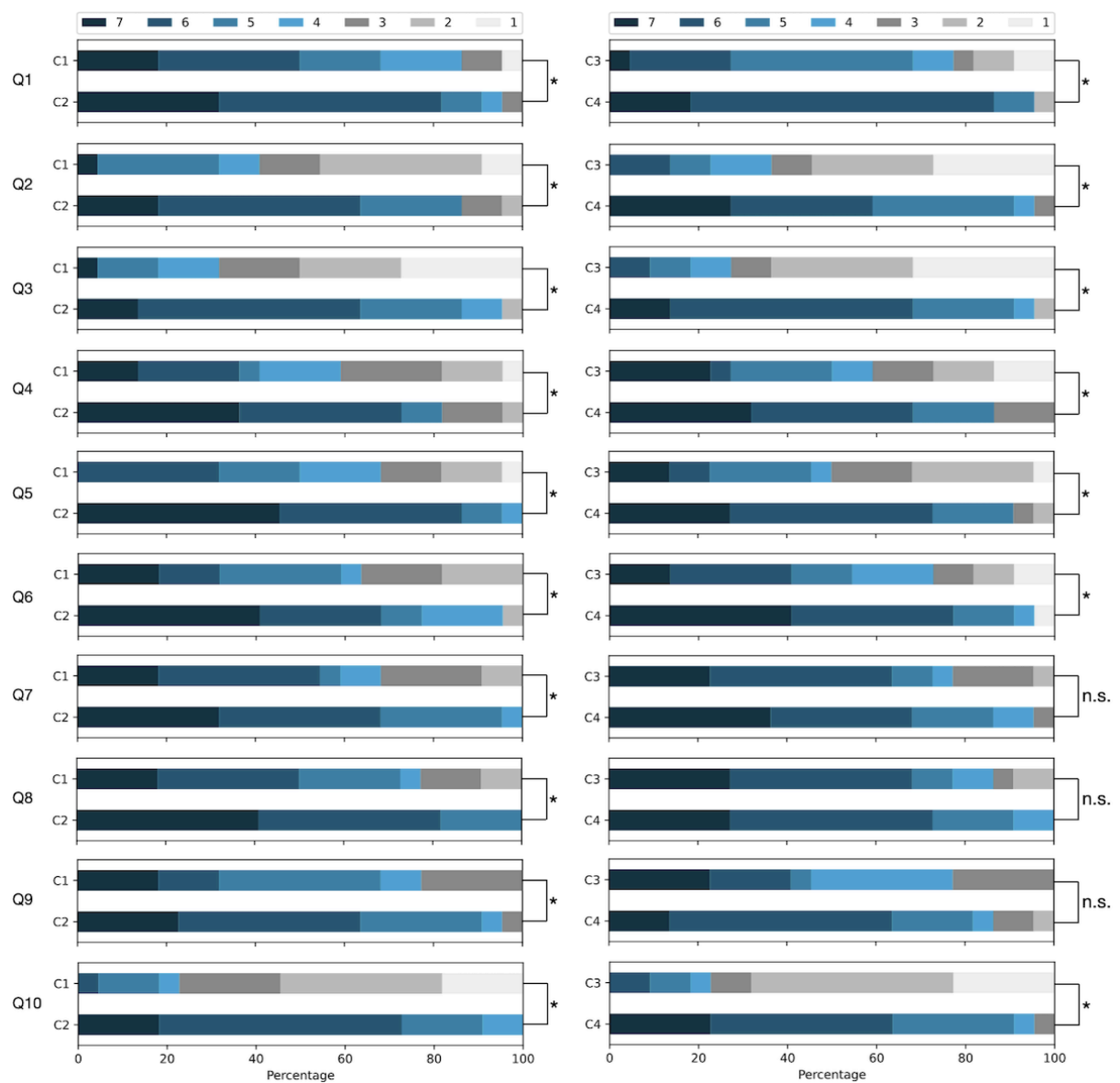


図 6.3: Presence Questionnaire の回答分布 (N=22)

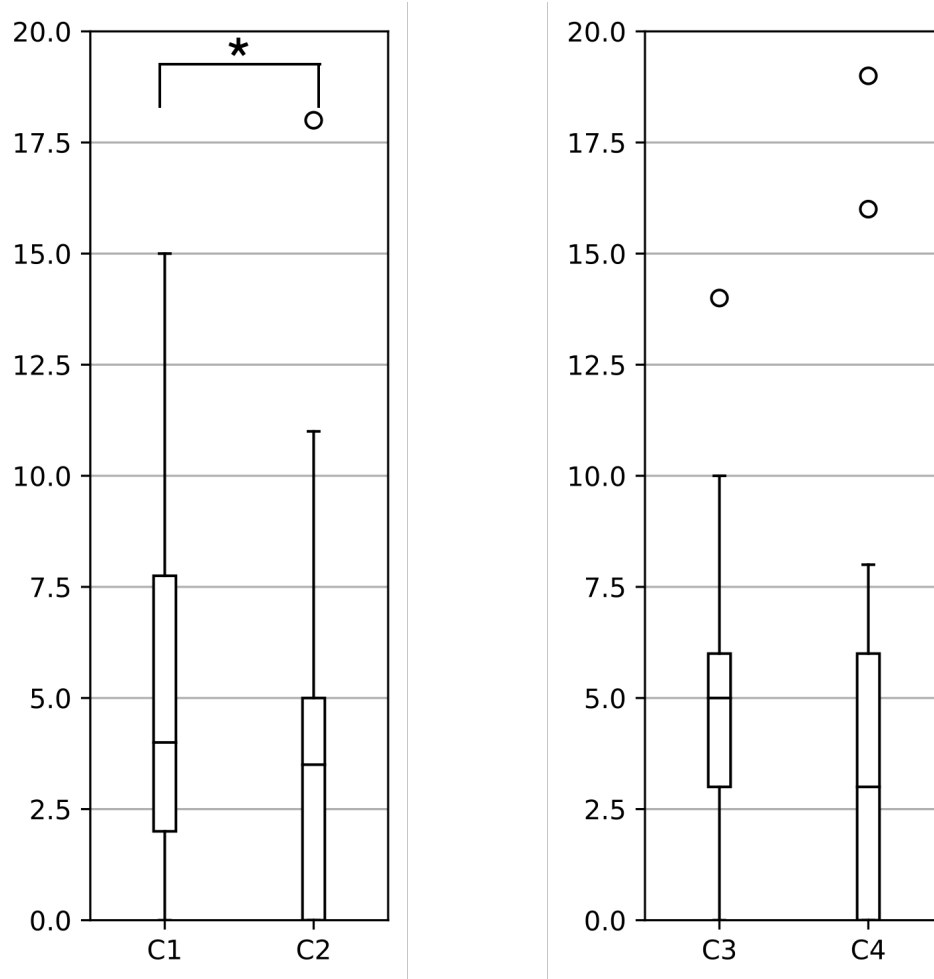


図 6.4: Simulator Sickness Questionnaire の回答分布 (N=22)

第7章 結論

現実空間での移動を伴うバーチャルリアリティ (VR) アプリケーションには、ユーザに気付かれず現実空間の移動経路を操作し、物理空間より広い VR 空間を歩行体験させる Redirected walking という手法がある。車椅子を利用した乗車型 VR シミュレーションでも同様の試みが行われているが、従来の手法は、基本的にユーザに気付かれない程度に VR 空間を回転させるため、VR 内で直進し続けながら現実空間で 90 度以上曲がるといった、VR・現実の両空間でユーザの動きを大幅に変えることは困難であった。本研究はこの問題の部分的な解決を狙い、VR 空間中で直進し続けながら現実空間では大きく曲がらなければならない状況において、ユーザが感じる違和感を低減する手法の確立を研究課題として設定した。研究課題を達成する方法として、VR 車椅子シミュレーションにおいて、現実空間で急カーブを曲がるタイミングで、VR 空間中に横方向の勾配がある道を直進するシーンを提示することで、急カーブによって生じる遠心力に起因する違和感の低減を狙った。評価実験では、乗車型 VR シミュレーションにおいて、VR 空間で直進中に現実空間で大きな方向転換を行う際、VR 空間中に横断勾配がある道を提示することで、ユーザが感じる違和感を低減できるか否か検証した。

22 名の実験参加者に対する評価実験の結果、本研究の提案手法は臨場感が高く、ユーザへの VR 酔いが少ないことから違和感が少ないリダイレクションを実現できる可能性が確認できた。シミュレーションの臨場感の評価では、現実空間で車椅子を急カーブさせる状況において、VR 空間で平坦な直進路を提示し続けるよりも、横断勾配がある直進路を提示した方が臨場感が高まることを確認した。VR 酔いの評価では、ベースライン手法と提案手法との間に特筆すべき差はなく、全条件において無視できるくらいの軽微な VR 酔いしか生じていなかった。

本研究にはいくつか制約・今後の課題がある。1 点目は、今回の検証は特定角度 (3.5°) の横断勾配のみを対象としている点である。今後は、他の角度の横断勾配で検証を行ったとき、同等の結果となるか検証する。2 点目は、シミュレーション時の現実空間の電動車椅子の曲がり方が 1 パターンという点である。今後は、電動車椅子の曲がり方について様々なパターンを用意し検証する必要がある。3 点目は、シミュレーションにおける移動速度である。今回の検証は、先行研究 [21] に従い、VR・現実の両空間で車椅子の走行速度を 0.80m/s と設定した。速度が小さすぎる場合、現実空間に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、ユーザに高い臨場感を与えられない可能性がある。今後は、シミュレーションにおいて、ユーザが違和感を感じない速度の下限値を調べたい。4 点目は、実験参加者の属性である。今回の検証は、全員 20 代の健常者を対象に行った。今後は、高齢者や車椅子を日常的に利用する方を対象に検証を行い、今回の検証結果が普遍的なものであるかどうか確かめる必要がある。5 点目は、リダイレクションに関する評価の網羅性である。例えば、リダイレクションが行われたことに実験参加者が気付いたか否かなど、今後明らかにすべき点が残っている。今後は、より多様な条件で、提案手法の普遍性を検証する必要がある。

参考文献

- [1] バーチャルリアリティとは | 日本バーチャルリアリティ学会: <https://vrsj.org/about/virtualreality/>.
- [2] Sharif Razzaque, Zachariah Kohn, and Mary C. Whitton. Redirected walking. In *Proc. EUROGRAPHICS2001*, pp. 105–106, 2001.
- [3] Gerd Bruder, Victoria Interrante, Lane Phillips, and Frank Steinicke. Redirecting walking and driving for natural navigation in immersive virtual environments. *IEEE Trans. Visualization and Computer Graphics*, Vol. 18, No. 4, pp. 538–545, 2012.
- [4] 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.
- [5] Patrick Abellard, Iadaloharivola Randria, Alexandre Abellard, Mohamed Moncef Ben Khelifa, and Pascal Ramanantsizehena. Electric wheelchair navigation simulators: Why, when, how? *Mechatronic Systems Applications*, pp. 161–186, 2010.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] Catherine Bigras, Dahlia Kairy, and Philippe S. Archambault. Augmented feedback for powered wheelchair training in a virtual environment. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, Vol. 16, pp. 12–23, 2019.
- [9] Felipe R. Martins, Eduardo L. M. Naves, Yann Mor'ere, Angela A. R. DeS'a. Preliminary assessment of a multimodal electric-powered wheelchair simulator for training of activities of daily living. *Journal on Multimodal User Interfaces*, Vol. 16, pp. 193–205, 2021.
- [10] 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.
- [11] 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. *Studies in Health Technology and Informatics*, pp. 134–141, 2016.
- [12] N. W. John, S. R. Pop, T. W. Day, P. D. Ritsos, and C. J. Headleand. The implementation and validation of a virtual environment for training powered wheelchair manoeuvres. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 24, No. 5, pp. 1867–1878, 2018.
- [13] Hamilton Rivera-Flor, Kevin A. Hernandez-Ossaa, Berthil Longo, and Teodiano Bastos. Evaluation of task workload and intrinsic motivation in a virtual reality simulator of electric-powered wheelchairs. *Procedia Computer Science*, Vol. 160, pp. 641–646, 2019.
- [14] 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.
- [15] D.Stewart. A platform with six degrees of freedom. In *Proc. the UK Institution of Mechanical Engineers*, Vol. 180, pp. 371–386, 1965.
- [16] 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 Mechatronics and Automation*, pp. 222–229, 2005.
- [17] Carmen Fernandez 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.
- [18] 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 *Proc. 2019 IEEE 16th International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR '19)*, pp. 77–82, 2019.
- [19] Guillaume Vailland, Louise Devigne, Francois Pasteau, Florian Nouviale, Bastien Fraudet, Emilie Leblong, Marie Babel, and Valerie Gouranton. Vr based power

- wheelchair simulator: Usability evaluation through a clinically validated task with regular users. In *Proc. 2021 IEEE Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*, pp. 420–427, 2021.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 本岡宏将, 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. 情報処理学会論文誌, Vol. 61, No. 1, pp. 61–69, 2020.
- [23] Kousuke Motooka, Takumi Okawara, Yuki Yamato, and Akihiro Miyata. Real-world distance reduction in a virtual reality-based wheelchair simulation on flat surfaces. In *Proc. Lecture Notes in Computer Science*, Vol. 12769, pp. 438–448, 2021.
- [24] 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.
- [25] 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, 第 2023 巻, pp. 61–67, 2023.
- [26] Evan A. Suma, Gerd Bruder, Frank Steinicke, David M. Krum, and Mark Bolas. A taxonomy for deploying redirection techniques in immersive virtual environments. In *Proc. 2012 IEEE Virtual Reality Workshops (VRW '12)*, pp. 43–46, 2012.
- [27] Linwei Fan, Huiyu Li, and Miaowen Shi. Redirected walking for exploring immersive virtual spaces with hmd: A comprehensive review and recent advances. *IEEE Trans. Visualization and Computer Graphics*, Vol. 29, No. 10, pp. 4104–4123, 2022.
- [28] Frank Steinicke, Gerd Bruder, Jason Jerald, Harald Frenz, and Markus Lappe. Estimation of detection thresholds for redirected walking techniques. *IEEE Trans. Visualization and Computer Graphics*, Vol. 16, No. 1, pp. 17–27, 2010.
- [29] Luke Bolling, Niklas Stein, Frank Steinicke, and Markus Lappe. Shrinking circles: Adaptation to increased curvature gain in redirected walking. *IEEE Trans. Visualization and Computer Graphics (TVCG '19)*, Vol. 25, No. 5, pp. 2032–2039, 2019.

- [30] Jerald Thomas and Evan Suma Rosenberg. A general reactive algorithm for redirected walking using artificial potential functions. In *Proc. 2019 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR '19)*, pp. 56–62, 2019.
- [31] Loren Puchalla Fiore, Lane Phillips, Gerd Bruder, Victoria Interrante, and Frank Steinicke. Redirected steering for virtual self-motion control with a motorized electric wheelchair. In *Proc. Joint Virtual Reality Conference of ICAT - EGVE - EuroVR*, pp. 45–48, 2012.
- [32] Loren Puchalla Fiore, Ella Coben, Samantha Merritt, Peng Liu, and Victoria Interrante. Towards enabling more effective locomotion in vr using a wheelchair-based motion platform. In *Proc. the 5th Joint Virtual Reality Conference (JVRC '13)*, pp. 83–90, 2013.
- [33] Victor F. P. Sassi, Thiago Porcino, Esteban W. G. Clua, and Daniela G. Trevisan. Redefining redirected movement for wheelchair based interaction for virtual reality. In *Proc. 2023 IEEE 11th International Conference on Serious Games and Applications for Health (SeGAH' 23)*, pp. 1–8, 2023.
- [34] 道路構造令について (1) | 国土交通省: https://www.mlit.go.jp/road/sign/pdf/kouzourei_full.pdf.
- [35] 東京都福祉のまちづくり条例施設整備マニュアル | 東京都福祉局: https://www.fukushi.metro.tokyo.lg.jp/documents/d/fukushi/05_douro.
- [36] Whill_control_system_protocol_specification | github: https://github.com/WHILL/whill_control_system_protocol_specification/blob/master/WHILL_Control_System_Protocol_Specification.pdf.
- [37] Bob G. Witmer, Christian J. Jerome, and Michael J. Singer. The factor structure of the presence questionnaire. *Presence*, Vol. 14, No. 3, pp. 298–312, 2005.
- [38] Robert S. Kennedy, Norman E. Lane, Kevin S. Berbaum, and Michael G. Lilienthal. Simulator sickness questionnaire: An enhanced method for quantifying simulator sickness. *The International Journal of Aviation Psychology*, Vol. 3, No. 4, pp. 203–220, 1993.
- [39] Kay M. Stanney, Robert S. Kennedy, and Julie M. Drexler. Cybersickness is not simulator sickness. In *Proc. the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, Vol. 41, pp. 1138–1142, 1997.

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, pp.211–220 (2024 年 1 月).
 - (2) 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 年 3 月).
 - (3) 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, pp.104–111 (2023 年 1 月).
-

査読付き国内会議

- (1) 杉本隆星, 齊藤孝樹, 藤本悠作, 滝本涼太, 呉健朗, 宮田章裕: VR 車椅子シミュレーションにおける直線距離を伸ばすためのリダイレクション, 情報処理学会インタラクション 2025 論文集 (2025 年 2 月掲載予定).
-

研究会・シンポジウム

- (1) 藤本悠作, 齊藤孝樹, 杉本隆星, 土岐田力輝, 呉健朗, 宮田章裕: 介助用車椅子を急停止させた際の乗り心地を介助者が体験できるシミュレータの検討, 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 (DICO2024), pp.1218–1221 (2024 年 6 月).
- (2) 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ョン 2024 論文集, pp.1004–1006 (2024 年 3 月).
- (3) 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 年 11 月).
- (4) 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 (DICO2023), pp.876–881 (2023 年 7 月).

-
- (5) 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, pp.127–132 (2022 年 7 月).
 - (6) 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).