

平地のVR車椅子シミュレーション における現実空間での移動距離削減の研究

令和3年度 修士論文

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

6120M09 本岡 宏將

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、坂道といったバリアを通行する際には恐怖を感じることもある。このため、リハビリテーションやトレーニングなどを目的として、車椅子用の物理的なコースを構築する必要のない 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、既存のシミュレータでは金銭的な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、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動作感覚) 誘発映像と電動車椅子の動作を組み合わせたVR車椅子シミュレータを提案してきた。しかし、このシミュレータではシミュレーションを行う際、VR空間上で移動するスペースと同じスペースを現実空間でも用意する必要があるという問題が発生する。そこで、HMDと電動車椅子を用いたVR車椅子シミュレータの現実空間における移動距離を削減するための初期検討として、平地での電動車椅子の現実空間における移動の振る舞いと、ユーザがVR空間で知覚する移動距離の関係を明らかにする研究を行ってきた。しかし、この研究は短距離の平地を移動するという限定的なシーンのシミュレーションで調査を行っていたため、長距離でのシミュレーションなど他のシーンにおいて、ユーザが現実空間とVR空間の走行距離を同等に感じる条件がどのようになるのか不明であった。

本研究では、VR空間上の車椅子の走行距離が長距離の場合と短距離の場合において、現実空間の電動車椅子の走行距離を様々な値に変更した際にユーザが現実空間の走行距離とVR空間の走行距離を同等に感じる条件がどのように変化するか明らかにすることを旨とする。そして、この目標を達成するために、VR空間上の電動車椅子が7mと14mの場合において、現実空間の電動車椅子の走行距離を様々な値に変化させた時、参加者がVR空間上の走行距離と比べ現実空間の走行距離や走行速度はどう感じるか調査を行った。その結果、VR空間上の走行距離が短距離・長距離の手法間で、実験参加者が現実空間とVR空間の走行距離・走行速度を同等と感じる条件に差が生じるとは言えなかった。また、VR空間上の走行距離が短距離・長距離の場合の両方で、実験参加者は現実空間の電動車椅子の走行距離の変化より速度変化の方が気付きやすい傾向にあることが示唆された。

本稿の貢献はVR空間上の車椅子の走行距離が長距離の場合と短距離の場合において、現実空間の電動車椅子の走行距離を様々な値に変化させた際にユーザが現実空間の走行距離とVR空間の走行距離を同等に感じる条件がどのように変化するか検証したことである。

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 ベースの車椅子シミュレータに関する研究事例	5
2.1.1	視覚フィードバックのみを提示するシステムに関する研究事例	5
2.1.2	視覚・動きのフィードバックを提示するシステムに関する研究事例	8
2.2	Vection に関する研究事例	10
2.3	現実空間での移動距離圧縮に関する研究事例	10
2.3.1	RDW の効果の拡張に関する研究事例	11
2.3.2	視覚刺激以外の感覚刺激を用いた RDW に関する研究事例	11
第3章	研究課題	13
3.1	問題の定義	14
3.2	研究課題の設定	15
第4章	VR 車椅子シミュレータの実装	16
4.1	シミュレータの全体像	17
4.2	映像再生アプリケーションの実装	17
4.3	電動車椅子制御アプリケーションの実装	18
4.4	各シミュレーションタイプの動作	19
4.4.1	上り坂の通過のシミュレーション	19
4.4.2	下り坂の通過のシミュレーション	20
4.4.3	線状ブロックの通過のシミュレーション	20
4.4.4	平地の通過のシミュレーション	21
第5章	予備実験	24
5.1	実験の目的	25
5.2	実験参加者・実験環境	25
5.3	実験条件	25
5.4	実験の手順	26

5.5	実験の結果	28
5.6	評価実験の実験条件の検討	28
5.6.1	VR空間上の電動車椅子の走行距離が7mの実験条件の検討	30
5.6.2	VR空間上の電動車椅子の走行距離が14mの実験条件の検討	30
第6章	評価実験	35
6.1	実験の目的	36
6.2	実験参加者・実験環境	36
6.3	実験条件	36
6.4	実験の手順	36
6.5	実験の結果	39
6.6	考察	41
6.6.1	参加者の属性についての考察	41
6.6.2	VR空間上の走行距離が7mのパターンについての考察	42
6.6.3	VR空間上の走行距離が14mのパターンについての考察	42
6.6.4	VR空間上の走行距離が7mと14mのパターンの比較	43
6.6.5	本実験で得られた知見	44
6.6.6	今後の課題	45
第7章	結論	48
	参考文献	50
	研究業績	55

目 次

2.1	ジョイスティック (左), ハンドリウム (右)	7
2.2	Stewart platform の構成図	9
2.3	VR 空間上のユーザの移動経路 (上), 現実空間のユーザの移動経路 (下)	12
4.1	シミュレータの外観	18
4.2	システム構成	19
4.3	HMD 上の映像再生アプリケーション	20
4.4	シミュレーション選択画面	21
4.5	上り坂を通過する際の映像	22
4.6	下り坂を通過する際の映像	22
4.7	線状ブロックを通過する際の映像	23
4.8	平地を通過する際の映像	23
5.1	実験時の走行コース	26
5.2	実験環境	27
5.3	HMD 上で表示する映像	30
5.4	VR 空間上の走行距離が 7m の場合の Q1 の回答分布 (N=3)	31
5.5	VR 空間上の走行距離が 7m の場合の Q2 の回答分布 (N=3)	32
5.6	VR 空間上の走行距離が 7m の場合の Q3 の回答分布 (N=3)	32
5.7	VR 空間上の走行距離が 14m の場合の Q1 の回答分布 (N=3)	33
5.8	VR 空間上の走行距離が 14m の場合の Q2 の回答分布 (N=3)	33
5.9	VR 空間上の走行距離が 14m の場合の Q3 の回答分布 (N=3)	34
6.1	実験時の走行コース	37
6.2	実験環境	38
6.3	HMD 上で表示する映像	40
6.4	事前アンケートの B-Q1 の回答分布 (N=7)	40
6.5	事前アンケートの B-Q2 の回答分布 (N=7)	42
6.6	事前アンケートの B-Q3 の回答分布 (N=7)	42
6.7	VR 空間上の走行距離が 7m の場合の A-Q1 の回答分布 (N=7)	43
6.8	VR 空間上の走行距離が 7m の場合の A-Q2 の回答分布 (N=7)	44

6.9 VR空間上の走行距離が7mの場合のA-Q3の回答分布 (N=7) (* : p < 0.05)	45
6.10 VR空間上の走行距離が14mの場合のA-Q1の回答分布 (N=7)	46
6.11 VR空間上の走行距離が14mの場合のA-Q2の回答分布 (N=7)	47
6.12 VR空間上の走行距離が14mの場合のA-Q3の回答分布 (N=7) (* : p < 0.05)	47

表 目 次

2.1	VR ベースの車椅子シミュレータに関する研究事例	5
4.1	シミュレータに使用したデバイスの名称	17
4.2	シミュレータタイプ一覧	18
4.3	コマンドの機能一覧	19
5.1	VR 空間の走行距離が 7m の場合の実験条件	28
5.2	VR 空間の走行距離が 14m の場合の実験条件	29
5.3	各実験条件終了後の実験参加者への質問一覧	29
6.1	VR 空間の走行距離が 7m の場合の実験条件	39
6.2	VR 空間の走行距離が 14m の場合の実験条件	39
6.3	実験前の実験参加者への質問一覧	41
6.4	各実験条件終了後の実験参加者への質問一覧	41

第1章 序論

1.1 研究の背景

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、坂道といったバリアを通行する際には恐怖を感じることもある。このため、車椅子用の物理的なコースを構築する必要のない Virtual Reality (VR) ベースの車椅子シミュレータが開発されてきた [6][23]。車椅子シミュレータはリハビリテーションやトレーニングのような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ときなど建築の設計での利用も想定されている。

しかし、既存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与えるシミュレータは、PC モニタや Head mounted display (HMD) といった低コスト機器で構築できるが、動きのフィードバックがないため現実感が低いという問題があった。一方、視覚と動きの両方のフィードバックを与えるシミュレータは、高い現実感を与えることができるが、モーションプラットフォーム（ユーザが乗った台座を6本のロボットアームで支え、各アームを伸縮させることでユーザに動きのフィードバックを与える装置）などの高額な装置が必要になり、金銭的なコストが高いという問題があった。

この問題を解決するために、先行研究では HMD に表示されるvection（複数感覚刺激により誘発される自己動作感覚）誘発映像と電動車椅子の動作を組み合わせた VR 車椅子シミュレータを提案してきた [1][2][3][4]。このシミュレータは金銭的に比較的 low cost な HMD と電動車椅子で構築でき、ユーザにバリアの場所を通過している感覚を与えることができる。しかし、このシミュレータではシミュレーションを行う際、VR 空間上で移動するスペースと同じスペースを現実空間でも用意する必要があるという問題が発生する。これでは、ユーザが自宅や病院等屋内の限られたスペースでシミュレーションを行うことが難しく、シミュレーションを行うことができる場所が限られてしまう。

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、HMD と電動車椅子を用いた VR 車椅子シミュレータの現実空間における移動距離を削減するための初期検討として、平地での電動車椅子の現実空間における移動の振る舞いと、ユーザが VR 空間で知覚する移動距離の関係を明らかにする研究を行ってきた [5]。これは平地を電動車椅子で 8m 走行するシミュレーションにおいて、現実空間の電動車椅子の走行距離や走行速度を様々に変化させた際に、ユーザが VR 空間と現実空間の走行距離の差に気付く条件を調査している。しかし、この研究は短距離の平地を移動するという限定的なシーンのシミュレーションで調査を行っていたため、長距離でのシミュレーションなどの他のシーンにおいて、ユーザが VR 空間と現実空間の走行距離の差に気付く条件がどのようになるのか不明であった。

そこで、本研究では、VR 空間上の車椅子の走行距離が長距離の場合と短距離の場合において、現実空間の電動車椅子の走行距離を様々な値に変更した際に、ユーザが現実空間の走行距離と VR 空間の走行距離を同等に感じる条件がどのように変化するか明らかにす

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、VR ベースの車椅子シミュレータに関する研究事例、Vection に関する研究事例、現実空間での移動距離圧縮に関する研究事例について述べる。

3章では、先行研究について説明し、先行研究における問題を定義し、それをふまえた上で本研究における課題を設定する。

4章では、最初にシステムの全体像を説明する。その後、HMD 上の映像再生アプリケーションの実装、電動車椅子制御アプリケーションの実装、各シミュレーションタイプの動作について具体的に述べる。

5章、6章ではそれぞれ、予備実験、評価実験について、目的・実験環境・手順・実験結果・考察を述べる。

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、HMD 上に表示される Vection 誘発映像と電動車椅子の動作を組み合わせた VR 車椅子シミュレータにおいて、シミュレーションを行う際に必要なスペースを圧縮するものである。本章では、この研究に関する研究領域について紹介する。2.1 節では、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紹介する。これらは、車椅子シミュレータに VR 空間を使用している点で本研究と関係している。2.2 節では、Vection 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 Vection 誘発映像を使用している点で本研究と関連している。2.3 節では、現実空間での移動距離圧縮に関する研究事例について紹介する。これらは、VR 空間の再現に必要な現実空間スペースを圧縮する研究を行っている点で本研究と関連している。

2.1 VR ベースの車椅子シミュレータに関する研究事例

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。研究事例をグループ毎にまとめたものを表 2.1 に示す。視覚フィードバックのみを提示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・動きのフィードバックを提示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。

表 2.1: VR ベースの車椅子シミュレータに関する研究事例

車椅子シミュレータのタイプ	研究事例
視覚フィードバックのみを提示するシステム	<ul style="list-style-type: none"> ・ PC 用モニタに VR 空間を表示するシミュレータの研究 ・ 没入型デバイスに VR 空間を表示するシミュレータの研究
視覚・動きのフィードバックを提示するシステム	<ul style="list-style-type: none"> ・ 手動車椅子シミュレータの研究 ・ 電動車椅子シミュレータの研究

2.1.1 視覚フィードバックのみを提示するシステムに関する研究事例

本項では、視覚フィードバックを提示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。これらの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。視覚フィードバックを提示する車椅子シミュレータは主に VR 空間を PC モニタに表示する手法 [6][7][8][9][10] と没入型デバイスに表示する手法 [11][12][13][14][15][16] に分類できる。また、VR 空間の要素の違いがユーザに与える影響についての研究も行われており、文献 [17] では、VR 空間の表示タイプ (PC モニタ、または、HMD)、視野の広さを自由に変更できる機能、ユーザのアバタの視覚化の3つの要素がユーザの感じる VR 空間の存在感に影響を与えるか検証している。その結果、3つの要素全てがユーザの感じる VR 空間の存在感に影響を与えていることを報告している。

PC モニタに VR 空間を表示するシミュレータについて説明する。文献 [6] では、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シミュレーション

システムを開発している。このシステムでは、ジョイスティック（図2.1）とPCモニタに表示しているVR空間の車椅子が連動する。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することができる。文献[7]は、重度の運動障害がある人が、電動車椅子の運転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ている。このシステムでは、ジョイスティックとPCモニタに表示しているVR空間の車椅子が連動する。PCモニタに表示しているVR空間は7つのレベルがあり、一番低いレベルは障害物がなく道路標示があるVR空間である。レベルが上がるにつれ、道路標示がなくなり、駐車場や歩道沿いに駐車された車や駐車スペースから移動する車、空間内を循環する車、歩行者や車椅子を操作しているユーザが順々にVR空間に追加される。これによりユーザがシミュレーションの回数を重ねるごとに、より複雑なVR環境で車椅子のシミュレーションをすることができる。文献[8]は、複数の障害がある子供が、車椅子の運転に慣れ親しむためのシミュレーションシステムを開発している。このシステムでは、ジョイスティックとPCモニタに表示しているVR空間の車椅子が連動する。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することができる。文献[9]では、車椅子シミュレータに学習を最適化するための拡張フィードバックを提案している。そして、電動車椅子シミュレータにこの拡張フィードバックを提供することで、ユーザが優れたパフォーマンスが得られるか否か、および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を検証している。その結果、このシミュレータでのトレーニング後、ユーザはVR空間でタスクを完了するまでの時間と電動車椅子が障害物に衝突する回数が大幅に改善されたことが報告されている。文献[10]では、車椅子での日常生活の動作と適応性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ジョイスティック、筋電図、視線追跡の3種類がある。パイロットテストの結果、ユーザは上記の3つの操作方法での車椅子の操作スキルがそれぞれ向上し、実験が進むにつれシミュレータの操作に自信がついたことが報告されている。

没入型デバイスにVR空間を表示するシミュレータについて説明する。文献[11]は、PCモニタを利用した場合とHMDを利用した場合の比較を行い、HMDがPCモニタよりユーザの電動車椅子を制御する能力を向上させることを示唆している。文献[12]は、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シミュレーションシステムを開発している。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空間の車椅子が連動する。HMDで表示しているVR空間は、ロビー、迷路、赤と青のボールが浮いているフロア、障害物が動くフロアの4つであり、ユーザはドアの開閉、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することができる。文献[13]は、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シミュレーションシステムを開発している。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

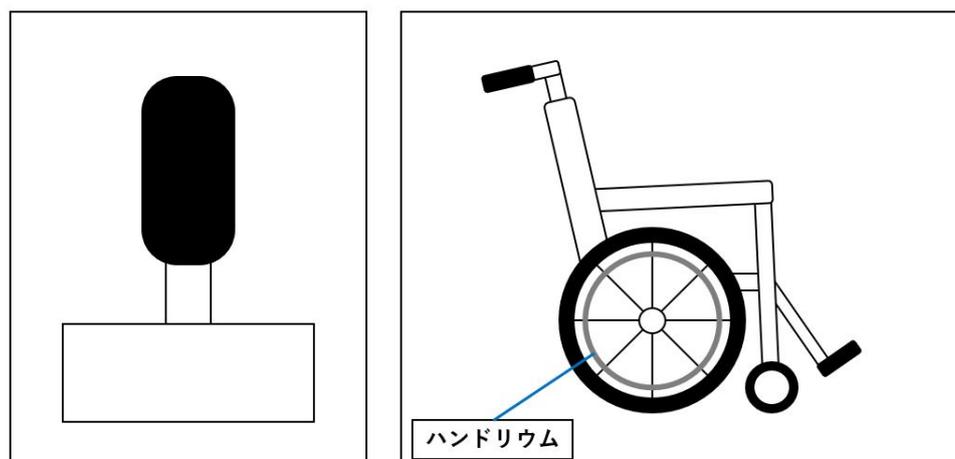


図 2.1: ジョイスティック (左), ハンドリウム (右)

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操作をすることができる。文献[14]では、電動車椅子の運転学習、運転スキルとパフォーマンスのテスト、および入力インタフェースのテストの3つの目的でVRシミュレータであるSimcadromを開発している。このシミュレータは、VR空間を表示するHMDとメインの入力インタフェースとしてジョイスティックを利用している。加えて、HMDの代わりにプロジェクターにVR空間を表示させたり、ジョイスティックの代わりにアイトラッカーデバイスを入力インタフェースにすることができる。Simcadromの評価実験を行ったところ、ほとんどの参加者は電動車椅子の運動技術を高めることができ、このシミュレーションで習得した全てのスキルを実際の電動車椅子の操作に利用できたことが報告されている。文献[15]は、車椅子運転支援システムの開発を支援するために、大規模なVRプラットフォームと車椅子を用いた車椅子シミュレータを提案している。このシミュレータのVRプラットフォームは4つの大画面で構成されるImmersioniaを使用している。ユーザは車椅子に座りジョイスティックを操作することでVR空間上の車椅子を操作できる。評価実験の結果、このシミュレータが優れた臨場感を生み、ユーザからの認知努力が低いことが報告されている。文献[16]では、車椅子操作のトレーニングのため、立方体の部屋の壁にVR空間を投影する没入型バーチャルリアリティシステムCAVEを用いて、手動車椅子と電動車椅子の両方のシミュレーションを行えるシミュレータを提案している。このシミュレータは、ユーザは手動車椅子シミュレータの場合はハンドリウム(図2.1)、電動車椅子シミュレータの場合はジョイスティックでVR空間上の車椅子を操作できる。しかし、このシミュレータにはユーザに力のフィードバックを与えられないという制限がある。手動車椅子シミュレータでの検証の結果、手動車椅子シミュレータにおいて、VR空間上の車椅子の挙動は、車輪の滑りと慣性が無い場合に実際の車椅子の挙動と一致していたことを報告している。

2.1.2 視覚・動きのフィードバックを提示するシステムに関する研究事例

本項では、視覚・動きのフィードバックを提示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。これらのシミュレータは、ユーザに視覚と動きの両方のフィードバックを与えるため、現実感が高いという特徴がある。文献 [18], [19] では、車椅子シミュレータに関連する様々な VR ベースのシステムのレビューを行っている。文献 [18] では、ユーザの前庭感覚を効果的に刺激するには VR 空間の傾斜に応じてユーザを傾けるモーションプラットフォームを使用する必要があるが、モーションプラットフォームは大幅にシミュレータの複雑さと金銭的なコストを増加させてしまうことを報告している。また、車椅子シミュレータは、手動車椅子シミュレータ [20] と電動車椅子シミュレータ [21][22][23][24][25][26] に大別できる。多くの場合ユーザは手動車椅子の場合はハンドリウム (図 2.1), 電動車椅子の場合はジョイスティック (図 2.1) を用いて VR 空間上の車椅子を操作できる。他にも、文献 [19] では、広い視野や HMD 等の没入型シミュレータはユーザが感じる存在感が強くなることを報告している。また、手動車椅子シミュレータは、ユーザがハンドリウムを操作するときユーザに触覚フィードバックを与える必要があるため、電動車椅子シミュレータと比べ高価なプラットフォームの開発が必要になることを報告している。

視覚・動きのフィードバックを提示する手動車椅子シミュレータについて説明する。文献 [20] は、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ている。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ウムと VR 空間の車椅子が連動する。加えて、車椅子の後輪にはハンドリウムとモーターが取り付けられており、車輪をモーターで制御することで、ユーザが手動車椅子を操作する際にユーザにかかる力のフィードバックを再現している。

視覚・動きのフィードバックを提示する電動車椅子シミュレータについて説明する。文献 [21] は HMD 上の VR 空間と電動車椅子を用いた車椅子シミュレータである VRoM を開発している。このシミュレータは慣性計測装置とカメラが内蔵されている HMD を用いて、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 VR 空間と現実空間の動きをリンクさせている。VRoM はシミュレーション中、VR 空間上の電動車椅子の動きに合わせて現実空間の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ている。さらに、車椅子での走行中に 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のシミュレータと VRoM 間でユーザの主観的評価に差が生まれるのか検証する比較実験を行っている。その結果、VRoM の方がユーザが適切に評価できることが確認されている。文献 [22] 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。このプラットフォームは、上部のプレートと下部のプレートを 6 つの調整可能な脚で繋ぐという構成になっている (図 2.2)。文献 [23] は、車椅子利用者が電動車椅子の操作に慣れるためのシミュレーションシステムを開発している。このシステムは、HMD と Stewart platform で構築されており、ジョイスティックとユーザが座っているプラットフォームが連動する。また、HMD にバーチャル環境を表示し、ユーザの運転技術に応じて表示するバーチャル環

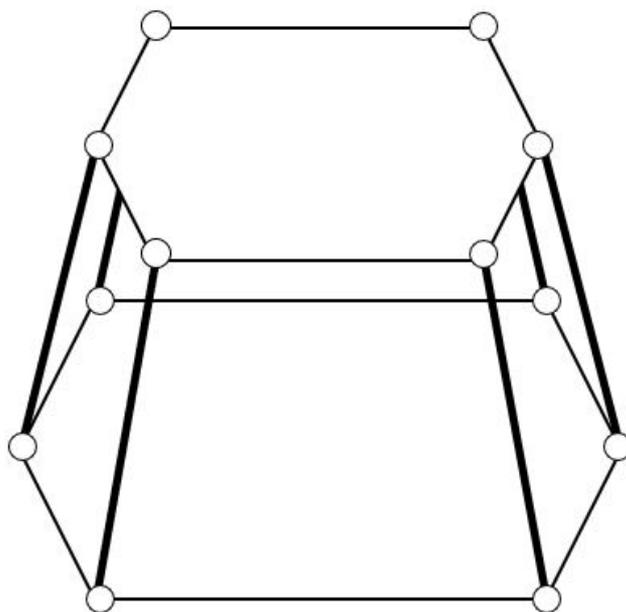


図 2.2: Stewart platform の構成図

境を変えることができる。文献 [24] は、車椅子を初めて運転する人が、事前に車椅子の運転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ている。このシステムは、Stewart platform と大型半球ディスプレイで構築されており、ジョイスティックとユーザが座っているプラットフォームが連動する。大型半球ディスプレイに表示しているバーチャル環境は、実世界の建物を基に構築されたバーチャル環境であり、ユーザは高い現実感を得ながら車椅子の運転技術を向上できる。文献 [25] 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するシミュレーションシステムを開発している。このシステムは、HMD と 3 自由度のモーションプラットフォームを利用して、車椅子利用者が日常的に通る斜面や段差などの通過時の様子を体感できる。また、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。文献 [26] では、電動車椅子の操作のトレーニングのために、HMD とモーションプラットフォームを用いた VR 車椅子シミュレータを提案している。車椅子ユーザにこのシミュレータを利用した VR 空間上の電動車椅子の運転と現実空間での電動車椅子の運転を行わせ、この 2 つのパフォーマンスを比較したところ、両方同じ時間でタスクを完了したことが報告されている。

2.2 Vectionに関する研究事例

本節では、Vectionに関する研究事例について述べる。Vectionとは、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 [27] のことを指していたが、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 [28]。関連して、文献 [29] は、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をしている。

次に Vection を用いたシミュレータの事例について紹介する [30][31][32][33][34]。これらのシミュレータは主にユーザに視覚刺激と前庭感覚刺激を与えて自己動作感覚を誘発している。文献 [30] は、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ことを報告をしている。文献 [31] は、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ことを報告をしている。文献 [32] は、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ことを報告している。文献 [33] は、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ことを報告している。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 [34] 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はより多様な動きに感じることができると示唆される。

2.3 現実空間での移動距離圧縮に関する研究事例

本節では、現実空間での移動距離圧縮に関する研究事例について述べる。歴史的には、没入 VR 空間を構築する際は、VR 空間と同じ広さのスペースを現実空間にも用意する必要があった。しかし、近年では VR 空間に没入しているユーザを障害物の無い方向へユーザに知覚されることなく方向転換させることで、VR 空間の再現に必要な現実空間スペースを圧縮する Redirected walking (RDW) が提案されている [35]。この手法を使用した際の VR 空間と現実空間のユーザの移動経路の一例を図 2.3 に示す。また、RDW について詳しく調査する研究も行われている [36][37]。文献 [36] は、ユーザが知覚する VR 空間での方向転換と現実空間でのユーザの方向転換にどの程度差があってもユーザに気付かれないうか、VR 空間の移動距離と現実空間の移動距離をどの程度拡大・圧縮できるかを検証している。その結果、ユーザが VR 空間で知覚する方向転換より現実空間の方が 49% 多い、または 20% 少ない方向に方向転換できること、現実空間上の距離を VR 空間上の距離より 14% 圧縮、または 26% 拡大できることを報告している。文献 [37] は、ユーザが長時間 VR 空間を体験していると脳が VR 空間に適応し、ユーザを方向転換させる際にユーザに知覚させることなく方向転換できる閾値を大きくできるかを検証している。ユーザに RDW 手法を用いた VR 空間を 2 回体験させたところ、2 回目の方がユーザが方向転換を知覚す

る閾値が大きくなったことが報告されている。

このRDWの効果を高めるための研究や視覚刺激以外の感覚刺激を用いた研究も行われている。RDWの効果の拡張に関する研究事例については2.3.1項で紹介する。視覚刺激以外の感覚刺激を用いたRDWに関する研究事例については2.3.2項で紹介する。

2.3.1 RDWの効果の拡張に関する研究事例

本項では、RDWの効果の拡張に関する研究事例について述べる。RDWは複雑な形の部屋や他のユーザや物などの障害物がある空間など複雑な空間では効果が低くなる問題があったが、RDWの効果を高めるための研究が多くされている[38][39][40][41]。文献[38]は、従来の手法では動く障害物を含む動的な現実空間ではRDWのパフォーマンスが低下する問題を解決するため、リアルタイムで空間の状況を認識しユーザが障害物に近づいたらユーザを障害物とは逆方向に誘導するシステムを開発している。加えて、逆方向だけではなく、ユーザを広いスペースへ誘導するシステムも開発している。文献[39]は、artificial potential fields-Redirected walking(APF-RDW)と呼ばれるシステムの効果について報告している。これはユーザの動きを追跡する領域の広さと部屋の形状を考慮した方向転換をできるようにし、不規則な形状の部屋でも壁や障害物にユーザが衝突しないように広いスペースにユーザを方向転換させるシステムである。加えて、APF-RDWを複数の利用者が同時に利用できることも報告している。文献[40]は、RDWに機械学習を利用するシステムを開発している。具体的には、リアルタイムでユーザの進行方向を予測し、その方向に障害物があった場合にユーザを障害物のない方向へ誘導するシステムである。文献[41]は、従来のRDWに加え、現実空間の障害物に衝突しそうになったら、VR空間上でも障害物を生成し、ユーザを別の方向へ方向転換させるアルゴリズムを提案している。この手法は、従来手法と比べて方向転換を66%削減し、方向転換してからまた方向転換するまでの平均歩行距離を86%増加させている。加えて、このシステムがユーザが少なくとも8人まで同時に使用できることを報告している。

2.3.2 視覚刺激以外の感覚刺激を用いたRDWに関する研究事例

本項では、視覚刺激以外の感覚刺激を用いたRDWに関する研究事例について述べる。RDWは主に視覚刺激を利用して現実空間の移動距離圧縮を行っているが、視覚以外の感覚も組み合わせてRDWの効果を高める研究もされている[42][43][44]。例えば、文献[42]は、触覚を用いて、凸面の壁に触れながら壁に沿って歩行させることでVR空間上の直線の廊下を無限に歩けるシステムを開発している。これは、視覚フィードバックに加えて触覚フィードバックを与えることで没入感を高め、RDWの効果を高めている。文献[43]は、聴覚フィードバックで利用者にRDWの効果を与えられることを報告している。これは、VR空間に没入しているユーザにピープ音等の音を聞かせ、ユーザの注意を音に惹かせることでユーザを気付かれずに方向転換させる手法である。さらに、従来手法と聴覚のみを

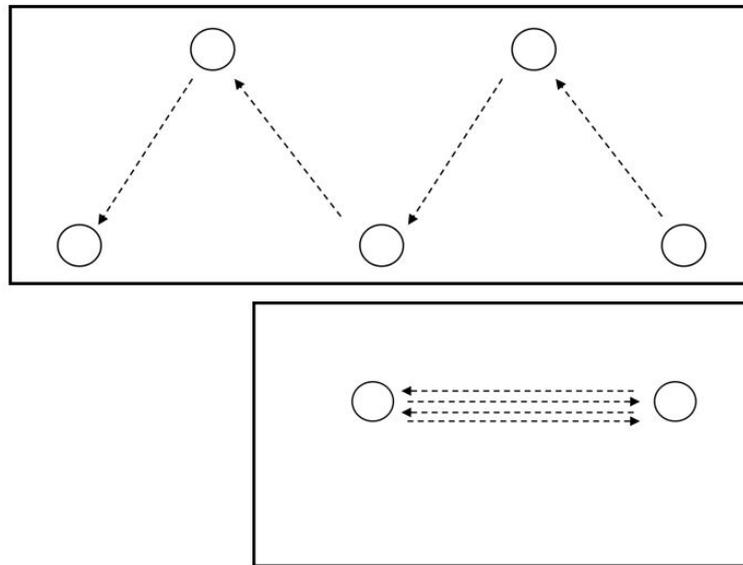


図 2.3: VR 空間上のユーザの移動経路 (上), 現実空間のユーザの移動経路 (下)

使用した RDW を比較し、ユーザを誘導する効果にほとんど差はないと報告している。文献 [44] は、ユーザがジャンプをする際、ユーザを無意識に方向転換させ、移動距離を圧縮できるかを調査している。その結果、歩行シーンと同じように、ジャンプでもユーザに気付かれずに方向転換させることができることを報告している。

第3章 研究課題

3.1 問題の定義

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 [6][7][8][12][23][24][25]。視覚フィードバックのみを提示するシミュレータは、PC モニタや 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ないため現実感に乏しい。例えば、文献 [6]、文献 [7]、文献 [8]、文献 [12] は、ユーザがジョイスティックを操作し、VR 空間を車椅子で移動するシミュレーションシステムである。これらのシステムは、ユーザは VR 空間上の電動車椅子を操作できるが、視覚フィードバックのみを提示するシミュレータであるため、車椅子で坂道などのバリアを通過する際に生じる車椅子の速度の変化と傾きの状態を把握することが難しい。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的高額な装置が必要になる。例えば、文献 [23]、文献 [24]、文献 [25] は、ユーザがジョイスティックを操作すると、モーションプラットフォームが動き、VR 空間を車椅子で移動するシミュレーションシステムである。これらのシステムは、車椅子で坂道を通過する際に生じる傾きなどを体感させることができ、ユーザに高い現実感を与えながらバリア通過時の車椅子の様子を把握させることができる。しかし、これらのシステムで利用しているモーションプラットフォームは高額な装置であり、車椅子利用者がシステムを容易に利用することは難しい。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を低コストで提示できないことである。

この問題を解決するために、先行研究では、電動車椅子の低自由度動作を HMD 上に表示する Vection（複数感覚刺激により誘発される自己動作感覚）誘発映像で拡張するバリアシミュレータを提案してきた [1][2][3][4]。このシステムでは、電動車椅子の動作と HMD 上の映像がシナリオに沿って連動する。例えば、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。同時に、HMD は電動車椅子で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。

しかし、この従来手法ではシミュレーションを行う際、VR 空間上で電動車椅子が進む距離と同じ距離を現実空間で確保する必要があった。例えば、ユーザが VR 空間上の電動車椅子が 10m 走行するシミュレーションを行う場合、現実空間内に電動車椅子が 10m 走行できるスペースを確保する必要がある。これでは、自宅や病院等屋内の限られたスペースでシミュレータを使用するユーザにとって、シミュレーションを行うことが難しい。また、VR 空間の再現に必要な現実空間スペースを圧縮する研究も多く行われているが [35]、これらの研究は歩行シーンを想定していたため、車椅子シミュレーションでは、現実空間の走行距離とユーザが VR 空間上で知覚する走行距離の関係は明確ではなかった。

そこで先行研究では、電動車椅子と HMD を用いたシミュレータの現実空間における移動距離を削減するための初期検討として、平地での電動車椅子の現実空間における移動の振る舞いと、ユーザが VR 空間で知覚する移動距離の関係を明らかにする研究を行ってきた [5]。この先行研究では平地を電動車椅子で 8m 走行するシミュレーションにおいて、

現実空間の電動車椅子の走行距離や速度を様々に変化させた際に、ユーザがVR空間と現実空間の走行距離の差に気付く条件を調査した。そして、現実空間の電動車椅子が等速で走行する等速方式と徐々に減速しながら走行する減速方式の2つの速度のパターンで検証を行い、等速方式の場合は30%、減速方式の場合は20%現実空間の走行距離を圧縮できることを報告している。しかし、この研究は比較的短距離でのシミュレーションで調査を行っていたため、長距離でのシミュレーション等VR空間上の走行距離を変えた場合でも同じ結果になるとは限らないという問題がある。

よって、本研究における問題は、VR空間上の車椅子の走行距離を様々な値に変更した場合、ユーザが現実空間の走行距離とVR空間の走行距離を同等に感じる条件がどのように変化するか明らかになっていないことだと定義できる。

3.2 研究課題の設定

3.1節で定義した問題を解決するためには、VR空間上の車椅子の走行距離を様々な値に変更した場合、ユーザが現実空間の走行距離とVR空間の走行距離を同等に感じる条件がどのように変化するか明らかにする必要がある。これにより、VR空間上の電動車椅子の走行距離を様々な値に変化させた際にも、どの程度現実空間の電動車椅子の走行距離を圧縮できるか明らかになると考えられる。

そこで本研究では、VR空間上の車椅子の走行距離が長距離の場合と短距離の場合において、現実空間の電動車椅子の走行距離を様々な値に変更した際にユーザが現実空間の走行距離とVR空間の走行距離を同等に感じる条件がどのように変化するか明らかにすることを研究課題として設定する。この研究課題が達成されると、VRシミュレータの分野において、物理的に限られたスペースでも利用可能なVR車椅子シミュレータの開発に貢献できると考えられる。

第4章 VR車椅子シミュレータの実装

本章では、本研究で用いるVR車椅子シミュレータの実装について述べる。

4.1 シミュレータの全体像

本節ではシミュレータの全体像について説明する。シミュレータの外観を図4.1に示す。本研究のシミュレータは、非透過型ヘッドマウントディスプレイ（Opaque Head mounted display, 以降HMD）、HMDのコントローラ、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。非透過型HMDはユーザがVR空間を体験している間、現実空間の周りの環境が見えないようになっているゴーグル型デバイスである。シミュレータに使用したデバイスの名称を表4.1に示す。シミュレータを使用する際、ユーザは図4.1のように電動車椅子に着座しHMDを装着する。そして、ユーザはHMDのコントローラを用いてHMD上の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できる。HMD上の映像再生アプリケーションはAndroid Studio（バージョン3.2.1）、SBC上の電動車椅子制御アプリケーションはPython（バージョン3.7.1）を用いて実装した。HMDとSBCは無線でWebsocket通信を行っており、SBCと電動車椅子はシリアルケーブルを繋いでシリアル通信を行っている。

シミュレーションを行う際の流れを説明する。最初に、ユーザはHMD上のアプリケーションで体験したいシミュレーションを選び、STARTボタンを押す。その後、HMDはシミュレーション開始信号をSBCに送信する。SBCはシミュレーション開始信号を受信後、ユーザが選んだシミュレーションに合わせて電動車椅子の動作を制御する。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4.2に示す。

表 4.1: 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 Pi 4
電動車椅子	WHILL Model-CR

4.2 映像再生アプリケーションの実装

本節では、HMD上で動作する映像再生アプリケーションについて説明する。HMDに表示する画面を図4.3に示す。ユーザは図4.3の左下のプルダウンに表示されるシミュレーション一覧から体験したいシミュレーションを1つ選択できる。シミュレーション一覧を図4.4に示す。シミュレーションタイプは、上り坂の通過、下り坂の通過、線状ブロックの通過、平地の通過の4種類である（表4.2）。シミュレーションタイプを選択した後、ユーザは図4.3の右下のSTARTボタンを押す。そうすると、映像再生アプリケーションは選択されたシミュレーションタイプの場所を電動車椅子で走行する一人称視点の映像を表示

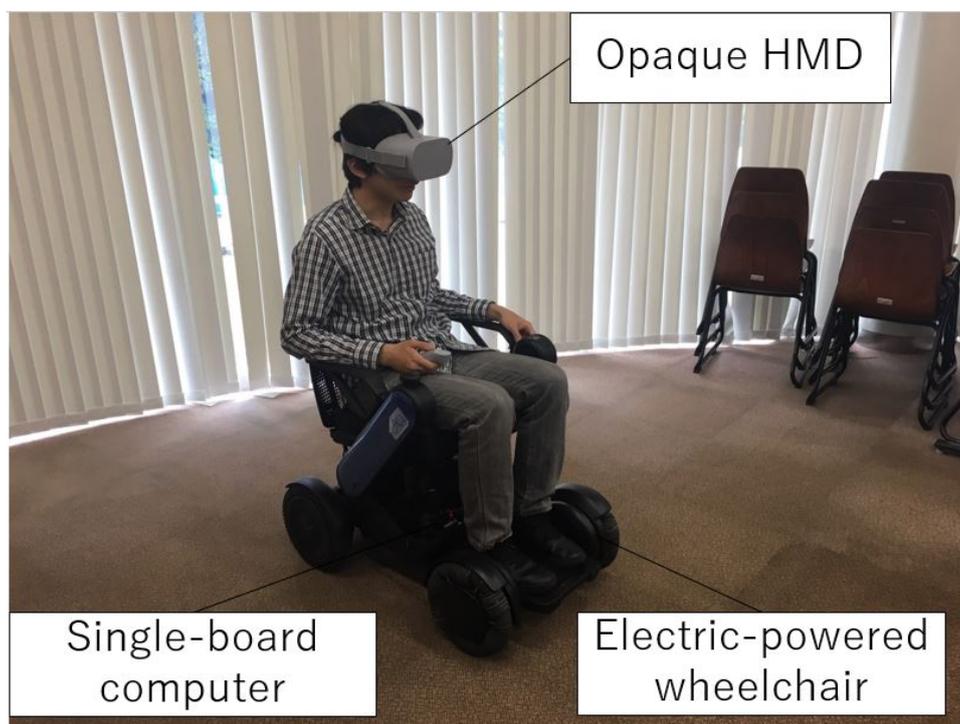


図 4.1: シミュレータの外観

する。START ボタンが押されると、映像再生アプリケーションはSBCにシミュレーション開始信号を送信する。

表 4.2: シミュレータタイプ一覧

シミュレーションタイプ名	シミュレート内容
Slope: up	上り坂の通過
Slope: down	下り坂の通過
Block: line	線状ブロックの通過
Flat	平地の通過

4.3 電動車椅子制御アプリケーションの実装

本節では、電動車椅子制御アプリケーションについて説明する。現実空間での電動車椅子の動作は、走行速度を時速 0km ～ 6km の間で設定できるようにした。道路交通法で電動車椅子の最高速度は時速 6km 以内にならなければならないと定められているため、上記の範囲で設定した [45]。SBC と電動車椅子はシリアルケーブルで接続されており、SBC 上で動作する電動車椅子制御アプリケーションはシリアル通信で電動車椅子の制御を行う。電動車椅子の制御には、電動車椅子を操作するジョイスティックの動きを制御する SetJoystick

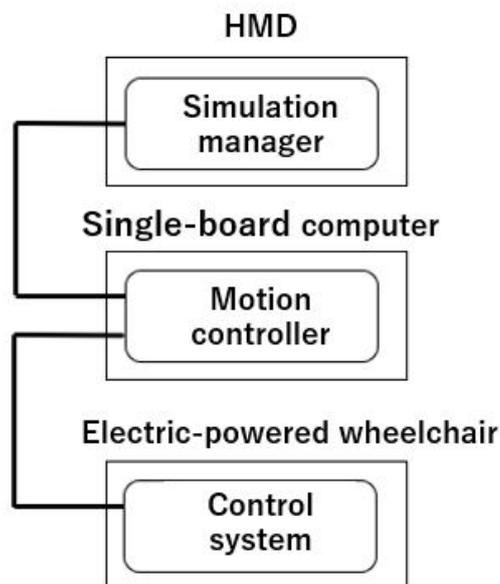


図 4.2: システム構成

コマンドを使用した [46]. このコマンドの機能を表 4.3 に示す. HMD 上のアプリケーションでシミュレーションを選択した後, SBC 上の電動車椅子制御アプリケーションは HMD からのシミュレーション開始信号を受信する. 受信した後, 電動車椅子制御アプリケーションは HMD 上で選択したシミュレーションに応じて電動車椅子の動作を制御する.

表 4.3: コマンドの機能一覧

コマンド名	コマンドの機能
SetJoystick	<ul style="list-style-type: none"> ・電動車椅子に乗るユーザのジョイスティック操作の有効/無効化 ・電動車椅子のジョイスティックの値の設定

4.4 各シミュレーションタイプの動作

本節では, 各シミュレーションタイプの HMD 上の映像と電動車椅子の動作について説明する.

4.4.1 上り坂の通過のシミュレーション

シミュレーション中に HMD で再生する映像を図 4.5 に示す. この映像のシナリオは, 最初に平地を走行するシーンから始まり, その後上り坂を通過するシーンへと遷移する流



図 4.3: HMD 上の映像再生アプリケーション

れている。現実空間の電動車椅子の動作シナリオは、HMDの映像上の電動車椅子が走行を開始すると同時に、現実空間の電動車椅子も映像上の電動車椅子と同じように走行を開始する。映像上の電動車椅子が上り坂を通過するシーンになると、現実空間の電動車椅子は減速して走行する。そして、映像上の電動車椅子が停止すると現実空間の電動車椅子も停止する。

4.4.2 下り坂の通過のシミュレーション

シミュレーション中にHMDで再生する映像を図4.6に示す。この映像のシナリオは、最初に平地を走行するシーンから始まり、その後下り坂を通過するシーンへと遷移する流れになっている。現実空間の電動車椅子の動作シナリオは、映像上の電動車椅子が平地の走行を開始すると同時に、現実空間の電動車椅子も映像上の電動車椅子と同じように走行を開始する。映像上の電動車椅子が下り坂を通過するシーンになると、現実空間の電動車椅子は加速して走行する。そして、映像上の電動車椅子が停止すると現実空間の電動車椅子も停止する。

4.4.3 線状ブロックの通過のシミュレーション

シミュレーション中にHMDで再生する映像を図4.7に示す。この映像のシナリオは、最初に平地を走行するシーンから始まり、その後線状ブロックを通過するシーンへと遷移する流れになっている。現実空間の電動車椅子の動作シナリオは、映像上の電動車椅子が平地の走行を開始すると同時に、現実空間の電動車椅子も映像上の電動車椅子と同じよう

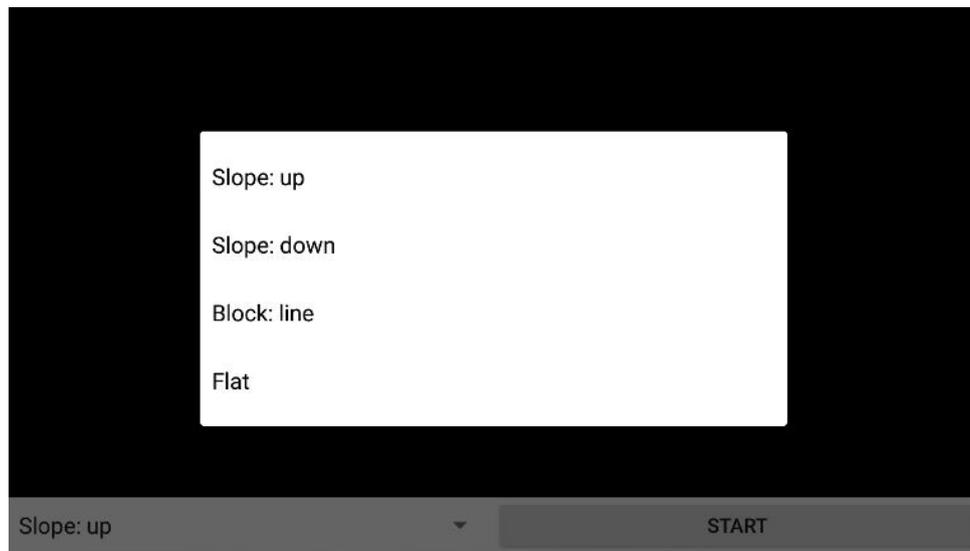


図 4.4: シミュレーション選択画面

に走行を開始する。映像上の電動車椅子が線状ブロックを通過するシーンになると、現実空間の電動車椅子は左右に大きく揺れながら走行し、最終的に揺れた方向に大きく軌道が逸れた状態で走行する。そして、映像上の電動車椅子が停止すると現実空間の電動車椅子も停止する。

4.4.4 平地の通過のシミュレーション

シミュレーション中に HMD で再生する映像を図 4.8 に示す。このシミュレーションのシナリオは、平地を通過するシーンのみになっている。現実空間の電動車椅子動作シナリオは、HMD の映像上の電動車椅子が走行を開始すると同時に、現実空間の電動車椅子も映像上の電動車椅子と同じように走行を開始する。そして、映像上の電動車椅子が停止すると現実空間の電動車椅子も停止する。



図 4.5: 上り坂を通過する際の映像



図 4.6: 下り坂を通過する際の映像



図 4.7: 線状ブロックを通過する際の映像

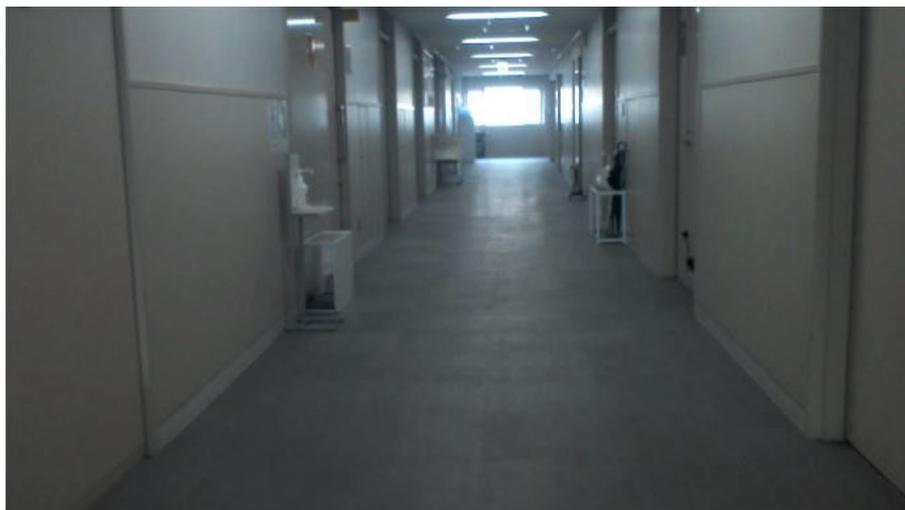


図 4.8: 平地を通過する際の映像

第5章 予備実験

5.1 実験の目的

評価実験で使用する実験条件を決めるために予備実験を行った。先行研究 [5] では VR 空間上の走行距離が 8m の場合で検証を行っていたが、評価実験は VR 空間上の走行距離が 7m と 14m の 2 パターンという先行研究とは違う走行距離で行うため、改めて予備実験を行い実験条件を設定しなおすことにした。評価実験での目的は、VR 空間上の車椅子の走行距離が長距離の場合と短距離の場合において、現実空間の電動車椅子の走行距離を様々な値に変化させた際にユーザが現実空間の走行距離と VR 空間の走行距離を同等に感じる条件がどのように変化するか明らかにすることである。しかし、評価実験には検証する対象が多く、大きな人的コストがかかってしまう。そのため、予備実験では評価実験で検証すべき対象を特定することを目的とする。今回は電動車椅子で平地を走行するシミュレーションを対象とする。

5.2 実験参加者・実験環境

予備実験の実験参加者は、研究室内の 20 代の学生 3 名であり、全員健常者である。実験参加者には、参加が任意であること、いつでも不利益無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 酔いなどの体調不良が無いことを確認した。実験では約 13m × 10m の部屋に、図 5.1 のように走行コースを構築した。実験環境を図 5.2 に示す。床は平坦であり、毛足の短いカーペットが敷いてある環境で実験を行った。また、部外者は部屋に一切入れないようにし、安全を確保した。

5.3 実験条件

まず、今回の実験において VR 空間上の走行距離が短距離の場合の走行距離を n メートル、長距離の場合を倍の $2n$ メートルとし、その 2 つで比較をすることにした。これは、VR 空間上の走行距離に倍の差があれば走行距離に十分差があると考えたためである。確保できた実験場所の制約から $n=7$ とし、VR 空間上の電動車椅子の走行距離は 7m と 14m の 2 つのパターンとした。

VR 空間上の電動車椅子の走行距離が 7m と 14m の 2 つのパターンに対して、次の手法を用意した。まず、現実空間の電動車椅子の走行距離が VR 空間上の電動車椅子の走行距離に対して 10%~90% の走行距離となるように 10% 刻みで合計 9 パターンの手法を用意した。これらの手法に加えて現実空間の電動車椅子の走行距離が VR 空間上の電動車椅子の走行距離と同じとなる手法を用意した。VR 空間上の電動車椅子の走行距離が 7m の場合の実験条件を表 5.1 に、14m の場合の実験条件を表 5.2 に示す。HMD 上で表示する映像は、図 5.3 で示すように実際に車椅子で屋内の平地を走行しながら撮影したものを使用する。映像は電動車椅子で 7m と 14m を走行する 2 種類を用意した。これらの映像は同じ場所・同じ走行開始位置で撮影した。VR 空間上の電動車椅子の走行速度は、先行研究

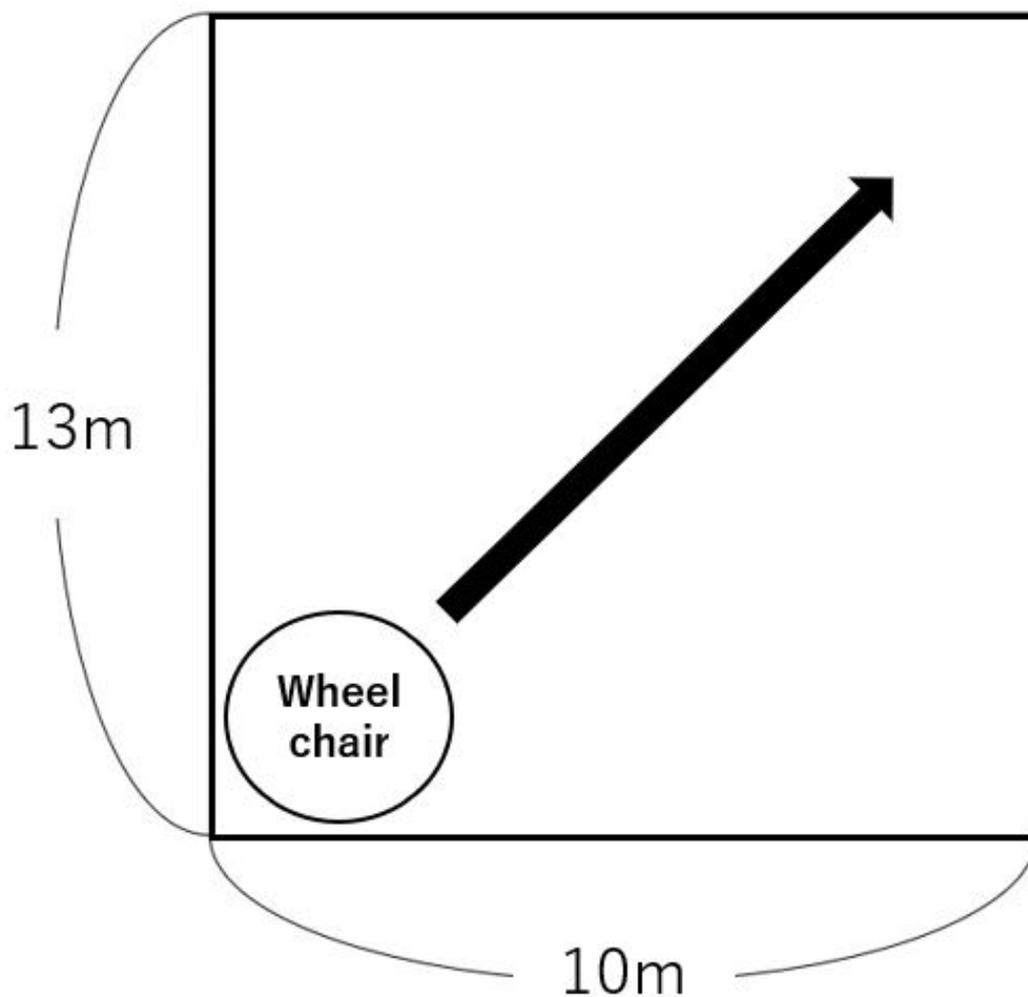


図 5.1: 実験時の走行コース

[1][2][3]の坂のシミュレーションにおいて、VR空間上の平地での走行速度が0.8m/sだったため、それを基準にして走行速度に設定した。0.8m/sで走行するため、走行時間はVR空間上の走行距離が7mの場合は8.75秒、VR空間上の走行距離14mの場合は17.5秒となっている。

5.4 実験の手順

予備実験は次の手順で実験を行った。

Step 1 : 実験者が、実験参加者にシミュレータの操作方法を説明する。



図 5.2: 実験環境

Step 2 : 実験参加者に 5.3 節で示した各走行距離パターン (7m, 14m) ・各手法 (現実空間の走行距離が, VR 空間上の走行距離の 100%, 90%, 80%, 70%, 60%, 50%, 40%, 30%, 20%, 10%) から, 順序効果を相殺するために無作為に選ばれた 1 条件を体験してもらう。

Step 3 : 実験条件のシミュレーションが終了するたびに, 実験参加者に VR 空間上の走行距離と比べ現実空間の走行距離や走行速度はどう感じたかに関するアンケート (表 5.3) に回答してもらう。

Step 4 : 全ての実験条件のシミュレーションが終了するまで Step2, Step3 を繰り返す。

Step 2 について補足する。実験参加者には, 各実験条件でシミュレーションを行う前に, 毎回 VR 空間上の電動車椅子と現実空間の電動車椅子が同じ距離を走行するシミュレーションを 1 回行ってもらった。これは, 実験参加者に HMD 上に表示される映像と同じ走行速度と走行距離で走行する感覚を覚えさせるためである。その後, 実験参加者には各実験条件について, 2 回ずつシミュレーションを行ってもらった。その際, 実験者はそれぞれのシミュレーション終了後, 実験参加者が自分の走行距離を目視で確認しないように, 実験参加者が HMD を外す前に電動車椅子をシミュレーション開始地点付近まで戻した。

表 5.1: VR 空間の走行距離が 7m の場合の実験条件

走行速度 (m/s)	走行距離 (m)	VR 空間上の走行距離と比べた割合 (%)
0.80	7.0	100
0.72	6.3	90
0.64	5.6	80
0.56	4.9	70
0.48	4.2	60
0.40	3.5	50
0.32	2.8	40
0.24	2.1	30
0.16	1.4	20
0.08	0.7	10

また、実験参加者がモーター音で移動距離を予測できないようにするために、シミュレーション中は耳栓を装着するようにした。

予備実験では実験参加者の主観的な指標で評価を行うため、回答にバイアスがかからないように次のような対策を行った。まず、実験参加者には実験目的のみ説明し、現実空間の走行距離が変化するとは伝えていなかった。また、実験条件を行う順番は現実空間の走行距離が長い順など規則的な順番にすると、参加者が次に行う条件の走行距離や走行速度がどう変化するか予想できてしまうことが考えられるため、ランダムな順番で行った。

5.5 実験の結果

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。

VR 空間上の電動車椅子の走行距離が 7m のパターンの実験条件に対する実験参加者の Q1（電動車椅子の走行距離は HMD 上の VR 空間上の走行距離と比べどう感じましたか？）の回答分布を図 5.4，Q2（HMD 上に表示される映像の場所を実際に走行しているように感じましたか？）の回答分布を図 5.5，Q3（電動車椅子の走行速度は HMD 上の VR 空間上の走行速度と比べどう感じましたか？）の回答分布を図 5.6 に示す。

VR 空間上の電動車椅子の走行距離が 14m のパターンの実験条件に対する実験参加者の Q1 の回答分布を図 5.7，Q2 の回答分布を図 5.8，Q3 の回答分布を図 5.9 に示す。

今回の実験は実験参加者が 3 人と少人数だったため、検定は行わなかった。

5.6 評価実験の実験条件の検討

本節では評価実験で使用する実験条件について検討する。最初にアンケートの回答項目について検討する。実験参加者に予備実験で使用したアンケートの回答項目についてイン

表 5.2: VR 空間の走行距離が 14m の場合の実験条件

走行速度 (m/s)	走行距離 (m)	VR 空間上の走行距離と比べた割合 (%)
0.80	14.0	100
0.72	12.6	90
0.64	11.2	80
0.56	9.8	70
0.48	8.4	60
0.40	7.0	50
0.32	5.6	40
0.24	4.2	30
0.16	2.8	20
0.08	1.4	10

表 5.3: 各実験条件終了後の実験参加者への質問一覧

質問番号	質問内容
Q1	電動車椅子の走行距離は HMD 上の VR 空間上の走行距離と比べどう感じましたか？ (短い, 同じ, 長い)
Q2	HMD 上に表示される映像の場所を実際に走行しているように感じましたか？ (はい, いいえ)
Q3	電動車椅子の走行速度は HMD 上の VR 空間上の走行速度と比べどう感じましたか？ (遅い, 同じ, 速い)
Q4	その他, 感じたことがあれば記述してください (任意回答 {記述式})

タビューを行ったところ、アンケートに回答する際に“短い”か“同じ”のどちらを回答するか迷うことがあったという意見が見られた。これは、それぞれの質問項目の回答項目が2, 3個しか用意されておらず、“やや短い”や“やや長い”といった細かい回答項目がなかったためだと考えられる。そのため、評価実験では実験参加者には7段階のリッカー尺度でアンケートに回答してもらうように設計する。

次に VR 空間上の電動車椅子の走行距離が 7m の場合と 14m の場合、それぞれの評価実験で使用する実験条件について検討する。実験条件の設定基準について説明する。まず、VR 空間上の走行距離が 7m と 14m のパターン両方で、予備実験の結果を現実空間の走行距離が VR 空間上の 90% の手法から順に確認していく。そして、最初に Q1 (電動車椅子の走行距離は HMD 上の VR 空間上の走行距離と比べどう感じましたか?) の場合は半数以上が短い、Q3 (電動車椅子の走行速度は HMD 上の VR 空間上の走行速度と比べどう感じましたか?) の場合は半数以上が遅いと回答していた条件を参加者が走行距離や速度の変化に気付く閾値とした。これは、半数以上の参加者が走行距離が短い、または走行速度が遅いと感じた場合に、参加者は走行距離の削減や走行速度の低下に気付いてしまう傾

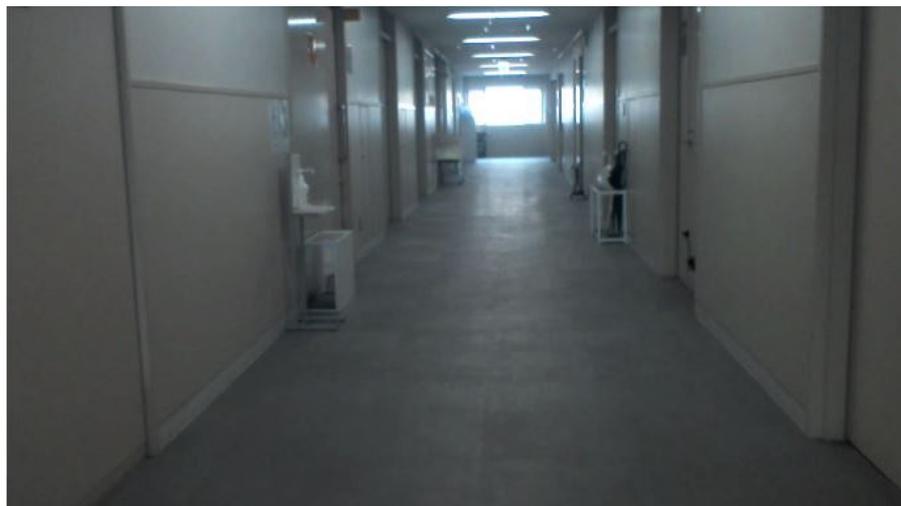


図 5.3: HMD 上で表示する映像

向にあると考えたためである。また，予備実験の参加者は3人と少なく，誤差が生じる可能性があるため，閾値の前後20%の手法を実験条件に設定した。さらに，VR空間上の走行距離が7mと14mのパターン間で比較を行えるようそれぞれの実験条件は同じものとした。5.6.1項でVR空間上の電動車椅子の走行距離が7mの場合の評価実験で使用する実験条件について検討する。5.6.2項でVR空間上の電動車椅子の走行距離が14mの場合の評価実験で使用する実験条件について検討する。

5.6.1 VR空間上の電動車椅子の走行距離が7mの実験条件の検討

現実空間の電動車椅子の走行距離がVR空間上の電動車椅子の走行距離の50%の場合において，走行距離が短いと感じた人と走行速度が遅いと感じた人が共に66%だった（図5.4，図5.6）。このことから，現実空間の電動車椅子の走行距離がVR空間上の電動車椅子の走行距離の50%の時に走行距離の違いや速度変化に気付く人が多い傾向にあると考えた。よって，評価実験では現実空間の走行距離がVR空間上の50%の走行距離のパターンとそれより走行距離が20%，10%長いまたは短いパターンを実験条件に設定する。また，これらに加えて現実空間の走行距離がVR空間上の80%の走行距離のパターンを追加し，VR空間上の走行距離が7mと14mのパターン間で比較を行えるようにする。つまり，現実空間の電動車椅子の走行距離がVR空間上の80%の走行距離のものからVR空間上の30%の走行距離のものまで10%刻みで合計6個の実験条件を用意する。

5.6.2 VR空間上の電動車椅子の走行距離が14mの実験条件の検討

現実空間の電動車椅子の走行距離がVR空間上の電動車椅子の走行距離の60%の場合において，走行距離が短いと感じた人が66%だった（図5.7）。現実空間の電動車椅子の

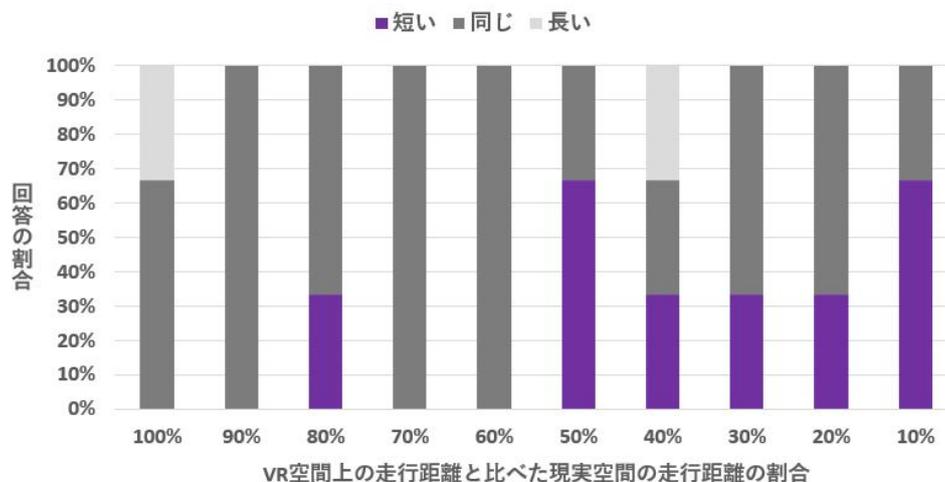


図 5.4: VR 空間上の走行距離が 7m の場合の Q1 の回答分布 (N=3)

走行距離が VR 空間上の電動車椅子の走行距離の 50% の場合において、走行速度が遅いと感じた人が 66% だった (図 5.9)。ここから、現実空間の電動車椅子の走行距離が VR 空間上の電動車椅子の走行距離の 60% の時に走行距離の違いに、現実空間の電動車椅子の走行距離が VR 空間上の電動車椅子の走行距離の 50% の時に走行速度の違いに気付く人が多い傾向にあると考えた。評価実験では現実空間の走行距離が VR 空間上の 60% の走行距離のパターンとそれより走行距離が 20%, 10% 長いパターン、現実空間の走行距離が VR 空間上の 50% の走行距離のパターンとそれより走行距離が 20%, 10% 短いパターンを実験条件に設定する。つまり、現実空間の電動車椅子の走行距離が VR 空間上の 80% の走行距離のものから VR 空間上の 30% の走行距離のものまで 10% 刻みで合計 6 個の実験条件を用意する。また、現実空間の電動車椅子の走行距離が VR 空間上の電動車椅子の走行距離の 40% の場合において、全ての実験参加者が走行距離が同じと感じていたが (図 5.7)、走行速度は遅いと感じていた (図 5.9)。これより、ユーザは走行速度の違いに気付いても、走行距離の違いには気付かない可能性がある。

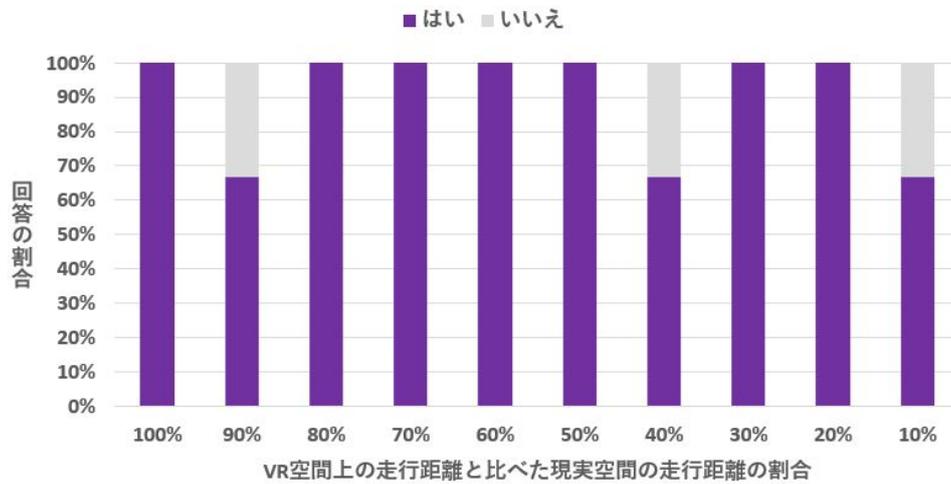


図 5.5: VR 空間上の走行距離が 7m の場合の Q2 の回答分布 (N=3)

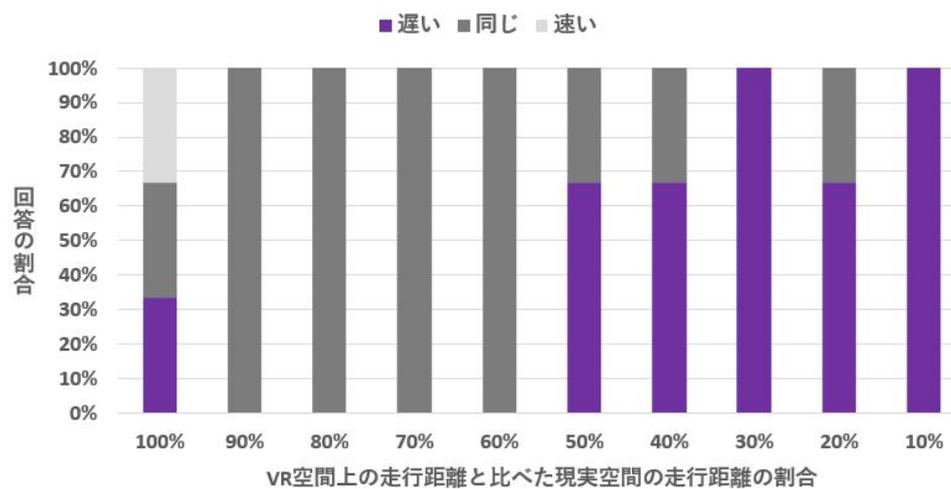


図 5.6: VR 空間上の走行距離が 7m の場合の Q3 の回答分布 (N=3)

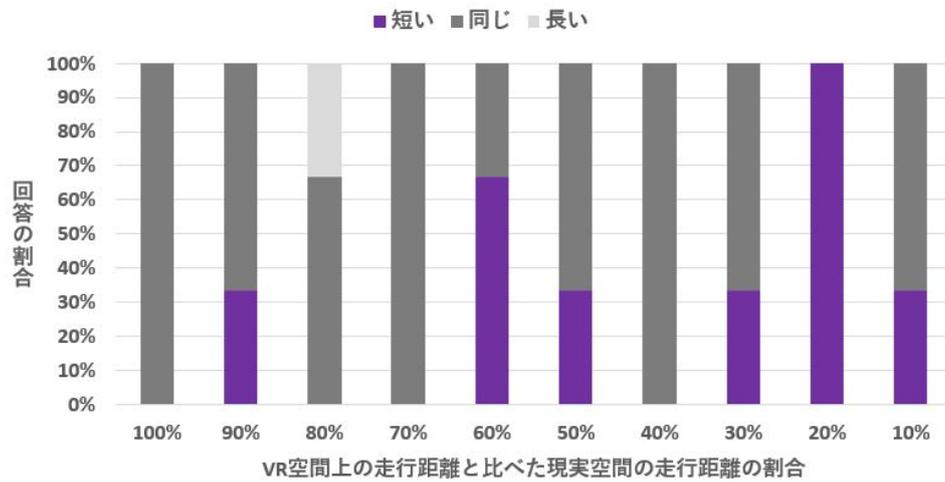


図 5.7: VR 空間上の走行距離が 14m の場合の Q1 の回答分布 (N=3)

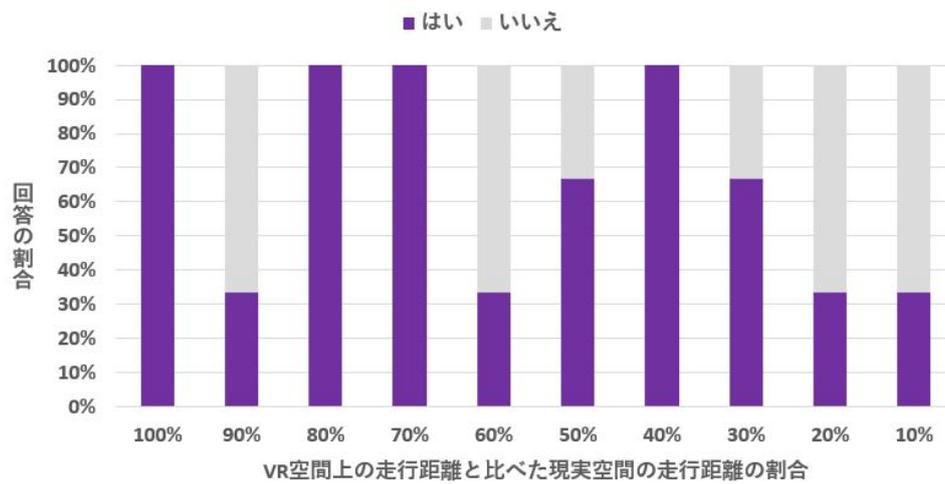


図 5.8: VR 空間上の走行距離が 14m の場合の Q2 の回答分布 (N=3)

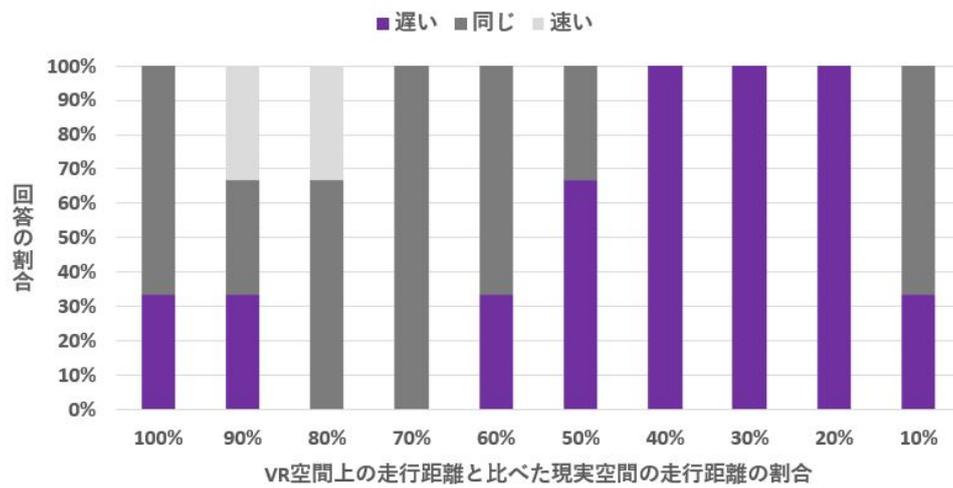


図 5.9: VR 空間上の走行距離が 14m の場合の Q3 の回答分布 (N=3)

第6章 評価実験

6.1 実験の目的

本実験の目的は、VR空間上の車椅子の走行距離が長距離の場合と短距離の場合において、現実空間の電動車椅子の走行距離を様々な値に変化させた際にユーザが現実空間の走行距離とVR空間の走行距離を同等に感じる条件がどのように変化するか明らかにすることである。今回はVR空間上の電動車椅子で平地を走行するシミュレーションを対象とする。

6.2 実験参加者・実験環境

本実験の実験参加者は、研究室内の20代の学生7名であり、全員健常者である。実験参加者には、参加が任意であること、いつでも不利益無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酔いなどの体調不良が無いことを確認した。実験では約13m×10mの部屋に、図6.1のように走行コースを構築した。実験環境を図6.2に示す。床は平坦であり、毛足の短いカーペットが敷いてある環境で行った。また、部外者は部屋に一切入れないようにし、安全を確保した。

6.3 実験条件

VR空間上の電動車椅子の走行距離が7m、14mの2つのパターンに対して、予備実験の結果を基に次の手法を用意した。まず、現実空間の電動車椅子の走行距離がVR空間上の電動車椅子の走行距離と同じとなる実験条件を用意した。この手法に加えて現実空間の電動車椅子の走行距離がVR空間上の電動車椅子の走行距離に対して80%～30%の走行距離となるように10%刻みで合計6パターンの手法を用意した。これらの手法をVR空間上の電動車椅子の走行距離が7mのパターンのものをS-1, S-2, S-3, S-4, S-5, S-6, S-7とし、電動車椅子の走行距離が14mのパターンのものをL-1, L-2, L-3, L-4, L-5, L-6, L-7とする。VR空間上の電動車椅子の走行距離が7mの場合の各実験条件を表6.1に、14mの場合の各実験条件を表6.2に示す。HMD上で表示する映像は、図6.3で示すように実際に車椅子で屋内の平地を走行しながら撮影したものを使用する。映像は電動車椅子で7mと14m走行する2種類を用意した。これらの映像は同じ場所・同じ走行開始位置で撮影した。

6.4 実験の手順

本実験は次の手順で実験を行った。

Step 1: 実験参加者に、VR空間をどの程度の頻度で体験しているかに関する事前アンケート（表6.3）に回答してもらう。

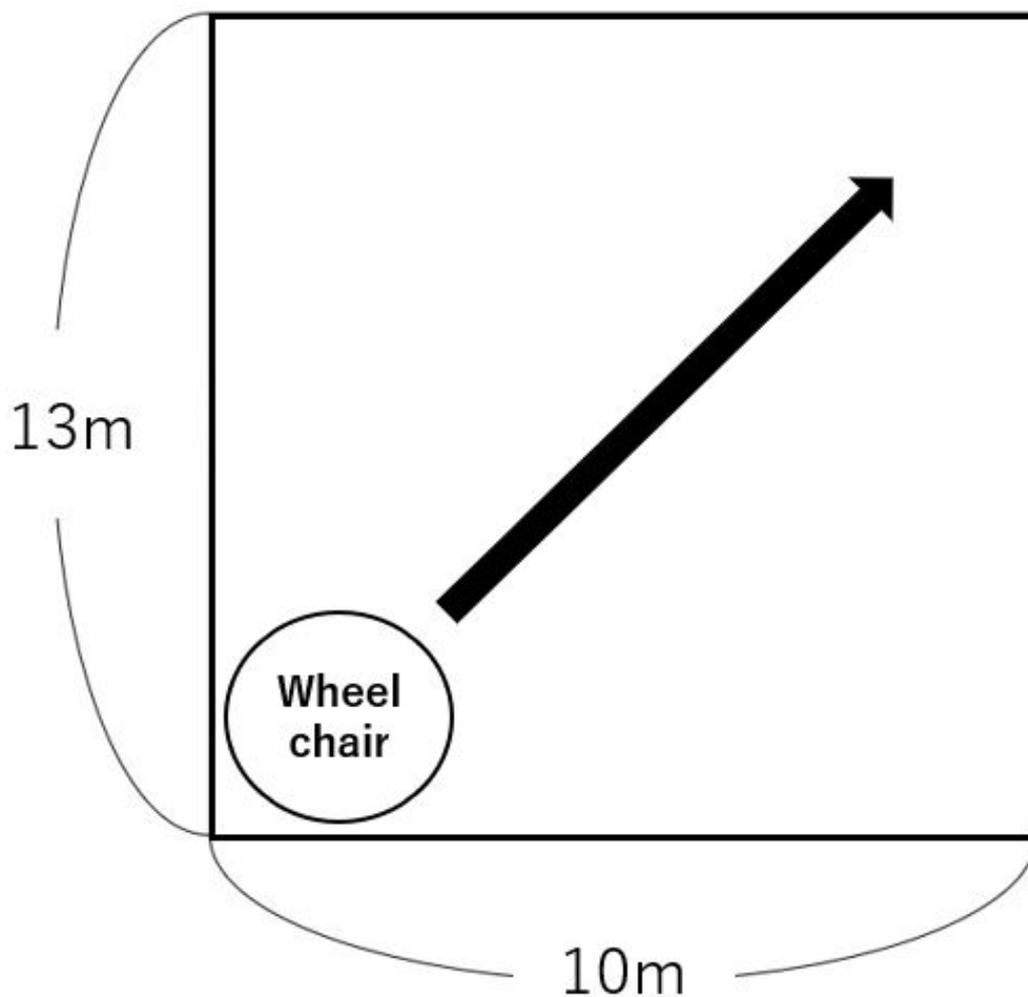


図 6.1: 実験時の走行コース

Step 2 : 実験者が, 実験参加者にシミュレータの操作方法を説明する.

Step 3 : 実験参加者に 6.3 節で示した各走行距離パターン (7m, 14m) ・各手法 (現実空間の走行距離が, VR 空間上の走行距離の 100%, 80%, 70%, 60%, 50%, 40%, 30%) から, 順序効果を相殺するために無作為に選ばれた 1 条件を体験してもらう.

Step 4 : 実験条件のシミュレーションが終了するたびに, 実験参加者に VR 空間上の走行距離と比べ現実空間の走行距離や走行速度はどう感じたかに関するアンケート (表 6.4) に回答してもらう.

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 Step3, Step4 を繰り返す.

Step 3 について補足する. 実験参加者には, 各実験条件でシミュレーションを行う前に,



図 6.2: 実験環境

毎回 VR 空間上の電動車椅子と現実空間の電動車椅子が同じ距離を走行するシミュレーションを1回行ってもらった。これは、実験参加者に HMD 上に表示される映像と同じ走行速度と走行距離で走行する感覚を覚えさせるためである。その後、実験参加者には各実験条件について、2回ずつシミュレーションを行ってもらった。その際、実験者はそれぞれのシミュレーション終了後、実験参加者が自分の走行距離を目視で確認しないように、実験参加者が HMD を外す前に電動車椅子をシミュレーション開始地点付近まで戻した。また、実験参加者がモーター音で移動距離を予測できないようにするために、シミュレーション中は耳栓を装着するようにした。

評価実験では実験参加者の主観的な指標で評価を行うため、回答にバイアスがかからないように次のような対策を行った。まず、実験参加者には実験目的のみ説明し、現実空間の走行距離が変化するとは伝えていなかった。また、実験条件を行う順番は現実空間の走行距離が長い順など規則的な順番にすると、実験参加者が次に行う条件の走行距離や走行速度がどう変化するか予想できてしまうことが考えられるため、ランダムな順番で行った。

表 6.1: VR 空間の走行距離が 7m の場合の実験条件

実験条件	走行速度 (m/s)	走行距離 (m)	VR 空間上の走行距離と比べた割合 (%)
S-1	0.80	7.0	100
S-2	0.64	5.6	80
S-3	0.56	4.9	70
S-4	0.48	4.2	60
S-5	0.40	3.5	50
S-6	0.32	2.8	40
S-7	0.24	2.1	30

表 6.2: VR 空間の走行距離が 14m の場合の実験条件

実験条件	走行速度 (m/s)	走行距離 (m)	VR 空間上の走行距離と比べた割合 (%)
L-1	0.80	14.0	100
L-2	0.64	11.2	80
L-3	0.56	9.8	70
L-4	0.48	8.4	60
L-5	0.40	7.0	50
L-6	0.32	5.6	40
L-7	0.24	4.2	30

6.5 実験の結果

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、実施したアンケートの結果について説明する。

事前アンケート（表 6.3）の B-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？）、B-Q2（どのようなデバイスで VR 空間を体験していますか？）、B-Q3（どのような場面で VR 空間を体験していますか？）の回答分布を図 6.4、図 6.5、図 6.6 に示す。

VR 空間上の電動車椅子の走行距離が 7m のパターンの実験条件に対する事後アンケート（表 6.4）の A-Q1（現実空間の電動車椅子の走行距離は HMD 上の VR 空間上の走行距離と比べどう感じましたか？）の回答分布を図 6.7 に示す。S-1 とそれ以外の実験条件間で 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。A-Q2（HMD 上に表示される映像の場所を実際に走行しているように感じましたか？）の回答分布を図 6.8 に示す。S-1 とそれ以外の実験条件間で 5%水準の Wilcoxon の符号順位検定を行ったところ、どの条件間でも有意差は認められなかった。A-Q3（現実空間の電動車椅子の走行速度は HMD 上の VR 空間上の走行速度と比べどう感じましたか？）の回答分布を図 6.9 に示す。S-1 とそれ以外の実験条件間で 5%水準の Wilcoxon の符号順位検定を行ったところ、S-1・S-2 間、S-1・S-3 間、S-1・S-4 間、S-1・S-5 間、S-1・S-6 間、S-1・S-7 間で p 値がそれぞれ 0.025, 0.023, 0.016, 0.039, 0.016, 0.039 となり、これらの条件

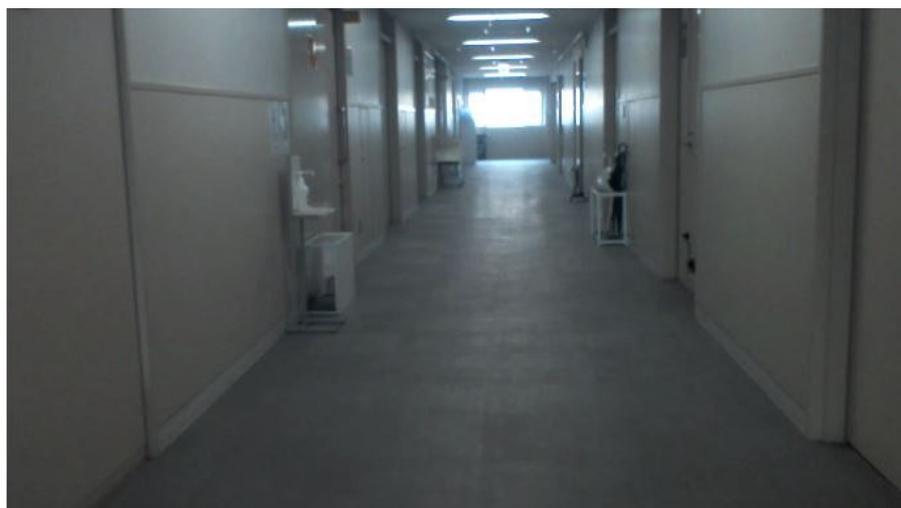


図 6.3: HMD 上で表示する映像

間に有意差を確認した。

VR空間上の電動車椅子の走行距離が14mのパターンの実験条件に対する事後アンケート（表6.4）のA-Q1の回答分布を図6.10を示す。L-1とそれ以外の実験条件間で5%水準のWilcoxonの符号順位検定を行ったところ、どの条件間でも有意差は認められなかった。A-Q2の回答分布を図6.11に示す。L-1とそれ以外の実験条件間で5%水準のWilcoxonの符号順位検定を行ったところ、どの条件間でも有意差は認められなかった。A-Q3の回答分布を図6.12に示す。L-1とそれ以外の実験条件間で5%水準のWilcoxonの符号順位検定を行ったところ、L-1・L-2間、L-1・L-3間、L-1・L-4間、L-1・L-5間、L-1・L-6間、L-1・L-7間でp値がそれぞれ0.033, 0.033, 0.033, 0.041, 0.023, 0.025となり、これらの条件間に有意差を確認した。

VR空間上の走行距離が7mと14mのパターンで現実空間の走行距離の割合が同じ条件間（S-1・L-1間、S-2・L-2間、S-3・L-3間、S-4・L-4間、S-5・L-5間、S-6・L-6間、S-7・L-7間）について質問項目毎に5%水準のWilcoxonの符号順位検定を行ったところ、どの条件間でも有意差は認められなかった。

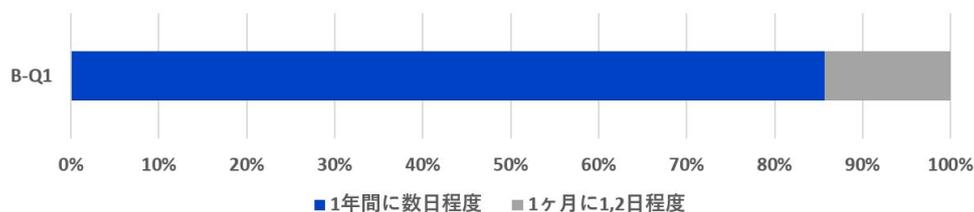


図 6.4: 事前アンケートのB-Q1の回答分布 (N=7)

表 6.3: 実験前の実験参加者への質問一覧

質問内容	回答項目
B-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
B-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 (専用デバイスで実現, 現実空間が見えないもの) 2: 密閉型 HMD (スマートフォンで実現, 現実空間が見えないもの) 3: 透過型 HMD (専用デバイスで実現, 現実空間が見えるもの) 4: 透過型 HMD (スマートフォンで実現, 現実空間が見えるもの) 5: 普段 VR 空間を体験していない 6: その他 (記述式)
B-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 6.4: 各実験条件終了後の実験参加者への質問一覧

質問内容	回答項目
A-Q1: 現実空間の電動車椅子の走行距離は HMD 上の VR 空間上の走行距離と比べてどう感じましたか?	1: 短い~4: 同じ~7: 長い
A-Q2: HMD 上に表示される映像の場所を実際に走行しているように感じましたか?	1: 感じない~7: 感じた
A-Q3: 現実空間の電動車椅子の走行速度は HMD 上の VR 空間上の走行速度と比べてどう感じましたか?	1: 遅い~4: 同じ~7: 速い
A-Q4: その他, 感じたことがあれば記述してください	任意回答 (記述式)

6.6 考察

参加者の属性についての考察を 6.6.1 項に, VR 空間上の走行距離が 7m のパターンについての考察を 6.6.2 項に, VR 空間上の走行距離が 14m のパターンについての考察を 6.6.3 項に, VR 空間上の走行距離が 7m と 14m のパターンの比較を 6.6.4 項に, 本実験で得られた知見を 6.6.5 項に, 今後の課題を 6.6.6 項に示す。

6.6.1 参加者の属性についての考察

事前アンケートの B-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?) の回答結果 (図 6.4) では, 全ての参加者が“1 年間に数日程度”または“1ヶ月に 1,2 日程度”と回答していた。これより, 実験参加者は VR 空間の体験を日常的に行っていないため, VR 空間の体験に不慣れだと考えられる。また, 事前アンケートの B-Q3 (どのような場面で VR 空間を体験していますか?) の回答結果 (図 6.6) では, 実験参加者の 71% が“ゲーム”または“ゲーム以外の娯楽”と回答していた。このことから, 今回の実験参加者の多くは車椅子シミュレータのような訓練目的ではなく, 主に娯楽目的で VR 空間を体験していると考えられる。これらのことから, 本実験では実験参加者全員が日常的に VR 空間を体験しておらず, さらに参加者の多くは主に娯楽目的で VR 空間を体験していると考えられる。

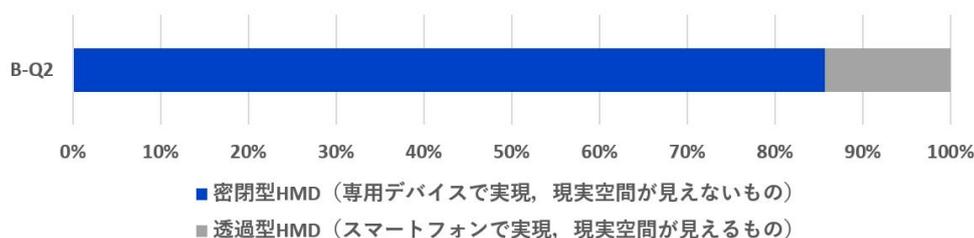


図 6.5: 事前アンケートの B-Q2 の回答分布 (N=7)

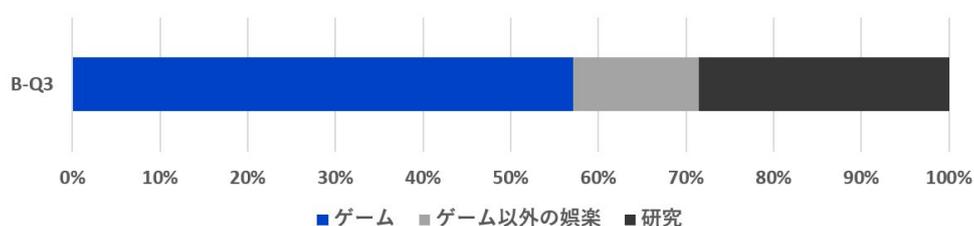


図 6.6: 事前アンケートの B-Q3 の回答分布 (N=7)

6.6.2 VR 空間上の走行距離が 7m のパターンについての考察

A-Q1 (図 6.7) の回答結果では、有意差が確認できなかった。そのため、現実空間の走行距離を圧縮してもユーザに気付かれない条件を特定できていないという結果となった。これは実験参加者数が少ないことに起因するものと考えられるため、引き続き実験参加者を増やして調査を行う必要がある。A-Q3 (図 6.9) の回答結果から、現実空間の走行距離が VR 空間上の走行距離と同じ手法 (S-1) は実験参加者の 71% が速いと感じていたことに対し、現実空間の走行距離が VR 空間上の走行距離の 80%, 70%, 60%, 50%, 40%, 30% の手法 (S-2, S-3, S-4, S-5, S-6, S-7) の場合は実験参加者の 14% が速いと感じていた。これより、現実空間の走行距離が VR 空間上の走行距離と同じ手法 (S-1) の方が他の手法より実験参加者は走行速度が速いと感じる傾向にあると考えられる。また、現実空間の走行距離が VR 空間上の走行距離と同じ手法 (S-1) は走行速度が遅いと感じた実験参加者はいなかった。加えて、走行距離が同じと感じた実験参加者は半数に満たなかった。このことから、現実空間の走行距離・走行速度が VR 空間上のものと同じでも、実験参加者の多くは走行速度が速いと感じたため、走行距離に違和感を覚え、走行距離が同じと感じなかった可能性がある。

6.6.3 VR 空間上の走行距離が 14m のパターンについての考察

A-Q1 (図 6.10) の回答結果では、有意差を確認することができなかった。そのため、現実空間の走行距離を圧縮してもユーザに気付かれない条件を特定できていないという結果となった。これは実験参加者数が少ないことに起因するものと考えられるため、

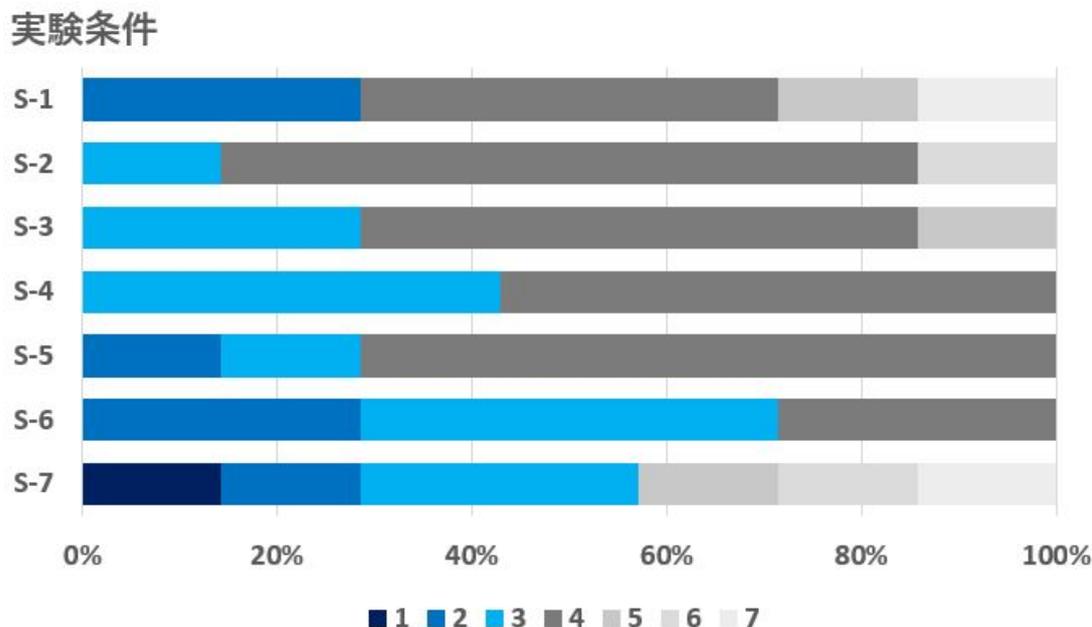


図 6.7: VR 空間上の走行距離が7m の場合の A-Q1 の回答分布 (N=7)

引き続き実験参加者を増やして調査を行う必要がある。A-Q3 (図 6.12) の回答結果から、現実空間の走行距離が VR 空間上の走行距離の 80%, 70%, 60%, 50%, 40%, 30% の手法 (L-2, L-3, L-4, L-5, L-6, L-7) の場合はそれぞれ実験参加者の 42%, 28%, 42%, 42%, 57%, 57% が遅いと感じていたことに対し、現実空間の走行距離が VR 空間上の走行距離と同じ手法 (L-1) は遅いと感じた実験参加者はいなかった。これより、現実空間の走行距離を圧縮した手法 (L-2, L-3, L-4, L-5, L-6, L-7) は現実空間の走行距離が VR 空間上の走行距離と同じ手法 (L-1) より実験参加者は走行速度が遅いと感じる傾向にあると考えられる。また、現実空間の走行距離が VR 空間上の走行距離と同じ手法 (L-1) は実験参加者の 57% が走行速度が同じと感じていたが、他の手法 (L-2, L-3, L-4, L-5, L-6, L-7) では実験参加者の半数以上が同じと回答したものはなかった。しかし、現実空間の走行距離が VR 空間上の走行距離の 80% と 50% の手法 (L-2, L-5) では実験参加者の半数以上が走行距離が同じと感じていた。このことから、実験参加者は走行速度の変化に気が付いても、走行距離の変化に気が付かない可能性がある。

6.6.4 VR 空間上の走行距離が 7m と 14m のパターンの比較

VR 空間上の走行距離が 7m のパターンと 14m のパターン間では現実空間の走行距離の割合が同じ手法間 (S-1・L-1 間, S-2・L-2 間, S-3・L-3 間, S-4・L-4 間, S-5・L-5 間, S-6・L-6 間, S-7・L-7 間) で有意差が認められなかった。これより、VR 空間上の走行距離が短距離・長距離の手法間で、実験参加者が現実空間と VR 空間の走行距離・走行速度を同

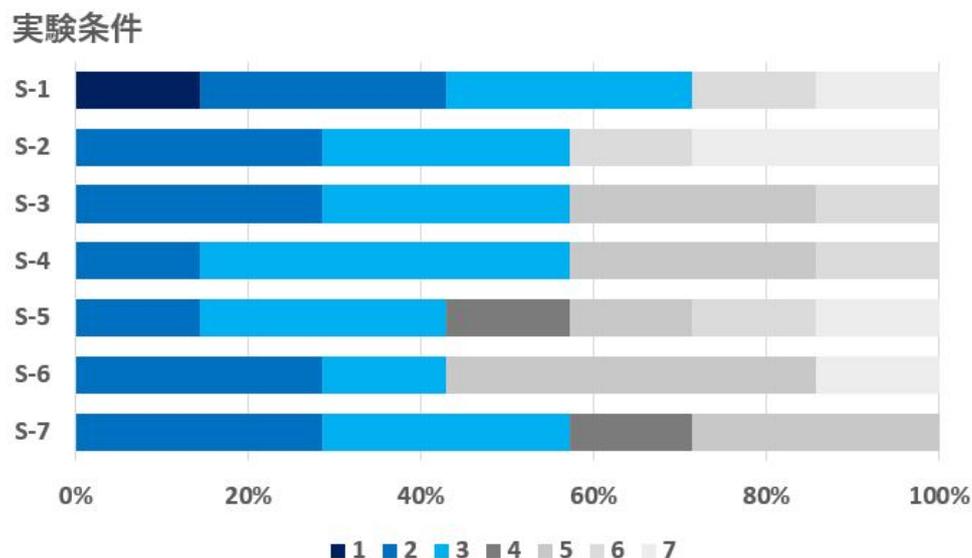


図 6.8: VR 空間上の走行距離が7m の場合の A-Q2 の回答分布 (N=7)

等と感じる条件に差が生じるとは言えないことが示唆される。また、VR 空間上の走行距離が7m と14m の両方のパターンにおいて、現実空間の走行距離がVR 空間上の走行距離と同じ手法 (S-1, L-1) は、実験参加者は走行速度が遅いと感じず、他のどの手法より走行速度が速いと認識できていた。加えて、現実空間の走行距離がVR 空間上の走行距離と同じ手法 (S-1, L-1) は、実験参加者は他のどの手法より走行距離が長いと認識できていたとは言えない傾向にあった。このことから、VR 空間上の走行距離が短距離・長距離の場合の両方で、実験参加者は現実空間の電動車椅子の走行距離の変化より速度変化の方が気付きやすい傾向にあると考えられる。ただし、今回は実験参加者が7人と少なく、VR 空間上の走行距離が2つのパターンでしか検証していないため、参加者を増やしVR 空間の走行距離を様々に変化させた場合で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。また、VR 空間の走行距離が7m と14m のパターン間で現実空間の走行距離の割合が同じ条件間でA-Q1 (図6.7, 図6.10) の結果を比較すると、VR 空間の走行距離が7m より14mの方が走行距離が長いと感じた参加者が多く見られた。ここから、VR 空間上の走行距離が長くなると、参加者が現実空間の走行距離が長いと感じる傾向にある可能性があるが、これが普遍的なものであるか検証していく必要がある。

6.6.5 本実験で得られた知見

本実験で得られた知見は次の通りである。

- VR 空間上の走行距離が短距離・長距離の手法間で、実験参加者が現実空間とVR 空間の走行距離・走行速度を同等と感じる条件に差が生じるとは言えない。

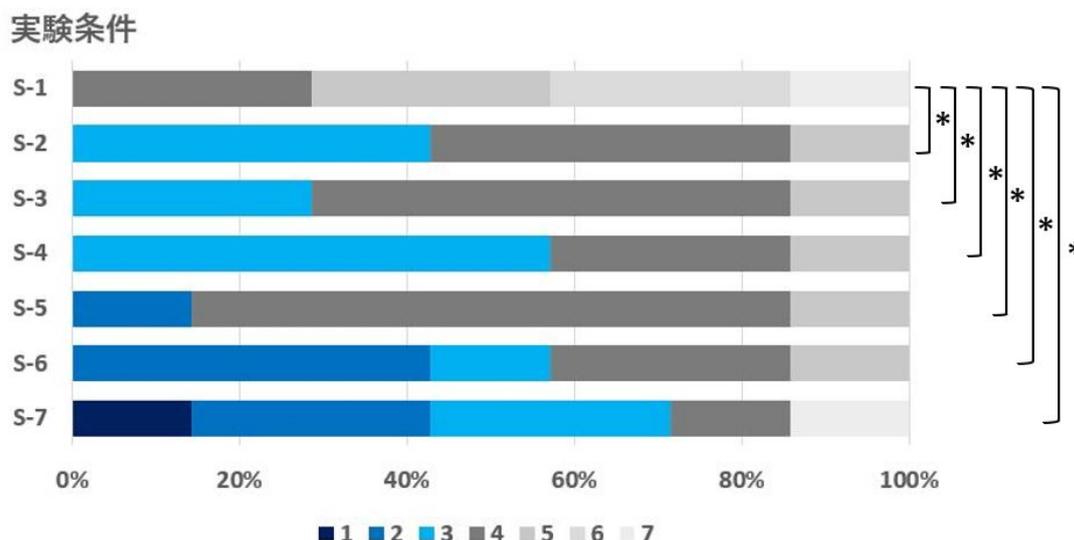


図 6.9: VR 空間上の走行距離が7m の場合の A-Q3 の回答分布 (N=7)
(* : $p < 0.05$)

- VR 空間上の走行距離が短距離・長距離の場合の両方で，実験参加者は現実空間の電動車椅子の走行距離の変化より速度変化の方が気づきやすい傾向にある。

また，先行研究 [5] と本実験では実験条件が異なるため厳密な比較はできないが，VR 空間上の走行距離が7m の場合に現実空間の走行距離を VR 空間上の走行距離の50%まで圧縮しても，短いと感じた実験参加者が半数に満たなかったことが先行研究と類似している。また，今回得られた VR 空間上の走行距離が短距離・長距離の場合の両方で，実験参加者は現実空間の電動車椅子の走行距離の変化より速度変化の方が気づきやすい傾向にあるという知見は先行研究では明らかにできなかった知見である。

しかし，本実験で得られた知見には大きく分けて2つの制限がある。

1点目は，本実験の参加者が日常的に VR 空間を体験していなかった点である。そのため，VR 空間の体験を日常的に行っているユーザを対象に実験を行った場合，違う結果が得られるかもしれない。

2点目は，実験参加者が7人と少人数だった点である。今後実験参加者を増やして調査を行う必要がある。

6.6.6 今後の課題

今後の課題は次に示す3点を考えている。

1点目は VR 空間の走行距離のパターンを増やして検証することである。今回の実験では特定の VR 空間の走行距離のシミュレーションのみの検証を行った。今回行った7m と14m 以外にも様々な VR 空間の距離を走行するシミュレーションも多く存在している。そ

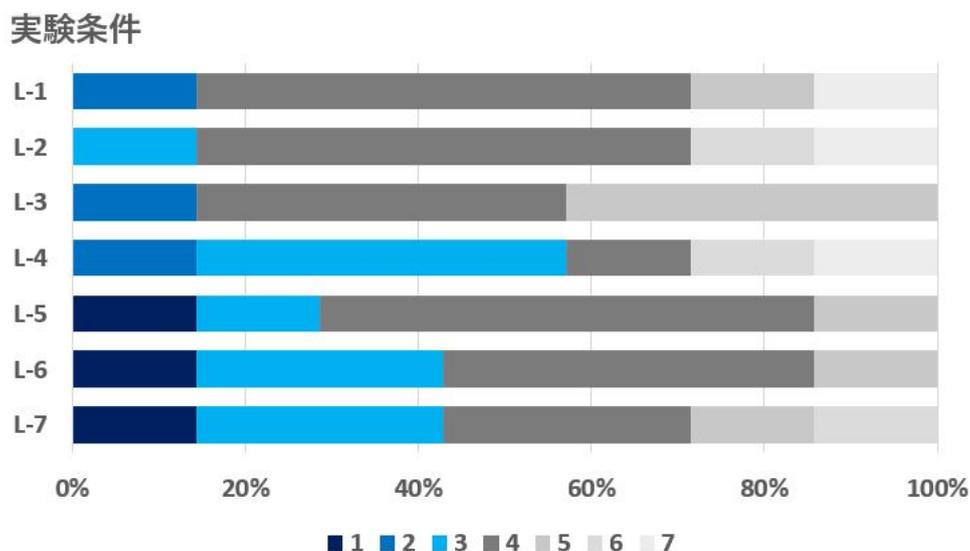


図 6.10: VR 空間上の走行距離が 14m の場合の A-Q1 の回答分布 (N=7)

のため、今後はどのような距離のシミュレーションが求められているのか調査し、それらについて検証していく予定である。加えて、いくつかの走行距離で知見を蓄積することで、走行距離と気付きやすさの関係などを数式でモデル化することも視野に入れている。

2点目は現実空間の電動車椅子の加速度がユーザが知覚する走行距離に影響を与えるか検証を行うことである。今回はVR空間と現実空間の電動車椅子の走行速度は一定の速度であり、加速度に関する評価を行っていなかった。現実空間の電動車椅子の加減速がユーザが知覚する走行距離に影響を与えるか検証していく予定である。加えて、現実空間の走行速度が等速の場合でも、電動車椅子の発進・停止時に加速・減速を行うため、急発進・急停止などの発進・停止時の挙動がユーザが知覚する走行距離に影響を与えるか検証していく予定である。

3点目は歩行シーンにおける現実空間に必要なスペースを削減する手法を車椅子シミュレータに応用できるか検証することである。今回の検証ではユーザが現実空間の走行距離とVR空間の走行距離を同等に感じる条件を調査していたが、それだけでは削減できる現実空間の距離に限界があると考えられる。そのため、2.3節で紹介したRDWのようにユーザに気付かれないように現実空間の電動車椅子を方向転換させることでシミュレーションに必要なスペースを削減できるかなどを検証していく予定である。

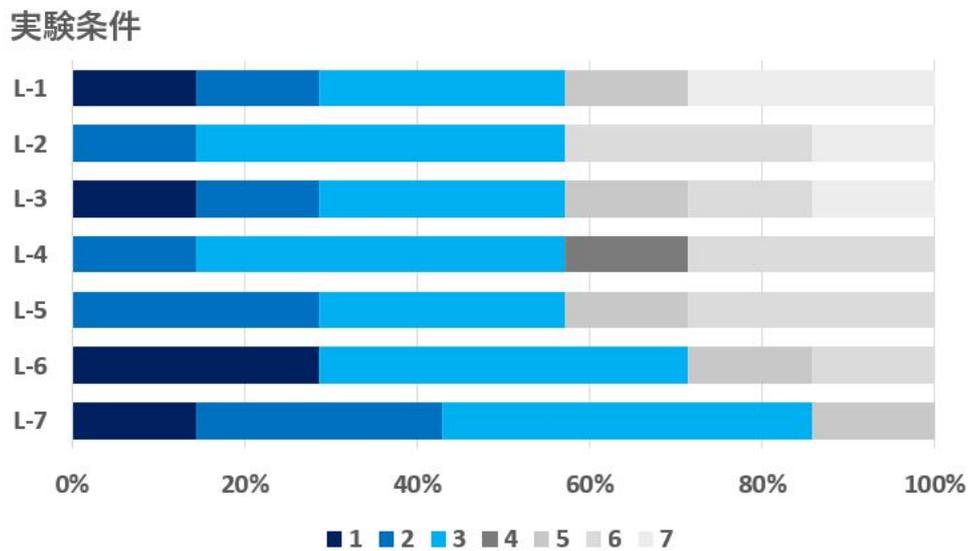


図 6.11: VR 空間上の走行距離が 14m の場合の A-Q2 の回答分布 (N=7)

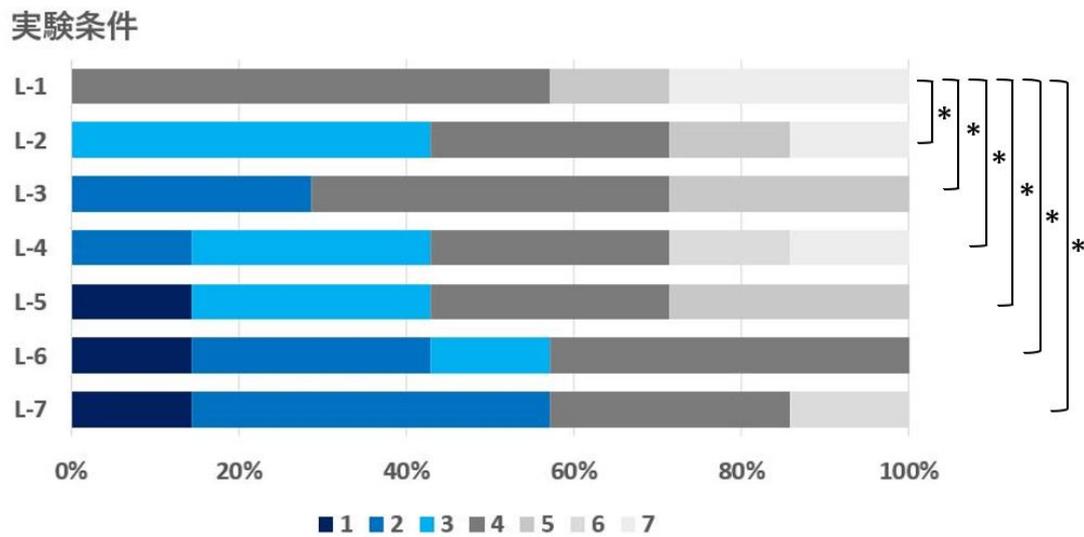


図 6.12: VR 空間上の走行距離が 14m の場合の A-Q3 の回答分布 (N=7)
 (* : $p < 0.05$)

第7章 結論

先行研究では、HMDと電動車椅子を用いたVR車椅子シミュレータの現実空間における移動距離を削減するための初期検討として、平地での電動車椅子の現実空間における移動の振る舞いと、ユーザがVR空間で知覚する移動距離の関係を明らかにする研究を行ってきた。具体的には、先行研究では平地を電動車椅子で8m走行するシミュレーションにおいて、現実空間の電動車椅子の走行距離や走行速度を様々に変化させた際に、ユーザが現実空間とVR空間の走行距離を同等に感じる条件を調査していた。しかし、この研究は短距離の平地を移動するという限定的なシーンのシミュレーションで調査を行っていたため、長距離でのシミュレーションなど他のシーンにおいて、ユーザが現実空間とVR空間の走行距離を同等に感じる条件がどのようなようになるのか不明であった。

そこで、VR空間上の車椅子の走行距離が長距離の場合と短距離の場合において、現実空間の電動車椅子の走行距離を様々な値に変更した際にユーザが現実空間の走行距離とVR空間の走行距離を同等に感じる条件がどのように変化するか明らかにすることを研究課題として設定した。そして、この研究課題を達成するためにVR空間上の電動車椅子が7mと14mの場合において、現実空間の電動車椅子の走行距離を様々に変化させた時、実験参加者がVR空間上の走行距離と比べ現実空間の走行距離や走行速度をどう感じるか調査を行った。その結果、VR空間上の走行距離が短距離・長距離の手法間で、実験参加者が現実空間とVR空間の走行距離・走行速度を同等と感じる条件に差が生じるとは言えなかった。今後、実験参加者を増やし、VR空間上の走行距離が短距離・長距離の手法間で、実験参加者が現実空間とVR空間の走行距離・走行速度を同等と感じる条件に差が生じるかどうか検証を継続する必要がある。また、VR空間上の走行距離が短距離・長距離の両方のパターンにおいて、現実空間の走行距離がVR空間上の走行距離と同じ手法は、実験参加者は走行速度が遅いと感じず、他のどの手法より走行速度が速いと認識できていた。加えて、現実空間の走行距離がVR空間上の走行距離と同じ手法は、実験参加者は他のどの手法より走行距離が長いと認識できていたとは言えない傾向にあった。このことから、VR空間上の走行距離が短距離・長距離の場合の両方で、実験参加者は現実空間の電動車椅子の走行距離の変化より速度変化の方が気付きやすい傾向にあることが示唆された。

なお、この実験結果には制約が残っている。まず、本実験の参加者が日常的にVR空間を体験していなかった点である。そのため、VR空間の体験を日常的に行っているユーザを対象に実験を行った場合、今回とは違う結果が得られる可能性がある。この点は、今後VR空間の体験を頻繁に行っている人を対象に実験を行うことで明らかになると考えられる。また、今回の検証はVR空間上の走行距離が2つのパターンでしか検証していない。そのため、その他の走行距離のVR空間で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。

上記の制約に加え、今後の課題をいくつか述べる。まず、本研究の実験は平地のシミュレーションで行ったが、坂道や不均一な道路などのバリアを通過するシミュレーションで、走行距離を圧縮できるかどうかを検証していく必要がある。また、今回の実験は参加者が7人だったため、今後は実験参加者の人数を増やし、VR空間上の電動車椅子が短距離・長距離のパターン間でユーザが感じる走行距離・走行速度に差が生じるか検証していく予定である。

参考文献

- [1] 宇野広伸, 呉健朗, 樋口恭佑, 篠崎涼太, 宮田章裕: 電動車椅子を用いたバリアシミュレーションシステムの基礎検討. 情報処理学会 DICOMO2018 論文集, Vol.2018, pp.421-426, 2018.
- [2] 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.
- [3] Akihiro Miyata, Hironobu Uno, Kenro Go, Kyosuke Higuchi and Ryota Shinozaki: Study on VR-Based Wheelchair Simulator Using Vection-Inducing Movies and Limited-Motion Patterns. Proc. the 24th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology (VRST 2018), Article No.121, 2018.
- [4] 呉健朗, 宇野広伸, 本岡宏將, 樋口恭佑, 宮田章裕: Vection 誘発映像による凹凸バリアシミュレータの基礎検討. 日本バーチャルリアリティ学会 VR 学研報, Vol.23, No. CS-4, pp.3-6, 2018.
- [5] 本岡宏將, 大河原巧, 呉健朗, 大和佑輝, 宮田章裕: HMD と電動車椅子を用いたバリアシミュレータの移動距離削減の基礎検討. 日本バーチャルリアリティ学会第 24 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 6B-04, 2019.
- [6] Manuel Desbonnet, Sara L. Cox, and Abdur Rahman. Development and Evaluation of a Virtual Reality based Training System for Disabled Children. Proc. ICDVRAT 1998, pp.177-182, 1998.
- [7] Yann Morre, Guy Bourhis, Kvin Cosnauu, Georges Guilmois Emmanuelle Blangy, and milie Rumilly. ViEW, a Wheelchair Simulator for Driving Analysis. Proc. ICVR 2015, pp.100-105, 2015.
- [8] Nancy Rodriguez. Development of a Wheelchair Simulator for Children with Multiple Disabilities. Proc. VAAT 2015, pp.1-4, 2015.
- [9] Catherine Bigras, Dahlia Kairy, and Philippe S. Archambault. Augmented Feedback for Powered Wheelchair Training in a Virtual Environment. Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation, 16, 1, 2019.

-
- [10] Felipe R. Martins, Eduardo L. M. Naves, Yann Morère, and Angela A. R. De Sá. Preliminary Assessment of a Multimodal Electric-Powered Wheelchair Simulator for Training of Activities of Daily Living. *Journal on Multimodal User Interfaces*, 2021.
- [11] 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* 24, pp.1867–1878, 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. *Studies in Health Technology and Informatics*, 220, pp.134-141, 2016.
- [13] Yuri Motta Silva, Walter Simes, Mauro Ricardo da Silva Tefilo, and Eduardo L M Naves. Training Environment for Electric Powered Wheelchairs Using Teleoperation Through a Head Mounted Display. *Proc. ICCE 2018*, 2018.
- [14] Kevin A. Hernandez-Ossa, Eduardo H. Montenegro-Couto, Berthil Longo, Alexandre Bisoli, Mariana M. Sime, Hilton M. Lessa, Ivan R. Enriquez, Anselmo Frizera-Neto, and Teodiano Bastos-Filho. Simulation System of Electric-Powered Wheelchairs for Training Purposes. *Sensors*, 20, 12, 3565, 2020.
- [15] Louise Devigne, Marie Babel, Florian Nouviale, Vishnu K. Narayanan, Francois Pasteau, and Philippe Gallien. Design of an Immersive Simulator for Assisted Power Wheelchair Driving. In *Proceedings of the 2017 International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR'17)*. IEEE, pp.995-1000, 2017.
- [16] Chiara Genova, Emilia Biffi, Sara Arlati, Davide Felice Redaelli, Alessio Prini, Matteo Malosio, Claudio Corbetta, Angelo Davalli, Marco Sacco, and Gianluigi Reni. A Simulator for Both Manual and Powered Wheelchairs in Immersive Virtual Reality Cave. *Virtual Reality*, 2021.
- [17] Abdulaziz Alshaer, Holger Regenbrecht, and David O ' Hare. Immersion Factors Affecting Perception and Behaviour in a Virtual Reality Power Wheelchair Simulator. *Applied Ergonomics*, 58, pp.1-12, 2017.
- [18] Pithon Thomas, Weiss Tamar, Richir Shimon, and Klinger Evelyne. Wheelchair simulators: A review. In *Technology and Disability*, Vol. 21, pp. 1–10, 2009.
- [19] Sara Arlati, Vera Colombo, Giancarlo Ferrigno, Rinaldo Sacchetti and Marco Sacco. Virtual reality-based wheelchair simulators: A scoping review. *Assistive Technology*, Volume 32, Issue 6, 2019.

-
- [20] 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.
- [21] 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. Proc. AutomotiveUI'21, pp.26-29, 2021
- [22] D. Stewart. A Platform with Six Degrees of Freedom. Proc. the UK Institution of Mechanical Engineers, Vol.180, No.1, pp.371-386, 1965.
- [23] Ajay Sonar, K.D. Burdick, Ryan R. Begin, and James J. Carroll. Development of a Virtual Reality-based Power Wheel Chair Simulator. Proc. ICMA 2005, pp.222-229, 2005.
- [24] Hafid Niniss and Takenobu Inoue. Electric Wheelchair Simulator for Rehabilitation of Persons with Motor Disability. Proc. SVR 2006, 2006.
- [25] 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. Jnl. Universal Computer Science, Vol.20, No.12, pp.1629-1648, 2014.
- [26] 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 Proceedings of the 2021 IEEE Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR'21). IEEE, pp.420-427, 2021.
- [27] Johannes Dichgans and Thomas Brandt. Visual-vestibular interaction: Effects on self-motion perception and postural control. In Handbook of Sensory Physiology, 1978.
- [28] Stephen Palmisano, Robert S. Allison, Mark M. Schira, and Robert J. Barry. Future challenges for vection research: Definitions, functional significance, measures, and neural bases. In Frontiers in Psychology, Vol. 6, pp. 1–15, 2 2015.
- [29] 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.
- [30] Bernhard E. Riecke. Simple user-generated motion cueing can enhance self-motion perception (vection) in virtual reality. In Proc. VRST 2006, 2006.
- [31] Bernhard E. Riecke, F. Caniard and Joerg schulte pelkum. Visually induced linear vection is enhanced by small physical accelerations. In Proc. IMRF 2006, 2006.

-
- [32] 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. In Vestibular Research*, Vol. 15, pp.185–195, 2005.
- [33] 鈴木亮太, 中村優介, 福田悠人, 小林貴訓, 久野義徳. ベクションを用いたパーソナルモビリティの誘導. 情報処理学会 インタラクション 2017, 2017.
- [34] Maiya Hori, Masayuki Kanbara, and Naokazu Yokoya. A mixed reality telepresence system with limited dof motion base and immersive display. In *Proc. ACE 2009*, 2009.
- [35] Sharif Razzaque, Zachariah Kohn and Mary C. Whitton. Redirected Walking. *Eurographics 2001*, Vol.9, pp.105-106, 2001.
- [36] 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.
- [37] Luke Bolling, Niklas Stein, Frank Steinicke and Markus Lappe. Shrinking Circles: Adaptation to Increased Curvature Gain in Redirected Walking. *IEEE VR 2019*, 2019.
- [38] Jerald Thomas and Evan Suma Rosenberg. A General Reactive Algorithm for Redirected Walking using Artificial Potential Functions. *IEEE VR 2019*, 2019.
- [39] Justin Messinger, Eric Hodgson and Eric R. Bachmann. Effects of Tracking Area Shape and Size on Artificial Potential Field Redirected Walking *IEEE VR 2019*, 2019.
- [40] Dong-Yong Lee, Yong-Hun Cho and In-Kwon Lee. Real-time Optimal Planning for Redirected Walking Using Deep Q-Learning. *IEEE VR 2019*, 2019.
- [41] Eric R. Bachmann, Eric Hodgson, Cole Hoffbauer and Justin Messinger. Multi-User Redirected Walking and Resetting Using Artificial Potential Fields. *IEEE VR 2019*, 2019.
- [42] Keigo Matsumoto, Yuki Ban, Takuji Narumi, Yohei Yanase, Tomohiro Tanikawa and Michitaka Hirose. Unlimited Corridor: Redirected Walking Techniques Using Visuo-Haptic Interaction. *SIGGRAPH 2016 Emerging Technologies*, 2016.
- [43] Nicholas Rewkowski, Atul Rungta, Mary Whitton and Ming Lin. Evaluating the Effectiveness of Redirected Walking with Auditory Distractors for Navigation in Virtual Environments. *IEEE VR 2019*, 2019.
- [44] Daigo Hayashi, Kazuyuki Fujita, Kazuki Takashima, Robert W. Lindeman and Yoshifumi Kitamura. Redirected Jumping: Imperceptibly Manipulating Jump Motions in Virtual Reality. *IEEE VR 2019*, 2019.

-
- [45] 電動車いすの安全利用に関するマニュアルについて | 警察庁 Web サイト
https://www.npa.go.jp/bureau/traffic/anzen/e_wheelchair.html (last visited January 27, 2022).
- [46] GitHub - WHILL/whill_control_system_protocol_specification: Protocol Specification for WHILL Model CR. https://github.com/WHILL/whill_control_system_protocol_specification (last visited January 22, 2022).

研究業績

査読付き論文誌

- (1) 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. 情報処理学会論文誌, Vol.61, No.1, pp.61–69 (2020年4月).
-

査読付き国際会議

- (1) 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 (HCI '21), Lecture Notes in Computer Science, Vol.12769, pp.438–448 (2021年7月).
 - (2) Akihiro Miyata, Kousuke Motooka and Kenro Go: A Wheelchair Simulator Using Limited-Motion Patterns and Vection-Inducing Movies. Proc. 31st Australian Conference on Human-computer-interaction (OzCHI '19), pp.508–512 (2019年12月).
-

研究会・シンポジウム

- (1) 大河原巧, 本岡宏將, 大和佑輝, 奥川和希, 宮田章裕: バリアシミュレータのためのオーサリングツールの基礎検討. 第28回インタラクティブシステムとソフトウェアに関するワークショップ (WISS '20) 予稿集, N-27 (2020年12月).
- (2) 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. 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 '20), Vol.2020, pp.904–908 (2020年6月).
- (3) 大河原巧, 本岡宏將, 呉健朗, 大和佑輝, 奥川和希, 宮田章裕: バリアシミュレータのための傾きフィードバックの基礎検討. 情報処理学会インタラクティブシステム2020論文集, pp.192–194 (2020年3月).
- (4) 本岡宏將, 大河原巧, 呉健朗, 大和佑輝, 宮田章裕: HMDと電動車椅子を用いたバリアシミュレータの移動距離削減の基礎検討. 日本バーチャルリアリティ学会第24回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 6B-04 (2019年9月).
- (5) 呉健朗, 宇野広伸, 本岡宏將, 樋口恭佑, 宮田章裕: Vection 誘発映像による凹凸バリアシミュレータの実装と評価. 情報処理学会第81回全国大会講演論文集, Vol.2019, No.1, pp.43–44 (2019年3月).

-
- (6) 本岡宏將, 呉健朗, 宇野広伸, 樋口恭佑, 宮田章裕: 電動車椅子と HMD を用いたバリアシミュレーションの検討. 情報処理学会インタラクシオン 2019 論文集, pp.476-478 (2019 年 3 月).
 - (7) 呉健朗, 宇野広伸, 本岡宏將, 樋口恭佑, 宮田章裕: Vection 誘発映像による凹凸バリアシミュレータの基礎検討. 日本バーチャルリアリティ学会 VR 学研報, Vol.23, No. CS-4, pp.3-6 (2018 年 12 月).