

HMDと電動車椅子を用いた 横断勾配シミュレータの実装

杉本 隆星¹ 大河原 巧² 板床 海斗¹ 宮田 章裕^{1,a)}

概要: 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提案が行われている。しかし, 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, 横断勾配のある道のシミュレーションの実装はされていない。そこで本稿では, 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することでユーザーに横断勾配を通過している感覚を与えるシミュレータの実装と, そのシミュレータの評価に向けた少人数での予備実験について報告する。予備実験では, 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で, 横断勾配シミュレーションの臨場感を高められる傾向にあることを確認した。

An Implementation of Cross Slope Simulator Using an HMD and an Electric Wheelchair

RYUSEI SUGIMOTO¹ TAKUMI OKAWARA² KAITO ITADOKO¹ AKIHIRO MIYATA^{1,a)}

1. はじめに

車椅子に不慣れな人が車椅子に乗った状態で屋外を移動するときの不安を軽減することを目的として, 車椅子で移動するときの感覚を体感できるシミュレータが数多く開発されてきた。車椅子シミュレータの中でも VR を用いた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たりしなくても 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 VR を用いた従来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。このことから我々は, 市販電動車椅子の低自由度を Vection 誘発映像で補完する車椅子シミュレータを提案してきた [1][2][3]。しかし, 現在先行研究で再現できるバリアは坂道のみであり, 他のバリアの再現はできていない。他のバリアの例として横断勾配のある道がある。先行研究 [3] 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

案がされているが, 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ーに与えられるかが可能なかが明らかとなっていない。そこで本稿では, このシミュレータを用いて横断勾配のある道を通過する感覚をユーザーに与えられるかを明らかにするために, シミュレータの実装と予備実験を行った。本稿の貢献は, 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ったことと, そのシミュレータの効果を調査するための予備実験を行ったことである。

2. 関連研究

本研究は, VR ベースの車椅子シミュレータの事例と関係がある。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与えるものと視覚と動きの両方のフィードバックを与えるものが存在する [4][5]。

視覚のフィードバックのみ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。文献 [6] では, 車椅子の操作に不慣れなユー

¹ 日本大学文理学部

² 日本大学大学院総合基礎科学研究科

^{a)} miyata.akihiro@acm.org

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がされている。このシミュレータは、HMD (Head Mounted Display), 椅子, ジョイスティックで構成されており, ユーザが椅子に座りジョイスティックを操作することで, HMD 上に表示される仮想空間上の車椅子を操作することができる。

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。ロボットアームで支える天板(ユーザが乗る台)を6自由度で制御する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が開発されている[7][8]。文献[7]では, 現実空間を元に作成されたVR空間を大型半球ディスプレイに表示し, そのVR空間上の車椅子の操作に合わせてモーションプラットフォームを動かすことで, 車椅子がバリアを通過する感覚をユーザに与えるシミュレータの開発がされている。文献[8]では, ユーザが装着したHMD上の映像変化と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の開発がされている。文献[9]では, 電動車椅子とHMDを用いた車椅子シミュレータと視覚のフィードバックのみを与えるシミュレータでユーザの主観的評価に差が生まれるのかの検証がされている。検証の結果, 動きのフィードバックの差により前者のシミュレータの方がより高い臨場感をユーザに与えられることが明らかになった。

3. 研究課題

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シミュレータ[6]は既製品のみで構築できるため金銭的なコストが低いが, 動きのフィードバックが無いと視覚と動きのフィードバックを与えるシミュレータと比べて臨場感が低い[9]。一方で, 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[7][8]は視覚のフィードバックのみを与えるシミュレータと比べて臨場感が高いが, 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り金銭的なコストが高い。

我々はこの問題を解決するため, HMDと電動車椅子を組み合わせ, 低コストで再現可能なバリアシミュレータを提案してきた[1][2][3]。先行研究[3]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。そのため, このシミュレータを用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が明らかとなっていない。

本稿では, 我々が開発してきた市販電動車椅子の低自由度をVection誘発映像で補完する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予備的検討を行うことを研究課題として設定する。

4. 提案手法

本稿では, 先行研究[3]と同様に, HMDと電動車椅子を組み合わせ低コストで実現可能な車椅子シミュレータを作成する。

まず, HMD上のVection誘発映像について考える。先行研究[1]より, HMD上のVection誘発映像は車椅子でバリアを通過している一人称視点の映像を流すことで, ユーザは目的のバリアに適した運動感覚を得られると考えられる。従って, HMD上のVection誘発映像は, 電動車椅子に乗っている状態で横断勾配のある道を通過する一人称視点の映像とする。

次に電動車椅子に動作について考える。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, 車椅子は左右どちらか一方に傾きながら前進する。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。これを電動車椅子の動作を用いて再現するために, 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することでシミュレーションを行う。この円運動時の走行速度や回転半径は, 車椅子ユーザが横断勾配のある道を通過するとき横方向にかかる重力加速度の理論値と, 電動車椅子の円運動による横方向の加速度の大きさが等しくなるように設定することで, より臨場感の高いシミュレーションが行えると考える。

我々は, このVection誘発映像と電動車椅子の円運動を組み合わせた車椅子シミュレータを用いて, 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を検証する。

5. 実装

本研究で用いるシミュレータの外観を図1に示す。本研究のシミュレータは, 密閉型HMD, シングルボードコンピュータ(single-board computer, 以降SBC), 電動車椅子からなる。

HMD上にはVR空間上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映像を流す。具体的には, シミュレーションを開始するとVR空間上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流れる。このとき, VR空間上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。このVR空間上のコースはUnityを用いて作成しており, コースの長さや角度, VR空間での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2に示す。

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



図 1 シミュレータの外観

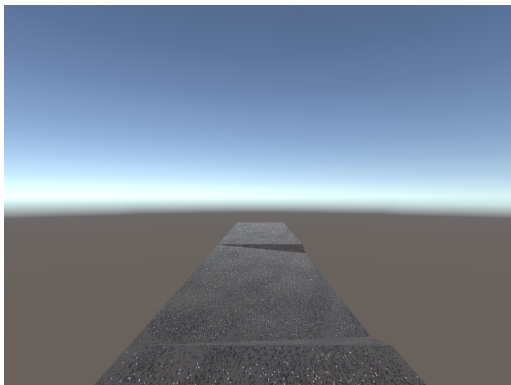


図 2 シミュレーションに用いる VR 空間上のコース

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。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 3 に示す。

HMD と電動車椅子を制御する SBC は WebSocket でリアルタイムに通信し、HMD 上の映像と電動車椅子の動作が連動できるようにする。

6. 実験

本研究の研究課題は、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通過する感覚をユーザに与えられるか予備的検討を行うことである。本稿では、著者を含む少人数の実験参加者を相手に予備実験を行うことで、今後の評価実験に向けた課題や評価項目の検討を行う。

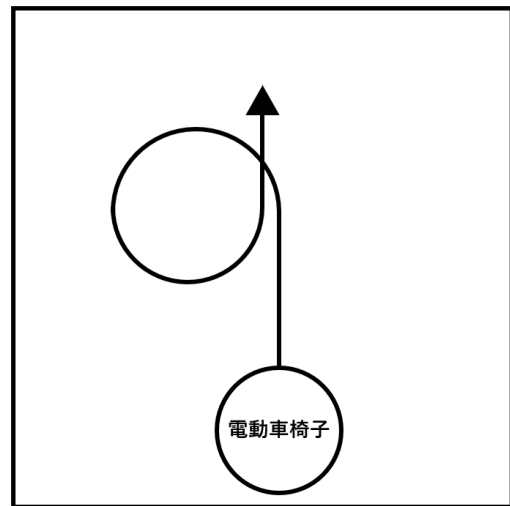


図 3 シミュレーション時の実際の電動車椅子の動き

6.1 実験参加者・実験環境

本実験の参加者は、著者を 2 名含む 20 代の学生 3 名であり、全員健康歩行者である。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、図 4 に示すに約 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る環境で行った。部外者は一切入れないようにし、安全を確保した。本実験は、倫理委員会の許可のもと行われた。

6.2 実験条件

本実験で再現する横断勾配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、傾斜の平均は約 3.5° であった。そこで、本実験で再現するコースの横断勾配の大きさは 3.5° とした。シミュレーション時の VR 空間上のコースの走行距離は、実験スペースを考慮して 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 空間上での走行速度は先行研究 [2] のものと同じ 0.80m/s とした。

提案手法の評価を行うために、HMD 上に映像を流す効果と、電動車椅子が円運動を行う効果をそれぞれ比較する実験条件を設計した。具体的な実験条件は下記のとおりである。

- HMD 上に映像を流し、電動車椅子が円運動を行う実験条件
- HMD 上に映像を流し、電動車椅子が円運動を行わない実験条件
- HMD 上に映像を流さず、電動車椅子が円運動を行う実験条件

電動車椅子の円運動には、走行速度と回転半径の 2 種類のパラメータがある。より臨場感の高いシミュレーション



図 4 実験環境

を行うため、これらのパラメータは4章で示したように、車椅子ユーザが横断勾配を通過するときに横方向にかかる重力加速度の理論値と、電動車椅子の円運動による横方向の加速度の大きさが等しくなるように設定する。本実験では、再現する横断勾配の大きさは 3.5° と設定したため、走行速度と回転半径のどちらかのパラメータを決めれば、もう一方のパラメータも決めることができる。走行速度をHMD上の映像と同じ 0.80m/s とし、それに合わせて回転半径を決めたパラメータを使用する実験条件を標準条件とした。これに加え、回転半径を 0.50m とし、それに合わせて走行速度を決めたパラメータを使用する実験条件を省スペース条件とした。これは、標準条件のシミュレーションに必要な現実空間のスペースよりも狭い環境でユーザがシミュレーションをすることを想定した実験条件である。以降、標準条件での電動車椅子の走行速度(0.80m/s)と回転半径(1.07m)をそれぞれ標準速度、標準半径と定義し、省スペース条件での電動車椅子の走行速度(0.54m/s)と回転半径(0.50m)をそれぞれ低速度、小半径と定義する。

3種類の実験条件と2種類のパラメータ、そして再現する横断勾配の方向(左右)2種類を組み合わせた合計12種類を今回の実験条件とした。進行方向に対して左方向に傾斜のある道を走行している映像をHMD上に流す実験条件を左傾斜、進行方向に対して右方向に傾斜のある道を走行している映像をHMD上に流す実験条件を右傾斜と定義する。これらの実験条件をまとめたものを表1に示す。

6.3 実験手順

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、実験参加者に2回続けて体験してもらう。
- 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

表 1 実験条件の一覧

実験条件	HMD上の映像	電動車椅子の振る舞い	電動車椅子の走行速度 (m/s)	円運動の回転半径 (m)
1	何も表示しない	直線運動と円運動	標準速度	標準半径
2	左傾斜	直線運動	標準速度	-
3	左傾斜	直線運動と円運動	標準速度	標準半径
4	何も表示しない	直線運動と円運動	標準速度	標準半径
5	右傾斜	直線運動	標準速度	-
6	右傾斜	直線運動と円運動	標準速度	標準半径
7	何も表示しない	直線運動と円運動	低速度	小半径
8	左傾斜	直線運動	低速度	-
9	左傾斜	直線運動と円運動	低速度	小半径
10	何も表示しない	直線運動と円運動	低速度	小半径
11	右傾斜	直線運動	低速度	-
12	右傾斜	直線運動と円運動	低速度	小半径

表 2 実験参加者への実験後質問一覧

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	1: 小さい ~ 4: 同じ ~ 7: 大きい
HMD上の映像と比べてどう感じましたか?	
Q3: 電動車椅子の走行速度は	1: 遅い ~ 4: 同じ ~ 7: 速い
HMD上の映像上の走行速度と比べてどう感じましたか?	

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。

実験時の電動車椅子が想定通りに動いたかを確認するために、約20Hzで加速度を計測するアプリケーションを起動したスマートフォンを電動車椅子の背もたれに装着した。

6.4 実験の結果

Q1の回答分布を図5に示す。HMD上に映像を流さず電動車椅子が円運動を行う実験条件(実験条件1, 実験条件4, 実験条件7, 実験条件10)とHMD上に映像を流し電動車椅子が円運動を行わない実験条件(実験条件2, 実験条件5, 実験条件8, 実験条件11)では、実験条件2を除き、実験参加者が横断勾配を通過している感覚が得られないと感じた割合が高かった。一方でHMD上に映像を流し電動車椅子が円運動を行う実験条件(実験条件3, 実験条件6, 実験条件9, 実験条件12)では、すべての実験条件で、実験参加者が横断勾配を通過している感覚を得られたと感じた割合が高かった。

次にQ2の回答分布を図6に示す。HMD上に映像を流さない実験条件(実験条件1, 実験条件4, 実験条件7, 実験条件10)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、空白としている。HMD上に映像を流し電動車椅子が円運動を行わない実験条件(実験条件2, 実験条件5, 実験条件8, 実験条件11)では、実験参加者が感じた傾きの大きさはHMD上の映像と比べて小さいと感じた割合が高かった。一方でHMD上に映像を流し電動車椅子が円運動を行う実験条件(実験条件3, 実験条件6, 実験条件9, 実験条件12)では、実験参加者が感じた傾きの大きさがHMD上の映像以上だと感じた割合

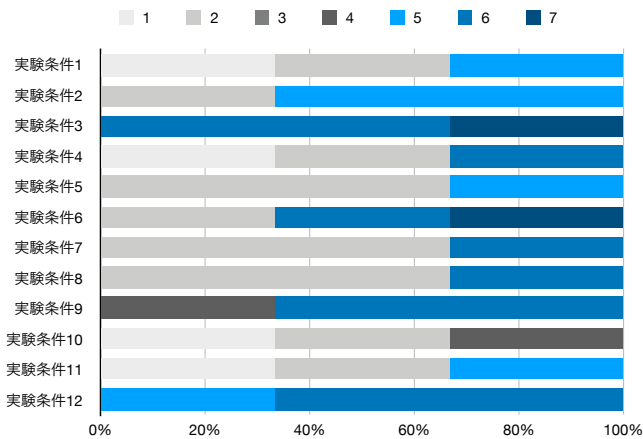


図 5 Q1 の回答分布 (N=3)

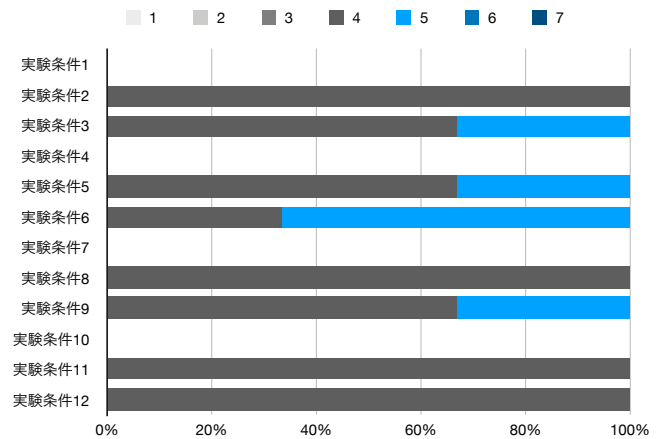


図 7 Q3 の回答分布 (N=3)

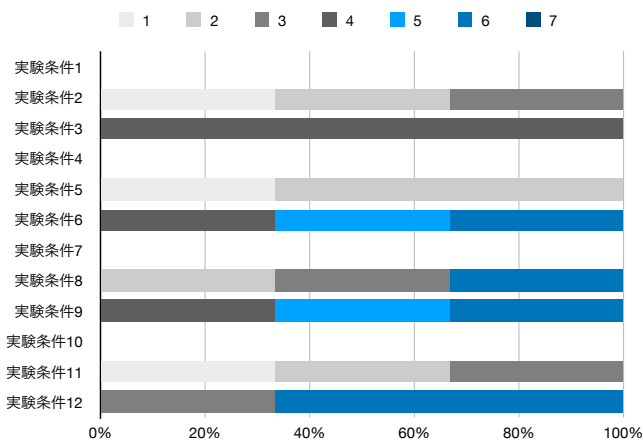


図 6 Q2 の回答分布 (N=3)

が高かった。

最後に Q3 の回答分布を図 7 に示す。HMD 上に映像を流さない実験条件（実験条件 1、実験条件 4、実験条件 7、実験条件 10）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、空白としている。HMD 上に流す VR 空間の走行速度はすべて 0.80m/s であり、実験条件 1 - 6 の電動車椅子の走行速度は 0.80m/s、実験条件 7 - 12 の電動車椅子の走行速度は 0.54m/s である。しかし、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て遅いと感じる実験参加者はいなかった。

6.5 考察

Q1 のアンケートの結果から、HMD 上に映像を流し電動車椅子が円運動を行う実験条件（実験条件 3、実験条件 6、実験条件 9、実験条件 12）では、横断勾配を通過している感覚を得られたと感じる傾向にあった。このことから、HMD 上に Vection 誘発映像を流し電動車椅子が円運動することで、横断勾配を通過している感覚をユーザに与えられていると考えられる。しかし、実験条件 6 のシミュレーション後の Q1 のアンケートにて「2」と回答している実験参加者がいた。この理由を調査するために、電動車椅子の背もたれに装着したスマートフォンから取得した加速度の時系列

データを確認した。本実験で電動車椅子が円運動をするときの横方向の加速度は、本来は 0.59m/s^2 でなければいけないが、実験条件 6 の 2 回目のシミュレーションをこの実験参加者が体感しているときの加速度が約 0.67m/s^2 と目標の加速度より大きく、実験時に電動車椅子が想定通りの振る舞いをしていなかったことが明らかとなった。これが原因となり、この実験参加者が体感したシミュレーションの臨場感が低くなったと予想される。電動車椅子が想定通りの振る舞いをしなかった理由として、実験参加者の体重や、シミュレーション中の無意識な体の動きなどが考えられる。この問題を解決するために、シミュレーション中の電動車椅子の加速度をリアルタイムに検知し、それに合わせて電動車椅子が振る舞いを変えるようにすることを検討する。

Q2 のアンケートの結果から、HMD 上に映像を流し電動車椅子が円運動を行わない実験条件（実験条件 2、実験条件 5、実験条件 8、実験条件 11）は、感じた傾きの大きさが HMD 上の映像と比べて小さいと感じる傾向にあった。このことから、電動車椅子が円運動を行うことでユーザを感じる遠心力の強さが、横断勾配のシミュレーションにおいてユーザを感じる傾きの大きさに影響を与えていると考えられる。これを検証するためには、円運動時の横方向の加速度を目標の加速度よりも大きくした実験条件と、円運動時の横方向の加速度を目標の加速度よりも小さくした実験条件とを増やし、それぞれでユーザを感じる傾きの大きさが変化するかを調査する必要がある。

Q3 のアンケートの結果から、横断勾配のシミュレーションにおいて、電動車椅子の走行速度と VR 空間上での走行速度の差に、ユーザが気づきにくい傾向があった。この傾向が普遍的なものである場合、狭いスペースでも高い臨場感の横断勾配シミュレーションが行える。しかし、本実験で HMD 上に流した映像は、VR 空間上に作成したコースを走行するのみの簡素なもので、移動距離の手がかりとなる壁や木などのオブジェクトが設置されていない。このことから、VR 空間上のコースのデザインやコース周囲のオ

プロジェクトの有無が、VR空間上での走行速度の把握しやすさに影響を与えていた可能性が考えられる。これを検証するためには、HMD上の映像を変更した実験条件を増やし、今後実験を行う必要がある。

7. おわりに

本稿では、Vection誘発映像と電動車椅子の動作を組み合わせ横断勾配を通過する感覚を再現する車椅子シミュレータの実装と予備実験を行った。その結果、次のような知見が得られた。

- HMD上にVection誘発映像を流し電動車椅子が円運動することで、横断勾配を通過している感覚をユーザーに与えられる傾向にある。
- 電動車椅子の円運動を行うことで、横断勾配のシミュレーションにおいてユーザーに傾いた感覚をより強く与えられる傾向にある。

今後の課題は、著者を含まない10名程度の実験参加者を対象に本実験を行うことで、予備実験の結果から考えられる傾向が普遍的なものであるかを調査することである。

謝辞 本研究はJSPS科研費JP19H04160の助成を受けて行われた。

参考文献

- [1] 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).
- [2] Kousuke Motooka, Takumi Okawara, Yuki Yamato, and Akihiro Miyata: Real-world Distance Reduction in a Virtual Reality-based Wheelchair Simulation on Flat Surfaces. Lecture Notes in Computer Science, Vol.12769, pp.438–448 (2021).
- [3] 大河原 巧, 本岡 宏将, 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, 2020, pp904–908 (2020).
- [4] Thomas Pithon, Tamar Weiss, Simon Richir, and Evelyn Klingler. Wheelchair Simulators: A Review. Technology and Disability, Vol.21, Issue 1–2, pp.1–10 (2009).
- [5] Patrick Abellard, Iadalo Harivola 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] Yuri Silva, Walter Simoes, Mauro Tefilo, Eduardo Naves, and Vicente Lucena: Training Environment for Electric Powered Wheelchairs Using Teleoperation Through a Head Mounted Display. Proc. 2018 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE '18), pp.1–2 (2018).
- [7] Hafid Niniss, and Takenobu Inoue: Electric Wheelchair Simulator for Rehabilitation of Persons with Motor Disability. Proc. Symposium on Virtual Reality VIII (2006).
- [8] Carmen Fernandez Panadero, Valentin de la Cruz Barquero, Carlos Delgado-Kloos, and David Moran Nunez: PhyMEL-WS: Physically Experiencing the Vir-

tual World. Insights into Mixed Reality and Flow State on Board a Wheelchair Simulator. Jnl. Universal Computer Science, Vol.20, No.12, pp.16290–1648 (2014).

- [9] 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. 13th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications (AutomotiveUI '21), pp.26–29 (2021).