



# 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

Study on Distance Reduction of a Barrier Simulator Using an HMD and an Electric Wheelchair

本岡宏将<sup>1)</sup>, 大河原巧<sup>1)</sup>, 呉健朗<sup>2)</sup>, 大和佑輝<sup>2)</sup>, 宮田章裕<sup>1)</sup>

Kousuke Motooka, Takumi Okawara, Kenro Go, Yuki Yamato and Akihiro Miyata

1) 日本大学 文理学部 (〒156-8550 東京都世田谷区桜上水 3-25-40)

2) 日本大学院総合基礎科学研究科 (〒156-8550 東京都世田谷区桜上水 3-25-40)

**概要:** 現在に至るまで、車椅子シミュレータが数多く開発されてきたが、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、我々は、HMD 上の映像と、電動車椅子の低自由度動作を組み合わせたバリアシミュレータを提案してきた。しかし、ユーザがシミュレーションを行う際、映像上の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。本稿では、シミュレータの車椅子の移動距離を削減するための基礎検討として、車椅子の現実空間における移動の振る舞いと、ユーザが仮想空間で知覚する移動距離の関係について報告する。

**キーワード:** 電動車椅子, 移動感覚, 視覚, HMD

## 1. はじめに

リハビリテーションなどを目的として VR ベースの車椅子シミュレータが開発されてきた。VR ベースのアプローチは、物理的な車椅子用コースを構築しなくて済むという長所がある。しかし、従来のシミュレータは、コストと現実感がトレードオフの関係にある。例えば、視覚フィードバックのみを提示するシミュレータは、低コストで構築できるが、ユーザに動きのフィードバックを与えられず現実感に乏しい。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、高価な装置が必要になる。

この問題を解決するために、我々は、電動車椅子の低自由度動作と、自己動作感覚を誘発する映像を同時に提示することで、低コストで高い現実感を得られる車椅子シミュレータを提案してきた [1][2][3][4]。しかし、このアプローチでは、シミュレーションを行う際、映像上の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るという問題があった。

本稿では、この問題をふまえ、電動車椅子の現実空間における移動の振る舞いと、ユーザが仮想空間で知覚する移動距離の関係を検証したことについて報告する。

## 2. 関連研究

### 2.1 車椅子シミュレータに関する事例

視覚と動きのフィードバックを行う車椅子シミュレータが多く提案されている。例えば、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が開発されている [5]。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ムと仮想世界の車椅子が連動する。さらに、手動車椅子を固定し、車輪をモータで回転させることで、斜面を車椅子で通過する様子を再現している。

より再現性を高めるためには、6 自由度で天板 (ユーザが乗る台) を制御する Stewart platform [6] が用いられる。このプラットフォームを用いる事例としては、HMD を併用したもの [7] や、大型半球ディスプレイを併用したもの [8] がある。両者とも、初心者が車椅子の操作に慣れることを目的としたシミュレーションシステムである。同様の 3 自由度のモーションプラットフォームと VR グラスを用いて、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も提案されている [9]。このシステムは、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。

### 2.2 RDW に関する事例

歴史的には、没入仮想空間を構築する際は、仮想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、仮想空間の再現に必要な現実空間スペースを圧縮する Redirect walking (RDW) が提案され [10]、RDW の効果を生じる条件の検証 [11] や、RDW を活用したエンターテインメントシステム [12] が提案されている。障害物を含む複雑な実世界の空間でも RDW が機能できる手法 [13][14] や、VR 空間を屋内の部屋の配置に合わせてリアルタイムで生成する手法が提案されている [15]。他にも、ユーザーの

仮想バスと物理バスに基づいて将来のバスでの衝突を回避できる最適な手法が提案されている [16]. RDW の技術は歩行シーンを前提とすることが多いが、ジャンプに適用する事例 [17] も報告されている。また、ユーザを方向転換させる範囲を広げようとする試み [18] や、同時体験人数を増やそうとする試み [19] も報告されている。

### 3. 研究課題

我々の従来手法 [1][2][3][4] では、シミュレーションを行う際、映像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る。しかし、これはユーザにとって負担である。

そこで、我々は、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基礎検討として、電動車椅子の現実空間における移動の振る舞いと、ユーザが仮想空間で知覚する移動距離の関係を明らかにすることを研究課題として設定する。

### 4. 実装

本稿では、研究課題を達成するため、電動車椅子と HMD を用いて、現実空間の走行速度と、走行距離を自由に設定できるシミュレータを実装する。

我々のシミュレータは、非透過型 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。図 1 にシミュレータ外観を示す。

現実空間での電動車椅子の動作は、速度と距離の 2 つを自由に設定できるようにした。速度は、等速のものと、徐々に減速していくものの 2 つを選べるようにした。電動車椅子を制御する SBC と HMD は WebSocket でリアルタイム通信しており、電動車椅子の動作と HMD 上の映像が連携するようにした。HMD 上で表示する映像は、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。

シミュレーションタイプの選択やシミュレーション開始操作は HMD 上から行えるようにした。これにより、ユーザは 1 人でシミュレーションを実行できるようになっている。

## 5. 実験

### 5.1 実験目的

本実験では、電動車椅子の現実空間における移動の振る舞いと、ユーザが仮想空間で知覚する移動距離の関係を検証することを目的とする。

### 5.2 実験参加者・実験環境

実験参加者は 20 代の学生 9 名である。全員、下肢障害は有しておらず、日常的に車椅子を利用していない。実験参加者には、本実験への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 酔いが無いことを確認した。実験では約 10m 四方の室内に、図 2 のように走行コースを構築し、このコースを走行してもらった。床



図 1: シミュレータの外観

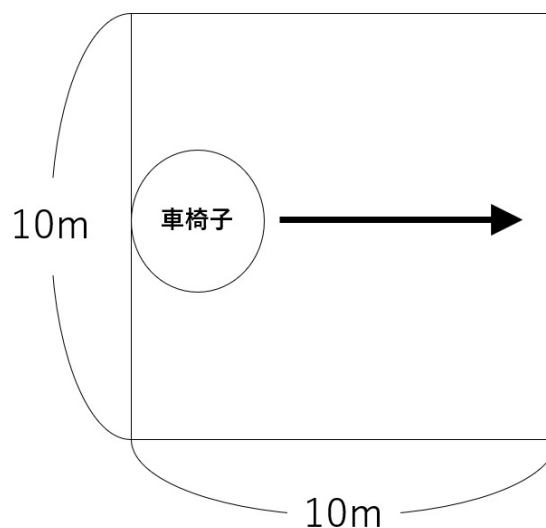


図 2: 実験時の走行コース

は平坦であり、毛足の短いカーペットが敷いてあった。部外者は部屋に一切入れないようにし、安全は確保されていた。

### 5.3 実験手順

シミュレータの操作ミスといった外的要因が混入しないように、実験者がシミュレータをコントロールした。また、HMD 上に表示する映像は速度 0.8m/s で 8m の距離を実際に電動車椅子で走行しながら撮影したものを使用した。実験条件は、電動車椅子の走行速度が HMD 上に表示される映像と同じもの (N) に加え、電動車椅子の走行速度が等速のもの (Constant velocity) と減速するもの (Deceleration) に対して、表 1 と表 2 および下記の示す 5 つをそれぞれ用意した。

電動車椅子の走行速度が等速のものは、電動車椅子が映像上の走行距離より 60%短いもの、50%短いもの、40%短いもの、30%短いもの、20%短いものの 5 つを用意した。これらの走行速度は、それぞれ 0.32m/s, 0.40m/s, 0.48m/s, 0.56m/s, 0.64m/s である。また、これらの走行距離は、そ

表 1: 走行速度が等速のパターン

実験条件	走行速度 (m/s)	走行距離 (m)
N	0.80	8.0
C-1	0.32	3.2
C-2	0.40	4.0
C-3	0.48	4.8
C-4	0.56	5.6
C-5	0.64	6.4

表 2: 走行速度が減速するパターン

実験条件	加速度 ( $m/s^2$ )	走行距離 (m)
D-1	-0.080	4.0
D-2	-0.064	4.8
D-3	-0.048	5.6
D-4	-0.032	6.4
D-5	-0.016	7.2

それぞれ、3.2m、4.0m、4.8m、5.6m、6.4mである。これらのパターンを C-1、C-2、C-3、C-4、C-5 とする。

電動車椅子の走行速度が減速するものは、電動車椅子が映像上の走行距離より 50%短いもの、40%短いもの、30%短いもの、20%短いもの、10%短いものの 5 つを用意した。これらの初期速度は全て 0.8m/s で、それぞれ  $0.08m/s^2$ 、 $0.064m/s^2$ 、 $0.048m/s^2$ 、 $0.032m/s^2$ 、 $0.016m/s^2$  で減速する。また、これらの走行距離は、それぞれ、4.0m、4.8m、5.6m、6.4m、7.2m である。これらのパターンを D-1、D-2、D-3、D-4、D-5 とする。

各実験参加者には、各実験条件を体験する前に、HMD 上に表示される映像と同様、走行距離 8m、走行速度 0.8m/s でシステムを使用してもらった。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、ランダムな順に決定された各実験条件について、2 回ずつシミュレーションを体験させた。その際、彼らには、各実験条件を体験するたびに、電動車椅子の走行距離は HMD 上の映像上の走行距離より短く感じたかを“Yes”か“No”で回答してもらった。

#### 5.4 実験結果

電動車椅子の走行速度が HMD 上に表示される映像と同じパターンにおいて“No”と回答した実験参加者の割合は、100%であった。X 二乗検定を行ったところ、有意な結果であった。

等速のパターンの実験条件に対する実験参加者の回答分布を図 3 に示す。C-1、C-2、C-3、C-4、C-5 において“No”と回答した実験参加者の割合は、それぞれ 33%、77%、66%、

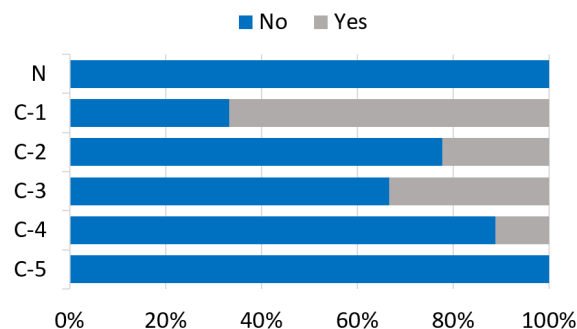


図 3: 走行速度が等速のパターンの回答分布 (N = 9)

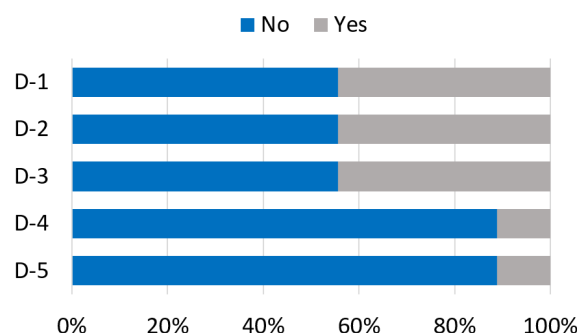


図 4: 走行速度が減速するパターンの回答分布 (N = 9)

88%、100%であった。それぞれの実験条件で X 二乗検定を行ったところ、C-2、C-4、C-5 が“No”と回答した人数の方が“Yes”と回答した人数より有意に多かった。

減速するパターンの実験条件に対する実験参加者の回答分布を図 4 に示す。D-1、D-2、D-3、D-4、D-5 において“No”と回答した実験参加者の割合は、それぞれ 55%、55%、55%、88%、88%であった。それぞれの実験条件で X 二乗検定を行ったところ、D-4 と D-5 が“No”と回答した人数の方が“Yes”と回答した人数より有意に多かった。

#### 5.5 考察

##### 走行速度が等速のパターン

実験条件 C-4 と C-5 はそれぞれ“No”と回答した人数の方が“Yes”と回答した人数より有意に多かったことから、走行距離を 30%までなら圧縮しても、過半数の人が HMD 上に表示される映像より短いとは感じないと考えられる。また、実験条件 C-1 と C-3 は実験結果が有意ではなかったため、過半数の人が HMD 上に表示される映像より走行距離が短いことに気付かないとは言えない。C-3 が C-2、C-4 より“Yes”と回答した人が多かった点については、今後実験参加者を増やして検証を行っていく必要がある。

##### 走行速度が減速するパターン

実験条件 D-4 と D-5 はそれぞれ“No”と回答した人数の方が“Yes”と回答した人数より有意に多かったことから、走行距離を 20%までなら圧縮しても、過半数の人が HMD 上に表示される映像より短いとは感じないと考えられる。ま

た, D-4 と D-5 以外の実験結果が有意ではなかったため, 過半数の人が HMD 上に表示される映像より走行距離が短いことに気付かないとは言えない。

## 6. おわりに

本稿では, 電動車椅子の現実空間における移動の振る舞いと, ユーザが仮想空間で知覚する移動距離の関係について報告した。今後は, この検証結果に基づいて我々の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方針である。

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] 宇野 広伸他: 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 章裕他: 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] Miyata et al: Study on VR-Based Wheelchair Simulator Using Vection-Inducing Movies and Limited-Motion Patterns. Proc. VRST 2018 (2018).
- [4] 呉 健朗他: 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] 陳連怡, 藤本英雄, 山田雅司; 仮想空間内車椅子訓練システムにおける操作感覚の実現と情報支援. 日本機械学会論文集 (C 編), vol.72, No.718, pp.1891-1899 (2006).
- [6] Stewart, D.: A Platform with Six Degrees of Freedom. Proc. the UK Institution of Mechanical Engineers, Vol.180, No.1, pp.371-386 (1965).
- [7] Sonar, A., Burdick, K.D., Begin, R.R. and Carroll, J.J.: Development of a Virtual Reality-based Power Wheel Chair Simulator. Proc. ICMA 2005, pp.222-229 (2005).
- [8] Niniss, H. and Inoue, T.: Electric Wheelchair Simulator for Rehabilitation of Persons with Motor Disability. Proc. SVR 2006 (2006).
- [9] Panadero, C.F., Barquero, V.D.L.C., DelgadoKloos, C. and Nunez, D.M.: 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).
- [10] Razzaque et al.: Redirected Walking. Eurographics 2001, Vol.9, pp.105-106 (2001).
- [11] Steinicke et al.: Estimation of Detection Thresholds for Redirected Walking Techniques. IEEE Trans. Visualization and Computer Graphics, Vol.16, No.1, pp.17-27 (2010).
- [12] Matsumoto et al.: Unlimited Corridor: Redirected Walking Techniques Using Visuo-Haptic Interaction. SIGGRAPH 2016 Emerging Technologies (2016).
- [13] Jerald Thomas et al.: A General Reactive Algorithm for Redirected Walking using Artificial Potential Functions. IEEE VR 2019 (2019).
- [14] Nicholas Rewkowski et al.: Evaluating the Effectiveness of Redirected Walking with Auditory Distractors for Navigation in Virtual Environments. IEEE VR 2019 (2019).
- [15] Lung-Pan Cheng et al.: VRoamer: Generating On-The-Fly VR Experiences While Walking inside Large, Unknown Real-World Building Environments. IEEE VR 2019 (2019).
- [16] Dong-Yong Lee et al.: Real-time Optimal Planning for Redirected Walking Using Deep Q-Learning. IEEE VR 2019 (2019).
- [17] Daigo Hayashi et al.: Redirected Jumping: Imperceptibly Manipulating Jump Motions in Virtual Reality. IEEE VR 2019 (2019).
- [18] Luke Bolling et al.: Shrinking Circles: Adaptation to Increased Curvature Gain in Redirected Walking. IEEE VR 2019 (2019).
- [19] Eric R. Bachmann et al.: Multi-User Redirected Walking and Resetting Using Artificial Potential Fields. IEEE VR 2019 (2019).