



球面ディスプレイ搭載電動車いすを用いた 加減速における視覚提示情報操作

Manipulation of Visual Information during Acceleration and Deceleration
using Electric Wheelchair with Spherical Display

佐藤賢太郎¹⁾, 矢野博明²⁾
Kentaro SATO, and Hiroaki YANO

1) 筑波大学 理工情報生命学術院 システム情報工学研究群

(〒305-8577 茨城県つくば市天王台 1-1-1, k_sato@vrlab.esys.tsukuba.ac.jp)

2) 筑波大学 システム情報系 (〒305-8577 茨城県つくば市天王台 1-1-1, yano@iit.tukuba.ac.jp)

概要：本研究では都市空間のような大規模空間をパーソナルモビリティで移動するシミュレータ構築のために映像だけでなく加減速などの前庭感覚, 体性感覚提示を行うシステムとして, 球面ディスプレイを搭載した電動車いすを用いたシステムを開発した. 車両の移動にもなって VR 空間の映像が提示され, 加減速や方向転換の際の慣性力を感じることが可能であるが, ここに **Redirected Driving** の手法を適用して必要となる走行面積を減らすことを考えた. 研究の第一段階として **Redirected Driving** の曲率操作の閾値を求める実験を行い, 周辺視野映像の有無による比較実験を行なった. また, VR 空間内で定速走行を行う際に, ユーザが知覚できない範囲で実速度を減速, 低下させるアルゴリズムの有効性を検証した.

キーワード：Redirected Driving, 球面ディスプレイ, 移動感覚

1. はじめに

バーチャルリアリティ (Virtual Reality, VR) の移動手段の中で, ユーザが実際に実空間を移動することにより, VR 空間内を移動する手法は, 方向感覚などの知覚において優位であることが知られている [1]. しかし, この手法では, 実空間の移動範囲に制限を受けるため, VR における無限に広がる空間の利点を損なう.

この問題を解決する移動手法の一つに **Redirected Walking (RDW)** [3] がある. この手法は, 空間知覚において, 視覚情報が前庭感覚や固有感覚などの感覚情報よりも優位であることを利用し, VR 空間の歩行経路とは異なる実空間の歩行経路にユーザを誘導することにより, 実空間よりも広大な VR 空間内の探索を可能とする [2]. 基本操作として, 移動量の拡大縮小を行う並進移動量操作・回転量の拡大縮小を行う回転量操作・実際には曲線上を移動しているユーザに直進移動をしていると感じさせる曲率操作がある.

RDW の先行研究では, 対角視野 40 度のヘッドマウントディスプレイ (Head Mounted Display, HMD) を着用し, 実際は半径 22 m 以上の円弧状の歩行経路を歩くユーザに

VR 空間内を直進する映像を提示することにより, 曲線上を歩いているにもかかわらず, 直進していると知覚することが知られている [4]. また, 水平視野角約 110 度の HMD を用いた実験では, ユーザは半径 11.6 m 以上の円弧状の経路を歩くとき, VR 空間上で直進していると知覚する [5]. これは, 周辺視野はオプティカルフローが支配的であることが影響していると考えられる.

RDW の技術を車いすなどのパーソナルモビリティに応用した手法として, **Redirected Driving (RDD)** [6] がある. この手法は, RDW と同様に基本操作として並進移動量操作・回転量操作・曲率操作がある. RDD の先行研究では, RDW と同程度に小さな実空間でより広大な VR 空間を探索可能であることが報告されている [6].

従来の RDW と RDD では, 同じ操作を用いているが, 歩行動作中は体を常に動かすため, 頭部に三次元的な加速度が常に生じているのに対して, パーソナルモビリティで舗装道路を長距離移動する時など上下動はほぼなく, 定速走行の時間帯が歩行に比べて多いと考えられる. そのため, RDW とは違う戦略を RDD で行うことが可能であると考えられる.

本研究では RDD に着目し、先行研究より 1) RDW と同様に周辺視野映像による移動感覚の操作が可能となる。2) パーソナルモビリティの運転の大半の時間が定速であることに着目し、定速走行時の速度を減速させることにより、小さな実空間でより広大な VR 空間の探索が可能となるという 2 つの仮説を立て、実験により検証した。

2. 評価実験

本実験では、仮説 1 を検証するために、RDD の曲率操作の閾値を求める実験を行い、周辺視野映像の有無による比較実験を行なった。また、仮説 2 を検証するために、VR 空間内で定速走行を行う際に、ユーザが知覚できない範囲で実速度を減速、低下させるアルゴリズムにおける弁別閾計測実験を行なった。

2.1 実験環境

本実験は、筑波大学内のエンパワースタジオにある Large Space (9 m × 18 m) で行った。

実験参加者は図 1 に示すような水平視野角 200 度の球面ディスプレイを搭載した電動車いすを用いて移動を行った。電動車いすには、WHILL model CR (WHILL 社) を使用し、プロジェクター・バッテリー・Real Sense を 2.4 GHz Core i9 プロセッサ、32 GB のメインメモリ、NVIDIA GeForce RTX2080 Super のグラフィックボードを搭載したノート PC に接続して制御した。VR 空間の視覚提示には、周辺視野までカバーする内径 80 cm の球面ディスプレイを用いた。映像出力として、プロジェクターの HU80KS (LG エレクトロニクス社) に全周魚眼レンズの DCRCF187PRO (raynok 社) を取り付けたものを使用し、テクスチャマッピングにより投影映像の歪み補正を行った。また、Real Sense (Intel 社) を用いることにより、電動車いすの位置と姿勢情報の取得を可能とした。なお、走行時には WHILL のモータやホイールの特性、路面の凹凸などにより速度に比例して振幅が増大するような振動が発生した。また、減速時には走行時の振動とは別に一定の周期で前後への振動が発生した。速度変化の知覚に影響を与える可能性があったため、意図的にデューティ比を調整したパルス波の振動を加えた。

実験中に球面ディスプレイで実験参加者に提示した映像の例を図 2 に示す。図 2 内の点線は実空間上の WHILL の移動経路例であり、実線は VR 空間上の視点移動経路例である。同図(a), (b)は 2.2 節の実験で提示したもので道幅 1 m、奥行きを 5 m とした。(c)の 2.3 節の実験の通路は幅 2 m、高さ 3 m、奥行き 20 m とした。なお、(a)と(b)でコントラストが異なるのは、球面内部の内部反射が原因である。実験参加者に視覚提示する VR 空間は Unity2019 を用いてレンダリングし、システムの管理やデータの記録も行なった。

実験は、ユーザの実空間環境からの情報をシャットアウトするために、球面ディスプレイの下部開口部に伸縮性の布を 2 枚張り合わせてユーザの身体を通すようにする

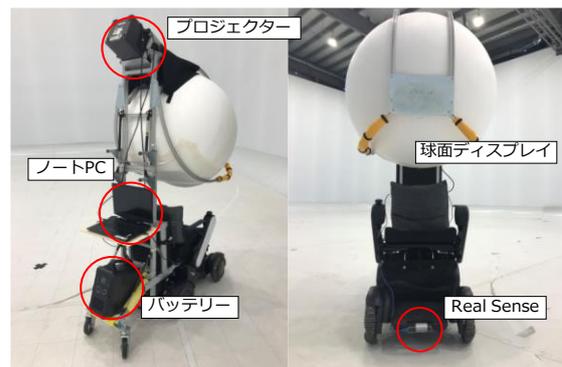
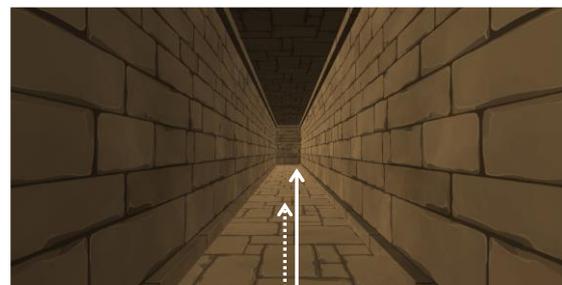


図 1: 球面ディスプレイ搭載電動車いす



(a) 広視野

(b) 有効視野



(c) 通路

図 2: 球面ディスプレイ内に投影した VR 空間

ことで、床面が直接見えないようにした。実験中は壁面への衝突などの危険防止のために常に実験者が隣にいた。

2.2 視野角の比較実験

本実験では、RDW と同様に周辺視野映像による移動感覚の操作の可能性について、RDD の曲率操作の閾値を求める実験を行い、周辺視野映像の有無による比較実験を行なった。

2.2.1 実験参加者

本実験の実験参加者は健康な男性 2 名 (年齢 22 - 23 歳、平均年齢 22.5 歳) であった。実験中 2 名は視力矯正のために眼鏡またはコンタクトレンズを着用していた。

2.2.2 実験計画

本実験は、Bruder ら [6] の曲率操作の閾値を求める実験を参考にし、閾値の比較を行った。2 条件の視野制限 (広視野、有効視野)、8 条件の実空間における移動経路の曲率ゲイン $g_c \in \{\pm 0.03, \pm 0.05, \pm 0.1 \pm 0.2\}$ の計 16 条件を、被験者内計画で各 4 回ずつ行った。曲率ゲインの関係式は、 $g_c = 1/r_{real}$ であり、 r_{real} は実空間の歩行経路の曲率半径である。試行順は完全無作為で行った。なお有効視野は注視点から約 4 ~ 20 度 [7] であり、本実験では 20 度を採用した (図 2 - (b) 参照)。実験は、二股強制選択法 (two-alternative forced-choice, 2AFC) で一定の刺激方法を使用

した。実験参加者には、「実空間上の経路は左曲がりか、右曲がりか」の、2つのうち1つを選択させた。「違いがあるか、そうでないか」という質問は、不確かな場合において「違いがない」と回答するバイアスがかかる可能性がある。本実験においては、「右曲がりか左曲がりか」という2AFCを用いることにより、不確かな場合は、ランダムにどちらかを回答するため、この問題を回避した。

2.2.3 実験手順

実験に関する説明、事前質問、本試行、休憩時間、事後質問を含めて、実験参加者一人当たりの実験時間は45分であった。初めに実験に関する説明を行い、その後実験参加者は事前質問として、年齢・性別・眼鏡およびコンタクトレンズの有無の回答を行った。

事前質問後は、電動車いすに搭乗してもらい、図2-(a)あるいは(b)に示すVR空間上の道を直進した。実空間上では、最初の1.5mは直進移動を行い、その後条件に定めた円弧状の経路を移動する。実経路の直線経路と円弧状の経路が切り替わりときに、横Gが発生し方向変化の知覚に影響を及ぼすため、本実験では横Gを徐々に増加させ影響を抑えるために、直線経路と円弧状の経路の間を補完するような曲線経路を2m設けた。実験参加者の移動が終わると、実験参加者自らがキーボード入力を行うことにより、実空間での経路がどちらに曲がっているかを判断した。回答後はすぐに次の試行を行った。16試行ごとに、休憩を挟み合計64試行を行った。全試行後には、感想を自由回答させた。

2.2.4 実験結果

結果を図3, 4に示す。弁別閾は、応答の割合が25%と75%のゲインの値となる。有効視野における弁別閾は ± 0.131 であった。すなわち半径7.6m以上の円弧状の経路を移動しても、直進しているように感じられる。また、広視野における弁別閾は ± 0.124 であった。ユーザは半径8m以上の円弧状の経路であれば、直進していると知覚することになる。

2.2.5 考察

図3, 4より本実験条件においては、広視野映像よりも有効視野に限定した映像提示がRDDの効果が高いことが示唆された。この要因としては、広視野において視覚情報量が多く、実験参加者が自然に周囲の状況（進行方向に対して横方向の様子）を頭を向けて観察したため、車両走行による遠心力と映像の流れの不一致を感じやすくなったと考えられる。有効視野限定提示条件においては、意識しない限り顔の向きは前方を向いていたため、不一致を感じにくかったと考えられる。しかしながら、実験参加者のサンプル数が少ないため、実験参加者を増やす必要がある。

2.3 VR空間上の定速走行時の減速操作実験

本実験では、パーソナルモビリティの運転の大半の時間が定速であると仮定すると、VR空間内で定速走行を行う際に、実速度を弁別閾以下で減速することで走行に必要な面積削減効果が期待できる。そこで、弁別閾の計測実験を

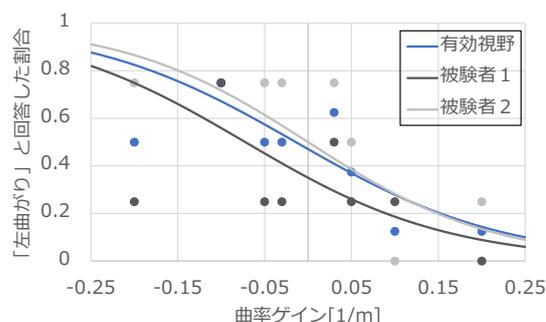


図3: 有効視野の曲率操作の結果

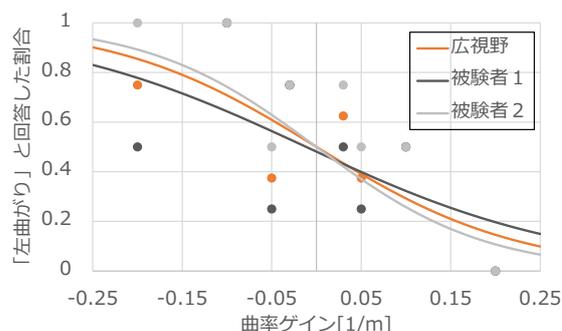


図4: 広視野の曲率操作の結果

行なった。減速のパラメータは実速度の減速の加速度一定での速度低下量、及び実速度の減速時の加速度の弁別閾に着目した。

2.3.1 実験参加者

本実験の実験参加者は、健康な男性2名（年齢23-24歳、平均年齢23.5歳）であった。実験中2名は視力矯正のために眼鏡またはコンタクトレンズを着用していた。

2.3.2 実験計画

実験は、実験参加者の負担を考慮して試行数を減らすために、2重上下法を使用した。実験参加者は、提示刺激と比べて「小さい」または「等しい」のうち1つを選択する。回答に応じた提示刺激の増減をしたのち、指定の回数に達するまで、視覚提示を繰り返した。

2.3.3 実験手順

実験に関する説明、事前質問、本試行、休憩時間、事後質問を含めて、実験参加者一人当たりの実験時間は120分であった。初めに実験に関する説明を行い、その後実験参加者は事前質問として、年齢・性別・眼鏡およびコンタクトレンズの有無の回答を行った。

事前質問後は、実速度の低下量に着目した実験を行った。実験参加者は、電動車いすに搭乗し、図2-(c)に示すVR空間上の通路を自動直進走行した。実空間上では、最初の3秒間は加速、減速開始時刻を予測させないように次の2~5秒間は等速、その後予備実験で求めたユーザの閾値 -0.025 m/s^2 以下の加速度で減速を行い、指定した速度に到達後定速走行を行った。また、VR空間上では、実空間と同じ加速度で加速した後は定速走行映像を30秒間提示した。移動終了後に実験参加者は口頭でVR空間上の速度に比べて実速度が低下したか否かを回答した。回答後はすぐに次の試行を行った。実験参加者は、10試行ご

とに休憩を挟み、合計 30 試行を行った。

20 分休憩を挟んで実速度の減速に着目した実験を行った。実験参加者を電動車いすに搭乗させて自動直進走行した。図 2-(c) に示す空間を走行した映像を提示しながら、実空間上では、最初の 3 秒間は加速、減速開始時刻を予測させないように次の 2~5 秒間は定速、その後指定した値による減速を行い、予備実験で求めたユーザの閾値 0.3 m/s 以上の実速度で定速走行を行った。また、VR 空間上では、実空間と同じ加速度で加速した後は定速走行を 15 秒間行った。実験参加者の移動が終了すると、実験者が識別課題を質問した。実験参加者は課題を口頭で回答することにより、実空間における電動車いすの減速の是非を判断した。回答後はすぐ次の試行を行った。実験参加者は 15 試行ごとに休憩を挟み、合計 30 試行を行った。全実験終了後には、感想を自由回答させた。

2.3.4 実験結果

図 5, 6 に実験参加者の 2 重上下法による提示刺激の遷移と平均弁別閾を示す。実速度の低下量実験の弁別閾は、実験参加者 1 は 0.25 m/s、実験参加者 2 は 0.36 m/s で、平均弁別閾は 0.31 m/s であった。実速度の減速実験の弁別閾は、実験参加者 1 は -0.027 m/s^2 、実験参加者 2 は -0.012 m/s^2 で、平均弁別閾は -0.019 m/s^2 であった。

2.3.5 考察

図 5, 6 の結果より、Large Space (9 m × 18 m) において、約 9.5 m × 約 23.5 m の VR 空間の探索が可能という結果となった。これにより、実空間の約 1.38 倍の VR 空間を探索可能であることが示唆された。

本研究で使用した電動車いすの特性上、一定の加速度で減速させるとき、電動車いす全体が前後に振動した。この振動を手掛かりに減速したとユーザが知覚することを防ぐために、定速走行時にも疑似的に前後の振動を付与した。減速時に滑らかに速度が低下する場合、より減速がわかりにくくなると考えられるが、本システムは振動が減速の判断の手掛かりになった可能性も含まれている。より精密な制御が行えればさらに弁別閾が大きくなることもあり得る。本実験についても有意差検定を行うために実験参加者を増やす必要がある。

3. まとめ

本研究では RDD に着目し、1) RDW と同様に周辺視野映像による移動感覚の操作が可能となる。2) パーソナルモビリティの運転の大半の時間が定速であることに着目し、定速走行時の移動量を減少させることにより、小さな実空間でより広大な VR 空間の探索を可能にするという仮説を立て検証実験によって、実験参加者数が限られているものの、その実現可能性や有効性が示唆された。

今後は長距離移動時に発生するさまざまな状況変化を利用したリダイレクション技術を開発する予定である。最終的には駐車場程度の広場があれば大掛かりな準備なしに加減速感覚付きの移動感覚提示をすぐに実現できる手

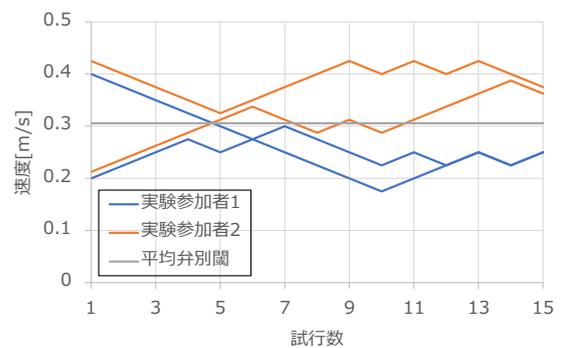


図 5: 実速度の低下量実験の結果

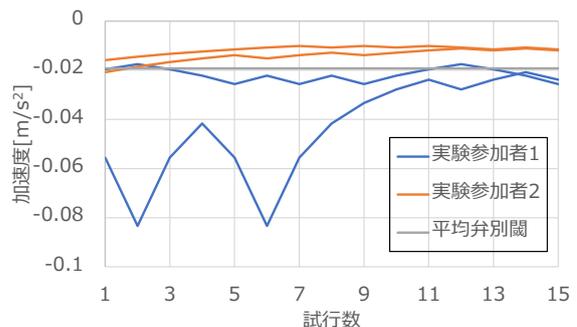


図 6: 実速度の減速実験の結果

法として体系化し、都市空間シミュレータやエンターテインメントなど様々な分野に応用することを目指す。

参考文献

- [1] R. Ruddle and S. Lessels. The benefits of using a walking interface to navigate virtual environments. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction (TOCHI)*, 16:1–18, 2009.
- [2] 松本 啓吾, 鳴海 拓志, 伴 祐樹, 谷川 智洋, 視触覚間相互作用を用いた曲率操作型リダイレクテッドウォーキング, *TVRSJ*, 23, (3), 129-138, 2018
- [3] S. Razzaque, Z. Kohn, and M. C. Whitton, Redirected walking, *Proceedings of EUROGRAPHICS*, 9, 105-106, 2001.9
- [4] F. Steinicke, G. Bruder, J. Jerald, H. Frenz, and M. Lappe, Estimation of Detection Thresholds for Redirected Walking Techniques, *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 16, (1), 17-27, 2010
- [5] T. Grechkin, J. Thomas, M. Azmandian, M. Bolas, and E. Suma, Revisiting detection thresholds for redirected walking, *Proceedings of the ACM Symposium on Applied Perception '16*, 113-120, 2016
- [6] G. Bruder, V. Interrante, L. Phillips, and F. Steinicke, Redirecting Walking and Driving for Natural Navigation in Immersive Virtual Environments, *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 18, (4), 2012
- [7] 清川 清, パーチャルリアリティにおける視覚提示技術, *日本知能情報フレンジ学会誌*, Vol.19, No.4, pp318-325, 2007