



# 水平方向加速度と路面映像による登坂路走行感覚提示

Presentation of Uphill Driving Sensation Using Horizontal Acceleration and Panoramic Visual Image of Virtual Road

植松航平<sup>1)</sup>, 矢野博明<sup>2)</sup>

Kohei UEMATSU and Hiroaki YANO

1) 筑波大学 システム情報工学研究群 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1, k\_uematsu@vrlab.esys.tsukuba.ac.jp)

2) 筑波大学 システム情報系 〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1, yano@iit.tsukuba.ac.jp)

**概要** : VR 空間を移動する方法の一つである Redirected Driving には坂の上り下りのような上下方向の移動感覚の提示が課題としてあった. 本研究では上り坂の走行感覚を表現するための要素として, 水平加速度, 映像遷移速度, 頭の向き, 視野角の4つの要素を提案し, 球面ディスプレイを搭載した電動車椅子を用いて登坂路走行映像を表示しながら水平加速度を与えることができるシステムを構築, これら4つの要素の登坂路走行感覚への影響を評価する実験を行った. その結果, これら4つの要素はどれも登坂路走行感覚の提示に影響を及ぼす要素であることが分かった.

**キーワード** : 移動感覚, 球面型ディスプレイ, 水平加速度

## 1. はじめに

VR 空間の移動方法にはコントローラで VR 空間内の映像を映す視点を操作して移動しているように感じさせる方法などといった, 様々なものが存在する[1]. その中でも特に実空間の移動量と VR 空間内の移動量を一致させて VR 空間内を移動する方法は方向感覚などの知覚に関して他の方法より優れていると言われている[2]. しかし, この方法では VR 空間内の移動距離は実空間の移動距離によって制限されてしまい, 広大な VR 空間を自由に動き回ることが難しい.

この問題に対する解決案の一つとして, Redirected Walking(以降, RDW)[3], Redirected Driving(以降, RDD)[4] という移動方法がある. この方法は, 空間知覚において, 視覚の情報が前庭感覚などの感覚情報よりも優位であることを利用し, VR 空間では直線経路であるが, 実空間では曲線の経路にユーザーを誘導することで, 実空間よりも広大な VR 空間内を自由に動き回ることが可能とするものであり[5], 球面ディスプレイ搭載電動車いすに RDD を用いて既存手法より小さな実空間で直線運動を知覚させるという研究があった[1].

この研究の結果, 概ね 9[m] × 18[m] 程のスペースがあれば一般的な都市空間を自動で走り回ることが可能であることが分かった. しかし, この研究で走り回ることが可能であると判明したのは平地のみの都市空間であり, 様々な地形の VR 空間で走り回ることに関しては今後の課題として残っている.

本研究では, 登坂路走行感覚提示手法を考案し, プロトタイプシステムによる評価実験を行いその有効性を検証した.

## 2. 登坂路走行感覚提示手法

登坂路走行感覚を提示するために重要な要素は車体の傾斜, 走行時の上下方向の加速度と水平方向の加速度, 移動に伴う見え方の変化などが考えられる. しかし, 本研究では先行研究で使用された球面ディスプレイ搭載電動車いすを用いて特殊な機構を加えず, 先行研究と同じ平地のみの実空間での走行で登坂路走行感覚を提示することを目的とするため, 車体の傾斜や上下方向の加速度はそのまま再現することが難しかった. そのため, 他の方法でこれらの要素を再現し, これらと水平方向の加速度, 見え方の変化を組み合わせることを考えた.

車体の傾斜により生じる椅子に押し付けられるような感覚は前方への水平加速度と頭の向きを上へ傾けることによって再現し, 本来車体が傾いた状態で受ける上下方向の加速度と水平方向の加速度も前方への水平加速度で再現できると考えた. また, 移動に伴う見え方の変化は登坂路走行の映像を視野が広く見える球面ディスプレイによって提示し再現した. また, 予備実験の際に映像の視点移動速度と電動車いすの速度を等しくした時に映像の視点移動速度が本来の速度より遅く感じたため, 映像の視点移動速度を本来より速くすることも必要な要素であると考えた.

これらのことから前方への水平加速度と頭の向き, 視野



図 1: 提案したシステム

角,映像の視点移動速度の 4 つの要素が登坂路走行感覚を提示するのに重要な要素であると考え,図 1 に示す 4 つを組み合わせたシステムでこれらを再現することで最も登坂路走行感覚を提示することができるという仮説を立てた。

### 3. 評価実験

#### 3.1 実験装置

本研究の実験は極力調べる条件以外の要因が発生せず,電動車いすを動かす広さがある場所で行うために路面状態が平らで広さが確保できる筑波大学構内にあるエンパワースタジオ内の Large Space (9 [m] × 18 [m])にて行い,図 2,3 に示す水平視野角 200 度の球面ディスプレイを搭載した電動車いすを使用した.電動車いすは,WHILL model CR (WHILL 社),映像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使用し,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) を取り付けしたものを使用することで広視野単眼映像を提示できるようにした.広視野単眼映像にした理由はメガネなどをかけずに周辺視野を広く確保するためである.また,テクスチャマッピングにより投影映像の歪み補正も行った.電動車いすの速度情報の取得には RealSense (Intel 社)を使用し,これらの車いす,プロジェクター,RealSense 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 に接続して電動車いすの速度を操作して前方へ動かす,球面ディスプレイに登坂路走行の映像を映すために unity で作成したアプリを動かす,といった制御を行った。

実験では,実験参加者は球面ディスプレイ内に入り,内部に図 4 に示す投影された坂道の映像を見ることで,VR 空間内で登る坂の把握を行う.この坂道は幅が 0.75 [m],角度が 10 度であり,模様はアスファルトになっている.映像では坂道の下に平地を用意することで坂道の脇から平地と水平線が見えるようにした.また,実験参加者が実空間からの視覚情報をなるべく得ないようにするために,球面ディスプレイの下部に伸縮性の布を 2 枚張り合わせてユーザーの身体を通すようにすることで,床面が直接見えないように



図 2: 球面ディスプレイ搭載電動車いす (側面)

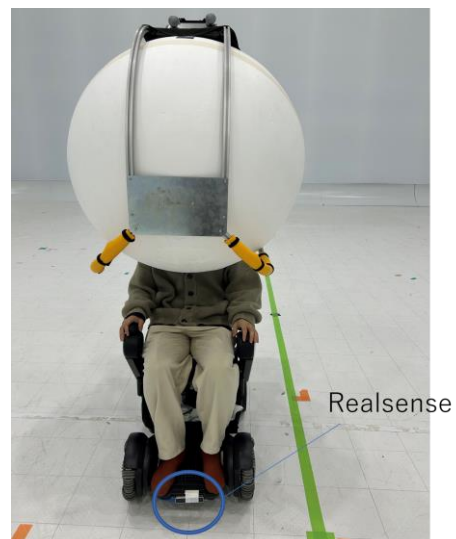


図 3: 球面ディスプレイ搭載電動車いす (正面)



図 4: 坂道の映像

した。

また,実験では見える視野の広さを変える必要があったため,その方法として図 5 に示す 視野 を水平,垂直方向に 60 度の範囲で制限するゴーグルを使用した。



図 5: 視野角制限ゴーグル

表 1: パターン表記の例

	加速度(a)	視点移動速度(v)	頭の向き(n)	視野角(w)
標準試行	あり	一倍	指定なし	広い
avnW	なし	一倍	正面	広い
avnw	なし	一倍	正面	狭い
avNW	なし	一倍	上	広い
avNw	なし	一倍	上	狭い
aVnW	なし	三倍	正面	広い
aVnw	なし	三倍	正面	狭い
aVNw	なし	三倍	上	広い
aVnw	なし	三倍	上	狭い
AvnW	あり	一倍	正面	広い
Avnw	あり	一倍	正面	狭い
AVNW	あり	一倍	上	広い
AVnw	あり	一倍	上	狭い
AVnW	あり	三倍	正面	広い
AVnw	あり	三倍	正面	狭い
AVNW	あり	三倍	上	広い
AVnw	あり	三倍	上	狭い

### 3.2 実験内容

本実験は登坂路走行感覚提示に重要な要素であると仮説を立てた 4 つの要素についてその有効性を検証するために行った。実験参加者を球面ディスプレイ搭載電動車いすに乗せ、毎回、始めに評価の基準となる標準試行を体験させたのち、調べる条件を変えたある一つのパターンを体験させた。実験参加者には標準試行と比べ、登坂路走行感覚をどれほど感じたか、または感じなかったかを以下の 5 段階で答えさせた。

- 1...悪い 2...ちょっと悪い 3...変わらない  
4...ちょっと良い 5...良い

水平加速度が「あり」のときは車いすを止まった状態から  $0.1 [m/s^2]$  の等加速運動で 12 秒間前進させその後、車いすの速度を 0 にし急停止させた。また、「なし」の時は車いすを動かさなかった。視点の移動速度に関しては上記の水平加速度を与えよときの速度と同じ速度を「一倍」とし、その速度を予備実験の際に最も登坂路走行感覚を感じた「三倍」にするパターンを作った。頭の向きに関しては坂道の映像上で坂の先と座って正面になる球面ディスプレイ内部の位置に図 4 に示す黄色い目印を貼り、「上」なら道の先の目

印、「正面」なら正面の目印の方向に頭を向けてもらった。視野角に関しては先ほどのゴーグルの着脱を指示して条件を変えた。各試行は 12 秒間であり、実空間では加速度の条件に従って動かない、または前進し、VR 空間では視点の移動速度の条件に従って登坂路走行をした。表 1 は調べるパターンと標準試行の条件をまとめたものである。このようにそれぞれ 2 パターン用意し、それらすべての組み合わせである  $2^4=16$  パターンをそれぞれ 3 セット、計 48 回の試行について答えさせた。なお、試行の順番はランダムとし、実験参加者は 20 代の成人男性 6 人であった。

### 4. 結果と考察

図 6 の結果から aVNw と AVNw, Avnw と AVnw, Avnw と AvNw, Avnw と AvnW のようなそれぞれの条件のみを変えたパターン同士を比べると加速度、映像の遷移速度、頭の向きに関しては同じか「あり」「三倍」「上」の方がスコアが高く、視野角に関しても「広い」の方がスコアが高い比較が多かった。また、表 2、図 7 に示す四元配置分散分析の結果から加速度、映像の遷移速度、頭の向きは  $p<0.001$  で「あり」「三倍」「上」が、視野角は  $p<0.05$  で「広い」が有意な効果があると示唆された。

これらのことから、提案した四つの要素は登坂路走行感覚をもたらし要素として大きく関わっていると考えられる。しかし、視野角に関してのみ  $p<0.05$  であった。これは今回の坂道の映像では周辺の背景は簡素な物にしてあり、坂道の脇から見える景色に変化があまりなかったからではないかと考えられる。また、AVNw や AVNW といったスコアが高いパターンでは標準偏差も小さいが、aVNw など標準偏差が大きいパターンもあり、実験参加者についても  $p<0.001$  で有意差が見られたことから、スコアが高い組み合わせ以外では登坂路走行感覚の感じ方には個人差があると考えられる。

この結果から本研究で提案した四つの要素を組み合わせることで登坂路走行感覚を提示することができることが分かったが、本実験での標準試行は現実で坂を登るものではなく、より実際の登坂路走行感覚に近い感覚と比較するために現実の登坂路走行との比較が必要だと考えられる。また、本研究では登坂路の走行のみだったため、下り道に関する研究も今後必要だと考えられる。

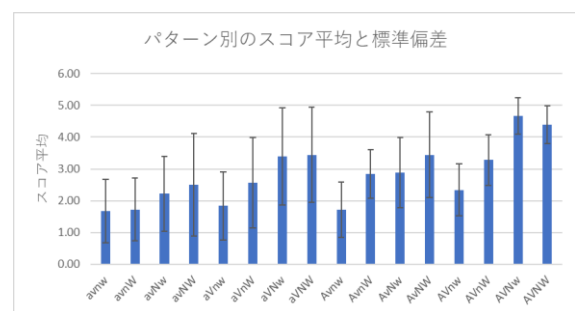


図 6: パターン別のスコア平均と標準偏差

表 2: 四元配置分散分析の結果

被験者間効果の検定						
従属変数: データソース		タイプ III 平方和	自由度	平均平方	F 値	有意確率
切片	仮説	755.611	1	755.611	166.912	<.001
	誤差	22.635	5	4.527 <sup>a</sup>		
加速度	仮説	14.531	1	14.531	16.422	<.001
	誤差	66.366	75	.885 <sup>b</sup>		
視点移動速度	仮説	17.828	1	17.828	20.147	<.001
	誤差	66.366	75	.885 <sup>b</sup>		
頭の向き	仮説	30.431	1	30.431	34.390	<.001
	誤差	66.366	75	.885 <sup>b</sup>		
視野角	仮説	4.459	1	4.459	5.039	.028
	誤差	66.366	75	.885 <sup>b</sup>		
参加者	仮説	22.635	5	4.527	5.116	<.001
	誤差	66.366	75	.885 <sup>b</sup>		
加速度 * 視点移動速度	仮説	.169	1	.169	.191	.663
	誤差	66.366	75	.885 <sup>b</sup>		
加速度 * 頭の向き	仮説	.783	1	.783	.885	.350
	誤差	66.366	75	.885 <sup>b</sup>		
加速度 * 視野角	仮説	.563	1	.563	.636	.428
	誤差	66.366	75	.885 <sup>b</sup>		
視点移動速度 * 頭の向き	仮説	2.888	1	2.888	3.263	.075
	誤差	66.366	75	.885 <sup>b</sup>		
視点移動速度 * 視野角	仮説	.114	1	.114	.129	.721
	誤差	66.366	75	.885 <sup>b</sup>		
頭の向き * 視野角	仮説	1.856	1	1.856	2.098	.152
	誤差	66.366	75	.885 <sup>b</sup>		
加速度 * 視点移動速度 * 頭の向き	仮説	.117	1	.117	.132	.717
	誤差	66.366	75	.885 <sup>b</sup>		
加速度 * 視点移動速度 * 視野角	仮説	.779	1	.779	.881	.351
	誤差	66.366	75	.885 <sup>b</sup>		
加速度 * 頭の向き * 視野角	仮説	.668	1	.668	.755	.388
	誤差	66.366	75	.885 <sup>b</sup>		
視点移動速度 * 頭の向き * 視野角	仮説	.911	1	.911	1.029	.314
	誤差	66.366	75	.885 <sup>b</sup>		
加速度 * 視点移動速度 * 頭の向き * 視野角	仮説	.017	1	.017	.019	.891
	誤差	66.366	75	.885 <sup>b</sup>		

a. MS(参加者)  
b. MS(誤差)

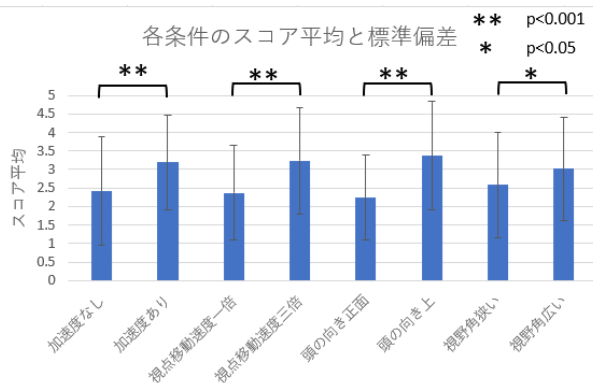


図 7: 各条件のスコア平均と標準偏差

5. まとめ

本研究の結果,登坂路走行感覚をもたらす必要要素として,水平加速度,映像の遷移速度,頭の向き,視野角があり,それぞれ水平加速度は「あり」,映像遷移速度は「三倍」,頭の向きは「上」,視野角は「広い」条件でより登坂路走行感覚を感じる事が示唆され,四つの要素を組み合わせることで登坂路走行感覚を提示することができる事が分かった。

今後の課題としては現実の登坂路走行との比較や下り道に関する研究が考えられる。これらの課題が解決され,上り下りの移動感覚を提示できるようになれば,RDD と組み合わせることで,限られた実空間で,広大な町や観光地などといった VR 空間を移動できるようになると考えられる。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 19H00806 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] 佐藤賢太郎, 球面ディスプレイ搭載電動車いす を用いた狭所における定速走行提示, 筑波大学大学院博士課程システム情報工学研究群修士論文, 2022.3
- [2] 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.
- [3] S. Razzaque, Z. Kohn, and M. C. Whitton, Redirected walking, Proceedings of EUROGRAPHICS, 9, 105-106, 2001.9
- [4] 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.
- [5] 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