

# 缶下駄を用いたリダイレクテッドウォーキングによる曲率操作

山内涼太<sup>†1</sup> 橋本渉<sup>†1</sup>

**概要**：VR 空間の移動手段に、実空間でのユーザの位置と姿勢を VR 空間に反映させ、現実のユーザの位置や姿勢をずらした映像を提示するリダイレクテッドウォーキングという手法がある。この手法を使うことで、実空間よりも広い VR 空間を知覚させ移動ができるようになる。しかし、依然としてリダイレクテッドウォーキングには大きな実空間が必要である。そこで、歩行の際に恣意的にバランスを悪くすることで、よりユーザの移動量や回転量に大きな操作を加えることができるのではないかと考えた。そこで、歩行の際に缶下駄に乗ることにより、リダイレクテッドウォーキングの操作量を増やすことを提案する。ここではリダイレクテッドウォーキングの曲率操作に着目する。実験を通して、同じ曲率ゲインでは主観的曲率が通常の歩行に比べて缶下駄に乗った場合の方が低くなることを確認した。

## 1. はじめに

バーチャルリアリティ (VR) 研究において、没入感や臨場感を高めるため実空間と VR 空間の移動量を一対一に対応させる試みがされてきた。しかし、この方法では移動できる範囲が実空間に制限され、広大な VR 空間を移動することができない。これに対してリダイレクテッドウォーキングと呼ばれる方法論がある。リダイレクテッドウォーキングは変化させた映像を提示することで空間知覚操作を行い、実空間よりも広大な VR 空間を移動することができるというものである。しかし、依然として広大な空間が必要である。例えば、VR 空間上では直進の映像を提示し、半径 6m の円状にある壁を伝いながら移動することで、直進しているように感じると示された先行研究がある[1]。そこで、より狭い実空間での無限歩行を実現するため、空間知覚をより大きく操作したい。そのために、歩きづらくすれば空間知覚操作をより大きくできるのではないかと考えた。本研究では、歩行バランスが悪くなる缶下駄を使うことを考えた。今回は VR 空間上では直進を歩いているつもりでも、実空間では曲がって歩いている曲率操作について着目した。歩行バランスが曲率操作にどのような影響を及ぼしているかを調べる。

## 2. リダイレクテッドウォーキング

リダイレクテッドウォーキングとは、主に視覚が空間知覚においてほかの感覚より優位であることを利用し、ヘッドマウントディスプレイで提示する映像を気づかれない範囲で変化させ、限られた実空間で広大な VR 空間を移動することができるという方法論である[1]。

リダイレクテッドウォーキングの空間知覚操作として図 1 に示すように並進移動量操作・回転量操作・曲率操作・曲げ操作がある。実線が VR の歩行経路で、点線が実空間

の歩行経路である[2]。並進移動量操作は、実空間の移動量に並進ゲインをかけることで VR 空間の移動量を拡大・縮小する操作である。回転量操作では、実空間で回転した量に回転ゲインをかけることで VR 空間の回転量を拡大・縮小する操作である。曲率操作では、ユーザに曲率ゲインを適用することで実空間でのある半径の円周上の経路と VR 空間上での直線の経路と対応付ける操作である。ここで実際の歩行経路の半径を  $r$  とすると、曲率ゲイン  $g_c = 1/r$  と定義される[3]。曲げ操作では、ユーザに曲げゲインを適用することで、実空間上の曲線状の経路と異なる VR 空間上の曲線状の経路を対応付ける操作である。ここで実際の歩行経路の半径を  $r$ 、VR 空間の歩行経路の半径を  $r'$  とすると、曲げゲイン  $g_b = r'/r$  と定義される[4]。

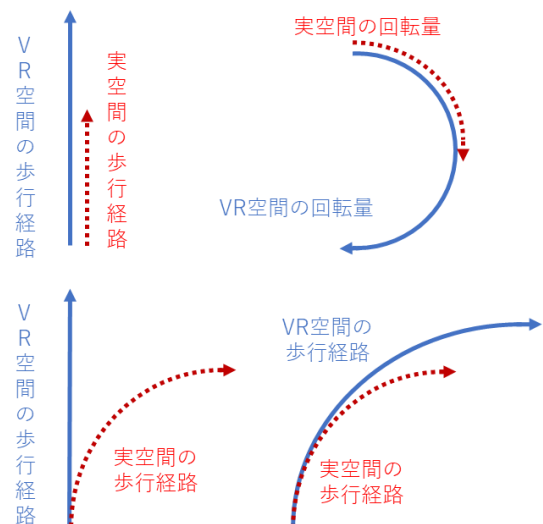


図 1 リダイレクテッドウォーキング[2]

(左上:並進移動量操作, 右上:回転量操作, 左下:曲率操作, 右下:曲げ操作)

<sup>†1</sup> 大阪工業大学 情報科学部情報メディア学科

### 3. 缶下駄による歩行環境

#### 3.1 缶下駄とは

缶下駄とは、空き缶などにひもを通し下駄にした遊びで使われるものである。今回の実験で使用する缶下駄は足元と身体バランスへの意識を向けることの影響を調査するため、竹にひもを通した比較的バランスがとりやすい缶下駄（安定下駄）との地面に接している部分が少なく、比較的バランスがとりづらくなっている缶下駄（不安定下駄）の2種類を使用する（図2）。



図2 缶下駄の着用時の様子（左:安定下駄，右:不安定下駄）

#### 3.2 缶下駄による曲率操作

実空間では曲がって歩行するが、VR空間上を直進歩行している風景が表示される仕組みを図3に示す。実空間上での歩行を開始する座標を $s$ 、実空間上での歩行経路の円弧の中心を $c$ 、実空間上でのユーザの位置を $p$ 、VR空間上でのユーザの位置を $p'$ 、VR空間上での直進上の位置を $q'$ 、実空間上での円弧上の角度 $\alpha$ 、実空間での円弧上の理想位置を $q$ とする。角度 $\alpha$ は式(1)のようになる。

$$\cos\alpha = \frac{\vec{cs} \cdot \vec{cp}}{|\vec{cs}| |\vec{cp}|} \quad (1)$$

このとき実空間上での歩行距離は $\alpha \cdot r_{real}$ であり、実空間とVR空間の移動距離は同じである。VR空間上での位置 $p'$ は式(2)式(3)のようになる。

$$p'_y = \alpha \cdot r_{real} \quad (2)$$

$$p'_x = -(p_x - q_x) \quad (3)$$

VR空間上でのユーザの姿勢を実空間の鉛直方向に対して $\alpha$ 回転させる。このときの曲率ゲイン $g_{c[m^{-1}]}$ は式(4)のようになる。

$$g_c = \frac{1}{r_{real}} \quad (4)$$

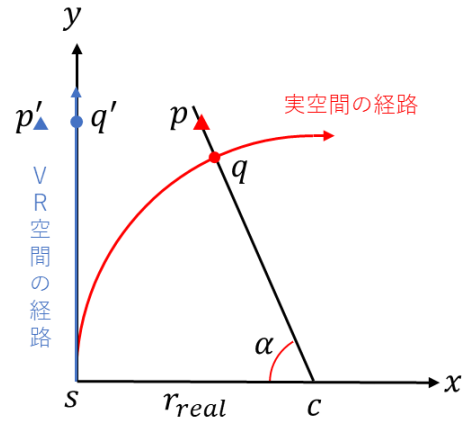


図3 曲率操作の仕組み[1]

#### 3.3 主観的曲率の定義

主観的曲率とは、被験者が歩行時に感じた回転量を基づいて得られるもので、主観的回転量 $\theta[rad]$ と実際の歩行距離 $l[m]$ から主観的曲率 $k[rad \cdot m^{-1}]$ を文献[1]に基づき式(5)のように算出した。主観的曲率が小さければ小さいほど歩行時の曲率半径が小さく感じていることを示している。曲率ゲインが同じでも主観的曲率が小さいほうが、歩行時の曲率半径を小さく感じているので、空間知覚操作の効果が高くなっていることを示している。

$$k = \frac{\theta}{l} \quad (5)$$

#### 3.4 実装

ヘッドマウントディスプレイは、Oculus quest を使用した。VR環境の作成は、Unity を使用した。実験で提示するVR環境は、壁で囲った部屋の6m先に目標位置の目印として赤い正方形の物体を用意した。

曲率操作の実装ができていることを示すために、初期位置でのユーザが見ているVR空間の映像と実空間の位置を図4に、歩行後のユーザが見ているVR空間の映像と実空間の位置を図5に示す。図5の左の映像を見ると、直進している映像を提示しているが、図4と図5のユーザの位置を見ると、ユーザ目線で右側に曲がっていることがわかる。

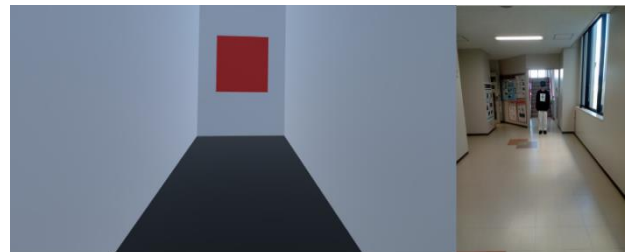


図4 初期位置（左:ユーザに提示している映像，右:実空間の位置）

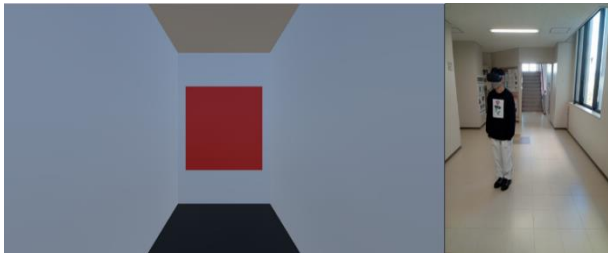


図 5 歩行後（左: ユーザに提示している映像, 右: 実空間の位置）

## 4. 缶下駄による曲率操作の効果

### 4.1 実験目的

今回の実験の目的は、缶下駄を用いることで空間知覚操作が普通に歩行した時より向上するかどうかを調査する。

### 4.2 実験手順

通常歩行と安定下駄と不安定下駄の 3 水準、2 水準の歩行経路の曲率（0.167, 0.333）の 3×2 条件を被験者内計画で行った。各条件の試行順は無作為化した。評価項目は被験者が歩行中に感じた回転量をもとに主観的曲率を算出したデータである。

実験を始める前に 2 種類の缶下駄に慣れてもらうため、不安定下駄で約 5 分程度乗ってもらう。そのあと被験者にヘッドマウントディスプレイを装着してもらい、閉眼状態で指定の場所まで実験者が誘導する。誘導した後被験者には VR 空間内での目標位置である赤い正方形のところまで道の真ん中を歩くように指示して歩行してもらう。目標の位置まで歩行した後は、閉眼状態で実験の最初と最後の位置がわからないように別の場所に誘導する。そのあと主観的回転量を答えてもらう。主観的回転量は、図 6 の FreeCAD を使用した画面で自分がどの程度回転しながら歩いたかをユーザの回答線を動かして回答してもらう。図 6 の場合は、30 度回転したと回答した画面である。

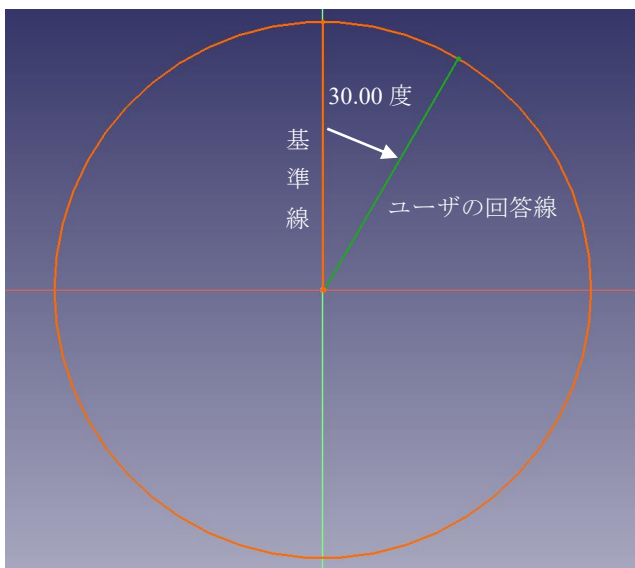


図 6 主観的回転量の回答画面

### 4.3 実験結果

実験から得られた主観的曲率の平均値と標準誤差を図 7 と図 8 に示す。左から通常歩行条件、安定下駄条件、不安定下駄条件である。曲率ゲイン 0.167, 0.333 のそれぞれで一元分散分析をしたところ、0.167 では有意でなかったが ( $F(2,12)=0.78$ ,  $p=.48$ ,  $\eta^2 = 0.12$ ), 0.333 では有意であった ( $F(2,12)=4.82$ ,  $p=.029$ ,  $\eta^2 = 0.45$ )。次に曲率ゲイン 0.333 の条件で多重比較の Bonferroni 法を用いて有意水準 5% とし、 $p$  値を  $p \cdot n$  ( $n$  を検定回数とする) に調整し行ったところ、通常歩行と安定下駄 ( $p<.001$ )、通常歩行と不安定下駄間 ( $p<.004$ ) で有意差があった。その他の条件間で有意差はなかった。通常歩行、安定下駄、不安定下駄の順で主観的曲率が低くなるのがわかる。

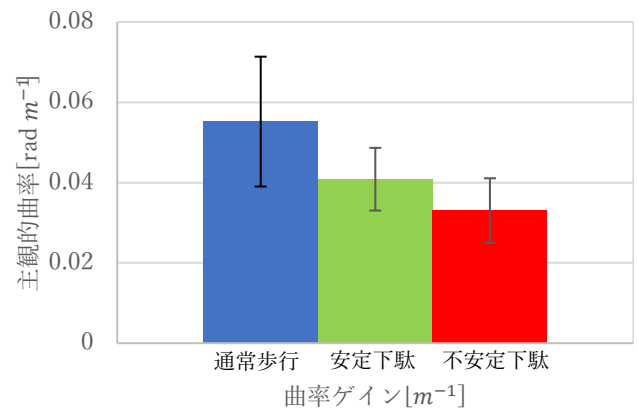


図 7 曲率ゲイン 0.167 で主観的曲率の平均値と標準誤差

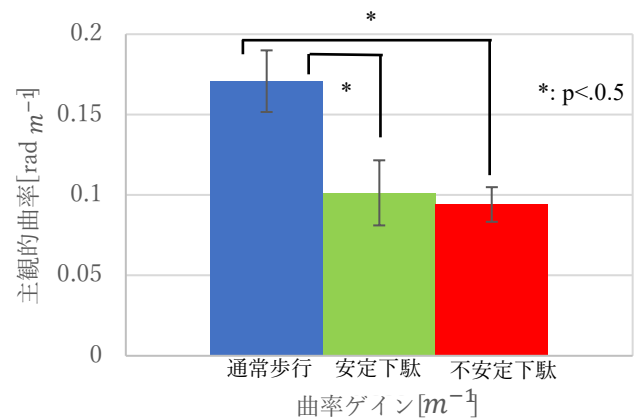


図 8 曲率ゲイン 0.333 で主観的曲率の平均値と標準誤差

### 4.4 考察

通常歩行条件に比べると缶下駄に乗る条件の方の主観的曲率が小さくなっていることから、歩行する際にバランスを低下することや普段と異なった歩き方をすることで空間知覚操作の効果が向上したと考えられる。曲率ゲインが高いほど、歩行時のバランスを低下させることでの空間知覚操作の効果が高くなると考えられる。また安定下駄と不安定下駄の主観的曲率の差があまり変わらないのは、歩行

中の缶下駄の難易度は大きく変わらなかったため変化が少なくなったと考えられる。安定下駄と不安定下駄との差がなく、これ以上バランスを低下させると歩行することが困難になり、乗りこなせる人が限られてくると考えられる。また安定下駄の方でも通常歩行条件と差があるためこれ以上バランスを悪くする必要性はないと考えられる。

## 5. 終わりに

今回の研究では、缶下駄をはいた状態で歩くことで足元と身体バランスへの意識を向けることで曲率操作の空間知覚操作の向上を目的とした。そこで安定した缶下駄と不安定な缶下駄の2種類用意し実験をした。実験の結果から足元と身体バランスへ意識を向けることで空間知覚操作の向上が見られた。今後の展望として、並進移動量や曲げ操作についても空間知覚操作の向上が見られるかどうかを確認していきたい。

## 参考文献

- [1] 松本啓吾, 鳴海拓志, 伴祐樹, 谷川智洋, 廣瀬通孝: 視触覚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: 日本バーチャルリアリティ学会, vol23 No.3 pp.128-138, 2018
- [2] Niels Christian Nilsson, Tabitha Peck, Gerd Bruder, Eri Hodgson, Stefania Serafin, Mary Whitton, Frank Steinicke, Evan Suma Rosenberg: 15 Years of Research on Redirected Walking in Immersive Virtual Environments, IEEE Computer Graphics and Applications, vol.38, no.2, pp.44-56, 2018
- [3] Frank Steinicke, Gerd Bruder, Luv Kohli, Jason Jerald, and Klaus Hinrichs: Taxonomy and implementation of redirection techniques for ubiquitous on Cyberworlds, International Conference on Cyberworlds, 217-223 (2008.4)
- [4] Eike Langbehn, Paul Lubos, Bruder Paul, and Frank Steinicke: Bending the Curve: Sensitivity to Bending of Curved Paths and Applied Perception'16, 113-120 (2016)