

# 手押し車による触覚フィードバックを利用した Redirected Walking

寺尾 颯人

井尻 敬

芝浦工業大学 工学部 情報工学科 〒135-8548 東京都江東区豊洲3丁目7番5号

E-mail: a118080@shibaura-it.ac.jp, ijiri@shibaura-it.ac.jp

あらまし 本研究では、設置が容易な触覚フィードバック付きの Redirected Walking 技術の実現を目的とし、手押し車を利用した手法を提案する。具体的には、前輪の角度を制御することで進行方向を指定可能な手押し車を用意し、ユーザはこれを押しながら実世界を歩行する。提案手法は、「直線移動」と「90°の方向転換」からなる Virtual Reality (VR) 空間の経路を、「円弧上の移動」と「180°の方向転換」からなる実世界の経路に対応付ける。これによりユーザは、手押し車による触覚フィードバックを受けながら、限られた実空間の歩行により、広大な VR 空間を移動できる。提案手法の有用性を示すため、提案手法による Redirected Walking を行った際にユーザが感じる歩行経路の曲率を調べる実験と、提案手法を用いたコンテンツを体験してもらう実験を実施した。結果、手押し車の有無によりユーザの曲率知覚に変化は認められなかった。一方、手押し車を利用して歩行すると、歩行速度が低下する可能性と実際の歩行経路が想定した経路から逸脱しにくい可能性が示唆された。また、提案システムに関して複数の肯定的なコメントを受けた。

キーワード リダイレクテッドウォーキング, 触覚フィードバック, 手押し車

## 1. はじめに

限られた実空間内を利用し広大な Virtual Reality (VR) 空間を歩行するための方法として、Redirected Walking (RDW) [1]が知られる。この RDW は、ユーザに気づかれない程度に位置や姿勢をずらした映像を Head Mounted Display (HMD) に提示することで、実空間の歩行経路を操作するものである。RDW を利用すると、例えば、VR 空間の直進移動を実空間における円弧上の移動に対応付けることで、ユーザは、限られた広さの実空間内を歩行しているにもかかわらず、広大な VR 空間を歩行しているような感覚を得る。

RDW に触覚フィードバックを組み合わせた手法が提案されている。松本らは、湾曲した壁を実空間に設置し、これに触れながら歩行する RDW 技術を提案した[2, 3]。この手法では、実世界の円弧上の歩行を VR 空間の直進に対応付けた場合に、曲率半径が 6m 以上であればユーザは気づきにくいことが示された。しかし、この技術には、壁の設置・移動に手間がかかるという課題がある。他にも、触覚フィードバックにより RDW の効果をも高める試みがなされている。例えば、実空間に細い円弧状の足場を設置し足裏触覚を提示する手法[4]、左右で高さが異なる靴を履いて歩行する手法[5]、ハンガー反射を利用する手法[6]が挙げられる。しかしこれらの手法は、直進以外の経路の歩行を考慮していない。

そこで本研究では、設置が容易な触覚フィードバック付きの RDW 技術の実現を目的とし、手押し車を利用した手法を提案する。具体的には、前輪の角度を制御することで進行方向を変化させられる手押し車を用意し、ユーザはこれを押しながら実空間を歩行する。この際提案システムは、VR 空間における「直線移動」と「90°旋回」を、実空間における「円弧上の移動」と「180°旋回」に対応付け、ユーザの HMD に提示する画像を操作する。これにより、ユーザは、手押し車による触覚フィードバックを受けながら、有限の実空間

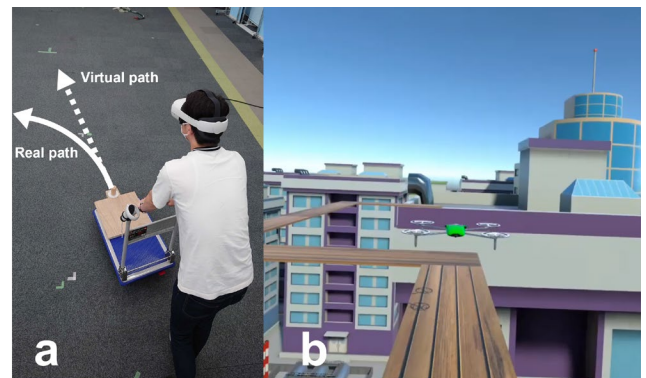


図1: 手押し車を利用した RDW. ユーザが手押し車を押しながら実空間の曲がった経路を歩行すると (a), HMD 上には直線的な経路を進む様子が提示される (b).

の歩行により広大な VR 空間を移動できる。また、提案システムは、手押し車と HMD のみで構成されるため、既存研究[2, 3]に比べ設置や経路変更が容易に行える。図1に、提案手法を利用する様子を示す。

## 2. 提案システム

### 2.1. 提案システムの構成

提案手法は、スタンドアロン型 HMD (Meta Quest2) と、3輪の手押し車で構成される。手押し車には、Wi-Fi 通信機能を持つマイコンボード (ESP32) とステップモーターが搭載されている。モーターと手押し車の前輪は歯車によって接続され、マイコンからモーターを制御することで前輪の角度を操作できる。システム起動時には、HMD からマイコンへ前輪の角度の値を送信することで手押し車の進行方向を操作する。

### 2.2. VR 空間の経路

本研究では、課題を単純化するため、VR 空間の経路を、直線移動と 90°の方向転換から構成されるものに

限定する．また，提案システムにおいて，ユーザは予め定められた経路を歩行するものとする．この制限下でも，建物内の廊下，都市など，多様なシーンを表現可能である．

提案システムは，VR空間における直進を実世界の円弧上の移動に，VR空間における90°方向転換を実世界における180°方向転換に対応付ける．図2にVR空間の歩行経路の例と，対応する実空間の経路を示す．この例において，ユーザはまずVR空間の赤色矢印の経路を歩行する（図2左）．この時，実空間では図2右の赤色矢印の経路を歩行する．次にユーザは，赤色矢印の末端に到達すると，VR空間において90°の方向転換を行う．このとき，実空間では，180°の方向転換を行い，先程とは正反対の方向を向く．続いてユーザは，黄色の経路を歩行する．この通り，直線と90°方向転換で構成されたVR空間における経路が，実空間では円弧上を行き来する経路に変換される．

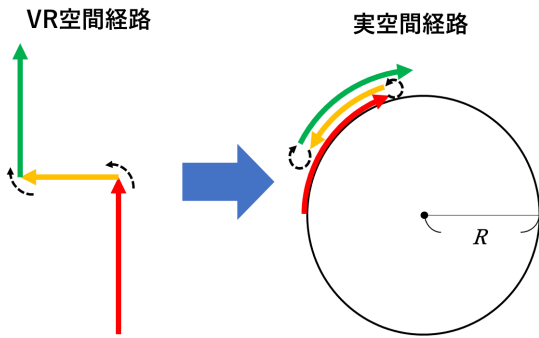


図2：VR空間経路と実空間経路の対応関係．

### 2.3. 歩行経路操作方法

提案システムは，直進と旋回という二種類の動きに対するRDWを実施する．それぞれの動きに対して，手押し車の前輪の角度と，HMDに提示する画像を操作する必要がある．それぞれ詳しく説明する．

**直進移動．**提案システムでは，VR空間における直進が，実空間における円弧上の移動に対応付けられる．この際，提案システムは，手押し車の前輪角度を $\theta = \arcsin \frac{L}{R}$ と指定する．ただし， $R$  [m]は事前に指定される円弧の半径， $L$  [m]は手押し車の前輪から後輪までの長さである．また，提案システムは，HMDに提示する画像も操作する．VR空間におけるHMDの位置を $\mathbf{p} \in \mathbb{R}^3$ ，姿勢を $\mathbf{M} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ とする．ユーザが実空間において，円弧上を $a$  [m]だけ移動した場合，VR空間におけるHMDの位置を $\mathbf{p}' = \mathbf{p} + \mathbf{a}\mathbf{t}$ と更新する．ここで， $\mathbf{t}$ は予め定められたVR空間における進行方向である．また，円弧上を反時計回りに $a$  [m]だけ歩行すると，HMDは鉛直方向を軸に角度 $\phi = a/R$ だけ回転する．提案システムは，この回転の効果を打ち消すよう，VR空間におけるHMDの姿勢を $\mathbf{M}' = \mathbf{M} \cdot \mathbf{R}_{-\phi}^y$ と更新する．ここで $\mathbf{R}_{-\phi}^y$ はY軸周りに $-\phi$ だけ回転する回転行列である．これにより実空間における円弧状の移動がVR空間における直進に置き換わる．

**旋回．**提案システムは，VR空間における90°旋回を実空間における180°旋回に対応付ける．旋回時，提案システムは，手押し車の前輪を進行方向に対して直

角に曲げ，その場で回転することのみが可能な状態にする．また，提案システムは，HMDに提示する画像も操作する．VR空間におけるHMDの姿勢を $\mathbf{M} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ とする．今，ユーザが実空間で $\rho$ だけ反時計回りに旋回した場合，HMDの姿勢を $\mathbf{M}' = \mathbf{M} \cdot \mathbf{R}_{\rho/2}^y$ と更新する．これによりVR空間の回転角度が実空間の回転角度のちょうど半分になる．

### 3. 曲率の知覚に関するユーザスタディ

提案手法の効果を確認するためにユーザスタディを行う．本実験では，主に『手押し車の有無によりユーザのRDW操作への知覚に影響があるか』『手押し車の利用により歩行速度が変化するか』『手押し車の利用により歩行経路が変化するか』という項目に関して調査を行う．

#### 3.1. 実験手順

実験参加者は，異なる条件でVR空間における5mの直線上を14回歩行する（図3a）．条件は，手押し車の有無の2条件と，実世界における7種の曲率の，計14通りである．本研究では，ユーザが実際に歩行する実世界の曲率 $c$ として $\{-0.250, -0.167, -0.125, 0, 0.125, 0.167, 0.250\}$  [m<sup>-1</sup>]の7種を用意する．ただし，正值は時計回り，負値は反時計回りを示す．この14条件は，ランダムな順番で実施され，実験参加者は，各歩行の直後，自身が実空間で実際に歩行したと思う曲率を回答する．この回答は，VR空間内にて曲線を示す形で行う（図3b）．また，我々は，歩行中のHMDの位置や姿勢をログとして記録する．

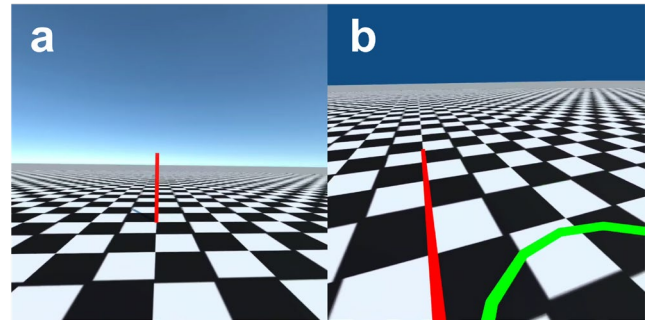


図3．歩行曲率の知覚に関するユーザスタディ．ユーザはVR空間を赤い棒に向かって5m直進する．歩行後，ユーザは自分の歩いたと感じた曲線をVR空間にて緑色の曲線を利用して回答する．

#### 3.2. 結果と考察

9名の大学生の協力の下，前述のユーザスタディを実施した．実験参加者が知覚した曲率の平均値と標準誤差を図4に示す．この結果に二要因分散分析を行ったところ，曲率 $c$ の主効果に有意差と大きな効果量がみられた ( $F(6,112) = 2.181, p < .01, \eta^2 = .70$ )．また，手押し車の有無の主効果と交互作用には有意差はみられなかった．続いて，手押し車利用時に着目し，7種の曲率 $c$ について，参加者が知覚した曲率の多重比較を行った．結果，直線上の歩行 ( $c = 0$ ) と有意差がみられたのは，曲率 $c = 0.250$ であった ( $p = .016$ )．同様の比較を手押し車非利用時(HMDのみでRDWを実施)でも実施したところ， $c = 0$  と  $c = -0.250$  の間に有意差がみられた ( $p = .010$ )．

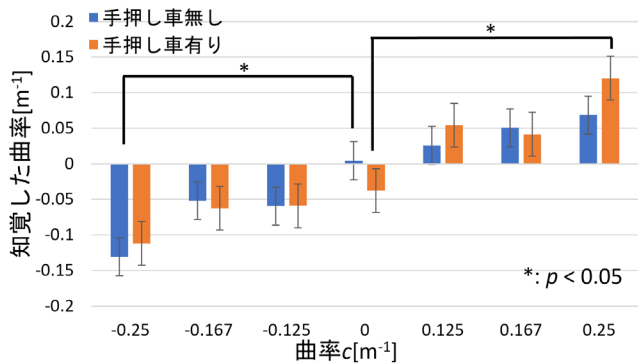


図 4. 実験参加者が知覚した曲率. 横軸は実際に歩行した実空間の曲率を, 縦軸はユーザが回答した (知覚した) 曲率の平均値を示す.

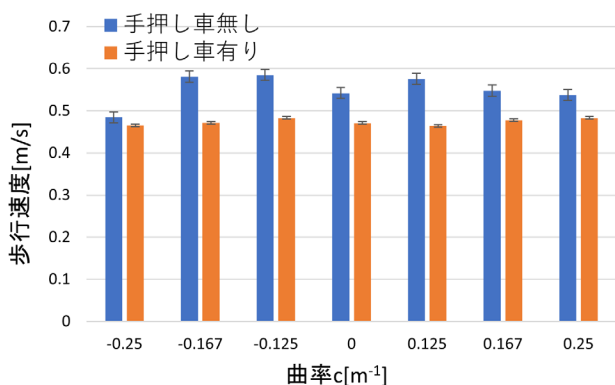


図 5. 体験中の歩行速度. 横軸は実際に歩行した実空間の曲率を, 縦軸は歩行速度の平均値を示す.

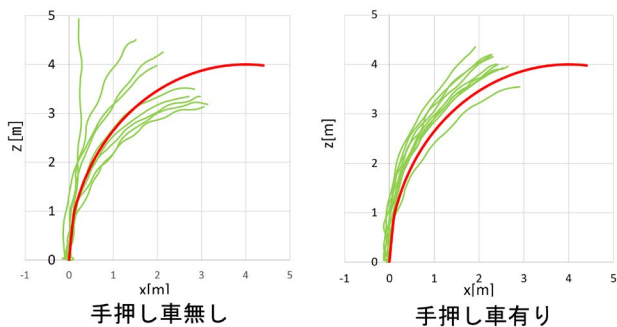


図 6. 曲率  $c=0.250$  の条件において, 実験参加者が実際に歩いた経路. 左が手押し車なし, 右が手押し車ありの歩行経路. 赤線は  $c=0.250$  の円弧を表す.

次に, 実験参加者の歩行速度についてまとめたグラフを図 5 に示す. 手押し車利用時の平均歩行速度は  $0.47\text{m/s}$ , 非利用時には  $0.55\text{m/s}$  であった. 歩行速度に対し二要因分散分析を行ったところ, 手押し車の主効果に有意差と大きな効果量がみられ, 実空間経路の曲率の主効果と交互作用には有意差はみられなかった ( $F(6,112) = 3.92, p < .01, \eta^2 = .16$ ).

最後に曲率  $c = 0.250$  の際に実験参加者が実際に歩行した経路を図 6 に示す. 赤色の曲線が  $c=0.250$  の円弧を示し, 緑色の複数の曲線は各実験参加者が歩行した経路を示す. この図から, 手押し車にはユーザの歩行経路をシステム側が指定した経路から逸脱しにくく

する効果があると考えられる. そこで, 実際の歩行経路を最小二乗法により円弧に近似することでその曲率を算出した. この実際の歩行経路の近似曲率とシステムが想定する曲率との絶対誤差を算出し,  $t$  検定を行った. 結果, 手押し車利用時は, 非利用時と比べて有意に絶対誤差が小さかった ( $t(62) = 4.37, p < .01$ ).

上記の結果をまとめる. 実験参加者が知覚する曲率について, 手押し車の有無による差は確認されなかった. 一方, 実験参加者の歩行速度について, 手押し車を利用すると, 歩行速度が低下する傾向が見られた. また, 手押し車を利用すると, ユーザの歩行経路が, システム側が想定したのから逸脱しにくくなる傾向が確認された.

#### 4. コンテンツ体験におけるユーザビリティ調査

提案手法のユーザビリティを評価するために, 提案手法を利用したデモコンテンツを体験してもらうユーザスタディを実施する.

##### 4.1. 実験手順

デモコンテンツの内容は, 2 つのビルの上に架かる細い足場の上を渡るというものである. 図 7 に VR シーンを示す. 足場の全長は  $30\text{m}$  で, 途中で 3 つ曲がり角がある. 実験参加者は実空間では半径約  $5\text{m}$  の円弧状経路を手押し車を押しながら歩行する. 実験参加者は, コンテンツの体験前後に SSQ[7]に回答する. また, 参加者は, 体験後に提案手法のユーザビリティに関するアンケートに回答する.

##### 4.2. 結果と考察

本実験には 8 名の学生が参加した. コンテンツ体験前と体験後の SSQ トータルスコアについて  $t$  検定を行った結果, 有意差はみられなかった. これにより, 提案手法はシミュレータ酔いを引き起こす可能性が低いことが示唆された.

また, アンケートより, 提案手法に関する肯定的な回答と否定的な回答の両方が得られた. 肯定的な回答には, 「自然に歩行, 方向転換できた」といった回答が多く見られ, 中には操作そのものに気づかなかった実験参加者もいた. また, 「手押し車によって誘導される感覚が VR 空間の歩行において快適さや安心感を感じた」といった回答もあり, 実空間を視認できない VR コンテンツにおいて経路誘導や触覚フィードバックの提示は, VR 空間の歩行に安心感を与える可能性が示唆された.

一方, 提案手法に対して否定的な回答として, 「経路が曲がっていることや, 方向転換時に回転量にずれがあることに気づき違和感を感じた」といったものが散見された. また, 「手押し車の持ち手から進行方向や方向転換時の回転量のずれを感じた」「持ち手の高さが自身の身長と合わず歩きにくさを感じた」という回答もあり, 手押し車の持ち手の高さ, 持ち方, 形状等が, ユーザの知覚や没入感に悪い影響を与える可能性も示唆された.

#### 5. まとめと展望

本研究では, 設置が容易な触覚フィードバック付きの RDW 技術の実現を目的とし, 進行方向の調整が可



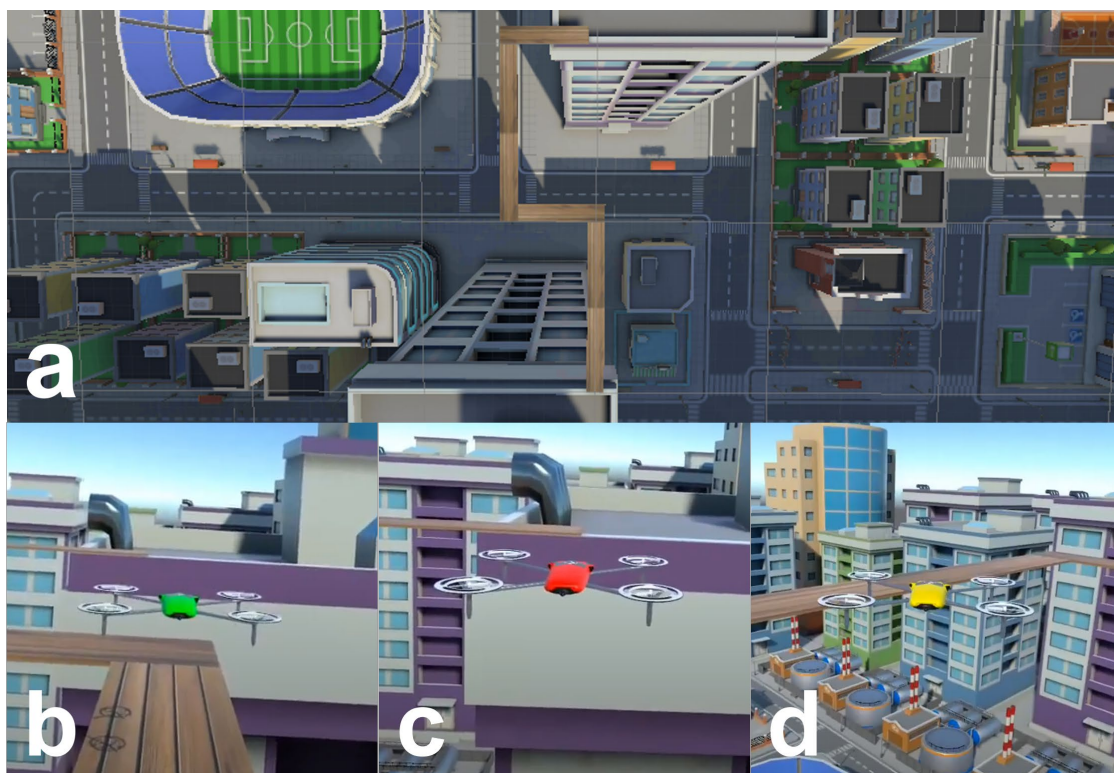


図 7. 提案手法を利用したデモコンテンツ. (a)VR 空間の俯瞰図と, (b, c, d) 歩行中のユーザからの視界. ユーザはビルの間にはかけられた幅 0.5m の橋を, ドローンの誘導に従い手押し車を押しながら歩行する.

能な手押し車を利用する方法を提案した. 提案手法の有用性を示すため実験を行った結果, 手押し車の利用時と非利用時においてユーザの知覚する歩行経路の曲率に差はみられなかった. 一方, 手押し車を利用すると, 歩行速度が低下する傾向や, システム側が想定した経路から逸脱しにくくなる傾向が確認された. また, 提案手法を利用したコンテンツの体験を通し, 提案手法のユーザビリティについて肯定的・否定的なコメントを受けた.

本研究の重要な将来課題のひとつは, 手押し車の持ち手の形状や高さの違いによる, 曲率知覚を調査することである. また, 予め固定された経路だけでなく, 動的に自由な経路を歩けるように提案手法を拡張することも重要な将来課題である.

## 文 献

- [1] Sharif Razzaque, Zachariah Kohn, and Mary C. Whitton : “Redirected Walking”, EUROGRAPHICS 2001, (2001).
- [2] 松本啓吾, 鳴海拓志, 伴祐樹, 谷川智洋, 廣瀬通孝 : “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”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 23, 3, pp.129-138, (2018).
- [3] Keigo Matumoto, Yuki Ban, Takuji Narumi, Yohei Yanase, Tomohiro Tanikawa, and Michitaka Hirose : “Unlimited Corridor: Redirected Walking Techniques using Visuo Haptic Interaction”, SIGGRAPH 2016 Emerging Technologies, (2016) .
- [4] 中垣内千晶, 橋本康弘, 岡瑞起, 加藤和彦 : “VR と足裏触覚を用いたアテンション操作によるリダイレクテッド・ウォーキング”, 人工知能学会

全国大会論文集第 31 回全国大会, pp.1G33-1G33, (2017) .

- [5] YanXiang Zhang and Jiao Hong : “Direction change of redirected walking via a single shoe height change. ”, 2021 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces Abstracts and Workshops (VRW), pp.375-376, (2021) .
- [6] Chun Xie, Chun Kwang Tan, and Taisei Sugiyama : “The effect of hanger reflex on virtual reality redirected walking.”, 2019 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR), pp.1243-1244, (2019) .
- [7] Robert S Kennedy, Norman E Lane, Kevin S Berbaum, and Michael G Lilienthal : “Simulator sickness questionnaire: An enhanced method for quantifying simulator sickness.”, The international journal of aviation psychology, 3, 3, pp.203-220, (1993) .