

## 頭部搭載型ディスプレイを用いた直線歩行への誘導方法の検証

西 綾花<sup>†1</sup> 星野 圭祐<sup>†1</sup> 梶本 裕之<sup>†1</sup>

VR 環境下において無限歩行空間を実現する手法は数多く提案されているが金銭的、空間的コストの問題は未解決である。本研究では比較的安価な直線運動のトレッドミルと、頭部搭載型ディスプレイによる直線状の運動誘導とを組み合わせて提案する。本稿では Redirected Walking として知られる視界の回転や動作のスケールの変化によるユーザの誘導手法を採用し、VR 空間での被験者の移動を視界の回転を用いて直線に導く方法を提案し、実際に提案手法を用いて被験者実験を行った。その結果 PD 制御を用いた手法においてユーザの歩行を最も直線状に誘導可能であることが示唆された。

## Straighten Walking Path by Using Redirected Walking Technique

AYAKA NISHI<sup>†1</sup> KEISUKE HOSHINO<sup>†1</sup> HIROYUKI KAJIMOTO<sup>†1</sup>

**Abstract:** Virtually infinite space is a holy grail of immersive virtual environment (IVE), and numerous approaches have been proposed, yet there still is a hardware and spatial cost. We propose to combine linear treadmill and linearization of walking path by head mounted display (HMD). In this paper, we utilize technique known as Redirected Walking, which allows people to walk in around a large IVE by presenting imperceptible rotation and scale movement in a virtual scene. We inversely use this technique to straighten walking path by rotation of fields of view. We conducted an experiment using the proposed method, and showed that by using PD control algorithm, the walking path became straightened.

### 1. はじめに

近年、Oculus Riftをはじめとした頭部搭載型ディスプレイ (HMD) や、Kinect などの身体姿勢計測機器を安価に入手することが可能になった。また、無料でクオリティの高い VR 空間を作成可能な Unity などのゲームエンジンも普及してきたことにより、誰でも簡単に VR 空間を作成、体験することが可能になっている。しかし、VR 空間を実現世界と同じように歩行しようとする広いスペースや高いコスト、バーチャル空間の歩行専用の器具が必要になってしまうのが現状である。

そこで本研究は、低コストかつ省スペースで違和感のない VR 空間での歩行移動を可能とするため、比較的安価な 1 次元トレッドミルと、HMD による歩行軌道の直線化を組み合わせて VR 空間上での自由な歩行を可能とする手法を提案する(図 1)。本稿ではその前段階として、VR 空間での曲線歩行を現実での直線歩行に変換する手法を用いて実際に歩行の誘導が可能か実験し、その結果について報告する。

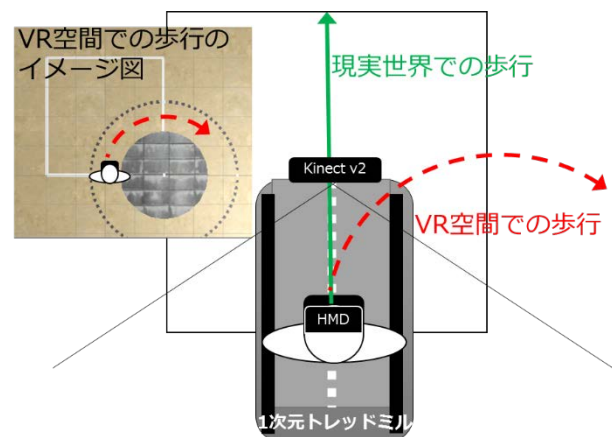


図 1: 提案手法のイメージ図

### 2. 関連研究

#### 2.1 VR 空間の移動

VR 空間での歩行移動方法をよりリアルに体感させる方法について、数多くの研究が行われている。雨宮ら 1)は、足踏みを利用した VR 空間の移動手法を提案している。この方法はコストが低く現実的な解であるが歩行ではなく足踏みであるため、脚にかかる力や足裏の感覚などが、実際に脚を踏み出す感覚とは異なると考えられる。同一の場所にとどまりながら実際にユーザが脚を踏み出すものとして米 Virtuix 社による Virtuix Omni 2)が挙げられる。これはすり鉢状の台の上で足を滑らせることにより VR 空間の移動

<sup>†1</sup> 電気通信大学  
The University of Electro-Communication

を行う歩行型 VR デバイスである。しかし足を滑らせる感覚と歩行の感覚は異なるため新たに技能を獲得する必要があると考えられる。

VR 空間での歩行感覚を提示するには、実際に歩行することが最も効果的であるといえる。実際に歩行を用いて VR 空間の移動を可能にしている研究として、2次元トレッドミルを用いた手法が提案されている(3)4)。これらは理想的な形ではあるが、2次元トレッドミルという特殊な装置が必要となるため、多大なコストがかかり一般に普及するのは困難であると考えられる。

大掛かりな装置を用いずに低コストで VR 空間の歩行を可能にするには、VR 空間に合わせて現実空間を実際に歩行するのが最も効果的だと考えられる。しかし VR 空間に合わせて現実空間を実際に歩行するには VR 空間と同等の広さの空間が現実世界に必要となってしまう。

## 2.2 Redirected Walking

現実世界に広いスペースが必要という問題を解決する方法として、HMD を装着したユーザの視界を気づかれぬ程度に VR 空間を回転、また、スケールの調整を行うことにより歩行を誘導し、現実の空間よりも広い VR 空間を歩行することを可能とする Redirected walking が提案されている(5)。しかし VR 空間に比べて狭い空間とはいえ、Redirected walking を行うには最低でも 30m 四方の部屋が必要であることが分かっている(6)。よって、ある程度広く何もない空間と、その広さ分のトラッキング装置が必要となるため、一般への普及が容易とはいえない。

## 3. 提案手法

我々はトレッドミルによって身体位置をとどめる手法と HMD による誘導とを組み合わせた新たな手法を提案する。トレッドミルとしては1次元直線運動するものを用いる。このようなトレッドミルはスポーツジムでよく見られるものであり、家庭での購入も可能な価格が実現されている。同時に、Redirected Walking の手法を援用し、HMD を装着した際の VR 空間での曲線歩行を、現実世界での直線歩行に誘導する。すなわち頭部位置を取得し、ユーザが直線上からずれた場合(トレッドミルから離れる場合)、VR 空間を視覚的に回転させることで身体の回転運動を誘発させ、結果としてユーザの位置を元の直線上、すなわちトレッドミル上に保つ。Redirected Walking が VR 空間における直線歩行を実空間での曲線歩行に変換する手法であったのに対し、本手法では VR 空間における曲線歩行を実空間での直線歩行に変換する手法であるといえる(図1)。本論文ではこの直線上への誘導性能について扱う。

### 3.1 アルゴリズム

本手法では、歩行を直線に誘導する手法が必要となる。

歩行を直線に誘導するため、以下の2つのアルゴリズムによって VR 映像を回転させた。

$$\text{rotate} = K_p * d \quad (1)$$

$$\text{rotate} = K_p * d + K_d * V_x \quad (2)$$

ただし y 軸を望ましい進行方向に、x 軸を y 軸と直交する方向に取る(図2)。rotate は画像の回転角度の各フレームでの増加量、d は x 軸における中心の直線からの距離、Vx は x 軸方向の速度、Kp と Kd はそれぞれ比例ゲイン、微分ゲインを表す。

式(1)は P 制御を表しており、x 軸方向の現在の身体ずれに比例した画像回転を行うというものである。式(2)は PD 制御を表しており、式(1)に追加して x 軸方向の速度に比例するブレーキ成分を追加している。

さらに上記の2つに対して画面の急激な変化を避けるために、6)で用いられている下記の IIR フィルタによってスムージングを行った。本論文において、以下の実験では、s = 0.8 とした。

$$\text{rotate} \leftarrow (1 - s) \times \text{before\_rotate} + s \times \text{rotate} \quad (3)$$

ただし、左辺の rotate は新たに適用する回転角度を、右辺の before\_rotate は現在の回転角度を、右辺の rotate は式(1)(2)によって計算された回転角度を表す。また上記の式は約 1/25 秒間隔で更新した。

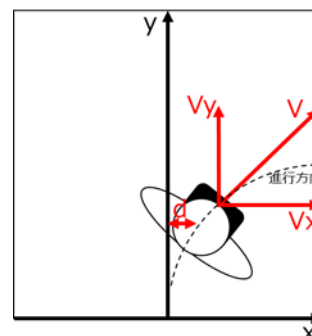


図 2：使用した軸および変数

## 4. 歩行誘導実験

提案手法を用いた歩行誘導が実際に実現可能かを検証し、制御の種類や各パラメータを最適化するための実験を行った。

### 4.1 実験環境

本実験は、6m 四方の部屋で行った(図3)。被験者に HMD(Oculus VR 社製、Oculus DK2)を装着させた状態で VR 空間内に作成した通路を歩かせた。その際の被験者の頭部位置を姿勢計測装置 Kinect(Microsoft 社製、Kinect ver2)で測定した。また、HMD を布で覆うことによって、HMD と顔の隙間から現実世界が見えないようにした。

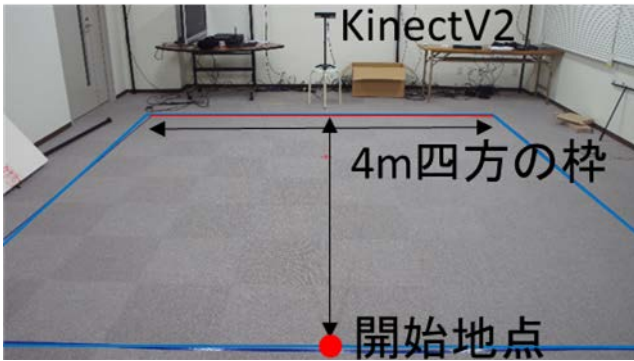


図 3：実験環境

#### 4.2 実験条件

本実験では制御式のパラメータとして表 1 に表す 13 通りの組み合わせを作成した。なお  $K_p$  は、距離を角度に変換する係数とし、その単位は  $\text{degree/m}$  である。 $K_d$  は角度に変換する係数とし、その単位は  $\text{degree*s/m}$  である。以降これらの単位は省略し、数値のみで表示する。速度を実験時の VR 空間の通路は図 4 に表す。正弦波状カーブと円の 2 種類である。各通路において、13 条件、合計 26 試行を用意した。

VR 空間(図 4)における白い四角は 4m 四方であり、現実の実験環境(図 3)にある赤と青の四角と同じスケールである。

	制御なし			P制御			PD制御						
$K_p$ (degree/m)	0	1	2	3	1	1	1	2	2	2	3	3	3
$K_d$ (degree*s/m)	0	0	0	0	2	4	6	2	4	6	2	4	6

表 1：パラメータ組み合わせ表

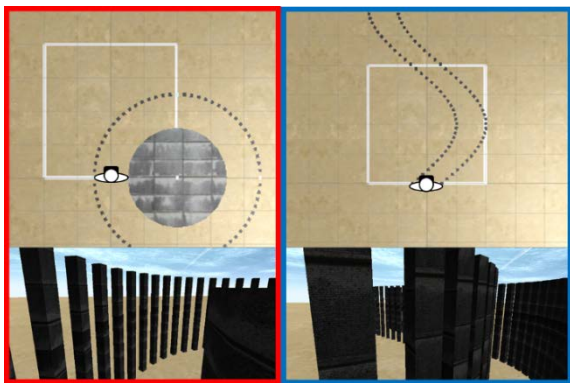


図 4：VR 環境に作成した通路(右：円，左：正弦波状カーブ)

#### 4.3 実験手順

被験者は図 3 の開始地点に立ち HMD を装着した。26 試行のうちランダムな 1 試行を提示し、被験者は HMD に表示された VR 空間の通路に沿うように歩行した。1 試行終了後、自分が現実ではどのような軌跡で歩いたと感じたかを紙に記入させた。また、画面に不安を感じた(予期せぬ方向への画面進行等)、歩行に不安を感じた(歩行が不安定だった等)、という 2 項目に対し当てはまるかを回答させた。

これを全 26 試行繰り返した。被験者は 20~24 歳の男女 6 名(男性 4 名、女性 2 名)であった。また、被験者のうち 1 名は眼鏡をつけていた。

### 5. 実験結果

図 5 は、実験中のある 1 人の被験者の頭の位置を Kinect で測定した結果である。項目は( $K_p$ ,  $K_d$ )を表している。黒の点線が制御なし、赤の線が  $K_p=1$ 、青の線が  $K_p=2$ 、緑の線が  $K_p=3$  を表しており、点線は P 制御、実線は PD 制御である。

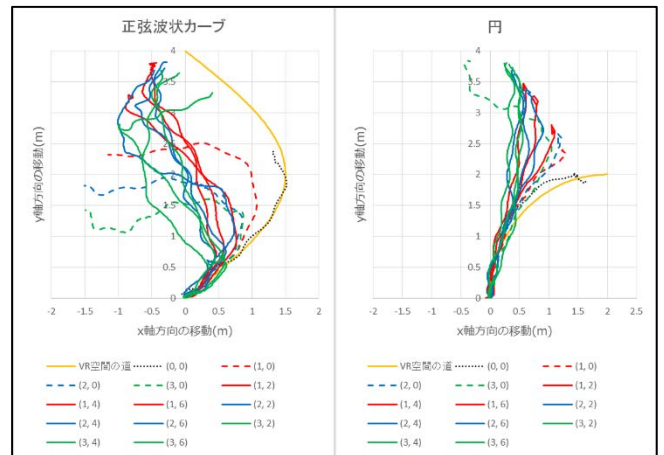


図 5：歩行軌跡

図 6, 図 7 は、正弦波状カーブ、円において、各条件の x 軸方向の最大振幅を箱ひげ図で表したものである。

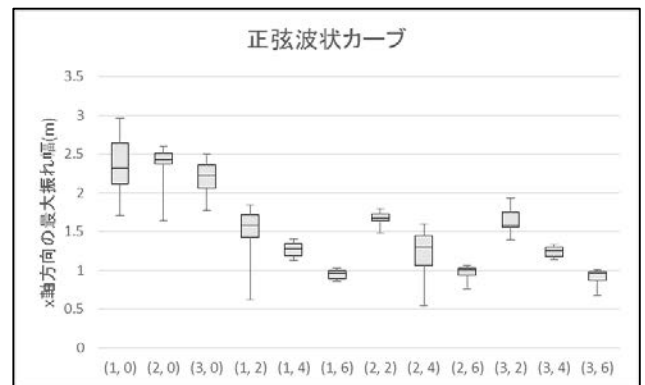


図 6：x 軸の最大振幅(正弦波状カーブ)

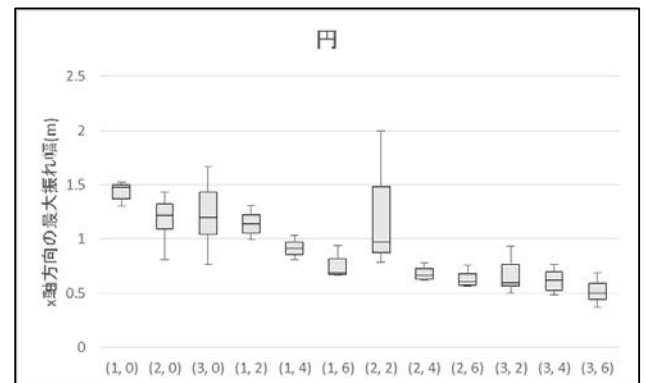


図 7：x 軸の最大振幅(円)

図 9 は、被験者へのアンケート結果である。円に比べ正弦波状カーブでは画面や歩行に不安を感じている人が多かった。

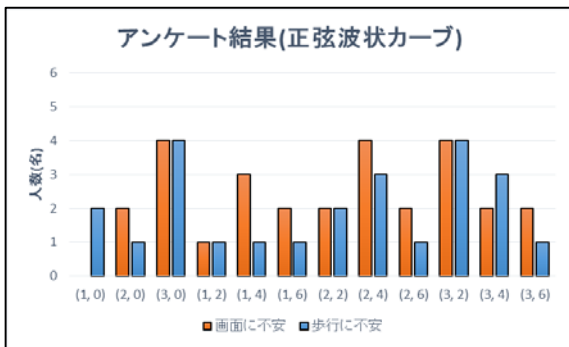


図 8 : アンケート結果(正弦波状カーブ)

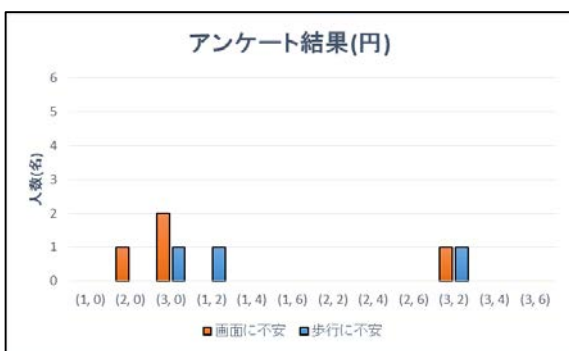


図 9 : アンケート結果(円)

## 6. 考察

### 6.1 制御種類・パラメータ

図 6, 図 7 を比較すると, PD 制御の方が x 軸の振れ幅が小さい事が見て取れる。よって, 本手法の制御には, PD 制御が適していると考えられる。

PD 制御においては, 正弦波状カーブの歩行時と, 円の歩行時で, パラメータに対する振れ幅の大きさやアンケート結果に違いが見られた。

円の場合,  $(K_p, K_d) = (2, 2)$  の際の最大値 2 m を除けば平均値が全て 1.5 m 以下になり, 安定して小さい振れ幅で歩行を誘導できている。このことからより厳しい条件である正弦波状カーブを中心に最適なパラメータを考える。

正弦波状カーブについて, 図 6 を見ると  $K_d$  による振れ幅の変化が大きく, どの  $K_p$  であっても,  $K_d = 6$  の場合に必要な幅が最も少ない。図 10 は, 被験者 6 人の歩行経路において  $K_d = 6$  の場合を比較したものである。赤の線が  $(K_p, K_d) = (1, 6)$ , 青が  $(K_p, K_d) = (2, 6)$ , 緑が  $(K_p, K_d) = (3, 6)$  を表している。この結果を見ると, VR 空間上の経路に関わらず,  $K_p$  が大きくなるほど中心の線に戻るのが早いことが分かる。これは  $K_p$  が大きいほど, ゲインが大きいためだと考えられる。今回用いたセットアップ以上に大きく変化のある道を歩く可能性を考えると, 制御のより早くかかる  $K_p = 6$  が良いと考えられる。しかしアンケート結果を見ると,

$K_p$  が大きくなるほどに, 画面や歩行に不安を感じる人が増えている。

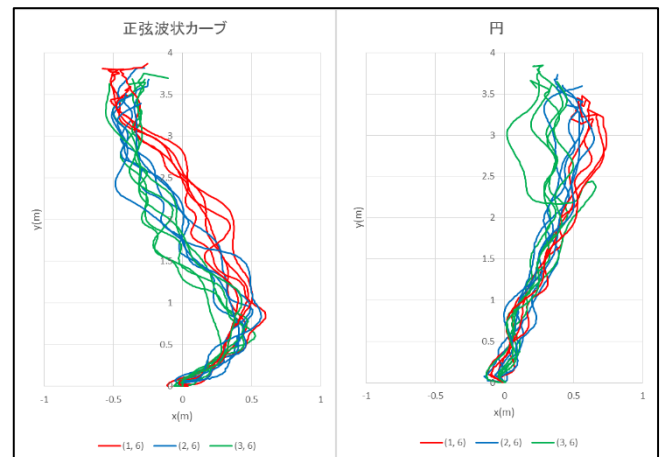


図 10 : 歩行経路( $K_d = 6$ )

以上制御種類・パラメータについてまとめると, PD 制御は P 制御よりも特に正弦波状のコースのように往復が派生する場合に適切であり,  $K_p$  に関しては, 値が大きくなるほど経路としては安定するが, 大きくなるほど, 画面や歩行に不安を感じる割合も増えていることが分かった。 $K_d$  に関しては, 今回の実験の範囲内では値が大きくなるにつれて歩行の幅も少し減少し, アンケート結果も良くなっている。

また, 今回の実験で画面に不安を感じた事に関してのコメントでは, 画面が小刻みに揺れたなどの意見があったので, 式(3)のスムージングにおける  $s$  の調整も今後必要と考えられる。

### 6.2 VR 空間の歩行の違和感と酔いの関係

円を歩行した際の被験者からのコメントで, 足の感覚で違う道を歩いていることはわかるが, 特に違和感や不安はなかった, 円を歩いていると感じたという興味深い意見を得た。また, 画面酔いを感じた被験者がいなかった。このことから, 本手法は少なくとも違和感の観点では十分に利用できる可能性が示唆されたといえる。

## 7. まとめと今後の課題

本稿では, 無限歩行空間を比較的安価に構成するために, リニアトレッドミルと視覚的な誘導を組み合わせた手法を提案した。そのための予備的検討として, VR 空間での被験者の移動を視界の回転を用いて直線に導く手法の実現性を検証した。結果より直線歩行への誘導が可能であること, その際には現段階では PD 制御が望ましいことが分かった。

本研究では視界のみを用いて歩行の誘導を行ったが, 今後は視覚だけでなく, 手に何かを持つことによる誘導など, 触覚も用いた誘導を行うことでどのような影響が起こるか

を検証していきたい。今回の実験より、VR空間の環境にもよるが、直径3mの円において、幅1m以内にユーザを誘導することが出来る可能性も示唆された。よって、今後実際にトレッドミルを用いた実験も行う予定である。

謝辞 本研究はJST-ACCEL「身体性メディア」プロジェクトの一環として行われた。

## 参考文献

- 1) 雨宮, 八木, 塩崎, 藤田, 渡部, “足踏式空間移動インタフェース(WARP)の開発と評価 の開発と評価”. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌 日本バーチャルリアリティ学会論文誌 Vol.6, No.3, pp.221-228, 2001.
- 2) Virtuix Omni, <http://www.virtuix.com/>
- 3) Hiroo Iwata, “The Torus Treadmill: Realizing Locomotion in VEs.” Computer Graphics and Applications, IEEE , Volume:19, Issue: 6 , pages30-35, 1999
- 4) Jimmy Chim, Rynson W. H. Lau, Hong Va Leong, and Antonio Si, Member, IEEE, “CyberWalk: A Web-Based Distributed Virtual Walkthrough Environment” IEEE Trans. On Multimedia, Vol. 5, NO. 6, page 504, 2003
- 5) Sharif Razzaque, Zachariah Kohn, Mary C. “Redirected Walking.” In Proceeding of Eurographics 2001.
- 6) Eric Hodgson and Eric Bachmann, Member. “Comparing Four Approaches to Generalized Redirected Walking: Simulation and Live User Data.” IEEE Trans Vis Comput Graph. Vol.4, No.19, pp.634-643, 2013.