

# 等身大 VR 環境における大型文化財の鑑賞のための低コスト無限歩行システムの提案

山本智之<sup>†1</sup> 齊藤充行<sup>†1</sup> 小林康秀<sup>†1</sup> 脇田 航<sup>†1</sup>

**概要:** デジタルアーカイブ化された大型文化財を VR 環境で鑑賞するためには VR 環境内を移動する必要がある。従来の VR 環境内の移動に関する研究には、トレッドミルなどがあるが、推進力を知覚することが困難である。そこで本研究では大型文化財の鑑賞のための低コスト無限歩行システムを提案する。具体的には、定位置での足踏みで推進力を知覚させるため、前傾姿勢になっても倒れないように遊脚の大腿部を支え、重心移動を起こし、pseudo-hapticsにより歩行映像を呈示することで疑似的に歩行感覚を知覚させることによる無限歩行可能なシステムを提案する。

**キーワード:** バーチャルリアリティ, Pseudo-haptics, ロコモーション, 無限歩行

## A Proposal Low-cost Infinity Walking System with Life-sized VR Environment for Appreciation of Large Cultural Resource

TOMOYUKI YAMAMOTO<sup>†1</sup> MITSUYUKI SAITO<sup>†1</sup>  
YASUhide KOBAYASHI<sup>†1</sup> WATARU WAKITA<sup>†1</sup>

**Abstract:** We propose a locomotion interface for many large digital cultural artifacts in large VR environment. Traditional methods about locomotion interface are difficult to perceive the propulsion because such as treadmill's running belt is moving to the opposite walking direction of walking. Therefore, we develop an infinity walking system which enables user to perceive the propulsion with pseudo-haptics in the stepping method.

**Keywords:** Virtual Reality, Pseudo-haptics, Locomotion, Infinity walking

### 1. はじめに

デジタルアーカイブ化された大型文化財を鑑賞するためには VR 環境内を移動する必要がある。従来の VR 環境内の移動に関する研究には、トレッドミル[1]や足踏み[2,3]などの方法が提案されている。しかしながら、歩行面が動くことや、前への重心移動が生じないこと等によって違和感が生じ、推進力を知覚することが困難となる。

そこで本研究では、定位置で足踏みしながら任意の移動方向への重心移動を可能にすることで推進力を知覚させる無限歩行システムを提案する。具体的には、移動方向に重心をかけても倒れないように遊脚の大腿部を支え、このときユーザには pseudo-haptics によって遊脚が前に動いている映像を呈示することで疑似的に歩行感覚を知覚させる。

### 2. 関連研究

歩行感覚を呈示するためのロコモーションインタフェース[4]に関する研究としては、トレッドミル型[1]、足踏みをする方法[2,3]、足を滑らす方法[5,6]、座位姿勢での足踏みする方法[7]、移動ロボットをユーザの遊脚が着地する位置に移動させることにより無限歩行空間を実現する方法

[8]などがある。トレッドミル型は、ユーザの腰部にベルトを取り付け、そのベルトで腰部の牽引により推進力を呈示することが可能だが、実環境の歩行では腰部が牽引されることがないためユーザに違和感を与えてしまう。足滑り式は、足が滑ることにより推進力の知覚が困難となりうる。足踏み式は定位置で足踏みをするため実環境での歩行による推進力を知覚することが困難となりうる。座ることによる歩行感覚の呈示では、ユーザは着席してデバイスを使用するため推進力の知覚が困難となりうる。移動ロボットを用いた無限歩行空間の構築では、移動ロボット上を踏み込むことにより推進力は得られるが、歩行面が動くため違和感が生じうる。また、3軸モーションベースに踏み台を取り付けた無限歩行装置[9]を用いて、歩行に応じた周囲の環境の変化をユーザに球面ディスプレイを用いて呈示し、歩行感覚を呈示する方式[10]もある。これは、階段などの昇降する感覚を呈示することができる。しかしながら、定位置での足踏み操作を実現するために支持脚の踏み台が進行方向と逆向きに動くため、推進力を知覚することが困難となりうる。さらに、環状に壁を設置し、この壁に手を当てながら歩行し、ユーザに VR 環境内を歩行している映像を呈示することにより歩行感覚を呈示する方法[11]がある。これは、ユーザの歩行時に歩行面が移動しないため推進力

<sup>†1</sup> 広島市立大学  
Hiroshima City University.

が得られるが、手を壁に当て続けなければ定位置で歩行をすることが困難となる。

一方、pseudo-haptics は視覚情報から力覚、触覚などを錯覚させる方法である。従来研究では、呈示する映像から実際に触っている物体の形状を呈示している映像物体の形状に錯覚させる方法[12]や、触っている物体の硬さを呈示している映像物体の硬さに錯覚させる方法[13]などがある。pseudo-haptics を歩行感覚に応用したものとしては、前述の Unlimited Corridor[11]が挙げられる。環状に設置した壁に手を当て続けながら歩行する際、ユーザに VR 環境内で直進している映像を呈示することで無限に歩行している感覚に錯覚させる。

本研究では、足踏み方式で推進力を知覚させるため、ユーザが移動方向に重心を移動しても倒れないよう体を支える。人間が歩行する際に足を前に踏み出すと大腿部に力がかかることから、本研究では大腿部を支え、このとき pseudo-haptics を用いて遊脚の動作を疑似的に呈示することにより、歩行感覚を錯覚させる方法を提案する。

### 3. 提案システム

図 1 に提案システムの概要図を示す。

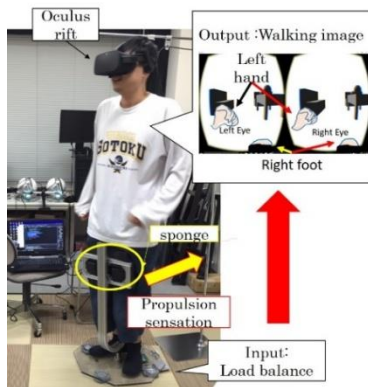


図 1 無限歩行システム

Fig. 1. Infinity walking system.

図 2 にユーザの足を置く提案装置の構造を示す。

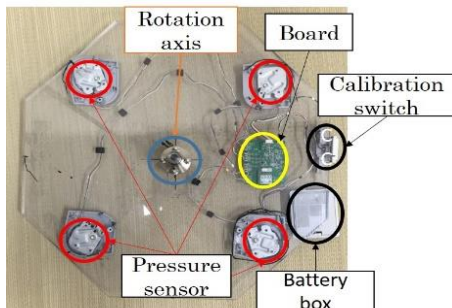


図 2 足元の装置構造

Fig. 2. Infinity walking device structure.

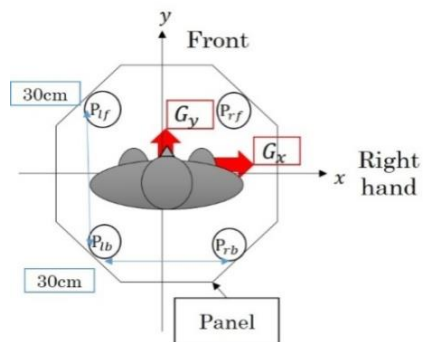
8 角形のパネルにバランス wii ボードの 4 つの圧力センサ、電池ボックス、キャリブレーションスイッチ、基盤、

回転軸を取り付け、回転軸には大腿部を支えるためのフレームを固定する。4 つの圧力センサは 30cm 間隔で正方形に配置した。また、大腿部が当たる部分にはなるべく圧迫感を与えないようスポンジを厚めに設置する。回転軸および大腿部の支えによって、ユーザは 360°任意方向に前傾姿勢になって足踏みすることで、重心を任意の進行方向に変化させることで推進力を知覚させ、遊脚を出す際、大腿部の支えによって遊脚を初期位置に戻すことで定位置での足踏みを実現する。このとき、pseudo-haptics を用いることで実際には前に出ない遊脚の動作を呈示することで、ユーザは疑似的に歩行感覚を知覚することが期待できる。

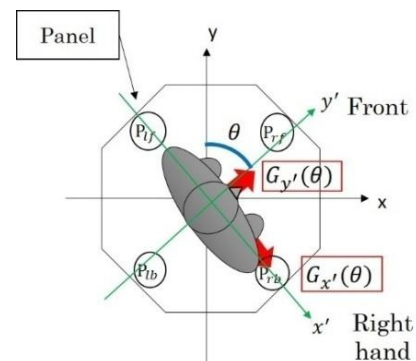
提案システムでは、HMD のヘッドトラッキング機能を用いてユーザの進行方向を取得し、4 つの圧力センサ値および進行方向からユーザの前後方向および左右方向の荷重バランス（前傾姿勢や足踏み動作）を推定し、VR 環境内の移動に反映させる。また、ユーザの姿勢をモーションキャプチャし、アバターとして CG 描画する際、荷重バランスから推定した足踏み動作を疑似的に呈示する。

### 4. 無限歩行法

図 3 に任意の方向への荷重バランスの変換方法を示す。



(a) アフィン変換前



(b) アフィン変換後

図 3 荷重バランスの変換

Fig. 3. Load balance conversion.

ユーザの足踏みを VR 環境内の歩行に反映させるため、4

つの圧力センサ値 $P_{rf}$ ,  $P_{rb}$ ,  $P_{lf}$ ,  $P_{lb}$ から任意方向のユーザの右手および正面方向の荷重バランスに変換する. 4つの圧力センサの値から, 初期状態(図3(a)参照)における左右方向の荷重バランス $G_x$ および前後方向の荷重バランス $G_y$ を以下の式で求める.

$$P_{sum} = P_{rf} + P_{rb} + P_{lf} + P_{lb} \dots\dots\dots (1)$$

$$G_x = \frac{P_{rf} + P_{rb} - P_{lf} - P_{lb}}{P_{sum}} \dots\dots\dots (2)$$

$$G_y = \frac{P_{rf} - P_{rb} + P_{lf} - P_{lb}}{P_{sum}} \dots\dots\dots (3)$$

このままだとユーザの向きが変わると前後左右の荷重バランスがとれないため, 図3(b)に示すように, 常にユーザの正面方向の荷重バランスがy軸の正の方向, ユーザの右手方向の荷重バランスがx軸の正の方向とし, 360°任意方向で荷重バランスの変化を推定するためx, y座標を $(\sin\theta, \cos\theta)$ としてアフィン変換を行う.  $\theta$ はHMDのヘッドトラッキング機能から取得する. ここでは, 図3(b)のy軸から右回りを正の向きとし, アフィン変換を行うために正面座標 $(\sin\theta, \cos\theta)$ を3次元で考える. つまり, 2次元正面座標 $(\sin\theta, \cos\theta, 0)$ に拡張する. ユーザの右手側座標は $(\sin\theta, \cos\theta, 0)$ と $(0,0,1)$ の外積で求める.

$$\begin{pmatrix} \sin\theta \\ \cos\theta \\ 0 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta \\ -\sin\theta \\ 0 \end{pmatrix} \dots\dots\dots (4)$$

式(4)を2次元平面座標に直すと $(\cos\theta, -\sin\theta)$ となり, 正面座標 $(\sin\theta, \cos\theta)$ , 右手側座標 $(\cos\theta, -\sin\theta)$ を用いてアフィン変換を行う. 次式に式(1), (2)を用いてアフィン変換を行う式を示す.

$$\begin{pmatrix} G_{x'}(\theta) \\ G_{y'}(\theta) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} G_x \\ G_y \end{pmatrix} \dots\dots\dots (5)$$

式(5)を展開すると,

$$G_{x'}(\theta) = \cos\theta \cdot G_x - \sin\theta \cdot G_y \dots\dots\dots (6)$$

$$G_{y'}(\theta) = \sin\theta \cdot G_x + \cos\theta \cdot G_y \dots\dots\dots (7)$$

となる. 式(6), (7)より360°任意方向でのユーザの正面, 右手方向の荷重バランスを推定することが可能となる. なお, 式(6)から得られる値が0~1の範囲内だと右足に荷重がかかっている状態, 値が-1~0の範囲内だと左足に荷重がかかっている状態である. さらに, 式(7)から得られる値が0~1の範囲内でユーザの前方向に荷重がかかっている状態, 値が-1~0の範囲内でユーザの後方向に荷重がかかっている状態である. 次に, 式(6), (7)から推定された荷重バランスをVR環境内の移動に反映させるため, 式(6), (7)に閾値を設ける. 式(6)から取得される値が一定の値の絶対値を上回った場合, かつ, 式(7)から取得される値が一定の値を上回った場合, ユーザは前進動作を行っているものと推定する. これにより, 荷重バランスのみでVR環境内を移動することが可能となる.

## 5. 実験

### 5.1 実験方法

ここでは, 任意方向でユーザの正面, 右手方向の荷重バランスの変化を確認するため, 回転角 $\theta = 0^\circ, 45^\circ, 135^\circ$ の場合を考える.  $\theta = 0^\circ, 45^\circ, 135^\circ$ のときの荷重バランスは式(6), (7)のパラメータ $\theta$ に $0^\circ, 45^\circ, 135^\circ$ を代入したときの値であり, この荷重バランス変化を取得し, グラフ化する. 横軸を時刻, 縦軸を $x', y'$ 軸上(図3(b)参照)における荷重バランスの値とする.

### 5.2 実験結果

図4(a)に回転角 $\theta = 0^\circ$ , (b)に回転角 $\theta = 45^\circ$ , (c)に回転角 $\theta = 135^\circ$ の場合の荷重バランスの変化のグラフを示す.

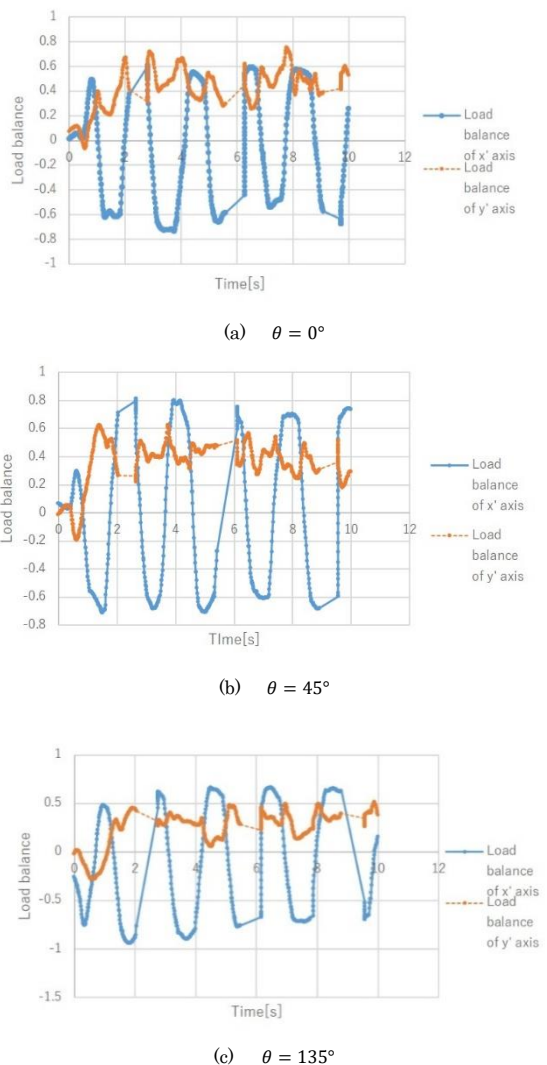


図4 足踏みによる荷重バランス変化  
 Fig. 4. Load balance change with stepping.

図4に示すように, 足踏みによる荷重バランスの波形は-0.96~0.88の範囲で変化しており, ユーザの回転角 $\theta$ に関わらず荷重バランスの推移は同じであることがわかる. 図4の $x'$ 軸における荷重バランスの値が0より大きい値の場合は右足に, 0より小さい値の場合は左足に荷重がかかっ

いる状態を表す。また、 $y'$ 軸における荷重バランス値が 0 より大きい場合は正面に、0 より小さい値の場合は背面に荷重がかかっている状態を表す。装置上で前傾姿勢になり、足踏みをすると $x'$ 軸における荷重バランスの値が-1~1 の範囲で変化し、 $y'$ 軸における荷重バランスの値は 0 より大きい値となる。また、 $x'$ 軸における荷重バランスの閾値を 0.53, -0.53 に、 $y'$ 軸における荷重比バランスの閾値を 0.1 に設定することで、荷重バランスの変化から足踏み動作を推定し、VR 環境内で移動することが可能となる。しかしながら、閾値判定のみで VR 環境内の移動を考えると、足踏みをせずとも片足立ちで VR 環境内を移動することが可能となり、歩行感覚の呈示に違和感が生じる。このため、荷重バランスが一定時間閾値を超え続けると VR 環境内の移動を停止させるなど工夫が必要となる。

図 5 に提案装置を用いて VR 環境内を移動したときに HMD に呈示される映像を示す。VR 環境のモデルは国宝である西本願寺の北能舞台のデジタルデータ[14]を用いた。

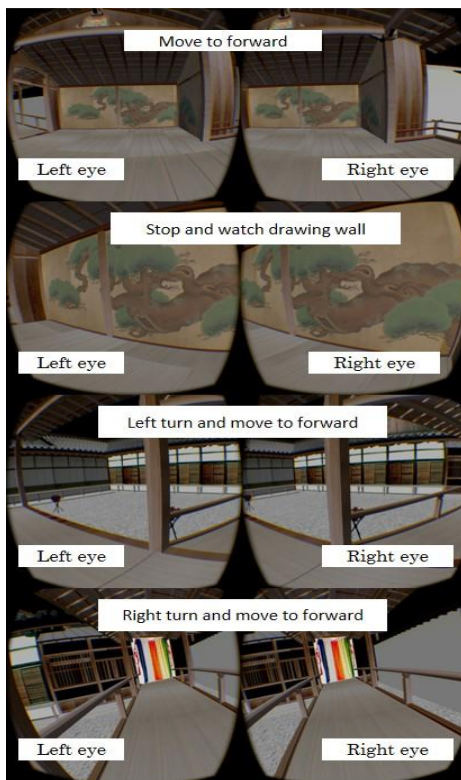


図 5 荷重バランスによる VR 環境内移動

Fig. 5. Walking in VR environment with load balance.

現状、ユーザが前傾姿勢の状態です踏みをしている間、VR 環境内の位置を 1 フレームあたり 5cm で前進させており、後ろ歩き、横歩きへの対応や歩行動作からの移動量推定までは至っていない。また、現状では荷重バランスに閾値を被験者による実験から算出しておらず、モーションキャプチャおよび荷重バランスから pseudo-haptics を実装するまでは至っていないため、これらは今後の課題である。

## 6. おわりに

本研究では、等身大 VR 環境における大型文化財の鑑賞のための低コスト無限歩行システムの提案を行った。本システムは、4つの圧力センサ、パネル、回転軸、スポンジ、フレームのみで低コストで作成できる。現在、任意方向におけるユーザの前後左右の荷重バランスによって VR 環境内を前進可能であることを確認した。現状では後ろ歩きや横歩きまでは至っておらず、また、モーションキャプチャおよび荷重バランスから pseudo-haptics を実装するまでには至っていないため、これらは今後の課題である。また、現状では HMD のヘッドトラッキング機能を用いて頭部の向きを進行方向としているため、ユーザの進行方向を推定することも今後の課題としてあげられる。

## 参考文献

- [1] 野間春生, 宮里 勉, 中津良平:「能動的歩行動作に対応した歩行感覚提示装置の開発」, 日本 VR 学会論文誌, Vol.4, No.2, pp. 407-416, 1999.
- [2] 岩下 克, 外山 篤, 橋本直己, 長谷川晶一, 佐藤 誠:「足踏み動作を用いた移動インタフェースの開発」, 信学論, Vol.87, No.1, pp.87-95, 2004.
- [3] 雨宮慎之助, 八木寿浩, 塩崎佐和子, 藤田欣也, 渡辺富士夫:「足踏式空間移動インタフェース(WARP)の開発と評価」, 日本 VR 学会論文誌, Vol. 11, No. 2, pp. 237-244, 2001.
- [4] 野間春生:「ロコモーションとバーチャルリアリティ」, 計測と制御, Vol. 43, No. 2, pp. 133-138, 2004.
- [5] H. Iwata and T.Fuji: "VIRTUAL PERAMBULATOR: A Novel Interface Devide for Locomotion in Virtual Environment", Proc. IEEE, pp. 60-65, 1999.
- [6] M. C. Schwaiger, T. Thummel, and H. Ulbrich: "A 2D-Motion Platform: The Cybercarpet", IEEE EuroHaptics Conference, pp. 415-420, 2007.
- [7] 石原大貴, 柴田龍輝, 北野貴士, 大島志一:「Virtual-ISU:座位姿勢での疑似歩行運動による歩行感覚提示インタフェース(第2報)」, 情報処理学会インタラクティブ 2016, 2016.
- [8] 福島寛之, 矢野博明, 野間春生, 岩田洋夫:「全方位移動ロボットを用いた歩行感覚呈示装置 CirculaFloor」, 日本 VR 学会論文誌, Vol. 6, No. 3, pp. 237-244, 2001.
- [9] H. Iwata, H. Yano, and F. Nakaizumi: "Gait Master: A Versatile Locomotion Interface for Uneven Virtual Terrain", Proc. IEEE VR 2001, pp. 23-28, 2001.
- [10] 中泉文孝, 矢野博明, 岩田洋夫:「没入映像と歩行感覚の統合呈示環境の構築」, 信学技報, Vol. 103, No. 352, pp. 131-137, 2001.
- [11] K. Matsumoto, Y. Ban, T. Narumi, Y. Yanase, T. Tanikawa, and M. Hirose: "Unlimited Corridor: Redirected Walking Techniques Using Visuo-Haptic Interaction", SIGGRAPH2016, 2016.
- [12] 伴 祐樹, 梶波 崇, 鳴海拓志, 谷川智洋, 広瀬通孝:「Pseudo-haptics を利用した形状呈示のための視触力覚システムに関する基礎的検討(MR/AR の実用化に向けた CV/PR 技術の課題と展望)」, 信学技報.PRMU, パターン認識・メディア理解, Vol.110, No.381, pp347-352, 2011.
- [13] 平野有一, 木村朝子, 柴田史久, 田村秀行:「Dent-Softness Illusion:複合現実型視覚刺激による硬さ知覚への影響」, 日本 VR 学会論文誌, Vol.16, No.2, pp271-278, 2011.
- [14] 脇田 航, 古川耕平, 八村広三郎, 田中弘美:「反射光解析に基づく薪能のリアルタイム CG 表現」, 日本 VR 学会論文誌, Vol.20, No.1, pp. 25-33, 2015.