

科学研究費補助金研究成果報告書

平成 21 年 4 月 1 日現在

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2006～2008

課題番号：18300040

研究課題名（和文） 3次元無限歩行空間の生成とその評価

研究課題名（英文） Development of 3D Infinite Walkthrough Space and its Evaluation

研究代表者

岩田 洋夫 （IWATA HIROO）

筑波大学・大学院システム情報工学研究科・教授

研究者番号：60184884

研究成果の概要：

本研究では、全方向に動く移動機構を有する可動床が、循環することによって無限に続く歩行面を提供する、歩行感覚呈示装置を実装し、それに昇降機構を搭載することによって、階段などの凹凸面のある歩行面を模擬することを実現した。本システムが体験者に与える効果を、足圧力等の計測によって評価した。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合 計
2006 年度	6,000,000	1,800,000	7,800,000
2007 年度	6,000,000	1,800,000	7,800,000
2008 年度	3,300,000	990,000	4,290,000
年度			
年度			
総 計	15,300,000	4,950,000	19,890,000

研究分野：バーチャルリアリティ

科研費の分科・細目：情報学、メディア情報学・データベース

キーワード：バーチャルリアリティ、ロコモーションインタフェース

1. 研究開始当初の背景

バーチャルリアリティの本格的な応用が進むにつれて、大規模なバーチャル空間を有効に移動する手段についての必要性が高まってきた。人間にとって最も生得的な移動手段は足で歩くことである。人間が自分の周囲の空間を認識する場合に、歩いて移動するという行為は極めて重要な意味を持つ。観光地に行った時に、バスに乗って見せられたものと自分の足で見つけたものの印象が大きく異なるのは、誰もが持つ経験であろう。歩いたり走ったりすれば地面から抗力や衝撃を受ける。また、地面に凹凸があれば、左右の足に異なる抗力を受ける。この現象は人間の

生活シーンでは当たり前発生するが、通常のバーチャルリアリティシステムにおいてはほとんど実現されていないのが実状である。

2. 研究の目的

本研究は前述の背景をふまえ、「足の歩行動作によって任意の方向の任意の高低差を体験する」という自然な現象を人工的に生成するシステムを構築し、それを用いて人間の歩行運動を定量的に評価することを目的としている。

3. 研究の方法

足の歩行動作による移動感覚を生成するためには、体全体が移動することなく足の運動感覚を与える装置が必要である。そのような装置を実現するためには、歩行者が床を蹴って歩く時に、前に進む動きを打ち消す仕掛けが必要になる。最も簡単な実現方法は健康機等で使われるトレッドミルやステッパーマシンである。一方、歩行による移動のもう一つの重要な機能として、方向の変換がある。好きな方向に行けるのであれば自然な歩行とは言えない。移動の打ち消しと方向の変換をどうやって同時に実現するかという問題に対して本申請グループは研究を続けてきた。その成果として、人間にとって最も自然な歩行動作を提供できる方法は全ての方向に無限に続く床を作り、それを歩行者の動作に合わせて移動の打ち消し操作を加えることである、という結論を得た。そして、前後左右の全方向に移動可能な床を数個集めて、歩行者がいる場所の周辺に歩行面を作り、それが循環することによって移動の打ち消しを行う新たな方式を開発した。すなわち、歩行者の歩いた分だけ歩行面を構成する可動床が逆に動き、歩行者が載っていない床が順方向に動いて、新たに歩行者が載る床を提供するというものである。この方式は、可動床の上に昇降機構を組み合わせることによって、上下方向の移動の打ち消しを可能にすることが、大きな特徴である。

4. 研究成果

(1) 3次元無限歩行空間の原理

本研究で開発した歩行感覚呈示装置では、それぞれが独立に動く床面が歩行者の進行方向に次々に回り込み、床面を形成すると同時に、歩行者の進行方向とは逆向きに動く事で移動量の打ち消しを行い、限られた空間の中で無限の床を呈示する。

本装置においては同時に階段の様な凹凸面の呈示も行う。凸面を呈示する場合には、歩行者の次なる床面を呈示する為に回り込む機体の天板をあらかじめ持ち上げておき、歩行者がその機体に昇り切った（重心が移動し切った）後で滑らかに天板を降ろす事で、垂直方向の移動量を打ち消す。それとは逆に凹面の呈示では、歩行者の次なる床面を呈示する機体の天板は下げた状態にしておき、それ以外の機体の天板を持ち上げた状態にしておく事で実現する。移動量の打ち消しは歩行者が次なる床面に降り切った（重心が移動し切った）後で天板を持ち上げる事で行う

(図1)。

以上の動きを組み合わせ、繰り返す事で、実空間での体の移動は無いままに無限に広がる平面、凸面、凹面を呈示する事が出来る。

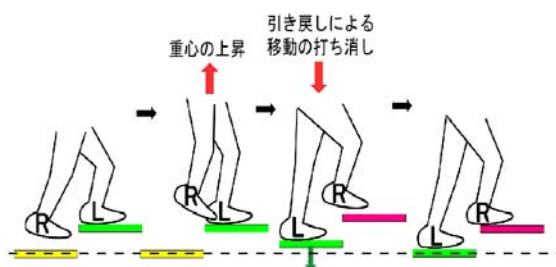


図1 上下動の打ち消し

(2) 床循環型歩行感覚呈示装置の実装

図2は昇降機能付き床循環型歩行感覚呈示装置の基本構成である。本システムは6台の床面型ロボット群と補正用外界センサシステム、それらを制御する統括計算機から成る。

統括PC、床面型ロボット、外界センサ制御PCでLANを組み、データや指令のやり取りを行っている。

外界センサも含め、設置面積は3600[mm]×3600[mm]の正方形領域に収まる。図3は、システムの概観である。

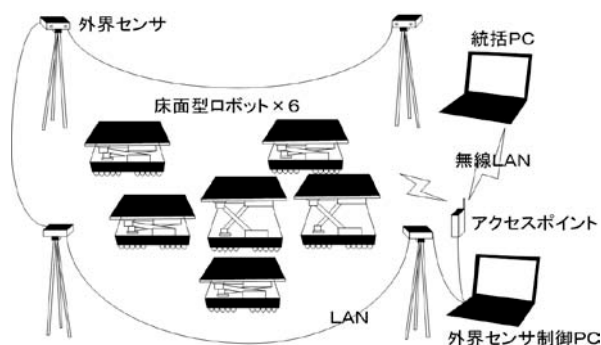


図2 システム構成



図3 システム概観

床面型ロボットの正確な仕様は 450[mm] 四方、高さ 230[mm]、バッテリーを含めた重量は 44[kg]となっている。本体の周囲には歩行面を形成する為に機体同士を密着させる際、衝撃を軽減させる目的で着脱可能な厚さ 20[mm]のウレタンバンパーを装着している。水平面を移動する際に用いるモータには maxon 社製 DC モータ RE35 を 4 つ、垂直面運動を行う際に用いる昇降機構のモータには maxon 社製 EC モータ EC45 を 1 つ用いている。RE35 は岡崎産業株式会社製の TITECH DRIVER JW-143-2 で、EC45 は maxon 社製 DES70/10 で駆動する。床面型ロボットは任意の軌道を独立で移動できるように電源供給にはバッテリーを使用し、一般的に電動ドライバーで使用されている松下電工社製 EZ9210 ニッケル水素電池を用いている。制御用計算機からの指令を伝送する通信回線には無線 LAN を使用し、UDP により約 20[Hz]で床面型ロボットに載せられた主基板との通信を行う。主基板では受け取った指令をもとに各モータの出力トルクを計算し、各モータの制御を行う分散基板へ SPI(Serial Peripheral Interface)で指令を伝送する。床面型ロボットからは制御用計算機に各 Omni-Disk に付いたモータの回転量及び昇降モータの回転角度を返す。

図 4 は可動床を横からみたもので、図 5 は昇降機構により天板が上がりきった状態の写真である。可動床はカムを回転させる事でパンタグラフを上下させ、昇降運動を行う。パンタグラフ最大上昇時で地面からの高さは 380[mm]となる。カムには安全の為にストッパーが付けられており、90 度以上は回転しない様になっている。昇降機構は制御用 PC から送られてきた目標位置、目標回転速度をもとに主基板で計算を行い、アクチュエータを回転させている。

外界センサシステムには 3 次元位置測定センサ PhaseSpace を用いる。PhaseSpace は赤色 LED マーカを 2 台以上の CCD ラインセンサ内蔵カメラで捉え、3 次元位置を検出する。それぞれのマーカには固有の ID が割り振られており、マーカの数が増えてもソフトウェアでの後処理にかかる負担がない。最大追跡可能マーカは 120 であり、測定分解能は 0.5[mm]、サンプリングレートは 480[Hz]である。マーカは環境光の影響を受けにくいアクティブマーカであり使用場所の照明環境を選ばない。PhaseSpace は専用の計算機で処理され、システム制御用計算機とはイーサネットにて通信を行う。今回は PhaseSpace の CCD カメラを 4 台使用し、床面型ロボッ

トが歩行者の歩行を打ち消す際に移動する領域である 3600[mm]×3600[mm]の正方形領域の各頂点に、高さ 1550[mm]で設置する。PhaseSpace の CCD カメラの画角は水平垂直ともに 60 度程であり、各マーカは 2 台以上のカメラで検出しないと位置を計測出来ない為、床面型ロボットが移動する全領域を計測範囲とする事は出来ない。しかし、今回は外界センサを自己位置推定の誤差を補正する為に用いるので、床面型ロボットの循環領域の一部を計測範囲と出来ていれば良い。上記の設置条件での計測範囲は正方形の中心から半径約 1300[mm]の円内である。補正領域を中心近辺にとったのは、歩行者がどの方向を向いて歩行した際にも床面型ロボットが必ず通過する場所である、また、歩行面に入る直前で補正を行えるのでより綺麗な歩行面を形成する事が出来る、といった理由からである。

床面型ロボットの位置姿勢を知る為には XY 平面上の位置、Z 軸回りの回転姿勢のデータが必要になる。その為、各床面型ロボットには最低 2 つ以上のマーカを取り付ける必要がある。本システムでは稼働床の表面に 2 つのマーカを取り付ける事とした。



図 4 可動床



図 5 昇降機構

(3) 循環アルゴリズム

可動床の循環の制御を行うにあたっては、各機体にそれぞれ移動中の場所や状況に基づいた状態ラベルを割り振り、動作を決定している。具体的には、図6の様に状態変更点を定め、各機体がそれぞれの点付近を通過した時に、他の状態ラベルの付いた機体との位置関係を見ながら次の処理を決定する。完全に機体の循環軌跡を決定してしまうよりもこうする事で、機体回り込みに遅れが生じ循環のタイミングがずれてしまうのを避ける事が出来るし、機体が壊れて欠けてしまった時等にアルゴリズムを大きく変更する事なく対応出来るからである。実際に作成したアルゴリズムでは最低4台の機体があれば同じアルゴリズムを大きく変更する事無く循環を行える。

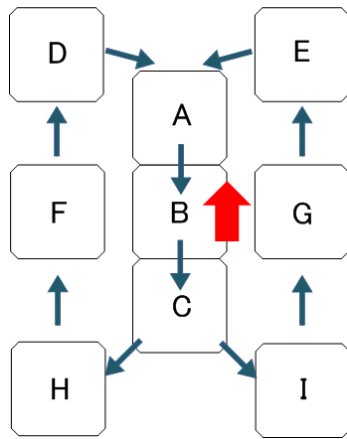


図6 循環における状態変更点

歩行面を連続して形成し続ける為には、歩行面形成に関する $(D \cdot A \cdot B \cdot C)$ もしくは $(E \cdot A \cdot B \cdot C)$ の4地点での処理は必ず同時に行われなければならない。これら4地点での処理パターンを各床面型ロボットに常に与える事で無限の循環が実現出来る。4地点での処理パターンの切り替えのタイミングは、 $A \rightarrow B$ 経路に回り込みラインからの機体の入り込みスペースが確保されると同時に、 $D \cdot E$ 地点のどちらかに入り込みを行う機体の準備が整った時である。

歩行面形成に関係のない $F \cdot G \cdot H \cdot I$ 地点での処理はスムーズな循環を行う為には早ければ早い方が良いので、各地点を通過次第、適宜状態ラベル変更を行う。

図7は、基本循環における各可動床の動きを表している。歩行者が進行方向を変えた場合は、それに応じて循環の方向も変える。図8は、斜め45度方向に進む場合の循環を表している。

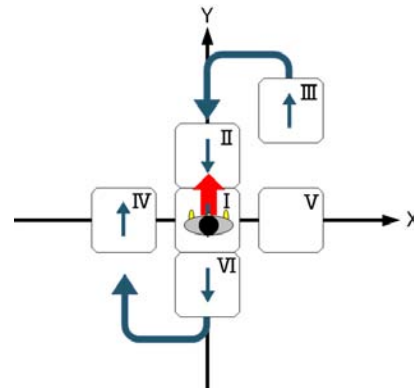


図7 基本循環

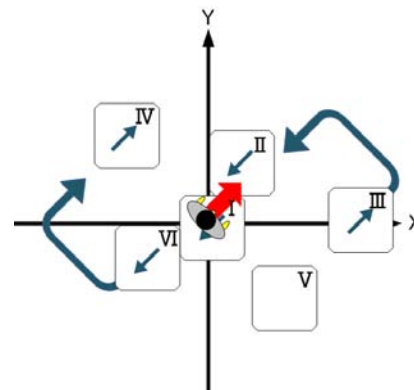


図8 斜め方向の循環

(4) 歩行運動の評価

本研究では、歩行運動の評価を行うために、足裏の圧力と、歩行者の腰と踵の動きの計測を行った。足裏の圧力は、靴の中に圧力センサを敷いて測定し、腰位置と踵位置は光学センサ（ステレオラベリングカメラ）を用いて測定した。

図9は被験者の中でも特に装置上を歩き慣れた人（以下、熟練者と呼ぶ）の階段昇り歩行時の足裏圧力及び進行方向に対する左右の腰変位であり、図10は逆に実験を行う時に初めて装置上歩行を体験した人（以下、初心者と呼ぶ）のグラフである。

足裏圧力変化で熟練者は階段の上り動作、階段の下り動作共に装置上歩行と実空間上歩行で酷似したグラフの形状が得られている。一方、初心者の足裏圧力も概ね似た様なグラフの形状は得られているが、装置上の歩行の際に立脚時で値が上下してしまっている。昇降歩行では機体一台につき一歩で歩いてももらっている為、平面歩行に比べて片足で立脚し続ける時間が長くなってしまい、床面の微小の揺れに対して踏ん張りを利かそうとして立脚時に足裏の圧力が変化してしま

っていると考えられる。

腰変位についても、熟練者は細かな揺れが入ってしまっているが、装置上歩行で実空間歩行と同じ様な動きが出来ている。一方、初心者の腰変位の形状も概ね機体上歩行で実空間と似た形は得られているが、平面歩行時よりも少し歪な形になってしまっている。図9のグラフが表す様に歩行者が可動床に乗ると、歩行引き戻しが等速で行えずに進行方向の前後左右に微小な加減速を行いながら引き戻しを行ってしまう。歩行者が歩く際、足を着地させた時に床を踏みこみ、足を離す際には床面を形成する機体を蹴りながら歩行を行うので、可動床はそれを制御する様に動いた結果、特に進行方向で微小な揺れが発生してしまっている。初心者はその様な微小の揺れに対して慣れていないせいで体が床面の動きに合わせられず、揺れる床面から落ちないように少し身体を強張らせて歩いた結果、実空間での階段の昇降よりも腰の揺れの振幅が小さくなり、少し不自然さの残る歩行になってしまったものと考えられる。

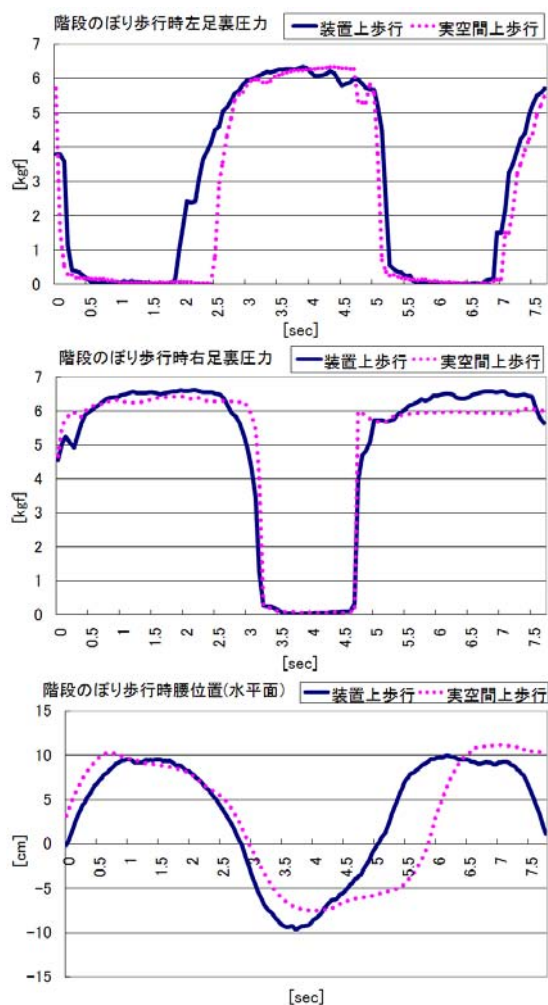


図9 熟練者の測定結果

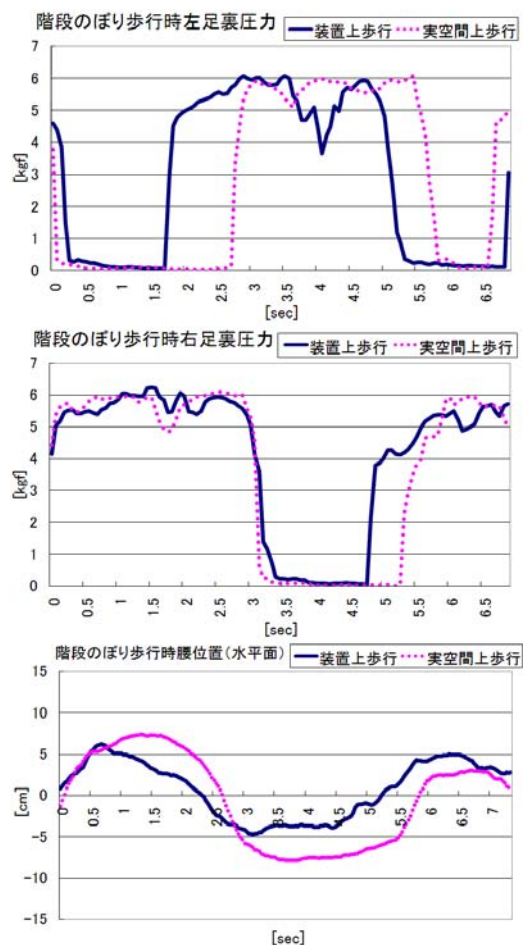


図10 初心者の計測結果

平面歩行でも同じ様な機体の揺れは見られるが、昇降歩行では重心の上下動も伴う為、揺れに対する反応が過敏になり平面歩行よりも歪な体重移動になってしまったと考えられる。以上の結果より、階段呈示時の歩行については装置の引き戻しにより発生する微小な揺れに

対する多少の慣れが自然な歩行を行う上で必要になるという事がわかった。

図11は踵の軌跡を表している。実空間上での階段上り歩行、及び装置上歩行の腰位置からの相対位置を表した軌跡である。それぞれ歩幅約 50[cm]、歩行速度約 25[cm/s]、階段高さ約 10[cm]で、進行方向は各グラフとも右向きである。

この結果は装置上歩行と実空間上歩行でほぼ同じ軌跡を描けている。歩行者の足を拘束せずに歩行が行える床循環型歩行感覚呈示装置の利点である、実空間に近い足運びが出来るという事が示せた。

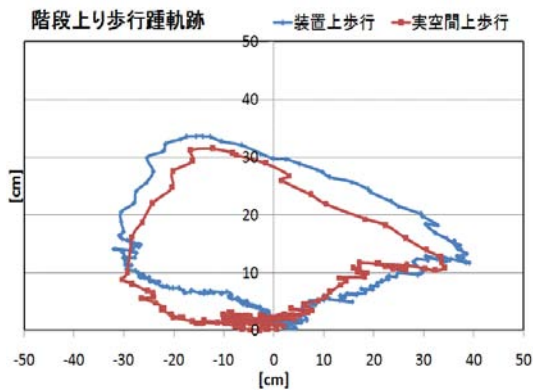


図 1.1 踵位置の計測結果

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 2 件)

[1] 棚橋 新七, 矢野 博明, 岩田 洋夫, 小型没入球面ディスプレイ「スピンドーム」における立体視, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vo.13, No.3, pp.325-332, (2008.9) (査読有)

[2] 矢野博明, 中島陽介, 岩田洋夫: 光トポグラフィによる歩行動作の評価、日本バーチャルリアリティ学会論文誌 Vol.12, No.1, pp.67-74(2007.3) (査読有)

〔学会発表〕(計 5 件)

[1] 森本 健浩, 岩田 洋夫, 矢野 博明: ”脳活動の温度呈示に関する研究”, 日本バーチャルリアリティ学会第 13 回大会論文集, pp.335-338(2008.9.24) 奈良先端科学技術大学院大学

[2] 宮本 優一, 岩田 洋夫, 矢野 博明: ”レーザー距離センサを用いた遠隔触知覚システム”, 日本バーチャルリアリティ学会第 13 回大会論文集, pp.335-338(2008.9.24) 奈良先端科学技術大学院大学

[3] 中島 陽介, 矢野 博明, 岩田 洋夫, 斉藤 秀之, 田中 直樹: ”改良型GaitMasterによる歩行リハビリテーション”, ヒューマンインタフェースシンポジウム 2007 論文集, pp.909-914(2007.9.3) 工学院大学

[4] Hiroo Iwata, Hiroaki Yano, and Masaki Tomiyoshi, ”String Walker” ACM SIGGRAPH 2007 Full Conference DVD (2007.8.5) San Diego Convention Center

[5] 増田 敬之, 中島 陽介, 矢野 博明, 岩田 洋夫: ”視覚と歩行感覚統合呈示システム”, 日本バーチャルリアリティ学会第11回大会論文抄録集, pp.67(2006.9.7) 仙台市青年文化センター

〔図書〕(計 2 件)

[1] Hiroo Iwata, Design Issues in Haptic Interface, Haptic Rendering (edited by Ming C. Lin and Miguel A. Otaduy), AK Peters, pp.53-66, 2008

[2] Hiroo Iwata, History of Haptic Interface, Human Haptic Perception (edited by Martin Grunwald), Birkhauser, pp.355-361, 2008

6. 研究組織

(1) 研究代表者

岩田 洋夫 (IWATA HIROO)

筑波大学、大学院システム情報工学研究科・教授

研究者番号: 60184884

(2) 研究分担者

矢野 博明 (YANO HIROAKI)

筑波大学、大学院システム情報工学研究科・准教授

研究者番号: 80312825

(3) 連携研究者

なし