

基礎論文

全方位移動ロボットを用いた歩行感覚呈示装置 CirculaFloor

福島 寛之,*¹ 矢野 博明,*² 野間 春生,*³ 岩田 洋夫*²

Development of a Circulation-type Locomotion Interface: CirculaFloor

Hiroyuki Fukushima,*¹ Hiroaki Yano,*² Haruo Noma*³ and Hiroo Iwata*²

Abstract – In this paper, we propose a new locomotion interface named CirculaFloor. The CirculaFloor uses a set of movable tiles. The movable tiles employ a holonomic mechanism that achieves omni-directional motion. Circulation of the tiles enables the user to walk in a virtual environment while his/her position is maintained. The user can walk in any chosen direction in the virtual environment. Through evaluation tests, we confirmed the effectiveness of the CirculaFloor.

Keywords : virtual reality, locomotion interface, movable tiles, omni-directional vehicle

1. はじめに

自らの身体を動かすことは空間を認識する有効な手段の1つである。中でも自身の足で歩くことは、空間認識に重要な意味を持つ。バーチャルな空間内において、自らの足で移動することによって、空間内の地面状況や環境状況を実空間と同様に認識でき、没入感が高まる [1]。

このような歩行感覚を呈示する装置をロコモーションインタフェース (以下 LI) と言う。LI は、バーチャルな空間内のあらゆる地面状況や地形を表現し、実空間で歩いているときと同様の感覚呈示が理想である。要求される要件としては、限られたスペースで無限歩行が可能であること、その無限歩行を全方位にわたって行えること。階段など凹凸面の呈示が挙げられる。さらに高いレベルでは歩行だけでなくジャンプや走行も挙げられる。

実空間の限られたスペースで無限に広がるバーチャル空間を歩行する手段としては、歩行者の進行方向を視覚的に誘導する方法 [2] が提案されているが、歩行者の自由意思による歩行実現には、歩行によって生じる移動を打ち消し歩行者の位置を一定に保つことが不可欠である。実空間上で歩行者の位置を一定に保つためには、歩行運動に合わせて、歩行者の歩く床面がその進行方向とは逆方向に動き、歩行者を引き戻せばよい。

現在、歩行速度等に制限があるものの、全方位無限歩行および凹凸面の呈示が可能となってきているが、また装置が大がかりで可搬性に乏しく、特定の機能に特化した装置であるため機能の拡張性も低い。これらのファクターを解決することは実用化に不可欠である。

そこで本論文では、可搬性と拡張性を併せ持った LI、『循環型歩行感覚呈示装置 CirculaFloor(以下 CF)』を開発した。CF は、平面上を任意方向に移動することができる座布団のような形状のロボットを複数台使用し、このロボット群を密着配置することで歩行面を形成する。歩行者の乗っているロボットが歩行に合わせて進行方向と反対向きに移動し、歩行者を引き戻すことで、移動の打消しを行い無限歩行を実現する。また、歩行方向に応じてロボットが入れ替わり歩行ラインを形成することで、進行方向に新たな道を形成し全方位歩行を実現する。さらに歩行者が乗っていないロボットは前方に回り込む、あるいは、進行方向を転換に備えて歩行者の周囲に待機する。複数台のロボットが状況に合わせて循環するように位置を変えていくことから、このシステムをこれまで研究されてきた LI の形式と区別するために「循環型」と分類する。

本論文では、循環型ロコモーションインタフェースの基本概念を提案し、CF のプロトタイプシステムによる評価実験を行ない、その有効性を検証した。

2. 関連研究

これまで研究されてきた LI には様々なものがあるが、床面を能動的に動かす LI の代表的な床面駆動機構には、以下の 2 方式が挙げられる。

1 つはルームランナーのように無限に続く床面をべ

*1: 沖電気工業株式会社 研究開発本部 ヒューマンインタフェースラボラトリー

*2: 筑波大学

*3: 国際電気通信基礎技術研究所 知識科学科学研究所

*1: Oki Electric Industry Co., Ltd Corporate Research and Development Center Human interface Lab

*2: University of Tsukuba

*3: ATR Knowledge Science Lab

ルトコンベアで生成し、歩行者の周囲全てに物理的な床面を提供する「連続面型」と分類されるものである [3] [4] [5] [6] [7]。連続面型 LI は歩行面が連続して循環しているため歩幅や歩隔に制限がなく自由な歩行スタイルが可能で、適切な制御を行えば、自然な歩行動作を呈示することができる。しかし、装置全体が巨大になるという欠点を抱えている。また、実際の歩行は常にフラットな面を歩くわけではなく、階段などの高低差を持った歩行面も想定される。連続面型 LI の歩行面は物理的に繋がっているため、このような凹凸面をもった歩行面に対応するために機能拡張を行うことが困難という問題点も抱えている。

もう 1 つの方式は GaitMaster [8] [9] などの「部分面型」である。健康器具などに用いられるステッパーマシンのように歩行者の足がおける程度の小さな床面（フットパッド）を用意し、フットパッドが足の動きに追従して常に足の真下に床を呈示する。部分面型 LI は連続面型 LI と比べ、装置を比較的小さい形にまとめることができる。また、面が離散して往復運動するため、階段などの凹凸の表現が得意という特徴がある。しかし、この方式は歩行者の足の動きを追跡するフットパッドの追従精度に限界があり、床の可動範囲と応答速度を歩行者側が意識しながら歩行する必要がある。また、進行方向転換が難しいという問題もある。

本研究で提案する「循環型」は、可動床の集合・離散により歩行面を形成するため、自由な歩行スタイルと凹凸面呈示を同時に行える。また、可動床は従来装置より小型軽量にできるため可搬性に優れている。さらに、可動床の数を増やすことが容易で、各可動床に昇降機構を装備することで、凹凸面の生成も実現可能である点でスケラブルといえ、これまでの LI に比べてはるかに高いポテンシャルを持つ方式といえる。

3. システム構成

3.1 基本設計

前述のように LI は、歩行スタイルを自由に選べて、かつ凹凸面を表現できるものが望まれる。また設置場所の条件を少なくするために、装置全体の可搬性を兼ね備えたものが望ましい。そのためには、可動床面が循環しつつも離散出来ることが必要となる。

これに対して本研究では、歩行面を分割し、それぞれが動的に位置を変えながら歩行面を形成する「循環型」方式を提案する。本方式は、連続面型 LI のように可動床面が物理的に繋がっているのではなく、初めはバラバラである複数の可動床群が、状況に合わせて組み合わせることで歩行面を形成する。これによりユーザは広い床面の上を歩幅や歩隔の制限なく自由な歩行スタイルで歩行可能となる。さらに可動床群に昇

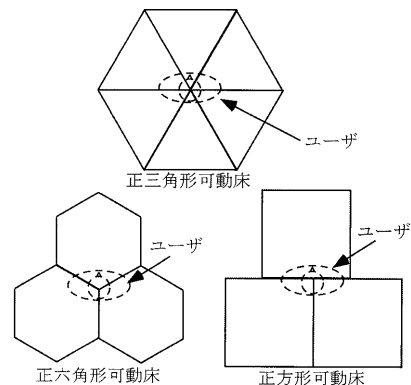


図 1 可動床の種類毎の最低必要枚数

Fig. 1 Relation between shape and the necessary number of sheets of movable floor

降機構を搭載することで、凹凸面を表現することも可能で、パーツが分かれているため可搬性にも優れたシステムを実現できる。

可動床群による循環型歩行面を形成には、まず可動床の形状と、必要となる可動床の総数とその面積を決定する必要がある。

歩行面は合同な図形が隙間なく集まって構成される。それが可能な形状は正三角形、正方形、正六角形の 3 種である。この中のどれが可動床の形状として望ましいかを考えるうえで重要な点は、歩行者がどこで立ち止まって方向を変えるかわからないということである。歩行者が常に可動床の中央にいれば問題は簡単であるが、縁の部分歩くことも当然あり得る。したがって、可動床の頂点部分に立った場合でも、その周辺に床を提供する必要がある。このような状況において必要となる可動床の数は形状によって異なる。正三角形の場合は 6 つ（4 つでも可能であるが、踏み出し量が大きく制限される方向ができてしまう。）、正方形と正六角形の場合は 3 つである（図 1）。一方、歩行者が可動床の縁や頂点に近づいたときは、その周辺に可動床を集めて歩行面を提供しなければならない。したがって、頂点の周囲をなるべく少ない数の可動床で敷き詰められる形状が望ましい。この点で正三角形は不利であるので候補から除外した。次に正方形と正六角形を比較すると、正六角形を敷き詰めて平面を構成する方式は一通りしかない。正方形の場合は 2 つの正方形の頂点を合わせた位置が、必ずしももう 1 つの正方形の辺中央に来なくてもよいので、組み合わせに自由度が高い。これは歩行者の進行方向に応じて、可動床の集合体の構成を選べるという点において有利である。以上のような考察に基づいて、可動床の形状は正方形が最適といえる。

次に歩行面を構成するのに必要な可動床の最小総数を考える。歩行者が立つのに必要な可動床の数は前述

のように3機である。歩行者が移動した場合、それに合わせて新たな床を提供するためには、歩行者が渡り切って自由になった可動床が、歩行者の進行方向に回り込んで新たな床面を作る必要がある。このとき床の数とその最大速度にトレードオフの関係がある。すなわち可動床の数を少なくすると要求される最大速度は大きくなり、逆に可動床の最大速度を小さく押さえるには必要な可動床の数は増える。可動床の最大速度が歩行者に比べて十分速ければ、前述通り3機でも可能である。ただし、それを実現するためには、歩行者の移動速度の数倍の速度が必要であるため、歩行者が走ったりする場合まで考えると、全方位移動床に要求されるスペックは非常に高くなる。

また、個々の床面の面積も考慮が必要である。面積が大きければ、追従精度が悪くても、足の着地面を形成することが出来、ある程度歩行者が自由に歩幅を決めることが可能になる。しかし大きすぎても回り込みに時間がかかる。逆に足と同じ面積にすると高い追従精度と、ロボットが軽量になるために立脚時の床面の安定性が要求される。

以上の議論より本論文では歩幅一步分程度の一辺の長さを持つ四角形4つの可動床を用いて、歩行者の進行方向の待ち受けに余裕を持たせることとした。

3.2 システム概要

本システムは可動床として全方位に移動可能なロボット Vmax Carrier [10] (以下 Vmax) を4台、Vmax用の位置測定センサ、歩行者の位置を測定するセンサ、これらを制御する計算機からなる。

Vmaxは、約60cm四方、厚さ約9cmで可搬重量は130kgf、最高速度は約90cm/sである。バッテリーにより駆動し、通信回線には無線RS232cを用いた。これにより配線の絡まりの問題がなくなり任意の軌道を移動できる。制御用計算機から各モータの目標速度指令値を約25Hzで与え、Vmax上のH8マイコンボード(H8S/2633)により各4つのモータの回転速度を制御する。図2に示すように各Vmaxには全方向車輪オムニディスク仕様の駆動輪が4組ついている。この駆動輪をDCモータで協調駆動することで、平面上を任意の方向へ移動できる。図2の4組の駆動輪が矢印方向に回転した場合、Vmaxは図上方向に向かって進む。また、旋回運動も可能で、本研究では方式の実現を優先したため利用しなかったが、旋回を併用した循環アルゴリズムの最適化も可能といえる。

位置測定に用いるセンサについては、歩行者・Vmaxの移動の妨げにならないように、無線・非接触型のセンサが望ましい。ところで、Vmaxは位置と回転の計測が必要のため各最低2点、合計8点の計測が必要である。さらにユーザの足の位置は最低2点計測が必要

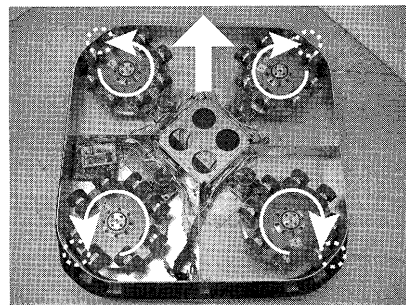


図2 全方位移動車両 Vmax Carrier
Fig. 2 Bottom View of the Vmax Carrier

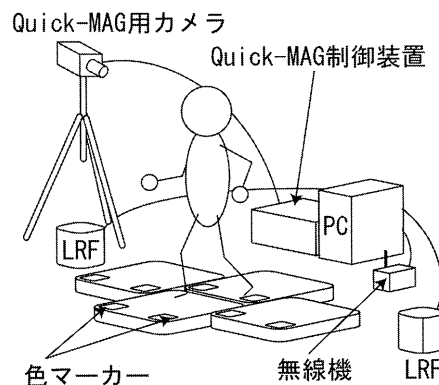


図3 システム構成
Fig. 3 System Configuration

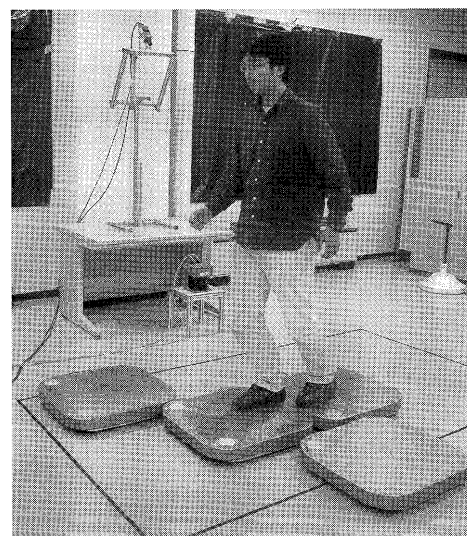


図4 システム全景
Fig. 4 Overall view of the CirculaFloor

で、予算的に10点同時計測の仕様に見合うものが無かった。そこで、本研究では、Vmaxの位置計測は、OKK(応用計測研究所)社製の色追跡型モーションキャプチャQuick-MAG IV(以降Q-MAG)を使用した。歩行者の位置測定にSICK社製のレーザーレンジファインダ(以下LRF)LMS200を2機使用した。それぞれ計測処理用計算機を備えており、Vmax制御用計算機とはEthernetを介してデータ通信を行なった。

CFのシステム構成と全景を図3、4に示す。なお本システムは、より現実に近い歩行を目指すため、体を支えるセーフティーフレーム等は使用しなかった。

4. 歩行感覚呈示の原理

歩行感覚を呈示するためには、歩行者の位置を検出し、それに合わせて可動床群の位置を制御する必要がある。この章では循環型LIによる歩行感覚呈示の基本的な原理を説明する。

4.1 基本原理

歩行者が歩行動作を行なうとその重心位置が初期位置から移動する。この移動を位置センサで計測し、歩行者が乗っているVmaxが歩行に合わせて歩行者の進行(移動)方向と逆向きに動き、歩行者の移動を打ち消す。こうすることで歩行者は実空間での位置をほとんど変えることなく無限に歩くことができる。

歩行者が乗り終えたVmaxは歩行面を形成するラインから外れ、歩行者の進行方向前方に回り込んで新たな歩行面を形成したり、歩行者の進行方向の転換に備えるために、歩行ラインの周囲に待機する。

この様にVmaxが循環運動し、歩行面の形成及び移動の打ち消しを行うことで歩行感覚呈示を実現する。

4.2 歩行者の位置検出

歩行者の足の位置計測は、歩行動作を妨げないようにするため非接触で行なう必要がある。さらに利用時にマーカなどの装着作業が無いほうが望ましい。CFはバーチャルな地面であるVmaxの床板が足よりも十分大きいので、数センチ程度の計測誤差は許容できる。そこでマーカなどを体につけるのではなく、2台のLRFによって両足のふくらはぎの中心位置計測した。

具体的には2台のLRFを約5m間隔で相対するように設置し、同一平面(走査面)をそれぞれのLRFで走査する。計測用計算機ではLRFから走査データを受け取ると、まずCFで使用するエリア外にある必要のないデータを省く。次に、走査面に存在している物体は線分として表されるので、その線分ごとにラベルをつける。2台のLRFによって得られた走査データそれぞれについてこの作業を行う。ラベル付け作業後、2つの加工データを同一空間に表示すると、走査面に存在していた物体は、線分によって囲まれた閉曲面に近い形で表されることになる。ラベル付けされた線分ごとの端点に注目し、線分同士の端点間の距離が設定値以下であった場合、その線分同士はつながっているものとして処理した。この作業を繰り返し、閉曲面を構成したものについてその閉曲面の面積を求め、閉曲面の面積が設定値(ふくらはぎの断面積)以上であった場合、足の断面であると判断する。最後にこの

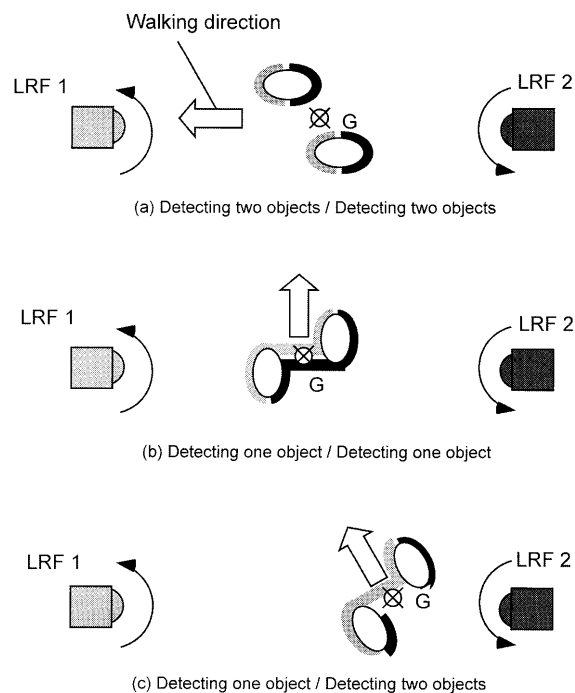


図5 LRFによる足の位置検出
Fig. 5 Condition of scanning mode and estimated body position

面の中心座標を求め、これを歩行者の足の位置データとして扱った。

しかし、実際は図5(a)で示すように両足とも検出できる場合だけでなく、図5(b)、図5(c)で示すような状況もある。CFで必要となるのは歩行者の位置データであり、必ずしも両足それぞれの位置データが必要なのではない。両足とも検出できた場合は、それぞれの足の位置を結んだ線分の中点を歩行者の位置データとして扱う(図5(a))。両足の位置データが得られなかった場合は、加工したデータの中から幾つか歩行者の位置データの候補点を挙げて、その中から最も歩行者の位置データとして信頼性が高いものを必要データとして扱うことにした。図5(b)に示すように、両足で1つの閉曲面を構成している場合は、この閉曲面の中心が歩行者の位置データの候補となる。図5(c)に示すようなときは閉曲面が存在しないので、線分の端点の位置関係から閉曲面を構成できそうな部分を探し、そこから位置データの候補を見つけた。

なお、この歩行者の位置検出法では、LRFによる測定領域に歩行者以外の物体が存在してはいけないことになる。また、歩行者の進行方向については、基準座標系の原点からLRFの測定データにより決定した歩行者の位置に向かう方向として定めた。

4.3 循環アルゴリズム

Vmaxの循環方式には様々なものが考えられるが、進行方向によっても最適な循環方式は異なる。本シス

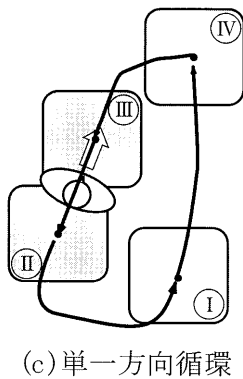
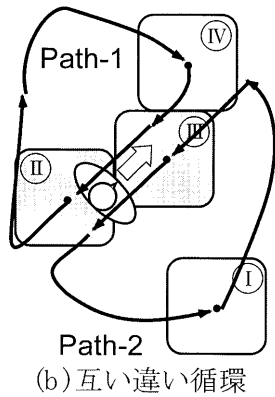
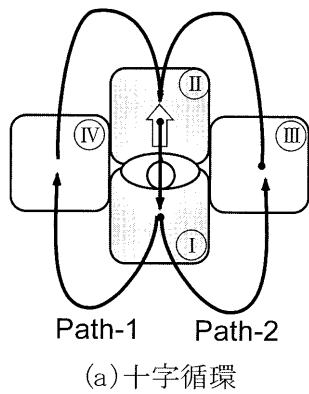


図6 CirculaFloorの循環方式
Fig. 6 Circulations of movable tiles

テムでは、歩行者の進行方向に合わせて3種類の循環パターン、十字循環、単一方向循環、互い違い循環、を切り替え、循環動作の効率化をはかった。

なお、基本設計の項では、歩行者が可動床の頂点部分にいる場合でも周囲に床面を提供するとして可動床の形状決定を行ったが、この場合同時に引き戻しを行なう床数は最大3となる。しかし本研究で使用したVmaxの性能では歩行面形成に間に合わない。そこで以降の議論では可動床2台で歩行ラインを形成し、歩行者の歩行に合わせてこの2台の可動床同士の接している辺の中点の移動を制御し、4台を循環させる方式を考えた。最も厳しい3台まとめた状態でもVmaxの最大速度に合わせて歩行可能速度の制限が大きくなるものの、同様の考え方で軌跡を生成可能である。

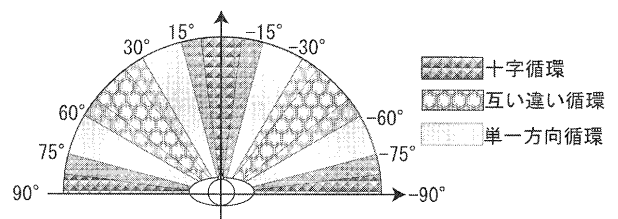


図7 方向別循環パターン
Fig. 7 Pulling back modes corresponding to the walking direction

- 『十字循環：X,Y軸から±15°の範囲に対応』

図6(a)のようにこの循環パターンでは歩行ラインを形成するVmax(図中のI,II)の両側に残りのVmax(図中III,IV)が待機している状態を基本形としている。左右に待機している機体のうち、どちらか一方が次の歩行面を形成するために進行方向前方に回り込む。引き戻し動作を終えて歩行ラインから外れたVmaxがこの空いたスペースに待機するように動く。新しい歩行面を形成するために進行方向前方に回り込む機体を左右交互に変えることで、回り込みに余裕を持たせることができる。本システムでの歩行可能速度は24.5cm/sである。

- 『互い違い循環：Y=X,Y=-X軸から±15°の範囲に対応』

図6(b)のように新たな床面となるVmaxが歩行ラインに接触するとき、図で言うところの上側から接触・右側から接触、これを交互に行う循環パターンである。歩行ラインを形成するVmaxは歩行者が歩く限り常にその進行方向とは反対側に移動することから、歩行ラインから抜けるVmaxは、抜けていく方向によっては大きく遠回りをするようになる。しかし、互い違いにVmaxがつながっていく形を取ると、歩行ラインから抜ける・歩行ラインに接触するとき、無駄な回り道を行わないで済むため循環効率上がる。歩行可能速度は13.4cm/sである。

- 『単一方向循環：上記2循環の間に対応』

十字循環の変形とも言えるのがこの循環パターンである(図6(c))。互い違い循環でも述べたが、Vmaxが歩行ラインから抜ける際に、歩行者の進行方向(Vmaxの循環方向)とどちら側から抜けていくかによって、歩行ラインから抜けるのに費やす移動距離に差がでてしまう。この単一方向循環では歩行ラインからはずれるVmaxがなるべくローコストで歩行ラインから抜けることを目的としている。歩行可能速度は20.8cm/sである。

これらは歩行者の進行方向によって切り替える必要がある。3つの循環パターンの対応関係を図7に示す。Vmaxの一辺の長さは約60cmであり、歩行ラインの

傾きが前方向土約 30° のとき、 V_{max} 同士が接触する辺の長さは、約 30cm である。そのため通常の歩幅 60cm 程度であれば、問題なく歩行可能であると言える。なお、循環パターン切り替えのための基準として、循環パターン毎の担当範囲の境界を明確にせずヒステリシスを持たせた。これは、循環パターンが頻りに切り替わり、 V_{max} の循環動作が不安定になることを回避するためである。また、 V_{max} の配置によっては回り込み中に他の V_{max} と衝突する可能性があるため、回り込みの際は衝突を予測し、所要時間に応じて外側に逃げる、あるいは一時停止してやり過ごす衝突回避機能も組み込んだ。

5. 評価実験

5.1 全方位歩行

本手法によって全方位歩行が可能であることを確かめるため、13 人の被験者に任意の方向に CF 上を歩かせた。ただし、進行方向を変えるとき (循環パターンが変わる場合の方向転換) は、一度歩みを止めて V_{max} が初期配置 (十字型配置) に近い形に戻るまで待つこと、 V_{max} 同士の接触部分については踏んでも問題ないことを事前に説明した。

図 8 に、典型的な被験者の上から見た CF 上での歩行時の腰の軌跡を示す。 V_{max} による引き戻し動作により、被験者が実空間上のある範囲内で歩行を続けたこと、また任意方向にも歩行できたことがわかる。

図 9 に V_{max} 上を人が歩いている状態での前述の 3 種類の循環パターンにおける V_{max} 中心座標の実際の移動軌跡を示す。歩行者の歩行ライン上で V_{max} の軌跡に若干のブレが見られる。これは歩行動作によって歩行方向横向きに加わる V_{max} への外力による変位を打ち消す動きのためである。また、十字循環の理想循環軌跡は左右対称であるが、実際は左右対象の軌跡

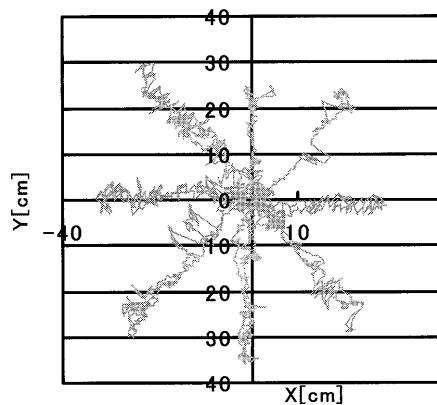


図 8 歩行者の歩行軌跡
Fig. 8 Trajectory of a walker

ではなかった。これは他の V_{max} との位置関係によって一時停止や遠回りなど衝突回避したため、ほぼ目標通りの動作を実現することが出来た。なお、 V_{max} には速度の個体差があり、循環のタイミングによっては V_{max} 同士が接触しない状態で歩行面を形成することが各試行中 2,3 回あった。しかしその場合でも、事前の指示の通り両者のエッジを踏んだ被験者は、問題なく歩行可能であった。実験後の被験者の感想を以下に示す。カッコ内の数字は同様の回答をした人数である。

1. 任意方向に歩くことができたが、上手く歩くには多少練習が必要かもしれない。(8)
2. 進行方向を変えるとき V_{max} の配置具合によっては足を踏み出しやすい部分とそうでない部分が生じてしまう。(2)
3. 進行方向を変える際に、一度足を止めて、全ての V_{max} が動きを止めるのを待たなくてはならないところに現実歩行との差を感じた。(7)

以上の結果から、全方位歩行が実現されたがいくつか課題もあることが分かった。

5.2 歩行安定性の評価

本システムは従来のシステムと異なり、可動床群の高さ 9 cm と低く歩行時の転落の恐怖感が少ないためセーフティーフレーム無しでも歩行が可能である。そこで歩行時の姿勢の安定性について評価実験を行った。

ここでは、 V_{max} 上で被験者が直進歩行する様子を背後からビデオ撮影し、その映像から被験者の腰の最大振幅を腰の幅で割った比率を「腰の変位比率」とし、安定性評価の指標とした。

事前実験として実床面上を歩行した場合の腰の変位比率を計測した。このとき被験者が実床面上を歩行中にバランスを崩したということはない。この実験の結果、腰の変位比率は 10% 以内に納まっていたことから、変位比率 10% を歩行中の安定と不安定の境界とした。

これまでの経験から、CF 上を歩行する際に被験者に対して歩行面を形成する V_{max} 同士が接触する部分を踏んでも問題はないという説明の有無によって、歩行動作の安定度に大きく差が出ることがわかっている。そのため本実験においても、被験者にこのことを事前に説明した。被験者 13 人の腰の変位比率別人数分布、また、その内歩行面を形成する V_{max} 同士の接触部分を跨いでいた人数の度数分布を図 10 に示す。この結果から、ほとんどの被験者がバランスを崩すことなく CF 上を歩行することが出来たといえる。

2 人の被験者 (腰の変位比率が 20% 以上だった被験者) が大きくバランスを崩してしまっただが、これは V_{max} の位置測定センサである Q-MAG 自体が抱えている問題に起因する。Q-MAG は色を追跡するセン

サであるため、追跡するマーカの設定色と同じ色と認識されるものが測定エリア内に存在すると、マーカ-の位置計測が正しく行なわれない。その結果 Vmax の機体制御が不安定になり、その煽りを受ける形で被験者が歩行バランスを崩したと考えられる。

事前に Vmax の機体同士の接触部分を踏んでも問題がないことは説明しておいたが、3人の被験者が Vmax 同士の接触部分を跨ぐように歩いてしまっていた。この3人の被験者から実験後に、「事前に説明は受けていたが、いざ CF 上で歩行すると頭からそのことがな

くなってしまった」、「次に乗る Vmax が自分の足元に来る前に、ついそれまでの歩行状態を変えて、次の Vmax に乗り急いでしまい、結果接触部分を跨いでしまった」との感想を得た。

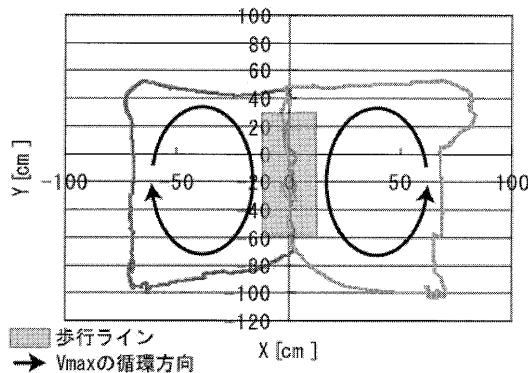
被験者全体から得られた感想としては、「ルームランナーのような床面がベルトコンベア式のものとは違って、最初から進行方向前方に床面が存在しているのではなく、Vmax が循環することによって次の床面が生成されていくことから、次の床面が形成されるのを目で追ってしまいがちになり、視線が足元を向いたままになってしまう」というものが多かった。

6. 考察

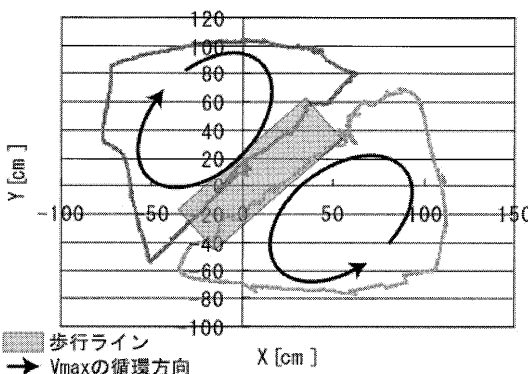
全方位床群の循環により全方位歩行を実現することができた。本装置と全周型ディスプレイなどの視覚系装置と組み合わせることにより実際に歩行できる都市空間設計システムや、都市環境内での避難訓練用シミュレータなどが実現できる。また、広域体験型ゲームなどアミューズメントの分野への応用など幅広い分野への寄与が期待できる。

しかし本試作システムでは、歩行速度、方向転換の応答性の点で、実空間の歩行には及ばなかった。

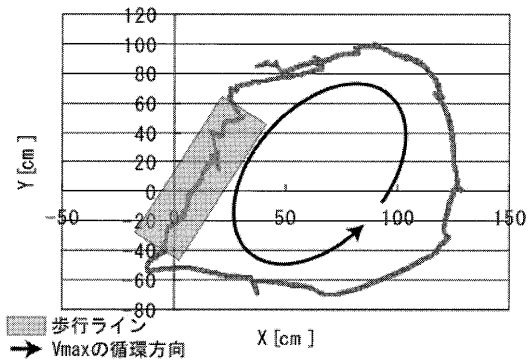
CF の歩行可能速度が実歩行速度に比べて遅い主な原因は可動床の性能不足にある。現在可動床として使用している Vmax についてはアクチュエータの性能を向上することで、最高速度を上昇させることはできる。しかし、進行方向を変える際にアクチュエータの回転方向が反転するほどの急制動がかかる場合があり、Vmax の駆動部に大きな負荷がかかる。歩行だけでなく、走行可能な LI への対応を考えた場合、Vmax の最高速度を上げて移動（歩行・走行）可能速度を上昇させるだけでなく、大きな負荷に耐えられるように駆動部の強度を強化、あるいは駆動方式自体を大幅に改良する必要があるといえる。関連して、歩行者の歩行の加減速によって、引き戻しを行う床面の加速度を感じて実歩行との違いを意識してしまう問題がある [11]。本



(a)Vmax 十字循環実軌跡(90° 方向)



(b)Vmax の互い違い循環実軌跡(45° 方向)



(c)Vmax の単一方向循環実軌跡(70° 方向)

図9 Vmax の循環軌跡
Fig.9 Trajectories of tiles

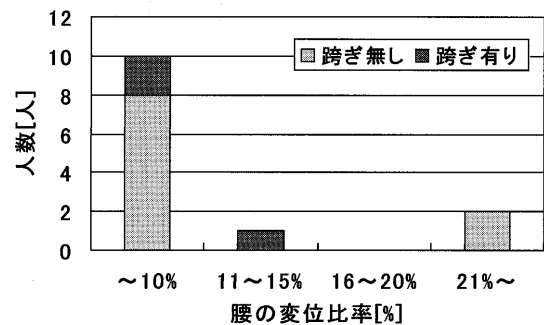


図10 腰の変位比率別人数 / 結合部分跨ぎの有無
Fig.10 Frequency distribution of sway ratio

実験では、歩行速度が遅く比較的定常状態に近かったこと、次の床面へ乗り移ることへ被験者の意識が向いていたため、引き戻しを行う床面の加速度を感じたり実歩行との違和感を得たという感想はなかった。しかし、上記改良によって歩行スタイルが多様化し、より現実空間に近い歩行を実現する際に無視できない側面である。この点についても十分な対策が必要といえる。

また、現在のアルゴリズムは、どのタイミングで歩行を停止しても方向転換可能である。しかし、歩行者の周囲に V_{max} を配置するため、歩行者は一時待機（長いと5秒程度）する必要がある。しかし、方向転換時の循環方式の切り替えを柔軟に行えるようにアルゴリズムを改良するだけでは限界がある。例えば、単一方向循環の場合に、もう一台 V_{max} を追加してどの方向への方向転換が起こっても対応可能にするなど、台数を動的に変更することも含めたハードウェアおよびソフトウェアの両面からの対応が必要となる。

V_{max} の上に搭載する昇降機構および循環アルゴリズムの改良による階段や坂道など凹凸面の表現手法については今後進めていく予定である。

7. まとめ

本論文では、これまでの LI の長所に加え、可搬性や拡張性を持った「循環型」方式 LI を提案した。

この循環型 LI を実現するために、床面として使用するロボットの形状・台数を検討、ロボットの循環アルゴリズムの構築を行い、循環型歩行感覚呈示装置 CirculaFloor を実装した。評価実験により、歩行方向を変える際に一度歩行を止めなければならないなど制限があるものの、任意方向への歩行可能であること、セーフティーフレームなしでも実床面上と同様にバランスを崩すことなく歩行できることを検証し、本システムの有効性を明らかにした。

今後の課題としては、立ち止まり不要の方向転換の実現、昇降機構による凹凸面の呈示が挙げられる。

8. 謝辞

本研究は情報通信機構の研究委託により実施した。

参考文献

- [1] Iwata, H., and Matsuda, K., Haptic Walkthrough Simulator: Its Design and Application to Studies on Cognitive Maps, Proc. of ICAT 92, 185-192, 1992
- [2] N.Nitzsche, U.D.Hanebeck, G.Schmidt, "Extending Telepresent Walking by Motion Compression", Proc. of HRCS'02, 83-90, 2002
- [3] Brooks, F.P., Jr. A dynamic graphics system for simulating virtual buildings. Proceedings of Interactive 3D Graphics, 9-21, 1986
- [4] Hirose, M. and Yokoyama, K. VR Application for Transmission of Synthetic Sensation. Proceedings of ICAT'92, 145-154, 1992
- [5] Noma, H. and Miyasato, T., Design for locomotion interface in a large scale virtual environment. ATLAS: ATR Locomotion Interface for Active Self Motion. Proc. ASME Dynamic Systems and Control Division, DSC-Vol. 64, 111-118, 1998
- [6] Christensen, R., Hollerbach, J.M., Xu, Y., and Meek, S. Inertial force feedback for a locomotion interface. Proc. ASME Dynamic Systems and Control Division, DSC-Vol. 64, 119-126, 1998
- [7] Iwata, H., The Trous Treadmill: Realizing Locomotion in VEs, IEEE Computer Graphics and Applications, Vol. 9, No. 6, 30-35, 1999
- [8] 岩田洋夫: 凹凸面を呈示する仮想歩行装置 GaitMaster, 日本バーチャルリアリティ学会第4回大会論文集, PP.345-348, 1999
- [9] Iwata, H., Yano, H. and Nakaizumi, F., Gait Master: A Versatile Locomotion Interface for Uneven Virtual Terrain, Proceedings of IEEE Virtual Reality 2001 Conference, (2001) 131-137
- [10] 駄本理一郎, Wendy Cheng, 広瀬茂男, Vuton-II: Omni-Disc を用いた全方向走行車の開発, 第6回ロボティクスシンポジウム予稿集, 255-260, 2001.
- [11] 高橋, 稲見, 柳田, 前田, 館: 人工現実環境における歩行感覚提示に関する研究; ヒューマンインタフェース学会研究報告集, 1(2), 25-28, 1999.

(2005年12月26日受付)

[著者紹介]

福島寛之 (学生会員)



2004年筑波大学第三学群工学システム学類卒業。06年筑波大学大学院理工学研究科修了。同年沖電気工業株式会社入社、現在に至る。コミュニケーション支援に関する研究に従事。

矢野 博明 (正会員)



1997年筑波大学大学院工学研究科修了。同年日本学術振興会特別研究員(PD), 99年同大機能工学系講師, 06年同大システム情報工学研究科助教授, 現在に至る。力学呈示, 移動感覚に関する研究に従事。博士(工学)

野間 春生 (正会員)



1994年筑波大学博士課程工学研究科修了。同年株式会社国際電気通信基礎技術研究所入所, 06年同知識科学研究所室長。人工現実感, ハプティックインターフェイス, センサーネットワーク等の研究に従事。博士(工学)

岩田 洋夫 (正会員)



1986年東京大学大学院工学系研究科修了。同年, 筑波大学構造工学系助手, 88年同年講師, 93年同助教授, 04年同大システム情報工学研究科教授, 現在に至る。人工現実感に関する研究に従事。工学博士