

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 4 月 24 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2009～2012

課題番号：21240006

研究課題名（和文） 歩行移動インタフェース基盤技術の構築

研究課題名（英文） Development of Generic Technology of Locomotion Interface

研究代表者

岩田 洋夫 (IWATA HIROO)

筑波大学・システム情報系・教授

研究者番号：60184884

研究成果の概要（和文）：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。歩行移動インタフェースは、バーチャルな空間を歩いて移動する感覚を生成する。本研究では、TorusTreadmill と呼ぶ 14 個のベルトを直交方向に数珠つなぎにして、前後左右の任意方向に無限に動く床を開発した。オーストリアのリンツ市で開催された Ars Electronica 2011 において展示評価を行い、モジュラー構造の有効性を確認した。

研究成果の概要（英文）：A locomotion interface using torus-shaped treadmill is developed. Traveling on foot is the most intuitive way for locomotion. An infinite surface driven by actuators is an ideal device for creation of sense of walking. The Torus Treadmill employs 14 sets of treadmills. These treadmills are connected side-by-side and driven in perpendicular direction. The effect of infinite surface is generated by the motion of the treadmills. The walker can go in any direction while his/her position remains localized in the real world. The device has modular structure that enables portability for exhibition. It was exhibited in Ars Electronica 2011 in Linz Austria.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	5,600,000	1,680,000	7,280,000
2010 年度	10,600,000	3,180,000	13,780,000
2011 年度	8,900,000	2,670,000	11,570,000
2012 年度	7,500,000	2,250,000	9,750,000
年度	0	0	0
総計	32,600,000	9,780,000	42,380,000

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

### 1. 研究開始当初の背景

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。この現象は実世界における人間の生活シーンでは当たり前が発生するが、バーチャルな

世界においてはほとんど実現されていないのが実状である。

歩行移動インタフェースは、バーチャルな空間を歩いて移動する感覚を生成する。自然な歩行感覚を得るためには、2つの機能を実現しなければならない。まず第一に、歩行運動を行わせつつ、体の位置を一定に保つ移動の打ち消しが不可欠である。移動の打ち消しを行うためには、歩行者の足の動きに合わせて床を逆方向に駆動する仕掛けが必要である。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。次に、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なけ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ことが、歩行移動インタフェースの中心的な技術になる。

本研究の代表者は、この歩行移動インタフェースに関して、世界に先駆けて1988年より研究に着手し、様々な可能性を追求してきた。それらの試みは次の4つのタイプに分類できる。

[タイプ 1] 靴の底に床との相対運動を起こす仕組みを備えるもの

[タイプ 2] トレッドミルを数珠つなぎにして、全方向に動く床を作るもの

[タイプ 3] 歩行者の両足の下に、それに追従する可動床を提供するもの

[タイプ 4] 全方向に動くロボットタイルを数枚用意し、その循環によって無限に続く床を構成するもの

これらの成果を国際会議で発表してきた結果、歩行移動インタフェースに関する研究は徐々に広がり、2008年4月には、ドイツのマックスプランク研究所において”CyberWalk”という国際ワークショップが開催され、本研究の代表者は招待講演を行った。

バーチャル空間内の移動に関する研究は、バーチャルリアリティにおける主要なテーマの一つであり、当該領域の著名な論文誌”Presence”において、過去2回の特集が組まれている。しかし、歩行移動に関する報告はそれらの中で、まだ少数である。申請者が20年間歩行移動インタフェースの研究を続けてきても、それが広く普及しない原因として第一に考えられることは、実験装置が大型になり、その実装と設置に大きな制約があることである。これは、この装置が人間の体全体を動かすという機能を有することに付随して発生する問題であるが、後述するいくつかのシステムが独立して試作されている段階であり、汎用的に用いることが可能な状態にはなっていない。本研究では、バーチャル空間における歩行移動に関する研究者が、共通に使えるような技術基盤を構築する。それ

を活用することによって当該研究が一般化することを目指す。

## 2. 研究の目的

本研究では、汎用的に使用できる歩行移動インタフェースを実現するために、共通プラットフォームとなりうる形態を明らかにする。前述のように4つに分類したもののうち、最も汎用性があると考えられるのは[タイプ 2]のトレッドミルを用いるものである。[タイプ 1]は、小型で比較の実装が容易であるが機能に限界があり、[タイプ 3]は、歩行者の足に追従させることに限界あり、[タイプ 4]はシステムが非常に複雑になり、安定して稼働させるのが難しい。

本研究の代表者は1997年に、Torus Treadmill と呼ぶ12個のベルトを直交方向に数珠つなぎにして、前後左右の任意方向に無限に動く床を試作し、この方式の有効性を確認した。ただし、この装置は大型であり、通常の部屋で運用するには無理がある。他の研究機関においても、トレッドミルを用いた歩行移動インタフェースは、専用の建屋に設置している。したがって、本研究では、これを小型化し汎用的に使えるものを目指す。小型化するためには、装置自体をコンパクトに実装することに加えて、限られた可動床面積で有効な歩行動作を安全に実現する必要がある。この目的を達成するために、以下の4つの研究項目について研究を進めた。

[研究項目 1] 全方向トレッドミル駆動機構のモジュール化

[研究項目 2] 歩行者の支持と歩行運動のセンシング

[研究項目 3] 全方向トレッドミルの駆動アルゴリズム

[研究項目 4] 安全性・有効性のアセスメント

## 3. 研究の方法

本研究は、前述の4つの研究項目について、以下のように4ヶ年で遂行した。

### 【平成21年度】

(1) 全方向トレッドミルのモジュール化駆動機構の設計

本研究の代表者は、前後だけでなく左右方向にも任意に歩けるようにした全方向トレッドミルを考案している。これは多数のベルトコンベアを直交方向に数珠つなぎにすることによって、無限に続く2次元平面を提供する。その原理は、前後方向に歩くときは各ベルトが回転し、左右方向に歩くときは数珠つなぎになったベルト群が公転する。これらの組み合わせによって任意方向の歩行移動

が打ち消される。

この方式の欠点は、装置が大型化することである。さらに、ベルトを数珠つなぎにした構造は、各ベルトがチェーンに固定されており、これを一旦組むと分解するのがほぼ不可能である。このことが本装置の運用の障害になっている。分解組立が困難なことは、メンテナンスの面で重大な欠点であり、施工後の性能向上も困難である。この問題を解決するために、本研究では駆動機構のモジュール化を行った。駆動モジュールは、各ベルトを自転させるユニットと、それらを公転させる無限軌道機構のユニットに分かれる。これらのユニットが容易に組み合うような構造にすることによって、柔軟な運用が可能になる。ユニットに分かれていれば、小さな部屋であっても、本装置を搬入し施工することができる。また、ベルトは歩行者がその上を歩くので消耗部品であるが、モジュール化することによって、交換の作業も簡略化できる。さらに、一旦施工した後でも歩行面の拡大が可能であるというスケラビリティも実現される。

#### (2) 無限軌道ユニットの原理試作

本研究で最も難しい部分は、ベルト群を公転させる無限軌道機構のユニット化にある。そこで、最初の設計がうまく機能しない場合に備えて実装を2段階にし、平成21年度は無限軌道ユニットの原理試作を行った。

#### 【平成22年度】

#### (3) 全方向トレッドミルのモジュール化駆動機構の実装

平成21年度に設計を行ったモジュール化駆動機構を実装し、それらの組み立てを行った。組みあがった状態で、ベルト群の公転試験を行った。

#### (4) 歩行者の支持機構の開発

歩行移動インタフェースを使用する場合、歩行者の転倒の危険があるため、転倒時に備えて歩行者の体を支持する手段が提供される。ユタ大学のHollerbachらが開発しているTreadPortと呼ばれる大型トレッドミルではパラシュート状のハーネスで、歩行者の体を上から吊るすことが行われている。このようなハーネスは脱着が煩雑であり、歩行中も圧迫感がある。

本研究の代表者は[タイプ1]の歩行移動インタフェースを研究している過程で、歩行者の支持方法として、のような円環を腰の周りに置くことが有効であることを発見した。転倒の不安があるときは、円環をつかまればよく、安定して歩行している時は、円環の内部で自由に動くことができる。このような円環型の支持機構を、全方向トレッドミルに適

用できるように設計した。

#### (5) 歩行運動のセンシングの開発

歩行者の移動を打ち消すためには、歩行者の位置を検出するセンサーが必要である。従来は磁気式や光学式のセンサーを別途設置して、歩行者の位置検出を行っていたが、本研究では上記の円環型の支持機構の内側に近接センサーを内蔵するものを新たに開発した。これは円環の内側に、全周にわたって近接センサーを配置し、歩行者の体幹がどの位置にあるかを検出するものである。

近接センサーの利点は、歩行者は体に何も付けなくてよいことであり、実利用の面で有利である。

#### 【平成23年度】

#### (6) 全方向トレッドミルの駆動アルゴリズムの開発

円環型のセンサーで検出した歩行者の位置に応じて、全方向トレッドミルを駆動し移動を打ち消すアルゴリズムを開発した。歩行者が円環の中央にいるときは、全方向トレッドミルは動かさず、ある方向に移動したことを検出すると、円環の中央に引き戻すように床を動かす。この方式の有効性は、申請者がこれまでに開発してきた、多数の歩行移動インタフェースにおいて確認してきた。

マックスプランク研究所のCyberWalk Platformや、ユタ大学のTreadPortが大型であるのは、静止状態から引き戻しを始める遷移過程をスムーズにするために、歩行者にある程度の距離を実際に移動させ、動的歩行になってから床を動かすためである。しかし、大きな可動床を用意していても、方向変換を行うと、進行方向と床の移動方向がずれて不安定になる問題が発生する。本研究では、この問題を避けるために、円環型支持機構を導入し、歩行者が不安定になる歩きだしや方向変換を行う状態では、自由に円環をつかませることによって転倒の危険を排除した。これによって、全方向トレッドミルを大幅に小型化することができ、その普及に有利になる。

#### 【平成24年度】

#### (7) 安全性・有効性のアセスメント

開発した全方向トレッドミルとその駆動アルゴリズムの安全性と有効性を検証した。本研究の代表者はJSTのCRESTプロジェクト「デバイスアートにおける表現系科学技術の創生」において、展示を通じて技術開発を推進する研究スタイルを確立している。これは、開発された試作システムを一般の人々が自由に体験できる環境を用意し、それを観察することによって、システムの改良すべき箇所を見出していくものである。CRESTプロジェクトでは日本科学未来館に

常設スペースを確保して、そこで展示を行っているが、本研究ではオーストリアのリンツ市で開催された Ars Electronica 2011 において展示評価を行い、モジュラー構造の有効性を確認した。

#### 4. 研究成果

##### トールストレッドミルのモジュラー構造の設計と製作

本研究では駆動機構のモジュール化を行った。駆動モジュールは、各ベルトを自転させるユニットと、それらを公転させる無限軌道機構のユニットに分かれる。これらのユニットが容易に組み合わせるような構造にすることによって、柔軟な運用が可能になる。ユニットに分かれていれば、小さな部屋であっても、本装置を搬入し施工することができる。また、ベルトは歩行者がその上を歩くので消耗部品であるが、モジュール化することによって、それらの消耗部品の交換作業も簡略化できる。さらに、一旦施工した後でも性能向上のための改造が可能であるというスケラビリティも実現される。

以下に自転ユニットと公転ユニットの具体的構成を説明する。

##### (1) 自転ユニット

各自転ユニットは、通常のトレッドミルと同じ機能を有するが、隣り合うユニットの隙間を最小にしなければならないという制約がある。それを実現する際に障害になるのは、ベルトローラーを駆動するチェーンを取り付ける場所である。ベルトをそのまま並べると、このチェーン駆動機構の幅だけ、ベルトの間に隙間ができてしまう。この隙間をなくすために、1997年に試作した初号機ではチェーンの sprocket の直径分だけ、ベルトを長手方向にずらし、偶数番目と奇数番目でチェーンの取り付け方向を逆にすることによって、ベルトの隙間を最小化した。しかし、この構造は歩行に使える駆動面の外側に、駆動用のベルトローラーとチェーンが張り出すために、歩行可能面の長さに対して、装置全体の幅が 1m 程度大きくなるという欠点があった。

本研究では、この問題に対処するために、駆動用のベルトローラーとチェーンを、自転ユニットの下側に取り付ける構造にした。自転ユニットの裏側には、駆動用のモーターとそれに電力を供給する集電ブラシが備えられる。さらに、自転ユニットをベルトと直行方向に滑らせるために、車輪が両端と中央に付いている。

使用したモーターは三菱製 0.75kW-4 極モーターの SF-HRCA で、1/30 に減速し sprocket を駆動する。スペック上は、80Kg の人が載って、3.8[m/sec] で回すことができる。自転ユニットの構造部材はアルミ合金で、1台の重量は 47Kg である。

駆動用のベルトローラーを下側に付けることによって、ベルト両端のローラーの径を小さくできるので、歩行可能面の長さに対して、装置の張り出す量は、6cm と大幅に短縮された。

自転ユニットのベルトの幅は 340mm で、可動面の長さは 1500mm である。これが 14 台組み合わせることによって、1500mm × 1500mm の全方向可動床が構成される。

##### (2) 公転ユニット

公転ユニットは、自転ユニットを数珠つなぎにし、それら全体を回転させる機能を有する。図 2 は、公転ユニットの概観である。両側に、各自転ユニットを直行方向に駆動するためのチェーンを備える。これらのチェーンの sprocket は軸で結合されており、自転ユニットと同じモーター 2 台で駆動される。減速比も 1/30 である。スペック上は、14 台の自転ユニットを、80Kg の人が載った状態で 1.2[m/sec] で回すことができる。電源を、汎用性を考慮して AC100V にしているために、モーターの出力に限界があるものの、自然な歩行速度で引き戻しが行えるように設計している。公転ユニットの中央には、自転ユニットのモーターに電力を供給する給電レールがあり、歩行者の体重を支えるためのレールも 2 本備える。公転ユニットの構造部材はスチール製で、各梁がボルトで締結され、分解が可能になっている。

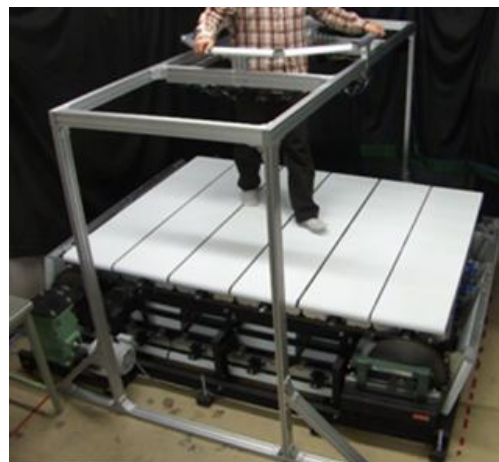


図 1 トールストレッドミル全景

図 1 は、この公転ユニットに 14 台の自転

ユニットが取り付けられた状態である。装置全体の大きさは、幅 2450[mm]×奥行き 2600[mm]である。

### 歩行者の支持と歩行運動のセンシング

歩行者の移動を打ち消すためには、歩行者の位置を検出するセンサーが必要である。従来は磁気式や光学式のセンサーを別途設置して、歩行者の位置検出を行っていたが、本研究では上記の円環型手すりの内側に近接センサーを内蔵するものを新たに開発した。これは円環の内側に、全周にわたって近接センサーを配置し、歩行者の体幹がどの位置にあるかを検出するものである。近接センサーの利点は、歩行者は体に何も付けなくてよいことであり、実利用の面で有利である。

近接センサーは、赤外線反射を用いる PSD センサ (SHARP 製 GP2Y0A21YK0F) を採用した。これを 2 3 個円環型手すりの下に配置した。この個数は向かい合う PSD センサーの干渉が無視できることを条件に決めている。各 PSD センサーと歩行者の体幹との距離を求め、体幹の中心位置を算出する。PSD センサーは計測対象との距離が離れると精度が大きく低下するので、体幹に近い方のデータを優先し、体幹を円と仮定し、その位置を最小 2 乗近似で求めている。この方式で、平均 16mm 程度の誤差で、位置が取得できる。

### 有効性・安全性のアセスメント

トーラストレッドミルの有効性と安全性を検証するために、オーストリアのリンツで開催された Ars Electronica 2011 において展示を行い、一般来場者に歩行を体験させた。

展示を実現するためには、トーラストレッドミルを分解して搬出し、現地の会場に搬入後組み立てなければならない。そこでモジュラー構造の有効性が試されることになる。筑波大学の実験室の出入り口は幅 1800mm 高さ 2000mm なので、搬出のためには、自転ユニットを公転ユニットからはずし、公転ユニットの鉄骨を分解する必要があった。展示会場はリンツ芸術大学であったが、その制約としては、フォークリフトなどの重機は使えないことと、開梱した箱を地下の倉庫にしまわなければならないことであった。特に、地下の倉庫に下ろすためのエレベータの開口部が幅 1400mm 高さ 2000mm であるのが、ボトルネックとなった。自転ユニットを個別に梱包し、分解した公転ユニットを小分けに梱包した結果、この制約をすべてクリアできた。

設営期間に、4 名で作業した結果、組立に要した時間は 8 時間であった。その内訳は公転ユニットの鉄骨の組み上げに 3 時間 30 分、自転ユニットの取り付けに 2 時間、円環型位

置センサの組立に 45 分、保護カバーの組立に 45 分、全体の調整に 1 時間程度であった。保護カバーとは、トーラストレッドミルの機構部分に来場者が誤って触れてけがをすることを防ぐために装置を覆うものである。本展示では、バーチャル空間の映像を 2 面の壁に投影した。

因みに、撤収時の分解作業は約 4 時間で終了した。その内訳は円環型位置センサと保護カバーの分解に各 30 分、自転ユニットの取り外しが 1 時間 30 分、公転ユニットの鉄骨の解体が 1 時間 30 分であった。

この展示会は設営時間と撤収時間が限られていたが、それを余裕でクリアすることができ、モジュラー構造の効果を実証した結果となった。

装置の評価のために体験者に対してアンケートを行った。内容は以下の 4 つの質問に対する 11 段階評価と自由記述である。また、データ整理のために性別、年齢、身長、体重を併せて記載してもらった。

1. トーラストレッドミルのレスポンスはどうだったか
2. 移動している感覚は得られたか
3. 自然な歩行感覚が得られたか
4. 手すりはバランス維持に役立ったか

6 日間の展示で 214 名の体験者に回答してもらった。男女比は約 3 : 1 で男性の方が多かった。年齢は 12 歳から 70 歳まで幅広い世代に体験してもらい、その中で 20 代と 30 代が共に約 3 割を占めた。体験者全体の平均年齢は 34.0 歳、平均身長は 175.8cm、平均体重は 72.1kg となっている。

4 つの質問に対しての全体の平均を図 9 に示す。尚、点数はレスポンスに関してが「遅かった」が 0、「適切」が 10 で、他の項目に関しては「いいえ」が 0、「はい」が 10 となっている。この結果、移動感覚と手すりに関しては比較的高い点数が得られたが、レスポンスと歩行感覚についてはちょうど中間の得点となった(図 2)。

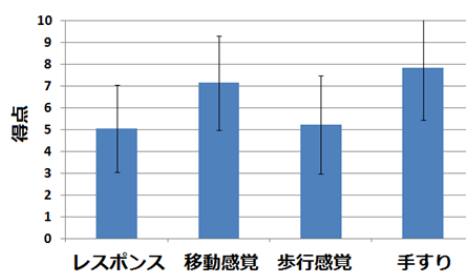


図 2 アンケート結果

この結果は、歩行による移動感覚の生成を、安全にできたことを意味し、装置本来の機能が発揮できたことが確認された。一方で、レスポンスと自然な歩行感覚の評価は、必ずしも高くなかった。その理由として、後述する公転時の振動のために、引き戻し速度の上限を 500[mm/s]におさえていたためと考えられる。

本論文ではロコモーションインタフェースの基盤技術を目指して、モジュラー構造を有するトラストレッドミルを設計し実装した。分解してオーストリアまで運搬し、設営条件に制約が大きい会場で展示を行うことに成功した。全方向トレッドミルの開発は、世界では他にも例があるが、芸術祭の会場に設置して一般公開したものは、本装置だけである。

## 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 5 件)

- ① Hiroaki Yano, Shintaro Tamefusa, Naoki Tanaka, Hideyuki Saitou and Hiroo Iwata,  
Interactive Gait Rehabilitation System with a Locomotion Interface for Training Patients to Climb Stairs, Presence:Teleoperators and Virtual Environments, 査読有, Vol.21, No.1, 2012, pp.16-30
- ② 真中勇太, 矢野 博明, 岩田 洋夫,  
ロボットタイトルとリアドームの統合に関する研究,  
日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 査読有, Vol.16, No.3, 2011  
426
- ③ 圓崎 祐貴, 矢野 博明, 岩田 洋夫,  
直動アクチュエータと空気圧バルーンを用いた体積型ハプティックディスプレイ”Volflex+”の開発,  
日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 査読有, Vol.16, No.3, 2011, pp.327~334
- ④ 圓崎 祐貴, 矢野 博明, 岩田 洋夫  
デバイスアート・ツールキットの開発  
日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 査読有, Vol.15, No.3, 2010, pp.417~426
- ⑤ Hiroaki Yano, Shintaro Tamefusa, Naoki Tanaka, Hideyuki Saitou and Hiroo Iwata,  
Gait Rehabilitation for Stair Climbing

with a Locomotion Interface  
Proceedings of the 2009 IEEE 11<sup>th</sup>  
International Conference on  
Rehabilitation Robotics. 査読有,  
Pp.218-223, 2009

[学会発表] (計4件)

- ① 佐野英雄, 矢野 博明, 岩田 洋夫,  
腰部揺動機能を有した装着型歩行感覚提示装置,  
第17回日本バーチャルリアリティ学会  
大会, 2012年9月12日, 慶應義塾大学
- ② 佐野英雄, 矢野 博明, 岩田 洋夫,  
歩行中の腰部揺動に関する研究,  
第16回日本バーチャルリアリティ学会  
大会, 2011年9月20日, 公立はこだて未来  
大学
- ③ 高橋広之, 矢野 博明, 岩田 洋夫  
円環型位置センサを用いた歩行移動イン  
タフェースの制御,  
第15回日本バーチャルリアリティ学会  
大会, 2010年9月15日, 金沢工業大学
- ④ Hiroo Iwata,  
Device Art: Why Dr. of Engineering La  
unched the Movement in Art?  
device\_art 3.009, 2009.10.27, Zagreb,  
Croatia

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

<http://intron.kz.tsukuba.ac.jp>

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

岩田 洋夫 (IWATA HIROO)  
筑波大学・システム情報系・教授  
研究者番号: 60184884

(2) 研究分担者

矢野 博明 (YANO HIROAKI)  
筑波大学・システム情報系・准教授  
研究者番号: 80312825