

基礎論文

モジュラー構造を有するトーラストレッドミル

岩田 洋夫*¹、矢野 博明*¹、圓崎 祐貴*¹、鈴木 一弘*¹

Torus Treadmill with Modular Structure

Hiroo IWATA*¹, Hiroaki YANO*¹, Yuki ENZAKI*¹ and Kazuhiro SUZUKI*¹

Abstract: This paper presents a locomotion interface using torus-shaped treadmill. 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

Key Words: locomotion interface, omni-directional walking, treadmill, modular structure

1. はじめに

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、自身の歩行運動に伴って視野全体の見えが変化する。この現象は人間の生活シーンでは当たり前が発生するが、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。

ロコモーションインタフェースとは物理的には存在しない空間を歩行する際に、脚の運動感覚を与える装置のことを意味する。そのような装置を実現するためには、実空間における歩行者の位置を固定したままで歩行感覚が得られる機能を備えなければならない。このような機能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、ロコモーションインタフェースのもう一つの機能として、方向の変換がある。好きな

方向に行けるのでなければインタフェースとしての意味はない。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がこの研究の主要な課題である。

このような機能の実現には、大規模な機械装置が不可欠であり、それゆえ実装上の困難が伴う。しかし、それに成功すれば、装置の挙動自体が人々に感銘を与え、キネティックアートとしての意味付が生まれて来る。後述するロボットタイルはその典型例であり、技術実証プロトタイプの実験において、批評家によって芸術性が見出された。

本論文では、ロコモーションインタフェースの基盤的な技術としてモジュラー構造を有するトーラストレッドミルを提案し、展示を通じてモジュラー構造の評価を行った結果を報告する。

2. トーラストレッドミルにおけるモジュラー構造の必要性

著者は、このロコモーション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[1]。

[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[2]。

*1 筑波大学

*1 University of Tsukuba

[タイプ3] 歩行者の両足の下に、それに追従する可動床（フットパッド）を提供するもの[3]。

[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[4]。

これらの成果を国際会議で発表してきた結果、ロコモーションインタフェースに関する研究は徐々に広がり、トレッドミルに小さな転動体を埋め込んで、全方向化した装置などが試作された[5][6]。フットパッドを用いる方式は、リハビリテーションへの応用が進んでいる[7][8]。

さらに、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”というロコモーションインタフェースに特化した国際ワークショップが開催された。

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、論文誌“Presence”において、過去2回の特集が組まれている[9]。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。著者が20年間ロコモーション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、前記のような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。バーチャル空間における歩行移動に関する研究が拡大するためには、当該テーマの研究が共通に使えるような技術基盤が必要である。

本研究では、出発点として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検討した。前述のように4つに分類したもので、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。

著者は1997年に、トーラストレッドミルの概念を発表し[10]、試作一号機となる、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(図1)。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った。前述のマックスプランク研究所では、EUから大型予算を獲得し、上記のトーラストレッドミルと同じ原理によるCyberWalk Platformを開発しているが[11]、この

装置は10m四方という大型のもので、専用の建屋に施工されている。

このような背景を踏まえ、本研究では、トーラストレッドミルの設置性を改善し、汎用的に使えるものにするを旨とし、モジュラー構造を実現することを目的とする。



図1 トーラストレッドミル初号機概観
Figure 1. Overall view of the first Torus Treadmill

3. トーラストレッドミルのモジュラー構造の設計

トレッドミルは歩行による前進移動を打ち消す方式としては、最もよく知られており、アスレチックジム等でランニングマシンとして使われている。しかし、通常のトレッドミルは歩く方向を変えると、ベルトから落ちてしまう。これはトレッドミルが1次元の運動しかできないからである。したがって、歩行移動インタフェースとして用いるためには、2次元平面における任意の方向に動く床を作らなければならない。このような動く床を作る最も簡単な方法は大きな玉の中に人が入って歩くというもので、VirtuSphereという製品も登場している。しかし、この方式は床が平面でなく、さらに、球体が回り始

めるとその慣性によって、歩行者が止まりたくても止まれないという問題が発生する。

トーラストレッドミルは、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レッドミルである。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。その原理は図2、3に示すように、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、初号機は溶接構造のフレームを用いており、これを一旦組むと分解するのがほぼ不可能であった。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。

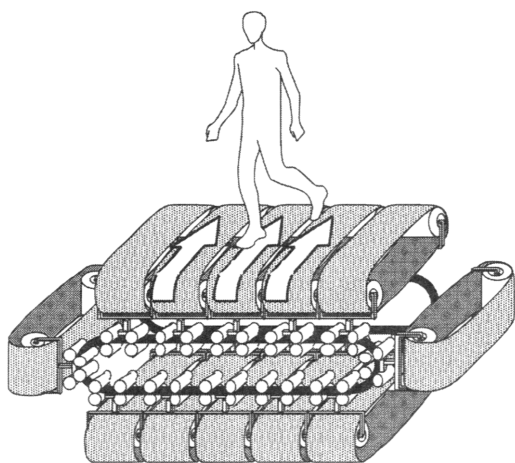


図2 トーラストレッドミル (X方向の動き)
Figure 2. Torus Treadmill (X motion)

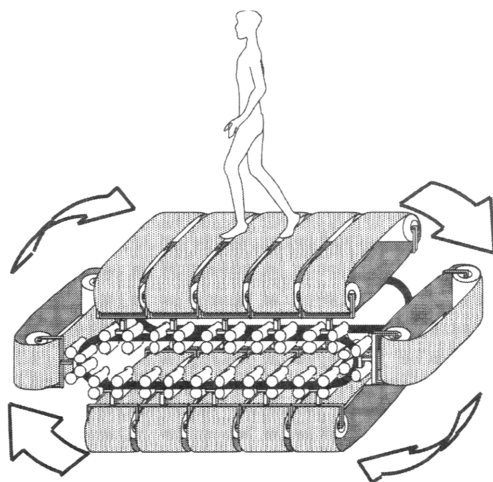


図3 トーラストレッドミル (Y方向の動き)
Figure 3. Torus Treadmill (Y motion)

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う。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、図1の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。図4は、この自転ユニット単体を裏側から見たところである。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

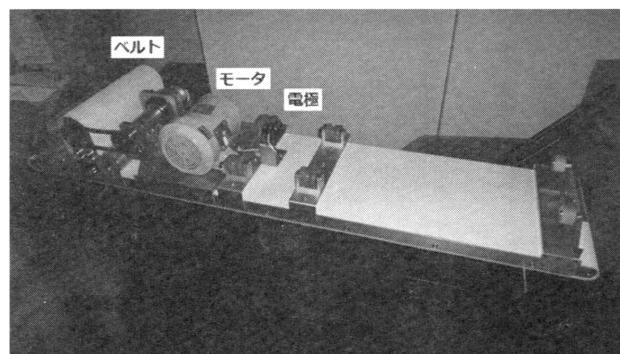


図4 自転ユニット
Figure 4. Rotational unit

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交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、体重 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、6 cm 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。この大きさを決めた根拠は、次章で述べる。

(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 5 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交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

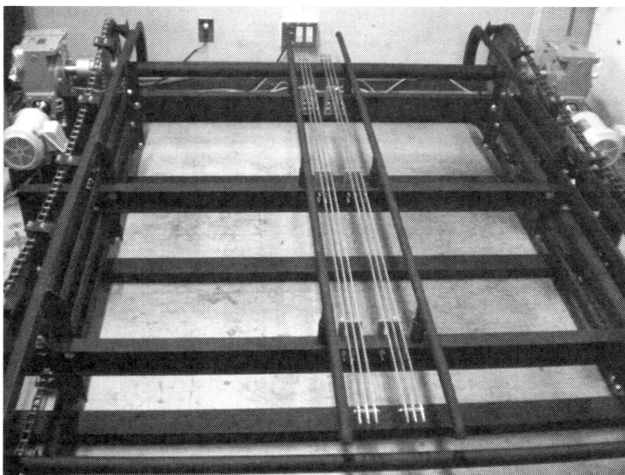


図 5 公転ユニット
Figure 5. Revolving unit

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 6 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。

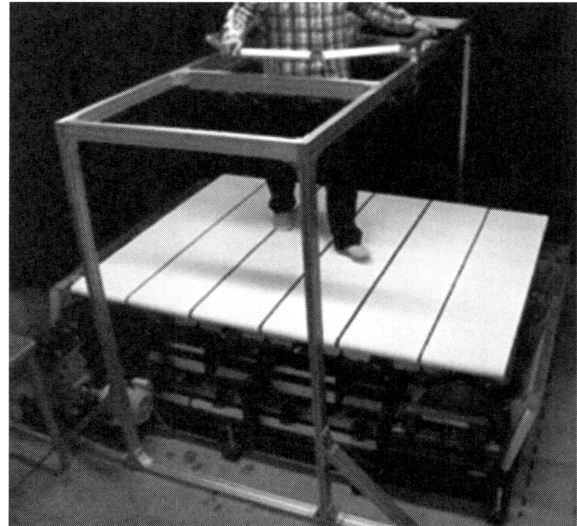


図 6 トーラストレッドミル全景
Figure 6. Overall view of Torus Treadmill

4. 歩行者の支持と歩行運動のセンシング

4.1 円環型手すり

ロコモーション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。このような歩行者の支持機構を、トーラストレッドミルのモジュラー構造に組み入れることは不可欠である。

前述の CyberWalk Platform や、ユタ大学の Hollerbach らが開発している TreadPort と呼ばれる大型レッドミルでは、パラシュート状のハーネスで、歩行者の体を上から吊るしている[12]。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。

著者は[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、円環状の手すりを腰の周りに配置することが有効であることを発見した[10]。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、手すりから手を離して、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手すりを、トーラストレッドミルにも適用した。図 6 の歩行者の周囲にあるのが、円環型手すりである。

歩行者の移動を打ち消すためには、歩行方向と逆に床を動かさなければならない。その方法としては、歩行者が円環の中央にいるときは、床は動かさず、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。床のチャタリングを排除するために、中央に不感領域を設け、その中にある場合は床が動かないようにしている（図7）。この方式の有効性は、著者がこれまでに開発してきた、タイプ2～4のロコモーションインタフェースにおいて確認してきた。

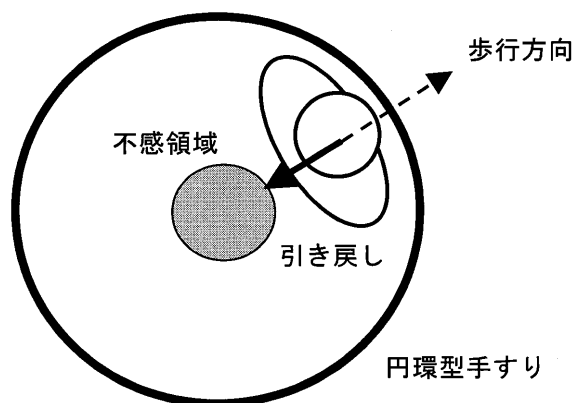


図7 不感領域
Figure 7. Insensitive area

ただし、床を動かす場合、静止状態から動き出す遷移状態において、歩行者が不安定になる傾向がある。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、円環型手すりを導入し、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する方針をとっている。

この円環型手すりの直径を決定するにあたり、次のことを要件とした。

- (1) 歩行面中央から任意の方向に1歩分(60cm程度)踏み出すことを可能にする。
- (2) 円環内のどの位置にいて、どの方向を向いていても、容易に手すりにつかまることができることとする。

平均的な成人が上記のことができるように、円環の直径は900mmとした。また、上記(1)の要件から、可動床の大きさは直径1500mmの円が入る広さとし

た。この検討結果に基づいて、自転ユニットと公転ユニットの寸法を決定している。

4.2 歩行者の位置検出

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センサー(SHARP製GP2Y0A21YK0F)を採用した。これを23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。図8が計測例である。

平均16mmという誤差は、歩行者が直径900mmの円環の内部で自由に歩き回る状況においては十分な精度とみなすことができる。

この円環型手すりとPSDセンサーを一体化したものを、「歩行者支持・センシングユニット」として、モジュラー構造に組み入れている。

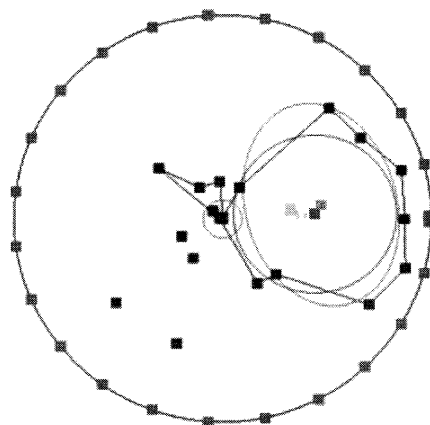


図8 PSDセンサーによる歩行者の位置検出
Figure 8. Position detection of walker by using PSD sensors

5. モジュラー構造の評価

5.1 分解・組立の容易性

モジュラー構造を実現する最大のメリットは、トーラストレッドミルを実験室から移動して、外部で展示を行うことが可能になることである。それを実証するために、本装置を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、出入り口を通過させるためにトーラストレッドミルを一旦分解して搬出し、現地の会場に搬入後組み立て直さなければならない。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。

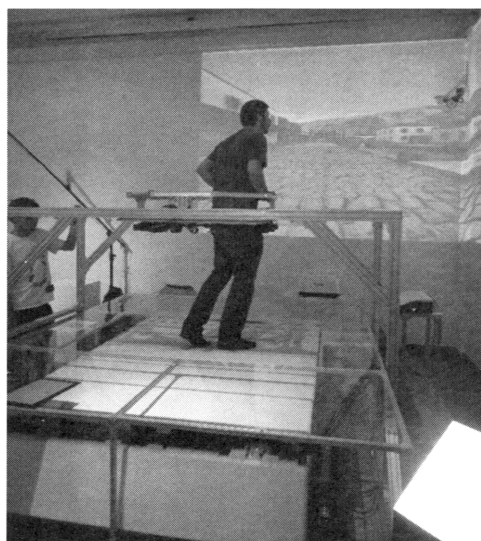


図9 Ars Electronica 2011 での展示状態
Figure 9. Exhibition in Ars Electronica 2011

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、円環型位置センサーの組立に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。図9は、展示状態の全景である。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ー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。

この展覧会は設営時間と撤収時間が限られていたが、その範囲内で余裕を持って作業を完了することができ、モジュラー構造の効果を実証した結果となった。

モジュラー構造を採用したことに伴う、ネガティブな効果としては、分解・組立を可能にしたことによる、公転ユニットの剛性低下が想定される。初号機では公転ユニットの強度部材は鉄骨を溶接した構造であったが、本装置はボルト締めである。しかし、最高速度における試運転時にも、強度部材の剛性不足は認められなかった。さらに、次項で述べる被験者実験において、本装置の剛性不足による不安感は報告されず、実質的に十分な剛性が確保されていたことが確認された。

5.2 歩行者支持・センシングユニットの性能評価

本装置が、1997年に試作した初号機と機能面で最も異なる点は、円環型の歩行者支持・センシングユニットを、システムに統合したことである。展示を行うことによって、多数の初心ユーザを被験者として、当該ユニットの性能評価を行うことが可能になる。

a) アンケートによる評価

まず体験者に対してアンケート調査を行った。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10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10)。

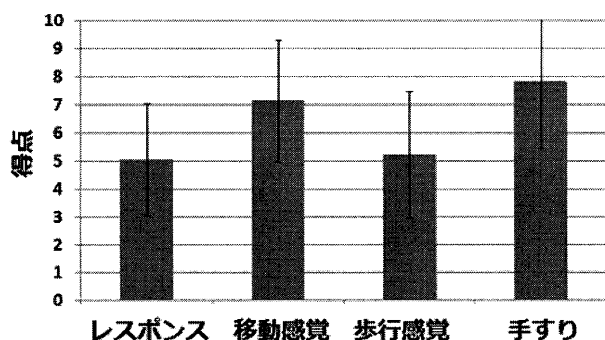


図10 アンケート結果
Figure 10. Result of questionnaire

各質問項目の結果に対する考察は以下のとおりである。

1. レスポンス

この質問は、静止状態から歩き立つ過渡応答の性能を確認するものであるが、ベルトの引き戻し動作が、必ずしも十分でなかった事例が多く観察された。その理由として、円環型の位置検出センサーの精度が必ずしも十分ではなく、さらに公転時の振動のために、引き戻し速度の上限を500[mm/s]におさえていたことも、応答性を低下させたと考えられる。

2. 移動感覚

この質問は、本装置の本来の目的である、バーチャル世界を歩いている感覚が発生できているかを確認するものであるが、直交する壁2面に投影した映像を、歩行動作に合わせて視点変換することによって、十分な移動感覚がえられていることが確認できた。一方で、「後ろ側の映像も欲しい」という意見も聞かれ、全方向の歩行には全周囲の映像が必要であることが確認された。

3. 歩行感覚

この質問は、歩行運動の動作に不自然な点があったかを確認するものであるが、引き戻し速度の上限を500[mm/s]におさえていたことにより、有効歩行面の限界に来てしまうことが多く、ベルトの引き戻しが完了するのを意図的に待つ、という現象が見られた。自然な歩行には、より速い引き戻しが必要であることが認められた。

4. 手すり

この質問は、本装置の安全性を確認するものであるが、平均で7.8点と最も高得点であり、初めて本装置を体験する人にとっても、円環型手すりがねらいどおりの効果を発揮できることが確認できた。

b) 体験者のビデオ分析による評価

展示における体験者の様子を撮影したビデオ映像を解析し、体験者の挙動の評価を行った。映像は全体験者214人中185人分撮影ができた。

体験者が理想的な歩行ができたかを、以下の3つの観点から分析した。

- ・客観的に見て自然な歩行だった。
- ・装置の動作原理について正しく理解できていた。
- ・円環型位置センサーが正しく歩行者を認識していた。

このビデオ分析の結果、上記の3条件をすべて満たしていた体験者は78名(42%)であった。条件を満たしているものの、若干のぎこちなさが認められる体験者は37名(20%)であった。一方、これらの条件が満たせなかった体験者は70名(38%)であった。

理想的な歩行ができなかったケースを精査すると、以下のことが分かった(表1)。

不感領域の境界付近で歩行しようとしたため引き戻しが安定しなかった	29名
黒い衣服が赤外線を吸収しセンシングの精度が落ちた	20名
装置の挙動がおかしかった	7名
引き戻しが始まってから歩行開始までが遅くすぐ不感領域に入ってしまう	5名
円環型位置センサーが腰より低い位置にあったためセンシングの精度が落ちた	3名
体験者が装置について理解できなかった	1名

表1 ビデオ分析の結果
Table 1. Result of video analysis

この展示では、歩行面中央に直径240mmの不感領域を設けているが、その境界付近では、十分な引き戻しができない事例が観察された。不感領域に関連する理由が観察された例はのべ41件になった。その主たる理由は、PSDセンサーのノイズによって歩行者位置の検出が安定しないことが、不感領域の境界付近では顕著に影響することが考えられる。実験室内で行った誤差測定の結果よりも、展示会場では大きな誤差が出ていたと考えられる。

来場者には黒い服を着ていた人が多く、黒はPSDセンサーの赤外線を吸収するために、検出精度がさらに低下する結果となった。本装置の駆動アルゴリズムは、PSDセンサーのデータに基づき歩行者の体幹を円で近似する段階で、位置を正常に検出できなかったと判定すると、安全措置としてベルトの駆動を止めるようになっている。黒い服を着ている人は、この安全措置の対象になって、前進してもベルトが動かないという結果になったと考えられる。

5.3 自転ユニットの支持方式の改良を事例とするスケラビリティ

モジュラー構造のメリットは、分解・組立が容易になるだけでなく、一旦製作した後で、性能向上のための改良が容易になるというスケラビリティが生まれることである。その事例を以下に紹介する。

前述の展示を行った試作機には、公転時に振動が発生する問題があった。それは、公転用の駆動チェーンに自転ユニットを固定する方法に原因があった。公転用のチェーンには、自転ユニットを隙間なく取り付けられ、速度変動がないことが要求される。そのため、各自転ユニットは、公転用チェーンのチェーンブロック 1 個に取り付ける構造をとっていた (図 11)。



図 11 自転ユニットの 1 点支持

Figure 11. Single connection point of the rotational unit

一方、歩行面では水平姿勢を維持するために、進行方向に 2 つの車輪を付ける必要がある。その結果、公転用チェーンの sprocket を回す時に、チェーンと車輪が異なる軌跡を通ることになり、sprocket を回り終わる時に、車輪がレールに上から落下して衝突することになった。そのため、レール上で衝突が起こる場所に緩衝材を付けて対処していたが、公転速度が上がると衝撃を吸収するのは困難であった。また、一点支持では sprocket を回す時の姿勢が安定せず、公転速度が上がると、自転ユニットの角が床に接触するという問題も発生した。これらの問題によって、実質的な公転速度の限界は 600 [mm/s] 程度であった。

この問題を解決するために、車輪と同じ位置でチェーンブロックに固定する改良を加えた。2 つの車輪と同軸でチェーンブロックに固定すれば、車輪が公転用チェーンと同じ軌跡を動き、sprocket を離れて直線部のレールに乗る時に、衝突が発生しな

い。そして、自転ユニットを 2 点で支えることになるので、sprocket 回転中の姿勢も安定する。

ただし、車輪とチェーンの取り付け位置を同じにすると、2 つの車輪の間隔が、直線部分と sprocket を回る時とで異なるという問題が起こる。sprocket を回る時は、チェーンが円弧になるので、2 つの車輪の直線距離は、その弦となり、円弧の長さよりも短くなる。一般的に用いられるコンベアチェーンのように車輪の間隔が固定のものは、チェーンの移動速度に変動が生じる。この現象は、多角形速度変動と呼ばれてよく知られている。この速度変動を抑えるために、車輪の軸間距離に対して、sprocket の外周を大きくしなければならず、2.5 倍以上が望ましいとされるので、装置の小型化にとって大きな障害になる。

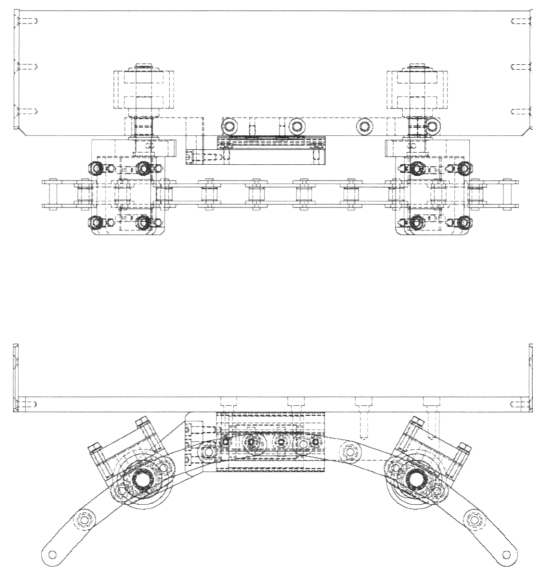


図 12 可変軸間距離機構

Figure 12. Mechanism for variable wheelbase



図 13 改良後のトーラストレッドミル

Figure 13. Improved Torus Treadmill

このような問題を解決するために、2つの車輪の軸間距離を可変にする直動機構を加えた。図12が可変軸間距離を実現する機構で、図13がこの改良を加えたトーラストレッドミルの外観である。この改良を加えた結果、公転時の振動が飛躍的に小さくなり、公転用モーターの設計上の性能限界を超えた1400[mm/s]まで公転速度を上げることができた。発生する振動を、公転ユニットの鉄骨に取り付けた加速度センサーで測定したところ、改良前に600[mm/s]で公転した時の振動に比べて、改良後に1400[mm/s]で公転した時の振動は1/3であった。

この改良には、自転ユニットの車輪部分の交換と、公転ユニットのレール位置の変更が必要であったが、その工事を容易に行うことができた。これは本装置のモジュラー構造の効果といえる。

6. まとめ

本論文では、モジュラー構造を有するトーラストレッドミルを設計し実装した。モジュラー構造の効果を以下の3つの観点で評価した。

- 1) 分解・組立の容易性
- 2) 歩行者支持・センシングユニットの性能評価
- 3) 自転ユニットの支持方式の改良を事例とするスケラビリティ

本研究で設計・製作したモジュラー構造により、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。展示を行うことによって、歩行者支持・センシングユニットが安全性に有効であることが確認できた。また、試作機完成後に発見された機構上の問題点を改良することが容易に実現できたことも、モジュラー構造が成功した証である。

全方向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。この点だけでもモジュラー化の意義は大きいと思われる。

一方で、本装置は機構が複雑で、それゆえ高コストであることは否定できない。汎用的に使えるロコモーションインタフェースを実現するためには、コストの面も考慮する必要がある。本装置においては、各自転ユニットが、それぞれにモーターを搭載していることが、高コストの大きな要因である。今後は、より簡便な自転駆動の方法を開発する必要があるだろう。

また、今回試作した円環型位置センサーの検出精度に若干不足があったために、自然な歩行の妨げになっていた。このセンサーを改良し、足の位置を高速で精度良く測定することができれば、高速の歩行が可能になるはずである。それが実現すれば、バー

チャル空間の歩行に関する基礎研究とアプリケーションに大きな可能性が広がるであろう。

参考文献

- [1] Iwata,H. and Fujii,T., Virtual Perambulator: A Novel Interface Device for Locomotion in Virtual Environment, Proc. of IEEE 1996 Virtual Reality Annual International Symposium , pp.60-65, (1996)
- [2] Iwata,H. and Yoshida,Y., Path Reproduction Tests Using a Torus Treadmill, PRESENCE Vol.8, No.6 pp.587-597, (1999)
- [3] Iwata,H., Yano,H. and Nakaizumi,F., Gait Master: A Versatile Locomotion Interface for Uneven Virtual Terrain, Proceedings of IEEE Virtual Reality 2001 Conference , pp.131-137, (2001)
- [4]Iwata,H., Yano,H., Fukushima,H., and Noma,H. :” CirculaFloor: A Locomotion Interface Using Circulation of Movable Tiles”, Proceedings of VR2005, pp.223-230 , (2005)
- [5]Darken, R.,Cockayne, W.,Carmein,D., The Omni-directional Treadmill:A Locomotion Device for Virtual Worlds, Proceedings of UIST’97 (1997)
- [6]Nagamori, A., Wakabayashi, K. and Ito, M., The ball array treadmill: A locomotion interface for virtual world, Proc. IEEE VR2005, (2005)
- [7]Yano,H., Tamefusa,S., Tanaka,N., Saitou,H., and Iwata,H., "Gait Rehabilitation System for Stair Climbing and Descending", Proceedings of Haptics 2010,pp. 393-400, (2010)
- [8]Schmidt, H. et al., HapticWalker---a novel haptic foot device, ACM Transactions on Applied Perception, Volume 2 Issue 2, pp. 166 – 180 (2005)
- [9] Darken,R., Allard,T., and Achille,L. Spatial Orientation and Wayfinding in Large-Scale Virtual Space:An Introduction. PRESENCE , 7 (2) pp.101-107, (1998).
- [10]岩田洋夫、全方向無限平面を用いたロコモーションインタフェース、日本バーチャルリアリティ学会論文誌、Vol.5, No.2, pp.853-862, (2000)
- [11] T, Ulbrich H , De Luca A , Bühlhoff HH and Ernst M, CyberWalk: Enabling unconstrained omnidirectional walking through virtual environments, Transactions on Applied Perception, Volume 8 Issue 4, Article No. 25, pp.1-22, (2011).
- [12] 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 pp.119-126, (1998)

(2013年3月19日受付)

[著者紹介]

岩田 洋夫 (正会員)



1986年 東京大学大学院工学系研究科修了。現在筑波大学システム情報系教授。バーチャルリアリティ、特に力覚提示、歩行感覚提示、没入ディスプレイの研究に従事。本学会副会長。工学博士。

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年筑波大学講師。現在、同大システム情報系准教授。力覚提示、移動感覚提示に関する研究に従事。博士(工学)。

圓崎 祐貴 (学生会員)



2010年同大学院システム情報工学研究科博士前期課程修了。2013年,同大学院システム情報工学研究科博士後期課程修了。現在、同大システム情報系研究員。力覚提示に関する研究に従事。博士(工学)。

鈴木 一弘 (学生会員)



2013年筑波大学第三学群工学システム学類卒業。現在同大学院システム情報工学研究科博士前期課程在学中。歩行感覚提示に関する研究に従事。