



二輪駆動型ロボットタイルを用いた 循環型歩行感覚提示装置

野本祥平 1), 圓崎祐貴 2), 矢野博明 2), 岩田洋夫 2)

- 1) 筑波大学 システム情報工学研究科 (〒305-8577 茨城県つくば市天王台 1-1-1, s_nomoto@vrlab.esys.tsukuba.ac.jp)
2) 筑波大学 システム情報系 知能機能工学域 (〒305-8577 茨城県つくば市天王台 1-1-1)

概要: 本研究では, 循環型歩行感覚提示装置として二輪駆動型ロボットタイルを提案する. 二輪駆動型ロボットタイルは駆動方式に対抗二輪駆動を用いた移動ロボットを使用する. 本システムはロボットの動作精度の向上による歩行速度, 歩行安定性の向上を目的とする. 二輪駆動型ロボットタイルにより目的が達成可能か検討するため対向二輪駆動を用いた移動ロボットの性能評価を行った. また, 本システムに用いる循環方式としてゾルゲル変換を用いた循環を提案しシミュレーターを用いて有効性の検討を行った.

キーワード: ロコモーションインタフェース, ロボット, メディアアート

1. はじめに

近年 VR の研究や商品化が盛んに行われ VR 空間の体験が身近なものになりつつある. 例えば, モーションキャプチャと HMD を用いて VR 空間に存在しているかのような体験ができるようになったが, 現実の空間的制約により自由な歩行移動は難しい. そのため VR 空間内を自由に歩行する手法への要求が高まりつつある.

現実の限られた空間内で無限に広がる VR 空間を歩行するには, 歩行によって生じる移動量を打ち消し歩行者の位置を一定範囲内に保つ必要がある. 実空間上で歩行者の位置を一定に保つには, 歩行者の進行方向を視覚的に誘導し一定範囲内を歩かせるリダイレクトウォーキングと呼ばれる方法[2]と, 歩行者の歩く床面を進行方向と逆向きに動かし歩行者の位置を引き戻す歩行感覚提示装置またはロコモーションインタフェースと呼ばれる方法[1]がある.

本研究室では, 可搬性と拡張性の獲得を目指し, 全方位移動ロボットを用いた循環型歩行感覚提示装置ロボットタイルを開発してきた. ロボットタイルは, 平面を任意方向に移動ができるタイル型のロボットを複数台使用し, ロボット群を密着して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逆方向に移動し, 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移動し歩行面を形成することで, 進行方向に新たな道を形成し全方位移動を実現するものである. これまで開発してきたロボットタイル[4]では駆動

にオムニディスクを使用してきたが, 移動時に車輪が滑り精度の高い制御が困難という問題や加減速, 最高速度に制約があった.

本研究では, 動作精度向上による提示可能な歩行速度, 歩行時の安定性の向上を目的として二輪駆動型のロボットタイルを用いた循環型歩行感覚提示装置を提案する. また, 二輪駆動型ロボットタイルの性能評価を行い, 計測した性能よりシミュレーターを用いて本手法による歩行速度を算出し, 有効性を検証した.

2. 歩行感覚提示の原理

2.1 基本原理

歩行感覚提示装置は, VR 空間内を歩いて移動する感覚を提示する. 自然な歩行感覚を得るには 2 つの機能を実現する必要がある. まず, 歩行を行わせつつ, 体の位置を一定に保つ移動の打消しが必要である. 移動の打消しを行う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. 次に, 歩行には方向の変換が不可分である. 方向の変換に対応するには歩行者の向きを検出し, 次に歩く方向に床面を形成しなければならない.

この 2 つの機能を可動床の循環により実現することで本システムでは歩行感覚の提示を実現する.

2.2 ゾルゲル変換による可変形状床

全方向に移動できる循環型歩行感覚提示装置では, 歩行時の床を蹴る動作による横揺れなどの不安定動作を起こす事や歩行速度に問題があり自然な歩行ができないなどの問題がある. 本研究では, 台数によらないスケラブルな循環アルゴリズムと歩行速度の向上, 歩行時の安定性の向上を目的として, 多数の可動床がゾルゲル変換を行う

Shohei NOMOTO, Yuki ENZAKI, Hiroaki YANO,
and Hiroo IWATA

「可変形状床」という概念による歩行インタフェース実現を目指し循環方法を提案する。

本提案手法では、可動床の数をスケーラブルにできることにより、可動床の台数を増やすことで提示可能な歩行速度を簡単にあげられる。また、歩行面を複数の可動床で構成することで歩行面の見かけ上の質量を大きくし安定性が向上することや歩行者は足を踏み外してしまうことを考えずに歩くことが期待できる。

本循環方法では、歩行面を多数の可動モジュールの集合体で構成し、歩行者が立つ部分はそれらが密に結合し、流動性のないゲル状になる。その歩行面の周辺には、可動モジュールが互いに結合せず、流動性のあるゾル状になっている。歩行者が移動してゲル領域の端に近づくと、ゾル状の可動モジュールがそこに寄り集まってきて新たなゲル状の歩行面を生成する。歩き去った後のゲル状可動モジュールは結合を解き、周囲のゾル状可動モジュール群に溶け込む。歩行者が移動すると、ゲル領域が反対方向に移動し、元の位置に戻る。この機能により任意方向の移動を打ち消すことが可能になる（図1）。

本循環方法には多数の可動床が必要なため、可動床1台当たりのコストを下げなければならない。従来のオムニディスクを使用したロボットタイルでは、機構が複雑なため1台当たりのコストが高く複数台の用意が難しい。そのため使用する可動床は小型化し二輪駆動とすることでコストダウンを行う。また、二輪駆動とすることで進行方向と垂直な方向に動きにくいいため横揺れが減り歩行時の安定性が向上する。

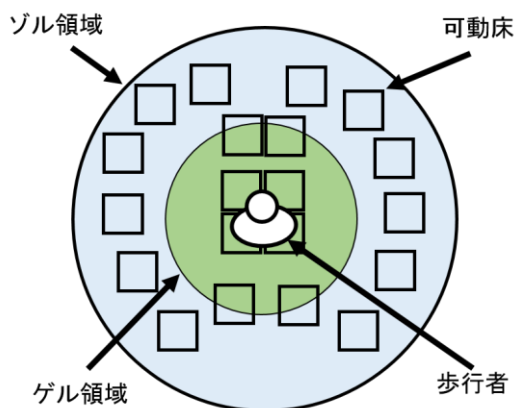


図1 可変形状床の原理

2.3 循環アルゴリズム

ゾルゲル変換による循環の実装には様々な方式が考えられるが、循環に必要な可動床の総数と簡単のため、本章ではゲル領域を可動床が2×2の正方形で構成した循環アルゴリズムを例に循環方法を検討する。また、前後左右斜めの8方向の移動に対応とした。図2にゾルゲル変換と歩行者の引き戻しの原理を示す。

全方位移動を可動床の辺の方向にする移動、方向の変換、可動床の頂点方向にする移動、引き戻し動作、ゾル領域の

振る舞いの5つに分けて説明する。

歩行者が可動床の辺方向に歩く時は、可動床は図3のように1行ごとにゲル領域から解放し、同数の可動床が歩行者前方のゲル領域に合流する。1行分の可動床がそろってゲル領域に合流するのは制御を簡単にするためである。

歩行者が斜め方向に歩くとき、可動床の頂点方向に向かうことになる。図4のように斜め方向に移動するときは歩行者を中心としたゲル領域の一番外側にある可動床がゾル領域に合流し、離れた可動床と同数ゲル領域に合流する。

全方位移動を行うには歩行者の歩行方向に合わせて引き戻しの方向を調整する必要がある。しかし、ゲル領域を複数の可動床で構成する時、可動床が引き戻しながら方向変換を行うと十分に精密な制御をしなければ隣接する可動床と衝突し危険な場合がある。そのため、歩行者は方向変換の際にその場で立ち止まって方向転換するとした。

常に可動床は、歩行者の歩行と反対方向に移動し一定の位置を保ち続ける引き戻し動作を行う。歩行者が歩く方向を変えた場合、ゲルを構成するタイルは天板の方向を変えずに車体の方向を歩行方向に向け引き戻しの動作を行う。このように常に歩行者に合わせて引き戻すことで一定の範囲内での歩行感覚提示を行う。

ゾル領域は、ゲル領域の外縁に円形の経路を設定しその上を可動床は走行する。ゾルを構成する可動床は歩行者の歩行方向に向かいゲル領域に合流しやすい位置に移動する。また、ゲル領域から合流してくる可動床が合流しやすいように歩行方向と逆側のゾル領域は空間をあけるようにする。

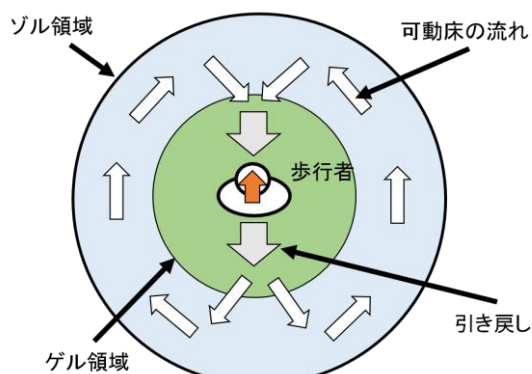


図2 循環と歩行者の引き戻し

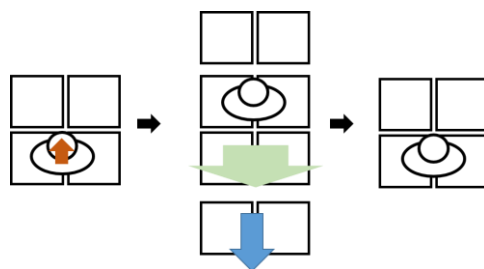


図3 可動床の辺方向への歩行

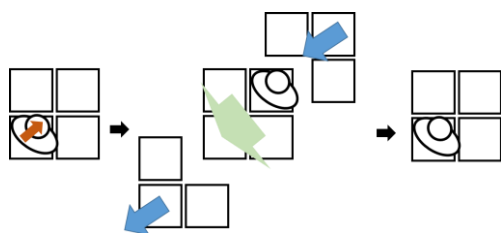


図4 可動床の頂点方向への歩行

3. システム構成

3.1 ロボットタイルシステム

本システムは、可動床として二輪駆動型ロボットタイルを複数台、ロボットと歩行者の位置を計測する外界センサ、これらの統括を行う PC で構成される。

位置測定に用いる外界センサについては、歩行者・ロボットの移動の妨げにならないように、またスムーズな歩行のため無線・高精度なものが良い。そこで本システムでは、歩行者とロボットの位置計測に NaturalPoint 社製光学式モーションキャプチャシステム OptiTrack を使用する。統括 PC では位置データの送受信とロボットタイルに生成した命令を送信する。ロボットタイルのシステムの全体像を図 5 に示す。

3.2 二輪駆動型ロボットタイル

可動床ロボットである二輪駆動型ロボットタイルは二つのモジュールから構成される。全方位移動用車輪を搭載した床面モジュールと対向二輪駆動の駆動モジュールである。図 6 に二輪駆動型ロボットタイルを示す。

床面モジュールを図 7 左側に示す。床面モジュールは 350[mm]四辺、高さ 150[mm]であり、オムニホイールを四隅に搭載し全方位移動を可能とする。また、位置計測用に OptiTrack の ActiveTag と駆動用のモバイルバッテリーを床面モジュールの天板下部に搭載した (図 8)。外界センサを用いて位置を取得するには ActiveTag の赤外線 LED が外部から見える必要があるため天板下部の外縁部に LED を配置した。また位置取得の安定性を上げるため天板に穴をあけて LED を出すことを検討している。

駆動モジュールを図 7 右側に示す。駆動モジュールは、水平移動用に DC モータを 2 つ、床面モジュール回転用に DC モータを 1 つ搭載している。独立稼働用の電源供給にはバッテリーを使用した。ロボットタイルにはマイコンボードとして Device Art Tool Kit[3]の SC02 が 1 つと MCD05 が各モータ用に 3 つ搭載されている。ロボットタイルの制御には raspberryPi3B を用いる。また、raspberryPi に搭載された Wifi を用いて統括 PC と通信する。床面モジュールと駆動モジュールの相対角度を検出し初期角度のキャリブレーション用にフォトインタラプタを使用する。

二輪駆動型ロボットタイルは 350[mm]四辺、高さ 150[mm]でバッテリーを含めた重量は約 14[kg]である。バッテリーによって駆動し、通信回線には Wifi 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。ロボットタイル上に搭載した raspberryPi3B でオ

ドメトリによる自己位置推定、目標地点の計算、軌跡追従を行う。UDP 実装の一つである通信プロトコル OpenSoundControl によって命令と外部センサで取得した位置情報の通信を行う。Device Art Tool Kit により各 3 つのモータの回転速度を制御する。二輪駆動型ロボットタイルは床面モジュールと駆動モジュールを組み合わせることで全方位移動を実現する。駆動モジュールが旋回を行う際に、床面モジュールの回転を天板回転用のモータで打ち消すことで歩行者から見たときの天板モジュールの向きが変わらず全方位移動を実現することができる。また、この機構によりロボットタイルの起動時に駆動部がどの方向を向いているかわからないため、初期位置のキャリブレーションを行う必要がある。OptiTrack で取得した絶対座標系での床面モジュールの角度とフォトインタラプタで検出した駆動モジュールの相対角度を使用してキャリブレーションを行う。

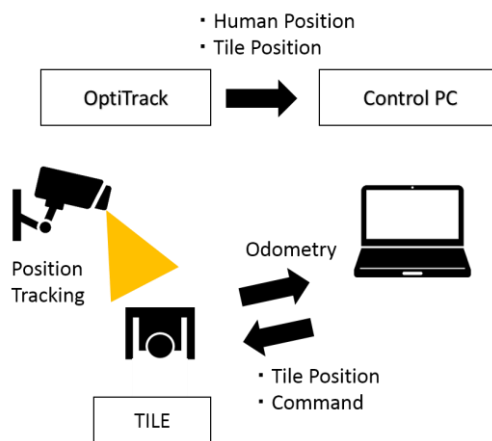


図5 ロボットタイルのシステム概要

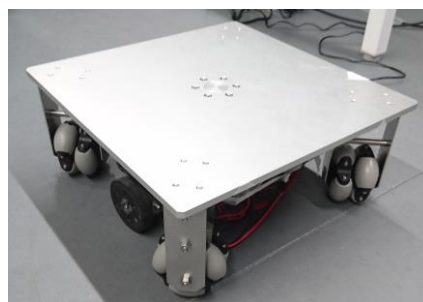


図6 二輪駆動型ロボットタイル外観

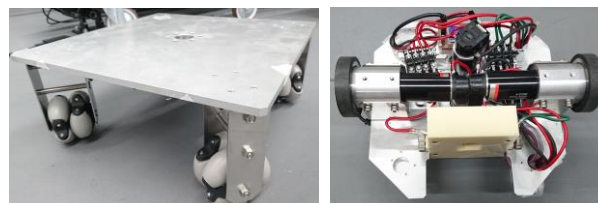
図7 床面モジュール (左側) と
下側から見た駆動モジュール (右側)



図8 ActiveTag とバッテリーの設置方法

3.3 外界センサ

ロボットタイルのオドメトリのみでは地面と車輪の間に発生する滑りにより自己位置推定にずれが生じるため、モーションキャプチャにより外界から位置補正を行う。ActiveTag を床面モジュールの天板下部に取り付けトラッキングを行うことで補正を行う。また、歩行者にもマーカーを装着し位置検出や進行方向の検出を行う。

4. 性能評価

4.1 性能計測

二輪駆動型ロボットタイルの性能を評価するため、速度と加速度の計測を行った。計測は筑波大学エンパワースタジオの LargeSpace 内で行った。測定には OptiTrack の Prime41 カメラ 20 台を使用した。ロボットタイルの天板に OptiTrack の再帰性反射素材性の球体マーカーを複数装着し座標の取得を行った。進行方向に対し真っ直ぐにロボットタイルを向け各動輪用モータに pwm 制御のモータドライバで 100% の出力指令を入力し直線を走行させ最高速と最大加速度を OptiTrack で計測した位置座標の変位より算出した。また、人をロボットタイル上に乗せて走行し、人を乗せた時の最高速度をエンコーダの値より測定した。次に、天板回転用のモータに pwm 制御のモータドライバで 100% の出力指令を与え回転速度の計測を行った。

計測結果は、最高速度 1.21[m/s]、最大加速度 1.7[m/s/s]、人 (60kg) を乗せたときの最高速度は 1.07[m/s]、天板の回転速度は 2 回転毎秒であった。

4.2 循環軌道の設計と歩行速度

歩行者が進行方向を変えずに歩行したときの提示可能歩行速度を算出する。循環経路を直線と円の組み合わせで設計する。シミュレーターを用いて可動床が衝突しない軌道の設計を行った。

提示可能歩行速度を向上するには循環する可動床の数を増やす必要がある。ゲル領域を大きくすると、本手法では行ごとに循環するため、可動床が歩行者の前に来る間隔が長くなる。可動床が迎えに来る間隔を短くするためゲル領域を 2×2 の 4 台で構成し歩行速度の向上と歩行安定性の両立を目的として軌道の設計を行った。

設計した軌道は可動床の中心が通る軌道であり、図 9 のようにゾル領域の円 (半径 1300[mm])、接続円 (半径 460[mm])、歩行直線 (長さ 1200[mm]) を組み合わせで構成した。図 9 の軌道の長さは 5186[mm]となる。

計測した性能をもとに本軌道で循環にかかる時間を計

算し、歩行速度の算出を行った。可動床の総数 16 台でゲル領域を 2×2 の可動床による歩行面で構成する時、提示可能歩行速度は 0.54[m/s]程度となった。従来手法では、歩行面を可動床 1 台で形成し人を載せ、歩行速度は歩行面が 4 つの時 0.23m/s であった[5]。本システムでは 1 つの歩行面を小型の可動床 4 台で形成し人を載せるため、歩行面が 4 つの時、可動床は 16 台となる。歩行面を分割すると構成する可動床が別々に循環でき、また組み合わせにより新しく歩行面を形成できるため歩行面の循環が速くなる。本手法では歩行面の数が同等の時、従来手法より早い歩行の実現が期待できる。本手法でゲル領域が 2×2 の時、歩行速度 1.0m/s にするには可動床が 30 台必要である。また、16 台で歩行速度 1.0m/s を実現するには車体中心速度が約 1.85m/s 必要である。

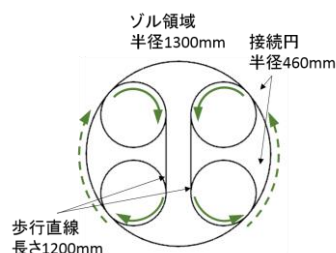


図9 ゲル 2×2 の時の軌道

5. まとめ

本研究では、二輪駆動型ロボットタイルを用いた循環型歩行感覚提示装置の提案を行った。また、提案手法で使用する二輪駆動型ロボットタイルの実装と性能計測を行った。次に可変形状床の循環軌道の設計を行い提示可能歩行速度を算出し、結果を従来の手法での歩行速度と比較することで提案手法の有効性が示唆された。

今後は、二輪駆動型ロボットタイルの増産や循環軌道の改善を行う。また、ゾルゲル変換を用いた循環を実際に複数のロボットタイルを用いて実験を行い歩行時の歩行速度および安定性の向上効果を検証する予定である。

参考文献

- [1] Souman JL, et al. "CyberWalk: Enabling unconstrained omnidirectional walking through virtual environments" TAP, Vol.8(4), 2011, pp.25-46
- [2] Steinicke F, et al. "Estimation of Detection Thresholds for Redirected Walking Techniques", IEEE Trans Vis Comput Graph, vol.16, No.1, pp.17-27, 2010
- [3] 圓崎祐貴, 佐藤亮太, 矢野博明, 岩田洋夫 "デバイスアート・ツールキットの開発", TVRSJ, vol.15, No.3, pp.417-426, 2010
- [4] 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提示装置 CirculaFloor", TVRSJ, vol.11, No.2, pp.237-244, 2006
- [5] 古谷典弘, 矢野博明, 岩田洋夫 "ロボットタイルの循環速度向上に関する研究", 第 22 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 2C2-04 (2017)