

歩行速度に合わせた速度を提示する アクティブトレッドミルの開発

久保村尚樹^{1,a)} Denielsen Paulus^{1,b)} 大井翔^{1,c)} 松村耕平^{1,d)} 野間春生^{1,e)}

概要: 数年間、健康寿命と平均寿命の差はあまり変化していない。本研究では、健康寿命の延伸を目的とした、歩行速度に合わせた速度を提示するアクティブトレッドミルの開発をする。また、歩行者の位置と歩容を計測することで位置のフィードバック制御と速度のフィードバックフォワードを実装し、歩行者の歩行速度が変化しても、歩行者を制御目標の位置から前後 10cm 以内の範囲に留めることができた。今後の展望として、VR 空間を利用したインターフェイスを開発することで、歩行者に対して歩行を促進させるシステムへ発展させる。

1. はじめに

近年、健康寿命の延伸を目的とした取り組みが多くある。健康寿命とは、自立して生活を送れる期間を指しており、平均寿命と健康寿命の差は数年間ほとんど変化していない。そのため、本研究は健康寿命の延伸を目的として、運動を支援する装置の開発を行う。

厚生労働省の「健康意識に関する調査」(2014 年) [1]より、生活習慣に関する病気に気を使っているが運動を行っていない人について調査した結果、「時間がない」、「何をどのようにやったらいいのかわからない」などの要因が挙げられた。これらの要素を解決する方法として、単純で日常的に行っている動作であり、1 日の活動量を歩数として計測できる、歩行による生活習慣の改善に着目した。また、1 日の歩数を計測した結果から、不足していた歩数を補うという方法で1日の目標の活動量を維持できると考える。

しかし、日常的に運動としての歩行習慣のない人にとっては、健康寿命の延伸を目的とした長時間の歩行は、継続できないばかりか逆にストレスをためてしまう原因になり、かえって不健康になってしまう可能性がある。そのため、健康寿命の延伸以外に歩行に対しての付加価値をつけることでの解決を考える。また、天候、気温などによる外出時間の低下を考慮した結果、室内で歩行ができるシステムが望ましいと考えた。さらに、付加価値として、VR 空間での歩行の実現をすることで、外出が困難である状況でも意欲的な歩行を促進できると考える。

このような背景のもと、本研究では歩行感覚提示装置であるアクティブトレッドミルを開発する。アクティブトレッドミルとは、歩行者の歩行速度が変化しても、歩行者の位置を制御目標に留める事ができるトレッドミルである。

通常のトレッドミルでは、歩行者は操作による速度の制御を行い、ベルトの速度を上げることによって、歩行速度を速くするため、受動的な歩行であると考えられる。一方でアクティブトレッドミルは歩行者がベルト上での歩行時に、歩容から速度を推定してベルト速度を自動制御するため、能動的な歩行が可能になる。そのため、外出時と同じように自然な歩行をトレッドミル上でも再現できる。さらに、VR 空間を利用し、歩行者に興味のある風景を見せることで、歩行することに付加価値をつけることができる。さらに、速度の制御のための操作が必要ないため、別途の要素として VR 空間でのインターフェイスを作成し、アクティブトレッドミルを使用することで、VR 空間内での歩行を提示できるなど、通常のトレッドミルにはできない付加価値をつけることができる。本稿では、歩行者の歩行速度が変化しても、歩行者を制御目標の位置から前後 10cm 以内の範囲に留めることができた事を確認した。

2. 関連研究

野間らは、トレッドミル上の歩行者の両足の先端に反射マーカーを取り付け、CCD カメラで位置を取得することで、歩行者の歩行速度に合わせた制御が可能な ATLAS を開発した[2]。制御方法として、重心位置による位置のフィードバック制御と両足の立脚時間による速度のフィードフォワード制御を採用することで、歩行者を制御目標の位置にとどめた状態での走行が実装できたと報告している。塩澤らは、歩行シミュレータを開発した[3]。足部、上半身、体重心の位置にマーカーを装着することで位置計測を行っており、制御方法としては、基本速度を入力し、制御量として PID 制御を行うことで、位置のフィードバック制御を行っていた。また、圧力センサによって両足の立脚か遊脚かの判定を行い、動作開始、停止の制御を行っていた。上田らは、2 次元歩行打消型ロコモーションインターフェイスであるボールアレイトレッドミルを開発した[4]。磁石を内蔵したスリッパを装着し、走行面のセンサアレイ版にホール

1 立命館大学

a) nkubomura@mxdlab.net

b) dpaulus@mxdlab.net

c) SHO.OOI@outlook.jp

d) matsumur@acm.org

e) hanoma@fc.ritsumeai.ac.jp

IC 素子を取り付けることで足の位置を計測している。また、制御方法としては、PID 制御による位置のフィードバック制御を採用している。

本研究では、歩行者の歩行を促進することを目的としており、歩行に対してストレスが発生することを防止したいと考える。そして、歩行者のストレスを軽減する方法として、自然な歩行を提示することでストレスが軽減されると考えた。具体的には、歩行者が歩行を開始するまでの工程である足部、身体へのマーカーの装着は日常的な歩行として考えた際に、自然な歩行ができなくなる可能性があり、歩行の促進に対して悪影響を与えると考える。そして、本研究ではマーカーを装着する必要のない計測方法での歩行感覚提示装置の開発を試みる。

3. 基本設計

3.1 制御方法

開発するアクティブトレッドミルの目標は、歩行者が歩行速度を変更したとしても、設定したトレッドミル上の制御目標の位置に歩行者を維持できる事として設定している。図 1 にアルゴリズム全体の構造を示す。本研究では、速度のフィードフォワード制御に加え、位置の PI フィードバック制御を行うことで実装を試みる。PI フィードバックはトレッドミル上の身体的位置を把握し、目標地点と身体的位置の差から制御量 \tilde{V}_A を計算し、PI フィードバック制御を行う。フィードフォワードは歩容から立脚時間を計測することで歩行速度 \tilde{V}_B を推定し、速度のフィードフォワード制御を行う。また、式(1)のように PI フィードバック制御で算出した制御量 \tilde{V}_A とフィードフォワード制御で算出した歩行速度 \tilde{V}_B の和を制御量 \tilde{V} としてトレッドミルの制御を行う。

$$\tilde{V} = \tilde{V}_A + \tilde{V}_B \quad (1)$$

3.2 使用するトレッドミルについて

歩行者を制御目標の位置に留める制御を行う際に、使用するトレッドミルは、セノー株式会社の製品である LABORDONEXT を採用する。走行面の長さは 158cm であり、幅は 50cm である。制御方法としては、LABORDONEXT に内蔵されているインバータの、FREQROL-D700(三菱電機

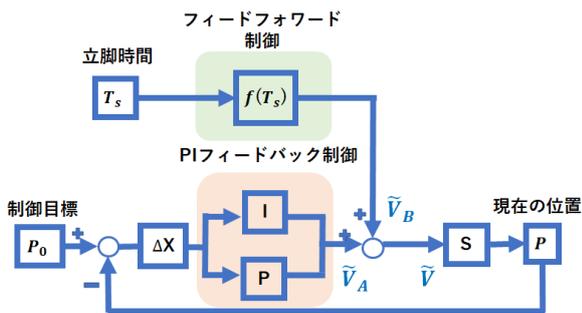


図 1 アルゴリズム全体の構造

株式会社製)でトレッドミルのベルトを回転させ、速度を制御している。そのため、アクティブトレッドミルは計算機からインバータに制御量 \tilde{V} を RS-485 (ラトックシステム株式会社製) 経由でシリアル送信することで実装している。

4. フィードバック制御のための計測

4.1 身体的位置取得について

身体的位置を取得するために使用する機器として、センサからの距離を ToF 方式で計測する LiDAR センサとして、Benewake の製品である TFMini を採用する。プログラム実装中のサンプリングレートは 80Hz であった。TFMini センサをトレッドミル前方から 20cm、床からの高さ約 90 cm の位置に設置し身体的位置を計測する。また、TFMini の設置位置を図 2 に示す。

4.2 PID 制御について

PID 制御は制御目標の位置と取得データとの差の値 ΔX から値を計算する。そして、トレッドミルの走行面の長さが 150 cm であり、図 2 の赤線の位置で示した、前方から 90 cm (センサから 70cm) を制御目標の位置とする。また、 ΔX について図 2 に示す。そして、PI フィードバックで使用する、制御量 \tilde{V}_A は、P 制御と I 制御の算出結果の和を代入する。また、PI フィードバック制御を式 (2) に示す。P 制御の引数として制御目標と歩行者の身体との差の値 ΔX と I 制御の引数として過去約 0.5 秒間で取得した 30 個のデータ ΔX の和を使用する。また、定数 α 、 β を使用することで、重みを変化させることができる。 α の値は 40、 β の値は 1 で計測している。

$$\tilde{V}_A = \alpha \times \Delta X + \beta \times \int \Delta X dt \quad (2)$$

5. フィードフォワード制御のための計測

前章で紹介した PI フィードバック制御だけでは、歩行者が制御目標に達した場合、トレッドミルのベルトが停止しまい、制御目標の位置に歩行者をとどませたままの歩

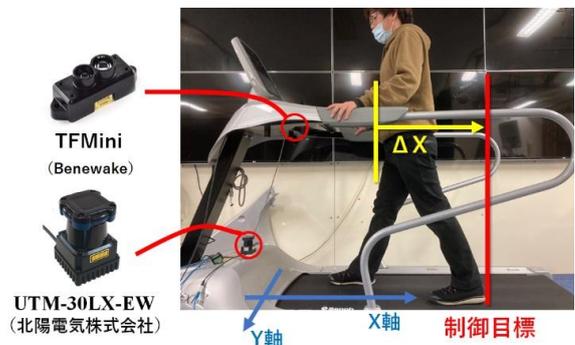


図 2 センサの設置位置・ ΔX の値の取り方

行は実現できない。そして、PI フィードバック制御は、応答性が遅く、そのため、歩行者の歩行速度を推定し、位置のPI フィードバック制御に付け加えることで、目標としていた、歩行者を制御目標の位置に維持することが可能になると考える。

そして、立脚時間と歩行速度は相関しているという報告がある[1]。そのため、歩容から立脚時間を計測し、立脚時間と歩行速度の関係について調査した。そして、立脚時間から歩行速度を推定するために、近似曲線を作成した。

5.1 足の位置取得について

足の位置取得には、北陽電気株式会社の製品である UTM-30LX-EW を使用する。UTM-30LX-EW は 270° の方向に対して、周囲の距離データを取得する LiDAR センサであり、プログラム実装中のサンプリングレートは 30Hz である。取得方法は、UTM-30LX-EW をトレッドミル前方、床からの高さ約 20 cm の位置に設置し足の位置を計測する。UTM-30LX-EW の設置位置を図 2 に示し、トレッドミルの進行方向を X 方向とする。

5.2 速度計測と立脚時間の計測方法

足の位置取得から足の速度へ変換する手順について図 3 に示す。立脚時間の計測方法をするためには、X 方向にお

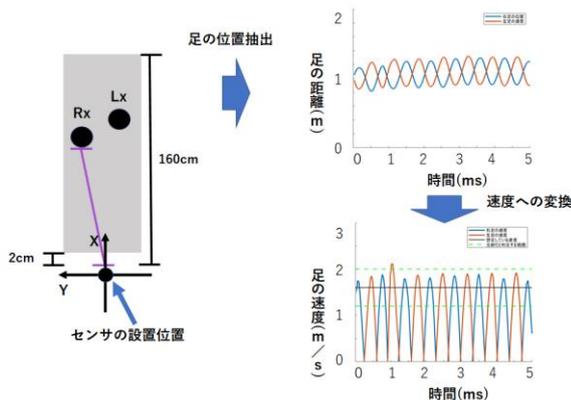


図 3 足の位置取得と速度への変換

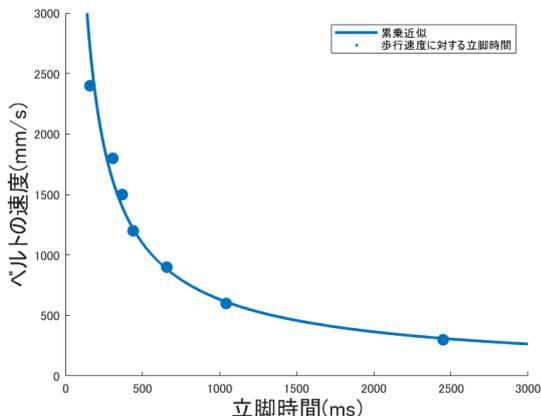


図 4 立脚時間と歩行速度の関係

る足の速度を知る必要がある。そして、計測方法として、過去 3 つの X 方向における足の位置の値とその時点で取得した X 方向における足の位置から、最小二乗法で計算を行い、得られた過去との差分より、X 方向における足の速度として取得した。

次に、X 方向における足の速度によって立脚判定を行い、立脚に要した時間である立脚時間を計測する。まず、立脚時の足先の速度はベルトの速度と同一の速度に一致すると考える。そして、図 3 の足の速度のグラフに示した様に、ベルトの速度の値を基準に立脚判定の幅をもうけ、幅の中に入っている時間を立脚時間とする。

5.3 立脚時間と歩行速度の関係

トレッドミルを (0.3・0.6・0.9・1.2・1.5・1.8・2.4m/s) の 7 つの速度を各速度に対して 2 分間歩行を行う。そして、縦軸をトレッドミルの速度、横軸を立脚時間として、結果を図 2 に示す。図 4 より、立脚時間と歩行速度には相関がある、歩容から立脚時間を計測することで、歩行速度を推定し、推定速度によるフィードフォワード制御を行う。また、図 2 で示した、立脚時間と歩行速度の関係を累乗近似で求めることで、推定速度を計算している。累乗近似を式 (3) に示し、 T_s は取得した立脚時間の値、 (γ, δ) は定数を入力しており、推定速度 \tilde{V}_B 計算している。

$$\tilde{V}_B = \gamma \times T_s^\delta \quad (3)$$

6. 実験結果

前章で紹介した、位置のPI フィードバック制御と速度のフィードフォワード制御を実装し、実験を行った。実験手順として、動作開始から約 20 秒間、低速で歩行を行い、その後、立脚時間を短くすることでベルトの速度を増加させた。また、一定時間速歩を行った後、徐々に速度を低下させ、トレッドミルを停止させた。そして、制御による胴体の位置の変化について図 5 に、実験での歩行者の位置を図 6 に示す。

結果として、立脚時間から速度のフィードフォワード制御を行い、推定速度を計算することでトレッドミルの速度調整を行い、胴体の位置が制御目標よりトレッドミル前方に動いた場合、位置のPI フィードバック制御によって計算された値が推定速度に加算されることで、アクティブトレッドミル送信する速度を計算している。また、アクティブトレッドミル稼働中の TFMMini から取得した胴体の位置の平均は 72cm であり、標本偏差は 9.1cm であった。制御目標

はTFMini から 70cm であるため,制御できていると考える.

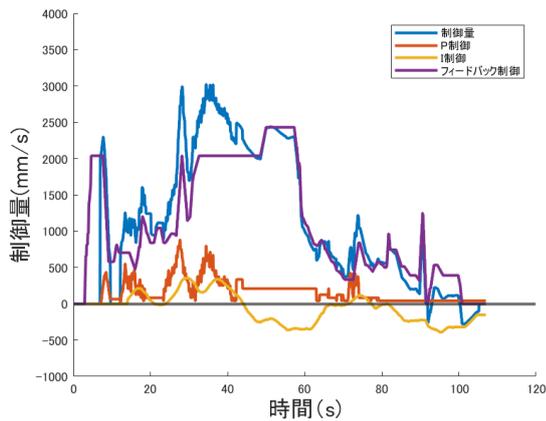


図5 実験での制御量

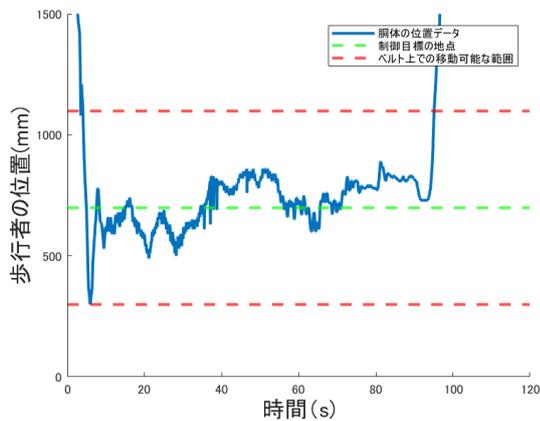


図6 実験での歩行者の位置

7.おわりに

本研究では,歩行者の歩行速度に合わせた制御を行う,アクティブトレッドミルの開発を行った.そして,速度のフィードフォワード制御と位置のPIフィードバック制御の2つの制御方式を用いた.これにより,歩行者の歩行速度が変化しても,歩行者を制御目標の位置から前後10cm以内での制御を実現した.

今後の展望として,VR空間内でのインターフェースの開発を行い,利用者に興味を持たせることで,健康習慣の改善が図れると考える.

8.謝辞

本研究は,JST,COI,”運動の生活カルチャー化により活力ある未来をつくるアクティブ・フォー・オール拠点”JPMJCE1306の支援を受けたものである.

参考文献

- [1] 厚生労働省政策統括官付政策評価官室委託 第1部 健康長寿社会の実現に向けて —健康・予防元年
<https://www.mhlw.go.jp/wp/hakusyo/kousei/14/dl/1-02-1.pdf>
(2020.12.21 参照)
- [2] 野間 春生,宮里 勉,中津 良平,能動的歩行動作に対応した歩行感覚提示装置の開発(<特集>三次元サイバースペース実現と利用),日本バーチャルリアリティ学会論文誌,1999,4巻,2号,p.407-415
- [3] 塩澤 成弘,有馬 秀一,牧川 方昭,歩行意思推定を用いた歩行シミュレータコントロールによる方向転換動作の実現,生体医工学,2005,43巻,1号,p.124-132
- [4] 上田 貴徳,宍戸 俊輔,高橋 嶺以,伊藤 稔,仮想空間内歩行のための2次元歩行打消型ロコモーションインタフェース:ボールアレイトレッドミル,日本バーチャルリアリティ学会論文誌,2012,17巻,3号,p.269-278