This article is a technical report without peer review, and its polished and/or extended version may be published elsewhere

第 23 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集（2018 年 9 月）

部分面型ロコモーションインタフェースを用いた柔軟床面提示

米澤綾恭 [1)]，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 知能機能システム専攻（〒305-8577 茨城県つくば市天王台 1-1-1）
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，部分面型ロコモーションインタフェースを用いて柔軟な床面を歩行する感覚提示が可能なシステムを開発した．従来のロコモーションインタフェースでは，剛体の床面を歩くのみで様々な地面性状を提示する研究は進んでいなかった．本研究では地面の凹凸を提示可能な部分面型ロコモーションインタフェースを用いて，弾性的な変形をする床面の提示環境を構築し，歩行時におけるユーザの床面性状の認識特性について調査した．

キーワード：Locomotion Interface, Force Display, Haptic Rendering

1. はじめに

近年，Head Mounted Display(HMD)の普及に伴って VR 技術が再度注目されている．VRZONE SHINJUKU[1]などにも見られるように，HMD による映像提示と合わせて移動感覚への提示も重要視されていることがわかる．その中でも，人間にとって最も生得的な移動手段である歩行による移動が可能な技術としてロコモーションインタフェース(LI)がある．

LI は現実でのユーザの歩行による移動量と等価の引き戻し運動を機械的に発生させることで，ユーザの位置を一定に保ちながら無限に歩行する感覚を提示可能な装置である．LI は大きく分けて連続面型，循環面型，部分面型の 3 種類に分類できる．

連続面型の Torus Treadmill[2]は，一方向のトレッドミルを数珠つなぎにすることで前後だけではなく 2 次元平面全方向への歩行が可能である．Torus Treadmill は連続した面であるため，安定した歩行が可能だが，凹凸面の提示ができない．

凹凸面を提示可能かつ無限平面にも歩行可能な循環面型の Robot Tile[3]は，自律移動するロボットが床面を形成することでユーザの足場となり，進行方向と逆行することで歩行を可能とする．しかし，ロボットが動き回ることで歩行できる速度が低く，足場自体が不安定なため歩行が不自然になるという課題がある．

部分面型の Gait Master[4]は，フットパッドと呼ばれる小さな床板を制御し，足の動きに合わせて動作させることで無限歩行を可能とする．Gait Master は安定した歩行が可能で凹凸面を提示可能だが，全方位への歩行には大掛かりな機構が必要なものとなってしまう．

これらのような手法で LI は実現されてきたが，様々な変化をするような地面性状の提示が可能なものは少ない．Gait Master では凹凸面の提示が可能だが，剛体の床面を歩行するのみで柔らかさが変化するような床面を歩行できる LI はあまり考えられてこなかった．

そこで，本研究では部分面型 LI を用いて足元の踏み込み量に応じて床面の高さを変更し，ゴムのような弾性変化をする柔軟な床面を歩行しているような感覚が提示可能な装置を開発し，評価・検証した．

2. システム構成

本研究で使用する装置には，筑波大学のバーチャルリアリティ研究室で部分面型 LI として開発された GaitMaster7(GM7)を用いる(図 1)．GM7 は図 2 に示すように，両足に対応した前後方向と上下方向に動作可能な計 4 自由度の装置である．前後と上下方向への各足の移動には，ベルト駆動のスライダを用いて実現している．

GM7 は 2 種類の歩行が提示可能な装置である．ひとつはあらかじめ用意した歩行軌跡データに基づいて，ユーザにその歩行軌跡を提示して歩行させる受動歩行であり，もうひとつはフットパッド部に取り付けた 6 軸力センサの値やユーザの足位置の計測データを用いて，ユーザの歩行意図を検出して，フットパッドを制御することで歩行感覚を提示する能動歩行が可能である．

Ayataka YONEZAWA, Hiroaki YANO, and Hiroo Iwata

© 2018 日本バーチャルリアリティ学会

図 1.　GaitMaster7 の外観

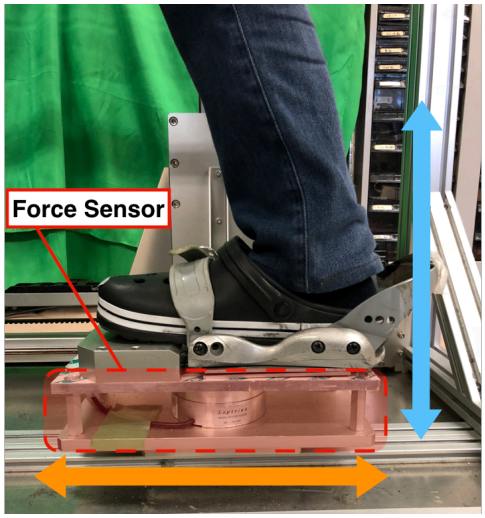

図 2. 足部分の自由度

3. 歩行アルゴリズム

3.1 能動歩行

人は歩行の際に足に発生している床反力を制御することで前へ進む力を得ている．具体的には，体重で生じる重力方向への力と，足と地面の間で進行方向に生じるせん断方向への力がある．産業技術総合研究所が開発した歩行データベース[5]を用いて，せん断歩行と身体重心のある腰と爪先の相対位置の関係を示したグラフを図 3 に示す．夏神らによると人の歩行は移動方向へのせん断力に基づいており，せん断力を利用した引き戻しによって自然な歩行が可能なことが確認されている[6].

システムは立脚側のフットパッドに発生しているユーザの移動方向へのせん断力を計測し，その力に比例した値を速度としてフットパッドの引き戻しを行う．また，それぞれの足が立脚か遊脚かの判定には重力方向への圧力を計測し，閾値を超えているかどうかで判定する．

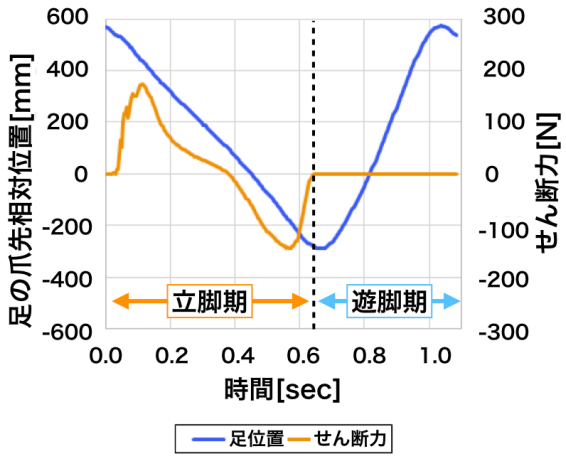

図 3. 歩行で生じるせん断力と足位置の関係

3.2 柔軟な床面提示アルゴリズム

人が感じる柔らかさの知覚について考える．入江らによると指先における柔らかさ知覚は，指腹と素材の接触面積および面内の圧力分布の寄与が指摘されている[7]. Srinivasan らは変形可能な物体における弾性知覚には指が埋没するものに関しては触覚が，2 枚の板でバネを挟んだものに関しては位置感覚である固有感覚が優位であると報告している[8].

これらの知見は指先が人体の中で一番刺激に敏感な部位であり[9], 微小な変化を感知することができるために得られた結果といえ，本研究の対象である足に関しては起因する要因が異なると考えられる．特に靴を履いた状態だと皮膚に触覚刺激があるわけではないため，指先ほど触覚の解像度は必要ではないため，位置感覚のみの提示によって柔らかさを提示可能だと言える．

GM7 で柔軟な床面を提示するためにはユーザの両足からの圧力に応じてフットパッドの位置が変化する必要がある．そこで，6 軸力センサから取得した重力方向のセンサ値に応じてフットパッドを上下に変位させることで，柔らかい床面提示が可能な装置を実装した．

弾性物体の変位$x[mm]$は一般的にフックの法則によって表され，(1)式より力センサの値$F[N]$に応じてフットパッドの位置を制御することで柔らかい床面を提示する．バネ定数kを変化させることで，異なる柔らかさの提示が可能と考えられる．

$$x = \frac{F}{k} \tag{1}$$

4. 性能評価

図 4 に示すようにフットパッドを15[mm]上昇させた位置を基準とし，その位置から見たフットパッドの下方向の変位と，力センサの重力方向の値を計測した．計測した点群を線形近似した直線を実線で，理想の目標値の直線を破線で表したグラフを図 5 に示す．それぞれのバネ定数に関して理想の直線式としては，表 1 に示す通りで，図中の各数式は GM7 で提示したグラフの線形近似式

© 2018 日本バーチャルリアリティ学会

を示している．

図 5 より，目標値に近い精度で提示できており，いずれのバネ定数においても線形的に変化していることが確認できる．弾性物体のような変化をする挙動が実現できていることが確認でき，バネ定数を変化させることで異なる柔らかさの地面を提示できたことが確認できる．

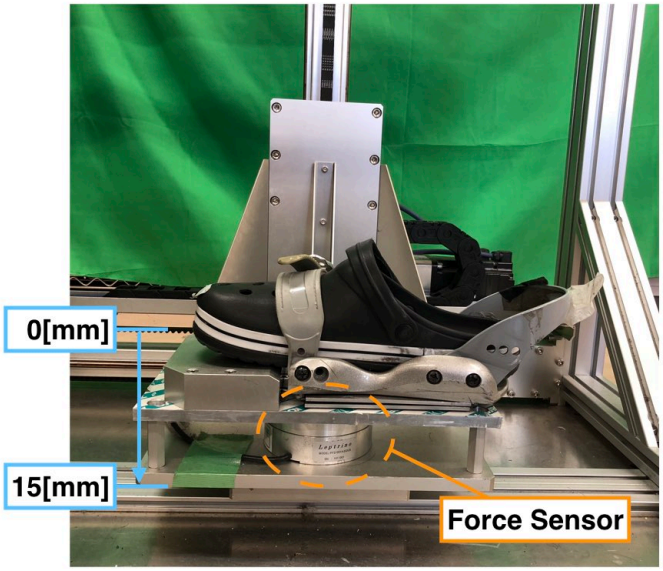

図 4. 高さ基準値と力センサの位置

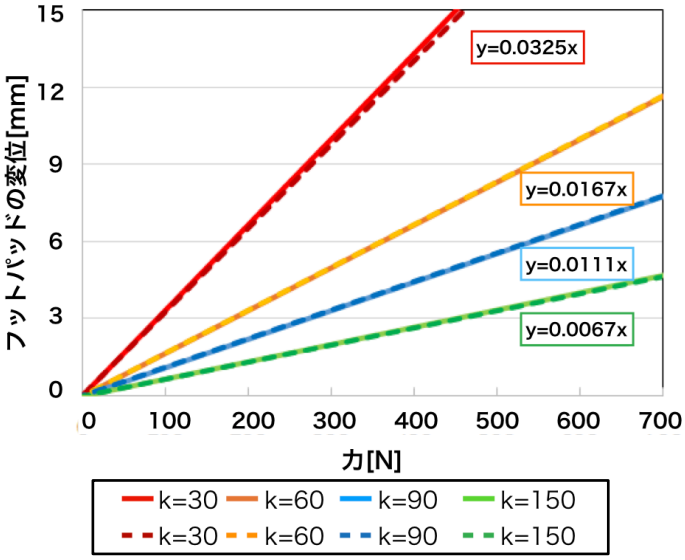

図 5. 力-フットパッドの変位グラフ

表 1. 各バネ定数における目標の直線式

バネ定数	直線の式
30	$y = 0.0333x$
60	$y = 0.0167x$
90	$y = 0.0111x$
150	$y = 0.0066x$

5. 評価実験

5.1 実験概要

GM7 によって性能上は弾性変化する床面を提示可能なことと，バネ定数を変化させることで異なる床面を提示可能なことを確認した．しかし，実際の人の知覚面において柔軟な床面提示と，異なる床面を提示できたかどうかは明らかになっていない．

そこで，異なるバネ定数を持つパラメータを用意し，違う柔らかさの床面を提示し，実際に人の知覚上で異なる柔らかさの床面が提示できているかどうかを調査するために実験を行なった．被験者は 20 代男性の健常者 7 名で実験を行なった．

5.2 実験の内容

(1) 被験者を GM7 に搭乗させ，力センサのキャリブレーションを行うために直立状態，右足を上げた状態，左足を上げた状態の時の力センサを取得する．

(2) 被験者は GM7 での能動歩行を動作確認後，全 5 種類の異なる柔らかさの床面を歩行する．

(3) 異なる 5 種類の柔らかさの床面のうちから 2 種類を選択し，順序効果を考慮した全 20 組からランダムに組み合わせを選択する．

(4) 1 つ目の柔らかさの床面を 10 歩分歩行後，2 つ目の柔らかさの床面を歩行する．

(5) 1 つ目の柔らかさと 2 つ目の柔らかさを比較して，歩行した時に感じた柔らかさ知覚について，「1 つ目の方が柔らかい(+2)」「1 つ目の方が少し柔らかい(+1)」「どちらでもない(0)」「2 つ目の方が少し柔らかい(-1)」「2 つ目の方が柔らかい(-2)」の 5 段階で被験者は回答する．

(6) (3)~(6)を 1 試行として 10 試行を繰り返し，一度休憩をはさんだのち，残りの 10 試行を繰り返す．

(7) 全組み合わせ終了後，気づいたことや感想などのコメントを聴取する．

実験手順はシェッフェの一対比較法に基づき，1 人の被験者に全組み合わせを試行する，浦の変法で行う．結果は，全組み合わせの比較によって心理尺度として GM7 で提示した床面に対して柔らかく知覚したかどうかが求められ，数値が小さいほど被験者は柔らかく知覚したと言える．

5.3 実験結果と考察

結果を図 6 に示す．バネ定数$k = 30,60,90,120,150$の 5 種類それぞれの刺激に対して柔らかさの度合いについて分散分析をした結果，$F(4,140) = 139.65(p < 0.01)$より主効果で 1%水準未満での有意が確認された．つまり，それぞれの柔らかさに対して，知覚の面においても異なる柔らかさの地面を提示可能だということが確認された．

また，各バネ定数の組み合わせに関しては，$k = 120$の時と$k = 150$の時の組み合わせ以外はいずれも，1%水準未満で有意に差があることが確認された．有意差のでなかった組み合わせに関しては，バネ定数が大きくなるにつれて人の体重分の荷重ではあまりフットパッドの位置が変化せず，変化の差異が知覚しづらいためであると考えられる．

被験者のコメントには，「陸上競技場のトラックのよう

© 2018 日本バーチャルリアリティ学会

な感覚」「ウレタンやゴムの床を歩いている感じに近い」など，弾性物体らしい柔らかい床面を歩行する感覚が提示できていたと考えられる．また一方で，「フットパッドの上下への振動でどの程度の柔らかさかがわかってしまう」という意見もあった．これはバネ定数が小さい時に体重の軽い人だと起きてしまう問題で，荷重の変化に対して大きくフットパッドの位置が変化して少し振動してしまうのが原因である．

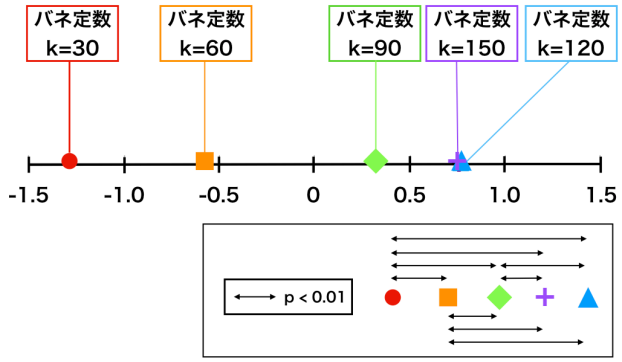

図 6. 各バネ定数の柔らかさに関する尺度図

6. 今後の展望と応用先

本研究で提案した GM7 上で柔らかい床面を歩行した際と，従来の能動歩行のみをした時の前脛骨筋の表面筋電位の変化を図 7 に示す．足が地面に接地した瞬間から遊脚期を経て再度地面に接地までを 1 周期とし，10 歩分のデータを平均平滑化し，その時の時間変化を示している．

提案手法である柔らかい床面提示した際の歩行時には，従来の能動歩行よりも前脛骨筋の活動がより活発になっている傾向が見られる．これにより，特に部分面型 LI の歩行リハビリテーションへの応用の際に前脛骨筋の活動が実歩行着地時と比べて低い傾向にあったが，地面性状を変更することで活性を高められる可能性が示唆された．今後，計測データを増やして実験することで本システムの有用性についての検証を行なう予定である．

また，住宅の空間デザインにおいて床材を選定する際の柔らかい床面提示や，トランポリンやスポンジの上を歩くような映像提示と共に本システムを使用することでより様々な VR 空間での歩行体験の提示が期待できる．

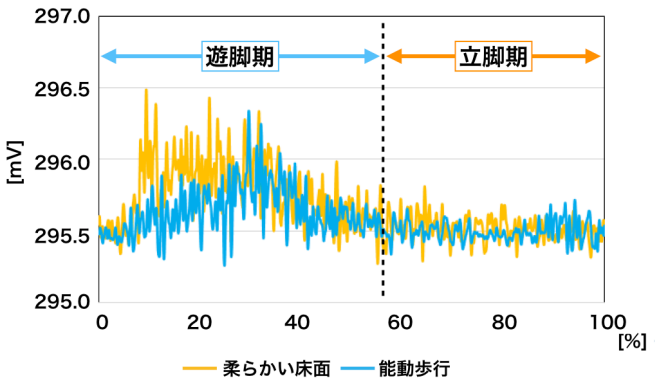

図 7. システム使用時の前脛骨筋の表面筋電

7. まとめ

本研究では平面のみではなく凹凸面を提示可能な部分面型 LI を用いて，弾性的な変化をする柔軟な床面を歩行しているような感覚提示する装置を開発した．力センサの値に応じてフットパッドの変位が線形的に変化していることから性能的に柔軟な床面を提示できていることと，バネ定数を変化させた時に異なる床仮面を提示できていることを確認した．そして，人の近くにおいても異なる柔らかさを提示できているかどうかの実験を行なった．

その結果，部分面型 LI のフットパッド制御をすることで，知覚の面でも異なる柔らかさを持つ床面提示可能なことが示唆された．

また，本システムの応用先として床面の素材を考慮した空間デザインでの活用や，アミューズメントなどでの歩行体験の拡張，リハビリテーションなどへの活用について述べた．今後は従来の能動歩行と提案手法の柔らかい床面を歩行した時の表面筋電位を計測・比較し，時間効率の良い歩行リハビリテーションへの活用が可能かどうかを検証する．

参考文献

[1] VRZONE SHINJUKU ”https://vrzone-pic.com/shinjuku/”, (最終アクセス:2018/07/19).

[2] H.Iwata, “Walking About Virtual Environments on an Infinite Floor”, Proceedings of IEEE Virtual Reality Conference, pp.286-293, 1999.

[3] 真中勇太，矢野博明，岩田洋夫，“ロボットタイ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, Vol.16, No.3, pp.449-458, 2011.

[4] 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論文誌, Vol.4，pp.345-348，1999.

[5] 小林吉之，持丸正明，” 2013:AIST 歩行データベース 2013”．

[6] 夏神龍之助，矢野博明，岩田洋夫，” 歩行時の床へのせん断力を考慮した歩行感覚提示”，第 20 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集，pp.110-113，2015.

[7] 入江隆，藤田尚文，中西秀男，太田学，“やわらかさ知覚のメカニズム”，電子情報通信学会論文誌，Vol.J91-A，No.1，pp162-171，2008.

[8] M.A.Srinivasan and R.H.Lamotte, “Tactual Discrimination of Softness”, Jounal of Neurophysiology, Vol.73, No.1, pp88-101. 1995.

[9] J.C. Stevens, and K.K. Choo, “Spatial acuity of the body surface over the life span”, Somatosensory & Motor Research, No.13, pp.153-166, 1996.

© 2018 日本バーチャルリアリティ学会