



座位・立位時の下肢運動提示による歩行感覚

Rendering of Walking Sensation with Lower Limb Motion While Sitting or Standing

山岡憲太郎¹⁾, 小出 蓮¹⁾, ヤエム ヴィボル¹⁾, 雨宮智浩²⁾, 北崎充晃³⁾, 池井 寧¹⁾
 Kentaro YAMAOKA, Ren KOIDE, Vibol YEM, Tomohiro AMEMIYA, Michiteru KITAZAKI, Yasushi IKEI

- 1) 首都大学東京大学院 (〒191-0065 東京都日野市旭が丘 6-6, {yamaoka, koide, ikei, yem}@vr.sd.tmu.ac.jp)
 2) 東京大学大学院 (〒113-8654 東京都文京区本郷 7 丁目 3-1, amemiya@vr.u-tokyo.ac.jp)
 3) 豊橋技術科学大学 (〒441-8580 愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘 1-1, mich@tut.jp)

概要: 本稿では、ユーザの下肢に運動刺激を提示し歩行感覚を生成する目的で設計された下肢駆動装置の特徴について述べる。本装置は実際の歩行時に近似した軌道を描くことで、歩行感覚の表現が可能となっている。本装置を使用する姿勢として座位と立位を比較すると、振幅量は立位の方が大きくなり、歩行感覚、移動感覚は共に立位の方が高い結果となった。立位の方が歩行感覚は表現しやすいが体験者の負担が大きく、座位で歩行感覚を表現できる利点は大きい。

キーワード: VR 歩行, 下肢運動提示, 座位, 立位, バーチャルリアリティ

1. はじめに

近年、バーチャルリアリティ(VR)体験は視覚の情報だけでなく身体感覚の刺激も統合するシステムの研究・開発により進展しつつある[1][2]。現実の世界における歩行は我々の活動に欠かせない基本的な行動であるため、ユーザが別の世界を体験するための没入感の向上の手法として歩行感覚を VR 空間で生成する必要がある。

VR 体験は、身体的な技能の伝承や他人の様々な身体的な活動の追体験等に有益である。それらにおいては、他人が体験した身体運動の感覚と外界世界から受け取った情報の両者を再現する必要がある。

身体感覚にかかわる VR 研究で、歩行感覚の提示に焦点を当てている手法がある[3][4]。これらの研究は、実際の環境内の限られた領域内を歩いている、あたかもユーザが広い VR 空間にいるかのように視覚世界を描画し、実際歩行の感覚に整合させている。身体感覚はユーザ自身の歩行運動から生じるため、他者の歩行感覚を再現する目的には適合しない。

本研究では、身体に力を加えて運動させる受動的な手法で引き起こされる歩行感覚に焦点を当てている。図 1 のようにユーザは椅子に着座し、装置によって与えられる足の運動の感覚を知覚する。座位は VR 体験時のユーザの身体的負担を最小限にでき、多様な VR コンテンツに適用可能な姿勢である。追体験の形式では、主に受動刺激を使用するため実際の歩行とは条件が異なるため、表現方法を検討する必要がある。



図 1 下肢駆動装置

本稿では、この下肢駆動装置を座位と立位で使用し、姿勢の違いによる装置の仕様の特徴、歩行感覚の変化について述べる。

2. 関連研究

2.1 立位姿勢におけるバーチャル歩行

立位の体験者に歩行感覚を生成する研究が行われている[5][6]。これらのシステムは実際の歩行に近い姿勢で行うため歩行感覚の再現度が高くなることが考えられる。しかし、

立位のユーザを支え、体重に耐えられる構造が必要となるため装置が大型化する問題点が挙げられる。また、立位での体験はユーザの負担が大きく、長時間の体験を行うことは難しいと考えられる。

2.2 座位姿勢におけるバーチャル歩行

座位のユーザの足底に刺激を与えて歩行感覚を生成するシステムが開発されている[7][8]。この手法では、体験者は着座状態で体験できるため、立位と比べ体験者の負担を少なくすることができ、長時間の体験が可能になると考えられる。また、着座姿勢のシステムはユーザを支える構造が必要ないため装置をよりコンパクトにすることが出来る。しかし、足底のみの刺激では多様な歩行感覚を再現することは困難である。バーチャル歩行の手法の中には下肢への刺激提示の他にも上肢へ刺激を提示する手法[9]や座席から刺激を提示する手法[10]の研究が行われている。これらの装置と下肢へ刺激する装置を組み合わせることでより高品質なバーチャル歩行が実現できると考えられる。本研究では、ペダルによる踵鉛直運動とスライダによる前後並進運動を組み合わせた下肢運動感覚ディスプレイを開発した。

3. 実際歩行の計測

システムで提示する運動の軌道を設定するため、実際歩行時の下肢部の空間軌道を計測した。計測参加者は正常な下肢状態を申告した本学の大学（院）生5名で、3回ずつ計測を行った。実験参加者の寛骨、外果部、踵部にマーカーを取り付け、トレッドミル上を周期1400msで自然に歩行できるように速度を調整させ、光学式モーションセンサで計測した。

参加者Aの歩行軌道を図2、参加者の平均振幅量を図3に示す。計測結果から、歩行の一周期（踵の接地時から次の接地までの時間）のうち、踵の接地期間は約40%、非接地の時間（遊脚期+爪先だけの接地期間）は約60%であり、踵部の鉛直方向の持ち上げ量は約225mmである。また、上昇時間と下降時間の比はおよそ2:1である。外果部の前後方向の並進運動は、振幅約570mm、前方への運動時間は一周期のうち約40%、後方は約60%である。前後変位量は、身体中心から前方へ約240mm、後方へ約330mmである。実際歩行では、後方への変位量の方が前方より大きい。

本ディスプレイの提示運動量を決定する際には、前後方向と鉛直方向の振幅をパラメータとし、実際歩行のプロファイルの比率でそれらの軌道を制御するものとする。

4. 下肢駆動装置

4.1 基本構成

本研究では、ユーザに歩行動作に近似した刺激を提示する方法として、踵の上下方向の動きと前後の並進方向の動きを組み合わせた下肢の運動感覚ディスプレイを開発した（図4）。この装置は下肢鉛直駆動部と下肢前後並進駆動部の2つから構成されている。これら2つの装置を統合的に

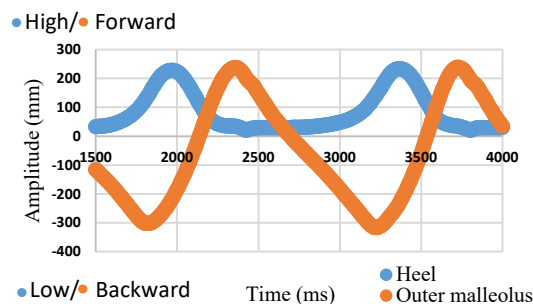


図2 参加者Aの歩行軌道

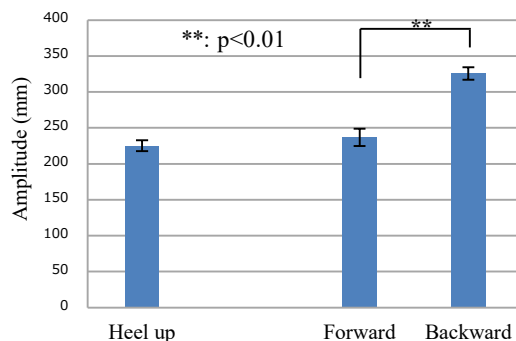


図3 実際歩行時の振幅

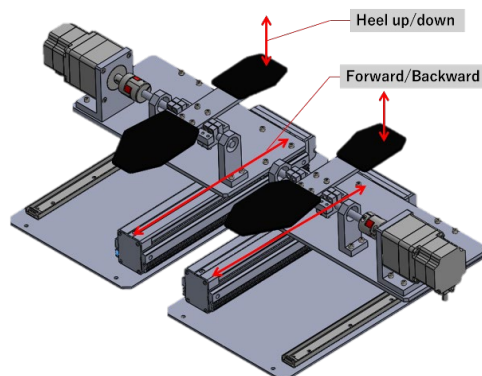


図4 下肢駆動装置

駆動させユーザの下肢部に刺激を提示することにより、歩行感覚を生成する。本稿では立位で行う場合があるため、高負荷に耐えられるよう大型装置も作成している。

下肢運動感覚ディスプレイのシステム概要図を図5に示す。PCから各モータにパルスを送ることで制御ができる。あらかじめプロジェクト内で目標軌道に応じた回転角度、回転速度、回転開始時間、回転停止時間を設定することで、下肢運動感覚ディスプレイの運動軌道を作成している。

5. 下肢駆動装置の効果

5.1 座位・立位時の提示波形の決定

座位または立位における歩行感覚を評価する前に、本装置を使用した各姿勢での提示波形を決める必要がある。そ

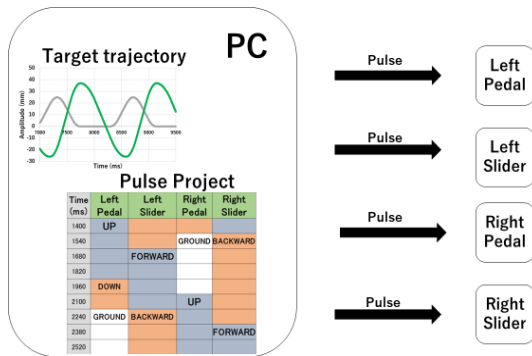


図5 下肢駆動装置のシステム概要図

ここで調整法を用い、装置の最適駆動波形を求める。座位、立位の各姿勢において、最も歩行感覚を得られる振幅量を調整させた。振幅調整には、キーボードを用い、(1)鉛直変位量、(2)前方への振幅変位量、(3)後方への振幅変位量の3つのパラメータを調整させた。

実験参加者は正常な下肢状態を申告した7名で、平均年齢は22歳である。実験参加者に実際歩行(1.4秒周期)を行わせた後、初期姿勢で着座させ、ホワイトノイズおよび閉眼により視聴覚情報を遮蔽した。次に、ランダムに設定した初期振幅を提示した後、上記の調整を2回行わせた。図6に各初期姿勢を示す。立位時には懸架装置を用いて参加者を吊ることで、提示装置への負荷を減らしている。

設定された振幅値を図7、駆動波形を図8に示す。実際歩行では後方への変位量が前方への変位量より大きいのにに対し、本ディスプレイで提示を行う際は、前方への変位量が後方への変位量より大きくなった。また、振幅量を比較すると、座位より立位の方が振幅が大きくなる傾向が見られた。

5.2 座位・立位時における歩行感覚・移動感覚の評価

座位または立位における歩行感覚の差異を調査するため、本実験では前章で決定した駆動波形を提示し、歩行感覚と移動感覚の2つを評価させた。評価には Visual Analogue Scale を用いた。

実験参加者は正常な下肢状態を申告した7名で、平均年齢22歳である。実験参加者に実際歩行(1.4秒周期)を行わせた後、立位または着座時の初期姿勢をさせ、ホワイトノイズおよび閉眼により、視聴覚情報を遮蔽した状態で刺激提示を行う。

評価された歩行感覚、移動感覚を図9に示す。100が実際歩行と同等で、0が全く感じないとしている。歩行感覚、移動感覚ともに立位姿勢時の方が高い評価となった。座位の感覚は歩行感覚、移動感覚は共に立位より2割ほど減少している。したがって、立位の方が歩行感覚を表現しやすいと言える。

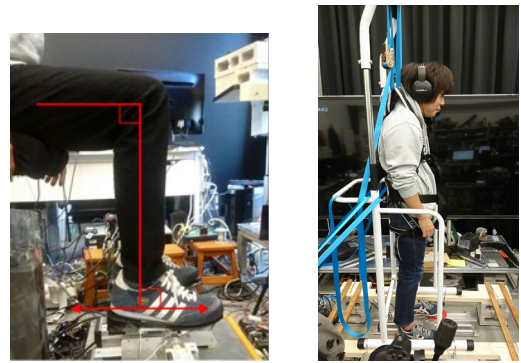


図6 実験時の参加者の初期姿勢 (左:着座, 右:立位)

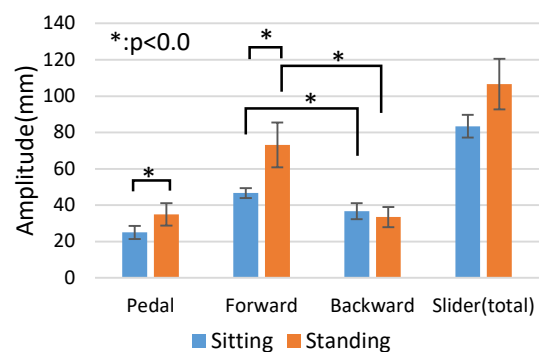


図7 設定された振幅値

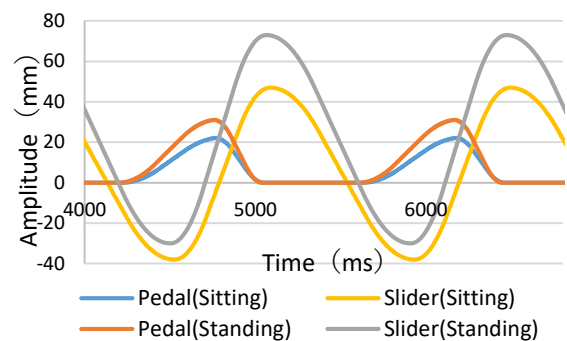


図8 設定された駆動波形

6. 考察

VR歩行において座位より立位の方が歩行感覚は高まるのが明らかとなった。しかし、立位の歩行表現は座位と比較すると体験者への負担が非常に大きく、体験者を支え、体重に耐えられるような装置は大型化する傾向があり、実用に適するとは言い難い。一方、座位の場合体験者への負担は非常に小さく、装置の負荷も小さいため実装が容易である。本稿の実験より座位は立位より歩行感覚は2割ほど減少するが歩行表現はある程度実現できている。座位のバーチャル歩行は歩行感覚をより高める必要があるが、他の部位への刺激提示が立位よりも容易であるため、前庭感覚

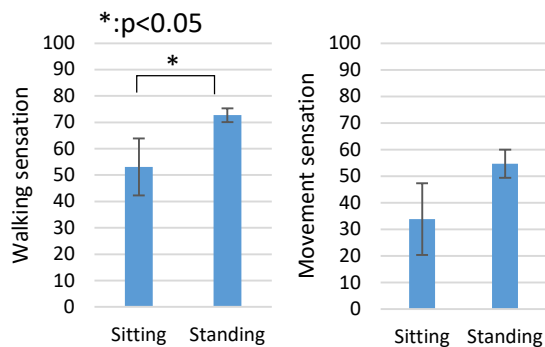


図9 歩行感覚（左）と移動感覚（右）

や上肢への刺激を加えることで歩行感覚は向上すると考えられる。

7. おわりに

本装置を使用し座位と立位で比較すると、振幅量は立位の方が大きくなり、歩行感覚、移動感覚は共に立位の方が高い結果となった。立位の方が歩行感覚は表現しやすいが体験者の負担が非常に大きく、実用には適するとは言い難い。座位では体験者の負担は非常に小さいため、座位で歩行感覚を表現できる利点は大きい。今後、下肢駆動装置の自由度を増やし、足底に振動を与えることで、歩行感覚をより高める。

謝辞 本研究は、情報通信研究機構イノベーション創出型研究開発 # 143 ウ 101, 総務省 SCOPE (#141203019, 191603003), JSPS 科研費 (JP26240029, JP18H04118, JP18H03283), SCAT, JKA の支援により実施されたことに謝意を表す。

参考文献

[1] Hollerbach J., Xu Y., Christensen R., Jacobsen S.: Design specifications for the second generation Sarcos Treadport locomotion interface; Proc. AMSE Dynamic Systems and

Control Division, DSC-Vol. 69-2 (2000)

- [2] Yano H., Kasai K., Saitoh H., Iwata H.: Development of a gait rehabilitation system using a locomotion interface; Journal of Visualization and Computer Animation, Vol.14, pp.243-252 (2003)
- [3] Matsumoto K., Ban Y., Narumi T., Yanase Y., Tanikawa T., Hirose M.: Unlimited Corridor: Redirected Walking Techniques Using Visuo-Haptic Interaction, In SIGGRAPH 2016 Emerging Technologies (2016)
- [4] Nishi A., Hoshino K., Kajimoto H.: Straightening Walking Path Using Redirected Walking Technique, SIGGRAPH '16 Poster, pp.24-28, Anaheim, CA (2016)
- [5] Schmidt H., Hesse S., Bernhardt R., Kruger J.: HapticWalker – A novel Haptic Foot Device; ACM Transactions on Applied Perception, vol. 2 No. 2, pp. 166-180 (2005)
- [6] Yano H., Nakajima Y., Tanaka N., Saitou H., Iwata H.: Gait Rehabilitation Using a Locomotion Interface for Clinical Testing; TVRSJ, Vol. 14 No. 4 455-462 (2009)
- [7] Kato G., Kuroda Y., Kiyokawa K., Takemura H.: Force Rendering and Its Evaluation of a Friction-based Walking Sensation Display for a Seated User; IEEE Transactions on visualization and computer graphics, vol. 24, No. 4, pp. 1506-1514 (2018)
- [8] Jayakumar R. P., Mishra S. K., Dannenhoffer J. F., Okamura A. M.: Haptic Footstep Display: IEEE Haptics Symposium(HAPTICS), pp. 425-430, (2012 April)
- [9] Saka N., Ikei Y., Amemiya T., Hirota K., Kitazaki M.: Passive arm swing motion for virtual walking sensation. In Proceedings of the 26th International Conference on Artificial Reality and Telexistence and the 21st Eurographics Symposium on Virtual Environments pp. 17-23. Eurographics Association. (2017)
- [10] Ikei Y., Kato S., Komase K., Imao S., Sakurai S., Amemiya T., Hirota K.: Vestibulohaptic passive stimulation for a walking sensation, 2016 IEEE Virtual Reality (VR). IEEE (2016)