



多様な姿勢に対応したワイヤレス足裏振動デバイスによる バーチャル歩行体験

Virtual walking experience with wireless sole vibration device for various postures

中村純也¹⁾, 北崎充晃¹⁾

Junya NAKAMURA, and Michiteru KITAZAKI

1) 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, nakamura.junya.ap@tut.jp, mich@tut.jp)

概要: 本発表では、バーチャル歩行体験を実現するワイヤレス足裏振動デバイスを開発した。このデバイスは、圧力センサと振動子によるバーチャル歩行の制御とフィードバックを提供する。前足部と踵部の振動子は、歩行に同期して足裏への振動を提示し、歩行する地面質感に応じた振動を提示する。6つの圧力センサは、足裏の荷重変化を捉え、歩行方向を制御する。ユーザーは立位や座位、仰向け姿勢など身体的制約に左右されず体験できる。

キーワード: ウェアラブル, 歩行, 振動, 姿勢

1. はじめに

歩行は人にとって最も馴染みのある移動手段であり、広く受け入れられやすい。これまでの研究では、バーチャル環境における歩行移動を再現するシステムが提案されてきた[1]。例えば、トレッドミルや摩擦を減らした靴を利用する手法がある。これらは高い歩行体験を提供するが、デバイスが高価である場合や設置場所の制約、運動を行うためにユーザーに身体上の制約を求める課題があった。そのため、これらの課題に対応し、より自由度の高い歩行体験を実現するために、HMDと足に着用する装置を活用したバーチャル歩行システムを開発した。

ユーザーは足を動かさず、足の荷重の移動で任意の方向に移動できる。これにより、ユーザーは座位などの安定した姿勢を選択でき、設置場所の制約や身体上の制約を回避できる。また、手を自由に使うことができ、他の操作やインタラクションに手を占有されない。また、足裏への振動提示は、歩行感覚を高めるのに有効な手段である[2, 3]。さらに、足裏振動に自己身体アバターの観察[4]や歩行環境の質感提示[5]を組み合わせることにより、歩行体験を高めることができる。そのため、足裏への振動刺激や視覚的な自己身体の提示も導入した。

本システムのデモでは、ユーザーの実身体を移動することなく、バーチャル環境内に配置した自己身体アバターを一人称視点から観察し、歩行移動を能動的に行える。加えて、アバターの歩行移動に同期して足裏振動を提示し、歩行環境の質感提示を行う。

2. 本システムについて

本システムは、ユーザーがVR環境内でのバーチャル歩行体験を実現するために、足裏への振動刺激と歩行移動を制御するデバイスが必要である。また、HMDを装着した状況での多様な姿勢変化は、ケーブルによるトラブルが予期された。そのため、ワイヤレスな足裏入力振動デバイスを設計した。また、安価に制作でき、カスタマイズ可能な仕様とした。筐体は、市販品のスノーボードビンディング (SALOMON PACT 2023 M-size) をベースに3Dプリントパーツで構成した。デバイスの制作方法やデータは公開する予定である。

デバイスのアクチュエータや制御は、前足部と踵部に配置された振動子 (AcouveLab Vp4)、振動子を駆動するためのアンプ (PAM8403)、圧力センサー、センサーのデータを処理して送信する ESP32 マイコン (ESP32-DevKitC-32E) で構成される。

圧力センサ群は、6個のロードセル (SC134-50kg-CTH) で構成され、前足部、中足部、踵部に2つずつ配置されている。1つのロードセルはA/Dコンバーター (HX711) により50kgまでの荷重を分解能24bit、サンプリングレート10HzでESP32マイコンに出力した。これらはデバイスに取り付けたバッテリーで駆動した。

ESP32マイコンはコンピュータとBluetooth接続し、HID準拠ゲームパッドとして振る舞う。デバイスはセンサーデータからXY軸の出力にマッピングする。X軸は、圧力セ

ンサの左右の縦3つのセンサーを加算し、左右で除算した値を割り当てた。Y軸は、前足部の2つの加算値と踵部の2つの加算値を除算した値を割り当てた。XY軸の出力は、今回のデモプログラムの性質から、-5kg(下限)~5kg(上限)に制限した。左右2つのデバイスは、Unity上で入力値を統合し、アバターの歩行と回転を制御した。UnityのC#スクリプトで2つのデバイスのX軸Y軸データをそれぞれ加算し、一つのバーチャルデバイスとして振る舞った。X軸の値は、アバターの回転を毎フレーム制御し、アバターの親オブジェクトのY軸回転値 = 入力値×倍率×(時間/1フレーム)とした。Y軸の値は、アバターの歩行アニメーションを毎フレーム制御し、アバター歩行アニメーションブレンド(-1~+1; 後退・静止・歩行) = 入力値×倍率とした。歩行アニメーションはUnityアセットのFinalIKに含まれるWalk Backwards, Idle, Walk2のアニメーションクリップを使用した。歩行スピードは-1の時に-1.556[m/s], 1の時に1.556[m/s], 0の時に静止する。足への荷重で歩行速度を制御でき、回転も併用可能である。また、アニメーションと回転は独立しているため、一方のみの制御が可能である。

ユーザーはHMD (HTC VIVE XR Elite, Meta Quest 3) とワイヤレス足裏入力振動デバイスを装着することで、バーチャル歩行体験が可能となる(図1)。このバーチャル歩行環境はUnity (2022 3.8f1)で開発し、CGや360度映像を適用可能である。ユーザーはアバターの一人称視点から歩行を観察し、アバターの足の動きに合わせて振動子から振動が提示される。歩行する環境に応じて振動の種類が変化し、木材、畳、石材、砂利、草の地面質感を振動で表現した。圧力センサーへの足の荷重の変化により、歩行する方向のコントロールが可能である。バーチャル環境を観察する姿勢には制限がなく、立位、座位、仰向けなど、身体的制約に左右されない。

3. 技術・芸術展示でのデモンストレーション

デモンストレーションでは、ユーザーは立位または座位姿勢でのバーチャル歩行体験の展示を行う。ユーザーは、HMDとワイヤレス足裏入力振動デバイスを装着し、足を動かさずに、足裏の荷重の移動だけで自由に自己身体アバターを制御して歩行し、方向と速さを制御できる。

CGによるバーチャル環境内には、地面質感の種類が異なる環境が再現され、ユーザーが歩行する際に、これらの質感に応じた振動が足裏に提示され、歩行環境の変化を感じることができる。

360度動画によるバーチャル環境では、地面質感提示などに加えて、動画中に本来存在しない自己身体アバターを重畳し、動画中への没入感の向上を狙う。



図 1: HMD とワイヤレス足裏入力振動デバイスを装着したユーザーの全体構成。左上: 足裏デバイスの外観。左下: 振動子ユニットを外し、圧力センサと制御基板が露出した内部構造。裏面に振動子を駆動するアンプ基板を配置する。

謝辞 本研究は、JSPS 科研費 (JP22J21664; JP23H03882; JP22KK0158) の補助を受けて行われた。

参考文献

- [1] N. C. Nilsson, S. Serafin, F. Steinicke, and R. Nordahl. Natural walking in virtual reality: A review. *Computers in Entertainment (CIE)*, 16(2), 1-22, 2018.
- [2] L. Terziman, M. Marchal, F. Multon, B. Arnaldi and A. Lecuyer, The King-Kong Effects: Improving sensation of walking in VR with visual and tactile vibrations at each step. *2012 IEEE Symposium on 3D User Interfaces (3DUI)*, 19-26, 2012.
- [3] L. Turchet, P. Burelli, and S. Serafin. Haptic feedback for enhancing realism of walking simulations. *IEEE transactions on haptics*, 6(1), 35-45, 2012.
- [4] Y. Matsuda, J. Nakamura, T. Amemiya, Y. Ikei, and M. Kitazaki. Enhancing Virtual Walking Sensation Using Self-Avatar in First-Person Perspective and Foot Vibrations. *Frontiers in Virtual Reality*, 2(26), 2021.
- [5] J. Nakamura, Y. Matsuda, T. Amemiya, Y. Ikei, and M. Kitazaki. Virtual walking with omnidirectional movies and foot vibrations: Scene-congruent vibrations enhance walking-related sensations and ground material perceptions. *IEEE Access*, 9, 168107-168120, 2021.