

仮想現実空間における振動スピーカを内蔵した靴型デバイスによる足底への擬似圧覚提示

小栗 令央¹ 中島 武三志² 菅野 由弘¹

概要：VR・MR環境で手に生じる体性感覚を表現する手段として、クロスモーダル刺激と呼ばれる複数の感覚刺激が相互に作用することによって誘発される錯覚刺激が注目されており、様々な方法で検討されている。その結果、聴覚刺激が付加されたVR・MR環境で触る・引っ張るという運動を行うと、手にクロスモーダル刺激が生じることが明らかにされた。しかし、歩く・走る・跳ぶといった重要な身体運動に深く結びつく足部の体性感覚を誘発するクロスモーダル刺激については十分に検討されていない。特に聴覚刺激の付加によって足からクロスモーダル刺激が生じる可能性については未だ精査されておらず、先行研究では限られた現実空間でいかに歩行感覚を提示するか、という点を調べるに留まっている。本研究では、歩行音の変化により生じる体性感覚について調査することを目的として、VR環境における歩行運動に歩行音を提示するシステムを開発した。本システムでは、VRHMDと靴型デバイスを着用し、VR空間を歩行することにより、歩行時に感じられる体性感覚を比較評価することが可能である。

1. はじめに

近年、VR（仮想現実）・MR（複合現実）技術が再び注目を集め、VR機器の開発やVR分野の研究が活発に行われている。VRHMD（ヘッドマウントディスプレイ）の進化は、VR空間やMR空間の視覚的表現力を上昇させ、視覚以外の表現力もVR分野の研究によって高まりつつある。中でも、触覚・力覚・圧覚といった体性感覚をVR環境で表現することを目的としたアプローチが盛んであり、その表現手段として「クロスモーダル刺激」と呼ばれる、複数の感覚刺激が相互に作用することによって誘発される錯覚刺激が注目されている。

視覚刺激によって生じる触覚・力覚のクロスモーダル刺激は、擬似触力覚（Pseudo-haptics）と呼ばれ、どのような環境下で誘発されるか様々な方法で検討されてきた。例えば、Lécuyerらは、コンピュータに表示された仮想のバネを押させる実験において、仮想バネの硬さ変化が擬似的な感覚変化をもたらしたと述べている[1]。宇治土公らは、スワイプ操作によってタッチパネル画面をスクロールする際に、背景移動量の増減が擬似抵抗感に影響することを実験から示している[2]。擬似触力覚をVR・MR空間に応用した研究例として、鍵本らは、MR型視覚刺激に触音を聴覚刺激として付加し、粗さの異なる実物体を撫でさせたと

きに、触印象が聴覚刺激に影響されることを明らかにしている[3]。白井らは、VR環境下で弾力性のある仮想物体を引っ張ると聴覚刺激が与えられるインタラクションにおいて、擬似力覚が誘発されたと報告している[4]。触覚デバイスによって実触力覚を与えるアプローチと比べ、擬似触力覚は既存技術の応用で提示できるため、要求される技術水準やコスト面で優れている。

これらの先行研究によって、聴覚刺激が付加されたVR・MR環境下で触る・引っ張るという運動を行うと、手にクロスモーダル刺激が生じることが明らかにされた。しかし、現実世界において人間は手だけでなく、身体全体から触覚情報を受け取っている。手以外の部位に生じるクロスモーダル刺激を明らかにできれば、VR・MRを触覚面で拡張でき、より没入感の高い体験をもたらすことが期待できる。また、触覚を聴覚によって補うという観点から、触覚を提示するデバイスの開発にも応用し得る。

そこで本研究では、同様の環境下で足にもクロスモーダル刺激が生じる可能性に着目し、踏む・歩くといった運動に聴覚刺激を付加することで、「擬似圧覚」が誘発されるか検証するためのシステムを開発した。具体的には、振動スピーカを内蔵したサンダルから歩行音を聴覚刺激として提示し、VR環境下で表示される床のテクスチャと歩行音を変化させることで、体感される擬似圧覚を比較評価することが可能である。なお本稿では、擬似圧覚を「視覚刺激・聴覚刺激によって生じる圧覚のクロスモーダル刺激」

¹ 早稲田大学大学院基幹理工学研究科表現工学科

² 東京工芸大学芸術学部インタラクティブメディア学科

という意味で用いる。

以降、既存の歩行感覚提示手法を示し、それらの研究と本研究の差異を述べる。その後、本研究で開発した VR 環境における歩行音提示システムの詳細を説明する。

2. 関連研究

一般的な VR 環境では、視覚情報は VRHMD によって、聴覚情報はイヤホン・ヘッドホンによって提示される。一方、体性感覚を提示するための汎用的なデバイスは現時点では存在しない。したがって、視覚的・聴覚的表現力と比べ、相対的に体性感覚の表現力は乏しいのが現状である。しかし、VR 体験により高度な没入感・一体感をもたらすためには、視聴覚情報の提示だけではなく、現実空間の身体運動と同様の体性感覚情報を提示することが欠かせない。

特に、足部は歩く・走る・跳ぶといった身体運動に深く結びつくため、足が感じる体性感覚は一層重要であり、様々な提示手法が提案されてきた。例えば、岩田は、トラス型のベルトを並べ、X 軸方向をベルトの回転によって、Y 軸方向をベルトの集合体移動することによって形成される全方向無限平面を用いて、現実空間で歩行者の位置を固定しながら自然な歩行感覚を与えることに成功し、VR 空間の移動手法として利用できることを実験で示している [5]。また、円形のターンテーブル上に 3 本のアクチュエータを三角錐状に組み合わせ、その上に足を載せるためのプラットフォームを付けたシステム『GaitMaster』を試作し、凹凸面の呈示可能性についても調査している [6]。福島らは、一辺が歩幅一步分程度の長さを持つ 4 つの正方形可動床を組み合わせ、歩行者の移動を打ち消すように循環させる装置『CirculaFloor』を開発し、可搬性を保ちつつ限られた空間における無限歩行を可能としている [7]。上田貴徳らは、ターンテーブル上にベルトコンベアを載せ、コンベアと当接するように内部にボールが設置された歩行板を上部に取り付けるという手法により、従来のものより小型化されたロコモーションインタフェース『ボールアイトレッドミル』を提案している [8]。

実歩行を制御する手法ではなく、静止状態で歩行感覚を示そうとする手法も試みられている。雨宮らは、着座状態で歩行音振動と接近音刺激を提示し、胸部に与える触覚刺激を検出させる課題実験を行い、同期した歩行音振動が歩行感覚を生起させることを明らかにしている [9]。上田祥平らは、HMD から提示される歩行映像に、映像と同期した足裏振動を付加することで、振動なしの条件と比べて移動感覚や歩行感覚が増強されたと述べている [10]。

これらの先行研究は、限られた現実空間でいかに歩行感覚を提示するか、という点に重心がおかれている。一方、歩行音自体の多様性は注目されておらず、使用された歩行音振動も全て単一のものである。しかし、歩行音は足または靴と地面の衝突音であり、これらの組み合わせによって

多様な歩行音が生じることは自明である。本研究では歩行音の音響的性質をより重要視し、歩行音そのものの変化により生じる体性感覚について調査することを目的としている。

3. 歩行音提示システム

本章では、VR 環境における歩行運動に歩行音を提示するシステムの構成要素を、歩行音・VR 環境・靴型デバイスの 3 つに分けて説明する。

3.1 歩行音

屋外のアスファルト上で、ゴム底の革靴（図 1）で足踏みをしたときの音を録音した。録音フォーマットはサンプリングレート 96kHz、量子化ビット数 32bit である。録音した音を Audacity[11] で整音し、各地点につき 5 つの足踏み音を切り出した。切り出した足踏み音に Audacity のノーマライズ機能を適用し、足踏み音の聴感を調整した。また、先行研究 [9][10] における歩行音と比較するため、各足踏み音にカットオフ周波数 120Hz のローパスフィルタをかけたもの（以下、ローパス音）を別途作成した。足踏み音とローパス音のスペクトログラムを図 2、図 3 に示す。

歩行音の録音には、PCM レコーダ（H4n Pro, ZOOM）を三脚（W-312, ハクバ）に取り付けて用いた。風によるノイズの影響を軽減するため、レコーダには風防（WS-11, TASCAM）を装着した。

3.2 VR 環境の構成

VR 空間には床を模した仮想オブジェクト（以下、床オブジェクト）と靴を模した仮想オブジェクト 2 つ（以下、靴オブジェクト）が配置される。歩行時に表示されるプログラム画面を図 4 に示す。靴オブジェクトとして用いる 3D モデルにはインターネット上のフリー素材を利用した [12]。床オブジェクトにはアスファルト面を想定したテクスチャ画像が描画される。テクスチャ画像にはインター



図 1 録音に使用した革靴

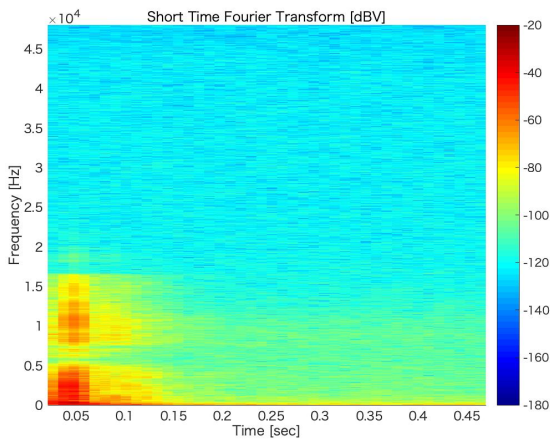


図 2 足踏み音のスペクトログラム

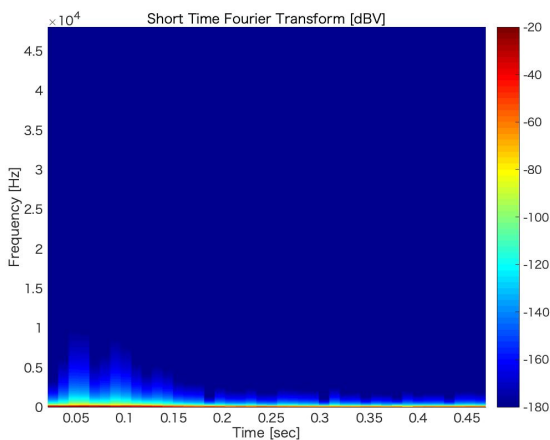


図 3 ローパス音のスペクトログラム

ネット上のフリー素材を利用した [13]。靴オブジェクトと床オブジェクトとの接触をトリガーとして、床オブジェクトのテクスチャに対応した歩行音が再生される。歩行音の音量は、靴オブジェクトと床オブジェクトの衝突速度を基に調整される。

コンピュータ上に表示されるプログラム画面を操作することにより、「単一振動モード」「単一音モード」「複数音モード」の 3 モードに切り替えることができ、各モード毎に異なる歩行音が振動スリッパから提示される。モード選択時のプログラム画面を図 5 に示す。単一振動モードでは、歩行時に 1 種類のローパス音が歩行音として提示される。単一音モードでは、歩行時に 1 種類の足踏み音が歩行音として提示される。複数音モードでは、歩行時に 5 種類の足踏み音から、1 つの足踏み音が同一音を連続させないという条件でランダムに選択される。また、歩行音は -100 セントから 100 セントの範囲でランダムな音程調整が行われてから提示される。これらの 3 モード間で感じられる歩行感覚を比較することにより、歩行音によって得られる擬似圧覚の大きさを確認することができる。

システムの VR 環境は、VRHMD (VIVE Pro, HTC) と



図 4 歩行時に表示されるプログラム画面

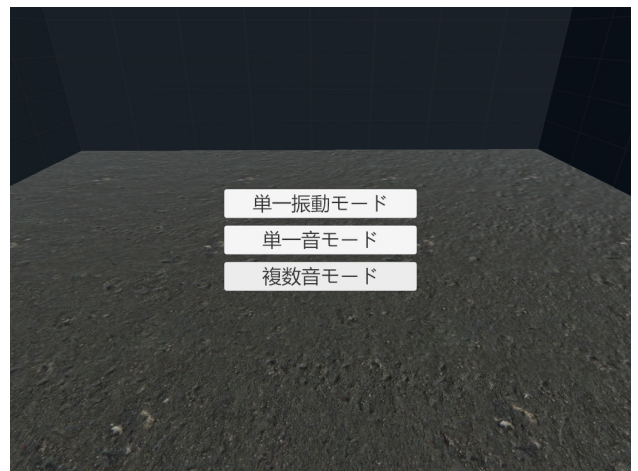


図 5 モード選択時に表示されるプログラム画面

コンピュータ (iMac Retina 5K, Windows 10) から構成される。視覚刺激として提示する VR 空間は、Unity[15] を使用して作成した。また、Unity 環境で VRHMD の制御を行うために、Unity に SteamVR プラグイン [16] を導入した。歩行音の再生およびパラメータ調整については、Unity プロジェクトに組み込んだサウンドミドルウェア Wwise[17] で制御した。

3.3 靴型デバイスの構成

雨宮らや上田祥平らの先行研究 [9][10] を参考に、システムに用いる靴型デバイス（以下、振動サンダル）を制作した。振動サンダルの外観を図 6 に示す。振動サンダルは地面と接触する際に歩行音が提示されるデバイスであり、具体的には以下の仕組みとなっている。まず、振動サンダルの位置や動きは VR トラッカー (VIVE Tracker, HTC) によってトラッキングされ、VR 空間上の靴オブジェクトの動作に反映される。次に、靴オブジェクトの動作に合わせて前節で説明したパラメータ処理が行われた後、振動サンダルに取り付けられた振動スピーカから歩行音が生成される。なお、歩行可能空間の範囲は VRHMD のトラッキン



図 6 振動サンダルの外観

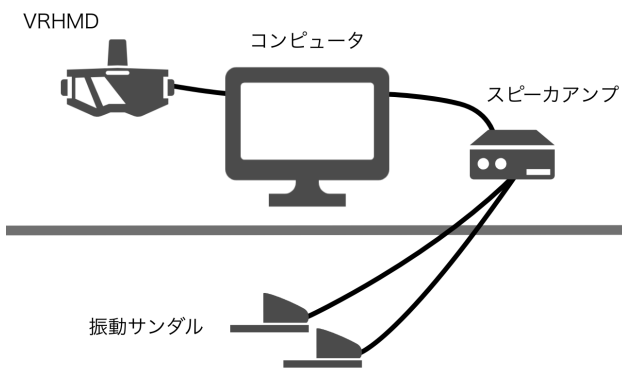


図 7 システム機器の構成図

グ範囲および振動スピーカのコード長に依存する。

振動サンダルには市販のサンダルを用い、機器組み込み用途振動スピーカ (50mm × 30mm, 4 Ω, 25W, Baosity) がサンダル足底部 (踵付近) に埋め込まれている。また VR トラッカーはサンダル甲部にネジで固定されている。オーディオ信号はコンピュータのヘッドホン端子から出力され、スピーカアンプ (FOSTEX, AP15d) によって増幅される。スピーカアンプから振動サンダル側面に取り付けられた RCA ジャックにケーブルが接続され、最終的に歩行音が再生される。システム機器の構成図を図 7 に示す。

4. おわりに

本研究では、足に生じるクロスモーダル刺激の可能性に着目し、VR 環境における歩行運動に歩行音を提示するシステムを開発した。VRHMD と靴型デバイスを着用し、VR 空間を歩行することにより、プログラムの各モードに対応した歩行音が提示される。これにより、歩行時に感じられる擬似圧覚を比較評価することが可能である。しかし、現段階では評価実験を実施できていないため、実験によるデータ収集が急務である。今後の課題として、実験を実施するにあたり、振動サンダルの形状およびソール素材による歩行感覚の影響を検討することが必要だと考える。

謝辞 本研究は、JSPS 科研費若手研究 18K18095 の助成を受けた。

参考文献

- [1] A. Lécuyer, S. Coquillart, A. Kheddar, P. Richard, and P. Coiffet.: Pseudo-Haptic Feedback : Can Isometric Input Devices Simulate Force Feedback?; Proceedings IEEE Virtual Reality 2000 (Cat. No.00CB37048), 83-90(2000).
- [2] 宇治土公雄介, 鳴海拓志, 伴祐樹, 谷川智洋, 広田光一, 廣瀬通孝: 背景移動量操作を利用した視触覚間相互作用生起によるタッチパネルでの擬似触力覚提示; 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 22(3), 305-313(2017).
- [3] 鍵本麻美, 木村朝子, 柴田史久, 田村秀行: 複合現実型視覚刺激と聴覚刺激が触印象に与える影響—産業応用システムでの利用を想定した評価—; 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 14(3), 325-333(2009).
- [4] 白井亮人, 中島武三志, 菅野由弘: 視覚及び聴覚刺激によるクロスモーダル現象を利用した力覚の錯覚; エンタテインメントコンピューティングシンポジウム 2017 論文集, 184-187(2017).
- [5] 岩田洋夫: 全方向無限平面を用いたロコモーションインタフェース; 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 5(2), 853-862(2000).
- [6] 岩田洋夫, 中泉文孝: 凹凸面を呈示するロコモーションインタフェース GaitMaster; 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 5(2), 863-866(2000).
- [7] 福島寛之, 矢野博暲, 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呈示装置 CirculaFloor; 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 11(2), 237-244(2006).
- [8] 上田貴徳, 穴戸俊輔, 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, 17(3), 269-278(2012).
- [9] 雨宮智浩, 池井寧, 広田光一, 北崎充晃: 歩行を模擬した足底振動刺激による身体近傍空間の拡張; 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 21(4), 627-633(2016).
- [10] 上田祥平, 池井寧, 広田光一, 北崎充晃: 実映像オブティックフロアと足裏振動による歩行感覚記録・体験手法の基礎検討; 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 21(1), 15-22(2016).
- [11] Audacity:
<https://www.audacityteam.org/>
- [12] Free3D:
<https://free3d.com/>
- [13] 3D TEXTURES:
<https://3dtextures.me/>
- [14] Matlab:
<https://jp.mathworks.com/products/matlab.html>
- [15] Unity:
<https://unity3d.com/jp>
- [16] SteamVR Plugin:
<https://assetstore.unity.com/packages/tools/integration/steamvr-plugin-32647>
- [17] Wwise:
<https://www.audiokinetic.com/ja/products/wwise/>