



全天球動画の地面質感を考慮した 足裏振動によるバーチャル歩行感覚

Virtual Walking Sensation with Foot-Vibration Based on
Ground texture in Omnidirectional Video

中村純也¹⁾, 松田勇祐¹⁾, 雨宮智治²⁾, 池井寧²⁾, 北崎充晃¹⁾

Junya NAKAMURA, Yusuke MATSUDA, Tomohiro AMEMIYA, Yasushi IKEI, and Michiteru KITAZAKI

1) 豊橋技術科学大学 大学院工学研究科

(〒441-8580 愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘 1-1, nakamura@real.cs.tut.ac.jp, matsuda.yusuke.vp@tut.jp, mich@tut.jp)

2) 東京大学 大学院情報理工学系研究科

(〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1, amemiya@vr.u-tokyo.ac.jp, ikei@vr.u-tokyo.ac.jp)

概要: 椅子に座った静止観察者に、歩行時のオブティックフローと足裏に振動を提示することで、バーチャル歩行感覚を誘発できる。本研究では、地面の種類に応じた足裏振動の提示により歩行感覚が増強されるか、また、地面の識別が可能であるかを調べた。地面種別との振動適合性を変化させたシステムで実験を行い、地面種別に一致する振動がバーチャル歩行感覚を増強することが明らかになった。また、地面種類の識別も可能であった。したがって、座位静止観察者に対して、地面質感に合致する振動を与えることで歩行感覚や歩行環境の認識を強化できることが示唆された。

キーワード: 歩行, オブティックフロー, 全天球動画

1. 序論

新型コロナウイルス感染症の影響により旅行や長距離移動が制限されている。そこで、人と人との実接触の機会を減らすためにオンライン上での交流や動画配信を活用した擬似的な旅行も行われている。360度撮影可能なカメラによる全天球動画を頭部装着型ディスプレイ (HMD) で観察することで、現在地と異なる地点で移動しながら周辺景色を見回す観察ができ、臨場感を持った体験を得ることができる。しかし、それは実際の旅行とは大きく異なる体験であるといえよう。そこで、任意の全天球動画中を歩く体験が得られるシステムを構築し、評価した。

視覚へのオブティックフローと足裏への振動を組み合わせ提示することでバーチャルな歩行感覚を生起することが可能である [1-3]。他者の歩行を追体験するシステムでは、足裏振動は他者の実歩行時の足の接地に対応し、実際の歩行タイミングに合わせて提示されている[1]。また、コンピュータグラフィックスによるバーチャル環境での歩行体験システムでは、一般的な歩行をシミュレーションして足の接地タイミングを生成し、そのタイミングで足裏振動を提示した[2]。しかし、これらの研究では振動のパターン (周波数特性や強弱変化) は一定で、視覚的に提示した

環境とは関連しない。人は視覚と触覚を最適に統合することが知られている[4]。それゆえ、視覚で観察している環境と対応し、地面質感に合わせた振動を与えることで、歩行感覚が強化されると仮定した。視覚と触覚が一致している場合、歩行に関する感覚は改善し、地面質感に応じた振動は被験者にとって有用な情報となると考えられる。

2. 方法

2.1 被験者

実験には 14 名の被験者が参加した。被験者は全員が男性で、年齢は 20-23 歳、平均年齢は 21.64、標準偏差は 0.8112 であった。全ての被験者は、裸眼または矯正視力が正常であった。本実験は、豊橋技術科学大学の人を対象とする研究倫理審査委員会の承認を得て実施した。また被験者に実験についての説明を行い、実験の同意を書面で得た。被験者のサンプルサイズは、中程度の効果量 ($f=0.25$), $\alpha=0.05$, 検定力 0.8 として G*Power 3.0 によって計算し決定した。

2.2 装置

実験にはコンピュータ (Intel Core i7 10700, NVIDIA GeForce RTX 2070 Super, DDR4 32GB) を使用した。Unity (2018.4.28f1) によって刺激を制御し、提示した。

視覚刺激は頭部装着型ディスプレイ（HMD, HTC VIVE, 1080[width] x 1200[height] pixels, refresh rate 90Hz）で提示した。被験者は椅子に座り、HMD を装着して実験を行った。

振動刺激は4つのバイプロトランスデューサで提示した。振動刺激は左右の足の前足部と踵に提示した。振動刺激の信号は、コンピュータに接続された USB オーディオインタフェースとパワーアンプによって出力された。トランスデューサの最大入力6Wで、実験を通してアンプからの出力レベルは固定した。振動刺激のレベルは、被験者が靴下越しに知覚するのに十分な大きさであった。足裏振動刺激装置は、アルミフレーム、振動子、アクリル、木板、バネで構成された。

振動子から発生する聴覚刺激を打ち消すために、被験者はノイズキャンセリングヘッドホン（SONY WH-1000XM4）を着用した。振動刺激の提示中、ヘッドホンからホワイトノイズ(70dBA)を提示した。

2.3 提示刺激・条件

地面質感の異なる4種類の全天球動画（屋内シーン、草原シーン、舗装路シーン、雪道シーン）を使用した（図1）。



図 1: 使用した全天球動画の各シーン（左上：屋内シーン、右上：草原シーン、左下：舗装路シーン、右下：雪道シーン）

全ての動画はカメラを手で持って撮影され、30秒間、ほぼ一定の速度(1.26–1.41m/s)で前方に移動した。雪道シーンは撮影が困難だったため、YouTube[5]から取得した。他のシーンは全天球カメラ(RICOH Theta Z1, 3840[width] x 2160[height] pixels, 29.97 fps)を用いて我々が撮影した。

足裏振動刺激は、左右の足の前足部と踵に提示した。振動刺激は動画中の地面質感の違いに応じて4種類用意した。音源は Unity アセット（Floor and Ground of Classic Footstep SFX, Footstep (Snow and Grass)）を使用した。振動の提示タイミングは、動画のカメラ位置の移動推定結果を利用して、事前に生成した（81 cm/stepとして、移動速度は1.56-1.74 steps/sで動画毎に異なった）。動画のカメラ位置と回転情報の遷移は、OpenVSLAM[6]で推定した。生成した左右2ch分の振動音源は、各足の爪先と踵の接地タイミングのズレを105[ms]に設定し、4ch化した。

振動提示条件は、動画中の地面質感と一致した振動条件、地面質感と一致しない他3環境の振動パターンをランダムに選定し、提示タイミングのみ再生中の動画に合わせた不一致条件、振動を提示しない条件の3条件とした。

被験者は48試行(4動画条件×3振動条件×4繰り返し)をランダムに試行した。

2.4 手続き

被験者は30秒間の刺激観察の後、主観評定に回答した。回答項目は、歩行についての4項目と地面の質感についての4項目である。

歩行についての感覚評定は、Visual Analog Scale(VAS)を用いて測定し、左端を「全くそう感じない」、右端を「現実のように感じる」とした。この評定項目は以前の研究に基づいた[1-2]。

- 歩行 1. 自分が移動している感じがする
- 歩行 2. 自分が歩行している感じがする
- 歩行 3. 自分が脚を動かし地面を踏んでいる感じがする
- 歩行 4. 自分がその空間にいるような感じがする

地面の質感についての評定も VAS を用いた。評定は対応関係を持つ形容詞対を予備実験で選定し、左端と右端に表示し回答を得た。

- 地面 1. (表面) ツルツル - 凸凹
- 地面 2. (硬度) 柔らかい - 硬い
- 地面 3. (状態) 湿っている - 乾いている
- 地面 4. (粘度) 滑る - 粘着する

回答は、0-100に離散化して分析に用いた。質問項目の順番は、各試行でランダムに表示した。

3. 結果

3.1 歩行に関する感覚評定

歩行に関する感覚評定データについて、正規性を満たさなかったため、整列ランク変換(aligned rank transform)を用いた二元配置分散分析(動画条件4水準×振動条件3水準)を行った(図2)。

全ての評定項目で振動条件の有意な主効果が認められた[self-motion: $F(2, 26) = 19.00, p < .0001, \eta_p^2 = 0.60$, walking: $F(2, 26) = 49.45, p < .0001, \eta_p^2 = 0.80$, leg action: $F(2, 26) = 78.47, p < .0001, \eta_p^2 = 0.86$, telepresence: $F(2, 26) = 13.07, p = .0001, \eta_p^2 = 0.50$]。また、振動条件と動画条件の交互作用が認められた[self-motion: $F(6, 78) = 3.23, p = .007, \eta_p^2 = 0.20$, walking: $F(6, 78) = 2.98, p = .011, \eta_p^2 = 0.19$, leg action: $F(6, 78) = 4.31, p = .0008, \eta_p^2 = 0.25$, telepresence: $F(6, 78) = 2.77, p = .017, \eta_p^2 = 0.18$]。

脚運動感と臨場感の評定項目で動画条件の有意な主効果が認められた[leg action: $F(3, 39) = 5.51, p = .0030, \eta_p^2 = 0.30$, telepresence: $F(3, 39) = 4.70, p = .0068, \eta_p^2 = 0.27$]。

単純主効果の分析を行った。全ての評定項目における全ての動画条件で、振動条件が一致の時または不一致の時、振動なしよりも有意に高かった。また、自己運動感覚と臨場感は、動画条件が雪道シーンで振動条件が一致の時は、

不一致よりも有意に高かった。歩行感覚は、動画条件が屋内シーンで振動条件が一致の時は、不一致よりも有意に高かった。脚運動感、動画条件が屋内シーンまたは雪道シーンで振動条件が一致の時は、不一致よりも有意に高かった。

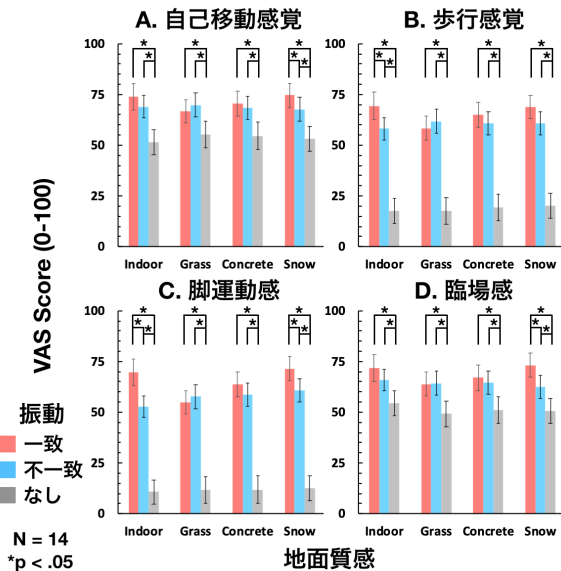


図 2: 歩行に関する感覚評定の結果

3.2 地面質感識別に関する評定

地面質感に関する感覚評定データについて、地面 1 (表面の滑らかさ) は正規性を満たし、地面 2・3・4 (硬度・状態・粘度) は正規性を満たさなかった。そのため表面評定では二元配置分散分析、硬度・状態・粘度評定では整列ランク変換 (aligned rank transform) を用いた二元配置分散分析 (動画条件 4 水準×振動条件 3 水準) を行った (図 3)。

全ての評定項目で動画条件の有意な主効果が認められた [Surface: $F(3, 39) = 26.77, p < .0001, \eta_p^2 = 0.67$, Hardness: $F(3, 39) = 47.07, p < .0001, \eta_p^2 = 0.78$, Condition: $F(3, 39) = 19.64, p < .0001, \eta_p^2 = 0.60$, Viscosity: $F(3, 39) = 4.83, p = .006, \eta_p^2 = 0.27$]。また、動画条件と振動条件の交互作用が認められた [Surface: $F(6, 78) = 10.63, p < .0001, \eta_p^2 = 0.45$, Hardness: $F(6, 78) = 25.14, p < .0001, \eta_p^2 = 0.66$, Condition: $F(6, 78) = 9.31, p < .0001, \eta_p^2 = 0.42$, Viscosity: $F(6, 78) = 4.19, p < .0001, \eta_p^2 = 0.24$]。

表面と粘度の評定項目では、振動条件の有意な主効果が認められた [Surface: $F(1.22, 15.86) = 7.09, p = .013, \eta_p^2 = 0.35$, Viscosity: $F(2, 26) = 13.75, p < .0001, \eta_p^2 = 0.51$]。

単純主効果の分析を行った。屋内シーンの表面・硬度・状態評定において、振動条件が一致の時は、不一致と比較し有意な差があった。また、硬度・状態・粘度評定において、振動条件が一致の時は、提示なしと比較し有意な差があった。

草原シーンの硬度評定において、振動条件が一致の時は、不一致と比較し有意な差があった。また、表面・硬度・粘度評定において、振動条件が一致の時は、提示なしと比較

し有意な差があった。

舗装路シーンの硬度・状態評定において、振動条件が一致の時は、不一致・提示なしと比較し有意な差があった。また、表面・粘度評定において、振動条件が不一致の時は、提示なしと比較し有意な差があった。

雪道シーンの全ての評定において、振動条件が一致の時は、不一致・提示なしと比較し有意な差があった。

動画シーン毎に評価パターンを分析した。屋内シーンと舗装路シーンの評価パターンは類似しており、シーンと振動が一致している場合、ツルツルであり硬く乾いていると評価された。不一致条件ではこれらの回答がより中立的になった。草原シーンは、シーンと振動が一致している場合、でこぼこで柔らかいと評価された。不一致条件ではむしろツルツルで滑りそうという評価になった。雪道シーンは、シーンと振動が一致している場合、デコボコで柔らかく濡れていて、粘着すると評価された。不一致条件では、むしろツルツルで滑りやすいと評価された。

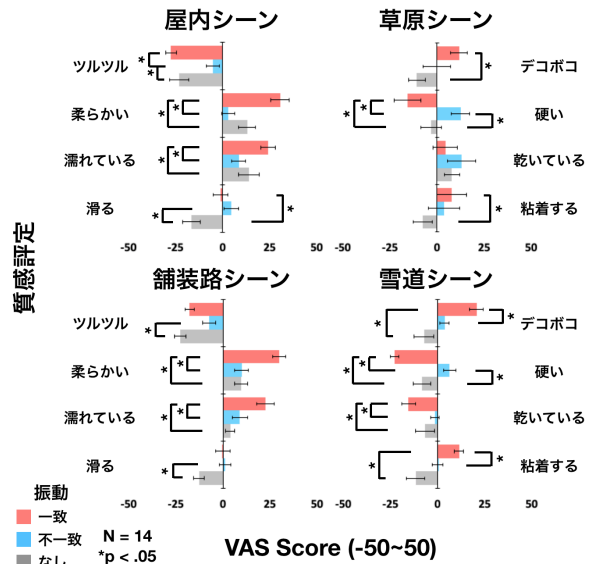


図 3: 地面質感識別に関する評定の結果

4. 考察

4.1 歩行に関する感覚評定

動画中のシーンと一致する振動は、雪道シーンで自己移動感覚・脚運動感・臨場感を改善し、屋内シーンで歩行感覚と脚運動感を改善した。振動の有無は全ての動画条件において、振動の提示が感覚を改善すること示した。

この結果は、動画中のシーンと一致する振動がバーチャルな歩行体験の改善に有効であることを示唆している。一方で、改善効果は振動の種類によって異なる。雪道シーンの歩行は他のシーンより特徴的な触覚のため、一致した振動により地面の知覚が適当になされ、改善効果が大きい結果が得られたと考えられる。将来的には、他のシーンにおいても地面の知覚に理想的な振動パターンを見出し、検討すべきである。

4.2 地面質感に関する評定

動画によりシーン提示と同時に振動を提示することは、振動の提示の有無、もしくは一致・不一致間で有意な差がある。また、屋内シーンと舗装路シーンは質感評定の傾向が類似したが、草原シーンと雪道シーンはそれぞれ特徴的なパターンを示した。

この結果は、提示する振動刺激やその有無により地面質感の知覚が変化することを示唆している。屋内シーンや舗装路シーンの硬度評定や状態評定では、シーン提示と一致する振動とそれ以外で与える感覚が異なる。

一方で、シーン提示と不一致な振動は、本来得られる感覚とずれた感覚を被験者に与えることがある。屋内シーンの表面評定、雪道シーンの硬度評定では、シーンと一致する振動と振動無しの評定は類似しているが、シーンと不一致な振動は前者と異なる知覚をもたらすことがある。

したがって、足裏振動は地面質感の知覚に貢献することが示唆された。

5. 結論

本研究では任意の全地球動画からバーチャルな歩行体験を生成するシステムを作成し、地面質感に応じた足裏振動が歩行体験や地面識別に寄与するかを評価した。実験により、地面質感と一致する振動は歩行体験を改善し、振動情報は地面質感の知覚に影響を与えることが示された。

地面質感に対応した足裏振動はユーザーの歩行体験を高めると共に、歩行中の地面状況を捉えることに寄与するため、より良いバーチャルな旅行体験への応用や最適な振動パターンの生成や評価への展開が考えられる。一方、地面質感の評定項目により、地面質感を考慮しない振動は、振動を提示しない時と比べて違和感として評価される場合があり、触覚情報の重要性が示唆された。

謝辞 本研究は、JSPS 科研費 (18H04118) および JST ERATO Grant Number JPMJER1701 (稲見自在化身プロジェクト) の補助を受けて行われた。

参考文献

- [1] M. Kitazaki, T. Hamada, K. Yoshiho, R. Kondo, T. Amemiya, K. Hirota, and Y. Ikei. Virtual walking sensation by pre-recorded oscillating optic flow and synchronous foot vibration. *i-Perception*, 10(5), 1-14. 2019.
- [2] 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.
- [3] L. Terziman, M. Marchal, F. Multon, B. Arnaldi, and A. Lécuyer. The King-Kong Effects: Improving sensation of walking in VR with visual and tactile vibrations at each step. In *2012 IEEE Symposium on 3D User Interfaces (3DUI)*, 19-26. 2012.
- [4] M. Ernst, and M. Banks. Humans integrate visual and haptic information in a statistically optimal fashion. *Nature*, 415(6870), 429- 433. 2002.
- [5] Preston Wright. 360 snow walk - <https://youtu.be/7od8MpjOmp0> (2021年7月19日 確認).
- [6] S. Sumikura, M. Shibuya, and K. Sakurada. OpenVSLAM: A Versatile Visual SLAM Framework. In *Proceedings of the 27th ACM International Conference on Multimedia (MM'19)*, 2292-2295. 2019.