



振動パターンが足裏錯触覚生起の 時間的推移に与える影響

Effects of Vibration Patterns on Temporal Transition
of Tactile Illusion on Sole

中村一貴¹⁾, 橋本悠希^{1),2)}

Kazuki NAKAMURA, and Yuki HASHIMOTO

1) 筑波大学 (〒305-8577 茨城県つくば市天王台 1-1-1, k_nakamura@vrlab.esys.ysukuba.ac.jp,
hashimoto@iit.tsukuba.ac.jp)

2) 国立研究開発法人科学技術振興機構 さきがけ (〒102-0076 東京都千代田区五番町 7 K's 五番町)

概要: 我々は足爪振動刺激によって、足指裏側に錯触覚を提示する手法を提案してきた。その先行研究の中で、歩行時に足の接地に合わせて足爪振動刺激を提示した際に、時間の経過に伴い足裏錯触覚の知覚が向上することを実体験として得られた。向上した要因が歩行をしているという感覚にあると考え、座位において歩調を模した受動的な振動刺激を両足爪に提示することで歩行感覚を生成し、足裏錯触覚の知覚が時間の経過に伴って向上するか否かを検証した。その結果、歩行感覚が足裏錯触覚の生起を向上させている要因であることが示唆された。

キーワード: 足裏錯触覚, 錯触覚, 歩行感覚

1. 緒言

人間の歩行動作において足裏からの触覚情報は、姿勢バランスの安定化や地面触覚の取得といった重要な役割を担っている[1]。また、足裏から得られる砂や芝生などの触覚は歩行のモチベーションの向上に繋がる。そこで、足裏に錯触覚を提示することによって、バーチャルリアリティにおける没入感の向上や、リハビリテーションにおける歩行の安定化が期待されている。従来の足裏への錯触覚提示手法では、足裏に直接振動刺激を提示することで錯触覚を提示している[2][3]。しかし、これらの手法は足裏と地面との間にアクチュエータが存在するため、足裏から得られる地面の感触を阻害しているという問題点がある。

これに対し、我々は足爪振動刺激による足裏錯触覚現象を利用した手法に着目してきた[4]。足裏錯触覚現象とは、足爪側よりも足指裏側の触覚感度が高いという触覚感度差によって、爪上に振動を提示しているにも関わらず、足指裏側に強く振動を知覚する現象のことである。この手法では爪側に振動を提示するため、足裏に伝わる地面本来の触覚情報を阻害することなく新たな触覚情報を重畳して提示することが可能である(図1)。我々はこれまで静止状態において足裏錯触覚が生起するために必要な条件を明らかとしてきた。しかし、リハビリテーションなどの歩行

時での利用を考慮すると、歩行状態で生起する条件を明らかとする必要がある。歩行状態での足爪振動刺激の提示は分単位の長時間で行うため、順応現象が生じることが考えられる。そのため、これまでの研究で提示してきた定常的な刺激ではなく、足の接地に合わせて提示する断続的な刺激である必要がある。また、歩行状態では静止状態とは異なり、足の接地に合わせて能動的に荷重が変化することになる。そのため、加重時の振動刺激の提示時間が短く、錯触覚が生起しにくくなることが考えられる。しかし、これまでの研究の中で、足爪振動刺激を足の接地に合わせて歩行時に提示した際に、時間の経過に伴って錯触覚の知覚が向上したことが実体験として得られた。もし、歩行時に錯触覚の知覚が向上した要因を明らかにすることが出来れば、歩行時においても安定して足裏錯触覚を提示することが可能となる。そこで、本研究では向上した要因が歩行をしているという感覚にあると考え、歩行感覚と足裏錯触覚生起の時間的推移の関係について検証を行う。

本稿では足裏錯触覚の生起条件が明らかとなっている静止状態で歩行感覚を生成するために、爪上振動刺激を歩調に模した間隔で提示する手法を用いて、歩行感覚と足裏錯触覚生起の時間的推移の関係について検証を行う。

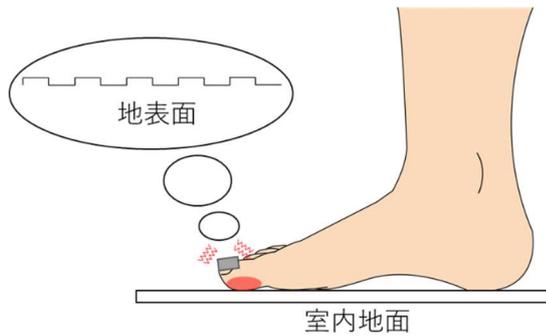


図 1 爪上振動刺激による足裏錯触覚現象

2. 実験

本実験では、歩調を模した一定間隔の爪上振動刺激を提示することで歩行感覚が生成され、足裏錯触覚の生起が向上するか否かの検証を行う。また、ランダムな間隔で提示を行う場合、提示間隔を設けない場合と比較を行うことで、歩行感覚の大きさによる足爪側と母趾裏側の知覚の関係性についての検証も行う。

2.1 実験装置

2.1.1 爪上刺激部

本実験では、両足の母趾爪上に振動子(日本電産コバル株式会社: LD14-002)を爪用両面テープで接着することで振動を提示した(図 2)。マイクロコントローラ(ARM ltd: mbed NXP LPC 1768)のデジタル出力端子から出力した矩形波を DA コンバータ(Linear Technology: LTC1660CN)でアナログ出力へと変換し、オーディオアンプ(DIODES: PAM8403)で増幅したものを振動子に出力した。周波数は使用する振動子の共振周波数である 150Hz とした。加速度センサ(Kionix: KXR94-2050)を振動子の上に固定し、振動強度の測定を行った。

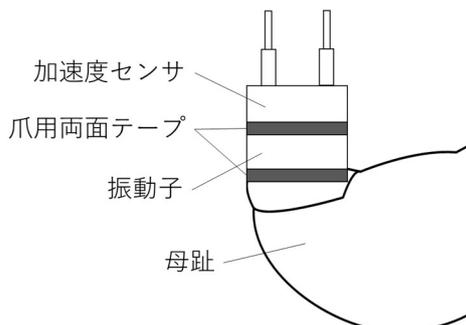


図 2 振動子と加速度センサ

2.1.2 荷重統制装置

本実験の装置構成を図 3 に示す。本実験では図 4 で示す天秤型装置を 2 つ用いることで、被験者の両足母趾裏にかかる荷重を統制した。天秤の片側に母趾裏を、反対側に重り(シンワ測定株式会社: 下げ振り錘 静止機構付 スイピタ 400g)を吊るし、母趾裏に荷重をかけた。過去の知見[5]では、最も錯触覚が生起しやすい荷重は 1200gf であるとされている。しかし、長時間被験者に荷重をかける

本実験において、この荷重では天秤の水平を保持することが困難である。そこで予備実験を行い、1200gf と比べ生起確率に差がなく荷重の小さい 800gf を本実験で用いる荷重とした。天秤の傾きは重り側に取り付けた測距センサ(ST マイクロエレクトロニクス株式会社: VL53L0X)を用いて測定した。被験者に LED が搭載されたゴーグル(図 5)を装着し、天秤の傾きが上下 0.5 度を超えた場合に右足であれば赤色、左足であれば緑色の LED が点灯することで水平の有無を知らせた。

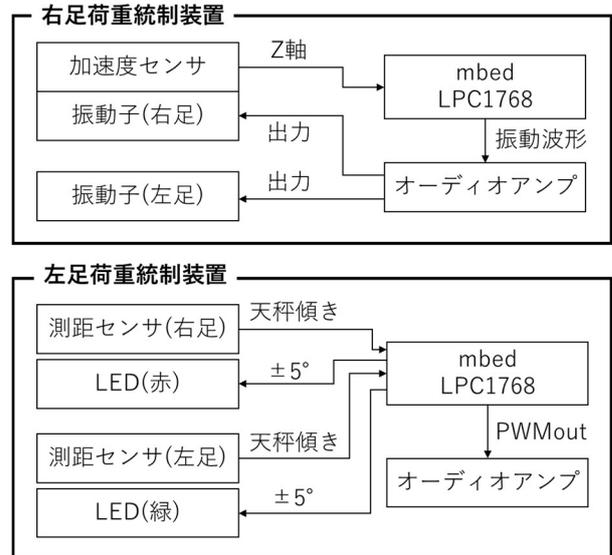


図 3 実験構成

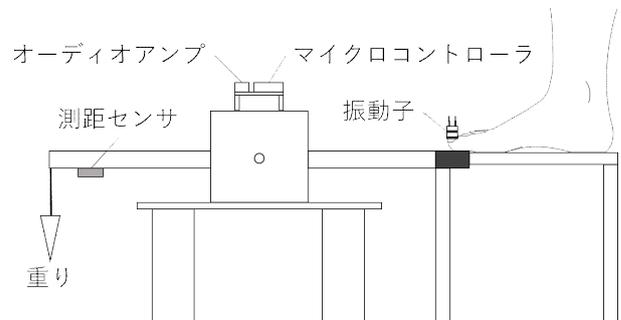


図 4 荷重統制装置

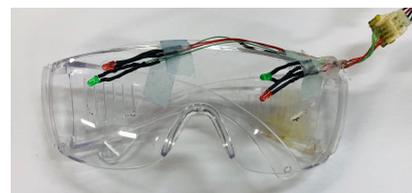


図 5 LED 搭載ゴーグル

2.2 実験条件

2.2.1 振動パターン条件

本実験で用いた 3 種類の振動パターンを図 6 に示す。1 つ目は、歩行感覚を有する歩調を模した歩行刺激である。刺激時間を 250ms とし、刺激間隔は 20 代男性の平均歩調と

される 115BPM とした[6]. 2つ目は、歩行感覚を生成しない、または小さいと考えられる非同期の間隔で刺激するランダム刺激である。刺激時間は上述した歩行刺激と同じであるが、刺激間隔は、人が遅いと知覚する歩調である 80BPM と人が速いと知覚する歩調である 150BPM の間から片足の刺激提示ごとに無造作に選出した。3つ目は、順応現象が生じると考えられる定常刺激である。歩行刺激とランダム刺激の刺激時間は、予備実験で歩行時の母趾裏に荷重がかかる時間を計測することによって決定した。

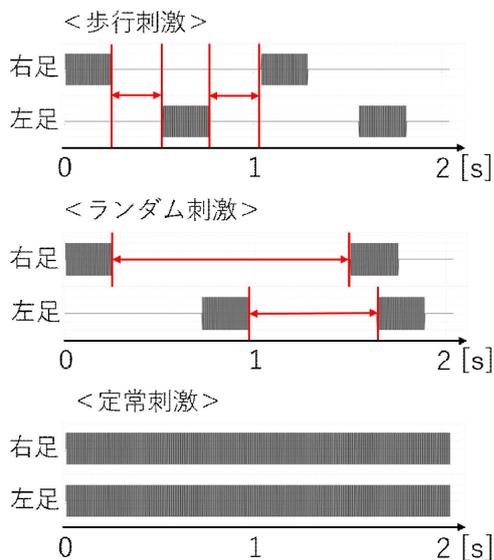


図 6 提示した振動パターン

2.2.2 回答条件・生起条件

被験者は右足母趾爪上に提示される刺激に対して、爪側と母趾裏側の知覚をそれぞれ 5 段階のリッカート尺度 (1: 全く知覚しない, 2: あまり知覚しない, 3: どちらともいえない, 4: やや知覚する, 5: 非常に知覚する) で回答した。回答のタイミングは右手首に取り付けた振動子 (株式会社アークヴラボ: Vibro Transducer Vp2 10Ω) を振動させることによって被験者に知らせた。

被験者は刺激提示後に 0-10 の Visual Analogue Scale (VAS) を用いて歩行感覚について評価を行った。VAS の両端指定は「歩行をしている感覚はない, 実際の歩行時と同等の感覚がする」である。

2.2.3 被験者条件

22~24 歳の健康な男性 6 名が実験に参加した。実験中は、視聴覚による情報を遮断するために LED を搭載したゴーグルの上からアイマスクとホワイトノイズの流れるヘッドホン装着した。

2.3 実験手順

被験者ごとに爪の共振特性が異なるため、振動子を同出力で振動させたとしても同じ振動強度にはならない。そのため、被験者ごとに加速度センサを用いて振動強度

を統制した。被験者は右足の母趾を台座に空いた穴の上に合わせ、地面に水平な状態で宙に浮かす。実験者は振動の出力を徐々に上げていき振動強度を設定する。本実験では振動強度を 0.5G と経験的に選定した。また、左右の振動子の張り付け方の違いによって振動強度が異なることが考えられるため、振動知覚強度の主観的等価点の統制を行った。右足、左足の順で母趾爪上に振動を提示後、被験者は右足の刺激に対して左足の振動の知覚を三件法 (小さい, 同じ, 大きい) で回答した。左足の知覚強度の上限値, 下限値をそれぞれ 3 回計測し、6 回平均を主観的等価点とした。

実験は以下の手順で行った。

- (1). 15 分間振動を提示する。
 - (2). 30 秒ごとに被験者は爪側と母趾裏側の知覚を回答する。
 - (3). 15 分経過後、被験者は VAS による歩行感覚の評価を行う。
 - (4). 5 分間の休憩を行う。
- (1)-(4)を繰り返す (振動パターン 3 条件, 計 3 試行)。

順序効果をなくすため、提示する振動パタンの順序をランダムにし、全被験者で 2 回以上順序が同じにならないようにした。

3. 実験結果

経過時間ごとの爪側と母趾裏側の主観的評定値を図 7 に示す。歩行刺激では、時間の経過に伴い爪側の知覚が 1.5 程度減少し、母趾裏側の知覚が 2.5 程度増加した。また、振動の提示から 500 秒で母趾裏側の知覚が爪側の知覚を上回った。ランダム刺激では爪側の知覚はほぼ減少せず、母趾裏側の知覚が 1.0 程度増加したが、母趾裏側の知覚が爪側の知覚を超えることはなかった。定常刺激では爪側の知覚において 120 秒まで急激に減少し、母趾裏側の知覚を下回った後、2.0 付近で変化が見られなくなった。母趾裏側の知覚においては変化が見られず、3.0 付近の値を取り続けた。

VAS による歩行感覚の評価結果を図 8 に示す。歩行刺激の評価値は、定常刺激、ランダム刺激、歩行刺激の順に高くなり、平均値はそれぞれ、0.4, 2.2, 4.3 となった。Wilcoxon の符号順位検定を行った結果、全ての振動パターン間で有意差が認められた ($p < .05$)。

4. 考察

実験結果から、歩調を模した一定間隔の振動刺激を爪上に提示することで、爪側の知覚が減少、母趾裏側の知覚が向上し、爪側の知覚を母趾裏側の知覚が上回った。このことから、歩調を模した提示間隔で振動刺激を提示することで足裏錯触覚の生起が向上することが示された。このような傾向を示した理由として、歩行をしているという感覚が足裏の触覚フィードバックに影響を及ぼし、足底の触覚感度を向上させると同時に、相対的に爪側の知覚が減少した

ことが原因であると考えられる。これはランダム刺激において、母趾裏側の主観的評定値の向上率と歩行感覚評価値が歩行刺激に比べ半分程度となっていること、定常刺激において、歩行感覚評価値が低く、母趾裏の知覚が向上せずに低い値を取り続けたことから歩行感覚が母趾裏の知覚を向上させている要因であると言える。また、ランダム刺激では歩行感覚が小さく、母趾裏の知覚の向上率が小さかったことにより、それに伴って爪側の知覚の減少量が抑えられたと考えられる。以上の結果から、歩行感覚の大きさに比例して足裏錯触覚の生起が向上することが考えられる。

定常刺激の爪側の主観的評定値において 120 秒あたりまで急激な知覚の減少が見られた。これは順応現象が生じたことによるものであると考えられ、この急激な爪側の知覚の減少が歩行刺激とランダム刺激で見られないことから、足が接地する程度の短い提示時間では順応現象が生じないことが示された。

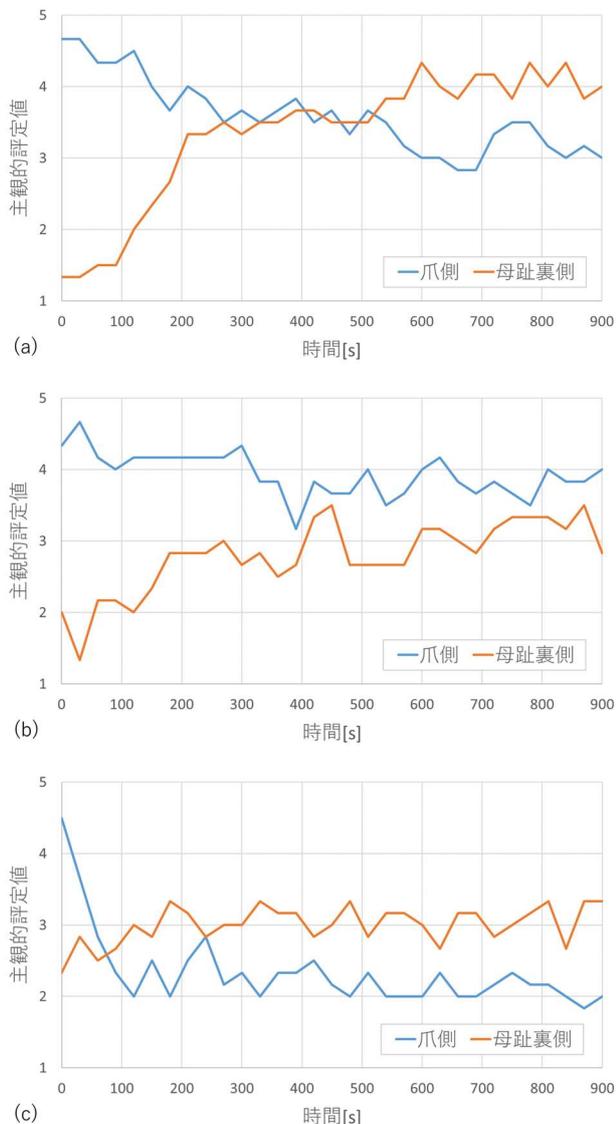


図 7 主観的評定値の時間的推移：(a) 歩行刺激、
(b) ランダム刺激、(c) 定常刺激

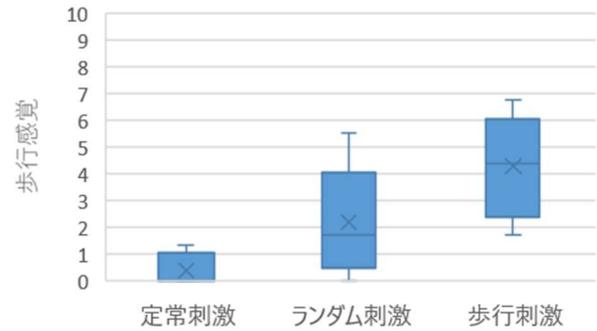


図 8 各振動パターンにおける歩行感覚の評価

5. 結言

本稿では歩調を模した一定間隔の爪上振動刺激を提示することで歩行感覚が生成され、足裏錯触覚の知覚が向上することを確認した。また、提示間隔の違いから生じる歩行感覚の大きさと、爪側と母趾裏側の知覚の関係性について検証を行った結果、生成される歩行感覚の大きさに比例して母趾裏側の知覚が向上したことから、歩行感覚が足裏錯触覚の生起を向上させる要因であることが示唆された。

課題として本稿における手法では生成される歩行感覚が小さい点が挙げられる。座位において歩行感覚を生成する手法としては足底への触覚刺激以外に、歩行映像や歩行音といった視聴覚刺激[7]や身体揺動刺激[8]を用いた手法が挙げられる。今後はこれらの手法を本研究で用いた足爪振動刺激手法と合わせることで歩行感覚を増強し、さらなる錯触覚生起の向上を図っていく。

参考文献

- [1] Palluel E., Nougier V., Olivier I.: Do spike insoles enhance postural stability and plantar-surface cutaneous sensitivity in the elderly?, Age(Dordr), 2008, pp.30(1), 53-61.
- [2] Visell Y., Law A. and Cooperstock J.R.: Touch Is Everywhere: Floor Surfaces as Ambient Haptic Interfaces," IEEE TOH, 2009, vol. 2, no. 3, pp. 148-159, 2009.
- [3] Turchet L., Burelli P. and Serafin S: Haptic Feedback for Enhancing Realism of Walking Simulations, IEEE Trans Haptics, vol. 6, no. 1, pp. 35-45, 2013.
- [4] 酒井, 蜂須, 橋本: 足爪振動刺激を用いた足指腹錯触覚提示に関する研究: 母趾への錯触覚生起における荷重条件の検証, TVRSJ, vol. 22, no. 3, pp. 349-357, 2017.
- [5] 内田: 微弱刺激による足指裏への錯触覚増強手法," 筑波大学大学院修士論文, 2019.
- [6] 山崎, 佐藤: ヒトの歩行 -歩幅, 歩調, 速度およびエネルギー代謝の観点から-, 人類誌, 98(4), pp.385-401, 1990.
- [7] A. L'écuyer, J.M. Burkhardt, J.M. Henaff, S. Donikian.: Camera motions improve the sensation of walking in virtual environments. ,IEEE VR pp. 11-18, 2006.
- [8] 雨宮, 北崎, 池井: 上下揺と旋回の受動的な身体揺動による疑似歩行感覚の生成, TVRSJ, Vol24, No4, pp