



足背部・足根管部への振動刺激による 中足部・後足部への足底錯触覚提示

鳥谷部孝大¹⁾, 橋本悠希²⁾

1) 筑波大学 システム情報工学研究群 (〒305-8577 茨城県つくば市天王台 1-1-1, s2420783@u.tsukuba.ac.jp)

2) 筑波大学 システム情報系 (〒305-8577 茨城県つくば市天王台 1-1-1, hashimoto@iit.tsukuba.ac.jp)

概要: 我々は、足背側に振動刺激を加えることにより、足底でその振動を知覚する足底錯触覚提示手法を用いて、歩行時に本来の地面環境を阻害せずに新たな触覚を重畳する取り組みを行っている。これまでの研究では、前足部の広範囲で本錯触覚の生起が確認されているが、中足部および後足部への範囲拡大が課題であった。本稿では、足背部および足根管部への振動刺激に対する本錯触覚の生起有無を検証し、中足部および後足部に対する足底錯触覚提示の可能性について報告する。

キーワード: 錯触覚, 足底感覚, 振動

1. はじめに

近年、バーチャルリアリティ (VR) 技術の発展により、人間の身体動作に応じた触覚を提示することによる VR 環境下での没入感の向上が期待されている。触覚を提示する部位の一つとして足底が挙げられる。これは、足底から得られる触覚情報によって周囲の地面環境の認識や姿勢の制御を行うためである[1][2]。足底への触覚提示により、VR 空間内における没入感の向上や座位状態での歩行感覚の提示、加齢に伴う足底の触覚感度低下による高齢者の立位バランス低下の改善等、人間に新たな体験や身体補助を行うことができる。主な触覚提示の方法として振動刺激を与える方法があり、これは振動の情報を変化させることで様々な種類の触覚情報を再現することができる。足底に振動刺激を与える方法として、靴のインソール部に振動子を埋め込み振動させる方法が挙げられる[3]。しかし、これは足底を直接振動刺激する方法であり、人間が足底を通して得る地面の感触を阻害することや、インソールによるクッション性の損失といった問題点が挙げられる。また、ほかの方法として、床面振動によるものがある。これは体験者に振動アクチュエータを取り付ける必要が無いが、装置が大型であることや歩行範囲が装置の範囲に限られる問題がある[4]。

そこで我々は、図 1 に示すように、足底を直接振動させないことで、本来の地面感触を阻害することなく新たな触覚を提示できる足底への錯触覚提示を行ってきた。これまでに、足爪上振動刺激、足背側第一及び第五中足骨頭部それぞれの部位への刺激により足底錯触覚が生じることを確認している[5][6]。また、これらの振動刺激を組



図 1: 足背側振動刺激による足底錯触覚提示手法

み合わせることで前足部の広範囲について錯触覚を提示できることが確認されている[6]。しかし、実際の歩行では足底の中足部、後足部も地面に接して触覚情報を得るため、現状の提示範囲では不十分である。

このため我々は、足底への錯触覚提示の広範囲化を目的として、新たに中足部、後足部で錯触覚が生起する可能性を検討する。本稿では、中足部、後足部に錯触覚が生じ得る提示部位、最適な振動強度条件をそれぞれ同定する試みについて報告する。

2. 予備実験

本実験では、足底錯触覚の生起が確認された足爪上、足背側第一及び第五中足骨頭部以外で、足底の中足部、後足部への錯触覚提示が可能な足背部や足根幹部における振動刺激の提示部位を明らかにすることを目的とする。

2.1 実験装置

本実験で使用した装置について述べる。

足背部への振動提示には振動子(日本電産コパル株式会

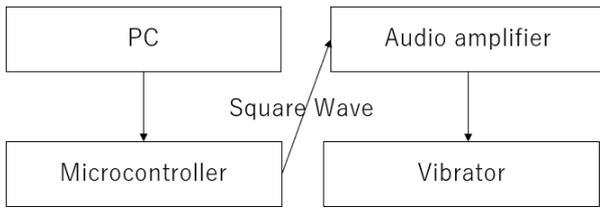


図 2: 実験装置の構成

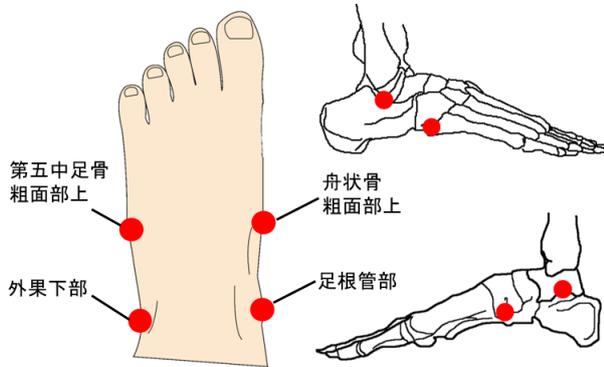


図 3: 予備実験での振動刺激提示部位

表 1: 予備実験結果

生起確率[%]	刺激部位			
	舟状骨粗面部	足根管	外果下部	第五中足骨粗面部
	87.5	75	50	100

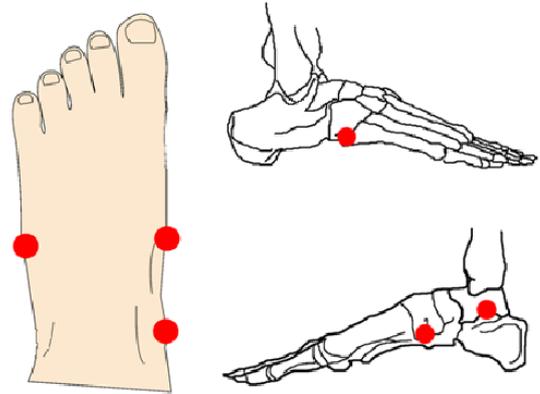


図 4: 振動刺激提示部位

社: LD14-002), オーディオアンプ(Adafruit : MAX98306 搭載 3.7 W ステレオ D 級アンプモジュール)を用い, 振動の制御はマイクロコントローラ(Espressif Systems :ESP32)を用いた(図 2). また, 振動の入力波形には, 人が知覚しやすい波形である, 矩形波を用いた[7]. 振動の周波数は, 振動子の共振周波数である 150 Hz とした.

2.2 振動刺激提示部位

本実験では, 刺激部位を図 3 に示す第五中足骨粗面部, 舟状骨粗面部, 外果下部, 足根管部の 4 点で行った. 第五中足骨粗面部や外果下は腓腹神経から伸びた外側足背皮神経が通るほか, 外側足底神経に近く刺激が伝搬しやすいのではないかと予想する. また, 舟状骨上や足根管部は足底へつながっている腓骨神経や伏在神経が通っており, 振動が神経を介して足底に伝わると考えられる. このことから, 以上 4 点に振動刺激を印加し足底錯触覚の生起について検証を行う.

2.3 実験方法

各被験者(20 代男性 8 名)の先述した提示部位一箇所ずつに振動刺激を印加し, 足底錯触覚生起の有無を検証する. 被験者はアクリル板の上に立ち, 振動子を取り付けた後, 振動強度や足底への荷重を自由に調整し, 足底に振動を感じたか回答する.

2.4 実験結果

実験結果を表 1 に示す. 第五中足骨粗面部を振動刺激した際に, すべての被験者が足底に振動を知覚した. また, 舟状骨粗面部と足根幹部に関してもほとんどの被験者が足底に振動を知覚したため, 外果下部を除く提示部位において足底への錯触覚の生起が期待できる. また, ほとんどの被験者が振動を知覚した地点での振動強度は 2.5G 付近であった.



図 5: 実験風景

3. 足底錯触覚生起確率検証実験

本実験では, 振動強度の変化による錯触覚の生起確率について検証を行う. また, 既に, 足底に錯触覚の生起が確認されている部位における錯触覚の生起確率と比較する. また, 実験装置は予備実験と同様である.

3.1 振動刺激提示部位

予備実験より, 図 4 に示す外果下部を除いた 3 点を対象とした.

3.2 実験方法

本実験では, 各被験者(20 代男性 4 名)の先述した刺激部位それぞれに, 振動強度 1.5 G~3.0 G まで 0.5 G 刻みの振動刺激を与え, 足底錯触覚の生起確率を検証する. 振動強度の範囲は, 予備実験で知覚を感じた振動強度より設定した. 振動条件からランダムに抽出した振動を 1 つの振動強度につき 20 試行, 計 80 試行を行い, 錯触覚の生起確率を求める.

実験の手順を以下に示す.

- 1) 被験者は図 5 のように, アクリル板の上に乗る, 振動子を刺激部位に取り付ける. その後, ヘッドフォンとアイマスクを装着することで聴覚, 視覚情報を

遮断する。ヘッドフォンからはホワイトノイズを流す。

- 2) 1.5 G~3.0 G までの振動をランダムに抽出し、1 試行に対し、7 秒間振動を提示する。
- 3) 被験者は振動提示中、足底の荷重を満遍なく変更させ、振動停止後、足底に振動を感じたかを答える。手順 2), 3) を繰り返し行い、40 試行の後、3 分間の休憩をとる。休憩後、残り 40 試行を行う。これを振動部位ごとに行う。

3.3 実験結果

振動部位ごとの足底錯触覚生起率を図 6,7,8 に示す。横軸は振動強度、縦軸は生起確率の最小値、第 1 四分位点、中央値、平均値、第 3 四分位点、最大値を示している。舟状骨粗面部に関して、振動強度が 2.0 G で、生起確率 87.5% が最大となり、第五中足骨粗面部に関しては、すべての振動強度において生起確率が 75% を超え、振動強度が 2.5 G で生起確率 92.5% と最も高い結果となった。足根管部については、錯触覚の生起率が低い結果となったが、図 9,10 に示すように予備実験で錯触覚を知覚した被験者とそうでない被験者の間で実験結果が大きく異なることが分かった。予備実験で錯触覚を知覚しなかった被験者の生起確率は、10% 前後にとどまっていることに対し、予備実験で錯触覚を知覚した被験者の生起確率に関しては、振動強度が増すにつれて生起確率も上昇し、3.0 G で生起確率 90% となった。

また、各被験者の実験結果に着目すると、被験者によって生起確率が最大となる振動強度が異なることがわかった。さらに、振動強度の増加に伴って生起確率も上昇する場合もあれば、生起確率が最大となる振動強度を超えた場合に生起確率が下がる場合があることが判明した。

4. 考察

実験結果より、舟状骨粗面部と第五中足骨粗面部へ振動刺激を印加した場合、計測した振動強度の範囲すべてにおいて足底錯触覚の生起確率が 75% を超えることを確認した。先行研究の爪上刺激や第一及び第五中足部頭部上刺激による錯触覚の生起確率検証実験では、生起確率 75% を閾値としている[6][8]。そのため、舟状骨粗面部と第五中足骨粗面部上への刺激により、足底への錯触覚提示が可能であることが示唆された。しかし、錯触覚の生起確率のピークを示す振動強度が被験者ごとで異なるため、被験者全体の平均としてみた場合に振動強度のピークはあるものの、生起確率の差は 10% 未満にとどまっている。この要因として、振動強度を上げた場合に足背側で振動を強く知覚したために足底での錯触覚を知覚しにくくなったことが考えられる。そのため、各個人に最適な振動強度を特定し振動の提示を行うことでより効果的な触覚提示が可能となると考えられる。

さらに、特定の被験者において、足根管部への振動刺激が有効である可能性も示唆されたが、この部位に関しては

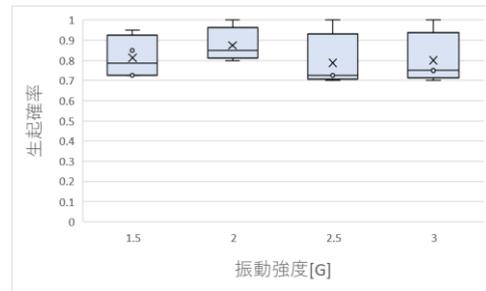


図 6: 舟状骨粗面部刺激による足底錯触覚生起率

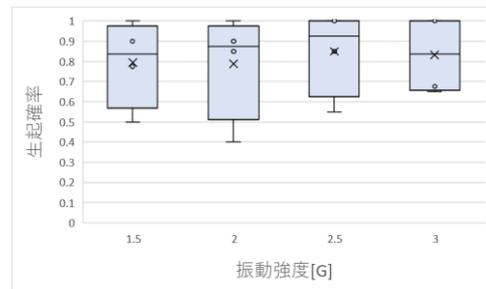


図 7: 第五中足骨粗面部刺激による足底錯触覚生起確率

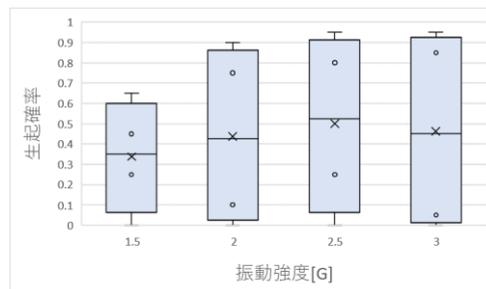


図 8: 足根管部刺激による足底錯触覚生起確率

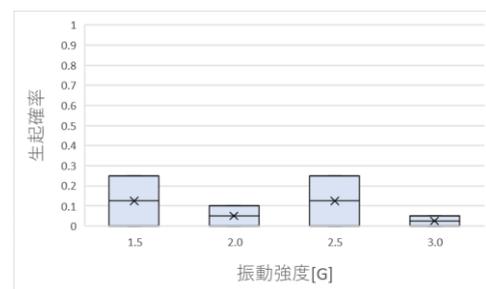


図 9: 予備実験で錯触覚を知覚しなかった被験者の足根管部刺激による足底錯触覚生起確率

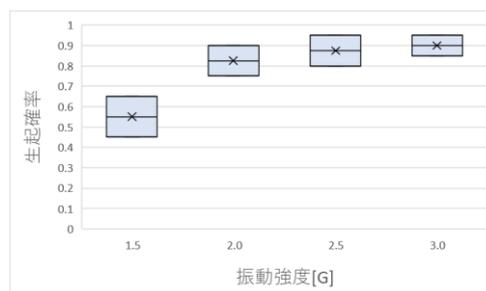


図 10: 予備実験で錯触覚を知覚した被験者の足根管部刺激による足底錯触覚生起確率

個人差が大きい。この要因の1つとして、足根管部へ正確に振動刺激を加えられていない可能性が考えられる。そこで、足根管への振動刺激における足底錯触覚の生起確率が低かった2名を対象とし、足根管が通る内果と踵の間で刺激箇所を変えながら予備実験と同様の検証を行った。その結果、1名が足底に振動を知覚できたことから、今後は足根管での振動刺激を加えるときに位置の微調整が必要となるため、被験者ごとに振動を知覚できる部位を把握する必要がある。そのほかにも、予備実験で錯触覚を知覚した被験者とそうでない被験者の違いを詳細に分析し、足根管部への刺激がどのように錯触覚を生起させるか探る必要がある。

5. まとめ

本稿では、中足部、後足部へ足底錯触覚提示範囲を拡大するために、新たに刺激部位について検証を行った。その結果、舟状骨粗面部と第五中足骨粗面上への刺激により、足底への錯触覚提示を確認した。足根管部については、被験者による生起確率の差が非常に大きいため、今後さらなる検証が必要となる。また、被験者ごとの振動強度と生起確率の結果からそれぞれにあった最適な振動強度を提示することで、足底錯触覚の提示確率を高めることが可能であることがわかった。以上より、提案手法による足底錯触覚提示範囲拡大の可能性が示された。

今後は、本実験では統制していない荷重条件と錯触覚の生起確率について検証を重ね、歩行時への応用を目標とする。また、錯触覚の生起が確認された複数の部位を同時に刺激し、仮現運動やファントムセンセーションを利用した錯触覚の生起についても検証を進めていく。

参考文献

- [1] E. Palluel, V. Nougier, I. Olivier “Do spike insoles enhance postural stability and plantar-surface cutaneous sensitivity in the elderly Age”, Vol. 30, No. 1, pp.53-61, 2008.
- [2] 崎田, 高杉, 河野, 熊谷: 足底, 下腿個別冷却後の足部外乱刺激に対する立位姿勢反応の重心および足圧中心偏位に与える影響, 理学療法科学, Vol. 22, No. 4, pp.449-455, 2007.
- [3] 渡邊, 安藤, 朝原, 杉本, 前田: 靴型インタフェースによる歩行ナビゲーションシステムの研究, 情報処理学会論文誌, Vol. 46, No. 5, pp.1354-1362, 2005.
- [4] L. Terziman, M. Marhcal, F. Multon, B. Arnaldi, A Lecuyer, “The King-Kong Effects: improving Sensation of Walking in VR with Visual and Tactile Vibrations at each Step”, IEEE Symposium on 3D User Interfaces 978-1-4673-1204-2, pp.19-26, 2012.
- [5] 酒井, 橋本: 足爪振動を用いた足底感覚提示手法における各指の知覚特性の検証, 日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, Vol. 20, pp.1-4, 2014.
- [6] 飯島: 足背側中足骨頭部への振動刺激による足裏錯触覚提示, 筑波大学大学院博士課程システム情報工学研究科修士論文, 2020.
- [7] 宮村, 小林, 白井: 人間の触覚感度および振動波形の統計的分析, 精密工学会学術講演会講演論文集, pp.468, 2003.
- [8] K. Sakai, T. Hachisu, and Y. Hashimoto, “Characteristics of illusory vibration in the toe pad induced by vibration applied to toenail and toe force to surface”, IEEE World Haptics 2017, Munich, pp. 281–286, 2017.