



第五中足骨先端上刺激による 足底触覚提示面積の拡大

飯島悠太郎¹⁾, 内田雅之¹⁾, 蜂須拓¹⁾, 橋本悠希^{1),2)}

- 1) 筑波大学 (〒305-8577 茨城県つくば市天王台 1-1-1, {y_ijima, m_uchida}@vrlab.esys.tsukuba.ac.jp, hachisu@ai.iit.tsukuba.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 (〒332-0002 埼玉県川口市本町 4-1-8)

概要: 我々は足爪上振動刺激によって、本来の足底の触感を阻害せずに、足底に錯触覚を提示する手法を提案してきた。しかし、爪上刺激のみでは、触覚提示面積に制限があるという課題があった。そこで、爪上に加え、第五中足骨先端上刺激によって足底に触覚を提示することで、触覚提示面積を拡大する手法を提案する。本稿では、提案手法を導出した予備実験及び、提案手法の振動強度ごとの生起確率検証実験について述べる。

キーワード: 足底触覚, 錯触覚

1. 緒言

足底は、身体において唯一、歩行動作時の地表面の形状を触覚情報として取得する部位であり、近年、足底の触覚が身体の運動、行動に影響を与えることが明らかになってきている[1][2]。したがって、足底にバーチャルな触覚情報を提示することで、人間の運動、行動を変化させることが可能になる。そこで、足底に様々な触覚を提示する手法が提案されてきている[3][4][5]。これらの内容は、ナビゲーションや地面感触の提示、歩行アシストなど多岐に渡る。そのため、足底への触覚提示は、今後、様々な分野で利用されることが期待できる。

また、近年、足の保護を目的としたクッション性の高い靴が流通し、足への負担が軽減される一方、このクッション性によって足底の触覚情報が減衰する問題が生じており、高齢者の転倒の原因の1つとも言われている[6]。そこで、減衰した足底の触覚情報を補う手法として、前述した足底触覚提示手法に着目する。従来の足底触覚提示手法は、足底に直接振動刺激を与えることで、触覚を提示している。しかしながら、これらの手法は、足底と地面の間に装置が組み込まれているため、足底から得られる地面の感触を阻害してしまう。そのため、足底への触覚提示には、本来の地面の感触を阻害せずに、新たな感触を重畳することが必要とされている。

これに対し我々は、足底触覚提示手法の一つとして、足爪上振動刺激によって足底に触覚を提示する手法を提案

してきた[7]。この手法は、手の爪上に振動刺激を提示し、指腹でその振動を知覚する錯触覚提示手法[8][9]を、足爪に応用したものである。足底と地面の間に装置を組み込む必要がないため、地面の感触を阻害せずに、新たな感触を重畳することを可能にしている(図1)。しかしながら、爪上のみ振動刺激を提示しているため、足底への触覚提示面積には制限がある。

そこで我々は、爪上刺激による足底への触覚提示に加え、爪上以外の部位でも足底に触覚を提示することができれば、足底触覚提示面積が拡大可能になると考え、足底触覚提示可能な足背部の刺激部位の検証を行った。

本稿では、足底触覚提示可能な足背部の刺激部位の検証により、新たな足底触覚提示手法を提案する。また、提案手法の振動強度ごとの生起確率検証実験によって、その有効性を明らかにし、足底触覚提示面積拡大の実現可能性を示す。

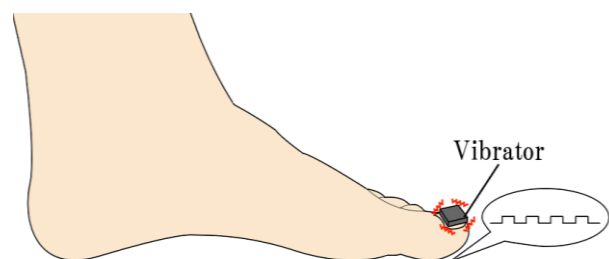


図 1: 足爪上振動刺激による足底触覚提示手法

Yutaro IJIMA, Masayuki UCHIDA, Taku HACHISU and Yuki HASHIMOTO

2. 予備実験：足底触覚提示可能な刺激部位の検証

本予備実験では、足底触覚提示面積を拡大するために、爪上以外で、足底への触覚提示が可能な足背部の刺激部位を明らかにすることを目的とする。

2.1 実験装置

足背部への振動提示に振動子(日本電産コパル株式会社: LD14-002), オーディオアンプ(Adafruit: MAX98306 搭載 3.7W ステレオ D 級アンプモジュール)を用い、振動強度の計測に加速度センサ(Kionix: KXR94-2050), 振動の制御にマイクロコントローラ(mbed NXP LPC1768 NXP Semiconductors)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[10]。振動の周波数は、振動子の共振周波数である 150Hz とした。

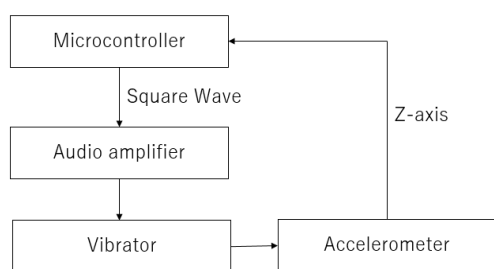


図 2: 実験装置の構成

2.2 振動刺激提示部位

本予備実験では足背部の刺激部位を図 3 に示す 5 点で行った。この 5 点はすべて足指の付け根である。足底側に着目すると、足指の付け根は、母指球や小指球があるように荷重がかかりやすい部位であり、地面との接触面積も大きい。そのため、この部位から多くの触覚情報を取得することが考えられる。また、足底触覚感度は、部位ごとに感度が異なり、足指付け根は、中足部外側や踵に比べて感度が高いといった結果が報告されている[11]。さらに、高齢者の足底には、接地していない部位が多くみられるため[12]、ほぼすべての人が接地する足指付け根は、足底の触覚情報の取得に重要な役割を担っている。以上のことから、本予備実験では、足背側の足指付け根に位置する、第一、第二、第三、第四及び第五中足骨先端上に振動刺激を与え、足底に触覚が生起するかを検証する。

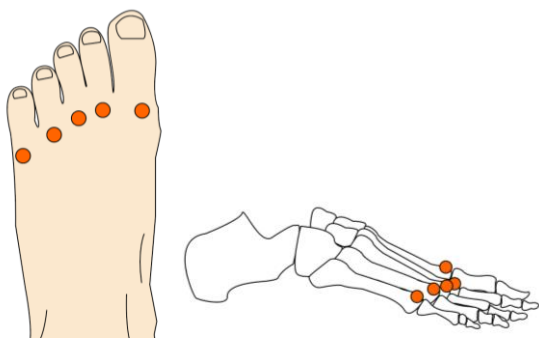


図 3: 予備実験における足背部振動刺激提示部位

2.3 実験方法

各被験者(20 代男性 2 名)の、5 つの刺激部位の一箇所ずつに振動刺激を与え、足底触覚の生起の有無を検証する。振動強度は、被験者自身に調整をしてもらう。また、振動刺激提示中は足底をアクリル板の上に接地し、足底への力の入れ具合も変化をさせる。

2.4 実験結果

本予備実験の結果、図 3 中の第一及び第五中足骨先端上に振動刺激した際に、すべての被験者で足底に触覚を知覚することができた。しかし、その他の刺激部位においては、足底に触覚を知覚することは困難であった。第一及び第五中足骨先端上は、共に足の側面付近に位置しているため、他の部位よりも足底へ振動を伝え易かったのではないかと考えられる。以上の結果から、爪上以外で足底への触覚提示が可能な刺激部位として、第一及び第五中足骨先端上が同定された。

3. 第五中足骨先端上刺激による足底触覚生起確率検証実験

予備実験により、足底への触覚提示が可能な足背部の刺激部位を特定した。本実験では、足底触覚提示面積拡大の第一段階として、第五中足骨先端上刺激について生起確率の検証を行う。また、先行研究の手法である第一趾爪上刺激についても生起確率の検証を行い、それぞれの結果の比較によって提案手法の有効性を示すことを本実験の目的とする。なお、本実験では予備実験と同一の装置を用いた。

3.1 振動刺激提示部位

本実験では、図 4 に示す第一趾爪上及び第五中足骨先端上に振動刺激を与えることで検証を行った。

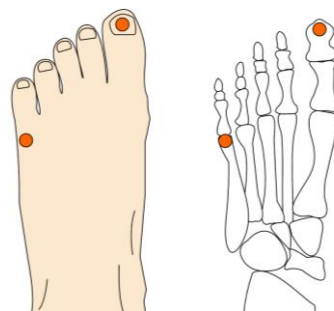


図 4: 振動刺激提示部位

3.2 実験方法

本実験では、各被験者(20 代男性 4 名)の爪上及び第五中足骨先端上それぞれに、振動強度 1.0G~2.5G まで 0.5G 刻みの振動刺激を与え、足底触覚の生起確率を検証する。振動はランダムに抽出し、1 つの振動強度につき 20 試行、計 80 試行分、振動刺激の提示を行う。実験の前に行う振動強度を調整する手順を以下に示す。ただし、1)は第五中足骨先端上刺激の場合のみに行う。

- 1) 被験者は図 5 のように足を握り、中足骨先端が浮き

- 出てくるようにすることで、刺激部位を確認する。
- 2) 加速度センサと振動子が一体となった振動装置を刺激部位に取り付ける。
 - 3) 握っていた足を伸ばし、地面と水平になるように足を浮かせ、その状態を維持する。
 - 4) 振動強度を徐々に大きくしていき、加速度センサの値をもとに振動強度を調整する。



図 5: 刺激部位を確認する際の足の形状

また、実験の手順を以下に示す。

- 1) 被験者は図 6 のように、アクリル板の上に乗る、ヘッドフォンとアイマスクを装着することで外部の音と視界を遮断する。ヘッドフォンからはホワイトノイズを流す。
 - 2) 1.0G~2.5G までの振動をランダムに抽出し、一つの振動刺激に対し、7 秒間振動を提示する。
 - 3) 被験者は振動が停止した後、足背部のみに振動を感じたか、足底にも振動を感じたかを答える。
- 2), 3) の手順を繰り返し行い、40 試行終わったら、3 分間休憩とる。休憩後、残り 40 試行を行う。以上の手順をそれぞれの刺激部位で行う。



図 6: 実験風景

3.3 実験結果

爪上及び第五中足骨先端上刺激による、足底触覚生起確率検証実験の結果をそれぞれ図 7,8 に示す。横軸は振動強度、縦軸は生起確率の平均値と標準偏差を示している。爪上及び第五中足骨先端上刺激、いずれの場合も、振動強度が 2.0G の時に、生起確率が最も高く、それぞれ 87.5%と 77.5%であった。また、提案手法は、振動強度が 2.0G 以上で、生起確率が 75%を超えるという結果を得た。さらに、爪上刺激と第五中足骨先端上刺激の各振動強度における生起確率について検定を行ったところ、有意差($p < 0.05$)は生じなかった。

爪上刺激の場合、先行研究[13]では、振動強度が強くなるにつれて足底触覚の生起確率が上昇することが確認されており、本実験においては、2.5G で若干減少するものの、

2.0G までは平均値及び全ての被験者の結果に上昇傾向があることを確認した。これに対し、第五中足骨先端上刺激の場合、平均値に関しては同様に 2.0G まで上昇傾向を示しているが、各被験者の結果に着目すると、全ての被験者で生起確率の最大値を取る振動強度が異なり、図 7, 8 に示すように、上昇傾向を示す人もいれば下降傾向を示す人もいた。しかしながら、被験者ごとの生起確率の最大値に関しては、4 人中 3 人が 90%を超えるという結果が得られた。

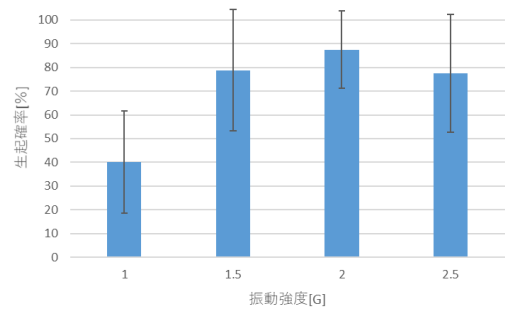


図 7: 第一趾爪上刺激による足底触覚生起確率

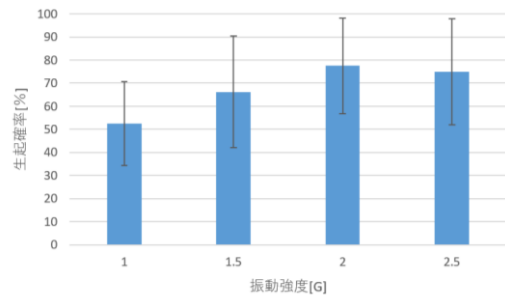


図 8: 第五中足骨先端上刺激による足底触覚生起確率

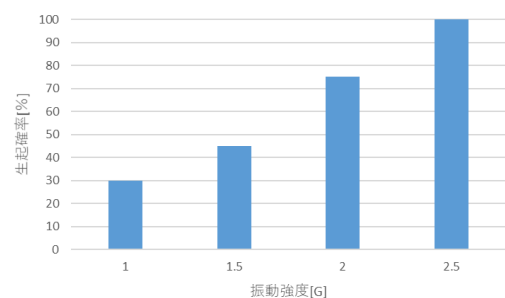


図 9: 振動強度の上昇に伴い生起確率が上昇した被験者

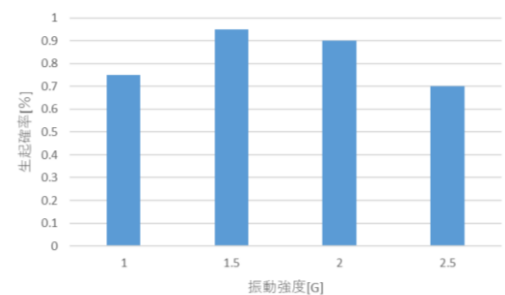


図 10: 振動強度の上昇に伴い生起確率が減少した被験者

4. 考察

実験結果から、第五中足骨先端上刺激によって、振動強度が 2.0G 以上の場合、足底触覚の生起確率の平均値が 75%を超えることが分かった。このことから提案手法は、高確率で足底に触覚を提示可能であることが示唆された。さらに、爪上刺激と第五中足骨先端上刺激の結果に有意差がなかったことから、提案手法が爪上刺激と同等の有効性を持つことを確認した。しかしながら、提案手法は、爪上刺激と異なり、振動強度が強くなるにつれ、生起確率が減少する結果を示す被験者もいた。その理由として、足背側の触覚が爪上に比べ、強く出てしまったことが影響しているのではないかと考えられる。実際に被験者から、振動強度が強い場合、足背側の触覚が強すぎて足底に触覚があるかがわからないという意見が得られた。しかし、逆に振動強度が強くなるにつれて、生起確率が上昇した被験者や、平均の生起確率が最も低い 1.0G の時に生起確率が最大値をとる被験者もあり、被験者によって振動強度ごとの足底触覚の生起確率の傾向は異なるという知見が得られた。さらに、被験者ごとの振動強度と生起確率の関係において、生起確率の最大値が 90%以上である被験者が 4 人中 3 人であった。このことから、提案手法は、個々人にあった振動強度を選定することで、さらに高確率で足底に触覚を提示することが可能になると考えられる。

5. 結言

本稿では、足底触覚提示面積を拡大するために、足爪上以外で足底に触覚提示が可能な足背部の刺激部位を検証し、第一及び第五中足骨先端上に振動刺激を与えることで、足底に触覚を提示できることを確認した。さらに、第五中足骨先端上振動刺激について、1.0G~2.5G まで 0.5G 刻みの振動強度で生起確率を検証した結果、2.0G 以上で生起確率が 75%を超え、爪上刺激と同等の有効性を持つことが示された。また、被験者ごとの振動強度と生起確率の結果から、個々人にあった最適な振動強度を選定することで、高確率で足底に触覚を提示可能であることを確認できた。以上のことから、提案手法の、足底触覚提示手法としての有効性並びに、爪上刺激との組み合わせによる、足底触覚提示面積拡大の可能性が示された。今後、予備実験で確認した第一中足骨先端上刺激についても、振動強度と生起確率の関係を検証していく。また、本手法は、最適な足底への荷重条件が明らかになっていくという課題がある。したがって、今後、足底への荷重条件と生起確率の関係についても明らかにする必要がある。

さらに、本手法を用いて、複数の部位に触覚を提示することが可能になれば、触覚提示部位間の仮現運動やファントムセンセーションといった錯触覚を生起する可能性がある。そのため、複数部位の振動刺激による足底触覚提示を用いた錯触覚に関しても、今後検証を進めていく予定である。

謝辞

本研究の一部は、JST さきがけ(JPMJPR17J7)の助成を受けたものである。

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”, 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] Terziman L., Marhcal M., Multon F., Arnaldi B., Lecuyer A. : 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] 大竹, 永谷, 昆陽, 田所 : 下肢への振動呈示による歩行サポートに関する研究 第 1 報 : 歩行時における下肢伝搬振動の計測・再生装置の開発, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2A2A07, 2013
- [6] 細田, 松田, 磯崎, 宮島, 柳澤, 高柳, “足底感覚と平衡機能”, 理学医療, 23(9), 1246-1253 (2006.9)
- [7] 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, 20, pp.1-4, 2014
- [8] 安藤, 渡辺, 稲見, 杉本, 前田 : Augmented Reality のための爪装着型触覚ディスプレイの研究, 電子情報通信学会論文誌, D-II, J87-D-II (11), pp.2025-2033, 2005
- [9] 橋本, 湯村, 米村, 飯塚, 前田, 安藤 : 爪上振動を利用する触覚伝送手法, 日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 16(3), pp.399-408, 2011
- [10] 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
- [11] 原田 : 歩行感覚支援のための足底刺激アクチュエータの研究開発, 法政大学大学院デザイン工学研究科紀要, Vol.4, 2015
- [12] 建内, 市橋 : 高齢者における足底感覚と足圧分布および足底接地状態 が立位バランス能力に与える影響, 京都大学医学部保健学科紀要, Vol.4, pp.25-30, 2008
- [13] 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:母指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