



足爪振動による足指裏への錯触覚現象の検証

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 丁目 1-1, 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：足底への触覚提示は、歩行安定化やバーチャルリアリティへの活用に注目されている。我々は足底触覚提示手法として、足爪を振動し足指裏に触覚を提示する錯触覚手法を提案してきた。従来は足爪への振動知覚の有無に関わらず、足裏に触覚が生じた際に、錯触覚現象とした。本稿では、錯触覚現象を「足爪を振動させているにもかかわらず、足指裏のみに振動刺激を感じる錯覚現象」と定義し、この錯覚現象の生起確率を検証する。

キーワード：錯覚現象 足底触覚提示

1. はじめに

地面の触覚情報の取得や、姿勢バランスを安定させる重心動揺の制御には、足底の触覚感覚が必要である。いままでに、足底に新たなテクスチャを付与し、没入感を向上させるバーチャルリアリティへの応用や、歩行安定化を目指したリハビリテーションに、足底触覚提示が研究されてきた [1][2][3][4]。例として、床面自体を振動させ地面の感触再現する手法[1]や、靴のインソール部分に振動子を埋め込み足底へ触覚提示する手法[2]などが挙げられる。しかしながら、これらの手法は足底に直接刺激を付与するため、足底と地面にアクチュエータが存在し、本来の地面からの触覚情報を阻害してしまう問題点がある。そのため、高齢者に対してリハビリテーション目的で使用する場合、姿勢制御に悪影響を及ぼす可能性があり、転倒リスクが高まる危険性がある。ここで、我々は手爪上からの振動によって指腹に振動を知覚する錯覚現象[5]を応用し、足爪を振動させることで、足裏に触覚を提示する錯触覚を利用した手法を提案してきた [6]。この手法では、足爪を振動させることで、本来の地面触覚を阻害せず、触覚情報を重畳して提示できる。また、足爪のみにアクチュエータを装着するため、小型で軽量の機構で製作でき、歩行動作に影響を受けにくい汎用性の高いデバイスの製作が期待できる (図 1)。

我々はこれまでに、母指に対して足爪振動で足指裏に触覚が生起するかを検証してきた[6]。その結果、一定の振動強度で足爪を刺激することで、足指裏に触覚が生起することを確認した。しかしながら、足指裏のみに刺激を感じた

場合と爪側と足指裏の両方に刺激を感じた場合を分けて検証してこなかった。だが、爪に刺激を感じてしまうことは望ましくない。足爪に刺激が感じられる際の問題点を、3点述べる。第一に、新たなテクスチャを足底に再現する場合、足爪にもテクスチャが重畳され、違和感が生じ没入感が低下してしまう。第二に、歩行安定のリハビリテーション目的で触覚提示を使用する場合、爪側に注意が向いてしまい、歩行安定に悪影響を及ぼす可能性がある。第三に、錯覚とは、実際とは異なる知覚を得てしまう現象のことであり、振動部位と知覚部位の一致は理想的ではない。

このことから、本稿では、従来の錯触覚の定義の曖昧さを明確にし、「足爪を振動させているにもかかわらず、足指裏のみに触覚を感じる錯覚現象」と定義する (図 2)。この定義をもとに、本手法で錯触覚が生起するか検証する。本稿では、錯触覚の生起確率の計測手法、及び、錯触覚の生起確率の結果について述べる。

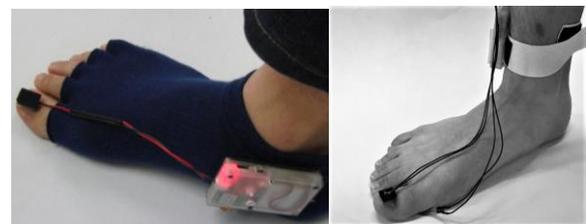


図 1: デバイス制作例

Masayuki Uchida, Taku Hachisu, and Yuki Hashimoto

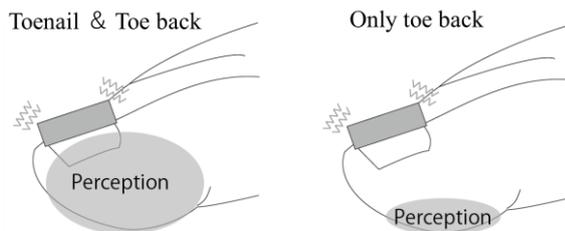


図 2: 左図:従来の錯触覚, 右図:再定義した錯触覚

2. 実験

本稿では、足爪振動で足指裏のみに錯触覚が生起するか検証する。過去の知見をもとに母子爪と母指裏に対して、振動子を取り付けて実験を行った。また、天秤装置を用いて足指裏の荷重を統制した。本章では、実験装置の詳細および実験方法について述べる。

2.1 実権装置

2.1.1 足爪及び足指裏刺激部位

本実験では、右足の母指爪と母指裏に振動子（日本電産コパル株式会社: LD14-002）を、皮膚用両面テープで接着した（図 3）。マイクロコントローラ(mbed NXP LPC1768 NXP Semiconductors)で出力した矩形波をオーディオアンプ(DIODES: PAM8403)で増幅し、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 と設定した。各被験者で足爪の硬さや形状は異なっているため、加速度計から振動強度を統制した。加速度センサ(Kionix: KXR94-2050)を振動子の上に固定し、足爪の振動振幅を計測した（図 2）。足指裏の振動刺激は、足爪で記録したデューティ値をもとに、足爪と同じ振動強度で刺激するように設定した。

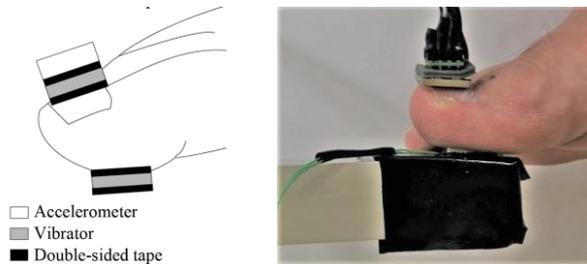


図 3: 足爪及び足指裏装着部位

2.1.2 足指裏の荷重

図 4 で示す天秤装置から被験者の母指裏にかかる荷重を統一した。天秤の片側には右足の母指を、反対側には水を入れたペットボトルと 1kg の重りを載せ、母子裏にかかる荷重の調整した。過去の知見[1]から、被験者が最も錯触覚を生起しやすい上限荷重と下限荷重の中央値の平均を算出したところ、約 1200gf であった。したがって本実験では、母指裏に提示する荷重を 1200 gf とした。天秤装置にエンコーダを搭載し、天秤が上下に 0.5 度以下の傾き角度を保持しているときに振動子が振動し、母指裏に対して荷重が水平に加わるようにした。また、天秤装置に LED を搭載したゴーグルを接続し、被験者は荷重の統制、回答のタイミングを LED の発光色から判定した。



図 4: 天秤による母指裏荷重

2.2 実験方法

以下に実験方法を示す。実験は、健康な男性被験者 5 名（年齢: 23.2 ± 1.6 歳）に対して行った。

2.2.1 振動加速度の選定

振動強度は以下の手順で設定した。

- (1) 加速度センサを搭載した振動子を右足の母指爪と母指裏に取り付ける。
- (2) 足を台座に載せた状態で、1.2kg の荷重を加えた天秤部分に母指を水平に載せる。
- (3) 天秤が水平状態を保った状態で、振動子の振動強度を大きくする。
- (4) 加速度センサの z 軸の値が 1.0G の振動強度を記録する。

過去の実験で振動強度が小さいほど足指裏のみに触覚が生起したという被験者の意見が多くあった。そのため、過去の実験をもとに、十分に足指裏に触覚が生起され、比較的小さい振動強度である 1.0G を経験的に選定した。

2.2.2 錯触覚生起の検証実験

被験者が振動子の駆動音によって、刺激部位の判定をしないために、耳栓をした状態でヘッドホンを装着し、ホワイトノイズを聞かせ、聴覚情報を遮断した。また、実験者の動作から荷重の有無を視覚的に判定しないため、アイマスクを装着した。アイマスクの下に、LED を搭載したゴーグルを装着し、天秤が水平でなければ赤色 LED が発光し、被験者は天秤を水平にするように通知した。また、振動提示後は緑色 LED が発光し、刺激知覚部位を回答するように指示した。振動提示時間は足爪の振動を認識でき、足爪の触覚感度が振動の慣れで減衰しない時間を経験的に 2 秒間とした。振動条件（振動なし、母指爪のみ振動、母指裏のみ振動、両側振動）4 条件、荷重条件（無、有）2 条件の 8 条件から、被験者は触覚知覚部位を回答した。

実験は、以下の手順で行った。

- (1) 2.2.1 とで設定した振動強度で 8 条件の中からランダムで 2 秒間振動提示する。
- (2) 振動提示後に、被験者は「刺激を感じない」、「足爪のみに振動を感じる」、「足指裏のみに刺激を感じる」、「両側に刺激を感じる」のいずれかを回答する。
- (3) (1)~(2)を繰り返す。

この手順を 120 試行（振動条件 4 条件×荷重条件 2 条件×繰り返し条件 15 回）行った。同じ振動条件が 2 回以上繰り返す振動順を除外した上で、各 8 条件をランダムに提示したものを繰り返し、条件に偏りがでないよう

にした。40 試行毎に 1 分ほど休憩を取った。

3. 結果

各条件で得られた被験者の平均生起確率を Confusion Matrix (混合行列) で示す (図 5)。括弧内の数値は標準偏差である。縦軸が実際の振動部位 (振動なし-None, 足爪振動-ToeNail vibration, 足指裏振動-Toe back vibration, 両側振動-Both vibration) を示し、横軸は被験者が回答した知覚部位 (None-知覚なし, Toenail-足爪のみ知覚, Toe back-足指裏のみ知覚, Both-両側に知覚) を示す。各条件をカラーリング化し、赤色に近いほど、触覚が生起する確率が高いことを表す。図 5 から、「荷重あり」の足爪振動では、足裏のみに刺激を感じる生起確率が約 50% と最も高かった。以上から、足指裏に荷重が加わった際に、本手法では、錯触覚が生起する確率が最も高いことを示した。

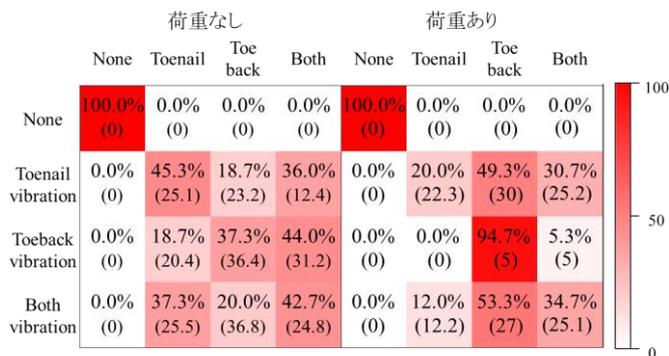


図 5: 刺激知覚の Confusion Matrix

また、各条件の生起確率に対して、標準偏差が最大 36.8% であり、被験者間でばらつきが生じた。図 6 で示す足指裏のみに刺激を知覚した被験者 (足指裏知覚:100%, 足爪知覚:0%) がいる一方で、図 7 で示す足爪のみに刺激を知覚した被験者 (足指裏知覚:13.3%, 足爪知覚:60.0%) が存在し、刺激知覚が被験者間で分かれる結果となった。

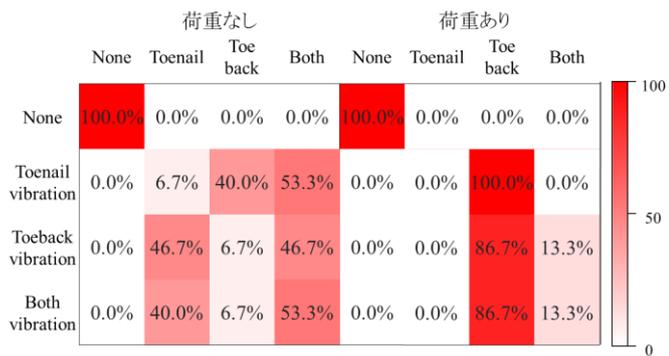


図 6: 足爪振動が足指裏のみに知覚されやすい被験者例

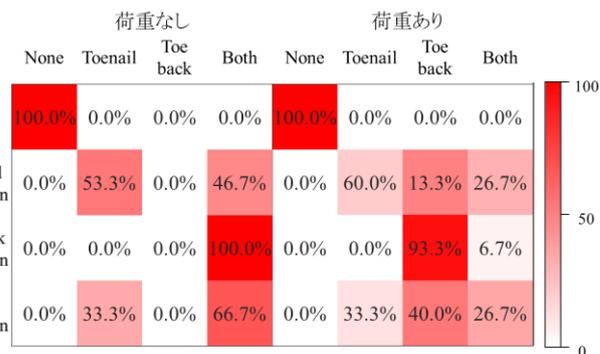


図 7: 足爪振動が足爪のみに知覚されやすい被験者例

4. 考察

本実験の結果から、振動強度 1.0G の足爪振動では、荷重が加わった場合、足指裏のみに錯触覚が生起する確率が最も高かった。このことから、本手法は、足指裏に荷重が加わる歩行時や立位時に、足底触覚提示の有用性を示した。また、両側知覚も含めた従来の錯触覚の定義では、本稿では約 80% 足指裏に触覚が生起し、以前の研究結果[6]と同程度の結果となった。一方で、今回の錯触覚の定義では約 50% の生起確率となり、従来定義の生起確率の 6 割程度に留まった。荷重条件の違いによる触覚知覚の差、被験者で知覚の生起にばらつきが生じた原因を考察し、さらなる錯触覚の生起確率の向上手法を検討する。

4.1 荷重に対する考察

本実験では、荷重の有無で各部位が知覚する生起確率を検証した。図 5 で示す結果から、「荷重あり」では、触覚生起が足指裏のみへ集中するが、「荷重なし」では、刺激知覚の分布が広がる結果となった。顕著な例は、足指裏のみ振動の条件で、「荷重あり」では足指裏のみへの知覚が高いが、「荷重なし」では、両側知覚が最も高い結果となった。我々は、荷重がない場合、実際の刺激部位と知覚部位の一致率が高まると予想したが、異なる結果であった。日常生活では、荷重が加わった場合のみに足指裏に刺激を感じている。そのため、足指裏に荷重が加わらず、刺激のみを知覚する特異な感覚では、知覚部位の判断が曖昧になり、刺激知覚の分布が広がったと考えられる。

4.2 被験者の知覚ばらつきに対する考察

本実験では、足爪刺激に対して、足指裏に刺激を知覚した被験者 (図 6) と足爪に刺激を知覚した被験者 (図 7) が存在した。触覚知覚に、ばらつきが生じた原因の一つに、被験者間での足爪と足裏の触覚感度差の違いが考えられる。錯触覚が生起するメカニズムとして、足爪側よりも足指裏側の触覚感度が高い触覚感度差により、足指爪側への振動刺激がマスクされ足指腹のみに刺激を感じることが考えられている。したがって、爪のみに刺激が知覚される場合、爪側の刺激の知覚強度の飽和が原因で、爪の刺激がマスクされなかったと考えられる。一方で、足指裏のみに 100% 錯触覚が生起した被験者 (図 6) がいたことから、爪側がマスクされる知覚強度で刺激することで、錯触覚の生起の大幅な向上を期待できる。また、被験者の足爪幅、

足指裏温度，足裏の硬度，スポーツ経験を調査し，被験者間で感度差の違いが生じる原因を探索している段階である．今後，被験者数を増やすことで，感度差の原因を突き止めていくことを目指している．また，本実験で用いた振動強度の統制方法では，土台と足指を天秤に載せた状態で計測したため，加速度が水平の状態では振動強度を計測できず，被験者間で振動強度のばらつきが生じたと考えられる．今後，水平器から加速度を水平な状態に保持し，被験者間で統制のとれた振動強度の設定手法を検討する．

誌, vol. 22, no. 3, pp 349-357.,2017

5. まとめと展望

本稿では，新たに錯触覚を定義し，足爪振動に対して，足指裏のみに錯触覚が生起するか検証を行った．本手法を用いることで，荷重を加えた際に，振動強度 1.0G では，足指裏のみに触覚が生起する割合が最も高いことが示された．今後は，足爪の触覚感度の閾値を計測し，より適切な振動強度の選定，振動強度の計測方法の改善，被験者間での錯触覚の生起が生じる要素の解明し，安定に錯触覚が生起する手法を目指していく．

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] Visell, Law, Cooperstock, "Touch is Everywhere: Floor Surfaces as Ambient Haptic Interfaces", IEEE Transactions on Haptics, Vol. 2, No. 3, 2009
- [2] 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
- [3] Daniel, Wen-Hao, Kelsey, Stacey, James, Nicholas, Conor, "Sensory Enhancing Insoles Modify Gait during Inclined Treadmill Walking with Load", Medicine and science in sports and exercise, Vol 48, No. 5, pp.860-868, 2015
- [4] 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
- [5] 橋本, 湯村, 米村, 飯塚, 前田, 安藤: 爪上振動を利用したなぞり動作における触覚伝送手法; 日本バーチャリアリティ学会論文誌, vol. 16, no. 3, pp. 399-408, 2011.
- [6] 酒井, 蜂須, 橋本: 足爪振動刺激を用いた足底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; 日本バーチャリアリティ学会論文