

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

酒井 健輔^{*1} 蜂須 拓^{*1} 橋本 悠希^{*1}

Presenting Tactile Illusion at the Toe Pad using Vibration Stimulus on Toenail:

Verifying Force Conditions Inducing Tactile Illusion for First Toe

Kensuke Sakai^{*1}, Taku Hachisu^{*1} and Yuki Hashimoto^{*1}

Abstract --- We present two psychophysical experiments to quantitatively measure toe force required for inducing a tactile illusion, in which a human feels tactile sensations in the toe pad when a vibration is presented to the toenail while the toe pad is in contact with a surface. While previous literatures introduced the illusion only in the finger pads, we found that the illusion in the toe pad requires a certain level of intensity of vibration and toe force applied to the surface in a preliminary test. In the first experiment, we quantitatively measured the force thresholds for inducing the illusion with constant vibration intensity by method of limits. The results revealed that averages of lower and upper thresholds were 490 and 2370 gf, respectively, and the upper threshold included larger variance than the lower threshold. In the second experiment, we remeasured the lower threshold by method of constant stimuli to eliminate prediction bias. The results revealed that the average threshold was 330 gf positively correlated with the temperature of the toe pad.

Keywords: Nail-mounted tactile display, Sole-tactile sensation, Tactile illusion

1 はじめに

近年、足底の皮膚感覚は身体運動・行動にとって大きな影響を与えることが広く知られるようになり、それに伴って様々な足底触覚提示手法が提案されてきている[1] [2] [3] [4]。その内容は、路面情報の提示やナビゲーションを始めとし、最近では身体近傍空間の拡張[5]や身体移動感の向上[6]、立位バランスの改善[7]、盲ろう者の支援[8]など多様性が増している。このことから、今後足底への触覚提示は様々な分野において高い効果が期待できる。ここで足底への触覚提示手法を見てみると、従来研究のほぼ全てが足底への直接刺激である。この手法では、地面と足底の間にアクチュエータが挟み込まれるため、地面から本来得られるはずの皮膚感覚が阻害される。また、十分に刺激を提示するために装置が大きくなり、利用範囲が制限されるという問題も生じる。例えば Visell らの足底触覚提示装置[1]はアクチュエータを含む上面 30.5 × 30.5 cm のユニットから構成され、床面に固定して使用される。これらの問題によって、従来手法では身体運動が阻害、制限されることが懸念される。

これに対して、我々は爪上側からの振動刺激によって

指腹側に触覚を提示する錯触覚提示手法[9] [10]を用いた手法に着目した。本手法は、アクチュエータが指爪に搭載されるため、地面からの触覚を受け取ることができる。また、足指腹の厚い皮膚を介さず振動を受容器に伝搬できるため、直接指腹を刺激する際と同様の強度の振動をより小型・軽量のアクチュエータで提示可能であると考えられる。我々は、本手法の特徴が足底触覚提示手法の問題を解決できるのではないかと考え、足の指腹に応用することを提案してきた[11] (図 1)。手指の場合、錯触覚現象自体はなぞり動作なしでも生起し、それになぞり動作を組み合わせることでテクスチャを知覚する。そのため、なぞり動作をあまり行わない足の場合でも、同様の錯触覚現象は生じると考えられる。これより、本論文で議論する錯触覚は「指爪への振動提示によって指腹に生起する振動感覚」と定義する。

我々は過去、本錯触覚が足にも生起することを確認し、錯触覚の生起する足指の荷重範囲を計測した[11]。しかし、これまでの実験設計では次の3点が考慮されておらず、錯触覚生起に対する影響は未検証であった。1点目は、本錯触覚の生起を1つの振動強度でしか確認していないことである。そのため、錯触覚に適した振動強度が不明であり、本錯触覚の生起と振動強度の関係を検証する必要がある。2点目は、錯触覚の生起と足指にかかる荷重の関係を検証した際、立位時の身体動揺

*1 筑波大学

*1 University of Tsukuba

によって荷重を高精度に計測できていなかったことである。したがって、身体動揺の影響が小さい条件での再検証が必要である。3点目は、荷重の計測を調整法で行ったことである。調整法は被験者によるバイアスが結果に影響しやすいため、バイアスの影響の低い心理物理実験手法での計測が必要である。

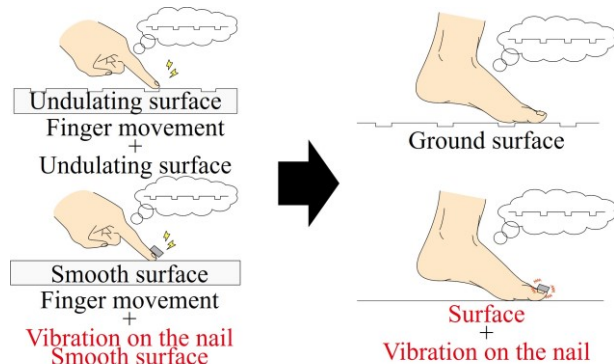


図1 提案手法の概要図

Fig. 1 Illustration of our approach

そこで本論文では、「足における本錯触覚の適用可能性」を検証することを目的とし、本錯触覚の生起と:1) 振動強度との定性的な関係;2) 母指にかかる荷重との定量的な関係を検証する。本論文は次のように構成される。2章では、従来の錯触覚を利用した感覚提示手法と各々の足への適用例を述べる。3章では、振動強度と錯触覚生起の関係を検証する実験について述べる。4章では、極限法を用いて錯触覚の生起する荷重範囲(荷重上限閾値および下限閾値)を計測する実験について述べる。5章では、恒常法を用いてより高精度に荷重下限閾値を計測する実験について述べる。6章では、実験結果とアプリケーションへの応用について考察し、7章でまとめと今後の展望を述べる。

2 足への錯触覚を利用した感覚提示手法

我々が調査した限りでは、これまでに錯触覚を利用した足への感覚提示に関する研究は次の5種類に分類できる。

第1に、腱への振動刺激による伸展錯覚を挙げる[12]。これは筋肉の腱に100 Hz程度の振動刺激を与え、刺激提示部分を固定しているにも関わらず筋が伸展したかのような運動錯覚が生起するものである。山腰らはこれを足に適用することで、歩行中のつま先高さを向上させ、転倒リスクを低減させる研究を行っている[13]。しかし、知覚可能な振動刺激を与えるだけでは運動錯覚は誘発せず、適切な振動振幅が存在すると報告されている。

第2に、確率共鳴現象を挙げる。これは信号にノイズを加えることで、確率的に信号が強まり反応が向上する現象である。この現象を画像に適用することで、コントラストを上げる試みもなされている[14]。これを足に適用

させた例として工藤らの研究がある。彼らは足根管上への振動提示によって足底の触覚感度度が向上し、立位姿勢が安定することを報告している[15]。

第3に、仮現運動を挙げる。仮現運動は、異なる位置を連続的に刺激することで、移動感を感じる錯覚である[16]。久野らの研究では、足での仮現運動は他部位と同様に移動感が生起することが報告されている[17]。

第4に、ファントムセンセーション(Phantom sensation, PhS)を挙げる。PhSは皮膚上の2点に刺激を提示した場合にその2点の間に刺激を感じる錯覚である[18]。久米らの研究では、4つの振動子を用いることで足裏に2次元の位置、移動、回転などの情報を提示できることを示した[3]。しかし、振動刺激が分離して知覚される場合もあると報告されている。

第5に、我々が着目した爪上振動刺激を挙げる。この手法は、手の指爪に振動を提示しながら、指腹が面に触れた際に、指爪の振動を指腹に感じる錯覚である[9][10]。指腹に振動子を固定する必要がないため、本来指腹で知覚される感触を保ちつつ、人工の感触を重畳できる。また、比較的軽量かつ小型な振動子で錯覚を生起することが可能であるため、ウェアラブルデバイスに応用した際に手指運動への阻害が少ない。

我々はこれまでに、錯触覚の生起する荷重範囲を調整法によって求めた[11]。実際に錯触覚を利用する場合には、十分な強度の錯触覚を生起させるためには振動強度の調整が必要である。しかし我々の研究[11]では、1つの振動強度でのみ実験を行っていたため、用いた振動強度と錯覚生起の関係が不明である。また、調整法による実験では被験者のバイアスによる影響が大きい。そこで本論文では、母指に対して錯触覚生起に必要な振動強度とより詳細な荷重閾値条件を検証する。そのためにまず、予備実験として母指に錯触覚が生起する確率を様々な振動強度条件で検証することで、錯触覚の生起について定性的に評価する。これによって、高確率で錯触覚が生起する振動強度を求める。次に、求めた振動強度を用いて、錯触覚の生起する荷重閾値範囲を極限法によって求める。そして、荷重下限閾値を恒常法によってより詳細に求める。

3 予備実験: 錯触覚生起の定性評価

先行研究[11]によって、足でも錯触覚が生起することが確認されている。しかし、錯触覚の生起確率と振動強度との関係は未知である。そこで、振動強度を調整するための知見を得るべく、錯触覚の生起と様々な振動強度との関係を定性的に評価する。

3.1 実験装置

本実験では振動の提示に振動子(日本電産コパル株式会社: LD14-002)、オーディオアンプ(DIODES: PAM8403)、振動振幅の計測に加速度センサ(Kionix:

KXR94-2050), 振動子の制御にマイクロコントローラ (mbed NXP LPC1768 NXP Semiconductors), 振動を開始するためのプッシュボタンを用いた(図 2-(a)). 振動子は図 2-(a)に示すように, 右足母指の爪上にネイルチップ用の両面テープで固定した. さらに, 振動子の上に両面テープで加速度センサを固定した. 振動子への入力 はマイクロコントローラの PWM 出力端子から振動子の共振周波数である 150 Hz の矩形波を出力し, アンプにより増幅したものをを用いた.

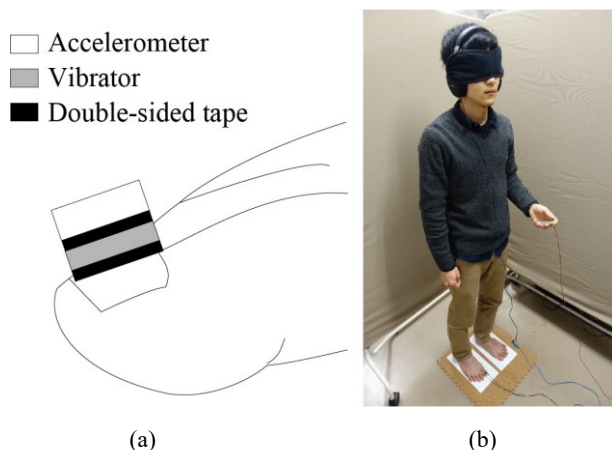


図 2 (a) 振動子・加速度センサの装着図; (b) 実験風景
Fig. 2 (a) Installation of a vibrator and an accelerometer; and (b) a participant performing a trial.

3.2 実験手順

まず, 被験者は右足母指の爪に振動子と加速度センサを固定し, ペディキュアパッドを用いて各足指が接触しないようにした. その状態で足を浮かせ, 加速度センサが地面と水平になるよう被験者に保持させ, 加速度センサの値を元に振動強度を調整した. 振動強度は 1.0~3.0 G まで 0.5 G 刻みとした. この振動強度の範囲には 2 つの理由がある. 1 つ目は, 振動刺激が弱すぎると錯触覚が生起しないため, 2 つ目は, 振動刺激が強すぎると錯触覚の生起を阻害するためである. 振幅の決定後, ペディキュアパッドを取り外し, 被験者をアクリル板上に立たせた. その後振動を数回提示し, 錯触覚が生起したかを尋ねた. 全ての被験者が錯触覚を感じたと報告し, 実験開始前に錯触覚について理解した.

次に, ノイズキャンセリングヘッドホンとアイマスクを装着させ, ホワイトノイズを聞かせた. そして, 被験者に任意のタイミングでプッシュボタンを押してもらい, 振動を 10 秒間提示した. この刺激時間は錯触覚生起に十分な時間として予備実験によって決定した. 被験者には, 振動を提示している間, 右足母指にかかる力を自由に変えさせた. その時, 指爪のみに振動を感じたか, 指腹にも振動を感じたかを答えさせた. この手順を 50 回(振動強度 5 種類×繰り返し 10 回)各被験者に行った. 被験者は健常な成人男性 10 名である.

3.3 実験結果

全被験者から得られた各振動強度における錯触覚の生起確率の中央値, 四分位数, 最大値, 最小値を図 3 に示す. 横軸は振動強度, 縦軸が確率である. 振動強度 1.0 G で生起確率が最も低く, 振動強度が強くなっていくにつれて生起確率が高くなり, 3.0 G では被験者全員から 100 % の生起確率を得られた. そのため, 3.0 G の振動強度を用いれば, 高確率で錯触覚を生起できると考えられる. さらに, 錯触覚の生起と指腹にかかる荷重の大きさが関係していることが被験者の報告から示された. 具体的には, 指腹が面に触れていない時は錯触覚が生起せず, 荷重がある大きさを越えると突然錯触覚が生起する, という報告であった. さらに, 指腹に垂直に荷重が加えられていない時は錯触覚が生起しないという報告もあった.

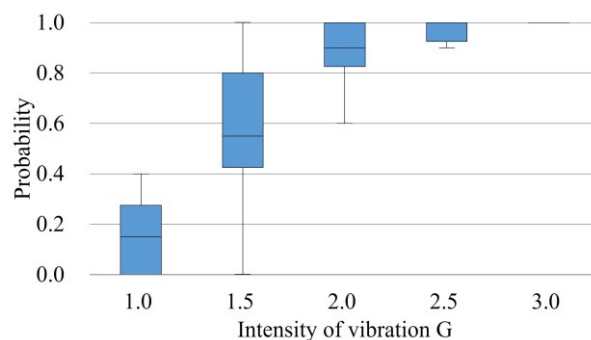


図 3 各振動強度における錯触覚の生起確率
Fig. 3 Probability of occurrence of the tactile illusion for each vibration intensity

4 実験 1: 荷重閾値範囲の定量評価

予備実験より, 錯触覚の生起は振動強度と指腹への荷重に関係していることが示された. 歩行中は足指にかかる荷重が大きく変化するため, 錯触覚が生起可能な荷重閾値範囲を求める必要がある. この閾値範囲は先行研究[11] で求めているが, 身体動揺による計測のずれや調整法による被験者のバイアスが計測値に含まれているため, 本実験では, 座位姿勢で極限法を用いて範囲を求める.

4.1 実験装置

本実験の装置構成を図 4 に示す. 振動提示は予備実験と同様のセットアップで行った. 振動子は 3 つ用い, 振動子 1 は錯触覚の生起用に右足母指の爪に, 振動子 2 は爪上振動の参考用に左足母指の爪に, 振動子 3 は指腹振動の参考用に左足母指の腹に両面テープで固定した.

右足の母指に一定の荷重を与えるために天秤を用いた. 天秤の片側には右足の母指を, 反対側にはペットボトルで作成した重りに乗せる. ペットボトルは電子天秤 (株式会社エー・アンド・デイ:SH-12K) によって重さを計

測した。指腹の皮膚温度変化による錯覚生起の影響を小さくするために指を置く位置にはアクリル板を固定した。天秤の傾きはエンコーダ(CUI inc.: AMT102-V)を用いて測定した(図 5-(a))。水平器を用いて天秤が水平であるときを 0 度と定義した。天秤が 0 度の時、指押し面は足置きから 2 mm 低くした(図 5-(b))。これは、指腹に垂直に荷重を加えるためである。

アイマスクの内側に取り付けられた LED によって、天秤の傾きが $-0.5\sim 0.5$ 度以内であることを示した。天秤が水平の場合は緑色の LED を、それ以外ならば赤色の LED を点灯させた。被験者がボタンを押すと、振動子 2 が 1 秒間振動し、続いて振動子 3 が 1 秒間振動するよう設定した。これは、被験者に足爪及び指腹への振動感覚を思い出させるためである。

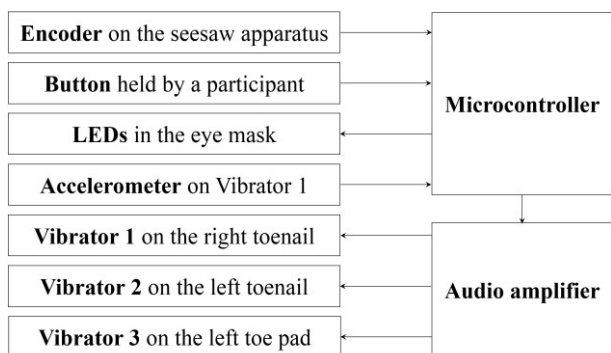


図 4 実験 1 のシステム構成

Fig. 4 Configuration of the system for Experiment 1

4.2 実験手順

まず、被験者は天秤の前に座り、右足と左足を各々足置きに乗せた(図 5-(c))。

その後、振動強度を予備実験と同様の方法で、3.0 G に調整した。被験者の指腹に荷重を与える前に、指爪に数回振動を提示しながら、被験者は足置き上で指にかかる荷重を自由に変更することで本錯覚に慣れさせた。被験者は天秤の一端に右足母指を置いた。実験中、視覚と聴覚を遮断するためにアイマスクとホワイトノイズを提示するヘッドホンを装着した。試行の開始時に実験者は天秤の一端に重りを置き、参加者の膝を 1 回軽く叩いて試行が始まる準備ができたことを指示した。その後被験者は、右足母指で天秤の一端を垂直に押した。天秤が水平になるとアイマスクの緑色の LED が発光し、振動子 1 が 1 秒間振動した。振動提示時間は実験全体の時間と被験者への負担を考慮して決定した。被験者には、試行毎に 1 回のみ振動子 1 を駆動するように指示した。次に、被験者には(1)爪のみに振動を感じた(錯覚の生起なし)、(2)指腹にも振動を感じた(錯覚の生起あり)のどちらかを回答させた。各被験者は下限上限 5 試行ずつ、計 10 試行を行った。5 試行後に 1 分の休憩をとり、膝を 2 回叩くことで合図した。被験者は、

健康な成人男性 12 名であった。

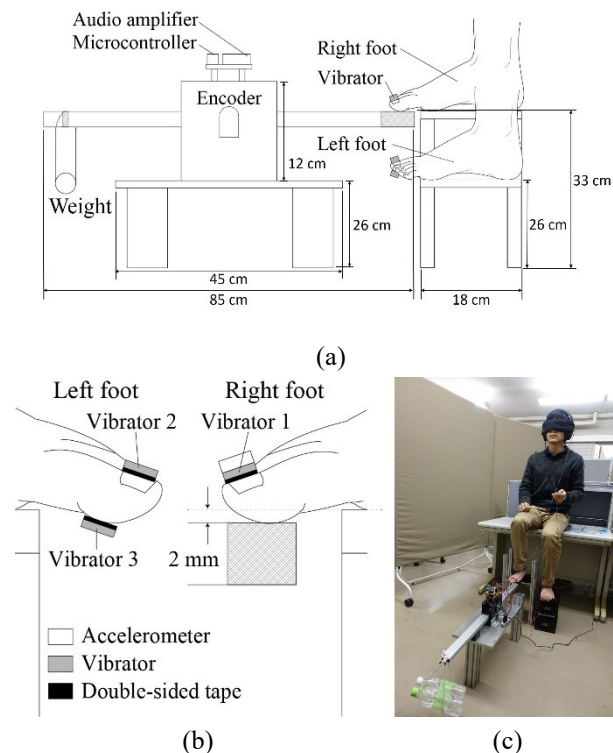


図 5 実験 2 のセットアップ: (a)天秤の全体図; (b)振動子の配置; (c)実験風景

Fig. 5 Configuration of the setup for Experiment 2: (a) Overview of the balance scale; (b) arrangement of the three vibrators; and (c) a participant performing a trial.

4.3 実験結果

各被験者における下限・上限の荷重閾値と全被験者の平均値を図 6 に示す。

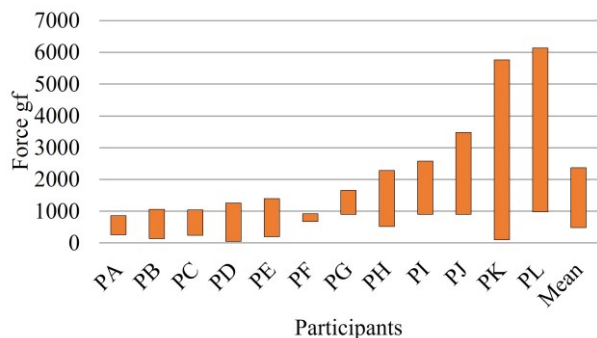


図 6 各被験者の下限・上限荷重閾値

Fig. 6 Lower and upper thresholds for each participant

縦軸は荷重、横軸は被験者を示している。平均して、下限閾値は約 490 gf, 上限は約 2370 gf となった。また、下限閾値に比べて上限の閾値のばらつきが大きいことが確認された。ばらつきの原因としては、指の形状や硬さ、筋肉による振動の伝搬特性の違い、足指腹の触覚感度、触覚感度が変化する外的要因等が挙げられる。これらを証明するためには、実際に指の振動伝搬特性

や触覚感度, 外的環境のパラメータを計測した上での実験や物理シミュレーションを行う必要がある. 特に, 下限閾値に比べて上限の荷重は天秤を水平に保持するためにより大きな力を必要とするため, 差が大きくなったと考えられる.

5 実験 2: 荷重下限閾値の定量評価

実験 1 より, 足指への荷重範囲と錯触覚生起の関係を明らかにした. しかし, 極限法による同定では被験者が結果を予測できてしまう可能性がある. 本実験では, 比較的ばらつきの小さかった下限閾値を対象として, 恒常法の実験によって, 精度の高い錯触覚の生起条件を調査することを目的とする.

5.1 実験装置

本実験は実験 1 と同様の装置を用いた. 重りの最大荷重は先行研究[11] によって求められた最も錯触覚を強く感じる荷重である 840 gf とし, これを 7 等分して荷重条件とした.

5.2 恒常法

閾値を定量的に測定するために, 恒常法を採用した. この方法では物理量(指腹への荷重)がランダムな順で提示される[19]. 被験者は「(a)錯触覚を感じた」もしくは「(b)錯触覚を感じなかった」の 2 つから選択する(2AFC 法). (a)の確率は, 指腹への荷重が下限閾値付近ならば, 増加するにつれて高くなると予測した. 確率 P は以下の式に示すように, 累積分布関数を用いて近似する.

$$P = \frac{1}{2} \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{x - \mu}{\sqrt{2}\sigma} \right) \right] \quad (1)$$

ここで, erf は誤差関数, x は確率変数, μ は平均値, σ^2 は分散値である. 本実験では, x は母指への荷重を示し, P は生起確率を示す. この関数を最小二乗法によってフィッティングした.

本実験では, 荷重下限閾値を確率が 75% の時とした. この 75% 閾値は恒常法による弁別実験を用いた研究[20][21] を元に決定した.

5.3 実験手順

本実験は実験 1 と同様の手順で, 各被験者 7 荷重 × 繰り返し 15 試行, 計 105 試行を行った. 15 試行毎に 1 分の休憩をとった. 休憩は膝を 2 回叩くことで合図した. 被験者は, 健常な成人男性 12 名であった.

5.4 実験結果

ほぼ全被験者において, 荷重が大きくなるに従って, 生起確率が上がる傾向が確認された. 各被験者の生起確率に累積正規分布関数をフィッティングし, 知覚確率曲線を求めた. 被験者 PE のグラフを図 7 に示す.

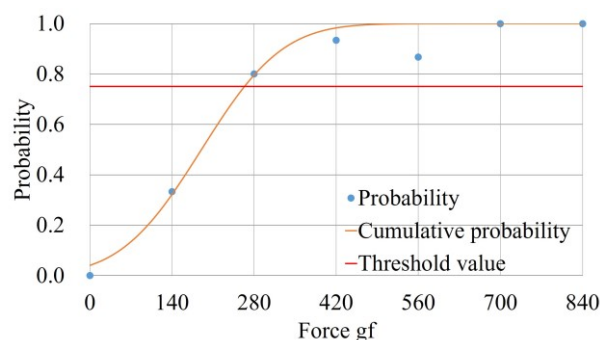


図 7 被験者 PE の知覚確率曲線

Fig. 7 Cumulative probability of occurrence in one participant (PE)

横軸は荷重, 縦軸は生起確率であり, 青点が生起確率, 橙線が知覚確率曲線, 赤線が閾値(75%)を示している. 閾値は被験者 PE では約 270 gf となった. 同様に全被験者で荷重閾値を求めた結果を図 8 に示す. 荷重の閾値を全被験者で平均すると, 約 330 gf となった.

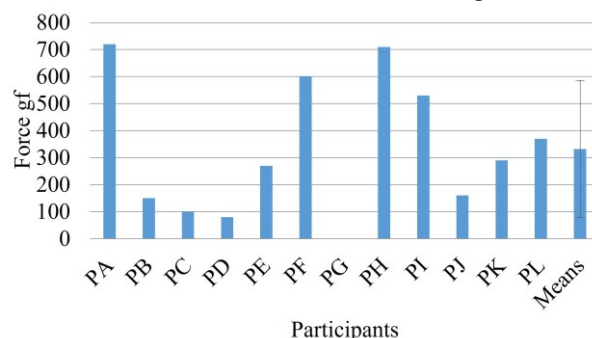


図 8 各被験者の荷重閾値

Fig. 8 Force thresholds for each participant

6 考察

6.1 実験結果に対する考察

足の接地状態は, 単純な立位姿勢や椅子に座っている等の静的な状態と, 接地と離地を繰り返す動的な状態がある. その中でも歩行は, 最も基本的な運動の一つであるため, 本錯触覚が歩行に対応することは重要である. そこで, 予備実験と 2 つの実験から, 本錯触覚が歩行に対応できる可能性を考察する. また, 錯触覚の生起する荷重閾値範囲が存在する理由, 実験で確認された荷重閾値のばらつきについて考察する.

6.1.1 歩行時の指の圧力推移と荷重閾値範囲の比較

荷重閾値範囲と歩行時に足指腹にかかる圧力推移[22] を比較した. 比較には, 日常利用することを考慮して, 通常歩行時(1.1 m/s)の圧力推移を用いた. 通常歩行時の圧力推移[22] を見ると, 歩行中に 5.4 で得られた荷重閾値である約 330gf を超えるのは, 立脚時間 400 ms の内, 足の接地開始後 220 ms と接地終了前 20 ms の計 240 ms だった. よって, 全立脚時間中約 60% の間で本錯覚を生起させることが可能であることから, 本錯覚が歩行における足底触覚提示に利用できる可能性が

示唆されたとと言える。また、靴装着時には指腹がほぼ常に靴底に接しているため、生起可能時間が長くなることが期待される。さらには、足の接地を検出することで、歩行中における適切な振動刺激タイミングの推定モデルが構築できる可能性も示唆された。しかしこれらの結果は、荷重閾値を求める実験の時と同じ感覚知覚特性であり、閾値も同じであることが前提となっている。そのため、この錯触覚生起時間を証明するためには、これらのパラメータを求める実験や、実際に求めたタイミングで振動を提示した実験が必要だと考えられる。

6.1.2 錯触覚が生起する荷重閾値範囲

予備実験及び実験 1 から、錯触覚が生起する荷重閾値範囲の存在が示された。一方で、一定の荷重があっても錯触覚が生起しない場合の存在が被験者のコメントより判明した。そのため、一定の荷重が必要である理由を考察することで、錯触覚が生起しない条件を考える。また、荷重上限閾値が存在する理由を考察することで、広い範囲での錯触覚生起を実現できる可能性を考える。

一定の荷重が必要な理由として、主に 3 つの可能性が考えられる。第一に、指腹に面が触れたという情報が引き金となり爪側の振動を指腹に感じることである。第二に、爪側の振動が接触面に伝達され、その振動が反射することでその振動を指腹側で知覚することである。第三に、指腹が圧迫され硬くなり、爪に提示された振動が腹側に届くまでの減衰率が低下したことである。今後、他の可能性も模索していく予定である。以上の理由の中で、最も有力であるのは、3 つ目に挙げた可能性だと考えられる。予備実験では、母指の踏む角度については統制していなかった。そのため、同じ荷重でも指腹への圧迫が不十分な場合が生じた可能性がある。実際、母指の踏む角度を変えたところ、知覚が少し変化したという内観報告があった。したがって、今後の実験では指の押す角度や位置を統制した上で再度検証を行う。他に挙げた 2 つの可能性に関しては今後検証する。

次に、荷重上限閾値が存在する理由として、マスキング効果が考えられる。荷重が大きすぎる場合、テスト刺激とマスク刺激が同時に提示されると、各々の刺激位置が近いほどマスキング効果が強くなると報告されている [23] [24]。刺激位置の距離は提案手法ではゼロとなる。したがって、錯触覚が荷重によってマスクされた可能性がある。したがって、アクチュエータの重量を軽くする、装着時の圧迫を減らす等の考慮が必要だと考えられる。

6.1.3 実験 2 における累積分布関数への近似

実験 2 では、ほとんどの被験者の結果を式 1 で近似することができたが、2 名の被験者は決定係数が 0.5 未満となり、近似できなかった。その理由を考察することで、実験の改良すべき点を見出す。

まず、被験者 PG では 0 gf の時に錯触覚が 100 % 生起した。この理由の 1 つとして、この被験者にとっては今回設定した振動強度が強すぎたことが考えられる。これ

は、振動強度が大きすぎる場合、接地の有無に関わらず指全体に振動を知覚してしまい、錯触覚だと捉えられなくなることが原因だと考えられる。この問題に対して、振動強度の主観的等価点を被験者毎に求める等の対策を行うことで、より正確な荷重下限閾値の同定を行う必要があると考えられる。一方、PA の錯触覚生起確率は他の被験者と比べてより小さい荷重で減少した。実験 1 より、荷重が大きすぎる場合には錯触覚が生起しないことが確認されているため、この被験者にとって錯触覚の生起する上限の荷重が小さかったと考えられる。そのため、提示する荷重も被験者によって調整することでより詳細な結果が得られるものと考えられる。

6.1.4 荷重閾値と指腹温度の関係

上記は被験者ごとの触覚感度の差によるばらつきに起因するものであるが、外環境による触覚感度の変動も十分に考えられる。その一例として、触覚感度が温度によって変化し、35 °C に近づくに従って触覚感度が高くなるという知見 [25] に着目した考察を行う。

まず、指腹の温度と、錯触覚の生起する荷重閾値範囲の幅、荷重下限閾値との関係を求めた。指腹の温度は温度計 (シンワ測定株式会社: 73010 放射温度計 B レーザーポイント機能付 (測定精度 $\pm 2\%$)) を用いて指腹の中心を実験開始直前に計測した。その結果を図 9、図 10 に示す。

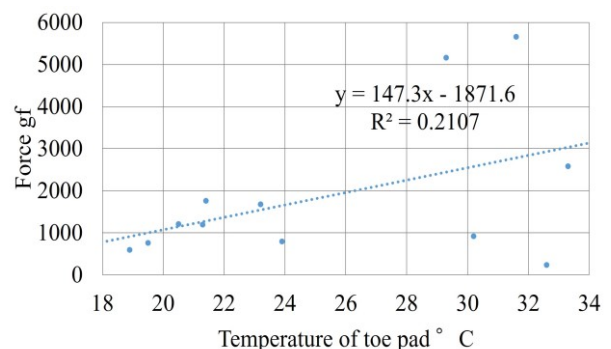


図 9 指腹温度と荷重範囲の関係

Fig. 9 Temperature of the toe pad and force ranges

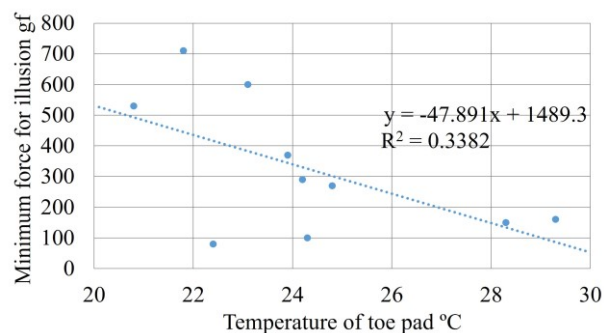


図 10 指腹温度と荷重閾値の関係

Fig. 10 Temperature of the toe pad and force thresholds

横軸は、指腹の温度、縦軸が荷重を示している。荷重

範囲との関係では、相関係数は約 0.46 となり、荷重閾値との関係では、式 1 で近似できなかった 2 名の被験者を除くと、相関係数は約 -0.58 となり負の相関が認められた。靴の中の温度は 30 °C 以上であると報告されている [26]。したがって、靴装着時には今回の実験時よりも指腹温度が上昇することが想定されることから、本手法が靴を履いた状態での歩行に特に有効である可能性がある。また、温度と荷重範囲に相関があるということは、温度によって変化する触覚感度と荷重閾値の間にも同様の相関関係があると考えられる。このことから、温度以外の方法で触覚感度を高めることで、荷重閾値を下げられる可能性がある。しかし、触覚感度と荷重閾値の因果関係を証明するためには、被験者の触覚感度を調査した上で振動刺激を提示し、結果を比較するという詳細な検証が今後必要である。

6.1.5 指腹温度による荷重下限閾値の補正

6.1.4 節から、荷重下限閾値と指腹温度の関係が確認された。そのため、荷重下限閾値は温度によって補正できると考えられる。補正できれば、温度条件を統制した時の結果が疑似的に得られる。

そこで、温度を実験 1 で計測された平均温度である約 24 °C として、荷重下限閾値を補正した。結果を図 11 に示す。近似式より推定される 24 °C 時の荷重下限閾値は約 340 gf であり、補正後の全被験者の平均荷重下限閾値は約 360 gf となった。また、標準偏差は約 220 gf から約 180 gf となり、被験者間のばらつきが小さくなった。このことから、温度によって補正できる可能性が示された。しかし、この結果は同じ被験者群の同じデータを用いているため、他の被験者群との比較によってこの近似式の妥当性を検証する必要がある。ここで、靴の中を想定して、30 °C で補正した際、荷重下限閾値は平均して約 50 gf となった。ただし、補正後に荷重下限閾値がマイナスを示す被験者が確認された。そのため、線形では近似できない領域が存在する可能性がある。より正確に補正するためには、実験中に温度を複数回計測するなどの実験の改良で、詳細な関係を求める必要がある。

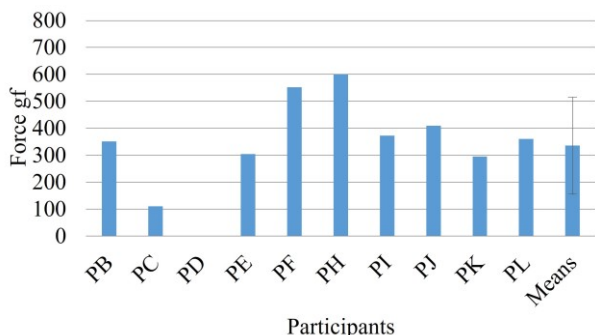


図 11 平均温度時の荷重下限閾値の補正值

Fig. 11 Correction value of force lower threshold at average temperature

6.2 足への感覚提示を利用した応用例

足の感覚提示手法にはどのようなアプリケーションが存在するのか、そして提案手法を用いたシステムがそれらに対してどのような利点があるかを述べる。

6.2.1 姿勢安定化

袴田らは、頸椎椎弓形成術後に足底感覚刺激を試みることで立位バランスに影響を与えることを示した [7]。しかし、足底への直接刺激であるため、皮膚感覚の障害やアクチュエータを踏むことによる姿勢の不安定化の可能性が考えられるため、日常的な利用には向いていないと考えられる。工藤らは、足根管上への振動提示 [15] によって立位姿勢の安定化を実現している。この手法は、足底と地面の間にアクチュエータを固定する必要がない。しかし、振動は微弱であるため、地面感を提示するには振動強度が足りない。

6.2.2 地面感触提示

床面に埋め込まれた振動スピーカを歩行に合わせて駆動することで足底に振動を提示する手法が存在する [1] [2]。しかし、この手法では足底に十分に振動を与えるために装置が大きくなり、移動範囲が制限されてしまう。

6.2.3 ナビゲーション

渡邊らは、靴底に振動子を埋め込んだウェアラブルデバイスによって歩行をナビゲーションするデバイスを提案している [4]。このデバイスは日常的に利用可能である一方で、地面と足底の間にアクチュエータが固定されることによる、歩き心地の低下が考えられる。

提案手法では、対象を機械受容器の密度が高い足指にすることで提示する振動強度を小さくできるため省電力化され、利用時間を長く出来ると考えられる。また、比較的小型なシステムで実装可能であるため、日常的な利用が可能であり、足底にアクチュエータを固定する必要がないため踏み心地を阻害することがない。さらに提案手法は、前述した 3 つのアプリケーションを 1 つの手法で小型に実現することが可能であると考えられる。なぜなら、姿勢安定化に関しては振動強度を調整することで確率共鳴現象と同様の現象が確認されると予想され、地面感触提示に関しては先行研究 [10] でテクスチャの提示を実現しているため、同様に提示できる可能性が高いからである。ナビゲーションに関しては、振動パターンを制御することで、直進や右折等の合図として利用できると考えられる。実際に、姿勢安定化は先行研究 [27] の実験によって、地面感触提示は先行研究 [28] のデモ展示による体験者の内観報告によって可能性を示唆した。

7 おわりに

本論文では、指腹が面に接している時に指爪に振動を提示すると指腹に振動を感じる錯触覚 [9] [10] を足指腹へ応用する手法の実現可能性を検証した。予備実験では、様々な振動強度条件で指腹に荷重をかけ、錯触

覚の生起を定性的に評価した。実験 1 では、錯触覚が生起する荷重閾値範囲を極限法によって求めた。結果として、指腹への荷重が平均で約 490 gf~2370 gf の時、錯触覚が生起することが確認された。また、得られた荷重閾値範囲から歩行中の錯触覚が生起するタイミングを推定した。実験 2 では、錯触覚生起に必要な荷重を恒常法によって求めた。結果として、錯触覚生起のためには平均で約 330 gf が必要であることが確認された。錯触覚の生起する荷重閾値範囲と指腹温度には正の相関が、荷重下限閾値とは負の相関が確認され、荷重閾値と指腹の温度が関係している可能性が示唆された。以上のことから、母指に対する錯触覚生起のための荷重条件を同定した。最後に、応用例として 3 つのアプリケーションについて、提案手法の利点を述べた。提案手法ではこれらのアプリケーションを 1 つの手法で全て行うことが可能になると考えられる。

今後は、考察で述べたような実験の改良を行い、より詳細な錯触覚生起と荷重閾値の関係や、温度との関係を調べる。また、足指で踏み込む瞬間に指腹に触覚を提示するウェアラブルデバイスを開発することで、歩行支援や様々な地面感触の提示を行う。実際、我々は既に約 40 g と軽量でスリッパに乗る程度の小型な装置を実装済みであり[28]、更なる小型化を目指す予定である。加えて、振動の提示効率、装置の大きさ、歩き心地等の実用面について、本提案手法による間接触覚提示と従来の直接触覚提示を比較・検証し、本提案手法に最適化したアプリケーションの開発に繋げる。

謝辞

本研究の一部は科研費(課題番号 26730102)の助成を受けたものである。

参考文献

[1] Visell Y., Law A., Cooperstock J. R., "Touch is Everywhere: Floor Surfaces as Ambient Haptic Interfaces", IEEE Transactions on Haptics, 2 (3) (2009)
 [2] 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, 19-26 (2012)
 [3] 久米, 白井, 津田, 畑田, "足裏への皮膚振動刺激による情報伝達", 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 3(3), 83-88 (1998)
 [4] 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, 46(5), 1354-1362 (2005)
 [5] 雨宮, 池井, 広田, 北崎, "歩行を模擬した足底振動刺激による身体近傍空間の拡張", 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 21(4), 627-633(2016)
 [6] Farkhatdinov I., Ouarti N., Hayward V., "Vibrotactile Inputs To The Feet Can Modulate Vection", Proceedings of the World Haptics Conference, 677-681(2013)

[7] 袴田, 中山, 細野, 山岸, "頸椎椎弓形成術後患者に対する足底感覚刺激の介入効果:—シングルケースデザインでの検討—", 日本理学療法学会大会, C3P2455(2009)
 [8] 篠木, 米村, "盲ろう者のコミュニケーションを支援するフット・インターフェースの検討", 電子情報通信学会技術研究報告, 116(360), 33-38(2016)
 [9] 安藤, 渡邊, 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), 2025-2033 (2004)
 [10] 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", 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 16(3), 399-408 (2011)
 [11] 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, 1-4 (2014)
 [12] Goodwin, G.M., McCloskey, D.I., Matthews, P.B.C., "The contribution of muscle afferents to kinesthesia shown by vibration induced illusions of movement and by the effects of paralyzing joint afferents", Brain, 95(4), 705-748 (1972)
 [13] 山腰, 小原, 竹村, 溝口, "前脛骨筋の腱振動が下肢動作へ及ぼす影響", 生活生命支援医療福祉光学系学会連合大会, P-13, 1-2 (2014)
 [14] 山本, 藤井, 高瀬, 遠地, 川浦, 森, 池田, 今井, "確率共鳴を利用したコントラスト分解能の改善", 信学技報, IMQ2013-13, 7-10 (2013)
 [15] Kudoh S., Obara A., Satoh Y., Ming D., Mizuguchi H., Takemura H., "Enhancement of Plantar Tactile Sensitivity by Wearable Stabilization Device Based on Stochastic Resonance for Fall Prevention", Journal of Robotics and Mechatronics, 25(6), 888-896 (2013)
 [16] Frey M. V., Metzner R., "Die raumschwelle der haut bei successivreizung", Zeitschrift für Psychologie, 29, 161-182 (1902)
 [17] 久野, 岡田, 柳田, "仮現運動を用いた脚部への振動刺激に関する研究", 日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 11, 380-381 (2006)
 [18] Georg V. B., "Neural Funneling along the Skin and between the Inner and Outer Hair Cells of the Cochlea", The Journal of the Acoustical Society of America, 31(9), 1236-1249 (1959)
 [19] Gescheider G. A., "Chapter 3: The Classical Psychophysical Methods, Psychophysics: the fundamentals (3rd ed.)", Lawrence Erlbaum Associates, (1997)
 [20] 梶本, 舘, "経皮電気刺激における振動知覚の電極サイズ依存性", 電子情報通信学会論文誌, D-II 88(12), 2380-2387 (2005)
 [21] 村瀬, 浅見, "幼児の把握時の力量弁別特性と力量弁別に基づく測定方法の検討", 日本体力医学会, 42(2), 201-208 (1993)
 [22] 岩間, 竹村, 上田, 松本, 小笠原, "足指免荷時足指圧力計測に基づく歩行運動に及ぼす足指機能解明", 日本機械学会論文集, C 編 70(689), 213-220 (2004)
 [23] Gilson R. D., "Vibrotactile masking : Effect of multiple maskers", Perception and Psychophysics, 5 (3), 181-182 (1969)
 [24] Gilson R. D., "Vibrotactile masking : Some spatial and temporal aspects", Perception and Psychophysics, 5 (3), 176-180 (1969)
 [25] 大山, 今井, 和氣, 菊池, "新編 感覚・知覚心理学ハンドブック", 誠信書房, 1304-1307 (2007)
 [26] エステー, "ビジネス靴の「蒸れ」を 16 時間追跡。湿度は驚きの 99.49% まで上昇!", <http://www.st->

c.co.jp/plus/channel/2015_08.html (2017/03/08 アクセス)

[27] 酒井, 蜂須, 橋本, “足爪振動を用いた歩行安定化手法の有効性検証”, 情報処理学会 アクセシビリティ研究会 第1回研究会, 2016-AAC-1(4), (2016)

[28] Kensuke Sakai, Taku Hachisu and Yuki Hashimoto, “Sole Tactile Display using Tactile Illusion by Vibration on Toenail”, Asia Haptics 2016, 65E-3, (2016)

(2017年3月13日受付)

[著者紹介]

酒井 健輔 (学生会員)



2015年岐阜工業高等専門学校専攻科電子システム工学専攻修了。同年筑波大学大学院システム情報工学研究科博士前期課程。錯触覚ディスプレイに関する研究に従事。

蜂須 拓 (正会員)



2010年電気通信大学電気通信学部人間コミュニケーション学科卒業。2012年電気通信大学大学院総合情報学専攻博士前期課程修了。同年より日本学術振興会特別研究員(DC1)。2015年同大学大学院情報理工学研究科総合情報学先行博士後期課程修了。同年より筑波大学システム情報系研究員, 現在に至る。触覚VR/AR, マルチモーダルヒューマンインタフェース, ウェアラブルデバイスの研究に従事。博士(工学)。

橋本 悠希 (正会員)



2010年電気通信大学電気通信研究科博士課程修了。2013年筑波大学システム情報系助教, 現在に至る。インタラクティブ技術, バーチャルリアリティおよび触覚インタフェースに関する研究に従事。博士(工学)。