



足底への静電触覚刺激における 素足と靴下着用時の知覚の違い

Differences in perception between bare feet
and socks in electrostatic tactile stimulation of the sole of the foot

阿部瑚南¹⁾, 橋本悠希²⁾

Konan ABE, Yuki HASHIMOTO

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, k_abe@vrlab.esys.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: 我々はこれまで、静電触覚技術と紙エレクトロニクス技術を組み合わせたプリンタブル静電触覚ディスプレイを用い、手部全体を用いた大面積の触覚インタラクションを提案してきた。本ディスプレイを足底に使用した結果、素足と靴下を履いた状態でも知覚することができた。過去に肌の水分保有量が多いと触覚が知覚しにくいと報告された。そのため、実際に本ディスプレイを足底で使用するには靴下を履くことが望ましいと考えられる。そこで本稿は、素足と靴下(綿 100%)の知覚閾値を比較し、靴下(綿 100%)を履いた状態での触覚提示の可能性を検証した結果を報告する。

キーワード: 静電触覚, 紙エレクトロニクス, 触覚デバイス

1. はじめに

足底の皮膚感覚は日常生活や歩行において極めて重要な役割を果たしている。足底に地面のテクスチャなどの触覚刺激を提示することで、地面の触覚情報の取得や身体近傍空間の拡張、ナビゲーションをすることができる。[1][2][3] それに伴い近年では、足底に対する多くの触覚提示手法が提案されてきた。その1つに靴のインソール部分に振動子を埋め込んでいるものや爪の上に振動子を配置するといった装着型の触覚提示デバイスがあげられる。[3][4]しかし、装着型の触覚提示デバイスには装置構成の煩雑さ、適合性、快適性といった欠点が存在する。また床に振動子を配置するデバイスも存在する。[5]床に振動子を配置するデバイスには装置を装着しなくても良いという利点は存在するが、可搬性が低いという欠点がある。そこでこれらの欠点を補う触覚提示デバイスとして、我々が開発した静電触覚技術と紙エレクトロニクス技術を組み合わせたプリンタブル静電触覚ディスプレイに着目した。[6]

静電触覚技術とは、静電気力によって接触部位とディスプレイの垂直抗力が変調されその間に発生する摩擦力を制御し、その変調により触覚提示を行う技術である。生じる静電気力を F [N]、電極と接触部位との距離を d [m]、接触面積を S [m²]、印可電圧を V [V]、絶縁層の誘電率を ϵ とすると静電気力の式は(1)式のように表せる。

$$F = \epsilon \frac{SV^2}{2d^2} \quad (1)$$

触覚提示の原理について図1に示す。交流電圧の印加によって発生する静電気力は周期的に変化する。それに応じて接触部位とディスプレイの垂直抗力が変調し間に発生する摩擦力も変調する。そのためディスプレイをなぞると摩擦力の周期的変化による凹凸テクスチャ感が知覚される。

紙エレクトロニクス技術とは、紙を基盤として使用し、導電性インクを用いることで紙面を電極として使用可能とする技術である。この技術を用いて作成された本ディスプレイは、簡易な構成や高い適合性や快適性、容易な大型化が可能である。また他素材の基盤とは異なり、軽く柔軟性が高い素材であることを活かした可搬性の高さも特徴である。

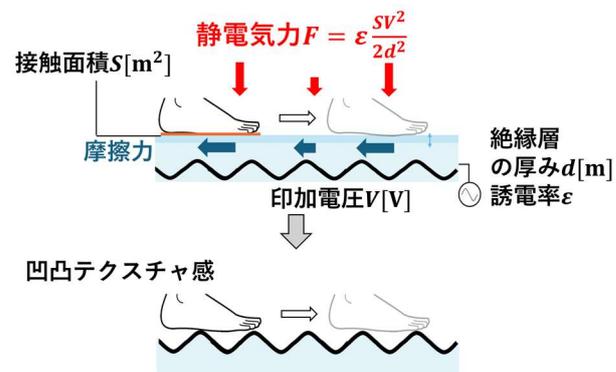


図1: テクスチャ感提示

これまでプリンタブル静電触覚ディスプレイは、手部全体を用いた大面積の触覚インタラクションを提案してきた。[7]本ディスプレイを足底で使用した結果、素足と靴下を履いた状態でも知覚することができた。過去に肌の水分保有量が多いと触覚が知覚しにくいと報告された。[8][9]靴下を履くことで足底の汗を吸収できるため、実際に本ディスプレイを足底で使用する際には靴下を履くことが望ましいと考えられる。そこで本稿は、素足と靴下(綿 100%)の知覚閾値を比較し、靴下(綿 100%)を履いた状態での触覚提示の可能性を検証した結果を報告する。

2. 知覚閾値実験

本実験では、靴下(綿 100%)をはいた状態での触覚提示の可能性を検証するために、素足と靴下(綿 100%)の知覚閾値を比較する。

2.1 実験装置

2.1.1 ディ스플레이構成

本研究で開発されたディスプレイは 3 層の構造を持つ。ディスプレイの構造については図 2 に示す。1 層目は台紙に白色 PET フィルムを用いた。2 層目は、銀ナノインク(三菱製紙株式会社 : NBSIJ-MU01)を紙エレクトロニクス技術により印刷し電極とした。電極部分は、(株)川口電気製作所の耐高電圧加工技術を用いて 1000V 以上の電圧に耐えることができる電極パターンを製作した。そして 3 層目は、絶縁層の役割を担う PET フィルムを用いた。

2.1.2 装置構成

実験の装置構成を図 3 に示す。本ディスプレイが高電圧印加によって生じる振動を防ぐために、本ディスプレイをバックライト板に貼り付けた。実験参加者にキーボードで電圧調整を行うように指示した。PC から mbed に processing を介してコマンドが入力される。また、静電触覚ディスプレイは高電圧発生装置の出力端子と接続し、GND 用リストストラップは GND 端子と接続した。

2.2 実験条件

被験者に、左から右へ 2 秒間に 1 回の速度で足底全体をなぞるように指示した。刺激は正弦波形であり、過去の研究で 100Hz 付近が最も知覚しやすいと報告されたため、周波数は 100Hz を用いた。[10]電圧は出力可能な最大電圧である 980V まで使用した。実験は、靴下(綿 100%)を装着した状態および素足で行った。実験中は聴覚の遮断をするために、ヘッドフォンからホワイトノイズ、なぞり速度統制用のメトロノーム音を提示した。また過去に肌の水分保有量が多いと触覚が知覚しにくいと報告された。[8][9] よって、送風機で足の乾燥を行い、ディスプレイはティッシュで適宜水分や汚れを拭き取ることで知覚の軽減を防いだ。実験参加者は 22 歳男性 2 名、23 歳男性 2 名、平均 22.5 歳の計 4 名に実施した。

2.3 実験手順

実験は、実験参加者が素足、靴下(綿 100%)の 2 条件で極限法を用いて知覚閾値を計測する。手順を以下に示す。

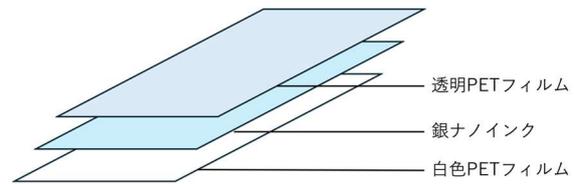


図 2 : ディ스플레이の構造

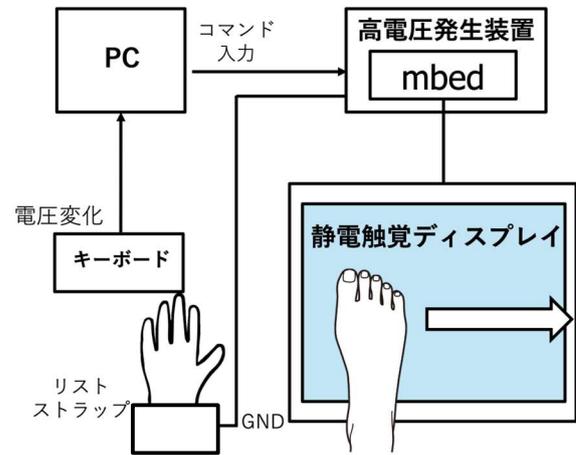


図 3 : 実験装置構成

1. 実験参加者に実験方法(足底全体でなぞること)を説明する。
2. 実験参加者を椅子に座らせてヘッドフォンとリストストラップを装着させる。
3. なぞり動作を行い、触覚を感じるかを確認させる。
4. 実験参加者は左から右へ 2 秒間に 1 回の速度でなぞり動作を行う。
5. 極限法を用いて知覚閾値を計測する。
6. 監督者は知覚閾値を記録し、次の条件を準備する。実験参加者は送風機により皮膚を乾燥させる。
7. 3~6 の試行を行う。これを 1 セットとし、素足、靴下(綿 100%)の 2 条件でそれぞれ 5 セット行う。

2.4 実験結果

素足と靴下(綿 100%)の知覚閾値を図 4、図 5 に示す。横軸は図 4 は素足と靴下(綿 100%)を示し、図 5 は被験者を示しており、縦軸は知覚閾値を示している。値は 1 回目の試行は練習とし、2 回目から 5 回目の知覚閾値の最大値、

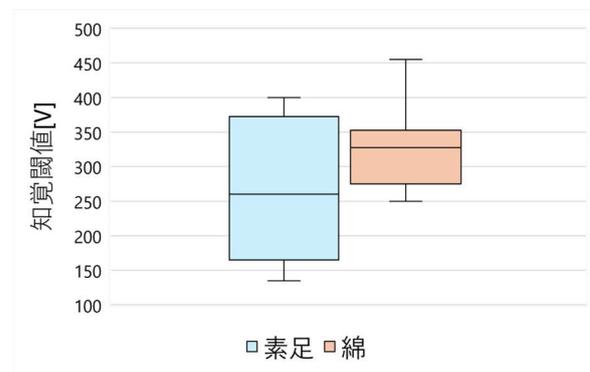


図 4 : 素足と靴下(綿 100%)を履いた場合の知覚閾値の比較

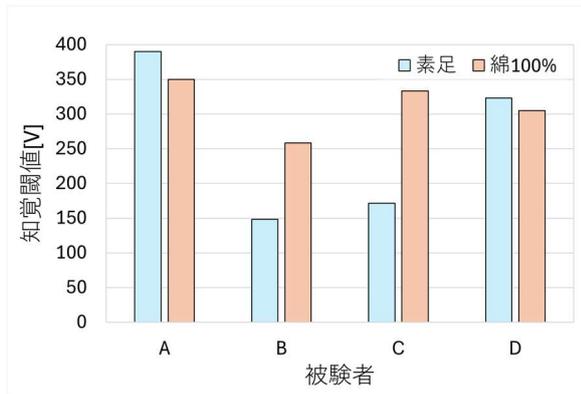


図5：被験者AからDにおける素足と靴下(綿100%)を履いた場合の知覚閾値の比較

最小値，中央値，平均を用いた。各条件での結果から，知覚閾値は靴下(綿100%)よりも素足の方が低くなった。しかし，電圧の分散は靴下(綿100%)の方が小さくなった。また，被験者ごとに結果を見てみると実験参加者の内2名は素足と靴下(綿100%)の知覚閾値は近い値になった。しかし，その他2名では素足の方が知覚しやすいという結果になった。

3. 考察

知覚閾値実験の結果から，実験参加者2名は素足と靴下(綿100%)の知覚閾値に大きな変化は見られなかった。また，他2名は素足の方が知覚しやすいという結果になり全体として有意な差は見られなかった。しかし，各条件の電圧の分散をみると靴下(綿100%)の分散は素足と比べて比較的小さい。つまり，靴下(100%)を履いた場合の知覚に個人差は少ないことを示している。実験参加者からのコメントによれば，靴下(綿100%)を履いたほうが汗を吸収してくれるため，なぞり動作を行いやすかったと報告されている。これは，靴下(綿100%)が足底の湿度を調整し，接触面の摩擦を安定させる効果があり，靴下(綿100%)を履いた状態での触覚提示の可能性を示唆している。

4. まとめ

本研究では，靴下(綿100%)をはいた状態での触覚提示の可能性を検証した。実験の結果，靴下(綿100%)が足底の湿度を調整し，接触面の摩擦を安定させる効果があり，靴下(綿100%)を履いた状態での触覚提示の可能性を示唆している。一度に長時間本ディスプレイを使用する場合は，徐々に足底に汗をかいたため素足よりも靴下(綿100%)を履いた方が安定した知覚を行うことができると考える。今後の研究では，吸湿性が異なる素材で触覚提示の可能性を確

認することで，素材の吸湿性と知覚の関係性を明らかにする。

参考文献

- [1] 酒井健輔，蜂須拓，橋本悠希，“足爪振動刺激を用いた足指腹錯覚提示に関する研究：母指への錯覚発生起における荷重条件の検証”，日本ハプティクス学会論文誌，22(3)，349-357(2017)。
- [2] 雨宮智浩，池井寧，広田光一，北崎充晃，“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)。
- [3] 渡邊淳司，安藤英由樹，朝原佳昭，杉本麻樹，前田太郎，“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)。
- [4] 内田雅之，蜂須拓，橋本悠希，“足爪振動による足指裏への錯覚現象の検証”，第23回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集，23(9)，1-8(2018)。
- [5] L. Terziman, M. Marhcal, F. Multon, B. Araldi, 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
- [6] 島津京平，橋本悠希，“触覚ポスター：プリンタブルな大型静電触覚ディスプレイの提案”，情報処理学会インタラクション，861-864，(2018)。
- [7] 福田哲生，柳沢卓，橋本悠希，“プリンタブルな大型静電触覚ディスプレイにおける基礎特性の検証”，日本バーチャルリアリティ学会論文誌，25(4)，346-355(2020)。
- [8] 山本晃生，“静電気力による映像ディスプレイ表面での触力覚提示”，システム/制御/情報，64.4，145-149，(2020)。
- [9] Shultz, Craig D., Michael A. Peshkin, J. Edward Colgate, “On the electrical characterization of electroadhesive displays and the prominent interfacial gap impedance associated with sliding fingertips”, 2018 IEEE Haptics Symposium (HAPTICS), IEEE, 151-157, (2018)。
- [10] 芝夏穂，堀金真一，橋本悠希，“プリンタブル静電触覚ディスプレイにおける印加電圧周波数と手掌部の知覚強度の関係”，第27回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集，27(9)，1-8(2022)。