



# 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

Relationship between applied voltage frequency and perceived intensity  
at the palm in printable electrostatic tactile displays.

芝夏穂<sup>1)</sup>, 堀金真一<sup>2)</sup>, 橋本悠希<sup>1)</sup>

Natsuho SHIBA, Yuki HASHIMOTO, and Shinichi HORIKANE

1) 筑波大学大学院 (〒305-8577 茨城県つくば市天王台 1-1-1, n\_shiba@vrlab.esys.tsukuba.ac.jp)

2) (株)川口電機製作所 (〒158-0097 東京都世田谷区用賀 3-3-21, business@kawaguchidenki.co.jp)

**概要**：我々は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な静電触覚ディスプレイを開発した。本ディスプレイは紙面に電極を印刷することで作製するため、低コストかつ大型化が容易な特長を持つ。本稿では、このディスプレイにおいて手掌部でなぞり動作を行った際の、印可電圧の周波数と知覚強度の関係を検証した。その結果、指腹部で行われた先行研究と同様の 100Hz 付近で知覚強度が最大となる傾向が得られたが、パチニ小体における振動検出閾とは異なる特性となった。

**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. 序論

近年, VR 分野の発展やスマートフォン等のタッチパネル付きデバイスの普及に伴い, ユーザへ触覚的フィードバックを行うディスプレイの研究は注目を集めている。これまで開発されてきた触覚提示デバイスは主に装着型, 把持型, 据置型の 3 つに分類されるが, 装着型は装置構成の煩雑さと高額な値段[1], 把持型は体験者の動きの制限[2], 据置型は感覚提示範囲の狭さ[3], といった欠点がそれぞれ存在する。そこでこれらの欠点を補う触覚提示デバイスとして, 我々は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開発した[4]。

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  $S$  [m<sup>2</sup>], 印可電圧を  $V$  [V], 絶縁層の誘電率を  $\epsilon$  とすると, 静電気力の式は(1)式のように表せる。

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

交流電圧の印可により凹凸テクスチャ感を提示する原

理を図 1 に示す。発生する静電気力が周期的に変化するため, それに応じて接触面とディスプレイ間の摩擦力も変調する。そのためなぞり動作を行うと, 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, 導電性インクを印刷することにより, 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製されたプリンタブル静電触覚ディスプレイは, 簡易な構成や低コスト化, 容易な大型化が実現され, また基盤が紙という軽く柔軟性のある素材であることを生かした高い可搬性も特徴として持つ。

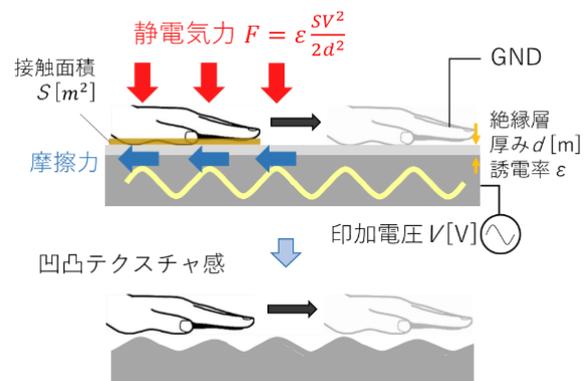


図 1：テクスチャ感提示

手の平大の面積に触覚提示を行うことができる大型のディスプレイを図2左に、柔軟性を生かしディスプレイをコンパクトに丸めた様子を図2右に示す。

静電触覚ディスプレイに関する研究は指先のみへの触覚提示が多く[3]、大面積への触覚提示に関する基礎研究はまだ進められていない。そこで本稿は、手の平大の面積に対し、印可電圧の周波数に応じた知覚強度比の検証結果を報告する。



図2 左：ポスターサイズの大型ディスプレイ  
右：丸めたディスプレイ



図3：ディスプレイ断面

## 2. 実験

本実験ではディスプレイを手掌部でなぞった際に、印可電圧の周波数に応じて知覚強度がどのように変化するか検証する。

### 2.1 実験装置

#### 2.1.1 ディスプレイ構成

本研究室で開発されたディスプレイは台紙に白色PETフィルムを用い、その上に銀ナノインク（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ている。この際、通常の印刷方法では導電パターンが高電圧に耐えられないため、（株）川口電気製作所の耐電圧加工技術を用いて1000V以上の電圧に耐えられる導電パターンを製作した。そして印刷した電極の上部に絶縁層の役割を担うPETフィルムを貼り付けた。断面図の構成を図3に示す。

#### 2.1.2 装置構成

実験の装置構成の概略を図4に示す。ディスプレイ上面を基準刺激提示面、下面を比較刺激提示面とし、以降それぞれ基準面、比較面と記述する。

作製した静電触覚ディスプレイは高電圧印可による振動を防止するためベークライト板に貼り付けた。PCと高電圧発生装置はmbedを介して、PCとテンキーは直接USBケーブルで接続した。このテンキーの操作により実験参加者は電圧調整を行う。また高電圧発生装置の出力端子をディスプレイに、GND端子をGND用リストストラップに接続した。

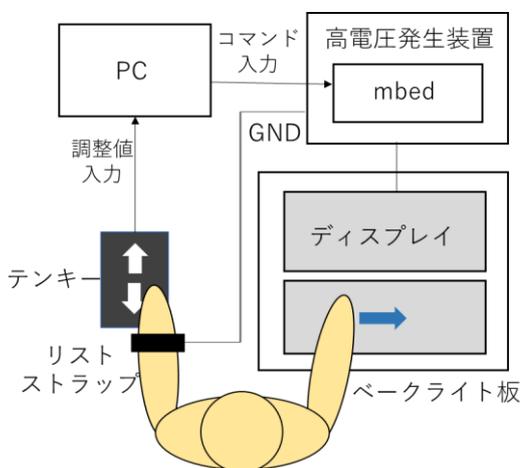


図4：装置構成

### 2.2 実験条件

なぞり動作における統制は以下の通りである。

なぞる向き：左から右

速度：2秒間に1回

なぞり動作に用いる範囲：手掌部全体

実験中はヘッドフォンからのホワイトノイズと、なぞり速度統制用のメトロノーム音の提示により聴覚の遮断を行った。印可電圧の波形はすべて正弦波とし、周波数は10Hzから280Hzまで30Hzごとに変化させた10種類を、電圧は出力可能な最大電圧である980Vまでを用いた。基準刺激は実験参加者が安定して感じ取れ、かつ比較刺激を調整する際に出力可能な最大電圧を超えないようにできるだけ小さい刺激にする必要があることを踏まえ、40Hz400Vの正弦波とした。

また手汗等により肌の水分保有量が多いと触覚が知覚

しにくいという報告が過去にされている[5][6]。これを考慮するため、実験中参加者には適宜送風機による手の乾燥と、ティッシュによるディスプレイの拭き上げを行わせ、触覚の減衰を防いだ。実験参加者は22～24歳の成人男性5名であった。

### 2.3 実験手順

本実験は、基準面と比較面の知覚強度が等しくなるように実験参加者が電圧の調整を行い、その値を監督者が記録するという内容である。詳細な手順は以下に記す。

- ① 実験参加者を椅子に座らせて実験内容を説明し、ヘッドフォンを装着させる。
- ② セット開始時に基準面をなぞり、触覚を感じられるか確認させる。
- ③ 実験参加者は基準面と比較面を任意の回数なぞり、両面の知覚強度が等しくなるようテンキーの入力によって電圧を調整する。
- ④ 強度が等しくなったと判断したらキー入力を止め、その旨を実験監督者に伝える。
- ⑤ 監督者は調整後の電圧値を記録し、次の条件を準備

する。その間実験参加者は送風機により手を乾燥させる。

- ⑥ 10種類の周波数において②～⑤の試行を行う。これを1セットとし、提示する周波数の順番を変えた計5セット行う。

各セット終了後には2分間の休憩をはさんだ。

## 2.4 実験結果

結果を図5に示す。横軸が使用した周波数、縦軸が各周波数において基準刺激に対し調整した電圧値である。値は被験者ごとに各周波数5回分の平均を用いた。また調整の際装置の最大出力を超えてしまう、最大出力であっても感じられないという場合は1000Vとして記録した。

100Hz付近の周波数で電圧値を小さく調整する傾向が見られた。調整された電圧値が小さいほど強く知覚している刺激であるため、知覚強度が高い周波数と言える。またこれをもとに各周波数において基準刺激に対する知覚強度の比をとったグラフを図6に示す。

最も知覚強度が高い周波数が70Hzであった実験参加者は2名、100Hzであった参加者は3名であった。逆に最も知覚強度が低い周波数が10Hzであった実験参加者は3名、280Hzであった参加者は2名であった。

## 3. 考察

結果より、本ディスプレイにおける周波数に応じた知覚は70～100Hz付近を頂点とした山なりのような特性を持つことが確認された。これは過去に指腹部で行った実

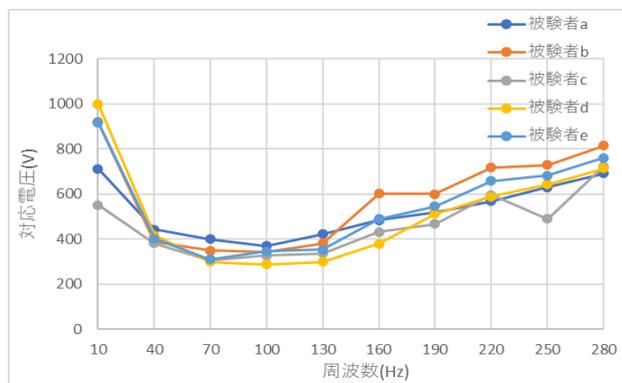


図5：調整電圧値

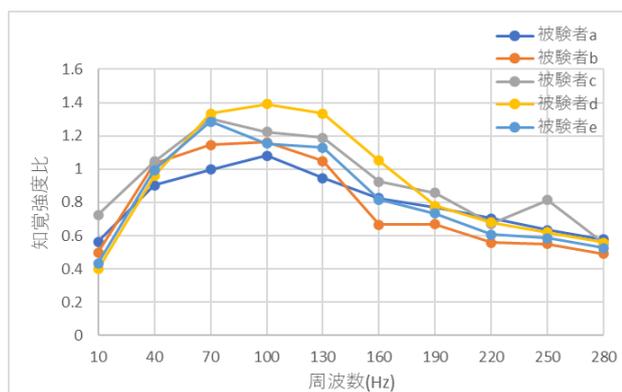


図6：知覚強度比

験において報告された特性に準じている[7]。このような傾向を示す理由として、手掌部の機械受容器による影響が考えられる。振動刺激の周波数に応じた検出閾値を測定した先行研究[8]では、40Hz以上の振動検出閾値に関してはパチニ小体により決定されている説が有効とされていた。このパチニ小体は250Hz付近に最低閾値を持つU字型の振動検出閾値曲線を描く特性があり、図5の特徴と合致している。しかし最低閾値をとるとされている周波数が250Hzと、本実験で得られた100Hz付近という結果とは異なったものになった。

この理由として、振動提示面の面積の大きさ、接触部位、触運動の受動的・能動的といった違いによるものが考えられる。まず、振動検出閾を調査した実験においては母指球に振動子を接触させて計測していた点に対し、本実験では手掌部とそれを十分カバーする広い振動提示面を用いた。振動提示面の大きさによるエッジの影響の違い、接触範囲の違いはもちろんのこと、手掌部と母指球では機械受容器の分布が異なることも考慮すべき点である。振動検出閾には少なくとも2種類の機械受容器が影響している説が唱えられており、特に40Hz以下の振動検出閾に関してはどの機械受容器が影響しているか定まっていない[8]。そのため部位による受容器の分布の違いは知覚に大きく作用する可能性がある。また先行研究では受動的触知覚による実験であったため、本実験のような能動的な触運動知覚に関する検証とは条件の違いが大きい。これらの違いから、一般的なパチニ小体の振動閾の特性とは異なる結果が得られたと考えられる。

## 4. まとめ

本稿では静電触覚ディスプレイにおいて、印可電圧の周波数に応じた手掌部の知覚強度比の特性を検証した。実験より、静電触覚ディスプレイを用いた指腹部を対象とする先行研究を支持する結果が得られたが、振動刺激閾に関する先行研究とは異なる結果となった。後者に関しては、実験条件にいくつかの違いが存在したことが原因と考えられる。

今後は被験者を増やし、周波数の変化幅を細かくしてさらに詳細な検証を行う。

## 謝辞

本研究の一部は、JST AIP-PRISM(JSMJCR1)、科研費(21H04909)の支援を受けたものである。なお、本研究は筑波大学システム情報系研究倫理委員会の承認(審査承認番号 2020R373)を受け、実施された。

## 参考文献

- [1] haptx®, 「HAPTX GLOVES DK2」, <https://haptx.com/> (最終閲覧日: 2022年2月1日)
- [2] 鈴木隆裕, 池田篤俊, 高松淳, & 小笠原司. "把持型触

- 覚提示デバイスを用いた振動による柔らかさ提示." 日本ロボット学会誌 30.7 (2012): 718-726.
- [3] BAU, Olivier, et al. "TeslaTouch: electrovibration for touch surfaces." In: Proceedings of the 23rd annual ACM symposium on User interface software and technology. (2010). 283-292.
- [4] 島津京平, 橋本悠希. "触覚ポスター: プリント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 (2018): 861-864.
- [5] 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 (2020): 145-149.
- [6] Shultz, Craig D., Michael A. Peshkin, and 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, (2018): p151-157
- [7] 富田洋文, 嵯峨智, 高橋伸, & 梶本裕之. "静電気力を用いた触覚ディスプレイにおける知覚強度の評価." ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集 2018. 一般社団法人 日本機械学会, (2018): 1A1-J13.
- [8] 大山正, 今井省吾, 和気典二. "新編 感覚・知覚心理学ハンドブック", 誠信書房, (1994):