

静電気力による触覚提示手法を用いた
触図提示システムに関する研究

2021年 9月

富田 洋文

静電気力による触覚提示手法を用いた
触図提示システムに関する研究

富田 洋文

システム情報工学研究科
筑波大学

2021年 9月

概要

静電気力触覚ディスプレイは簡易的な構造で触覚提示を可能とする上に費用コストが安く、プロトタイプが製作しやすい特徴がある。これまでの静電気力触覚ディスプレイを用いた研究では、一部の触感の提示、一本指のみを用いた図形認識、そして限られた触察戦略の中での図形情報の提示を行っていた。

本研究では、静電気力触覚ディスプレイを用いた触図提示手法における図形認識の向上を目的とし、現状の静電気力触覚ディスプレイの課題に対して調査及び開発を実施し、評価実験を実施した。

静電気力触覚ディスプレイが提示できる触感表現に関する調査では、粗いテクスチャや滑らかなテクスチャ、他にも「ぷつぶつ」といった離散的な触感を表現できることができた。この調査によって、より詳細な周波数や波形の種類を用いることで、静電気力触覚ディスプレイが表現できる触感の特徴を波形ごとで可視化することができた。またそれらの触感がどれほど強さを感じとれるのかを示す知覚強度についても調査した。この調査結果から波形によって知覚強度が異なることが分かった。さらに知覚強度に関する簡易モデルを作成し、実際に得られた実験結果とこのモデルによる知覚強度の推定値を比較し、このモデルが有用であるかを検証した。

次に一本指による触察に比べて複数指による触察のほうが図形を把握するのに有用であることを示し、静電気力触覚ディスプレイが触図提示システムとして利用するために複数指への対応の必要性を調査した。これまでの静電気力触覚ディスプレイは、一本指による触察しかできなかった。このため、これまで図形識別は識別度が低く、提示できる図形情報に限りがあった。そこで複数指への図形情報の提示を可能とするために、銀ナノインクを図形状に印刷した触覚ディスプレイを複数用意した。これらの触覚ディスプレイを用いて、図形識別に関する評価実験を実施した。また触覚ディスプレイ上に複雑な図形を提示し、複数指で図形を認識してもらった後に、その図形を実際の紙に描いてもらった。これらの実験から、複数指を用いることによって図形の位置や大まかな大きさの把握、大きな図形や複雑な図形の概形を取得できることが見込まれた。また、複数電極を用いて動的に触覚を提示する領域を変更できるデバイスを提案することで、図形の切り替えが可能な触覚ディスプレイを検討した。

最後に、静電気力触覚ディスプレイ上にある静止した指への触覚提示を可能とするために、線状の電極を用いた提示手法を考案した。この手法は従来の静電気力触覚ディスプレイとほぼ同じ構造としながらも、電極を導電糸またはステンレス線に変えることで触覚の提示を試みた。評価実験を通して、一部の波形を用いれば静止した指への触覚提示の可能性が示された。また、複数の実験条件を設けることで、この触覚提示に関する制約条件を調査した。

これらの調査、または提案手法の考案と開発から、静電気力触覚ディスプレイでの触図提示に必要な要素を明らかにした。

目 次

| | |
|---|-----------|
| 第1章 序論 | 1 |
| 1.1 本研究の背景と課題 | 1 |
| 視覚障害者向け触図の課題 | 1 |
| 触覚ディスプレイによる図の情報提示 | 1 |
| 静電気力触覚ディスプレイを用いた図の情報提示に関する研究と課題 | 2 |
| 1.2 本研究の目的と成果 | 3 |
| 図形情報を効果的に認識させるための触感を生成する入力信号の調査 による成果 | 3 |
| 複数指による触察の有効性とその図形認識に関する調査による成果 | 4 |
| 静止した指への触覚提示を可能とする手法の提案と検証による成果 | 4 |
| 1.3 本論文の構成 | 5 |
| 第2章 関連研究 | 6 |
| 2.1 触図と触図製作装置 | 6 |
| 2.1.1 触図製作の簡易化 | 6 |
| 2.1.2 コンピュータとのインタラクションとして用いる場合での触図の課題 | 6 |
| 2.2 触覚ディスプレイを用いた図の情報提示に関する研究 | 7 |
| 2.3 静電気力触覚ディスプレイとそのディスプレイでの図の情報の提示に関する研究 | 8 |
| 2.3.1 静電気力触覚ディスプレイに関する研究 | 8 |
| 2.3.2 静電気力触覚ディスプレイを用いた図の情報の提示に関する研究 | 8 |
| 2.4 触図や触覚ディスプレイにおける図形認識に関する研究 | 9 |
| 2.4.1 触図や触覚ディスプレイを利用した図形情報の認識に関する研究 | 9 |
| 2.4.2 静電気力触覚ディスプレイを用いた図形情報の認識に関する研究 | 10 |
| 2.5 触察戦略に関する研究と静電気力触覚ディスプレイにおける課題 | 10 |
| 2.6 健常者と視覚障害者の触知覚に関する関連研究 | 12 |
| 第3章 静電気力触覚ディスプレイにおける入力波形に対する知覚強度と触感の調査 | 13 |
| 3.1 静電気力を用いた触覚ディスプレイの原理 | 13 |
| 3.2 静電気力触覚ディスプレイの実装 | 15 |
| 3.2.1 高電圧発生装置 | 15 |
| 高電圧発生装置に内蔵されたマイコン | 15 |
| アナログ入出力回路 | 17 |

| | |
|---|-----------|
| 3.2.2 絶縁膜 | 18 |
| 3.3 静電気力触覚ディスプレイの触感に関する調査 | 18 |
| 3.3.1 触感表現とオノマトペの関連 | 19 |
| 3.3.2 評価実験に使用した機材 | 20 |
| 3.3.3 電極に印加する入力波形 | 21 |
| 3.3.4 実験協力者と触察時の制約 | 22 |
| 3.3.5 実験手順 | 22 |
| 3.3.6 実験結果 | 22 |
| 3.3.7 考察 | 27 |
| 3.4 入力波形に対する知覚強度に関する調査 | 27 |
| 3.4.1 マグニチュード推定法 | 28 |
| 3.4.2 実験協力者 | 28 |
| 3.4.3 入力波形 | 29 |
| 3.4.4 実験手順 | 29 |
| 3.4.5 実験結果 | 29 |
| 3.4.6 考察 | 30 |
| 100 Hz 以上におけるグラフの傾向とその考察 | 30 |
| 100 Hz 未満におけるグラフの傾向とその考察 | 31 |
| 3.5 周波数成分に着目した入力波形での知覚強度の評価実験 | 32 |
| 3.5.1 追加実験で用意した入力波形 | 32 |
| 3.5.2 実験結果と考察 | 34 |
| 3.6 知覚強度の予測モデルの提案 | 35 |
| 提案した知覚強度モデルによる知覚強度の推定とその結果 | 36 |
| 3.7 触図提示に適した入力波形に関する考察 | 36 |
| 3.8 本章のまとめ | 38 |
| 第4章 複数指による触察での図形認識に関する調査 | 40 |
| 4.1 触図の認識を一本指と複数指で比較した研究 | 40 |
| 4.2 銀ナノインクを用いた静電気力触覚ディスプレイとその実装 | 41 |
| 4.2.1 従来の静電気力触覚ディスプレイにおける複数指への触覚提示の課題 | 41 |
| 4.2.2 複数指への触覚提示が可能な静電気力触覚ディスプレイ | 42 |
| 4.2.3 銀ナノインクを用いた静電気力触覚ディスプレイの研究 | 42 |
| 4.2.4 銀ナノインクを用いた静電気力触覚ディスプレイの実装 | 43 |
| 4.3 一本指と複数指による触察時の図形識別に関する評価実験 | 45 |
| 4.3.1 実験条件と実験手順 | 45 |
| 実験協力者 | 45 |
| 使用する指の制約 | 45 |
| 評価実験に使用する図形 | 45 |
| 入力波形 | 46 |

| | |
|---|-----------|
| 実験手順 | 47 |
| 4.3.2 実験結果 | 47 |
| 4.3.3 学習効果による実験結果への影響の考察 | 52 |
| 4.3.4 実験結果と先行研究の結果との比較 | 52 |
| 4.3.5 図形認識時の触察戦略に関する考察 | 54 |
| 4.4 自由描画による図形認識に関する評価実験 | 58 |
| 4.4.1 評価実験で使用した図 | 58 |
| 4.4.2 実験協力者と実験タスク | 59 |
| 4.4.3 実験手順 | 59 |
| 4.4.4 実験結果 | 62 |
| 4.4.5 考察 | 62 |
| 4.5 複数電極を用いた静電気力触覚ディスプレイ | 63 |
| 4.5.1 複数電極を用いた静電気力触覚ディスプレイによる触覚提示領域の制御 | 64 |
| 4.5.2 複数電極を用いた静電気力触覚ディスプレイの予備的評価 | 65 |
| 実験協力者 | 66 |
| 入力波形 | 66 |
| 実験に使用する図形 | 66 |
| 実験手順 | 66 |
| 実験結果 | 68 |
| 考察 | 68 |
| 4.6 図形認識のさらなる向上に関する考察 | 69 |
| 4.7 本章のまとめ | 71 |
| 第5章 静止した指への触覚提示の提案手法とその手法の有用性に関する調査 | 72 |
| 5.1 静止した指への触覚提示を可能とするハードウェアの提案とその実装 | 72 |
| 5.1.1 平行板静電アクチュエータ | 73 |
| 5.1.2 平行板静電アクチュエータと静電気力触覚ディスプレイを組み合わせた関連研究 | 74 |
| 5.1.3 線状の電極を用いた静電気力触覚ディスプレイの提案 | 74 |
| 5.1.4 静止した指への触覚提示を可能とする静電気力触覚ディスプレイの実装 導電糸を用いた電極面 | 74 |
| 絶縁膜 | 75 |
| 5.2 導電糸を用いた触覚提示装置の評価実験 | 75 |
| 5.2.1 恒常法による評価実験 | 76 |
| 触覚提示に対する評価方法 | 76 |
| 恒常法による振幅の閾値の推定 | 76 |
| 5.2.2 評価実験に関する実験条件 | 77 |
| 実験協力者 | 77 |
| 入力波形 | 77 |

| | |
|--|-----------|
| 押下力 | 78 |
| 5.2.3 実験手順 | 78 |
| 5.2.4 実験結果 | 79 |
| 各波形に対する閾値を算出できた実験協力者数 | 79 |
| 波形に対する振幅の閾値 | 79 |
| 押下力ごとの評価結果 | 82 |
| 5.2.5 考察 | 82 |
| 波形に対する評価結果の考察 | 82 |
| 押下力に対する評価結果の考察 | 83 |
| 5.3 実験条件のパラメータを増やした追加実験 | 83 |
| 5.3.1 周波数成分に着目した入力波形を用いた評価実験 | 84 |
| 周波数成分に着目した入力波形 | 84 |
| 押下力 | 84 |
| 電極 | 85 |
| 絶縁膜 | 85 |
| 実験協力者 | 85 |
| 実験手順 | 85 |
| 実験結果 | 86 |
| 考察 | 87 |
| 5.3.2 導電糸の配置パターンに関する評価実験 | 88 |
| 電極と配置パターン | 88 |
| 入力波形 | 89 |
| 絶縁膜 | 89 |
| 実験協力者 | 89 |
| 実験手順 | 90 |
| 実験結果 | 90 |
| 考察 | 90 |
| 5.3.3 電極の材質と直径に関する評価実験 | 91 |
| 線状の電極 | 91 |
| 入力波形 | 93 |
| 絶縁膜 | 93 |
| 実験協力者 | 93 |
| 実験手順 | 93 |
| 実験結果 | 93 |
| 考察 | 94 |
| 5.4 本章のまとめ | 95 |
| 第6章 結論 | 96 |
| 6.1 本研究の貢献 | 97 |

| | | |
|-------|---|-----|
| 6.2 | 今後の展望 | 98 |
| 6.2.1 | 触図へのインタラクティブな操作や多種な触図の提示を可能にするハーデウェアの実装 | 98 |
| 6.2.2 | 複数の触感を用いた付加情報の提示に関する展望 | 99 |
| 6.2.3 | 視覚障害者を対象とした静電気力触覚ディスプレイの図形認識評価に関する展望 | 100 |
| | 謝辞 | 101 |
| | 著者論文リスト | 109 |

図 目 次

| | |
|---|----|
| 1.1 (a) 触地図の例 [一刈 15] と (b) ピンアレイアクチュエータを用いた触図の表現 の例 [USKK16] | 2 |
| 2.1 静電気力触覚ディスプレイを用いた図形提示レンダリング手法. (a) 移動する 指が提示する図形領域外の場合. (b) 移動する指が提示する図形領域内の場合. | 9 |
| 3.1 静電気力を用いた触覚提示システムの動作原理の模式図 | 14 |
| 3.2 高電圧発生装置 | 16 |
| 3.3 高電圧発生装置のメイン回路の概略図 | 17 |
| 3.4 アナログ入出力回路の概略図 | 17 |
| 3.5 オノマトペのマップ ([早川 10, WHM ⁺ 12] を参考に作図) | 19 |
| 3.6 絶縁膜が貼られた ITO 電極 | 20 |
| 3.7 評価実験に使用した 4 種類の入力波形の概形(左図)とその波形の周波数成分の 概形(右図) | 21 |
| 3.8 4 つの領域に分けたオノマトペのマップ | 23 |
| 3.9 波形ごとの実験協力者が回答した触感の領域の分布 | 26 |
| 3.10 知覚強度の評価結果 | 30 |
| 3.11 追加実験で用いる入力波形 | 33 |
| 3.12 追加実験での周波数に対する入力波形ごとの知覚強度のグラフ | 34 |
| 3.13 入力波形ごとのパラメータの比較 | 37 |
| 4.1 単一電極上で複数指を同時になぞった場合の様子 | 42 |
| 4.2 銀ナノインクを用いた静電気力触覚ディスプレイの構成図 | 43 |
| 4.3 実際の銀ナノインクを用いた静電気力触覚ディスプレイ. 左側に高電圧発生装 置, 右側に絶縁膜が貼られた銀ナノインク電極. | 44 |
| 4.4 評価実験に使用した 4 つの触図 | 46 |
| 4.5 実験協力者が図形を触察している様子 | 48 |
| 4.6 各図形における触察方法ごとの一人あたりの平均識別正答率の結果 | 49 |
| 4.7 提示された図形に対する回答した図形の数:一本指による触察(上), 複数指に よる触察(下) | 50 |
| 4.8 各図形における平均探索時間の結果 | 51 |

| | |
|---|----|
| 4.9 触察時の指の様子. (a) 垂直方向に指をスキャンする様子と (b) 図形の境界線上をなぞる様子 | 55 |
| 4.10 触察戦略ごとの平均識別正答率の結果 | 57 |
| 4.11 触察戦略ごとの平均識別正答率の結果 | 57 |
| 4.12 複数指における図形ごとの触察戦略に対する識別率の結果 | 59 |
| 4.13 提示した矢印の図形(左上)と実験協力者が認識した図 | 60 |
| 4.14 提示した地図の図形(左上)と実験協力者が認識した図 | 61 |
| 4.15 複数電極を用いた触覚提示装置の表面(左)と裏面(右) | 64 |
| 4.16 触覚提示装置のシステム図(左)と電極とソリッドステートリレーの構成模式図(右) | 65 |
| 4.17 複数電極によるシステムでの実験に使用した図形 | 67 |
| 4.18 複数電極を用いた触覚ディスプレイにおける図形識別率に関する実験結果 | 68 |
| 4.19 (a) 指を速く動かした時の様子. (b) 指を遅く動かした時の様子 | 70 |
| 4.20 (a) 本研究における図形のレンダリング手法. (b) 図形内部, 境界線, 及び背景で異なるテクスチャ感を提示する手法 | 70 |
| 5.1 (a) 従来の静電気力触覚ディスプレイ, (b) 平行板静電アクチュエータ [BP19, PRKK14]. (c) 提案手法の模式図: 導電糸や針金のような線状の電極の上に薄い柔らかな絶縁膜を貼り付ける. (d) 指表面の拡大図. | 73 |
| 5.2 (a) 作成した触覚ディスプレイ上に指を置く様子, (b) 導電糸を縦縞状に並べた様子. | 75 |
| 5.3 実験での評価結果値に対する心理測定閾値の例 | 77 |
| 5.4 実験時に LCD に表示した画面の例 | 79 |
| 5.5 入力波形に対して振幅の閾値を算出できた実験協力者の数 | 80 |
| 5.6 波形に対する振幅の閾値の結果 | 81 |
| 5.7 新たに用意した 6 つの波形 | 85 |
| 5.8 波形ごとで振幅の閾値を算出できた実験協力者の数 | 86 |
| 5.9 波形ごとの振幅閾値の結果 | 87 |
| 5.10 波形ごとの最小閾値(左)とその時の周波数(右) | 88 |
| 5.11 用意した 3 つの電極配置パターン | 89 |
| 5.12 電極配置パターンごとの波形に対する閾値の結果 | 91 |
| 5.13 用意した 2 つの直径の針金による電極 | 92 |
| 5.14 直径が異なる電極ごとの波形に対する閾値の結果 | 94 |
| 6.1 本研究における静電気力触覚ディスプレイを用いた触図提示システムと今後に見込まれる触図提示システム | 99 |

表 目 次

| | | |
|-----|--|----|
| 2.1 | 静電気力触覚ディスプレイや他の触覚ディスプレイで利用できる触察戦略 | 11 |
| 3.1 | 触感に関する評価実験の結果：正弦波 | 24 |
| 3.2 | 触感に関する評価実験の結果：矩形波 | 25 |
| 3.3 | 触感に関する評価実験の結果：鋸歯状波 | 25 |
| 3.4 | 触感に関する評価実験の結果：デルタ関数 | 26 |
| 4.1 | 先行研究における複数指と一本指での結果の差異 | 41 |
| 4.2 | 各図形及び試行回数に対する識別正答数と、試行回数に対する識別正答数の相 関係数 | 52 |
| 4.3 | 先行研究と本研究における複数指と一本指での結果の差異 | 53 |
| 4.4 | 実験協力者ごとの使用した触察戦略の回数 | 54 |

第1章 序論

本章では初めに本研究の背景を述べ、次にその背景に対する研究目的、及び研究内容の概要を述べ、最後に本論文の構成を述べる。

1.1 本研究の背景と課題

視覚障害者向け触図の課題

視覚障害者は現在、世界で 3600 万人ほどの数であり、2050 年頃には 1 億人を超える人数になると推測されている [BFB⁺17]。このような視覚障害者の増加に伴い、視覚障害者同士、または健常者とのコミュニケーションの機会が増えることも予測される。しかし遠隔でのコミュニケーションが必要となった場合、インターフェースとしてコンピュータを用いることは避けられない。このような状況の場合、会話や音楽といった音声によるコミュニケーションは容易ではあるが、文字や画像、動画といった視覚情報に比重があるコンテンツのやり取りは容易ではない。特に、コンピュータから視覚障害者にこれらの情報を提示するインターフェースが大きな問題となる。

一般に視覚障害者は文字や図に関する情報を取得するために触図を用いることが多い。触図とは地図(図 1.1(a))やグラフといった音声のみで伝えることが難しい情報を、触覚を通してユーザに提示するための図である [渡辺 18]。しかし、一般的な触図は静的であり、提示したい図の情報が複数ある場合には、各触図を製作する必要がある。そして触図を使う場合には、読みたい図形情報が変わるたびに違う触図に取り換える必要がある。また、ドキュメント内の情報を視覚的に読む場合には、ページ送りや図の拡大縮小といったインタラクションを行うことが可能であるが、触図のみでこれらのインタラクションを行う場合、拡大した図や縮小した図をそれぞれ用意しなければならない。そのため、触図を動的に切り替える触覚ディスプレイが開発されている。

触覚ディスプレイによる図の情報提示

触覚ディスプレイとはユーザに対して力の提示や感触の提示等といった触覚体験を提示する装置である。触覚ディスプレイの提示手法としては、皮膚に機械的な突起や振動 [YL07, MFK⁺07, TYI17]、摩擦を提示する手法 [OHRT14, CCP10]、熱といった温度による提示手法 [YKJ09, HWAK11]、他にも電気刺激による提示手法 [USKK16] がある。これまでに多くの研究者が平面状の触覚ディスプレイを用いて動的に図形を切り替える触覚ディスプレイを開発してきた。

この中でも特にピンアレイを用いた触覚ディスプレイが多い [YL07]. このディスプレイは、図 1.1 (b) のように上下に動くピンが二次元状に並んでおり、提示したい図形の領域をそれらのピンの突起によって表現する。そしてこの領域の境界線を認識することで図形の形状を把握する。この手法の特徴として図形のレンダリング手法が非常に単純で、ユーザにとって図形を認識しやすいことが挙げられる。しかし、このピンアレイの手法はピンの 1 つ 1 つにアクチュエータが必要となるため、製作コストが非常に高くなる。

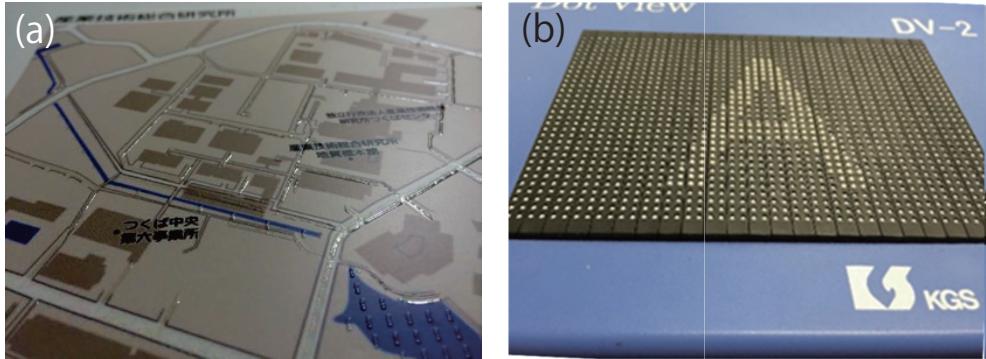


図 1.1: (a) 触地図の例 [一刈 15] と (b) ピンアレイアクチュエータを用いた触図の表現の例 [USKK16]

そこで、本研究では、静電気力触覚ディスプレイを図の情報提示に利用できないかと考えた。この静電気力触覚ディスプレイは、触覚ディスプレイの中でも、より安価かつ小さな装置で触覚提示が行える。このディスプレイの特徴として、装置への入力信号を制御することでユーザに粗いや滑らかといったテクスチャ感を提示することができる。また、このディスプレイは透明素材などを使用することで画像や絵の上にテクスチャ感を付与することも可能である [BPIH10, FSH19]。これにより、触地図のような視覚障害者と健常者に対して共通の図の情報を共有するアプリケーションも考えられる。

静電気力触覚ディスプレイを用いた図の情報提示に関する研究と課題

静電気力触覚ディスプレイは安価かつ平面上のテクスチャ表現が得意なディスプレイではあるが、触図のような図形情報を提示する場合、現状の提示手法では実用的であるとは言い難い。これまでに静電気力触覚ディスプレイを用いた図形情報を提示する試みが行われてきた [BZB⁺18, XIP⁺11, TAW⁺19]。これらの研究は、単純な図形を用意し、指でディスプレイ上をなぞった際に、図形をどれほど識別できるかについて調査した。この結果、これらの平均識別正答率は 70%未満であった [XIP⁺11, TAW⁺19]。点状の輪郭線で描かれる点図を用いた実験 [長尾 17] では、一辺または直径のサイズが 11.5 mm といった小さな図形でも平均識別正答率が 80%を超えた結果となった。

静電気力触覚ディスプレイによって提示された図形の識別率が低い理由として、3 つが挙げられる。1 つ目は、図形情報を効果的に認識させるためにはどのような入力信号で触感を生

成すれば良いかが調査されていないことが挙げられる。これまでの研究では触感のある領域と無い領域で図形を表現してきたが、この触感自体の詳細な調査がされていないため、図形領域をより強調できる静電気力触覚ディスプレイ向けの入力信号が不明である。2つ目は、触察が一本指でしか行われていないことが挙げられる。これは現状の静電気力触覚ディスプレイの多くの実験では、複数指でディスプレイ上をなぞる際に、すべての指に同時に同じ触覚を提示してしまうことが原因である。したがって、実際にこの触覚ディスプレイを用いたアプリケーションを利用する際には、一本指への触覚提示が主となっている。そのため、図形の辺の長さや、頂点の角度といった図形の要素を捉えることが難しく、時間もかかってしまう。3つ目は、指を動かさないと触覚を感じ取れないことが挙げられる。これは現状の実装では後述する理由から静電気力が指に対して触覚を知覚させるほど働かないからである。この静止した指への触覚提示は関連研究で述べる一般的な触察戦略 [MM16]において必須であるが、現状の静電気力触覚ディスプレイにおいては実現されていない。そのため、複数指による触察も含め、現状の静電気力触覚ディスプレイではまだ一般的な触察戦略の一部しか利用できていない。したがって、静電気力触覚ディスプレイを図の情報提示装置として利用するには、まずこれらの課題を解決することが必要である。

1.2 本研究の目的と成果

本研究は、静電気力触覚ディスプレイを用いた触図提示手法における図形認識の向上を目的とし、現状の静電気力触覚ディスプレイの課題に対して調査及び開発を実施し、健常者を対象とした評価実験を通して、静電気力触覚ディスプレイでの触図提示に必要な要素を明らかにする。そのために次の3つの検討事項を挙げ、それぞれの事項に関する評価調査及び開発を行った。

- 図形情報を効果的に認識させるための触感を生成する入力信号の調査
- 複数指による触察の有効性とその図形認識に関する調査
- 静止した指への触覚提示を可能とする手法の提案と検証

図形情報を効果的に認識させるための触感を生成する入力信号の調査による成果

初めに、静電気力触覚ディスプレイが提示できる触感と、触感の強さを表す知覚強度について調査した。そしてこれらの結果から、触図提示システムにおいて図形領域をより明確にする入力信号を検討した。触図を提示するには、提示する図形領域をユーザに認識させないといけない。そのため、図形内部に静電気力触覚ディスプレイによる触覚を提示することで、図形内部と外部の触感の違いが生まれ、その異なる触感を指の移動で図形の概形を把握することができる [XIP⁺11]。しかし、これまでの調査では一つの入力信号による触感のみで触図の提示を行っており、図形領域を把握させるのに適した入力信号であったかどうかは調査されていない。さらに、触感に関する調査もこれまでに簡易的な評価は行われてきたが、詳細

な条件での入力信号を用いた評価は実施されていない。そこで静電気力触覚ディスプレイが提示できる触感と知覚強度を調査するための評価実験を実施した。

この触感に関する調査から、2つのことが明らかになった。1つ目は、波形の種類(例えば正弦波や矩形波)が同じでも、主周波数を変えると触感が変わることである。特に低い主周波数では「ざらざら」や「じよりじより」といった粗い表現のテクスチャ感と「ふつぶつ」といった離散的な触感を、高い主周波数では「さらさら」といった滑らかな表現のテクスチャ感を提示できることが分かった。2つ目は波形の種類によってこれらの提示する周波数帯が変化することである。

一方、知覚強度に関する調査からも、2つのことが明らかになった。1つ目は、同じ波形の種類でも主周波数が異なる、または主周波数が同じでも波形に含まれる周波数成分の構成が異なることで、知覚強度に差が表れることである。2つ目は、入力波形に含まれる周波数成分の構成から大まかな知覚強度の推測が可能であることである。

これらの調査により、静電気力触覚ディスプレイが提示できる触感の分布と、それらの触感の知覚強度の傾向を把握することができた。また、これらの結果から触図提示システムにおいて図形領域をより明確にする入力信号を特定できた。

複数指による触察の有効性とその図形認識に関する調査による成果

静電気力触覚ディスプレイ上で触図を触察する際に複数指が必要であるかどうかを調査し、一本指による触察に比べて複数指による触察のほうが図形を把握するのに有用であることを示した。従来の静電気力触覚ディスプレイでは、ユーザが一本指のみを用いて提示された図形を触察し認識してきた。しかし、一般的な触察行為においては、複数指を同時に用い、対象をなぞることが多い。静電気力触覚ディスプレイも一本指による触察に対して複数指による触察の方が図形を認識しやすいことが予想される。そこで静電気力触覚ディスプレイにおける複数指による触察の有効性を示すために、限られた選択肢の中から提示された図形を選ぶ図形識別に関する評価実験と、提示された図形を実際に描いてもらう図形認識に関する評価実験を実施した。

これらの図形認識に関する評価実験の結果、一本指による触察より複数指による触察のほうが図形認識に関する有効性があることが分かった。さらに触察時の手の様子を観察することで、複数指による触察によって図形の全体の概形や頂点周辺の情報が捉えやすくなった可能性が示せた。一本指を用いた触察では図形の輪郭を探索するユーザが少なく、図形の上を水平方向または垂直方向になぞるユーザが多くなったが、複数指による触察では図形の輪郭を探索するユーザが増えた。

静止した指への触覚提示を可能とする手法の提案と検証による成果

静電気力触覚ディスプレイ上での静的接触を細い線状の電極を使用することで可能にした。これまでの静電気力触覚ディスプレイは静止した指に対して触覚を提示することが困難であった。この制約があると、静電気力触覚ディスプレイにおける触察でユーザが図形を把握する

ことが難しくなる。そこで、静止した指に触感を提示するために平行板静電アクチュエータの原理を模した構造を静電気力触覚ディスプレイに取り入れ、この手法によって静的接触が可能になるかどうかを調査した。

この調査から2つのことが明らかになった。1つ目は、細い線状の電極を並べ、その上に絶縁膜を敷くことで、ディスプレイに触れている静止した指に振動のような触覚を提示できることが分かった。2つ目は、この触覚提示手法を利用するにあたり、入力信号の制約や押下力の条件が明らかになった。

1.3 本論文の構成

本稿では、2章において関連研究について述べる。ここでは触図を提示する装置の関連研究と、静電気力触覚ディスプレイを用いた触図提示手法に関する研究について述べる。

3章では、初めに静電気力触覚ディスプレイの構造と原理について述べ、そして入力波形に対する触感と知覚強度に関する調査について述べる。この調査において、これまでの研究では実施されなかった詳細な周波数や波形の種類を用いた評価実験を実施することで、波形ごとの静電気力触覚ディスプレイが表現できる触感の特徴を可視化することができた。そしてこれらの触感表現がどれほど強さで提示できるかを示す知覚強度について調査した。そしてこれらの調査結果から触図提示に最適な入力信号に関して議論する。

4章では、一本指による触察と複数指による触察を比較し、複数指による触察の有効性について述べる。銀ナノインクを用いた静電気力触覚ディスプレイを用いることで単電極ではありながら複数指に対応した図形の提示を可能にし、この触覚ディスプレイを用いて図形識別に関する評価実験を実施する。また複雑な図形を提示し、複数指による触察でどれほど図形を把握できるかを調査する。これらの調査から複数指による触察の有効性と、提示できる図形の特徴を考察する。

5章では、静電気力触覚ディスプレイの課題の1つである「静止した指への触覚提示」に関して、静電気力触覚ディスプレイの電極部分として線状の電極を用いることでそれが可能かどうかを検証する。恒常法を用いた評価実験を実施することで、入力波形ごとの触覚提示に必要な振幅閾値を算出することができ、波形ごとの閾値の特性を考察する。

そして最後に第6章にて本研究をまとめ、今後の展望を示し、結びとする。

第2章 関連研究

本章では初めに触図を用いた図の情報提示に関する研究を述べ、本研究において利用する触覚提示手法である静電気力触覚ディスプレイの説明、およびこのディスプレイを用いた図の情報提示に関する研究について述べる。

2.1 触図と触図製作装置

視覚情報を使わないので図の情報をユーザに伝達するのに触図が用いられることが多い。触図とは二次元状に広がる線や点、または面といった形状情報を、触覚を通して視覚障害者に提示するための図であり、地図やグラフといった音声のみで伝えることが難しい情報を提示できる [渡辺18]。触図の例として触地図 [一刈15, ČBH⁺16] がある。触地図は道路や建物の形状を伝えるために使われる。この触地図は主に図の情報に基づいた凹凸を元からある平面な地図上に作成し、その凹凸をユーザに触れてもらうことで建物の位置や大きさといった地図情報を提示させる。

2.1.1 触図製作の簡易化

近年ではコンピュータ内の地図情報や図の情報を専用の印刷機と硬化用機材を使うことで容易に印刷することができるようになった [一刈15, IYK16]。例えば、図形上に透明なUVニスを重ね塗りすることで凹凸を生成する手法や、PIAF印刷という特殊なインクで図形を印刷し、そのインクを熱することで膨張し凹凸を生成する手法がある。他にも3Dプリンタを利用した触地図 [Göt16, TDSS16, HMB18] や木材をレーザー加工で作成した触地図 [GBMJ17] の取り組みがある。さらにこれらの触地図にタッチ認識を付加することで、タッチした部分について音声による説明がされ、形状情報以外の情報をユーザに提示する研究もある [BTO⁺15, Göt16, HMB18]。また2.5次元プリンタ mofrel [黒澤19] は平面状の素材を凹凸状に加工し、さらにその表面にテクスチャを付与する加工を短い時間での印刷が可能となった。

2.1.2 コンピュータとのインタラクションとして用いる場合での触図の課題

これまでの触図は静的であり、コンピュータとのインタラクションとして用いる場合では、その都度、提示する触図を切り替える必要があり、手間がかかる。例えば、図の拡大縮小や、図形の切り替えといったインタラクションが考えられる。しかし、静的な触図だけでこれら

のインタラクションを行うことは難しい。そのため、触図を動的に切り替えられる触覚ディスプレイを利用する。

2.2 触覚ディスプレイを用いた図の情報提示に関する研究

触覚ディスプレイとはユーザに対して圧力や感触などといった触覚体験を提示する装置である。コンピュータからユーザに触覚情報を提示するには、触覚ディスプレイが必要となる。触覚ディスプレイの提示手法としては、皮膚に機械的な突起や振動 [MFK⁺07, TYI17]、摩擦を提示する手法 [OHRT14, CCP10]、熱といった温度による提示手法 [YKJ09, HWAK11]、他にも電気刺激による提示手法 [USKK16] がある。

これまでに多くの研究者が平面的なディスプレイ上で動的に図形を切り替えられる触覚ディスプレイを開発しており、その一つとしてピンアレイを用いた触覚ディスプレイがある [YL07, 山本 08, VWB08, 坂井 10, LBW⁺18, BLB⁺18]。この触覚ディスプレイでは、上下に動くピンが二次元上に並んでおり、提示したい図形の領域をそれらのピンの突起によって表現する。そしてその領域の境界線を認識することで図の形状を把握する。この手法の特徴として図形のレンダリング手法が非常に単純で、ユーザにとって図形を認識しやすいことが挙げられる。しかし、ピンごとに凹凸を作るアクチュエータが必要となり、その結果、装置の内部構造が大きくなる。そこで静電アクチュエータやピエゾ素子を用いることで、小スペースで構成できる装置が開発された [PWS10, VHP12, ZGGF19]。また、ピンアレイ装置を用いたインタラクション操作に関する調査もされており [山本 08]、この先行研究において触図提示装置とユーザが対話的に操作できるシステム構築の必要性を示唆している。しかし、これらはコストが高く、解像度を高くするためにアクチュエータを増やす必要がある。

凹凸を生成するピンアレイ以外の機械的な手法での動的触図の提示を可能とするアプローチもある。触知ピンというピンアレイ状に並んだピンを一つずつ振動を制御する装置があり、これは振動している部分を図の領域としてユーザに提示する [BKRS70, Cra85, 島田 08]。この手法は点字や墨字の提示に使われる一方、一本指表面程度の大きさが主であり、図全体を表現するには多くのアクチュエータを必要とする。また、Suzuki らは磁石付マーカーを電磁石によって動かすことで提示する図形を動的に変えるというアプローチを試みた [SSGY17]。これにより最小限のアクチュエータで様々な図を表現できるため、ピンアレイに比べて低いコストでの製作を可能とした。しかし、この研究での実験時のマーカーの数は少なく、図の細かな情報を提示することは難しいと考えられる。マーカーを増やすことも可能であるが、それによる図の切り替えの困難さや、切り替えにかかる時間などの問題がある。

機械的な触覚提示以外の手法として、電気刺激装置による図形情報の提示がある。電気刺激は指に直接電流を流す手法であり、わずかな面積の電極で指を刺激することが可能である。Uematsu らは指表面に複数電極を当て、提示したい領域のみに電気を流すことで図形を認識させることを試みた [USKK16]。この装置は指表面の大きさ程度の装置による触覚提示が可能であり、費用コストも機械的な触覚提示より低い。レンダリング手法も提示する図形上に指がある場合にのみ電気刺激を行う単純な手法である。しかし、ピンアレイによる触覚提示と

比べ、この手法を用いた図形の識別精度は低く、76.2%という結果であった。また電気刺激と後述する静電気力触覚ディスプレイを複合した触覚ディスプレイもある [KIKM18]。しかし、これらの装置は提示する際に指に提示用のパッドを取り付けなければならない。将来、日常で使うことを想定すると手に何も取り付けないことが好ましいと考えられる。

本研究では、より安価かつ身体への装着を必要としない触覚提示手法が必要であると考え、簡易構成かつ平面上のテクスチャ表現が得意な静電気力触覚ディスプレイ [BPIH10] を利用する。静電気力触覚ディスプレイはディスプレイ上でなぞる指に対して静電気力による剪断力を加える装置となっており、この剪断力を制御することでユーザに粗いや滑らかといったテクスチャ感を提示できる。この静電気力触覚ディスプレイを活用し、複数のテクスチャ感を図形に合わせて提示することで図形の輪郭線を表現し、ユーザにその図形の形状を認識させる。

2.3 静電気力触覚ディスプレイとそのディスプレイでの図の情報の提示に関する研究

2.3.1 静電気力触覚ディスプレイに関する研究

静電気力触覚ディスプレイは、1950年代に静電気力によって絶縁膜越しで振動のような摩擦感が発生する現象の発見 [MHSJ53] から始まり、1970年頃からこの現象を用いた触覚ディスプレイの開発が行われ、入力波形に対する触覚の強さなどの調査が行われた [VAGLS14, VGB17]。Eric らは、矩形波を印加した際に、立ち上がりと立ち下がりで指に剪断力がかかるのを観測し、この結果を基に指にかかる剪断力のモデル化を行った [VAGLS14]。Yasemin らは、いくつかの入力波形を用いて触覚を知覚する電圧値の閾値を周波数ごとで調査した [VGB16]。この研究から波形の種類ごとで人の知覚に違いが出てくることが分かった。Kang らは、波形にオフセット電圧があるかどうか、AM(Amplitude Modulation)変調をした場合とそうでない場合での剪断力を測定した [KKC⁺17]。また本手法と電気刺激を組み合わせた触覚提示の研究 [KMKI17] や、ペルチェ素子と組み合わせた触覚提示の研究 [HIKM16] のように複数の触覚提示手法を組み合わせた応用も行われている。近年では Bau らの研究により、静電気力触覚ディスプレイが材料表面の粗いや滑らかといったテクスチャ感を提示するのに適していることが分かった [BPIH10]。

2.3.2 静電気力触覚ディスプレイを用いた図の情報の提示に関する研究

静電気力触覚ディスプレイによる触図の提示を試みた研究はいくつある。Bateman らはディスプレイ上にある点をどの程度把握できるかについて調査した [BZB⁺18]。Xu らは静電気力触覚ディスプレイを用いて点字や単純な図形の提示、また図形のレンダリング手法に関する調査を実施した [XIP⁺11]。その結果、図形の識別正答率は平均 56%という結果であり、またレンダリング手法に関して図形内部のみの触覚提示が最も図形を識別させやすいことが分かった。

図2.1に静電気力触覚ディスプレイを用いた図形提示レンダリング手法の例を示す[XIP⁺11, TAW⁺19]。図2.1(a)のようにディスプレイ上でなぞる指が図形提示領域の外では、静電気力触覚ディスプレイ上では何も触覚を提示せず、図2.1(b)のように指が領域内にある場合のみ触覚ディスプレイ全体で触覚を提示する。このように図がある場所と無い場所で異なるテクスチャ感を提示することで図形をユーザに提示することが可能となる。

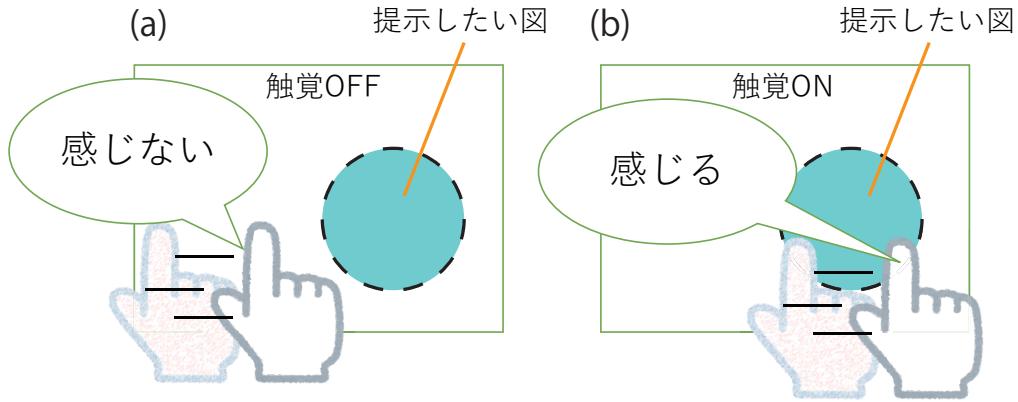


図2.1: 静電気力触覚ディスプレイを用いた図形提示レンダリング手法。(a) 移動する指が提示する図形領域外の場合。(b) 移動する指が提示する図形領域内の場合。

2.4 触図や触覚ディスプレイにおける図形認識に関する研究

2.4.1 触図や触覚ディスプレイを利用した図形情報の認識に関する研究

これまで触図を利用し図の形状をどの程度ユーザに認識させるかに関して多くの調査が行われてきた。例えば、点状の突起を図の輪郭線上に印刷した触図を用いた研究があり、その点のサイズや点同士の間隔によって変化するユーザの読み取りやすさについて調査した。この調査から、線または図の境界線を提示する場合には大きな点を用いることで強い刺激となる、または点同士の間隔を離して刺激を離散的にすることで図の認識が向上することが明らかとなった[森ま11, 土井14]。また触地図をユーザに利用してもらい、目的地や経路探索といった地図情報が提示できることも確認されている[渡辺13]。

そして点図を用いてどれほど図形を識別できるかに関する調査が実施された[長尾17]。この調査では、円や四角、三角、平行四辺形といった基本的な図形を提示したところ、平均識別正答率は高く、図形の種類やサイズによって識別正答率が異なることが分かった。特に、どの図形もサイズが大きくなるほど識別正答率が増加する傾向が見られた。11.5 mm のサイズであれば先天盲者は100%、後天盲者でも平均正答率が85.3%と高い識別率となった。

触覚ディスプレイであるピンアレイアクチュエータを用いた図の識別に関する調査も実施された[USKK16]。この調査ではアルファベットの形状の図の情報を提示し、実験協力者にそ

のアルファベットを識別してもらう。この結果、高さ 52 mm の図を提示した場合、正答率は 95% を超え、ほとんどの実験協力者が正答することができた。

触覚マウスという入力インターフェースに使用するマウスに小型のピンアレイアクチュエータを内蔵した装置がある [渡辺 00, 大岡 05, OKM⁺07]。この装置を用いて単純な図形である円形、三角形、四角形、五角形、六角形の図形を識別する評価実験が実施された [渡辺 00]。この結果、平均識別正答率は 80% を超える結果となった。また五角形、六角形、円形同士の誤認識が比較的多かった。

2.4.2 静電気力触覚ディスプレイを用いた図形情報の認識に関する研究

静電気力触覚ディスプレイを用いて簡易的な図形を使用した図形識別に関する評価調査が実施された [TAW⁺19]。この調査は、静電気力触覚ディスプレイを用いた触図提示において、図形情報の提示がどれほど可能かを検証した。そのために曲線を含む円形、水平垂直方向の線で構成される四角形、斜線を含む三角形、そしてやや複雑な図形として星形の 4 つの図形を用意し、それぞれの図形を識別できるかを調査するために評価実験を実施した。この実験の結果、全図形の平均識別正答率は 68.3% となり、円形の識別正答率は 46.7%，四角形は 60.0%，三角形は 80.0%，そして星形は 86.7% という結果であった。このように図形によっては識別正答率が低い結果となった。特に円形と四角形が互いに間違えるケースがあり、円形を提示した際に四角形と回答した割合が 33.3%，逆に四角形を提示して円形を回答した割合が 26.7% であった。

点図による触図やピンアレイアクチュエータ装置を用いた触覚ディスプレイにおける図形識別結果と比較すると、この静電気力触覚ディスプレイの調査での識別率は低く、現状では静電気力触覚ディスプレイを触図提示装置として実用することは困難である。本研究ではこの低い識別正答率の要因として、静電気力触覚ディスプレイを用いた場合での触察戦略に原因があると考えた。

2.5 触察戦略に関する研究と静電気力触覚ディスプレイにおける課題

ユーザが物体を認識する際の触察戦略は主に 6 種類に分類される [MM16]。この中で二次元状の凹凸で構成された図の情報を取得する際には、このうち主に 3 種類の戦略が用いられることが分かった。これらの戦略とは、表面をこする戦略 (Lateral motion)，輪郭を探索する戦略 (Contour following)，静的接触による戦略 (Static contact) である。しかし、静電気力触覚ディスプレイはこれらの触察戦略を十分に利用できているとは言い難い。

表 2.1 に静電気力触覚ディスプレイや他の触覚ディスプレイごとで利用できる触察戦略を示す。この表から、静電気力触覚ディスプレイは他の手法と比べ、利用できる触察戦略が限られており、図の情報の識別正答率が低い要因となっていることが考えられる。

表面をこする戦略に関して、静電気力触覚ディスプレイではテクスチャ感を得るためにこの触察戦略が使われており、2 次元の触図の認識においてこの戦略を利用できていると考えら

表 2.1: 静電気力触覚ディスプレイや他の触覚ディスプレイで利用できる触察戦略

| 触図または触覚ディスプレイ | 表面をこする戦略 | 輪郭を探索する戦略 | 静的接触 | 複数指 |
|----------------|----------|-----------|------|-----|
| 点図 [長尾 17] | ○ | ○ | ○ | ○ |
| ピンアレイ [USKK16] | ○ | ○ | ○ | ○ |
| 静電気力 | ○ | △ | × | × |

れる。

輪郭を探索する戦略に関して、Xuらは図形内部における触覚提示のレンダリング手法を用いることで、図形の境界線の把握とその境界線から図形の形状をユーザに認識させることを検討した [XIP⁺11]。しかし、図形の輪郭線などの情報を効果的に認識させるためにはどのような入力信号で触感を生成すれば良いかは調査されていなかった。

静的接触による戦略に関して、静電気力触覚ディスプレイはディスプレイ自体の構造と原理から静止した指への触覚提示が困難である。そのため指が止まってしまうと触覚の提示領域上に指があるにも関わらず、触覚を提示できず、ユーザはその指が静止する場所の図形情報を取得できない。

また、これらの触察戦略以外にも、複数指による触察も検討する必要がある。静電気力触覚ディスプレイは主にディスプレイ全体に広がる単電極を用いているため、同じ電極上にあるすべての指に同じ触覚を提示してしまう問題がある。そのため、これまでの触覚提示時には一本指による触察が余儀なくされた。一般的な触察行為は複数指が用いられる。そこで、静電気力触覚ディスプレイにおいて複数指に対応した触図提示装置を実装し、静電気力触覚ディスプレイにおいて複数指による触察が有用であるかを調査する必要がある。この調査から複数指による触察が図形識別を向上させる結果であれば、触図提示装置として複数指への触覚提示に対応した静電気力触覚ディスプレイの開発を検討しなければならない。

したがって、本研究は静電気力触覚ディスプレイを触図提示装置として使用するために、以下のような課題調査が必要と考えた。

- 静電気力触覚ディスプレイが提示できる触感とその知覚強度の調査
- 静電気力触覚ディスプレイにおける複数指による触察の有効性と図形認識に関する調査
- 静止した指への触覚提示を可能とする装置の開発とその評価

触感に関する調査は、静電気力触覚ディスプレイに入力する波形に対して、ユーザがどのような触感を感じるかを調査する。この調査では日本語のオノマトペを利用することで、触覚提示においてどのような表現が可能かを評価する。また、それぞれの触感がどれほど強く感じるかをマグニチュード推定法を用いて評価する。複数指による触察の有効性に関して、一本指の触察と複数指の触察で図形識別を行い、この結果を比較することで複数指による触察の有効性を調査する。また複数指に対して複雑な図形を提示し、どの程度図形を把握できるかを調査する。静止した指への触覚提示に関しては、静電気力触覚ディスプレイの構造をほ

とんど変えることなく触覚提示が可能な手法を提案し、その手法を検証するために恒常法を用いた評価実験を実施し、この手法の有効性を調査する。

2.6 健常者と視覚障害者の触知覚に関する関連研究

本研究では、健常者を対象とした評価実験を実施したが、将来的には視覚障害者と健常者の両者を対象としたシステムを目指す。これは触覚提示装置によるコンピュータとのインタラクションは視覚障害者だけではなく、高齢者や機器装置の操作に慣れていないユーザへの支援にも繋がる [坂井 10] からである。

また、健常者と視覚障害者で触図に対する分かりやすさの傾向が似ていることが調査されている。Kwok らの研究では [Kwok04]、健常者と視覚障害者で触地図の認識の比較に関する調査を実施した。この調査では、決められた形状の物体を用意し、触図の大きさや厚さ、図形自体の識別、そして複雑な図形の認識を健常者と視覚障害者で同じ実験を実施し、それぞれの結果を比較した。これらの結果から、触図の大きさや厚さに関して、探索時間が触図全体で視覚障害者の方が短くなることが分かった。さらに、健常者と視覚障害者で大きさや厚さに対する反応時間および主観評価である触図の分かりやすさの傾向が同じであることが分かった。また図形の識別に関しては、円形と三角形において健常者と視覚障害者の知覚内容は同じ傾向であったが、四角形においては、知覚内容に違いがあった。この違いとは、健常者は横長の四角形の認識が難しく、視覚障害者は縦長の四角形の認識が難しいことが分かった。また、複雑な図形の認識では、健常者と視覚障害者で図形認識の内容が異なることが分かった。これは、両者の図形認識の過程が異なることが要因であることが示唆されており、健常者は全体像を一度に視覚的に再現していると考えられ、視覚障害者は触覚を知覚した部分から図形を再現していると考えられる。

このことから、正円や正三角形、正方形といった単純な図形であれば、健常者による評価結果から視覚障害者で実施した場合の結果を推測することが可能であると考えられるので、本研究における評価実験では単純な図形における図形識別の傾向を調査するために健常者に評価実験を依頼した。

第3章 静電気力触覚ディスプレイにおける入力波形に対する知覚強度と触感の調査

図の情報を静電気力触覚ディスプレイによって提示する際に、図形の輪郭線などの情報を効果的に認識させるためにはどのような入力信号で触感を生成すれば良いかを調査する必要がある。一般的に用いられる触察戦略 [MM16] にある輪郭線の探索をより精度よく行うためには、この輪郭線をより強調できる波形を選定しなければならない。そこで、静電気力触覚ディスプレイが提示できる触感、及び触感の強さを示す知覚強度について調査する。そしてその調査結果を基に図形提示に必要な入力波形を検討する。触感に関する調査では日本語のオノマトペを、知覚強度に関する調査ではマグニチュード推定法を用いた評価実験を実施した。

この章では初めに静電気力触覚ディスプレイの触覚提示の原理を説明し、静電気力触覚ディスプレイが提示できる触感の調査と知覚強度の調査を実施した。そしてそれらの調査結果から、図形提示に必要な入力信号を検討した。

3.1 静電気力を用いた触覚ディスプレイの原理

静電気力を用いた触覚ディスプレイは高電圧発生装置、電極、そして絶縁膜のみの構成で触覚を提示することが可能である。図 3.1 (a) のように高電圧発生装置は電極に接続されており、その電極上に絶縁膜が貼られている。ユーザの指はこの絶縁膜上に置かれる。この際に指が絶縁膜を押さえつける力を \mathbf{F}_p とする(図 3.1 中の緑色の垂直方向の矢印)。この状態で図 3.1 (b) のように指を剪断方向に動かした場合、絶縁膜の動摩擦係数を μ としたとき、指は絶縁膜自体の表面の摩擦力 $\mu\mathbf{F}_p$ (図 3.1 (b) の緑色の水平方向の矢印)の触覚を感じる。電極に高電圧を印加した場合、絶縁膜の表裏上で誘電分極により電荷が溜まる(図 3.1 (c))。この現象により、図 3.1 (c) の黄色の垂直方向の矢印のように指と電極間にわずかな吸引力 \mathbf{F}_s が発生する。吸引力 \mathbf{F}_s の大きさを式 3.1 に示す [VAGLS14]。

$$\|\mathbf{F}_s\| = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_i S}{2(\frac{d_{sc}}{\varepsilon_{sc}} + \frac{d_i}{\varepsilon_i})(d_{sc} + d_i)} V^2 \quad (3.1)$$

ここで ε_0 は真空の誘電率、 ε_i は絶縁膜自体の比誘電率、 S は指の接触面積、 d_i は絶縁膜の厚さ、 V は入力電圧を示す。また d_{sc} 、 ε_{sc} は角質層の厚さとその誘電率を表している。この角質層とは表皮の中で最も表面側にある層である。

しかし、この吸引力 \mathbf{F}_s は指が絶縁膜に対して垂直方向に押し付ける力 \mathbf{F}_p より微弱なため、この吸引力 \mathbf{F}_s を指で知覚することは難しい。この状態で指を動かした場合、指には元々の絶

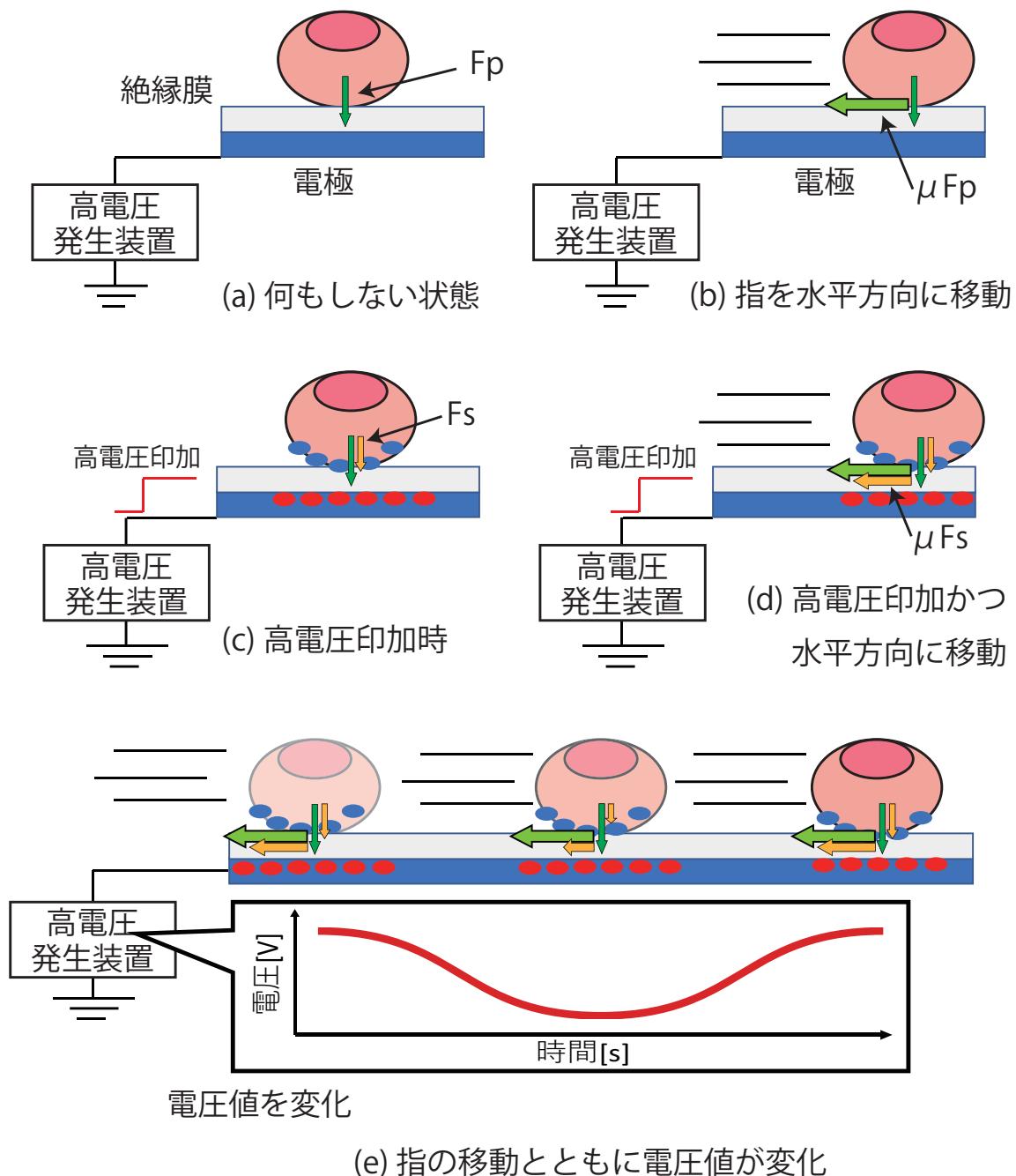


図 3.1: 静電気力を用いた触覚提示システムの動作原理の模式図

縁膜に対する摩擦力に吸引力による摩擦力 \mathbf{F}_s が加わる(図3.1(d)の黄色の水平方向の矢印). ここで入力電圧が一定の場合に指が受ける力 \mathbf{F} を式3.2に表す.

$$\mathbf{F} = \mu \|\mathbf{F}_p\| \mathbf{e}_h + \mu \|\mathbf{F}_s\| \mathbf{e}_h \quad (3.2)$$

ここで \mathbf{e}_h はディスプレイに対して剪断方向にかかる力の単位ベクトルを表す. 一定の電圧をかけた場合, 指にかかる力も一定なため, 指はわずかな力が加わったことに知覚することができない.

ここで入力電圧を変化させることで加わる摩擦力 F_s を変化させる(図3.1(e)). その際の力の変化を式3.3に示す.

$$\Delta \mathbf{F} = \mu \mathbf{F}_p + \mu \mathbf{F}'_s - (\mu \mathbf{F}_p + \mu \mathbf{F}_s) = \mu \mathbf{F}'_s - \mu \mathbf{F}_s \quad (3.3)$$

ここで \mathbf{F}'_s は入力電圧が変化した後の吸引力による摩擦力を示す. 指はある程度の力の変化がなければ知覚することはできない. 式3.3において, 入力電圧が変化した際に指の押し付けの力が変わらない場合, この $\Delta \mathbf{F}$ は吸引力による摩擦力の変化のみとなる. そしてこの摩擦力の変化があった場合において, 指は何かしらの力を知覚することができる[VGB17]. 簡易的なざらざらといったテクスチャ感であれば入力波形を正弦波にするだけで提示が可能である[BPIH10].

3.2 静電気力触覚ディスプレイの実装

ここでは, 静電気力触覚ディスプレイを実装するために, このディスプレイを構成する高電圧発生装置と絶縁膜について述べる.

3.2.1 高電圧発生装置

本研究では, 図3.2に示す高電圧発生装置を利用する[TSK16]. また, 高電圧発生装置の内部の概略図を図3.3に示す.

この高電圧発生装置は主にマイコン及びアナログ入出力回路で構成される. この装置から出力される電圧は昇圧器を用いて12Vの電源を最大600Vの電圧まで昇圧させる. 高電圧発生装置内の電流制御回路により電流の最大出力を2mAに抑えることができる. このため, 電極に直接触れた場合でも安全性は確保されている. またPCと接続し, 制御信号をPCから高電圧発生装置に送ることによって, 正弦波や三角波といった様々な波形を出力できる.

高電圧発生装置に内蔵されたマイコン

高電圧発生装置に使用したマイコンは mbed NXP LPC1768 を用いた. このマイコンからアナログ入出力回路に SPI 通信で電圧出力値の決定を行い, アナログ入出力回路から決められた電圧値を出力する. マイコン内のプログラムによって, 時間に沿った電圧値を出力させる

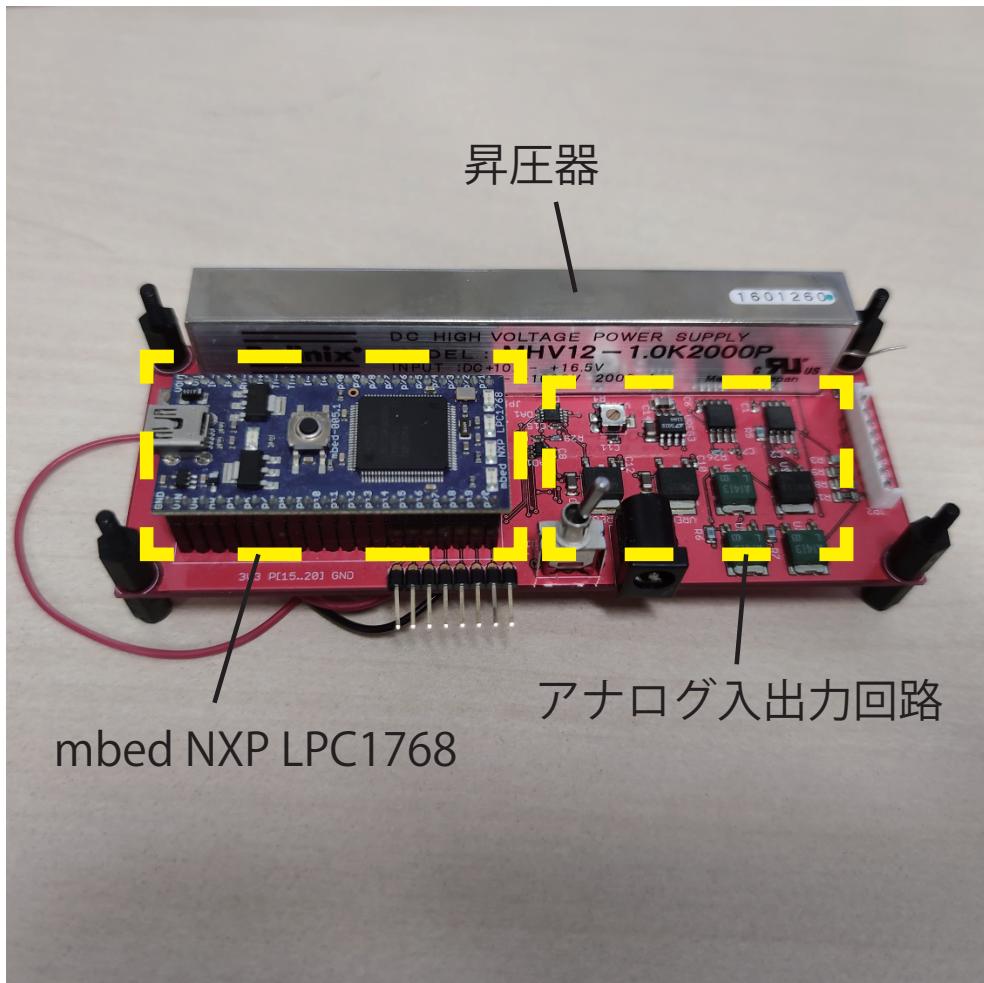


図 3.2: 高電圧発生装置

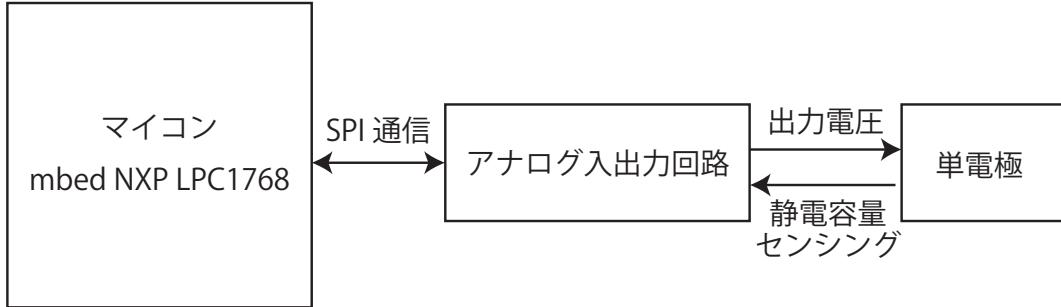


図 3.3: 高電圧発生装置のメイン回路の概略図

ことで、波形をアナログ入出力回路経由で電極に印加することが可能となる。また、このマイコンには AD 変換器が備わっており、外部センサーと繋ぐことも可能である。

アナログ入出力回路

アナログ入出力回路の概略図を図 3.4 に示す。この回路は DA 変換器、昇圧回路、オペアンプ、カレントミラー回路、AD 変換器で構成される。DA / AD 変換器はともに SPI 通信に対応しており、マイコンと通信が可能である。昇圧器によって 600 V にまで昇圧された電圧を、DA 変換器から出力されたアナログ電圧がオペアンプを介してカレントミラー回路に接続することで 0 V から 600 V の間に変換する。また出力された電圧を抵抗で分圧しオペアンプのボルテージフォロアを介して AD 変換器に入力する。AD 変換器から得られる信号によってタッチセンシングに使用することも可能である。

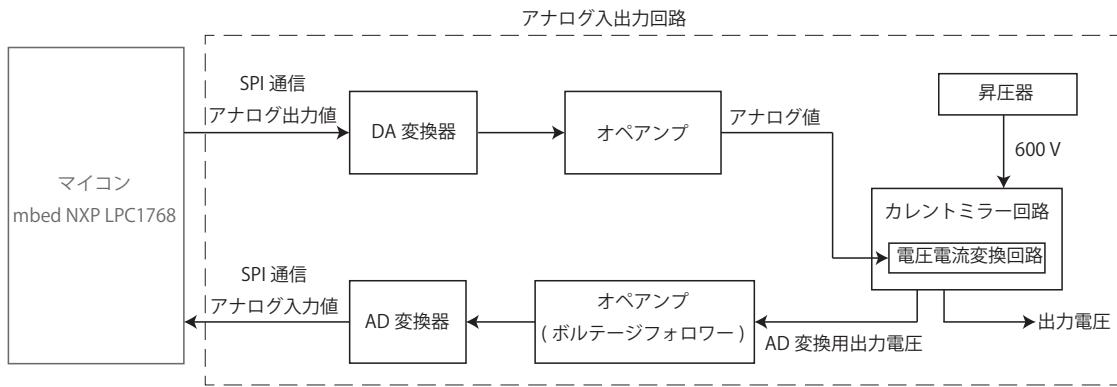


図 3.4: アナログ入出力回路の概略図

3.2.2 絶縁膜

静電気力触覚ディスプレイによる触覚提示には電極の表面に薄い絶縁膜を敷かなければならない。そこで、本研究では市販で手に入りやすいポリ塩化ビニリデンが原料の絶縁膜(旭化成サランラップ)を用いて、電極面に貼り付け触覚提示を行った。

触覚提示に使用する絶縁膜は式3.1から絶縁膜の厚さが感じ取れる触覚の強さに影響を及ぼすことが分かる。絶縁膜を電極に敷く方法として、電極表面に絶縁膜を貼る方法、または絶縁スプレーをかける方法などが考えられる。しかし、絶縁スプレーでは電極表面の絶縁膜の厚さが一様になりにくく、触る場所によっては指に感電してしまう。そのため、厚さが均一であり電極1枚あたりに使用するコストが安く、貼り替えも容易な絶縁膜を用意した。本研究で使用する絶縁膜の厚さは11 μmである。

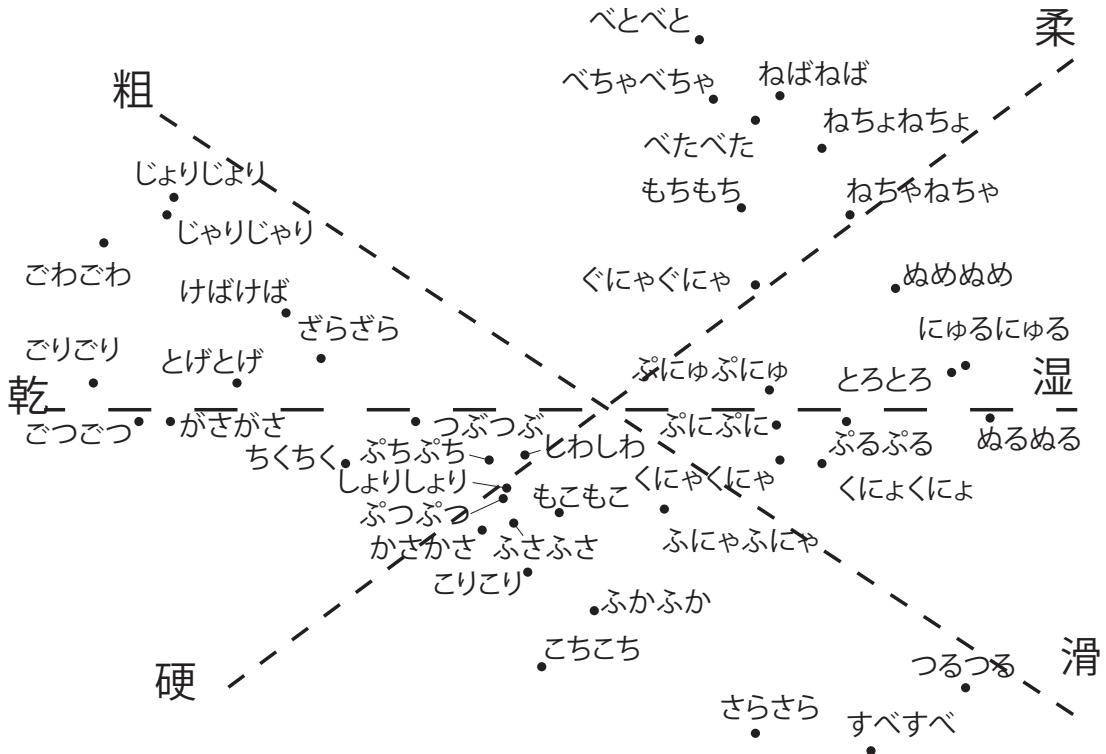
本研究の実験ではこの絶縁膜を使用するが、将来、製品として実用化する場合において安全性を考慮すると、より薄い素材を使用することが良好である。本研究で使用する絶縁膜は指でなぞる際に爪などが当たることで絶縁膜が損傷し、その部分から絶縁破壊が起きて指に電気が直接流れてしまう。保護回路によって電流を最大0.2 Aに抑制しているが、600 Vの高電圧が印加されると、指に強い刺激を与えててしまう。そこで絶縁膜を薄くすることで、使用的電圧を低くすることができるため、仮に絶縁破壊が発生したとしても、刺激を弱めることができ可能である。また硬い素材を採用することで損傷を抑えることも考えられる。

3.3 静電気力触覚ディスプレイの触感に関する調査

本節では、静電気力触覚ディスプレイがユーザに提示できる触感について行った調査について述べる。この調査により、この触覚ディスプレイが提示できる触感の分布の可視化やそれらの触感を出力するための入力波形の条件を明確にすることができた。

これまでの関連研究では、静電気力触覚ディスプレイにおいて、波形に対する触感の提示について調査した研究がある[BPIH10, VJSB17]。しかし、これらの研究は、限定された波形および周波数で調査されており、詳細な波形での触感の調査はされていない。そこで多くの波形を用意し、波形や周波数が変化することで、どのように得られる触感に影響があるかを調査していく。

今回の調査では、触感を評価する手法として日本語のオノマトペを用いた。これまでの研究では提示された触感に対してどれほど「粗い」か、どれほど「硬い」かなど、テクスチャごとで尺度を設けて評価されてきた[BPIH10]。しかし、今回の調査は多くの波形を評価してもらうため、一人当たりの実験時間が非常に長くなってしまう。そこで、触感を擬音語で表すオノマトペを利用することで、一つの波形に対する評価をより効率的に実施することができると考えた。

図 3.5: オノマトペのマップ ([早川 10, WHM⁺12] を参考に作図)

3.3.1 触感表現とオノマトペの関連

これまでに砂や布、ゴムといったテクスチャの触感に対してどのような日本語のオノマトペが使用されるのかを調査した研究がある [早川 10, WHM⁺12]. 早川らは「粗さ」や「滑らかさ」が分析されたテクスチャを複数用意し、実験協力者にこれらのテクスチャを触れさせ、オノマトペの一覧表から対応したオノマトペを選択させた. そして、その選択したオノマトペをテクスチャの「粗さ」や「滑らかさ」といった軸に沿って主成分分析を行うことでオノマトペのマップを作った(図 3.5).

このマップを利用し、静電気力触覚ディスプレイから得られた触感をオノマトペで回答させることで、その触感がどのようなテクスチャであるかを評価することが可能となる. 例えば、ある入力波形に対して実験協力者が「ごつごつ」というオノマトペを回答すれば、「硬い」かつ「粗い」触感が提示されることになる. このように得られた評価結果を収集することで、各入力波形での結果の比較やそれらのオノマトペがどのような分布になるのかを可視化できるようになる.

3.3.2 評価実験に使用した機材

今回の評価実験では、前節に記載した最大電圧 600 V の波形を出力できる高電圧発生装置と厚さ $11 \mu\text{m}$ のポリ塩化ビニリデンである絶縁膜を使用した。

今回の評価実験で使用する静電気力触覚ディスプレイの電極として図 3.6 のような絶縁膜を貼った酸化インジウムスズ (ITO) 電極を用いた。この電極は透明な電極でタブレット端末などのタッチパネルでも使われている。今回使用する ITO 電極は電極の厚さが 90 \AA で抵抗値が約 $1 \text{ k}\Omega / 100 \text{ cm}^2$ である。

絶縁膜を貼った ITO 電極単体だと指でなぞる際に電極自体が引っ張られて動いてしまうため、絶縁膜を貼った ITO 電極をこの電極の周辺にアクリルのフレームを取り付け固定した。この触覚ディスプレイの電極に高電圧発生装置から入力波形を印加した後に、図中のアクリルフレーム内を指でなぞることで、貼り付けてある絶縁膜自体の触感とは異なる触感を感じることができる。

今回の評価実験では、この触覚ディスプレイを 2つ用意し、実験を実施した。

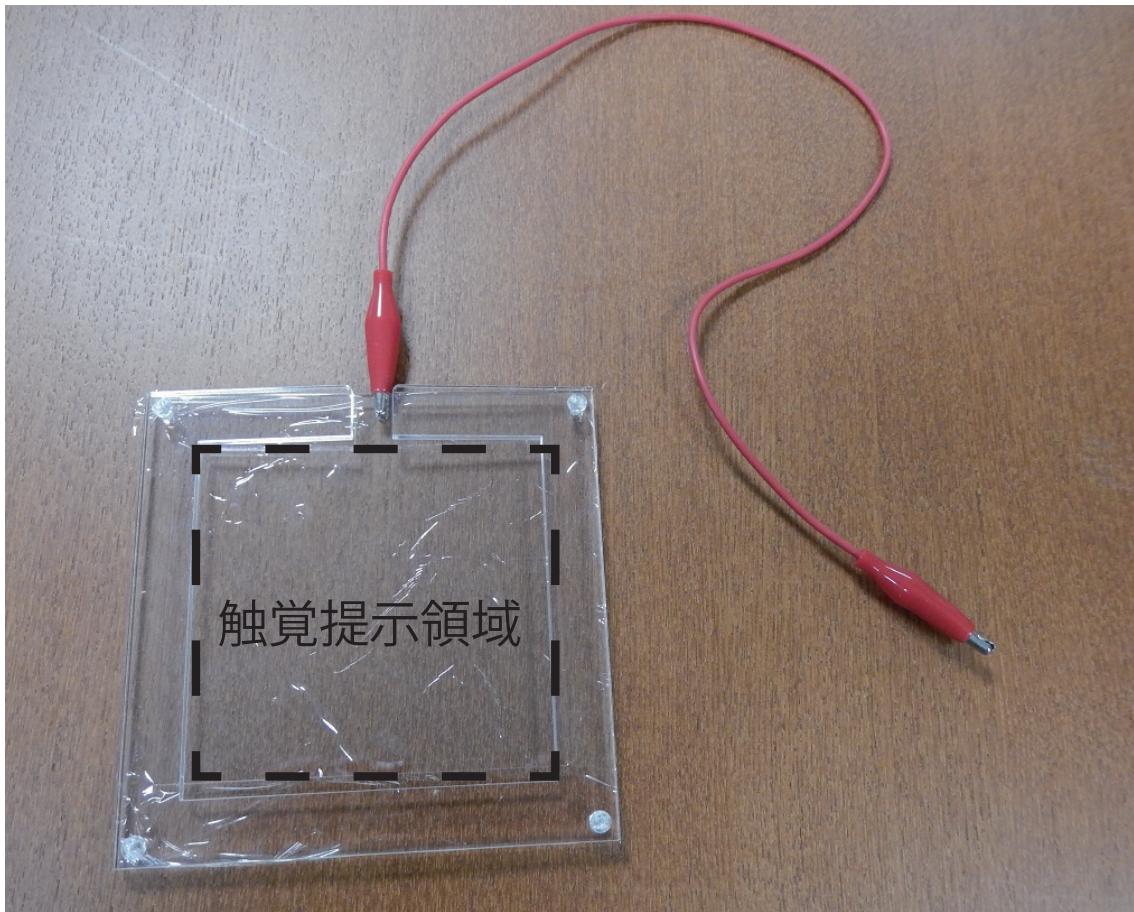


図 3.6: 絶縁膜が貼られた ITO 電極

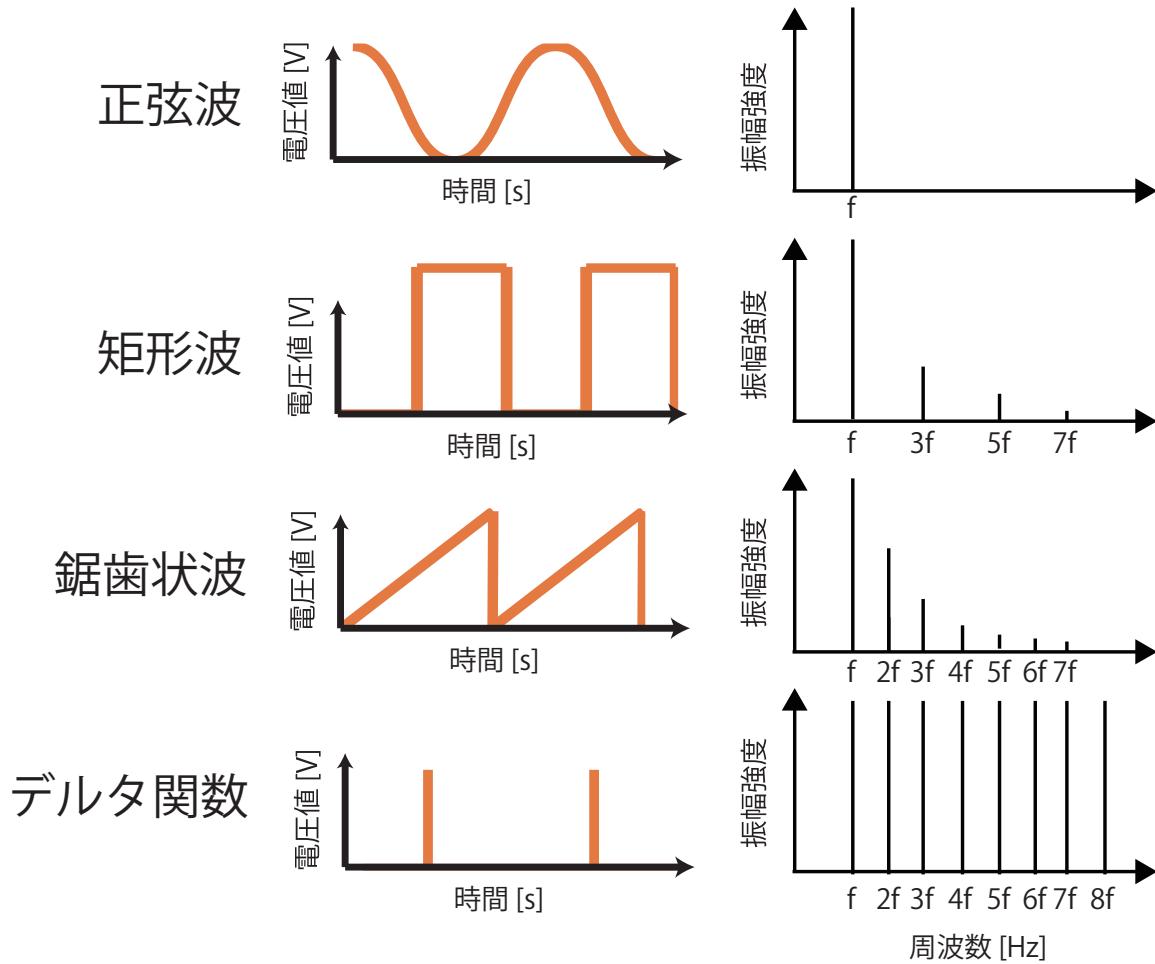


図 3.7: 評価実験に使用した 4 種類の入力波形の概形 (左図) とその波形の周波数成分の概形 (右図)

3.3.3 電極に印加する入力波形

今回の評価実験では、実験協力者一人当たりに 4 種類の波形と、20 個の主周波数、計 80 個の波形に対して触感の評価を実施してもらった。

電極に印加する波形の種類としては、図 3.7 のように正弦波、矩形波、鋸歯状波、デルタ関数の 4 種類を用意した。矩形波は一つの周期の半分が最大電圧である 600 V、もう半分が 0 V となる波形である。鋸歯状波は周期の初めを 0 V とし、経過時間に比例して電圧が上昇し、周期時間に最大電圧となる波形である。本論文におけるデルタ関数は、周期の始めに電圧を最大値に設定し、電圧が最大値に達した瞬間に電圧値を 0 V に戻す波形である。

主周波数に関して、各波形で 10 Hz から 794 Hz までの 20 個の周波数の波形 (10 Hz, 12 Hz, 15 Hz, 19 Hz, 25 Hz, 31 Hz, 39 Hz, 50 Hz, 63 Hz, 79 Hz, 100 Hz, 125 Hz, 158 Hz,

199 Hz, 251 Hz, 316 Hz, 398 Hz, 501 Hz, 630 Hz, 794 Hz) を用意した。これらの主周波数は指数的に増えていくように設定した。これは指が触覚を知覚できる刺激量が周波数の対数に応じて変化すること [GBH01] を参考にして設定した。

3.3.4 実験協力者と触察時の制約

実験協力者は 10 名(うち女性が 1 名)の大学生、及び大学院生である。平均年齢は 22 歳(21 歳から 23 歳)である。この実験協力者 10 名は静電気力触覚ディスプレイを経験したことがなかった。

触覚ディスプレイに触れる際、実験協力者には利き腕に関係なく右手の人差し指で評価を行ってもらった。指の動かす方向や速さ、こすり方について厳密な制限を設けなかった。実験の練習の際に、実験実施者による指の動かし方の模範を実験協力者に見せ、極端に速くまたは遅く指を動作させないよう依頼した。

3.3.5 実験手順

実験実施者は初めに実験協力者に実験概要を説明し、全員から実験参加に関する同意を得た。そして実験の練習時間を設け、指の触れる場所の確認や、触感の有無の確認、そして回答するオノマトペの一覧の確認を行った。実験協力者に見せるオノマトペは図 3.5 の軸を無くしたものを見せた。この練習時間で使用した入力波形は正弦波の 300 Hz に設定した。実験中、実験実施者は波形をランダムに入力し、その際に実験協力者が感じた触感をオノマトペのマップから選ぶよう依頼した。なお、この際に触覚を感じない場合では、「なし」と回答してもらった。回答後はすぐに次の試行へと移った。これを一人あたり全 80 試行を実施した。20 試行が終わるごとに 5 分程度の休憩時間を設けた。

3.3.6 実験結果

表 3.1 から表 3.4 に各波形に対する実験協力者が回答したオノマトペを示す。これらの表の横軸は各実験協力者を示し、縦軸は各波形の主周波数を示す。これらの実験結果において、表 3.1 のように 1 つの波形に対して実験協力者全員が同じオノマトペを答えることはなかったが、近い表現のオノマトペを複数人が答えることはあった。また、低い周波数帯または高い周波数帯では触覚を感じなかつたと答える実験協力者がいた。

ここで実験協力者が選択したオノマトペの傾向を見るために、図 3.5 のオノマトペのマップを領域ごとで分割し、実験結果を各領域で色分けすることで、波形ごとで回答したオノマトペの傾向を分析する。図 3.8 は 4 つに分けた領域を色分けした図である。表 3.1 から表 3.4 は、その色を実験結果に付けた表である。「粗い」かつ「硬い」表現をするオノマトペ(「じょりじょり」、「ごわごわ」、「がさがさ」など)は表のマスの色を緑に、「滑らか」かつ「硬い」表現をするオノマトペ(「さらさら」、「すべすべ」、「つるつる」)を表のマスの色を赤に、「粗い」

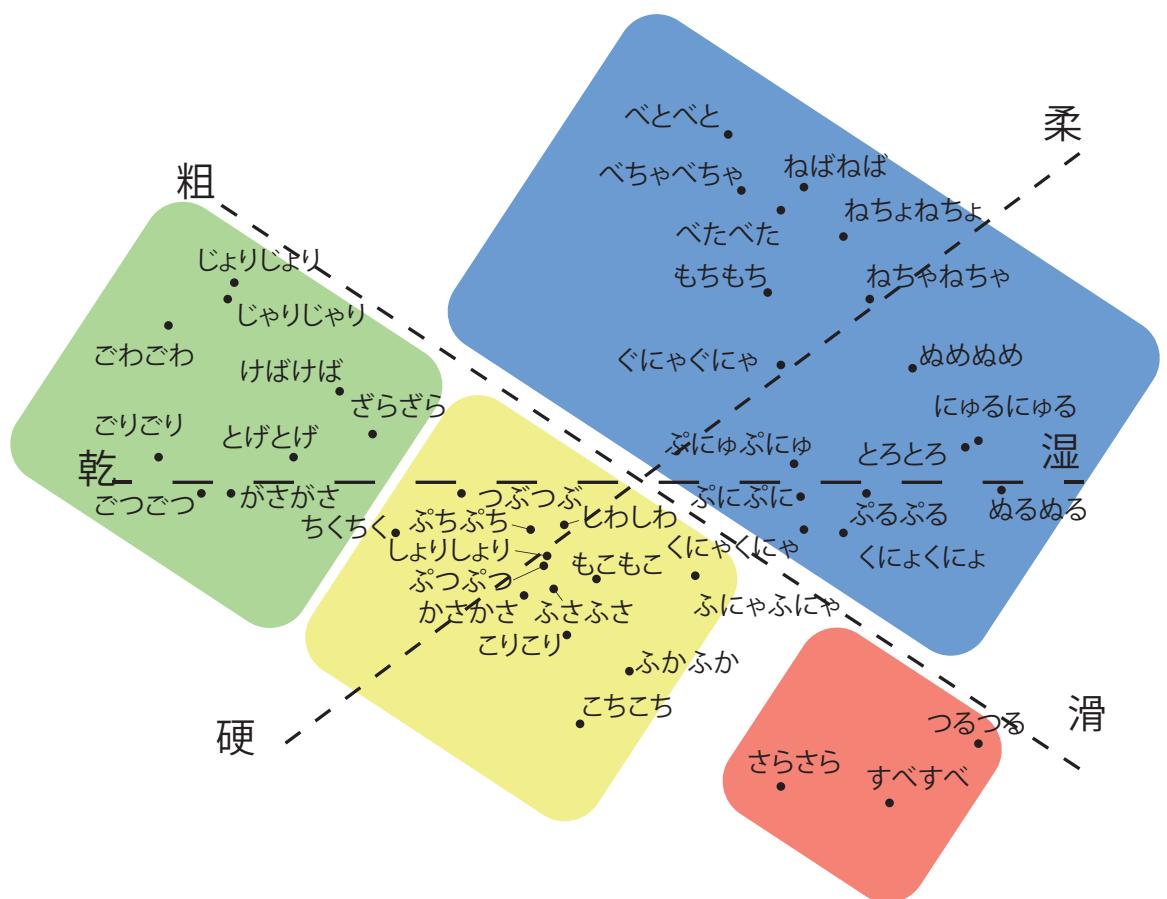


図 3.8: 4 つの領域に分けたオノマトペのマップ

「滑らか」の軸の中心付近のオノマトペ（「つぶつぶ」、「もこもこ」、「こりこり」など）を表のマスの色を黄色、それ以外のオノマトペを表のマスを青色にした。白いマスは触覚を感じなかったことを示す。

表 3.1: 触感に関する評価実験の結果：正弦波

| | 正弦波 | | | | | | | | | |
|-------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|
| Freq. | Subj. 1 | Subj. 2 | Subj. 3 | Subj. 4 | Subj. 5 | Subj. 6 | Subj. 7 | Subj. 8 | Subj. 9 | Subj. 10 |
| 10 | | もこもこ | | | とろとろ | つるつる | | ぶちぶち | | |
| 12 | | もこもこ | つるつる | | | さらさら | とろとろ | | | |
| 15 | | もこもこ | | | | さらさら | もこもこ | ごりごり | | |
| 19 | ごわごわ | もこもこ | | こりこり | とろとろ | つるつる | ふさふさ | ごりごり | ぬるぬる | |
| 25 | ごわごわ | ごわごわ | | ごつごつ | ふさふさ | つるつる | もこもこ | ごわごわ | ぶるぶる | |
| 31 | しわしわ | ごわごわ | ごりごり | もこもこ | ふさふさ | ざらざら | ごつごつ | もこもこ | ぬるぬる | しわしわ |
| 39 | ごわごわ | ごりごり | ごりごり | ごつごつ | ごわごわ | ごわごわ | ごわごわ | ぶるぶる | ぬるぬる | ふさふさ |
| 50 | ごわごわ | ごりごり | ごりごり | ごわごわ | かさかさ | つぶつぶ | ごわごわ | つぶつぶ | ぶるぶる | ざらざら |
| 63 | ごわごわ | ざらざら | ごりごり | ごりごり | かさかさ | ごりごり | ごわごわ | ごわごわ | ぶつぶつ | しわしわ |
| 79 | ふかふか | ざらざら | ごりごり | ごわごわ | かさかさ | かさかさ | ざらざら | ざらざら | つるつる | ぶるぶる |
| 100 | ごわごわ | じよりじより | ざらざら | ざらざら | かさかさ | かさかさ | ざらざら | じよりじより | ごわごわ | じよりじより |
| 125 | ごわごわ | ざらざら | ざらざら | つぶつぶ | しわしわ | じよりじより | こりこり | ぶるぶる | じやりじやり | ざらざら |
| 158 | つるつる | じやりじやり | ざらざら | ざらざら | かさかさ | じよりじより | つぶつぶ | ざらざら | ざらざら | べたべた |
| 199 | つるつる | じよりじより | ざらざら | ざらざら | ふさふさ | じよりじより | じよりじより | ざらざら | ざらざら | ざらざら |
| 251 | ぬるぬる | じよりじより | ざらざら | ざらざら | かさかさ | じよりじより | こりこり | ざらざら | ざらざら | べたべた |
| 316 | つるつる | じよりじより | ざらざら | がさがさ | かさかさ | じやりじやり | しょりしょり | つるつる | ざらざら | ざらざら |
| 398 | つるつる | ざらざら | じやりじやり | しょりしょり | | ざらざら | ちくちく | つるつる | じよりじより | とろとろ |
| 501 | つるつる | じよりじより | つるつる | しょりしょり | | さらさら | しょりしょり | つるつる | つるつる | しわしわ |
| 630 | つるつる | じよりじより | つるつる | ざらざら | | じやりじやり | しわしわ | | つるつる | ざらざら |
| 794 | さらさら | | | しょりしょり | | すべすべ | しわしわ | すべすべ | すべすべ | |

図 3.9 は、各領域の割合を波形の種類毎、及び主周波数毎にグラフにしたものである。正弦波を入力した場合、他の波形と比べて触覚を感じなかった実験協力者が多かった。15 Hz 以下または 398 Hz 以上の周波数で触覚を感じない実験協力者がいた。15 Hz 以下ではほとんどの実験協力者が触覚を感じず、感じた場合でも実験協力者ごとで感じた触感の領域も異なった。398 Hz 以上では滑らかさを示す赤い領域が多い傾向が見られた。それ以外の周波数帯ではほとんどが粗さを示す緑の領域を回答した。しかし、他の領域の触感を答える実験協力者は僅かにいた。

矩形波を入力した場合、19 Hz 以下では黄色の領域の触感を回答する実験協力者が半数ほどいたが、25 Hz から 316 Hz まではほとんどが緑色の領域の触感を回答した。100 Hz のみ全員が緑色の領域の触感を回答した。それ以降の周波数では、実験協力者ごとで回答する領域が異なった。

鋸歯状波を入力した場合、31 Hz までは黄色の領域を回答する実験協力者が多かった。39 Hz から 316 Hz まではほとんどの実験協力者が緑色の領域の触感を回答した。398 Hz 以降では実験協力者によって回答した触感が異なった。

デルタ関数を入力した場合、12 Hz から 31 Hz までは全員が黄色の領域を回答し、39 Hz から 79 Hz まではほとんどの実験協力者が黄色の領域を回答した。100 Hz から 500 Hz まではほとんどの実験協力者が緑色の領域の触感を回答した。それ以降の周波数では実験協力者によって回答が異なった。

正弦波以外の波形において、離散的な触感を回答した実験協力者が多い周波数帯、粗い表

表 3.2: 触感に関する評価実験の結果：矩形波

| Freq. | 矩形波 | | | | | | | | | |
|-------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|
| | Subj. 1 | Subj. 2 | Subj. 3 | Subj. 4 | Subj. 5 | Subj. 6 | Subj. 7 | Subj. 8 | Subj. 9 | Subj. 10 |
| 10 | こりこり | つぶつぶ | ぶつぶつ | ごつごつ | ごつごつ | こりこり | ぶつぶつ | ぶつぶつ | ぶつぶつ | つぶつぶ |
| 12 | ぶつぶつ | つぶつぶ | ぶつぶつ | ごわごわ | つぶつぶ | こりこり | ごりごり | ぶるぶる | ぶつぶつ | ぶつぶつ |
| 15 | じゅりじゅり | つぶつぶ | ぶつぶつ | ごつごつ | じよりじより | こりこり | ごつごつ | ごわごわ | ぶつぶつ | つぶつぶ |
| 19 | ごつごつ | つぶつぶ | つぶつぶ | ごわごわ | ごわごわ | ごりごり | ごつごつ | ごわごわ | ぶつぶつ | つぶつぶ |
| 25 | ごわごわ | じよりじより | ぶつぶつ | ざらざら | けばけば | つぶつぶ | ごつごつ | ごわごわ | ぶつぶつ | つぶつぶ |
| 31 | ごつごつ | つぶつぶ | ごりごり | ごわごわ | ぶつぶつ | ごりごり | ごりごり | ごりごり | ざらざら | つぶつぶ |
| 39 | ごつごつ | じよりじより | ごりごり | ごりごり | つぶつぶ | ごつごつ | ごわごわ | ごりごり | ぶつぶつ | じよりじより |
| 50 | べちゃべちゃ | じよりじより | ごりごり | ざらざら | ごわごわ | ごわごわ | じよりじより | ぶるぶる | ごりごり | じゅりじゅり |
| 63 | じゅりじゅり | ざらざら | ごりごり | ごりごり | かさかさ | ざらざら | じよりじより | ぶるぶる | ごりごり | ごわごわ |
| 79 | ぐにやぐにや | ざらざら | じよりじより | ごわごわ | けばけば | がさがさ | ごわごわ | ごりごり | ざらざら | ごわごわ |
| 100 | じよりじより | ざらざら | じよりじより | ごつごつ | ごわごわ | ざらざら | じよりじより | ざらざら | がさがさ | じよりじより |
| 125 | けばけば | ざらざら | じよりじより | ざらざら | かさかさ | かさかさ | ごわごわ | じよりじより | ざらざら | ざらざら |
| 158 | ねちゃねちゃ | じゅりじゅり | ざらざら | じゅりじゅり | かさかさ | ざらざら | じよりじより | つるつる | しょりしょり | ざらざら |
| 199 | つるつる | じよりじより | じよりじより | じゅりじゅり | かさかさ | じよりじより | じよりじより | ぶるぶる | しょりしょり | ぬめぬめ |
| 251 | つるつる | じよりじより | じゅりじゅり | ざらざら | かさかさ | ざらざら | ざらざら | ぶつぶつ | がさがさ | ざらざら |
| 316 | すべすべ | ざらざら | ざらざら | がさがさ | しょりしょり | じゅりじゅり | しょりしょり | つるつる | じゅりじゅり | じよりじより |
| 398 | つるつる | じよりじより | つるつる | つぶつぶ | とろとろ | しょりしょり | しょりしょり | つるつる | ざらざら | とろとろ |
| 501 | つるつる | ざらざら | つるつる | ぶつぶつ | くによくによ | つるつる | しょりしょり | つるつる | さらさら | とろとろ |
| 630 | つるつる | ざらざら | つるつる | かさかさ | すべすべ | さらさら | しょりしょり | かさかさ | さらさら | |
| 794 | つるつる | ざらざら | つるつる | こりこり | とろとろ | つるつる | しょりしょり | つるつる | つるつる | |

表 3.3: 触感に関する評価実験の結果：鋸歯状波

| Freq. | 鋸歯状波 | | | | | | | | | |
|-------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|
| | Subj. 1 | Subj. 2 | Subj. 3 | Subj. 4 | Subj. 5 | Subj. 6 | Subj. 7 | Subj. 8 | Subj. 9 | Subj. 10 |
| 10 | ぶつぶつ | つぶつぶ | ぶちぶち | ごつごつ | ぶつぶつ | こりこり | ぶつぶつ | ごつごつ | ぶちぶち | つぶつぶ |
| 12 | つぶつぶ | ぶちぶち | ぶつぶつ | ごりごり | ごりごり | ぶつぶつ | ごつごつ | つぶつぶ | ぶちぶち | ぶつぶつ |
| 15 | ぶちぶち | ぶちぶち | ぶつぶつ | ごりごり | つぶつぶ | こりこり | こりこり | ごわごわ | ぶちぶち | ぶちぶち |
| 19 | こりこり | つぶつぶ | ぶちぶち | つぶつぶ | ぶちぶち | こりこり | ごりごり | ごわごわ | ぶちぶち | ぶちぶち |
| 25 | ごりごり | ぶちぶち | こりこり | ごわごわ | ごりごり | ぶつぶつ | ごつごつ | ごりごり | ぶちぶち | つぶつぶ |
| 31 | ごわごわ | つぶつぶ | ぶつぶつ | しょりしょり | ごりごり | こりこり | ごつごつ | ごりごり | ぶつぶつ | つぶつぶ |
| 39 | とげとげ | じゅりじゅり | ぶつぶつ | ごつごつ | じよりじより | つぶつぶ | ごつごつ | ごりごり | ねばねば | つぶつぶ |
| 50 | べちゃべちゃ | ざらざら | ぶつぶつ | じよりじより | ざらざら | ごりごり | つぶつぶ | ごりごり | ぶつぶつ | つぶつぶ |
| 63 | じゅりじゅり | じゅりじゅり | ごりごり | ごわごわ | ごわごわ | つぶつぶ | ごりごり | ぶるぶる | ぶつぶつ | つぶつぶ |
| 79 | けばけば | ざらざら | ごりごり | ごつごつ | がさがさ | ごつごつ | ごりごり | ぶるぶる | ぶつぶつ | ごつごつ |
| 100 | じゅりじゅり | じよりじより | ごわごわ | ごわごわ | けばけば | ざらざら | ごりごり | ぶるぶる | ざらざら | ざらざら |
| 125 | ごわごわ | ざらざら | ざらざら | ごわごわ | かさかさ | ごわごわ | じよりじより | ごりごり | がさがさ | ざらざら |
| 158 | ぬめぬめ | ざらざら | ざらざら | じゅりじゅり | がさがさ | しょりしょり | じよりじより | ざらざら | しょりしょり | ざらざら |
| 199 | にゅるにゅる | ざらざら | ざらざら | ごりごり | がさがさ | じゅりじゅり | じよりじより | がさがさ | じよりじより | ざらざら |
| 251 | けばけば | ざらざら | ざらざら | ごわごわ | かさかさ | ざらざら | つぶつぶ | ごりごり | ざらざら | ごわごわ |
| 316 | ぬめぬめ | ざらざら | じゅりじゅり | ざらざら | けばけば | しょりしょり | しょりしょり | しょりしょり | ざらざら | じよりじより |
| 398 | すべすべ | ざらざら | しょりしょり | しょりしょり | しわしわ | しょりしょり | しょりしょり | つるつる | ざらざら | がさがさ |
| 501 | くにやくにや | ざらざら | つるつる | ぶつぶつ | さらさら | つるつる | | ざらざら | すべすべ | とろとろ |
| 630 | つるつる | ざらざら | かさかさ | ざらざら | ぬるぬる | さらさら | しょりしょり | つるつる | さらさら | べちゃべちゃ |
| 794 | つるつる | ざらざら | つるつる | つぶつぶ | ぬめぬめ | さらさら | さらさら | つるつる | つるつる | |

表 3.4: 触感に関する評価実験の結果：デルタ関数

| デルタ関数 | | | | | | | | | | |
|-------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|
| Freq. | Subj. 1 | Subj. 2 | Subj. 3 | Subj. 4 | Subj. 5 | Subj. 6 | Subj. 7 | Subj. 8 | Subj. 9 | Subj. 10 |
| 10 | ぶつぶつ | ぶちぶち | ぶつぶつ | つぶつぶ | | こりこり | ぶつぶつ | ぶちぶち | ぶちぶち | ぶつぶつ |
| 12 | ぶちぶち | ぶちぶち | ぶつぶつ | ぶちぶち | つぶつぶ | こりこり | ぶつぶつ | ぶちぶち | つぶつぶ | ぶつぶつ |
| 15 | ぶちぶち | つぶつぶ | ぶつぶつ | つぶつぶ | ぶつぶつ | こりこり | つぶつぶ | ぶちぶち | ぶちぶち | ぶつぶつ |
| 19 | ぶちぶち | つぶつぶ | ぶつぶつ | ぶつぶつ | しょりしょり | こりこり | こりこり | つぶつぶ | ぶちぶち | ぶちぶち |
| 25 | こりこり | ぶちぶち | ぶつぶつ | ござり | つぶつぶ | こりこり | つぶつぶ | つぶつぶ | つぶつぶ | つぶつぶ |
| 31 | ぶちぶち | つぶつぶ | ぶつぶつ | つぶつぶ | ぶつぶつ | こりこり | つぶつぶ | ぶちぶち | つぶつぶ | つぶつぶ |
| 39 | ちくちく | つぶつぶ | ぶつぶつ | ぶちぶち | ぶつぶつ | こりこり | つぶつぶ | ござり | ぶちぶち | つぶつぶ |
| 50 | ぶちぶち | つぶつぶ | ぶつぶつ | ざらざら | ざらざら | ござり | ぶちぶち | ぶちぶち | つぶつぶ | つぶつぶ |
| 63 | ぶちぶち | つぶつぶ | ぶつぶつ | ごつごつ | ざらざら | こりこり | つぶつぶ | ぶるぶる | つぶつぶ | つぶつぶ |
| 79 | ちくちく | ざらざら | ぶつぶつ | つぶつぶ | がさがさ | じょりじょり | つぶつぶ | ぶちぶち | つぶつぶ | がさがさ |
| 100 | とげとげ | じょりじょり | ぶつぶつ | ざらざら | けばけば | がさがさ | ぶつぶつ | かさかさ | じょりじょり | ざらざら |
| 125 | じょりじょり | ざらざら | ざらざら | ごつごつ | かさかさ | ざらざら | つぶつぶ | こりこり | ざらざら | じょりじょり |
| 158 | ごわごわ | じゃりじゃり | ざらざら | ごわごわ | しわしわ | ごわごわ | じょりじょり | かさかさ | ざらざら | ざらざら |
| 199 | ぬるぬる | じょりじょり | ざらざら | がさがさ | けばけば | じゅりじゅり | つぶつぶ | ざらざら | じょりじょり | がさがさ |
| 251 | もちもち | じょりじょり | ざらざら | がさがさ | かさかさ | じゅりじゅり | かさかさ | しょりしょり | こりこり | ざらざら |
| 316 | つるつる | じょりじょり | ざらざら | ごわごわ | かさかさ | じょりじょり | ざらざら | つるつる | さらさら | ざらざら |
| 398 | つるつる | じょりじょり | じゃりじゃり | ごわごわ | かさかさ | じょりじょり | しわしわ | つるつる | ざらざら | ざらざら |
| 501 | つるつる | じょりじょり | じゃりじゃり | ざらざら | | じょりじょり | しょりしょり | つるつる | すべすべ | ざらざら |
| 630 | つるつる | じょりじょり | つるつる | がさがさ | かさかさ | ざらざら | しょりしょり | つるつる | すべすべ | とろとろ |
| 794 | ぶちぶち | ざらざら | つるつる | かさかさ | かさかさ | じゅりじゅり | ざらざら | がさがさ | さらさら | しわしわ |

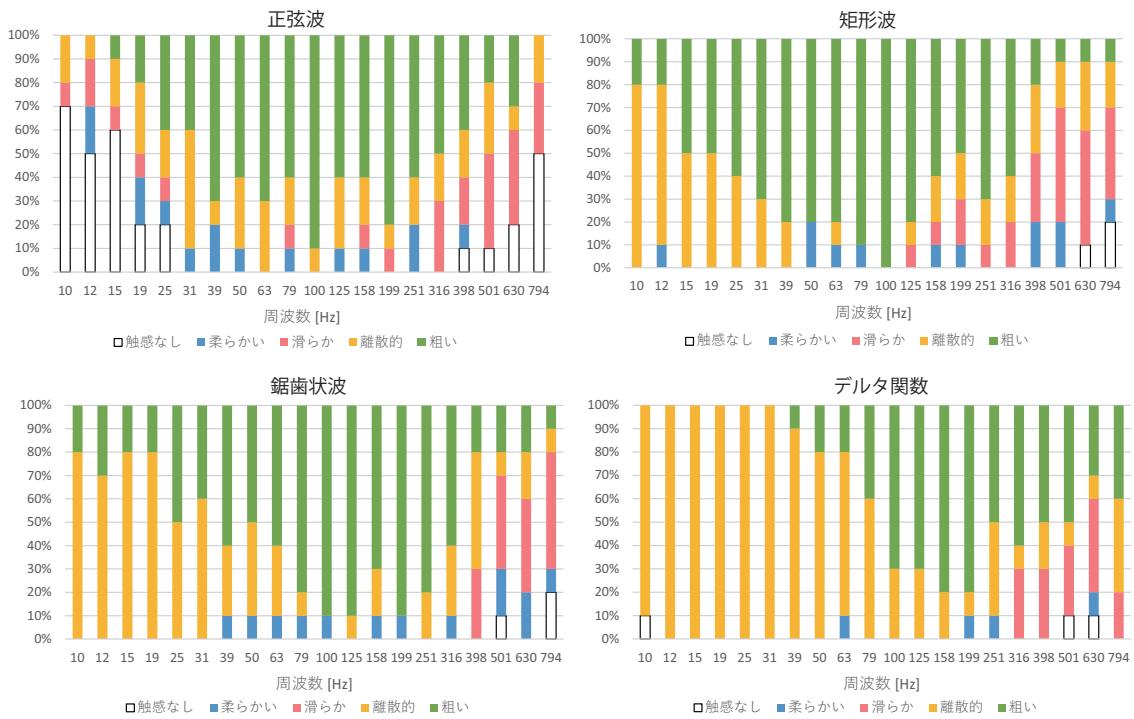


図 3.9: 波形ごとの実験協力者が回答した触感の領域の分布

現の触感を回答した実験協力者が多い周波数帯、実験協力者によって回答する触覚が異なる周波数帯が存在した。離散的な触感を提示しやすい周波数帯は比較的低い周波数が多く、矩形波、鋸歯状波、デルタ関数の順にその周波数帯の幅が広かった。粗い触感を提示しやすい周波数帯は各波形で異なり、矩形波、鋸歯状波、デルタ関数の順でその主周波数が低く、周波数帯の幅も広い結果となった

3.3.7 考察

図3.9において、波形の種類間で触感の分布が異なる周波数帯と分布が近い周波数帯があることが分かった。具体的には、主周波数が100 Hz以下の場合は、正弦波ではすべての触感の領域が、矩形波や鋸歯状波においては黄色と緑の触感の領域が、デルタ関数では黄色の触感の領域が示された。一方、主周波数が100 Hz以上の場合は、どの波形の種類においても、主周波数が高いほど赤や黄色の触感の領域が増えていくことが示された。

主周波数が100 Hz以下の場合は、波形の種類ごとで提示する触感の分布が異なった要因として、波形が高電圧状態になる時間の割合が考えられる。矩形波は周期の半分が最大振幅値となり、もう半分が0 Vとなる。このことから、一つの周期で摩擦を感じる時間と感じない時間が半分ずつとなり、これを繰り返したことでユーザはざらざらといった粗いテクスチャを感じたと考えられる。Vardarらも正弦波、矩形波、鋸歯状波、三角波で触覚を提示した際に、矩形波が最も粗い触感であるという結果であった[VISB17]。逆にデルタ関数は摩擦力が最大となる時間が非常に僅かであるため、ぱつぱつといった離散的な触感を答えたと考えられる。鋸歯状波は波形の特性上、剪断力が徐々に増え、周期毎で最大値から0 Vに下がる。このため剪断力が最大となる時間が矩形波より短いため、低周波では離散的な触感を答えるケースが多くなったと考えられる。

主周波数が100 Hz以上の場合は、波形の種類ごとで提示する触感の分布が似たような結果になった要因として、指の皮膚の機械的なローパスフィルタが考えられる。周波数が高いほど、指に伝わる力が機械的なローパスフィルタによって正弦波の場合と矩形波の場合が近くなる[GZW⁺18]。このことから鋸歯状波やデルタ関数に関しても同様なことが起こり、高周波では各波形の力の伝わり方に違いが表れにくくなり、どの波形でも同じような触感になったと考えられる。またどの波形でも高周波になると最大電圧となる時間が密になり、細かい刺激が多くあることから「さらさら」といった滑らかな表現が他の周波数帯より増えたと考えられる。

3.4 入力波形に対する知覚強度に関する調査

前節では、電極に入力する波形に対して、どのような触感が提示できるかを調査したが、それぞれの触感がどれほど強く感じるかは分からぬ。触図提示において触覚を提示しない場合と触覚を提示した場合で明確な差があるような入力波形を検討する。そのために、これまでに評価した触感の他に、その波形に対する触感の強さ（知覚強度）も調査する必要がある。

これまでに入力波形に対する振幅の閾値を調査した研究がある [BPIH10, VGB17]. 例えば、主周波数が 60 Hz 未満では正弦波を入力した場合に比べ、矩形波を入力した場合のほうが閾値が低かった. この結果から、主周波数が 60 Hz 未満において、矩形波を入力した場合のほうが正弦波を入力した場合より知覚強度も強くなると予測できる. またこの調査から、主周波数が 15 Hz から 480 Hz までの矩形波に対する振幅の閾値はほとんど差異が無かった. しかし、これらの周波数帯において閾値に変化がなくとも、知覚強度もそれらの周波数帯において同じとは考えにくい.

前節での触感に関する調査では、15 Hz において「ごつごつ」や「ぷつぶつ」といった「粗い」または離散的な触感表現を回答していたのに対し、501 Hz において「つるつる」や「さらさら」といった滑らかな触感を回答する実験協力者が全体の半分もいた. この滑らかな表現は触覚を感じたうえで回答している可能性もあるが、触覚を感じにくくなつたことで元々の絶縁膜の触感を回答している可能性もある. そこで閾値ではなく、どれくらい触覚を感じ取れるかの心理物理実験を実施した.

感覚尺度である知覚強度を調査するにあたり、一人当たりの長時間の実験を避ける必要がある. これは実験協力者の長時間での実験による疲労もあるが、なるべく同程度の湿度環境での実験が必要となるからである. そのため、心理物理測定法の一つであるマグニチュード推定法 [SS75] を用いて評価実験を実施した.

3.4.1 マグニチュード推定法

マグニチュード推定法とは 1 つの比較対象物と 1 つの評価対象物を用いて比較評価する心理物理実験である. 今回の実験では、触覚提示装置を 2 つ用意し、片方の装置によって実験協力者に同じ触覚を提示し続け、もう片方の装置で提示する触覚を変えていく. そして同じ触覚を提示し続けている装置側の触覚の知覚強度を 1.0 とし、もう片方の装置から提示される触覚の知覚強度が何倍なのかを実験協力者に自由な数値で回答させた. 例えば、比較対象となる触覚に比べて評価する触覚が弱ければ 1.0 未満の数字を、逆に触覚が強ければ 1.0 より大きな数字で何倍かを答えてもらう. また評価するほうの触覚を感じない場合は 0.0 と答えてもらう. しかし、評価する場合、実験協力者によって答える数字の最大値が変わる. そこで実験協力者ごとで最小の 0.0 から最大の 1.0 までの範囲になるように正規化する. そのために、実験協力者が回答した知覚強度の最大値を、その実験協力者が評価した値全体に割ることで正規化する. つまり、各実験協力者で少なくとも知覚強度が最大 1.0 となる波形が 1 つ以上あるような評価結果となる. このマグニチュード推定法を用いた知覚強度の評価実験を実施した.

3.4.2 実験協力者

実験協力者は 10 名で平均年齢は 22 歳 (21 歳から 23 歳) の大学生、及び大学院生である. また実験協力者のうち女性は 1 名であった. この 10 名の実験協力者は前節の触感に関する実験協力者と同じである.

提示装置に触れる際、実験協力者には利き腕に関係なく右手の人差し指の腹の部分で触覚を提示する部分に触れてもらい評価を行ってもらった。指の動かす方向や速さ、こすり方について厳密な制限を設けなかった。実験の練習の際に、実験実施者による指の動かし方の模範を実験協力者に見せ、極端に速くまたは遅く指を動作させないよう依頼した。また、実験協力者は比較対象となる触覚と評価対象となる触覚を何度も触れることを許可した。

3.4.3 入力波形

実験で使用する比較対象となる触覚の入力波形は、300 Hz の正弦波に設定した。触感に関する調査結果から、波形の種類ごとで提示する触感の特徴が異なるが、すべての波形で同じ基準の触覚に対する比較を行うために、今回の実験の基準となる触覚の入力波形を正弦波に固定した。評価する入力波形は触感の評価実験と同様に図 3.7 のような 4 種類(正弦波、矩形波、鋸歯状波、デルタ関数)を用意し、それぞれ 10 Hz から 794 Hz までの 20 個の周波数の波形を用意した。これにより、4 種類の入力波形と、20 個の主周波数により、一人当たり計 80 個の波形に対する知覚強度の評価を行ってもらった。これらの評価用の入力波形はランダムに提示され、実験協力者ごとでそれらの順番も異なるように設定した。

3.4.4 実験手順

実験手順として、初めに実験協力者には実験概要を説明した。そしてすべての実験協力者から実験に参加する同意を得た。その後、練習時間を設け、実験協力者には触覚ディスプレイ上で触覚の有無を確認してもらった。この際に使用した波形は正弦波の 300 Hz とした。実験中、実験実施者は入力波形をランダムに入力し、実験協力者は 2 つの触覚を比較した。そして評価値が決まり次第、その評価値を回答した。回答後はすぐに次の試行に移った。これを一人あたり全 80 試行を実施した。20 試行ごとで 5 分程度の休憩を挟んだ。すべての波形に関して評価してもらい、実験を終了した。実験終了後、実験実施者は各結果を実験協力者が答えた値の最大値でその他の値を割ることで知覚強度を 0.0 から 1.0 に正規化した。なお、本論文中の心理物理実験は全て筑波大学の研究倫理規定に則った実験(承認番号 2016R151)である。

3.4.5 実験結果

各波形での周波数ごとの知覚強度の評価結果を図 3.10 に示す。このグラフの横軸が主周波数を示し、この軸は対数表示となっている。縦軸は正規化された知覚強度を示し、グラフに示される知覚強度は実験協力者 10 名の結果を平均したものである。エラーバーは標準誤差を示す。

図 3.10 より、主周波数が変わることで知覚強度も変化することと、すべての波形の種類において 100 Hz 付近の知覚強度が高いことが見られた。また、すべての波形の種類において 100 Hz あたりを境にグラフの傾向の特徴が分かれた。入力波形が 100 Hz より低い周波数帯

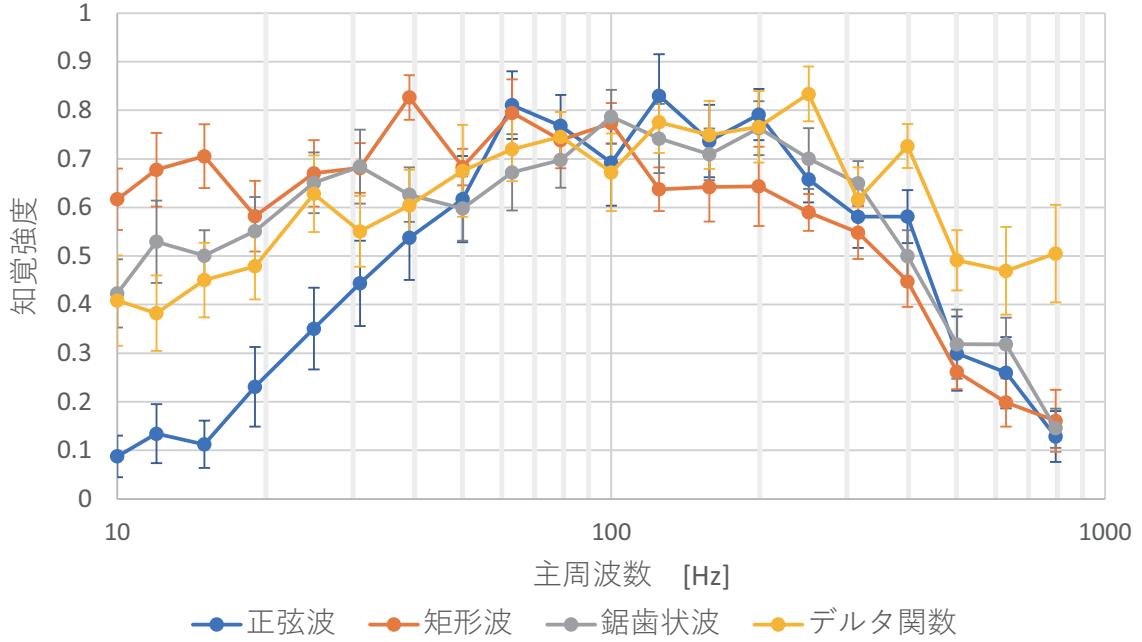


図 3.10: 知覚強度の評価結果

では、すべての波形の種類において周波数が高くなるほど知覚強度も高くなる傾向がみられた。また波形の種類ごとで知覚強度の値に違いが表れた。入力波形が 100 Hz より高い周波数帯では、周波数が高くなるほど知覚強度が低下する傾向が見られた。

3.4.6 考察

100 Hz 以上におけるグラフの傾向とその考察

ここでは主周波数が 100 Hz より高い周波数帯におけるグラフの結果に着目する。主周波数が 100 Hz 付近では、すべての波形において知覚強度が約 0.7 になっているのに対して、高周波になるほどどの波形でも知覚強度が低下していく様子が見られた。この周波数帯に限定して波形の種類間にに関する分散分析による検定を実施した結果、主周波数と波形の種類間の交互作用は有意ではなかった ($F(27,360)=1.52, p=0.178$)。また主効果に関しては主周波数、波形の種類ともに有意であった ($F(9,360)=1.91, p < 0.001, F(3,360)=2.63, p < 0.001$)。このことから、どの波形の種類も主周波数に応じて知覚強度が同様に低下することが示された。また、波形の種類間で比べた場合、主周波数が 400 Hz 以降の周波数帯において、デルタ関数の知覚強度が 0.5 付近に対し、他の波形の種類では知覚強度が 0.3 以下になる傾向が見られた。主周波数が 400 Hz 以降の周波数帯ではデルタ関数と他の波形の種類間で有意差が確認され(有意水準 5%), デルタ関数以外の波形の種類間では有意差が確認出来なかった。

すべての波形において、高周波になるほど知覚強度が低下することに関して、指にある機械受容器の影響が考えられる。指の皮膚内には皮膚感覚を知覚するための多くの触覚の受容器が備わっている。皮膚感覚は皮膚内部にある受容器が刺激を受け、その刺激が視床を通して脳に信号が伝達されヒトは触覚刺激を知覚する。皮膚の変形刺激に対する順応が遅いもの(Slow Adaptive)と早いもの(Fast Adaptive)に区別され、さらにそれぞれ受容器が集中する受容野が狭いもの(I型)と広いもの(II型)で分けられる。解剖学的な知見とあわせると、それぞれの順応と受容野の機能は、総計約17000個の機械受容ユニットからなる4種類の機械受容器があり、メルケル細胞(SA I), マイスナー小体(FA I), パチニ小体(FA II), そしてルフィニ終末(SA II)に分けられる[岩村01]。これらの受容器は種類ごとに特性が違う、またその機械受容器が刺激される周波数帯も違う。順応が速いほど振動や加速度を検出し、順応が遅いほど圧力を検出する。Gesheiderら[GBH01]は振動する物体に指を乗せ、振動する物体の周波数ごとで振幅を変えることで、触覚受容器が反応する振幅を調査した。その結果、機械受容器が刺激される振動の周波数が存在し、例えばメルケル細胞は50 Hz付近で刺激され知覚されやすく垂直方向の変形に応答する。パチニ小体は300 Hz付近で知覚されやすく感度も高い。今回の実験結果において、100 Hz付近の波形の知覚強度が高かったのはこれらの機械受容器が刺激されやすい周波数帯であったからだと考えられる。そして、波形の主周波数が高くなるほど機械受容器が刺激を受けにくくなり、知覚強度が低下したと考えられる。

非常に高い周波数帯でもデルタ関数が他のグラフと比べて知覚強度が高かった要因として、入力波形に含まれる周波数成分と指の機械受容器の関係性が挙げられる。前述のように、正弦波を入力した場合、機械受容器が刺激されやすい周波数帯であれば、強い知覚強度が得られる。今回の実験で用意した矩形波のような波形は、複数の周波数成分、つまり振幅が異なる複数の正弦波を含んでいる。矩形波の主周波数が低い場合でも、高周波数帯において小さい振幅強度の周波数成分(正弦波)が存在する。これらの周波数帯の周波数成分が機械受容器を刺激することで、触覚を感じやすくしていると考えられる。デルタ関数の場合、図3.7の右図のように主周波数から整数倍の周波数において周波数成分を含んでいる。逆にそれ以外の波形は高周波になるほど振幅強度が反比例する。つまり、デルタ関数が持つ主周波数の整数倍の周波数でも振幅強度が変わらない周波数成分を持つという特性から、高周波数帯において知覚強度が他の波形の種類より高くなったと考えられる。

100 Hz未満におけるグラフの傾向とその考察

主周波数が100 Hz未満における波形ごとの知覚強度のグラフにおいて、この周波数帯に限定して4つの波形の種類間で知覚強度の結果を比較するために、主周波数間と波形の種類間で二元配置の分散分析を実施した。その結果、主周波数と波形の種類間の交互作用が有意であった($F(27,360)=1.52, p=0.00121$)。また主効果に関しても主周波数、波形の種類とともに有意であった($F(9,360)=1.91, p<0.001, F(3,360)=2.63, p<0.001$)。このことから、すべての波形の種類における知覚強度は周波数に応じて値が変化し、その変化する傾向も各波形の種類間で異なることが分かった。

正弦波は10 Hz付近の周波数帯では知覚強度が低く、触感に関する実験結果と同様にほと

などの実験協力者が触覚を感じなかった。周波数が高くなるほど知覚強度の値が増えていった。鋸歯状波やデルタ関数も同様に周波数が高くなるほど知覚強度の値が増えていったが、10 Hz付近の周波数帯では知覚強度が0.3以上と正弦波の場合より高い結果となった。矩形波は10 Hz付近でも知覚強度が0.5以上と高く、主周波数が高くなるほど知覚強度も増える傾向が見られた。

主周波数が非常に低い場合において、正弦波の知覚強度が低くなる傾向に関して、波形に対する指にかかる剪断力の関係性が考えられる。静電気力触覚ディスプレイは時間軸に対して電圧値の変化が緩やかなほど指にかかる力が弱くなることが分かっている[VGB17]。低周波の正弦波の場合では指にかかる剪断力が弱くても、矩形波のような短い時間で電圧の変化が大きい波形の場合では指にかかる剪断力が大きい。このことから、正弦波の低周波では知覚強度が弱く、周波数があがるほど電圧値の変化が急になるので、周波数が高いほど知覚強度が大きくなつたと考えられる。

主周波数が低くとも、矩形波、鋸歯状波、デルタ関数の知覚強度が正弦波より高かったことに関して、これらの波形に電圧値の変化が急な部分があるからだと考えられる。しかし、これらの波形の種類間でも知覚強度が異なつた。この要因に関しても、波形に含まれる周波数成分と人間の指の機械受容器の関係性に着目した。Vardarらは複数の周波数成分を含む矩形波のほうが正弦波より低い周波数において機械受容器が刺激されやすいことを指摘した[VGB17]。矩形波、鋸歯状波、デルタ関数においても、この周波数成分の構成により知覚強度に差が表れたと考えられる。また、デルタ関数は主周波数からある程度の周波数帯の周波数成分が矩形波に比べ小さいため、低周波数帯では矩形波より知覚強度が低かったと考えられる。

3.5 周波数成分に着目した入力波形での知覚強度の評価実験

前節では、入力波形に含まれる周波数成分の構成によって知覚強度が異なる可能性があると考えた。そこで、本節では周波数成分の構成によって知覚強度に影響があるのかを調査するため、周波数成分に着目した入力波形を用意し、基本波形を用いた場合と同様な評価実験を行つた。

3.5.1 追加実験で用意した入力波形

図3.11に示す8つの入力波形を用意した。波形#1から波形#3は周波数成分の数が2つであり、それぞれ振幅強度の傾向が異なる。波形#4から波形#6も同様に周波数成分の3つで、それぞれ振幅強度の傾向が異なる。波形#7と波形#8は周波数成分が5つで、それぞれ振幅強度の傾向が異なる。それぞれの波形の式を以下に示す。

以下に各波形の式を示す。

$$\text{入力波形\#1: } \frac{1}{2} \sum_{m=1}^2 \sin(2\pi m ft) \quad (3.4)$$

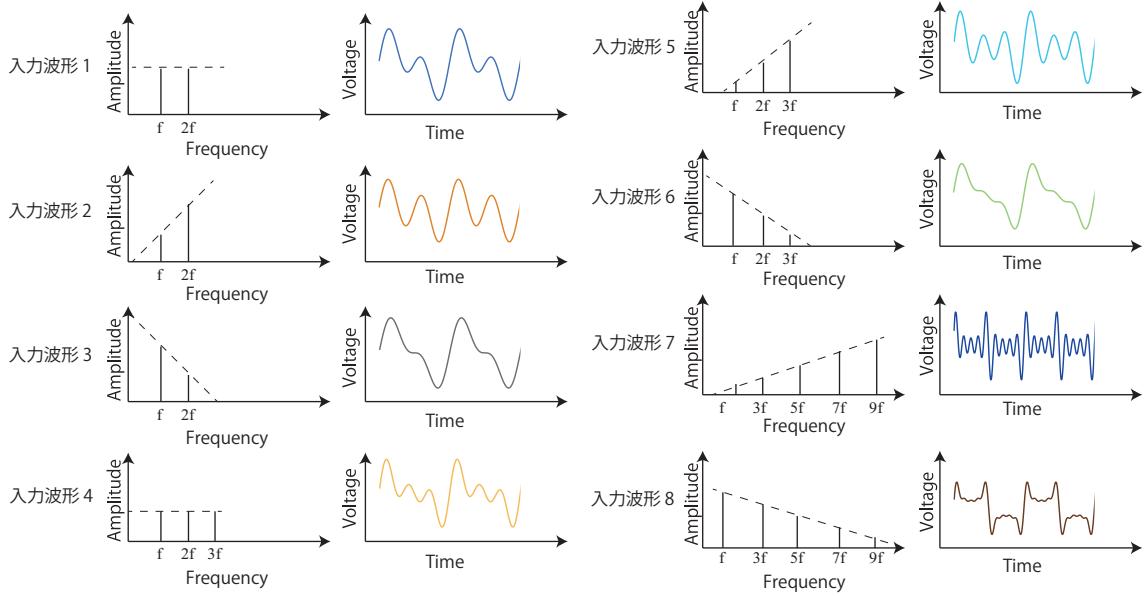


図 3.11: 追加実験で用いる入力波形

$$\text{入力波形\#2: } \sum_{m=1}^2 \frac{m}{3} \sin(2\pi m ft) \quad (3.5)$$

$$\text{入力波形\#3: } \sum_{m=1}^2 \frac{3-m}{3} \sin(2\pi m ft) \quad (3.6)$$

$$\text{入力波形\#4: } \frac{1}{3} \sum_{m=1}^3 \sin(2\pi m ft) \quad (3.7)$$

$$\text{入力波形\#5: } \sum_{m=1}^3 \frac{m}{6} \sin(2\pi m ft) \quad (3.8)$$

$$\text{入力波形\#6: } \sum_{m=1}^3 \frac{4-m}{6} \sin(2\pi m ft) \quad (3.9)$$

$$\text{入力波形\#7: } \sum_{m=1}^5 \frac{6-m}{15} \sin((2m-1)\pi ft) \quad (3.10)$$

$$\text{入力波形\#8: } \sum_{m=1}^5 \frac{m}{15} \sin((2m-1)\pi ft) \quad (3.11)$$

ここで f は波形の主周波数を示す。これらの波形を用いて前節と同様な評価実験を実施した。この実験では実験協力者として 10 名の大学生、及び大学院生のを募った。比較対象の入

力波形は前節と同じ正弦波の 300 Hz に固定する。実験環境も実施した場所や温度を前節と同程度になるようにした。

3.5.2 実験結果と考察

各波形の知覚強度に関する実験結果を図 3.12 に示す。縦軸は正規化された知覚強度が示され、横軸は波形の主周波数を示す。エラーバーは標準誤差を示す。各値は実験協力者が評価した結果の平均値である。これらの結果から、前節と同様に約 100 Hz 周辺で特徴が分かれ、上に凸となる部分がこの前後で分かれている。例えば、波形#7 と波形#8 の凸なる周波数は 100 Hz より低いが、それ以外の波形は 100 Hz より高い結果となった。

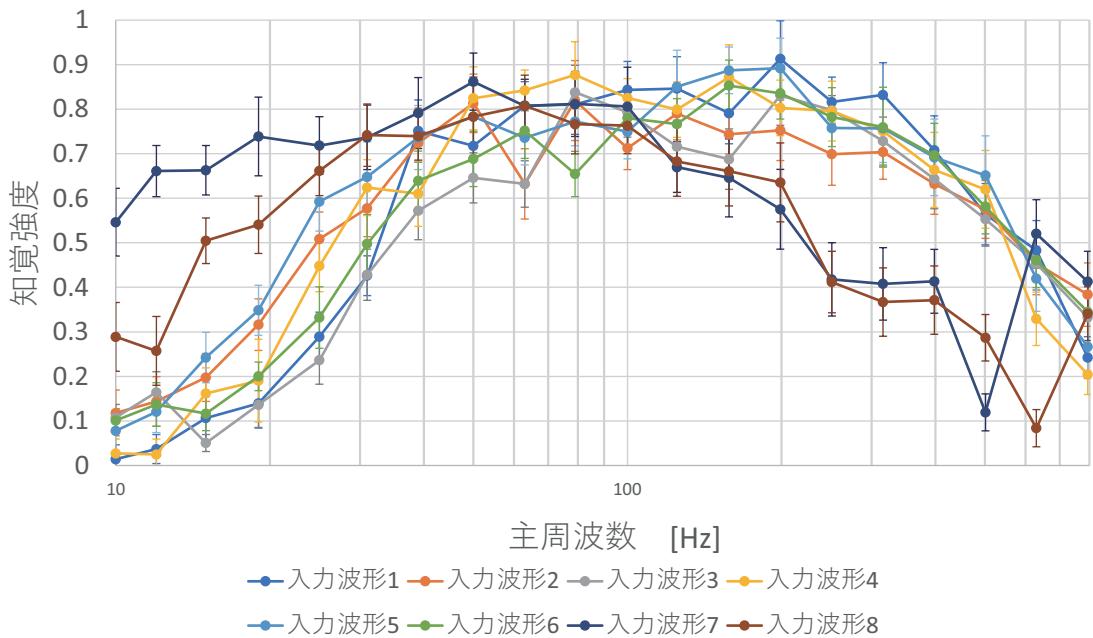


図 3.12: 追加実験での周波数に対する入力波形ごとの知覚強度のグラフ

今回の結果では知覚強度が波形#1 から波形#6 までは僅かに違う傾向が見られたが、グラフのままでは比較が難しい。ここで、結果のグラフをガウス関数のような式に近似し、その関数のパラメータを比較することで特徴を分けることを考えた。近似する式を以下に示す。

$$G(f) = a + b e^{-\frac{(\log_{10} f - \log_{10} \mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (3.12)$$

ここで $G(f)$ は主周波数 f に対するグラフ値の近似値を表し、 a , b , μ , σ は変数パラメータを表す。 a はグラフ全体のオフセット量、 b は知覚強度のグラフの最大値、 μ はグラフが最大となる周波数、そして σ はガウス関数の山の広がり具合を表す。この式にすべての入力のグラフをフィッティングしていく。

各波形をフィッティングした際のパラメータごとの値を図3.13に示す。青いバーは実験値から式3.12にフィッティングさせた時の各パラメータである。パラメータ a はほとんどの波形で0に近い値となった。パラメータ μ は周波数成分の構成によって特徴が異なった。波形#3, #6, #8のような振幅強度が高周波ほど下がる波形のグループ、波形#2, #5, #7のような振幅強度が高周波ほど上がる波形のグループ、そして振幅強度がフラットな#1と#4のグループで見比べた場合、周波数成分の数が増えるほど知覚強度が最大となる周波数が低くなる傾向が確認できた。パラメータ σ は波形#7のみ0.5を超え、それ以外の波形ではほぼ変わらない結果となった。

これらの結果は周波数成分の構成によって変わると考えられる。波形の主周波数が低い場合でも、その波形に含まれる周波数成分が高周波にも存在すれば、この周波数成分の影響により指の機械受容器を刺激した可能性を考えられる。波形#7の周波数成分は広い範囲の周波数帯かつ高周波ほど強い振幅強度のため、低周波からある程度の周波数まで機械受容器を刺激する周波数成分があったと考えられる。

3.6 知覚強度の予測モデルの提案

本研究では、波形の周波数成分のみの情報でこの知覚強度のグラフの傾向が予測できるのではないかと考え、次のような仮説をたてた。周波数に対する人間の指の知覚強度の基準となるグラフがあるとし、それに周波数成分と掛け合わせることで他の波形でも知覚強度が予測できるというものである。

人間の指に備わる触覚受容器はそれぞれ受容器が反応しやすい周波数帯域が存在する。その周波数帯域より低すぎても高すぎても知覚強度は落ちてしまう。そこで、本研究では静電気力による触覚ディスプレイ装置においても、各周波数で基準となる知覚強度があると仮定する。また任意の入力波形から周波数解析により周波数成分を求める。この仮定した基準となる知覚強度のグラフと入力波形が持つ周波数成分を用いて、用意した入力波形に対する知覚強度のグラフの予測が可能であるかを考える。

ある周波数 f にて基準となる知覚強度のグラフ $G(f)$ とし、任意の入力波形 $a(t)$ の周波数成分の集合 $A = \{A_{f_0}, A_{f_1}, A_{f_2}, \dots\}$ を掛け合せた結果を予測知覚強度 $R(f)$ とする(式3.13)。

$$R(f) = \sum_{k=0}^A A_{f_k} G(f_k) \quad (f_0 = f) \quad (3.13)$$

ここで、もし入力波形が正弦波だった場合、正弦波は周波数成分が1つの周波数成分で構成される。したがって、式3.14のような正弦波を入力波形としたとき、この正弦波に対する予測知覚強度は、入力波形に含まれる周波数成分を $A_{\sin}(f)$ とすると、その際の予測知覚強度 $R_{\sin}(f)$ は式3.15となる。

$$a_{\sin}(t) = \sin(2\pi ft) \quad (3.14)$$

$$R_{\sin}(f) = \sum_{k=0}^A G(f_k) A_{\sin}(f_k) = G(f) A_{\sin}(f) \quad (3.15)$$

ここで $A_{\sin}(f)$ は任意の周波数において常に同じ値なので、この値を m とすると、 $G(f)$ は式 3.16 となる。

$$G(f) = \frac{R_{\sin}(f)}{m} \quad (3.16)$$

ここで正弦波における各周波数の知覚強度 $R_{\sin}(f)$ を既知としたとき、任意の入力波形 $a(t)$ に対する予測知覚強度 $R_a(f)$ は、入力波形に含まれる周波数成分の集合を A とすると式 3.17 となる。

$$R_a(f) = \sum_{k=0}^A A_{f_k} \frac{R_{\sin}(f_k)}{m} \quad (f_0 = f) \quad (3.17)$$

この予測モデルにより、実験による正弦波の知覚強度 $R_{\sin}(f)$ が既知であれば、任意の波形に対する知覚強度を予測することが可能となる。この正弦波の知覚強度 $R_{\sin}(f)$ は実験値を用いることで疑似的な式として置き換えることができる。

提案した知覚強度モデルによる知覚強度の推定とその結果

任意の波形における知覚強度の推定を行うために、初めにこれまでの正弦波で実施した知覚強度のグラフを疑似的な数式に置き換える。式 3.13, 3.17において $m = 1$ と仮定したとき、正弦波による知覚強度のグラフの疑似的な数式を以下に示す。

$$G(f) = R_{\sin}(f) = 0.8e^{-\frac{(\log_{10}(\frac{f}{10.1})-1)^2}{0.36}} \quad (3.18)$$

この式を用いて、前節で用いた入力波形を式 3.13 で計算する。

提案した推測モデルから知覚強度の推定値を算出した。そして式 3.12 にこれらの予測したグラフをフィッティングさせ、各パラメータを求めた。予測値からパラメータを算出した結果を図 3.13 のオレンジのグラフに示す。パラメータ a はどちらの結果もほぼ 0 に近い値であった。これらの図で実験から得られた結果と予測モデルによる結果を比べると、パラメータ b ではほぼ同じ値となり、平均誤差は 0.045 であった。パラメータ μ は実験値と予測モデル値で平均誤差が 39.8 Hz であり、大きく異なる結果となった。しかし、これらの値は相関係数が 0.968 と高い数値となった。このことから予測モデルから一定の割合の係数をかけることでこのパラメータを予測することができると考えられる。パラメータ σ は実験値と予測モデルで値が異なり、かつ相関係数も 0.297 と低い結果となった。

このことから現状のモデルでは一部の予測は難しいことが言え、現状の提案モデルに加えて湿度や絶縁膜の素材などを考慮しなければならない。

3.7 触図提示に適した入力波形に関する考察

ここまで触感に関する調査と知覚強度に関する調査から、静電気力触覚ディスプレイが表現できる触感を可視化することができ、さらにそれらの触感がどのくらいの強さで提示できるかについて大まかな予測が可能となった。

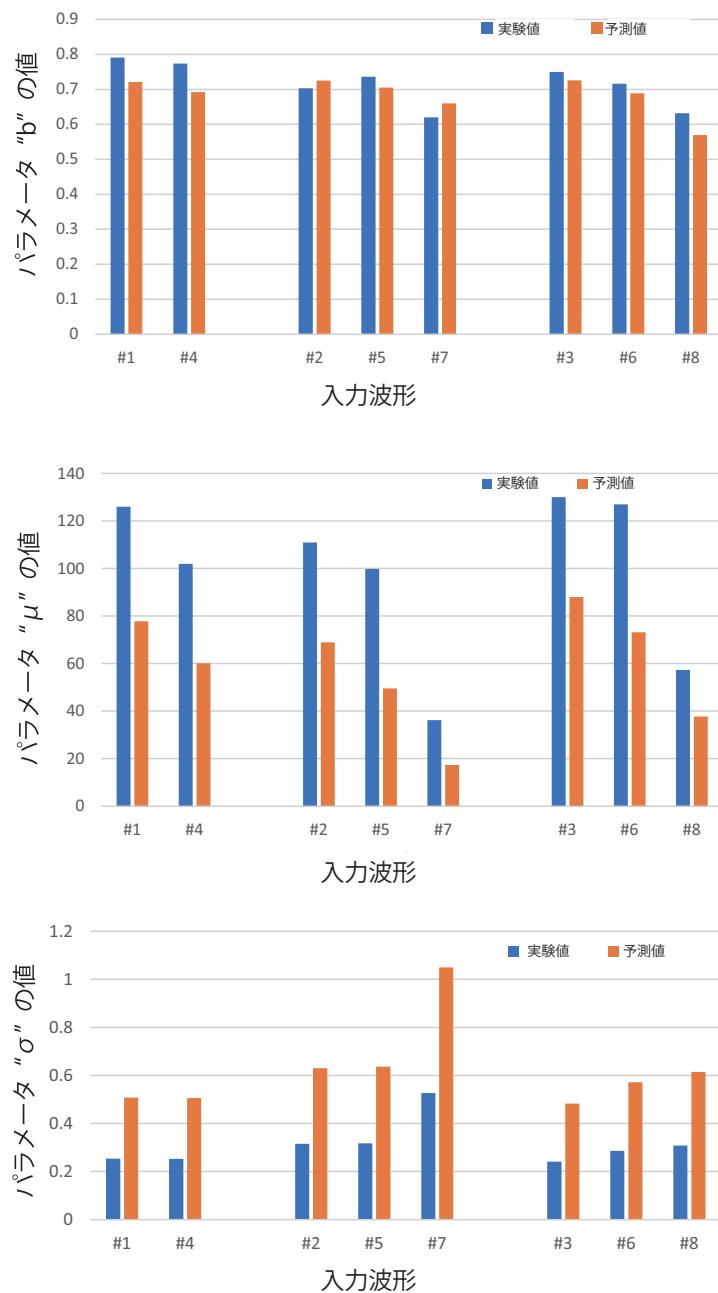


図 3.13: 入力波形ごとのパラメータの比較

触感に関する調査の結果から、静電気力触覚ディスプレイは「粗」軸-「滑」軸上に沿った分布となった。知覚強度に関する調査の結果からは、どの波形の種類も主周波数が 100 Hz 付近において知覚強度が高くなり、逆に、正弦波の低周波またはどの波形の種類でも高周波の入力波形において知覚強度が低くなることが分かった。このことから、触図提示に必要とされる、図形内部と外部で感じる触覚の強さの差をより大きくするには、より「粗い」表現と「滑らか」な表現かつ、それらの知覚強度に差があるような入力波形を選ぶことが考えられる。両結果を合わせた場合、知覚強度が高い主周波数の 100 Hz 付近は「粗い」表現のオノマトペの回答が多く、知覚強度が低い波形においては「滑らか」な表現のオノマトペ、または触覚を感じない回答が多かった。この知覚強度が低い場合でのオノマトペの結果に関しては、触覚を感じ取れなく、元々のディスプレイ自体のテクスチャをオノマトペで表現した可能性もある。

このことから、触図提示において「粗い」表現の触感を提示する領域と、触感の提示を行わない領域を分けて図形をレンダリングすることで、より図形の輪郭線を強調できることが考えられる。

3.8 本章のまとめ

本章ではこの静電気力触覚ディスプレイを用いた触図提示において、図形の輪郭線などの情報を効果的に認識させるための入力信号の選定を目的とし、静電気力触覚ディスプレイが提示できる触感、及び触感の強さを示す知覚強度について調査した。

触感に関する調査では、入力波形として 4 種類の波形とそれら 20 個の主周波数、計 80 個を用意し、各波形でどのような触感が得られるかを限定された日本語のオノマトペを用いて調査した。オノマトペが表す触感のマップを基に収集したオノマトペの結果を触感の種類ごとに分けた結果、正弦波や矩形波といった同じ種類の波形を用いた場合でも、主周波数を変えることで提示する触感が変わることが分かった。たとえば、低周波では「ぶつぶつ」といった離散的な触感が、100 Hz 付近では「ごわごわ」といった粗い触感が表現できる傾向が見られた。また高周波では「さらさら」や「つるつる」といった滑らかな触感を提示できる可能性も示せた。またこれらの触感を提示する周波数帯は、波形の種類ごとで変化することも分かった。

さらに、これらの触感がどれほど強さで感じ取れるのかを示す知覚強度を調査した。触感調査でも使用した 4 種類の波形を用いて、マグニチュード推定法による評価実験を実施した。この評価手法によって、それぞれの波形に対する知覚強度を実験協力者に評価してもらった。この結果、100 Hz 未満の波形は主周波数が高くなるほど知覚強度が上がる傾向が見られた。逆に 100 Hz 以降の波形は高周波になるほど知覚強度が低下していった。また、同じ主周波数でも波形の種類ごとで知覚強度が異なる場合があった。例えば、正弦波は 10 Hz ではほとんどの実験協力者は触覚を感じ取れなかったが、矩形波の場合ほとんどの実験協力者が触覚を感じ取れた。

本研究ではこれらの結果の要因を波形に含まれる周波数成分と指に備わる機械受容器の関

係性であると考え、周波数成分から知覚強度を予測するモデルを提案した。このモデルを検証するために、新たに8つの波形を用意し、それらに対する知覚強度を収集し、この実験結果と提案したモデルによる予測値を比較した。この結果、このモデルを利用することで、波形の種類ごとで得られる知覚強度の最大値や、最も強く感じる主周波数を予測できることが見込まれた。これにより、提示したい触感に合わせた波形を用意した場合に、その波形を用いてどれほどユーザに強く感じ取れてくれるかの大まかな推定が可能と考えられる。

静電気力触覚ディスプレイが提示できる触感の分布と知覚強度の調査結果から、触図提示において「粗い」表現の触感を提示する領域と、触感の提示を行わない領域を分けて図形をレンダリングすることで、より図形の輪郭線を強調できることが見込まれた。

第4章 複数指による触察での図形認識に関する調査

本章の目的は、静電気力触覚ディスプレイを使用した触図提示手法における複数指による触察の有効性の調査である。そのため、複数指への触覚提示を可能とする静電気力触覚ディスプレイを利用し、このディスプレイを用いた図形の認識に関する評価実験を実施した。

本章では初めに触図の認識に関する研究を述べ、次に複数指による触察を可能とするために銀ナノインクを用いた触覚ディスプレイについて述べる。そしてこの触覚ディスプレイを用いた二つの評価実験を実施した。一つは提示された図形を限られた選択肢の中から選んでもらう図形識別に関する調査を行った。もう一つは、提示された図形を実際に紙に書いてもらう図形認識に関する調査を行った。

4.1 触図の認識を一本指と複数指で比較した研究

これまでの先行研究において一本指と複数指での図形識別に関する調査が行われてきた。これらの調査から、使用的する触覚ディスプレイや提示する図形の大きさによって複数指による触察において有効である場合とそうでない場合があることが分かった。

振動付き点図ディスプレイを用いた調査では、複数指を使う方が図形の認識度が下がる結果となった [Cra85]。この触覚ディスプレイは 6×24 の計 144 のピンで構成されており、ディスプレイの大きさは横が 11 mm であり、縦が 27 mm である。そして各ピンには振動アクチュエータが備わっており、触覚を提示する際にその領域内のピンのみを振動させることで、ディスプレイ上にある指に対して触覚提示領域を把握させる。このディスプレイを用いて一本指による触察の場合と複数指による触察の場合において提示された図の認識に関する比較調査をした結果、一本指による触察のほうが正しく図を認識する結果となった。

Uematsu らのピンアレイ装置 (DotView DV-2) を用いた図形の提示では、識別正答率の結果に関しては、一本指と複数指に差異はほとんどなく、探索時間に関しては、サイズによっては複数指の方が探索時間が早くなる傾向があった [USKK16]。このピンアレイ装置は 32×48 のピンで構成され、ピン同士の間隔は 2.4 mm である。この装置を用いて高さが 20 mm の図形と 52 mm の図形をユーザに提示し、その図形が何であるかを回答してもらう評価実験を実施した。この実験の結果、図形把握の正答率に関しては指の本数やサイズに関わらず 90%を超える正答率であった。そしてどちらのサイズでも一本指による触察と複数指による触察で正答率に差異は無かった。探索時間に関しては、小さなサイズの図形の提示においては複数

指による触察のほうが探索時間が長くなる傾向となり、逆に大きいサイズでは探索時間が短くなる傾向となった。

表4.1に先行研究における複数指と一本指での図形識別に関する結果を示す。この表のように触覚ディスプレイや提示する図形によって、図形を認識するまでの識別正答率や探索時間が一本指と複数指でどちらが有用であるかが異なる。しかし、静電気力触覚ディスプレイでは識別正答率と探索時間に関する一本指と複数指の比較調査は明らかになっていない。そこで本研究では、静電気力触覚ディスプレイ装置を用いた場合において、一本指による触察と複数指による触察の結果を比較し、どれほど複数指による触察で図形識別が向上するかを調査する。またこれらの調査結果から、他のディスプレイでの結果と比較し考察する。

表4.1: 先行研究における複数指と一本指での結果の差異

| 触覚ディスプレイ | 識別正答率 | 探索時間 |
|--------------------|-----------|-----------|
| 振動付点図 [Cra85] | 複数指 < 一本指 | 複数指 > 一本指 |
| ピンアレイ (小) [USKK16] | 複数指 ≈ 一本指 | 複数指 ≈ 一本指 |
| ピンアレイ (大) [USKK16] | 複数指 ≈ 一本指 | 複数指 < 一本指 |

4.2 銀ナノインクを用いた静電気力触覚ディスプレイとその実装

静電気力触覚ディスプレイにおいて複数指による触察の有効性を調査するために、本研究における実験用装置として銀ナノインクを用いた静電気力触覚ディスプレイを利用した。そしてこの銀ナノインクによるディスプレイで図形識別に関する評価実験を行うための装置を実装した。

4.2.1 従来の静電気力触覚ディスプレイにおける複数指への触覚提示の課題

これまで、静電気力触覚ディスプレイにおいて複数指を用いた図形認識に関する調査はない。これは従来の静電気力触覚ディスプレイのハードウェアの構造の原因が主であると考えられる。

静電気力触覚ディスプレイは平面状の单一電極を利用しておおり、図4.1のように複数の指を同時にディスプレイ上をなぞってしまうと、すべての指に同じ触覚を提示してしまう。そして、複数の指が図形提示領域の境界線を覆ってしまうと、指ごとで触覚の制御を行うことができないため、全ての指に同じ触覚を提示してしまい、ユーザはこの図形領域の境界線を歪んだ状態で認識してしまう可能性がある。

そのため、複数指でなぞった場合でも、指ごとで触覚提示を制御するハードウェアが必要となる。

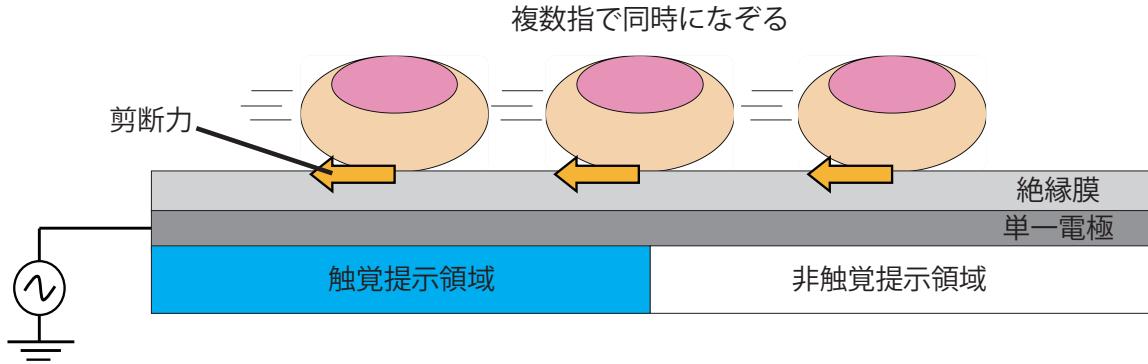


図 4.1: 単一電極上で複数指を同時になぞった場合の様子

4.2.2 複数指への触覚提示が可能な静電気力触覚ディスプレイ

本研究では、今回の実験に向けた触覚ディスプレイとして、触図の製作が比較的に容易であり、複数指による触察に対応できる銀ナノインクを用いた静電気力触覚ディスプレイを利用した。

複数指の触察に対応した静電気力触覚ディスプレイを開発した研究がある。Ilkhani らの研究では、直交する電極線に特定の高電圧の交流信号を印加することで、この交点において触覚を知覚させることを実現し、複数の指への触覚提示を可能にした [IS18]。また複数電極を用いて複数指に対する触覚提示を可能とするデバイスも開発されている [TSK16]。

この他に、銀ナノインクを用いた静電気力触覚ディスプレイがある [KIKM18, FSH19]。この触覚ディスプレイは、電極部分を高い解像度の特定の形状に銀ナノインクで印刷し、その印刷された電極に高電圧を印加することで、その電極上のみに触覚を提示することができる。したがって、複数指をディスプレイ上に置いたときに、この図形上にある指のみが触覚を感じる。これにより複数指への触覚提示が可能となる。さらに銀ナノインクによる触覚ディスプレイは、一つの電極を印刷する時間が短く、一般家庭で使用されるプリンタで印刷が可能であるため触図の製作が容易である。この触覚ディスプレイは触覚提示領域が静的ではあるが、今回の実験では用意するディスプレイの種類が少ないため、評価実験用の触覚ディスプレイとして有用であると考えた。

4.2.3 銀ナノインクを用いた静電気力触覚ディスプレイの研究

これまでに静電気力触覚ディスプレイと銀ナノインクを組み合わせた研究として Kato らの触覚ディスプレイがある [KIKM18]。このディスプレイは指表面に電極付きのパッドを装着し、この指に対して電気刺激と静電気力による剪断力提示を組み合わせて触覚提示を行った。これにより、静電気力によるテクスチャ感の提示と、電気刺激による静止した指への触覚提示を可能とした。そして、このテクスチャ感を提示する際に、銀ナノインクによって印刷された図形状の電極上に指がある場合にのみ触覚を提示する手法を用いた。

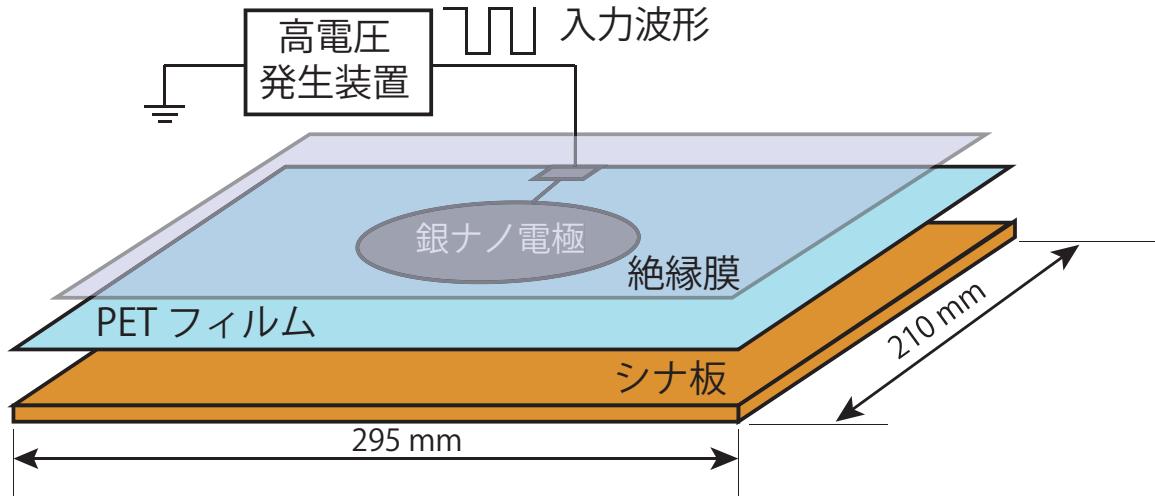


図 4.2: 銀ナノインクを用いた静電気力触覚ディスプレイの構成図

また Fukuda らは電極上に塗装を施し、さらに絶縁層を設けることで色のついた絵の上で触覚をユーザに感じさせることを可能にした [FSH19]。この手法も Kato らと同じく、図形状に印刷された電極上にのみ触覚を提示する手法を利用した。

本研究の評価実験でも、提示する図形状の電極を銀ナノインクで印刷し、その上をユーザの指でなぞってもらう。そして、その電極上触覚提示領域をユーザに把握してもらい、図形を認識させる。

4.2.4 銀ナノインクを用いた静電気力触覚ディスプレイの実装

銀ナノインクを用いた静電気力触覚ディスプレイは、高電圧発生装置、絶縁膜、銀ナノインクで電極が印刷された PET (polyethylene terephthalate) フィルム、そしてこのフィルムを貼りつけるシナ板で構成される(図 4.2)。このディスプレイでは図形の形に印刷された電極上にのみ触覚が提示されるため、単電極ではあるが複数指で図形を触察することができる。

本研究では提示したい図形を銀ナノインク印刷専用の PET フィルム (NB-TP-3GU100) に銀ナノインク (NBSIJ-MU01) を用いて印刷した。印刷機は家庭用インクジェットプリンター (EPSON PX-S160T) を用いた。この印刷された PET フィルムを同じサイズのシナ板に貼りつけ、PET フィルムの表面に絶縁膜を貼り付けた。この際に印刷された電極面自体の浮き上がりを知覚することは無かった。絶縁膜は厚さ $11 \mu\text{m}$ の塩化ビニリデンフィルムを使用した。シナ板を用いるのは提示する図形ごとに電極を取り換える際に PET フィルムが折れ曲がることによって生じる絶縁膜の歪みを防ぐためである。シナ板は幅 295 mm、高さ 210 mm であった。実際の銀ナノインクを用いた静電気力触覚ディスプレイを図 4.3 に示す。

また、各図形の電極をディスプレイの中央に配置するため、高電圧発生装置からこの図形へ接続できるようにディスプレイの外枠から図形領域まで幅 0.5 mm の導線パターンも印刷した。導線パターンは十分に細いので触覚はほぼ感じられない。後述する評価実験では、実験協

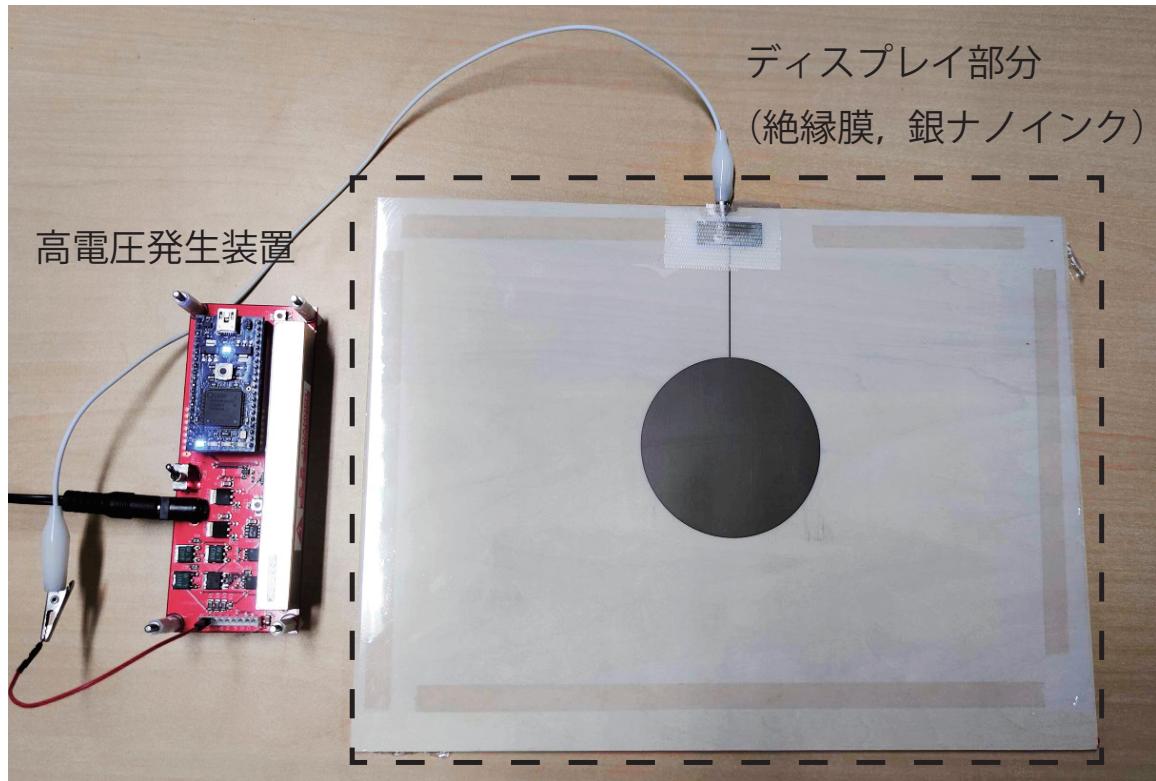


図 4.3: 実際の銀ナノインクを用いた静電気力触覚ディスプレイ. 左側に高電圧発生装置, 右側に絶縁膜が貼られた銀ナノインク電極.

力者に導線パターンがあったことに気づいたかを聞いたところ、この導線パターンに気づいた実験協力者はいなかった。

本研究では、この銀ナノインクを用いた静電気力触覚ディスプレイにおいて、図形認識に関する評価実験を実施し、複数指による触察の有効性を調査した。

4.3 一本指と複数指による触察時の図形識別に関する評価実験

一本指による触察と複数指による触察でどれほど図形の識別に違いがあるかを調査するために、銀ナノインクを用いた静電気力触覚ディスプレイを利用し、図形認識に関する評価実験を実施した。この評価実験では4つの単純な図形を触覚ディスプレイによって実験協力者に提示し、この提示した図形が何であるかを答えてもらった。そして実験結果から各図形の識別正答率や図形を回答するまでの探索時間を求め、一本指による触察と複数指による触察で比較した。

4.3.1 実験条件と実験手順

実験協力者

今回の評価実験では、一本指による触察か複数指による触察かといった触察方法ごとの図形識別の差の傾向を把握するために健常者である大学生、及び大学院生の10名を募った。この実験協力者10名のうち、6名が静電気力触覚ディスプレイを体験したことがあった。今回の評価実験において一本指と複数指の2グループを作るために、静電気力触覚ディスプレイを体験したことがある実験協力者と体験したことがない実験協力者をそれぞれランダムに2グループに分けた。一本指による触察のグループは22歳から26歳の大学生5名（うち女性1名）で構成され、複数指による触察のグループは22歳から24歳の大学生5名（うち女性1名）で構成された。

使用する指の制約

実験中の使う指の本数や動かし方に関して、一本指による触察では実験協力者の利き腕に関係なく右手の人差し指で触察を行ってもらった。この際に、指の触れる場所や指の動き、そして指の動かす速度に関しては制限を設けなかった。複数指による触察では両手の指で自由に触察を行ってもらった。この触察においては、使う指の本数や指の触れる場所、指の速度は指定しなかった。

評価実験に使用する図形

今回の評価実験は基本的かつ一般の人が分かる図形である、円形、四角形、三角形、星形が用いられた。これは一本指と複数指を比較する場合、複雑な図形で実施すると、結果の要

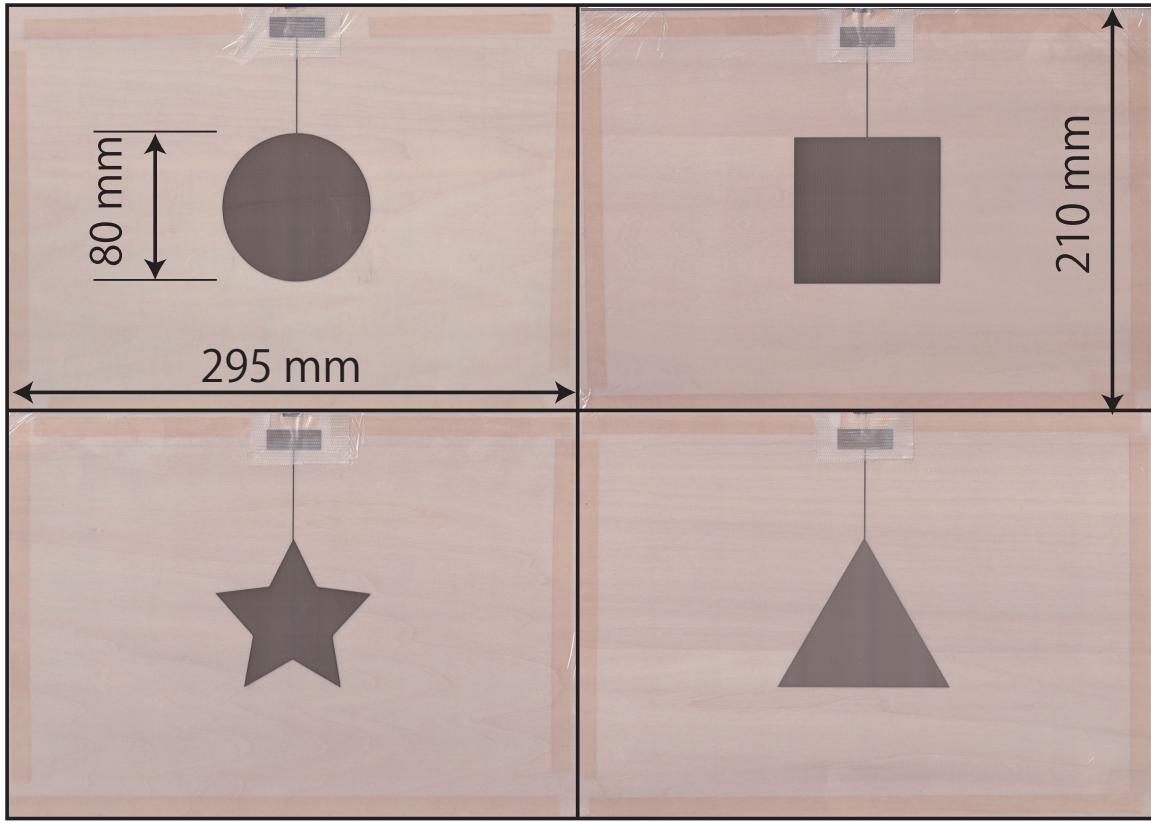


図 4.4: 評価実験に使用した 4 つの触図

因が触察した指の本数によるものか、図形の複雑さによるものかが混合してしまう可能性があるためである。そこで、直線で構成される四角形、曲線で構成される円、斜線を含む三角形、これら 3 つの図形より少し複雑な星形を用意した。これらの図形で調査することで、一本指や複数指によって把握しやすい図形の特徴といった考察が可能となる。

評価実験で使用した触覚ディスプレイを図 4.4 に示す。これらは提示する図形ごとで印刷された。印刷された各図形の高さは 80 mm であり、ディスプレイのほぼ中央に位置する。

入力波形

触覚提示のために高電圧発生装置から電極に印加する入力波形を 100 Hz の矩形波に設定した。この波形は前の章にてユーザにとって触覚を感じやすく、かつ触感も絶縁膜の滑らかさとは逆の粗いテクスチャ感を提示できるため使用された。今回使用する装置は前の章と異なる触覚ディスプレイではあるが、指が触れる絶縁膜は前の章と同様な素材を使用しているため、この矩形波を入力波形として用いた。波形の振幅値は高電圧発生装置が出力できる最大電圧である 600 V に設定された。

指で提示領域上をなぞる場合、指の速さによって領域上の空間周波数が変化し、感じる粗

さが実験協力者ごとで異なることが考えられる。この実験協力者ごとで異なる触感の知覚に伴い、図形の境界線の把握具合も実験協力者ごとで異なる可能性がある。そのため、実験本番前に練習時間を設け、実験協力者が触覚を感じる部分と感じない部分を十分に把握できることを確認した後で実験を実施した。

実験手順

実験手順に関して、初めに実験概要を実験協力者に説明し、実験に関する同意を取得した。この説明時から触覚ディスプレイは実験協力者に見せないようにし、できるだけ触覚ディスプレイや提示する図形の大きさなどの情報を与えないようにした。実験の説明後、実験中の視覚情報を抑えるために実験協力者にアイマスクを着用させた。実験中の様子を図4.5に示す。そして、実験実施者は口頭で指の触り方と提示する4つの図形の名称（「円形」、「四角形」、「三角形」、「星形」）のみを教示した。実験開始前に、練習として両グループともに右手の人指し指を用いて、円形が印刷された触覚ディスプレイに触れてもらった。この際に、実験協力者に触覚を感じる場所と感じない場所があるかを聞き、実験協力者があると答えたのを確認して実験に移った。なお、この練習時には、どの図形が提示されたかは教えなかった。この時点での実験協力者の既知情報は、提示される図形の名称、指でなぞることで触感を得ること、そして触感がある部分が図形の内部であることの3つである。

実験中、実験協力者は触察によってディスプレイ上に提示されている図形を識別する。識別をする際には制限時間は設けず、図形が分かり次第回答してもらった。回答後、実験協力者はそれが正解かどうかは教わらず、すぐに次の試行へと移った。提示する4種類の図形は5回ずつ順番がランダムに提示され、合計20試行の評価を行った。また、5試行ずつ3分ほどの休憩をはさんだ。この際にはアイマスクの着脱を許したが、休憩中は触覚ディスプレイが見えないようにした。すべての試行の終了後、実験実施者はすべての回答を収集し、各図形の識別率、そして触察時の探索時間を計算した。また実験中では、実験協力者がどのように触察を行うかを観察するために、実験協力者に手元の動画撮影の許可をもらい撮影した。この実験は筑波大学の倫理審査委員会の承認（承認番号2018R271）のもとで実施した実験である。なお、実験を実施した部屋の平均温度は摂氏24.2度（SD=0.376）で、平均湿度は63.2%（SD=3.24）であった。

4.3.2 実験結果

図4.6は図形ごとの識別正答率を示す。この図の横軸は各図形の名称を、縦軸は平均識別正答率を、そしてエラーバーは標準誤差を示す。また、青いバーは複数指による触察での識別正答率を示し、オレンジのバーは一本指による触察での識別正答率を示す。この結果から、複数指による触察のほうが識別正答率が高くなる傾向が見られた。図形全体での平均識別正答率は、複数指による触察では79%，一本指による触察では63%であり、これらの触察手法間で16ポイントの差があった。また図形ごとの一人当たりの平均識別正答率は、図4.6に示すように一本指では円形が56%，四角形が60%，三角形が76%，星形が60%であり、複数指



図4.5: 実験協力者が図形を触察している様子

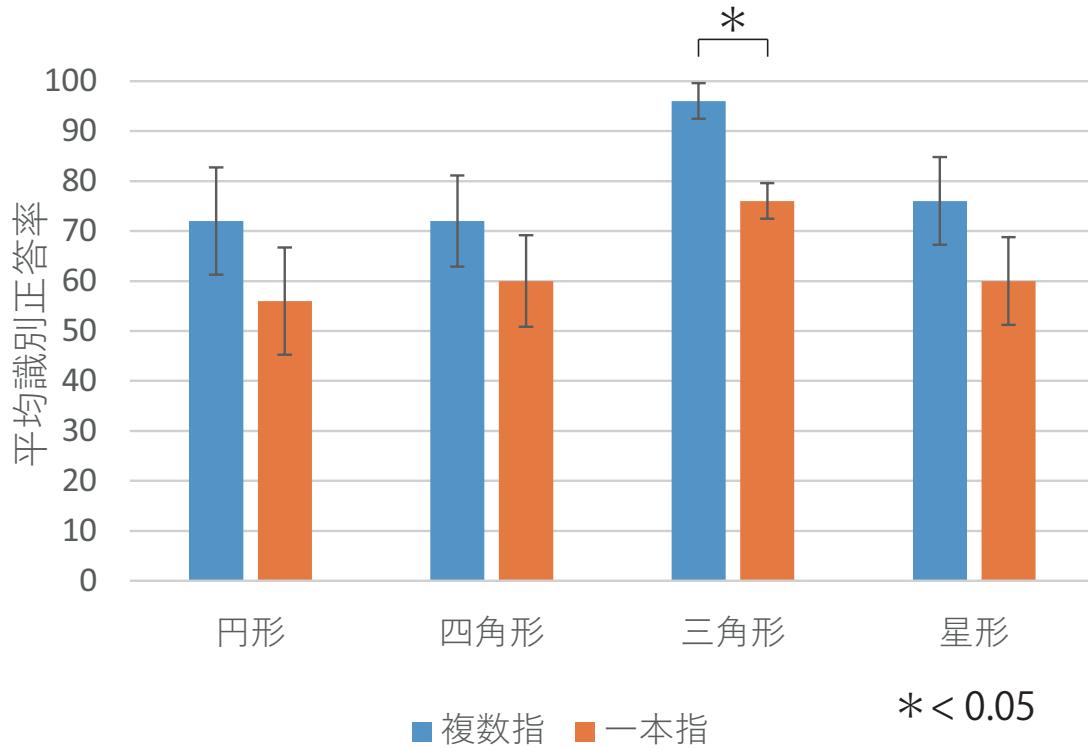


図 4.6: 各図形における触察方法ごとの一人あたりの平均識別正答率の結果

では円形が72%, 同様に四角形が72%, 三角形が96%, 星形が76%であった。これらの結果を分析する前に、平均によって分散が変わる比率の性質を解消するために、これらの比率に対してロジット変換 [SVD⁺16] を行ってから、繰り返しのある二元配置の分散分析を実施した。この分析の結果、触察方法と図形の種類間の交互作用は有意でなかった ($F(3,32)=0.12$, $p=0.94$)。また主効果に関しては触察方法のみ有意であった ($F(1,32)=5.7$, $p=0.023$)。これにより、複数指による触察の平均識別正答率が有意に高いことが分かった。また各図形間の有意差を確認できなかったが、図 4.6 から、両グループともに三角形の識別正答率が高く、星形や円形、そして四角形ではやや低い傾向であった。

また提示されたすべての図形に対して実験協力者が答えた図形の数を図 4.7 に示す。この図から、提示された図形を実験協力者がどのように認識したかの傾向が分かる。一本指による触察ではほぼ全ての図形で誤認するケースが見られ、0.0%となるケースは1つのみであった。特に円形を提示して実験協力者が四角形や三角形を答えたケースや、星形を提示して実験協力者が円形と答えるケースが見られた。それに対して複数指による触察では図形を間違えるケースが減った。特に円形や四角形を提示した際に三角形や星形と間違えるケースが一本指の場合に比べて減少する傾向が見られた。しかし、複数指による触察でも円形と四角形同士で誤認するケースは一本指による触察の場合と同程度であった。

| 一本指 | | 回答した図形の数 (最大値 : 25) | | | |
|------------|-----|---------------------|-----|-----|----|
| | | 円形 | 四角形 | 三角形 | 星形 |
| 提示した 図形 | 円形 | 14 | 6 | 5 | 0 |
| | 四角形 | 4 | 15 | 3 | 3 |
| | 三角形 | 2 | 2 | 19 | 2 |
| | 星形 | 5 | 2 | 3 | 15 |

| 複数指 | | 回答した図形の数 (最大値 : 25) | | | |
|------------|-----|---------------------|-----|-----|----|
| | | 円形 | 四角形 | 三角形 | 星形 |
| 提示した 図形 | 円形 | 18 | 4 | 1 | 2 |
| | 四角形 | 7 | 18 | 0 | 0 |
| | 三角形 | 1 | 0 | 24 | 0 |
| | 星形 | 2 | 0 | 4 | 19 |

図 4.7: 提示された図形に対する回答した図形の数：一本指による触察(上), 複数指による触察(下)

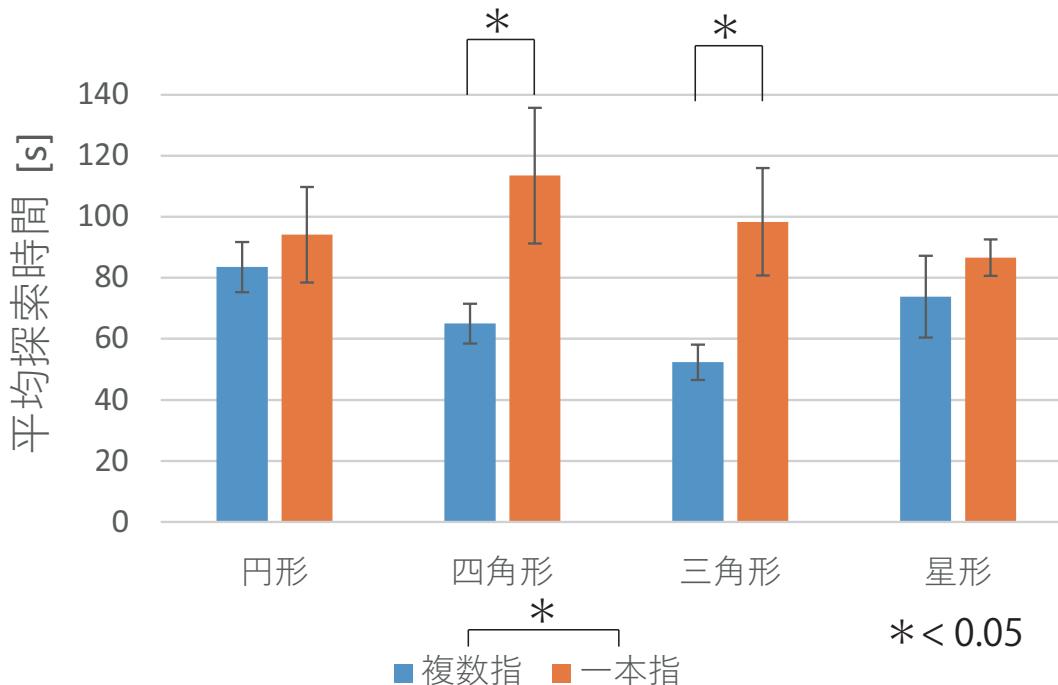


図 4.8: 各図形における平均探索時間の結果

また、一本指による触察と複数指による触察における図形を認識するまでの平均探索時間を図 4.8 に示す。この図は実験協力者が指を触覚ディスプレイに触れてから何かしらの図形を回答するまでの時間であり、この探索時間を図形ごとで収集し、すべての実験協力者での結果を平均した。横軸は各図形を表し、縦軸は平均探索時間を示す。青いバーは複数指による触察時の結果で、オレンジのバーは一本指による触察時のグラフである。この図の結果から、複数指による触察のほうが探索時間が短くなる傾向が見られた。図形全体として、複数指による触察では 1 つの触図に対する平均探索時間が一本指では 98 秒、複数指では 69 秒であった。これらの結果を繰り返しのある二元配置の分散分析を実施したところ、まず触察方法と図形の種類間の交互作用は有意でなかった ($F(3,32)=0.96$, $p=0.42$)。次に主効果に関しては触察方法のみ有意であった ($F(1,32)=7.9$, $p=0.0084$)。これにより、両触察方法を比較すると、複数指による触察の探索時間が有意に短いことが示された。また図形ごとの探索時間に関して、四角形や三角形を提示した際には触察方法間の探索時間に有意差があり（有意水準 5%），複数指での触察のほうがそれぞれ 43%, 40% 短くなった。円形や星形に関しては、平均値ではわずかに複数指のほうが探索時間が短いが、有意差は確認できなかった。

これらの結果から、複数指による触察のほうが、図形の識別度が高く、さらに探索時間が短くなる傾向が見られた。

表 4.2: 各図形及び試行回数に対する識別正答数と、試行回数に対する識別正答数の相関係数

| | 円形 | | 四角形 | | 三角形 | | 星形 | |
|----------------|------|------|-------|-------|------|------|------|------|
| | 一本指 | 複数指 | 一本指 | 複数指 | 一本指 | 複数指 | 一本指 | 複数指 |
| 1試行目の正答数(最大5回) | 1 | 3 | 3 | 5 | 4 | 5 | 3 | 1 |
| 2試行目の正答数(最大5回) | 4 | 4 | 3 | 3 | 3 | 5 | 3 | 5 |
| 3試行目の正答数(最大5回) | 2 | 3 | 3 | 2 | 5 | 4 | 2 | 4 |
| 4試行目の正答数(最大5回) | 3 | 4 | 4 | 4 | 3 | 5 | 3 | 4 |
| 5試行日の正答数(最大5回) | 4 | 4 | 2 | 4 | 4 | 5 | 4 | 5 |
| 試行数と正答数の相関係数 | 0.61 | 0.58 | -0.22 | -0.14 | 0.00 | 0.00 | 0.45 | 0.67 |

4.3.3 学習効果による実験結果への影響の考察

今回得られた実験結果に関して、試行回数に対して正答率が増えているか、つまり実験中の触図に対する学習効果について検証した。

表 4.2 は、横軸として図形の種類、縦軸として試行回数を示す。各マスには条件毎の識別正答数(識別できた実験協力者の数)を示しており、最大数が 5 回である。また、この表の最後の行は試行回数に対する識別正答数の相関係数を示す。この表の結果から、円形と星形を提示した場合、一本指と複数指のどちらの触察でも正の相関がみられた。これらの結果から、円形と星形に関しては、僅かに学習効果があった可能性がある。逆に、四角形や三角形の場合では、一本指と複数指のどちらの触察でもほとんど相関が無かった。

三角形はすべての試行回数で正答率が高いために相関が無かった。これは三角形が頂点の鋭角といった特徴のある図形であるため、正答率が高かったと考えられる。四角形も比較的単純な図形ではあるが正の相関は見られなかった。これは今回の実験において円形と間違える場合が多くあることから、実験協力者が頂点の直角を捉えることが難しかったと考えられる。しかし、円形の学習効果の可能性があるため、今回のような一つの図形に対して全 5 試行ではなく、多くの試行を繰り返していくことで円形と四角形の識別が可能となっていくことが考えられる。

4.3.4 実験結果と先行研究の結果との比較

今回の実験結果での複数指による触察の有効性について、他の触覚提示手法における結果と比較する。この比較から静電気力触覚ディスプレイにおける結果は他の触覚ディスプレイとは複数指に関する結果と異なることが分かった。静電気力触覚ディスプレイでは、複数指を用いたほうが一本指のみの場合に比べ、識別正答率の向上の傾向と一部の図形での探索時間の減少が確認された。他の触覚ディスプレイにおいて、一本指と複数指で触図認識を比較した研究と本研究での結果を表 4.3 に示す。振動付き点図ディスプレイを用いた調査では、一本指による触察よりも複数指による触察の方が図形の識別度が下がる結果となった、Uematsu

らのピンアレイ装置での調査では、小さなサイズ(24 mm)と大きなサイズ(52 mm)の触図を用いており、これらの結果、識別正答率に関しては両触察手法で100%に近い結果となり、有意差は確認できなかった。探索時間に関して、どの条件でもほとんどの実験協力者が十秒程度で触図の図形を識別でき、また大きいサイズの場合では複数指のほうが探索時間が短くなる傾向が確認された。静電気力触覚ディスプレイにおける評価実験の結果と比較して、これまでの触覚ディスプレイは識別正答率に関しては複数指による触察のほうが低くなるか、ほぼ変わらない結果となったが、静電気力触覚ディスプレイでは複数指による触察のほうが識別正答率が高い結果となった。また探索時間に関して、触覚ディスプレイや提示する図形の大きさによって傾向が異なるが、今回の調査では複数指による触察のほうが探索時間が早い結果となった。

表 4.3: 先行研究と本研究における複数指と一本指での結果の差異

| 触覚ディスプレイ | 識別正答率 | 探索時間 |
|--------------------|-----------|-----------|
| 振動付点図 [Cra85] | 複数指 < 一本指 | 複数指 > 一本指 |
| ピンアレイ (小) [USKK16] | 複数指 ≈ 一本指 | 複数指 ≈ 一本指 |
| ピンアレイ (大) [USKK16] | 複数指 ≈ 一本指 | 複数指 < 一本指 |
| 静電気力 | 複数指 > 一本指 | 複数指 < 一本指 |

静電気力触覚ディスプレイが他のディスプレイと異なる結果となった要因として、図形の大きさといった触図自体の影響と、触察時の手の全体にかかる剪断力の違いが考えられる。触図自体の大きさによる影響により、複数指と一本指の間で、探索時間に差が表れたと考えた。今回の静電気力触覚ディスプレイでは Craig や Uematsu らが調査した触覚ディスプレイで使用された触図よりも大きな図形(80 mm)を使用した。これにより図形全体を把握するために必要な指の移動量は一本指に比べ複数指のほうが少なくなるので探索時間が早くなつたと考えられる。逆にサイズが小さい場合は移動量が一本指でも複数指でも変わらないため、複数指のほうが多くの情報を読み取ろうとする工程も考えられるため、サイズによっては一本指の方が探索時間が早くなる可能性もある。今後の調査において、より多くの図形のサイズや解像度、また位置や回転角度に関して評価実験を行うことで、触図の影響で複数指の有効性がどれほど変わるのであるのかを調査する必要がある。もう一つの要因として、触察時の手の全体にかかる剪断力の違いが考えられる。静電気力触覚ディスプレイは、指がディスプレイに接触する面積が大きいほど剪断力が大きくなる。一本指と複数指ではどちらも指ごとにかかる力はほとんど変わらないが、手全体にかかる剪断力は複数指のほうが大きい。後述する触察時の指の使い方に関する考察では、触察戦略として指を図形に対して水平、垂直、または斜め方向へスキャンするような触察が多く見られた。この戦略において一本指でスキャンした場合と、複数指でスキャンした場合では複数指のほうが接触面積が広く剪断力も大きくなる。これによって、提示される触覚の感じやすさが増し、図形の輪郭線をより明確にできたことから、複数指のほうが識別正答率が高くなつたと考えられる。

これらの考察により、一本指による触察と複数指による触察において、図形のサイズといった触図自体の影響により探索時間が早くなり、接触面積の影響により識別正答率が高くなつ

表 4.4: 実験協力者ごとの使用した触察戦略の回数

| 複数指による触察 | スキャンのみ | 境界線のみ | 両手法 |
|----------|--------|-------|-----|
| 実験協力者 1 | 19 | 0 | 1 |
| 実験協力者 2 | 0 | 17 | 3 |
| 実験協力者 3 | 6 | 7 | 7 |
| 実験協力者 4 | 7 | 1 | 12 |
| 実験協力者 5 | 20 | 0 | 0 |
| 合計 | 52 | 25 | 23 |

| 一本指による触察 | スキャンのみ | 境界線のみ | 両手法 |
|----------|--------|-------|-----|
| 実験協力者 6 | 10 | 2 | 8 |
| 実験協力者 7 | 20 | 0 | 0 |
| 実験協力者 8 | 20 | 0 | 0 |
| 実験協力者 9 | 5 | 9 | 6 |
| 実験協力者 10 | 20 | 0 | 0 |
| 合計 | 75 | 11 | 14 |

たと考えられる。特に、この識別正答率に関しては他の触覚ディスプレイと異なる傾向となり、これは静電気力触覚ディスプレイの特有な結果の可能性があると考えられる。

4.3.5 図形認識時の触察戦略に関する考察

複数指による触察時の指の使い方によっても図形の識別度や探索時間が向上したと考えた。そこで実験協力者が触察する際にどのような触り方で図形を認識しようとしたのかを調査した。この結果、多くの実験協力者が触図を認識する際に、主に図 4.9 のような 2 種類の触察戦略で図形の概形を捉える様子が見られた。この戦略とは、図形に対してスキャンする触り方と図形の境界線をなぞる触り方であった。これら以外の戦略で触察する実験協力者はほとんどいなかった。

表 4.4 に実験協力者ごとの使用した触察戦略の回数を示す。実験協力者 1 人あたり 20 試行あり、各試行で上記の触察戦略を使用した場合をカウントした。カウント方法として、スキャンする触察は指が図形の端から端までを直線上に移動し、この動作が反復された場合においてカウントした。境界線をなぞる触察は、指が図形の境界線付近を往復する動作が見られた場合においてカウントした。

表 4.4 から複数指による触察では実験協力者ごとに用いた触察戦略の傾向が異なった。また一本指による触察ではほとんどの実験協力者が図形上でスキャンする戦略が見られ、境界

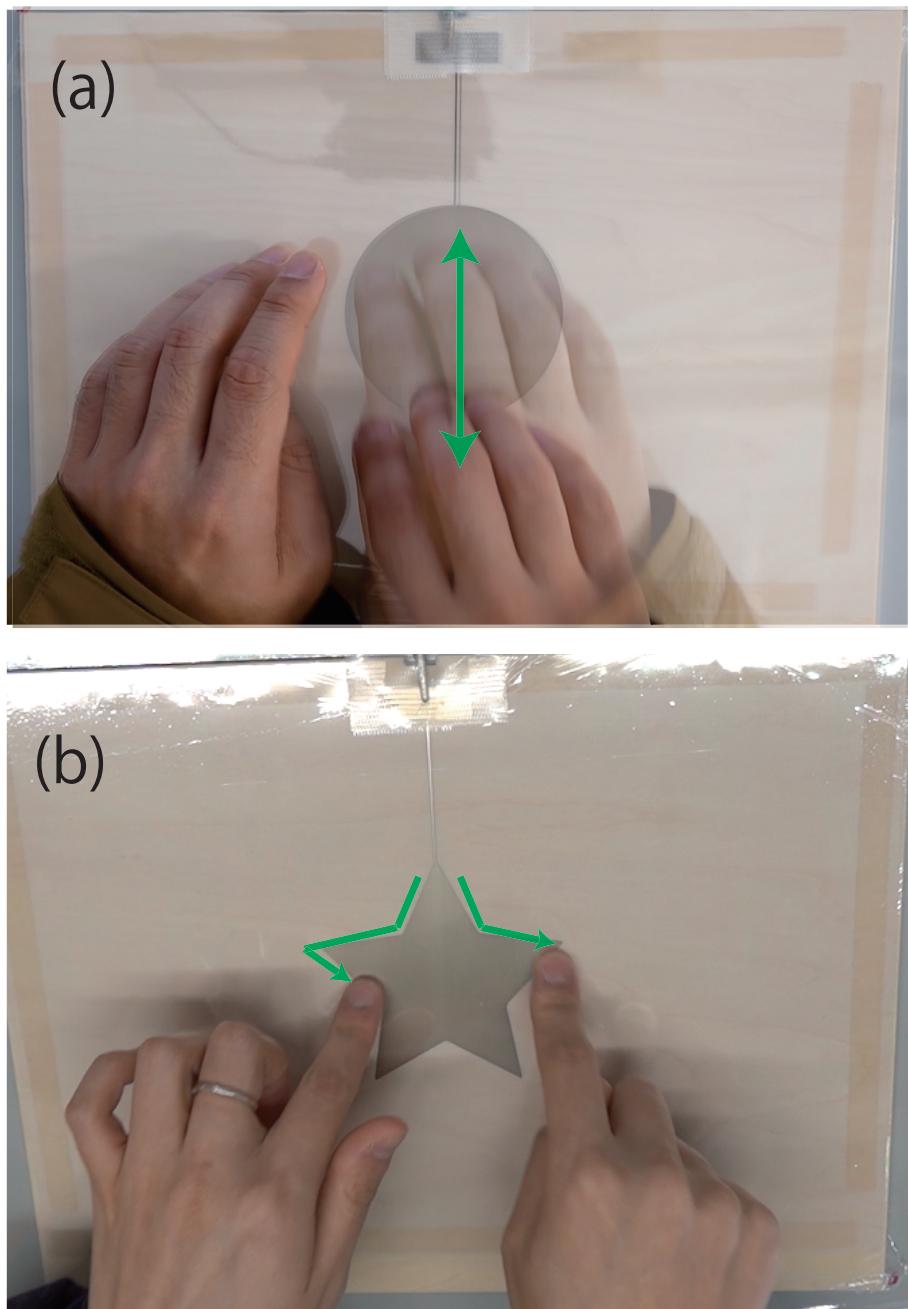


図4.9: 触察時の指の様子. (a) 垂直方向に指をスキャンする様子と (b) 図形の境界線上をなぞる様子

線をなぞる戦略を用いた実験協力者は一部いたが、複数指による触察の場合より人数が少なかった。

触察戦略が主に「スキャンする戦略」と「境界線をなぞる戦略」になったことと、「スキャンする戦略」を利用した実験協力者が多かったことに関して、静電気力触覚ディスプレイでの触察の制約や実験協力者が健常者であることが要因だと考えられる。また、静止した指に触覚を提示できないことを除き、静電気力触覚ディスプレイでも他の触覚ディスプレイと同様な触察戦略が利用されたと考えられる。Lederman の調査によって、二次元的凸図は主に「輪郭探索」、「表面をこする」、そして「静的接触」で触察されることが確認された [LK87]。このことから、今回の実験結果では、静電気力触覚ディスプレイにおいて図形を認識するために「輪郭探索」の戦略が使われ、その図形の輪郭を捉えるためにディスプレイ表面のテクスチャ感を得る「表面をこする」戦略が使われたと考えられる。また、今回の実験で「スキャンする戦略」が多かった原因として、今回の実験協力者がすべて健常者であったことが考えられる。これは Kwok らの調査において健常者は図形全体を捉える傾向があることから [Kwok04]、今回の実験でも図形の全体像を短時間で取得できる「スキャンする戦略」が多かったと言える。

ここで、それぞれの触察戦略において図形の識別正答率や探索時間について算出した。図 4.10 は触察戦略ごとの図形の平均識別正答率を示し、図 4.11 に触察戦略ごとの平均探索時間を示す。それぞれの図の青いグラフは複数指による触察時の結果で、オレンジのグラフは一本指による触察時の結果である。これらの図から、スキャンのみの触察戦略を利用した場合において、平均識別正答率や平均探索時間では複数指による触察のほうが効果が見られる傾向があった。特に図 4.11において、この触察戦略での平均探索時間に有意差が確認された(有意水準 5%)。しかし境界線のみの触察戦略では、複数指による触察での効果があまり見られなかった。

図 4.9 (a) のように図形上を指でスキャンすることによって複数指による触察のほうが図形の識別率が高くなり、探索時間も短くなったと考えられる。複数指であれば、一度のストロークにおいては触れている複数の指はすべて同じ速度で動いているため、指の本数分の情報を一度に取得し、図形の境界線の位置をより正確に把握することができたと考えられる。実験中において、実験協力者が図形の位置や大きさ、概形を捉える様子が見られた。一本指による触察の場合、図形情報を捉るために指を図形の端から端までを多く往復する様子が見られた。逆に複数指による触察では、複数指で同時になぞることで少ないストロークで図形の位置や大きさを捉える様子が見られた。そのため、図 4.11 のように平均探索時間が一本指の場合と比べて短縮したと考えられる。また複数指によるスキャンでは識別率の向上も見られた。これは図形をスキャンする際に、一度のストロークで図形の境界線に関する情報を多く取得できたからだと考えられる。一本指ではスキャンするたびに指を同程度の速度でなぞらないと、正確な図形の位置や大きさを把握しづらかったと推測できる。

図 4.9 (b) のように複数指で境界線をなぞる触察戦略では、指同士の相対位置や角度、距離といった情報を取得できる可能性がある。一本指ではこの相対関係の情報を取得しづらいため、この方法を利用した実験協力者が少なく、逆に複数指では上記のような効果が見込まれることから境界線をなぞる実験協力者が増えたと考えられる。

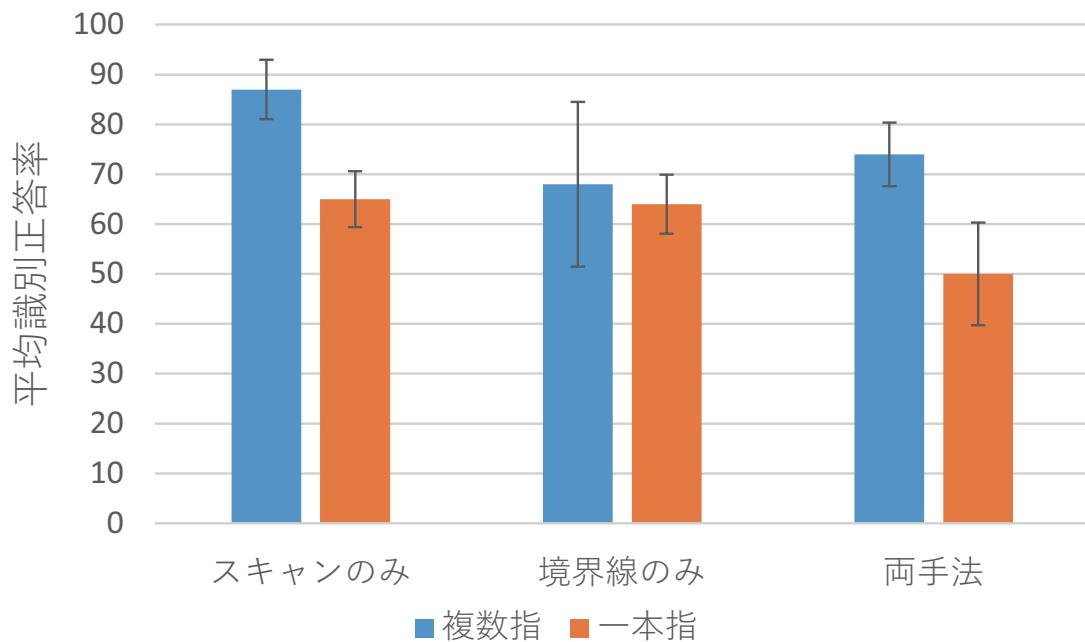


図 4.10: 触察戦略ごとの平均識別正答率の結果

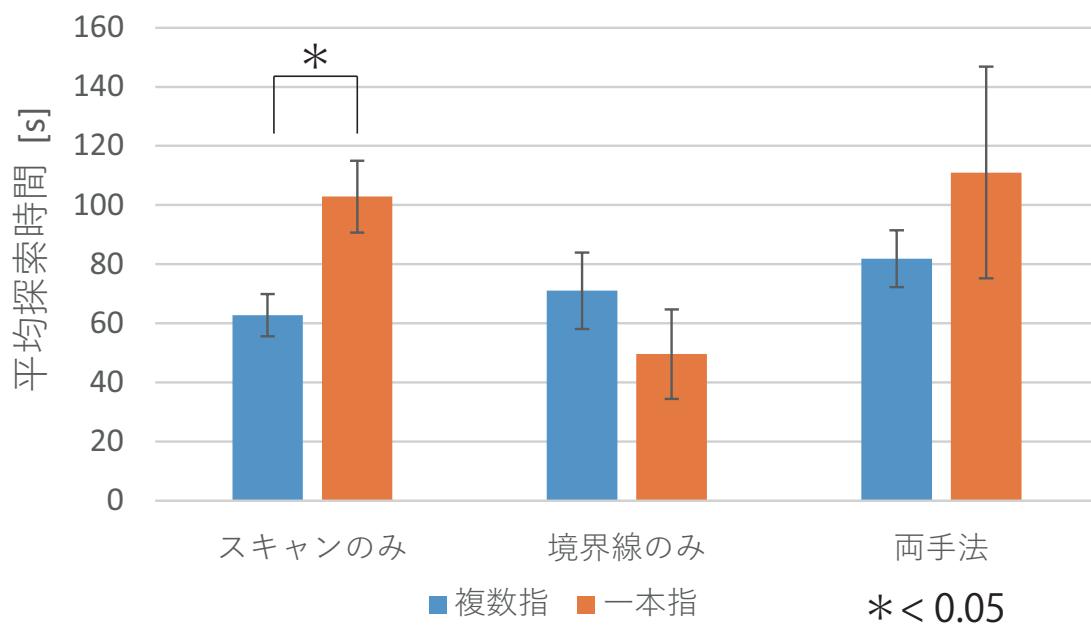


図 4.11: 触察戦略ごとの平均識別正答率の結果

図4.11に示されているように、複数指による境界線のみの触察戦略が一本指による触察よりも探索時間が遅いという結果となった。この要因として2つが考えられる。1つは、一本指と複数指での試行数の違いが考えられる。一本指での触察では全部で11試行であったことに対して、複数指では25試行と倍以上であった。特に一本指で境界線上を触察する実験協力者は1人しかいなかった。実験協力者の個人差の影響によってこの探索時間が早くなってしまったと考えられる。これは今後より多くの実験協力者を募って同じ条件となる実験を実施し、検証する必要がある。もう1つの要因として、触察時の指の本数と指の触り方が考えられる。複数指で境界線をなぞる戦略を用いた実験協力者は、両手の人差し指を使って図形の境界線をなぞっていた。そのため、一本指で境界線をなぞる場合より単位時間に探索できる面積が広いわけではなく、さらに慎重に図形を探索することで探索時間が遅くなったと考えられる。

ここで複数指による触察において、図形ごとの触察戦略に対する平均識別正答率の結果を図4.12に示す。このグラフの横軸は図形の名称を示し、触察戦略ごとで色が分かれている。青のバーはスキャンによる戦略を用いた場合、オレンジのバーは境界線のみによる戦略を用いた場合、そして灰色のバーは両手法を用いた場合を示す。縦軸は平均識別正答率を示す。エラーバーは標準誤差を示す。この図から三角形や星形に関して境界線をなぞる戦略を用いた場合では平均識別正答率がスキャンによる戦略と同程度となった。そしてこの触察戦略において三角形では識別率が100%であった。この結果から、三角形のような図形に関して、頂点の鋭角や数といった図形の特徴を取得しやすかったため、この図形の平均識別正答率がスキャンによる戦略と同程度となったと考えられる。逆に四角形の場合、直角を認識することが難しかったと考えられ、これにより頂点情報を取得できず円形と間違えるケースが多くなったと考えられる。このような図形の場合、頂点を強調するようなレンダリング手法を用いることでさらなる識別度の向上が見込まれる。

4.4 自由描画による図形認識に関する評価実験

前節では、提示された図形に対して、限られた選択肢の中から図形を回答してもらった。この結果、複数指による触察の有効性が示され、図形も頂点に特徴のある図形であればユーザに提示しやすいことが示された。本節では、複雑な図形を提示し、ユーザがどれほど図形を認識できるのかを調査した。この実験は、提示された図形に対して実験協力者が認識した図を実際の紙に描画してもらうことで、実験協力者が図形の位置や大きさ、それらの概形といった図形情報をどのように取得するかを調査するためである。これらの調査結果から、触図を作成するためのモデル指標を検討することができると考えられる。

4.4.1 評価実験で使用した図

複数指による触察によってどれほど図形を把握できるかを調査するために、前節で提示した図形より複雑な図形を用意して、評価実験を実施した。今回の実験で使用した図形は図4.13と図4.14の左上のような矢印型とイタリアの地図を印刷したもの用意した。矢印は普段の

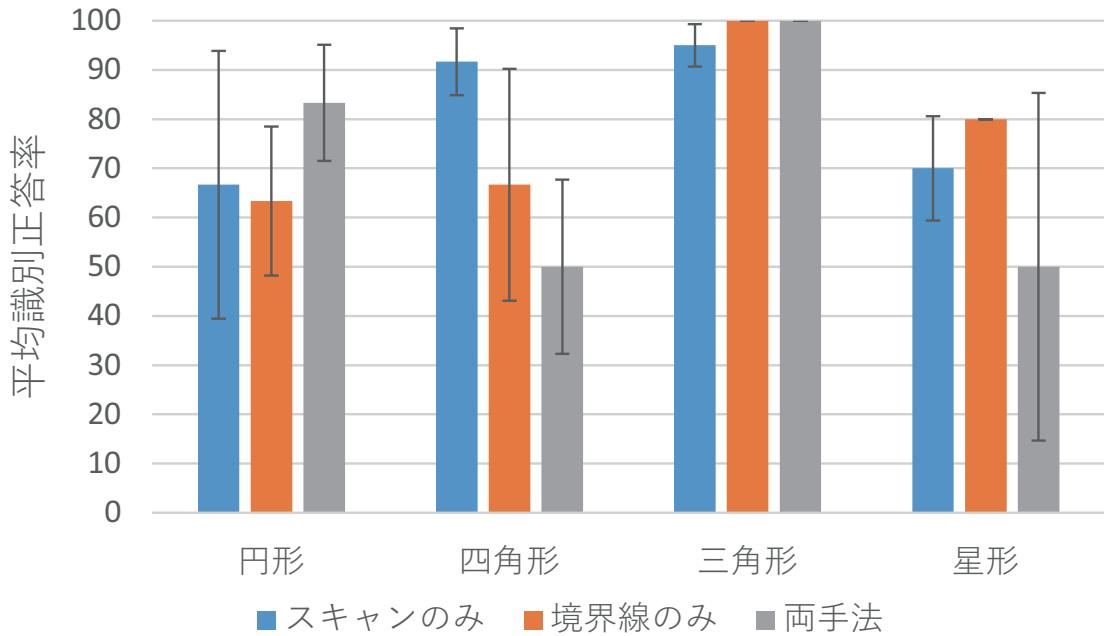


図 4.12: 複数指における図形ごとの触察戦略に対する識別率の結果

生活でも見られる図形であり、逆に地図は普段見慣れない図形であり複雑な図形である。矢印の図形は高さが 80 mm、幅が 110 mm になるようにし、ディスプレイのほぼ中央の位置に印刷した。地図は高さが 170 mm、幅が 200 mm になるように印刷した。

4.4.2 実験協力者と実験タスク

今回の実験では前節と同じ実験条件にして実施した。実験協力者は 22 歳から 25 歳の大学生、及び大学院生の 5 名（うち女性が 1 名）に実施してもらった。

今回の実験では触図のタスクと描画のタスクを実験協力者に行ってもらった。触図のタスクでは、実験協力者は目隠しを付け、触覚ディスプレイ上で提示された図形を把握してもらう。この際の使用する指に関しては、実験協力者に対してどの指を使用してもよく、動かし方や速さに関する制限は設けなかった。描画タスクでは実験協力者は目隠しを外し、触覚を感じた位置や大きさといった領域を描いてもらう。実験中、これらのタスクは何度も繰り返すことができる。なお、触図タスクのみ制限時間を持った。

4.4.3 実験手順

実験の初めに実験協力者に実験に関する説明をし、全員から同意を得た。そして実験協力者に目隠しをしてもらった。この時点では実験協力者に対して触覚ディスプレイや図の情報

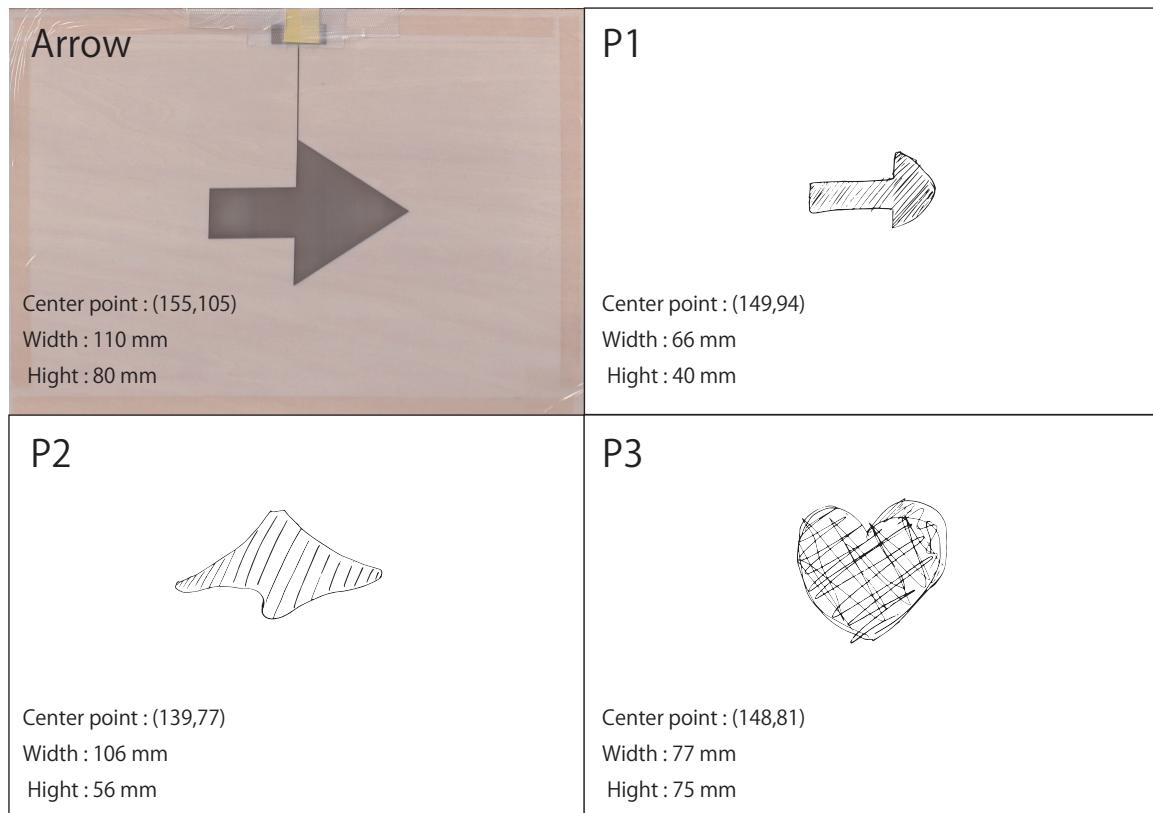


図 4.13: 提示した矢印の図形(左上)と実験協力者が認識した図

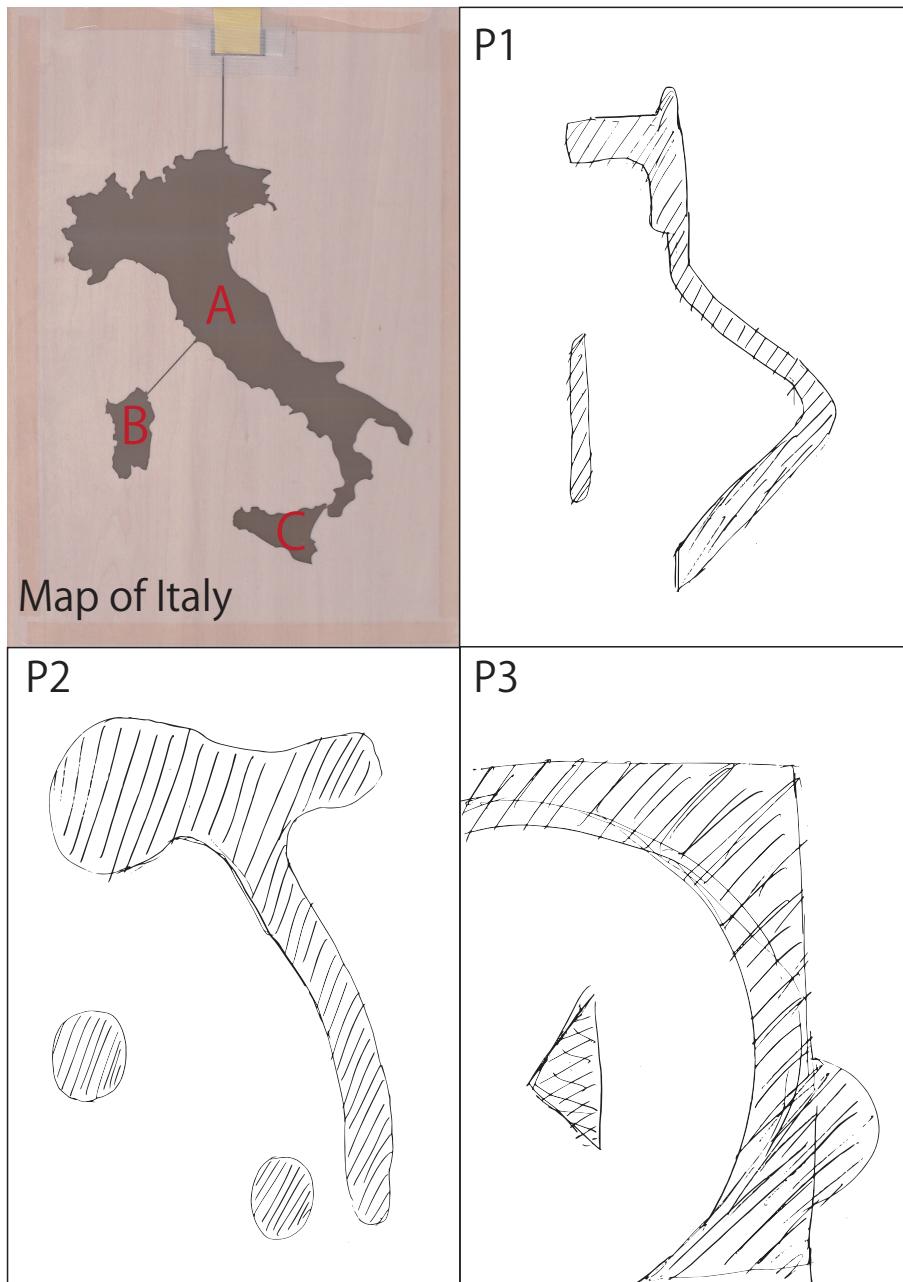


図 4.14: 提示した地図の図形(左上)と実験協力者が認識した図

などを一切与えないようにした。実験の本番前に、実験実施者は実験協力者の指を触覚が提示された部分と提示されていない部分に触れ、触覚を知覚できるかどうかを確認した。この際に矢印の電極を用いたが、触っている図形に関して実験協力者には図形に関する情報は教えなかった。その後、矢印の電極を提示し、触図タスクと描画タスクを実施してもらった。矢印を提示する際の触図タスクの時間を10分に設定した。実験協力者が図を描き終えたら答えの図を教えることなく、5分程度の休憩を挟んで次の図形に移った。地図の触図でも矢印の場合と同様に両タスクを行ってもらった。この図での触図タスクを20分に設定した。そして図を描き次第、実験を終了した。

4.4.4 実験結果

図4.13に矢印を提示した場合の結果を示す。図形の概形に関してはP1(実験協力者1)とP2が近い図形となった。P1は実験後にこの図形を矢印とコメントしており、正解の図形として認識できていた。またその実験協力者も図形を解答用紙の中央付近に描画している。中心点の平均誤差はx軸が9.7mm、y軸が21mmであった。描画した図形のサイズは提示した図形より小さい傾向があり、横幅は27mm、縦幅は23mmの平均誤差であった。

図4.14は地図を提示した場合の結果を示す。この地図は特徴として三つの独立した領域が存在し、一つが非常に大きな領域である「A」、他に非常に小さな領域である「B」と「C」がある。今回の結果では、Bに関しては全員が独立した図だと判別できた。P1とP3は領域Aと領域Cが繋がっていると認識したが、P2は3つの島があると認識した。領域Cは領域Aと非常に近く、それらの間の僅かな空間を認識できなかったからだと考えられる。すべての実験協力者は領域Aを大きい領域と捉え、かつ左上方向に伸びる形と捉えていた。

これらの触図をどのように捉えているかを観察したところ、すべての実験協力者は初めに図形の全体の大きさを初めに把握、その後境界線付近をなぞり細かい図形の特徴を捉える様子が見られた。図形識別での実験と同様にスキャンする手法と境界線をなぞる動作を使用することでこれらの図形を捉えていた。指と指の相対位置や角度を取得することで図形認識を試みる実験協力者は多かった。

4.4.5 考察

今回の実験において、矢印を提示した際にどの実験協力者も中央の位置に図形を描画したが、大きさに関してはやや小さくなる傾向が見られた。平均誤差と実際のサイズの比率では、横幅を25%、縦幅を29%短く捉えていた。Kwokらは、四角形に加工した厚みのあるスチレンボードを用いた触察の調査を実施した結果から、横方向より縦方向の図形の弁別が難しいことが分かっている[Kwo01b, Kwok04]。このことから、今回の実験においても同様に縦幅の精度が低かったと考えられる。また、実際のサイズより小さく認識していたことについて、今回の実験での触察の様子から、ほとんどの触察時において図形を捉えるのに図の外側から内側に手を動かす様子が観察された。これによって触覚を感じ始める境界線を認識した際に図形の内側で指が止まり、そこを図形の境界線と捉えて内側に縮小したと考えられる。

地図に関する触察では、領域ごとの位置関係を捉えることができた。最も大きな領域Aの上から下に延びる特徴や左下の領域Bの島になっている特徴が捉えられた。触察時の様子から大まかに3つの工程が観察された。初めに実験協力者は両手で触覚ディスプレイ自体を確認する様子が見られた。そして次にディスプレイ内部の全体を両手でスキャンする様子が見られ、それと同時に図形の境界線をトレースする様子も見られた。

地図に関する触図のみ縦長の触図を用意した。実験協力者はこれまでの触図を経験しており、触察を始めた時点では縦長の図形であることに気づき、触覚ディスプレイ自体の四辺を触ることでディスプレイ全体の大きさを確認した。

両手の指でディスプレイ全体をスキャンすることで、図形全体の位置と大きさを把握する様子が見られた。この際に領域Aと領域Bの間の導線に気づく実験協力者はいなかった。このことから細い導線を引くことで浮島状になる複数箇所の図形の提示が可能だと考えられる。ほとんどの実験協力者が領域A（領域Cを含む）と領域Bの二つの島があると認識した後に、それぞれの領域で細かな触察を行っていた。この際に領域Aの触察では前節と同様にスキャンする触察戦略と境界線をなぞる触察戦略を行う実験協力者がいた。これらの触察戦略により、領域Aの上部が横に広がっていること、そして下方向に細く伸びているといった特徴を捉えたと考えられる。実験協力者P1とP3は領域Aと領域Cを同一の領域と捉えたため、領域Aの下部が左方向に延びる図を描いたと考えられる。

これらのことから、静電気力触覚ディスプレイにおいて、複数指の触察を行うことで、図形の位置や大きさを捉えることが可能と考えられる。しかし、今回の実験結果から細かく複雑な形状の提示は難しいと考えられる。また、図の中で一つの領域の図ではなく複数の領域を持つ図形も捉えることが可能であることが分かった。しかし、領域同士が近い場合はそれらが結合した図として捉えてしまう可能性があることも分かった。

4.5 複数電極を用いた静電気力触覚ディスプレイ

ここでは、将来的に図形の位置や回転、図形自体の変更、アニメーションの提示といった動的な図の情報の切り替えが可能なデバイスを提案する。本章において、銀ナノインクを用いた触覚ディスプレイにより、複数指での有効性が示され、複雑な図形でも概形を掴まることができた。しかし、この銀ナノインクによる静電気力触覚ディスプレイは、一つの図形情報、および同じ場所による触覚提示のみしか実現できない。今後、この触覚ディスプレイを用いたコンピュータとのインタラクションを考えた場合、図形の切り替えが困難なため、有用性があるとは言えない。そこで、電極を単電極から複数電極に変えることで、各電極、つまり図中の1ドットごとの触覚提示の切り替えが可能となり、さらに複数指への触覚提示も可能となる。



図 4.15: 複数電極を用いた触覚提示装置の表面(左)と裏面(右)

4.5.1 複数電極を用いた静電気力触覚ディスプレイによる触覚提示領域の制御

提案した複数電極を用いた触覚ディスプレイの実装を図 4.15 に示す。また、装置全体のシステム図と電極単体の構造模式図を図 4.16 に示す。図 4.15 のように、開発した触覚提示装置上には 12 行 16 列の計 192 個の電極が配置されている。この電極は 1 辺が 10 mm の大きさで、電極間には 1 mm の隙間がある。この 1 mm の隙間は電極間にある程度の距離を離す、またはこれらの間にグランド面を敷かないと高電圧を印加させた際に他の電極に干渉する可能性があるためである。電極の 1 辺に関して、より面積が小さいほうが解像度も高くなり、より正確な触図を提示できると考えられるが、配線技術の問題と多層にした場合の費用コストの面から今回の調査においては 1 辺が 10 mm の電極となった。

各電極面の裏には図 4.15 のようにソリッドステートトリレー (AQY214SX) が 1 つずつ設置されている。このソリッドステートトリレーには入力側と出力側があり、入力側の信号をオン状態にすることで出力側の 2 点を導通させることができる。この出力側の 1 点を装置表面の電極に、もう 1 点を高電圧発生装置の電圧出力部に接続した。これにより、ソリッドステートトリレーの入力側をオン状態にすることで電極面に高電圧を印加し絶縁膜越しで指をなぞることで触覚を知覚できる。逆にオフ状態にすることで電極は高電圧発生装置と絶縁されハイインピーダンス状態になり、電極面をなぞっても触覚を感じることはできない。これを各電極で行うことで、触覚ディスプレイ上の触覚提示領域を動的に変えることが可能となる。そのために 12 個のソリッドステートトリレーを 1 つのシフトレジスタ (NPIC6C4894DY) に接続し、さらに 16 個のシフトレジスタを 1 つのデマルチプレクサ (CD74HC4514M96) に接続

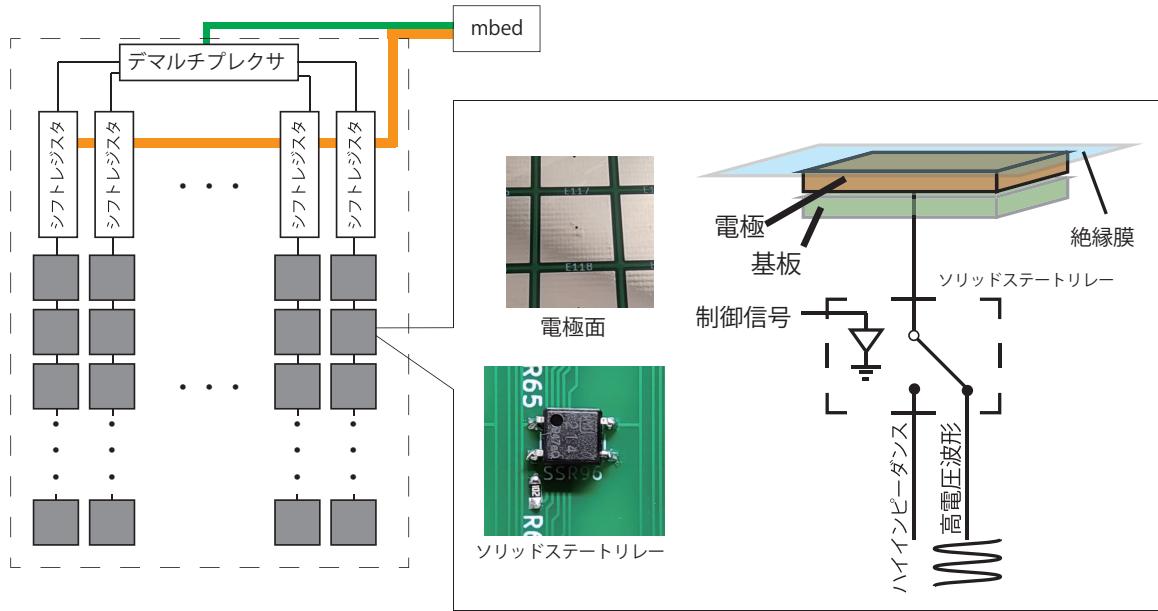


図 4.16: 触覚提示装置のシステム図(左)と電極とソリッドステートリレーの構成模式図(右)

した。そしてこのシフトレジスタとデマルチプレクサは高電圧発生装置に内蔵してある mbed マイコンに接続されており、このマイコンから送られる制御信号によって各電極の触覚提示の切り替えを行っている。さらに mbed マイコンは PC (Microsoft Surface Pro) と接続されており、この PC から提示したい図形を指定することで、マイコンがその図形に見合った制御信号を触覚ディスプレイに送信し、ディスプレイ上で指定した図形が提示される。

開発した触覚提示装置は装置全体の大きさが横 200 mm, 縦 200 mm, 厚さ 40 mm となり、提示領域の大きさは横 182 mm, 縦 135 mm である。また、触覚提示領域上部に指が装置の部品に触れないように突起部分を設けた。なお、この装置の動作確認は済んでおり、PC で触覚を提示する電極を指定し、高電圧発生装置から出力された波形がその指定された電極上にのみ観測するのを確認した。

4.5.2 複数電極を用いた静電気力触覚ディスプレイの予備的評価

実装した複数電極を用いた静電気力触覚ディスプレイが動作するかをこれまでの実験と同様の条件で確認した。今回開発した装置は低解像度かつ低い電圧での触覚提示であるが、図の切り替えを含めた動作確認の実験を実施した。実験の内容としてはこれまでの実験同様、基本的な図形を用意し、それらを提示した後に、実験協力者のどの図形であるかを回答してもらった。

実験協力者

実験協力者に関して、22歳から24歳の大学生、及び大学院生の5名(うち女性1名)を募った。この5名のうち4名は銀ナノインクを用いた触覚ディスプレイにおける評価実験にも参加した。

実験環境における使用した指に関して、最大10本の両手の指で自由に触察を行ってもらった。この際に、実験実施者は使う指の本数や触り方、指の速度について制限を設けなかった。

入力波形

入力波形に関して前節までと同様に電極に入力する波形は100 Hzの矩形波に設定した。しかし、最大振幅に関しては400 Vに設定した。これは今回使用したソリッドステートリレーの許容最大電圧が400 Vのためである。実験協力者には本実験の前で触覚を感じるかの確認を実施しており、全員が触覚を感じたと回答したのを確認した。

実験に使用する図形

提示する図形に関して、今回の実験では円形、四角形、三角形、十字形を用意した。提示した図形を図4.17に示す。これらの図形はディスプレイ全体のほぼ中央に位置するように設定した。今回の実験では図4.17中の色が付いているマス上にのみ触覚を提示するようにした。

実験手順

実験手順として、評価実験では初めに実験概要を実験協力者に説明し、実験に関する同意を得た。この説明時から触覚ディスプレイは実験協力者に見せないようにし、できるだけ装置に関する情報を与えないようにした。実験の説明後、実験中の視覚情報を抑えるために実験協力者にアイマスクを着用させた。そして、実験実施者は口頭で指の触り方や提示する図形の名称を教え、その後実際の触覚ディスプレイに触れてもらった。その際に、触覚ディスプレイ上で触覚を感じる場所と感じない場所があるかを聞き、実験協力者があると答えたのを確認して実験に移った。実験中、実験協力者は触察によってディスプレイ上に提示されている図形を識別する。識別をする際には制限時間を設げず、図形が分かり次第回答してもらった。回答後、実験協力者はそれが正解かどうかは教わらず、すぐに次の試行へと移った。提示する4種類の図形は5回ずつ順番がランダムに提示され、合計20試行において識別を行った。また、5試行ずつ3分ほどの休憩をはさんだ。この際にはアイマスクの着脱を許したが、休憩中は触覚ディスプレイが見えないようにした。すべての試行が終了した後、各図形の識別率、そして触察時の探索時間を計算した。実験中、実験協力者がどのように触察を行うかを観察するために、動画撮影と音声撮影を実験協力者に許可をもらい撮影した。

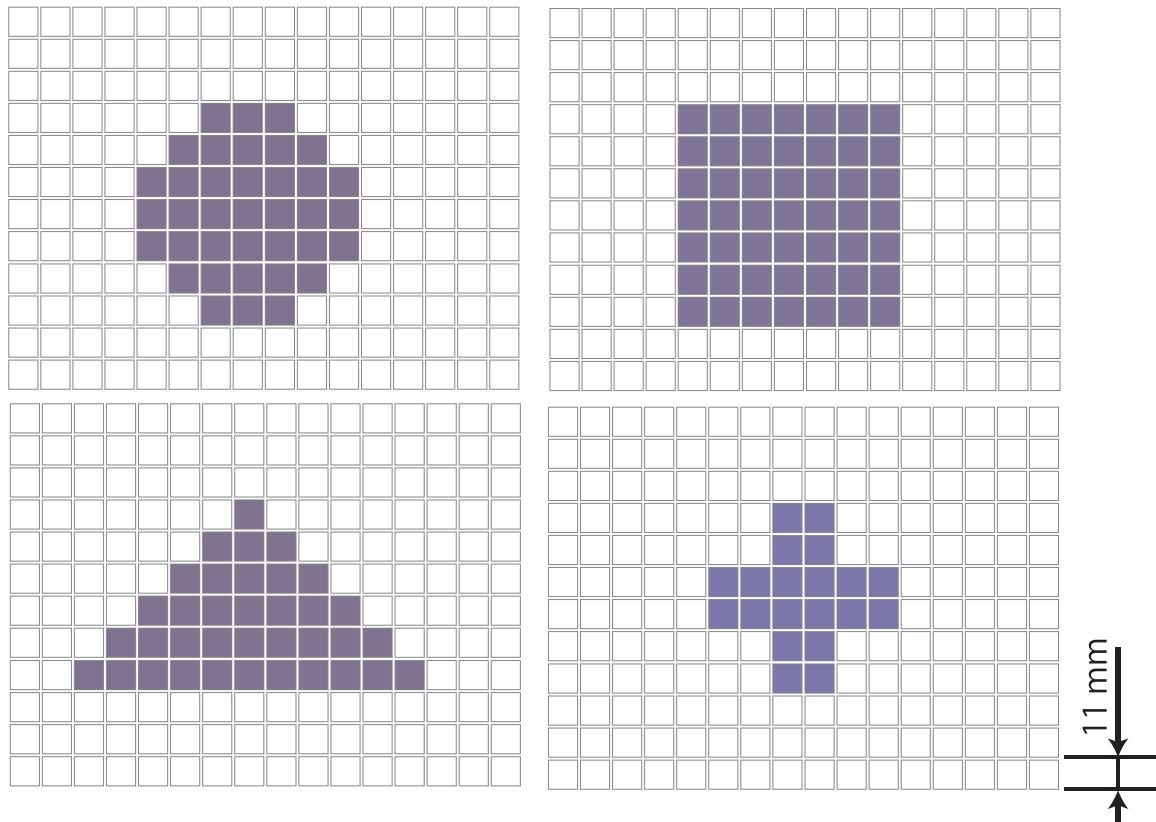


図 4.17: 複数電極によるシステムでの実験に使用した図形

| 複数電極 | | 回答した図形の数 (最大値 : 25) | | | |
|------------|-----|---------------------|-----|-----|-----|
| | | 円形 | 四角形 | 三角形 | 十字形 |
| 提示した 図形 | 円形 | 15 | 5 | 4 | 1 |
| | 四角形 | 2 | 19 | 4 | 0 |
| | 三角形 | 2 | 4 | 15 | 4 |
| | 十字形 | 3 | 1 | 3 | 18 |

図 4.18: 複数電極を用いた触覚ディスプレイにおける図形識別率に関する実験結果

実験結果

図 4.18 に複数電極を用いたシステムにおいて、提示された図形に対する実験協力者が回答した図形の数を示す。この装置を用いた触図の平均識別正答率は 67% であった。図形ごとで比較すると、四角形と十字形の識別正答数が他の図形よりも高く、それぞれ 19 回と 18 回であり、逆に円形と三角形の識別正答数は 15 回と低い結果であった。銀ナノインクを用いた触覚ディスプレイでの実験結果と比較すると、円形は 3 回、三角形は 9 回低く、四角形は 2 回高かった。また間違えたケースが最も多かったのは、円形を提示した際に四角形と回答した場合で、その回数は 5 回であった。しかし、銀ナノインクによる触覚ディスプレイでは四角形と円形を互いに間違えるケースが多かったが、今回の触覚ディスプレイでは円形を四角形に間違えるケースはあったものの、その逆のケースは 5 回減少した。

考察

図形識別率に関して、銀ナノインクを用いた場合よりもわずかに識別率は低下した。これは銀ナノインクを用いた触覚ディスプレイに比べ、解像度が低いことが原因と考えられる。今回製作した触覚ディスプレイは、一つの電極の縦幅と横幅が 10 mm となっているため、円形のような曲線の表現や三角形のような鋭角の表現が難しかったと考えられる。また、四角形の識別率や円形との間違えの減少に関して、四角形は今回用意した装置で形に違和感なく提示することが可能であるため、四角形が提示された場合では他の図形と間違えにくかったと考えられる。これと同様に十字形の識別率が高い理由としても今回の装置で表現しやすい概形だったからだと考えられる。この改善策として一つの電極のサイズや形を考慮し、解像度を改善することが挙げられる。

識別率は銀ナノインクを用いた場合と比べて図形の識別率が低い結果となったが、図形の動的な切り替えが可能であったことは確認できた。

4.6 図形認識のさらなる向上に関する考察

今回の図形識別に関する評価実験では複数指を使って触察することで、識別正答率が79%になり、ある程度向上したと考えられる。しかし、点図やピンアレイを用いた場合と比較するとまだ識別正答率が高いとは言えない。静電気力触覚ディスプレイを用いた触図提示システムとして図形の識別度を向上させる方法として静止した指への触覚提示と、指の動きに合わせた入力波形の変調が考えられる。

今回の実験における指の触察時の様子から、図形の輪郭線を探索することは触察戦略として重要である。これは静電気力触覚ディスプレイのみならず、触地図のような一般的な二次元状の物体でも同様である [MM16]。この輪郭線の探索は図形の提示領域内と領域外で明確な触覚の違いによって可能となる。例えば、ピンアレイアクチュエータや点図であれば、図形の境界線上に段差を作ることで、指がこの段差を認識し輪郭線を探索できる。触知ピンの場合では図形の境界線を振動させることで、振動のない部分とある部分の境界線を指が認識し、どうように図形の輪郭線を探索することができる。静電気力触覚ディスプレイもテクスチャ感のある場所とない場所で境界線を把握することは可能である。しかし、この静電気力触覚ディスプレイが他の触覚ディスプレイと大きく異なる部分があり、それは指を止めてしまうと触覚を知覚できることである。他の触覚ディスプレイは指を止めた状態でも段差や振動を知覚することが可能であるため、正確な境界線の位置や頂点付近の形状情報を取得することが容易である。つまり、図形の輪郭線を認識する際に指表面が自然に図形の境界線を捉えていることが識別度を高くしていると考えられる。一方、静電気力触覚ディスプレイは触察をする際に、指を動かしながら図形の境界線の位置や形状の把握を行う。そのため、図形の輪郭線を認識する以前に、図形の境界線を把握するための触察が必要なため、より図形識別の難易度が上がってしまったと考えられる。この問題点に関して、次の章では静止した指への触覚提示を可能とするための提示手法について提案している。

また、指の動きによって入力波形を変調させることも図形の識別度を向上させると考えられる。前章の実験から粗い表現を行うことがより図形の境界線を明確にすると考察した。しかし、今回用意した静電気力触覚ディスプレイは指の位置や速度を検出しておらず、一定の波形を常に出力しているため、図4.19のように指の速度によって指が知覚するディスプレイ上の空間周波数が異なる。指を速く動かすと電圧の変化に伴う触覚が疎になり、逆に遅く動かすことでの触覚が密になる。ピンアレイを用いた図形識別実験において、指の動きに対する空間周波数の違いで図形の識別率に影響があることが調査されている [渡辺00]。このことから、静電気力触覚ディスプレイを用いた触図の提示においても、この空間周波数を考慮した触覚提示が重要であることが考えられる。また、今回の触覚提示におけるレンダリング手法はXuらの調査を参考にし、図4.20(a)のような図形内部のみに一種類のテクスチャを提示する手法を採用した [XIP⁺11]。この調査では1種類の図形内部用のテクスチャと1種類の境界線用のテクスチャを用意し、それぞれの組み合わせで図形識別の評価を行った。しかし、図4.20(b)のように図形の内部、図形の境界線、また背景となる図形の外部にも異なるテクスチャをつけ、各箇所のテクスチャ感を変えながら評価を行うことで、より図形の輪郭線を強調できる組み合わせが存在する可能性がある。これらのことから、指の位置によってテクス

チャ感を変え、さらに指の速度に応じてテクスチャの空間周波数を保つことで、より図形の識別度の向上が見込まれる。

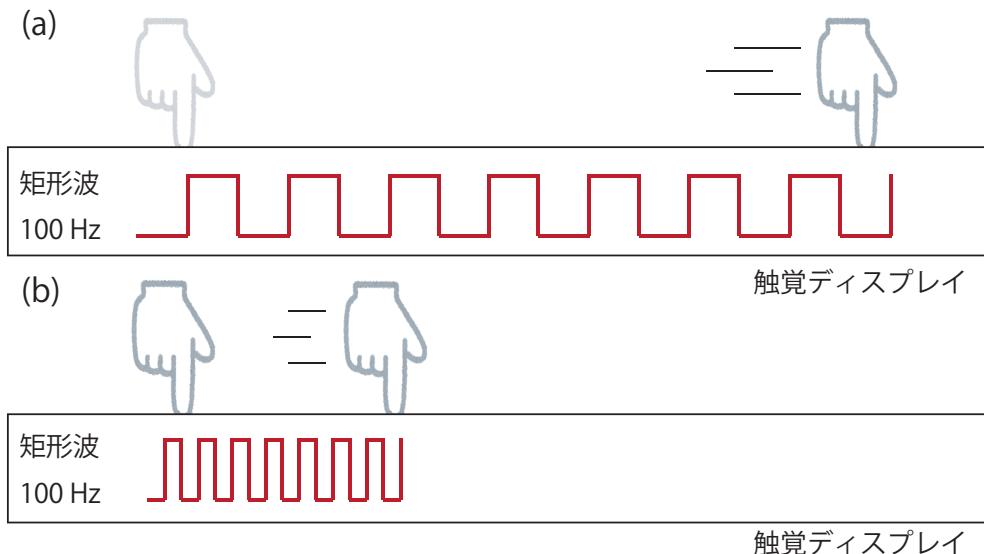


図 4.19: (a) 指を速く動かした時の様子. (b) 指を遅く動かした時の様子

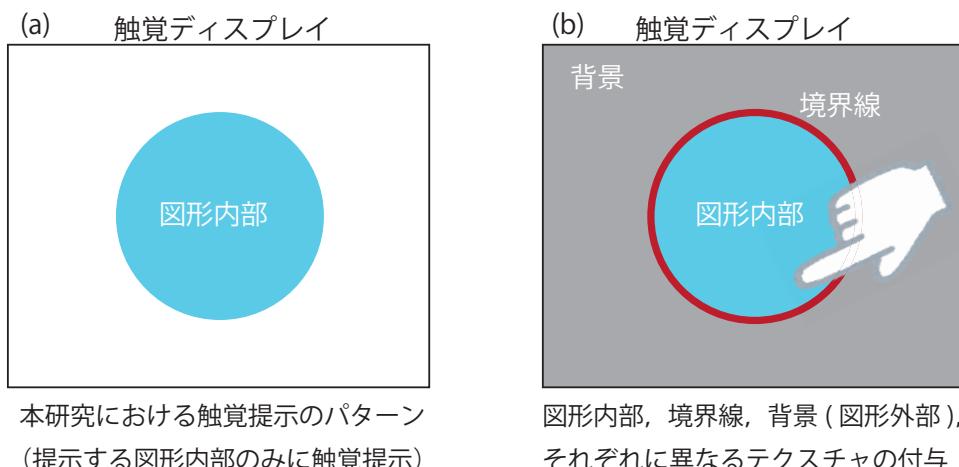


図 4.20: (a) 本研究における図形のレンダリング手法. (b) 図形内部、境界線、及び背景で異なるテクスチャ感を提示する手法

4.7 本章のまとめ

本章では静電気力触覚ディスプレイを用いた触図の提示に関して、複数指での触察の有効性の調査を目的とした。このため、最初に図形識別に関する評価実験を実施し、従来手法の一本指での触察と比較し、複数指による触察の有効性を明らかにし、その次に複雑な図形に対してどれほど図形情報を取得できるかを調査した。

本研究では、銀ナノインクを用いて図形を印刷することで、静電気力触覚ディスプレイにおいて複数指による触察を可能にした。そしてこの触覚ディスプレイを用いて複数の簡易的な触図を用意し、触察による図形識別に関する評価実験を実施した。この実験では提示された図形の識別正答率と図形を識別するまでの探索時間を収集した。実験の結果、複数指による触察のほうが識別正答率が高くなる傾向と探索時間が早くなる傾向が確認された。また、提示した図形のなかで、三角形と四角形を提示した場合では探索時間の有意差が確認された。これらの結果の要因として、触図自体のサイズと、指にかかる剪断力の違い、そして実験協力者の触察戦略が考えられる。特に、識別正答率が複数指による触察で向上したことは他のディスプレイと異なる傾向であり、これは接触面積による剪断力の違いといった静電気力触覚ディスプレイの特有な要因が考えられる。

さらに本研究では実験時の実験協力者の指を動かす様子を観察した。この観察から、図形を認識するための2種類の戦略が確認された。一つは境界線をなぞる触察戦略であり、指同士の位置や距離、角度といった図形情報を取得する様子が見られた。これにより三角形といった頂点に特徴のある図形が識別されやすかったと考えられる。もう一つは水平、垂直、または斜め方向にスキャンすること触察戦略であり、複数指を同時になぞることで短い時間で図形の概形を把握する様子がみられた。この触察戦略に関する結果と先行研究による触察の調査から、静止した指に触覚を提示できないことを除き、静電気力触覚ディスプレイでも他の触覚ディスプレイと同様な触察戦略が行われていたと考えられる。

また、複数指によって複雑な図形を触察し、これらをどのように認識したかを確認するために実際の紙に描いてもらう図形認識に関する評価実験を実施した。この結果から、図形の位置や大きさ、そして図形の概形を認識させる可能性を見いだせた。逆に図形のパーツ同士が近い場合、それらが一つのパーツと誤認識するということも観察された。これらの調査から、一本指では難しかった2次元上の図形情報の提示において、複数指による触察によって表現できる幅が広がったと考えられる。

本研究ではさらに、複数電極を用いた触覚ディスプレイを開発し、触覚提示領域を制御が可能な装置を開発した。そしてこの触覚ディスプレイにおいて、銀ナノインクによる触覚ディスプレイと同様な図形識別に関する評価実験を実施した。この結果、銀ナノインクによる触覚ディスプレイと比べ、識別正答率の低下が確認されたが、提示する図形や用途を限定すれば、現状の装置でも図形の切り替えが容易な静電気力触覚ディスプレイとして使用できると考えられる。

第5章 静止した指への触覚提示の提案手法とその手法の有用性に関する調査

本研究では静電気力触覚ディスプレイにおいて、ディスプレイ上にある指が静止した状態でも、その指に触覚を提示する手法を提案し、その提案手法によって触覚提示が可能であるかどうかを評価実験によって検証した。

静電気力触覚ディスプレイの触覚提示における課題の一つに静止した指への触覚提示が困難であることが挙げられる。これにより、触図提示に関して図形の識別率を低下させる可能性がある。McLinden らの調査において、二次元状の凹凸で構成された図の情報を取得する際に利用される触察戦略の一つに静的接触(static contact)がある。この静的接触に関して、他の触覚提示装置においては、点字による触図や、凹凸を使った触覚ディスプレイは図形境界線をこの静的接触によって取得することが可能である。一方、これまでの静電気力触覚ディスプレイではこの触察戦略を利用できるデバイスがほとんどなかった。

静電気力触覚ディスプレイの静的接触の課題を解決するために、本研究では静電アクチュエータを用いた手法を参考にすることで、指が静止した状態でも触覚を提示する手法を考案した。従来の静電気力触覚ディスプレイは平面な電極上に薄い絶縁膜を敷き、その上で指をなぞる。第3章の静電気力触覚ディスプレイの原理で述べた通り、指をなぞる際の触覚ディスプレイへの押下力に対して誘電分極によって発生するクーロン力の力が弱すぎると、指への変形が難しい。このように従来の静電気力触覚ディスプレイで静的接触を行うことが難しい。そこで、静電気力触覚ディスプレイのハードウェアを改造し、静的接触が可能となる手法を検討する。この手法が可能となれば、静電気力を用いた触覚提示に対する触察戦略の幅が広がると考えられる。

5.1 静止した指への触覚提示を可能とするハードウェアの提案とその実装

静電気力触覚ディスプレイにおいて静的接触を可能とするために、平行板静電アクチュエータに着目した。この原理を模した構造を静電気力触覚ディスプレイに取り入れることで、指に対して振動といった触覚の提示が可能となると考えた。

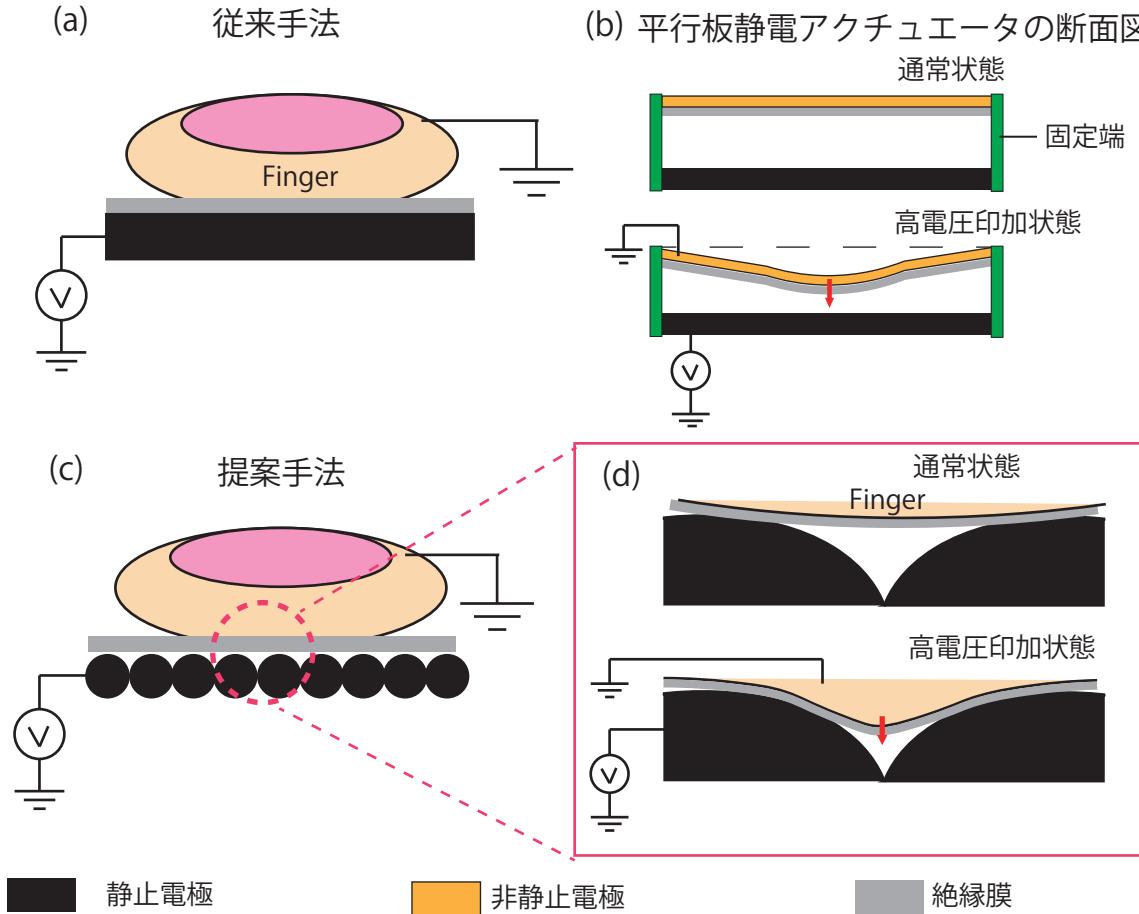


図 5.1: (a) 従来の静電気力触覚ディスプレイ, (b) 平行板静電アクチュエータ [BP19, PRKK14]. (c) 提案手法の模式図: 導電糸や針金のような線状の電極の上に薄い柔らかな絶縁膜を貼り付ける. (d) 指表面の拡大図.

5.1.1 平行板静電アクチュエータ

平行板静電アクチュエータとは平行に設置された二つの電極に波形を印加させることで、電極自身が振動のような動作を発するアクチュエータである [PFH90, BP19, PRKK14]. このアクチュエータは静電気力触覚ディスプレイとほぼ同じ構造で動作させることが可能である. 図 5.1 (b) は機械振動を発生する平行板静電アクチュエータの模式図である. このアクチュエータは静止電極と非静止電極で構成され、それらは平行状に固定される. 非静止電極は弾性変形し、表面には絶縁膜が貼られている. 静止電極に高電圧が印加された場合、非静止電極は静止電極の方に引っ張られる. そして、交流波形を入力することで非静止電極を振動させることができる. 本研究ではこの平行板静電アクチュエータの原理を参考にした手法を提案する.

5.1.2 平行板静電アクチュエータと静電気力触覚ディスプレイを組み合わせた関連研究

これまでに、静電気力触覚ディスプレイとこの平行板静電アクチュエータを組み合わせた装置を開発した研究がある [PRKK14]。この装置は静電アクチュエータの層の上に静電気力触覚ディスプレイの層が重なる二段構造で構成される。この時、下段の静電アクチュエータによって振動の提示が、上段の静電気力触覚ディスプレイによってテクスチャ感の提示が可能となる。この際に、ディスプレイ上に指を静止させた状態でも、下段の静電アクチュエータによる振動が上部にある指にも伝わり、この指に振動の刺激を与えることが可能である。下段の静電アクチュエータは平面状の電極同士でエンボス構造の PDMS (Polydimethylsiloxane) を挟むような構成となっている。そして電極に高電圧の交流を印加することで、電極間で振動が発生する。上段の静電気力触覚ディスプレイは従来の平面の電極と絶縁膜で構成されている。これにより静電気力触覚ディスプレイでの静的接触を可能とするが、この手法は2層構造であるため、電圧源が2つ必要である。また静電アクチュエータのほうでは約1kVという高い電圧源が必要となる。

そこで本研究では、静電気力触覚ディスプレイの従来手法のような、より簡易な構造でこの平行板静電アクチュエータと静電気力触覚ディスプレイを両立できるハードウェアを提案する。

5.1.3 線状の電極を用いた静電気力触覚ディスプレイの提案

本研究では、従来の静電気力触覚ディスプレイの構成物である平面状の電極を並べられた細い線状の電極に替えることで、静的接触の実現を提案する。静電アクチュエータは電極間に僅かな空間を設置しており、静電気力触覚ディスプレイも同様に絶縁膜と電極の間に、僅かな空間を設けることで絶縁膜または指表面が振動し、静止した状態の指に対して何かしらの触覚刺激を与えることができると思った。しかし、従来の平面状の電極では絶縁膜との間に均一な空間を作ることが難しい。そのため、図5.1(c, d)のように導電糸や針金といった非平面形状である細い線状の電極を使用する。この電極を並べ、上から絶縁膜を貼り付けることで絶縁膜と電極の間に小さな空間を作り出せる。本研究はこの電極に交流波形を入力することで、平行板静電アクチュエータのように非静止電極と見立てた指表面が振動し、指に触覚を知覚させることを試みた。

5.1.4 静止した指への触覚提示を可能とする静電気力触覚ディスプレイの実装

提案手法を実装した触覚ディスプレイを図5.2に示す。この触覚ディスプレイは図5.2(a)のようにPET樹脂で製作されたスタンドがあり、その上に並べられた線状の電極、さらにその上に絶縁膜が貼られている。また、スタンドの下には評価実験で使用するための圧力センサを設置した。

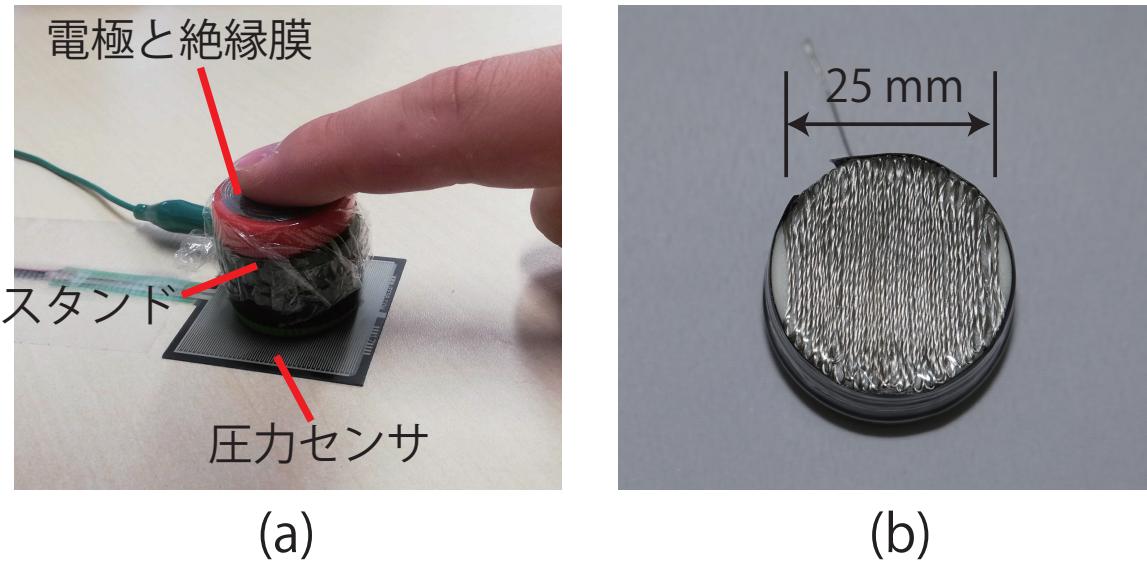


図 5.2: (a) 作成した触覚ディスプレイ上に指を置く様子, (b) 導電糸を縦縞状に並べた様子.

導電糸を用いた電極面

提案手法を実装するために、線状の電極として直径が $120\ \mu\text{m}$ のステンレススチール製の導電糸を用いた。この導電糸を図 5.2 (b) のように PET 樹脂で製作されたスタンド上に縦縞状に 50 本並べた。この並べられた導電糸は断面が正円ではなく楕円状になり、結果、幅が 25 mm となった。これらの導電糸はすべて導通しており、この電極と導通した線をディスプレイ外側に延ばし、高電圧発生装置に接続した。

絶縁膜

絶縁膜は柔らかく薄いポリ塩化ビニリデンのフィルムを用いた。この絶縁膜の厚さは $11\ \mu\text{m}$ である。そしてこの絶縁膜をディスプレイ上に歪みが発生しないようにスタンドの淵付近で接着し固定した。今回の評価実験の際には、実験協力者が変わるたびにこの絶縁膜を新しいものに入れ替えた。

5.2 導電糸を用いた触覚提示装置の評価実験

導電糸を用いた触覚提示装置において、静止した指の状態で触覚提示が可能であるかを調査した。本研究では、より堅牢な実験結果を取得することができ、慣れによる予測といった実験協力者間の偏りを出来るだけ無くすため、恒常法を用いた評価実験を実施した。本研究におけるこの評価手法を利用した実験では、装置の電極に印加する入力波形の条件を変えて

いき、それに対して実験協力者が触覚の有無を回答することで、触覚提示が可能であったかどうかが確認でき、さらに触覚提示に必要な条件を議論することができる。

5.2.1 恒常法による評価実験

今回の評価実験では心理物理実験における恒常法を用いて、実験協力者が触覚を感じるかどうか、また感じた場合で触覚知覚に必要な波形の条件を調査した。恒常法は実験協力者に提示された刺激に関して「刺激あり」か「刺激なし」の二者択一で答えてもらい、その回答を実験実施者が収集し、最終的に波形の振幅の閾値を求める方法である。

触覚提示に対する評価方法

今回の評価実験において、提示された触覚に対して「刺激あり」か「刺激なし」の二者択一の回答をキーボードへの打ち込みによって実験協力者に評価してもらった。今回の恒常法では評価試行数が多いため、一回あたりの評価の際に簡易かつ速く実行できるようにした。

恒常法による振幅の閾値の推定

今回の評価実験では、評価結果として入力波形ごとの触覚提示に必要な振幅の閾値の推定値が算出される。この振幅の閾値は、ある波形に対して触覚提示するために必要な波形の振幅を示す。この振幅の閾値の結果から、指への触覚提示ができていたか、また波形ごとでこの閾値がどのように変化するのかを確認できる。

振幅の閾値を算出するには、初めに実験実施者が評価結果を収集し、波形ごとの「刺激あり」の反応の割合を算出する。そしてその割合を縦軸、評価条件である波形の振幅値を横軸とする心理測定関数を求めた。心理測定関数の例を図5.3に示す。心理測定関数は各波形で得られた実験値を式5.1のようなロジスティック関数にフィッティングさせることで得られた。

$$R = \frac{1}{1 + ae^{-bv}} \quad (5.1)$$

ここで、 R は反応の割合を示し、 v は波形の振幅値、 a と b はこのロジスティック関数の定数パラメータを示す。これらのパラメータを調整し、実験で得られた評価結果(図5.3の青いグラフ)の各点からロジスティック関数で得られるグラフ(図5.3のオレンジのグラフ)の間の差をより少なくすることで、フィッティングしたグラフが得られた。本研究ではこの心理測定関数の値が50%になる点の振幅値をこの恒常法による実験の結果とする波形の振幅の閾値と設定した。この閾値を入力波形の種類や周波数ごとで求めることで、各波形での閾値にどのような変化があるかを観測することができる。

なお、この恒常法を用いた実験において、閾値を算出する際に実験値がロジスティック曲線に収束しない場合があった。これは入力波形の振幅値に対する反応確率がほぼ一定であった場合で起きる。今回の恒常法を用いた実験ではすべての振幅値に対して反応確率が20%以下

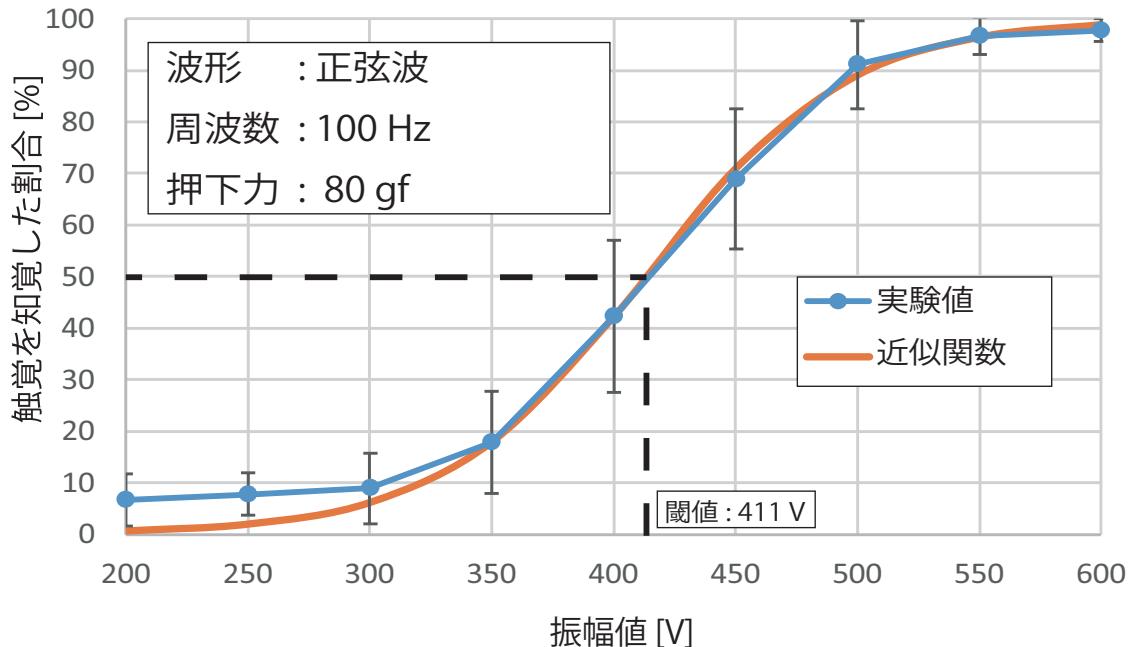


図 5.3: 実験での評価結果値に対する心理測定関数の例

の結果であった場合では、閾値を算出できなかった。また、すべての振幅値に対して反応確率が 50%未満の場合、閾値の算出値は用意した最大振幅の 600 V(図 5.5 の正弦波の結果の赤い破線)を超える結果となった。

5.2.2 評価実験に関する実験条件

今回の評価実験では、実験協力者一人に対して 3 種類の入力波形、10 個の周波数、9 個の振幅電圧、10 回の試行、2 パターンの押下力、計 5400 回の評価を実施してもらった。

実験協力者

恒常法を用いた評価実験に 9 名の実験協力者を募った。実験協力者は 22 歳から 25 歳の大学生、及び大学院生であり、このうち 2 名が女性であった。この 9 名は全員、従来の静電気力触覚ディスプレイを体験したことがある。

入力波形

今回の実験では提示装置の導電糸に 3 種類の波形(正弦波、矩形波、デルタ関数)を印加した。各波形において 10 Hz から 630 Hz までの 10 個の周波数(10 Hz, 15 Hz, 25 Hz, 39 Hz,

63 Hz, 100 Hz, 158 Hz, 251 Hz, 398 Hz, 630 Hz) を用意した。また波形の振幅値は 200 V から 600 V までの 50 V 間隔の 9 つの電圧を用いた。各波形は 10 回ずつランダムな順番で入力される。この波形の周波数や振幅の順番は実験協力者ごとで異なった。

押下力

今回の評価実験では押下力を一定に保ちながら回答してもらった。押下力を測定するためには触覚ディスプレイの下に圧力センサ (FSR406) を設置した。このセンサは高電圧発生装置に備わっている mbed マイコンに接続されている。押下力によって出力されるセンサ値を mbed マイコンに内蔵されてあるアナログ-デジタル変換機能を用いて取得し、このセンサ値を高電圧発生装置に接続されている LCD に出力する。図 5.4 に表示した LCD の画面の例を示す。画面内の赤いバーまたは緑のバーは実験協力者の押下力を示しており、その力に応じて上下する。この色付きのバーは図 5.4 (a) のように指定した押下力以外の場合では赤を、図 5.4 (b) 指定した範囲内では緑を示す。2 つの黒のバーは指定した押下力の範囲を示し、実験協力者に対してこの範囲内に色付きのバーがあるように依頼した。これにより、LCD に表示されている押下力の情報をもとに同程度の押下力を保ち続けてもらった。なお、この押下力の許容範囲はプラスマイナス 5 gf に設定し、それぞれ黒のバーになるように設定した。

今回の実験において指の押下力と閾値結果の関係性も調査した。これは押下力によって触覚提示に影響があるかを調査するためである。これにより、押下力はすべての波形での評価が終えたところで、異なる押下力で再度波形を評価するようにした。押下力の条件は 40 gf と 80 gf の 2 つの場合を用意した。この押下力の条件の順番は実験協力者ごとでランダムに設定した。

5.2.3 実験手順

評価実験の実験手順として、初めに実験概要を実験協力者に説明し、実験に関する同意を得た。装置から発生する音により、刺激提示の有無が分からぬよう、実験中、実験協力者には耳にホワイトノイズの音が再生されているヘッドホンを着用させた。実験協力者は利き腕に関わらず右手の人差し指の腹を触覚ディスプレイ上に置いてもらい、押下力を保ってもらった。そして今回の実験では「感じる」と「感じない」の回答について、設置してあるキーボードの特定のキーを押下するよう教示した。このタスクをすべての波形で実施してもらった。900 試行ごとに 5 分程度の休憩をとった。2700 試行が終わった際に、押下力を変え、再度評価を実施してもらった。全 5400 試行の評価が終わった後、実験実施者は実験協力者が評価した結果を収集し、波形ごとの振幅の閾値を算出した。

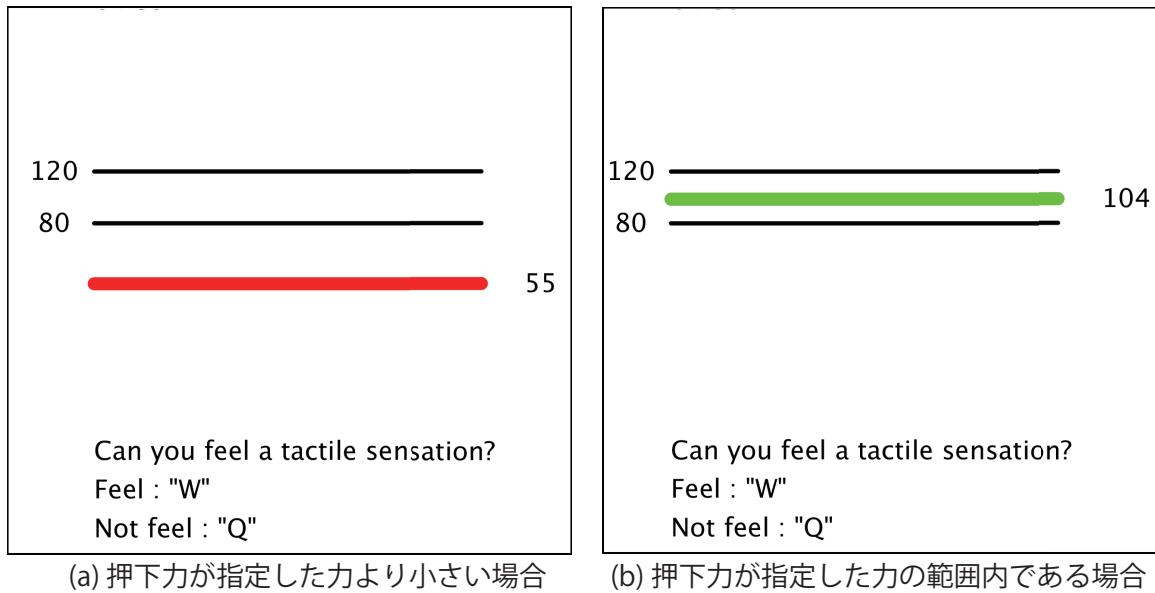


図 5.4: 実験時に LCD に表示した画面の例

5.2.4 実験結果

各波形に対する閾値を算出できた実験協力者数

入力波形に対して振幅の閾値が算出できた実験協力者の数を図 5.5 に示す。グラフの横軸は入力波形の周波数を示す。青のバーは押下力が 40 gf の場合、オレンジのバーは押下力 80 gf の場合を表す。今回の実験において、閾値が算出できなかった結果は、すべての波形の振幅値に対して触覚を知覚した割合が 10% 以下であった。

図 5.5 より、正弦波を入力した場合において 63 Hz 未満の場合では半分以上の実験協力者が閾値が算出できない、つまり触覚をほとんど感じとれなかった。また 630 Hz といった高周波でも閾値を算出できなかった実験協力者がいた。これはデルタ関数でも低周波数と高周波数で同様な傾向が見られた。これに対して矩形波はほぼすべての周波数帯で半分以上の実験協力者の結果において、閾値を算出することができた。このことから、本研究で提案した手法を用いることで、いくつかの条件の組み合わせであれば指を動かさなくても触覚提示の可能性が示せた。

波形に対する振幅の閾値

入力波形に対する振幅の閾値の結果を図 5.6 に示す。グラフの横軸は入力波形の周波数を示す。青のグラフは押下力が 40 gf の場合、オレンジのグラフは押下力 80 gf の場合を表す。これらの結果は、閾値を算出できた実験協力者で平均した結果である。エラーバーは標準誤差を示す。

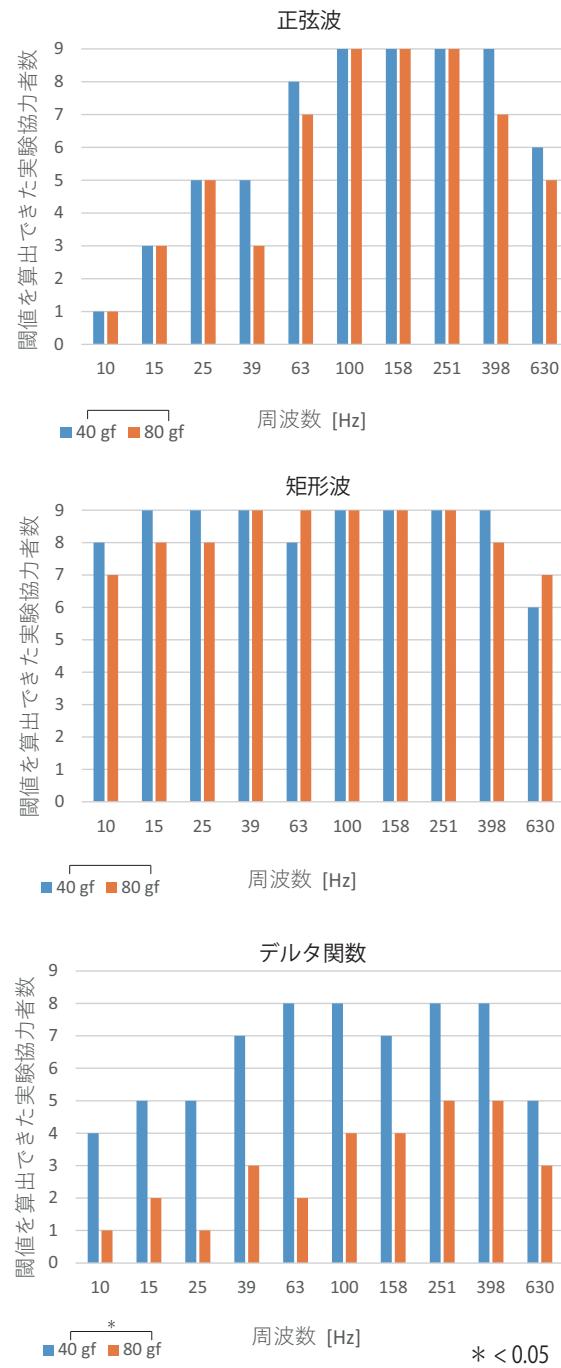


図 5.5: 入力波形に対して振幅の閾値を算出できた実験協力者の数

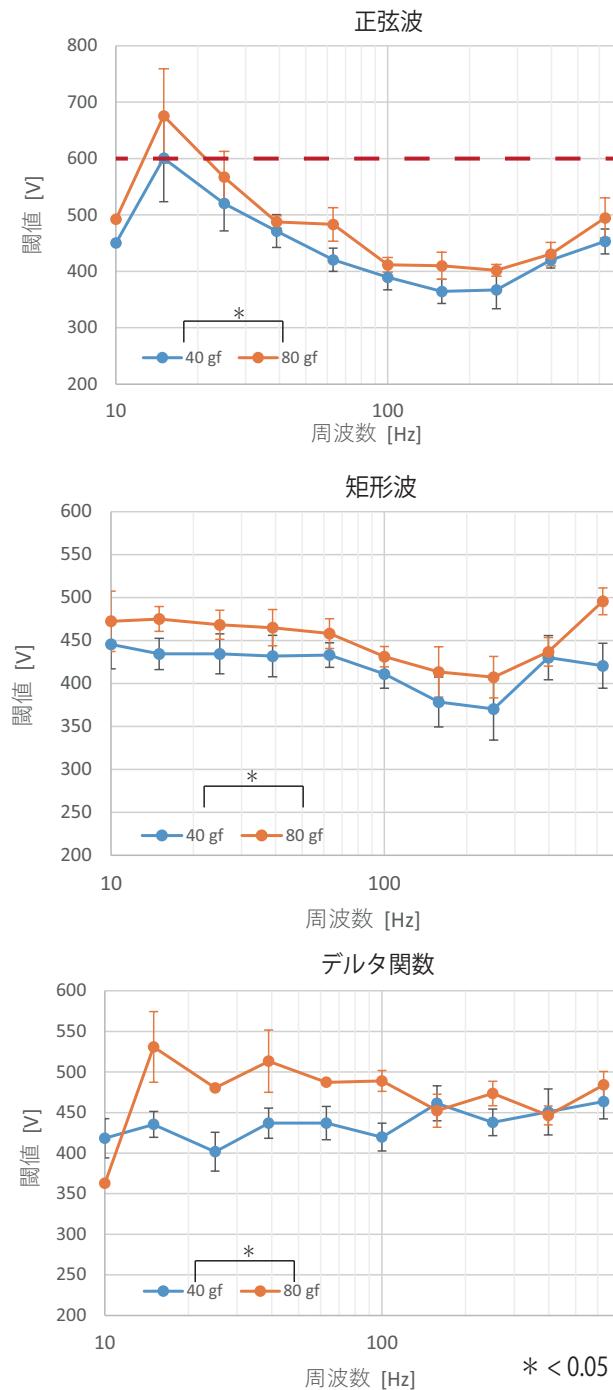


図 5.6: 波形に対する振幅の閾値の結果

図5.6より、正弦波を入力した場合では低周波数では閾値が高く、200 Hz周辺において最小閾値(365 V)となった。そして、200 Hz以降では高周波になるほど閾値が高くなる傾向が見られた。矩形波を入力した場合では低周波数では閾値が400 Vから500 Vの間の結果であるが、100 Hz以降では閾値が低くなり、200 Hz周辺において最小閾値(370 V)となった。そして、200 Hz以降では高周波になるほど閾値が高くなる傾向が見られた。デルタ関数を入力した場合、正弦波や矩形波のような下に凸のようなグラフにならなく、周波数が高くなるほど閾値が上がる傾向(押下力が40 gfの場合)、または下がる傾向(押下力が80 gfの場合)が見られた。このように、入力する波形の種類によって、閾値のグラフの傾向が異なった。

押下力ごとの評価結果

評価結果において押下力ごとで閾値を算出できた実験協力者の数と波形に対する振幅の閾値が異なることが見られた。図5.5の結果を分散分析で検定した結果、正弦波を入力した場合、これらの押下力間において有意差が確認できなかった($F(1,9)=5.12, p=0.0510$)。矩形波を入力した場合では有意差が確認できなかった($F(1,9)=5.12, p=0.279$)。デルタ関数を入力した場合では有意差が確認できた($F(1,9)=5.12, p<0.001$)。そして一部の正弦波とデルタ関数の結果において、弱く押した場合(40 gf)の方が強く押した場合(80 gf)より閾値を算出できた実験協力者数が多かった。図5.6でも波形ごとで2つの押下力間の閾値に差があるかを調査した。波形の周波数に対する閾値で繰り返しのない二元配置の分散分析を実施した場合、すべての波形の種類で押下力間に有意差(有意水準5%)が確認された。

5.2.5 考察

波形に対する評価結果の考察

入力波形ごとで閾値を算出できた実験協力者数や振幅の閾値が異なった。この結果の要因として、指にある機械受容器と入力波形、及びその波形に含まれる周波数成分が関わっていると考えられる。特に、今回の装置に関して機械受容器のパチニ小体とマイスナー小体が関連していると考えられる。

Vardarらは、静電気力ディスプレイによる刺激はパチニ小体が主であることと、多くの周波数成分を有する波形を入力することで低周波での刺激が敏感になることを言及した[VGB17]。この研究では、静電気力ディスプレイにおいて入力波形ごとで触覚知覚にどのような影響があるかを調査した。その結果では60 Hzまでは正弦波よりも矩形波のほうが敏感であることが分かった。本研究における実験結果についても同じように考えられ、今回の実験でも40 Hz以下における矩形波の場合より正弦波の場合のほうが閾値が高かった。これは複数ある周波数成分の一部が機械受容器が刺激されやすい周波数帯を含んでいる場合、10 Hzや15 Hzのように主周波数が低くても、高周波にある周波数成分がパチニ小体を刺激することで、触覚を知覚できた可能性があると考えられる。

また、マイスナー小体の特性によって、低周波数における矩形波とデルタ関数の閾値が低いことが考えられる。島田らはオプタコンという触覚提示装置を用いて、機械受容器との関連性を調査し、その調査結果から、提示された振動の形状の認識はメルケル細胞、振動を捉えるのはマイスナー小体が受容していると指摘した[島田08]。このオプタコンとは、ピニアレイアクチュエータを用いた触覚ディスプレイであり、本研究の導電糸による触覚ディスプレイと同様に静的接触向けの装置である。この装置は二次元状に並べられたピニアレイで構成され、各ピンにおいて振動制御を行う。ユーザはこのピンの上に指を起き、各ピンの振動の有無による振動領域を指で知覚し、提示された点字、または文字を認識する。本研究では指表面の全体を振動させていると考えられるため、形状の認識という観点から示唆されるメルケル細胞との関連性は不明であるが、振動を捉えるマイスナー小体との関連性はあると考えられる。特にマイスナー小体は皮膚表面の急激な負荷の変化を検出する特性がある。このことから、矩形波やデルタ関数のような電圧値の変化が激しい波形の場合、このマイスナー小体を刺激させやすく、この結果、低い周波数の矩形波やデルタ関数において振幅の閾値が低くなったと考えられる。

押下力に対する評価結果の考察

今回の実験において、押下力によって評価結果が違うことが見られた。この結果の要因として、指の押す力に対する最小差知可異の比率の関係があると考えられる。図5.5ではデルタ関数において弱く押した場合と強く押した場合でのグラフに有意差が見られ、強く押した場合(80 gf)より、弱く押した場合(40 gf)の方が触覚を知覚しやすい結果となった。また図5.6においても、すべての波形の種類で弱く押した場合と強く押した場合でのグラフに有意差が見られ、強くした場合より弱く押した場合の方が振幅電圧の閾値が小さかった。ここで、ウェーバの法則に着目した。ウェーバの法則の式を下記に示す。

$$\frac{\Delta R}{R} = \text{Const}$$

ここで、 ΔR を触覚における最小差知可異を示し、 R は押下力を示す。この式から押下力を強くするほど、触覚の差を感じる知覚量を多くする必要がある。したがって、押下力が強くなつた際に、このディスプレイで提示できる知覚量が飽和し、感じにくくなつたと考えられる。

5.3 実験条件のパラメータを増やした追加実験

前節では提案した手法において限定した種類の波形や押下力に対して触覚を感じ取ることができるかを調査した。しかし、今回提案した手法に関してより詳細な条件での実験を実施し、この提案手法の触覚提示に関する制約条件を調査する必要がある。

本節では以下の条件に関して調査する。

- 周波数成分に着目した入力波形

- 導電糸の配置パターンに関する条件
- 電極の材質と直径に関する条件

前節では3種類の基本的な波形を用いて実験が行われ、その結果から、周波数成分の構成によって閾値が変わると考察した。そこで、周波数成分に着目した入力波形を用意し、波形ごとでどのように変化するかを調査し議論する。

また、電極として利用した導電糸は置く指に対して縦縞模様に配置した。しかし、実際に触覚ディスプレイとして使われる場合、どのユーザも前節のような指の置き方をするとは限らない。そこで、置いた指に対する電極の配置パターンをいくつか用意し、各パターンで差異が表れるかを調査する。さらに同じ電極の配置パターンでも、導電糸ではない材質や電極の直径によっても差異が表れるかを調査する。これらの調査により、提案手法による触覚ディスプレイを製作する際のハードウェア設計のモデルの指針となることが期待される。

5.3.1 周波数成分に着目した入力波形を用いた評価実験

前節では、正弦波、矩形波、デルタ関数を入力し、評価結果である触覚知覚に必要な閾値の傾向が各波形で異なることが分かった。そしてこの要因が入力波形の周波数成分にあると考えた。そこでより詳細な波形に対する閾値の調査をするため、入力波形として図5.7のような周波数成分に着目した波形を6個用意し、前節と同じ恒常法を用いた評価実験にて各波形における振幅の閾値を調査した。

この実験では6個の波形、10個の周波数、9つの振幅、そしてそれら条件を10回ずつ行い、計5400試行の評価を行った

周波数成分に着目した入力波形

図5.7は各波形の概形とその波形の周波数成分を表す。実験ではこれらの波形の主周波数として10Hzから630Hzまでの10個を用意した。波形#1から波形#3は2つの周波数成分を持つ波形であり、波形#4から波形#6は3つの周波数成分を持つ波形である。また波形#2と波形#5は周波数が高いほど振幅強度が大きくなるような波形であり、波形#3と波形#6は周波数が高いほど振幅強度が小さい波形である。これらの波形を用いて評価実験を行うことで、周波数成分の数や振幅強度の大きさに関して結果を比較することができる。なお、波形の順番は実験協力者ごとでランダムに入力した。

押下力

今回の実験では、触覚ディスプレイに対する実験協力者の指の押下力を40gfに設定した。この押下力の値は圧力センサ(FSR406)によって測定され、高電圧発生装置に接続されているLCDに出力された。LCDには押下力によって上下するバーを表示し、実験協力者に対して指

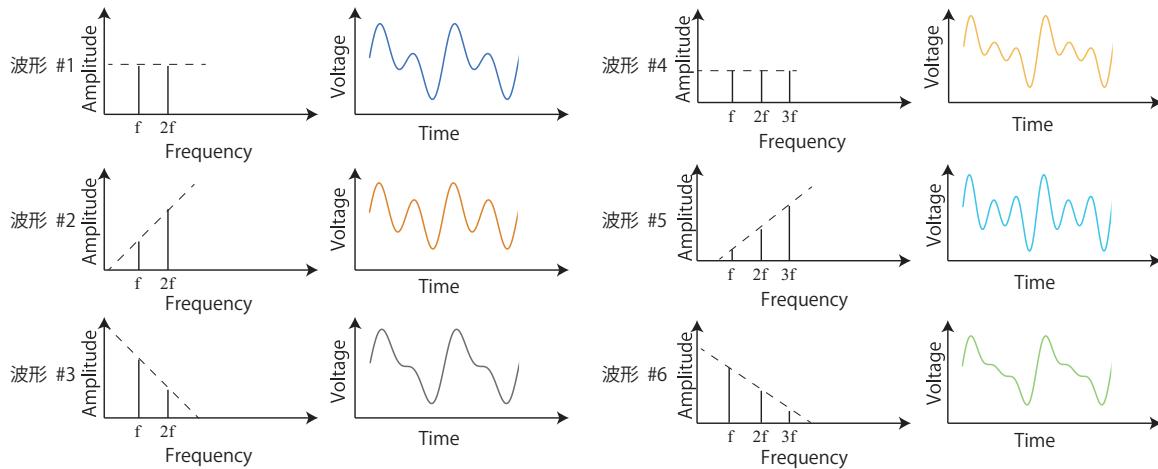


図 5.7: 新たに用意した 6 つの波形

定された範囲内にバーがあるように教示した。なお、この押下力の許容範囲はプラスマイナス 5 gf に設定した。また、実験前にセンサのキャリブレーションを行った。

電極

電極は直径 $120\mu\text{m}$ のステンレススチールファイバー製の導電糸を使用した。PET樹脂で製作されたスタンド上に縦縞状に並べた。これらの糸はすべて導通しており、これらの糸とつながった線をディスプレイ外側に延ばし、高電圧発生装置に接続する。

絶縁膜

絶縁膜は前節の実験と同様にポリ塩化ビニリデンのフィルムを用いた。この絶縁膜の厚さは $11\mu\text{m}$ である。そしてこの絶縁膜をディスプレイ上に歪みが発生しないようにスタンドの淵付近で接着した。実験協力者が変わるたびに、絶縁膜は新しいものに取り換えられた。

実験協力者

実験協力者は 23 歳から 26 歳の計 8 人の大学院生（うち女性 3 名）を募った。このうち、静電気力触覚ディスプレイを体験したことがある実験協力者は 7 名であった。また、すべての実験協力者はコンピュータ用のキーボードを使い慣れていた。

実験手順

評価実験の実験手順として、初めに実験概要を実験協力者に説明し、実験に関する同意を得た。装置から発生する音により、刺激提示の有無が分からぬよう、実験中、実験協力者

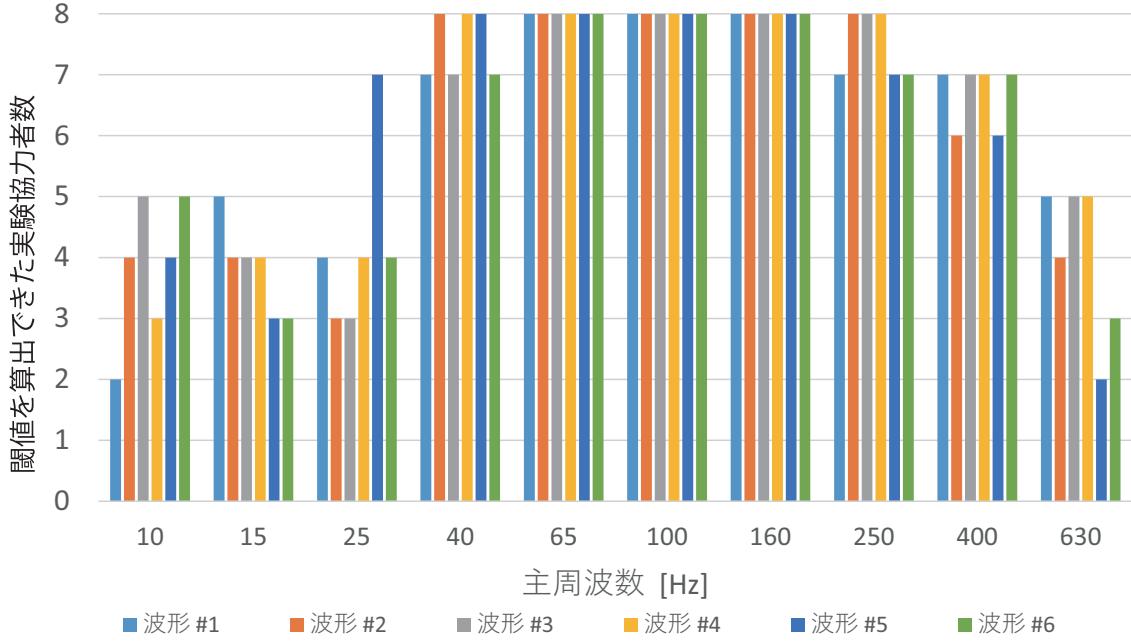


図 5.8: 波形ごとで振幅の閾値を算出できた実験協力者の数

には耳にホワイトノイズの音が再生されているヘッドホンを着用させた。実験協力者は利き腕に関わらず右手の人差し指の腹を触覚ディスプレイ上に置いてもらい、押下力を保ってもらった。実験中、用意した波形が入力された後に、実験協力者に対して「感じる」と「感じない」の回答を設置してあるキーボードの特定のキーを押下するよう教示した。このタスクをすべての波形で実施してもらった。900 試行ごとに 5 分程度の休憩をとった。全 5400 試行の評価が終わった後、実験実施者は実験協力者が評価した結果を収集し、波形ごとの振幅の閾値を算出した。

実験結果

波形ごとで閾値を算出できた実験協力者の数を図 5.8 に示す。図 5.8 のグラフの横軸は波形の主周波数を示し、縦軸は閾値が算出できた実験協力者の数を示す。主周波数が 10 Hz, 15 Hz, 25 Hz, 630 Hz ではどの波形においても触覚を感じ取れなかった実験協力者が多かった。その中で波形#5 は 25 Hz でも 7 人の実験協力者が触覚を感じた結果となった。主周波数が 40 Hz から 250 Hz までは 7 人または全ての実験協力者が触覚を感じることができた。

図 5.9 に波形ごとの主周波数に対して算出された閾値のグラフを示す。このグラフは片対数グラフとなっており、横軸は波形の主周波数を、縦軸は振幅閾値を示す。このグラフの結果は、振幅の閾値を算出できた実験協力者で平均した結果であり、エラーバーは標準誤差を示す。このグラフから、どの入力波形においてもグラフの傾向は似ており、下に凸のようなグ

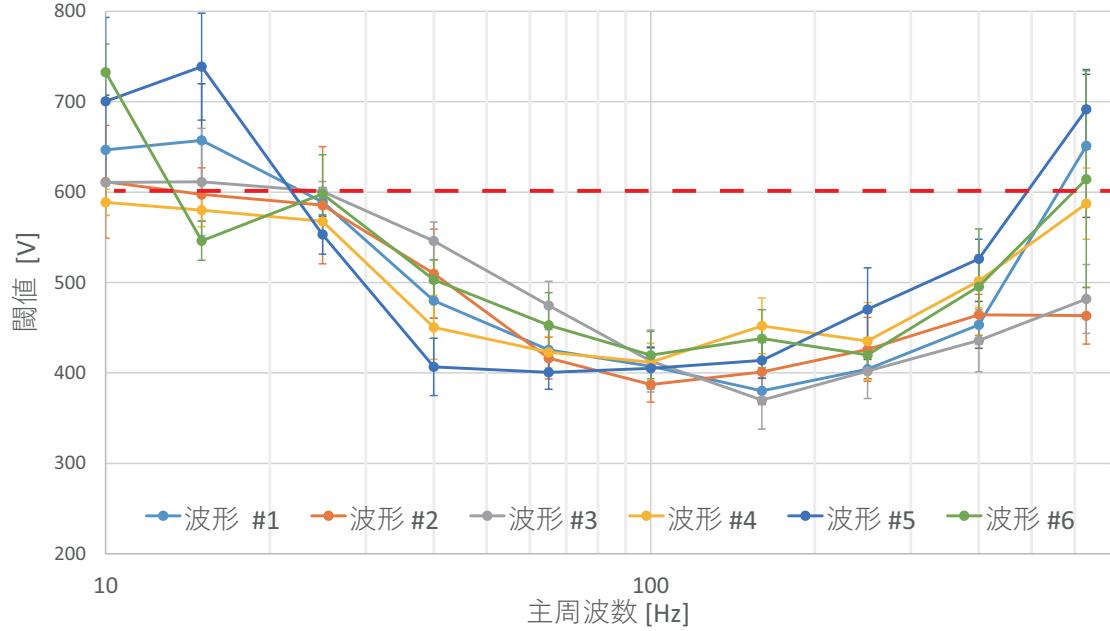


図 5.9: 波形ごとの振幅閾値の結果

ラフになった。低周波である 10 Hz, 15 Hz, 25 Hz, そして高周波である 630 Hz では閾値の推定値が 600 V を超えることがあり、最大振幅でも反応確率が低かった。

また、各波形の最小閾値とその時の周波数を図 5.10 に示す。このグラフは横軸として波形 #1 から波形#6 を示す。左図の青いグラフは最小閾値を、右図のオレンジのグラフは最小閾値時の周波数を示す。この図から、波形ごとの最小閾値は 370 V から 420 V の間であった。この時の周波数値は 60 Hz から 160 Hz の間であった。最小閾値に関して、周波数成分の数が 2 つの場合 (波形#1 から#3) と 3 つの場合 (波形#4 から波形#6) で異なり、二つの場合は 400 V 以下となり、3 つの場合は 400 V 以上の結果となり、周波数成分が少ないほど最小閾値が低くなる傾向が見られた。最小閾値時の周波数に関して、波形#1 と#3 が 420 Hz 付近となり、波形#2, #4, #6 が 400 Hz 付近、そして波形#5 が最も低い 385 Hz であった。ここで振幅強度の傾向ごと (波形#1 と波形#4, 波形#2 と波形#5, 波形#3 と波形#6) で見た場合、どの組み合わせでも、周波数成分の数が多い方が周波数が低くなる傾向が見られた。

考察

25 Hz 以下のこのような低い周波数、または 630 Hz のような高周波では前節の考察同様、指の機械受容器がこれらの周波数帯に対して刺激されにくいかからだと考えられる。

各波形の最小閾値に関して周波数成分の数が少ないほど振幅閾値のほうが低くなる傾向が見られた。これは周波数成分の数が少ないほど、周波数成分 1 つあたりの振幅強度が大きくなり、機械受容器への刺激量が大きくなつたからだと考えられる。最小閾値時の周波数に関し

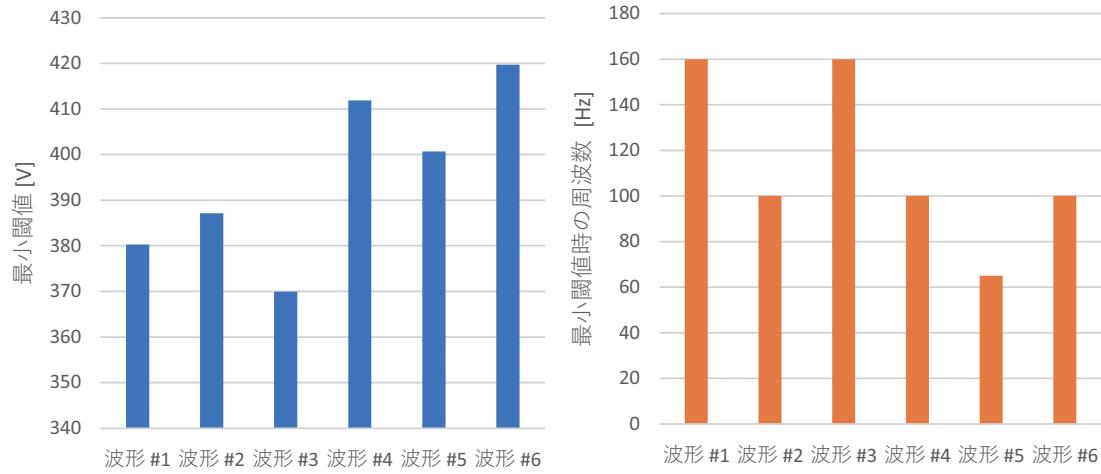


図 5.10: 波形ごとの最小閾値(左)とその時の周波数(右)

では、逆に周波数成分が少ないほど周波数が高くなる傾向が見られた。周波数成分が多いほど、波形に含まれる成分の周波数帯が広くなり、低い主周波数の波形でも機械受容器を刺激する周波数帯の周波数成分が含まれて触覚を感じたと考えられる。これにより、振幅強度が大きい周波数成分がある波形ほど最小閾値が小さくなり、周波数成分の数が増えるほどその閾値の周波数は低くなると考えられる。このため、正弦波の場合は周波数成分が1つであるため、最小閾値が360 V、その際の周波数が170 Hzであることもこの考察に当てはまると考えられる。しかし、矩形波は周波数成分の数が多いにも関わらず、最小閾値の周波数が260 Hzであった。これは複数の成分が含まれているにも関わらず、振幅強度が大きい周波数帯が僅かであることが考えられる。

5.3.2 導電糸の配置パターンに関する評価実験

前節の評価実験では、導電糸を縦縞状に設置した触覚ディスプレイを使用した。しかし、この触覚ディスプレイが実際に使われるとなった場合には、この実験のように指の置く向きが一定とは限らない。そこで、指に対する電極の配置パターンを複数用意し、各パターンで差異が表れるかを調査する。

この実験では10個の波形、9つの振幅、3つの電極パターン、そしてそれらの条件を10回ずつ行い、計2700試行の評価を行った。

電極と配置パターン

電極の配置パターンを変えるために、図5.11のような導電糸の配置パターンである、縦縞、横縞、螺旋状の3種類を用意した。これらは直径120 μmのステンレススチールファイバー製

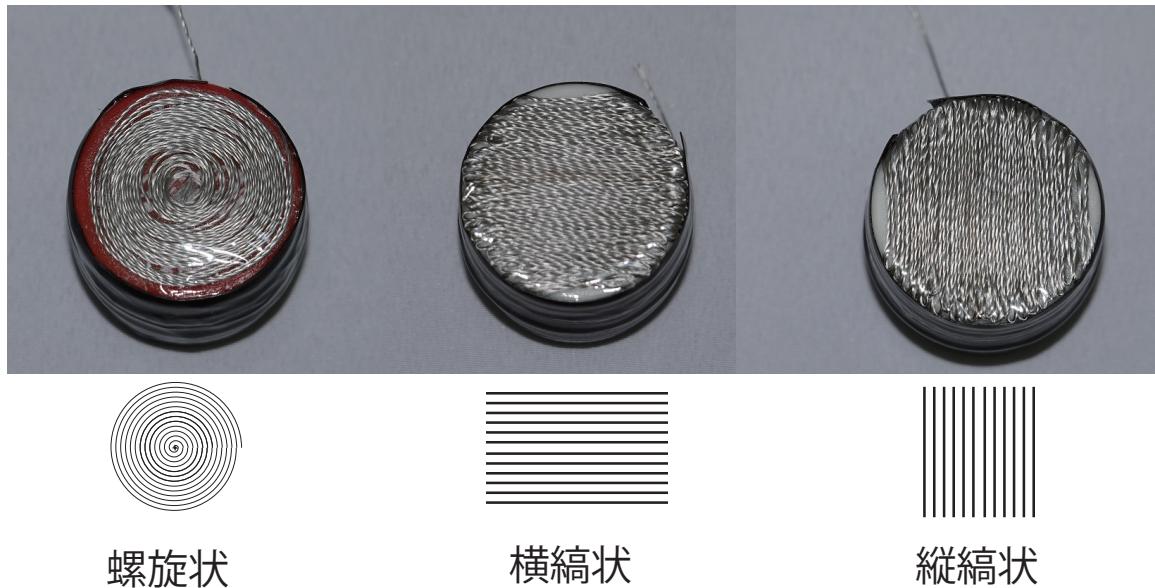


図 5.11: 用意した 3 つの電極配置パターン

の導電糸が用いられ、これまでの装置同様に PET 樹脂のスタンド上に設置された。縦縞状の電極は幅 25 mm、横縞状の電極は縦縞状の電極を 90 度回転したものを用意した。螺旋状の電極は中央から外側に広がっており、スタンドの上面をほとんど埋めるように設置された。

入力波形

今回の評価実験において、電極に印加する入力波形は周波数が 10 Hz から 630 Hz までの 10 個の正弦波を用いた。波形の振幅に関しては 200 V から 600 V までの 9 つの振幅を用意した。これらの波形はランダムに入力され、その順番は実験協力者ごとで異なった。

絶縁膜

絶縁膜は柔らかく薄いポリ塩化ビニリデンのフィルムを用いた。この絶縁膜の厚さは 11 μm である。そしてこの絶縁膜をディスプレイ上に歪みが発生しないようにスタンドの淵付近で接着した。実験協力者が変わるたびに、絶縁膜は新しいのに取り換えられた。

実験協力者

実験協力者は 23 歳から 26 歳の計 8 人の大学院生（うち女性 3 名）を募った。なお、この 8 人の実験協力者は前項の評価実験を実施した者であるが、この実験とは異なる日に評価実験を実施してもらった。

実験手順

評価実験の実験手順として、初めに実験概要を実験協力者に説明し、実験に関する同意を得た。装置から発生する音により、刺激提示の有無が分からぬよう、実験中、実験協力者には耳にホワイトノイズの音が再生されているヘッドホンを着用させた。実験協力者は利き腕に関わらず右手の人差し指の腹を触覚ディスプレイ上に置いてもらい、押下力を保ってもらった。実験中、用意した波形が入力された後に、実験協力者に対して「感じる」と「感じない」の回答を設置してあるキーボードの特定のキーを押下するよう教示した。このタスクをすべての波形で実施してもらった。一つの電極パターンでの評価を終了(900試行)ごとに5分程度の休憩をとった。そして異なる電極パターンでの触覚ディスプレイを用意し、再度評価を実施してもらった。すべての電極パターンで評価が終わった後、実験実施者は実験協力者が評価した結果を収集し、波形ごとの振幅の閾値を算出した。

実験結果

電極の配置パターンごとの実験結果を図5.12に示す。この図は配置パターンごとに波形に対する閾値の結果を示す。このグラフは片対数グラフとなっており、横軸が周波数、縦軸が振幅の閾値を示す。これらのグラフの結果は、振幅の閾値を算出できた実験協力者で平均した結果であり、エラーバーは標準誤差を示す。この結果から、電極の配置パターンごとで閾値の結果に差は表れなかったことが分かった。用意したどの配置パターンでも65 Hz以降では同じような結果となった。65 Hz以降で最大差となったのは46 Vであり、250 Hzでの横縞の電極と縦縞の電極の配置パターンの時であった。これらの結果から周波数に対する各電極配置パターンに対して分散分析を実施した結果、すべての配置パターン間で有意差は確認できなかった ($F(2,18) = 3.55, p = 0.735$)。

考察

今回の実験では配置パターンごとで閾値の結果に差は表れなかった。これに関して、指が触覚を導電糸の線ごとで感じたのではなく、面全体で感じたと考えられる。今回の提案手法では2つの導電糸間で振動を起こすことを想定している。今回の使用した導電糸は直径120 μm が使用された。そのため、振動が発生する間隔も120 μm 以内になると考えられる。しかし人が2点弁別できる閾値は指表面において2 mmから4 mm程度[Wei68]である。つまり、今回の振動は弁別できず、ディスプレイ上の振動が1つの点もしくは面として指が振動を捉えたと考えられる。したがって、導電糸をどの配置パターンにしても同じように触覚を感じたと考えられる。

このことから、静電気力触覚ディスプレイに線状の電極を配置する際に、配置するパターンを考慮することなく間を開けず敷き詰めることによって、配置パターンに関係なくこの手法を利用できると考えられる。

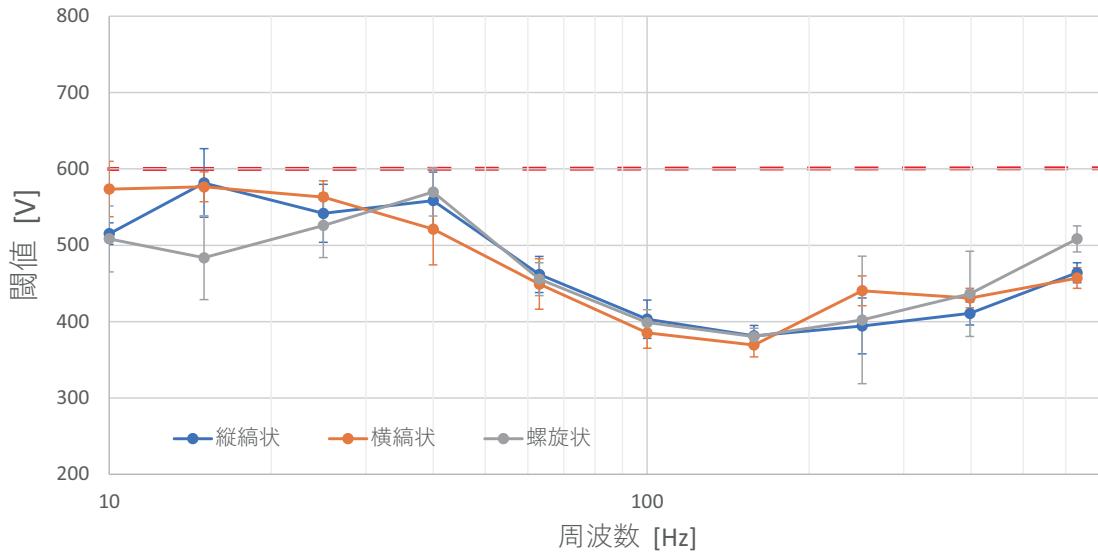


図 5.12: 電極配置パターンごとの波形に対する閾値の結果

5.3.3 電極の材質と直径に関する評価実験

前節では、電極として直径 $120\ \mu\text{m}$ の導電糸が用いられた。ここで電極に関して、振動が発生する際に導電糸自体が変形する可能性がある。指表面または絶縁膜表面が振動しているか、指が電極側に引っ張られることで導電糸が変形し振動しているといった可能性が考えられる。そこで押下力を加えても電極が変形しない材質を用意し、同様な評価実験を実施し、これまでの実験結果と比較する。また線状の電極の直径を変化させることで振幅閾値に影響が表れるかも調査する。これらの検証からこの提案手法を利用した触覚ディスプレイの製作の指針となる。

なお、この評価実験では 10 個の波形、9 つの振幅、2 種類の直径の電極、そしてそれらの条件を 10 回ずつ行い、計 1800 試行の評価を行った。

線状の電極

材質を変える、かつ電極の直径を変えた場合での評価実験を実施するために図 5.13 のようなステンレス製の針金を 2 種類用意した。これらは直径 $280\ \mu\text{m}$ と $550\ \mu\text{m}$ であり、アクリル板上に 5 cm ずつカットされ、縦縞状に並べられた。このアクリル板は PET 樹脂のスタンド上に貼り付けられた。

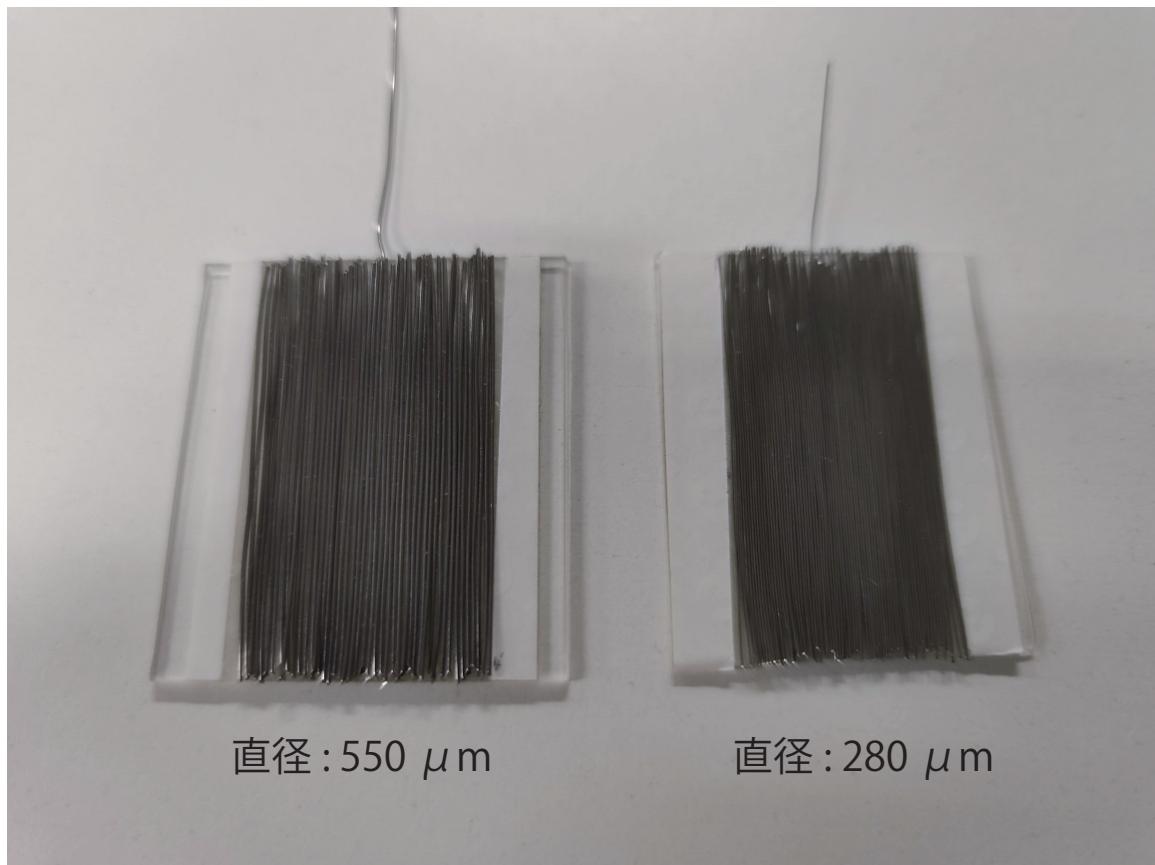


図 5.13: 用意した 2 つの直径の針金による電極

入力波形

今回の評価実験において、電極に印加する入力波形は周波数が 10 Hz から 630 Hz までの 10 個の正弦波を用いた。波形の振幅に関しては 200 V から 600 V までの 9 つの振幅を用意した。これらの波形はランダムに入力され、その順番は実験協力者ごとで異なった。

絶縁膜

絶縁膜は柔らかく薄いポリ塩化ビニリデンのフィルムを用いた。この絶縁膜の厚さは 11 μm である。そしてこの絶縁膜をディスプレイ上に歪みが発生しないようにスタンドの淵付近で接着した。実験協力者が変わるたびに、絶縁膜は新しいものに取り換えられた。

実験協力者

実験協力者は 23 歳から 26 歳の計 8 人の大学院生（うち女性 3 名）を募った。なお、この 8 人の実験協力者は前項の電極の配置パターンに対する評価実験を実施した者であり、この実験の直後に今回の評価実験を実施してもらった。

実験手順

評価実験の実験手順として、初めに実験概要を実験協力者に説明し、実験に関する同意を得た。装置から発生する音により、刺激提示の有無が分からぬよう、実験中、実験協力者には耳にホワイトノイズの音が再生されているヘッドホンを着用させた。実験協力者は利き腕に関わらず右手の人差し指の腹を触覚ディスプレイ上に置いてもらい、押下力を保ってもらった。実験中、用意した波形が入力された後に、実験協力者に対して「感じる」と「感じない」の回答を設置してあるキーボードの特定のキーを押下するよう教示した。このタスクをすべての波形で実施してもらった。一つの電極における評価を終了した後（900 試行）に 5 分程度の休憩をとった。それでもう一つの電極を装着し、再度評価を実施してもらった。すべての評価が終わった後、実験実施者は実験協力者が評価した結果を収集し、波形ごとの振幅の閾値を算出した。

実験結果

直径が異なる電極ごとの波形に対する閾値の結果を図 5.14 に示す。このグラフは片対数グラフとなっており、横軸が周波数、縦軸が閾値となっている。図中の青いグラフである直径 120 μm は前節での導電糸を用いた場合の結果である。オレンジのグラフは直径 280 μm を用いた場合の結果である。灰色のグラフは直径 550 μm を用いた場合の結果である。これらのグラフの結果は、振幅の閾値を算出できた実験協力者で平均した結果であり、エラーバーは標準誤差を示す。

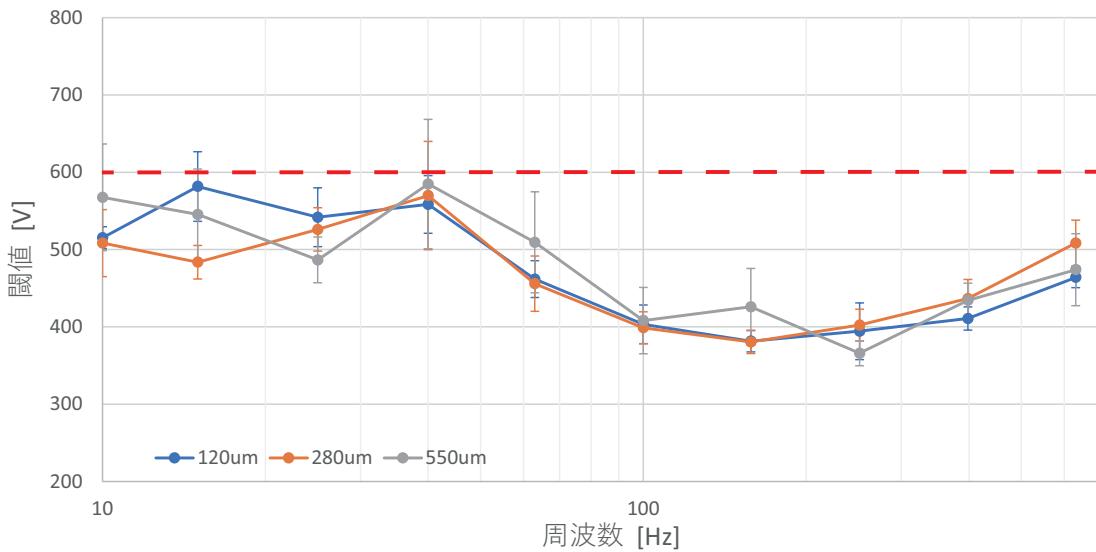


図 5.14: 直径が異なる電極ごとの波形に対する閾値の結果

今回の実験結果から、導電糸を用いた場合や、直が異なるステンレス線を使用した場合でも差異が見られることはなかった。図 5.14において、入力波形が 40 Hz 未満では半分以上の実験協力者が直径 280 μm と 550 μm のステンレス線で触覚を感じ取れなかった。100 Hz と 160 Hz ではすべての実験協力者が触覚を感じ取ることができた。図 5.14 の結果から、どの電極でも下に凸のようなグラフとなり、40 Hz 以降ではすべての波形で同じような結果となつた。これら電極間で周波数に対する分散分析を行った結果、3 つの電極間での有意差は確認できなかった ($F(2,18) = 3.52, p = 0.554$)。直径 280 μm での最小閾値は 380 V で、その時の周波数は 158 Hz であった。また直径 550 μm での最小閾値は 366 V で、その時の周波数は 251 Hz であった。

考察

今回の実験で電極の直径を変えて振幅閾値を調査したが、どの条件でも差異は見られなかつた。この結果に関して、振動の発生箇所の間隔が要因であると考えられる。

電極の直径が大きいほど電極間の距離が長くなり、絶縁膜のたわむことが可能な量が大きくなる。たわみ量が増えれば触覚を感じやすくなると考えたが、実験の結果ではすべてのグラフで有意差は確認されなく、ほとんどの実験協力者が触覚を感じた 65 Hz 以上ではグラフにほとんどの差異がなかった。平行板静電アクチュエータの原理上、電極と絶縁膜間の距離が離れすぎるとこの非静止電極である指表面に力が発生しにくくなる。そのため、電極と絶縁膜の接点付近で振動が発生していると考えられる。したがって電極の直径が大きいほど、この振動の発生源の間隔が広くなると考えられる。今回使用した直径 120 μm の電極の場合と直径 550 μm の電極の場合では、振動が発生しない領域が直径 550 μm のほうが広くなつたた

め、たわみ可能な量が大きくて小さな直径の電極と比べて閾値に差が生まれにくかったと考えられる。

5.4 本章のまとめ

本章では静電気力を用いた触覚ディスプレイにおいて静止した指への触覚提示を目的とし、これを可能とする手法を提案、そして実装し、さらに評価実験を通して触覚提示に必要な制約条件を議論した。

静電気力触覚ディスプレイ上で静止した指への触覚提示を可能とするために、絶縁膜と電極間にわずかな空間を設けることで絶縁膜または指を振動させることを考案した。この提案手法を実装する際に、縦縞状に並べた導電糸を用いることで絶縁膜と電極の間に僅かな空間を作ることができた。そしてこの提案手法で触覚を提示できるかどうかを調査するために、恒常法による評価実験を実施した。この評価実験では入力波形として3つの波形(正弦波、矩形波、デルタ関数)を用意し、各波形の主周波数を変え、それらの波形ごとで何かしらの触覚を「感じるか」、または「感じないか」を実験協力者に回答してもらった。

この結果、入力波形を正弦波やデルタ関数とした場合、限られた周波数帯であれば触覚を提示できることが分かった。また、今回調査した周波数帯において、矩形波を入力することでほとんどの実験協力者が触覚を感じ取ることができた。恒常法による評価実験から、各波形の触覚を知覚させるための波形の振幅の閾値を算出した。正弦波を入力した場合の最小閾値は、360 V となり、この際の入力波形の周波数は 200 Hz であった。矩形波を入力した場合でも、同様に主周波数が 200 Hz 付近で最小閾値である 370 V となった。しかし正弦波とは異なり、低い周波数帯でも閾値が 400 V から 500 V の間になることが分かった。これらの要因として、波形に含まれる周波数成分と、指の機械受容器との関係性にあると考えた。

また、入力波形に対する振幅の閾値を算出できた実験協力者の数やその閾値において、押下力ごとで結果が異なることが分かった。押下力を強くすると触覚を感じにくくなり、閾値も上がることが分かった。この要因として指の押す力に対する最小差知可異の比率の関係であると考えており、押下力が強くなった際に、この触覚ディスプレイで提示できる知覚量が飽和し、相対的に知覚量が小さくなつたため触覚を感じ取りにくくなつたと考えられる。

本研究ではさらに、この提案手法の制約を調査するために、周波数成分に着目した波形を用意し、どのような周波数成分の構成であればこの閾値に影響があるか、また導電糸の配置パターンや電極をステンレス線に変えることで、閾値に影響があるのかを調査した。

これらの実験結果から、振幅強度が大きい周波数成分がある波形ほど最小閾値が小さくなり、周波数成分の数が増えるほど触覚を感じ取れる周波数帯が広がることが分かった。また、今回用意した電極の配置パターンがどれであっても、閾値に差異はなかった。電極の材質に関して、今回用意した直径 280 μm のステンレス線や直径 550 μm のステンレス線を用いた場合でも、導電糸を用いた場合と閾値に差異はなかった。これにより、今回用意した直径の範囲であれば導電糸やステンレス線でも、またどのような配置設定でも同様な触覚提示が可能であると考えられる。

第6章 結論

本研究は、静電気力触覚ディスプレイを用いた触図提示手法における図形認識の向上のために、静電気力触覚ディスプレイの課題を調査及び開発によって取り組み、評価実験を通して以下のような静電気力触覚ディスプレイでの触図提示に必要な要素を明らかにした。

- 「粗い」触感を提示する入力信号を使うことで触覚をより強く感じさせることが可能である
- 静電気力触覚ディスプレイが複数指による触察に対応することで図形識別率が向上する
- 並べられた線状の電極を使用することにより静電気力触覚ディスプレイ上の静止した指への触覚提示が可能となる

本研究では、初めに静電気力触覚ディスプレイにおいて入力波形に対する触感と知覚強度に関する評価実験を実施した。触感に関する実験では、限定した日本語のオノマトペを用いて評価し、この結果、粗い表現や滑らかな表現、他にも「ぶつぶつ」といった離散的な触感を表現できることが分かった。今回の調査によって、より詳細な周波数における波形を用いたことで、静電気力触覚ディスプレイが表現できる触感の特徴を波形ごとで可視化することができた。またそれらの触感がどれほどどの強さで感じられるのかを示す知覚強度について、マグニチュード推定法を用いて調査した。この調査結果から波形によって知覚強度が異なることが分かり、その要因を波形に含まれる周波数成分と指に備わる機械受容器の関係性にあると考察した。そしてこの考察を検証するために本研究では知覚強度に関する簡易モデルを作成し、実際に得られた実験結果とこのモデルによる推定値を比較した。その結果、一部の推定が可能となり、この結果から、知覚強度をある程度予測することが可能となった。

次に静電気力触覚ディスプレイにおける複数指による触察の有効性とその触察でどれほど図形を認識できるのかを調査した。これまでの静電気力触覚ディスプレイのほとんどは、ディスプレイの全面に単一電極を設置したため、一本指による触察が余儀なくされた。このため、この触察手法での図形の識別度が低く、提示できる図形情報に限りがあった。そこで複数指による触察での詳細な図形情報の取得を見込み、本研究では基本的な図形の識別に関する調査と複雑な図形の認識に関する調査を実施した。これらの実験では、複数指による触察を可能とするために、銀ナノインクで図形を印刷した触覚ディスプレイを複数用意した。図形識別に関する実験では、これらの触覚ディスプレイを触察し、決められた選択肢から選んでもらった。この実験から一本指による触察と比べ、複数指による触察のほうが図形を識別するのに有効であることが示された。また図形認識に関する実験では、触覚ディスプレイ上で触察し、提示された図形を実際に紙に描いてもらった。この実験から、複数指での触察によっ

て図形の位置や大まかな大きさの把握、大きな図形や複雑な図形の概形を取得できることができることが見込まれた。また、これらの実験で使用した触覚ディスプレイは一つのディスプレイにつき一つの図形情報しか提示できない。そこで複数電極を用いて動的に触覚を提示する領域を変更できるデバイスを開発しどれほど図形を認識できるかを評価した。

最後に静止した指への触覚提示を可能とするために、導電糸を用いた触覚ディスプレイを考案した。この手法は従来の静電気力触覚ディスプレイとほぼ同じ構造としながらも、電極を導電糸に変えることで指と電極の間にわずかなスペースを作り出した。そして導電糸に高電圧波形を印加することで指への触覚提示を試みた。この導電糸を用いた触覚ディスプレイが実際に触覚を提示できるかを調査するために、恒常法を用いた評価実験を実施した。この結果、一部の波形を用いれば静止した指への触覚提示の可能性が示された。そして、この触覚提示に関する制約条件を調査するために、入力する波形の追加、押下力を変えての実験、電極に使用する材質や配置パターンを変えての実験を実施した。これらの結果から、波形に含まれる周波数成分の構成によって触覚提示に必要な波形の振幅閾値が変化する可能性が示され、押下力を強くするほど触覚を知覚しにくくなることも分かった。そして電極の配置パターンや材質に関わらず触覚を提示できること、そして今回用意した直径 0.55 mm のステンレス線でも触覚提示が可能であることが分かった。

6.1 本研究の貢献

本研究の貢献を以下に述べる。

静電気力触覚ディスプレイが提示できる触感の分布の可視化、及び触感の強さを表す知覚強度を把握することができ、触図提示システムにおいて図形の輪郭線を効果的に認識させるための入力信号を明らかにした。静電気力触覚ディスプレイが提示する触感に関して、「ごつごつ」といった粗い表現、「さらさら」といった滑らかな表現、「ぷつぶつ」といった離散的な触感表現のように、多様性のあるテクスチャ感を提示できることが示された。また、同じ波形の種類でも主周波数が異なる、または主周波数が同じでも波形に含まれる周波数成分の構成が異なることによって、知覚強度に差が表れることが分かり、入力波形から知覚強度を推測する簡易的なモデルを作成することで大まかな知覚強度の推測が可能となった。これらの触感の調査から、輪郭線以外の活用として図形情報の一つである図形の色に対応した触感を付加するといった応用が可能である。また、触図以外の分野でも、商品の表面のテクスチャ感を端末上のスクリーンで表現するアプリケーションを考えた際に、本研究の触感を可視化したマップや知覚強度を求めるモデルを利用することが可能である。

一本指による触察に比べて複数指による触察のほうが図形を把握するのに有用であることが分かり、静電気力触覚ディスプレイが触図提示システムとして利用するために複数指への対応の必要性を示した。さらに実験時の実験協力者の指を動かす様子を観察することで、静止した指に触覚を提示できないことを除き、静電気力触覚ディスプレイでも他の触覚ディスプレイと同様な触察戦略が行われていることが分かった。

また、これまで難しかった静電気力触覚ディスプレイでの静止した指への触覚提示を線状

の電極を用いることで可能にした。さらに、この触覚提示手法を利用するにあたり、入力信号の制約や押下力の条件を明らかにした。入力信号の制約に関しては、波形の種類によって一部の周波数帯でのみ触覚提示が可能であることが分かった。押下力に関しては、静電気力触覚ディスプレイに対して垂直方向に強く押すほど触覚を感じ取りにくくなることも分かった。本研究の成果によって、触覚提示手法を利用する用途が広がった。特に導電糸を用いた触覚提示を行えたことによって、手袋といった衣類に本手法による振動発生装置を内蔵させることも可能となる。

6.2 今後の展望

本研究の今後の展望として、以下の三つが挙げられる。

6.2.1 触図へのインタラクティブな操作や多種な触図の提示を可能にするハードウェアの実装

本研究において、複数電極を用いた触覚提示により触覚提示領域を動的に変更できる装置を開発した。これにより単純な図形であればユーザへ図の情報を提示することが可能となり、さらに動的な図の切り替えも可能であることから、縮小拡大表示といった図の描画をリアルタイムでユーザに提示できるようになった。またアニメーション提示も可能であり、指に対して点や線の動きをユーザに提示することも可能である。

この開発した静電気力触覚ディスプレイに対して、指の位置の検出機能の付加や、電極の再設計。透明素材を使用したハードウェア構築を行うことで、図6.1の下部のような触図提示システムが可能となり、より実用性が向上する触図提示システムとなる。

指の位置検出に関して、赤外線による検出や各電極での静電容量による検出による指の位置推定の機能を加えることで、指の位置やジェスチャに合わせた触図に対するインタラクティブな操作が可能となる。また指の動きに合わせた波形を生成することで提示するテクスチャの空間周波数を制御することができ、よりリアルな触覚体験が可能となる。

電極の再設計に関して、複数電極の密度を上げること、また各電極の表面を凹凸状にすることによって図形の認識度が向上すると考えられる。複数電極の密度を増やすことでディスプレイで提示できる図の解像度が上がり、より細かい図の形状を表現できることで、ユーザの図形の認識度が向上すると考えられる。また、電極面を凹凸状にすることで静止した指への触覚提示が可能となるため、提示された図の境界線が捉えやすくなり、図形の認識度が向上すると考えられる。図形の認識度が向上することで、提示できる図の種類も増え、より実用的な触覚ディスプレイが見込まれる。

さらにこの複数電極を用いた静電気力触覚ディスプレイをITO電極や透明な絶縁膜の素材で製造することで、タブレット端末のような映像スクリーンでの触図の体験が可能となる。このような視覚情報と触覚情報を提示できる装置によって、視覚障害者だけではなく健常者

にも利用することができ、両者同士がこの装置をコミュニケーションツールとして実用することも見込まれる。

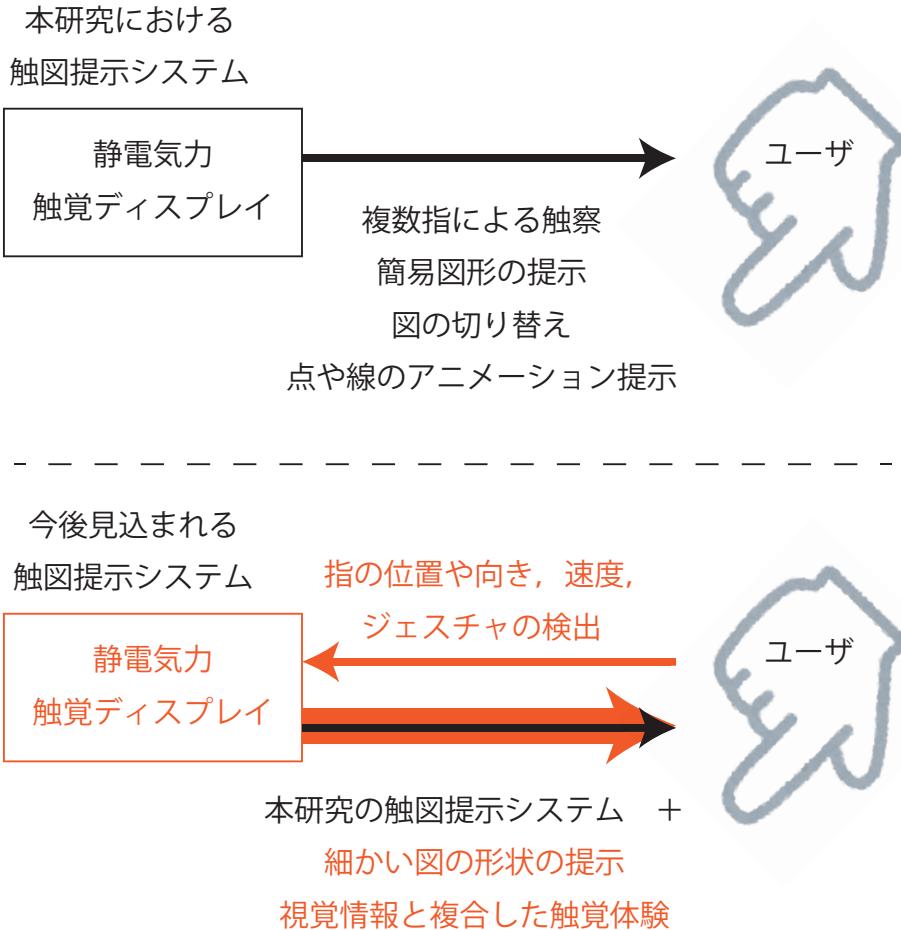


図 6.1: 本研究における静電気力触覚ディスプレイを用いた触図提示システムと今後に見込まれる触図提示システム

6.2.2 複数の触感を用いた付加情報の提示に関する展望

本研究による触感調査の結果、静電気力触覚ディスプレイは複数の触感を提示できることが分かった。これらの触感は材質のテクスチャ感を表現する用途にも使用できる。この用途以外として、触図に何かしらの情報を付加するといったことが考えられる。

付加情報の例として、色情報の付加が考えられる。例えば、デルタ関数の周波数が低い時、つまり離散的な触感の場合を黒に設定し、粗い触感の場合を白に設定することで 2 色の図形情報を提示することができる。また矩形波の周波数を調整することで、低周波の「ごりごり」

といった空間周波数が低い表現を黒、高周波の「じよりじより」といった空間周波数が高い表現を白といった、グレースケールのような色情報を提示できることも見込まれる。また、色だけではなく、テクスチャごとに数字や文字といった情報に置き換えることも考えられる。今後、触感の識別に関する評価実験を実施することで、触感を識別できる度合を調査し、この度合にあった付加情報を設定することが可能になると考えらえる。

さらに、本研究で開発した装置では一つの波形しか出力することができなく、そのため触覚ディスプレイ上で同時に一つの触感しか提示できない。今後、複数の波形を同時に出力できるデジタル-アナログ（DA）変換器を用いることで、複数の図形ごとで異なる触感を同時に提示できると考えられる。これにより、触図提示装置として表現力が拡張した触覚ディスプレイが見込まれる。

6.2.3 視覚障害者を対象とした静電気力触覚ディスプレイの図形認識評価に関する展望

本研究では、単純な図形を静電気力触覚ディスプレイを用いて図形認識の向上を目的とし、実験協力者として健常者に評価してもらうことで、どのような結果となるかを調査した。単純な図形を評価する場合では、健常者と視覚障害者で図形の認識に同じような傾向があるが、複雑な図の提示となると両者の認識に異なる場合がある [Kwok04, Kwo01b, Kwo01a]。将来的に複雑な図の提示も考慮するために、視覚障害者を実験協力者とした実験結果の収集及び分析を実施していく必要がある。そしてこの実験結果を踏まえ、実用性のあるハードウェアの改善、図のレンダリング手法および静電気力触覚ディスプレイを用いたアプリケーションの開発を行っていく必要がある。

謝辞

本研究を行うに当たり、多くの方々による時間、金銭、精神的援助をいただきました。

指導教員の高橋伸先生には、研究指導を行って頂き、また多くの相談に乗っていただきました。ご多忙の中、筆者に合わせて休日または平日の夜の遅い時間に研究指導など、臨機応変にご対応いただきました。博士論文を締めるところまで筆者が到達できたのは高橋先生の御助力あってのことです。深く感謝申し上げます。また熊本大学の嵯峨智先生には副査も含め触覚分野に関する助言を多くしていただき、ここまで多くの論文を執筆することが出来ました。深く感謝申し上げます。

主査の志築文太郎先生、副査の田中二郎先生、大矢昇久先生、井野秀一先生には本研究の予備審査の際に様々なご意見と知見を頂戴いたしました。特に田中二郎先生には筆者の学士課程、修士課程時代よりお世話になっており、コンピュータインタラクションにおける研究において参考となる知見も提示していただきました。深く感謝申し上げます。

インタラクティブプログラミング研究室の皆様にも、研究活動において様々な意見を頂きました。また実験を行った際にも自身が忙しい身の上でありながらも、数回に渡り、長時間の実験に辛抱強く付きあってくださいましたことをお礼申し上げます。誠にありがとうございました。

電気通信大学の梶本裕之先生には研究をしていく上で、重要な高電圧発生装置を開発していただきました。この装置があったことで、静電気力触覚ディスプレイの研究を促進することができました。

最後に、私の6年間に及ぶ研究生活においてお世話になった様々な人々に感謝を告げて、謝辞を終わらせていただきます。本当にありがとうございました。

参考文献

- [BFB⁺17] Rupert RA Bourne, Seth R Flaxman, Tasanee Braithwaite, Maria V Cicinelli, Aditi Das, Jost B Jonas, Jill Keeffe, John H Kempen, Janet Leasher, Hans Limburg, et al. Magnitude, temporal trends, and projections of the global prevalence of blindness and distance and near vision impairment: a systematic review and meta-analysis. *The Lancet Global Health*, Vol. 5, No. 9, pp. e888–e897, 2017.
- [BKRS70] James C. Bliss, Michael H. Katcher, Charles H. Rogers, and Raymond P. Shepard. Optical-to-tactile image conversion for the blind. *IEEE Transactions on Man-Machine Systems*, Vol. 11, No. 1, pp. 58–65, 1970.
- [BLB⁺18] Luca Brayda, Fabrizio Leo, Caterina Baccelliere, Elisabetta Ferrari, and Claudia Vignini. Updated tactile feedback with a pin array matrix helps blind people to reduce self-location errors. *Micromachines*, Vol. 9, No. 7, p. 351, 2018.
- [BP19] Sindhu Preetham Burugupally and W Roshantha Perera. Dynamics of a parallel-plate electrostatic actuator in viscous dielectric media. *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 295, pp. 366–373, 2019.
- [BPIH10] Olivier Bau, Ivan Poupyrev, Ali Israr, and Chris Harrison. Teslatouch: Electrovibration for touch surfaces. In *Proceedings of the 23Nd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST’10, pp. 283–292, New York, NY, USA, 2010. ACM.
- [BTO⁺15] Anke M Brock, Philippe Truillet, Bernard Oriola, Delphine Picard, and Christophe Jouffrais. Interactivity improves usability of geographic maps for visually impaired people. *Human–Computer Interaction*, Vol. 30, No. 2, pp. 156–194, 2015.
- [BZB⁺18] Amelia Bateman, Oliver K Zhao, Andrea V Bajcsy, Mathew C Jennings, Bryan N Toth, Alexa J Cohen, Emily L Horton, Anish Khattar, Ryan S Kuo, Felix A Lee, et al. A user-centered design and analysis of an electrostatic haptic touchscreen system for students with visual impairments. *International Journal of Human-Computer Studies*, Vol. 109, pp. 102–111, 2018.

-
- [ČBH⁺16] Petr Červenka, Karel Břinda, Michaela Hanousková, Petr Hofman, and Radek Seifert. Blind friendly maps: Tactile maps for the blind as a part of the public map portal (mapy.cz). *arXiv preprint arXiv:1603.09520*, 2016.
- [CCP10] Erik C. Chubb, J. Edward Colgate, and Michael A. Peshkin. Shiverpad: A glass haptic surface that produces shear force on a bare finger. *IEEE Transactions on Haptics*, Vol. 3, No. 3, pp. 189–198, 2010.
- [Cra85] James C. Craig. Attending to two fingers: two hands are better than one. *Perception & Psychophysics*, Vol. 38, No. 6, pp. 496–511, 1985.
- [FSH19] Tetsuki Fukuda, Kyouhei Shimazu, and Yuki Hashimoto. Basic characteristics of printable large-area electrostatic tactile display. In *2019 IEEE World Haptics Conference (WHC)*, pp. 497–502. IEEE, 2019.
- [GBH01] George A. Gescheider, Stanley J. Bolanowski, and Kathleen R. Hardick. The frequency selectivity of information-processing channels in the tactile sensory system. *Somatosensory & Motor Research*, Vol. 18, No. 3, pp. 191–201, 2001.
- [GBMJ17] Stéphanie Giraud, Anke M Brock, Marc J-M Macé, and Christophe Jouffrais. Map learning with a 3d printed interactive small-scale model: Improvement of space and text memorization in visually impaired students. *Frontiers in psychology*, Vol. 8, p. 930, 2017.
- [Göt16] Timo Götzemann. Lucentmaps: 3d printed audiovisual tactile maps for blind and visually impaired people. In *Proceedings of the 18th international ACM Sigaccess conference on computers and accessibility*, pp. 81–90, 2016.
- [GZW⁺18] Xingwei Guo, Yuru Zhang, Dangxiao Wang, Lei Lu, Jian Jiao, and Weiliang Xu. Correlation between electrovibration perception magnitude and the normal force applied by finger. In *International Conference on Human Haptic Sensing and Touch Enabled Computer Applications*, pp. 91–101. Springer, 2018.
- [HIKM16] Ryuhei Hatada, Hiroki Ishizuka, Makoto Kawazoe, and Norihisa Miki. Haptoskin-a flexible sheet-type tactile display with a cnt electrode. In *Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), 2016 IEEE 29th International Conference on*, pp. 1145–1148. IEEE, 2016.
- [HMB18] Leona Holloway, Kim Marriott, and Matthew Butler. Accessible maps for the blind: Comparing 3d printed models with tactile graphics. In *Proceedings of the 2018 chi conference on human factors in computing systems*, pp. 1–13, 2018.

-
- [HWAK11] Hsin-Ni Ho, Junji Watanabe, Hideyuki Ando, and Makio Kashino. Mechanisms underlying referral of thermal sensations to sites of tactile stimulation. *Journal of Neuroscience*, Vol. 31, No. 1, pp. 208–213, 2011.
- [IS18] Gholamreza Ilkhani and Evren Samur. Creating multi-touch haptic feedback on an electrostatic tactile display. In *2018 IEEE Haptics Symposium (HAPTICS)*, pp. 163–168. IEEE, 2018.
- [IYK16] Ryosuke Ichikari, Tenshi Yanagimachi, and Takeshi Kurata. Augmented reality tactile map with hand gesture recognition. In *International Conference on Computers Helping People with Special Needs*, pp. 123–130. Springer, 2016.
- [KIKM18] Kunihiro Kato, Hiroki Ishizuka, Hiroyuki Kajimoto, and Homei Miyashita. Double-sided printed tactile display with electro stimuli and electrostatic forces and its assessment. In *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 1–12, 2018.
- [KKC⁺17] Jeonggoo Kang, Heewon Kim, Seungmoon Choi, Ki-Duk Kim, and Jeha Ryu. Investigation on low voltage operation of electrovibration display. *IEEE transactions on haptics*, 2017.
- [KMKI17] Kunihiro Kato, Homei Miyashita, Hiroyuki Kajimoto, and Hiroki Ishizuka. Tactile element with double-sided inkjet printing to generate electrostatic forces and electros-timuli. In *Adjunct Publication of the 30th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp. 31–33. ACM, 2017.
- [Kwo01a] Misa Grace Kwok. Dual figure recognition by tactile stimulation : Difference between the blind and the non-blind. *Proceedings of the Third International Conference on Congnitive Science*, 2001.
- [Kwo01b] Misa Grace Kwok. 触覚による図形知覚に関する実験的検討-触図形の最適性と基礎図形知覚について-. 日本認知科学会第 18 回大会, 発表論文集, 2001.
- [Kwok04] Misa Grace Kwok, 福田忠彦. 感覚特性に基づく触地図作成法の提案. ヒューマンインターフェース学会研究報告集, 第 6 卷, pp. 55–62, 2004.
- [LBW⁺18] Fabrizio Leo, Caterina Bacchieri, Aleksander Waszkielewicz, Elena Cocchi, and Luca Brayda. Tactile symbol discrimination on a small pin-array display. In *Proceedings of the 2018 Workshop on Multimedia for Accessible Human Computer Interface*, pp. 9–15, 2018.
- [LK87] Susan J Lederman and Roberta L Klatzky. Hand movements: A window into haptic object recognition. *Cognitive psychology*, Vol. 19, No. 3, pp. 342–368, 1987.

-
- [MFK⁺07] Kouta Minamizawa, Souichiro Fukamachi, Hiroyuki Kajimoto, Naoki Kawakami, and Susumu Tachi. Gravity grabber: wearable haptic display to present virtual mass sensation. In *ACM SIGGRAPH 2007 emerging technologies*, p. 8. ACM, 2007.
- [MHSJ53] Edward Mallinckrodt, AL Hughes, and William Sleator Jr. Perception by the skin of electrically induced vibrations. *Science*, 1953.
- [MM16] Mike McLinden and Steve Mccall. *Learning through touch: Supporting children with visual impairments and additional difficulties*. Routledge, 2016.
- [OHRT14] Yoichi Ochiai, Takayuki Hoshi, Jun Rekimoto, and Masaya Takasaki. Diminished haptics: Towards digital transformation of real world textures. In *International Conference on Human Haptic Sensing and Touch Enabled Computer Applications*, pp. 409–417. Springer, 2014.
- [OKM⁺07] Masahiro Ohka, Hiroshi Koga, Yukihiro Mouri, Tokuhiro Sugiura, Tetsu Miyaoka, and Yasunaga Mitsuya. Figure and texture presentation capabilities of a tactile mouse equipped with a display pad of stimulus pins. *Robotica*, Vol. 25, No. 4, pp. 451–460, 2007.
- [PFH90] Kristopher SJ Pister, Ronald S Fearing, and Roger T Howe. A planar air levitated electrostatic actuator system. In *IEEE Proceedings on Micro Electro Mechanical Systems, An Investigation of Micro Structures, Sensors, Actuators, Machines and Robots.*, pp. 67–71. IEEE, 1990.
- [PRKK14] Dongbum Pyo, Semin Ryu, Seung-Chan Kim, and Dong-Soo Kwon. A new surface display for 3d haptic rendering. In *International Conference on Human Haptic Sensing and Touch Enabled Computer Applications*, pp. 487–495. Springer, 2014.
- [PWS10] Denise Prescher, Gerhard Weber, and Martin Spindler. A tactile windowing system for blind users. In *Proceedings of the 12th international ACM SIGACCESS conference on Computers and accessibility*, pp. 91–98, 2010.
- [SS75] S Stevens Stanley. Psychophysics: Introduction to its perceptual, neural and social prospects. New York, Wiley, 1975.
- [SSGY17] Ryo Suzuki, Abigale Stangl, Mark D Gross, and Tom Yeh. Fluxmarker: Enhancing tactile graphics with dynamic tactile markers. In *Proceedings of the 19th International ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility*, pp. 190–199, 2017.
- [SVD⁺16] Sarah Stevens, Jose M Valderas, Tim Doran, Rafael Perera, and Evangelos Kontopan telis. Analysing indicators of performance, satisfaction, or safety using empirical logit transformation. *bmj*, Vol. 352, , 2016.

-
- [TAW⁺19] Hirobumi Tomita, Shotaro Agatsuma, Ruiyun Wang, Shin Takahashi, Satoshi Saga, and Hiroyuki Kajimoto. An investigation of figure recognition with electrostatic tactile display. In *International Conference on Human-Computer Interaction*, pp. 363–372. Springer, 2019.
- [TDSS16] Brandon Taylor, Anind Dey, Dan Siewiorek, and Asim Smailagic. Customizable 3d printed tactile maps as interactive overlays. In *Proceedings of the 18th International ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility*, pp. 71–79, 2016.
- [TSK16] Hirobumi Tomita, Satoshi Saga, and Hiroyuki Kajimoto. Multi-electrodes-based electrostatic tactile display. In *International AsiaHaptics conference*, pp. 171–174. Springer, 2016.
- [TYI17] Takeshi Tanabe, Hiroaki Yano, and Hiroo Iwata. Temporal characteristics of non-grounded translational force and torque display using asymmetric vibrations. In *World Haptics Conference (WHC), 2017 IEEE*, pp. 310–315. IEEE, 2017.
- [USKK16] Haruya Uematsu, Masaki Suzuki, Yonezo Kanno, and Hiroyuki Kajimoto. Tactile vision substitution with tablet and electro-tactile display. In *International Conference on Human Haptic Sensing and Touch Enabled Computer Applications*, pp. 503–511. Springer, 2016.
- [VAGLS14] Eric Vezzoli, Michel Amberg, Frédéric Giraud, and Betty Lemaire-Semail. Electrovibration modeling analysis. In *International Conference on Human Haptic Sensing and Touch Enabled Computer Applications*, pp. 369–376. Springer, 2014.
- [VGB16] Yasemin Vardar, Burak Güçlü, and Cagatay Basdogan. Effect of waveform in haptic perception of electrovibration on touchscreens. In *International Conference on Human Haptic Sensing and Touch Enabled Computer Applications*, pp. 190–203. Springer, 2016.
- [VGB17] Yasemin Vardar, Burak Güçlü, and Cagatay Basdogan. Effect of waveform on tactile perception by electrovibration displayed on touch screens. *IEEE transactions on haptics*, Vol. 10, No. 4, pp. 488–499, 2017.
- [VHP12] Ramiro Velázquez, Hermes Hernández, and Enrique Preza. A portable piezoelectric tactile terminal for braille readers. *Applied Bionics and Biomechanics*, Vol. 9, No. 1, pp. 45–60, 2012.
- [ViSB17] Yasemin Vardar, Aykut İşleyen, Muhammad K. Saleem, and Cagatay Basdogan. Roughness perception of virtual textures displayed by electrovibration on touch screens. In *2017 IEEE World Haptics Conference (WHC)*, pp. 263–268. IEEE, 2017.

-
- [VWB08] Thorsten Völkel, Gerhard Weber, and Ulrich Baumann. Tactile graphics revised: the novel brailledis 9000 pin-matrix device with multitouch input. In *International conference on computers for handicapped persons*, pp. 835–842. Springer, 2008.
- [Wei68] Sidney Weinstein. Intensive and extensive aspects of tactile sensitivity as a function of body part, sex and laterality. *The skin senses*, pp. 195–222, 1968.
- [WHM⁺12] Junji Watanabe, Tomohiko Hayakawa, Shigeru Matsui, Arisa Kano, Yuichiro Shimizu, and Maki Sakamoto. Visualization of tactile material relationships using sound symbolic words. *Haptics: Perception, Devices, Mobility, and Communication*, pp. 175–180, 2012.
- [XIP⁺11] Cheng Xu, Ali Israr, Ivan Poupyrev, Olivier Bau, and Chris Harrison. Tactile display for the visually impaired using teslatouch. In *CHI'11 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, pp. 317–322. 2011.
- [YKJ09] Gi-Hun Yang, Dong-Soo Kwon, and Lynette A Jones. Spatial acuity and summation on the hand: The role of thermal cues in material discrimination. *Attention, Perception, & Psychophysics*, Vol. 71, No. 1, pp. 156–163, 2009.
- [YL07] Fung-Huei Yeh and Shih-Hao Liang. Mechanism design of the flapper actuator in chinese braille display. *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 135, No. 2, pp. 680–689, 2007.
- [ZGGF19] Kai Zhang, Eric J Gonzalez, Jianglong Guo, and Sean Follmer. Design and analysis of high-resolution electrostatic adhesive brakes towards static refreshable 2.5 d tactile shape display. *IEEE Transactions on Haptics*, Vol. 12, No. 4, pp. 470–482, 2019.
- [一刈 15] 一刈良介, 蔡田武志. 外出前学習のための拡張現実型触地図. 感覚代行シンポジウム, Vol. 41, pp. 21–24, 2015.
- [岩村 01] 岩村吉晃. タッチ(神経心理学コレクション). 医学書院, 2001.
- [黒澤 19] 黒澤諭. 質感と触感の出力—2.5 d プリントシステムが生まれるまで—. 日本画像学会誌, Vol. 58, No. 1, pp. 147–149, 2019.
- [坂井 10] 坂井忠裕, 半田拓也, 伊藤崇之, 伊福部達, 湯山一郎. Gui や表を伝える触覚インターフェースとアクセシビリティ評価. ヒューマンインタフェース学会論文誌, Vol. 12, No. 1, pp. 81–91, 2010.
- [山本 08] 山本卓, 内田優典, 島田茂伸, 篠原正美, 下条誠, 清水豊. インタラクティブ型触覚グラフィックディスプレイのユーザインタフェース向上とその応用(「ハaptic インタラクション」特集). 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 13, No. 1, pp. 49–57, 2008.

-
- [森ま 11] 森まゆ, 佐島毅, 青松利明. 点図の線における点サイズと点間隔の要因が直交する 2 線の識別容易性に及ぼす影響. 特殊教育学研究, Vol. 48, No. 5, pp. 337–349, 2011.
- [早川 10] 早川智彦, 松井茂, 渡邊淳司. オノマトペを利用した触り心地の分類手法(<特集>アート & エンタテインメント 2). 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 15, No. 3, pp. 487–490, 2010.
- [大岡 05] 大岡昌博, 古賀宏嗣, 宮岡徹, 三矢保永. 高密度ピンアレイ形触覚マウスによる格子状仮想テクスチャ呈示. 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 71, No. 711, pp. 3174–3180, 2005.
- [長尾 17] 長尾博. 点図読み取り指導プログラムの開発における段階的指導に適した触図課題の作成とその排列に関する研究. 宮城教育大学特別支援教育総合研究センター研究紀要, Vol. 12, pp. 12–29, 2017.
- [渡辺 00] 渡辺哲也, 久米祐一郎, 伊福部達. 触覚マウスによる図形情報の識別. 映像情報メディア学会誌, Vol. 54, No. 6, pp. 840–847, 2000.
- [渡辺 13] 渡辺哲也, 渡部謙, 山口俊光, 南谷和範, 大内進, 宮城愛美, 高岡裕, 喜多伸一. 立体コピー触地図の触読性の評価. 電子情報通信学会論文誌 D, Vol. 96, No. 4, pp. 1075–1078, 2013.
- [渡辺 18] 渡辺哲也, 加賀大嗣, 小林真, 南谷和範. 視覚障害者のための触図訳サービスに関する調査. ヒューマンインターフェース学会論文誌, Vol. 20, No. 2, pp. 147–152, 2018.
- [土井 14] 土井幸輝, 西村崇宏, 藤本浩志. 紫外線硬化樹脂点字のマス間隔比が触読性に及ぼす影響. 国立特別支援教育総合研究所研究紀要, Vol. 41, pp. 27–36, 2014.
- [島田 08] 島田茂伸, 篠原正美, 安彦成泰, 下条誠. オプタコンの機械特性と人間の触覚特性との適合度に関する研究. 電子情報通信学会論文誌. D, 情報・システム = The IEICE transactions on information and systems (Japanese edition), Vol. 91, No. 5, pp. 1296–1304, may 2008.

著者論文リスト

本研究に関連する論文

論文誌

- [1] 富田洋文, 嵐峨智, 高橋伸, 「静電気力触覚ディスプレイにおける複数指による触察の有効性の調査」, ヒューマンインタフェース学会論文誌, Vol. 23, No. 2, pp. 239-250, 2021.

査読付き国際会議

- [1] Hirobumi Tomita, Satoshi Saga, Hiroyuki Kajimoto, Simona Vasilache, and Shin Takahashi, “A study of tactile sensation and magnitude on electrostatic tactile display”, In 2018 IEEE Haptics Symposium (HAPTICS), IEEE, pp. 158-162, 2018.
- [2] Hirobumi Tomita, Shotaro Agatsuma, Ruiyun Wang, Shin Takahashi, Satoshi Saga, and Hiroyuki Kajimoto, “An Investigation of Figure Recognition with Electrostatic Tactile Display”, In Universal Access in Human-Computer Interaction. Multimodality and Assistive Environments, LNCS 11573, pp. 363-372, 2019.
- [3] Hirobumi Tomita, Satoshi Saga, Shin Takahashi, and Hiroyuki Kajimoto, “A Proposal and Investigation of Displaying Method by Passive Touch with Electrostatic Tactile Display”, In Haptics: Science, Technology, Applications, LNCS 12272, pp. 353-361, 2020.

その他の論文

- [1] Hirobumi Tomita, Satoshi Saga, and Hiroyuki Kajimoto, “Multi-electrodes-Based Electrostatic Tactile Display”, In the International AsiaHaptics conference, LNEE 432, pp.171-174, 2016.
- [2] Hirobumi Tomita, Shin Takahashi, Satoshi Saga, Simona Vasilache, and Hiroyuki Kajimoto, “Toward the Modeling of Tactile Sensation on Electrostatic Tactile Display”, The International Display Workshops, Vol. 25, pp.1584-1587, 2018.
- [3] Hirobumi Tomita, Satoshi Saga, Hiroyuki Kajimoto, Simona Vasilache, and Shin Takahashi, “An Attempt of Displaying Softness Feeling Using Multi-electrodes-based Electrostatic Tactile Display”, In the Haptic Interaction, LNEE 535, pp.100-102, 2019.

査読のない発表論文

- [1] 富田洋文, 嵐峨智, 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, pp.1A1-J13, 2018.
- [2] 富田洋文, 嵩峨智, 梶本裕之, 高橋伸, 「静電気触覚ディスプレイにおける受動的触覚提示手法の提案とその評価」, 第 20 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, pp.120-123, 2019.
- [3] 富田洋文, 嵩峨智, 高橋伸, 梶本裕之, 「静電気力触覚ディスプレイを用いた複数指による触図の識別率調査」, ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集 2020, pp.1P1-N10, 2020.