2021年度

筑波大学情報学群情報科学類

卒業研究論文

題目

格子状触覚ディスプレイの 解像度向上手法の検討

主専攻 知能情報メディア主専攻

著者 佐久間 亮太

指導教員 高橋 伸 川口 一画 志築 文太郎

要 旨

視覚障碍者支援デバイスやスマートフォンなどのモバイルデバイスに利用されている触覚提 示はタッチインタラクションにおいて応答を示すフィードバックを与えることが可能である. これらのデバイスは、通常提示される触覚刺激が構造全体に伝播する.そのため、マルチタッ チインタラクションにおいて、個々の指に対して異なった触覚のフィードバックを与えること が難しい.そこで,個々の指に対して異なった触覚のフィードバックを与える手法が提案され ている.その先行研究の一つである静電触覚ディスプレイはマルチタッチインタラクション に対応する際、導電板を細かくする必要があるが、静電触覚ディスプレイは高電圧を制御す るため、導電板数を多くした際に高価になるという問題が存在する。ゆえに、本研究の目的 は,より安価な格子状静電気触覚ディスプレイの高解像度化することである.そこで本研究 では、静電気触覚ディスプレイとインタラクションを行う指の位置をセンシングし、指の位 置に応じてディスプレイに印加する電圧を切り替えることにより,ソフトウェア的にディス プレイの解像度を向上させる手法を提案する.本研究では、この手法に基づくプロトタイプ を実装した. このプロトタイプは、ディスプレイ頭上に設置されたカメラから取得した RGB 画像を用いて機械学習器によって指の位置座標を取得し、それによって動的にディスプレイ を変化させる.そして、このプロトタイプを利用し、システムの応答速度と図形提示精度を 調査するための実験を行った.応答速度の測定の結果,システムの動作速度は 20Hz 程度であ ることが確認された. 図形提示精度の測定の結果として、ディスプレイを動的に変化させた 場合の触察精度が著しく低下した. また, 被験者間の図形の特定率と図形の大小関係正答率 の標準誤差がともに大きいという結果が得られた.これは、触察速度に対してシステムの応 答速度が低いといった問題が起因していると考えられる.

目次

第1章	序論	1
1.1	背景	1
1.2	目的	2
1.3	本論文の構成	2
第2章	先行研究	3
2.1	複数指への触覚提示	3
2.2	静電触覚ディスプレイ	3
2.3	本研究の位置づけ	4
第3章	静電気による触覚提示とその高解像度化	5
3.1	静電気による触覚提示	5
3.2	格子状静電触覚ディスプレイが持つ問題点............	6
3.3	指の位置のセンシングを用いた格子状静電触覚ディスプレイの高解像度化	7
第4章	カメラを用いた静電触覚ディスプレイの高解像度化システム	8
4.1	静電触覚ディスプレイ	8
4.2	静電触覚ディスプレイの制御システム...........................	10
	4.2.1 センシングシステム	10
	4.2.2 制御システム	12
	PC 内部のシステム	12
	ファームウェア	15
	4.2.3 制御アプリケーション	15
第5章	評価	17
5.1	評価 1: 静電触覚ディスプレイの処理速度測定	17
	5.1.1 指位置推定,描画情報生成においての処理速度測定	17
	5.1.2 信号送信,図形更新においての処理速度測定	18
	5.1.3 結果	19
5.2	評価 2: 高解像度化ディスプレイを用いたディスプレイの長さの推測精度の測定	19
	5.2.1 実験手順	20
	5.2.2 実験結果と考察	22

第6章 制約と今後の展望

第6章	制約と今後の展望	25
6.1	制約	25
	6.1.1 手の認識精度・手の認識速度	25
	6.1.2 健常者における操作性の阻害	25
	6.1.3 静電触覚ディスプレイの触覚提示強度	25
6.2	今後の展望	26
第7章	結言	27
	謝辞	28
	参考文献	29

図目次

3.1	静電触覚ディスプレイの原理	5
3.2	せん断方向の力と知覚の関係	6
3.3	電圧印加するグリッドの動的決定	7
4.1	システム概略図	9
4.2	実装図	10
4.3	静電触覚ディスプレイ	11
4.4	静電触覚ディスプレイの制御部..............................	11
4.5	高電圧制御回路の概要	12
4.6	Mediapipe Hand Landmark によって出力される id と関節の対応関係 [1]	13
4.7	実際に手の認識をディスプレイ上において行っている様子	13
4.8	AR マーカを用いたグリッドサイズの推定	14
4.9	ディスプレイ操作アプリケーション	15
5.1	指位置推定,描画情報生成においての処理速度測定の実験工程.......	17
5.2	信号送信,図形更新においての処理速度測定の実験工程........	18
5.3	実験に用いた指サック: 指サックにはアルミ箔が接着されている.アルミ箔は	
	鰐口クリップと接続されており,その鰐口クリップを介して Analogdiscovery2	
	を用いて電圧が測定される..................................	19
5.4	本実験の様子: 被験者は目隠しを行った状態において静電触覚ディスプレイを	
	触察した. 被験者は右手を用いてディスプレイをなぞりながら, 左手にはグラ	
	ウンドに接続されたアルミ箔を把持している.	20
5.5	実験における図形の提示例...............................	21
5.6	銀ナノインクを用いたサンプルディスプレイ...........	22
5.7	被験者によるディスプレイの推察の混合行列	23
5.8	高解像度化ディスプレイにおいての長辺の長さの推測正答率	24
5.9	高解像度化ディスプレイにおいての長辺の長さの大小関係の推測正答率	24

第1章 序論

1.1 背景

触覚提示はタッチインタラクションにおいて応答を示すフィードバックを与えることが可 能であるため、視覚障碍者支援デバイスやスマートフォンなどのモバイルデバイスに利用さ れている.これらデバイスは、通常提示される触覚刺激が構造全体に伝播する.そのため、マ ルチタッチインタラクションにおいて、個々の指に対して異なった触覚のフィードバックを 与えることが難しい.マルチタッチインタラクションにおいて個々の指に対して異なった触 覚のフィードバックは、視覚障碍者だけでなく健常者が使用する、GUIをはじめとするマル チタッチインタラクションの使用感を向上させることが期待されている.

そこで,近年ピンアレイデバイスをはじめとした,個々の指に対して異なった触覚のフィー ドバックを与える手法が提案されている.しかしながら,現在提案されている手法は,いく つかの欠点を持っている.ピン個々の高さを制御し擬似的な凹凸を生成することにより,空 間的な情報の提示を行うピンアレイデバイス [2] は,比較的高解像度な触覚刺激を与えること が可能であるが,構造が緻密で複雑であるため製造やメンテナンスのコストが高く,取り扱 う際には相応の専門性が求められることが知られている.また,振動子を用いた振動フィー ドバック [3,4] は,安価かつ比較的構造が単純という利点が存在するが,アクチュエータ1つ の大きさに解像度が依存してしまうため,円などの特定の図形状に触覚を提示することが難 しいといった欠点が存在する.

そこで,比較的構造が単純かつ様々な図形状に触覚刺激を局在化させることが可能な触覚 提示ディスプレイとして,静電触覚ディスプレイ [5] を用いた情報提示手法が提案されている. この手法は,ディスプレイに高電圧を印加し,絶縁膜の上から触れた指に誘電分極によるせ ん断力を引き起こすことにより触覚提示を行う手法である.従来,この手法は高電圧がディ スプレイ全範囲に印加されてしまうため,複数指がディスプレイに触れた際,触れた指個々 に異なる刺激を与えることが難しかったが,富田らは静電触覚ディスプレイを格子状に配置 することによって複数指を用いた触覚提示が可能な装置である,格子状静電触覚ディスプレ イを提案している [6]. このような格子状ディスプレイは,導電板の大きさを小さくし,多く の導電板を配置することによって高解像度化することが可能である.しかしながら,この手 法では高電圧を制御するため,導電板数を多くした際に,高価になってしまうといったよう な欠点が存在する.

1.2 目的

本研究の目的は、導電板数が少ないディスプレイにおいて、滑らかな触覚提示を行うこと が可能な格子状静電気触覚ディスプレイを実現することである.そこで、導電板内の指の位 置を取得し、その位置に応じて導電板に対する電圧印加を切り替えることにより、滑らかな 図形提示が可能な格子状触覚ディスプレイを提案する.本研究では、カメラを利用して導電 板内の指の位置の特定を行う.本研究の実現によって、視覚障碍者だけでなく健常者が使用 する、GUIをはじめとするインタラクティブに操作を行うマルチタッチインタラクションの 使用感をより安価で簡易的に向上させることが可能となる.

1.3 本論文の構成

本論文では、2章において静電触覚ディスプレイをはじめとする触覚を用いた情報提示の先 行研究と本研究の差分を示す.3章では、基本的な静電触覚の発生原理と本提案の概要を説明 する.4章では、本提案のプロトタイプの具体的な実装方法を記述する.5章では、行った実 験とその結果に関して記述を行う.6章ではこのシステムの制約と今後の課題、7章では結言 を述べる.

第2章 先行研究

2.1 複数指への触覚提示

触覚を用いた情報提示は,視覚を用いることが不可能な場合の通知や,システムからの応答を示す手段として有効な手段である.実際に,現在,社会実装されているモバイルデバイスの多くには振動子が搭載され,着信時の通知や,画面をタッチした際の応答を示す用途として利用されている.一般的にこれらに用いられる振動は,デバイス全体に伝播する.そのため,マルチタッチインタラクションの際,複数指に独立した刺激を与えることが難しいことが知られている.この問題を解決するため,振動を局在化するための試みが多く行われている.Wockelら,Hudinらは,波形の逆計算から,2次元平面において特定の範囲以外の振動減衰を実現した[7,8].Dhiabらは,振動子の装着されている板の両側面を固定することによってカットオフ周波数を操作し,振動減衰を行った[3,4].Daunizeauらは,振動減衰を行いたい地点の表面の構造を変更することによって,振動減衰を行う手法を提案した[9].しかしながら,これら振動子を用いた手法は,振動子の大きさ以下の細やかさの描画を行うことが難しい.この問題は,円をはじめとする様々な図形状に触覚提示範囲を局在化させる困難性へとつながっている.

そこで、細かな描画が可能かつ、複数指に独立した刺激を与えることが可能な手法として、 ピンアレイデバイスの研究が進んできた. Follmer らはピンアレイデバイスに映像を投影する ことによって、複数指に独立した刺激を与えるタンジブルユーザインタフェースを提案した [2]. Lee らは、いままで設置型であったピンアレイデバイスを拡張し、VR 内での触察を実現 するハンドヘルド型ピンアレイデバイスを提案した [10]. しかしながら、ピンアレイデバイ スは、ピン一つ一つの機構が緻密であるため、メンテナンスコストが高く、取り扱う際の専 門性が求められる.

2.2 静電触覚ディスプレイ

静電触覚ディスプレイは、電極に対して高電圧を印加し、その電極を絶縁膜を介して触る ことにより、指内での誘電分極を発生させ、指に振動刺激を与える手法である.この静電触 覚ディスプレイは、ピンアレイデバイスと比較して、機構が単純かつ、メンテナンスコスト が低いという利点が挙げられる.Bouらは、静電触覚ディスプレイとプロジェクタを組み合 わせることによって、ディスプレイに描画されたオブジェクトとの触覚的なインタラクショ ンを実現した[11].Xuらは、静電触覚ディスプレイを用いて視覚障碍者へ向けた触覚ディス

表 2.1: 先行手法と本手法の比較

触覚提示手法	複数指の触察が可能	メンテナンスの簡便性	解像度
振動子を用いた振動局在化	0	0	×
ピンアレイ型ディスプレイ	0	×	\bigcirc
格子型静電触覚ディスプレイ	0	\bigcirc	×
本手法	0	\bigcirc	\bigcirc

プレイを提案した [5]. また, Kim らは, 静電触覚ディスプレイを用いたディスプレイ上の凹 凸, テクスチャ提示を行った [12]. これらのディスプレイでは, 振動と同様に電圧は電極全 体に印加されるため, 複数指に独立した刺激を与えることが不可能であった.

そこで、近年では複数指に独立した刺激を与える静電触覚ディスプレイの提案が行われて きた. Tomita らは銀ナノインクを用いて電極形状を設計することによって、複数指に独立し た刺激を与えることを可能とした [13]. しかしながら、これらの接地型銀ナノインクディス プレイは提示領域を動的に変化させることが不可能である. そのため、Nakamura らは、指に 静電触覚ディスプレイを装着し、指に装着された静電触覚ディスプレイと卓上に設置された ディスプレイの間に静電気的な引力を発生させることによって複数指に独立した刺激を与え ることを実現した [14, 15]. この手法では、使用者が指にディスプレイを装着する必要がある という欠点が存在している. また、Tomita らや Ishizuka らは、電極を格子状に分割すること によって、指に装置を装着することなしに静電触覚ディスプレイを用いて複数指に独立した 刺激を与えることを可能とした [6, 16]. しかしながら、この手法は個々の導電板に高電圧を 印加するため、導電板を細かくした際、高価になってしまうというような欠点が存在する. 電 極板が単一の場合、電圧印加の制御を赤外線 [11] や静電容量センサ [5] を用いて行うことに よって、提示範囲を制御する試みが行われている.

2.3 本研究の位置づけ

本研究とこれまでの先行研究の位置づけを示したものが表 2.1 である.本研究は,従来の 単一電極を用いて滑らかに触覚の描画を行うための手法として導入されていた指のセンシン グの手法を用いることによって,Tomita らの提案する格子状静電触覚ディスプレイの欠点で ある導電板数の制限をソフトウェア的に拡張する.これにより,少ない導電板数のまま高解 像度かつ複数指に独立した刺激を与えることが可能な静電触覚ディスプレイを実現すること が可能となることが期待される.

第3章 静電気による触覚提示とその高解像度化



図 3.1: 静電触覚ディスプレイの原理

3.1 静電気による触覚提示

静電気を用いた触覚提示の原理を図 **3.1** に示す.指が高電圧の印加された導電性の板を薄い 絶縁膜ごしに触れた際,指に対して引力が発生する.これは,触れている指内部において誘 電分極が発生するためである.この引力 $f_E(t)$ は以下のような式によって表されることが知ら れている [17].

$$f_E(t) = \frac{\epsilon_0 S}{2(\frac{d_{sc}}{\epsilon_{sc}} + \frac{d_i}{\epsilon_i})(d_{sc} + d_i)} V(t)^2$$

ここにおいて、V(t)は導電板に印加される電圧、Sは指の接地面積、 ϵ_{sc} 、 ϵ_i はそれぞれ角質、 絶縁膜の誘電率、 d_{sc} 、 d_i はそれぞれ角質、絶縁膜の厚さである。この引力は垂直抗力 f_N と 比較して無視できる程度に小さいため、人間がこの引力を静止状態において感じることは難 しい、この吸引力が加わっているとき、指を移動させると指には動作方向とは逆の以下の力



図 3.2: せん断方向の力と知覚の関係

*F*_f が発生する.

$F_f = \mu F_N + \mu F_E(t)$

指は横方向に発生する力を力が変化したときのみ知覚しているため、人間は *f_E(t)* の変化を 横方向の力の変化として知覚することが可能である. これは FA2 の役割を持つパチニ小体に よって摩擦をはじめとするスティックスリップ現象による振動が知覚されるという推論と一致 している [?]. このような原理によって、人間は指を電圧の印加された導電板の上を絶縁膜越 しになぞることによって触覚を知覚する. また、この横方向の力によって発生する指のせん 断方向の力を図 3.2 のように制御することによって、凹凸に知覚されることが知られている [18]. したがって、この静電気による触覚提示は細やかな凹凸の連続として表現される物体の 細やかな粗さの変調が可能であるといえる.

3.2 格子状静電触覚ディスプレイが持つ問題点

導電板に高電圧を付与する際,通常導電板全体に伝播する.そのため,導電板を手全体を 用いて触れた際,指個々に異なった触覚刺激を与えることが難しい.そこで,導電板を格子 状に分割することによって,指個々に異なった触覚刺激を与えることが可能となる[16].しかしながら,先行研究の章においても言及した通り,多くの導電板を用意した際にディスプレイ自体が高価になってしまう.そこで,従来の研究に用いられていたセンシング[5,11,12]を用いて導電板に印加する電圧を変化させることによって滑らかな描画を行う手法を格子状静電触覚ディスプレイに導入する.この一連の手法によって,複数指を用いて触察可能な格子状静電触覚ディスプレイの高解像度化を行う.

3.3 指の位置のセンシングを用いた格子状静電触覚ディスプレイの高 解像度化



図 3.3: 電圧印加するグリッドの動的決定

本研究では、ディスプレイに触れている指の位置をセンシングすることによって、格子状 静電触覚ディスプレイの高解像度化を行う.本研究ではまず RGB カメラの映像を機械学習を 用いて処理することによって、指先の位置をセンシングする. RGB カメラを用いた手のセン シングは、先行研究でも多く行われており、容易に実現可能であることが知られている [1]. その後、図 3.3 に示す通り、ディスプレイ提示範囲内に指が存在する場合のみ、ディスプレイ の該当する導電板に高電圧を印加することによって、高解像度化を実現する.前述にもある 通り、静電触覚ディスプレイは高電圧を導電板に印加するかどうかによって触覚提示の局在 化を容易に行うことが可能である.そのため、高解像度な触覚提示範囲が実現可能である.

第4章 カメラを用いた静電触覚ディスプレイの 高解像度化システム

本章では,提案手法のプロトタイプの構成について説明を行う.プロトタイプのシステム 概要図を図 4.1,実際の実装図を図 4.2 に示す.プロトタイプは,格子状静電触覚ディスプレ イとその制御用マイクロコンピュータに加え,手の認識を行うカメラと,マイクロコンピュー タ制御用の PC とその内部で動作するシステムによって構成される.

4.1 静電触覚ディスプレイ

静電触覚ディスプレイは、図4.3に示す通り提示部と制御部の2つによって構成されている. 提示部は、デマルチプレクサ (CD74HC4514M96)、シフトレジスタ (NPIC6C4894DY)、高電 圧用のソリッドステートリレー (AQY214SX)、導電板アレイによって構成されている.デマル チプレクサはマイクロコンピュータ、および 16 個のシフトレジスタと接続されており、個々 のシフトレジスタは 12 個のソリッドステートリレーと接続されている.その個々のソリッド ステートリレーには電圧を印加する導電板が接続されている.またこの導電板は 1 辺 10mm の正方形の形状をしており、ディスプレイ内部に縦 12 個、横 16 個の計 192 個等間隔に配置 されている.この導電板間の距離は 1mm である.これは、導電板同士が干渉することを防ぐ ためである.この提示部では、まずデマルチプレクサがマイクロコンピュータから受け取っ た信号を各列の電圧印加を制御するシフトレジスタへと分配する.その後、信号か送信され たシフトレジスタは、接続されている個々のソリッドステートリレーへ送信する信号を制御 する.これにより、導電板の電圧印加を操作する.

制御部は図 4.4 に示す通り,昇圧器 (MHV12-1.0K2000P) と制御用のマイクロコンピュータ (Mbed LPC1768),そして電圧制御回路によって構成されている.この制御部は,提示部と接 続されており,導電板個々の電圧印加を行うかどうかを制御する信号を,提示部のデマルチプ レクサへ送信し,かつ導電板に印加する高電圧電源を提示部へ供給する.高電圧電源は,AC アダプタ (12V1.5A) からの電源を昇圧器を介して昇圧することによって生成される.生成さ れる高電圧の最大値は 600V, 2mA である.また,電圧制御回路は,図 4.5 のような構成となっ ており,マイクロコンピュータからの信号を DA 変換し,その信号と昇圧器からの高電圧電源 をカレントミラー回路に接続することによって出力電圧値を制御することが可能である.ま た,マイクロコンピュータは,制御用の PC(Mac book pro 2018) と USB を介して接続されて おり,シリアル通信を用いて PC から信号を受信することが可能である.これにより,提示部 の導電板の電圧印加を動的に変更することが可能となっている.



図 4.1: システム概略図



図 4.2: 実装図

4.2 静電触覚ディスプレイの制御システム

図 4.1 に示す通り,静電触覚ディスプレイの制御システムは,センシングシステムとマイク ロコンピュータの制御システム,それを GUI 上で操作する制御アプリケーションによって構成されている.

4.2.1 センシングシステム

センシングシステムは、図 4.1 に示す通り、カメラ画像を転送するスマートフォンとカメ ラ情報から指の位置の特定を行う機械学習器によって構成される.スマートフォンは、Sony



図 4.3: 静電触覚ディスプレイ



図 4.4: 静電触覚ディスプレイの制御部

Xperia XZ premium¹を利用している. このスマートフォンは Iriun Webcam²を用いて WiFi を

https://xperia.sony.jp/xperia/docomo/so-04j/

²https://iriun.com/



図 4.5: 高電圧制御回路の概要

介して仮想的なウェブカメラとして PC に認識される.

この時, Iriun Webcam によって転送される画像サイズは 1920 × 1080px であり,フレーム レートは 30fps である.また,スマートフォンは,ディスプレイから 480 mm の高さに三脚 を用いて設置する.WiFi を介して転送されたカメラ画像は,機械学習器によって指の位置の 判別に利用される.機械学習器には,MediaPipe Hand Landmark Model[1]を採用する.この Model は,RGB 画像と前フレームにおいて手が識別されていた場合と手が識別されていない 場合の検出の閾値となる確信度を入力することによって,図4.6 のような指の関節に割り振 られた id とその画像においての座標を出力する.このプロトタイプにおいて,前フレームに おいて手が識別されていた場合と手が識別されていない場合の閾値となる確信度はどちらも 0.8 に設定している.実際に,Mediapipe を用いて指の位置の出力を行った結果が図4.7 であ る.この機械学習器は python の mediapipe ライブラリ³を用いて開発されている.

4.2.2 制御システム

制御システムの概要を図 4.1 に示す.制御システムは, PC で動作するシステムとマイクロ コンピュータで動作するファームウェアによって構成される.

PC 内部のシステム

まず,システム起動時にカメラ画像を取得し,ディスプレイの両端に設置されている AR マーカを認識する.この AR マーカは openCV のライブラリである ArUco⁴を用いて認識され る.そして認識された 2 つの AR マーカ同士の距離を内部に存在するグリッド数によって割

 $^{^{3} \}texttt{https://google.github.io/mediapipe/getting_started/python}$

⁴https://docs.opencv.org/4.x/d5/dae/tutorial_aruco_detection.html



図 4.6: Mediapipe Hand Landmark によって出力される id と関節の対応関係 [1]



図 4.7: 実際に手の認識をディスプレイ上において行っている様子

ることによってグリッドサイズを推定する.実際にディスプレイの位置,範囲を推定した画 像を図 4.8 に示す.その後、システムはセンシングシステムによって判別された指の位置から 個々の指座標を取得し、その座標を推定されたグリッドサイズをもとに静電触覚ディスプレ イ上の座標へと変換する.その後、指座標をもとに静電触覚ディスプレイの描画情報を生成 する.この描画情報は、描画範囲に導電板が完全に含まれる場合のみ常時電圧が印加される ように描画する.それに加え、個々の指座標が提示する領域内に含まれている場合、動的に その指上にある導電板に電圧を印加するよう描画する.そして、前回描画した情報と比較し、 描画情報が変わった部分のみ、座標情報をシリアル通信を用いてマイクロコンピュータに送 信する.この PC 内部で動作する制御システムは、flask⁵, openCV⁶を用いて python によって 開発されている.



図 4.8: AR マーカを用いたグリッドサイズの推定

⁵https://palletsprojects.com/p/flask/ ⁶https://opencv.org/

app	
Electro-Static Controll App	
<u>Parameters</u>	Preview
Figure	
Circle Square Triangle Line Test	
Center	
x: 3 y: 1	
Edge length/Radius	
Edge length/Radius: 3	
Electro-Static Device Switch	Viewer
Electro-Static Device Switch:	
Server Log	
200: initial data	

図 4.9: ディスプレイ操作アプリケーション

ファームウェア

初めに、ファームウェアは、内部に保持している導電板個々の ON/OFF 情報が記載された 配列情報をデマルチプレクサに送信する.その後、SPI 通信を用いて提示する電圧値を DA 変 換器へと送信する.また、ファームウェアは PC からシリアル通信を用いて座標情報を受信し た際、提示部のデマルチプレクサに送信する信号の該当箇所を変更する.これにより受信し た導電板のみ電圧印加を行うかどうかを切り替えることが可能となる.

4.2.3 制御アプリケーション

これらのセンシング・フィードバックシステムは、制御用の GUI アプリケーションを用い て操作が可能である.制御用の GUI アプリケーションを、図 4.9 に示す.このアプリケーショ ンはアプリケーション左側にパラメータを入力しシステムを起動させるボタンを押すことに よって,静電触覚ディスプレイに情報を転送する.また,右側には,提示される図形が表示される.この制御アプリケーションは,Electron⁷https://www.electronjs.org/を用いて開発を行っており,python,flaskを用いて開発されている内部 API を経由して静電触覚ディスプレイを制御する.

 $^{^{7}}$ \unskip\protect\penalty\@M\vrulewidth\z@height\z@depth\dp4

第5章 評価



実行時間測定

図 5.1: 指位置推定, 描画情報生成においての処理速度測定の実験工程

5.1 評価1:静電触覚ディスプレイの処理速度測定

開発したプロトタイプの処理速度が指の触察精度に対して十分であるかどうかを確認する ため、図 5.1 のようにシステムの処理速度測定実験を行った.この処理速度測定は、カメラに よる画像取得から描画情報生成までの処理速度の測定と PC による信号送信から図形更新まで の処理速度の測定に分割されて行われた.これは、システムが指動作に対して動的に信号送 信を行い、図形更新を行う特性上、指の動作という不安定性を排除するためである.

5.1.1 指位置推定,描画情報生成においての処理速度測定

プロトタイプを用いて画像取得,指位置推定,描画情報生成の処理を 500 回行った際の時間を測定した.この時取得する画像は,十分明るい室内においてプロトタイプのカメラから撮影したものを利用した.画像を取得する際,被験者 1 名 (22 歳,男性,右利き)がディスプレイ上をランダムになぞる行為を行っていた.

静電触覚ディスプレイの電圧の変化



図 5.2: 信号送信, 図形更新においての処理速度測定の実験工程

5.1.2 信号送信,図形更新においての処理速度測定

プロトタイプを用いて,図 5.2 のように電圧印加を変化させる座標情報を送信し,実際に 電圧が変化するまでの時間を測定した.まず被験者1名(22歳,男性,右利き),が図 5.3 の ようなアルミ箔(三菱アルミニウム)の接着された指サックを用いて当該電極へ触れた.この 電極は縦幅が10mmとなっており,ワニロクリップを通して Analog Discovery2¹のプローブ へと接続されていた.この時,対象のグリッドは電圧は印加されていた.この状態において, シリアル通信を用いて触れている電極の座標を送信した時間から電極の電圧が一定閾値以下 に下がった時間までを計測した.この一連の試行は 500 回行われた.

表 5.1:	システム処理速度測定結果

処理内容	1 サイクルあたりの平均実行時間 (sec)
画像取得,指位置推定,描画情報生成	0.043
データ送信, 描画情報更新	0.010

¹https://digilent.com/reference/test-and-measurement/analog-discovery-2/start



図 5.3: 実験に用いた指サック: 指サックにはアルミ箔が接着されている.アルミ箔は鰐口クリップと接続されており,その鰐口クリップを介して Analogdiscovery2 を用いて電圧が測定される.

5.1.3 結果

500回の測定実験の1サイクルあたりの実行時間の平均は**表 5.1**となった.この結果から, システムの速度は約 20Hz で動作することが示された.触察の際のテクスチャ弁別の際の指移 動は 5mm ほどの振幅の 2Hz 以下の振動によって構成されている [19] ことから,正しく指位 置が認識できた際,この静電触覚ディスプレイの解像度は 1mm 程度を担保することが可能で あると言える.

5.2 評価2: 高解像度化ディスプレイを用いたディスプレイの長さの推 測精度の測定

高解像度化ディスプレイによって提示される図形の分類精度を測定するため,図5.4のよう に,被験者4人(22歳-24歳,男性,右利き)に対してプロトタイプを用いて複数の図形を提 示し,その弁別精度を測定した.この時,被験者は全員静電触覚刺激を感じることができる ことを確認した.提示される図形は,図5.5に示す通り,横幅21mm,縦幅は23mm,26mm, 29mm,32mmの4種類のいずれかである長方形状のものであった.また,印加された電圧は 400V100Hzの矩形波であった.印加された電圧の波形の種類や周波数は先行研究から知覚強 度が一番高いものが選ばれた[20].



図 5.4: 本実験の様子: 被験者は目隠しを行った状態において静電触覚ディスプレイを触察した. 被験者は右手を用いてディスプレイをなぞりながら, 左手にはグラウンドに接続された アルミ箔を把持している.

5.2.1 実験手順

はじめに、被験者は図 5.6 のように、銀ナノインクを用いて印刷された、横幅 21mm、縦幅 は 23mm、26mm、29mm、32mm の4 種類のディスプレイを触察した.次に、被験者は視覚 の影響を排除するためアイマスクを装着した.その後、被験者は静電触覚刺激に慣れるため、 縦幅 32mm の静電触覚ディスプレイを1分間触察した.この時、被験者には静電触覚ディス プレイ 4 種のうちのどのものなのかは伝えなかった.その後、被験者は 4 種の図形うち 1 つ を1分間提示され、その提示図形の縦幅がいずれに当てはまるかを回答した.この提示は 4 回の触察を1 セットとし、このセットを4 セット行った.この間、被験者は左手に装置のグ ラウンドと接続されたアルミ箔を把持していた.提示される図形の順序は、1 セット内にすべ



図 5.5: 実験における図形の提示例

ての縦幅の種類が含まれており,1セット内の順序とセット回数においてラテン方格を用いて カウンターバランスがとられていた.



図 5.6: 銀ナノインクを用いたサンプルディスプレイ

5.2.2 実験結果と考察

実験の際の回答の混合行列は図 5.7 である. 被験者のディスプレイ弁別の平均正答率を図 5.8 に示す. また, 直前に提示されたディスプレイとの大小関係の正答率は図 5.9 である. 被 験者間のディスプレイ弁別の正答率の平均は 42.19%, 標準誤差は 19.34%となった. また, 直 前に提示されたディスプレイとの大小関係の正答率の平均は 62.50%, 標準誤差は 17.34%と なった. 混合行列から, 動的にグリッドを変化させた 32mm 以外のディスプレイ提示の知覚 精度が低くなったことが伺える. また, 実験結果としてディスプレイの正答率と大小関係の 正答率どちらもばらつきが大きいことが示された. 原因として, 被験者の触察速度の違いが 考えられる. そして, 被験者間のディスプレイ弁別の正答率が低い原因として, 触覚刺激に よって与えられた図形の相対的な大きさはわかるが, 絶対的な大きさがわからないという点 が考えられる. 実際に, 実験後に被験者の多くは絶対的な大きさがわからないということを 述べていた.



図 5.7: 被験者によるディスプレイの推察の混合行列



図 5.8: 高解像度化ディスプレイにおいての長辺の長さの推測正答率



図 5.9: 高解像度化ディスプレイにおいての長辺の長さの大小関係の推測正答率

第6章 制約と今後の展望

6.1 制約

この研究には、いくつかの制約が存在する.この章では、それぞれの制約について述べていく.

6.1.1 手の認識精度・手の認識速度

このプロトタイプでは, RGB カメラからの映像を機械学習器によって処理することによっ てタッチ位置推定を行っている.そのため,本研究において利用したプロトタイプは,ある 程度のタッチ位置との誤差を生む可能性がある.この改善方法としては,静電式容量を用い てタッチ認識を行うこと [5] をはじめとする,センサを静電触覚ディスプレイ内部に組み込む という手法が考えられる.また,Time of Flight法 (ToF)を用いた遠隔タッチ認識手法も提案 されており [21],導入することによってシステムの提示精度が向上することが推察される.

また,機械学習器による速度遅延の問題も存在する.先行研究によると,テクスチャ提示の際の弁別閾はどの材質においても 1mm 以下であり [22],弁別閾を下回るほど細かな提示を行うことが難しい.この問題も,静電式容量型のタッチセンサによって改善が可能であると推察される.

6.1.2 健常者における操作性の阻害

このプロトタイプでは、カメラを静電触覚ディスプレイの上に設置する必要がある.これ により、健常者がこのシステムを視認しながら利用した際、カメラの位置などによってディ スプレイの操作性を阻害する可能性がある.これも、先ほど述べたものと同様に、静電式容 量を用いてタッチ認識をディスプレイ内部に埋め込むことによって改善されると推察される.

6.1.3 静電触覚ディスプレイの触覚提示強度

このプロトタイプは,絶縁膜としてポリ塩化ビニリデンの薄いシートを利用している.こ のシートの厚さは11µmであり,印加することのできる最大値400Vでは十分な触覚強度を提 示することは難しい.また,このシートは粘着性がないため,シートの接着が不十分である 場合がある.シートの接着が不十分である場合,シートとディスプレイの間に空気層が発生 してしまう. これによって,静電触覚ディスプレイと指間の絶縁性が上がり,触覚提示強度 が小さくなる [23]. この問題の解決策は主に2つ考えられる. 1つ目の解決策は,絶縁膜を薄 く,粘着性のあるものにすることである. 2つ目の解決策は,ディスプレイに印加する電圧を 上げることである. 3章でも述べたとおり,静電触覚ディスプレイの与えるせん断方向の刺激 の大きさと電圧の大きさの二乗の関係には線形性が存在する [17]. そのため,電圧の大きさ を上げることによって提示する触覚強度を向上させることが可能であると考えられる. しか しながら,電圧を極度にあげた場合,絶縁膜の絶縁性がなくなってしまう絶縁破壊が発生す る可能性があるため,注意が必要である. 実際に 6µm の絶縁膜 (司化成 nano6) を利用した際, 400V の電圧では絶縁膜の絶縁性がなくなってしまう絶縁破壊が容易に発生してしまうという 問題が発生した.

また,発汗などにより,ディスプレイと指間における湿度が高い場合摩擦係数が低減する という先行研究も得られている[24]. 摩擦係数が低減した場合,3章でも示した通り指を動か した際に得られる知覚の強度が減少する.

6.2 今後の展望

この研究では、主に提案するシステムの応答速度や、システムを用いることによってディ スプレイの提示解像度がどの程度向上するかを検証した.しかしながら、この研究では円な どの細かな描画が必要な図形をどの程度正確に描画が可能かについての検証が行われていな いため、今後はまずこの検証を行う予定である.また、制約の章でも述べたとおり、この提 案システムにはいくつかの改善点が存在する.この改善点においても、今後改善を行い、改 善に応じた提示可能な解像度を測定していく予定である.

第7章 結言

本研究では、コストの低い格子状静電触覚ディスプレイの高解像度化手法を実現するため、 指の位置をセンシングしそれに応じて導電板の電荷印加を動的に変更することによって、高 解像度化を行うような手法を検討する.これの実現によって、そこで、本研究ではこの提案 に基づくプロトタイプを作製した.このプロトタイプは既存の静電触覚ディスプレイの頭上 にカメラを設置されているものである.プロトタイプは、カメラから指の位置を推定し、そ の情報によって導電板の電圧印加を動的に決定する.このプロトタイプを用いてシステムの 遅延性能と提示性能の精度の確認を行った.システムの速度遅延の結果、システムの動作速 度はおおよそ 20Hz あることが示された.また、システムの提示性能の精度の測定の結果、動 的にグリッドを変更させた際のみグリッドの認識率が大幅に低下した.この原因として、触 察速度の分散が大きいという点や触覚強度の小ささが大きな影響を及ぼしている可能性が高 いと推察している.今後は、触察速度の測定や静電触覚ディスプレイの提示強度を改善した のち、新たな高解像度化手法について研究を進めていきたいと考えている.

謝辞

本論文の執筆にあたり,指導教員である高橋伸先生,川口一画先生,志築文太郎先生には手 厚くご指導を頂きました.深く感謝致します.特に高橋伸先生には専門外の研究でありながら, 様々なご意見やご指導を賜りました.心よりお礼申し上げます.また,インタラクティブプロ グラミング研究室の皆様には,研究生活に関する様々な助言を頂きました.特に UBIQUITOUS チームの皆様にはチームゼミをはじめ,論文執筆時の添削など支援を頂き,充実した研究生 活を送ることができました.深く感謝致します.

参考文献

- Fan Zhang, Valentin Bazarevsky, Andrey Vakunov, Andrei Tkachenka, George Sung, Chuo-Ling Chang, and Matthias Grundmann. MediaPipe hands: On-device real-time hand tracking. *arXiv*, pp. 1–5, June 2020.
- [2] Sean Follmer, Daniel Leithinger, Alex Olwal, Akimitsu Hogge, and Hiroshi Ishii. inFORM: dynamic physical affordances and constraints through shape and object actuation. In *Proceedings of the 26th annual ACM symposium on User interface software and technology*, UIST '13, pp. 417–426, October 2013.
- [3] Ayoub Ben Dhiab and Charles Hudin. Confinement of vibrotactile stimuli in periodically supported plates. In *Haptics: Science, Technology, Applications*, pp. 334–342. Springer International Publishing, 2020.
- [4] Ayoub Ben Dhiab and Charles Hudin. Confinement of vibrotactile stimuli in narrow plates. In 2019 IEEE World Haptics Conference (WHC), pp. 431–436, July 2019.
- [5] 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, CHI EA '11, pp. 317–322, New York, NY, USA, May 2011. Association for Computing Machinery.
- [6] 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. 博士論 文, 筑波大学, pp. 1–110, 2021.
- [7] Sebastian Wöckel, Ulrike Steinmann, and Hendrik Arndt. Haptics by time reversal of elastic waves. In 2016 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS), pp. 1–3, September 2016.
- [8] Charles Hudin, Jose Lozada, and Vincent Hayward. Localized tactile feedback on a transparent surface through Time-Reversal wave focusing. *IEEE Trans. Haptics*, Vol. 8, No. 2, pp. 188– 198, April 2015.
- [9] Thomas Daunizeau, David Gueorguiev, Sinan Haliyo, and Vincent Hayward. Phononic crystals applied to localised surface haptics. *IEEE Trans. Haptics*, Vol. 14, No. 3, pp. 668–674, July 2021.

- [10] Chi-Jung Lee, Hsin-Ruey Tsai, and Bing-Yu Chen. HairTouch: Providing stiffness, roughness and surface height differences using reconfigurable brush hairs on a VR controller. In *Proceedings of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 1–13. May 2021.
- [11] 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*, pp. 283–292. October 2010.
- [12] Seung-Chan Kim, Ali Israr, and Ivan Poupyrev. Tactile rendering of 3D features on touch surfaces. In *Proceedings of the 26th annual ACM symposium on User interface software and technology*, UIST '13, pp. 531–538, October 2013.
- [13] 富田洋文, 嵯峨智, 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.
- [14] Taku Nakamura and Akio Yamamoto. A Multi-User surface Visuo-Haptic display using electrostatic friction modulation and Capacitive-Type position sensing. *IEEE Trans. Haptics*, Vol. 9, No. 3, pp. 311–322, July 2016.
- [15] Taku Nakamura and Akio Yamamoto. Multi-finger electrostatic passive haptic feedback on a visual display. In 2013 World Haptics Conference (WHC), pp. 37–42, April 2013.
- [16] Hiroki Ishizuka, Keisuke Suzuki, Kyohei Terao, Hidefumi Takao, and Fusao Shimokawa. Development of high resolution electrostatic tactile display. In 2017 International Conference on Electronics Packaging (ICEP), pp. 484–486, April 2017.
- [17] Kurt A Kaczmarek, Krishnakant Nammi, Abhishek K Agarwal, Mitchell E Tyler, Steven J Haase, and David J Beebe. Polarity effect in electrovibration for tactile display. *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, Vol. 53, No. 10, pp. 2047–2054, October 2006.
- [18] Gabriel Robles-De-La-Torre and Vincent Hayward. Force can overcome object geometry in the perception of shape through active touch. *Nature*, Vol. 412, No. 6845, pp. 445–448, July 2001.
- [19] E Kunesch, F Binkofski, and H J Freund. Invariant temporal characteristics of manipulative hand movements. *Exp. Brain Res.*, Vol. 78, No. 3, pp. 539–546, 1989.
- [20] 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), pp. 158–162, March 2018.

- [21] Vivian Shen, James Spann, and Chris Harrison. FarOut touch: Extending the range of ad hoc touch sensing with depth cameras. In *Symposium on Spatial User Interaction*, No. Article 5 in SUI '21, pp. 1–12, November 2021.
- [22] Seitaro Kaneko, Kohei Matumori, Naoki Saito, and H Kajimoto. Preliminary study on gap detection threshold of textured surface. In 2018 AsiaHaptics, pp. 14–16, 2018.
- [23] Craig D Shultz, Michael A Peshkin, and J Edward Colgate. Surface haptics via electroadhesion: Expanding electrovibration with johnsen and rahbek. In 2015 IEEE World Haptics Conference (WHC), pp. 57–62, June 2015.
- [24] Subrahmanyam M Pasumarty, Simon A Johnson, Simon A Watson, and Michael J Adams. Friction of the human finger pad: Influence of moisture, occlusion and velocity. *Tribol. Lett.*, Vol. 44, No. 2, p. 117, August 2011.