

博士論文

静電気力を用いた
インタラクティブ視触覚ディスプレイに関する研究

宇都宮大学大学院 工学研究科

システム創成工学専攻

芳賀 浩史

概要

静電触覚ディスプレイは電極と絶縁層とで構成され、電極に電圧を印加した際に指と電極との間に生じる静電気力によって、触察時の摩擦力を変化させて振動刺激を行う触覚ディスプレイである。視覚ディスプレイに積層して利用することができるため、インタラクティブ視覚ディスプレイへの応用が期待されている。

本研究では静電触覚ディスプレイを利用したインタラクティブ視覚ディスプレイを開発し、視覚ディスプレイの設計論への道を拓く。

第1の課題はマルチタッチに対して独立した刺激を提示する、触覚刺激の空間的局在化である。直交するX電極とY電極に、指先の振動検出閾値が大きい1240 Hzと1000 Hzの交流電圧信号をそれぞれ印加すると、振動検出閾値が小さい240 Hzの静電気力振動が電極の交差部分でうなりにより発生し、局在化された触覚刺激を提示できることを示す。

第2の課題は静電触覚ディスプレイと静電容量センサとの共存化である。静電触覚ディスプレイと自己容量方式のタッチセンサとの共存化を、電極の時分割駆動の手法で解決する。XY電極構造の静電触覚ディスプレイを用いて、特定の電極がタッチセンサとして利用される時間を8.3 msecとし、タッチセンサとして利用する電極を空間的に拡散させ走査させることで、静電気力が途切れることで生じる不要な触覚刺激が抑制されることを示す。5.1 mm四方の電極を30×20個アレイ状に配列したセグメント電極構造の静電触覚ディスプレイを用いて、マルチタッチ入力が可能であること、隣り合う電極に位相が180度異なる交流信号を印加することで、ヒトの電氣的接地状態に依存しない安定した触覚刺激を提示できることを示す。さらに、タッチ面上に空間的に局在化して提示された静電触覚オブジェクトを、複数の指で触察する際に生じる触覚のクロストークが、該交流信号を利用することで低減することを示す。

第3の課題は、静電触覚ディスプレイとラテラルモーションを併用しクリック感を提示する際の知覚特性の解明である。タッチ面の振動方向が指の長軸方向の場合は、短軸方向の場合と比較して触覚刺激が強く知覚されることを主観評価実験で示し、振動方向の設計指針を示す。

本論文は7章で構成されており、各章の概要は以下のとおりである。

第1章では、研究背景を述べ、本研究の動機と目的を示す。

第2章では、第3章以降の前提となる、触覚知覚の知見、触覚ディスプレイの研究と分類、静電触覚ディスプレイの研究、触覚刺激の局在化に関する研究、タッチセンシング技術について概説する。

第3章では、静電触覚ディスプレイにおける触覚刺激の空間的局在化の手法を提案する。マルチタッチに対して独立した刺激を提示するためには触覚刺激を局在化する必要

がある。直交する X 電極と Y 電極に、指先の振動検出閾値が大きい 1240 Hz と 1000 Hz の交流電圧信号をそれぞれ印加すると電極の交差部分で振動検出閾値が小さい 240 Hz の静電気力振動がうなりにより発生し、タッチ面上に局在化された触覚刺激を提示できることを示す。

第 4 章では、静電触覚ディスプレイのインタラクティブ化で必要とされる、静電容量センサとの共存化について述べる。第一の段階として、3 章で作成した電極基板、すなわち平行に配置された複数の X 電極とそれらと直交する複数の Y 電極、およびそれら電極を覆いタッチ面を形成する絶縁膜で構成された電極基板がタッチセンサとして利用できるかどうかを明らかにする。当該基板は自己容量方式のタッチセンサとして利用できる一方、相互容量方式のタッチセンサとして利用した場合、タッチを検出できない問題が生じること、当該絶縁膜が静電触覚ディスプレイ向けに極めて薄く形成されていることがその原因であることを示す。第二の段階として、静電触覚ディスプレイと自己容量方式のタッチセンサとの共存化を、電極の時分割駆動の手法で解決する。特定の電極がタッチセンサとして利用される時間を 8.3 msec とし、タッチセンサとして利用する電極を空間的に拡散させ走査させることで、静電気力が途切れることで生じる不要な触覚刺激が抑制されることを示す。またセンサに混入する電氣的ノイズを低減するために (i) 触覚を提示する交流電圧信号にタッチを検出するための励振信号を重畳する回路及び、(ii) タッチ検出信号に混入する、触覚提示用の交流信号を除去するための基準ノード駆動ハイパスフィルタ回路を提案する。これらの技術を利用することで静電触覚ディスプレイと静電容量センサとの一体化が可能であることを示す。

第 5 章では、5.1 mm 四方の電極を 30×20 個アレイ状に配列したセグメント電極構造の静電触覚ディスプレイを試作し、個々の電極を独立して制御することでマルチタッチ入力が可能なこと、形状の自由度が高い触図を提示できることを示す。また、触覚刺激を提示するための交流信号に関し、隣り合う電極に位相が 180 度異なる交流信号を印加することで、ヒトの電氣的接地状態に依存しない安定した触覚刺激を提示できることを示す。さらに、タッチ面上に空間的に局在化し提示した静電触覚オブジェクトを、複数の指で触察する際に生じる触覚のクロストークが、該交流信号を利用することで低減することを示す。

第 6 章では、ラテラルモーションを併用しクリック感を提示する際の知覚特性を解明する。タッチ面の振動方向が指の長軸方向の場合は、短軸方向の場合と比較して触覚刺激が強く知覚されることを主観評価実験で示し、振動方向の設計指針を示す。また、静電容量センサを一体化した静電触覚ディスプレイとラテラルモーション機構を用いてインタラクティブな視触覚ディスプレイを作製し、Eyes-free interaction を可能とする一つの構成を示す。

第 7 章では、本研究の成果をまとめ、今後の課題と展望について述べる。

目次

第1章	序論	1
1.1.	本研究の背景	1
1.1.1.	フラットパネルディスプレイの発展とインタラクティブ化	1
1.1.2.	インタラクティブ視触覚ディスプレイへの期待	2
1.1.3.	インタラクティブディスプレイの現状と課題	2
1.2.	本研究の目的	5
1.3.	本論文の構成	6
第2章	触覚知覚, 触覚ディスプレイ, タッチセンシングの研究	8
2.1.	触覚知覚の知見	8
2.1.1.	触覚受容器	8
2.1.2.	振動検出閾曲線	11
2.1.3.	触覚の時間分解能	12
2.2.	触覚ディスプレイの研究と分類	12
2.2.1.	Normal vibration	13
2.2.2.	Pulses	15
2.2.3.	Lateral vibration	16
2.2.4.	Ultrasonic waves	17
2.2.5.	Electrostatic	18
2.2.6.	Asymmetric friction	19
2.2.7.	Driving force	20
2.3.	静電触覚ディスプレイの研究	21
2.4.	触覚刺激の局在化に関する研究	22
2.5.	タッチセンシング技術	25
2.5.1.	自己容量方式と相互容量方式	25
2.5.2.	表面容量式と投影容量式	27
2.6.	本章まとめ	29
第3章	触覚刺激の空間的局在化	30
3.1.	はじめに	30
3.2.	原理	30
3.2.1.	構造	30
3.2.2.	モデルを用いた原理の説明	31
3.3.	駆動周波数の設計	34
3.4.	実験	36
3.4.1.	4.1 インチの静電触覚ディスプレイの試作	36
3.4.2.	電気的特性評価	38

3.4.3.	主観評価実験.....	40
3.5.	10.4 インチインタラクティブ視触覚ディスプレイ.....	43
3.5.1.	デモ実証.....	43
3.6.	おわりに.....	46
第4章	静電触覚ディスプレイと静電容量センサの共存化.....	47
4.1.	はじめに.....	47
4.2.	静電容量センサ共存化に向けた電極基板の可能性検討.....	47
4.2.1.	実験.....	47
4.2.2.	実験結果の妥当性の検証.....	49
4.3.	静電容量センサを一体化した静電触覚ディスプレイの提案.....	54
4.4.	実装.....	56
4.5.	評価.....	58
4.5.1.	電気的特性評価.....	58
4.5.2.	主観評価実験.....	62
4.5.3.	デモ実証.....	65
4.6.	おわりに.....	66
第5章	マルチタッチ入力可能な静電触覚ディスプレイ.....	68
5.1.	はじめに.....	68
5.2.	原理.....	68
5.2.1.	電極基板.....	68
5.2.2.	駆動方法の検討と提案.....	68
5.3.	実験.....	72
5.3.1.	触覚刺激の安定性に関する主観評価実感.....	72
5.3.2.	複数の指で触察する際に生じる触覚のクロストーク.....	74
5.4.	実装とデモ実証.....	78
5.5.	おわりに.....	82
第6章	ラテラルモーションを利用した視触覚ディスプレイ.....	83
6.1.	はじめに.....	83
6.2.	ラテラルモーションの方向と刺激の強さ.....	83
6.2.1.	実験方法.....	83
6.2.2.	実験結果.....	91
6.2.3.	考察.....	93
6.3.	静電触覚ディスプレイとラテラルモーションを用いたインタラクティブ視触覚ディスプレイ.....	94
6.3.1.	設計.....	95
6.3.2.	評価.....	98
6.4.	おわりに.....	102

第7章	結言	104
7.1.	本論文のまとめ	104
7.2.	今後の課題と展望	105
付録A	オンセル型タッチパネルとノイズ対策技術	107
A1.	はじめに	107
A2.	オンセル型タッチパネル	107
A2.1	パネル構造	107
A2.2	タッチ検出原理	108
A2.3	開発したオンセル型タッチパネル	109
A3.	LCDの駆動ノイズ対策	110
A4.	センサ電極の寄生容量対策	110
A4.1	寄生容量の問題点	110
A4.2	寄生電流低減化技術(PCR)	111
A5.	外来ノイズ耐性の向上	112
A5.1	相関ノイズ減算法の原理	112
A5.2	信号処理	113
A5.3	試作パネルを用いての実証	116
A6.	おわりに	118
	参考文献	119
	謝辞	130
	研究業績	132

第1章 序論

1.1. 本研究の背景

1.1.1. フラットパネルディスプレイの発展とインタラクティブ化

フラットパネルディスプレイは、この20年間で多機能化が進み、単なる表示媒体として使用されるだけでなく、インタラクティブなデバイスとして利用されるようになった。表1にフラットパネルディスプレイのインタラクティブ化に向けた発展を示す。2001年から3G携帯電話の市場が拡大し、限られた寸法の筐体内で表示部の領域を拡大するために、狭額縁化と部品点数削減化が進んだ。これらを支えた技術は低温ポリシリコン薄膜トランジスタ(Low temperature polycrystalline silicon thin-film transistor:以下LTPS-TFTと略記)である。TFTのチャンネル層の結晶状態が多結晶であり、電界効果移動度は従来のアモルファスシリコンTFTの移動度と比べて2桁大きい $30\sim 100\text{ cm}^2/\text{Vs}$ が得られた。このLTPS-TFTを用いて、液晶表示装置(LCD)の周辺回路であるシフトレジスタ等の機能回路をガラス基板上に集積化する技術開発が進められた[1]。2005年頃の国内のハイエンド携帯端末の多くのLCDは、LTPS-TFTを用いて、ゲートドライバ回路とデータドライバ回路の一部(デマルチプレクサのアナログスイッチ)をガラス基板上に集積化したLTPS-TFT LCDとなった[2]。さらなる小型実装および低コスト化を目指して、6-bit A/Dコンバータ回路と電源回路とを内蔵化したLTPS-TFT LCDが開発され[3][4]、その一部は製品化された。また、携帯端末の低消費電力化を目的とし、画像フレームメモリを集積化したLTPS-TFT LCDが開発された[5][6][7]。

2007年頃からスマートフォンの市場が世界的に拡大した。スマートフォンとのインタラクティブには、マルチタッチ入力に対応した静電容量式タッチパネルが用いられた。タッチパネル付きディスプレイに対する、表示品位向上、薄型軽量化、低コスト化というユーザーニーズに応えるため、オンセル型タッチパネル[8][9][10]やインセル型タッチパネル[11][12]の開発が進められ一部は実用化された。これらは、従来個別の部品であったディスプレイと静電容量式タッチパネルとを完全に一体化した構造であり、従来の構造と比較して光学界面の数及び基板などの構成部材の数を低減する。

当初は携帯端末向けに開発されたLTPS-TFT LCDやインセル型タッチパネルを製造する技術は、現在、車載用のタッチディスプレイにも使われ始めている。視覚ディスプレイはマルチタッチ式のタッチセンサと組み合わせられることで、スマートフォンやタブレット端末、車載HMIに欠かすことができないインタラクティブディスプレイへと進化した。さらに、操作対象の状態を触覚でフィードバックする機能を付与することで、対話的かつ体感的な操作を可能とするインタラクティブな視触覚ディスプレイが検討されている。静電触覚ディスプレイは電極と絶縁層とで構成され、電極に電圧を印加した際に指と電極との間に生じる静電気力によって、触察時の摩擦力を変化させて振動刺

激を行う触覚ディスプレイである。視覚ディスプレイに積層して利用することができるため、インタラクティブ視触覚ディスプレイへの適用が期待されている。

表 1：フラットパネルディスプレイのインタラクティブ化に向けた発展

	3G携帯電話	スマートフォン	車載ディスプレイ
小型化	部品点数削減 狭額縁	薄型化	薄型化
インタラクティブ化 (入力)	入力機能付加	入力機能集積化	入力機能集積化
インタラクティブ化 (出力)	触覚提示機能付加	触覚提示機能付加	触覚提示機能付加

1.1.2. インタラクティブ視触覚ディスプレイへの期待

物体の視覚情報と触覚情報とを同一のディスプレイで同時に提示することで、コンピュータの中のバーチャルな物体を現実物体と同様に触れ、操作しているかのように扱うことが可能となる。一つの理想はわれわれが通常生活しているのと同様な状況、すなわち「見たものが触れるもの(What You See Is What You Feel)」, WYSIWYF ディスプレイである。WYSIWYF ディスプレイを実現するためにはさまざまな問題を解決する必要がある [13]。WYSIWYF ディスプレイには次の効果が期待される。

- ①タッチパネルのボタン操作の操作性が向上する。
- ②視覚情報と触覚情報との多感覚統合が発現し [14]、一方の情報の信頼度が低くなったとき、他方の感覚モダリティが優位に働き知覚が形成される。車載ディスプレイの場合、画面に注視することができなくなったとき触覚情報に基づいてボタンが知覚される。視触覚ディスプレイに入力機能が付与されるとボタンを操作できる。
- ③e コマース、感性を重視する商品のデザインの場合、等において商品の質感情報の伝達がしやすくなる。

1.1.3. インタラクティブディスプレイの現状と課題

モバイル機器とのインタラクションでは、ユーザの視覚情報に依存する傾向がある。しかし、視覚的注意はヒトの限られたリソースであり、モバイル環境では大きな負担を強いられることが多い。視覚的注意への依存を最小化するため、音響や触覚など代替となるモダリティを用いたインタラクションが提案されている [15][16][17][18][19]。これはまた Eyes-free interaction として知られている [20]。文献 [20]は Eyes-free interaction

が必要とされる動機を調査し、4つのカテゴリー（環境、社会、デバイス機能、個人）に分類した10の動機を提示した。その中の一つは、デバイスと物理環境との間で視覚的注意を切り替えることが安全上の懸念となるコンテキストでの安全性の向上である [16]。例えば、運転中にモバイル機器と道路との間で視覚的注意を切り替えるのは危険とされる。

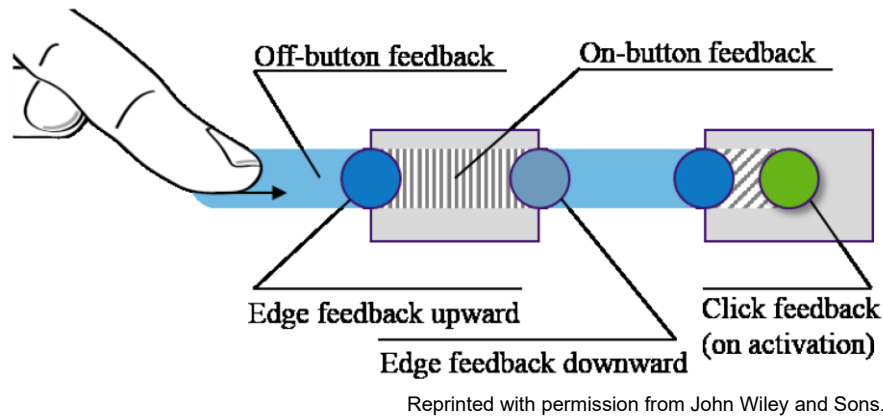
車載用のタッチパネルは使用時に実用的な利点を提供する [21]。ディスプレイと入力と同じ場所にあるため、入力は直接的であり、操作の単純なモードであるポインティングは、初心者ユーザにもなじみがある [22]。ただし、従来のタッチパネルの主な欠点は、画面の表面によって提供される皮膚感覚と運動感覚の両方の触覚フィードバックがないことである。これにより、視覚的注意が非常に求められ [23]、安全性に関する潜在的な問題が生じる。交通事故研究データによると、衝突、衝突寸前、および事故の60%は、前方の車道から視線を逸らしたことが原因である可能性がある [24]。このためタッチパネルの操作においても *Eyes-free interaction* が求められる [25]。

タッチパネルインターフェースに触覚フィードバックを組み込むことで、ユーザは採用されている両方のモダリティでフィードバックを受けられることができる。モバイル機器では、触覚フィードバックは、入力と選択タスクのエラー率を減らし、タスク完了時間を短縮し [26]、作業負担を改善することが示された [27]。Lee と Spence [28]は、高負荷のシナリオで、運転をテーマにした反応時間テストとタッチパネルを使った電話の二次タスクを使って、複数のモダリティを用いたフィードバック（バイモーダル(*bimodal*)とトリモーダル(*trimodal*)のフィードバック)の利点を評価した。その結果、トリモーダル（視覚、触覚、聴覚）フィードバックを有効にすると、運転タスクへの反応と電話タスクの完了にかかる時間が共に短縮され、それに伴い主観的作業負担も軽減されることを示した。運転手の主観的な好みに関し、Seraphin ら [29]は、ユーザは視覚だけよりもバイモーダル（視覚+聴覚または触覚）フィードバックを好み、トライモーダルフィードバックが最も強く好まれることを示した。Pitts ら [30]は、模擬運転環境における自動車のタッチパネルのユースケースのシナリオに基づき、視覚、聴覚、触覚のフィードバックを組み合わせた試験を実施した。ここでも、トライモーダルフィードバックがユーザに最も好まれ、主観的な難易度評価、ユーザの自信、運転タスクへの干渉が、視覚フィードバックだけよりも改善されたことが示された。

車載用タッチパネルの操作では、ユーザは操作対象を見つけるために視覚を用いる。操作対象をアクティブ化する前にタッチパネルを一瞥することを一次一瞥、アクティブ化後にアクティブ化されたことを確認するために一瞥することを二次一瞥と定義し、それぞれの時間を測定すると、2:1の割合で一次一瞥の時間の方が長かった [31]。従来の触覚フィードバックタッチパネルは、操作対象がアクティブ化されたことを触覚でユーザに通知するものであり、操作対象の識別や位置の特定を支援する触覚的な手がかりがないという問題が残っている。

一次一瞥の時間、すなわち操作対象のオブジェクトを視覚で探す時間を無くすために、

触覚を用いてボタンの位置を提示する概念が Beruscha ら [32]により報告された。Beruscha らは触覚キューとして図 1 に示すように、ボタンの領域内外で異なる触覚を提示する [33]、ボタンのエッジで触覚を提示する [34]、ボタンの押下操作で触覚を提示する [35] [36] [37]を挙げている。



Reprinted with permission from John Wiley and Sons.

図 1：触覚フィードバックを用いたタッチパネルのインタラクション [32].




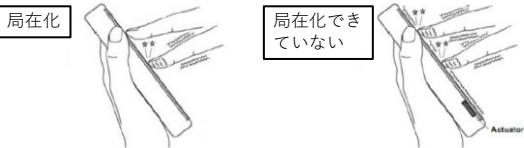
文献 [32] [33]で試作された触覚フィードバックタッチパネルではタッチパネルで指の位置を検知し、表示オブジェクトの位置と比較し、例えば指の位置がボタンのエッジの位置と一致したら触覚を提示する手順で動作する。指で触探索運動をする場合、指がエッジの位置に到達してからアクチュエータを駆動するための信号がアクティブになるまでのタイムラグに起因して、視覚オブジェクトの位置と触覚オブジェクトの位置が一致しない課題が生じる。また、指を右方向にスキャンさせた場合と左方向にスキャンさせた場合とで触覚オブジェクトの位置が異なる課題が生じる。例えば iPhone 5 ではユーザが画面をタッチしてからアクチュエータを駆動するための信号が発生するまでのタイムラグが 55msec との報告がある [38] [39]。Galaxy Y では、指が画面に触れてからイベントがアプリケーションに配信されるまでの時間が約 70msec であり、振動モータによる振動の加速度が最大に達するまでの時間は起動から 90msec 後であった [40]。タイムラグに起因して、視覚オブジェクトの位置と触覚オブジェクトの位置が一致しない課題は WYSIWYF ディスプレイ実現にむけて解決すべき課題の一つである。

この課題を解消する一つのアプローチとして、触覚刺激を局在化して提示することが考えられる。ユーザの指が触探索運動を開始する時点、あるいは開始前から視覚オブジェクトの位置に触覚オブジェクトを提示することで、両者の位置は一致する。さらに、複数指で操作対象をサーチすることが可能となる。

車載用のタッチパネルの操作やタブレット機器で Eyes-free interaction を実現するために求められる機能を表 2 にまとめた。触覚提示機能に関し、操作ボタン上であることを示すテクスチャ感(ファイン粗さ)と、操作ボタンの境界を表す凹凸感(マクロ粗さ)といった材質感の提示は、操作ボタンの位置をユーザに提示するために役立つ。クリッ

ク感の提示は操作ボタンの押し込み操作に対するフィードバックとして機能する。これらの触覚刺激を局在化して提示することで、タイムラグに起因する触覚オブジェクトの位置のずれを無くし、更に、操作ボタンの位置を触覚で特定するために必要な時間を低減する。

表 2： Eyes-free interaction を可能とするために視触覚ディスプレイに求められる機能

触覚提示	テクスチャ感 (ファイン粗さ) パチニ小体	 なぞることで知覚可能な表面粗さ
	凹凸感 (マクロ粗さ) マイスナー小体 メルケル触盤	 FとJの凸マーク探りあて キーのエッジの感覚 指を押し当てることで知覚可能な表面粗さ
	クリック感/ ボタンを押した感	
	上記各触覚の 局在化	
タッチ入力	静電容量式 (マルチタッチ入力)	
(映像表示)	(フラットパネルディスプレイ)	

1.2. 本研究の目的

前節で述べた研究背景より、本研究では、対話的かつ体感的に操作可能な情報ディスプレイを設計することを目的に、インタラクティブなフラットパネル視触覚ディスプレイを構成する上で必要とされる技術を開発し、視触覚ディスプレイの設計論への道を拓く。前節ではこれまでの研究をレビューし、モバイル機器や車載ディスプレイのタッチパネルで Eyes-free interaction が求められていることを示した。前節の議論により、Eyes-free interaction のためには触覚刺激の局在化提示が望ましいことを示した。触覚刺激の局在化提示技術は、WYSIWYF(What You See Is What You Feel)ディスプレイを実現する上での課題を解決する技術でもある。

タッチ入力機能に関しては、ほぼすべてのスマートフォン、タブレットで静電容量式タッチパネルが採用されている。その理由は小さな接触力で応答する、駆動方式によってはマルチタッチ入力に対応する、タッチ面に接触せずに浮遊する指を検出できる、表示画質が良い、が挙げられる。しかし、静電容量式タッチパネルと触覚刺激を局在化して提示可能な触覚ディスプレイとを共存化させる研究例は少ない。本研究では静電容量式タッチパネルと、触覚刺激を局在化して提示可能な触覚ディスプレイとの共存化を阻む

課題を明らかにし、解決手段を示し、Eyes-free interaction が可能なインタラクティブ視触覚ディスプレイの礎を築くことを目的とする。

1.3. 本論文の構成

本論文の構成を図 2 を参照し説明する。

第 2 章では、第 3 章以降の前提となる、触知覚の知見、触覚ディスプレイの研究と分類、静電触覚ディスプレイの研究、触覚刺激の局在化に関する研究、タッチセンシング技術について概説する。

第 3 章では、静電触覚ディスプレイの触覚刺激を空間的に局在化する手法を提案する。マルチタッチに対して独立した刺激を提示するためには触覚刺激を局在化する必要がある。直交する X 電極と Y 電極に、指先の振動検出閾値が大きい 1240 Hz と 1000 Hz の交流電圧信号をそれぞれ印加すると電極の交差部分で振動検出閾値が小さい 240 Hz の静電気力振動がうなりにより発生し、タッチ面上に局在化された触覚刺激を提示できることを示す。

第 4 章では、静電触覚ディスプレイのインタラクティブ化で必要とされる、静電容量センサとの共存化について述べる。第一の段階として、第 3 章で作成した電極基板、すなわち平行に配置された複数の X 電極とそれらと直交する複数の Y 電極、およびそれら電極を覆いタッチ面を形成する絶縁膜で構成された電極基板がタッチセンサとして利用できるかどうかを明らかにする。当該基板は自己容量方式のタッチセンサとして利用できる一方、相互容量方式のタッチセンサとして利用した場合、タッチを検出できない問題が生じること、当該絶縁膜厚が静電触覚ディスプレイ向けに極めて薄く形成されていることがその原因であることを示す。第二の段階として、静電触覚ディスプレイと自己容量方式のタッチセンサとの共存化を、電極の時分割駆動の手法で解決する。特定の電極がタッチセンサとして利用される時間を 8.3 msec とし、タッチセンサとして利用する電極を空間的に拡散させ走査させることで、静電気力が途切れることで生じる不要な触覚刺激が抑制されることを示す。またセンサに混入する電氣的ノイズを低減するために(i)触覚を提示する交流電圧信号にタッチを検出するための励振信号を重畳する回路及び、(ii)タッチ検出信号に混入する、触覚提示用の交流信号を除去するための基準ノード駆動ハイパスフィルタ回路を提案する。これらの技術を利用することで静電触覚ディスプレイと静電容量センサとの一体化が可能であることを示す。

第 5 章では、5.1 mm 四方の電極を 30×20 個アレイ状に配列したセグメント電極構造の静電触覚ディスプレイを試作し、個々の電極を独立して制御することでマルチタッチ入力が可能なこと、形状の自由度が高い触図を提示できることを示す。また、触覚刺激を提示するための交流信号に関し、隣り合う電極に位相が 180 度異なる交流信号を印加することで、ヒトの電氣的接地状態に依存しない安定した触覚刺激を提示できることを示す。さらに、タッチ面上に空間的に局在化し提示した静電触覚オブジェクトを、複数

の指で触察する際に生じる触覚のクロストークが、該交流信号を利用することで低減することを示す。

第6章では、ラテラルモーションを併用しクリック感を提示する際の知覚特性を解明する。タッチ面の振動方向が指の長軸方向の場合は、短軸方向の場合と比較して触覚刺激が強く知覚されることを主観評価実験で示し、振動方向の設計指針を示す。また、静電容量センサを一体化した静電触覚ディスプレイとラテラルモーション機構を用いてインタラクティブな視触覚ディスプレイを作製し、Eyes-free interactionを可能とする一つの構成を示す。

第7章では、本研究の成果をまとめ、今後の課題と展望について述べる。

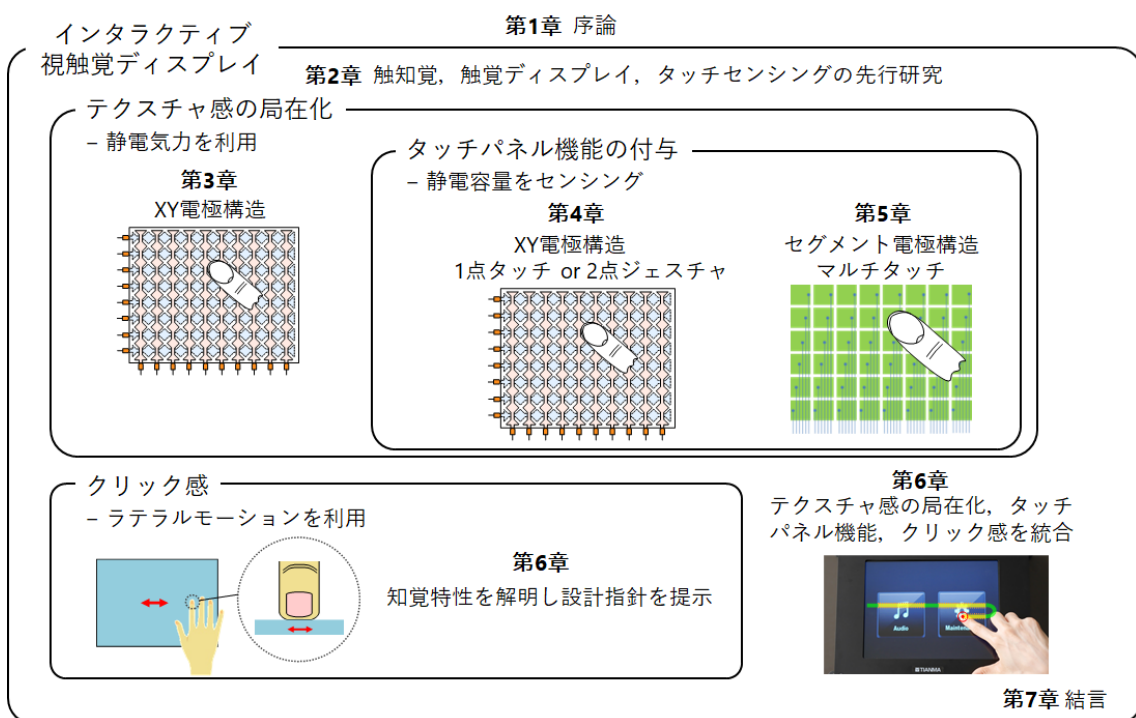


図 2：本論文の構成

第2章 触知覚, 触覚ディスプレイ, タッチセンシングの研究

本論文で述べるインタラクティブ視触覚ディスプレイは, 視覚ディスプレイ, 触覚ディスプレイ, タッチセンシングの研究成果を基礎に構築された. 本章で触知覚の知見, 触覚ディスプレイ, タッチセンシング技術について概説する. これらが第3章以降での前提となる.

2.1. 触知覚の知見

2.1.1. 触覚受容器

触覚受容器は, 皮膚変形刺激に対する順応時間と受容野の広さから4種類に分類されている [41], [42]. ステップ状に皮膚を押し込むと受容器は刺激に応じて発火しパルスを出力する. このとき刺激の強度に応じて発火する遅順応型(Slowly Adapting: SA)と, 刺激の時間変化に応じて発火する速順応型(Fast Adapting: FA)とがある. また受容野の特徴からはI型とII型に分けられる. I型は受容野が狭く境界が明瞭である. II型は受容野が広く境界が不明瞭である. よってこれら特徴の組み合わせとして SAI, SAII, FAI, FAII の4つのタイプに分類されている. これらは機能的な分類である.

一方, 触覚受容器は形態学的につぎのように分類される. 皮膚に対する刺激を検出する機械受容器は4種類存在する. すなわち, メルケル触盤 [43], マイスナー小体 [44], パチニ小体 [45], ルフィニ終末 [46]である. メルケル触盤は皮膚の表面近く存在する. マイスナー小体もまた皮膚の表面近くの真皮乳頭の中に存在する. パチニ小体は皮下組織に存在する. ルフィニ終末は真皮の深い位置に存在することが報告されている.

これら形態学的に同定された受容器と機能的分類との関係は, メルケル触盤が SAI に, ルフィニ終末が SAII に, マイスナー小体が FAI にパチニ小体が FAII にそれぞれ対応するものと推定されている. 図3に触覚受容器の形態学的分類と機能的分類の対応関係を示す. 表3に機械受容器の特性をまとめる [47].

順応が遅く(静圧力に応答), 受容野が狭い SAI (メルケル触盤) が点字パタンの刺激を受容する役割を担っていることが確認されている [48], [49], [50].

表3を参照してパチニ小体について述べる. パチニ小体は広い周波数帯(10-1000 Hz)の機械振動刺激に反応する. パチニ小体は200 Hz から 300 Hz の間の周波数で最も高い感度を持つ. パチニ小体の受容野は比較的大きいため, 空間的な分解能はかなり低い. パチニ小体を介した振動の主観的な印象は, 一般的に“smooth vibration”と表現される. パチニ小体は, 時間的にも空間的にもエネルギーの加算が可能である. 時間領域では, 短い刺激よりも, 長い刺激の方が絶対的な検出閾値が低く, 同じ強度であれば長い刺激のほうが短い刺激よりも知覚されやすい. 同様に, 長い刺激は短い刺激よりも強いと知覚される. 同じことが, 刺激の皮膚への接触面積にも当てはまり, これを空間加算特性 (spatial summation property)と呼ぶ. したがって, 刺激の持続時間と接触面積は, パチニ

小体チャネルのさまざまな知覚特性を決定する重要なパラメータとなる。パチニ小体は振動の方向を識別しない [51]。したがって、タッチ面の法線方向の振動と接線方向の振動の間の知覚特性は似ている。

本研究では周波数が 240 Hz の静電気力の刺激を触覚の提示に利用した。

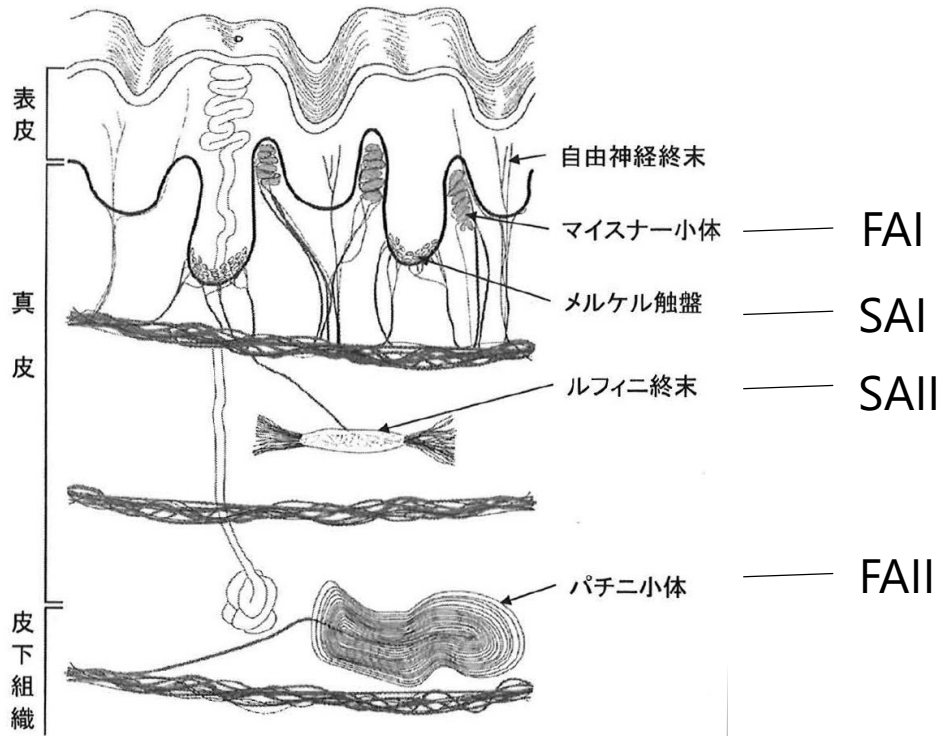


図 3：触覚受容器の形態学的分類と機能的分類の対応関係（現在のところの推定）。
[47], [52]より再構成。

表 3：ヒトの無毛部皮膚機械受容器の特性. [47]より再構成.

	SAI	SAII	FAI	FAII
受容器	メルケル触盤	ルフィニ終末	マイスナー小体	パチニ小体
順応性	遅い	遅い	早い	早い
受容野の境界	明瞭	不明瞭	明瞭	不明瞭
平均的受容野面積 [53]	11.0 mm ²	59 mm ²	12.6 mm ²	101.0 mm ²
受容器当たりの 抹消感覚機構 [53]	4-7	1	12-17	1
皮膚表面からの相対 的深さ	浅い	深い	浅い	深い
形状・寸法 [41]	卵円形(6-12 μm) 触覚円板(直径 7 μm, 厚さ 1 μm)	紡錘形 (長さ 0.5 mm-2 mm)	楕円体(長軸:40-100 μm, 短軸:30-60 μm)	卵型(2500 μm×750 μm)
手掌面における 神経支配密度 [42]	25% (4250 本)	19% (3230 本)	43% (7310 本)	13% (2210 本)
空間加算特性 [54]	なし	—	なし	あり
時間加算特性 [54]	—	あり	なし	あり
皮膚表面温度影響 [54]	あり	あり (100 Hz 以上)	なし	あり
感覚発生に必要な パルス数 [55], [56]	連続パルス(20 程度)	少しでは関与なし	単一パルス	連続パルス
触神経電気刺激によ る発生感覚 [57]	Pressure	—	Tapping (1 Hz) Flutter (10 Hz) Vibration (50 Hz)	Tickling/Vibration
周波数レンジ	0.4-100 Hz	0.4-100 Hz	10-200 Hz	70-1000 Hz
最小閾値(周波数)	10 μm (50 Hz)	3 μm (50 Hz)	6 μm (40 Hz)	0.1 μm (250 Hz)
機能的特徴	強度検出 空間パターン検出 皮膚曲率検出	皮膚の引っ張り検出	速度検出 空間パターン検出 皮膚曲率検出	加速度検出 振動検出
刺激(皮膚変形) と 応答(発火) [55]				
神経線維	伝導速度が速い(40-70 m/s), 太い直径(8-13 μm 以上)の有髄神経線維. 体性感覚野まで2つ程度の中継で伝達.			

2.1.2. 振動検出閾曲線

図 4 は正弦波振動刺激をヒトの母指球に提示して、振動検出閾を測定した結果である [52],[58]. 被験者の右手母指球に、面積 2.9 cm^2 の円盤状接触子で振動刺激を提示したときの振動検出閾値を黒丸で示す. また、同じ部位に面積 0.008 cm^2 の接触子で振動刺激を提示したときの振動検出閾を白丸であらわす. 両者の違いは、刺激周波数 40 Hz 以上の部分で黒丸の方が白丸より小さな値を示すことである. 特に刺激周波数が $200 \sim 300 \text{ Hz}$ の場合、両者の振動振幅の差は 30 dB (30 倍) に達する. 刺激面積が増加すると検出閾値が小さくなる現象を空間的加重という. 振動刺激については、刺激周波数 40 Hz 以上で空間的加重が観察され、 40 Hz 以下ではそれが観察されないことが知られている [59],[60]. 図 4 より、検出閾が最小となる刺激周波数は 250 Hz であることがわかる. 図 4 の黒丸で記されている、大接触子を用いた場合の振動検出閾曲線は、 2 Hz 以下で SA I, $2 \sim 40 \text{ Hz}$ で FA I, 40 Hz 以上では FA II の神経発射曲線と重なり合っていることがわかる. つまり、この振動検出閾曲線は 3 種類の神経発射閾曲線を合成した形となっている. また、白丸で示されている小接触子を用いた場合の振動検出閾曲線は、 2 Hz 以下で SA I, $2 \sim 100 \text{ Hz}$ で FA I, 100 Hz を超えると SA II の神経発射曲線と重なり合う. 黒丸と白丸の振動検出閾曲線の相違は、FA II が振動検出閾曲線パタンの形成に関与しているか、していないかという点にある. FA II は、4 種類の機械受容器単位中で唯一空間的加重を示し、振動刺激の提示面積が広くなると閾値が低くなる特性をもつ [52].

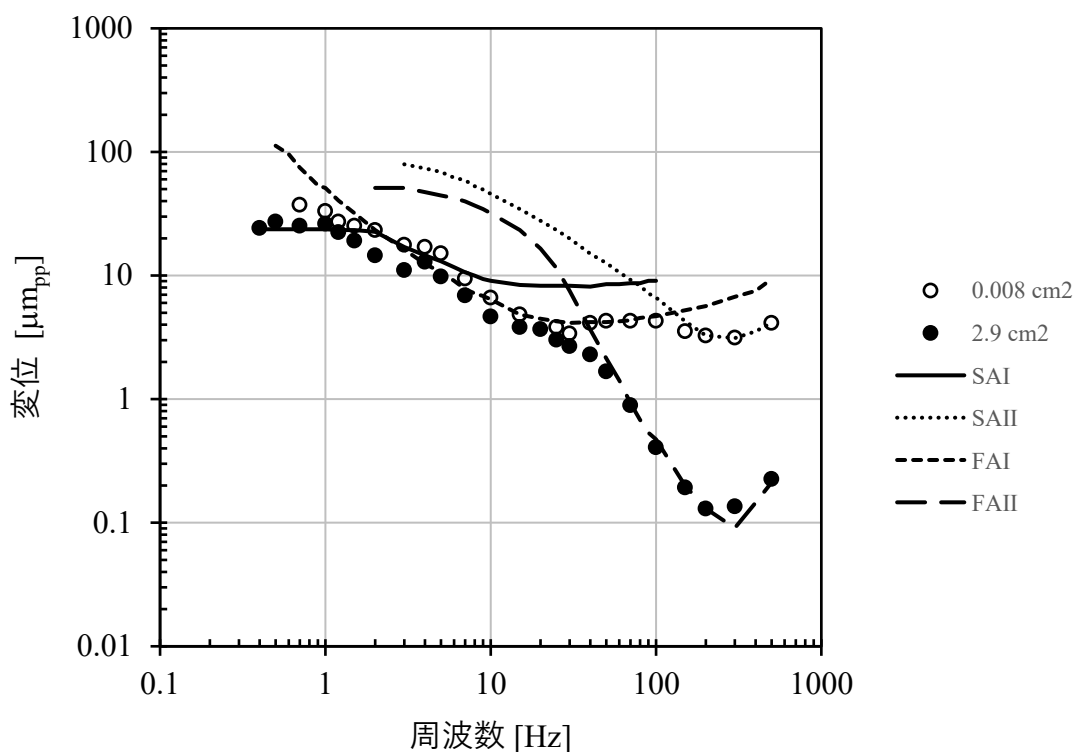


図 4：4つの機械受容器の周波数閾値特性． [58]を元に，縦軸を dB から変位 μm に変換し再構成．

2.1.3. 触覚の時間分解能

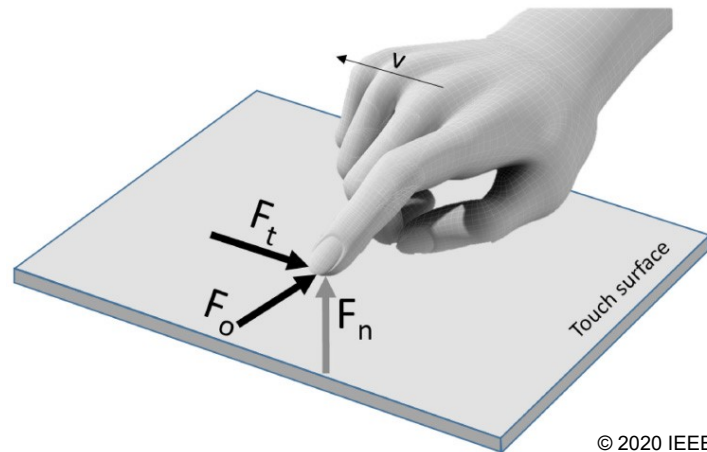
本研究では静電触覚ディスプレイと静電容量センサの一体化を課題に，電極の時分割駆動でアプローチする．電極を静電容量センサとして駆動するとき，触覚を提示するための静電気力の途切れが生じる．この途切れに伴う不要な触覚刺激の発生を抑制するために，触覚の時間分解能の理解が役立つ．触覚の時間分解能とは，2つの刺激提示時間間隔が短くなった場合にそれが2つであることを区別できる最小時間間隔を指す．加える刺激の強さによって変化し，強い場合は 10 ms 程度，弱くすると 50 ms 程度との報告がある．また，5 秒間で知覚できる連続刺激は 9 つまでとの報告もある [42]．また，ある一定の持続時間をもつ振動刺激の中に挿入された時間的な空白的を検出する課題の場合，空白検出閾は振動強度によって異なるが，およそ数十ミリ秒とされる [61]．

2.2. 触覚ディスプレイの研究と分類

インタラクティブなタッチ面のための Haptics は Surface Haptics とも呼ばれ，Haptics の分野における新しい研究領域である [62]．本節では Surface Haptics の先行研究を述べる．

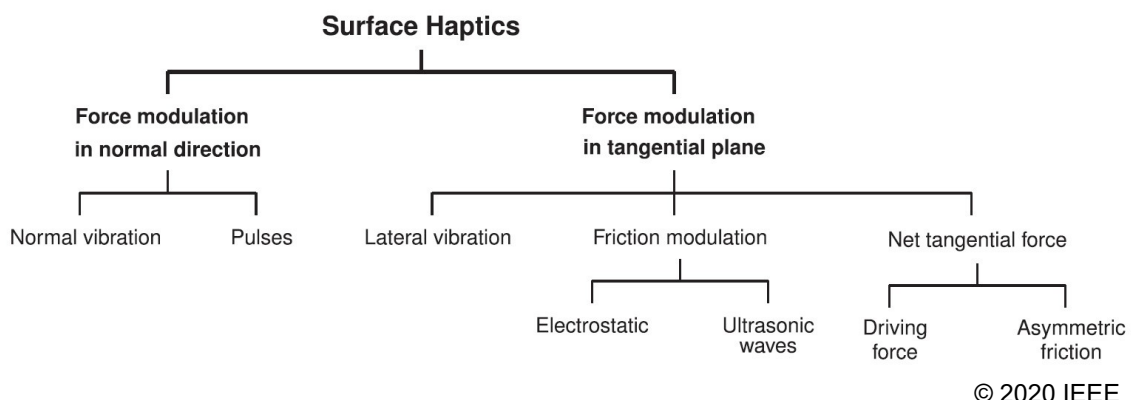
現在のアクチュエーション技術は，相互作用によって指にはたらく力の方向（図 5 参

照)に基づいてグループ化できる. すなわち, (a)タッチ面の法線方向(F_n), (b)タッチ面の接線方向(F_t および F_o)に基づいてグループ化できる. 図 5 の力の分解に基づいて, 現在の技術をさらに分類するアプローチを図 6 に示す. 以下にアクチュエーション技術の分類を示す.



© 2020 IEEE

図 5: タッチ面との触覚的なインタラクションの際に指にはたらく力の方向 [62].



© 2020 IFFF

図 6: 指にはたらく力の方向および刺激の提示方法に基づく, 現行の surface haptics ディスプレイ技術の分類. 7 種類に分類される [62].

2.2.1. Normal vibration

指にはたらく力(刺激)がタッチ面の法線方向の場合, タッチ面の周辺に配置されたアクチュエータが機械的な振動を生成し, それが部材の内部を伝播し指に到達する [63]. このような刺激は **normal vibration** と呼ばれ, 1 kHz 以下の周波数の振動であれば, ヒトの触覚システムで直接検出することができる. 実際, 今日の携帯電話には, この目的のために振動アクチュエータが組み込まれており, 電話の着信をユーザに知らせたり,

ボタンの押下イベントをユーザにフィードバックするために使われている。ここで用いられている単純な振動アクチュエータは、複雑な触覚効果を生み出すことは非常に難しいが、低コストかつ低エネルギーであることから、メーカー各社で採用されている。複数のアクチュエータを使用し、より高度な刺激技術を利用することでユニークな触覚効果を得ることができる。例えば、適切な振幅変調または位相変調を用いて複数の振動を表面に与えることで、実際に刺激された点の中間に振動感覚を得ることができる。このいわゆる *tactile phantom sensation* は、精力的に研究され、多くの用途に用いられている [64] [65]。 [64]に記載されたハンドヘルドデバイスを図 7 に示す。 [64]は一連の心理物理学的実験により、ユーザがデバイスを握っている間、両手に滑らかで一貫した動きを生み出すための制御空間を決定した。

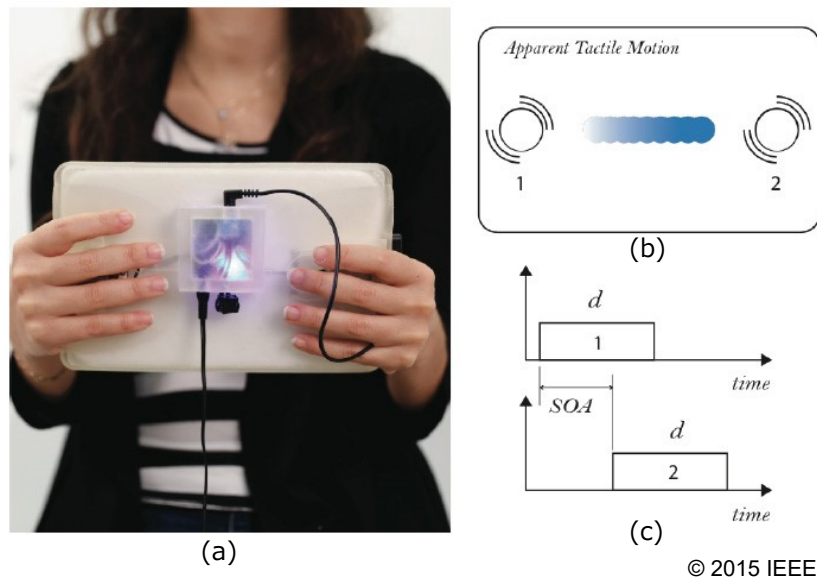
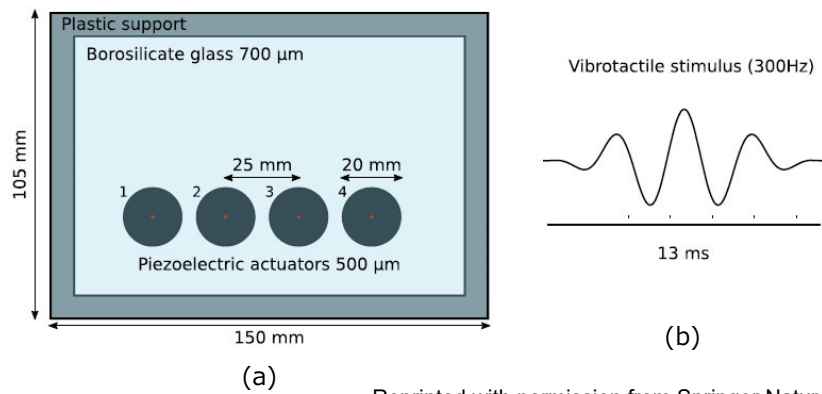


図 7 : Tactile phantom sensation を用いたハンドヘルドデバイス。①Normal vibration に分類される。(a) は 2 つのバイブレータが埋め込まれたタブレットを手に持つユーザ。(b) は見かけの触覚の動き,(c) は 2 つのバイブレータの駆動を示す [64]。

また、*constructive wave* (干渉により強め合った波)と *destructive waves* (干渉により弱めあった波) [66]を作ることで、表面上の小さな領域に振動を局所化して生成することが可能である。この原理の背後にある理論は、インバースフィルタリング [67]やモーダルコンポジション [68]、 [69]という名称で研究されている。インバースフィルタは逆フィルタのことである。インバースフィルタリングを用いて、振動を局在化して提示するように構成した触覚ディスプレイ [67]を図 8 に示す。また、モーダルコンポジションを用いてはりに振動を局在化して生成したときのふるまい [69]を図 9 に示す。



Reprinted with permission from Springer Nature.

図 8: 時空間逆フィルタを用いて振動の局在化を試みた例 [67]. Normal vibration に分類される. (a)は実験評価とユーザ調査のためのセットアップ. 4つの圧電アクチュエータをガラス板に接着し、振動刺激を発生させる. (b)は提示する振動のターゲット波形. この振動を局在化して提示する.

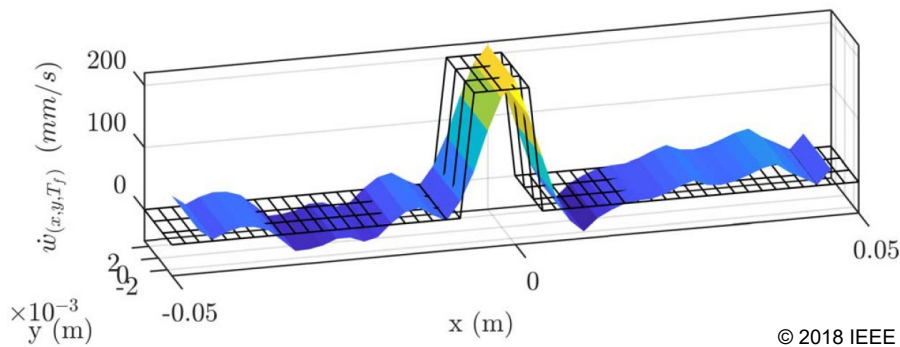
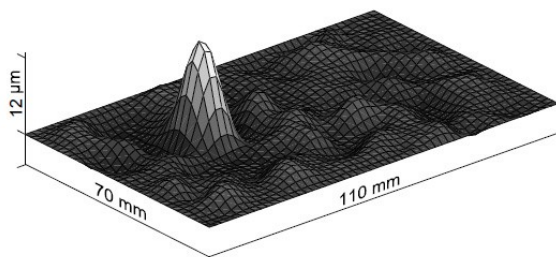
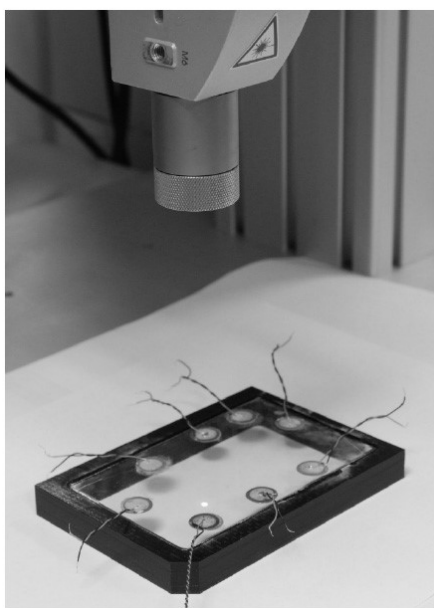


図 9: [振動の局在化の他の例] はりに形成される振動の速度マップ. 理想的な基準速度場 (黒のメッシュ面) と、同定されたモーダル基底の重ね合わせで得られた実際的な基準速度場 (色付きの面) [69]. Normal vibration に分類される.

2.2.2. Pulses

連続した振動を提示する代わりに短い振動パルスを利用し、タッチ面の法線方向の力に起因した触覚効果を生じさせることができる. タッチ面は共振する性質を持っているため、タッチ面に短い振動パルスを生成することは簡単ではない. 表面の機械的な励振により反射が発生するため、特定の場所で法線方向の短い振動パルスを得るためには、この反射を打ち消す必要がある. そのためには、複数のアクチュエータを表面に配置し、それらの制御信号を同期させて、constructive and destructive interference(干渉による波の強め合い、弱めあい)をつくる必要がある. これらの制御信号は、[70]や [71]に記載があるとおり、time reversal(時間反転)理論(時間反転対称性)から導くことができる. 図 10 に time-reversal 理論を利用した触覚ディスプレイと測定された変位 [71]を示す.



© 2013 IEEE

図 10 : time-reversal(時間反転)理論を利用した触覚ディスプレイ(左)と変位測定結果(右) [71]. Pulses に分類される.

2.2.3. Lateral vibration

指と触覚面とが相対的に変位する場合、接線方向にはたらく力を変調させて触覚を提示することも可能である。例えば、触覚面の相対的な横方向の動きが、指内部に接線方向の力を誘発し、横方向の振動(lateral vibration)を引き起こすことがある。この横方向の動きを指の変位の関数として変調することで、触覚面に仮想的なテクスチャを表示することも可能である [72]。実際、因果関係の反転(causality inversion)と呼ばれる現象を利用して、触覚面の横方向の動きによって生じる力と、実際にテクスチャのある表面上を指が滑ったときに生じる力を一致させることができる。 [72]に記載されている実験装置を図 11, 図 12 に示す。図 11 は指が実際にテクスチャのあるサンプル上を移動する際に生じる接線方向の力 f_t と法線方向の力 f_n と指の位置 x_c を検出する装置である。図 12 は刺激装置(触覚のシミュレータ)である。圧電アクチュエータ(図の一番奥の円形の部分)の制御電圧はリニアスライダ E に搭載されたタッチ面 A の位置 x_c と再生するテクスチャ・プロファイルの関数として更新される。

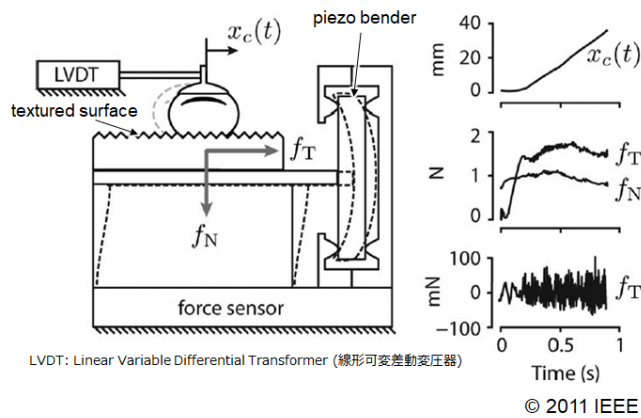


図 11: 指がテクスチャのついたサンプル上を移動する際に生じる接線方向の力 f_T と法線方向の力 f_N と指の位置 x_c を検出する装置 [72].

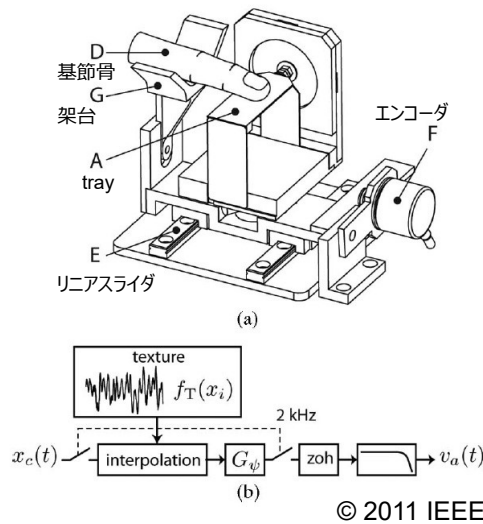


図 12: 刺激装置 (触覚のシミュレータ). 圧電アクチュエータ (図の一番奥の円形の部分) の制御電圧はリニアスライダ E に搭載されたタッチ面 A の位置と再生するテクスチャ・プロファイルの関数として逐次更新される [72]. Lateral vibration に分類される.

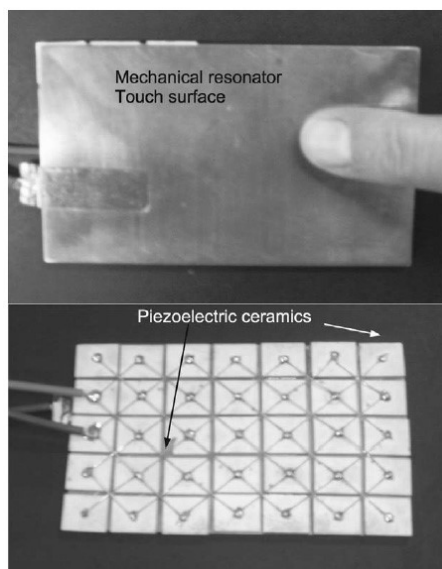
横方向の振動(lateral vibration)は, Lateral actuation やラテラルモーション(Lateral motion)とも呼ばれ, 車載用の触覚フィードバックタッチパネルに適用した例が報告された [73].

2.2.4. Ultrasonic waves

触覚面とその上を滑る指との間の摩擦を動的に変化させる方法も考案されている. 一つの手法は, アクチュエータを用いて触覚面に超音波を発生させる方法である [74][75]

[76] [77]. 触覚面の振動により、指が触覚面と断続的に接触し、摩擦係数が低下する。この現象は active lubrication(能動潤滑)と呼ばれる。励振を単純にオン・オフして、オープンループで比較的単純な触覚効果を得ることも、クローズドループで振動の振幅を制御して、より複雑な触覚効果を得ることも可能である。図 13 に [75]に記載がある超音波触覚プレートを示す。 [75]はプレートと指との間に生じるスクイーズフィルム効果を説明し、その効果を利用して超音波触覚プレートを設計した。

超音波触覚ディスプレイで摩擦が減少する理由として2つの異なるメカニズムが提案されている。 [75]は、指とタッチ面との間に空気のスクイーズフィルムが形成されることで摩擦が減少すると提案した。また、タッチ面が超音波で振動すると、指とタッチ面との間に断続的な機械的接触が生じ、指がタッチ面で跳ねながら滑るという説も提案されている [78]。 Wiertlewski らがストロボスコープを用いて行った最近の研究 [79]では、両方のメカニズムが摩擦低減に寄与していることが明らかにされた。



© 2007 IEEE

図 13: [75]に記載がある超音波触覚プレートを示す。 [75]はプレートと指との間に生じるスクイーズフィルム効果を説明し、その効果を利用して超音波触覚プレートを設計した。 (上)はタッチ面, (下)は piezo素子のアレイである。 Ultrasonic waves に分類される。

2.2.5. Electrostatic

超音波アクチュエーションで摩擦を減らす代わりに、静電アクチュエーションで摩擦を増やすことも可能である [80] [81] [82]- [83]。 表面容量式タッチパネルの導電層に電圧を印加すると、その表面上の指と導電層との間に静電気力による吸引力が法線方向に発生し、表面を滑る指にはたらく摩擦力が増加する。 導電層に印加する電圧信号の振幅、周波数、波形を変化させることで、さまざまな触覚効果を得ることができる。 [82]に記

載がある静電触覚ディスプレイを図 14 に示す. [82]は4インチシリコンウエハー上に49個の電極を正方形に配列した. 200~600 V のパルス電圧を用いた実験では、中程度の強さの触覚が得られた. 指先の感覚は、"sticky "または "buzzing "と表現された.

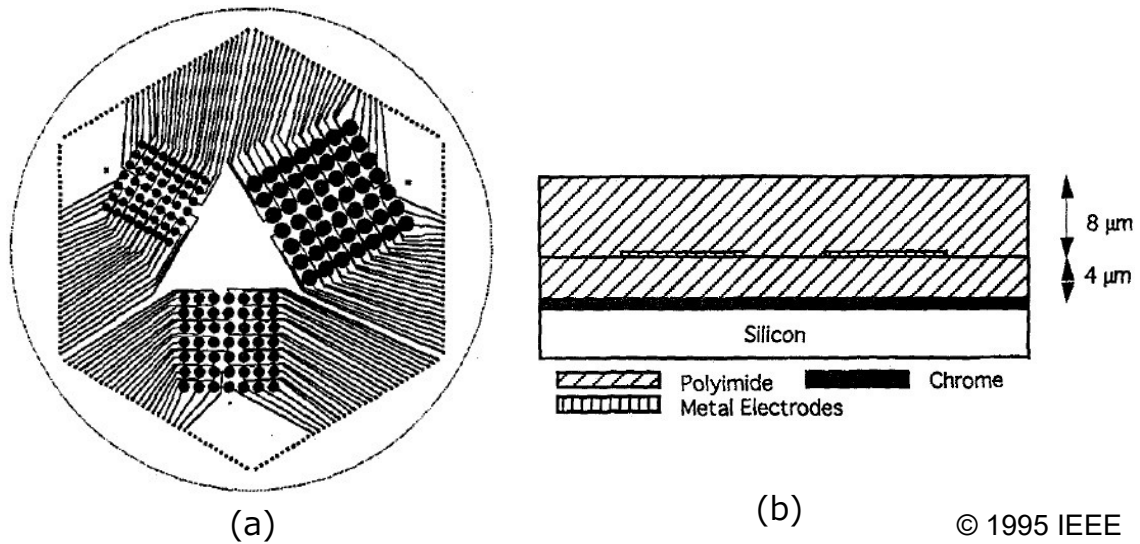


図 14: [82]に記載がある静電触覚ディスプレイ. (a): 4インチシリコンウエハー上に形成した3つのディスプレイ. (b): 断面図. 金属電極(metal electrodes)が静電触覚ディスプレイの電極, 配線, ボンディングパッドに使われる. Chrome は接着層である. Electrostatic に分類される.

Electrostatic に分類される触覚ディスプレイが静電触覚ディスプレイである. 静電触覚ディスプレイについては詳細を 2.3 節で述べる.

2.2.6. Asymmetric friction

超音波または静電アクチュエーションのいずれかを使用して摩擦を制御しながら、タッチ面を接線方向に振動させることで、指で表面をなぞることなく、接線方向の力（すなわち、図 5 の F_t と F_o のベクトル和）を得ることができる. この技術は asymmetric friction(非対称摩擦)と呼ばれ、表面の接線方向の変位が非常に小さくても接線方向の力を生み出すことができる [84]. [84]に記載された触覚提示面を図 15 に示す. タッチ面を図の左右方向に往復振動させ、タッチ面が右に変位する時は強い摩擦力、左に変位する時は弱い摩擦力を与えることで指に右方向の力を与える.

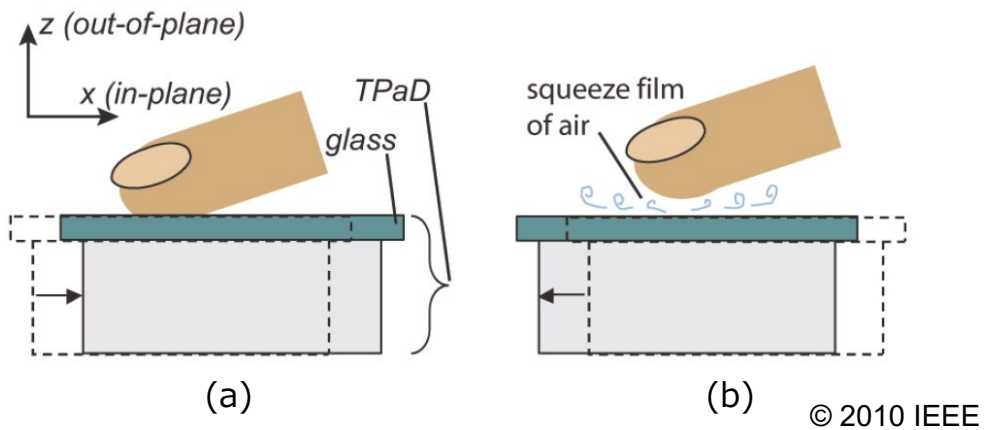


図 15 : [84]に記載がある触覚提示面. 指に右方向の力を与える方法.
 (a):大きな摩擦力でタッチ面を右に変位させる (b):小さい摩擦力でタッチ面を左に変位させる, を繰り返す. *Asymmetric friction* に分類される.

2.2.7. Driving force

超音波の進行波を利用し, タッチ面の接線方向の力を発生させる触覚ディスプレイが報告されている [85]. たわみ振動の進行波がタッチ面を進行するとき, タッチ面の各点は楕円形の軌跡を描く. タッチ面の各点の楕円運動の水平成分は, 接触している物体(指)とタッチ面との間に相対的な速度を発生させる. 図 16 に [85]に記載された, 進行波による力のかかり方を示す. 進行波が左に進むときタッチ面の各点は右回りの楕円形の軌跡を描き, 指には右方向の推進力 F_p が作用する.

類似の技術として, 振動板にたわみ振動モードの進行波を発生させることで振動板上におかれた物体を非接触で搬送する技術がある [86]. 振動板と浮遊物体との間の媒質(空気)の粘性を介して徐々に浮遊物体に搬送する力が加わり, 次第に進行波と同方向に物体が搬送されるとされている. このとき浮遊物体に作用する力の向きは, 興味深いことに [85]に記載がある指に作用する力の向きと逆である.

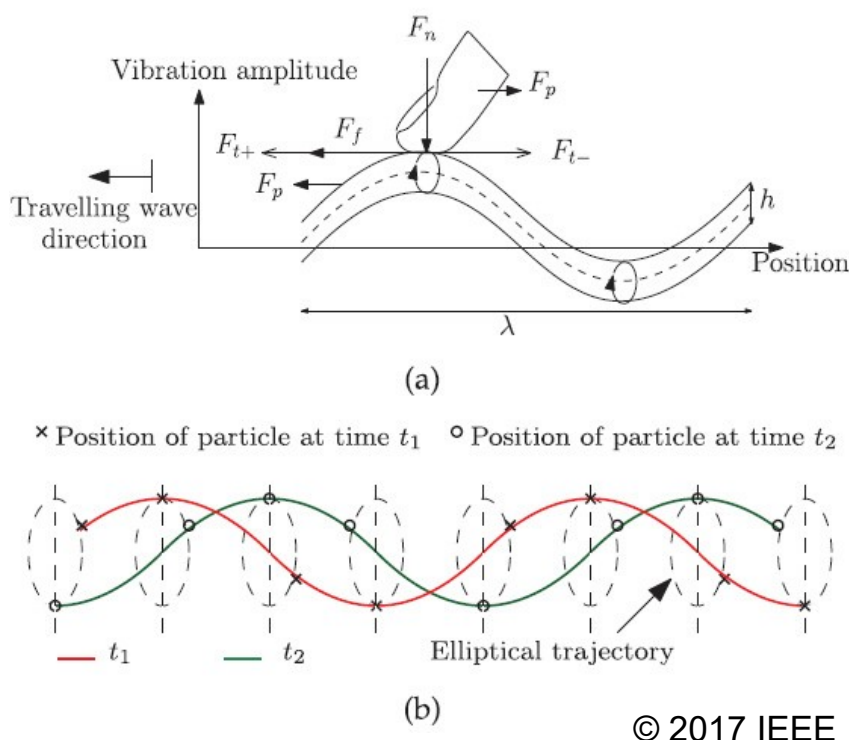


図 16 : [85]に記載がある進行波を利用した触覚提示面.

(a):進行波による力のかかり方 (b):点の楕円運動の軌跡. Driving force に分類される.

2.3. 静電触覚ディスプレイの研究

静電触覚ディスプレイは電気振動(electrovibration)と呼ばれる現象を利用する. 電気振動は Mallinckrodt らにより 1953 年に偶然発見された [87]. 薄い絶縁層で覆われた金属表面上で乾いた指をそっと動かし、110 V の AC 電源ラインで金属を励起すると、表面がゴムのような感触だと報告した. Mallinckrodt らは皮膚の絶縁層または外皮が平行平板コンデンサの誘電体を、金属が一方の電極を、指の導電性液体が他方の電極を形成することを示唆し、その効果をつぎのように説明した. すなわち、交流電圧が金属に印加されると、皮膚と金属の間に断続的な静電引力が生じる. この力は指が静止しているときは弱すぎて知覚できないが、タッチ面上で指を滑らせた場合、タッチ面と皮膚との間に働く摩擦力が振動し、ゴムのような感覚を生み出す.

電気振動を触覚提示の応用に利用した最初の試みは Strong によって 1970 年に報告された [81]. 彼は平らなヘッドをもつ金属ピンのアレイを、そのヘッドが薄い絶縁膜で絶縁される形態でプラスチックのボディに埋め込んだ. ユーザが様々な触覚形状を知覚できるようにピンに異なる電圧信号を印加した. 同様の構成が Tang らによって 1988 年に報告された [88]. Tang らはリソグラフィー微細加工を使用して、シリコンウエハー上に絶縁層で覆われた電極アレイを作製した.

静電触覚ディスプレイと視覚ディスプレイとタッチ入力機能を組み合わせたインタ

ラクティブな視触覚ディスプレイは Bau らにより 2010 年に報告された [89]. 視触覚ディスプレイは、ガラス板とガラス板上に形成された光学的に透明な電極層で構成され、電極層は絶縁体層でコーティングされた。映像は、ガラス板の後ろに設置されたプロジェクターを使用してガラス板の拡散面に投影された。触覚刺激は視覚情報に一致するように生成された。赤外カメラを用いてタッチ面にタッチする指の反射光を取得した。Radivojevic らは、モバイル用の液晶ディスプレイ(LCD)と静電触覚ディスプレイを組み合わせた装置を 2012 年に報告した [90]. 触覚ディスプレイは LCD の上に配置された。Bau らおよび Radivojevic らにより報告された、視覚ディスプレイと組み合わせた静電触覚ディスプレイは、表面全体に同じ触覚を提示するため、マルチタッチまたは複数人での触覚インタラクションには適していなかった。

中村らは、接触パッドを利用した、透明な静電触覚ディスプレイを 2016 年に提案した [91]. 中村らの装置はマルチユーザ機能と、静電容量センシングを用いた位置の検出機能を可能とした。装置は視覚ディスプレイと、視覚ディスプレイ上に積層された酸化インジウムスズ(ITO)製の電極シートと、静電吸着に用いる複数の接触パッドで構成された。ユーザは接触パッドに指を乗せ、接触パッドをタッチ面上でスライドさせた。静電吸着により触覚を提示するための低周波の電圧信号に、接触パッドの接触位置を検出するための高周波電圧信号を重畳させ、接触パッドに印加することで、システムは同じ構成部品を用いて受動的な触覚フィードバックの提示と接触位置検出を行った。接触パッドはシステムと配線で接続されているため、アプリケーションは限定的であった。

静電触覚ディスプレイと投影容量式タッチセンサの組み合わせは、Kim らによって 2016 年に報告された [92]. 彼らは、投影容量式タッチセンサ上に静電触覚ディスプレイ用の導電層を積層した。静電触覚ディスプレイ用の導電層を介して、投影容量方式タッチセンサの電極と指との間に形成される静電容量の変化を検出するため、静電触覚ディスプレイ用の導電層には $10^6 \Omega/\square$ 以上の高インピーダンスの膜が使用された。

触覚ディスプレイをマルチタッチに対応させる目的で、触覚刺激を局在化して提示することを試みた静電触覚ディスプレイが、筆者らにより、本研究の成果の一部として 2014 年に発表 [93]された。また Ilkhani らにより 2018 年に発表 [94]された。両者とも XY 電極構造の電極基板を利用した。詳しくは 2.4 節および第 3 章で述べる。

2.4. 触覚刺激の局在化に関する研究

触覚刺激の局在化に関する研究であって、タッチパネルに適用可能な方式を述べる。

マイクロ流体構造を用いて、タッチ面を変形させ凹凸を提示する触覚提示デバイスが Tactus で開発された [95]. 触覚を提示する必要が無いときタッチ面はフラットで、触覚を提示するときはマイクロチャンネル内の流体圧を上げることで表面のポリマー層が隆起する。ソフトウェアキーボードの個々のキーに対応した形状で隆起し、あたかも個々のボタンが上昇したような触覚を提示することができる。静電容量式タッチパネル

に積層することでインタラクティブな視触覚ディスプレイを構成することが可能とされる。

Normal vibration や Pulses の類型においては、複数のアクチュエータを制御し、面内の特定に位置を振動させるために、時間反転(Time-reversal)を用いた手法、[70][71][96][97]と逆フィルタ(Inverse filter)を用いた手法 [67][98][99]が提案されている。またタッチ面を振動させた時に形成される定在波の位置をあらかじめ周波数ごとに計算し、タッチ位置に応じて振動させる周波数を選択することで、特定の指に触覚刺激を提示する手法が提案されている [100]。

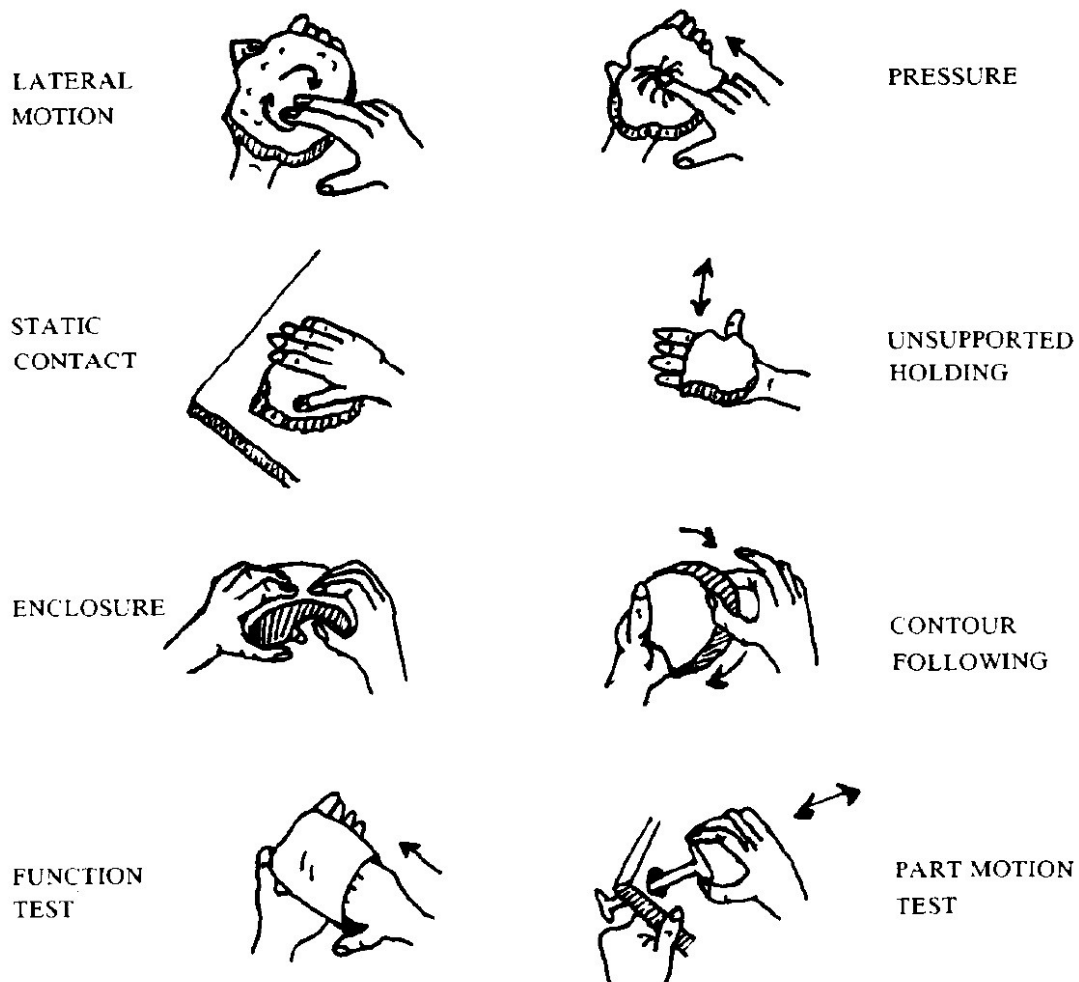
配置した電極から皮膚表面に電流を流し、皮膚下の神経を活動させる電気触覚ディスプレイでは、1 mm 四方の電極を 3 mm 間隔で配列し、個々の電極を独立に制御することで触覚を局在化して提示した例が報告されている。さらに、個々の電極に電流を流したときに生じる電圧を測定することでタッチの検出ができたとされる [101]。

静電触覚ディスプレイの場合もセグメント化された電極を配列し、個々の電極を独立に制御することで触覚刺激を局在化し提示することができる。これでは装置が煩雑となることから、より簡易な構成で刺激を局在化する方法が検討されている。その一つは、2018 年に Ilkhani らにより発表 [94]された方法である。直交する特定の X 電極と Y 電極に 250 Hz の高電圧交流信号を印加し、その結果、交点で静電気力が倍となり、摩擦に変化が生じ、その部分だけで知覚閾値を超えて刺激を感じるとされる。しかし、この方法は触覚のコントラストが低いという点で限界がある。その理由は、交点では摩擦力が指の検出閾値を超え、それ以外の電極上では摩擦力が検出閾値を超えないように駆動電圧を設定する必要があるからである。この方法は、摩擦力の違いのみを利用して局在的な触覚刺激を生み出す。一方、筆者らが 2014 年に発表した、第 3 章で提案する方法 [93][102]は、摩擦力の違いだけでなく、摩擦力の周波数に応じた機械受容器の感度の違いを利用した。このため触覚刺激のコントラストを高められる可能性がある。

Lederman と Klatzky (1987) は、遮眼した視覚に障害のない者を対象とした実験を行い、触運動知覚による探索を行う際の手指の使い方とそれにより得られる情報の分類を試みた [103], [104]。それらを Exploratory Procedures (Eps:探索法) と命名し、Eps には対象物に関係なく一定の運動パターンがあるとしている。Lederman Klatzky (1987) が分類した Eps は図 17 に示す 8 通りである。

- ・「lateral motion」は、擦るような横方向の動きである。対象物の表面の小さく均一な領域をすばやく前後に擦ることにより、輪郭などの形状ではなく肌理などの質感が探索される。
- ・「pressure」は、対象物の一部に押すような力を加え、硬さに関して探索される。
- ・「static contact」は、対象物に静かに手をあてることにより温度に関して探索される。
- ・「unsupported holding」は、対象物を掌などに乗せることにより持ち上げ、保持した状態で行われる。これにより、腕や手首の感覚などから重さに関して探索される。

- 「enclosure」は、手で対象物を全体的に包んでできるだけ多くの部分に接触する。この時対象物の輪郭に合わせて手でより正確に包み込もうとする様子が見られる。これにより全体的な形状や大きさが探索される。
- 「Contour following」は、手が対象物の輪郭との接触を維持する動的な探索で対象物の輪郭を非反復的になぞることによって正確な形状や大きさが探索される。
- 「part motion test」は、対象物のある部分に力を加えて動かす動作である。この Eps は対象物の可動部分が存在する場合にのみ定義される。
- 「function testing」は、特定の機能を実際に行う動作である。例えば手や指を容器に入れたり音が出る道具で音を慣らしたりすることである。



Reprinted with permission from Elsevier.

図 17 : Lederman and Klatzky (1987) による Exploratory Procedures (Eps:探索法) のパターン [103].

静電触覚ディスプレイは「lateral motion」による探索に対応する触覚を提示することができる。「Contour following」による探索については限定的な情報提示にとどまる。そ

の他の探索法に対しては、現在のところ情報を提示することはできない。

2.5. タッチセンシング技術

静電容量をセンシングする静電容量式タッチパネル、例えば [105]は小さな接触力で応答する、駆動方式によってはマルチタッチ入力に対応するという特徴があり、さらにタッチ面に接触せずに浮遊する指を検出できるといった特徴から、多くのスマートフォン、タブレットで採用されている。本研究では、視触覚ディスプレイのインタラクティブ化に際し、実際に広く普及している静電容量式タッチパネルの上記特徴が不可欠と考え、静電容量センサを一体化するアプローチを採用した。

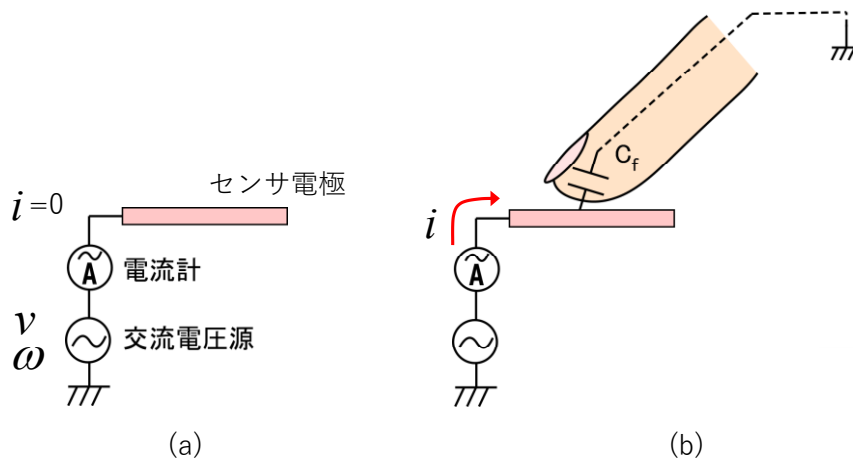
静電容量式タッチパネルは静電容量を検出する電氣的な方式の観点から自己容量方式と相互容量方式に分類される。また電極の形状の観点から表面容量式と投影容量式に分類される。

2.5.1. 自己容量方式と相互容量方式

静電容量を検出する電氣的な観点から分類される2つの方式、自己容量方式と相互容量方式 [106]について述べる。図 18 は自己容量方式の動作原理を示す。自己容量方式ではセンサ電極に結合する静電容量を検出する。センサ電極に交流電圧源(電圧 v 、角周波数 ω)を接続し、交流電圧源に流れる電流 i を測定する。図 18(b)の回路方程式より次の関係が成り立つ。

$$\|i\| = \omega C_f \|v\| \quad (1)$$

電流 i のノルムは静電容量 C_f に比例するので、電流 i のノルムを測定することで電極に結合する静電容量を計測することができる。上の例では交流電圧を印加し電流のノルムを測定したが、電流を積分した電荷を測定することも一般的である。ステップ電圧信号を印加しその応答としての電荷を測定することも一般的である。



$$\|i\| = \omega C_f \|v\|$$

電流 i のノルム（実効値）は C_f に比例

図 18：自己容量方式の動作原理. (a)はタッチしていない場合，(b)はタッチしている場合のふるまいを示す.

図 19 は相互容量方式の動作原理を示す. 相互容量方式では駆動電極(Drive electrode, Tx)と受信電極(Receive electrode, Rx)を対で用いる. 駆動電極に交流電圧信号を印加すると，駆動電極と受信電極との結合容量を介して，グラウンドに接続された受信電極に電流が流れる. 指でタッチすると，一般的には結合容量が減少し [107], 図 19(b)に示すように電流が減少する. 電極上の絶縁膜厚が薄い場合，人体が接地していると見做せなくなり，4.2 節で述べるように電流が増加するあるいは電流が変化しないふるまいをする.

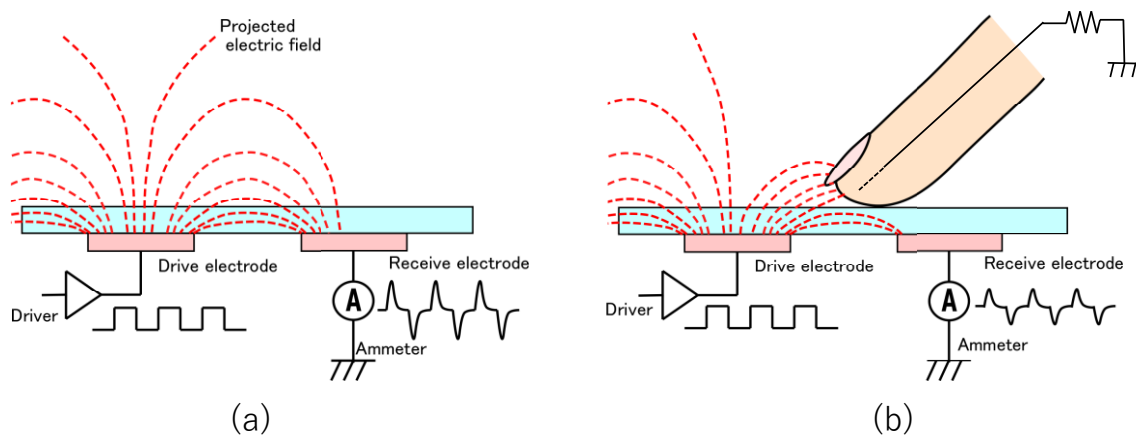


図 19：相互容量方式の動作原理. (a)はタッチしていない場合，(b)はタッチしている場合のふるまいを示す.

2.5.2. 表面容量式と投影容量式

電極の形状の観点から分類される2つの様式、表面容量式と投影容量式について述べる。表面容量式では、タッチ検出領域を覆う1枚の抵抗膜がタッチ検出用の電極を構成する。投影容量方式ではタッチ検出領域に複数の電極が設けられる。電極に駆動電圧が印加されると電界がタッチパネル前面に投影されるために投影容量方式タッチパネルと呼ばれる [108]。電極の形状の観点から分類される表面容量式/投影容量式と、静電容量を検出する電気的な観点から分類される自己容量方式/相互容量方式との組み合わせの例を表4に示す。

表4：静電容量式タッチパネルの方式の組み合わせの可否

	表面容量式 (1枚の抵抗膜)	投影容量式 (複数の電極)
自己容量方式	可	可
相互容量方式	不可	可

図20に表面容量式のタッチパネルを示す。タッチに伴い電流の和($|I_1|+|I_2|+|I_3|+|I_4|$)が増加するため、タッチの有無はこの電流の和を閾値と比較することで検出する。タッチの位置は各電流の比から特定する。

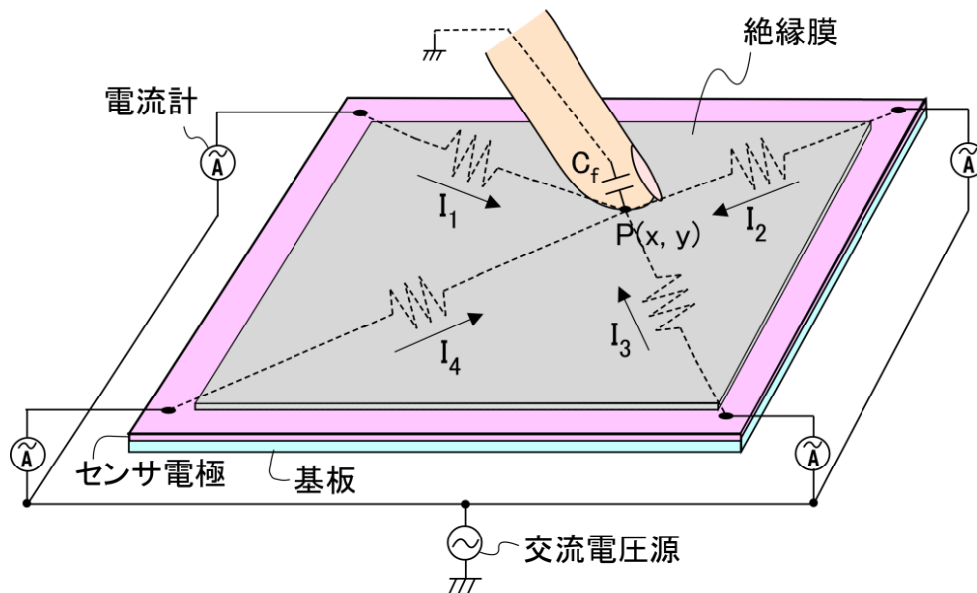


図20：表面容量式のタッチパネル

投影容量式と自己容量方式を組み合わせたタッチパネルを図21に示す。電極基板は複数の水平電極(X電極)と複数の垂直電極(Y電極)を有し、それぞれの電極の自己容量を検出してタッチ位置を特定する。感度調整のレンジが広く、手袋やホバー入力に有利とされる。XY電極構造の場合、いわゆるゴーストタッチが検出されるためマルチ

タッチ入力ができない。矩形の電極を石畳のように敷き詰めて、各電極の自己容量を検出することでマルチタッチ入力が可能となる。この概念は近年、LCD のインセルタッチパネル [109] [110] [111] [112] や OLED のオンセルタッチパネル [113] への適用が報告されている。本研究では、視触覚ディスプレイのインタラクティブ化に際し、自己容量方式のタッチパネルを一体化するアプローチを採用した。

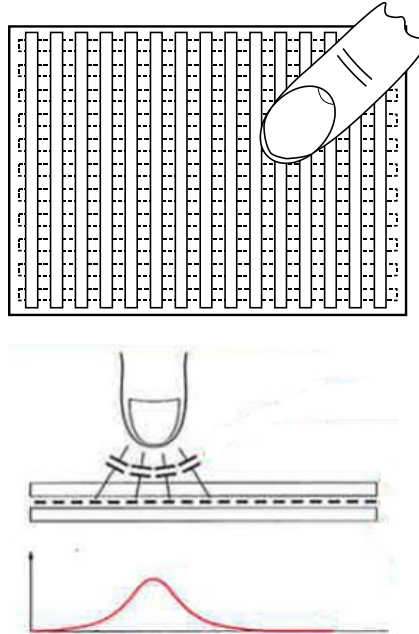


図 21：投影容量式と自己容量方式を組み合わせたタッチパネル

投影容量式と相互容量方式を組み合わせたタッチパネルを図 22 に示す。電極基板は複数の水平電極（X 電極）と複数の垂直電極（Y 電極）を有す。X 電極が駆動電極であり、順次パルス電圧信号が印加される。その応答を各 Y 電極で検出してタッチ位置を特定する。マルチタッチ入力が可能である。

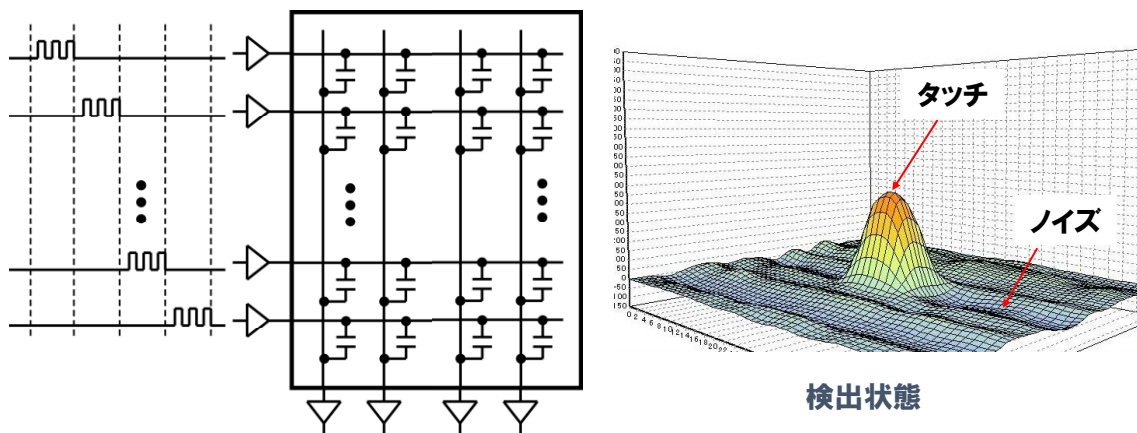


図 22：投影容量方式と相互容量方式を組み合わせたタッチパネル

2.6. 本章まとめ

第3章以降の前提となる，触知覚の知見，触覚ディスプレイの研究と分類，静電触覚ディスプレイの研究，触覚刺激の局在化に関する研究，タッチセンシング技術について概説した．

第3章 触覚刺激の空間的局在化

3.1. はじめに

第3章では、静電触覚ディスプレイにおける触覚刺激の空間的局在化の手法を提案する。マルチタッチに対して独立した刺激を提示するためには触覚刺激を局在化する必要がある。直交する X 電極と Y 電極に、指先の振動検出閾値が大きい 1000 Hz と 1240 Hz の交流電圧信号をそれぞれ印加すると電極の交差部分で振動検出閾値が小さい 240 Hz の静電気力振動がうなりにより発生し、タッチ面上に局在化された触覚刺激を提示できることを示す。

本研究では、触覚刺激を局在化して提示する際、刺激の周波数により検出閾が異なる特徴を利用した。すなわち、触覚刺激を提示する対象とする領域（以下、対象領域と略記）には検出閾値が小さい周波数の刺激を提示し、他の領域では触覚刺激が検出されないよう、止む無く刺激が生じる場合は、検出閾値が大きな周波数の刺激が発生するようにした。

3.2. 原理

3.2.1. 構造

触覚刺激の空間的局在化に向けて提案した静電触覚ディスプレイの概念を図 23 に、構造を図 24 に示す。静電触覚ディスプレイの構成要素である電極基板は、基板上に形成された複数の X 電極と複数の Y 電極とそれらを覆う絶縁膜で構成した。一部の X 電極と一部の Y 電極に、指先の振動検出閾値が大きい 1000 Hz と 1240 Hz の交流電圧信号(V_2 , V_1)をそれぞれ印加すると、これらの電極が交差する領域で、振動検出閾値が小さい 240 Hz の静電気力振動が、指と電極との間に発生した。ユーザが指先で触探索運動をすると、ユーザは交流電圧が印加された電極が交差する領域でザラザラした印象の触覚を知覚した。この触覚ディスプレイは交流電圧信号を印加する電極を選択することで、X 電極と Y 電極とが交差する任意の位置に触覚刺激を提示することができた。

図 24 の断面図に示すように、X 電極と Y 電極は互いに隣接する。また、X 電極と Y 電極との隙間を最小化するために、ダイヤモンド形状の電極を数珠上に連結した電極構造とした。絶縁膜の上がタッチ面である。

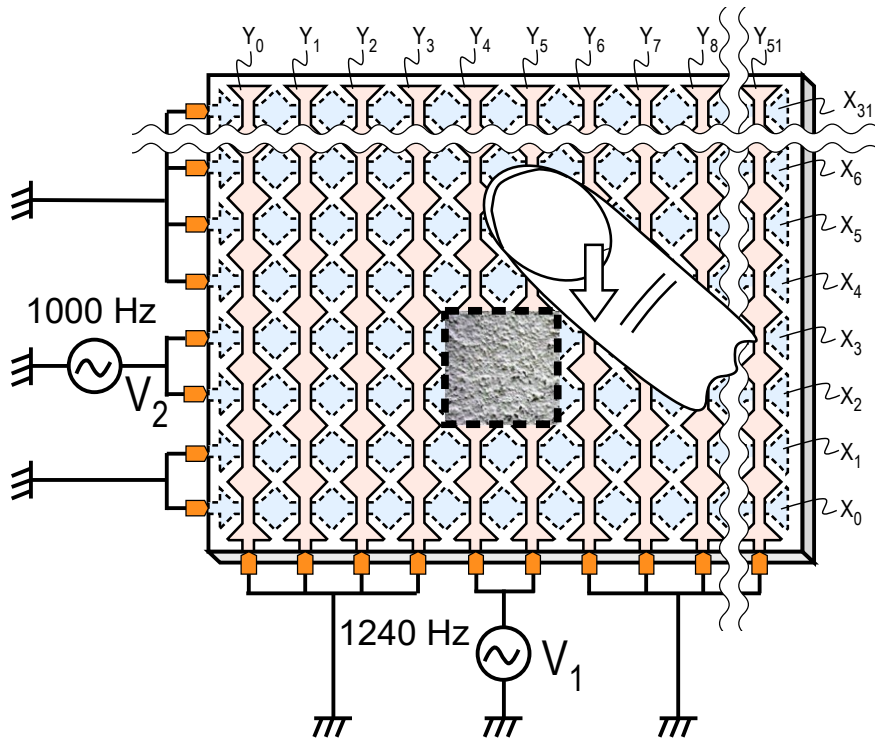


図 23 : XY 電極を用いた, 静電気力を用いた静電触覚ディスプレイ

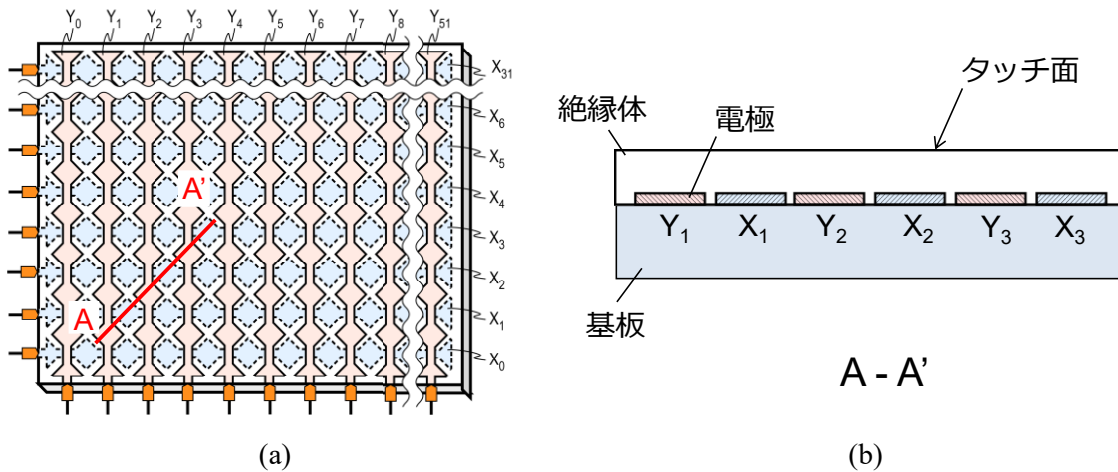


図 24 : XY 電極構造の電極基板. (a)平面視図, (b)断面図.

3.2.2. モデルを用いた原理の説明

図 25 に示すモデルを用いて指に働く静電気力を計算し, X 電極に印加する交流電圧信号の周波数と, Y 電極に印加する交流電圧信号の周波数との差の周波数の静電気力が

指にはたらくことを示す．図 25 は提案する触覚ディスプレイにおいて，交流電圧信号が印加されている X 電極と交流電圧信号が印加されている Y 電極とが交差する領域の断面を示す．Y 電極には交流電圧信号として，周波数が f_1 の正弦波の交流電圧信号 V_1 が印加され，X 電極には周波数が f_2 の正弦波の交流電圧信号 V_2 が印加される．指は電極 P としてモデル化する．電極 P がタッチ面に接触すると，複数の X 電極と Y 電極とが電極 P に対向する．これら複数の電極は静電容量が C の複数の平行平板コンデンサを形成する．人体のインピーダンス R が十分に大きい場合，電極 P の電位(V_p)は $V_p = (V_1 + V_2)/2$ と近似される．真空の誘電率を ϵ_0 絶縁体の比誘電率を ϵ_r ，絶縁体の誘電率を $\epsilon (= \epsilon_0 \epsilon_r)$ ，平行平板コンデンサの電極面積を S とすると，平行平板コンデンサの電極間に働く力の式より，電極 P と電極 X_a との間に生じる静電気力(引力) F_{e1} は次の式で表される．

$$F_{e1} = \frac{1}{2\epsilon S} \left(C \frac{V_2 - V_1}{2} \right)^2 \quad (2)$$

同様に電極 P と電極 Y_b との間に生じる静電気力(引力) F_{e2} は次式となる．

$$F_{e2} = \frac{1}{2\epsilon S} \left(C \frac{V_1 - V_2}{2} \right)^2 \quad (3)$$

図 25 では静電気力が働く平行平板コンデンサが 4 つ描かれている．これらの電極が，指で力 F_{e1} と力 F_{e2} とが区別できない程度に高密度な場合，個々の平行平板コンデンサの電極間に働く力静電気力の合力が，マクロ的に指に働くと考えられる．個々の平行平板コンデンサの電極間に働く力静電気力の合力を F_{total} とすると，図 25 より， $F_{total} = 2(F_{e1} + F_{e2})$ である．Y 電極に印加する振幅 A の正弦波の電圧信号 V_1 を $V_1 = A \cos 2\pi f_1 t$ ，X 電極に印加する振幅 A の正弦波の電圧信号 V_2 を $V_2 = A \cos 2\pi f_2 t$ ，絶縁膜の厚さを d とすると，マクロ的に指に働く力 F_{total} は次式となる．

$$F_{total} = \frac{A^2 \epsilon S}{2d^2} \{1 - \cos 2\pi(f_1 + f_2)t\} \{1 - \cos 2\pi(f_1 - f_2)t\} \quad (4)$$

数式4により，マクロ的に指に働く力 F_{total} は， $f_1 + f_2$ の周波数で振動する力の振幅を周波数 $f_1 - f_2$ で変調させた信号であることが示された．つまり，X 電極に印加する正弦波の電圧信号と Y 電極に印加する正弦波の電圧信号の周波数の差で生じる，うなりの周波数と等しい周波数成分をもつ静電気力が指に働くことが示された．

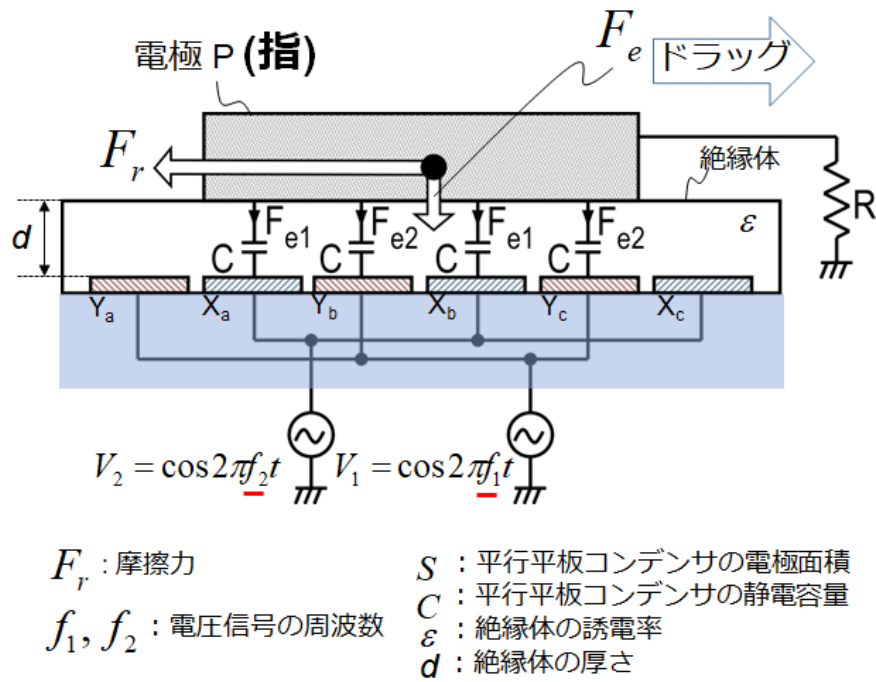


図 25 : 指に働く静電気力を計算するモデル.

周波数 f_1 を 1000 Hz, 周波数 f_2 を 1240 Hz とした場合に, 数式4で表される波形を図 26 に示す. マクロ的に指に働く力 F_{total} の包絡線の周波数は 240 Hz となり, この周波数は周波数 f_1 と周波数 f_2 のうなりの周波数である. この状態で触探索運動をすると, うなりの周波数の静電気力振動により摩擦力が変動し, ユーザの指先では指のせん断方向の変形が生じる. ユーザはこの変形を検出することで触覚刺激を知覚する.

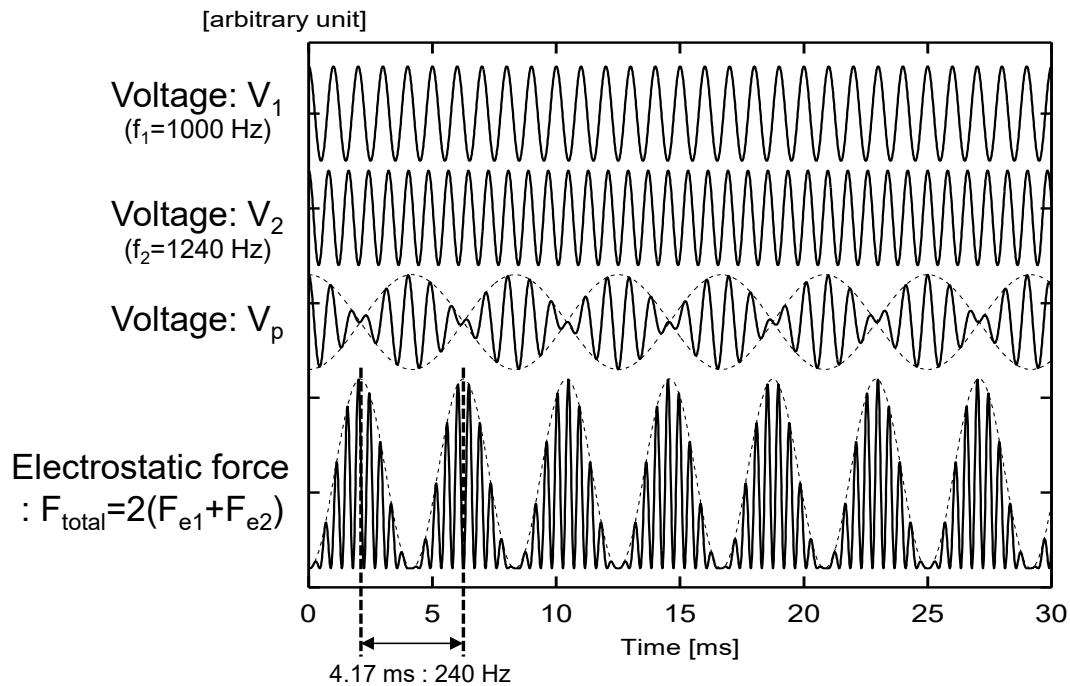


図 26 : X 電極の電圧 V_1 , Y 電極の電圧 V_2 , 指に誘起される電圧 V_p , マクロ的に指に働く力 F_{total} の波形の計算結果.

3.3. 駆動周波数の設計

ヒトの機械受容器は振動検出閾振幅値が周波数に依存する [58]. X 電極と Y 電極に印加する交流電圧信号の周波数を設計するために, 静電触覚ディスプレイにおける検出閾電圧の周波数依存性を, 1 枚の電極で構成される電極基板(3M 社製の表面容量式タッチパネル)を用いて測定した. 測定結果を図 27 に示す. 図 27 に示すように, 静電気力の周波数が 200 Hz 付近で検出閾電圧が最低となった.

先行研究と比較する. 円盤状接触子を用いて振動刺激を提示して得られた周波数特性によれば, 図 4 に示すように振動の検出閾値は 250 Hz 付近で最も小さくなった [52]. 静電触覚ディスプレイを用いた検出閾値測定結果も上記の感度曲線に沿ったものとなったとの報告がある [114]. [114]では, 交流電圧信号の周波数が 60 Hz から 240 Hz の範囲で検出閾値が小さくなった. 発生する静電気力の周波数は交流電圧の周波数の 2 倍であるため, 静電気力の周波数が 120 Hz~480 Hz の範囲で検出閾値が小さくなったと言える.

これらの知見に基づき, f_1 に 1000 Hz, f_2 に 1240 Hz を選定し, マクロ的に指に働く力 F_{total} の包絡線の周波数が 240 Hz となる設計とした.

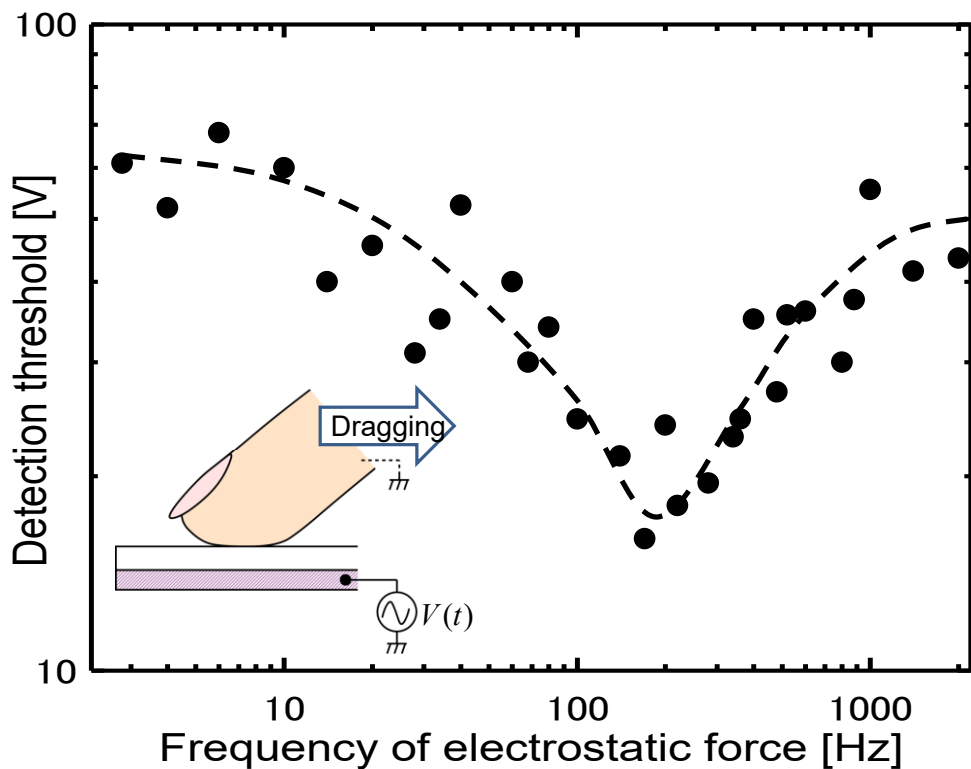


図 27：静電触覚ディスプレイの検出閾電圧測定結果。

図 28 に静電触覚ディスプレイの駆動状態の一例を示す。この例では、領域 A に含まれる Y 電極に 1000 Hz の交流電圧信号を印加し、領域 B に含まれる X 電極に 1240 Hz の交流電圧信号がを印加する。このとき領域 C のタッチ面に置かれた電極（指）にはうなりにより、検出閾電圧が小さい 240 Hz の静電気力が働く。一方、領域 C を除く領域 A に置かれた電極（指）には検出閾電圧が大きい 2000 Hz の、領域 C を除く領域 B に置かれた電極（指）には検出閾電圧が大きい 2480 Hz の静電気力が働く。このため、ユーザは領域 C に局在化された触覚刺激を知覚すると見込まれる。

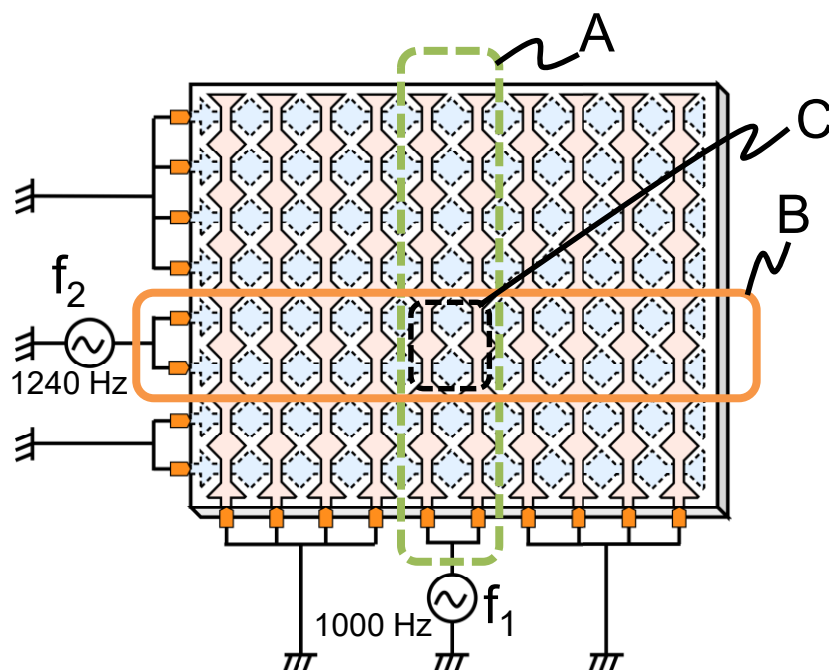


図 28：静電触覚ディスプレイの駆動状態の一例

3.4. 実験

3.4.1. 4.1 インチの静電触覚ディスプレイの試作

対角 4.1 インチの静電触覚ディスプレイを試作し評価した。電極基板のマスクレイアウトを図 29 に、仕様を表 5 に示す。3.2.2 で述べたモデルに基づくと、うなりによって触覚刺激を生成するための重要なパラメータは電極のピッチ(空間的な周期)と電極間の隙間である。タッチ面に接触する指の領域と対向する位置には、少なくとも一対の X 電極と Y 電極が必要である。このため本電極基板の電極ピッチは 1.7mm とし、一般的な投影型静電容量式タッチパネルの電極ピッチ(5 mm)と比較して小さく設定した。また、菱形の電極を数珠上に連ねた電極形状とすることで隣り合う X 電極と Y 電極との間の隙間を最小限にし、指の接触領域に対向する電極の面積を最大化した。電極を覆う絶縁膜は厚さ d が $1.5\mu\text{m}$ 、比誘電率 ϵ_r が 3.0 のアクリル系樹脂とした。電極基板は液晶ディスプレイ等の視覚ディスプレイと積層して用いることを想定しているため、可視光に対して透明となるよう、基板にはガラスを、X 電極と Y 電極には酸化インジウムスズ(ITO)を利用した。試作した対角 4.1 インチの静電触覚ディスプレイを図 30 に示す。

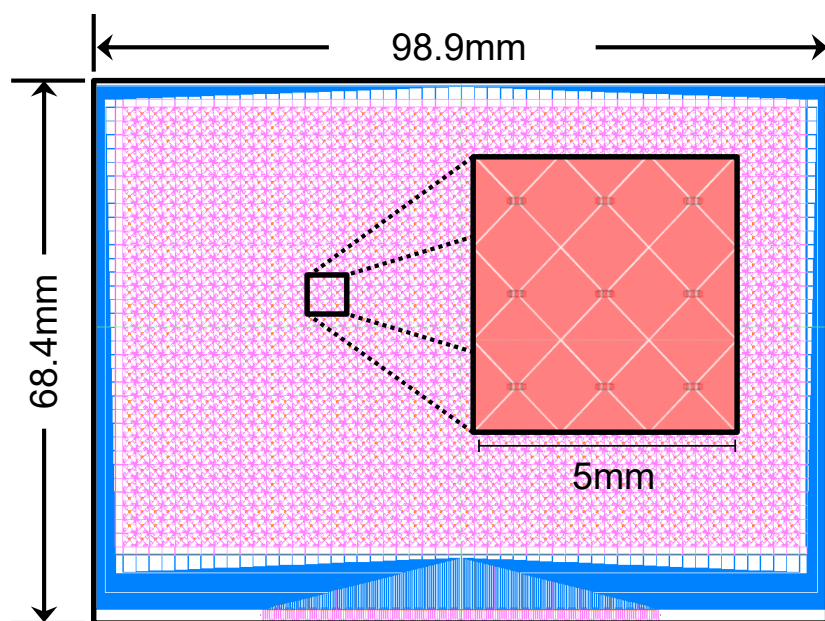


図 29 : 4.1 インチ静電触覚ディスプレイの電極基板のマスキレイアウト

表 5 : 4.1 インチ静電触覚ディスプレイの電極基板の仕様

Diagonal size	4.1-inch wide
Number of electrode	32 (X) x 52 (Y)
Electrode pitch	1.73 mm (X) x 1.75 mm (Y)
Insulator thickness (d)	1.5 μm
Insulator relative permittivity (ϵ_r)	3.0



図 30 : 試作した 4.1 インチ静電触覚ディスプレイの電極基板(FPC 貼付後).

3.4.2. 電気的特性評価

3.2 で述べた原理の妥当性を検証するために、モデルで示した電極 P(指)の電位を導電性の四角柱を使用して測定した。図 31 に測定のセットアップを示す。底面が 10 mm × 10 mm の正方形の真鍮製の角柱を静電触覚ディスプレイの表面絶縁体の上に置いた。角柱に導線を接続し、その電圧を 10 MΩ/8 pF の電圧プローブを用いてオシロスコープで測定した。

図 32 に静電触覚ディスプレイの駆動方法を示す。Y₂₀ から Y₃₂ で構成される Y 電極のグループには、周波数 1000 Hz の交流電圧信号 V_1 を印加した。X₁₀ から X₂₁ で構成される X 電極のグループには、周波数 1240 Hz の交流電圧信号 V_2 を印加した。これらの交流電圧信号を印加した電極を除く電極はグランドに接続した。四角柱を次の 4 か所に順次配置して電圧波形を記録した。

- ・位置(I) : Y 電極は 1000 Hz の交流電圧信号で駆動され、X 電極はグランドに接続される。
- ・位置(II) : Y 電極はグランドに接続され、X 電極は 1240 Hz の交流電圧信号で駆動される。
- ・位置(III) : Y 電極と X 電極は、それぞれ 1000 Hz と 1240 Hz の交流電圧信号で駆動される。
- ・位置(IV) : Y 電極と X 電極の両方がグランドに接続される。

それぞれの位置で測定した電圧波形を図 33 に示す。位置(I)に四角柱を置いたときは 1000 Hz の波形が、位置(II)に四角柱を置いたときは 1240 Hz の波形がそれぞれ観測された。位置(III)に四角柱を置いたときは、3.2.2 で示した電極 P の電位(V_p)、すなわち

$V_p=(V_1+V_2)/2$ と良く一致するうなりの波形が観測された。これらの結果は 3.2 で述べた原理の妥当性を示した。

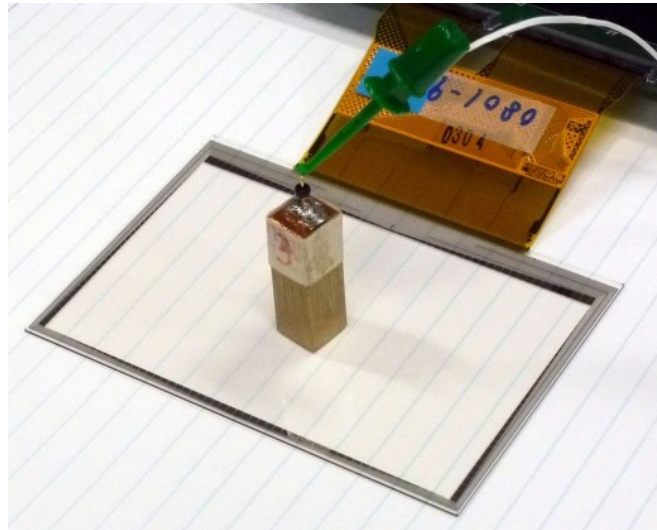


図 31：電位測定のためのセットアップ。

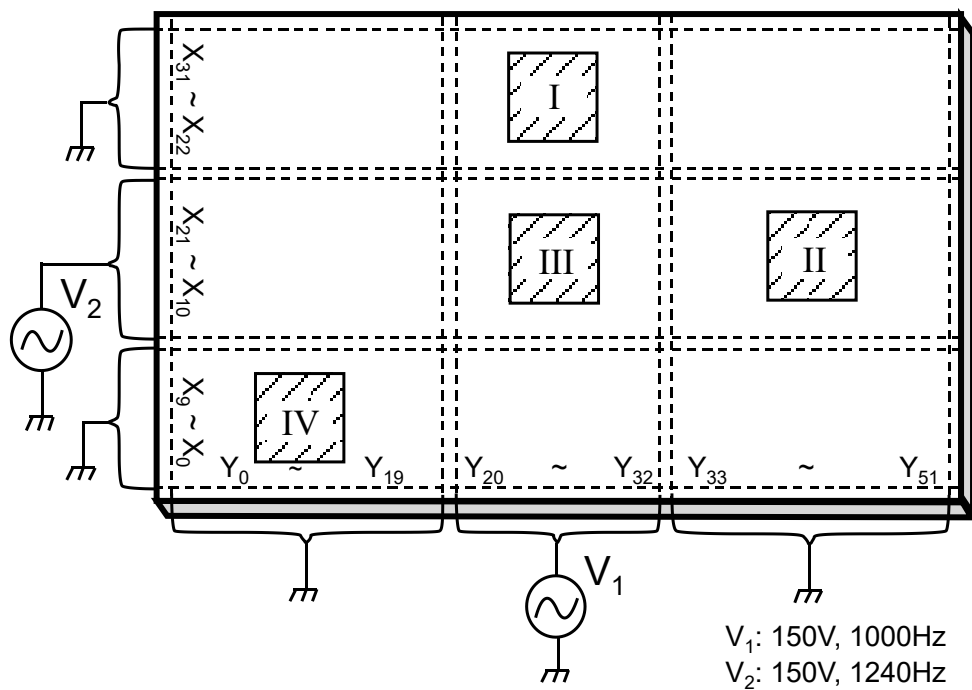


図 32：電位測定のための駆動方法。

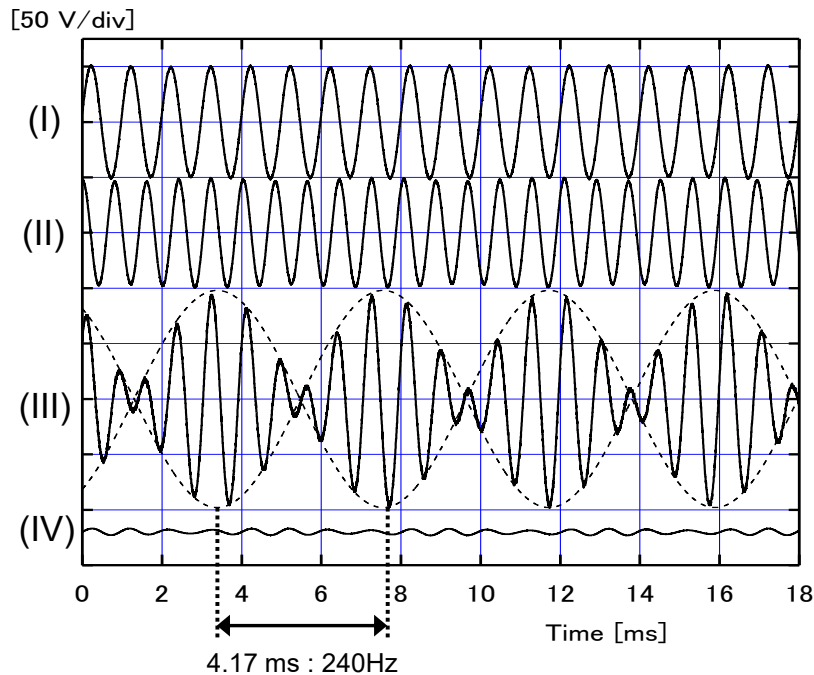


図 33：電圧測定結果.

3.4.3. 主観評価実験

3.4.3.1. 1本指で触察した場合に知覚される局在化された触覚刺激

提案した静電触覚ディスプレイが空間的に局在化された触覚を提示できているかどうかを確認するため主観評価実験を実施した. 年齢が 20 代から 50 代の 10 人が実験に参加した. 静電触覚ディスプレイは図 34 に示すように構成した. すなわち, タッチ面のうち, 一部の領域にうなりが生じるように Y 電極を選択的に駆動した. X 電極のうち X_{10} から X_{21} には交流電圧信号 V_2 を印加した. Y 電極は, Y_4 から Y_{16} で構成される第 1 グループ, Y_{20} から Y_{32} で構成される第 2 グループ, Y_{36} から Y_{48} で構成される第 3 グループの 3 つのグループのうち, 1 つのグループに交流電圧信号 V_1 を印加した. 交流電圧信号 V_1 および V_2 のどちらも印加しない全ての電極はグラウンドに接続した.

オペレータは対応するスイッチをオンにすることで, 3 つの領域 F, D, B からうなりが生じる領域を一つ選択した. オペレータの操作と駆動方法は被験者から隠した. オペレータは被験者に対して「人差し指でタッチ面をなぞって, 触感が異なる領域を指し示してください. 触感が異なる領域が無い場合は『無い』と答えてください.」と指示した. 被験者は自由に触探索運動をし, 触感が異なる領域をオペレータに指し示すか, 触感が異なる領域を知覚することができなかつた場合は触感が異なる領域は無いと回答した. 図 35 に主観評価実験中の参加者の写真を示す.

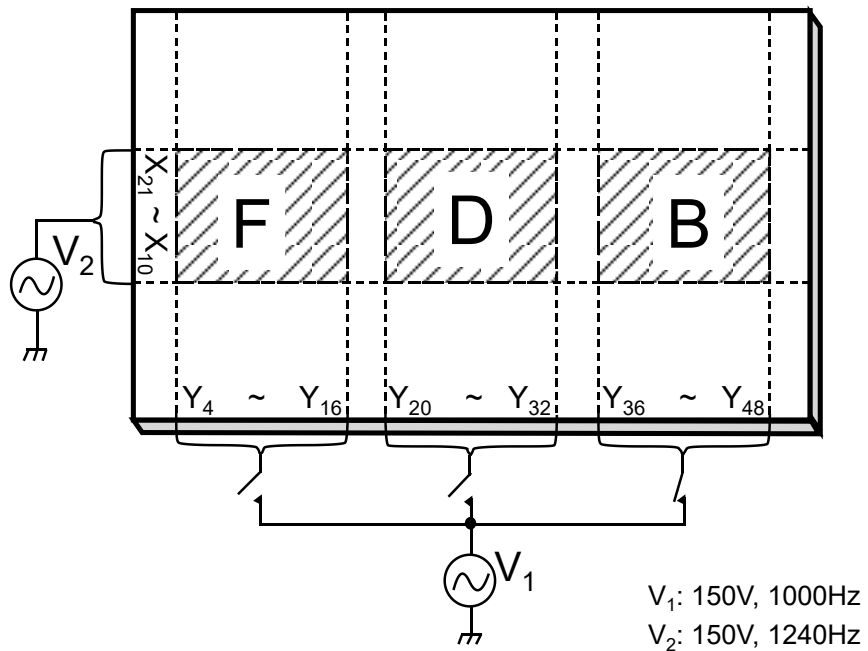


図 34 : 主観評価実験で用いた静電触覚ディスプレイの駆動方法.

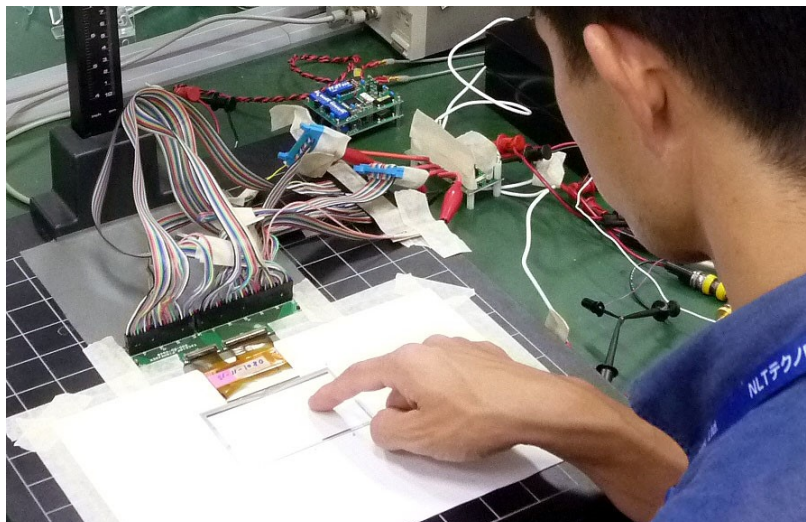


図 35 : 主観評価実験の様子.

2人の被験者の指先の軌跡の例を図 36 に示す. この例の場合, 静電触覚ディスプレイは領域 D にうなりが生じるように駆動された. 2人の被験者は領域 D に触感が異なる領域があることを言い当てた (指で指し示した).

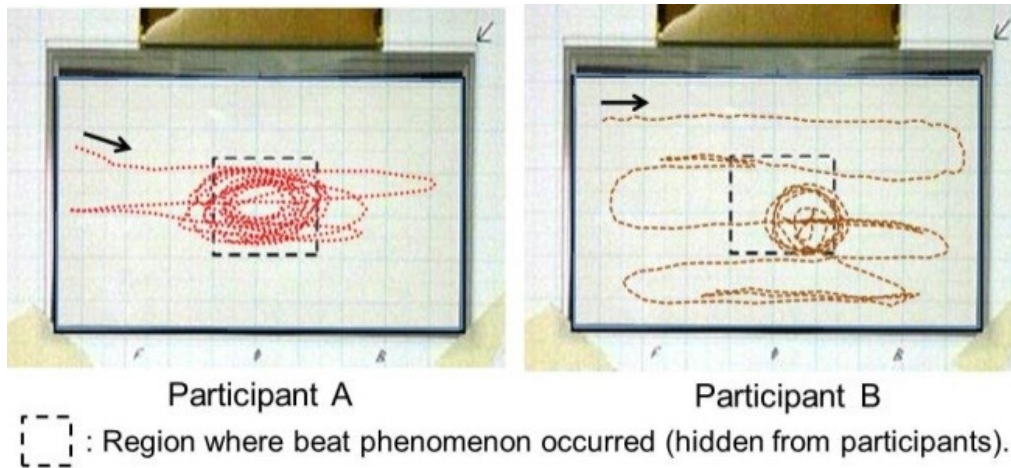


図 36 : 2 人の被検者の指先の軌跡の例

主観評価実験の結果を図 37 にまとめた。オペレータが領域 F を選択したとき、回答の 85% が領域 F を触感が異なる領域だと示した。オペレータが領域 D を選択したとき、回答の 75% が領域 D を触感が異なる領域だと示した。オペレータが領域 B を選択したとき、回答の 80% が領域 B を触感が異なる領域だと示した。正解の全体の平均は 80% であり、タッチ面上に局在化された触覚刺激を提示できることが示された。

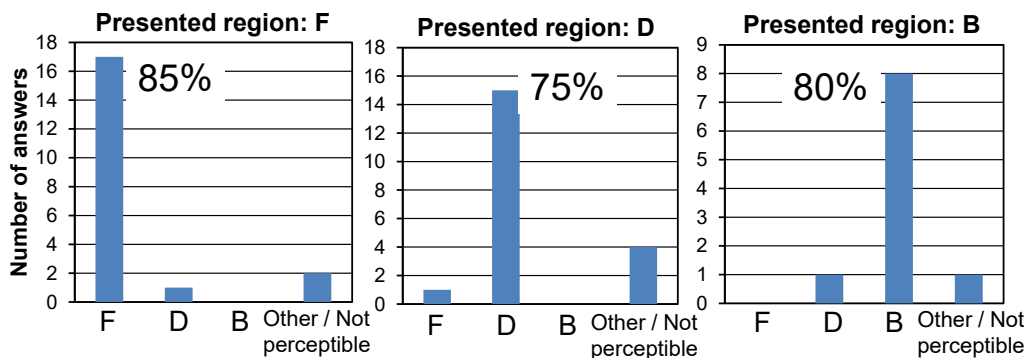


図 37 : 主観評価実験の回答数.

被験者 10 人の内、2 人の正答率が極めて低かった。2 人のうち一人はほぼすべての試行に対して「触覚が異なる領域が無い」と回答し、残りの 1 人は正答率が 40% であった。他の 8 人の被験者はほぼすべての試行に正解した。図 37 の各正答率の支配的な要因は個人差であった。静電触覚ディスプレイは皮膚の湿度に非常に敏感であり、刺激が不安定になることが報告されている。汗に関し、汗層の電界遮蔽効果により電極と皮膚との間ではなく、電極と汗層との間に電場が形成される。その結果、皮膚に働く静電気が大幅に減少する。さらに、汗層の物理的特性により、せん断力の生成が妨げられる場合がある [88] との報告がある。実際、正答率が低い 2 人のうち 1 人は指に多くの汗を

かく体質であった。他の1人の正答率が低かった理由は特定することができなかった。

局在化された触覚刺激を知覚することができた一部の被験者は、その触感について、その領域の表面に微細な凹凸があるようだと表現した。また、ゴムのようだと表現した被験者もいた。これらの感覚は、参加者が指を動かしているときにのみ知覚され、また、刺激の強さは指の走行速度によって変化した。このように、機械式アクチュエータの振動で得られる刺激とは異なる触感が知覚された。

3.4.3.2. 2本指で触察した場合に知覚される触覚刺激

2本の指に同時に独立した刺激を提示できるかを実験で確認した。本章で提案した、触覚刺激を局在化し提示する静電触覚ディスプレイの原理に基づいて、10.4インチの静電触覚ディスプレイ（次節で述べる）を作製し、実験に用いた。

右手の人差し指と左手の人差し指で同時にディスプレイに触れ触探索運動した場合、各指は触れた領域に対応する独立した触覚を知覚した。しかし、右手の人差し指と中指で同時にディスプレイに触れ触探索運動した場合、指は従属的な触覚を知覚した。人差し指がうなりの発生する領域、中指がバックグラウンドの領域、すなわち X 電極と Y 電極が共にグラウンドに接続されている領域にあるとき、中指は本来不要な触覚を僅かに知覚した。この現象の合理的な説明は、うなりの発生する領域の電極に対向する人差し指に誘起される電圧変動が、十分に減衰されることなく中指に伝達され、中指と接地電極との間に静電力が発生した、である。触覚体験を向上させるには、この干渉を減らすことが不可欠である。この説明が妥当であることと課題の解決は第5章で述べる。

3.5. 10.4 インチインタラクティブ視触覚ディスプレイ

3.5.1. デモ実証

本章で提案した、触覚刺激を局在化し提示する静電触覚ディスプレイの原理に基づいて、10.4インチの静電触覚ディスプレイを作製し、インタラクティブ視触覚ディスプレイを作製した。図 38(a)に作製した対角 10.4 インチの触覚ディスプレイの電極基板を、図 38(b)にインタラクティブ視触覚ディスプレイの構成を示す。このインタラクティブ視触覚ディスプレイは LCD と、LCD に積層した静電触覚ディスプレイと、LCD の額縁部に取り付けたカメラ式のタッチセンサとで構成した。

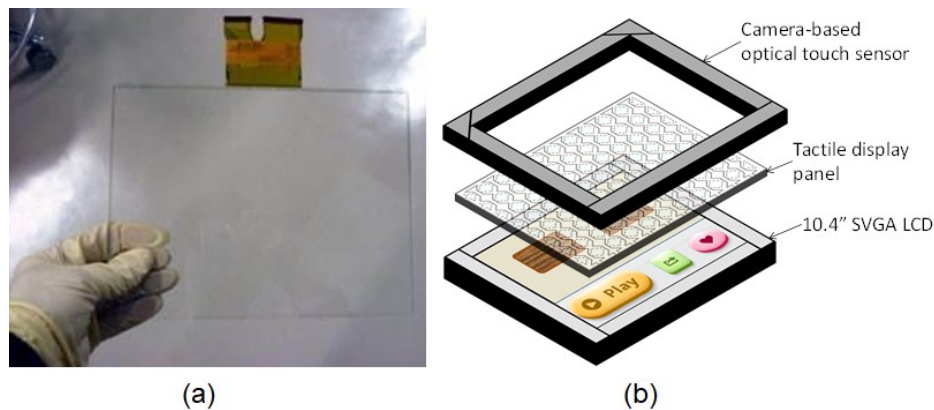


図 38 : (a)作製した対角 10.4 インチの触覚ディスプレイの電極基板 (b)インタラクティブ視触覚ディスプレイの構成.

インタラクティブ視触覚ディスプレイは PC で制御される構成とした. システム構成を図 39 に示す. 視覚画像データは、VGA 接続を介して LCD に送信され、視覚画像の位置に対応する触覚マッピングデータは、USB 接続を介して触覚ディスプレイに送信された. タッチセンサは、別の USB ポートを介して PC に接続した. このシステムは、視覚と触覚の情報を提示する機能とタッチ入力機能とを有し、ユーザはインタラクティブな視触覚ディスプレイを体験できた.

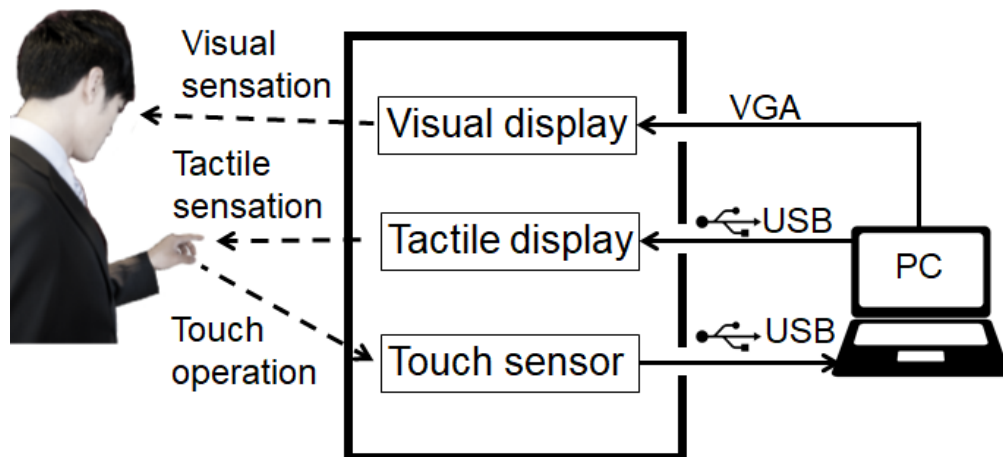


図 39 : インタラクティブ視触覚ディスプレイのシステム構成

システムの処理のフローは次の 2 つのステップで構成される. すなわち, (I)視覚ディスプレイのグラフィックフレームバッファへの視覚画像データの書き込み, (II)視覚画像データに対応する触覚マッピングデータの触覚ディスプレイのフレームバッファへの書き込み, である. 本研究の視触覚ディスプレイは、触覚ディスプレイのフレームバッファに書き込まれた触覚マッピングデータによって、局在化された触覚刺激を提示する特徴を有するため、処理の流れが従来のものとは異なる. 従来は、タッチセンサで指の

位置を検出するステップと、指の位置がボタン等のオブジェクトの位置かどうかを判定するステップと、判定に応じてアクチュエータを駆動するステップが必要であった。従来の処理のフローと比較すると、本研究の視触覚ディスプレイの処理フローは単純である。

デモソフトウェアを作成し、提案したインタラクティブ視触覚ディスプレイのユーザビリティを確認した。図 40(a) は、「這いまわる亀」という名前のデモソフトウェアを示している。本ディスプレイは、視覚的に表示される這いまわる亀の位置に触覚刺激を局在的に提示するため、視覚オブジェクトに対応した触覚刺激を複数の指に対して同時に提示することができた。複数の指が同時にディスプレイにタッチした場合、亀の位置で触探索運動をする指にはザラザラした触覚が提示され、亀の位置以外の場所で触探索運動をする指にはそのような触覚は提示されない。視覚ディスプレイで提示される視覚情報に、視覚に対応した触覚を付与すると、バーチャル環境におけるリアリズムが高まり、直接対話のメタファーが創造された。図 40(b)は「テンキー」という名前のデモソフトウェアを示している。本デモでは、触覚刺激を各ボタンの位置に局在的に提示した。この特徴により、ユーザは視覚だけではなく触覚でもボタンの場所を特定することが可能となった。ユーザはボタンを操作するという基本的なタスクを、使い慣れた触覚キューを頼りに遂行することができた。このため、触覚刺激の局在化が可能な本提案のインタラクティブディスプレイは、画面を注視せずに操作する所謂 *Eyes-free interaction* の構築に役立つ。このデモは SID2014 の他、国内外の展示会で展示され、多くの来場者が触覚刺激の局在化が可能なインタラクティブ視触覚ディスプレイとのインタラクションを体験した。

触覚刺激の局在化は、(i)スマートフォンやタブレット端末のようなスマートデバイス、(ii)車載ディスプレイや機械の操作用のディスプレイ等、視覚的な不注意を防ぐ必要がある装置、(iii)高齢者・視覚障害者への視覚補助装置等、多くのアプリケーションで役立つ可能性がある。

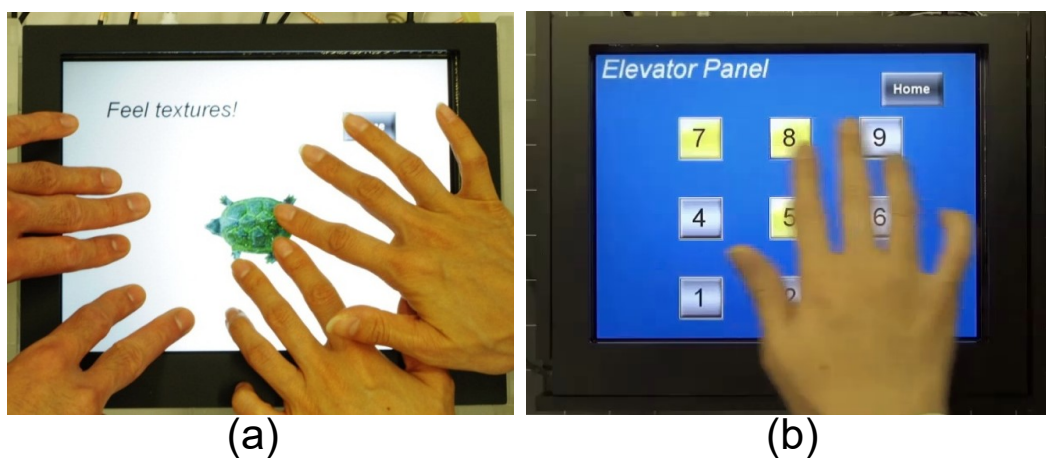


図 40：デモソフトウェアを用いた動作実証 (a)這いまわる亀 (b)テンキー

3.6. おわりに

本章では、静電触覚ディスプレイにおける触覚刺激の空間的局在化の手法を提案し、解析と実験を通して、タッチ面上に局在化された触覚刺激を提示できることを示した。直交する X 電極と Y 電極に、指先の振動検出閾値が大きい 1240 Hz と 1000 Hz の交流電圧信号をそれぞれ印加すると、電極の交差部分で振動検出閾値が小さい 240 Hz の静電気力振動がうなりにより発生し、タッチ面上に局在化された触覚刺激を提示できた。10 人の被験者で主観評価を実施し、局在化された触覚刺激を 80% の正答率で検知できることを示した。開発した静電触覚ディスプレイを 10.4 インチ LCD および光学式タッチセンサと組み合わせてインタラクティブ視触覚ディスプレイを試作し、展示会で展示しその動作を実証した。本章で提案した技術は、視覚情報とマルチタッチに対応させた触覚提示を通じた対話を可能とし、人とディスプレイとのインタラクションの新しい可能性を切り開いた。

一方、この方式の課題も明らかとなった。2 本指で同時に触探索運動をすると、グラウンドに接続された電極の位置の指にも触覚刺激が知覚される「触覚のクロストーク」が生じることがわかった。

第4章 静電触覚ディスプレイと静電容量センサの共存化

4.1. はじめに

第4章では、静電触覚ディスプレイのインタラクティブ化で必要とされる、静電容量センサとの共存化について述べる。第一の段階として、3章で作成した電極基板、すなわち平行に配置された複数のX電極とそれらと直交する複数のY電極、およびそれら電極を覆いタッチ面を形成する絶縁膜で構成された電極基板がタッチセンサとして利用できるかどうかを明らかにする。当該基板は自己容量方式のタッチセンサとして利用できる一方、相互容量方式のタッチセンサとして利用した場合、タッチを検出できない問題が生じること、当該絶縁膜厚が静電触覚ディスプレイ向けに極めて薄く形成されていることがその原因であることを示す。第二の段階として、静電触覚ディスプレイと自己容量方式のタッチセンサとの共存化を、電極の時分割駆動の手法で解決する。特定の電極がタッチセンサとして利用される時間を8.3 msecとし、タッチセンサとして利用する電極を空間的に拡散させ走査させることで、静電気力が途切れることで生じる不要な触覚刺激が抑制されることを示す。またセンサに混入する電氣的ノイズを低減するために(i)触覚を提示する交流電圧信号にタッチを検出するための励振信号を重畳する回路及び、(ii)タッチ検出信号に混入する、触覚提示用の交流信号を除去するための基準ノード駆動ハイパスフィルタ回路を提案する。これらの技術を利用することで静電触覚ディスプレイと静電容量センサとの一体化が可能であることを示す。

4.2. 静電容量センサ共存化に向けた電極基板の可能性検討

静電容量センサ共存化に向けて、第3章で作製したXY電極構造の電極基板が静電容量センサとして機能するかを調べた。その結果は筆者の予想に反し、当該電極基板を相互容量方式のタッチセンサとして駆動するとタッチの検出ができないことが明らかとなった。この理由は電極と指との間の表面絶縁膜の薄さに起因した。以下に実験結果と原因の解析結果を示す。

4.2.1. 実験

第3章で作製した10.4インチのXY電極構造の電極基板を用いて、相互容量方式のタッチセンサと同等の駆動をし、出力信号を評価した。具体的には図41に示すように、X電極を駆動電極(Drive electrode, Tx)、Y電極を受信電極(Receive electrode, Rx)に割り当て、複数のX電極のうち1本にパルス高が10Vのステップ電圧を印加し、その時にRxに流れる電荷をRxに接続したチャージアンプで検出した。

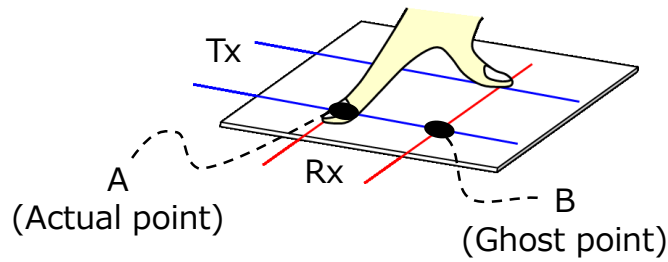


図 41：XY 電極構造の電極基板用を相互容量方式のタッチセンサとして駆動する場合の電極の役割

第 3 章で作製した 10.4 インチの XY 電極構造の電極基板を相互容量方式のタッチセンサとして駆動したときに、応答として検出された電荷を図 42 に示す。図の縦軸 ΔQ は、タッチしていないときにチャージアップによって検出される電荷を基準として、タッチしたときに検出された電荷を示す。すなわち、タッチしている時に検出された電荷とタッチしていない時に検出された電荷の差を示す。図中の左の 3 本の棒グラフは 1 点タッチ（1 本の指で電極基板にタッチ）の結果である。これら 3 本の棒グラフは、図 41 の A 点をタッチし、A 点と平面視で重なる 1 つの X 電極を T_x としてステップ電圧を印加し、A 点と平面視で重なる Y 電極を R_x とし、この Y 電極に接続されたチャージアンプで得られた電荷の差 ΔQ である。タッチの接触力が小さい(soft)場合 ΔQ は負であり、接触力が大きい(Hard)場合 ΔQ はプラス 23pC であった。接触力によって ΔQ が負から正の範囲となり、ある接触力ではゼロとなる。この結果は、 ΔQ と所定の閾値との大小関係でタッチの有無を検出することができないことを示す。図中の右端の棒グラフは 2 本指でタッチしたときのゴースト点の ΔQ を示す。ゴースト点は図 41 の B 点であり、実際にはタッチされていない点である。図 42 の棒グラフに示すように、ゴースト点での ΔQ が実際にタッチされている点での ΔQ と同等の大きさであり、実験結果はマルチタッチを検出することができないことを併せて示した。

図 43 は対照実験の結果であり、第 3 章で作製した 10.4 インチの XY 電極構造の電極基板に 500 μm のガラス板を積層し、相互容量方式のタッチセンサとして駆動したときに検出された電荷である。図中の左の 3 本の棒グラフは 1 点タッチの結果であり、接触力の大小にかかわらず ΔQ はすべて負である。また右端に示すゴースト点における ΔQ は実際にタッチされている点の ΔQ と区別可能な程度にその絶対値が小さい。タッチにより ΔQ が減少し、またゴースト点における ΔQ は実際にタッチされている点の ΔQ と区別可能な程度に絶対値が小さいという図 43 で示された特徴は、従来から知られる相互容量方式のタッチセンサのふるまいと一致した。図 42 と図 43 の結果より、第 3 章で作製した XY 電極構造の電極基板を相互容量方式のタッチセンサとして駆動するとタッチの検出ができないという問題は、表面絶縁膜の薄さに起因することが示唆された。

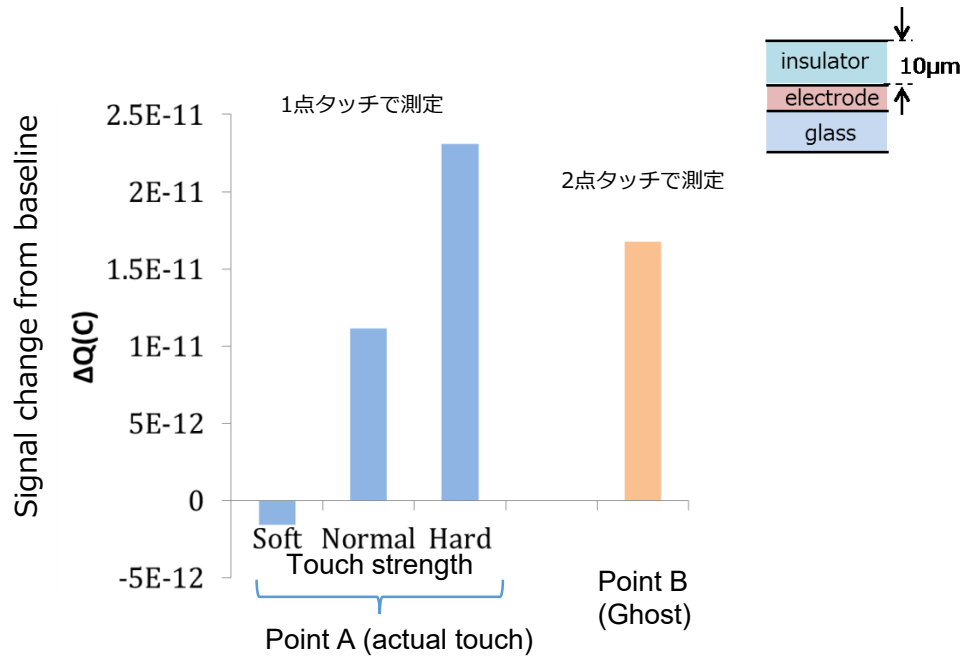


図 42：第 3 章で作製した 10.4 インチの XY 電極構造の電極基板を相互容量方式のタッチセンサとして駆動したときに検出された電荷.

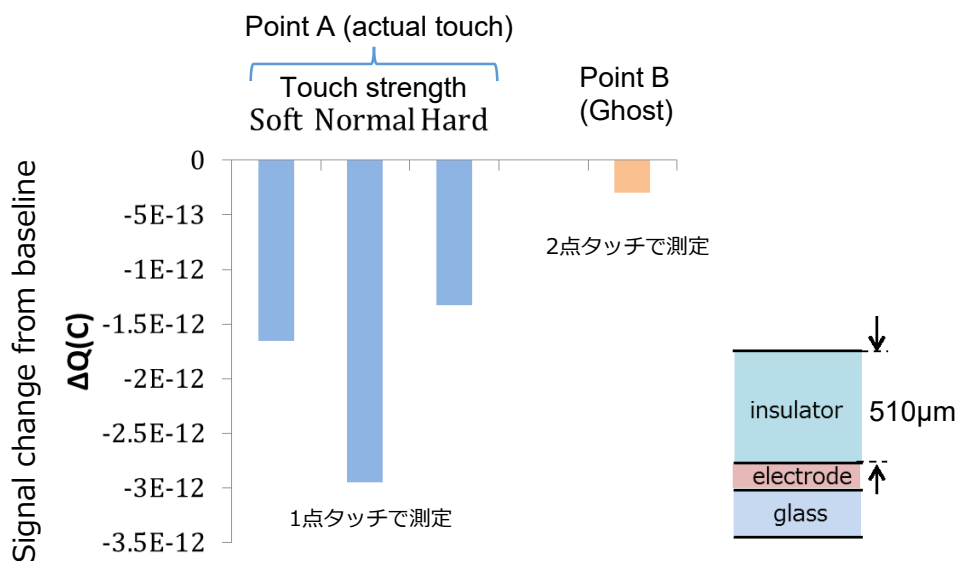


図 43：第 3 章で作製した 10.4 インチの XY 電極構造の電極基板に 500μm のガラス板を積層し、相互容量方式のタッチセンサとして駆動したときに検出された電荷.

4.2.2. 実験結果の妥当性の検証

4.2.1 節で述べた実験結果の現象が生じる理由を理解し、実験結果の妥当性を確認するため、回路モデルを用いてふるまいを検証した. 定量的な検証をするためにはレイアウト寄生パラメータ抽出ソフトウェアを用いて静電容量を抽出し、得られたネットリス

トを回路シミュレータに入力し、Tx に該当するノードに駆動電圧を印加し、Rx に該当するノードに流れる電流を測定する手順が必要である。この節ではもっぱら定性的にふるまいを理解することを目的とし、定性的なふるまいが阻害されない程度に単純化したモデルを構築して得られた結果を先に述べ、後から定量的な検証結果を補足する。

図 44(a)及び図 44 (b)は、相互容量方式のタッチセンサの等価回路を模式的に示す。図 44(a)は、タッチパネルが指でタッチされていない場合の回路を示し、図 44 (b)は、タッチパネルが指でタッチされている場合の回路を示す。図 44(a)の電極 e_1 及び e_2 は、X 電極(駆動電極(Drive electrode, Tx))および Y 電極(受信電極(Receive electrode, Rx))を示す。電極 e_1 と電極 e_2 との間に、静電容量 C_{n1} が存在する。駆動電極 e_1 に静電容量のセンシングに用いる励振 V_{Tx} を与えると、受信電極 e_2 に信号電流 i_{Rx} が流れる。図 44 (b)において、指は電極 e_3 、電極 e_4 、皮膚の抵抗 R_f からなる回路で表わされる。人体は、抵抗 R_b 及び静電容量 C_b を有す。駆動電極 e_1 と指の電極 e_3 との間に、静電容量 C_f が存在し、受信電極 e_2 と指の電極 e_4 との間に、静電容量 C_f が存在する。

理解を助けるためにモデルを単純化する。幾何形状として隣り合う駆動電極 e_1 及び受信電極 e_2 を図 44(c)に示すように対向させ、電極間距離が d_p の平行平板コンデンサに変形する。指でタッチされた場合は図 44(d)に示すように、電極 e_1 と e_2 の空間に指のモデルの回路要素である電極 e_3 、電極 e_4 とそれらと接続された R_b 、 C_b が挿入される。信号電流 i_{Rx} を計算する際に用いた数値を表 6 に示す。

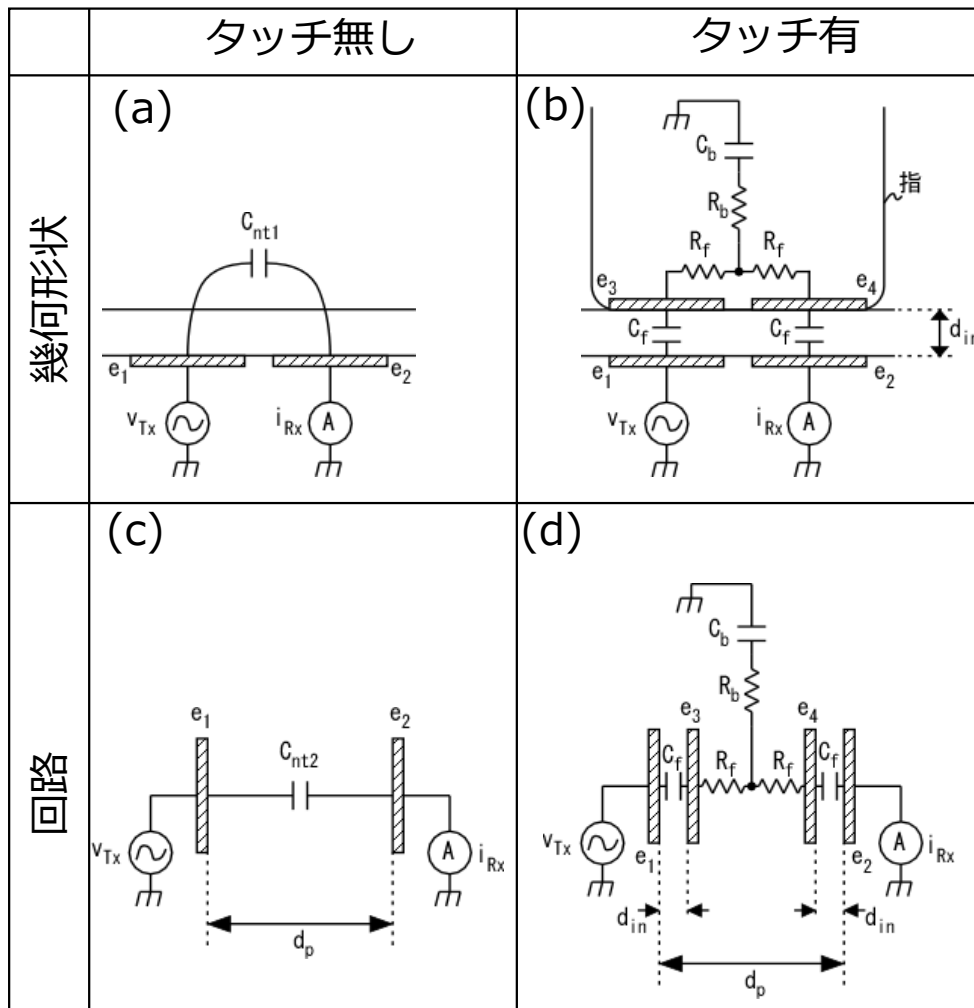


図 44：相互容量方式のタッチセンサの信号電流の計算に用いたモデル。

表 6：相互容量方式のタッチセンサの信号電流の計算に用いた数値

駆動電圧 V_{Tx}	振幅 1 V, 周波数 100 kHz, 正弦波
電極 e_1, e_2, e_3, e_4 の寸法	3 mm 四方
電極間距離 d_p	3 mm
表面絶縁膜厚 d_{in}	変数
ボディ容量 C_b	100 pF
ボディ抵抗 R_b	1.5 k Ω
指先の皮膚の抵抗 R_f	25 Ω
平行平板コンデンサの誘電体の比誘電率	1

図 45 は、図 44(c)及び図 44(d)に示すモデルにおける、表面絶縁膜厚 d_{in} と受信電極 e_2 の信号電流 i_{Rx} との関係の計算結果を示す。当該計算において、駆動電圧 V_{Tx} は 1 V、

100 kHz の正弦波、電極 e_1, e_2, e_3, e_4 は、3 mm 四方の導体であって、電極 e_1, e_2 の回路上の電極間距離 d_p は 3 mm とした。また、ボディ容量 C_b は文献 [115] を参考に 100 pF、ボディ抵抗 R_b は文献 [116] に記載された HBM(人体モデル) を参考に 1.5 k Ω 、そして、指先の抵抗 R_f は、文献 [117] に基づいて 25 Ω とした。

図 45 に示すように、電極と指との間の表面絶縁膜厚 d_m が 50 μm 以上の場合、タッチによって信号電流 i_{RX} が減少する。一方、表面絶縁膜厚 d_m が 50 μm 未満の場合、検出される信号電流が、タッチにより増加する、つまり、X 電極と Y 電極との間の相互容量が増加する。このように表面絶縁膜の厚さが、タッチによって信号が減少するか増加するかを決める決め手となっていることが確認された。より詳しくは、指—電極間のインピーダンスと指—グラウンド間のインピーダンス（人体のインピーダンス）との相対的な大小関係によって信号が減少するか増加するかが決まる。従来の多くの解析では、人体のインピーダンスがゼロ又は指—電極間のインピーダンスに対して十分に小さいと仮定されていたため、タッチによって信号が減少すると説明されていた。

タッチによる相互容量の変化 (ΔQ) が、正になるか負になるかは、指と電極 e_1, e_2 との間のインピーダンスとボディのインピーダンスとの関係できまることを図 44(c) 及び図 44(d) に示すモデルに基づいて説明する。

表面絶縁膜厚 d_m を大きくすることで、指と電極 e_1, e_2 との間の静電容量 C_f を小さくし、それぞれのインピーダンスをボディのインピーダンスより大きくすることができる。極端な例を考えると、静電容量 C_f のインピーダンスがボディのインピーダンスより十分大きい場合、回路動作的にはボディのインピーダンスをゼロとみなすことができる。この場合、指の抵抗を表す 2 つの R_f の中間点の電位はグラウンドに固定され、その結果 i_{RX} は流れない。そのため、タッチによって信号電流 i_{RX} が減少する、つまり X 電極と Y 電極の相互容量が減少する。

一方、表面絶縁膜厚 d_m が小さくなると、指と電極 e_1, e_2 との間の静電容量 C_f が大きくなり、指と電極間のインピーダンスが小さくなる。指—電極間のインピーダンスがボディのインピーダンスと比べて十分に小さい場合は、回路動作的にはボディのインピーダンスを無限大とみなすことができる。この場合、図 44(d) を参照すると、指の電極 e_3, e_4 が挿入されることにより、電極 e_1, e_2 間の容量が増加し、受信電極 e_2 での信号電流 i_{RX} が増加することが理解できる。このように、タッチによって信号電流 i_{RX} が増加する、つまり、X 電極と Y 電極の相互容量が増加する。

人体のインピーダンスを含めて受信電極に流れる電流を計算することで、XY 電極構造の電極基板を相互容量方式のタッチセンサとして動作させるためには、強くタッチして接触力が大きくなり、X 電極及び Y 電極と指の間のインピーダンスが小さくなった場合であっても、相互容量がタッチによって減少するよう、X 電極及び Y 電極と指との間のインピーダンスを大きくする必要があることがわかった。そのための一つの方法は表面絶縁膜厚を厚くすることであるが、静電触覚ディスプレイとしての動作を考えると静電気力が減少し触覚刺激を提示できなくなり、相容れないことがわかった。

尚、第3章で作製した10.4インチのXY電極構造の電極基板は、自己容量方式のタッチセンサとしては動作することを確認した。

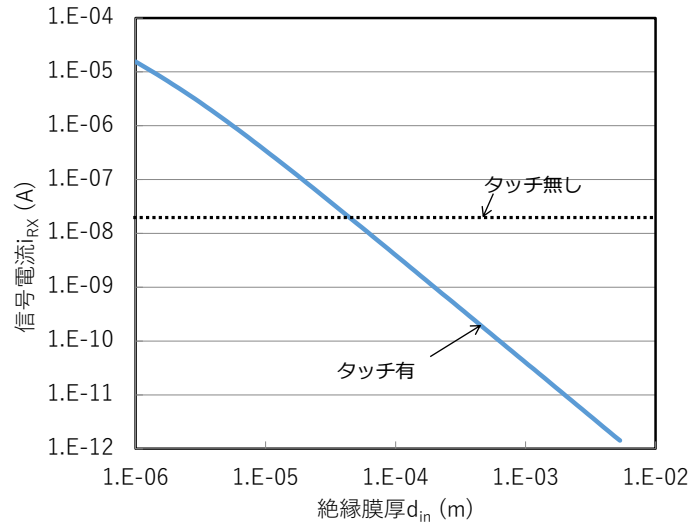
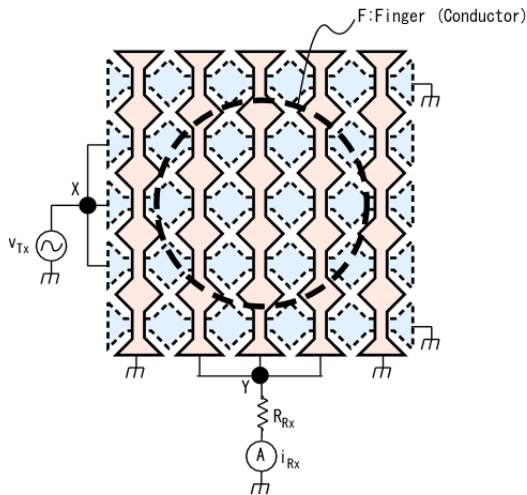


図 45：相互容量方式のタッチセンサの信号電流の計算結果

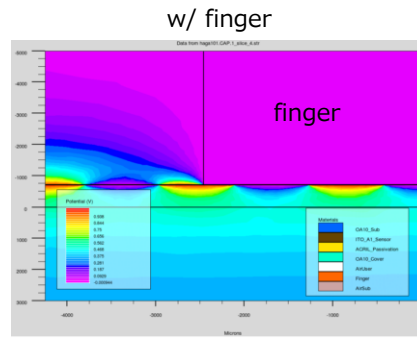
冒頭で述べたシミュレータを利用する手法で絶縁膜厚と信号電流 i_{RX} との関係を調べた。第3章で作製した10.4インチの電極基板を解析の対象とした。まず、解析の対象となるモデルを決めた。モデルを図46(a)に示す。次に3次元レイアウト寄生パラメータ抽出ソフトウェアを用いて静電容量を抽出した(図46(b))。次に、得られた静電容量を含むネットリストを回路シミュレータに入力し、Txに該当するノードに駆動電圧を印加し、Rxに該当するノードに流れる電流を観測した(図46(c))。これらの手順で得られた絶縁膜厚 d_{in} と信号電流 i_{RX} との関係を図46(d)に示す。実験結果や定性的な計算で得られた結果と同様に、絶縁膜厚 d_{in} が薄くなるとタッチにより信号電流 i_{RX} が増加することが確認された。絶縁膜厚 d_{in} が $42 \mu\text{m}$ より薄くなるとタッチにより信号電流 i_{RX} が増加することが示された。

タッチにより信号電流が増加する薄い絶縁膜厚を持つ電極基板を相互容量式の駆動で用いた場合、実験結果にみられたように、弱いタッチで信号電流が減少し強いタッチで信号電流が増加する現象が生じ、タッチを検出できない問題が生じる。また、真のタッチとゴーストタッチを区別できない問題が生じる。このため、第3章で作製したXY電極構造の電極基板を静電容量センサとして用いるためには、自己容量式の駆動を選択せざるを得ないことがわかった。



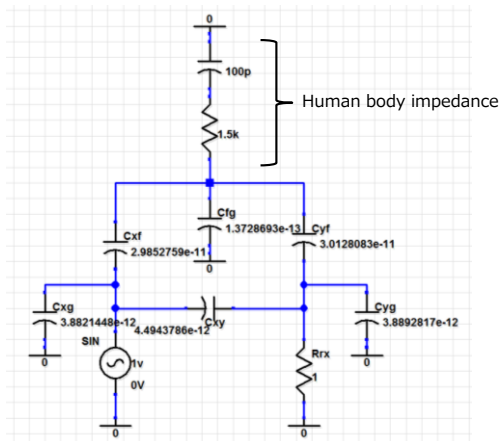
駆動電圧 V_{Tx} : 1V 100kHz 正弦波
 R_{Rx} 抵抗: 1Ω

(a) シミュレーションのモデル

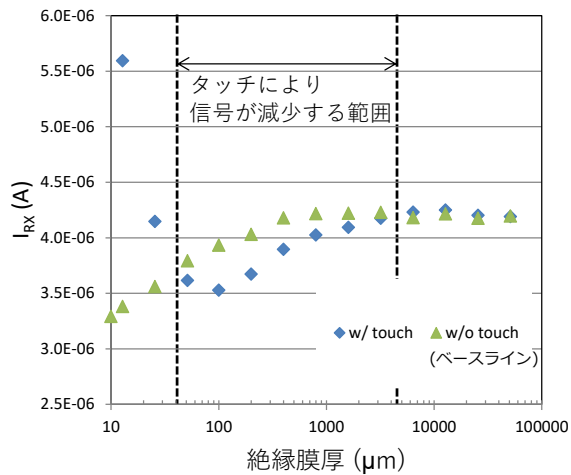


C1	F	gnd	1.3728693e-13
C2	F	X	2.9852759e-11
C3	F	Y	3.0128083e-11
C4	gnd	X	3.8821448e-12
C5	gnd	Y	3.8892817e-12
C6	X	Y	4.4943786e-12

(b) 3次元構造から静電容量を抽出



(c) シミュレーションで信号 i_{Rx} を観測



(d) 結果

図 46: 相互容量方式のタッチセンサの信号電流のシミュレーション結果

4.3. 静電容量センサを一体化した静電触覚ディスプレイの提案

提案した、静電容量センサを一体化した静電触覚ディスプレイの構成を図 47 に示す。静電容量センサを一体化した静電触覚ディスプレイの電極基板は、ガラス基板、基板上にマトリクス状に配置した、酸化インジウムスズ(ITO)からなる複数の X 電極と Y 電極、およびこれら電極を覆う絶縁体層で構成した。電極基板の上全ての X 電極と全ての Y 電極は触覚ディスプレイと静電容量センサの両方の目的に時分割で利用した。電極に 2 つの機能を持たせるために、各電極は、システムコントローラの制御信号に従って動作する単極双投 (SPDT) スイッチを介して、2 つの触覚駆動回路(Tactile driver)の 1 つ又はタッチパネルコントローラ(Touchscreen controller)に接続される構成とした。

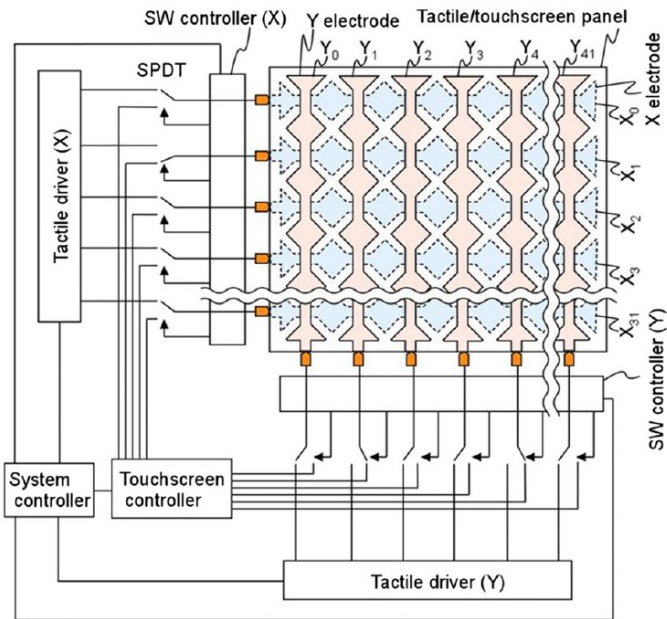


図 47：静電容量センサを一体化した静電触覚ディスプレイの構成

提案した駆動方法を図 48(a) と図 48(b)に示す. 本駆動方法を「空間拡散駆動法」呼ぶこととした. ある時刻の時, 大部分の電極は触覚提示のために駆動され, 残りの電極は静電容量センシングのために駆動された. 一つの電極に着目すると, フレーム周期である 33.3 msec のうち, 8.3 msec を静電容量センシングのために利用した. 4.2 節の検討に基づき, 静電容量センシングには自己容量方式を採用した. この方式では, グランドに対する各電極の静電容量を個別に検出し, 指でのタッチに伴う静電容量の増加がタッチパネルコントローラで評価される. 1 フレーム内に全ての電極の静電容量を評価する. 例えば時刻 t_0 - t_1 の期間は電極 X_0, X_4, Y_0, Y_4, Y_8 が静電容量を評価するために駆動され, 時刻 t_1 - t_2 の期間は電極 X_1, X_5, Y_1, Y_5, Y_9 が静電容量を評価するために駆動された. すべての電極の静電容量が測定された後, タッチパネルコントローラはタッチの座標を決定した. 例えば, X_0 と Y_1 の静電容量の増加がしきい値を超えると, タッチパネルコントローラは座標(X_0, Y_1)をタッチ位置として出力した. 静電容量センシングのために駆動される電極は, パネル上で空間的に拡散させた. 空間的に拡散させることで, 触覚オブジェクトの上下左右の領域で発生する不要な触覚を抑制できた. この効果は 4.5.2 節で説明する.

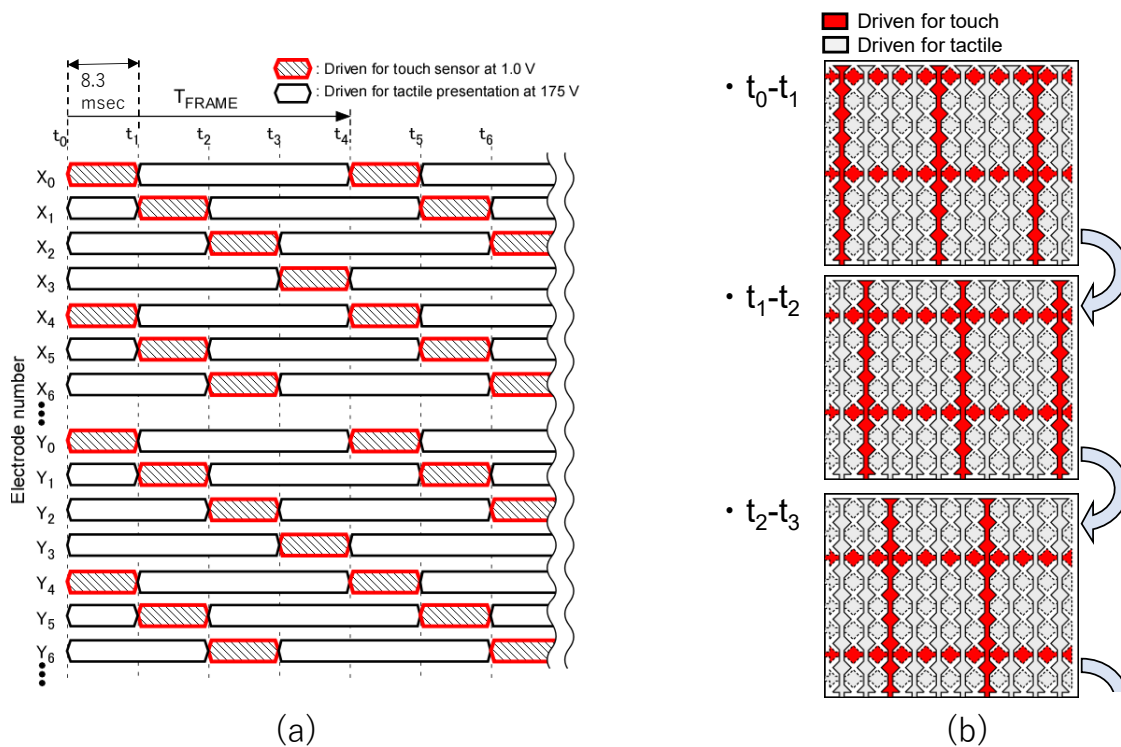


図 48 : (a)空間拡散駆動法のタイミングチャート. (b)静電容量センサとして利用される電極の空間的分布.

4.4. 実装

空間拡散駆動法を実装し、触覚刺激の提示と静電容量のセンシングとを同時に行うために次の2つの問題を解決した。

1つ目の問題は、静電容量センシングに関し、電極の寄生容量が 220 pF と大きいことである。図 49 は電極 X_a の静電容量をセンシングする場合を例に寄生容量を記載している。電極 X_a が Y 電極と交差する各交差点で寄生容量 C_C が生じ、また、電極 X_a と平行に隣接する X 電極との間に寄生容量 C_P が生じる。これらの寄生容量の合計は 220 pF であった。寄生容量の静電容量の大きさはタッチに伴う静電容量の増加(1~10 pF)と比べて遥かに大きい。寄生容量は、静電容量センシング回路のダイナミックレンジを占有し、タッチ信号の S/N 比を低下させる。

2つ目の問題は、容量センシングに関し、静電容量をセンシングする電極に隣接する電極や交差する電極に印加される触覚提示用の交流電圧信号(一例として振幅 175 V, 周波数 1 kHz)が、結合容量 (C_C や C_P) を介して静電容量をセンシングする電極にノイズとして混入することである。静電容量のセンシングには 1 V, 100 kHz の励振を用いるため、ハイパスフィルタ回路の適用が対策の候補となる。しかし、通常のハイパスフィルタ回路を接続した場合、1000 pF の等価寄生容量が発生し、タッチに伴う静電容量の増加(1~10 pF)の検出を困難とする。

これら2つの問題を解決する触覚駆動回路/タッチパネルコントローラを図49に示す。図に示す励振信号重畳回路(superimposing circuit)が1つ目の問題を解決し、基準ノード駆動ハイパスフィルタ回路(reference-node-driven high-pass filter circuit)が2つ目の問題を解決した。

1つ目の問題、すなわち、電極の寄生容量が220 pFと大きい問題に対し、以前に筆者らが開発した寄生電流低減化技術(Parasitic Current Reduction technique, PCR) [9] [118]のコンセプトを適用した。これは、寄生容量の両端のノードに同振幅で同位相の電圧を印加することで寄生容量に流れる電流を低減化する技術コンセプトである。

励振信号重畳回路は触覚提示用の交流電圧信号 V_X と V_Y に静電容量のセンシングに用いる励振 V_{TS} を重畳する。励振信号重畳回路_x は、X電極に印加する触覚提示用の交流電圧信号(V_{EX})を出力する。 V_{EX} は、 $V_{EX} = V_X + V_{TS}$ で表される。励振信号重畳回路_y は、Y電極に印加する触覚提示用の交流電圧信号(V_{EY})を出力する。 V_{EY} は、 $V_{EY} = V_Y + V_{TS}$ で表される。図49中 X_a の符号で示す静電容量をセンシングする対象となる電極は、オペアンプのイマジナリーショート動作により励振 V_{TS} が印加される。してみれば、寄生容量 C_C の両端のノードには励振 V_{TS} が印加される。このため寄生容量 C_C には、静電容量のセンシングに用いる励振 V_{TS} の周波数(100 kHz)の電流は流れない。これは、等価寄生容量がゼロであることを意味する。同様に寄生容量 C_P には静電容量のセンシングに用いる励振 V_{TS} の周波数(100 kHz)の電流は流れない。これは、等価寄生容量がゼロであることを意味する。励振重畳回路の回路構成を図49内の左側に示す。触覚提示用の交流電圧信号 (V_X / V_Y) に静電容量のセンシングに用いる励振 V_{TS} を重畳するために、容量結合方式を採用した。 C_S は結合コンデンサである。 R_S は V_X / V_Y の電圧源の周波数 100 kHz での出力インピーダンスである。 C_S の静電容量は、 R_S よりも十分低いインピーダンスになるように設定した。

基準ノード駆動ハイパスフィルタ回路は、抵抗 R_H に励振 V_{TS} の周波数(100 kHz)の電流を流すことなく、触覚提示用の交流電圧信号の周波数 1 kHz 付近の電流信号を除去する。図49に示すように、基準ノードは静電容量のセンシングに用いる励振 V_{TS} に接続され駆動される。抵抗 R_H の両端のノードは励振 V_{TS} の電圧で駆動されるため、抵抗 R_H には静電容量のセンシングに用いる励振 V_{TS} による電流は流れない。これによりハイパスフィルタ回路を接続することによって生じる等価寄生容量の発生が回避される。励振 V_{TS} の周波数(100 kHz)の信号は減衰させず、ノイズである 1 kHz の信号を減衰させる回路設計に基づき、 C_H は 10 nF, R_H は 1.5 k Ω とした。

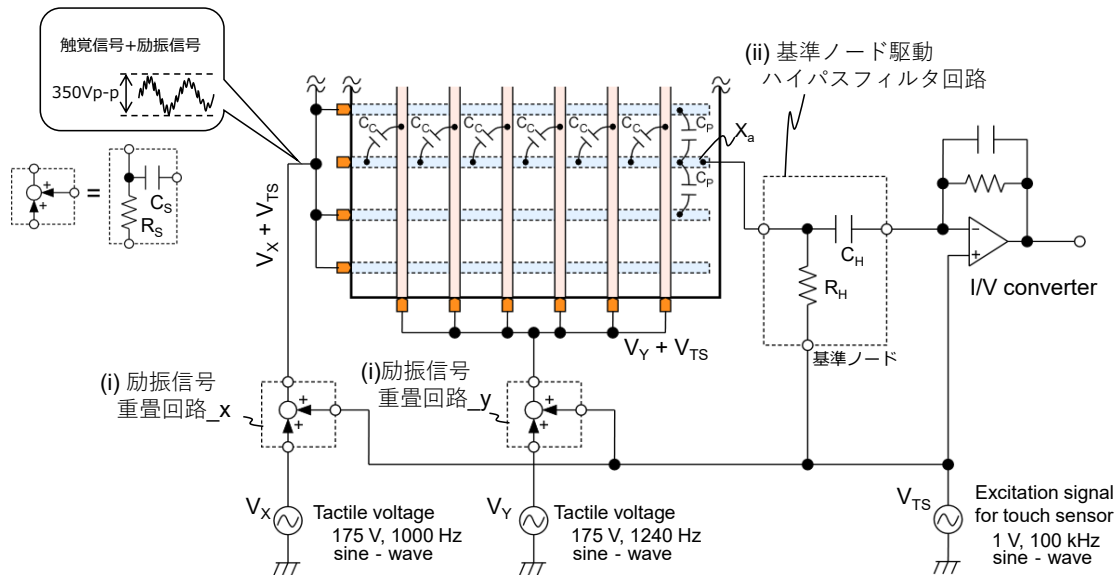


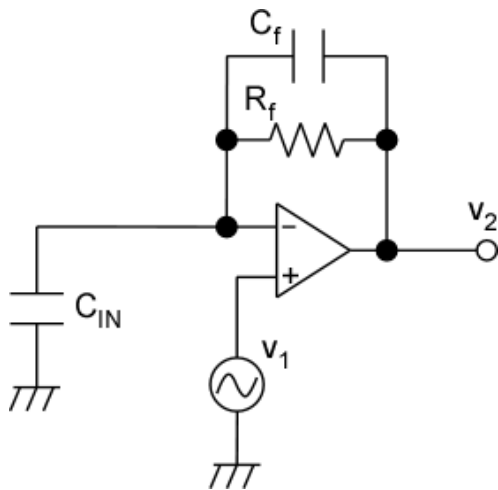
図 49：静電容量センサを一体化した静電触覚ディスプレイのコントローラ回路の等価回路

4.5. 評価

4.5.1. 電気的特性評価

励振信号重畳回路の評価について述べる。

提案した触覚駆動回路/タッチパネルコントローラ回路を評価するため、図 49 に示す回路を作製した。交流電圧信号 V_x を生成する回路は、正弦波電圧信号を生成するダイレクトデジタルシンセサイザ(DDS)と高電圧増幅器[HOPS-0.3B10(A)、松定プレジジョン]で構成した。交流電圧信号 V_y を生成する回路は、正弦波の周波数の設定を除き交流電圧信号 V_x を生成する回路と同一構成とした。静電容量のセンシングには I/V 変換器(I/V converter)を利用した。図 50 に示すように、I/V 変換器はオペアンプの反転入力ノードに接続された静電容量を検出する。出力電圧の振幅は静電容量 C_{IN} の増加に応じて増加する。この評価では 10.4 インチの XY 電極構造の電極基板を用いて、X 電極の 1 つ (X_{16}) を、基準ノード駆動ハイパスフィルタ回路を介して I/V 変換器に接続した。残りの X 電極とすべての Y 電極には、触覚提示用の交流電圧信号を印加した。励振信号重畳回路の効果を確認するため、図 49 のとおり、励振信号重畳回路がある場合と、励振信号重畳回路を使用しない場合、すなわち、結合コンデンサ C_s を取り外した場合とで、I/V 変換器の出力電圧をオシロスコープで測定し比較した。表面にはタッチしない条件で測定した。



$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{1 + j\omega(C_f R_f + C_{in} R_f)}{1 + j\omega C_f R_f},$$

where v_1 and v_2 are the amplitude of the voltage, j is the imaginary unit, ω is the angular frequency of v_1 .

図 50 : 電流電圧変換器(I/V converter)の静電容量センシング動作. 出力電圧 V_2 は静電容量 C_{IN} に関して単調に増加する.

I/V 変換器の出力電圧の測定結果を図 51 に示す. 励振信号重畳回路(superimposing circuit)を使用することで I/V 変換器の出力電圧の振幅が減少した. I/V 変換器の出力電圧の振幅を等価寄生容量に変換した結果を図 51 中に記入した. 励振信号重畳回路は等価寄生容量を 217 pF から 61 pF に減少させる効果を有すことを確認した.

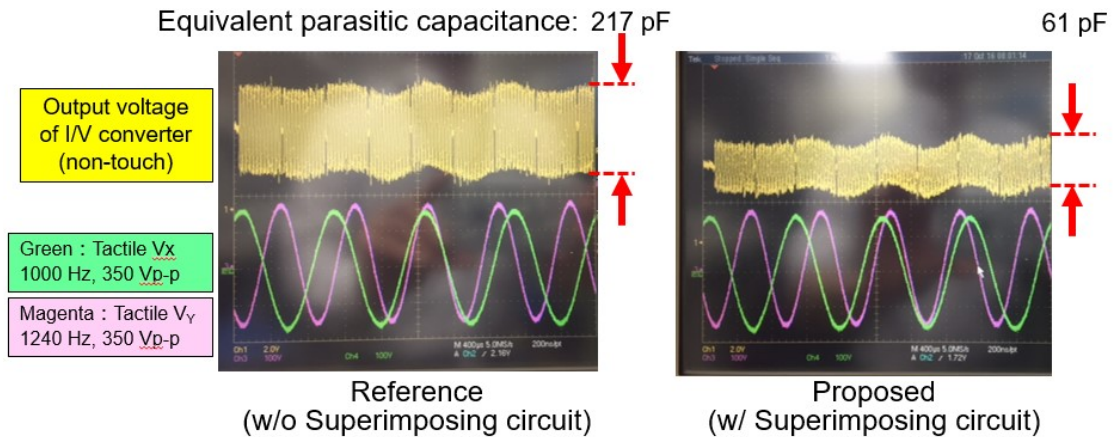


図 51: I/V 変換器の出力電圧の測定結果. 励振信号重畳回路により等価寄生容量が低減.

基準ノード駆動ハイパスフィルタ回路の評価について述べる.

図 49 で示した基準ノード駆動ハイパスフィルタ回路がある場合と, 基準ノード駆動ハイパスフィルタ回路を使用しない場合, すなわち, コンデンサ C_H と抵抗 R_H を取り外し, オペアンプの非反転入力ノードと電極 X_{16} とを導線で接続した場合とで, I/V 変換器の出力電圧をオシロスコープで測定し比較した. 表面にはタッチしない条件で測定した.

I/V 変換器の出力電圧の測定結果を図 52 に示す。基準ノード駆動ハイパスフィルタ回路(reference-node-driven high-pass filter)を使用することにより、結合容量 C_C や C_P を介して電極 X_{I6} に混入した触覚提示用の交流電圧信号が除去されることが示された。

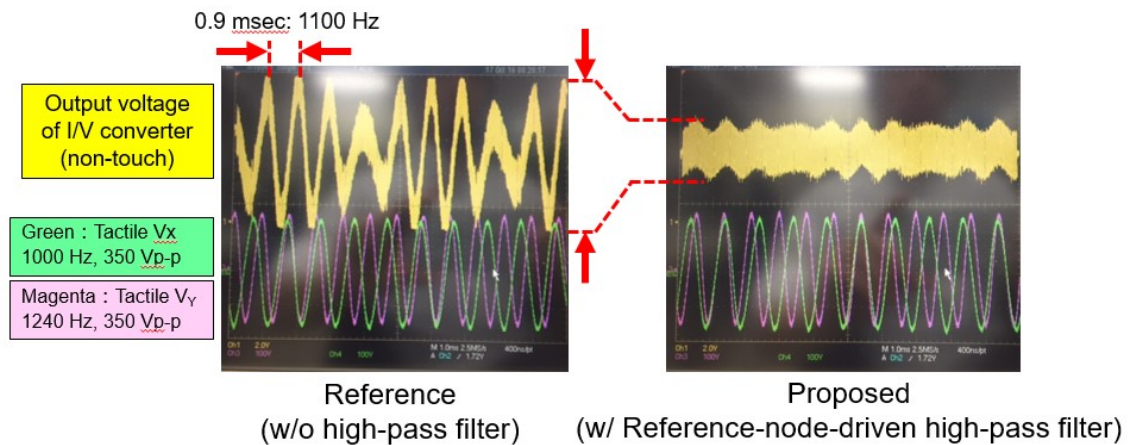


図 52 : I/V 変換器の出力電圧の測定結果。基準ノード駆動ハイパスフィルタ回路により、静電容量センシングの信号に混入した触覚提示用の交流信号が除去された。

また、基準ノード駆動ハイパスフィルタ回路を電極 X_{I6} と I/V 変換器との間に挿入した場合に生じる等価寄生容量と通常のハイパスフィルタ回路を挿入した場合に生じる等価寄生容量とをシミュレーションで比較した。図 53 に示すように、基準ノード駆動ハイパスフィルタ回路は等価寄生容量の増加を 95%低減することが示された。

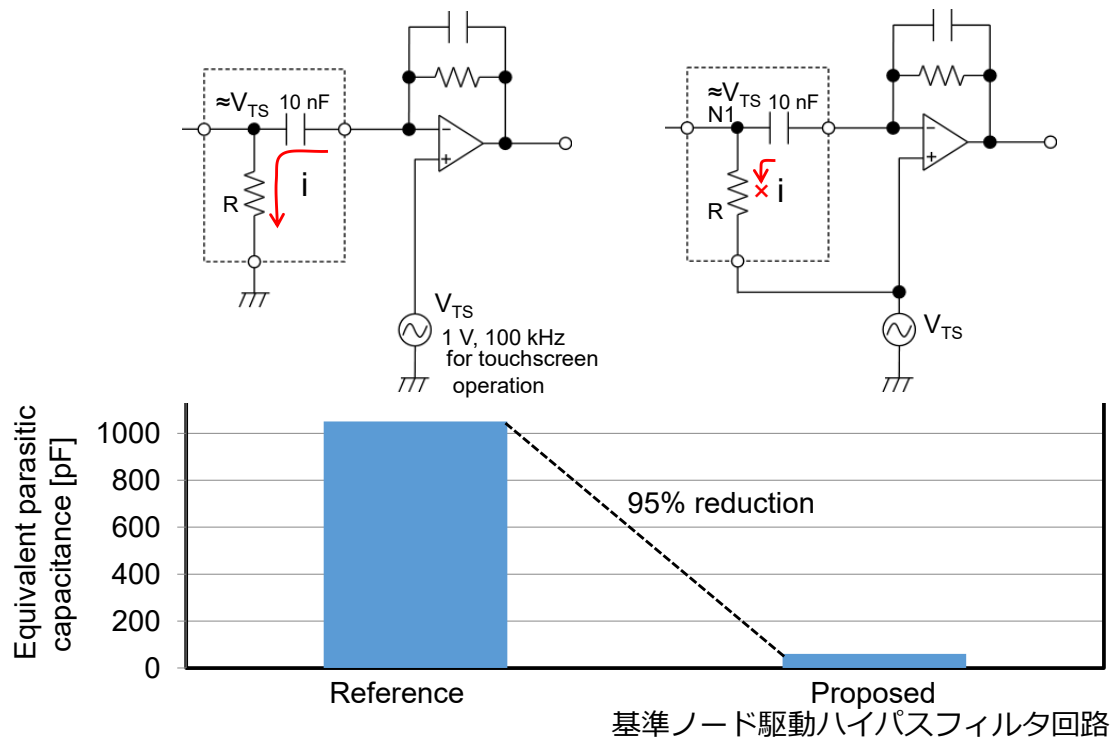


図 53 : 等価寄生容量のシミュレーション結果

タッチ信号の評価結果について述べる。

自己容量方式では、指で絶縁膜表面をタッチしたときに電極の静電容量が増加する。静電容量は I/V 変換器の出力電圧の振幅から求めた。振幅を得るため、I/V 変換器の出力に 14 ビットの A/D コンバータを接続し、A/D コンバータで得られた量子化されたサンプリングデータから振幅を計算する FPGA を作製した。振幅は 33 msec ごとに計算した。1 つの振幅値の算出には、静電容量センシング用の 100 kHz の励振を 45 波含む 450 μsec の期間にサンプリングされたデータを用いた。X₁₆ の静電容量を得ることとし、他の全ての電極には触覚提示用の交流電圧信号を印加した。得られた X₁₆ の静電容量を図 54 に示す。励振信号重畳回路と基準ノード駆動ハイパスフィルタ回路を適用することで 24 dB の S/N 比が達成され、電極 X₁₆ 以外の電極に触覚提示用の交流電圧信号が印加された環境でタッチの信号が検出できることが示された。一方、励振信号重畳回路も基準ノード駆動ハイパスフィルタ回路も利用しない、対照実験での S/N 比は 0 dB 未満であった。

	対照実験 励振信号重畳回路なし 基準ノード駆動ハイパスフィルタ 回路なし	提案手法 励振信号重畳回路あり 基準ノード駆動ハイパスフィルタ回 路あり
S/N比	< 0 dB	24 dB
タッチ 信号		

図 54：タッチ信号の測定結果．励振信号重畳回路と基準ノード駆動ハイパスフィルタにより S/N 比が向上．

4.5.2. 主観評価実験

本章で提案した，静電容量センサを一体化した静電触覚ディスプレイの触覚提示の性能を主観評価実験で確かめた．10.4 インチの静電触覚ディスプレイを 10.4 インチの LCD に積層し，主観評価実験で用いる視触覚ディスプレイを作製した（図 55）．電極基板の駆動回路のシステム構成は図 47 で示すとおりであり，触覚駆動回路(X)及び触覚駆動回路(Y)には前述の励振信号重畳回路を実装し，タッチパネルコントローラには前述の基準ノード駆動ハイパスフィルタ回路を実装した．図 55(B)の領域 A と領域 C に含まれる Y 電極（垂直電極）には，触覚提示用に振幅 175 V，周波数 1240 Hz の交流電圧信号を，領域 B と領域 C に含まれる X 電極（水平電極）には，触覚提示用に振幅 175 V，周波数 1000 Hz の交流電圧信号を，図 48 のタイミングチャートに示す「触覚提示のために駆動」で示される期間，印加した．1 フレーム期間は 33 msec に設定した．対照実験として図 56 に示す単純な時分割駆動で駆動し，触覚刺激を比較した．単純な時分割駆動の場合，全ての電極は， t_0-t_1, t_4-t_5, \dots の期間，同時に静電容量センシングのために駆動され，他の期間は触覚提示のために駆動される．

主観評価実験は 2 段階で実施した．第 1 段階では，静電触覚ディスプレイに慣れた 4 人が評価実験に参加した．参加者には自由に視触覚ディスプレイを体験してもらい，知覚された触覚刺激を述べてもらい，その内容を記録した．領域 C に関し，空間拡散駆動法で駆動した場合，参加者はザラザラした触感やゴムのような触感であると述べた．単純な時分割駆動の場合，ザラザラした触感やゴムのような触感が脈動しているようだと述べた．触覚刺激の強さはどちらの駆動法でもほぼ同じで，どちらの刺激が強いかを明確に述べることはできなかった．領域 A と領域 B に関し，どちらの駆動法であっても

本来不要な脈動するような触感を知覚したと述べた。参加者全員が、単純な時分割駆動の方が空間拡散駆動法で駆動した場合よりも本来不要な脈動する刺激が強いと述べた。領域 A と B で知覚される，本来不要な脈動感を調べるために、第 2 段階の主観評価実験を実施した。

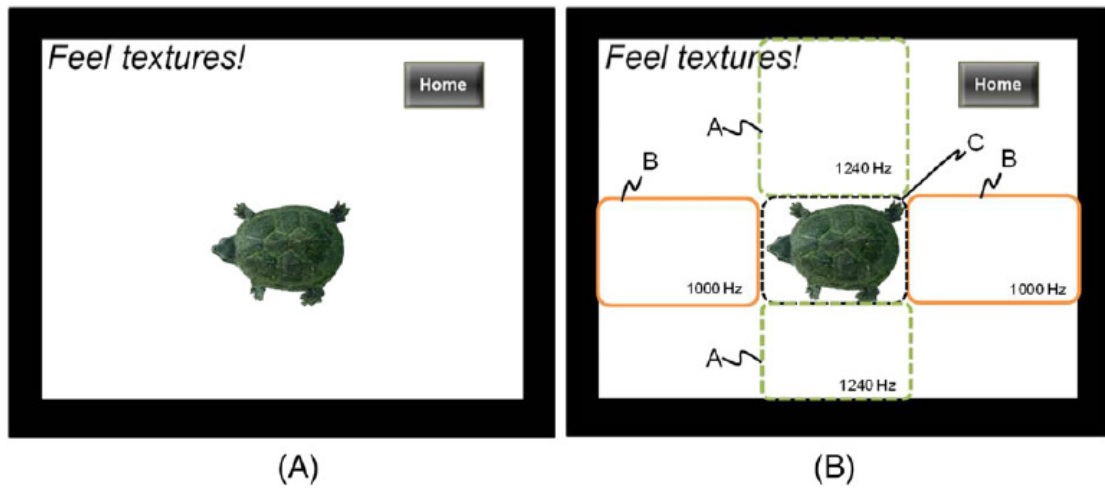


図 55：主観評価実験に利用した画面(A)と領域(B)

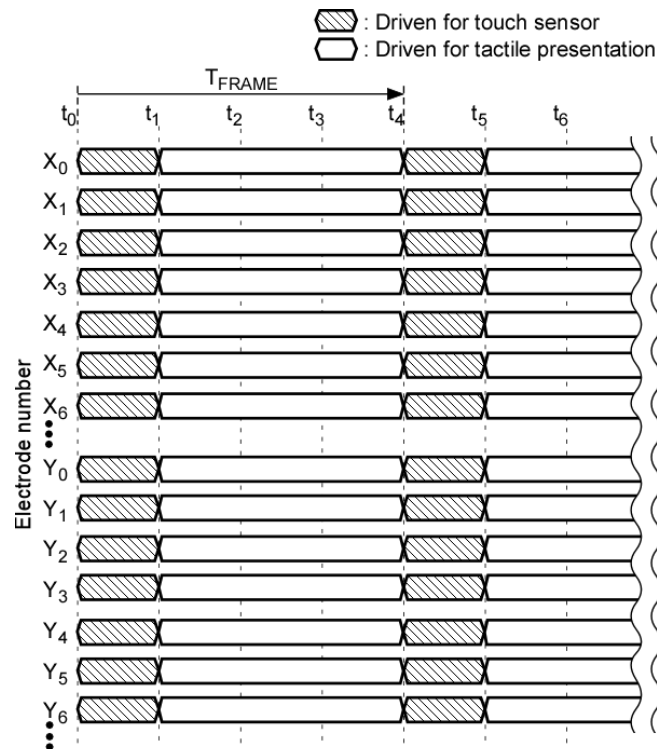


図 56：単純な時分割駆動のタイミングチャート

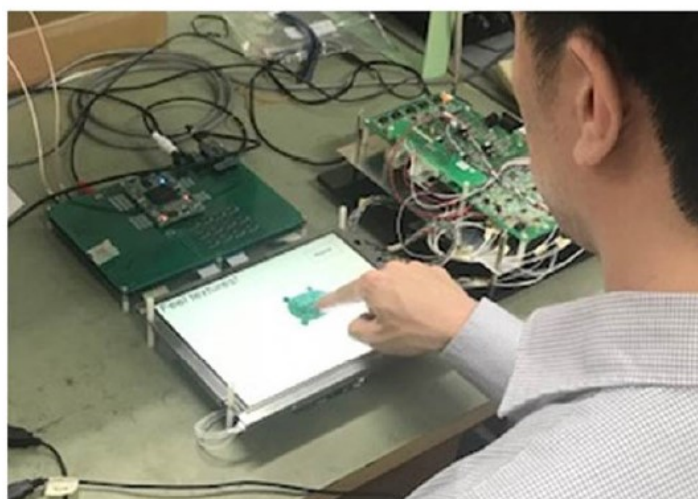
第2段階の主観評価実験には20代～50代の男女、合計7人が参加した。参加者は人差し指1本で視触覚ディスプレイ上を触察し、領域Aと領域Bの刺激の強さを0～4の尺度で評価するように求められた。ここで、「4」は領域Cの刺激と同じ強さであり、「0」は背景(領域A、B、Cを除いた場所)と同じ強さとした。アースバンド等で指や体を電氣的にグラウンドに接続することはしなかった。図57に主観評価実験中の様子の写真を、図58に実験結果を示す。単純な時分割駆動の場合、すべての参加者は領域AとBに不要な脈動を感じた。空間拡散駆動法で駆動した場合、領域AとBで知覚される不要な脈動は、単純な時分割駆動と比べると、弱く知覚された。すなわち、空間拡散駆動法は、触覚刺激の空間的局在化の観点で、対象領域の上下左右に発生する不要な触覚刺激を抑制するという利点があることが示された。

単純な時分割駆動で領域Aと領域Bで不要な脈動が発生した理由は、次のように推測できる。

- (i) 領域AおよびBの1240 Hzまたは1000 Hzの交流電圧信号は、静電容量センシングのため周期的に停波された。周期は33 msecであり停波期間は8.3 msecであった。
- (ii) その期間、指と電極との間の静電気力は周期的に失われた。

静電触覚ディスプレイを1000 Hzや1240 Hzの交流電圧信号で駆動した場合、静電気力の周波数が高く、このため皮膚で生じる機械振動の周波数が高く、ザラザラした触感のような材質感は提示できないし、振動として知覚することもできない。ところが、これらの交流電圧信号が33 msecの周期(周波数30 Hz)で8.3 msecの時間停波することで、機械受容器の検出閾値を超える振動が発生した。30 Hzの振動は振動として知覚することができ、また皮膚の触覚の時間分解能は10 msecとされている[119]ことは実験の結果を支持する。

一方、空間拡散駆動法の場合、静電容量センシングのために停波される電極は、電極4本に対して1本の割合である。ユーザがタッチ面上で指を滑らせている間、静電気力は空間的に平均化され、静電気力の減少は単純な時分割駆動と比べて小さく、不要な脈動が弱く知覚されたと推測される。



- Seven participants
 - male and female, ages ranging from 20's to 50's
- They were asked to indicate strength of stimulus in regions A and B as compared with C.

図 57:主観評価実験の様子

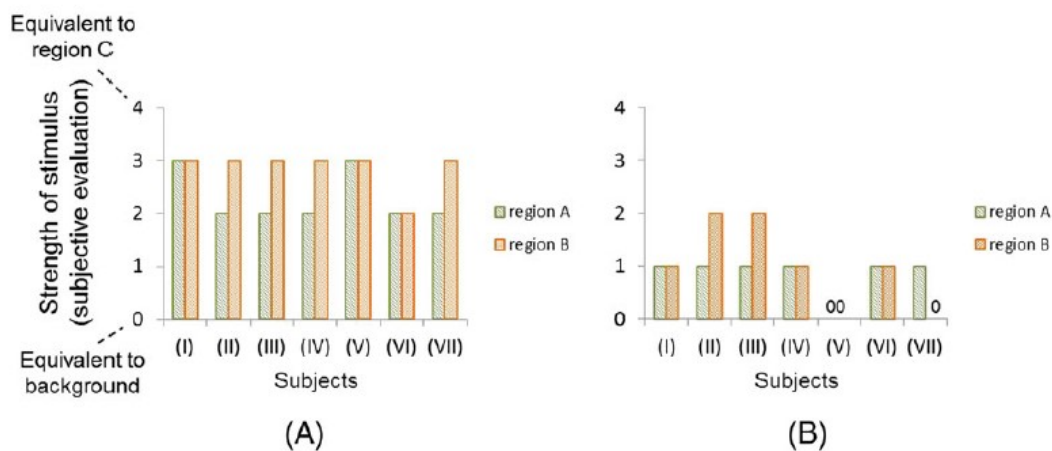


図 58 : 主観評価実験で得られた触覚刺激の強さ. (A)単純な時分割駆動法. (B)空間拡散駆動法

4.5.3. デモ実証

図 59 は静電容量センサを一体化した静電触覚ディスプレイを 10.4 インチ LCD に積層して作製した、インタラクティブ視触覚ディスプレイのデモ装置である。このデモ装置は図 47 に示す構成の静電容量センサを一体化した静電触覚ディスプレイ有し、図 48 に示す空間拡散駆動法で駆動された。このデモ装置は SID2017 等の展示会で展示され、多数の来場者がその動作を体験した。ユーザは視触覚を通して情報を得て、タッチ入力によって画面を操作することで本視触覚ディスプレイと対話した。表 7 に本視触覚ディスプレイ

レイの仕様をまとめる。



図 59：静電容量センサを一体化した静電触覚ディスプレイを 10.4 インチ LCD に積層した作製のインタラクティブ視触覚ディスプレイ。

表 7：静電容量センサを一体化した静電触覚ディスプレイの仕様

Diagonal size	10.4 in.
Number of electrodes	32 (X) × 42 (Y)
Driving voltage for tactile display	175 V
Driving frequency for tactile display	1000 Hz for X electrode 1240 Hz for Y electrode
Touchscreen type	Projected-capacitive Self capacitance
Touchscreen driving signal	1 V, 100 kHz

4.6. おわりに

本章では、静電触覚ディスプレイと静電容量センサを共存させ、一体化可能であることを示した。

XY 電極構造の電極基板を静電触覚ディスプレイおよび静電容量センサとして機能させる場合、相互容量式で駆動させた場合は、表面絶縁膜の薄さに起因してタッチを検出できなくなる条件が存在することを示し、自己容量方式で駆動する必然性を明らかにした。静電触覚ディスプレイと自己容量方式の静電容量センサとの一体化を、電極の時分割駆動の手法で解決した。触知覚上の課題に対し、特定の電極がタッチセンサとして利用される時間を 8.3 msec とし、タッチセンサとして利用する電極を空間的に拡散させ走査させる駆動法を提案し、静電気力が途切れることで生じる不要な触覚刺激が抑制され

ることを示した。静電容量センシングでの課題に対し、センサに混入する電氣的ノイズを低減するために(i)触覚を提示する交流電圧信号にタッチを検出するための励振信号を重畳する回路及び、(ii)タッチ検出信号に混入する、触覚提示用の交流信号を除去するための基準ノード駆動ハイパスフィルタ回路を提案した。今後の課題はマルチタッチ入力と触覚オブジェクトの上下左右の領域で知覚される不要な触覚の低減である。

第5章 マルチタッチ入力可能な静電触覚ディスプレイ

5.1. はじめに

第5章では、5.1 mm 四方の電極を 30×20 個アレイ状に配列したセグメント電極構造の静電触覚ディスプレイを試作し、個々の電極を独立して制御することでマルチタッチ入力が可能で、形状の自由度が高い触図を提示できることを示す。また、触覚刺激を提示するための交流信号に関し、隣り合う電極に位相が 180 度異なる交流信号を印加することで、ヒトの電氣的接地状態に依存しない安定した触覚刺激を提示できることを示す。さらに、タッチ面上に空間的に局在化し提示した静電触覚オブジェクトを、複数の指で触察する際に生じる触覚のクロストークが、該交流信号を利用することで低減できることを示す。

5.2. 原理

5.2.1. 電極基板

本章で検討する、静電容量センサを一体化した静電触覚ディスプレイで用いる電極基板について述べる。本章で使用する電極基板は、図 60 に示すように、5.1 mm 四方の電極を 30×20 個アレイ状に配列したセグメント電極構造とした。5.1 mm 四方の電極はガラス基板上に ITO で形成した。各電極は電極基板の下辺に設けた外部接続パッドと信号線で一对一の関係で接続された。第 1 の絶縁膜で電極層と信号線層を分離し、電極層の上に第 2 の絶縁膜を形成し、第 2 の絶縁膜表面をタッチ面とした。

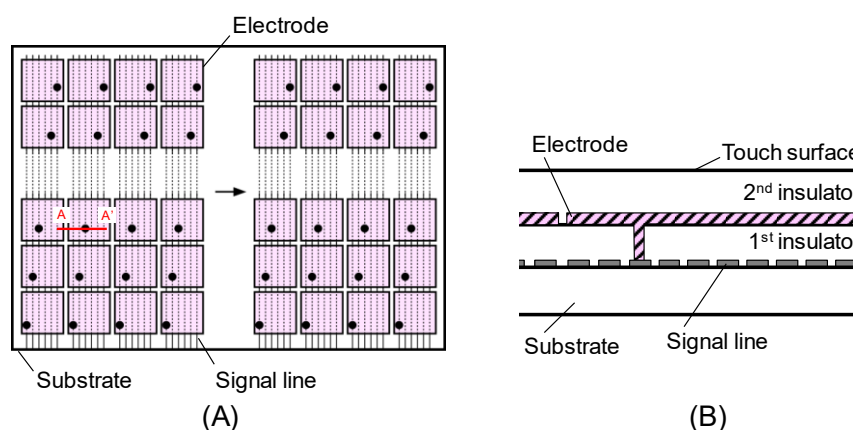


図 60 : (A)セグメント電極構造の電極基板の平面視図, (B)断面図

5.2.2. 駆動方法の検討と提案

筆者は、従来の静電触覚ディスプレイにおいて、人体の電氣的な接地状態によって知覚される触覚刺激の強度が変わることを経験した。Bau らは、強い触覚刺激をユーザに

提示するために、リストストラップを使用して人体をグラウンドに接続した [89]. リストストラップ無しで、安定した強度の触覚刺激を提示可能な静電触覚ディスプレイが望まれていた. この節では、人体の電氣的な接地状態によって知覚される触覚刺激の強度が変わる理由を述べ、触覚刺激の強度を安定化させる駆動方式を提案する. 効果を実証する実験結果を 5.3 節で述べる.

触覚刺激の強度が人体の電氣的な接地状態によって変動する理由を図 61 に示すモデルを用いて述べる. 図 61(B)の Z は指先とグラウンドの間のインピーダンスであり、 V_f は指先の電位である. このモデルは Bau らが用いた電極基板 [89]と同様に、単一の電極で構成されている. 図 61 のインピーダンス Z に接続されているグラウンドは AC 的なグラウンドを示す. すなわち、このグラウンドは、交流電圧信号 V_e の周波数の交流電流を流す低インピーダンスの回路素子と等価である. 例えば、大地と容量結合している金属板はグラウンドである可能性がある.

図 61 のモデルの場合、指先 P_f に働く静電気力 (引力) F_e は、絶縁体の誘電率と厚さをそれぞれ ϵ と d 、接触面積を S_e 、電極 P_e の電位を V_e 、指先 P_f の電位 V_f とすると、平行平板コンデンサの電極間に働く力の式より次の式で表される.

$$F_e = \frac{1}{2} \epsilon S_e \left(\frac{V_e - V_f}{d} \right)^2 \quad (5)$$

数式5より、指先に働く静電気力は指先の電位の V_f の関数である. 指先の電位の V_f は、指先とグラウンドの間のインピーダンスを Z 、電極 P_e の交流電圧の角周波数を ω 、虚数単位を j とすると図 61 (B) の回路方程式より、次の式で表される.

$$V_f = \frac{j\omega Z}{\epsilon S_e + j\omega Z} V_e \quad (6)$$

従って、指先に働く静電気力 F_e は、指先とグラウンドの間のインピーダンス Z に依存する. 指先とグラウンドの間のインピーダンス Z がゼロの場合と無限大の場合で指先に働く静電気力を計算し、そのふるまいを確認する. インピーダンス Z がゼロの場合、指先に働く静電気力 F_e は、

$$F_e = \frac{1}{2} \epsilon S_e \left(\frac{V_e}{d} \right)^2 \quad (7)$$

となり、指先とグラウンドの間のインピーダンス Z が無限大の場合、指先に働く静電気力 F_e は、

$$F_e = 0 \quad (8)$$

となる. 数式7と数式8より、インピーダンス Z がゼロの場合は所定の静電気力が指先に働くが、 Z が無限大の場合は静電気力がゼロになり、触覚ディスプレイとして機能しないことが示された. Bau ら [89]がグラウンドに接続されたリストストラップ(ground

bracelet)を必要とした理由は、 Z をゼロに近づけることで指先に静電気力を働かせるためである。

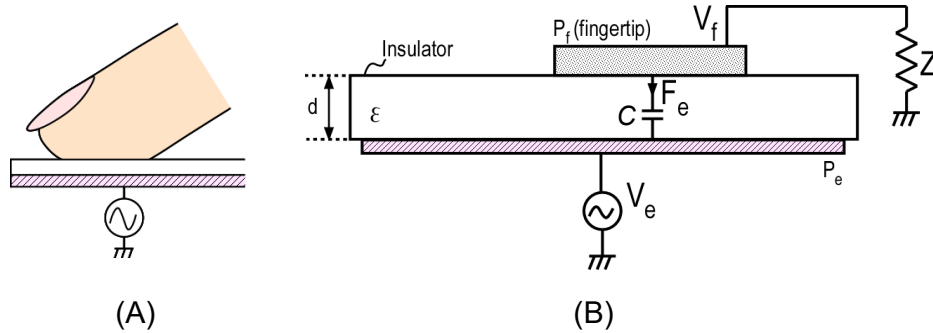


図 61：静電触覚ディスプレイのモデル。(A)：幾何学構造。(B)：電気モデル。

複数の電極が指に対向する構造の電極基板を用いて静電触覚ディスプレイを作製する際の駆動方法を検討した。複数の電極を2つのグループに分け、第1のグループの電極には交流電圧信号 V_{e1} を印加し、第2のグループには交流電圧信号 V_{e2} を印加する。図 62(B)に示すように、指の接触領域が2つの電極にオーバーラップするとき、指先は V_{e1} が印加される電極と V_{e2} が印加される電極の2つの電極に対向する。 V_{e1} と V_{e2} は同一の振幅と周波数で、位相差 Φ の正弦波の電圧とする。具体的には、各信号は ω を角周波数とし、 V_{e1} は $V_0 \sin(\omega t)$ とし、 V_{e2} は $V_0 \sin(\omega t + \Phi)$ で表される信号とする。指に働く静電気力 F_{total} は、指とそれぞれの電極との間に働く静電気力 F_{e1} と F_{e2} の和である。

指先とグラウンドの間のインピーダンス Z がゼロの場合、指先に働く静電気力 F_{total} は、 S_e を指に対向する一つの電極の面積、 α を定数とすると、次の式で表される。

$$F_{total} = \frac{1}{4} \epsilon S_e \left(\frac{V_0}{d} \right)^2 \left\{ 2 + \sqrt{2(1 + \cos 2\Phi)} \sin(2\omega t + \alpha) \right\} \quad (9)$$

指先とグラウンドの間のインピーダンス Z が無限大の場合、指先に働く静電気力 F_{total} は、 β を定数とすると、次の式で表される。

$$F_{total} = \frac{1}{4} \epsilon S_e \left(\frac{V_0}{d} \right)^2 \left\{ 1 - \cos \Phi - (1 - \cos \Phi) \sin(2\omega t + \beta) \right\} \quad (10)$$

これらの数式9,10は、時刻 t を変数とする関数として見たとき、振動項と定数項がある。ヒトの機械受容体は周波数 200 Hz 付近の静電気力の振動で生じる静電触覚で高い感度を持ち [102]、振動しない力には触覚刺激を知覚しないため、関心のある項は振動項である。他の研究と同様に、ユーザは表面上で指を滑らせている間のみ振動項に由来する静電触覚を知覚し、探索的な動きがなければ、静電気力で誘起される触覚刺激を知覚しないことに注意する必要がある。

数式9の振動項は次の式で表される。

$$\frac{1}{4} \epsilon S_e \left(\frac{V_0}{d} \right)^2 \sqrt{2(1 + \cos 2\Phi)} \sin(2\omega t + \alpha) \quad (11)$$

数式10の振動項は次の式で表される.

$$\frac{1}{4} \epsilon S_e \left(\frac{V_0}{d} \right)^2 (\cos \Phi - 1) \sin(2\omega t + \beta) \quad (12)$$

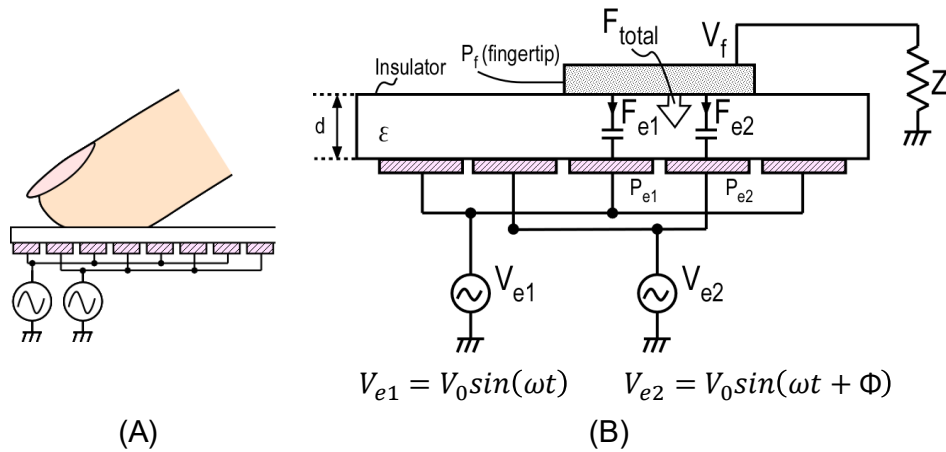


図 62：複数の電極で構成された静電触覚ディスプレイのモデル。(A)：幾何学構造。(B)：電気モデル。

数式11,12は振動項の係数，すなわち静電気力の振幅が位相差 Φ に応じて変化することを示す。図 63 に位相差 Φ と振動項の係数の絶対値との関係を $Z=0$ および $Z=\infty$ で計算した結果を示す。 $Z=0$ の場合、振動項の係数の絶対値は位相差 90 度でゼロとなり、位相差 0 度と 180 度で最大となる。 $Z=\infty$ の場合、位相差が 0 度のとき振動項の係数の絶対値がゼロとなり位相差が 180 度まで単調増加する。図 63 を見ると、振動項の係数の絶対値が、 Z が 0 であるか ∞ であるかに依存しない位相差が 2 つあることがわかる。それらは 70.5 度と 180 度である。図 63 は、位相差 Φ が 180 度のとき、人体の電気的な接地状態に依存せず安定であり、かつ、強い触覚刺激が得られることを示唆している。

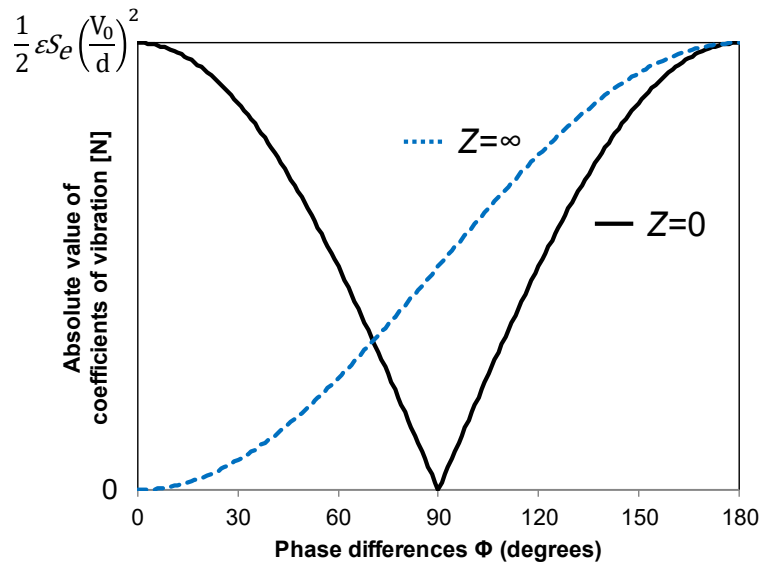


図 63：指に働く静電気力の振幅の計算結果． S_e は一つの電極の面積を表す．

5.3. 実験

5.3.1. 触覚刺激の安定性に関する主観評価実感

静電気力を直接測定することは困難なため、静電気力の振動項を測定する代わりに、触覚刺激の検出閾電圧を測定した．上記のモデルでは、位相差 Φ および人体の接地状態は発生する静電気力の周波数に影響しないため、検出閾電圧は静電気力の振動項の係数の指標となると考えられる．つまり、静電気力の周波数が一定であるため、検出閾値の大・小はすなわち振動する静電気力の小・大を表すとの推測が成立し、検出閾電圧が小さい Φ は、同じ駆動電圧 (V_0) で静電気力の振動項の係数が大きいと考えられる．

実験には図 60 の電極基板を用い、図 64 に示すように V_{e1} が印加される電極と V_{e2} が印加される電極とが、平面視で市松模様になるように駆動した． V_{e1} と V_{e2} の正弦波の周波数として 100 Hz (静電気力の周波数は 200 Hz) を選択した．人体の接地状態はグラウンドに接続されたリストストラップの着用の有無で制御し、位相差 Φ に対する検出閾電圧を測定した．この実験には 3 人の被験者 (男性 2 人、女性 1 人、年齢 28 歳から 54 歳) が参加した．

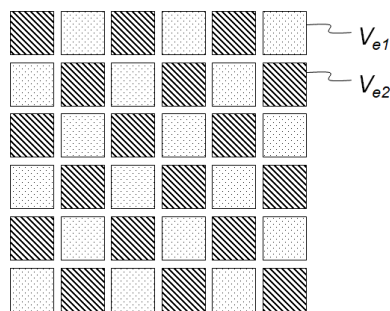
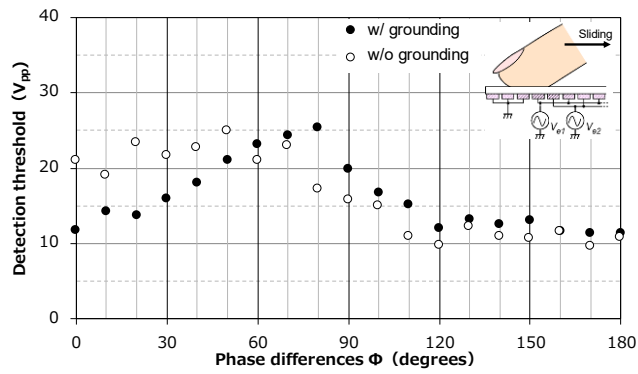
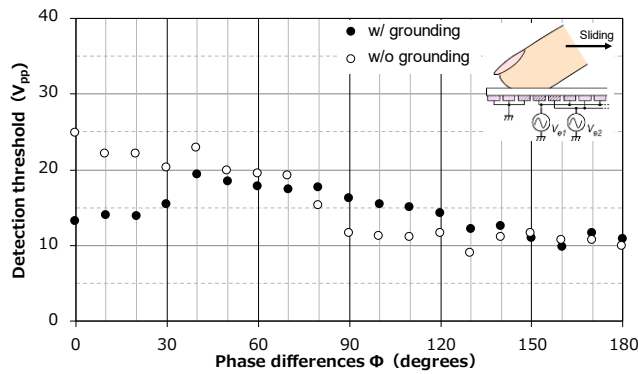


図 64：検出閾電圧測定のための駆動パターン (平面視図)

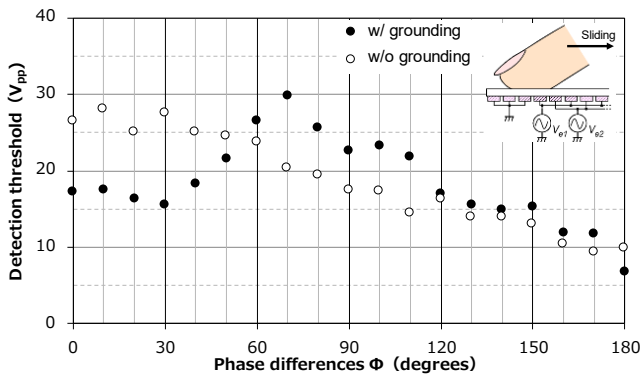
測定された各被験者の検出閾電圧を図 65(A)～(C)に示す. 3つの図を比較すると個人差があるが, 位相差が 180 度 のとき, グラウンドストラップの有無に対し検出閾電圧の差が小さく安定で, また検出閾電圧が小さいことがわかる. この結果は, 位相差 ϕ が 180° のときに静電気力の振動項の係数が大きく, かつ人体の電氣的な接地状態接地状態に依存せず安定であることを示し, モデルを用いた検討結果と一致した. 後述するセグメント電極構造の静電触覚ディスプレイでは, 上記で説明した駆動条件, すなわち, V_{e1} が印加される電極と V_{e2} が印加される電極とが平面視で市松模様になるように駆動し, V_{e1} と V_{e2} の位相差 ϕ を 180° とした.



(A) Subject A



(B) Subject B



(C) Subject C

図 65 : 検出閾電圧測定結果

5.3.2. 複数の指で触察する際に生じる触覚のクロストーク

XY 電極構造の電極基板を用いて触覚刺激を局在化して提示した場合、3.4.3.2 節で述べたように、2本の指で同時に触察すると触覚を提示していない領域の指にも触覚刺激

が知覚される課題が生じた。本章で述べる静電触覚ディスプレイはこの課題を解決した。以下に主観評価結果と解決できた理由を述べる。

5.3.2.1. [主観評価実験]

(装置)

図 66(A)は、第 3 章で述べた XY 電極構造の静電触覚ディスプレイの駆動方法と、該駆動方法でタッチ面上に形成される各領域を示す。電極に印加される交流電圧信号に応じて 4 つの種類の領域 (rgnT、rgnX、rgnY、rgnG) が形成される。rgnT は局在化された触覚を提示する対象とする領域 (対象領域) であり、X 電極と Y 電極は異なる周波数の高周波の交流電圧信号で駆動され、うなりの周波数である 240 Hz の静電気力振動が指先と電極基板との間に発生し、触察によりユーザが微細テクスチャ感を知覚する領域である。rgnX は、X 電極のみが 1000 Hz の交流電圧信号で駆動される領域である。周波数が高く、対象表面がツルツル・ザラザラという表現で表されるような微細テクスチャの触感を提示することはできない。rgnY は Y 電極のみが 1240 Hz の交流電圧信号で駆動される領域であり、やはり静電気力の振動の周波数が高く、1 本の指で触察した場合、微細テクスチャの触感を提示することはできない。rgnG は X 電極と Y 電極の両方がグランドに接続される領域である。

図 66 (B) は、セグメント電極構造の静電触覚ディスプレイの駆動方法と、該駆動方法でタッチ面上に形成される領域を示す。電極に印加される交流電圧信号に応じて 2 つの種類の領域 (rgnS、rgnG) が形成される。rgnS は局在化された触覚を提示する対象とする領域 (対象領域) であり、隣り合う電極同士で位相が 180 度異なる 120 Hz の交流電圧信号が印加される。rgnG は電極がグランドに接続される領域である。

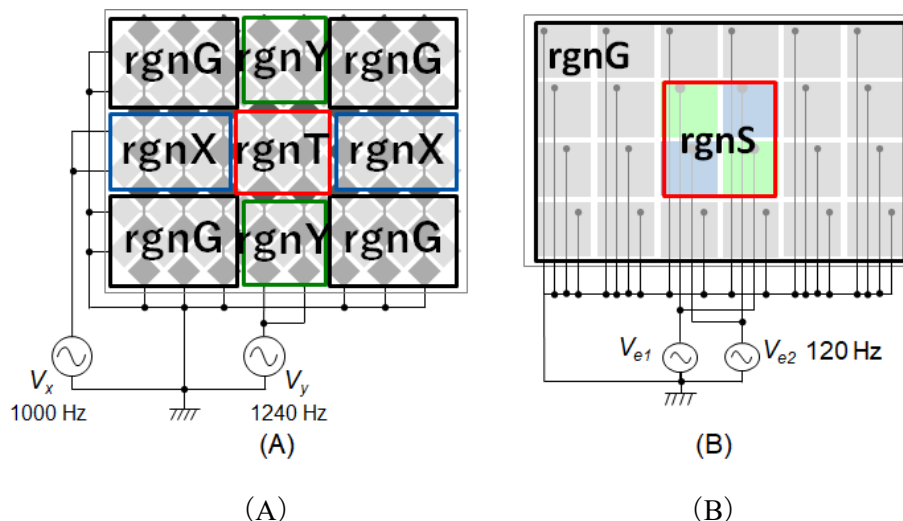


図 66 : 2 本指で触察したときに生じる触覚のクロストークの強さを評価する駆動条件。(A) : 3 章で述べた XY 電極構造の静電触覚ディスプレイの駆動方法。(B)本章で提案するセグメント電極構造の静電触覚ディスプレイの駆動方法。

(主観評価実験)

上で述べた各領域を触察したときに知覚される触覚刺激の強度を評価した。1本の指で触察する条件と、2本の指で同時に触察する条件で評価した。1本の指で触察する場合は、それぞれの領域を順次触察し、2本の指で触察する場合は、一方の手の1本の指で触覚刺激を提示する対象領域 (rgnT または rgnS) を触察し、同じ側の手の他の指で非対象領域を触察した。11人(男性9人、女性2人、年齢:25~60歳)が実験に参加した。XY電極構造の触覚ディスプレイを評価する際は、触覚を提示する対象領域(rgnT)を1本の指で触察したときに知覚される触覚刺激の強度を10とし、X電極とY電極の両方がグラウンドに接続される領域(rgnG)の強度を0とするように基準を定め、被験者は知覚される触覚刺激の強度を評価した。セグメント構造の触覚ディスプレイを評価する際は、同様に触覚を提示する対象領域(rgnS)の強度を10とし、XY電極構造のX電極とY電極の両方がグラウンドに接続される領域(rgnG)の強度を0とし、触覚刺激の強度を評価した。

評価結果を図67、図68に示す。図67は実験参加者が1本の指で触察したときに、各領域で知覚した触覚強度の平均と最大/最小を示す。局在化された触覚を提示する対象とする領域(対象領域)を除いた領域、すなわち非対象領域では、触覚刺激の強度は対象領域の強度と比較してほぼゼロであった。この結果より、1本の指で触察した場合は、XY電極構造であってもセグメント電極構造であっても、触覚刺激を対象領域に局在化して提示できることが示された。

図68は、2本の指を用いて、1本は対象領域を、他の1本は非対象領域を同時に探索した場合に、各領域の各指が知覚する触覚刺激の平均強度と最大/最小を示す。XY電極構造の触覚ディスプレイの場合、3種類の非対象領域(rgnX、rgnY、rgnG)があるが、これら全ての非対象領域において、触察する指に本来不要な触覚刺激が知覚された。セグメント電極構造の触覚ディスプレイの場合、非対象領域で知覚された触覚刺激の強度は平均で1であった。この実験により、セグメント電極構造の電極基板を用い、隣り合う電極同士で位相が180度異なる交流電圧信号を印加する駆動法を適用することで、複数の指で触察する際に生じる触覚のクロストークが低減することが示された。

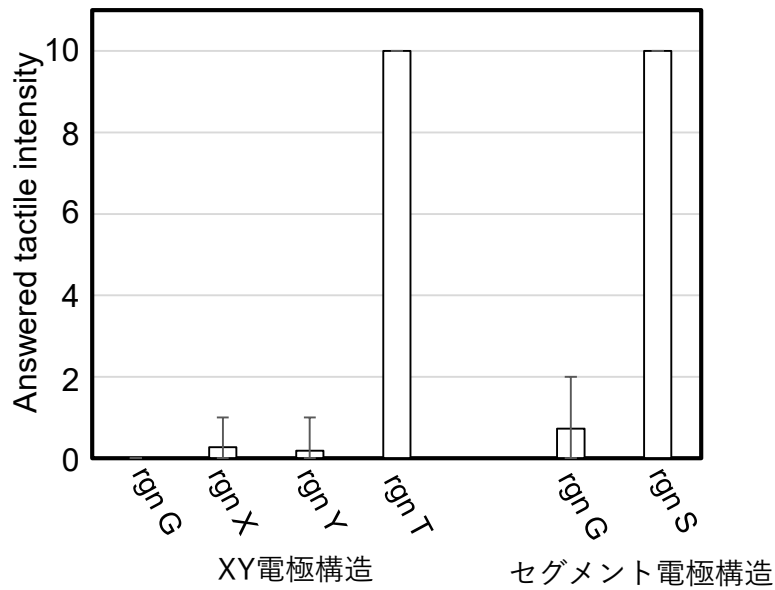


図 67 : 1 本指で触察したときの触覚刺激の強さの評価結果

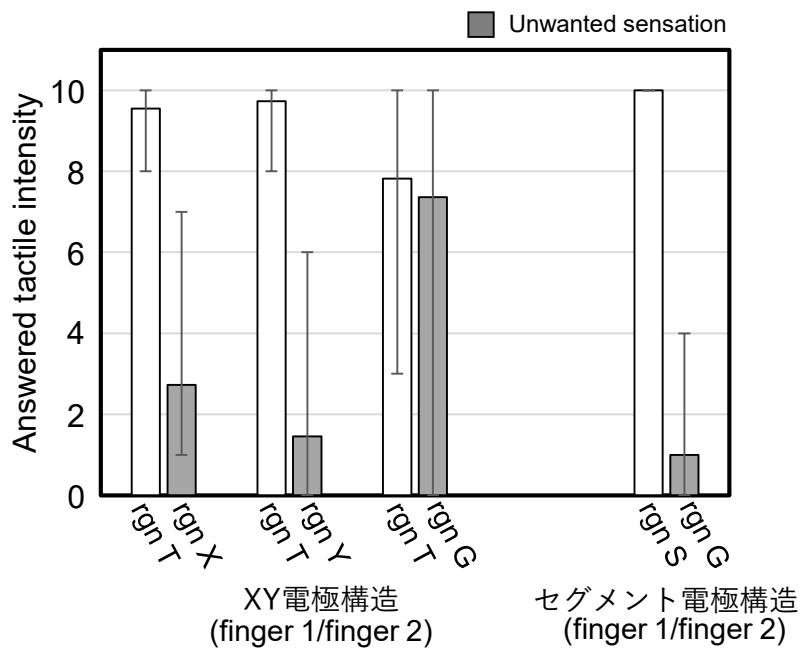


図 68 : 2 本指で同時に触察したときの触覚刺激の強度の評価結果

5.3.2.2. [電气的特性評価]

複数の指で触察する際に生じる触覚のクロストークの原因が人体の電位変動によることを確認するため、指の電位を測定した。図 69 に測定結果を示す。図 69 (A) は、XY 電極構造の静電触覚ディスプレイを用いて、人差し指が対象領域(rgnT)に接触して

いる時に、中指の第1関節と第2関節の間の皮膚で測定した電位である。包絡線の周波数が 240 Hz の電位変動が観測された。この電圧変動は、対象領域(rgnT)に触れているもう一方の指に誘起された電位変動によりもたらされたと考えられる。その根拠は、図 33 の(III)で観測された、対象領域上に置いた真鍮の角柱で観測された電位の波形と類似していることであり、他の原因が考えられないことである。非対象領域に触れる指の電位が変動するため、その指に対向する電極がグラウンドに接続されている非対象領域であっても触覚刺激が生じることが示唆された。

図 69 (B) は、セグメント電極構造の静電触覚ディスプレイを用いて、人差し指が対象領域(rgnS)に接触している時に、中指の第1関節と第2関節の間の皮膚で測定された電位である。測定された電位変動は、図 69(A)の電圧変動よりも小さかった。電位変動が小さい理由は、対象領域(rgnS)に触れている指が、逆極性の電圧($\Phi=180$ 度)で駆動される電極に対向し、指に誘起される電位変動がキャンセルされるからだと考えられる。

これらの測定された指の電位変動は、複数の指で触察する際に生じる触覚のクロストークの原因が、対象領域に触れる指に誘起される電位変動であるとの推論を支持する。

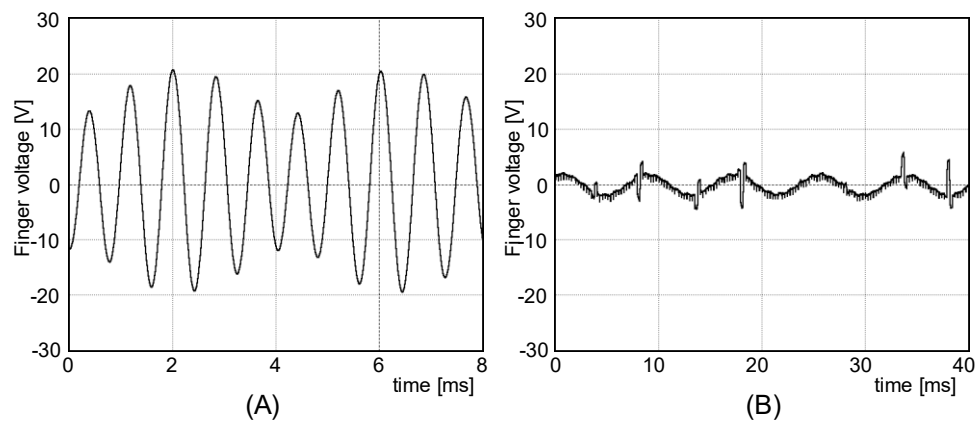


図 69：2本指で触察したとき、非対象領域を触察する側の指の電位測定結果。電位測定時、非対象領域側の指はタッチ面から浮せた。

5.4. 実装とデモ実証

600個(30×20)のセグメント電極を有する静電触覚ディスプレイを用いて作製した、インタラクティブ視触覚ディスプレイの構成を図 70 に示す。一つの電極は一辺 5.1 mm の正方形で、隣接する電極との隙間は 50 μm とした。各電極は一対一の関係で接続された信号線を介して、独立して制御される。目的の信号線に交流電圧信号を供給することで、画素単位で局在化された触覚刺激を生成できる。すべての電極は、触覚提示と静電容量センシングの両方の目的に使用される。これら 2つの機能を持たせるために、各信号線は、システムコントローラに制御された単極双投 (SPDT) スイッチを介して触覚

駆動回路(Tactile driver)またはタッチパネルコントローラ(Touchscreen controller)に接続される構成とした。各 SPDT スイッチは個別に制御可能とした。ある時刻に、600 個のうち 16 個の電極がタッチパネルコントローラに接続され、残りの電極は触覚駆動回路に接続される。スイッチコントローラは、1 フレームで全ての電極がタッチパネルコントローラに順次接続されるように SPDT を制御しスキャンする。タッチ検出のスキャンレートは、既存のタッチパネル製品の一般的なレートと同等な 100 Hz で設計した。

触覚駆動回路は、触覚提示用の交流電圧信号を生成する。図 71 に示すように 600 個の出力端子を備える。各出力端子は、図 70 の SPDT スイッチに一对一で接続される。触覚駆動回路は、触覚を提示するために、触覚刺激を提示する対象領域に対応する端子に交流電圧信号(V_{e1} または V_{e2})を出力し、非対象領域に対応する端子にグラウンド電位を出力する。図 73(B)は、触覚駆動回路によって駆動される電極の状態の例を示す。触覚駆動回路は 100 Hz のフレームレートで出力が更新可能なように設計した。このため、局在化されたテクスチャ感の幾何学的図形の形状を 100 Hz で変更できる。触覚を利用したインタラクションの用途には十分なフレームレートである。

セグメント電極を用いた静電触覚ディスプレイを LCD にオプティカルボンディングし、インタラクティブな視触覚ディスプレイを作製した。このインタラクティブな視触覚ディスプレイにより、ユーザは、視覚情報と触覚情報を同時に取得することができる。さらに、セグメント電極は触覚提示と静電容量センシングの両方の目的に使用され、マルチタッチ入力も可能である。表 8 に本視触覚ディスプレイの仕様をまとめた。

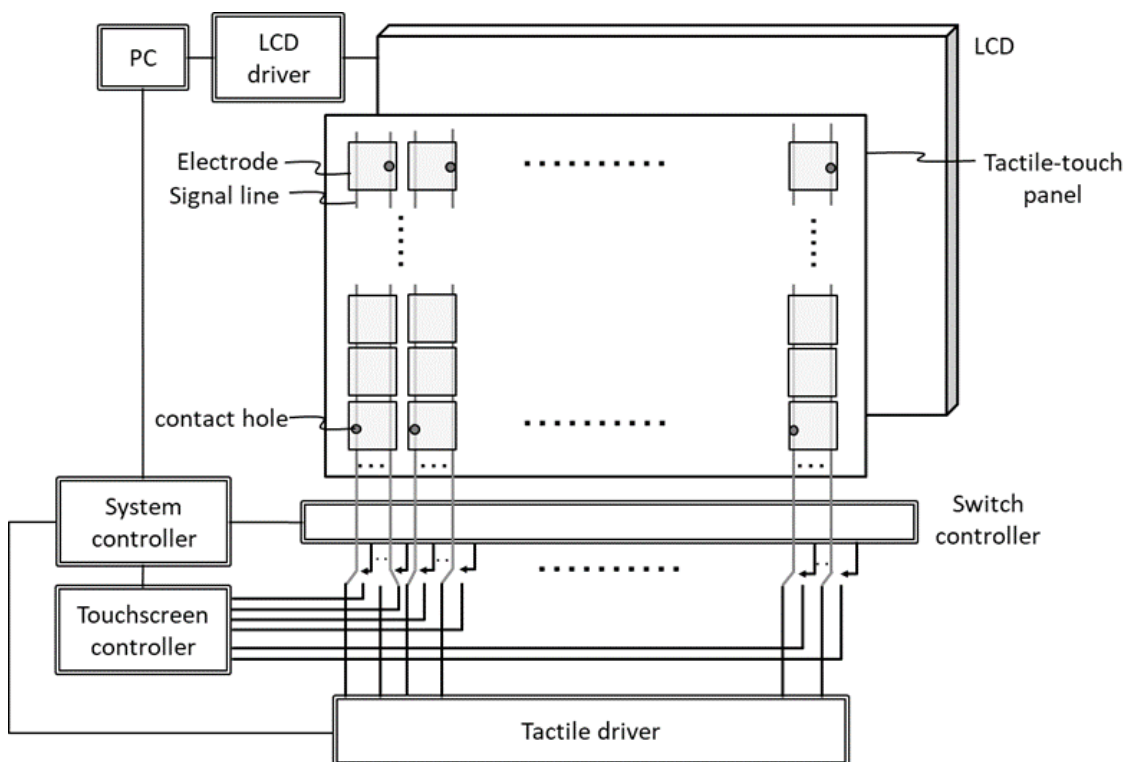


図 70 : 作製したインタラクティブ視触覚ディスプレイの構成図

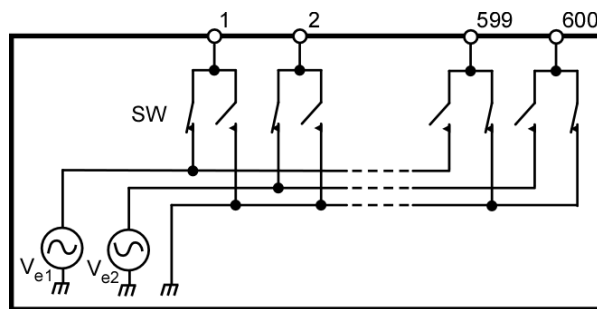


図 71 : Tactile driver の構成図

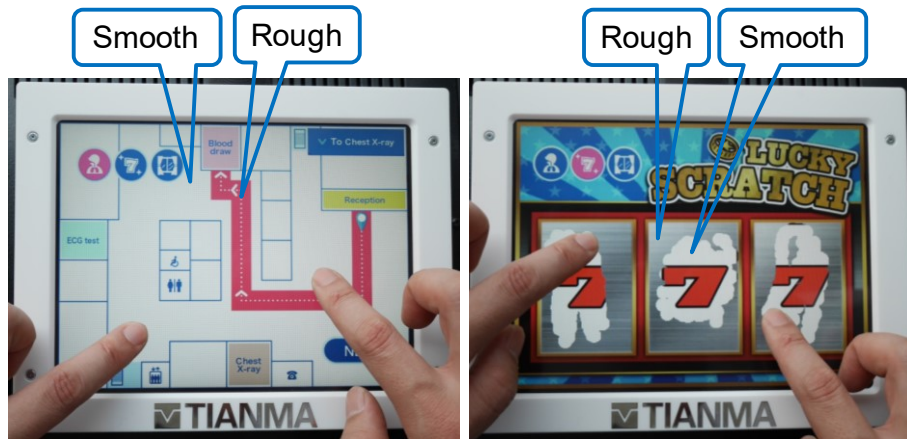
表 8 : 作製したインタラクティブ視触覚ディスプレイの仕様

	Size (inches)	8.4"
Visual display (LCD)	Active area (mm)	170.4 × 127.8
	Resolution (pixels)	800 × 600
	Luminance (cd/m ²)	800
	Number of electrodes	30 × 20
	Electrode unit size (mm)	5.1 × 5.1
Tactile touch display	Touch point	10-point touch
	Report rate of touch detection (Hz)	100
	Tactile display type	Friction control
	Tactile signal frequency (Hz)	120

インタラクティブ視触覚ディスプレイを使用したデモを作成した。第1のデモは、目的地までのルートを視覚および触覚で提示する医療施設内の地図である（図 72(A)）。触覚提示用の交流電圧信号は、視覚ディスプレイで示されている経路の領域の電極のみに供給される。ユーザは経路を視覚と触覚で知覚できる。第2のデモはスクラッチカードである（図 72(B)）。ユーザがタッチ面を指でスワイプすると、銀色の上塗りでも覆われたように表示された部分にザラザラした触感が感じられ、上塗りが剥がれ、隠れた画像が表示される。隠れた画像をスワイプするとスムーズな触感が知覚される。どちらのデモにおいても 5.3 節で確認した安定した強度の触覚刺激を片手および両手で知覚することができた。

このデモ装置は SID 2019 等の展示会で展示され、多数の来場者がその動作を体験した。第4章で述べた、XY 電極を用いて作製した触覚ディスプレイと比べると触覚刺激を知覚しやすく、実際、多くの来場者から触覚刺激がわかりやすくなったとのコメントを頂いた。触覚刺激が知覚できないと訴えた来場者は筆者が対応した限りゼロ人であった。

た. 図 73(A)はデモ画像のスクリーンショットであり、図 73(B)は触覚提示のために交流電圧信号が印加された電極を示す. 図 73 に示すように、本視触覚ディスプレイは、視覚オブジェクトに対応する位置に局在化されたテクスチャ感を提示する. また、静電容量センシング機能のデモンストレーションも実施した. 図 74(A)は、10本の指で操作する写真であり、図 74(B)はその時に自己容量方式で検出した各電極の静電容量の増加である.



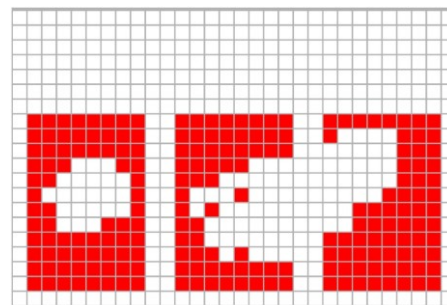
(A) Tactile map

(B) Scratch card

図 72 : 作製したインタラクティブ視触覚ディスプレイの写真



(A) Displayed image



■ : Excited by driving signal for tactile presentation
□ : Grounded

(B) Electrodes status

図 73 : 表示画像と駆動される電極の状態との関係を表す図.

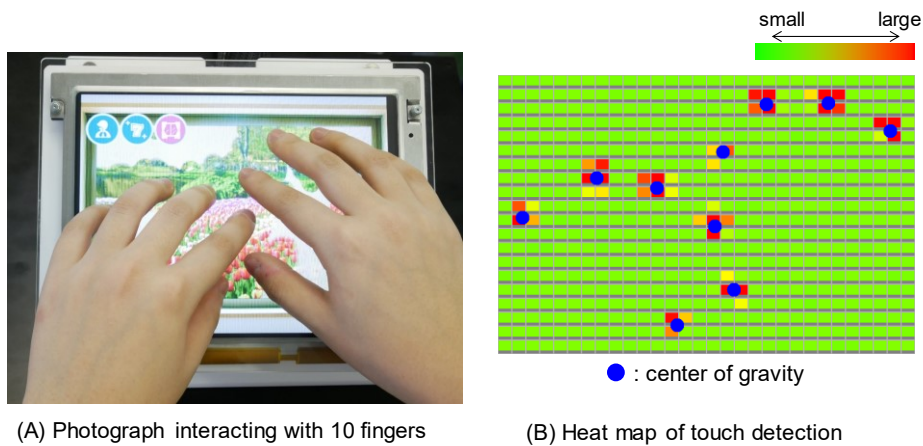


図 74 : インタラクティブ視触覚ディスプレイのタッチ検出例を表す図.

5.5. おわりに

本章では、セグメント電極構造の電極基板を用いることでマルチタッチ入力可能な静電触覚ディスプレイを作製できることを示した。セグメント電極構造の電極基板で静電触覚ディスプレイを設計する際は、隣り合う電極に位相が 180 度異なる交流信号を印加することで、(i)ヒトの電氣的接地状態に依存しない安定した刺激が得られ、リストストラップが不要となる、(ii)タッチ面上に空間的に局在化し提示した静電触覚オブジェクトを、複数の指で同時に触察する際に生じる触覚のクロストークが低減することを示した。

第6章 ラテラルモーションを利用した視触覚ディスプレイ

6.1. はじめに

1.1.2 で述べたように、Eyes-free interaction が可能なタッチパネルにはボタンを押下したときにクリック感のフィードバックが求められる。静電触覚ディスプレイはパッシブ型の触覚ディスプレイであり、ボタン押下動作に対してクリック感を提示することはできない [120]。本章では、静電容量センサを一体化した静電触覚ディスプレイとラテラルモーション機構とを組み合わせて、Eyes-free interaction を可能とする構成を示す。はじめに、ラテラルモーションでクリック感を提示する際の知覚特性を解明する。タッチ面の振動方向が指の長軸方向の場合は、短軸方向の場合と比較して触覚刺激が強く知覚されることを主観評価実験で示し、振動方向の設計指針を示す。次に、静電容量センサを一体化した静電触覚ディスプレイとラテラルモーション機構とを用いてインタラクティブな視触覚ディスプレイを作製し、Eyes-free interaction を可能とする一つの構成を示す。

6.2. ラテラルモーションの方向と刺激の強さ

6.2.1. 実験方法

6.2.1.1. [装置]

ラテラルモーションの振動方向と知覚される触覚強度との関係を調べるために作製した装置を説明する。図 75 にラテラルモーションを発生させる機構の構造を示す。タッチ面を徐々に押し込んで、接触力が所定の力に達するとタッチ面に一軸方向のラテラルモーションが発生するように装置を設計した。アクチュエータにはリニアソレノイドアクチュエータを採用した。アクチュエータの固定子をベースに固定し、可動子をリンク機構でキャリアに結合し、アクチュエータを駆動させてキャリアをラテラルモーションさせる構成とした。キャリアとベースを結合する4枚の板バネは、変位の一方向に拘束し、またキャリアを初期位置に戻す、2つの機能を果たす。キャリアにはタッチパネルを積層し接着した10.4インチのLCDを搭載した。これら加振させられるパーツ（可動部）の質量は合計で832gであった。ベースは運動する系の力学的なグラウンドとみなすことができるように、ネジを用いて重い鉄板に強く結合した。

上述の機構を用いて作製した実験装置を図 76 に示す。押力を検出するために、力センシング抵抗器 (FSR, Interlink Electronics 製 FSR-402) を両面粘着テープでタッチパネルの中央に固定した。FSR は 2 端子デバイスであり、押力が増加するにつれて抵抗が減少する。この FSR は、実験では被験者の指で押される。実験中に被験者が実験装置を触った場合に実験装置の向きが認識されないよう、FSR をその円形のセンシング部を除いて厚紙とポリプロピレン (PP) シートで覆った。また、ラウンドプレートで上面を覆っ

た. ラウンドプレートは可動部と接触しないように, 鉄板に設けた壁で支持した.

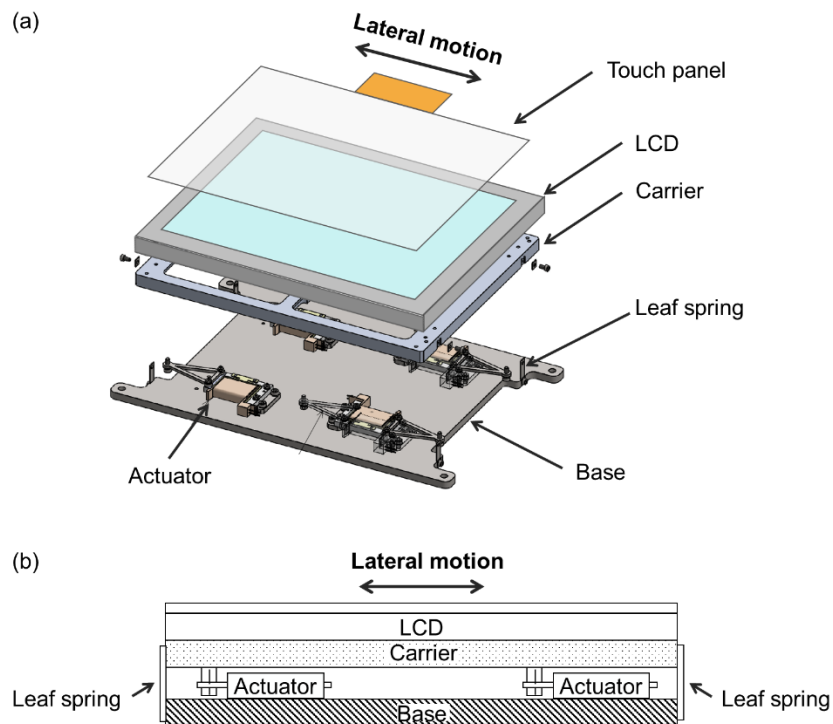


図 75 : ラテラルモーションを発生させる機構の構造. (a)斜視図, (b)断面構造図

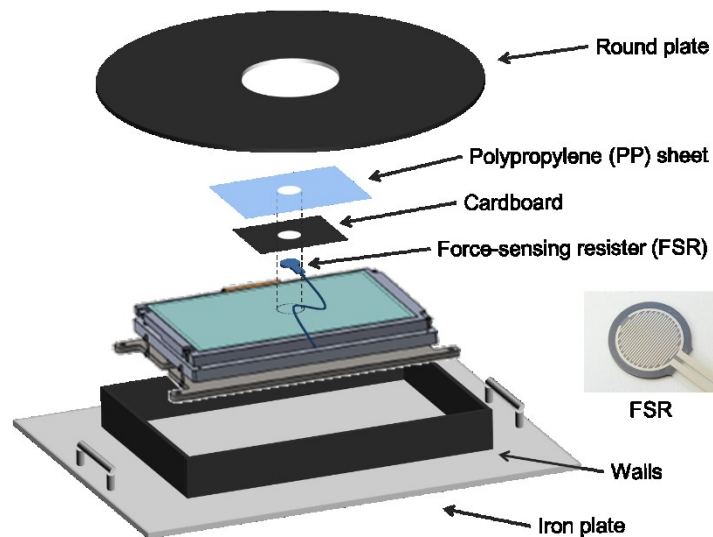


図 76 : 実験装置のセットアップ

アクチュエータに供給する駆動信号波形と変位について述べる. 駆動信号波形を図 77 に示す. タッチ面の変位が最大となるように, パルス幅を 10 msec とした. 図 78 の振動変位の余韻の波形からわかるように, 実験装置は固有周期が 18 msec であり, 10

msec のパルス幅は装置を効率的に駆動する波形であった。ユーザの指による押力が 3.3 N に達した時点で、図 77 の駆動信号波形を 1 回生成し、図 80 で示すアンプ回路で増幅しアクチュエータに供給した。

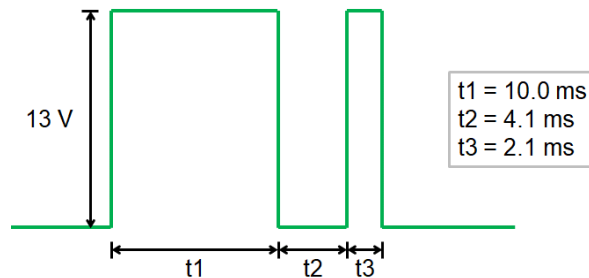


図 77：クリック感を提示するためにアクチュエータ駆動回路に入力するパルス波形

図 78 に実験装置の変位および加速度の測定結果例を示す。変位の波形は図に示すように、孤立したインパルス状であり、クリック感を提示する際などに使われる [37]。発生した変位の最大値は $280 \mu\text{m}$ 、最大の加速度は 161 m/s^2 (peak-to-peak) であった。主観評価と同じ条件で測定した変位の測定結果は後述する。変位と加速度は、図 79 に示すようにキャリアの側面で測定した。変位測定には、反射型変位センサ（キーエンス社製 センサーヘッド IL-S025、アンプユニット IL-1000）を用いた。加速度測定には圧電式加速度計（リオン株式会社製 PV-91CH とチャージアンプ UV-16）を用いた。

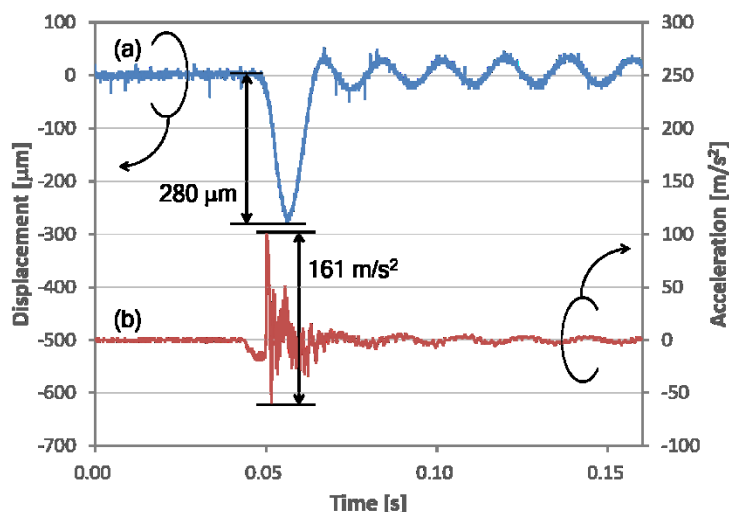


図 78：実験装置の変位(a)および加速度(b).

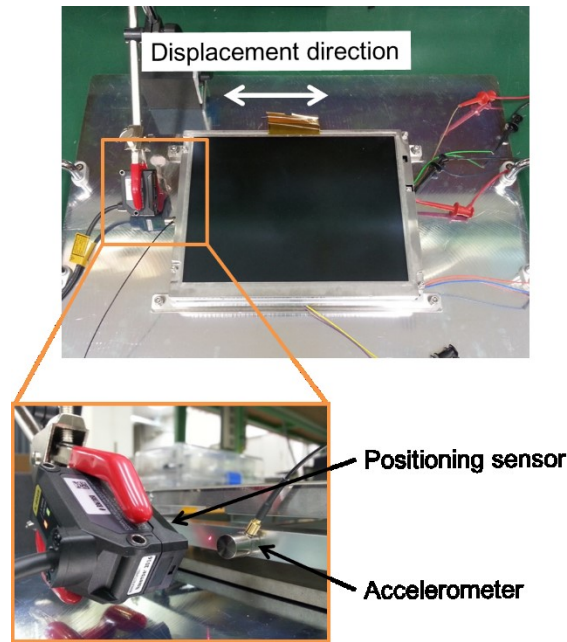


図 79：変位，加速度の測定方法

図 80 に実験装置の回路システムを示す．押力が 3.3 N を超えたときに、電圧パルス信号がリニアソレノイドアクチュエータに印加されるように回路システムを構成した．力センシング抵抗器（FSR）からのアナログ電圧信号を、マイクロプロセッサに組み込まれた 10 ビット A/D コンバータに入力し、離散化・量子化した．力センシング抵抗器（FSR）からのアナログ電圧信号は、押力が増加するにつれて減少する．A/D コンバータで取得された電圧信号がプログラムされたしきい値(3.3 N に対応)を下回った時点で、マイクロプロセッサは、内蔵タイマーに基づく割り込み制御によってパルス信号を生成した．内蔵タイマーに基づく割り込み制御を利用したため、マイクロ秒単位でパルス幅を制御できた．マイクロプロセッサから出力されるパルス高 5 V のパルス信号を、レベルシフト回路と CMOS アンプ回路を介してパルス高 13 V に変換し、リニアソレノイドアクチュエータに供給した．

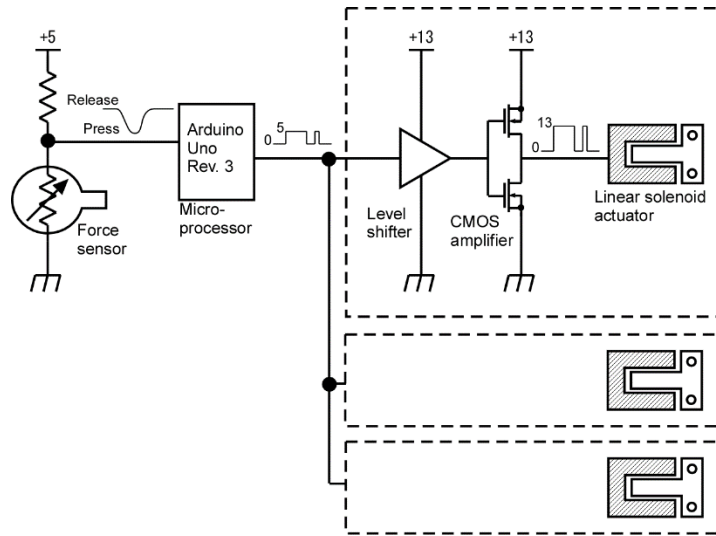


図 80：実験装置の回路システム図

実験装置の変位の測定結果について述べる．後述する主観評価と同等の負荷を与えた複数の条件で変位を測定し，それら条件による差は僅かであったことを述べる．図 81(a)～(d)は、ラテラルモーシヨンの最初の変位方向に対して、それぞれ 0° 、 90° 、 180° 、 270° の角度で指を表面に押し付けて測定した変位を示す．角度や詳細な条件は、次のセクションで表 9 を使用して定義される．押力が 3.3N に到達したときにラテラルモーシヨンを発生させた．それぞれのグラフは 13 回または 12 回繰り返して測定した変位である．13 回または 12 回の平均の変位は $279(0^\circ)$ 、 $277(90^\circ)$ 、 $275(180^\circ)$ 、 $279(270^\circ)\ \mu\text{m}_{\text{pp}}$ であり、押し付ける指の角度が変位に影響を与えないことを示す．図 81(e) は、指を押し付けずに測定された変位を示す．13 回の繰り返し測定の平均変位は $282\ \mu\text{m}_{\text{pp}}$ であった．指がある場合とない場合の変位のこの僅かな違いは、 $3.3\ \text{N}$ の接触力で表面に押し付けられた指先の負荷によって、装置の変位がほとんど影響を受けなかったことを示す．

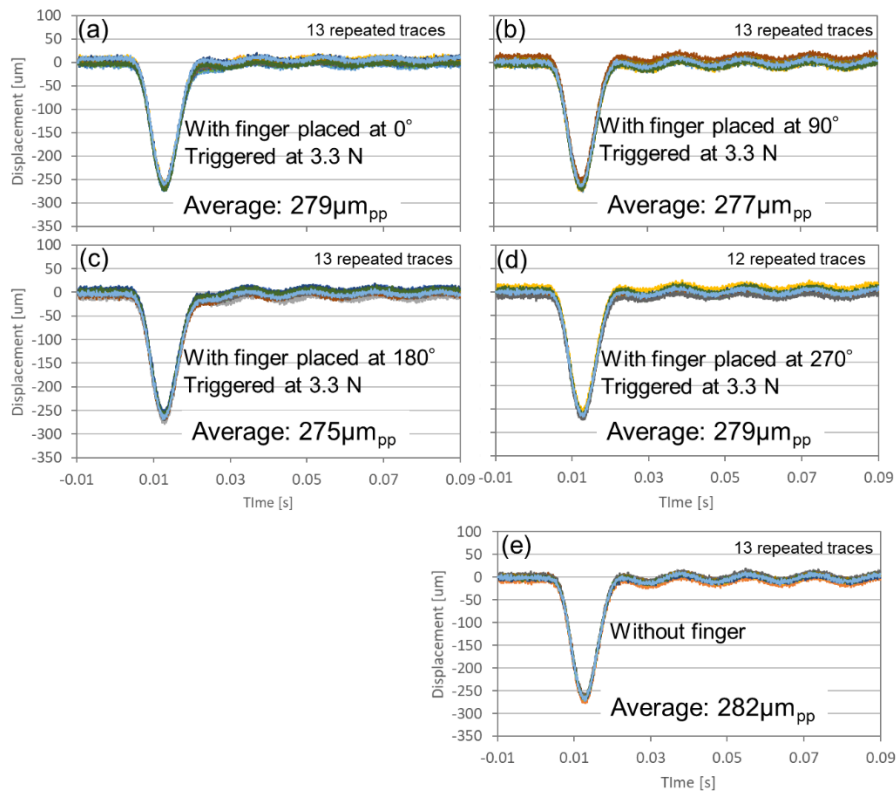






図 81：主観評価実験と同等の条件で測定した変位の測定結果(a)-(d)，指が無い場合の変位の測定結果(e).

6.2.1.2. [主観評価実験]

主観評価実験には年齢が 20 代の健康な 6 人が参加した。実験に先立ちインフォームドコンセントを実施した。すべての測定は非侵襲的であり，その場で行われた。実験実施計画は宇都宮大学のヒトを対象とする研究倫理審査委員会にて審査され承認された。変位方向によって知覚される触覚刺激の強さに有意差があるかどうかを明らかにする目的でシェッフェーの一対比較法(Scheffe's Paired Comparison) [121][122]を使用した。表 9 に示す 4 種類の刺激，すなわち最初の変位方向が、触れている指の近位方向(proximal direction)に対して 0°、90°、180°、270°の 4 種類を比較した。0°と 180°の変位は指の長軸方向の変位であり，90°と 270°の変位はそれと垂直方向の変位である。これらの刺激は、実験装置を置く向きを変えることによって設定した。表 10 に示す 12 対の刺激をランダムな順序で各被験者に提示し，6 人の被験者が刺激を評価した。被験者は、一対の刺激の強さを比較し，先に提示された刺激(表で i と記載した変位方向)に対して後に提示された刺激(表で j と記載した変位方向)の強さを数値で回答した。刺激の強さの印象は、強い (+2)、やや強い (+1)、同じ (0)、やや弱い (-1)、弱い (-2) の 5 段階とした。

表 9 : 評価対象の変位方向

Target directions for evaluation	First-displacement direction			
Group	Long direction of finger		Short direction of finger	
				
Angle ^a	0°	180°	90°	270°
	(Proximal)	(Distal)	(Radial)	(ulnar)

a. The angle against proximal direction of finger

図 82 に主観評価実験時の写真を示す。被験者は椅子に座り、ホワイトノイズを再生するヘッドフォンを着用し、目を覆って評価した。被験者は右手の人差し指を使って刺激を評価するように指示された。さらに、前腕を体から前方に伸ばし、実験装置の上面に対して水平に保つように指示された。実験中、被験者がラウンドプレートに触れないように、オペレータが被験者の指先をタッチ位置に導く補助をした。



図 82：主観評価実験時の写真

評価手順について述べる。評価を開始する前に、被験者に装置に慣れてもらうことを目的に、被験者にタッチ面を押してもらい、クリック感のような刺激を自由に体験してもらった。タッチ面を徐々に押し込むと、所定の押力に達した時点で触覚刺激のフィードバックがあることを理解してもらった。その後の評価手順を図 83 を参照して説明する。被験者はオペレータの指示に従ってヘッドフォンを装着して目を覆う。オペレータは1番目の刺激を提示する向きに装置を置く。その後被験者はタッチ面を押して、発生した振動を感じ、この刺激の強さを覚えるまで押下を繰り返す。記憶が終わると指を離し、オペレータに知らせる。オペレータは、2番目の刺激を提示する向きに装置を置く。その後被験者はタッチ面を押して、発生した振動を感じ、1番目の刺激と比較した刺激の強さの数値を決定する。数値の決定が完了すると、指を離してオペレータに通知する。オペレータは被験者からヘッドフォンと目の覆いを外し、被験者にその数値を記入させる。その後、最初のステップに戻り、別の刺激のペアでの比較を繰り返す。

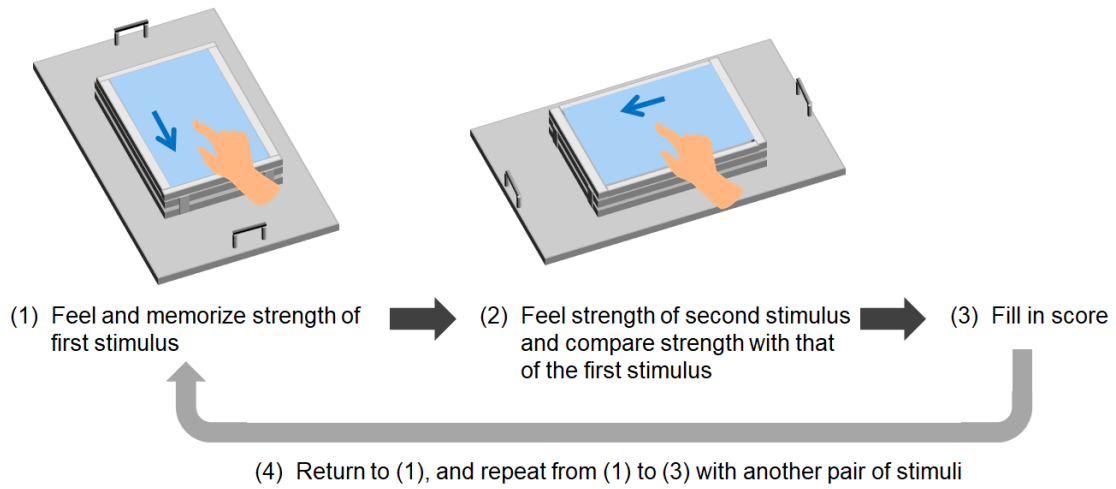


図 83 : 評価のフローチャート

6.2.2. 実験結果

評価結果について述べる. 表 10 は, シェッフエーの一対比較法を用いて 4 種類の刺激の強さを評価した結果を示す. 6 人の被験者の結果から, 各スコアの合計頻度 (Total frequency) と各ペアの合計スコア (Total score) を計算した. 各ペアの平均評点 ($\hat{\alpha}_{ij} = \text{Total score} / \text{評価回数}(=6)$), 平均評点の順序差についての平均 ($\hat{\pi}_{ij}$) を求め, 最初の変位方向 (0° , 90° , 180° , 270°) の効果を測るため心理尺度値 $\hat{\alpha}_i$ を次の式で求めた.

$$\hat{\alpha}_{0^\circ} = \frac{1}{4}(0 - 1.417 - 0.583 - 1.000) = -0.750 \quad (13)$$

$$\hat{\alpha}_{90^\circ} = \frac{1}{4}(1.417 + 0 + 1.417 + 0.500) = 0.833 \quad (14)$$

$$\hat{\alpha}_{180^\circ} = \frac{1}{4}(0.583 - 1.417 + 0 - 1.250) = -0.521 \quad (15)$$

$$\hat{\alpha}_{270^\circ} = \frac{1}{4}(1.000 - 0.500 + 1.250 + 0) = 0.438 \quad (16)$$

表 10：一対比較法で4種類の刺激の強さを評価した結果

Pair of directions (i - j)	Degree of grade					Total score	Mean grade	$\hat{\pi}_{ij} = \frac{\hat{u}_{ij} - \hat{u}_{ji}}{2}$
	-2	-1	0	+1	+2		\hat{u}_{ij}	$\hat{\pi}_{ij}$
0° - 90°	4	1	1	0	0	-9	-1.500	-1.417
90° - 0°	1	0	0	0	5	8	1.333	
0° - 180°	0	3	2	1	0	-2	-0.333	-0.583
180° - 0°	0	1	1	2	2	5	0.833	
0° - 270°	2	2	1	1	0	-5	-0.833	-1.000
270° - 0°	0	1	0	2	3	7	1.167	
90° - 180°	0	0	1	3	2	7	1.167	1.417
180° - 90°	4	2	0	0	0	-10	-1.667	
90° - 270°	0	0	2	3	1	5	0.833	0.500
270° - 90°	0	3	1	2	0	-1	-0.167	
180° - 270°	3	2	1	0	0	-8	-1.333	-1.250
270° - 180°	0	0	1	3	2	7	1.167	
Total frequency	14	15	11	17	15			

続いて、各種偏差の自乗和を計算し、分散分析表（表 11）を作成した。

$$S_{\alpha} = 2 \times 6 \times 4 \times \{(-0.750)^2 + (0.833)^2 + (-0.750)^2 + (0.438)^2\}$$

$$= 82.54$$

$$S_{\pi} = 2 \times 6 \times \{(-1.417)^2 + (-0.583)^2 + (-1.000)^2 + (1.417)^2 + (0.500)^2 + (-1.250)^2\}$$

$$= 86.00$$

$$S_{\mu} = 6 \times \{(-1.500)^2 + (1.333)^2 + (-0.333)^2 + (0.833)^2 + (-0.833)^2 + (1.167)^2$$

$$+ (1.167)^2 + (-1.667)^2 + (0.833)^2 + (-0.167)^2 + (-1.333)^2$$

$$+ (1.167)^2\}$$

$$= 89.33$$

$$S_t = (-2)^2 \times 14 + (-1)^2 \times 15 + 0^2 \times 12 + 1^2 \times 17 + 2^2 \times 15$$

$$= 148.00$$

$$S_{\delta} = 89.33 - 86.00$$

$$= 3.33$$

$$S_r = 86.00 - 82.54$$

$$= 3.46$$

$$S_E = 148.00 - 89.33$$

$$= 58.67$$

表 11 に示すように、主効果の p 値は 0.01 未満であったが、他の要因ではそうではなかった。このため評価対象間のどこかに危険率 1% で有意差があると判断できる。

表 11:変位方向の分散分析結果

Source of variance	Sum of square	Degree of freedom	Unbiased variance	F-ratio	P-value
Main effect α	82.542	3	27.514	28.139	0.000 (**)
Combinatorial effect γ	3.458	3	1.153	1.179	0.325
Order effect δ	3.333	6	0.556	0.568	0.754
Residual error E	58.667	60	0.978		
Total		72			

主効果のどの水準間に有意差があるかを調べるため、図 84 に示すように心理尺度の値 $\hat{\alpha}_i$ を数直線上にプロットし、またヤードスティックを計算した。Y0.05 と Y0.01 は、有意水準がそれぞれ 0.05 と 0.01 の場合のヤードスティックである。図 84 の各値の間の距離を見ると、180°と 270°との間の距離が Y0.01 より大きい。これは、これらの間に統計的に有意な差があったことを示す。同様に、0°と 270°、0°と 90°、180°と 90°のペアでも有意差が見られた。対照的に、0°と 180°との間、および 90°と 270°との間の差は、Y0.05 よりも小さい。心理尺度の値は、数値が小さいほど刺激が強いことを意味するため、これらの結果は 0°および 180°の刺激が 90°および 270°の刺激よりも有意に強く知覚されたことを示す。

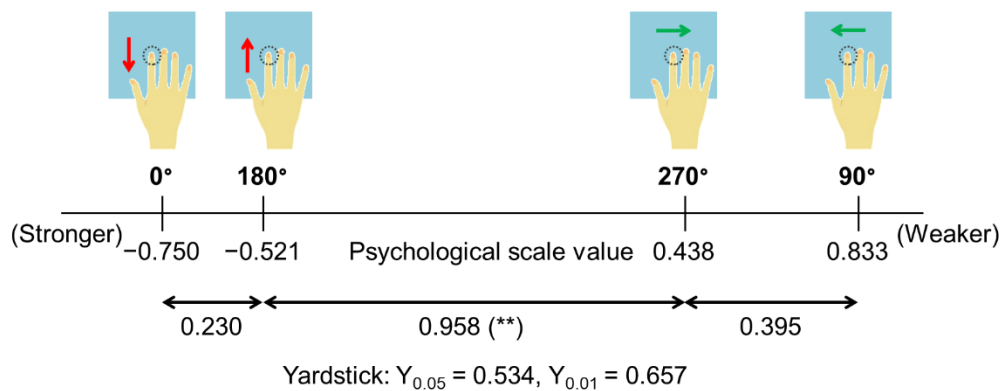


図 84 : 刺激の強さの心理尺度とヤードスティック

6.2.3. 考察

主観評価の結果、知覚する刺激の強度は変位方向に依存することが示された。被験者は、評価対象の変位方向が異なることを知らされず、変位方向を推測するに足る視覚的、聴覚的、または触覚的情報は与えられなかった。図 84 に示すように、指の長軸方向のグループ(0°, 180°)とそれと垂直方向のグループ(90°, 270°)の間に有意差があることが示された。また、長軸と垂直な方向の刺激よりも、長軸方向の刺激の方が強く感じられ

たことが示された。長軸方向のグループ内の 2 つの刺激(0° 、 180°)の間には有意差が認められなかった。また、長軸方向と垂直なグループの 2 つの刺激(90° 、 270°)の間には有意差が認められなかった。ただし、この結果は、それぞれのグループの 2 つの刺激間に違いがなかったという結論につながるべきではない。

シェッフェーの一対比較法は、刺激間の相対的な違いを示すことができるが、絶対的な違いを示すことは困難である。ラテラルモーションの方向に対する指の長軸方向の角度と知覚される刺激の強さとの関係を定量的に評価するためには検出閾の測定が必要であり、今後の課題としたい。

ラテラルモーションの変位方向による触覚の違いは、変位方向の識別に関する他の研究でも観察されている。Gleeson らの実験では、近位方向と遠位方向の変位が提示されたときに、被験者は最も正確に変位方向を識別できた [123]。彼らが使用した刺激は、本章の刺激とは異なる特徴を持っていたが、彼らの発見と本章の実験結果との間に関係が見出される可能性がある。Birznieks らは、指先の各タイプの機械受容器に関し、力の働く方向と感度の関係を研究した [124]。[124]では、SA-I は遠位方向の力に良く反応し、SA-II は近位方向の力に良く反応することが示唆されており、本章で述べた研究をさらに進めることで 0° と 180° の方向の違いを見つけることができる可能性がある。

Nakazawa によって報告された指先の剛性 [125] と本章で述べた結果の間に関連があることがわかった。ケルビンモデルに基づく Nakazawa の実験結果は、指先に加えられるせん断力の方向によってせん断剛性が異なることを示した。ポインティング方向 (180°) の剛性は、その垂直方向 (90° 、 270°) の剛性よりも大きかった。したがって、ラテラルモーションの変位が等しい条件の下では、ポインティング方向の変位で指先に生じる応力は、その垂直方向の変位で指に生じる応力よりも大きくなる。この応力の違いが、知覚される刺激の強さの要因の可能性がある。なお、Nakazawa らの結果では、 180° での剛性が 0° での剛性よりも大きいことが示された。

本章で述べた評価結果は、ラテラルモーションを利用した触覚フィードバックディスプレイの設計方法論を提供する。たとえば、ユーザの指の長軸に沿ってラテラルモーションの変位方向を設計すると、エネルギー効率の高いデバイスとなる。あるいは知覚される刺激の大きさを保ったままより騒音の小さいデバイスを作製することができる。あるいは、触れた指の長軸とラテラルモーションの変位方向のなす角度に応じてアクチュエータを駆動する駆動波形を変化させることで、感覚の強さが均一になり、高品質なユーザ体験を実現できる可能性がある。

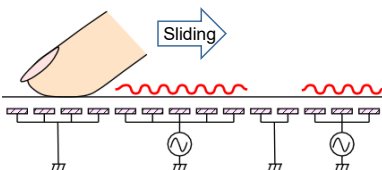
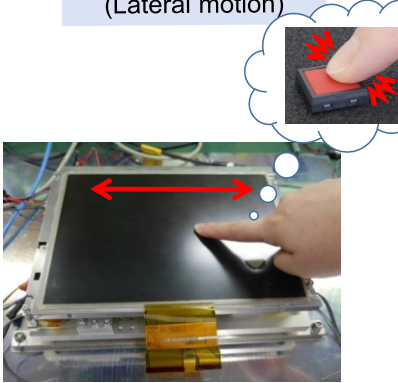
6.3. 静電触覚ディスプレイとラテラルモーションを用いたインタラクティブ視触覚ディスプレイ

本節では、静電容量センサを一体化した静電触覚ディスプレイとラテラルモーション機構を用いて作製したインタラクティブな視触覚ディスプレイについて述べ、Eyes-free

interaction の可能性を示す。本節で述べる視触覚ディスプレイが提示する触覚刺激とのインタラクションを表 12 にまとめた。静電触覚ディスプレイは画面を触察する指にテクスチャ感を提示することで、ボタン等のオブジェクトの位置を提示する。ラテラルモーションはボタンの押下操作に対するフィードバックとしてクリック感を提示する。

ボタンの位置を探すための触探索運動による画面のタッチとボタンの押し込み操作とを区別するためにフォースセンサを組み込み利用した。

表 12：静電触覚ディスプレイとラテラルモーションを統合したインタラクティブ視触覚ディスプレイにおける触覚刺激とのインタラクション

Sensation type	Texture sensation	Click sensation
Purpose	Locating on-screen buttons	Feedback of button-pressing
Stimulus source	<p>Electrostatic force</p>  <p>Surface friction is controlled by electrostatic force between electrode and finger.</p>	<p>Mechanical motion (Lateral motion)</p>  <p>Lateral motion: Displacement of the touch surface in the in-plane direction.</p>

6.3.1. 設計

6.3.1.1. [機構]

作製したインタラクティブ視触覚ディスプレイの構造を図 85 に示す。Eyes-free interaction のために、2 種類の触覚刺激源を搭載した。第 1 の触覚刺激源は、局所的な触覚刺激の提示を特徴とする静電触覚ディスプレイによって生成される静電気力である。第 2 の触覚刺激源はリニアソレノイドアクチュエータによって生成されるタッチ面のラテラルモーションである。さらに指による押力を検出するフォースセンサを搭載した。

静電容量センサを一体化した静電触覚ディスプレイを光学的に透明な樹脂(Optical Clear Resin)を用いて LCD に結合した。リニアソレノイドアクチュエータの固定子をベースに固定し、可動子をキャリアに接続した。可動子とキャリアとの接続には金属製のリンケージを用いた。可動子は図 85 に示したラテラルモーションの変位方向と同じ方向に変位する。キャリアとベースとは 4 つの板バネで結合した。板バネによりキャリアの運動方向はラテラルモーションの変位方向に拘束される。キャリアには 4 つのはりを

取り付け、はりの先端と LCD の 4 隅とを結合した。すべてのはりにひずみゲージを貼り付け、フォースセンサを構成した。

リニアソレノイドアクチュエータによって生成された運動が、少ない減衰でタッチ面に伝達されるように、リニアソレノイドアクチュエータからタッチ面に至るまでの機械要素は、ラテラルモーションで変位する方向に対し機械的に強く結合させた。

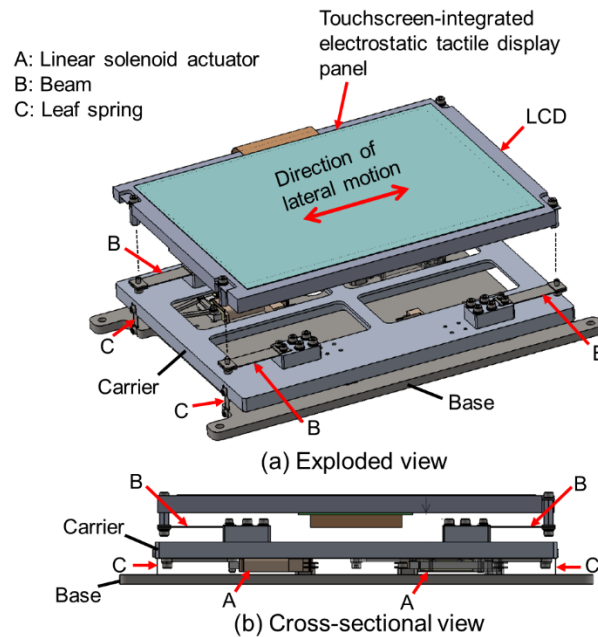


図 85：静電触覚ディスプレイとラテラルモーションを統合したインタラクティブ視触覚ディスプレイの構造図

LCD は4つのはりで支えられるため、はりのひずみを検出することでタッチ面に垂直に働く力を検出できる。各はりに取り付けられたひずみゲージ (図 86) がひずみを検出する。各はりに取り付けられた、合計4つのひずみゲージで4ゲージ法のブリッジ回路を構成し、当該ブリッジ回路を計装アンプに接続し、力の検出信号電圧(図 88 の V_{out})を得た。

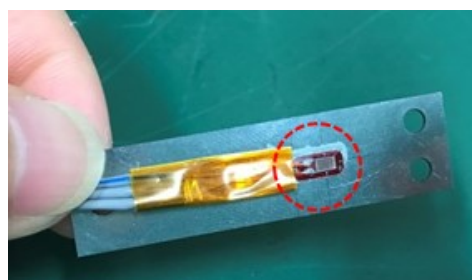


図 86：はりに貼り付けたひずみゲージ

6.3.1.2. [エレクトロニクス]

モジュールレベルのブロック図を図 87 に示す。PC をメインコントローラとして使用しインタラクティブ視触覚ディスプレイを構築した。インタラクティブ視触覚ディスプレイを構成する各モジュールは PC の周辺機器として PC に接続した。静電容量センサを一体化した静電触覚ディスプレイは USB で PC と接続し、LCD は VGA インタフェースで PC と接続した。フォースセンサとリニアソレノイドアクチュエータはコントローラとして機能するマイクロプロセッサと接続し、マイクロプロセッサは USB で PC と接続した。

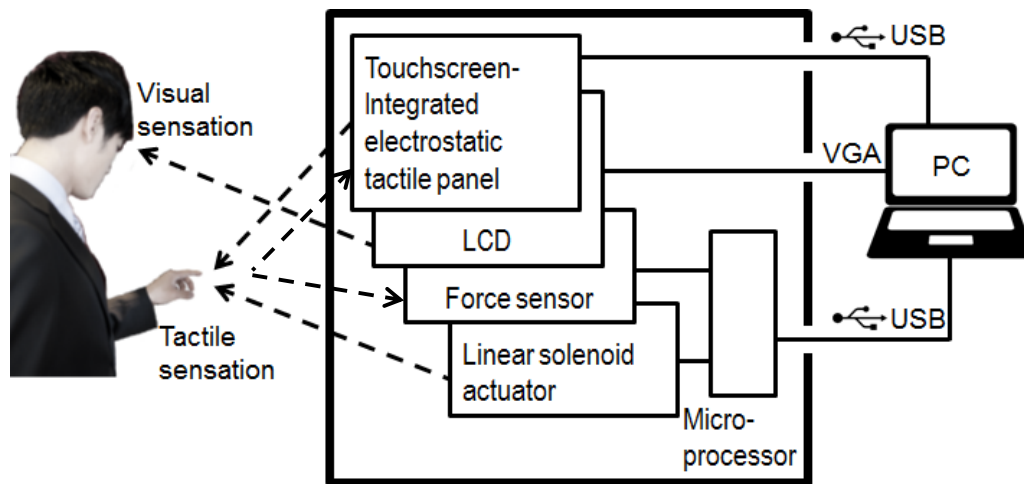


図 87：静電触覚ディスプレイとラテラルモーションを統合したインタラクティブ視触覚ディスプレイのブロック図

テクスチャ感を提示するためのエレクトロニクスについて述べる。テクスチャ感を提示する静電触覚ディスプレイは第 4 章で述べたものを利用した。すなわち、XY 電極構造の電極基板を利用し、静電容量センサを一体化し、触覚刺激を局在化し提示可能な静電触覚ディスプレイを利用した。

クリック感を提示するためのエレクトロニクスについて述べる。図 88 は、クリック感を提示するために視触覚ディスプレイに実装した回路システムを示す。このシステムは、押力が 157 cN を超え、かつ検出されたタッチ座標が画面のボタンの領域内である場合に、電圧パルス信号でリニアソレノイドアクチュエータを駆動するように構成された。押力を検出する回路は、ひずみゲージを用いて構成した 4 ゲージ法のブリッジ回路を計装アンプに接続し構成した。計装アンプで次段の回路に対して適度な振幅を持つシングルエンドアナログ信号(V_{out})に増幅した。計装アンプの出力するアナログ信号をマイクロプロセッサに内蔵した 10 ビット A/D コンバータで取得した。取得した信号がプログラムされたしきい値(157 cN に相当)を超える荷重を検出し、かつタッチ座標がボタン

の領域内であることを検出すると、マイクロプロセッサの内蔵タイマーによる割込み制御によってパルス信号を生成するよう、マイクロプロセッサをプログラムした。内蔵されたタイマーの割込み制御によりパルス幅を制御したため、パルス幅はマイクロ秒単位で正確に制御された。マイクロプロセッサからの波高 5 V のパルス信号は、レベルシフタと CMOS アンプを用いて波高 13 V に増幅され、リニアソレノイドアクチュエータに供給された。

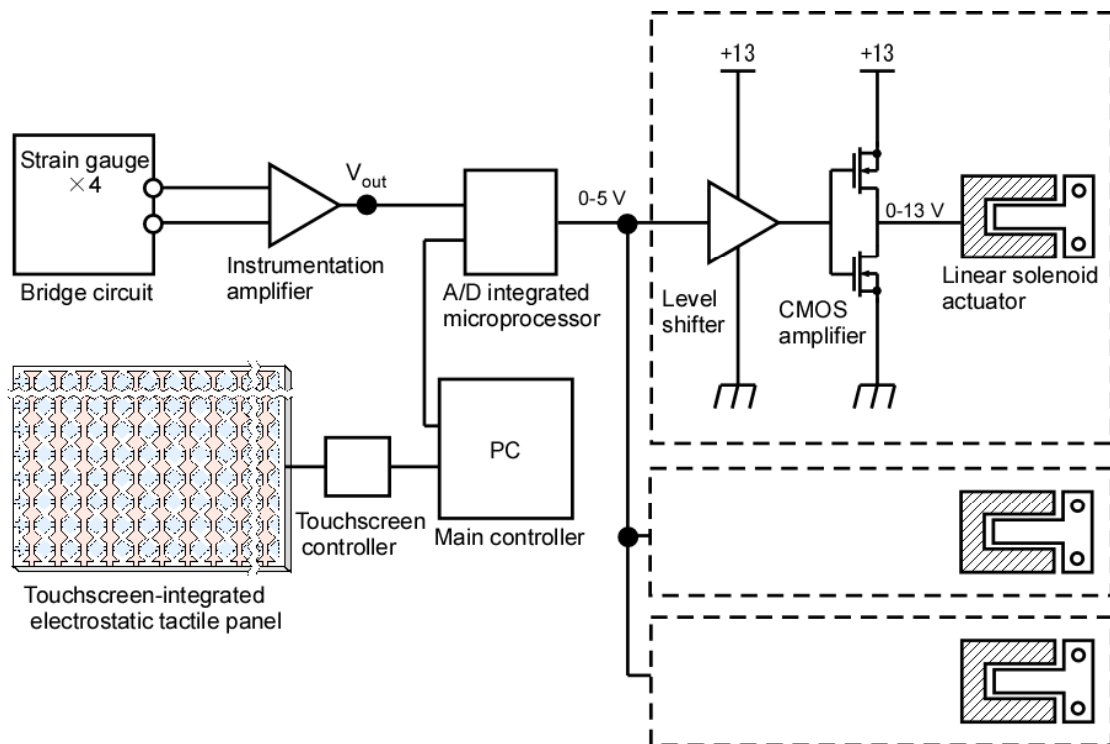


図 88 : クリック感を提示するための回路システム

6.3.2. 評価

6.3.2.1. [フォースセンサの静特性]

図 89 にフォースセンサの静特性の測定結果を示す。静特性は、ディスプレイの中央と 4 隅の合計 5 か所の各箇所で、テンションゲージで荷重を与えて出力電圧 V_{out} を記録することで測定した。測定された感度の平均値 $0.075 \text{ V}/100 \text{ cN}$ は、設計値 $0.083 \text{ V}/100 \text{ cN}$ と概ね一致した。ヒステリシスは観察されなかった。接触力の分解能は、その変化を知覚できる荷重の変化として調べられており、およそ 5~15%程度といわれている [119]。あるいは、リファレンスが 80 gf のときの JND は 9.8~16.0 gf、リファレンスが 160 gf のときの JND は 11.6~15.0 gf であったとの報告がある [126]。静特性の測定で得られた感度の、面内のばらつきはボタンの押下を検出する目的では許容されると考える。

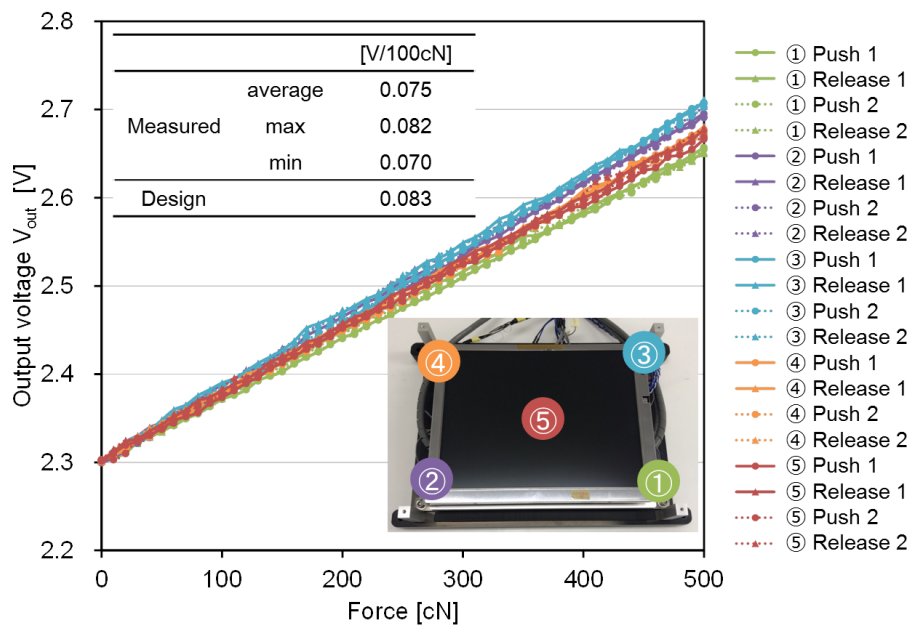


図 89：フォースセンサの静特性の測定結果

6.3.2.2. [タッチ面の変位と加速度]

ラテラルモーシヨンの変位と加速度を測定した。図 90 に測定された波形を示す。変位は $288 \mu\text{m}_{\text{pp}}$ 、加速度は $13.9 \text{ G}_{\text{pp}}$ (G は重力加速度で 9.8 m/s^2) であった。これらの値は振動する車内での加速度の検出閾の $0.34 \sim 0.45 \text{ G}_{\text{peak}}$ [127] を遙かに上回る値であった。指の接触力が設定した閾値を超えた時にクリック感が生じるように制御したことで、機械式のタクトスイッチを押下したようなクリック感をユーザに提示することができた。

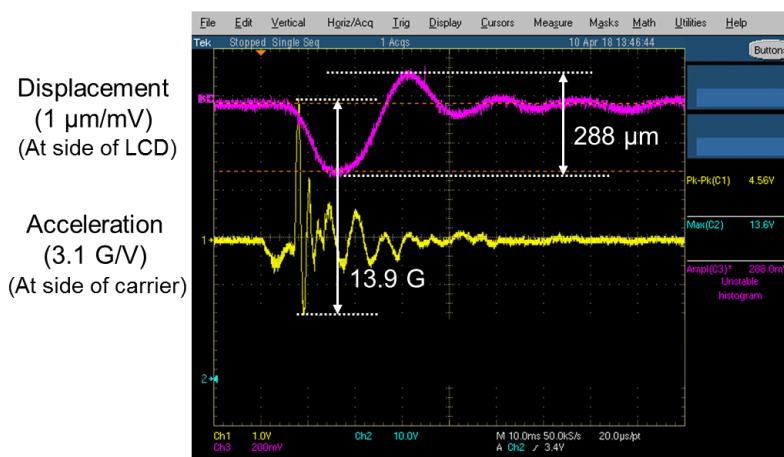


図 90：ラテラルモーシヨンの変位と加速度の測定結果。

6.3.2.3. [ユーザインタフェース]

インタラクションの評価のために設計し、実装したユーザインタフェース(UI)を図 91 に示す。作製した装置を操作した結果は次のとおりであった。

ユーザが画面をなぞると、ユーザの指はボタン上で静電触覚ディスプレイが提示するテクスチャ感であるザラザラとした触感を知覚した。ユーザがボタンを押下すると、ラテラルモーショが発生し、ユーザは機械的なボタンを押したかのような「クリック感」を感じた。これらのインタラクションによって、ユーザは(i)触覚を頼りに画面上のボタンを見つけ、(ii)ボタンを押下し、(iii)押下が装置によって受け付けられたことを確認する、一連の操作をディスプレイ見続けることなく実行できた。このUIでは、ユーザが触覚を頼りにボタンを見つけた後にタップ操作を行う必要がないことも特徴である。触覚を頼りにボタンを見つけた後、ユーザはその位置を押すだけでよい。このUIはフォースセンサの存在により実現された。この操作はメカニカルスイッチの操作に近いものであった。

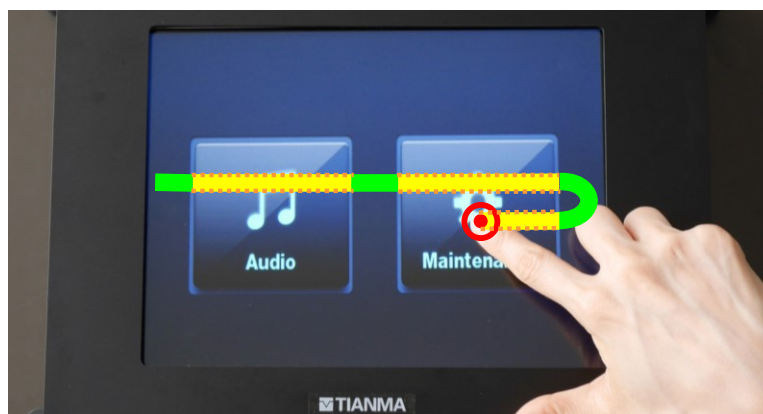
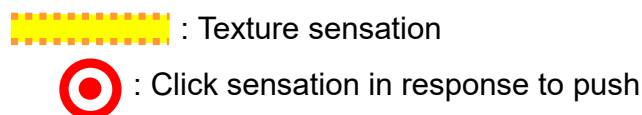


図 91 : 作製したインタラクティブ視触覚ディスプレイとのインタラクションのシナリオ

6.3.2.4. [視触覚の一致について]

1.1.2 で述べたように、従来の触覚フィードバックタッチパネルは、指がエッジの位置に到達してからアクチュエータを駆動するための信号がアクティブになるまでにタイムラグがあった。このタイムラグは、触探索運動で触覚刺激が発生する位置が視覚イメージの位置と一致しない課題をもたらす。図 92 は、ユーザがタッチ面で指を触探索運動させて、局在化された触覚刺激を頼りにボタンの位置を探す際に測定された指先の速さを示す。この測定には、第 3 章で作製した 10.4 インチの静電触覚ディスプレイを用いた。最高速度は 700 mm/sec を超えた。指先がボタンの領域に侵入したこと

が検出されてからアクチュエータが動作するまでのタイムラグを 55 msec とした場合，図 93(a)に示すように，触覚の刺激が得られる位置と視覚イメージのずれが 38.5 mm になる．一方，本研究で述べる，触覚刺激を空間的に局在化し提示できる静電触覚ディスプレイを用いた場合，あらかじめ電極に電圧信号を印加することで，触覚で得られる情報と視覚で得られる情報とを一致させることができた(図 93(b)).

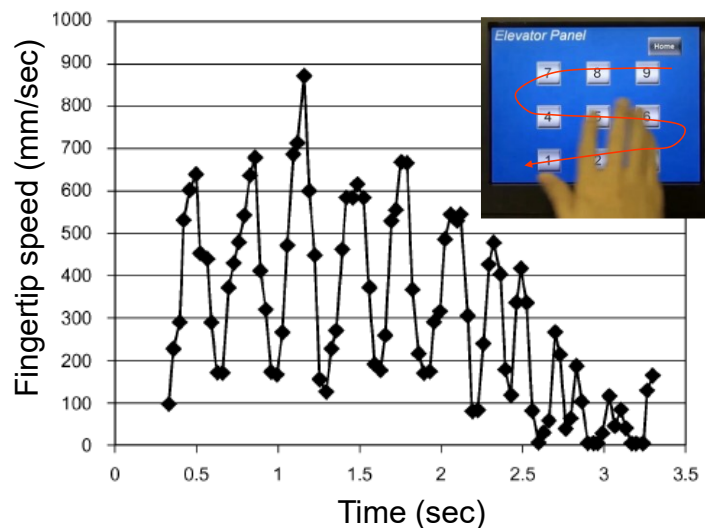


図 92：ユーザが触覚を頼りにボタン位置を探索するときの指先の速さ

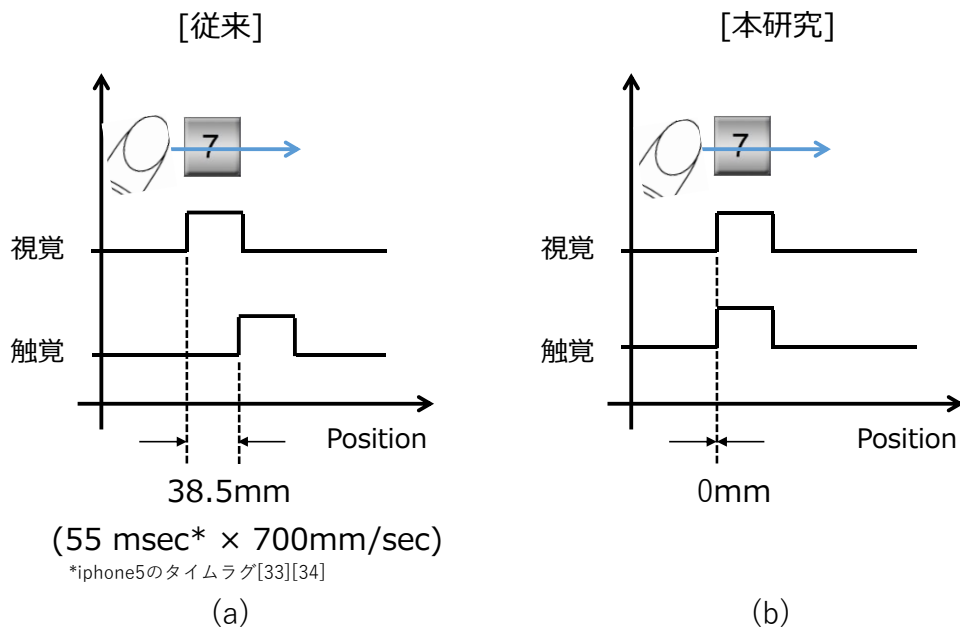


図 93：知覚される視覚オブジェクトと触覚刺激の位置

6.3.2.5. [デモ実証]

SID 2018 等の展示会に本章で作製した 10.4 インチインタラクティブ視触覚ディスプレイを出展した。出展したデモ機の写真を図 94 に示す。図 94(a)のデモコンテンツで、前述のインタラクション、すなわち、触覚を頼りに画面上のボタンを見つけ、ボタンを押下し、押下が装置によって受け付けられたことを確認する、一連の操作を多数の来場者が実際に体験した。表 13 にデモ機の仕様をまとめた。



(a) Screen with two push buttons

(b) Screen with 6 rocker switches

図 94 : 作製したインタラクティブ視触覚ディスプレイのデモ画面

表 13 : 作製したインタラクティブ視触覚ディスプレイの仕様

Diagonal size	10.4-in.
Number of electrodes in electrostatic tactile display with touch sensor	32(X) X 42(Y)
Number of strain gauges	4
Force threshold	160 cN
Acceleration of vibration	13.9 G

6.4. おわりに

本章では、静電容量センサを一体化した静電触覚ディスプレイとラテラルモーション機構とを用いてインタラクティブな視触覚ディスプレイを作製し、触覚を頼りにボタンの位置を特定し、ボタンを押下し、ボタンの押下が受け付けられたことをクリック感で知覚するインタラクション、すなわち Eyes-free interaction を可能とする一つの構成を示した。クリック感を提示するために利用したラテラルモーションにおいて、知覚される

刺激の強さに関し、指の長軸方向の変位の振動（ $0^{\circ}, 180^{\circ}$ ）と、指の短軸方向の変位の振動（ $90^{\circ}, 270^{\circ}$ ）との間で、危険率 0.01 で有意差があることを明らかにした。指の長軸方向の変位の振動は、指の短軸方向の変位の振動よりも強く知覚されることを明らかにし、振動方向の設計指針を示した。

第7章 結言

7.1. 本論文のまとめ

本研究は Eyes-free interaction が可能なインタラクティブ視触覚ディスプレイの実現を目指し、静電触覚ディスプレイにおける次の課題を明確化し、解決手法を導き、設計指針を積み上げた。

1. 触覚刺激の空間的局在提示
2. 静電容量センサとの共存

また、ラテラルモーションで知覚される刺激の強さがその変位の方向に依存することを明らかにし、装置の設計指針を示し、静電触覚ディスプレイとラテラルモーションを組み合わせて Eyes-free interaction を可能とする一つの構成を示した。

これらの本研究成果はインタラクティブ視触覚ディスプレイの発展に寄与するものと考えられる。

本研究で開発した技術項目と展望を表 14 に示す。

第3章では、静電触覚ディスプレイで触覚刺激を空間的に局在化して提示する手法を提案した。直交する X 電極と Y 電極に、指先の振動検出閾値が大きい 1240 Hz と 1000 Hz の交流電圧信号をそれぞれ印加すると電極の交差部分で振動検出閾値が小さい 240 Hz の静電気力振動がうなりにより発生し、タッチ面上に局在化された触覚刺激を提示できることを示した。

第4章では、静電触覚ディスプレイと静電容量センサとを一体化する手法を示した。静電触覚ディスプレイと自己容量方式のタッチセンサとの共存化を、電極の時分割駆動の手法で解決した。特定の電極がタッチセンサとして利用される時間を 8.3 msec とし、タッチセンサとして利用する電極を空間的に拡散させ走査させることで、静電気力が途切れることで生じる不要な触覚刺激が抑制されることを示した。またセンサに混入する電氣的ノイズを低減するために求められる回路を提案した。

第5章では、5.1 mm 四方の電極を 30×20 個アレイ状に配列したセグメント電極構造の静電触覚ディスプレイを試作し、マルチタッチ入力が可能で、形状の自由度が高い触図を提示できることを示した。触覚刺激を提示するための交流信号に関し、隣り合う電極に位相が 180 度異なる交流信号を印加することで、ヒトの電氣的接地状態に依存しない安定した触覚刺激を提示できることを示した。さらに、タッチ面上に空間的に局在化し提示した静電触覚オブジェクトを、複数の指で触察する際に生じる触覚のクロストークが、該交流信号を利用することで低減できることを示した。

第6章では、静電容量センサを一体化した静電触覚ディスプレイとラテラルモーション機構とを用いてインタラクティブな視触覚ディスプレイを作製し、触覚を頼りにボタンの位置を特定し、ボタンを押下し、ボタンの押下が受け付けられたことをクリック感

で知覚するインタラクション，すなわち Eyes-free interaction を可能とする一つの構成を示した．ラテラルモーションに関し，その知覚特性を解明した．タッチ面の振動方向が指の長軸方向の場合は，短軸方向の場合と比較して触覚刺激が強く知覚されることを示し，振動方向の設計指針を示した．

表 14：本研究で開発した技術項目と展望

技術項目		3章	4章	5章	6章	展望1	展望2	備考
電極基板	XY電極基板	○	○		○		○	電極数が少なく装置が簡易
	セグメント電極基板			○		○		形状の自由度が高い触図
駆動方法	うなりを用いた局在化	○	○		○		○	XY電極基板で触覚刺激を局在化
	空間拡散法(静電触覚/容量センスの時分割駆動)		○	○	○	○	○	静電触覚/容量センスの時分割駆動で不要な触覚刺激を抑制.
駆動回路	励振信号重畳回路		○	○	○	○	○	静電触覚/容量センスの時分割駆動で容量センスのノイズを低減
	基準ノード駆動ハイパスフィルタ		○	○	○	○	○	静電触覚/容量センスの時分割駆動で容量センスのノイズを低減
駆動方法	隣り合う電極との位相差が180°の信号で駆動			○		○	要検討	ヒトの電気的接地状態に依存しない安定した触覚刺激を提示できる
	ラテラルモーション				○	○		ボタン押下時のクリック感の提示

7.2. 今後の課題と展望

本研究では XY 電極構造とセグメント電極構造の静電触覚ディスプレイを作製し，共に，触覚刺激を空間的に局在化して提示できること，静電容量センサと一体化できることを示した．XY 電極構造の静電触覚ディスプレイはセグメント電極構造のそれと比べると電極数が少なく，装置を簡易に構成することができる．一方，次の課題があり，対応が必要である．

①触覚オブジェクトの上下左右の領域で不要な触覚刺激が知覚される課題：4.5.2 節で述べたように，単純な時分割駆動に比べると不要な触覚刺激は弱い，指に対向する一部の電極の静電気力が間欠的に途絶えるために，触覚オブジェクトの上下左右の領域で不要な触覚刺激が知覚される．セグメント電極構造ではこの課題は生じなかった．静電気力が途絶える時間や途絶える面積に対して，指先の検出閾値を超えない条件を主観評価で明らかにし，駆動方法に適用することが望まれる．

②ヒトの電気的接地状態に依存して触覚刺激の強さが変化する課題：第3章と第4章で作製した XY 電極構造の静電触覚ディスプレイは，ヒトの電気的接地状態に依存して触覚刺激の強さが変化した．グランドストラップを用いて接地した場合，触覚刺激は弱くなった．セグメント電極構造では，隣り合う電極を位相の異なる交流電圧信号で駆動することでこの課題を解決した．XY 電極構造の場合も同様の手法で解決できるのかの検証が急務である(表 14 の展望 2)．

③複数指で触探索運動したときに触覚のクロストークが発生する課題:第3章と第4章で作製したXY電極構造の静電触覚ディスプレイは2本指で触察した場合に触覚のクロストークが生じた。この原因は5.3.2節で述べた通り人体の電位変動であった。セグメント電極構造では、隣り合う電極を位相の異なる交流電圧信号で駆動することでこの課題を解決した。この駆動方向がXY電極構造の静電触覚ディスプレイに適用できるかどうか検証が必要である。

第5章で述べた、5.1mm四方の電極を30×20個アレイ状に配列したセグメント電極構造のインタラクティブな静電触覚ディスプレイは次の多くの優れた特徴を示した。すなわち、マルチタッチ入力が可能、形状の自由度が高い触図を提示できる、ヒトの電氣的接地状態に依存しない安定した触覚刺激を提示できる、タッチ面上に空間的に局在化し提示した静電触覚オブジェクトを、複数の指で触察する際に生じる触覚のクロストークの低減、である。このインタラクティブな静電触覚ディスプレイとラテラルモーションとを組み合わせたインタラクティブ視触覚ディスプレイを作製し、主観評価実験での効果の実証が期待される(表14の展望1)。

本研究では静電触覚ディスプレイを用いて触覚の局在化にアプローチした。静電触覚ディスプレイはパッシブ型の触覚ディスプレイであるため、触覚オブジェクトの位置を知覚するために触探索運動が必要となる[120]。アクティブ型の触覚ディスプレイでの触覚の局在化、あるいはパッシブ型であっても小さい触探索運動で触覚を提示可能なデバイスの開発が進むことで、マルチタッチを必要とするユーザインタフェース、例えばソフトウェアキーボードの操作性が高まると期待される。また、指を押し当てることで知覚可能な表面粗さ(マクロ粗さ)の提示により、操作ボタンの境界が明瞭となるため、マクロ粗さを提示するための手法の研究と実装が望まれる。

視覚ディスプレイの分野ではディスプレイのフレキシブル化、ストレッチャブル化の研究が進んでいる。ディスプレイのフレキシブルやストレッチャブル化により、従来は視覚ディスプレイに適用できなかった触覚提示の手法、例えば、ディスプレイ裏面に配置した複数のアクチュエータを独立して駆動して触覚刺激を局在化して提示したり、触知ピンアレイと組み合わせてタッチ面を変形させたりすることが可能になりつつある。実際、ストレッチャブルディスプレイを変形させて触覚情報を提示した報告もある[128]。今後、フレキシブル/ストレッチャブルディスプレイの特徴を活かしたインタラクティブ視触覚ディスプレイの研究が進展すると期待され、その結果、より優れたインタラクションの社会実装が期待される。

付録 A オンセル型タッチパネルとノイズ対策技術

第4章では、静電触覚ディスプレイと静電容量センサの共存化について、静電容量センサのノイズの低減化が実装上の課題であり、励振信号重畳回路や基準ノード駆動ハイパスフィルタ回路で解決したことを述べた。筆者は静電触覚ディスプレイと静電容量センサの共存化に先立ち、静電容量センサと LCD との一体化技術を開発した [118]。その際に検討したノイズの低減化技術の概念を本研究の課題、特に第4章で述べた静電触覚ディスプレイと静電容量センサを共存化させるときの課題の解決に適用した。付録 A では静電容量センサと LCD とを一体化したオンセル型タッチパネルとノイズ対策技術について述べる。

A1. はじめに

タッチパネル付きディスプレイに対する、表示品位向上、薄型軽量化、低コスト化というユーザーニーズに応えるため、オンセル型タッチパネル [8] [10]やインセル型タッチパネル [11][12]の開発が進められ一部は実用化された。これらは、従来個別の部品であったディスプレイと静電容量式タッチパネルとを完全に一体化した構造であり、従来の構造と比較して光学界面の数及び基板などの構成部材を低減化する。

一方、オンセル型タッチパネルやインセル型タッチパネルはセンサ電極とディスプレイとの距離が近い構造であるため、ディスプレイの駆動ノイズを受けやすくなり、またセンサ電極の寄生容量が増加する。本稿ではこれら課題の対策技術を我々のオンセル型タッチパネルと共に紹介する。また、外来ノイズに対する耐性を高めるために開発した相関ノイズ減算法 [129]を紹介する。本手法は従来除去できなかった、センサの励振周波数と同一周波数のノイズを除去する技術である。

A2. オンセル型タッチパネル

A2. 1 パネル構造

作製したオンセル型タッチパネルの断面構造を図 95 に示す。TN 形 LCD では、カラーフィルタ基板の裏面に成膜した一様な ITO 膜をセンサ電極に利用する。センサ電極はパタニングが不要である。センサ電極より下の構造は既存の TN 形 LCD 製品と同一である。IPS 形 LCD の場合も同様に、センサ電極はカラーフィルタ基板裏面に形成した一様な ITO 膜である。既存の IPS 形 LCD 製品は、カラーフィルタ基板裏面に帯電防止の目的で ITO が成膜されている。これをセンサ電極に兼用する。この結果、これらオンセル型タッチパネルは従来の画素設計技術資産を活かした高画質設計が可能で、また製造歩留まりに与えるインパクトも小さい。さらに、インジウム等の希少資源の使用量低減に貢献する。

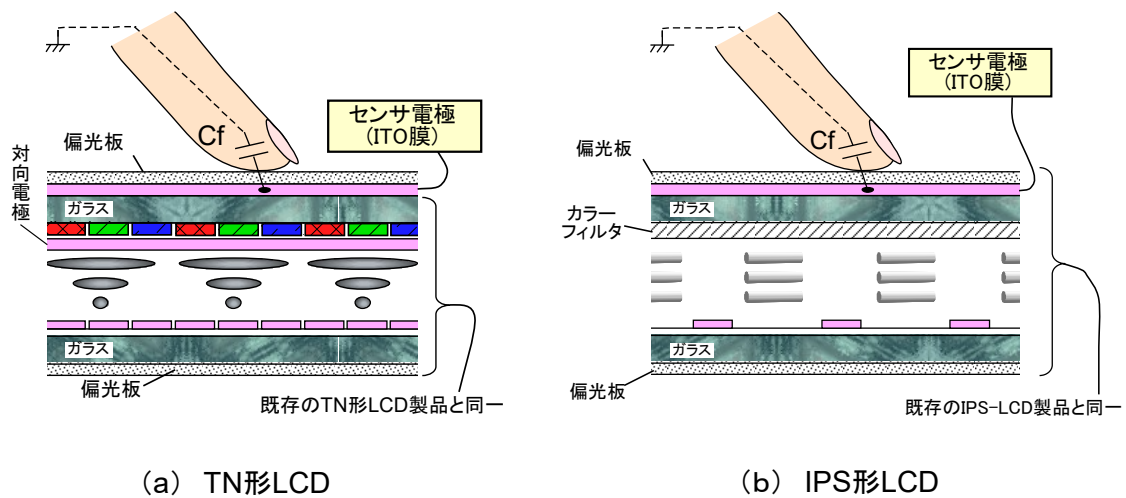


図 95：オンセル型タッチパネルの断面構造

A2. 2 タッチ検出原理

図 96 (a) に開発したオンセル型タッチパネルのタッチ検出システムを示す。検出原理は表面型静電容量方式と同一である。すなわち、タッチ検出システムは、センサ電極と、センサ電極の 4 隅に励振を与える交流電圧源と、その応答である 4 つの電流を観測する電流計で構成される。

交流電圧源は図 96 (b) の一番上の波形に示すように交流電圧を出力し、センサ電極を駆動する。交流電圧の周波数は 100 kHz とした。センサ電極の 4 隅に同じ電圧が与えられるため、図 96 (a) において指が無い場合は電流が流れない。しかし実際には指以外の静電容量、すなわち寄生容量が存在するため、タッチ無しでも電流が流れる。タッチによって静電容量 C_f が形成されるとそれに応じて電流が増加し、図 96 (b) の一番下の波形に示すように電流の振幅が大きくなる。

タッチの有無は、図 96 (c) に示すように、電流 I_1 から I_4 の和が、ある閾値より大きいかな否かで検出する。タッチ位置 $P(x, y)$ は、タッチ位置 P に応じてそれぞれの隅から点 P までのコンダクタンスが変化し、4 つの電流が変化する性質を利用して、 I_1 から I_4 を独立変数とする関数で求める。

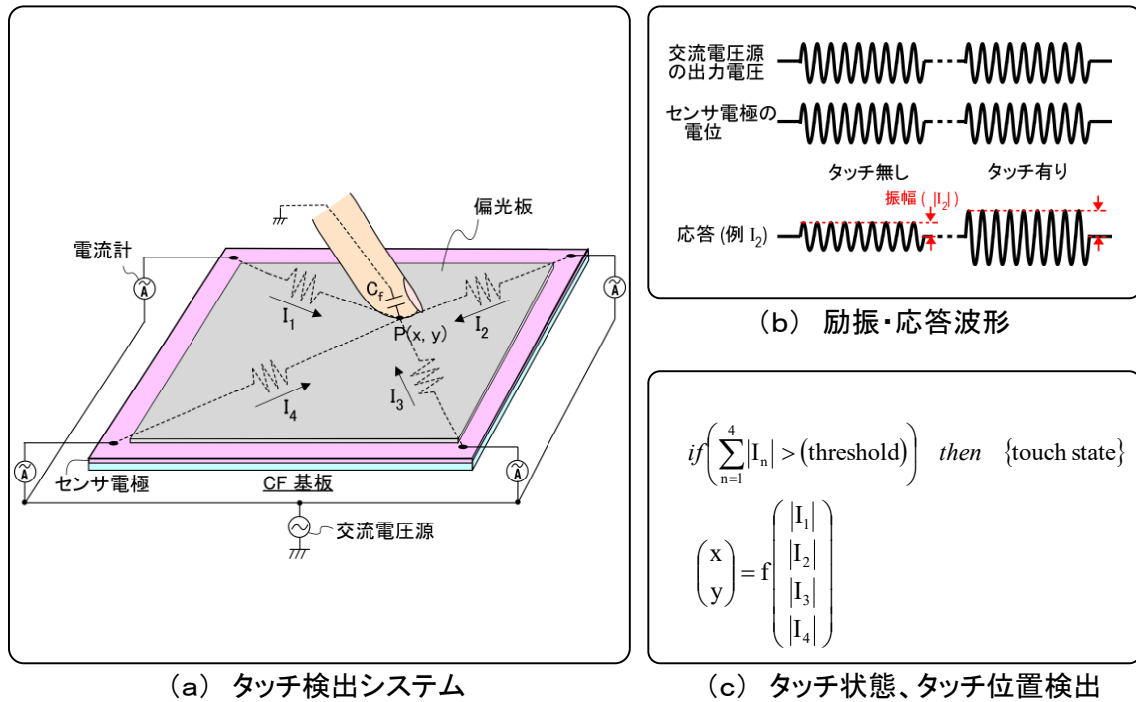


図 96：オンセル型タッチパネルのタッチ検出原理

A2. 3 開発したオンセル型タッチパネル

開発したオンセル型タッチパネルを表 15 に示す。対角 3.5 インチでバックプレーンにポリシリコン TFT を用いた TN 形 LCD 及び IPS 形 LCD、並びに対角 10.4 インチでバックプレーンに a-Si TFT を用いた TN 形 LCD を開発した。動作実証に成功した要因は、後述する LCD の駆動ノイズ対策及びセンサ電極の寄生容量対策技術を開発し、これらを適用したことである。

表 15：開発したオンセル型タッチパネル

画面サイズ	対角3.5インチ	対角3.5インチ	対角10.4インチ
画素数	480xRGBx640	480xRGBx640	800xRGBx600
液晶モード	TN	IPS	TN
バックプレーン	ポリシリコンTFT	ポリシリコンTFT	a-Si TFT
フレーム周波数	60Hz	60Hz	60Hz
センサータイプ	表面型静電容量	表面型静電容量	表面型静電容量

A3. LCDの駆動ノイズ対策

LCDの駆動に起因してセンサ電極に混入するノイズはLCDの駆動タイミングと相関がある。このためLCDの駆動とタッチパネルの駆動とを同期させ、LCDの駆動ノイズが少ないタイミングでタッチパネルを駆動することでLCDの駆動ノイズの影響を低減することができる。図97に開発したオンセル型タッチパネルのタイミングチャートを示す。タッチパネルの駆動期間をLCD動作のVblank期間内に割り当てることで63 dBという高いS/N比を得た [8]。

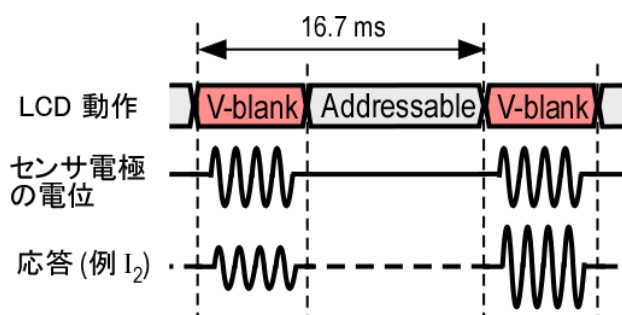


図 97：オンセル型タッチパネルのタイミングチャート

A4. センサ電極の寄生容量対策

A4. 1 寄生容量の問題点

オンセル型タッチパネルの問題点として、センサ電極の寄生容量が大きく、そこに流れる寄生電流が大きいことが挙げられる。図95のパネルの断面構造を参照すると、TN形LCDの場合、センサ電極と対向電極とが平行平板コンデンサを形成し、IPS形LCDの場合、センサ電極とTFT基板上の電極とでコンデンサを形成する。いずれの場合も3.5インチのLCDにおいて、センサ電極に数百pF～千数百pFの大きな寄生容量が形成される。一方、指のタッチで形成される静電容量 C_f は10pF程度である。このため、タッチ検出システムの電流計の測定レンジの大部分は寄生容量に流れる電流、すなわち寄生電流に占有される。この結果、タッチの有無で変化する僅かな電流の変化に対して電流計は低感度となる問題が生じる。また、寄生容量は液晶の誘電率異方性に起因してLCDの表示内容に応じて変化する。表示内容に応じた電流の変化は誤検出をもたらす。

A4. 2 寄生電流低減化技術(PCR)

これらの問題を解決するために、寄生電流低減化技術(Parasitic Current Reduction technique, PCR)を開発した [8][9]. PCR のコンセプトは①センサ電極を交流駆動する際、寄生容量を形成する他方の電極にも同じ交流電圧を印加する、あるいは②センサ電極を交流駆動する際、寄生容量を形成する他方の電極を電氣的にフローティングにする、である. PCR を適用したオンセル型タッチパネルを図 98 に示す. タッチパネル駆動期間において、図中の全てのスイッチ (SW1～SW5、データ線駆動回路及びゲート線駆動回路の出力部に設けたスイッチ) は図 98 に示す極が選択される. よって対向電極及びコモン配線にはセンサ電極に印加される交流電圧と同位相・同振幅の電圧が印加され、また、データ線及びゲート線はハイインピーダンスとされる. 一方、LCD 駆動期間においては、図 98 に示した全てのスイッチは反対の状態とされ、従来の LCD と同様に映像データが画素に書き込まれる.

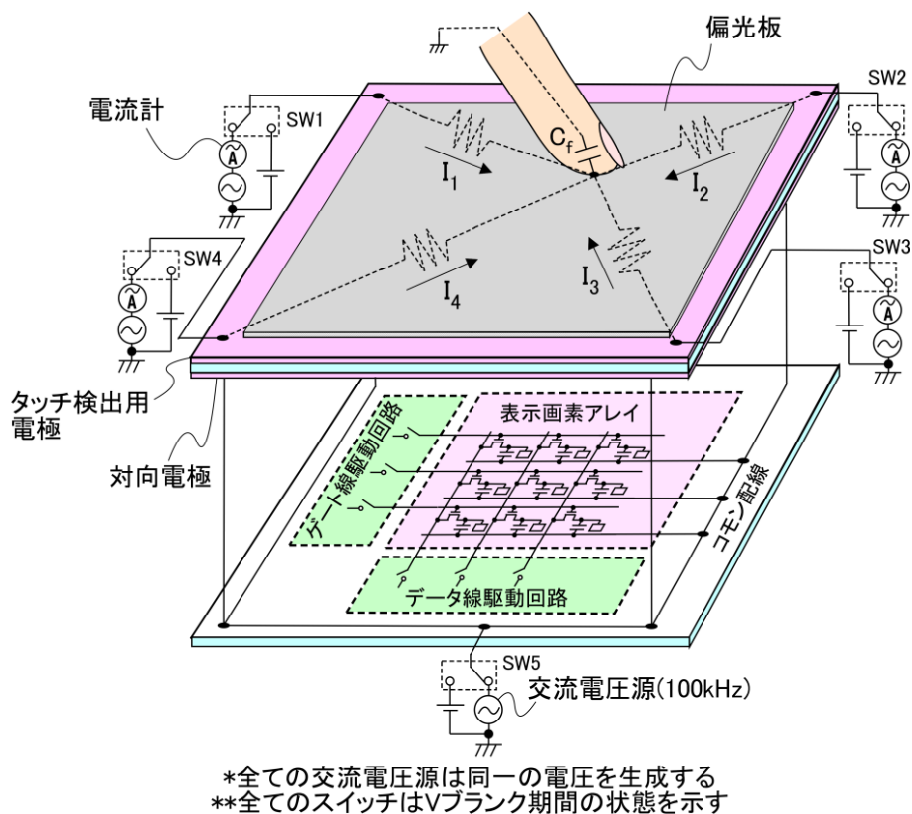


図 98 : PCR を適用したオンセル型タッチパネル (TN 形 LCD の例)

PCR の効果を検証するため、試作した 3.5 インチ TN 形 LCD を用いて、センサ電極の等価容量 C_{eq} を測定した. C_{eq} は次式により求めた.

$$C_{eq} = \frac{\sum_{n=1}^4 I_n}{\omega V} \quad (17)$$

ただし、 I_n は交流電流計で検出された電流、 V はセンサ電極の4隅に接続した交流電圧源の電圧振幅、 ω は交流電圧の角周波数である。

LCD にタッチしていない状態で、PCR を適用した場合と適用しない場合とで得られた等価容量 C_{eq} を図 99 に示す。LCD にタッチしていない状態であるため、得られた等価容量は、等価な寄生容量を示す。リファレンスと提案構成とを比較すると等価容量は 900 pF から 8 pF に大幅に低減された。つまり、PCR は等価な寄生容量を 99%低減、すなわち寄生電流を 99%低減したといえる。これにより、タッチの有無で変化する僅かな電流の変化を高精度で検出することが可能となった。また、この電流は表示内容に依存しないことも合わせて確認した [8]。

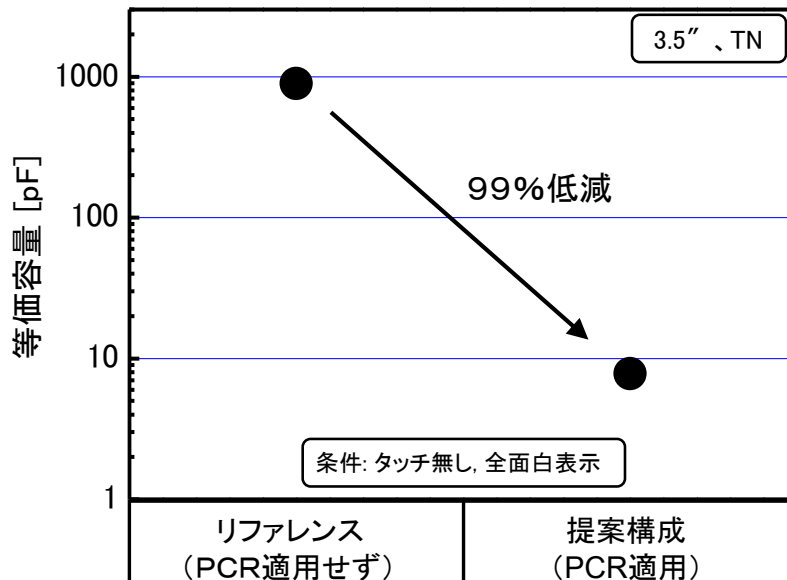


図 99 : センサ電極の等価寄生容量測定結果

A5. 外来ノイズ耐性の向上

A5. 1 相関ノイズ減算法の原理

外来ノイズ耐性を高めるために開発した相関ノイズ減算法 [129]を紹介する。本手法は従来除去できなかった、センサの励振周波数と同一または近傍の周波数のノイズを除去する技術である。図 96 で示したタッチ検出システムでは、応答 (例えば I_2) の実際の観測信号は真の信号にバックグラウンドノイズが重畳したものである。本手法は観測信号からバックグラウンドノイズを除去し、真の信号の振幅を求めるものである。本手法の

コンセプト次の通りである (図 100)。

- ①励振を間欠的な正弦波とする。停波期間中の応答($y(t)$ 及び $z(t)$)はバックグラウンドノイズである。これを取得する。
- ②発振中の応答 $x(t)$ に含まれるノイズは $y(t)$ 及び $z(t)$ と相関があると仮定する。
- ③取得した $y(t)$ 及び $z(t)$ から $x(t)$ に含まれるノイズを推測し、推測したノイズを $x(t)$ から減算する。

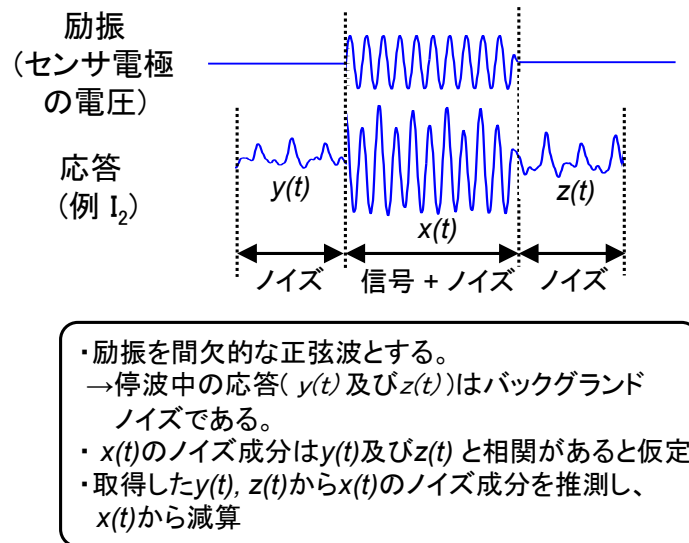


図 100 : 相関ノイズ減算法のコンセプト

A5. 2 信号処理

図 101 を参照して相関ノイズ減算法を計算機で実行する際の信号処理方法を説明する。計算は、時間領域の信号を周波数領域に変換し、ベクトル演算によって行う。

(Step 1) 応答をサンプリングし、離散時間信号 ($x(i \Delta t)$, $y(i \Delta t)$, $z(i \Delta t)$) を得る。(図 101 (a))。

(Step 2) それぞれの期間の離散時間信号から、真の信号の周波数である 100 kHz のフーリエ係数を計算する。たとえば、期間 T の離散時間信号 $x(i \Delta t)$ に次の離散フーリエ変換の式を適用し、100 kHz のフーリエ係数 X を計算する。

$$X = \frac{2}{N} \sum_{i=0}^{N-1} x(i \Delta t) \exp(-j 2\pi 100 \text{kHz} i \Delta t) \quad (18)$$

ただし j は虚数単位、 Δt はサンプリング間隔、 N はサンプル数である。

上式で得られるフーリエ係数 X は複素数なので、複素平面にプロットすることで、図 101 (b) に示すベクトル X を得る。ここで、ベクトル X の長さは、 $x(i \Delta t)$ の 100 kHz 成分の振幅を意味し、実数軸となす角は位相を表す。

同様に $y(i \Delta t)$ からベクトル Y を、 $z(i \Delta t)$ からベクトル Z を計算する。この計算手法は、

直角位相振幅変調の復調原理を応用したものと言う事もできる。

(STEP 3) 期間 T2 の観測信号に含まれるノイズをベクトル \mathbf{Y} とベクトル \mathbf{Z} の平均と仮定し、ノイズの推定値 \hat{N} を計算する (図 101 (c))。

(STEP 4) ベクトル \mathbf{X} から \hat{N} をベクトル減算することで、真の信号の推定値 \hat{S} を得る。 \hat{S} の大きさが真の信号の振幅の推定値である (図 101 (d))。

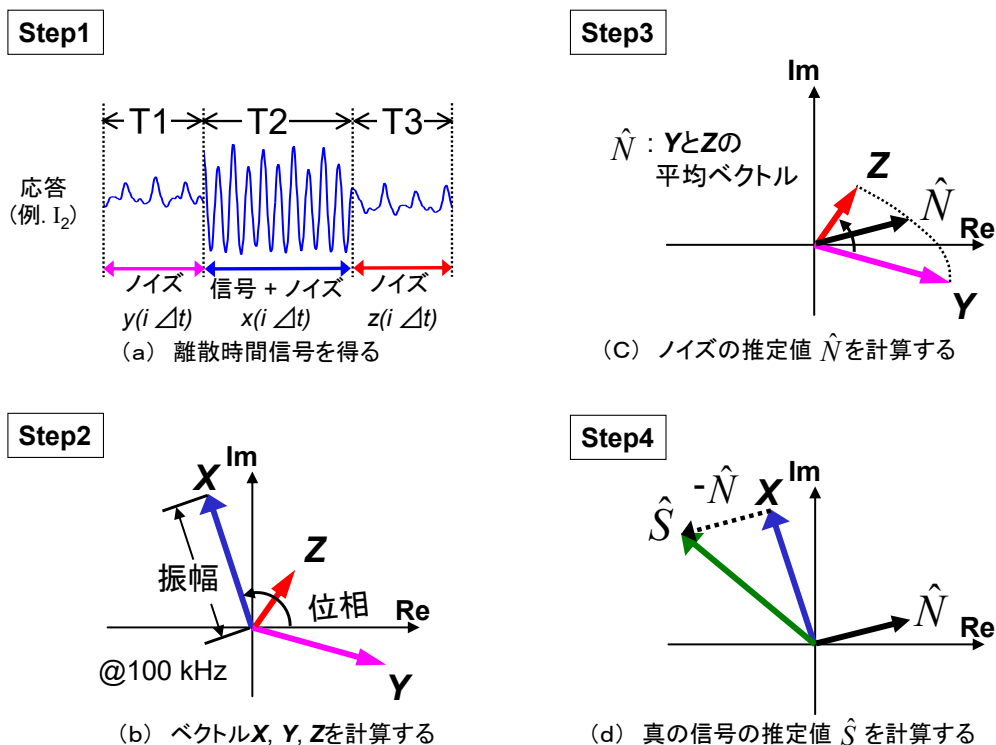


図 101 : 相関ノイズ減算法の計算方法

本手法の妥当性を検証するために、本手法をプログラミングしたソフトウェアにテスト信号を入力し、その出力を評価した。検証のために2種類のテスト信号を用いた。

テスト信号 (1) は、図 102 に示すように、振幅 2.0 の真の信号と振幅 1.0 のバックグラウンドノイズとを重畳させたものとした。真の信号もノイズも周波数は 100 kHz であり、位相は 135 度ずれたものとした。この場合ベクトル \mathbf{Y} とベクトル \mathbf{Z} は等しく、ノイズの推定値 \hat{N} もこれらと同じになる。ベクトル \mathbf{X} からノイズの推定値 \hat{N} を減算して真の信号の推定値 \hat{S} をもとめるとその大きさは、図 102 の右側に示すように 2.0 であり、真の信号の振幅と一致した。このように信号とノイズの周波数が同じ場合であっても、相関ノイズ減算法によって真の信号の振幅が得られることを確認した。

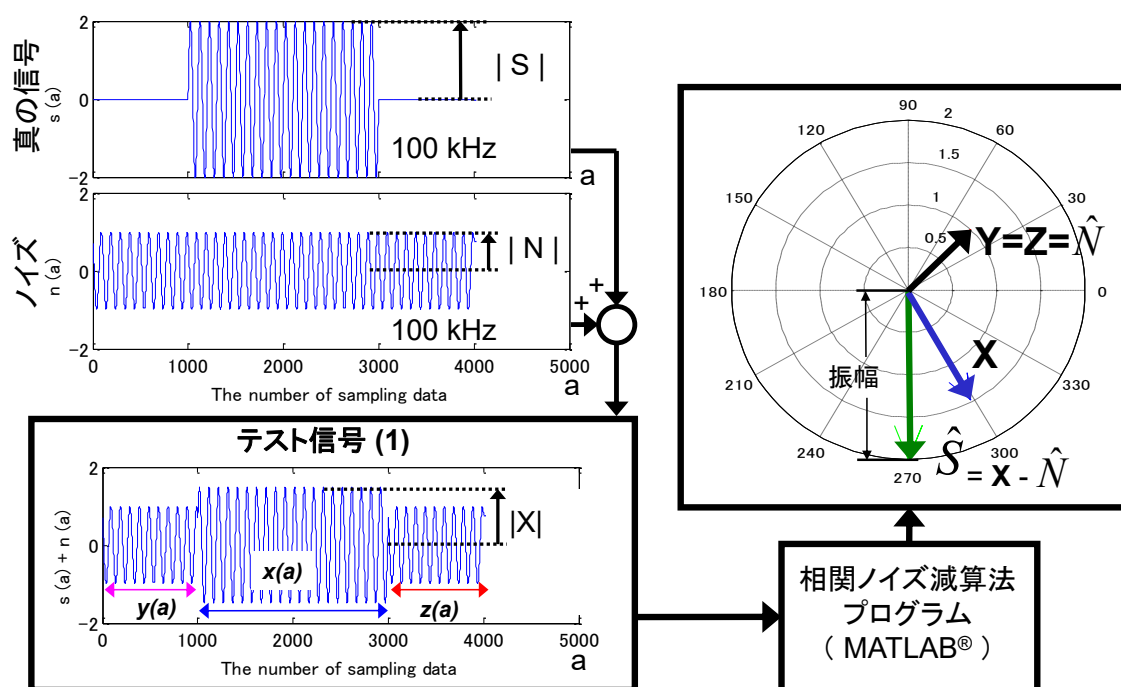


図 102 : テスト信号 (1) を用いた検証

テスト信号 (2) は、図 103 に示すように、振幅 1.0、周波数 100 kHz の真の信号に、周波数が 99 kHz で振幅が時間と共にリニアに増加するバックグラウンドノイズを重畳させたものとした。この場合ベクトル \mathbf{Y} とベクトル \mathbf{Z} 、そしてノイズの推定値 \hat{N} は図 103 の右に示す通りとなった。ベクトル \mathbf{X} からノイズの推定値 \hat{N} を減算して真の信号の推定値 \hat{S} をもとめると、その大きさは 1.0 であり、真の信号の振幅と一致した。このように、ノイズの周波数が真の信号の近傍であっても、真の信号の振幅が得られることを確認した。

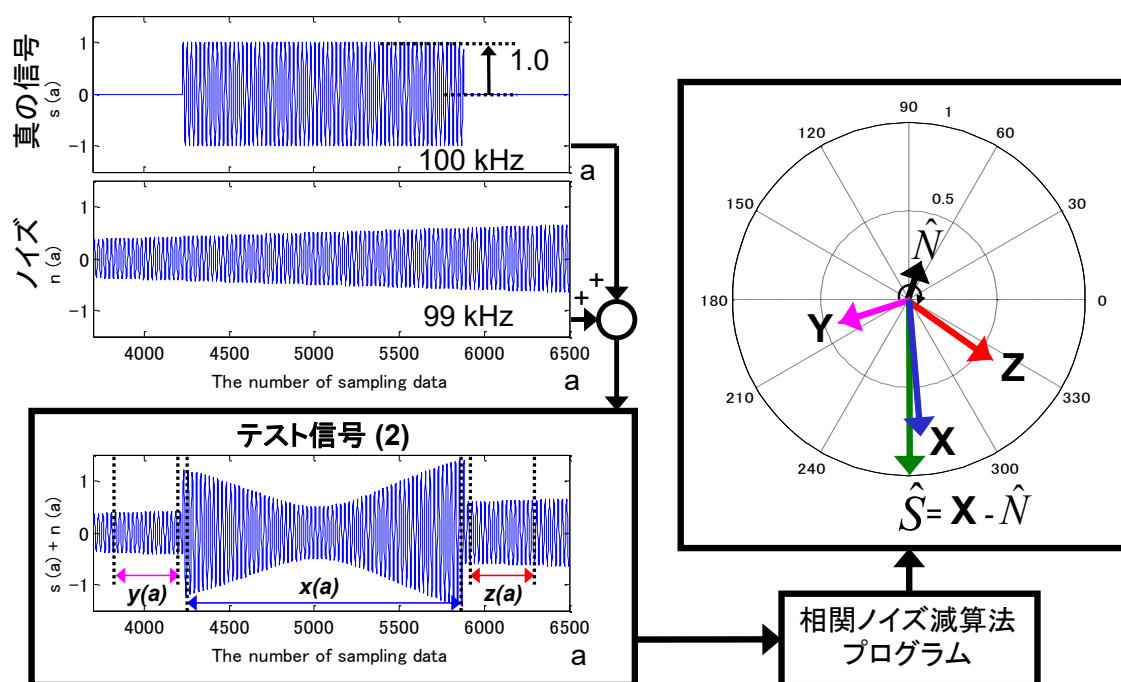


図 103 : テスト信号 (2) を用いた検証

A5. 3 試作パネルを用いての実証

10.4 インチのオンセル型タッチパネルの試作品を、ノイズの大きい環境下で動作させ、提案した手法の効果を検証した。インバーター回路で駆動される蛍光灯をノイズ源として、これをパネルに近づけて設置した (図 104 (a))。筐体のエネルギースペクトルを測定すると、50 kHz の基本周波数とその高調波が観測された (図 104 (b))。第 2 高調波は 100 kHz であり、タッチパネルの励振周波数と一致した。蛍光灯をオンにした状態で測定した V ブランク期間の波形を図 104 (c) に示す。測定は一連の 400 回の V ブランク期間について行っているが、図 104 (c) では 1 番目及び 2 番目の V ブランク期間の波形を示した。上の波形がセンサ電極の電位で、下の波形がその応答の電流である。\$x(i \Delta t)\$ の期間に、真の信号にバックグラウンドノイズが重畳された波形をみることができる。また、励振が停止中の \$y(i \Delta t)\$ や \$z(i \Delta t)\$ の期間で、バックグラウンドノイズが確認できる。ノイズの基本周波数は 50 kHz であることがわかる。

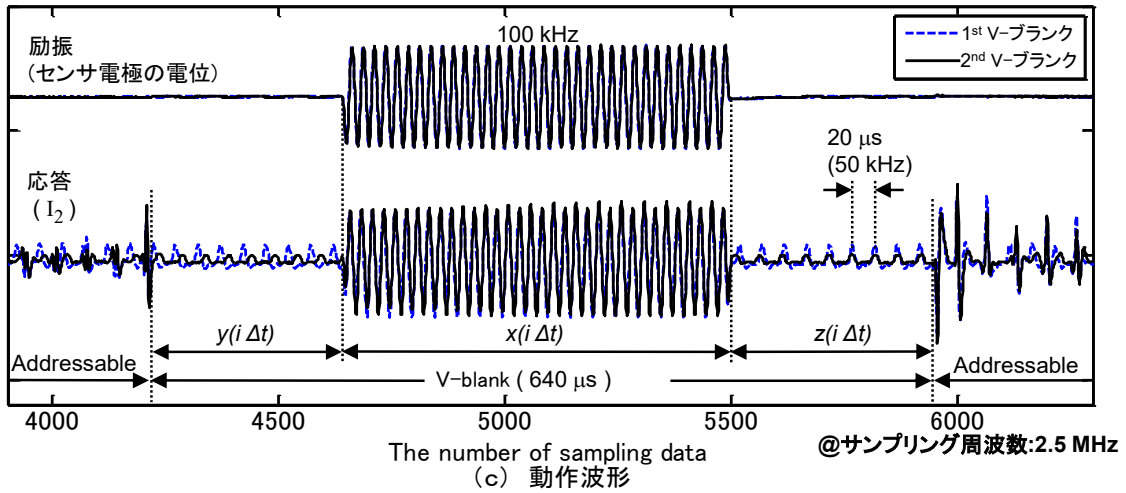
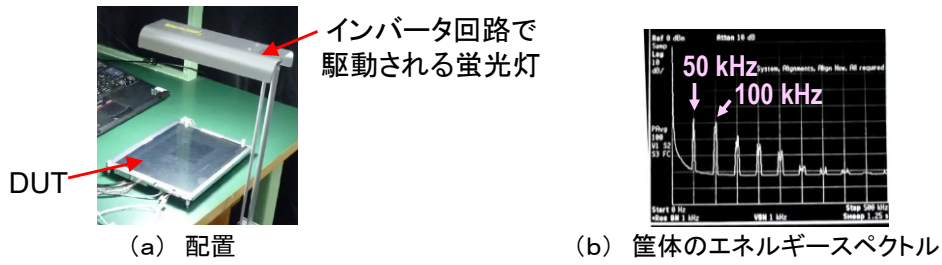


図 104 : ノイズが大きい環境でのオンセル型タッチパネルの動作波形

一連の 400 回の V ブランク期間の応答から得られた振幅を図 105 に示す. 約 6 秒にわたりタッチパネルを動作させ、開始から 3 秒後にタッチパネルの中央付近を指でタッチした. 図 105 (a) は、従来の手法で得られた振幅である. すなわち、観測信号から 100 kHz の信号を抽出し、その振幅をみたものである. 従って 100 kHz のバックグラウンドノイズを除去することができずノイズの多い波形となっている. 図 105 (b) は相関ノイズ減算法を適用したものである. タッチ時のエッジ波形の急峻さを失うことなく S / N 比が飛躍的に向上していることがわかる. S / N 比は 14.6 dB 向上しており、タッチのオンとオフが明確に区別可能である. この結果から相関ノイズ減算法の有効性が実証されたといえる.

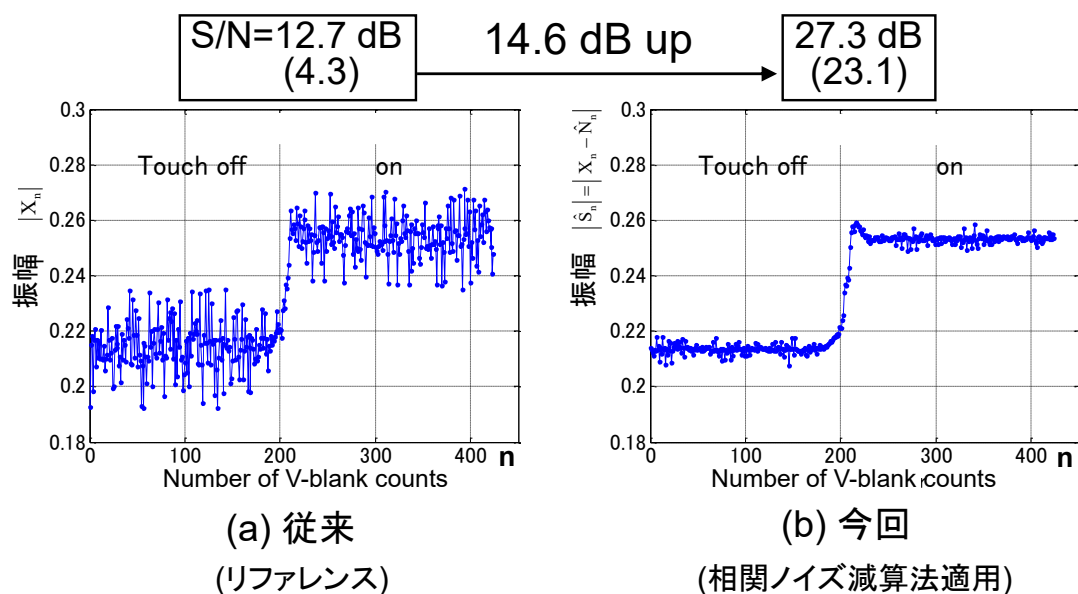


図 105：ノイズが大きい環境下でオンセル型タッチパネルの応答から得られた振幅

A6. おわりに

タッチパネル付きディスプレイに対する、表示品位向上、薄型軽量化、低コスト化という、ユーザーニーズに応えるため、カラーフィルタ裏面のITO膜をセンサ電極に利用する構造のオンセル型タッチパネルを提案した。

また、S/N比向上のために、LCDの駆動とタッチパネルの駆動とを同期させる駆動法や寄生電流を低減化するPCR、及びセンサの励振周波数と同一または近傍の周波数のノイズを除去可能な相関ノイズ減算法を提案し、それぞれの有効性を確認した。相関ノイズ減算法はデジタル信号処理を利用するが、半導体技術の進歩によって、サンプリング周波数が1MHzのADCやDSP機能を搭載した低価格マイコンの実用化が急速に進み、コスト要求が厳しいタッチパネルにおいても、デジタル信号処理を利用することが可能な状況となった。半導体技術の進歩を活用することで、タッチパネルのノイズ耐性はさらに向上すると思われる。

ディスプレイにタッチパネル機能を内蔵化する技術は、ユーザーニーズの観点に加え、インジウム等の希少資源の使用量低減といった社会の持続的発展の観点から実用化が進んでいる。

参考文献

- [1] 中村卓, "低温ポリシリコンを用いた液晶表示装置への機能集積化の研究," 東京大学, 2020.
- [2] 浅田秀樹, 芳賀浩史, "ガラス上に DRAM を形成 —液晶とフレームメモリ一体化の可能性を実証—," *日経 FPD 2006 戦略編*, pp. 262-267, 2005.
- [3] Yoshihiro Nonaka, Hiroshi Haga, Hiroshi Tsuchi, Youichi Kitagishi, Tadahiro Matsuzaki, Mitsuhiro Sugimoto, Hiroshi Hayama, Hideki Asada, "A Low-Power SOG LCD with Integrated DACs and a DC-DC Converter for Mobile Applications," *SID 2004 Digest*, 54.1, pp. 1448-1451, 2004.
- [4] Yoshiharu Nakajima, Yoshitoshi Kida, Masaki Murase, Yoshihiko Toyoshima, Yasuhito Maki, "Latest Development of "System-on-Glass" Display with Low Temperature Poly-Si TFT," *SID 2004 Digest*, 21.3, pp. 864-867, 2004.
- [5] M. Senda, Y. Tsutsui, R. Yokoyama, K. Yoneda, S. Matsumoto, A. Sasaki, "Ultra-Low-Power Polysilicon AMLCD with Full Integration," *SID 2002 Digest*, 22.1, pp. 790-793, 2002.
- [6] Hiroshi Haga, Yoshihiro Nonaka, Youichiro Kamon, Tomohiko Otose, Daigo Sasaki, Youichi Kitagishi, Tadahiro Matsuzaki, Yoshinobu Satou, Hideki Asada, "A 510-kb SOG-DRAM for Mobile Displays with Embedded Frame Memories," *Journal of the Society for Information Display*, vol. 14, no. 4, pp. 339-344, 2006.
- [7] Hiroshi Haga, Yoshihiro Nonaka, Youichiro Kamon, Youich Kitagishi, Masayuki Jumonji, Kenichi Takatori and Hideki Asada, "DRAM-Frame-Memory Embedded SOG-LCD," *SID 2007 Digest*, 46.3, pp. 1486-1489, 2007.
- [8] H. Haga et al, "Touch Panel Embedded LCD using Conductive Overlay," *IDW '09 Digest*, pp. 2143-214, 2009.
- [9] H. Haga et al, "Touch Panel Embedded IPS-LCD with Parasitic Current Reduction Technique," *SID 2010 Digest*, pp. 669-672, 2010.
- [10] 佐伯, "表示部と一体化した「オンセル型」が普及のきざし," *日経エレクトロニクス 2010.12.13*, p. 130, 2010.
- [11] K. Noguchi et al, "Newly Developed In-Cell Capacitive Touch Panel Technology in a Wide Viewing Angle IPS-Mode Display," *IDW '12 Digest*, pp. 817-820, 2012.

- [12] Y. Sugita et al, "In-Cell Projected Capacitive Touch Panel Technology," *IDW '12 Digest*, pp. 825-828, 2012.
- [13] 稲見昌彦, 舘章, "複合現実 視・触覚複合現実環境提示技術," *計測と制御*, vol. 41, no. 9, pp. 639-644, 2002.
- [14] 伴 祐樹, "クロスモーダルインタラクション最前線," *電子情報通信学会誌*, vol. 104, no. 12, pp. 1271-1278, 2021.
- [15] Ashbrook, D., Baudisch, P., and White, S., "Nenya: subtle and eyes-free mobile input with a magnetically-tracked finger ring," *In Proc. CHI 2011, ACM (2011)*, pp. 2043-2046, 2011.
- [16] Brewster, S., Lumsden, J., Bell, M., Hall, M. and Tasker, S., "Multimodal 'eyes-free' interaction techniques for wearable devices," *In Proc. CHI 2003, ACM (2003)*, pp. 473-480, 2003.
- [17] Li, K. A., Baudisch, P. and Hinckley, K., "Blindsight: eyes-free access to mobile phones.," *In Proc. CHI 2008, ACM (2008)*, pp. 1389-1398.
- [18] Vazquez-Alvarez, Y. and Brewster, S. A., "Eyes-free multitasking: the effect of cognitive load on mobile spatial audio interfaces," *In Proc. CHI 2011, ACM (2011)*, pp. 2173-2176, 2011.
- [19] Zhao, S., Dragicevic, P., Chignell, M., Balakrishnan, R. and Baudisch, P., "Earpod: eyes-free menu selection using touch input and reactive audio feedback," *In Proc. CHI 2007, ACM (2007)*, pp. 1395-1404, 2007.
- [20] Yi, Bo and Cao, Xiang and Fjeld, Morten and Zhao, Shengdong, "Exploring User Motivations for Eyes-Free Interaction on Mobile Devices," *CHI '12: Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, p. 2789-2792, 2012.
- [21] A. Sears, C. Plaisant, B. Shneiderman, "A new era for high precision touchscreens," *in: H.R. Hartson, D. Hix (Eds.), Advances in Human-Computer Interaction, Ablex Publishing, New Jersey*, p. 2-3, 1992.
- [22] F.-G. Wu, H. Lin, M. You, "Direct-touch vs. mouse input for navigation modes of the web map," *Displays*, vol. 32, p. 261-267, 2011.
- [23] G.E. Burnett, J.M. Porter, "Ubiquitous computing within cars: designing controls for non-visual use," *Int. J. Human-Comput. Interact.*, vol. 55, p. 521-531, 2001.
- [24] S.G. Klauer, T.A. Dingus, V.L. Neale, J.D. Sudweeks, D.J. Ramsey, "The Impact of Driver Inattention on Near-Crash/Crash Risk: An Analysis Using the 100-Car Naturalistic Driving Study Data," *National Highway Traffic Safety Administration, DOT HS 810 594*, 2006.
- [25] Corentin Bernard, Jocelyn Monnoyer, Sølvi Ystad, Michael Wiertlewski, "Eyes-Off Your

Fingers Gradual Surface Haptic Feedback Improves Eyes-Free Touchscreen Interaction," *CHI '22: Proceedings of the 2022 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, April 2022 Article No.: 427.*, pp. 1-10, 2022.

- [26] I. Poupyrev, S. Maruyama, J. Rekimoto, "Ambient Touch: Designing Tactile Interfaces for Handheld Devices," *Proceedings of the 15th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology (UIST '02)*, p. 51–60, 2002.
- [27] Brewster, Stephen and Chohan, Faraz and Brown, Lorna, "Tactile Feedback for Mobile Interactions," *CHI '07: Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, April 2007*, p. 159–162, 2007.
- [28] J.-H. Lee, C. Spence, "Assessing the benefits of multimodal feedback on dualtask performance under demanding conditions," in: *Proceedings of the 22nd British HCI Group Annual Conference on People and Computers: Culture, Creativity, Interaction.*, vol. 1, p. 185–192, 2008.
- [29] C. Serafin, R. Heers, M. Tschirhart, C. Ullrich, C. Ramstien, "User experience in the US and Germany of in-vehicle touch-screens with integrated haptic and auditory feedback," in: *SAE World Congress, 2007-01-0451*, 2007.
- [30] M.J. Pitts, M.A. Williams, T. Wellings, A. Attridge, "Assessing subjective response to haptic feedback in automotive touchscreens," in: *Proceedings of the 1st International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications, ACM, Essen, Germany*, pp. 11-18, 2009.
- [31] Matthew J. Pitts, Gary Burnett, Lee Skrypchuk, Tom Wellings, Alex Attridge, Mark A. Williams, "Visual–haptic feedback interaction in automotive touchscreens," *Displays*, vol. 33, no. 1, pp. 7-16, 2012.
- [32] Frank Beruscha, Catrin Brosi, Wolfgang Krautter, Tobias Altmüller, "Deriving User Requirements for Haptic Enhanced Automotive Touch Screen Interaction," *SID 2016 Digest*, 22-3, pp. 271-273, 2016.
- [33] A. Nashel, S. Razzaque, "Tactile virtual buttons for mobile devices," *CHI'03 extended abstracts on Human factors in computing systems, ACM*, 2003.
- [34] T. Pakkanen et al, "Comparison of three designs for haptic button edges on touchscreens," *Haptics Symposium, 2010 IEEE*, 2010.
- [35] S. Kim, G. Lee, "Haptic feedback design for a virtual button along force-displacement curves," *Proceedings of the 26th annual ACM symposium on User interface software and technology. ACM.*, 2013.
- [36] H.-Y. Chen et al, "Design and evaluation of identifiable key-click signals for mobile devices," *IEEE Transactions on Haptics*, vol. 4, no. 4, pp. 229-241, 2011.

- [37] G. Park, S. Choi, K. Hwang, S. Kim, J. Sa, M. Joung, "Tactile effect design and evaluation for virtual buttons on a mobile device touchscreen," *Proc. 13th Int. Conf. Human Comput. Interaction Mobile Devices Services*, p. 11–20, Aug. 2011.
- [38] "iPhone 5 touchscreen latency measured, found to be 2.5x faster than closest Android rival," <https://www.imore.com/iphone-5-touchscreen-latency-measured-found-be-25-times-faster-closest-android-device>.
- [39] "Nokia Lumia 928 lags far behind the iPhone 5 in new screen latency test," <https://www.windowscentral.com/nokia-lumia-928-lags-behind-iphone-5-screen-latency-test>.
- [40] Niels Henze, Benjamin Poppinga, "Measuring Latency of Touch and Tactile Feedback in Touchscreen Interaction Using a Mobile Game," *Proceedings of the 3rd International Workshop. Held in Conjunction with Mobile HCI*, pp. 23-26, 2021.
- [41] Schmit, R. F. (岩村他訳), "感觉生理学第2版," 金芳堂, 1991.
- [42] Susan J. Lederman, "Skin and Touch," *Encyclopedia of Human Biology*, vol. 7, pp. 51-63, 1991.
- [43] Iggo A, Muir AR, "The structure and function of a slowly adapting touch corpuscle in hairy skin," *J Physiol*, vol. 200, no. 3, pp. 763-96, 1969 Feb.
- [44] CAUNA N, ROSS LL, "The fine structure of Meissner's touch corpuscles of human fingers," *J Biophys Biochem Cytol*, vol. 8, no. 2, pp. 467-82, 1960, Oct.
- [45] Loewenstein WR, Skalak R, "Mechanical transmission in a Pacinian corpuscle. An analysis and a theory," *J Physiol*, 第 卷 182, 第 2, pp. 346-78, Jan, 1966.
- [46] Paré M, Behets C, Cornu O, "Paucity of presumptive ruffini corpuscles in the index finger pad of humans," *J Comp Neurol*, vol. 456, no. 3, pp. 260-6, Feb, 2003.
- [47] 下条誠, "触覚の生理・心理学," <http://www.rm.mce.uec.ac.jp/sice/2006HapticsCommitteePPt.pdf>.
- [48] Phillips, J.R., Johansson, RS., Johnson, K.O., "Representation of Braille characters in human nerve fibers," *Exp. Brain Res*, vol. 81, pp. 589-592, 1990.
- [49] Phillips, J.R., Johnson, K.O., "Tactile spatial resolution. II. Neural representation of bars, edges, and gratings in monkey primary afferents," *J Neurophysiol*, vol. 46, pp. 1192-1203, 1981.
- [50] 土井幸輝, 岩崎亜紀, 藤本浩志, "印刷素材がUV点字の触読性に及ぼす影響に関する研究," *日本機械学会論文集 (C編)*, vol. 716, pp. 1230-1236, 2006.
- [51] A. J. Brisben, S. S. Hsiao, K. O. Johnson, "Detection of vibration transmitted through an object grasped in the hand," *J. Neurophysiology*, vol. 81, no. 4, p. 1548–1558, 1999.

- [52] 下条誠, 前野隆司, 篠田裕之, 佐野明人, "触覚認識メカニズムと応用技術 -触覚センサ・触覚ディスプレイ- 増補版," p. 15, 2010.
- [53] J. M. Loomis, S. J. LEDERMAN, "Tactual Perception," *Handbook of perception and Human*.
- [54] R. S. Johansson, R. H. LaMotte, "Tactile detection thresholds for a single asperity on an otherwise smooth surface," *Somatosens. Res.*, vol. 1, pp. 21-31, 1983.
- [55] 山田雅弘, "各感覚における神経情報処理の共通点・相違点," *電総研調査報告*, no. 215, 18, 1986.
- [56] 下条誠, 牧野了太, 小川博教, 鈴木隆文, 並木明夫, 斎藤敬, 國本雅成, 石川正俊, 満洲邦彦, "ロボットハンドからの接触感覚を触覚神経系経路により提示するシステムの開発," *日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会*, 2P2-E08, 2002.
- [57] 宮岡徹, 間野忠明, "単一神経線維電気刺激による臨床検査. 単一神経線維電気刺激," *臨床脳波*, Vols. 29-9, pp. 574-578, 1987.
- [58] A. Gescheider, Stanley J. Bolanowski, 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.
- [59] 宮岡徹, 間野忠明, "皮膚振動感覚における空間的加重," *名古屋大学環境医学研究所年報*, vol. 38, pp. 259-261, 1987.
- [60] R. T. Verrillo, "Effect of contactor area on the vibrotactile threshold," *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 35, pp. 1962-1966, 1963.
- [61] G. A. Gescheider, S. J. Bolanowski, S. K. Chatterton, "Temporal gap detection in tactile channels," *Somatosensory & Motor Research*, vol. 20, pp. 239-247, 2003.
- [62] Cagatay Basdogan, et al, "A Review of Surface Haptics: Enabling Tactile," *IEEE Transactions on haptics*, 第 卷 13, 第 3, pp. 450-470, 2020.
- [63] H.-Y. Yao and V. Hayward, "Design and analysis of a recoil-type vibrotactile transducer," *J. Acoustical Soc. Amer.*, vol. 128, no. 2, p. 619-627, 2010.
- [64] S. Zhao, A. Israr, and R. L. Klatzky, "Intermanual apparent tactile motion on handheld tablets," *Proc. IEEE World Haptics Conf.*, p. 241-247, 2015.
- [65] G. Park and S. Choi, "Tactile information transmission by 2d stationary phantom sensations," *Proc. CHI Conf. Human Factors Comput. Syst.*, pp. 1-12, 2018.
- [66] "https://www.phys.uconn.edu/~gibson/Notes/Section5_2/Sec5_2.htm".
- [67] C. Hudin and S. Panfœels, "Localisation of vibrotactile stimuli with spatio-temporal inverse filtering," *Haptics: Science, Technology, and Applications*, D. Prattichizzo, H.

Shinoda, H. Z. Tan, E. Ruffaldi, and A. Frisoli, Eds. Berlin, Germany: Springer, p. 338–350, 2018.

- [68] J.-H. Woo and J.-G. Ih, "Vibration rendering on a thin plate with actuator array at the periphery," *J. Sound Vibration*, vol. 349, pp. 150-162, 2015.
- [69] E. Enferad, C. Giraud-Audine, F. Giraud, M. Amberg, and B. Lemaire-Semail, "Differentiated haptic stimulation by modal synthesis of vibration field," *Proc. IEEE Haptics Symp.*, pp. 216-221, 2018.
- [70] M. R. Bai and Y.K. Tsai, "Impact localization combined with haptic feedback for touch panel applications based on the time-reversal approach," *J. Acoustical Soc. Amer.*, vol. 129, no. 3, p. 1297–1305, 2011.
- [71] C. Hudin, J. Lozada, and V. Hayward, "Localized tactile stimulation by time-reversal of flexural waves: Case study with a thin sheet of glass," *Proc. World Haptics Conf.*, pp. 67-72, 2013.
- [72] M. Wiertelwski, J. Lozada, and V. Hayward, "The spatial spectrum of tangential skin displacement can encode tactual texture," *IEEE Trans. Robot.*, vol. 27, no. 3, p. 461–472, 2011.
- [73] B. Banter, "Touch Screens and Touch Surfaces are Enriched by Haptic Force-Feedback," *Information Display*, vol. 26, no. 3, p. 26–30, 2010.
- [74] T. Nara, M. Takasaki, T. Maeda, T. Higuchi, S. Ando, and S. Tachi, "Surface acoustic wave tactile display," *IEEE Comput. Graph. Appl.*, vol. 21, no. 6, pp. 56-63, 2001.
- [75] M. Biet, F. Giraud, and B. Lemaire-Semail, "Squeeze film effect for the design of an ultrasonic tactile plate," *IEEE Trans. Ultrasonics, Ferroelectrics, Freq. Control.*, vol. 54, no. 12, p. 2678–2688, 2007.
- [76] L. Winfield, J. Glassmire, J. E. Colgate, and M. Peshkin, "T-pad: Tactile pattern display through variable friction reduction," *Proc. 2nd Joint EuroHaptics Conf. Symp. Haptic Interfaces Virtual Environ. Teleoperator Syst. (WHC'07)*, pp. 421-426, 2007.
- [77] S. Ghenna, C. Giraud-Audine, F. Giraud, M. Amberg, and B. Lemaire-Semail, "Control and evaluation of a 2-d multimodal controlled-friction display," *Proc. IEEE World Haptics Conf.*, p. 593–598, 2017.
- [78] E. Vezzoli et al, "Friction reduction through ultrasonic vibration part 1: Modelling intermittent contact," *IEEE Trans. Haptics*, vol. 10, no. 2, pp. 196-207, 2017.
- [79] M. Wiertelwski, R. F. Friesen, and J. E. Colgate, "Partial squeeze film levitation modulates fingertip friction," *Proc. Nat. Acad. Sci.*, vol. 113, no. 33, p. 9210–9215, 2016.
- [80] S. Grimnes, "Electrovibration, cutaneous sensation of microampere current," *Acta*

Physiologica Scandinavica, vol. 118, no. 1, p. 19–25, 1983.

- [81] R. M. Strong, "An Electrotactile Display," *IEEE Man-Machine System*, Vols. mms-11(1), pp. 72-79, 1970.
- [82] D. J. Beebe, C. Hymel, K. Kaczmarek, and M. Tyler, "A polyimide-on-silicon electrostatic fingertip tactile display," *Proc. 17th In. Conf. Eng. Medicine Biol. Soc.*, vol. 2, p. 1545–1546, 1995.
- [83] J. L. Ville M€akinen and P. Suvanto, "Interface apparatus for touch input and tactile output communication," *Finland Patent PCT/FI2009/050 416*, 2009.
- [84] E. Chubb, J. Colgate, and M. Peshkin, "Shiverpad: A glass haptic surface that produces shear force on a bare finger," *IEEE Trans. Haptics*, vol. 3, no. 3, p. 189–198, 2010.
- [85] S. Ghenna, E. Vezzoli, C. Giraud-Audine, F. Giraud, M. Amberg, and B. Lemaire-Semail, "Enhancing variable friction tactile display using an ultrasonic travelling wave," *IEEE Trans. Haptics*, vol. 10, no. 2, pp. 296-301, 2017.
- [86] 橋本芳樹, 他, "超音波を利用した非接触搬送技術," *精密工学会誌*, vol. 63, no. 7, pp. 947-950, 1997.
- [87] E. Mallinckrodt, A. Hughes and W. Sleator, "Perception by the Skin of Electrically Induced Vibrations," *Science*, vol. 118, no. 3062, p. 277–278, 1953.
- [88] H. Tang, D. J. Beebe, "A Microfabricated Electrostatic Haptic Display for persons with Visual Impairments," *IEEE Rehabilitation Engineering*, vol. 6, no. 3, pp. 241-248, Sep. 1998.
- [89] O. Bau, I. Poupyrev, A. Israr, C. Harrison, "TeslaTouch: Electro-vibration for Touch Surfaces," *UIST 2010: ACM*, pp. 283-292, 2010.
- [90] Zoran Radivojevic, Paul Beecher, Chris Bower, Darryl Cotton, Samiul Haque, Piers Andrew, Brian Henson, Steven A. Wall, Ian S. Howard, James N. Ingram, Daniel M. Wolpert, Piers Andrew, Antti Salo, Tom Xue, "Programmable Electrostatic Surface for Tactile Perceptions," *SID 2012 Digest, 31.1*, pp. 407-410, 2012.
- [91] T Nakamura, A Yamamoto, "A multi-user surface visuo-haptic display using electrostatic friction modulation and capacitive-type position sensing," *IEEE Transactions on Haptics*, vol. 9, no. 3, p. 311–322, July–September 2016.
- [92] Ki Duk Kim, Yongkyun Choi, Seung Hwan Yoon, Jeonggoo Kang, Heewon Kim, Jeha Ryu, "An Electrostatic Haptic Display with a Projected Capacitive Touch Screen," *SID 2016 Digest, 39-3*, pp. 506-509, 2016.
- [93] H. Haga, K. Yoshinaga, J. Yanase, D. Sugimoto, K. Takatori, H. Asada, "Electrostatic Tactile Display Using Beat Phenomenon of Voltage Waveforms," *SID 2014 Digest, 43.3*,

- p. 623–626, 2014.
- [94] G. Ilkhani, E. Samur, "Creating multi-touch haptic feedback on an electrostatic tactile display," *IEEE Haptics Symposium (HAPTICS), San Francisco, CA*, pp. 163-168, 2018.
 - [95] Nate Saal, "Microfluidic Technology Enables New User Interface," *Information Display*, vol. 28, no. 10, pp. 6-9, 2012.
 - [96] Charles Hudin, Jose Lozada, Vincent Hayward, "Localized Tactile Feedback on a Transparent Surface through Time-Reversal Wave Focusing," *IEEE TRANSACTIONS ON HAPTICS*, vol. 8, no. 2, pp. 188-198, 2015.
 - [97] S. Wöckel, U. Steinmann, H. Arndt, "Haptics by time reversal of elastic waves," *2016 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS)*, pp. 1-3, 2016.
 - [98] L. Pantera and C. Hudin, "Sparse Actuator Array Combined with Inverse Filter for Multitouch Vibrotactile Stimulation," *2019 IEEE World Haptics Conference (WHC)*, pp. 19-24, 2019.
 - [99] L. Pantera and C. Hudin, "Multitouch Vibrotactile Feedback on a Tactile Screen by the Inverse Filter Technique: Vibration Amplitude and Spatial Resolution," *IEEE Transactions on Haptics*, vol. 13, no. 3, pp. 493-503, 2020.
 - [100] S. E. Emgin, A. Aghakhani, T. M. Sezgin and C. Basdogan, "HapTable: An Interactive Tabletop Providing Online Haptic Feedback for Touch Gestures," *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, vol. 25, no. 9, pp. 2749-2762, 2019.
 - [101] H. Kajimoto, "Skeletouch: Transparent Electro-Tactile Display for Mobile Surfaces," *SIGGRAPH Asia 2012*, 2012.
 - [102] H. Haga, K. Yoshinaga, J. Yanase, D. Sugimoto, K. Takatori, H. Asada, "Electrostatic Tactile Display Using Beat Phenomenon for Stimulus Localization," *IEICE Transactions on Electronics*, Vols. E98-C, no. 11, p. 1008–1014, 2015.
 - [103] Susan J. Lederman and Roberta L. Klatzky, "Hand movements: A window into haptic object recognition," *Cognitive Psychology*, vol. 19, pp. 342-368, 1987.
 - [104] 宮崎善郎, "視覚障害児の図形認知と空間表象に関する研究I," *岡山大学大学院教育学研究科研究集録*, vol. 174, pp. 37-44, 2020.
 - [105] 中谷健司, "静電容量タッチインタフェース," *映像情報メディア学会誌*, vol. 68, no. 11, pp. 868-873, 2014.
 - [106] Gary Barrett and Ryomei Omote, "Projected-capacitive touch technology," *Information Display*, vol. 26, pp. 16-21, 2010.
 - [107] "<https://www.renesas.com/jp/ja/application/key-technology/hmi/2nd-generation-capacitive-touch-sensor-system>".

- [108] Tony Gray, "White paper," *Ocular LCD, Inc., 2010*, http://www.ocularlcd.com/library/papers/pcap_touch_technology.pdf.
- [109] Jaehun Jun, Yongwoo Choi, Hongju Lee, Hyeongwon Kang, Myungho Shin, Juneyoun Hwang, Hyunkyu Park, Kyungjin Jang, Jongsang Baek, "43-inch UHD Digital Kiosk System Using Advanced In-Cell Touch Technology," *SID 2018 Digest, 69.1*, pp. 914-917, 2018.
- [110] Wei Xue, Jian Tao, Lei Lv, Zhifu Dong, Silin Feng, Dong Wang, Hongmin Li, Xianjie Shao, Junsheng Chen, Seungkyu Lee, "Overcoming an Abnormal Horizontal Dim Lines of an In-cell Touch Display," *SID 2018 Digest, 69.2*, pp. 918-921, 2018.
- [111] Masayuki Hata, Kohei Tanaka, Takuya Watanabe, Mikihiro Noma, Akira Tagawa, Keisuke Yoshida, Kaoru Yamamoto, Kosuke Nagata, Shinichi Miyazaki, Daiji Kitagawa, "Development of Middle Size Full In-Cell LCD Module for PC with IGZO," *SID 2018 Digest, 69.3*, pp. 922-925, 2018.
- [112] Yin-long Zhang, Yan-ping Liao, Zhao-yu Peng, Dong-chuan Chen, Guo-huo Su, Qiu-jie Su, Xi-bin Shao, "Driving Technology of Super Large Full In Cell Touch LCD," *SID2022 Digest, P-100*, pp. 1404-1407, 2022.
- [113] Feng Lu, Zhe Li, Zihan Zhou, Jing Zhang, Qijun Yao, Yuan Ding, Yung-Sheng Lu, Jui-Chuan Chuang, Chien-Chuan Chen, "Integrated Self-Capacitance Touch Panel for Flexible OLED Display," *SID 2022 Digest, 17.2*, pp. 182-185, 2022.
- [114] Yasemin Vardar, Burak Güçlü, Cagatay Basdogan, "Effect of Waveform on Tactile Perception by Electrovibration Displayed on Touch Screens," *IEEE Transactions on Haptics*, 第 卷 10, 第 4, pp. 488-499, 2017.
- [115] 藤原修, 井川隆規, "表面電荷法を用いた人体容量の数値計算," *電子情報通信学会論文誌 B, 通信*, Vols. J84-B, no. 10, pp. 1841-1847, 2001.
- [116] 藤江明雄, "半導体分野の ESD(静電気放電)に関わる諸問題(ESD(Electro Static Discharge)静電気放電)," *日本信頼性学会誌*, vol. 35, no. 6, pp. 342-349, 2013.
- [117] Yuhei Morimoto, Ryota Yoneda, Reiji Hattori, "Skin Resistance Measurement using Static Capacitive Touch Panel," *SID2015 Digest, P-146*, pp. 1744-1747, 2015.
- [118] 芳賀浩史, "オンセル型タッチ・パネルのノイズ対策技術," *月刊ディスプレイ '13 7月号*, pp. 78-85, 2013.
- [119] 下条誠, "触覚のセンシングとディスプレイ," *電気学会論文誌 E*, Vols. 122-E, no. 10, pp. 465-468, 2002.
- [120] 岡本正吾, "触覚提示デバイスに何ができるのか? 触覚フィードバック機能付きタッチパネルのための価値あるコンテンツ," *映像情報メディア学会誌*, vol. 72,

no. 7, pp. 515-520, 2018.

- [121] "<https://www.itl.nist.gov/div898/handbook/prc/section4/prc472.htm>".
- [122] S. Nagasawa, "Improvement of the Scheffé's Method for Paired Comparisons," *KANSEI Engineering International*, vol. 3, no. 3, pp. 47-56, 2002.
- [123] B. T. Gleeson, S. K. Horschel, W. R. Provancher, "Perception of Direction for Applied Tangential Skin Displacement: Effects of Speed, Displacement, and Repetition," *IEEE Transactions on Haptics*, vol. 3, no. 3, p. 177–188, Jul.–Sep. 2010 .
- [124] I. Birznieks, P. Jenmalm, A. W. Goodwin, R. S. Johansson, "Encoding of Direction of Fingertip Forces by Human Tactile Afferents," *The Journal of Neuroscience*, vol. 20, no. 21, p. 8222–8237, Oct. 2001.
- [125] N. Nakazawa, R. Ikeura, H. Inooka, "Characteristics of human fingertips in the shearing direction," *Biol. Cybern.*, Vols. 82, 2000, p. 207–214, Feb. 2000.
- [126] 佐藤克成, 川上直樹, 舘障, "指固定状態における筋活動と力知覚の関連性," *ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, 2A2-J12*, pp. 2A2-J12(1)-2A2-J12(3), 2009.
- [127] Kim K, Jeong JH, Cho JH, Kim S, Kang J, Ryu J, Lee SW, "Development of a Human-Display Interface with Vibrotactile Feedback for Real-World Assistive Applications," *Sensors*, vol. 592, p. 21, 2021.
- [128] Stacy Wu, "Automotive display design and technology trends," *Digest of THE 29th INTERNATIONAL WORKSHOP ON ACTIVE-MATRIX FLATPANEL DISPLAYS AND DEVICES, AMFPD '22 Digest, SS2_1*, pp. 37-39, 2022.
- [129] H. Haga et al, "A 10.4-in. On-Cell Touch-Panel LCD with Correlated Noise Subtraction Method," *SID 2012 Digest*, pp. 489-492, 2012.
- [130] H. Haga, D. Sugimoto, Y. Yang, H. Sasaki, T. Asai, K. Shigemura, "Capacitive Touchscreen Integrated Electrostatic Tactile Display with Localized Sensation," *J Soc Inf Display*, vol. 27, pp. 59-71, 2019.
- [131] Hiroshi Haga, Daisuke Sugimoto, Yiping Yang, Harue Sasaki, Takuya Asai, Koji Shigemura, "Capacitive touchscreen-integrated electrostatic tactile display with localized sensation," *J Soc Inf Display*, vol. 27(2), p. 59–71, 2019.
- [132] Hiroshi Haga, Daisuke Sugimoto, Yiping Yang, Harue Sasaki, Hideki Asada, Koji Shigemura, "Capacitive Touchscreen Integrated Electrostatic Tactile Display with Localized Sensation," *SID 2018 Digest*, 83.3, p. 1127–1130, 2018.
- [133] Seunghoon Ko, et al, "Low noise capacitive sensor for multi-touch mobile handset's applications," *Solid State Circuits Conference (A-SSCC), 2010 IEEE Asian*, 2010.

謝辞

本研究の遂行に際し、多くの方々のご協力とご支援を賜りました。この場をお借りして感謝を申し上げます。

山本裕紹教授には本研究のご指導をお引き受け下さり、こころより感謝申し上げます。先生の広く深いご見識のもとでご指導を頂くたびに、課題が明確になり、あるいは課題解決に向けた研究手法が明確になり、時には思いがけない応用に発展し、広い視野で研究を進めることができました。主観評価実験に際しては、数ある手法の中から最適な手法をご提案いただき円滑に研究を推進できました。博士課程への進学に際しお力添えを賜りました。心から感謝申し上げます。本論文の副査をお引き受けいただいた石川智治教授には本論文のまとめ方や記載すべき事項、また触覚ディスプレイについての多くの具体的なご指導とご指摘を頂きました。心から感謝申し上げます。玉田洋介准教授には、本論文に関する多くの質疑を通して本論文のまとめ方のご指導を頂きました。心から感謝申し上げます。杉原興浩教授には副専門研修にて圧電薄膜材料について課題としてご指導を頂きました。本研修を通して知識を深めまた整理することができました。また本論文の資格審査と予備審査において多くのご指導を頂きました。心から感謝申し上げます。大谷幸利教授には副専門研修にて液晶の偏光計算について課題としてご指導を頂きました。研究開発業務で実際に扱う偏光計算の理解を深めることができました。また本論文の資格審査と予備審査において多くのご指導を頂きました。心から感謝申し上げます。

本研究は、私が日本電気株式会社、NLTテクノロジー株式会社、Tianma Japan 株式会社 在職中の研究開発活動をまとめたものであり、非常に多くの方々のご支援とご協力に支えられております。こころより感謝申し上げます。Tianma Japan 株式会社の浅田秀樹氏は、私の入社当初より、ポリシリコン TFT 集積回路やその応用デバイスの研究に関し、数多くのご指導と親身なご助言を下さいました。感謝申し上げます。重村幸治氏は本研究の過程において、長年にわたり多くの議論とご指導ご鞭撻をくださいました。さらに、博士課程への進学についてご了解を下さいますと共に、社内のサポート体制を構築して下さいました。こころより感謝申し上げます。高取憲一氏は長年にわたり、技術的な議論とご指導ご鞭撻をくださいました。こころより感謝申し上げます。

吉永一秀氏には静電触覚ディスプレイの電極基板の設計、試作、評価を行うための指導をしてくださいましたことに感謝申し上げます。佐々木晴江氏、竹内伸氏、柳瀬慈郎氏、浅井卓也氏、杉本大輔氏、楊一平氏には、共同研究者として触覚ディスプレイの設計、試作、評価において多くの協力を頂きました。感謝申し上げます。

山本研究室研究員の藤井賢吾氏には触覚の主観評価実験に関し、装置の作製、実験の実施、データ整理で多くの協力を頂きました。感謝いたします。山本研究室の学生の皆様には触覚の主観評価実験で多くの協力を頂きました。堀江ひとみ氏、小野瀬翔氏、安

達真由氏に感謝いたします。

神奈川県立川崎図書館と川崎市立中原図書館からは、参考となる多くの図書の貸出と参考文献の取寄せなどのレファレンスサービスを受けました。また、調査研究の場の提供を受けました。感謝いたします。

支え続けてくれた家族に感謝します。

研究業績

A. 査読付き原著論文

1. “A 510-kb SOG-DRAM for Mobile Displays with Embedded Frame Memories,”
Hiroshi Haga, Yoshihiro Nonaka, Youichiro Kamon, Tomohiko Otose, Daigo Sasaki,
Youichi Kitagishi, Tadahiro Matsuzaki, Yoshinobu Satou, Hideki Asada,
Journal of the Society for Information Display, vol.14, issue4, pp. 339-344, (2006).
2. “Electrostatic Tactile Display Using Beat Phenomenon for Stimulus Localization,”
Hiroshi Haga, Kazuhide Yoshinaga, Jiro Yanase, Daisuke Sugimoto, Kenichi Takatori,
Hideki Asada,
IEICE TRANSACTIONS on Electronics Volume E98-C No.11, pp.1008-1014, (2015).
3. “Capacitive touchscreen-integrated electrostatic tactile display with localized sensation,”
Hiroshi Haga, Daisuke Sugimoto, Yiping Yang, Harue Sasaki, Takuya Asai, Koji
Shigemura,
Journal of the Society for Information Display, vol.27, pp.59–71, (2019).
4. “Tactile Touch Display using Segmented-electrode Array with Tactile Strength Stabilization,”
Hiroshi Haga, Takuya Asai, Shin Takeuchi, Harue Sasaki, Hirotsugu Yamamoto, Koji
Shigemura,
IEICE TRANSACTIONS on Electronics Volume E104-C No.2, pp. 64-72, (2021).
5. “Effects of Directions of Lateral Motion on Perceived Strength in Fingertip,”
Hiroshi Haga, Harue Sasaki, Kengo Fujii, Sho Onose, Hirotsugu Yamamoto,
Koji Shigemura,
ITE Transactions on Media Technology and Applications (Accepted. To be published
in April, 2023).

B. 受賞

1. 1999年 電子情報通信学会 学術奨励賞
2. 2017年 24th International Display Workshops (IDW'17) Best Paper Award

C. 国際学会発表

1. "Compact Imaging Apparatus for a Pen-Shaped Handheld Scanner,"
Hiroshi Haga, Ichiro Fujieda, Fujio Okumura,
Proc. SPIE 3019, Solid State Sensor Arrays: Development and Applications, pp.168-173, (1997).
2. "A Parallel Digital-Data-Driver Architecture for Low-Power Poly-Si TFT-LCDs,"
Hiroshi Haga, Hiroshi Tsuchi, Katsumi Abe, Naoyasu Ikeda, Hideki Asada, Hiroshi Hayama, Kunihiro Shiota, Naruaki Takada,
SID 2002 Digest, 16.2, pp.690-693 (2002).
3. "A 510Kb SOG-DRAM for Frame-Memory-Integrated Displays,"
Hiroshi Haga, Yoshihiro Nonaka, Youichi Kitagishi, Youichiro Kamon, Tadahiro Matsuzaki, Yoshinobu Sato, Hideki Asada,
SID 2005 Digest, 24.4, pp.1106-1109, (2005).
4. "510-Kb SOG-DRAM for Frame-Memory-Integrated Displays,"
Hiroshi Haga, Tomohiko Otose, Yoshihiro Nonaka, Daigo Sasaki, Youichiro Kamon, Youichi Kitagishi, Tadahiro Matsuzaki, Yoshinobu Satou, Hideki Asada,
IDW/AD '05 Digest, AMD11-1, pp.1015-1018, (2005).
5. "A 510-kb SOG-DRAM for Displays with Embedded Frame Memories,"
Hiroshi Haga, Yoshihiro Nonaka, Tomohiko Otose, Hideki Asada,
AM-FPD 06 Digest, S-2, pp.65-68, (2006).
6. "DRAM-Frame-Memory Embedded SOG-LCD,"
Hiroshi Haga, Yoshihiro Nonaka, Youichiro Kamon, Youichi Kitagishi, Masayuki Jomonji, Kenichi Takatori, Hideki Asada,
SID 2007 Digest, 46.3, pp.1486-1489, (2007).
7. "Touch Panel Embedded LCD using Conductive Overlay,"
Hiroshi Haga, Jiro Yanase, Youichiro Kamon, Youichi Kitagishi, Kenichi Takatori, Hideki Asada, Setsuo Kaneko,
IDW'09 Digest, INP2-5, pp.2143-2146, (2009).
8. "Touch Panel Embedded IPS-LCD with Parasitic Current Reduction Technique,"
Hiroshi Haga, Jiro Yanase, Youichiro Kamon, Kenichi Takatori, Hideki Asada, Setsuo Kaneko,
SID 2010 Digest, 45.1, pp.669-672 (2010).
9. "A 10.4-in. On-Cell Touch-Panel LCD with Correlated Noise Subtraction Method,"
Hiroshi Haga, Jiro Yanase, Yoshihiro Nonaka, Daisuke Sugimoto, Kenichi Takatori, Hideki Asada,

- SID 2012 Digest, 37.2, pp.489-492, (2012).
10. “Electrostatic Tactile Display Using Beat Phenomenon of Voltage Waveforms,”
Hiroshi Haga, Kazuhide Yoshinaga, Jiro Yanase, Daisuke Sugimoto, Kenichi Takatori, Hideki Asada,
SID 2014 Digest, pp.623–626, (2014).
 11. “Electrostatic Tactile Display for Stimulus Localization,”
Hiroshi Haga, Kazuhide Yoshinaga, Jiro Yanase, Daisuke Sugimoto, Kenichi Takatori, Hideki Asada,
IDW'14, INP2-1, pp.1525-1528, (2014).
 12. “Electrostatic Tactile Display with Localized Multiple Sensations,”
Hiroshi Haga,
ICDT2017, S51.2, pp.96-97, (2017).
 13. “Electrostatic Tactile Display Integrated with a Projected Capacitive Touch Screen,”
Hiroshi Haga, Daisuke Sugimoto, Yiping Yang, Koji Shigemura,
IDW'17 Digest, HAP2/INP4-1, pp.84–87, (2017).
 14. “Capacitive Touch Screen Integrated Electrostatic Tactile Display with Localized Sensation,”
Hiroshi Haga, Daisuke Sugimoto, Yiping Yang, Harue Sasaki, Hideki Asada, Koji Shigemura,
SID 2018 Digest, 83-3, pp.1127-1130, (2018).
 15. “Touchscreen for Eyes-free interaction Utilizing Electrostatic Force, Lateral Motion, and a Force Sensor,”
Hiroshi Haga, Harue Sasaki, Takuya Asai, Yiping Yang, Koji Shigemura,
SID 2019 Digest, 21-3, pp.291–294, (2019).

D. 国内学会発表

1. “小型イメージセンサと携帯型スキャナへの応用,”
芳賀浩史, 藤枝一郎, 奥村藤男,
電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集 1997 p.141, (1997年8月).
2. “単一ファイバーイメージング(SOFI)による携帯型カラーレスキャナ,”
芳賀浩史, 藤枝一郎, 奥村藤男, 松本康義, 小橋広志, 松尾浩, 三浦重喜,
電子情報通信学会総合大会講演論文集 1998 (2), p.90, (1998年3月).
3. “200/400dpiフォトダイオードアレイを集積した低温poly-Si TFT駆動回路一体型イ

メージセンサ,”

芳賀浩史, 藤枝一郎, 奥村藤男,

電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集 1999 (2), C-11-7, p.70, (1999 年 8 月).

4. “オンセル型タッチ・パネルのノイズ対策技術,”

芳賀浩史,

電子情報通信学会 電子ディスプレイ研究会 CEATEC 電子ディスプレイシンポジウム「タッチパネルのすべて」, (2013 年 10 日).

E. 特許

1. 情報入力装置

芳賀浩史, 藤枝一郎, 奥村藤男

特許第 2803608 号

1998.07.17

2. 回転検出装置

芳賀浩史, 奥村藤男

特許第 2783242 号

1998.05.22

3. Manual scanning type image input device and image signal processing method using thinned out line image data

芳賀浩史

US6058224

2000.5.2

4. 密着型カラーイメージセンサ、密着型カラーイメージセンサユニット、および密着型カラーイメージセンサの製造方法

芳賀浩史

特許第 3481408 号

2003.10.10

5. 手動走査型カラー画像入力装置

芳賀浩史

特許第 3159138 号

2001.02.16

6. Semiconductor device and the manufacturing method thereof, image sensor apparatus

- comprising the same, and the image reader comprising the same
芳賀浩史, 藤枝一郎, 奥村藤男
TW454407 (B)
2001.9.11
7. Semiconductor device, method of manufacturing the same, image sensor apparatus having the same and image reader having the same
芳賀浩史, 藤枝一郎, 奥村藤男
US6407418 (B1)
2002.6.18
8. Semiconductor device, method of manufacturing the same, image sensor apparatus having the same and image reader having the same
芳賀浩史, 藤枝一郎, 奥村藤男
US6583456 (B2)
2003.6.24
9. 半導体装置、製造方法及びそれを用いたイメージセンサ装置
芳賀浩史, 奥村藤男
特許第 3714025 号
2005.09.02
10. 半導体装置及びそれを用いたイメージセンサ装置
芳賀浩史, 奥村藤男
特許第 4525451 号
2010.06.11
11. サンプリングレベル変換回路と 2 相及び多相展開回路並びに表示装置
芳賀浩史
特許第 3758545 号
2006.01.13
12. Sampling level converter circuit, 2-phase and multiphase expanding circuit, and display device
Hiroshi Haga
US7006068 (B2)
2006.2.28
13. Sampling level converter circuit, 2-phase and multiphase expanding circuit, and display device
芳賀浩史 CN1295875 (c)

- 2007.1.17
14. 表示装置
芳賀浩史, 高取憲一, 浅田秀樹
特許第 5259904 号
2013.05.02
 15. 表示装置及び半導体装置
芳賀浩史, 高取憲一, 浅田秀樹
特許第 5389507 号
2013.10.18
 16. Display device and semiconductor device
Hiroshi Haga, Kenichi Takatori, Hideki Asada
US7259740 (B2)
2007.8.21
 17. Display device and semiconductor device
Hiroshi Haga, Kenichi Takatori, Hideki Asada
US8035132 (B2)
2011.10.11
 18. 显示装置
芳賀浩史, 高取憲一, 浅田秀樹
CN100437717 (c)
2008.11.26
 19. 半導体装置、回路、これらを用いた表示装置、及びこれらの駆動方法
芳賀浩史, 音瀬智彦, 浅田秀樹, 野中義弘, 是成貴弘, 高取憲一
特許第 4882322 号
2011.12.16
 20. センスアンプ回路、半導体装置及び表示装置
芳賀浩史, 音瀬智彦, 浅田秀樹, 野中義弘, 是成貴弘, 高取憲一
特許第 5389098 号
2013.10.18
 21. 半导体器件、使用该器件的电路和显示设备及其驱动方法
芳賀浩史, 音瀬智彦, 浅田秀樹, 野中義弘, 是成貴弘, 高取憲一
CN100555375 (C)
2009.10.28
 22. 半导体器件、使用该器件的电路和显示设备及其驱动方法

- 芳賀浩史, 音瀬智彦, 浅田秀樹, 野中義弘, 是成貴弘, 高取憲一
CN101527133 (C)
2012.07.18
23. Semiconductor device, method for driving same, display device using same and personal digital assistant
芳賀浩史, 音瀬智彦, 浅田秀樹, 野中義弘, 是成貴弘, 高取憲一
US8681084 (B2)
2014.03.25
24. 表示装置
芳賀浩史, 浅田秀樹, 金子節夫
特許第 5299730 号
2013.06.28
25. 显示装置
芳賀浩史, 浅田秀樹, 金子節夫
CN101162307 (B)
2014.2.26
26. 显示装置
芳賀浩史, 浅田秀樹, 金子節夫
CN101944316 (B)
2013.3.27
27. 显示装置
芳賀浩史, 浅田秀樹, 金子節夫
CN103794163 (B)
2017.4.12
28. 显示装置
芳賀浩史, 浅田秀樹, 金子節夫
CN103794164 (B)
2016.8.17
29. TFT display device including unit circuits, pixel circuits and a display element
Hiroshi Haga, Hideki Asada, Setsuo Kaneko
US10008165 (B2)
2018.6.26
30. Surface display device with a non-rectangular display surface shape and electronic device including same

Hiroshi Haga, Hideki Asada, Setsuo Kaneko

US10235954 (B2)

2019.3.19

31. Surface display device with a non-rectangular display surface shape and electronic device including same

Hiroshi Haga, Hideki Asada, Setsuo Kaneko

US10453408 (B2)

2019.10.22

32. Surface display device of an arbitrary shape

Hiroshi Haga, Hideki Asada, Setsuo Kaneko

US8773344 (B2)

2014.7.8

33. Display device, and electronic device and ornamental product incorporating same

Hiroshi Haga, Hideki Asada, Setsuo Kaneko

US9097942 (B2)

2015.8.4

34. 表示装置

芳賀浩史, 浅田秀樹, 金子節夫

特許第 5610407 号

2014.9.12

35. 表示装置

芳賀浩史, 浅田秀樹, 金子節夫

特許第 5870412 号

2016.1.22

36. 表示装置

芳賀浩史, 浅田秀樹, 金子節夫

特許第 6260973 号

2017.12.22

37. 面表示装置及び電子機器

芳賀浩史

特許第 5380723 号

2013.10.11

38. 面表示装置及び電子機器

芳賀浩史

- 特許第 5386623 号
2013.10.11
39. 面表示装置及び電子機器
芳賀浩史
特許第 5729621 号
2015.04.17
40. 面表示装置及び電子機器
芳賀浩史
特許第 5850350 号
2015.12.11
41. Flat-panel display device and electronic apparatus
Hiroshi Haga
US8928620 (B2)
2015.1.6
42. 面显示装置及电子设备
芳賀浩史
CN101364157 (B)
2013.8.21
43. 面显示装置及电子设备
芳賀浩史
CN102902409 (B)
2015.9.2
44. 面显示装置及电子设备
芳賀浩史
CN103123561 (B)
2017.6.20
45. 面显示装置及电子设备
芳賀浩史
CN103472942 (B)
2016.12.28
46. 表示装置及び表示装置の駆動方法
芳賀浩史, 柳瀬慈郎, 北岸洋一
特許第 5372630 号
2013.09.27

47. 表示装置及び表示装置の駆動方法
芳賀浩史, 柳瀬慈郎, 北岸洋一
特許第 5601553 号
2014.08.29
48. Display and method for driving the display
Hiroshi Haga, Jiro Yanase, Yoichi Kitagishi
US8477105 (B2)
2013.9.27
49. Display and method for driving the display
Hiroshi Haga, Jiro Yanase, Yoichi Kitagishi
US8659573 (B2)
2014.2.25
50. Display and method for driving the display
Hiroshi Haga, Jiro Yanase, Yoichi Kitagishi
US8803838 (B2)
2014.8.12
51. 显示装置及显示装置的驱动方法
芳賀浩史, 柳瀬慈郎, 北岸洋一
CN101630081 (B)
2015.1.7
52. 走査線駆動回路、表示装置及び走査線駆動方法
芳賀浩史, 北岸洋一
特許第 5540430 号
2014.05.16
53. Scanning line driving circuit, display device, and scanning line driving method
Hiroshi Haga, Yoichi Kitagishi
US8421737 (B2)
2013.4.16
54. Scanning line driving circuit, display device, and scanning line driving method
Hiroshi Haga, Yoichi Kitagishi
US8884865 (B2)
2014.11.11
55. 扫描线驱动电路、显示装置以及扫描线驱动方法

- 芳賀浩史, 北岸洋一
CN101866606 (B)
2014.4.16
56. 扫描线驱动电路和显示装置
芳賀浩史, 北岸洋一
CN103915075 (B)
2017.06.09
57. 電子機器、静電容量センサ及びタッチパネル
芳賀浩史, 浅田秀樹
特許第 5823523 号
2015.10.16
58. 電子機器、静電容量センサ及びタッチパネル
芳賀浩史, 浅田秀樹
特許第 6023301 号
2016.10.14
59. 電子機器、静電容量センサ及びタッチパネル
芳賀浩史, 浅田秀樹
特許第 6296307 号
2018.3.2
60. Electronic device, electrostatic capacitance sensor and touch panel
Hiroshi Haga, Hideki Asada
US10330766 (B2)
2019.6.25
61. 电子设备、静电电容传感器和触摸面板
芳賀浩史, 浅田秀樹
CN103765354 (B)
2017.3.15
62. 電子機器、静電容量センサ及びタッチパネル
芳賀浩史, 浅田秀樹, 杉本大輔
特許第 6298764 号
201803.02
63. 電子機器、静電容量センサ及びタッチパネル
芳賀浩史, 浅田秀樹, 杉本大輔
特許第 6436374 号

- 2018.11.22
64. Electronic device, electrostatic capacitance sensor and touch panel
Hiroshi Haga, Hideki Asada, Daisuke Sugimoto
US9529473 (B2)
2016.12.27
65. Electronic device, electrostatic capacitance sensor and touch panel
Hiroshi Haga, Hideki Asada, Daisuke Sugimoto
US10126875 (B2)
2018.11.13
66. 电子设备、静电电容传感器和触摸面板
芳贺浩史, 浅田秀树, 杉本大辅
CN104718702 (B)
2018.2.16
67. 电子设备、静电电容传感器和触摸面板
芳贺浩史, 浅田秀树, 杉本大辅
CN108111158 (B)
2021.7.13
68. 触觉提示装置、電子機器、および触觉提示方法
芳贺浩史, 柳瀬慈郎, 杉本大輔
特許第 6327466 号
201804.27
69. Tactile sense presentation device, electronic apparatus, and tactile sense presentation method
Hiroshi Haga, Jiro Yanase, Daisuke Sugimoto
US9513708 (B2)
2016.12.6
70. Tactile sense presentation device, mobile unit including same, and tactile sense presentation method
Hiroshi Haga, Jiro Yanase, Daisuke Sugimoto
US10088905 (B2)
2018.10.2
71. Tactile sense presentation device
Hiroshi Haga, Jiro Yanase, Daisuke Sugimoto

- US10289202 (B2)
2019.5.14
72. 触觉提示装置、电子设备和触觉提示方法
芳贺浩史, 柳瀬慈郎, 杉本大辅
CN104571685 (B)
2018.9.25
73. ディスプレイ装置および電子機器
芳贺浩史, 中西太, 池田直康
特許第 6555608 号
2019.07.19
74. Display device and electronic apparatus
Hiroshi Haga, Futoshi Nakanishi, Naoyasu Ikeda
US9785239 (B2)
2017.10.10
75. 显示装置及电子设备
芳贺浩史, 中西太, 池田直康
CN105654851 (B)
2019.10.1
76. 電子機器、電子機器の操作制御方法および操作制御プログラム
芳贺浩史, 山口雄司
特許第 6654743 号
2020.02.04
77. Electronic apparatus and electronic apparatus operation control method
Hiroshi Haga, Yuji Yamaguchi
US11275440 (B2)
2022.3.15
78. 电子装置和电子装置的操作控制方法
芳贺浩史, 山口雄司
CN105589594 (B)
2019.12.31
79. 触觉提示装置及び電子機器並びに触觉提示装置の駆動方法
芳贺浩史, 杉本大輔
特許第 6693641 号
2020.04.20

80. Tactile sense presentation device, electronic apparatus, and method of driving tactile sense presentation device
Hiroshi Haga, Daisuke Sugimoto
US10627905
2020.4.21
81. 触觉提示装置、电子设备及触觉提示装置的驱动方法
芳贺浩史, 杉本大辅
CN106020576 (B)
2020.9.15
82. 触觉提示装置及び制御方法
芳賀浩史, 杉本大輔
特許 7036310 号
2022.3.7
83. Tactile presentation device and control method
Hiroshi Haga, Daisuke Sugimoto
US10908688
2021.2.2
84. Tactile presentation device and control method
Hiroshi Haga, Daisuke Sugimoto
US11353961
2022.6.7
85. 触觉提示装置及控制方法
芳贺浩史, 杉本大辅
CN107977140
2022.5.3
86. Touch panel and touch panel device
Hiroshi Haga, Daisuke Sugimoto
US10802655 (B2)
2020.10.13
87. Touch panel and touch panel device
Hiroshi Haga, Daisuke Sugimoto
US11169643 (B2)
2021.11.9
88. Tactile presentation device

Harue Sasaki, Hiroshi Haga, Koji Shigemura, Hirotsugu Yamamoto

US10908693

2021.2.2

89. Tactile presentation device

Harue Sasaki, Hiroshi Haga, Koji Shigemura, Hirotsugu Yamamoto

US11334167

2021.5.17

90. Device to enable touchless operation

Hiroshi Haga, Koji Shigemura, Hirotsugu Yamamoto

US11550423

2023.1.10

(以上)