

博士論文（要約）

静電吸着を活用した  
大画面上でのマルチユーザ力覚提示システム

中村 琢

## 序論

近年急速に普及する大画面マルチタッチインタフェースにおいて、多点入力に対する力覚提示機能付与への要求が高まっている。大画面マルチタッチインタフェースは、直観的なタッチ操作を介して複数人が同時に入力操作できるという特長を活かして、ビジネスシーンや医療シミュレータ、インタラクティブゲームなど多様な応用が期待されている。しかし、現状の入力操作に対するフィードバックは視覚（映像）提示と聴覚（音）提示のみで、力覚（指先にかかる対象物からの反力）提示が欠落しており、タッチを介したインタフェースの利点を活かしきれていない。

画面上で力覚提示を実現する手法として、リンク機構やワイヤ機構、リニア誘導モータを用いて提示子を駆動させることでアクティブに力覚を提示する手法や、提示子内蔵の車輪を操舵して操作方向を制限することでパッシブに力覚を提示する手法が提案されている。これらの提示装置は基本的にシングルタッチを前提として設計されており、提示機構の干渉や比較的大型で複雑な装置構成から、大画面上での多点提示には課題がある。すなわち、多点化が容易な簡易構成での力覚提示システムの実現が要求されている。

本研究では、上述の要求から、複数提示子にかかる静電吸着の活用に着目し、大画面上でのマルチユーザ力覚提示システムを構築する。本システムは、互いに絶縁した対向電極にかかる静電吸着力により提示子にかかる摩擦力を制御することで、操作者の動作に対する抵抗力を用いたパッシブな力覚提示を行う。画面上に配置する要素は透明ベタ電極と複数提示子のみで、大画面多点提示に適した簡易な構成である。また、対向電極間ギャップを $\mu\text{m}$ オーダーとすることで、指先へNオーダーの比較的大きな提示力を実現できる。

静電吸着を用いた力覚提示では、提示力（静電吸着による摩擦力変化）をインタラクションに応じて多様なプロファイルに制御する必要性から、静電吸着の動的応答制御が重要となる。静電吸着は、古くはシリコンウェハやガラス基板の静電チャック、近年では指先への表面テクスチャ感提示、壁登りロボット、ドローン、ソフトグリップなど多分野で活用されている。しかし、基本的に単純な吸着や振動が用いられており、吸着力の動的応答制御については検討されていない。とくに制御に十分なモデルがない。そこで本研究では、画面上多点力覚提示の実現を念頭に、

- 静電吸着活用による画面上多点力覚提示のコンセプトの提案と実証
- 静電吸着の一般化モデルの提案と実証
- 静電吸着の動的応答制御手法の確立

を目的とする。

本論文は、全9章からなる。第1章の序論に続く第2章から第5章では、本研究の主題である多点静電力覚提示システムの構築について述べる。静電吸着モデルの検討とともに、提示システムの要素技術として静電容量式ビルトインセンサを構築し、これらを用いた提示力制御を実現する。第6章と第7章では、構築システムの改変による機能拡張を検討する。第8章では、将来的な展開として、提案システムの無線化に関する課題を議論する。第9章で本研究を総括する。以下、各章の要旨を述べる。

## 第2章 提案システムの基礎検討と技術課題の設定

提案システムは、提示子と画面上の、互いに絶縁された対向電極間への電圧印加で生じる静電吸着力を活用して、提示子にかかる摩擦力を変調させることで力覚提示を行う。複数提示子に異なる電圧を印加することで、画面上多点独立提示が実現する。本章では、簡易試作機により本コンセプトを実証するとともに、提案システムの技術課題を論じている。実用面での課題として、提示子摺動による摩耗への耐久性、数百Vの高電圧使用による安全性の課題を挙げ、これを解決する設計法を論じている。より本質的な力覚提示に関する課題として、位置検出のオクルージョン、パッシブ型特有の粘る壁問題、提示力の動的応答制御を挙げている。とくに提示力の動的応答に関しては、静電吸着の簡易モデルである平行平板コンデンサモデルには従わず、直流電圧印加時の発生力減衰という電氣的応答と、電極間ギャップ変動による静的・動的な発生力の変化という機械的応答が大きく影響することを実験から明らかにしている。

## 第3章 提示力制御に向けた静電吸着のモデル化

本章では、提示力制御に向けて、第2章の実験結果を説明可能な、静電吸着の電氣的応答と機械的応答を考慮した静電吸着モデルを検討している。直流における発生力の増大を説明するJohnsen-Rahbekモデルを基に、提案システムにおける発生力の減衰を説明し得る可能性を検討するとともに、ギャップ変動を考慮したモデルを構築している。具体的には、電極間の絶縁体と電極変形に伴う空隙を、絶縁層と空隙層からなる二層誘電体でモデル化している。空隙層の導電現象として静電吸着の接触に伴う電荷緩和を仮定し、界面電荷の蓄積を考慮することで、直流における吸着力の減衰と増大の両方を説明し、交流においては単純なコンデンサモデルに一致することを示している。また、空隙層のギャップ変動を仮定することで、実際の静電吸着応答をよく説明できることを示している。以上を考慮し、静電吸着力の制御がギャップ変動の検出と提案モデルの逆モデルから実現する可能性を示している。

## 第4章 多点静電力覚提示のためのビルトインセンサシステムの構築

提案システムは、画面内の映像と同期した力覚提示を行うために、複数提示子の位置検出が不可欠である。また、前章までの検討から、提示力制御に向けたギャップ検出を行える必要がある。さらに、静電吸着の簡易性を阻害しない構成で、多点検出のオクルージョンや干渉のない検出システムが要求される。

本章では、これらの要求を満たすセンサシステムとして、表面型静電容量式タッチパネルの技術を援用し、静電吸着機構と共通の構成要素を活用したビルトインセンサを提案している。簡易構成でありながら、各提示子の位置と電極間ギャップを同時・独立に多点で測定できる。本章では、本ビルトインセンサに特有の、多点検出と静電吸着統合による干渉について論じ、非干渉条件および干渉時の力覚提示への影響を明らかにしている。また、試作機の構築とインタラクティブゲームの実装を通し、提案システムによる大画面上多点力覚提示の有用性を示している。

## 第5章 ビルトインセンサによる提示力制御

本章では、第3章の提案モデルと、第4章のビルトインセンサを用いた提示力制御を検討している。交流・直流それぞれにおいて、ビルトインセンサで測定した電極間ギャップと提案モデルの逆モデルを考慮して印加電圧を制御することで、静電吸着力ひいては提示力の動的応答制御が実現することを示し、提案モデルの妥当性を実証している。一方で、本制御手法による提示力の精度は、摩擦係数の同定精度と、直流ではこれに加えて各層の導電率や界面電荷の同定精度に支配される。とくに直流では界面電荷蓄積の影響が大きいことから、大画面上システムでの安定した長期使用には除電手法の確立が課題となることを示している。

## 第6章 等方性ブレーキを用いたパッシブ型力覚提示

本章では、パッシブ型力覚提示システムに特有の粘る壁問題の解決を念頭に、力覚レンダリングを検討している。提案システムのような等方性ブレーキを用いたシステムにおける、物理モデルの基本要素（弾性・粘性・慣性）レンダリングの定式化を検討し、操作者の力方向検出の必要性を論ずるとともに、ビルトインセンサ拡張による粘着壁解消を提案している。具体的には、提示子電極を分割し、各電極のビルトインセンサ出力の差から操作者の力方向を推定し、これを考慮して壁面提示を行うことで、粘着感が大幅に低減することを示している。

## 第7章 硬軟感提示機能の付与

提案システムは、水平方向のなぞり動作に対する反力提示を行うが、提示子機構の改変により垂直方向の押込み動作に対する硬軟感提示機能を付与することで、より多様な画面上インタラクションの実現が期待される。指先への硬軟感提示には押込み力に応じた接触面積制御が有効であることが従来研究から示されているが、従来研究の機構は指からの押込み力に対抗して機構を駆動するため、画面上の指先大提示子に適用可能な小型機構の実現は困難である。

本章では、提示子機構を押込み力により変形する可変機構に改変し、その変形を静電吸着によるブレーキ力で制御することで、パッシブに接触面積を制御する硬軟感提示手法を提案している。機構の基本的な設計手法を示すとともに、可変の硬軟感を提示できることを示している。

## 第8章 ワイヤレスシステムの検討

提案システムは、提示子に対して機械的拘束は不要だが、電圧印加用の給電線を要する。この給電線は、画面上インタラクションを大きく阻害するものではないが、今後の展開としては完全なワイヤレス構成が望ましい。

本章では、将来的な展望として提案システムのワイヤレス化を検討している。バッテリー・電磁誘導・電界結合の3つの主要な無線給電手法の適用を検討し、LC共振の活用による多点静電力覚提示のワイヤレス化実現の可能性を示している。一方で、提示子の小型化には、容量性負荷への高周波交流印加で生じる大電流に起因する課題が存在し、共振用インダクタの小型化が望まれることを示した。

## 第9章 結論

本章では、本研究を総括し、今後の展望をまとめている。本研究は、複数提示子にかかる静電吸着を活用することで、従来にない簡易構成で画面上多点力覚提示を実現できることを示している。また、静電吸着の動的応答制御手法を確立し、力覚提示以外にも静電吸着を用いたシステム一般に対して、有用な知見を与えるものである。