

博士論文（要約）

柔軟物体が有する表面触感の
再現提示手法に関する研究

木村文信

諸言

PC 等に代表される情報機器の発展に伴い、それらが扱う情報（電子メディア・デジタルコンテンツ）の多様化が進められている。今後も多様化が進められるこれらのコンテンツを我々ユーザが享受するためには、情報とユーザの橋渡しとなるインタフェース・情報提示装置も多様化していく必要がある。実用面で見ると現状の情報提示装置は、ヒトの五感の中で視聴覚を対象としたもの（モニタ・スピーカなど）がほとんどであるが、今後の提示装置の多様化を考えると他の感覚も積極的に利用することが望ましい。そのため近年では、新しいインタフェースとして、触覚（体性感覚）を対象とした情報提示が盛んに研究されるようになってきている。

最も一般的な体性感覚への情報提示例に、仮想柔軟物体の硬さ・柔らかさ（硬軟感）を再現提示するものがある。指先で柔軟物を押し込む際、対象物に対する指先の状況（反力、変位、圧分布など）が変化する。この変化を体性感覚のうち深部感覚および皮膚感覚を用いて把握することで、ヒトは硬軟感を知覚する。深部感覚は指先の変位や反力を、皮膚感覚では指先表面の接触圧分布を把握する。この両者を比較した先行研究では、指先での硬軟感知覚には皮膚感覚が支配的であることが明らかにされている。これは、皮膚感覚で把握する接触状況のみを装置によって再現することで十分な品質の硬軟感提示が可能であることを示しており、それゆえ、皮膚感覚を刺激することで硬軟感提示を目指す研究が増えてきている。本研究も皮膚感覚刺激によって柔軟物体が有する触感を指先に対して再現提示することを主題とする。

本研究は、これまでに提案されている皮膚感覚刺激手法の一つである「接触面積制御」による硬軟感提示に着目する。この手法では、指先からの押し込み力に応じて指先の接触面積を変化させることで柔軟物体と指先の接触状況を制御し硬軟感を提示する。接触面積の制御は、薄いシート等で指先を包み込むことで実現する。本研究で用いる提示装置（硬軟感ディスプレイ）では、薄く帯状のポリイミドフィルムシートを使い、シート両端を電磁アクチュエータで持ち上げることで指先への包み込み（接触面積制御）を行う。

従来の硬軟感提示では、再現される柔軟物体が「均一な構造」をした「弾性体」に限定されていた。硬軟感提示の将来的な応用・実用を考えると、このような単純な柔軟物体では不十分であると考えられる。例えば、硬軟感提示の応用先として医療における触診などを考えると、人体に触れたときの触感を再現する必要があるが、人体は内部に骨やしこりがあるといった「不均一な構造」をしており、「粘弾性物質」で構成される。従来の硬軟感提示手法ではこのような柔軟物体（人体）が有する触感を再現することが困難である。対象が単純なものに限定されていたのは、従来手法に機構面および計算モデル面で制約が存在することに起因する。機構面での制約には、従来の硬軟感ディスプレイの多くが単一のアクチュエータによって柔軟面の再現を行っており、機構的に1自由度しか有していないことが挙げられる。また、計算モデル面での制約には、接触面積を求める際に用いる計算モデルをヘルツの接触理論をベースにしていることが挙げられる。ヘルツ理論は、均一な半無限体との静的な接触状況を表すため、上記のような不均一な粘弾性体との接触が検討されていない。

本研究では、将来的な応用（医療における触診など）を考え、従来よりも多様な硬軟感を提示可能にすることを目的とする。上記した制約を解消することで、再現できる柔軟物体の多様性向上を図る。また、具体例として（1）粘弾性物質で構成される柔軟物体、（2）厚みが有限な柔軟物体、（3）しこりを内包する柔軟物体を挙げ、それぞれの再現手法を検討する。これらの例は柔軟物体

である人体が有する基本的な特徴であり、将来的な医療応用などで必要となると考えられる触感要素であると考えられる。

本論文は全7章で構成される。第1章では、以上で述べたような本研究の背景および研究目的について述べる。第2章から第5章では、上記した多様な柔軟物体例について個別に再現する手法を検討する。第6章では個別に検討した各柔軟物体が有する触感を比較し、各手法の統合について検討する。第7章では、本論文の結論および本研究分野の今後の展望について述べる。以下では、各章ごとに要旨を述べる。

第2章 粘弾性体の硬軟感提示

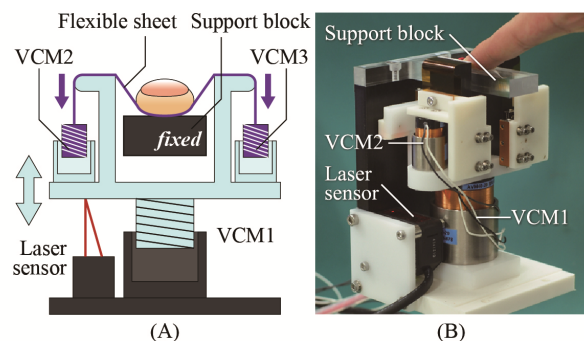
従来の研究では、ディスプレイ駆動のための計算モデルがヘルツ理論をベースに構築されていた。ヘルツ理論は弾性体同士の接触状況を静的に表すものであるため、動的な挙動の影響を受ける粘性の性質を含む粘弾性体を指先で押し込む際の接触については考慮できなかった。本章ではこのような接触状況を表現するため、ヘルツ理論を拡張し、非線形ダンパ要素を付加することで動的接触モデルを提案した。提案モデルが妥当であることを確認し、実際に提示システムに実装する方法について検討した。硬軟感ディスプレイの動特性を考慮して動的接触モデルを利用する手法としてシステムに一次遅れ演算要素を付加する手法を提案し、粘弾性体が有する硬軟感の再現提示手法を開発した。

第3章 2自由度硬軟感ディスプレイ

従来の硬軟感提示手法における機構面での制約として、ディスプレイが1自由度（シートの巻きつけ制御）しか有していないことが挙げられる。多様で複雑な柔軟物体の硬軟感を再現するためには自由度が不足しており、本章ではこの制約解消のために提示機構の多自由度化を検討した。指先へのシート巻きつけに加えてシート張力を制御できる機構を付加することで、図に示すような2自由度の硬軟感ディスプレイを開発した。張力を能動的に制御することで、接触面積に加えて接触圧分布（もしくは接触力分布）を変化させることを試みた。開発したディスプレイの駆動に関する基礎的な評価実験を行い、提案手法（張力制御）によって予想通りの圧分布変化が観察できることを確認した。

第4章 厚みが有限な柔軟物体の硬軟感提示

本章では、厚みが有限な柔軟物体に触れた際に感じられる硬軟感を、第3章で開発した張力制御機構付き硬軟感ディスプレイによって再現提示する手法について検討した。柔軟物体の厚みが有限な場合、構成する物質の稠密度によって触感が変化し、稠密度が低く薄い物体（ヒト肌やスポンジなど）の場合は特に特徴的な触感が得られる。このような柔軟物体が硬い物体（設置台や骨など）の上に配置された状態では、押し込み量がある一定量を



図：張力制御機構付き硬軟感ディスプレイ

超えると底面側に配置される物体の硬さを知覚することができる(この感触を「底着き感」と称す)。これは従来の接触面積制御のみでは表現が困難な触感であった。実際にこのような柔軟試料を対象に接触力分布計測を行い、計測結果を基に提示するための計算モデルを提案した。張力制御を適切に行うことで、特徴的な接触力分布を再現し、底着き感および仮想柔軟物の厚さの違いを提示可能であることを確認した。

第5章 しこりを内包する柔軟物体の硬軟感提示

本章では、内部にしこりを有する柔軟物体が有する触感(しこり感)の再現手法について検討した。第3章で開発した硬軟感ディスプレイにおいて、特定の条件(張力が非常に大きい場合)でディスプレイ使用者がしこりを錯覚することを発見した。この触錯覚現象を積極的に利用することで、使用者に対して、柔軟物体の柔軟性としこり感を同時に提示する手法を提案した。提案手法を用いて提示実験を行った結果、本手法によってサイズが異なるしこりの再現できることを確認できた。また、シートに掛かる張力を左右独立して制御することで、なぞり動作に対応したしこり感の提示手法を開発した。

第6章 各触感の統合

第2章から第5章まで、従来の提示手法では再現が困難であった、複雑な構成をした柔軟物体が有する触感を個別に提示する手法について検討した。本章ではこれらの触感および提示手法を比較し、各提示手法の統合について検討を行った。本研究で取り上げた各触感は、「柔軟性」「粘性」「構造の特徴」といった3つの項目(基本要素)に集約できることを指摘し、それに基づいて統合提示のコンセプトモデルを提案した。ただし、本研究で取り扱った硬軟感ディスプレイでは、本コンセプトモデルに完全に従うことが難しく、硬軟感提示研究の今後の課題を明らかにした。

第7章 結言

本章では、本研究で得られた成果・知見の総括を行うとともに、今後の展望について述べる。本研究は、従来の提示技術では再現が困難であった複雑な構成をした柔軟物体が有する触感の提示手法を検討した。従来の提示技術に課せられていた制約の解消によって、再現提示できる触感の多様化を実現した。

本研究で開発した硬軟感ディスプレイ・提示手法によって、現実存在するあらゆる柔軟物体を再現できるわけではない。これは全ての制約が完全に解消されたわけではでないためであると考えられる。本研究と同様に、今後の研究では考えられる制約の解消を進めていくことで、より多様な硬軟感の再現を可能にし、硬軟感提示に関する研究分野が発展していくことが期待される。