



能動的触受容機構に基づく触感ディスプレイに関する研究

昆陽, 雅司

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

2004-03-31

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲3125

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1003125>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



【 3 2 4 】

氏 名・（本 籍） 昆陽 雅司 （兵庫県）

博士の専攻分野の名称 博士（工学）

学 位 記 番 号 博い第334号

学位授与の 要 件 学位規則第4条第1項該当

学位授与の 日 付 平成16年3月31日

【 学位論文題目 】

能動的触受容機構に基づく触感ディスプレイ法に
関する研究

審 査 委 員

主 査	教 授	高 森	年
	教 授	藤 井	進
	教 授	多 田	幸 生
	助 教 授	田 所	諭

1. はじめに

本研究では、布地を撫でたときの手触りのような「質的情報」までを含めた触感を人間に呈示する手法を提案する。任意の触感を人工的に生成する技術は、遠隔手術などの技能支援やバーチャルリアリティにおける臨場感の向上など、体感するメディアとして情報通信の新しい可能性を生み出す。

触感ディスプレイの実現のためには、1) 皮膚に微小分布刺激を与える機械インタフェースの開発、2) 任意の触感を合成するための触覚受容器の刺激法、3) 触運動をともなう能動的な触知覚機構に応じた刺激の呈示法、が大きな課題となる。本研究では、高分子ゲルアクチュエータという新しい機能素材の利用して、柔軟で微小分布構造をもつ刺激呈示デバイスを提案し、手指に装着可能な軽量小型デバイスを開発する。また、受容器の時間周波数応答性を利用して、受容器を選択的に刺激し、複数の受容器への刺激量を制御することで任意の触感を生成する手法を提案する。これにより、布のようなテクスチャ感、触運動に応じたなぞり感、押し付け感などの触感を呈示することに成功した。これらの触感は、被呈示者が触運動を実際に行い、その触運動に応じた刺激を呈示することによって始めて実現される。このような、触運動をともなう触受容は、人間の能動的な触受容器機構に基づいた知覚であり、本研究が開発した触感ディスプレイの最大の成果である。

以下に本論文の2章以降の概要を述べる。

2. 触感の受容機構とその呈示手法

人間の触受容機構は末梢レベルと中枢レベルに分かれる。本研究では、末梢レベルの触受容機構の知見より、入力となる機械刺激の時空間情報が各受容器の応答特性に応じて符号化され、中枢によって元の時空間情報が再構成されるというモデルを設定した。そして、受容器を代替刺激で刺激し、刺激量と時間変化をコントロールすることで任意の触感を作り出すという選択的刺激法の原理を述べた。次に、従来の選択的刺激法の問題であったアクチュエータとして、ICPF アクチュエータを用いた微小分布構造をもつ刺激呈示デバイスを提案した。このデバイスは、高密度分布刺激、せん断方向も含めた多方向刺激、幅広い時間周波数をもつ振動刺激、受動的柔軟性、装着可能な重量と大きさ、などの要件を満たす。

中枢レベルの触受容機構では、触運動をともなう能動的な受容が重要となる。能動性は、運動指令が直接感覚に影響を与える。このような能動的な触受容機構に基づく触感ディスプレイを実現するためには、手指に装着可能で、自由に触運動を行うディスプレイが必要である。

3. ICPF アクチュエータの改良および ICPF センサの開発

従来 Nafion-Pt 型から Nafion-Au 型 ICPF アクチュエータを導入し、その製造条件の最適化をおこなった。製造条件についてタグチメソッドを用いて最適なパラメータを調べた。その結果、最適な条件では最大屈曲変位が理論上 174 % 向上することができた。また、還元回数のパラメータによって、アクチュエータの応答特性が変化することを確認した。

また、ICPF アクチュエータの機能を高度化させる ICPF センサの開発をおこなった。まず、

ICPF に自由振動の変位と出力電圧の関係を調べ、出力電圧が変位速度に比例して出力されることを発見した。この出力特性は優れた線形性を持つことから、速度センサとして利用できることを示した。また、ICPF センサの内部イオン移動に基づく動作原理の仮説を行い、電氣的に平行板コンデンサとしての性質を仮定しモデル化した。

4. ICPF アクチュエータを用いた受動型触感ディスプレイ

ICPF アクチュエータを用いた受動型刺激発生デバイスを開発した。このデバイスによる時間周波数刺激に対する感覚の変化から、高周波のときに FA II、低周波成分のときに FA I を選択的に刺激できる可能性を示した。

次に、時間周波数の合成波により、複数の受容器を同時に刺激し、複雑な触感を作ることができるかを確認した。高周波成分 180 Hz に対し、低周波成分を 30 ~ 80 Hz の間で変化させると、単なる振動感覚ではない特別な触感が生成されることを確認した。

この人工触感と本物の布素材サンプルと比較する実験を行い、人工触感が低周波成分変化させると、異なる布素材選ばれる結果となった。これは本ディスプレイが布のような微妙な手触りの違いを呈示できる可能性を示す。とくに、タオル、デニムのような比較的表面の粗い素材は約半数の被験者に呈示することができた。一方、SD 法によって定量的に評価した結果、実素材に比べて人工触感の触感因子得点が低く、その感覚は曖昧性をもつことが示唆された。

5. 視覚統合の影響

視覚情報が触感受容に与える影響を SD 法により、定量的に評価した。実素材を用いた視覚の有無の影響の評価では、因子得点の増減の比較から、粗さ因子に関しては、視覚情報は触感の認識の助けとなり、柔らかさ因子においては、逆に視覚情報は妨げとなる傾向を持つことが分かった。

次に、タオル、デニムに近い人工触感を用いて、さまざまな視覚情報を与え、その影響を調べた。粗さ因子に関しては、画像によって素材の粗さがうまく表現できた場合は、因子得点を増加させるが、逆に、画像によってあまり粗くなく見えると、因子得点は減少した。このことから、視覚情報は粗さ因子には強く影響を与えることが明らかになった。柔らかさ因子に関しては、因子得点にほとんど影響を与えることはなかった。

6. 触運動可能な能動型触感ディスプレイの開発

従来の繊維毛型刺激呈示デバイスを小型軽量化し、手指に装着して自由に触運動を行うことができる触感ディスプレイを開発した。この装着型デバイスを用いて、単純な振動感覚の知覚範囲より、時間周波数によって対応する受容器が変化することが確認された。また、能動触と受動触の違いを振動検出閾の差によって比較した。この結果、能動的に刺激を受容した場合、検出閾が下がることが示された。本結果は触運動に応じた刺激の有効性を示す。

次に、触運動に応じたなぞり感の呈示手法を提案した。手の速度、加速度に応じて、低周波成分、高周波成分の振動振幅をそれぞれ変化させることで、自然ななぞり感が呈示できることを確認した。これは、本来であれば、触運動に応じて機械刺激の時間周波数の変化が起こる

(氏名：昆陽 雅司 NO. 3)

現象を、時間周波数を固定して振幅を変化させることで再現できることを意味する。これにより、時間周波数を用いた選択的刺激法が触運動に合わせて刺激することで、なぞり感のような新たな感覚を作り出すことができる可能性を示した。

7. 触運動に応じた触感呈示アプリケーション

装着型ディスプレイを用いて、さらに多様な触感を呈示するアプリケーションの開発を行った。触運動に応じたなぞり感の呈示手法を拡張し、1つの時間周波数が与えるFA I、FA IIへの刺激の割合を定義し、複数の周波数成分に対して、手の速度、加速度に応じた刺激を生成した。周波数成分と合成比を調整することによって、「ふわふわ、ざらざら」などの複数のテクスチャ感を試作した。

また、SAIを刺激する超低周波振動による圧覚呈示手法を提案し、5Hz以下の超低周波成分で圧覚を呈示可能であることを示した。この手法により、テクスチャ感とは独立させて圧覚の呈示が可能となる。この圧覚呈示手法を利用して2つのアプリケーションを開発した。1つは、静的に平面上に圧覚マップを定義することによって凹凸の表現した。もう一つは、素材の圧縮特性を考慮し、押し付け距離に対して、押し付け方向によるヒステリシスを持たせながら、圧覚を変化させることにより、スポンジのような柔らかさの表現を行った。

最後に、触運動が触感認知に与える影響の評価を行った。触運動に対して、方向に関わらず、まったく同じように刺激を生成するように調整し、触運動の向きによって感覚内容を評価した結果、触運動によって感覚内容が変化することを示した。このことから触運動可能な触感ディスプレイが、単に想像力の補助の役割をするといったレベルではなく、触感の受容自体に直接影響を及ぼしている可能性が示され、触運動可能な触感ディスプレイの有効性を示した。

8. 能動的知覚行為のための触感受容モデルの検討

能動的な触受容機構を捉えるための感覚・運動・意図・環境からなる水平分散型触感受容ネットワークモデルを提案した。とくに、これまで実現されていなかった「意図」に応じた触感呈示を実現するために、意図と触運動の関係からネットワークモデルを構築した。

提案した能動的触感受容ネットワークモデルを試行的に構築するために、触運動の低次元の動きの特徴量の組合せから、意図や運動の種類などの高次元の特徴量をファジィ推論を用いて推定し、触運動の観測実験で実際にその手法で可能であることを確認した。触運動のトラッキングを行う観測システムを用意し、意図、環境を固定した状況で、触運動の解析を行った。実験で設定した「柔らかさ調べる知覚」、「粗さを調べる知覚」の2つの意図をもって、触運動を行う際に観測された特徴を、ファジィ推論で抽出できることを確認し、触運動の観測によって意図に関係する特徴量が推定可能であることを示した。この結果は、意図まで含めた触受容ネットワークモデルが構成できることを示す。このような触受容ネットワークモデルを構築することができれば、意図まで含めた総合的な触感を呈示するディスプレイが実現できると考える。

(別紙1)

論文審査の結果の要旨

氏名	昆陽 雅司		
論文 題目	能動的触受容機構に基づく触感ディスプレイ法に関する研究		
審査委員	区 分	職 名	氏 名
	主 査	教授	高森 年
	副 査	教授	藤井 進
	副 査	教授	多田 幸生
	副 査	助教授	田所 諭
	副 査		
要 旨			
本研究は、布地を撫でたときの手触りのような「質的情報」までを含めた触感をバーチャルリアリティとして人間に呈示する触感ディスプレイを開発することを目的としている。このような技術の開発は、VRでの現実感・臨場感の向上、触覚呈示による人間の技能の支援、感性にもとづく手触りのデザインなど、幅広い応用分野が期待される。			
本研究では、特に、従来の触覚ディスプレイの最大のボトルネックになっていた皮膚に微小分布刺激を与える機械インターフェースの開発を高分子ゲルアクチュエータという新しいアクチュエータの利用によって解決している。また、受容器を選択的に刺激することで任意の触感を生成する手法について検討し、受容器がもつ時間周波数応答性を利用して、複数の受容器への刺激を制御することで、布のようなフワフワ感、ザラザラ感を併せ持ったテクスチャ感、触運動に応じたなぞり感、押し付け感などの触感を実現している。このような触感では、装着可能な刺激呈示デバイスの開発により、被呈示者が触運動を実際に行ない、その触運動に応じた刺激を呈示することによって始めて実現されており、このような触運動をともなう触受容は、人間の能動的な触受容機構に基づいた知覚であり、本研究が開発した触感ディスプレイの最大の成果であると考えられる。			
本論文は次のように構成されている。			
第1章では、本研究を開始するに至った背景、経緯を説明し、研究の目的が述べられている。			
第2章では、触受容機構と触感呈示手法の全般について説明している。すなわち、末梢レベルの触受容機構の知見をまとめて、その過程をモデル化している。入力となる機械刺激の時空間情報が各受容器の応答特性に応じて符号化され、中枢によって元の時空間情報が再構成されると仮定し、この受容器を代替刺激で刺激し、刺激量と時間変化をコントロールすることで任意の触感を作り出すという選択的刺激法の原理を述べている。また、従来の選択的刺激法のアクチュエータの問題の解決策として、本研究では、ICPFアクチュエータを用いた微小分布構造をもつ刺激呈示デバイスを提案している。このデバイスは、高密度分布刺激、せん断方向も含めた多方向刺激、幅広い時間周波数をもつ振動刺激、受動的柔軟性、装着可能な重量と大きさ、などの特長を持っている。また、このデバイスによる時間周波数を用いた選択的刺激法を提案している。さらに、触運動による能動的な受容における運動指令の直接感覚への影響を考慮し、手指に装着可能で、自由に触運動を行うディスプレイを提案している。			
第3章では、前章で述べたディスプレイを実現する手段として、ICPFアクチュエータの改良について述べている。具体的には、Nafion-Pt型からNafion-AuICPFアクチュエータを導入し、その製造条件の最適化をおこなっている。製造条件についてタグチメソッドを用いて最適なパラメータを調べた結果、最適な条件では最大屈曲変位が理論上174%向上することができた他、還元回数のパラメータによって、アクチュエータの応答特性が変化することを確認している。さらに、本ディスプレイでのアクチュエーションとセンシングの統合のための基礎要素技術として、ICPFセンサの開発をおこなっている。ICPFに自由振動の変位と出力電圧の関係調べ、屈曲変位に対して、位相に90度の遅れがあることから、変位速度に応じた電圧が出力されることを発見している。この電圧は変位速度に比例して出力され、優れた線形性を持つことから、速度センサとして利用できることを示している。また、ICPFセンサの内部イオン移動に基づく動作原理の仮説を行い、電気的に平行板コンデンサとしての性質を仮定しモデル化している。このモデルを用いて、減衰要素をもつ片持ち梁によっておこる運動とそのセンサ出力の比較を行い、モデルの有効性を示している。			
第4章では、ICPFアクチュエータを用いた受動型触感刺激発生デバイスの開発について述べている。時間周波数によって、振動感覚であると感じる領域が変化し、主観的感覚内容から、高周波のときにFA II、低周波成分のときにFA I、SAIを刺激できる可能性を示している。これにより、時間周波数によって、受容器を選択的に刺激できることが示されている。また、時間周波数の合成波により、複数の受容器を同時に刺激し、複雑な触感を作ることができるかを確認している。高周波数成分180Hzに対し、低周波数成分を30～80Hzの間で変化させると、単なる振動感覚ではない、特別な触感が生成されることを確認している。さらに、この人工触感と本物の布素材サンプルと比較する実験をおこなっている。実際に触り比べる実験では、人工触感が低周波成分変化させると、最も近いサンプルとして異なる布素材が選ばれる結果となり、本ディスプレイが布のような微妙な手触りの違いを呈示できる可能性を示している。とくに、タオル、デニムのような比較的表			

氏名	昆陽 雅司
----	-------

面の粗い素材は約半数の被験者に呈示することができている。形容詞対尺度評価を用いた因子分析評価では、実素材に比べて人工触感の触感因子得点得点が低く、その感覚は曖昧性をもつことが示唆された。また、これらの2つの評価から触感因子別の推定因子得点を推定する手法を提案し、前者の評価で触感が大きく変化したのは、柔らかさ因子の変化によるものと推定している。

第5章では、視覚情報が触感受容に与える影響を形容詞尺度対を用いた因子分析により、定量的に評価している。視覚情報が触感受容に与える影響を、実素材を用いて、視覚の有無によって触感を評価している。因子得点の増減の比較から、粗さ因子に関しては視覚情報は触感の認識の助けとなり、柔らかさ因子においては、逆に視覚情報は妨げとなる傾向を持つことを明らかにした。また、タオル、デニムに近い人工触感を用いて、さまざまな視覚情報を与え、その影響を調べている。粗さ因子に関しては、画像によって、素材の粗さがうまく表現できた場合は、因子得点を増加させるが、逆に、画像によって、あまり粗くなく見えると、因子得点は減少したことから、視覚情報は粗さ因子には強く影響を与えることが明らかになった。一方、柔らかさ因子に関しては、因子得点にほとんど影響を与えることはなく、視覚情報で柔らかさ因子を補助することは難しいことを示した。

第6章では、触運動可能な能動型触感ディスプレイの開発について述べている。シリコンゴムを用いた成形を行い、刺激呈示デバイスは重量が約8gと非常に軽量化することに成功した。この装着型デバイスを用いて、単純な振動感覚の知覚範囲より、本デバイスが、受動型ディスプレイのときと同様に時間周波数によって対応する受容器が変化することが確認された。また、能動触と受動触の違いを振動検出閾の差によって比較している。この結果、能動的に刺激を受容した場合、検出閾が下がることが示されているが、これは刺激としては全く同じであるのに、触運動をすることによって、検出閾が下がったことを示し、触運動に応じた刺激の有効性を明らかにしたと考えられる。さらに、触運動に応じたなぞり感の呈示手法を提案している。手の速度、加速度に応じて、低周波成分、高周波成分の振動振幅をそれぞれ変化させることで、自然ななぞり感が呈示できることを確認した。これは、本来であれば、触運動に応じて機械刺激の時間変化、すなわち時間周波数の変化が起こるはずの現象を、時間周波数を固定して、振幅を変化させることで再現できることを意味している。これにより、時間周波数を用いた選択的刺激法が触運動に合わせて刺激することで、なぞり感のような新たな感覚を作り出すことができる可能性を示したものと考えられる。

第7章では、装着型ディスプレイを用いて、さらに多様な触感を呈示するアプリケーションの開発について述べている。触運動に応じたなぞり感の呈示手法を拡張し、テクスチャ感を表現するなぞり感を呈示手法を提案している。1つの時間周波数が与えるFA I、FA IIへの刺激の割合を定義することで、複数の周波数成分に対して、手の速度、加速度に応じた刺激を生成し、テクスチャ感を生成することを試行的に確認している。合成する周波数成分と合成比を調整することによって、「ふわふわ、ざらざら」などの複数のテクスチャ感を試作している。また、SA Iを刺激する超低周波振動による圧覚呈示手法を提案し、基礎実験により5Hz以下の超低周波成分で圧覚を呈示可能であることを示している。また、FA Iへの刺激と合成することで、摩擦感の呈示を実現している。この手法により、テクスチャ感とは独立させて圧覚の呈示が可能となり、これを利用して2つのアプリケーションを開発している。一つは、静的に平面上に圧覚を定義する圧覚マップによって凹凸の表現である。この圧覚マップにより、テクスチャ感をもち、かつ大きな凹凸のある触感を実現している。もう一つは、垂直方向に動的に圧覚を変えることで柔らかさを表現するものであり、押し付け距離に対して、圧覚を変化させることにより、柔らかさの表現を行っている。また、素材の圧縮特性を考慮し、押し付け方向によってヒステリシスを持たせることでより本物に近い柔らかさを表現している。さらに、触運動が触感認知に与える影響の評価を行っている。触運動に対して、方向にかかわらず、まったく同じように刺激を生成するように調整し、触運動の向きによって、感覚内容が変化するかを評価した。その結果、触運動と感覚内容は非常に密接に関係することを明らかにしている。このことから触運動可能な触感ディスプレイが、単に想像力の補助の役割をするといったレベルではなく、触感の受容自体に直接影響を及ぼす可能性が示され、触運動可能な触感ディスプレイの有効性を示している。

第8章では、能動的な触感受容機構を捉えるための感覚・運動・意図・環境からなる水平分散型触感受容ネットワークモデルを提案している。とくに、これまで実現されていなかった「意図」に応じた触感呈示を実現するために、意図と触運動の関係からネットワークモデルを構築している。提案した能動的触感受容ネットワークモデルを試行的に構築するために、触運動の低次元の動きの特徴量の組合せから、意図や運動の種類などの高次元の特徴量をファジィ推論を用いて推定する方法を提案し、触運動の観測実験で実際にその手法で可能であることを確認している。触運動のトラッキングを行う観測システムを用意し、意図、環境を固定した状況で、触運動の解析を行っている。実験で設定した「柔らかさを調べる知覚」、「粗さを調べる知覚」の2つの意図をもって、触運動を行う際に観測された特徴を、ファジィ推論で抽出できることを確認し、触運動の観測によって意図に関係する特徴量が推定可能であることを示している。この結果は、意図まで含めた触感受容ネットワークモデルが構成できることを示していることから、このような触感受容ネットワークモデルを構築することができれば、意図まで含めた総合的な触感を呈示するディスプレイが実現できると結論づけられている。

第9章では、結論を述べている。

本論文の研究は、これまで不可能だった微妙な触感を仮想的に創り出す新しい方法論を提案・実証しており、これからのバーチャルリアリティの学術分野にとって非常に価値の高い研究であると判断する。このことは、日本バーチャルリアリティ学会論文賞をはじめとする数々の学会賞を受賞していることにも裏付けられている。

よって、学位申請者昆陽雅司は、博士(工学)の学位を得る資格があると認める。