

審査の結果の要旨

氏 名 長 谷 川 圭 介

本論文は、超音波フェーズドアレイによって空中に収束超音波の場を生成し、人体表面に多彩な振動触覚を提示する手法とその応用について提案および検証したものである。近年人間とコンピュータのインタフェースにおける触覚の役割が注目されつつあるが、人間に触覚を感じさせるためには人間の皮膚が何等かの物理的デバイスに直接接触する必要があり、それが触覚の活用領域を狭める要因の一つになっている。空中超音波による非接触刺激手法はこの問題を回避する手法の一つであるが、従来の研究では触覚提示における刺激強度が小さく、提示される圧力の時間波形や空間パターンは限定的であった。また触覚を提示可能な範囲は装置の近傍20cm程度に限定されており、超音波発生時に可聴音が発生してしまうことも応用上の問題となっていた。本論文はこれらの問題を解決し、超音波による非拘束触覚提示の有効性を実証したものである。本論文は以下の7章からなる。

序論である第1章では、本論文の研究背景および目的が述べられており、超音波を用いることの合理性と利点について物理的な側面から考察されている。触覚の潜在的な活用シーンを俯瞰し、触覚刺激を非接触化することによって実現される人間行動支援の可能性が示されている。

第2章では、触覚提示手法とその応用についての先行研究および開発例が、触覚生理の基礎的な知見と併せて整理され、本論文の研究の位置づけを明確にしている。特に振動の提示が物体の触感や存在感を生々しく伝達できることを示した近年の関連研究が説明されており、振動触覚提示の重要性の論拠となっている。

第3章では超音波が皮膚表面に圧力を発生させるメカニズムとその物理的特性が説明され、超音波の波動場と、皮膚に惹起される触覚刺激の関係が明らかにされている。特に所望の空間的圧力パターンを実現するための振動子の駆動電圧波形制御法が導出されており、これが本論文成果の第一の柱となっている。単一平面上のみに配置された振動子アレイによって、振動子アレイに水平な面内での目標音圧分布を生成する従来研究を拡張し、3次元配置された振動子アレイに対して任意の3次元音圧強度分布を与える素子駆動方法を導出している。また、音響流の方向を制御する手法も導出され、数値実験により妥当性の検証が行われている。

第4章では、シリアル接続によって容易に拡張できる振動子アレーユニットを設計し、大開口の超音波フェーズドアレイを作製している。デジチェーン接続したときの各接続の遅延は25ns程度であり、2つのユニットに分岐しながら接続していった場合には、1,000ユニット接続しても信号の遅延は1 μ s以下である。実際にデバイス開発を行い、9ユニットを接続した大開口フェーズドアレイにおいて、理論限界に近い良好な超音波収束特性が得られることを実験的に確認した。さらに本章の後半部では、出力放射圧の量子化ビット数を増加させる方法と、それを用いた具体的な振動触覚信号の設計法が提案され、最終的に卓上規模程度のワークスペースを有する非接触触覚提示を実証した。

第5章では、振動触覚発生提示の際に可聴音が発生してしまう問題について考察されている。可聴音を発生させる複数の要因が整理され、それらの効果が定量的に評価されるとともに具体的な対策が行われている。超音波振動子の駆動電圧波形を改善し、超音波包絡中の高周波成分を低減することによって、実システムにおいても可聴音を低減できることを示した。

第6章では、上記の要素技術を統合した実世界情報提示システムを構築し、多くの人々が体験できるデモシステムを通して有効性を実証した。第一のシステムは、皮膚表面に映像を投影するとともにそこに触覚を重畳する「触覚プロジェクタ」であり、IEEE World Haptics 2013 等でのデモを通じ国際的にも強いインパクトを与えた成果について報告されている。第二のシステムは、東京大学石川正俊研究室と共同で構築した「高速動的視触覚情報提示環境」である。高速視覚で人間の手の運動を計測し、それにあわせて遅延なく視触覚提示を行うシステムが実証されており、非接触触覚提示を用いた近未来の情報提示システムの具体的な姿が示されている。

結論として第7章では本論文の結果がまとめられており、今後の展望について述べられている。

以上要するに、本論文は空中超音波を用いた非接触触覚提示において提示可能な刺激を空間的・時間的の多様性を大幅に拡大する手法を確立し、それらを応用する際に生じる諸問題を解決しながら卓上程度のワークスペースを有する触覚刺激システムを実現し、応用システムにおいてその有効性を実証したものである。本論文の成果はヒューマンインタフェースとバーチャルリアリティの分野に対して多大な貢献が認められ、医療、コンピュータシステム、自動車/航空機の操縦システム、コミュニケーション、エンターテインメントなど諸分野への広範な波及効果が期待される。

よって本論文は博士（情報理工学）の学位請求論文として合格と認められる。