

# 審査の結果の要旨

氏名 伊藤 充

本論文は、コンピュータインタフェースに不可欠であるクリック感を、空中超音波によって提示可能であることを実証したものである。キーボードやタッチパネルは、その表面に軽く接触している入力待機状態と、入力を意図して強く押し込んだ状態の2状態をもち、その遷移をクリック感として知覚することで効率のよい入力が可能になる。近年検討が進んでいる空中超音波触覚提示においてもクリック感提示の必要性は大きいですが、その知覚強度は比較的弱く、明確なクリック感を再現するのは困難であった。そのような背景のもと、本研究では、超音波照射点の微小振動によって触覚を提示する **Lateral Modulation (LM)** という方式で得られる触感が、固定点での音圧強度変化によるものとはその触感、知覚強度ともに明確に異なるものであることに着目した。そしてそのような触感コントラストを用いれば、クリック感提示が実現され、視覚を用いない状態での操作も可能となることを実証した。本論文は以下のような7章から構成される。

第1章では、人間の行動や意思表示の際の触覚の必要性についてまとめ、特にボタン押下時のクリック感の必要性を論じている。それを空中で再現することの意義を論じ、本論文の目的と構成を述べている。

第2章では、人間の皮膚が触覚を得るための原理について概説し、触覚提示法の現状について整理している。特に人間にデバイスを装着させることなく触覚を提示する空中触覚提示法について、超音波による音響放射圧の生成法とその制御原理について、超音波の距離減衰、焦点径、指向性の特性に言及しながら整理している。

第3章では、超音波放射圧によるクリック感提示のプリミティブな原理を論じている。触覚の提示部位は手掌部を想定し、仮想的な空中ボタンに接触していることを操作者に知らせる触覚刺激と、意図的な入力完了を確認する触覚刺激の2種類の刺激によってボタンの押下を再現する。前者として固定点での時間変動圧力の刺激、後者として **LM** 刺激を用いることを提案し、その際に体験される触覚を心理物理実験によって検証している。さらに視覚を用いない状態において、仮想ボタンを手探りで探索し、操作可能であることを示している。

第4章以降は、ボタンの空中映像を空間中に生成し、それを指先への触覚刺激と重畳するシステムの構成と基礎特性について論じている。空中映像は、レンチキュラーレンズを用いた多視点画像として生成し、その立体像に合わせて超音波フェーズドアレイの焦点を制御する。このとき、視覚像と触覚像を空間的に合致させるための設計と検証が行われている。

第5章では、指先へのクリック感提示について、より詳細な分析を行っている。一般的な物理ボタンが操作者に通知する情報について、接触の有無、反力変化、振動発生、の各要素とその役割を整理し、クリック感発生のための要件を整理している。これらの知覚要素を超音波で提示可能であることを指摘し、特に接触からクリック振動に至るまでの反力増大を、超音波のエネルギー密度勾配によって無振動のまま提示する手法を提案している。実験によって、無振動

エネルギー勾配についての触覚閾値を調査し、クリック要素としての利用可能性を評価している。また、クリック振動については、LM 法による提示を提案し、その実現性を数値実験で検証している。

第6章では、第5章までの議論に基づいて、指先へのクリック感提示システムを提案している。無変調の静的触覚像による反力提示と、パルス状の振動刺激によって、クリック感を再現する。指先の位置に応じて超音波の3次元分布をどのように変化させればよいか、その具体的な駆動方法を明らかにし、そのときの触覚体験について被検者実験を実施している。またここで提案されるクリック感提示に基き、視覚を用いない状態での手探りによる空中ボタンの探索と操作が可能であること、指先でボタンの存在を感じながら繰り返しボタン押下が可能であることを示している。

第7章では、本研究の成果をまとめ、結論を述べている。

以上要するに、本論文は、空中超音波によってクリックの触感を提示する手法を提案し、実験によってそれを実証したものである。本論文の成果は、空中触覚インタフェースにおいて自身の意図を効率よくコンピュータに伝達する際に不可欠な要素であり、物理スイッチが幅広い用途で利用されているのと同様、今後多様な目的で活用されていく成果であると考えられる。

よって本論文は博士（科学）の学位請求論文として合格と認められる。

以上 1,866 字