

審査の結果の要旨

氏名 神垣 貴晶

本論文は、非線形音響用途、特に触覚提示デバイスとして利用可能なシート状の空中超音波フェーズドアレイ (Airborne Ultrasonic Phased Array, AUPA) の実現を目的としたものである。近年、空中超音波の非線形音響現象は、パラメトリックピーカをはじめ、触覚提示や微小物体のマニピュレーション、気流の制御などの幅広い用途での利用が検討されている。上記用途に利用されている AUPA は、いずれも圧電セラミックスを用いた空中超音波素子を個別配置することで実現されており、そのことが現実の応用を制限する要因となっている。デバイス外形が厚くかさばるだけでなく、エネルギー変換効率においても十分でなく、その発熱や消費電力のために、持ち運びを前提とした応用が困難になっている。

本論文は、上記問題を新しい構造の静電駆動型素子により解決する。振動膜と下部電極からなる従来の平行平板構造では、対向する電極間に存在する空気が振動の阻害要因となり、放電しない電圧範囲で発生できる超音波強度には、理論限界が存在していた。本論文では、この限界を大幅に引き上げる振動体構造を提案し、薄型のデバイスによって従来の圧電型素子と同等以上の音圧を生成可能であることを実証した。本論文は以下の6章からなっている。

序論である第1章では、研究目的とその背景、提案手法の概要について述べられている。AUPA を用いた応用例とともに、その薄型化・高効率化の重要性について述べている。また、これまでの空中超音波素子について俯瞰し、本研究の位置づけを明確にしている。

第2章では、空中超音波を用いた触覚提示のメカニズムが説明され、開発デバイスに対する要求仕様を明確にしている。空中超音波を用いた触覚提示は、空間中に超音波を集束し、高エネルギー密度を生成して得られる放射圧によって実現される。ここでは有意な触覚提示のために AUPA が送出すべき音響パワーを算出し、開発目標を定量化している。

第3章では、従来の平行平板構造における問題を整理している。所望の音圧の生成には、振動膜に作用する静電気力を決定する電界強度の向上、素子内部でのエネルギー損失の抑制、振動膜変位の確保、の3要件を同時に達成する必要があることを論じており、各要件の詳細が述べられている。さらに平板間で放電を生じない範囲では、発生可能音圧に理論限界が存在していることを明らかにしている。

第4章では、第3章で述べた問題に対する具体的な解決方策を提案している。具体的には、下部電極に微細な貫通孔を設けたうえで、下部電極と振動膜を近接させる構造を用いることで、電界強度を増大しつつ、素子でのエネルギー損失を抑制する構造を提案

している。また、振動膜の変位を確保するための駆動方法についても述べられている。

第5章では、第4章で論じた方策に基づいて、2種類の具体的なデバイス構造を提案している。第一のデバイスは、下部電極として金属繊維によるメッシュシートを用いた構造であり、理論的考察とともに実験的検証が行われている。その結果 44kHz 駆動時において、55%の電気音響エネルギー変換効率が達成されること、その効率を維持しながら既存の圧電型デバイスとほぼ同等な超音波出力密度が得られることを確認している。また、各素子の裏面に実装可能な低損失駆動回路を設計し、超音波素子構造と駆動回路を一体化した 64 素子 AUPA の開発を行った。

この章の後半では、上記 AUPA における製造上の問題点を指摘し、実用化を見込んだ第二のデバイス構造を提案している。粘性損失についての理論的考察に基づいて、下部電極構造の最適化を行い、微細加工技術を用いた製造方法の提案と試作を行っている。実際に作製した素子を用い、51 kHz 駆動時において、従来デバイスを上回る音響パワーを安定に送出可能であることを実験的に確認した。

第6章では、本論文の結論が述べられている。

以上要するに本論文は、非線形音響用途に利用可能な静電駆動型素子の新しい構造を提案・実証し、それを実現するための設計手法を確立したものである。本論文の成果は、音響工学、ヒューマンインタフェース、ハプティクス、ロボティクスなど幅広い分野に貢献する。

したがって、博士（科学）の学位請求論文として合格と認められる。

以上 1770 字