

## 審査の結果の要旨

氏 名 井 上 碩

本論文は、音響境界ホログラムの概念と実現方法を提案し、その手法を音響放射圧による浮遊物体の制御に適用したものである。本論文で提案する音響境界ホログラムとは、音響フェーズドアレイによって音響インピーダンス境界面上およびその近傍に所望の音場を実現する方法論である。音響放射圧による浮遊物体制御に適用した場合には、物体の受ける放射力を制御できるだけでなく、安定把持条件をみたく音場分布、すなわち物体の任意の微小変位に対して常に復元力が生成されるような音場分布をも実現することができる。

空中超音波による物体浮揚は、近年いくつかのグループによって精力的に研究されているが、波長より小さな粒子、あるいは音源に近接した物体について実証されているのみであり、波長より大きな対象物体を、トランスデューサから離れた3次元空間中で浮揚させることは困難であった。本研究では、対象物体の存在を前提とし、かつ摂動変位に対する安定性をも制約条件に含めた音場設計によってこの問題をはじめて解決した。本論文は以下の9章から構成されている。

第1章は序論として、本研究の背景と問題設定について述べられている。空中浮揚に関してこれまで行われてきた研究を整理し、フレネル領域において波長以上の大きさの物体を空中浮揚させた例が存在しないこと、およびその困難の原因と、本研究で示される取り組みの新規性、必要性がまとめられている。

第2章は、自由空間における音響ホログラムの関連研究についてのレビューに充てられている。特に位相変調によるフレネル場における音場制御の原理と、放射圧の生成について問題を明確にし、本論文が提案する音響境界ホログラムの新規性を整理している。

第3章では、音響境界ホログラムの実現方法をシステム論の観点から考察し、その離散的な記述が導出されている。また、音響散乱問題に対する具体的な伝達行列の決定法について、境界要素法と対応づけて議論されている。

第4章では、これまで近似的な議論しか行われていなかった3次元音響場における音響放射圧について、代数的解析と数値モデルの提案およびその検証がなされている。代数的解析は二つのアプローチからなり、第一は熱収支の観点から、第二は流体力学の観点から行われている。続く数値モデルでは、フェーズドアレイの駆動パターンから音響

放射駆動力への陽な行列方程式の表現が提案されている。この提案モデルは既存のモデルと比べてより正確に放射圧を与えることが実測実験によって示されている。

第5章では、波長より大きい構造をもつ剛体の空中浮揚法について、提案・実証されている。線形化されたダイナミカルシステムとして剛体の運動を捉え、その安定条件をみたす音場を与えるフェーズドアレイの駆動を、最適化問題により数値的に求める手法が提案されている。また、特に波長の6倍程度の大きさをもつ非回転体を、音源からの距離が波長の20倍以上である地点に安定保持できることが実証されている。

第6章では、空中浮揚以外の応用として空中超音波触覚ディスプレイを想定し、人間の指に対する放射圧パターン形成について議論するとともにその実験結果が述べられている。適応的収束の結果、主観的触覚強度が有意に向上することが示され、モデリング精度についての指針が与えられている。

第7章では、本論文で用いられた実験装置および条件の詳細が説明されている。特に、大規模化可能なフェーズドアレイシステムの実現方法とその仕様が述べられ、超音波振動子の位相同期の方法と精度について示されている。

第8章では、第3章で提案された境界ホログラムの行列計算高速化について議論され、数値実験が行われている。リアルタイムフィードバック制御に組み込む応用に向けて、複数の高速化手法の提案とその数値実験結果が示されている。

第9章では、本論文の結論および今後の展望とアプリケーションについて述べられている。

以上要するに、本論文は音響放射圧による物体浮遊制御を契機として音響境界ホログラムという新規な音場設計法を提案・確立するとともに、それを用いてフレネル領域における巨視的物体の安定浮揚をはじめ実証したものである。本論文の成果は、音響工学をはじめヒューマンインタフェース、ロボティクスなどの諸分野に貢献する。

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。