

論文の内容の要旨

論文題目	Two-Dimensional Spatial Control using multiple circular loudspeaker arrays and elliptical loudspeaker array
学位申請者	REN YI

本研究は、スピーカアレイを用いた2次元音場制御に関する研究である。音場制御とは空間において音の波面全体を制御する技術であり、音場再現、指向性制御や空間騒音制御などに応用される。特に音場再現では、高臨場感音響再生技術の一環として、近端空間と距離の離れた遠端空間のユーザが擬似的に重なり、その場にいるかのような聴覚体験を提示することが可能になる。これらの音場制御技術の発展に伴って、立体テレビ、立体コミュニケーションシステムやバーチャルライブなどの実現が期待できる。

これまで多くのスピーカアレイを用いた音場制御手法が提案されているが、特に理論的解析や形状のわかりやすさから直線や円といった基本的なアレイ形状が多く用いられてきた。一方、素子配置が決まっているシステムや素子配置の設計を含めたプロジェクトに適している最適化手法は、性能を最大限に引き出すことができるが、シミュレーションごとに数値的最適化が必要となり汎用性に欠ける。本研究では、シンプルではないスピーカ配置においても解析的な制御を可能とするスピーカアレイに関する研究を行う。

本研究では、音場制御システムの基本要素の1つであるスピーカアレイの音響的特性に着目し、新たなスピーカアレイの形状を提案することによって、制御の多様性を増やし、制御性能を向上させることを試みる。本来、考慮すべきアレイ形状は無限にあるが、本論文においては2つのアレイ形状に注目する。具体的には、従来の円形スピーカアレイを出発点としこれを変形させることを考え、複数の円形アレイを用いた複数剛円スピーカアレイおよび円形アレイを扁平させたような形状である楕円スピーカアレイを提案する。複数剛円スピーカアレイに対しては、アレイ中心のずれや無限に往来する散乱作用を考慮した解析的制御手法を提案する。楕円スピーカアレイに対しては、楕円座標系およびその波動関数解を用いた新たな解析的音場制御手法を提案する。

本論文の構成は以下のとおりである。

1章では、音場制御技術を概説し、従来研究の課題を整理することで、スピーカアレイの形状と解析のしやすさのトレードオフに言及し、本研究の位置づけについて述べる。

2章では、音場制御の基本である音場再現技術について、技術原理と従来研究について述べる。また、本研究で扱う3つアプリケーション（内側音場再現、外側音場再現、ビームフォーミング）とその評価方法について紹介する。

3章では、複数剛円スピーカアレイを提案し、さらに円筒関数の加法定理を活用して、アレイの中心ずれおよびアレイ間の無限散乱作用を考慮した解析的制御手法を提案する。計算機シミュレーションの結果により制御手法が有効であることや無限散乱作用を考慮する必要があることがわかった。複数剛円アレイと従来の円形アレイを比較し、複雑な目標音場において提案アレイが高い制御効率を有することを示した。また、剛円アレイの数や配置による制御性能への影響を調べた。

4章では、楕円スピーカアレイを提案する。楕円座標系およびその座標系における波動関数を導入し、楕円アレイに適した解析的手法を提案し、さらに従来の円形マイクロホンアレイ信号を用いる手法を提案する。上述の手法は楕円波動関数を新たな直交基底として用い、数少ない解析的制御手法の直交基底を発展させており、音場制御技術において非常に重要な手法と考えられる。計算機シミュレーションにて手法の有効性を確認した。提案する楕円アレイと従来のアレイモデルの結果を比較し、楕円アレイの形状の非対称性が非対称な空間制御性能を導いたことがわかった。3章、4章では、複数の場面において、提案アレイは従来のアレイ形状より良い結果が得られ、アレイ形状の提案による制御性能向上の可能性が示された。また、アレイ形状の特徴が音場制御の性能に与える影響についても部分的ではあるが明らかにした。

5章では、4章で提案した手法を拡張し、楕円以外のアレイ形状に実装できる非対称な制御手法を提案する。計算機シミュレーションの結果は提案手法を既存の音響システムに実装できることや、楕円以外のアレイ形状でも楕円波動関数の特徴を有する制御結果が得られることを示した。

最後に6章では、提案した手法の成果をまとめるとともに、本論文の結論および今後の課題と展望について述べる。

論文審査の結果の要旨

学位申請者氏名 REN YI

審査委員主査 羽田陽一

委員 廣田光一

委員 野村英之

委員 高橋裕樹

委員 小泉直也

(*自筆署名の場合に限り、押印省略可)

REN YI氏提出の学位論文「Two-Dimensional Spatial Control using multiple circular loudspeaker arrays and elliptical loudspeaker array」は、複数のスピーカ素子を並べたスピーカアレイを用いて2次元平面内における音場を制御する手法に関する研究である。従来、空間制御を行うためのスピーカを円周上や直線上に等間隔に並べた場合、解析的な制御が可能である一方、配置の自由度が限られるといった課題があった。一方で、自由なスピーカ配置を許容した場合、数値的な最適化が必要となり、さらに制御結果が予測しづらいといった問題があった。本研究は、スピーカ数やアレイ全体の大きさ、周波数帯域などの条件により制御結果が予測しやすい特徴を持つ解析的な制御手法が実現でき、かつスピーカ配置にある程度自由度があるスピーカアレイを提案することを目的に研究をおこなったものである。具体的には、複数の剛円を利用するスピーカアレイと、円形アレイをつぶしたような形状である楕円形アレイに着目して研究が行われている。前者では複数剛円間の多重反射を含めた個々の剛円中心座標系音場をグローバル座標系に変換して制御を行う手法を提案し、後者では楕円調和関数展開を音場展開に導入し、新たな制御手法を確立している。

本論文は全6章から構成されている。

1章では、音場制御技術を概説し、従来研究の課題を整理することで、スピーカアレイの形状と解析のしやすさのトレードオフに言及し、本研究の位置づけについて述べている。

2章では、音場制御の基本である音場再現技術の原理と従来研究について述べている。また、本研究で扱う3つアプリケーション（内側音場再現，外側音場再現，ビームフォーミング）とその評価方法について紹介している。

3章では、複数剛円スピーカアレイを提案し、さらに円筒関数の加法定理を活用して、アレイの中心ずれおよびアレイ間の無限散乱作用を考慮した解析的制御手法を提案した。計算機シミュレーションの結果により制御手法が有効であることや無限散乱作用を考慮する必要があることを明らかにした。複数剛円アレイと従来の円形アレイを比較し、複雑な目標音場において提案アレイが高い制御効率を有することを示した。また、剛円アレイの数や配置による制御性能への影響について言及した。

4章では、楕円スピーカアレイを提案する。楕円座標系およびその座標系における波動関数を導入し、楕円アレイに適した解析的手法を提案し、さらに従来の円形マイクロホンアレイ信号を用いる手法を提案した。上述の手法は楕円波動関数を新たな直交基底として用い、数少ない解析的制御手法の直交基底を発展させており、音場制御技術において非常に重要な手法と考えられる。計算機シミュレーションにて手法の有効性を確認した。提案する楕円アレイと従来のアレイモデルの結果を比較し、楕円アレイの形状の非対称性が非対称な空間制御性能を導いたことを明らかにした。3章、4章では、複数のシミュレーション条件において、提案アレイは従来のアレイ形状より良い結果が得られ、アレイ形状の提案による制御性能向上の可能性が示された。また、アレイ形状の特徴が音場制御の性能に与える影響についても部分的ではあるが明らかにした。

5章では、4章で提案した手法を拡張し、楕円以外のアレイ形状に実装できる非対称な制御手法を提案した。計算機シミュレーションの結果は提案手法を既存の音響システムに実装できることや、楕円以外のアレイ形状でも楕円波動関数の特徴を有する制御結果が得られることを示した。

最後に6章では、提案した手法の成果をまとめるとともに、本論文の結論および今後の課題と展望について述べている。

以上、REN YI氏提出の学位論文は、解析的な音場制御において、従来直線上や円周上に限られていたスピーカ配置を、複数剛円を用いたスピーカアレイシステムと楕円形アレイに拡張し、その解析的制御手法を提案することで、スピーカアレイ形状に新たな多様性を追加した点において極めて先駆的である。また、多重散乱理論や楕円柱座標系における波動方程式の解の形式など物理的な特性を利用することが音場制御において今なお重要であることを認識させている点においてもその貢献は大きい。さらにスピーカアレイ形状の多様性が増したことは一般の室内形状への適用可能性も広がったことを意味する。

よって、学術上・産業上寄与することが大きく、学位論文としてふさわしい内容であるため、本審査委員会は、本論文は博士（工学）の学位請求論文として十分な価値を有するものと認める。