氏　名（本籍）	橋本泰治（栃木県）
学位の種類	博　士（情報学）
学位記番号	博甲第 6274 号
学位授与年月日	平成 24 年 3 月 23 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当
審査研究科	図書館情報メディア研究科
学位論文題目	**境界音場制御の原理に基づく二次元スピーカアレーを用いた音の指向性制御システムの研究**

主　査	筑波大学教授	田中和世
副　査	筑波大学教授	鎮目浩輔
副　査	筑波大学教授	石塚英弘
副　査	筑波大学准教授	三河正彦
副　査	筑波大学教授	水谷孝一

論文の内容の要旨

本論文は、多数のスピーカを配置したスピーカアレーを用い、個々のスピーカの音響出力を計算機プログラムを用いて制御することにより、スピーカアレーから出力する音の伝搬方向を制御するシステムの構築に関するものである。ここでは、境界音場制御の原理と呼ぶ理論に基づく制御方法を採用し、実空間に実機を設置するという制約を考慮したシステム構築方法を提案している。具体的には、実空間においてあらゆる方向への指向性形成を可能とするための音源配置、制御点配置、及び、ハードウェア構成を新規提案し、計算機シミュレーション、試作システムを用いた実空間計測実験を通して提案手法の有効性を検証している。

音の指向性制御システムは所望の方向にのみ音を放射することで、その他の方向の音環境を乱すことなく受聴者に音を聴かせることが出来る。これにより、音を再生する側で騒音を防ぐことが可能である。また、壁面などの周囲環境からの反射が減少することで、目的再生方向での音質を向上させることができる。ソフトウェアによる指向性制御により、受聴者の移動に追従した目的再生方向の変更や異なる信号を異なる方向に同時に再生するマルチビームフォーミング等の応用が可能となる。

スピーカアレーを用いたシステムは、そのアレー形状を工夫することで様々な指向性をソフトウェアにより形成することが可能であるという応用上の利点がある。スピーカアレーを用いた指向性制御方法には遅延和アレー法や境界音場制御の原理を用いた方法などがあるが、境界音場制御の原理に基づいた指向性スピーカシステムでは低域において比較的鋭い指向性を形成できるという利点がある。本研究では、この境界音場制御の原理に基づく指向性制御方法を採用している。

本論文は、5 章より構成されており、第 1 章序論では研究の背景や意義、本研究の目的について述べている。

第 2 章では、本研究の基礎となる境界音場制御の原理による指向性制御の理論について述べ、先行研究の問題点について明らかにしている。従来の境界音場制御の原理に基づく指向性制御システムの開発には制御音源の配置として直線アレーが用いられてきたが、直線アレーは原理的に形成できる指向性に制約がある。多次元的なアレーを用いることで形成できる指向性の制約を解消できるが、実空間におけるシステムの実装

を考慮した場合、三次元的にスピーカを配置することは困難である。そこで、本研究では境界音場制御の原理を用いた指向性制御システムを制御音源配置として二次元アレーを導入したシステムに拡張する。また、従来法では制御点を配置する仮想的な境界をスピーカアレーを中心として、これを囲む円上に設置していた。しかし、この場合、境界で反射した音響エネルギーはシステムを中心とした対向方向に流れるため、目的再生方向以外の音圧を上昇させる可能性が考えられる。そこで、目的再生方向以外での音圧を抑え、目的再生方向での音圧を上昇させる境界として楕円形を用いる方法を新規提案している。

第3章では、上記の二次元アレーと楕円形配置の制御点について、計算機シミュレーションにより以下の実験を行い、その効果を検討している。制御音源について二次元アレーとして典型的な3つのパターン（二軸交差形、正方配列形、円形）、また、制御点を配置する境界形状として円形、楕円形制御点を用いたシステムを想定して制御効果を検討した。目的再生方向を0deg、45degの二方向に設定したシミュレーションの結果、いずれのアレー形状の場合においても円形よりも楕円形の制御点配置の方が鋭く、柔軟な指向性の制御が可能であることを明らかにした。また、目的再生方向の違いによる指向性の差は円形が最も小さいが、いずれの目的再生方向においても正方配列形の指向性のほうが鋭く、優位な性質を持っていることを示した。音圧分布の評価の結果、三次元空間内では制御音源が配置される平面から離れるほど指向性が低下する傾向が確認された。これに対して、楕円形の回転体である楕円体上に制御点を配置する方法を導入した結果、制御音源から離れた平面においても指向性を維持できることを示した。

第4章では、実空間における実機システムの構築について述べている。3章の結果を踏まえた実用システムの制作を想定した場合、実空間において音環境を計測する際に楕円形上の制御点位置にマイクロホンを配置することは現実的ではないという問題点がある。そこで、正方形に配置したマイクロホンを用いて楕円形配置の制御点を等価的に制御する方法を考案した。また、天井からの反射などの周囲の音環境によらず安定的に指向特性を得るためにリフレクターを導入した。これらの提案手法を用いて、実環境において有効に動作する二次元スピーカアレーを用いた指向性制御システムを構築した。数値シミュレーションにおいて等価的に楕円形制御点を制御した場合の性能の劣化は見られず、その妥当性が確認できた。リフレクターの導入は、アレーの総出力パワーが同じ場合に目的再生方向での音圧が4dB程度上昇するなどの有効な効果が認められた。また、構築した指向性制御システムが形成する指向性はシミュレーションには劣るもののその周波数特性のパターンは類似しており、手法の妥当性が確認できた。目的再生方向とその対向方向の音圧を比較すると全帯域にわたって概ね6から12dB以上の抑圧効果が得られ、全方位に同様の指向性を形成可能であることが示された。

第5章は結論であり、本研究で提案した手法とそれを実験により実証した結果をまとめている。また、今後の課題について述べている。

審査の結果の要旨

本論文は、「論文の要旨」でも述べたように、音源としてスピーカアレーを用い、その音響出力をソフトウエア（計算機プログラム）を用いて制御することにより、スピーカアレーから出力する音の伝搬方向を制御するシステムの構築に関するものである。本論文の冒頭において、この研究により実現できる機能として、ソフトウェアによる音の指向性制御により受聴者の移動に追従した音の再生方向の動的変更、あるいは異なる信号を異なる方向に同時に再生するマルチビームフォーミング等の応用が可能になると述べている。この研究分野は、音響メディア処理における新しい可能性を拓く技術として近年、注目を集めており、その研究の動機と意義は十分理解できる。

本研究の特色の一つは、実空間に実機を設置するという制約を考慮したシステム構築方法を具体的に提案

し、これをまず計算機シミュレーションにより様々な実験条件の下で検討し、その結果に基づいて試作システムを用いた実空間計測実験を通して手法の有効性を検証している点にある。このように研究実施過程全体を通して、着実な実験に基づいて実問題を解決して行くアプローチがとられており、その研究に対する姿勢は高く評価できる。

本研究で導入された新規性の高い技術として、次の２つが挙げられる。

(1) 音源スピーカ配置を従来用いられてきた一次元アレーから二次元アレーに拡張し、制御点配置形状を円形から楕円形にし、システム性能を改善した。

(2) 実機製作上の問題点を解決するため、制御点配置について、正方形状配置を用いて楕円形状配置を等価的に実現するための手法を開発した。

以上の２点については、いずれもその有効性を計算機シミュレーションにより検証し、その結果に基づいて実機を製作し、ほぼ所望の結果を得ている。

まず上記 (1) に関しては、従来のスピーカアレーを用いた指向性制御システムの研究では、音源配置に関しては一次元配置での検討がほとんどであったが、本研究ではその限界を明らかにした上で、二次元配置による効果を典型的な３タイプの形状（二軸交差形、正方配列形、円形）を設定し、シミュレーションにより検討している。この結果、理論計算通り全方位への指向性制御が可能となり、実験により正方配列型アレーが相対的に有効性が高いことを明らかにしている。また、音圧制御点の配置については、従来システムで採用されてきた円形境界への配置に対して、その問題点を明らかにし、楕円形状境界への制御点配置を新規提案している。楕円形状配置の優位性に関する説明は説得力があり、シミュレーションでもその優位性が検証されている。さらに、三次元空間を想定した楕円体形の制御点配置についても検証実験を行い、この場合も有効に指向性を形成できることを示しており、この提案の新規性は十分に認められる。

次に (2) に関しては、実機製作に当たり実空間では音環境の変動も様々であり、制御点へのマイクロホン設置が必要となることから生じた問題である。楕円形状の制御点へのマイクロホン配置は実際上、実現困難であるため、この問題を等価的制御点配置という方法により解決した。その具体的手法は正方配列形スピーカアレーの外枠にマイクロホンを配置し、このマイクロホンアレーから得られる計測値を利用して仮想的な楕円形状制御点を制御するものである。この手法は、まず計算機シミュレーションによりその妥当性が検証されており、手法自体の新規性も高いと認められる。

以上の検証実験を基に、実機の試作を行っている。ここでは、天井からの音の反射を防ぐリフレクターの導入等の工夫も取り入れている。また、実機設計のすべてと機器の組立を著者自身が行っている点も評価できる。実環境におかれた試作機における性能検証も十分に注意深く設定されており、実験の結果はこの種のシステムとしてはシミュレーションの結果と良く一致しており、試作機は所望の性能を示したものと認められる。論文の最後にある「今後の課題」において述べているように、試作機の性能向上を目指すという点では改善点も考えられるが、論文の冒頭で挙げた機能である「異なる信号を異なる方向に同時に再生するマルチビームフォーミング」が、この試作機を用いることにより音響的歪の少ない状態で実現できることを実証している。この意味でも研究として一定の完結をみたものとなっている。

以上、本論文は、冒頭において研究目的、問題設定が適切に記述されており、それに対する新規性のある解決手法が提案され、それらの手法の有効性に対する実験による検証が信頼できる形で実施されている。実験結果に対する論述も明確であり、実際に提案手法に基づいて試作機を製作する等、全体として高い評価が与えられる。これらを総合して、本論文は博士論文として十分な内容をもつものと判断される。

平成 24 年 1 月 13 日、図書館情報メディア研究科学位論文審査委員会において、審査委員全員出席のもと、本論文について著者に説明を求めた後、関連事項について質疑応答を行った。引き続き、「図書館情報メディア研究科博士後期課程の学位論文の審査に関する内規」第 12 項第 2 号に基づく最終試験を行い、審議の結果、

審査委員全員一致で合格と判定された。

よって、著者は、博士（情報学）の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。