

氏 名 (本 籍)	羽 田 陽 一 (神奈川県)
学 位 の 種 類	博 士 (情報科学)
学 位 記 番 号	情 第 10 号
学 位 授 与 年 月 日	平成 11 年 1 月 14 日
学 位 授 与 の 要 件	学位規則第 4 条第 2 項該当
最 終 学 歴	平成元年 3 月 東北大学大学院理学研究科物理学専攻前期 2 年の課程修了
学 位 論 文 題 目	共通極を用いた音響伝達関数のモデル化に関する研究
論 文 審 査 委 員	(主 査) 東北大学教授 曾 根 敏 夫 東北大学教授 阿 部 健 一 (工学研究科) 東北大学教授 牧 野 正 三 東北大学助教授 鈴 木 陽 一

論 文 内 容 要 旨

室内に置かれた音源と受音点間の音の伝達特性を表す室内伝達関数、あるいは音源から耳までの音響伝達特性を表す頭部伝達関数をモデル化することは、音響エコーキャンセラや音像定位装置などの多くのアプリケーションを考える上で大変重要である。このとき、これらの音響伝達関数のモデルとしては、少ないパラメータで効率良く伝達関数を表現できることが要求される。なぜなら、音響エコーキャンセラでは、少ないパラメータで室内伝達関数を表現できれば、パラメータ数に依存する適応フィルタの収束速度を向上させることができるからである。さらに、異なる音源方向の多数の頭部伝達関数を保存しておく必要のある音像定位装置では、メモリスペースの削減が可能となるからである。

室内伝達関数の従来の代表的なモデルとしては、全零モデル (MA モデル) と極零モデル (ARMA モデル) が知られている。全零モデルは、室内インパルス応答を有限長で打ち切ったモデルであるが、これを室内伝達関数のモデルとして用いた場合、室内の残響時間が長いと、多くのパラメータが必要となるという問題がある。また、音源や受音点の配置が変わった場合には、すべての係数が変化するという問題もある。一方、従来の極零モデルは、共振系による長いインパルス応答を少ない極で表現できるという特長を持つ。しかし、このモデルにおいても、全零モデルと同様に、音源・受音点配置の変化に対し、すべての係数が変化してしまうという問題を持つ。すなわち、これらの従来のモデルには、すべてのパラメータが音源・受音点位置に依存しているという欠点がある。

しかし、音響伝達関数の物理的な性質を見ると、すべてのパラメータが音源・受音点配置に依存しているわけではない。そこで、本論文では、多くの音響アプリケーション装置を考える上で基本となる音響伝達関数に対して、音響伝達関数の持つ物理的な性質に着目した効率的かつ効果的な新しいモデル化手法とその応用に関する研究を行う。

第 2 章では、まず、音源・受音点が移動したときの室内伝達関数の変化に対し、変化しない極と、変化する零点とで室内伝達関数を表現する新たな共通極・零モデルを提案する。この共通極・零モデルでは、共通極は室内の物理的な共振周波数に対応した量であり、室内の形状や吸音率に依存するが、音源や受音点の移動には依存しない。一方、零点は音源や受音点の移動の影響を受け、複雑に変化し、これにより室内伝達関数の音源・受音点位置依存性を表現する。

また、共振周波数に対応する共通極を、複数の室内伝達関数から、それらに共通な極として推定する 2 つの手法を提

案する。一つは共通極を、複数のインパルス応答に共通な AR 係数として最小 2 乗法を用いて推定する方法であり、もう一つは、それぞれのインパルス応答から求めた AR 係数を平均することにより求める方法である。これらの手法を用い、共通極を理論的に予測される次数と同じ次数で推定した結果、推定された共通極は理論的な極と良く一致した。一方、共通極を理論的に予測される次数よりも少ない次数で推定した結果、推定された共通極は、理論的な極の中でも高い Q 値を持つ極と、振幅周波数特性のピーク上で一致した。

次に、このモデルの有効性を確かめるため、音響エコーキャンセラへの応用を考え、共通極を固定 AR 係数として持つ直並列 IIR フィルタ型音響エコーキャンセラを提案する。マイクロホン位置が移動した場合の適応追従性能を従来の音響エコーキャンセラと比較した結果、提案したモデルに基づくエコーキャンセラは、800Hz までの周波数帯域において、従来の MA モデルに基づくエコーキャンセラの約半分の適応フィルタ次数しか必要とせず、収束速度を約 1.5 倍速くすることができた。

第 3 章では、共振周波数に対応する共通極の逆特性を用いて、室内の共振周波数を抑圧する多点イコライゼーション手法を提案する。室内伝達関数は、室内や音源・受音点の配置に依存した山谷を持つ複雑な周波数特性を示すが、この室内伝達関数が、ある周波数において強いピークを持つ場合には、様々な音質的な問題が生じる。例えば、場内拡声システムにおいては、ハウリングマージンが減少し、十分な音量が得られないという問題が発生する。また、スピーカ再生システムなどにおいては、ある特定の周波数だけが強調された音を聞くことになる。

そこで、本章では、複数の室内伝達関数に対し、物理的に共通な部分だけをイコライズする手法を提案する。具体的には、第 2 章において提案した共通極の逆特性をイコライゼーションフィルタとして用いることを提案する。共通極は、受音位置に依存しない共振周波数に対応しているため、複数の受音位置において共通に観測される室内の共振による周波数特性のピークを効率良く抑圧することが可能になると考えられる。この考えでは、音源・受音点配置に依存した零点（周波数特性の谷）を回復することはできないが、周波数特性のピークを抑圧するだけでも高いイコライゼーション効果が得られると期待される。

提案したイコライゼーションフィルタの有効性を示すために、従来の 1 点逆フィルタ、1 点全極モデルフィルタ、及び多点逆フィルタとの比較を、実測したインパルス応答を用いて行った。室内伝達関数のイコライゼーションの性能を、複数の受音点位置における振幅周波数特性の標準偏差を用いて比較した結果、提案したフィルタが最も標準偏差を減少させることを明らかにした。また、提案したフィルタを場内拡声における音響フィードバックの影響軽減に使用した場合には、複数の受音位置においてハウリング開始レベルを 1dB から 5dB 程度向上させることができた。さらに、提案したイコライゼーションフィルタは、時間領域においても、インパルス応答の反射音をある程度抑圧することが分かった。

第 4 章では共通極・零モデルを頭部伝達関数のモデル化に適用することを提案する。頭部伝達関数は、自由空間における音源から人間の耳までの音の伝達特性を表し、人間が音源方向を知覚するための重要な情報を含んでいる。このため、頭部伝達関数のモデルは、室内音場シミュレータやバーチャルリアリティ技術の三次元音像定位などに用いられる。この頭部伝達関数は、外耳道や耳介等の共振系を含んでいるため、共通極・零モデルが適用可能であり、その結果、頭部伝達関数を音の到来方向に依存しない共通極と、到来方向に依存した零点とに分離して表現することができる。

まず、本モデルの有効性を確認するため、音の到来方向の異なる複数の頭部伝達関数から、共通極を抽出した。この共通極は外耳道や耳介等の共振系に対応すると考えられた。次に、抽出した共通極を用いて、共通極・零モデルによる頭部伝達関数のモデル化を試みた。その結果、音の到来方向の変化に対し、変化するパラメータの数（方向別零点の数）を従来の極零モデルや全零モデルに比べ、モデル化の精度を保ちながら削減することができた。

また、頭部伝達関数の方向依存性は、人間が音源方向を知覚する上で大変重要な手掛かりとなっている。そこで、頭部伝達関数の方向依存性を調べるため、頭部伝達関数を共通極・零モデル化したあとの零点について、その変化を調べた。零点は、振幅周波数特性上の谷を複素数として表現したものに対応するため、頭部伝達関数の方向依存性を振幅周波数特性上の谷の変化で解析するよりも詳しく調べられることが分かった。さらに、零点が複素数であることを利用して、非最小位相零点のみを抽出し、その変化について考察した。その結果、非最小位相零点は、直接音と耳介からの反

射音によって生成されていると考えられることを示した。

以上のように、頭部伝達関数の共通極・零モデル化は、方向に依存したパラメータの削減において効果的であり、さらに頭部伝達関数の方向依存性の研究においても有効であることが分かった。

第5章では、室内伝達関数の変化を効率良く表現することが可能な共通極・留数モデルを提案する。第2章で提案した共通極・零モデルは、複数の室内伝達関数を従来モデルに比べ効率良くモデル化できるが、零点が音源・受音点配置に依存しているため、モデル化したい室内伝達関数は測定する必要がある。複数の室内伝達関数を測定しなければならないということは、しばしば煩わしいと感じられるときがあるため、既知の室内伝達関数を用いて補間や外挿により任意の位置での室内伝達関数を推定する技術は、大変魅力的である。

室内伝達関数の補間や外挿を行うためには、室内伝達関数の音源・受音点配置に対する依存性を明らかにし、音源・受音点配置の変化に対する室内伝達関数の変化を簡単な関数で表現できることが重要であると考えられる。しかしながら、従来のモデルでは不可能であった。

そこで、本章では、室内伝達関数の変化を簡単な関数で表現できる新しいモデルとして、共通極とその留数を用いた共通極・留数モデルを提案する。このモデルは、波動方程式から導かれる理論的な室内伝達関数の表現を基礎としている。共通極は、室内の固有周波数（共振周波数）に対応しているため、その留数は、室内の固有関数に対応する。したがって、提案したモデルでは、室内伝達関数の変化を固有関数に従って変化する留数関数として表現することができる。また、共通極・留数モデルは共通極・零モデルの部分分数展開に対応しているので、留数の具体的な値を共通極・零モデルに基づいて求められるという特徴を持つ。

さらに、本章では、提案モデルに基づいた室内伝達関数の補間手法と外挿手法を提案する。直方体室において音源位置を固定し、受音点位置を1つの軸方向に沿って移動した場合、留数関数は単純な余弦関数、あるいは線形予測方程式で近似可能である。そこで、実際の直方体室において補間と外挿の実験を行った。まず、測定したインパルス応答を共通極・留数モデル化して得られた留数の値を用いて、留数関数のパラメータ推定を行った。次に、推定した留数関数に目的となる受音点位置を代入して得た留数の値と、共通極とを用いて、補間あるいは外挿する室内伝達関数を求めた。この実験は低周波数領域でしか行われていないが、提案手法を用いれば従来技術に比べはるかに小さい誤差で室内伝達関数の補間及び外挿が行えることが明らかとなった。このように、共通極・留数モデルは、室内伝達関数の補間や外挿に対し有効なアプローチを与えると考えられる。

音響信号処理や音場制御の分野には、複雑な形状の音響系の特性解析、残響除去処理、多点制御の効率化、頭部伝達関数の補間、など数多くの課題が残されている。

本研究は、このような中において、音響系伝達関数のモデル化に関する研究の先駆的役割を担い、さらに音響伝達関数のモデル化研究の重要性、及び残された課題解決のための有効な指針を示したものとして位置づけることができると考える。

論文審査の結果の要旨

音源から受音点までの音響系の伝達特性のモデル化は、音響エコーキャンセラや音像定位システムなどの多くの応用を考える上で重要である。これまで、全零モデル（MA モデル）と極零モデル（ARMA モデル）が代表的なモデルとして知られているが、これらのモデルは、パラメータを多く必要とするという問題点を持っている。そこで、著者は、この問題を解決するため、音響系の持つ物理的な性質に着目した高性能かつ効率的な新しい音響伝達関数のモデル化と、その応用に関する研究を行ってきた。本論文は、これらの研究成果をまとめたもので、全編6章から成る。

第1章は、序論であり、研究の背景と目的を述べている。

第2章では、音源・受音点が移動することによる室内伝達関数の変化に対し、変化しない極と、変化する零点とで伝達関数を表現する新たなモデル、即ち共通極・零モデルの考え方と実際の推定法を提案している。さらに、提案モデルを音響エコーキャンセラに適用し、受音位置が移動した時の適応追従性能が、従来に比べて向上することを示している。これは、音響装置の性能向上に有効な手段を提供するものとして高く評価できる。

第3章では、前章で提案した共通極の逆特性を用いて、室の共振によって生じる振幅周波数特性のピークを抑圧する多点イコライゼーション手法を提案し、これが従来の方法に比べ、優れた特性を有することを示した。これは、少ないフィルタ係数で複数の受音位置での伝達関数をイコライズするための有力な手法の提案として評価できる。

第4章では、共通極・零モデルを頭部伝達関数に適用することを提案し、従来の極零モデルや全零モデルに比べ、同じ精度を保ちながらパラメータ数を約2/3に削減できることを示している。また、頭部伝達関数の非最小位相零点が直接音と耳介からの反射音によって生成されると考えられる根拠を示している。これらは、提案モデルが頭部伝達関数のモデルとして妥当であることを示すもので、興味深い知見である。

第5章では、室内伝達関数が共振周波数と固有関数によって表現できることに着目し、共振周波数に対応する共通極と、固有関数に対応する留数とを用いた共通極・留数モデルを提案している。更に、このモデルに基づき、室内伝達関数の補間手法と、これまで実用が困難と考えられていた外挿手法の提案を行い、実験により提案手法の有効性を実証しており、位置による音響伝達関数の変化の高精度なモデル化手法として高く評価できる。

第6章は、結論である。

以上要するに、本論文は、音響伝達関数のモデル化手法として、音響系の共振周波数に対応する共通極を用いたモデルを提案し、その有用性を検証すると共に、多くの音響装置が、提案したモデルを用いることで効果的かつ効率的に動作可能となることを実証したもので、音響情報工学及びシステム情報科学の進展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は、博士（情報科学）の学位論文として合格と認める。