

氏 名	おく やま とも なお 奥 山 智 尚
学位(専攻分野)	博 士 (工 学)
学 位 記 番 号	工 博 第 2747 号
学位授与の日付	平 成 19 年 3 月 23 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当
研 究 科 ・ 専 攻	工 学 研 究 科 精 密 工 学 専 攻
学 位 論 文 題 目	伝達関数補間を用いた時変音響系の信号処理および制御に関する研究

論文調査委員 (主 査) 教 授 松 久 寛 教 授 吉 村 允 孝 教 授 松 原 厚

論 文 内 容 の 要 旨

本研究は空間中を音源または評価点が移動することで両者間の音響伝達特性が変化する時変音響系に能動騒音制御(ANC)や音場創生技術を適用することを目的とし、次の9章からなっている。

第1章は緒論であり、従来のANCや音場創生技術は音源および評価点位置が固定された時不変音響系を主対象として研究が進められてきたことを指摘し、本研究の狙いを論じている。

第2章では、本研究の基本となるデジタル信号処理の理論について説明した。時間領域および周波数領域において片方の領域で信号を周期的に扱う場合、もう一方の領域ではその周期の逆数を基本間隔として信号が離散的になることを数学的に示した。また任意の線形時不変信号伝達系に対する入力信号と出力信号の離散フーリエ変換(DFT)からその系の離散的な伝達関数が得られること、および伝達関数を逆離散フーリエ変換(IDFT)することで得る有限インパルス応答(FIR)をデジタル信号フィルタとして時間領域で入力信号に畳み込むことで出力信号が得られることを示した。

第3章では、有限長音響管内における音源と評価点の間の伝達関数のインパルス応答は両端での反射による周期的な時間構造を持つことに着目し、この特徴を用いた簡便な伝達関数補間法を提案した。この伝達関数は最初の一周期分の波形を表す伝達関数を初項、音響管内の往復と両端の反射を表す伝達関数を公比とする無限級数で表される。インパルス応答の最初の1周期分と次の1周期分の波形それぞれのDFTより、公比を表す伝達関数が得られる。またインパルス応答の最初の1周期分の波形中の各インパルスの位置は測定点の位置で定まる。従って各測定点でのインパルス応答から、測定点間任意位置での最初の一周期分の波形が補間でき、これのDFTより得られた伝達関数を初項とし、先ほど得た公比を用いることで任意位置での伝達関数が無限級数の総和として得られることを導いた。数値計算および実験により、伝達関数を精度良く補間できることが検証された。

第4章では、一次元ダクト系でのANCにおいて、評価点位置が移動し誤差経路伝達関数(TFEP)が大きく変動する場合に、第3章で提案した伝達関数補間法を用いた新たな制御法を提案した。各時刻における評価点位置でのTFEPをあらかじめ同定しておき、騒音制御時にTFEPの補償フィルタをその時刻における評価点位置に応じて逐次更新することで、評価点移動速度に影響されない安定した消音性能が実現される。数値計算および実験による検証において、本提案法による制御は、従来のTFEP実時間同定による制御では消音性能が低下する移動速度においても安定した消音性能を示した。

第5章では、任意の環境中を音源が任意の音を放射しながら任意の運動をする際に、固定された評価点で測定される音圧の計算法を提案した。伝達関数が音源の各時刻における位置の関数として表されるとき、数箇所での伝達関数測定値から測定点間の任意位置における伝達関数は補間できる。伝達関数のIDFTにより得たFIRフィルタを各時刻の音源位置に応じて切り替えながら音源からサンプリングした信号に畳み込むことで、評価点での音圧の時刻履歴が得られる。本提案法による評価点音圧計算値は幾何音響に基づく理論解と良く一致した。

第6章では、第5章で提案した音圧創生法の応用として、道路計画に際して行われる模型実験での測定を基に、道路を自

動車が走行する際に周囲で受聴される騒音を事前に創生する手法について研究した。道路と平行な遮音壁上縁で音が回折した後に受音点に届く場合、伝達関数は経路長と回折を表す係数からなる。二点での伝達関数の測定値と経路長から、回折による係数が同定できることを示した。任意位置における回折係数と経路長を測定点での同定値をもとに補間することで、その位置での伝達関数が得られる。なお、音が地面で反射する場合、伝達関数は直接波と反射波を示す二つの項の和となる。両者の分離法として、伝達関数のケプストラムを用いる手法と、二測定点における直接波同士の時間差および反射波同士の時間差の差異を利用する手法の二つを提案した。特に後者は地面の反射率の周波数特性に影響されず分離精度を保つ。数値計算および実験により、伝達関数の補間値は測定値を良く近似することを検証した。続いて補間された伝達関数を第5章で提案した方法に用いて音源移動時に測定される評価点音圧を計算した。ドップラー効果、回折による減衰、うなりなどの現象を計算値は良く再現した。

第7章では、第5および6章において伝達関数の補間値は周波数領域で得られることを基に、音源移動時における評価点音圧創生法の効率化を考察した。時間軸および周波数軸に沿って音圧と伝達関数をそれぞれ並べた二つの行列を用いることで、周波数上で評価点音圧を計算することが可能となり IDFT に伴う計算量を減らすことができる。数値計算により、本提案法は従来法より少ない計算量で十分な精度を持つことを確認した。

第8章では、三次元閉空間である室内を音源が移動する場合に受聴される音圧を計算する方法を研究した。直接音および初期反射音に対しては近接4点法により各測定点での各仮想音源座標と各波形を同定することで任意位置での伝達関数を補間し、残響の補間に対しては単純な線形補間およびゲインの調整で対応する。この伝達関数補間法を第7章で提案した音圧計算法に用いることで、音源が室内を移動する際的评价点音圧が計算できる。無響室での音源移動実験において、評価点音圧の計算値は測定値を振幅・位相共に良く近似した。また、長い残響に対し、測定値から残響の特性を表す少数のパラメータを抽出・保存し、補間に際しては必要な測定点のパラメータのみ読み出して近似的な残響を合成する方法を提案し、合成値が測定値を良く近似することを実験で検証した。

第9章は結論で、本論文で得られた成果と今後に残された課題についてまとめている。

論文審査の結果の要旨

本論文は、空間中を音源または評価点が移動することで両者間の音響伝達特性が変化する時変音響系に能動騒音制御や音場創生技術を適用することを目指した研究であり、新たな手法を提案し、その理論的解析を行い、それを数値計算と実験によって検証している。得られた成果の主たるものは以下のとおりである。

1. 一次元音響管内を評価点が移動する際の能動騒音制御に対し、インパルス応答の周期性に着目した伝達関数補間法を提案した。この補間法を用いて任意の評価点位置での誤差経路伝達関数を同定することで、評価点移動速度に影響されない安定した消音性能を実現した。
2. 音源移動時の各時刻での音源位置での伝達関数を有限インパルス応答（FIR）フィルタとして音源音圧にたたみ込むことで評価点音圧を得る方法を提案し、数値計算により本提案法が幾何音響による理論解と良く一致することを検証した。
3. 遮音壁を有する道路上を音源が移動するような三次元閉空間を対象に、道路上二点での伝達関数測定値から、遮音壁の回折と道路での一回反射の両経路の係数および経路長を分離して同定することで、二点間任意位置での伝達関数を補間できることを数値計算および実験で検証し、評価点で観測される移動音源の音を創生した。
4. 上記3. で提案した補間法では伝達関数の補間値が周波数領域で得られることを基に、音源移動時の評価点音圧を周波数領域で計算する方法を提案し、上記2. で示した方法に比べ計算量の削減および精度の向上を実現した。
5. 居室などの三次元閉空間において、近接4点法による初期反射音の仮想音源同定を用いた伝達関数補間法を提案し、閉空間内を音源が移動する際的评价点音圧を提案法により創生することの妥当性を実験により検証した。

以上、本論文は時変音響系への能動騒音制御や音場創生技術の適用を研究したものであり、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成19年1月24日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。