

氏名	たけ ばやし よう いち 竹 林 洋 一
授与学位	工 学 博 士
学位授与年月日	昭和 55 年 3 月 25 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 1 項
研究科，専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 情報工学専攻
学位論文題目	音響信号処理に関する研究
指導教官	東北大学教授 城戸 健一
論文審査委員	東北大学教授 城戸 健一 東北大学教授 野口 正一 東北大学教授 星子 幸男 東北大学教授 曾根 敏夫

論 文 内 容 要 旨

第 1 章 序 論

音の発生及び伝搬機構の計測は，音響工学の基本的課題である。例えば，騒音の評価や制御のためには，まず物理的音響特性の測定が必要である。また，近年の電気音響変換器や半導体素子の進歩は音響機器の大幅な性能向上をもたらしたが，音響通信の高忠実度化をさらに発展させるためには高速かつ高精度の音響測定が必要であると考えられる。本研究は，従来，主としてアナログ的に行われてきた音響測定を，デジタル信号処理により行うことを主題としたものである。特に，人間の聴覚の機能を考慮した場合，音響特性は周波数の関数として表すと合理的であると考えられるので，1965年 Cooley と Tuhey により創案された高速フーリエ変換 (Fast Fourier Transform : FFT) アルゴリズムを中核とした音響信号処理に関する検討を行うこととした。

音響測定では測定対象とする音響系が複雑多岐にわたっており，伝搬に要する時間が無視できない場合や，音源や伝搬経路が複数個存在したり，あるいは，長い残響や外部雑音を伴う場合がある。このため，音声信号処理のように，ただある一点の音響信号のデジタル処理を行うだけでは，その音響系に関する十分な情報を得ることは困難であり，複数点の音響信号を扱う多チャンネル信号のデジタル処理が必要であると考えられる。本論文では，上述した観点から，FFT を活用して莫大な情報量を含む音響信号を処理し，音響系の伝達関数，コヒーレンス関数等を推定する際に遭遇する諸問題を定量的に解明し，その解決法を与えることを目的としている。

第2章 離散的フーリエ変換によるデジタル信号処理

本論文中で中心的役割をする離散的フーリエ変換 (Discrete Fourier Transform: DFT) を利用した種々のデジタル信号処理の理論面の整備を行った。

まず、DFTとフーリエ変換の定義を、信号の自由度の概念を用いて明確に対応づけた。また、DFTの演算を効率的に実行するFFTアルゴリズムにつき考察した。次に、直接法(DFT法)及び相関法によるパワースペクトル推定の差異につき検討した。さらに、相関法によるコヒーレンス関数推定では、パルツェン窓を使用しても、コヒーレンス関数の推定値 $\hat{\rho}^2$ は1以下に抑制できないことを明らかにした。

第3章 音響伝達特性推定における諸問題

音響伝達特性推定をFFTプロセッサ等を用いて実際に行う際に生じる諸問題につき体系的検討を行った。

まず、時間遅れや残響を含む系の伝達特性推定では、有限長の時間窓を使用するために誤差が生じることを指摘した。また、複数の伝達経路が存在する場合の問題を提起し、これらの問題に対する詳細な議論を、第4、5、6章に譲った。

観測データ長が有限である場合に生じる統計的誤差につき検討した。その結果、伝達系の周波数特性が平坦で時間窓で切り出される各セグメントが独立な場合、コヒーレンス関数推定値のバイアス及び分散は窓関数に依存しないことが明らかとなった。また、方形波窓とCOSⁿ窓について、時間窓のオーバーラップの割合と統計的誤差との関係を求めた。そして、時間窓の両端の荷重が滑らかな窓関数ほど、統計的誤差低減のために、オーバーラップの割合を増加させるべきであることが明らかとなった。ここで得られた結果は、観測データ量の圧縮及び観測区間の短縮のための基礎資料として有用である。

次に、AD変換の際に発生する量子化誤差につき検討した。コヒーレンス関数を用いて求めた量子化によるSNR(信号対雑音比)は理論と良く合致した。また、量子化誤差の伝達特性推定への影響を理論的に検討し、量子化による伝達特性推定誤差が入出力信号の分散と量子化ビット数に依存し、その誤差の補正が可能であることを明らかにした。さらに、ブロック浮動小数点演算による16ビットの1024点FFTの1回当りのSNRは63dB程度であることを実験的に示した。伝達特性推定における有限レジスタ長による誤差は、量子化誤差と演算誤差とに分離でき、補正が可能であることが明らかとなった。

さらに、実数系列FFTアルゴリズムをインパルス応答及びケプストラムの推定に適用する際の問題を指摘し、折り返し周波数におけるDFTの計算を別個に行うことが必要であることを示した。また、入力音声や音楽等のように非白色である場合の問題につき考察し、入力のスペクトルに零点がある場合には、その周波数付近での伝達特性の推定精度が著しく劣化することを示した。

第4章 時間遅れを有する系の伝達特性の推定

伝達系に時間遅れがある場合の伝達特性推定について詳細に検討し、窓関数の効果を明らかにした。

特に、方形波窓とハニング窓について、 d/T_w （遅延時間/時間窓長）とコヒーレンス関数推定値 r^2 との関係を実験的に求めた。その結果、 $d/T_w < 0.18$ のとき、ハニング窓を用いたときの r^2 の方が、方形波窓のときよりも大きく、推定精度が良好であることが明らかとなった。一般に、調和解析を行う場合、窓関数の選択は、スペクトルの分解能とサイドローブという視点から行われている。しかし、伝達特性を推定する場合、入出力系列に対して時間窓をかけるので、系に時間遅れがあるときの窓関数は単なるスペクトル分析のときとは異なる意味をもつことを示した。高精度の伝達特性の推定を実現するためには、遅延時間よりも十分に長い荷重関数窓の使用が必要であり、本章で得られた結果は、時間遅れを有する系の解析における時間窓設定のための基礎資料として極めて有用である。

第5章 残響を有する系の伝達特性の推定

音響伝達特性推定において重要な残響の問題について考察し、解決法としてFFTを活用した狭帯域化デジタル処理法を提案した。

残響に起因する伝達特性推定誤差につき理論的検討を行い、方形波窓及びハニング窓を使用したときの単一共振系の τ/T_w （時定数/時間窓長）とコヒーレンス関数及び伝達関数の推定精度との関係を与えた。その結果、残響時間よりも十分に長い荷重関数窓を使用することにより、残響に基づく誤差が抑制できることが明らかとなった。

さらに、単一共振系について行った実験結果から、本章で提案したFFTを活用した狭帯域化デジタル処理の有効性が確かめられた。

第6章 複数の経路を有する系の伝達特性の推定

入出力間に伝搬時間の異なる複数の経路が存在する場合の問題について検討した。

各経路の伝達関数の分離推定法として、複素ケプストラムを利用した方法を提案し、他の方法（原波形に短い時間窓をかける方法、相互相関関数による方法、インパルス応答による方法）と比較検討した。何れの方法でも経路間の伝搬時間差が短い場合、伝達関数の分離推定精度は劣化するが、複素ケプストラム法はコムリフタの使用により分解能の向上が可能であり、分離推定精度が最良であることが示された。

また、通常の複素ケプストラム解析は雑音の影響を受けやすい欠点があるが、本章で提案した方法はクロススペクトルを基本としているので、外部雑音の影響を除去できるという利点があることを示した。

さらに、3個以上の経路を含む場合や経路間の周波数特性が異なる場合の問題についても検討し、複素ケプストラム法の有効性を示した。

第7章 複数入力を有する系の伝達特性の推定

多入力系の解析に関する検討と応用について論じた。

種々の時間遅れを含む多入力系をシミュレートし、通常のコヒーレンス関数、パーシャルコヒーレンス関数、マルチプルコヒーレンス関数を求め、それらの推定値が時間遅れの影響により複雑な振舞いをすることを明らかにした。

また、6章で議論した並列伝送系の伝達関数の分離推定法として、残差スペクトルを利用した方法を提案し、実験結果から、経路間の遅延時間差が短い場合に、この方法が有効であることを示した。

第8章 音響信号処理の応用

前章まで検討を加えたデジタル信号処理を、実際の音響測定に適用した例を示した。

スピーカ及びアンプの周波数特性及びS/Nの測定を行い、その精度につき検討した。また、自動車の騒音測定を行い、種々の問題点を指摘した。続いて、建築音響への応用例として、5章で提案した狭帯域化デジタル処理法を、部屋の音響伝送特性の測定に適用し、有効性を明らかにした。さらに、機械系の故障検出への応用につき検討し、板振動及びベアリングの異常の検知に音響信号処理が有用であるとの見通しを得た。また、水中音響等において重要な時間遅れの推定について検討を行った。そして、水道管の漏水箇所の検知に適用し、良好な結果を得た。

第9章 結 論

本論文では、音響系の伝達関数及びコヒーレンス関数推定における体系的検討を行い、統計的誤差、量子化及び演算誤差、時間遅れ、残響、複数経路、複数入力等の問題を明らかにし、その解決法を与えた。今後、超LSI技術や素子の高速化により信号処理プロセッサは高速高精度化し、デジタル信号処理による伝達特性推定の応用範囲はさらに拡大するものと考えられる。その際、本論文中で検討した時間窓長の制限や量子化及び演算誤差の問題は緩和すると考えられるが、本論文で示した結果は、高精度の伝達特性推定のために有用な基礎資料と信号処理技術を含んでおり、音響学は固より、医学、機械、建築、土木、資源工学等の広範な分野の伝達特性推定に活用できるものである。

審査結果の要旨

音の発生と伝達の機構の解明は、音響工学の基本的課題であり、それに関する研究は古くから行われている。しかし、従来からのアナログ処理では不可能な問題が残り、新しい処理技術の発展による解決が望まれていた。近年急速に発達したデジタル信号処理技術は、それに対応し得るものであるが、音響工学に適用するためには、音響信号特有の性質に基づいて生じる諸問題の解決が必要である。本論文は、この解決を目標として行った研究の成果をまとめたもので、全文9章からなる。

第1章は序論である。

第2章では、本研究の根幹となる離散的フーリエ変換(DFT)について論じ、第3章ではDFTによる音響伝達特性推定について実際の検討を行い、解決すべき問題点を明らかにしている。

第4章では、入出力間に時間遅れのある系の解析について詳細に検討し、信号を切り取る時間窓の設計について、新しい知見を加えている。

第5章では、残響を有する系の解析の問題を取り上げ、高速フーリエ変換の性質を巧みに利用した狭帯域デジタル信号処理法を提案し、これによって残響の長い系の伝達特性の推定が可能になることを示している。

第6章では、複数経路を持つ系の各経路の伝達特性を分離して推定するために、クロススペクトル法を基本とする複素ケプストラムを利用する方法を提案し、この方法が2経路の特性が著しく異なる場合に適していることを示している。

第7章では、多入力系の解析に関する検討を行い、種々のコヒーレンス関数の性質を明らかにし、入力信号の間に相関がある場合の各経路の伝達特性の推定に残差スペクトルを用いる方法を提案し、この方法による推定精度と信号源間の相関との関係を論じている。

第5、6、7章で提案された方法は、共に優れた着想に基づく有用なものである。

第8章では、本論文で述べた種々の音響信号処理技術の応用について述べている。

第9章は結論である。

以上要するに、本論文は新しい信号処理技術を音響信号処理に応用し、音響信号特有の性質に基づく諸問題を明らかにすると共に、その性質を利用した新たな処理方法を開発し、従来困難とされていた問題に解決の道を与えたものであり、音響工学並びに情報工学に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。