

学 位 論 文 題 名

センサ・アレーによる音源方位推定手法の高性能化に関する研究

学位論文内容の要旨

センサ(マイクロホン)・アレーを用いて複数の入射音響信号の音源の位置を推定する問題(音源定位問題)は、ソナーや地震波解析など、多方面の音響信号処理分野で古くから重要な問題である。中でも音源がアレーから十分遠方にあると仮定した場合の、平面波入射信号の音源方位推定は、音源定位問題に対して基礎となるものであり、極めて重要な問題である。この問題に対し、限られた量のデータから精度よくかつ高速に音源方位を推定する手法の研究が近年盛んに行われている。

最も古典的な手法の一つとして、ビームフォーミング法があり、現在も広く一般に用いられている。この手法では、方位分解能がセンサ素子数により制限され、センサ素子数の少ないアレーを用いて高い方位分解能を得ることは困難である。

この従来のビームフォーミングに比べて卓越した分解能が得られるような音源方位推定手法、いわゆる高分解能手法が数多く提案されている。高分解能手法の中で特に精度が良いアルゴリズムとして MUSIC アルゴリズムが知られている。MUSIC は、いわゆるしきい値領域(低 SNR の時または少数データ・サンプルの時)において分解能及び推定精度の劣化が著しい。また、信号の伝達がマルチパス伝達である時に起こる、コヒーレント入射信号に対し、MUSIC を単独で適用することは困難である。この解決法として空間スムージングと呼ばれる前処理が提案されているが、推定精度・分解能の点で良好な手段とは言えない。

このアプローチとは別に、音源方位推定問題への最大尤度法(最尤法, ML)の適用も検討されてきた。最尤法による音源方位推定法は、コヒーレント入射信号に対しても単独で適用可能であり、しきい値領域において MUSIC よりも高分解能・高推定精度である。しかし最尤法は、多次元の非線形最適化問題を含むため一般に膨大な計算量が必要である。最尤推定を効率的に行う手法として、Ziskind と Wax による AP (Alternating Projection) アルゴリズムなどが提案されているが、やはり計算量が膨大である。

本論文では、分解能が高く、推定精度が良好で、かつ計算量が少ない音源方位推定手法の確立

を目標とし、高分解能・高推定精度を有する最大尤度法に着目し、最尤音源方位推定を少ない計算量で行うためのアルゴリズムを考察する。ここでは基礎的なものとして、等間隔直線センサ・アレーを対象にする。

第2章では、等間隔直線アレーの各センサ素子で得られるデータの定式化を行う。ここでは、得られる実データに基づいてデータの複素表現による定式化を行う。

第3章では、等間隔直線アレーの場合における、最大尤度法による音源方位推定問題の定式化を行う。尤度関数の最大化問題は一般に多次元の複雑な最適化計算を必要とするが、アレーの形状を巧みに利用することにより、最尤法の評価基準が、多項式係数をパラメータとした評価関数となり、方位推定値が多項式零点から容易に求まることを示す。最終的に最尤音源方位推定問題は、係数に対応する実ベクトルによる制約条件なしの最適化問題に帰着する。

第4章では、センサ素子数が入射信号数より1個だけ多い場合において、複雑な非線形計算を回避する手法を示す。本手法では最適ベクトルが実対称行列の固有ベクトルで与えられるため、計算量が少ない。シミュレーション実験により、本手法が MUSIC アルゴリズムより高精度であり、AP アルゴリズムより計算量が少ないことを示す。

第5章では、アレー全体を入射信号数より1個だけ多いセンサ素子数を有する複数のサブアレーに分割することにより、センサ素子数の増加が可能な手法を示す。この手法は、真の最尤推定法の近似であるが、4章の手法を活用できるため、非線形最適化問題の回避が可能である。シミュレーション実験により、本手法が AP アルゴリズムより計算量が少ないことを示す。また、サブアレー分割は AP アルゴリズムに比べ推定精度の劣化を招くことを示す。

第6章では、効率的な繰り返し計算を導入することにより、サブアレー分割を必要としない手法について示す。この手法は、各繰り返しステップが実対称行列の固有ベクトル計算で成り立っているため、計算量が少ない。シミュレーション実験により、本手法が MUSIC アルゴリズムより高精度であり、AP アルゴリズムより計算量が少ないことを示す。また、この手法が、評価係数の正確な微分を考慮していないため、推定値が真の最尤推定値からずれることを示す。

第7章では、評価係数の正確な微分を考慮することにより、第6章の手法における最尤推定値からのずれを削除する手法を示す。この手法も、実対称行列の固有ベクトル計算に基づいているため、計算量が少ない。シミュレーション実験により、本手法が、MUSIC アルゴリズムより高精度であり、AP アルゴリズムより計算量が少なく、あるしきい値以上の SNR で正確な最尤推定値を与えることを示す。またこの手法は、繰り返し計算の収束性が考慮されていないため、低 SNR などの悪条件で真の最尤推定が行えない場合があることを示す。

第8章では、評価関数の勾配の効率的な計算法を示し、最尤音源方位推定問題に勾配法を適用する。ここでは、勾配法の中で収束性・効率性が最も優れていると言われる準ニュートン法を用いた推定手法を中心に議論する。シミュレーション実験により、本手法が MUSIC アルゴリズムより高精度であり、AP アルゴリズムより計算量が少なく、7章の手法に比べ低 SNR において安定した最尤推定を行えることを示す。

第9章では、最尤法による音源方位推定を適応的推定問題に拡張することを試みる。適応的音源方位推定は、時変の音源方位を実時間で推定したい場合（方位トラッキング問題）などに対し有効である。ここでは、第6章の固有ベクトル計算繰り返し法、および第8章の準ニュートン法による方法を適応推定の形式に拡張した2つのアルゴリズムについて論ずる。シミュレーションにより、これら2つのアルゴリズムの有効性を示す。

最後に、第10章で、本研究の成果について要約し、今後に残された課題について述べる。

本研究では、等間隔直線アレーの場合において、最大尤度推定法に着目し、計算量の削減をはかり、高分解能・高推定精度かつ少計算量の音源方位推定手法が得られた。またこのことにより、高性能な適応的音源方位推定手法が構築された。

学位論文審査の要旨

主査	教授	永井信夫
副査	教授	伊藤精彦
副査	教授	小川吉彦
副査	教授	栃内香次
副査	助教授	三木信弘

センサ・アレーにより複数の平面波入射信号の音源方位を推定する問題は、多方面の音響信号処理分野で重要な問題である。この問題に対し、限られた量のデータから高精度・高速に音源方位を推定する手法の研究が、テレビ会議や移動体通信の需要の増大に相まって、近年盛んに行われている。

最大尤度法による音源方位推定手法は、雑音環境下において方位分解能や推定精度で優れているが、一般に膨大な計算量を必要とする。

本論文は、最尤音源方位推定を少ない計算量で行うアルゴリズムを論ずるものである。ここでは基礎的なものとして等間隔直線アレーを対象にしている。

第2章では、等間隔直線アレーで得られるデータのモデリングを行う。ここでは、データの複素表現モデルを導いている。

第3章では、等間隔直線アレーの場合における、最大尤度法による音源方位推定問題の定式化を行っている。アレーの形状を巧みに利用することにより、最尤法の評価基準が、多項式係数をパラメータとした評価関数となり、方位推定値が多項式零点から容易に求まることを示している。最終的に最尤音源方位推定問題は、係数に対応する実ベクトルによる制約条件なしの最適化問題に帰着されている。

第4章では、センサ素子数が入射信号数より1個だけ多い場合において、複雑な非線形計算を回避する手法を提案している。本手法では最適ベクトルが実対称行列の固有ベクトルで与えられるため、計算量が少ない。実験（シミュレーション）により、本手法が従来の最尤推定アルゴリズム（AP アルゴリズム）より計算量が大幅に少ない（約1000分の1）ことが示された。

第5章では、アレー全体を「入射信号数+1」個のセンサ数の複数サブアレーに分割することにより、全センサ数の増加が可能でありかつ非線形最適化を回避する手法を提案している。実験により、本手法がAPより大幅に少ない計算量で最尤推定値の近似値を与えることが示された。

第6章では、固有ベクトル計算の繰り返しによる計算量の少ない手法を提案している。実験により、本手法が5章の手法より精度が良く、APより少ない計算量（約 $1/100 \sim 1/1000$ ）で最尤法の近似解を与えることが示された。

第7章では、6章の手法を改良し、正確な最尤音源方位推定値を少ない計算量で求める手法を提案している。実験により、本手法がAPより少ない計算量（約 $1/10 \sim 1/300$ ）で正確な最尤推定値を与えることが示された。

第8章では、評価関数の勾配の効率的な計算法を示し、勾配法の中で収束性・効率性が最も優れていると言われる準ニュートン法を適用した推定手法を提案している。実験により、本手法がAPより少ない計算量（約 $1/10 \sim 1/100$ ）で、7章の手法に比べ安定に、正確な最尤推定値を与えることが示された。

第9章では、時変方位の実時間推定のために、6章および8章の手法それぞれを適応的音源方位推定アルゴリズムに拡張している。実験により、これら2つのアルゴリズムの有効性が示されている。

最後に、第10章で、これまでの章を総括し、本研究の成果について要約し、今後に残された課

題について述べている。

以上のように本論文では、高分解能・高推定精度かつ計算量の少ない音源方位推定手法および高性能な適応推定手法を提案し、多くの新知見を得ており、音響信号処理および電子工学に寄与するところが大きい。よって著者は、博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。