

優ガウス性の確率分布を用いた統計モデルに基づく 信号処理に関する研究

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 公開日: 2020-05-27 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 丹治, 寛樹 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/10291/20858

優ガウス性の確率分布を用いた統計モデルに基づく信号処理に関する研究

電気工学専攻
丹治 寛樹

1. 問題意識と目的

音響信号が持つさまざまな情報をコンピュータによって取り出したり、音響信号の部分的な情報のみから音響信号を合成したりするために、音響信号処理の分野ではさまざまな技術が考案されている。特に音響信号のパラメータ推定では、例えば音源の到来方向や基本周波数、さらに音源のそのものが推定の対象になる。このような音源の基礎的な情報を推定できれば、音楽から楽譜情報を推定する自動採譜やロボット聴覚といった応用技術の構築に寄与することができる。

音響信号のパラメータを推定する手法では、音響信号の物理的なモデルや統計的な性質に基づいてパラメータに関する評価関数を導出し、この評価関数を最適化するアプローチがしばしばとられる。このようなアプローチでは、パラメータをより正確に推定するために、対象とする音響信号を可能な限り忠実にモデリングすることと、導出された評価関数が限られた処理時間内で最適化できることが要求される。特に、統計的なアプローチに基づく音響信号のパラメータ推定では、対象とする音響信号の統計的な性質を考慮して統計モデルを構築する必要がある。

より優れた統計モデルを構築するため、音響信号の統計的な性質を調査した結果がこれまでに数多く報告されている。これらの先行研究では、音声や音楽、実環境の雑音といった多くの音響信号が時間領域で正の尖度を持つことが指摘されている。また、周波数領域でもこれらの信号は正の尖度を持つことが知られている。これに基づき、尖度が正の分布、すなわち、優ガウス性の分布に基づくパラメータの推定手法がいくつか提案されている。しかし、音響信号処理における問題の複雑化や優ガウス性の分布の取り扱いの難しさから、依然として最適化の容易さを優先して統計モデルを構築することが多い。最適化アルゴリズムの導出が困難であったとしても、実応用の場面では、音響信号の特性をなるべく忠実にモデリングすることが非常に重要である。

本研究では、実環境の音響信号を記述するのに相応しい優ガウス性の分布を用い、パラメータ推定のための統計モデルを構築する。音響信号処理におけるさまざまな推定タスクのうち、本研究では離散時間システム同定および信号分離に着目する。これらのタスクの目標は、それぞれ未知のシステムへの入出力信号からそのシステムの特徴を推定すること、また混ざり合った複数の音響信号から元の音響信号を推定することである。いずれも信号処理における中心的な課題であり、システム同定は通話音声の残響除去、信号分離は録音された音声に混入した多種多様な雑音の除去などに活用できる。本研究で提案する定式化により得られる評価関数は従来法より取り扱いが難しいが、本研究では提案する定式化に基づいた最適化アルゴリズムの導出を試みる。

2. 構成及び各章の要約

本論文は以下に示す5つの章から構成されている。

- 第1章 はじめに
- 第2章 優ガウス性の確率分布
- 第3章 双曲線正割分布に基づく離散時間システム同定
- 第4章 複素ベッセル分布に基づく非負値行列因子分解
- 第5章 おわりに

各章の詳細を以下に述べる。

第1章では、統計モデルに基づく音響信号処理の背景や先行研究について述べ、本研究の動機付けを行う。この章では、まず音響信号の定式化の例や音響信号の統計的な性質を調査した先行研究について述べ、音響信号処理における優ガウス性の仮定の重要性について説明する。さらに、優ガウス性の分布に基づく離散時間システム同定および信号分離における従来手法を概説する。また、研究背景を踏まえて、第3章および第4章で提案する推定手法のあらましを述べる。

第2章では、第3章および第4章での定式化に寄与することを目的として、本研究の定式化に用いる優ガウス性の分布である双曲線正割 (hyperbolic secant; sech) 分布および複素ベッセル分布について、これらの定義や性質を述べる。また、これらの分布の工学的な応用例についても併せて取り上げる。複素ベッセル分布はラプラス分布の一般化であることから、本章ではラプラス分布の構成方法を踏まえて複素ベッセル分布の密度関数を導出する。

第3章では、未知の離散時間システムが有限インパルス応答 (finite impulse response; FIR) システムで記述できると仮定し、離散時間システムの同定問題を FIR システムの係数の推定問題として扱う。この推定問題において、本章では sech 分布に基づく評価関数を提案する。先行研究において sech 分布を明示的に用いるものは皆無であるが、ニューラルネットワークや信号分離の分野では sech 分布と深く関連する定式化がなされている。特に信号分離では、sech 分布の仮定と等価な仮定に基づく手法が音声信号の分離に対して有効であると知られている。

この章では、まず、正規分布およびラプラス分布を用いた FIR システム同定の定式化および最適化アルゴリズムの概要を述べる。これを踏まえて、以下の3つの手法を提案する。

(1) sech 分布に基づく FIR システムの係数の推定手法

sech 分布に基づいて FIR システムの係数を推定するための評価関数を提案する。この評価関数の最適化問題では、係数に加えて分布の尺度も同時に最適化する必要がある。そのため、尺度の非負性を保証するために上界最小化 (majorization-minimization; MM) アルゴリズムに基づいて最適化アルゴリズムを導出する。

(2) sech 分布に基づく FIR システムの次数と係数の同時推定のためのベイジアンモデルおよびサンプリングアルゴリズム

未知システムは、本来次数も係数も未知であるため、sech 分布を用いて、次数と係数を一挙に推定するための枠組みを構築する。この枠組みはノンパラメトリックベイジアン (nonparametric Bayesian; NPB) モデルに基づいており、無限個の要素を持つスパースなベクトルを用いて FIR システムの係数を構成する。提案する NPB モデルに基づき、事後分布を最大化する次数と係数を見つけるために、本研究では、事後分布を探索するサンプリングアルゴリズムを導出する。本研究で提案する NPB モデルでは、尤度関数と事前分布が共役ではない。そのため、効率的なサンプリングアルゴリズムを導出するために、MM アルゴリズムと同様のアプローチを用いて尤度関数を書き換えることで、共役なモデルを得る。このモデルから推定すべき変数をできる限り積分消去することでサンプリングすべき変数を減らし、事後分布からのサンプリングを効率化させる。

(3) sech 分布に基づくカルマンフィルタによる線形状態空間モデルの状態変数の推定手法

FIR システム同定の実応用では、係数の適応的な推定がしばしば求められる。そのため、係数の推定問題が線形状態空間モデルの状態変数の推定問題によって記述できることに着目し、sech 分布に基づくカルマンフィルタを提案する。提案するカルマンフィルタにおいても、(1)および(2)と同様に sech 分布をより扱いやすい形に書き換えることでパラメータの更新アルゴリズムを導出する。

さらにこの章では、(1)および(2)に対して、優ガウス性の雑音に対する頑健性やアルゴリズムの収束速度をシミュレーションにより検証する。(3)に対しては FIR システム同定に加えて力学系の状態変数の推定についてもシミュレーションを行い、提案法が外れ値を持つ雑音に対して有効であることを示す。

第4章では、非負値行列因子分解 (nonnegative matrix factorization; NMF) に基づく信号分離のアプローチに着目する。音響信号処理において NMF は、観測信号のスペクトログラムを頻出するスペクトルとそのスペクトルの重み行列に分解する。従来の NMF は複素正規分布を用いて定式化されているが、本研究では、音響信号のスペクトログラムが複素ラプラス分布などの優ガウス性の分布に従うことを考慮し、複素ラプラス分布の一般化である複素ベッセル分布を用いて NMF を定式化する。NMF に関する研究において統計モデルの一般化を考えることは、ハイパーパラメータを変化させることで観測信号により適した統計モデルを見つけることが期待できるため、非常に有意義である。

この章では、まず従来の NMF および NMF に空間モデルを導入した多チャンネル拡張 (multichannel NMF; MNMF) の定式化について述べる。その上で、以下の2つのモデルとその評価関数の最適化アルゴリズムを提案する。

(4) 複素ベッセル分布に基づく NMF

複素ベッセル分布に基づいて NMF の評価関数を提案する。この評価関数は、2種類の複素ラプラス分布に加え、従来の複素正規分布に基づく統計モデルの一般化である。本研究では、複素ベッセル分布に基づく定式化に加えて複素ラプラス分布に基づく定式化も同時に提案し、これらの統計モデルの関係を整理する。提案する評価関数はパラメータについての特殊関数を含んでいるため、パラメータの非負制約を保証する最適化アルゴリズムの導出は困難である。しかし本研究では、パラメータの最適化が可能になるように MM アルゴリズムに基づいて最適化問題を等価な問題に書き換えることで、パラメータの非負制約と評価関数の単調減少が保証された最適化アルゴリズムを導出する。

(5) 複素ベッセル分布に基づく MNMF

(4)で提案した NMF をブラインド信号分離 (blind signal separation; BSS) に適用するために、複素ベッセル分布を用いた MNMF の新たな評価関数を提案する。さらに、この評価関数に対しても MM アルゴリズムを適用することでパラメータの最適化アルゴリズムを導出する。

この章では、さらに、(4)および(5)で提案した手法の性能をシミュレーションにより検証する。まず、(4)で提案した NMF を、低ランクな分散構造を持つ分布から生成したデータへの適合および半教師あり雑音除去に適用して性能を検証する。また、(5)で提案した MNMF を3音源の BSS に適用し、提案法の分離性能やアルゴリズムの収束速度を検証する。これらのシミュレーションでは、ハイパーパラメータをさまざまに変えながら提案法の性能を検証し提案法の可能性を議論する。

第5章では、本研究で新たに得られた知見を整理し、今後の展望を示す。第3章では、sech 分布に基づいて FIR システムの同定を定式化することで、優ガウス性の雑音に対して頑健な推定アルゴリズムが導出できることを示した。また、第4章では従来の NMF および MNMF の新たな一般化を提案し、シミュレーションにより複素ラプラス分布に従う雑音の除去に提案法が有効であることを示した。今後は、sech 分布の多変量拡張の発見や、これに基づくカルマンフィルタの導出が望まれる。また、NMF に基づく信号分離において、適切な統計モデルを明らかにするために、理論的な議論やシミュレーションによる検証が求められる。