

論文の内容の要旨

論文題目 Inverse Problems for Acoustic Measurement with
Nonlinear Saturation Effects: Theory and Application
(非線形飽和現象を伴う音響計測のための逆問題における理論と応用)

氏名 植野 夏樹

本研究は、音響信号や音場などの様々な音響的物理量の計測問題を包括的に扱ったものである。この音響計測の技術は、音を扱う様々な応用技術の基礎をなす重要な技術である。音響計測は、未知量をその間接的な観測を基に決定・推定する問題、すなわち逆問題の一種として捉えることができる。逆問題は、未知量と観測値の間の線形性を仮定する線形逆問題と、そうではない非線形逆問題に分類される。様々な音響計測問題は、理想的な観測条件の下では線形逆問題として扱うことができ、実際に従来研究の多くは観測の線形性を仮定している。しかし、現実の多くの計測問題では、しばしば観測が非線形な飽和現象の影響を受けるため、このような非線形性を考慮した音響計測問題の包括的な理論の確立が望まれる。また、主に線形逆問題の分野で既に確立されているいくつかの有用な理論も、音響計測の応用的な手法においては十分に活用されていないため、これらの適用による高精度化も課題として挙げられる。そこで本研究では、非線形飽和現象を考慮した逆問題の理論の確立及び、新たに確立された理論並びに既存理論の種々の応用問題への適用を本研究の目的とする。

第 2 章では、本研究が扱う対象とする逆問題のクラスを述べ、関連研究を俯瞰的にまとめた後に、本研究で解決すべき問題を明確化する。逆問題とは、未知量と観測値の関係、すなわち順問題が与えられた下で、観測値を基に未知量を決定・推定する問題である。多くの音響計測問題では、順問題のみに基づいて観測値から未知量を一意に決定することは困難であり、そのような場合、未知量に対する何らかの先験情報を基に最も「妥当な」解を求める最適化問題として定式化されるのが一般的である。この最適化問題では、推定された未知量と与えられた観測値との間の乖離を評価する損失関数と、観測とは独立に定義される、先験情報を基に観測値の妥当性を評価する正則化関数との和を最小化すべき目的関数として定義される。本研究が対象とする逆問題では、飽和現象に由来する観測の非線形性が原因で、最適化の容易さと観測ノイズへの頑健性を両立するような損失関数の定式化が提案されていないという問題がある。以降の章では、最適化の容易さと観測ノイズへの頑健性を両立するような損失関数を提案し、また、様々な応用問題の文脈で、その定式

化に基づく計測手法を提案する。

第 3 章では、第 2 章で述べた問題を解決するような定式化を新たに提案し、従来の定式化との理論的な比較を行う。本研究では、飽和を表す関数の原始関数を用いて損失関数を定義し、この損失関数のいくつかの有用な性質を述べる。また、従来の損失関数の定式化と比較し、本研究で提案された損失関数が、最適化の容易さと観測ノイズの頑健性を両立していることを確認する。また、様々な正則化関数と組み合わせた際の最適化理論及び具体的な最適化アルゴリズムについても述べる。

第 4 章では、飽和した音響信号の復元問題を扱う。従来の信号復元の問題の多くは、例えば A/D 変換器におけるハードクリッピングのような特定の飽和現象を想定し、飽和現象の後には観測ノイズが印加されない条件を想定していた。しかし、センサや増幅器における飽和現象を想定する場合は、飽和現象の後にも観測ノイズが生じる場合がある。このような問題に対して、第 3 章で提案した定式化に基づく信号復元手法を提案し、従来の手法よりも観測ノイズに頑健な信号復元が実現されたことを数値実験によって確認する。

第 5 章では、音場計測問題について扱う。本研究では、音源方向の事前情報を与えることで推定精度を向上する手法及び、飽和現象の影響を受けた観測値から音場を推定する手法の 2 つを提案する。従来の音場計測の問題では、音場を有限個の基底関数を用いて表現することが一般的であり、基底の取り方が不適切であった場合に推定精度が劣化する問題があったが、本研究では、無限次元のヒルベルト空間の知見を利用することでこの問題を回避している。また、提案手法の有効性を数値実験によって示す。