

学 位 論 文 題 名

シュリンケージ法による雑音除去技法と

その応用に関する研究

学位論文内容の要旨

本論文は雑音除去アルゴリズムであるシュリンケージ法 (Shrinkage Method) の応用として、主に多次元データの次元決定問題及び適応デジタルシュリンケージフィルタの設計というふたつの議題について論じるものである。

シュリンケージ法は離散ウェーブレット変換などの変換を用いて時間領域の離散時間入力信号を周波数領域の信号に変換し、周波数領域内において各帯域ごとに信号をしきい値処理によって直接減衰させることによって特定帯域の信号を減衰させて雑音除去を行う非線形アルゴリズムであり、その本質は雑音の種類に応じたしきい値の最適選択にある。このシュリンケージ法自体は信号処理の分野のみならず、様々な分野において古くから用いられてきた技法であるが、1990 年台初頭にウェーブレット解析が発展し、主に Donoho, Johnstone らによってウェーブレットシュリンケージ法 (Wavelet Shrinkage Method) として体系化されたあと様々な最適しきい値選択手法が提案されている。

本論文ではこのシュリンケージ法の応用のひとつとして、はじめに多次元データの本質的な次元を選択する問題を取り扱っている。

ある多次元観測データの次元縮小をおこなうために、観測データの本質的な次元を選択する必要性が様々な分野で度々生じている。従来ではそのデータから標本共分散行列の固有値を求めて、 $\chi^2$  検定などの手段を用いて選択した最適なしきい値よりも小さい固有値を雑音成分として取り除くことによって次元を選択する方法が用いられている。ここで固有値を観測データの一種の周波数領域信号表現とみなせば、これはハード型しきい値関数を用いたシュリンケージ法そのものであると考えられる。そこで本論文ではシュリンケージ法の最適しきい値選択手法のひとつとして提案されている AMDL (Approximate Minimum Description Length) 基準をこの問題に対して拡張して適用することを提案している。AMDL 基準はモデル選択基準のひとつである MDL (Minimum Description Length) 基準から導かれる基準であり、観測データの標本共分散行列が Wishart 分布に従うと仮定することによって標本共分散行列の固有値の漸近同時分布モデルが簡潔に求まるため、共分散行列の固有値を計算するだけで本手法を適用することが可能となる。

さらに本論文ではしきい値を与えられた教師信号に応じて適応的に変化させて雑音除去を試みる適応デジタルシュリンケージフィルタの設計に関して述べている。

従来のシュリンケージ法では入力信号が与えられたあとに、その雑音に応じて静的にしきい値を選択している。それに対して、本論文ではシュリンケージ法をデジタルフィルタへと拡張定義し、フィルタ出力が与えられた教師信号に追従するようにしきい値を動的に変更する手法を提案している。しきい値は各帯域ごとに学習アルゴリズムのひとつである

LMS(Least Mean Square) アルゴリズムを用いてしきい値関数の出力と教師信号との間の二乗誤差が最小になるように動的に変化される。なお本論文ではしきい値関数としては非線形ソフト型しきい値関数を用いている。この LMS アルゴリズムによるしきい値学習は非線形特性を持っているが、入力、及び教師信号の確率構造として正規ガウス性を仮定すれば、学習の収束点が高々ひとつに過ぎないことが本論文で定理として述べられている。

また、本論文では適応デジタルシュリンケージフィルタの応用例として周期性雑音を除去するための適応デジタルシュリンケージフィルタの具体的な設計方法について述べている。

周期性雑音はハムノイズ、電磁波などの影響により、音声データや通信路など様々な状況で混入する。その周期性雑音の中心周波数は時間によって変化するためにしきい値を動的に変化させる必要性が出てくる。設計するフィルタは教師信号として、周波数領域で各帯域ごとにしきい値関数への入力信号をある最適な時間だけ遅延させ符号を反転させた信号を使用する。このように教師信号を設定することによって周期性雑音成分に対応する帯域のしきい値が上昇し、その結果として周期性雑音が除去される。また教師信号の最適遅延時間の決定方法のひとつとして、各帯域ごとにしきい値関数への入力信号列の自己相関を計算して最も相関が高くなる時点を選択する手法を本論文では提案している。

本論文の構成は以下の通りである。

第 1 章では、本論文の背景と目的、及び章構成について述べている。

第 2 章では、本論文で使用する線形変換行列、非線形しきい値関数、およびシュリンケージ法などの基本事項に関して説明している。

第 3 章では、シュリンケージ法の応用として多次元データの次元選択問題を取り扱っている。多次元の観測データから求められる標本共分散行列の固有値を計算し、ある最適なしきい値よりも小さい固有値を雑音成分とみなして取り除くことにより次元の選択を行う。最適なしきい値を選択するためにシュリンケージ法のしきい値選択手法のひとつである AMDL 基準を拡張する。さらに従来手法と提案手法を比較するためにシミュレーション実験をおこなって提案手法の有効性を示している。

第 4 章では、シュリンケージ法を適応デジタルフィルタに応用した適応デジタルシュリンケージフィルタの設計をおこなっている。設計するフィルタのパラメータであるしきい値ベクトルは、与えられた教師信号に追従して LMS アルゴリズムによって各帯域ごとに独立に適応学習される。さらに LMS アルゴリズムによる非線形学習特性について論じ、シミュレーション実験をおこなって提案フィルタのしきい値が実際に学習される様子を示している。

第 5 章では、第 4 章で設計した適応デジタルシュリンケージフィルタの応用として周期性雑音を除去するための適応デジタルシュリンケージフィルタを設計している。設計するフィルタは周波数領域で各帯域ごとにしきい値関数への入力信号をある最適な時間だけ遅延させ、かつ符号を反転させた信号を教師信号としてしきい値の更新をおこなうものである。最適遅延時間の決定方法として、各帯域ごとにしきい値関数への入力信号列の自己相関を計算して最も相関が高くなる時点を選択する手法を提案している。さらに設計したフィルタの動作例を示すためにシミュレーション実験をおこない、従来の線形適応デジタルフィルタによるシミュレーション結果と比較することにより本章で設計したフィルタの有効性を示している。

第 6 章では、まとめとして本論文で論じたシュリンケージ法の応用に関して総括し、今後の課題について述べている。

# 学位論文審査の要旨

|     |     |         |
|-----|-----|---------|
| 主 査 | 教 授 | 佐 藤 義 治 |
| 副 査 | 教 授 | 宮 腰 政 明 |
| 副 査 | 教 授 | 工 藤 峰 一 |
| 副 査 | 教 授 | 栗 原 正 仁 |
| 副 査 | 教 授 | 水 田 正 弘 |

## 学 位 論 文 題 名

### シュリンケージ法による雑音除去技法と その応用に関する研究

シュリンケージ法は、時間領域の信号を周波数領域の信号に変換し、周波数領域内において各帯域ごとに信号を非線形な閾値関数を用いて縮小（シュリンク）させることによって雑音の除去を行う非線形アルゴリズムであり、統計学における推定問題や信号処理などの工学的分野のみならず、様々な分野において近年応用されつつある最新の雑音除去技法と考えられる。シュリンケージ法においては、扱う問題に応じて閾値を適切に選択することが本質的であり、1990 年台初頭に Donoho, Johnstone 等によってウェーブレットシュリンケージ法として体系化された後、様々な閾値選択法が提案されている。

本論文では、多次元データの次元決定問題をシュリンケージ法として定式化し、そのための閾値決定法を論じ、さらにシュリンケージ法概念を適応デジタルフィルタへ導入し、新たな適応デジタルシュリンケージフィルタを開発したものである。

多次元データから求められる主成分をデータのひとつの周波数表現と捕らえ、各主成分の寄与率を表す標本分散共分散行列の固有値に対して適当な閾値関数を設定してシュリンケージ法を適用している。すなわち最適な閾値を選択した後、その閾値よりも小さい固有値に対応する主成分を雑音成分と見做し除去する。これによりデータの持つ本質的な情報を保持する主成分の個数、すなわちデータの次元を推定することができる。最適な閾値を選択する手法として、著者はデータが多次元正規分布に従うものと仮定し、標本分散共分散行列の固有値の漸近分布に基づき、モデル選択基準のひとつである MDL 基準を適用して閾値を選択する技法を提案した。また提案された基準は、多次元正規分布モデルを直接データに当てはめて求められた GMDL 基準 (Nagao and Han, 2000) を周波数領域における基準へと拡張したものであるともいえるが、計算量が膨大であり、3 次元以上の次元決定が事実上不可能であるのに対して、本論文の方法における計算量の主要な部分はデータから得られる

標本共分散行列の固有値を求めることであり、極めて実用的な基準であるといえる。

つぎにシュリンケージ法を連続入力信号に対するデジタルシュリンケージフィルタへと拡張定義した後、閾値を教師信号を用いて動的に変化させる適応デジタルシュリンケージフィルタの設計問題を取り扱っている。ここで取り扱う閾値選択学習法は、従来の静的な閾値選択法とは異なり、各帯域ごとに独立に適応学習アルゴリズムの一つである最小平均二乗誤差 (LMS) アルゴリズムを用いて、閾値関数の出力と教師信号との間の二乗平均誤差が最小になるように閾値を動的に変化させるものである。この問題は設定した閾値関数における閾値の学習特性の評価に帰着される。学習のための、周波数領域で各帯域ごとに適応遅延装置とよばれる装置によって閾値関数への入力信号をある最適な時間だけ遅延させ、さらにその符号を反転させた信号を教師信号として使用している。最適遅延時間は閾値関数への入力信号列の自己相関が高くなる時点とした。著者は LMS アルゴリズムによる閾値学習は非線形特性を持っているが、入力および教師信号の確率構造として正規性を仮定すれば、定常状態での学習の収束点が高々ひとつに過ぎないことを定理として証明している。さらに学習特性に関連する諸定理が証明されている。

ハムノイズなどに代表されるデータに混入した周期性雑音の中心周波数は時間によって変化することが多く、適応学習の効果が期待できるが、具体的に音声信号を用いたシミュレーション実験を行い、提案したフィルタは、特に複雑な周期性雑音が付加された状況において従来の線形フィルタよりも周期性雑音の除去能力が高いことを示した。

これを要するに、著者は統計的モデル選択および信号処理における雑音除去等の問題をシュリンケージ法における閾値選択問題として定式化することにより、最適な閾値選択技法を開発したものである。これはモデル選択技法への新しい接近法を示唆するものであり、情報解析学および計算機統計学の発展に寄与するところ大なるものがある。

よって、著者は北海道大学博士 (工学) の学位を授与される資格あるものと認める。