

学位論文題名

ARMA Process Order Selection Based on SVD and its  
Application for Room Transfer Function Estimation

(SVD 法に基づく ARMA 過程の次数決定および室内伝達関数推定への応用)

学位論文内容の要旨

ディジタル信号処理では、未知システムの ARMA (Autoregressive Moving Average) 近似が重要な課題である。この ARMA システム同定の多くの推定アルゴリズムが提案されており、入出力が既知とした場合でも、ARMA 次数と雑音比の設定が推定精度に影響することが知られている。雑音の存在が未知 ARMA システムの最適次数の推定を困難にするので、特に高次数システムにおける最適推定法を用いた ARMA パラメータの最適推定を得ることができない。したがって、雑音のない場合と区別して、雑音の存在する場合を考察しなければならない。

音響的なエコーキャンセラを実現するときは、室内伝達関数 (RTF) を含むエコーパスを同定することが重要である。しかしながら、室内には音響的雑音が必ず存在するので、室内には雑音がないと仮定することは不可能である。本論文での応用では、入出力ともに観測されると仮定する。与えられたシステムの近似を FIR (Finite Impulse Response) フィルタで行うと、極めて高次数が必要となる。ARMA 近似を用いれば、係数の個数削減が可能となるので、計算コストおよびフィルタの複雑さを減少できる。そこでこの研究では、未知 ARMA システムに対する新しい次数決定アルゴリズムを提案し、それが雑音で汚れた RTF の最適 ARMA 近似の同定に有効なことを示す。ARMA 近似では、最適次数推定が安定性および高能率同定におおきな影響をおよぼす。したがって、次数決定あるいは推定ではロバストなアルゴリズムを得る必要がある。室内には音響的な雑音が常に存在するので、入力信号が既知であっても ARMA モデルの次数推定あるいは決定は大変困難である。出力信号に白色雑音加わるなら、よく知られた次数推定を用いると妥当な次数の決定ができない。本論文で提案するアルゴリズムを用いるなら、雑音に汚染されていても妥当な次数を推定することができる。

提案するアルゴリズムは、白色雑音で汚れた観測された入出力データからなるデータ行列のランクを得るために SVD (Singular Value Decomposition) 法を用いる。SVD 法は雑音の無い場合に有効なことが知られている。出力に白色雑音加わる場合は、SSV (Smallest Singular Value) がもはや零ではないので正の小さい数として計算される。この SSV は SNR (Signal Noise Ratio) に依存するので、どの位の正の小さい数を切り捨てるのが良いのかの限界を決定する極めて困難な問題に直面する。

本論文では、切り捨てる値の決定に新しい基準を導入し、それが既知の SNR に対しては妥当な測度となることを示す統計的手法を提案している。

本手法は観測入出力データのみを必要とし、次数推定には ARMA パラメータを推定する必要はない。それに対して AIC (Akaike Information Criteria)、MDL (Minimum Descrip-

tion Length)、FPE(Final Prediction Error) および PLS(Predictive Least Squares) などの従来の多くのアルゴリズムは、パラメータと次数との同時推定が必要である。パラメータ推定と次数推定とは深く結びついているので、雑音を含む観測データのみで次数の推定精度を評価するのは困難である。雑音を含むデータを最小二乗近似で実現するときは、ARMA パラメータ空間と観測データ空間とを分けておくのが便利である。

本論文は7章および3つの付録で構成されている。第1章では、本論文の背景および動機付けについて述べ、各章の概説を行う。第2章では、通信工学におけるエコーおよびエコーの消去について述べている。異なるメディアにおけるエコー現象の基本定義および区分が与えられ、エコーの消去について従来から行われている方法と現在研究中的の方法とが明らかにされている。

第3章では、本論文で広く用いられるSVD および行列の計算法について述べている。SVDの中で最も重要な性質を定理としてその証明も与え、それを明らかにする例題も示している。また、雑音で汚れたデータで作られた行列の特異値のパターンの摂動と雑音による効果が述べられている。行列のランクおよびランクを減少させるときに用いられる特異値分解の非常に有用な性質もこの章に示している。

第4章では、ARMAモデルに基づく未知システムの次数決定の新しい方法を提案している。まず、未知システムの次数推定についての簡単な説明を行い、この問題に対する従来の方法を述べている。次に、二三の定義をのべた後に、本論文で提案するアルゴリズムがSVDを用いて未知システムの雑音で汚されたデータの行列のランク落ちの検出に基づいて導出される。本アルゴリズムのランク検出の重要な特徴は、本章で導出した雑音で汚されたデータ行列の最小特異値の限界を統計的な処理から抽出可能にした点である。

第5章では、第4章で提案したアルゴリズムの実際の適用例を与える。まず、コンピュータ上で作成した未知システムの次数決定に本アルゴリズムを応用し、異なるARMAモデルに対して雑音のある場合とない場合とについて本アルゴリズムの動作を調べた。その結果、雑音のない場合には完全に一致し、雑音のある場合も極めてよい実験結果を得た。さらに、観測データ行列の条件数が非常に大きい場合の悪条件下での推定に対して、ダウンサンプリングとプレ・エンファシスの処理を組み合わせれば、条件数を下げる効果が得られ、安定にARMA推定が可能であることを示している。

第6章では、実験室内の音響的な伝達関数の推定実験の詳細が述べられている。すなわち、実験を行うための準備と実験に用いられた装置とが詳細に述べられ、その実験により、雑音で汚された室内伝達関数をARMAモデルとし、その次数推定に本アルゴリズムを適用し、その有効性を確かめている。

第7章は結論であって、得られた結果とその意義について述べている。すなわち、本研究の成果は、TV会議やテレ・コンファレンス等の新しい通信システムの音声品質の向上に有用であることを論じている。また、将来に残された諸問題についても述べられている。

# 学位論文審査の要旨

主査 教授 永井 信夫  
副査 教授 小川 吉彦  
副査 教授 栃内 香次  
副査 教授 北島 秀夫  
副査 助教授 三木 信弘

## 学位論文題名

### ARMA Process Order Selection Based on SVD and its Application for Room Transfer Function Estimation

(SVD法に基づくARMA過程の次数決定および室内伝達関数推定への応用)

デジタル信号処理では、未知システムのARMA (Autoregressive Moving Average) 近似が重要な課題である。ARMAシステムでは入出力が既知とした場合でも、ARMA次数と雑音比の設定が推定精度に影響し、雑音の存在が未知ARMAシステムの最適次数の推定を困難にすることが知られている。

この研究では、未知ARMAシステムに対する新しい次数決定アルゴリズムを提案し、それが雑音で汚れた室内伝達関数(RTF)の最適ARMA近似の同定に有効なことを示している。提案するアルゴリズムは、白色雑音で汚れた観測された入出力データからなるデータ行列のランクを得るためにSVD(Singular Value Decomposition)法を用いる。SVD法は雑音の無い場合に有効なことが知られている。出力に白色雑音が加わる場合は、SSV(Smallest Singular Value)がもはや零ではないので正の小さい数として計算される。このSSVはSNR(Signal to Noise Ratio)に依存するので、どの位の正の小さい数を切り捨てるのが良いのかのスレッシュホールドを決定する極めて困難な問題に直面する。本論文では、スレッシュホールドの値の決定に新しい基準を導入し、それが既知のSNRに対しては妥当な測度となることを示す手法を提案している。

本手法の特徴の一つは観測データとしては入出力データのみが必要であり、第二の特徴は次数推定にはARMAパラメータを推定する必要がないことである。それに対して、従来の多くのアルゴリズムであるAIC(Akaike Information Criteria)、MDL(Minimum Description Length)、FPE(Final Prediction Error)およびPLS(Predictive Least Squares)などはパラメータと次数との同時推定が必要である。

本論文は、従来雑音のあるデータには適用不可能といわれているSVD法が、雑音があるARMAモデルの次数推定に有効なことを示し、また、室内伝達関数(RTF)の同定に応用したものであり、その主要な成果は以下に要約される。

① SVD の性質について検討し、雑音で汚れたデータで作られた行列の特異値のパターンの摂動と雑音による効果を調べ、行列のランクおよびランクを減少させるときに用いられる特異値分解の非常に有用な性質を求めている。

② 上に求めた性質を応用して、SVD を用いて ARMA モデルに基づく未知システムの次数決定の新しい方法を、雑音で汚されたデータの行列のランク落ちの検出に基づいて導出している。

③ 本アルゴリズムは、雑音のない場合には完全に一致し、雑音のある場合も極めてよい実験結果を得ている。さらに、観測データ行列の条件数が非常に大きい場合の悪条件下での推定に対して、ダウン・サンプリングとプレ・エンファシスの処理を組み合わせれば、条件数を下げる効果が得られ、安定に ARMA 推定が可能であることを示している。

④ 実験室内の音響的な伝達関数の推定実験の詳細が述べられている。すなわち、雑音で汚された室内伝達関数を ARMA モデルとし、その次数推定に本アルゴリズムを適用し、その有効性を確かめている。

これを要するに、著者は、デジタル信号処理では重要な課題である ARMA システム同定における高精度な次数推定を、SVD のデータ行列のランク落ちに着目して可能にし、次数推定のアルゴリズムの確立に有益な新知見を得たものであり、信号処理工学および電子工学の発展に貢献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。