

学 位 論 文 題 名

# Signal Processing Algorithms Based on Multirate and Total Least Squares Techniques

(マルチレート処理とトータル最小2乗法に基づく信号処理アルゴリズムの研究)

## 学位論文内容の要旨

VLSI技術の進歩によりアナログ信号をディジタル信号として処理することが多くなり、多様な処理が可能となってきた。したがって、ディジタル信号処理は社会における情報通信基盤を支える重要な技術と言える。こうした進歩に伴い、これまでの信号処理アルゴリズムでは不十分な性能しか得られない場合が生じることが明らかになってきた。従来の信号処理アルゴリズムは限定された状況で使用が検討されてきたので、これまでよりも広いリアルワールドでの使用が可能であるようにアルゴリズムを拡張する、あるいは新たなアルゴリズムを提案することが必要になってきたと言える。

こうしたリアルワールドでの信号処理アルゴリズムの検討課題の一つに雑音への耐性が挙げられる。すなわち、信号処理アルゴリズムを実装した時に可搬性に優れた安価なものにするために小規模実現でもアルゴリズムの性能が劣化しない量子化雑音耐性や、外界に常に存在する観測雑音によって性能が劣化しない観測雑音耐性を持つ信号処理アルゴリズムの検討である。

以上の観点から、本論文では従来の信号アルゴリズムに対して性能劣化をもたらす雑音を量子化雑音と観測雑音に分け、こうした雑音に関し、マルチレート処理とトータル最小2乗(TLS)法に基づいて、雑音に対する耐性・除去機能を持つ効率的な信号処理アルゴリズムを提案・解析する。そして、マルチレート処理とTLS法を導入した信号処理アルゴリズムが従来のアルゴリズムでは十分な性能が得られなかったリアルワールド環境において有効であることを明らかにする。本論文の構成を以下に示す。

第1章では序論と概観が述べられている。まず本論文の前半では、マルチレート処理に基づく信号処理アルゴリズムについて検討する。すなわち、第2章と第3章では処理能力の低下を招くことなく量子化雑音への耐性を向上させることを主な目的として、時変自己回帰(AR)モデルにおけるマルチレート適応パラメータ推定アルゴリズムに関する解析・提案を行う。第4章ではマルチレート処理の一種であるウェーブレット変換を用いて、白色雑音に埋もれたフラクタル信号から原信号を復元する信号強調アルゴリズムの提案を行う。

第2章では、時変システムのサブバンド適応システム同定において可能な最大間引き率を定量的に判定する条件式を導いている。時変ARモデルをマルチレート処理する場合、間引き率には上限値が存在すると考えられる。そこで、サブバンド化のための最大間引き率と時変量に関する理論的検討を行う。すなわち、重み係数付きRLS法の収束特性を時変量によって表し、分割数・間引き率の適否を判定する条件を定式化する。また導出条件が満たされる場合の応用として、スペクトル推定を高速・高精度に行うサブバンド適応アルゴリズム

の提案を行う。ここではサブバンド化の利点を生かして、並列手法により高速にスペクトル推定を行うことを考える。そのため、各サブバンドの時変量と次数を推定しながらパラメータ推定を行うサブバンド適応ラティスアルゴリズムの提案を行う。

第3章では、解析信号に対するマルチレート複素 RLS 法 (MC-RLS 法) について定量的検討を行う。第2章で提案した条件式が満たされる適切な分割数・間引き率の下で、良好な追従性、浮動小数点誤差の軽減そして演算量の効率化を図ることのできる RLS 法 (トランスバーサル構成) について述べる。まず、間引いた解析信号に基づく AR モデルを導入し、MC-RLS 法を示す。次に MC-RLS 法の過剰平均 2 乗誤差を用いて、解析信号変換と間引きが追従性に影響を与えないことを示す。更に、浮動小数点誤差と演算量についても解析を行い、従来の RLS 法よりも小さな浮動小数点誤差と演算量をもつことを示す。

第4章では、マルチレート処理の一種であるウェーブレット変換を用いたフラクタル信号の強調アルゴリズムの提案を行う。本章では、前章までは内部雑音への耐性向上が目的であったのに対し、外部雑音の除去が目的となる。近年その重要性が言われているフラクタル信号が白色雑音に埋もれた場合に対し、ウェーブレット領域での制約付き最小化問題として信号強調問題を定式化することにより効率的にフラクタル信号の強調を行うアルゴリズムの提案を行う。

本論文の後半では、TLS 法に基づく信号処理アルゴリズムを検討する。すなわち、第5章と第6章では有理関数モデルで表現できる信号を対象として、観測信号すべてに雑音が相加されている場合への耐性を向上させるため、TLS 法に基づくパラメータ推定手法と信号強調手法について述べる。

第5章では、TLS パラメータ推定のための正規化ラティス IIR 適応フィルタリングアルゴリズムを提案する。パラメータの更新速度に依存せずに安定性が保証される正規化ラティスフィルタを用いた適応アルゴリズムを提案するが、従来のタップ付き正規化ラティス IIR フィルタでは伝達関数パラメータを分母と分子に分離して更新することができないため、TLS コスト関数のこう配ベクトル計算が不可能になる。そのため、本章では縦続ラティスフィルタ構造を用いて分母・分子の分離を行い、正規化ラティスフィルタでの適応 TLS アルゴリズムを導く。そして、すべての信号が白色雑音に乱されていても、バイアスの無い IIR システムパラメータを従来法よりも効率的に推定できることを述べる。

第6章では、ガウス性白色雑音とインパルス性雑音が同時に加わった時にも信号強調が可能となるロバストな適応信号強調手法の提案を行う。現実の環境ではガウス性白色雑音のみならずインパルス性雑音が観測時に加わることも考えられる。そこで、インパルス性雑音へのロバスト性を上げるため、異常に大きなインパルス性雑音を含む観測信号をゆう度比検定により除去し、カルマンフィルタで必要となる信号パラメータを TLS-EM アルゴリズムによって推定する手法を提案する。これによりインパルス性雑音とガウス性白色雑音が混在する環境での信号を適応的に強調できることを述べる。

第7章では結論として、本研究で得られた成果をまとめる。さらに今後の課題についても述べる。

# 学位論文審査の要旨

|    |     |      |
|----|-----|------|
| 主査 | 教授  | 栃内香次 |
| 副査 | 教授  | 永井信夫 |
| 副査 | 教授  | 青木由直 |
| 副査 | 助教授 | 宮永喜一 |

## 学位論文題名

### Signal Processing Algorithms Based on Multirate and Total Least Squares Techniques

(マルチレート処理とトータル最小2乗法に基づく信号処理アルゴリズムの研究)

ディジタル信号処理は情報通信基盤を支える技術としてますます重要性が増してきている。それに伴い、より広範囲な実環境で利用できる、雑音への耐性の強い信号処理アルゴリズムが求められている。

本論文は、マルチレート処理とトータル最小2乗 (TLS) 法に基づいて、雑音に対する耐性と除去機能を持つ処理アルゴリズムを提案し、従来十分な性能が得られなかった実環境での有効性を示したもので、その主要な成果は以下に要約される。

(1) 時変システムのサブバンド適応システム同定において、可能な最大間引き率を定量的に判定する条件式を導き、これを適用してスペクトル推定を高速かつ高精度で行う適応ラティスアルゴリズムの提案を行った。

(2) 解析信号に対し、適切な分割数と間引き率の下で、良好な追従性、浮動小数点誤差の軽減と演算の効率化を図ることのできるマルチレート複素 RLS 法について定量的検討を行い、解析信号変換と間引きが追従性に影響を与えないことを確認した。

(3) マルチレート処理の一種であるウェーブレット変換を用いたフラクタル信号の強調アルゴリズムを提案し、フラクタル信号が白色雑音に埋もれた場合に対し、効率的にフラクタル信号の強調が可能であることを示した。

(4) 縦続ラティスフィルタ構造を用いて分母・分子を分離して更新することができる TLS パラメータ推定のための正規化ラティス IIR 適応フィルタリングアルゴリズムを提案し、すべての入出力信号が白色雑音に乱されていても、システムパラメータを従来法よりも効率的に推定できることを示した。

(5) ガウス性白色雑音とインパルス性雑音が同時に加わった時にも信号強調が可能とな

るロバストな適応信号強調手法を提案し、インパルス性雑音とガウス性白色雑音が混在する環境で信号を適応的に強調できることを示した。

これを要するに、著者は、マルチレート処理と TLS 法に基づく、雑音に対する耐性と除去機能を持つ信号処理アルゴリズムを提案してその解析を行ない、従来のアルゴリズムでは十分な性能が得られなかった実環境での有効性を示したもので、信号処理工学ならびに情報通信工学の発展に寄与するところ大である。

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。