

学 位 論 文 題 名

回帰的最小 2 乗法のアルゴリズムの高度化に関する研究

学位論文内容の要旨

回帰的最小 2 乗法 (: Recursive Least Squares, RLS) は、適応信号処理、制御、システム同定などの分野で重要かつ基礎的な位置を占める最小 2 乗法に基づくアルゴリズムである。

信号あるいは情報を処理する機械 (以後、情報処理機械) の数は増え続け、計算機本体の台数は 1984 年から 1988 年の間に 1.54 倍になっている。また情報処理能力に乏しい機械 (以後、機械) も増加している。その増加に伴い、人、環境、情報処理機械、機械、の境界を接する部分の数が爆発的に増加し、また 人-機械、人-人、の通信も情報処理機械を間に挟むことで、通信可能な情報の種類を広げ、新たな機能を付加する可能性を持つ。

このことは、ヒューマン・インターフェースやマシン・マシン・インターフェースの需要と重要性が増し続けていることを意味し、このようなインターフェースが必要となるところには、未知の動的システムの推定が必要になる。

情報処理機械に取り込むべきデータが測定あるいは受信データと一致していないことがある。音声信号を例にとると、測定系で取り込んだ情報は音圧に比例した数値信号であり、このような数値は一部の専門家にとってわずかな意味があるに過ぎず、多くの人にとって意味があるのは音声信号に含まれる単語情報や、誰が喋ったか (話者認識) である。

そこで測定データに含まれる所望の情報を抽出する必要が生ずる。このような情報の抽出には、測定データが生成される過程をあるシステムとみなしその未知の動的システムを推定することが有用である。

情報のインタフェースのそのものである通信系では情報の圧縮 (たとえば音声の低ビットレート符号化)、エコーキャンセラ、適応等化器、移動体通信における アレー・アンテナによる適応ビームフォーミングなどに、未知の動的システムを線形システムでモデル化し推定する技法が有用であることが知られている。

機械-情報処理機械の通信は、主に機械の制御のための操作量を伝えるために必要となり、操作すべきシステムが動的で未知であれば、制御対象を推定しながら制御する必要がある。

線形モデルの最小2乗推定は、最尤推定やスペクトル推定の最大エントロピー法(MEM)との関連も知られ、局所的な最小値が存在せず、エネルギーやパワの概念との関係がある。

この最小2乗法をインターフェースに伴う未知の動的システムの推定に適用するときには、ある時刻における標本値が1組得られるたびに、毎回推定計算をする手法が重要になり、それがRLSである。RLSも上記の利点を当然もっているため、他の多くのアルゴリズムの基礎になっている。

本研究は、このRLSアルゴリズムの高度化として、高速化の手法としての並列処理向きのアルゴリズムおよび並列処理アーキテクチャと知識の導入による推定の改善について論ずるものである。

本論文は、全9章より構成されている。以下に各章の概要を述べる。

第2章では最小2乗法の概説をし、RLSのアルゴリズムとしてカルマンフィルタ型のアルゴリズム、QR分解に基づくアルゴリズムとAgee-TurnerのUD分解更新定理に基づくアルゴリズムの3手法について比較し、Agee-TurnerのUD分解更新定理とQR分解の過程は、ほぼ同一の操作を行っていることを明らかにし、Agee-TurnerのUD分解更新定理の方がRLSの概念との親和性が良いことを論じている。

第3章ではRLSの並列処理に向いている並列アーキテクチャについて論じ、RLSのように他の機械に組み込まれて使われ、高い性能必要とする時にはシストリックアレーが向いていることを示し、逆にシストリックアレーで高い性能を出すためにアルゴリズムの改変が必要となることがあることを主張している。

第4章ではRLSの応用では実時間の制約のため高速な処理が要求されるため、並列処理の検討をした結果、カルマンフィルタ型のRLSは並列処理に向いていないことが明らかになった。そこで並列処理向きのRLSアルゴリズムとそれを実行する三角シストリックアレーを提案した。提案シストリックアレーで並列処理することで $O(N^2)$ 倍の高速化が達成できる。

第5章ではRLSの拡張である拡大最小2乗法(ELS)の並列処理をする際の問題点を明らかにし、ELSをも実行できる1次元シストリックアレーによる並列処理法を提案した。このために残差の計算と相関行列(のUD分解形式)の更新を同時に処理できるアルゴリズムを開発した。この1次元シストリックアレーは三角シストリックアレーに比べ並列度は低いが適用範囲が広くハードウェア実現が容易であり、処理速度が $O(N)$ 倍になる。

第6章ではRLSが指数窓重みがかかった最小2乗法であって一括処理のときの真の最小2乗法と違う推定結果を生むことを問題にし、真の最小2乗法と同じ結果になる方形窓のRLSを議論した。そして方形窓のRLSの並列処理法を提案した。この方形窓のRLSは第5章で提案のアーキテクチャとほとんど同じハードウェアでほとんど同じ時間で並列処理可能なことを示した。

第7章では、推定結果を集合とする手法について述べ、この考え方から最小2乗法の決定論的解釈ができることを示した。そして最小2乗推定において観測データのサンプル値

が少ないときには真の残差パワと最小 2 乗の意味での残差パワが一致しなくなり、このとき係数の推定値を「推定係数の個数」次元楕円体と見なし得ることを明らかにし、この楕円体を推定楕円と呼ぶことにした。

第 8 章では前章の推定楕円が観測からの推定であることを考慮し、推定楕円内での推定を分析者の知識で行なうことで、観測に矛盾せず、その限りにおいて分析者の好む推定結果を得る推定法を提案した。そして、この方法により分析者の知識を生かして「変換の少ない推定値」を得たり、「既知の値のいずれかに近い推定値」を得ることができることを数値実験により示した。

第 9 章では、これまでの章を総括し、本研究の成果について要約する。さらに残された課題について述べる。

本研究の目的である回帰的最小 2 乗法の高度化として、いくつかの効率の良い並列処理法と回帰的最小 2 乗法の観測値からの推定に知識に基づく推定を連係させる端緒となる推定法を得ることができた。

学位論文審査の要旨

主査	教授	永井信夫
副査	教授	伊藤精彦
副査	教授	小川吉彦
副査	教授	栃内香次
副査	助教授	三木信弘

学位論文題名

回帰的最小2乗法のアルゴリズムの高度化に関する研究

回帰的最小2乗法 (: Recursive Least Squares, RLS) は、適応信号処理、制御、システム同定などの分野で重要かつ基礎的な位置を占める最小2乗法に基づくアルゴリズムである。

ヒューマン・インタフェースやマシン・マシン・インタフェースの需要と重要性が、増大している。未知の動的システムの推定問題はインタフェースの様々なところで現れる。

未知の動的システムの推定の一手法として、ある時刻における標本値が1組得られるたびに、最小2乗法に基づいて、毎回推定計算をする手法がRLSである。

本研究は、RLSアルゴリズムの高度化として、高速化の手法としての並列処理法(アルゴリズムおよびアーキテクチャ)と知識の導入による推定の改善について論ずるものである。本論文は、全9章より構成されている。以下に各章の概要を述べる。

第2章では最小2乗法の概説をし、RLSのアルゴリズムとしてカルマンフィルタ型のアルゴリズム、QR分解に基づくアルゴリズムとAgee-TurnerのUD分解更新定理に基づくアルゴリズムの3手法について比較し、Agee-TurnerのUD分解更新定理がRLSの概念との親和性が良いことを主張している。

第3章ではRLSの並列処理に向いている並列アーキテクチャについて論じ、RLSのように他の機械に組み込まれて使われ、高い性能を必要とする時にはシストリックアレーが向いていることとシストリックアレーで高い性能を出すためにアルゴリズムの改変が必要となることを論じている。

第4章ではRLSの並列処理の検討をした結果、カルマンフィルタ型のRLSは並列処理に向いていないことが明らかになった。そこで並列処理向きのRLSアルゴリズムとそれを実行する三角シストリックアレーを提案し、逐次処理に比べておよそ「推定係数の個数の2乗」倍の高速化になることを示した。

第5章ではRLSの拡張である拡大最小2乗法(:ELS)の並列処理をする際の問題点を明らかにし、アルゴリズムを改良し、ELSをも実行できる1次元シストリックアレーによる並列処理法を提案した。本章の並列処理法は、第4章の並列処理法に比べてハードウェア実現が容易であり、逐次処理のおよそ「推定係数の個数」倍の高速化になる。

第6章では一括処理のときの真の最小2乗法と同じ結果になる方形窓のRLSを議論し、その並列処理法を提案した。この方形窓のRLSは第5章で提案のアーキテクチャとほとんど同じハードウェアでほとんど同じ時間で並列処理可能なことを示した。

第7章では、推定結果を集合とする手法について述べ、この考え方から最小2乗法の決定論的解釈ができることを示した。最小2乗推定において観測データのサンプル値が少ないときには真の残差パワと最小2乗の意味での残差パワが一致しなくなり、このとき係数の推定値を「推定係数の個数」次元楕円体(:推定楕円)と見なし得ることを明らかにした。

第8章では前章の推定楕円が観測からの推定であることを考慮し、推定楕円内での推定を分析者の知識で行なうことで、観測に矛盾せず、その限りにおいて分析者の好む推定結果を得る推定法を提案した。そして、この方法により分析者の知識を生かして「変化の少ない推定値」を得たり、「既知の値のいずれかに近い推定値」を得ることができることを数値実験により示した。

第9章では、これまでの章を総括し、本研究の成果について要約する。さらに残された課題について述べている。

以上のように本論文では、回帰的最小2乗法の並列処理向きアルゴリズムおよび並列処理法や、観測値からの推定と知識に基づく推定の折り合いを付ける推定法を提案し、多くの新知見を得ており、適応信号処理および電子工学に寄与するところが大きい。よって著者は、博士(工学)の学位を授与される資格あるものと認める。