

Volterra 型非線形適応システムの理論解析と高速適応アルゴリズムに関する研究

研究代表者 研究員 趙 晋輝 (中央大学理工学部)

共同研究者 研究員 辻井 重男 (中央大学理工学部)

共同研究者 準研究員 鈴木 正樹 (中央大学大学院理工学研究科博士後期課程)

近年、適応信号処理の分野では、非線形適応フィルタが注目され、特に、非線形性を含むシステムに対して、高精度のシステム同定などの性能が期待される。しかし、線形フィルタと異なり、非線形フィルタのモデルが数多く提案されているが、対象とする未知システムに適する最適なモデルの選択が必要である。また、一般に、出力が重みのなどのパラメータの非線形関数となる非線形適応フィルタは、未知系と推定系との自乗平均誤差で表される誤差曲面の形状が単峰性を有さない。従って、適応算法の大域的収束が保証されず、極小誤差に収束する可能性がある。そして、そのような複雑な誤差関数に対して適応更新する際、適応算法の安定性を保つことも難しい。

これらのモデル選択、大域的な収束及び安定性保証の問題をさけるために、FIR 型の Volterra 非線形適応フィルタ (以下、Volterra ADF) が用いられている。Volterra ADF は、出力が入力に対しては非線形関数であるが、重みパラメータに関しては線形関数である。従って、Volterra ADF の誤差曲面の形状は単峰性を有しており、大域的収束が保証され、勾配法などの簡便な適応更新法が適用可能となっている。実際に、非線形性を含む環境の適応エコーキャンセラや適応自動等化器といったシステムに応用されている。しかし、Volterra ADF は、多変数級数展開に基づいているため、所謂展開項数となる Volterra 核を密に取る場合が多く、例えば、2 次フィルタの場合、入力の N 個の過去値を用いると、フィルタの全係数は $O(N^2)$ となり、それも適応更新する計算量は大変大きい。

非線形適応フィルタの諸課題は、誤差曲面形状の複雑さに起因するものが少なくない。このため、誤差曲面の幾何学的特性を解析し、形状の情報を得ることは有効である。これに関して、筆者らは正規入力信号を有する二次 Volterra ADF の入力相関行列 R_{xx} の構造解析を行ない、厳密な固有値と固有ベクトル及び誤差曲面の幾何学的特徴を求めている。この結果、二次 Volterra ADF の誤差曲面の形状は、線形項に割り当てられたタップ数を N として、ある特定の方向上の曲率が他の方向上の曲率の $O(N)$ 倍以上であり、最大曲率の方向のみは急峻で他方向は相対的に平坦であるという興味深い特徴を持つことが明らかとなった。さらに、

この特徴は入力信号の自己相関の強弱によらないことが示されている。

Volterra ADF の適応算法としては一般的に、LMS 法、RLS 法などが考えられる。LMS 法の演算量は二次 Volterra ADF の場合 $O(N^2)$ で効率が良く、数値的にも安定である。しかし、単一な更新幅を用いるため、一方向が極端に急峻な Volterra ADF の誤差曲面に対しては全主軸方向に最適な更新幅を用いることは難しい。一方、RLS 法は更新回毎に最適な更新幅を求めるので収束は高速であるが、更新幅の計算は入力相関行列の逆行列演算と等価であるため、二次 Volterra ADF における演算量は $O(N^4)$ となり膨大である。また、数値的にも不安定さがある。従って、どちらも実用に向く算法とはいえない。

そこで筆者らは、誤差曲面形状の幾何学的特性を基に、有効な勾配型の適応更新法を提案している。白色信号入力時の算法は、入力相関行列の構造解析から得られた厳密な固有値に反比例した更新幅を、対応する固有ベクトル方向に対して用いる LMS 法である。これは、RLS 法と等価な高速な収束特性を LMS 法と同じ演算量で実現する。一方、有色信号入力時の算法は、誤差曲面の最も急峻な勾配方向と更新幅を推定し更新に用い、かつ、非急峻方向に対応する過大な更新幅による更新をこの方向には行わないことでロバスト性の保証と高速な収束特性を実現している。有色時の算法において、勾配方向と更新幅の推定には入力相関行列の生成や最大固有値に対応する固有ベクトルを推定する必要があり、この手続に演算量がかかるが、急峻方向の更新幅のみを曲率に基づく制御をすることで高速収束の効果が得られている。

本研究では、有色入力信号に対する演算量を削減した新たな高速収束算法を提案する。勾配法の適応更新において、信号の線形項に対応する部分 (以下、入力信号ベクトル) のみ白色化しその後全入力信号ベクトルを構成し、誤差曲面の曲率情報を基に各主軸方向それぞれに最適な更新幅を決定する。ここで、白色化のみでは誤差曲面の形状の特徴が変わらないのが線形フィルタと異なる点である。提案手法は全主軸方向に固有値に反比例したステップサイズを用いるため、誤差曲面を完全に正規化する。提案手法の演

算量は二次 Volterra ADF の場合には $O(N^2)$ で線形フィルタに RLS 法を用いる場合や二次 Volterra ADF に LMS 法を用いる場合と同じであるが、収束速度は二次 Volterra ADF に RLS 法を用いる場合と等価であり高速収束する。計算機シミュレーションにより提案手法の有効性を示す。

従来、線形適応フィルタにおいても、入力信号の白色化は行われており、この操作は勾配型の適応算法の収束を高速化に直接寄与することが知られている。これは、線形フィルタの誤差曲面が白色入力信号時には完全に等曲率二次超曲面である、すなわち、入力相関行列が入力信号の分散で定数倍された単位行列であるという性質による。そのような誤差曲面に対して、勾配型適応算法は、最も安定で早い収束を実現することができる。一方、有色入力の場合は、誤差曲面は各方向上に異なる曲率を持ち、その歪みが勾配型適応算法の高速収束の障害となる。その意味で、RLS 法は、白色化操作と等価的に、誤差曲面を正準化してから勾配法を適用していると見なすこともできる。しかし、その演算量が多いため、一般に線形フィルタの場合は、厳密ではない簡易な白色化操作を用いることで、勾配法と同オーダの演算量で近似的な RLS 法を実現している。

しかし、二次 Volterra ADF の場合は、白色入力の場合でも入力相関行列は対角行列ではなく、誤差曲面の幾何学的形状は自明ではない。したがって、例えば厳密な白色化を行っても、直接収束の高速化には結びつかない。実際、Jenkins は白色化操作を行っているが、その目的は、入力相関行列をブロック対角化することで、RLS 法における逆行列の演算量を削減することである。その結果、RLS 法の計算は高速化されるものの、そのオーダは依然 $O(N^5)$ を要している。また、数値的に不安定になる可能性があるだけでなく、相関行列の推定誤差の影響が考えられ、さらに、行列生成と逆行列の演算を重み係数ベクトルの更新に組み込まねばならない。一方、提案手法では、二次 Volterra ADF における白色入力信号の入力相関行列の固有値と固有ベクトルを完全に求めたことで、白色入力信号に対する RLS 法は、勾配法と同様な演算量で実現できる。更に、有色入力の場合、入力信号の線形項に対してのみ白色化すればよいと、厳密な白色化操作を用いても、その演算量は、勾配法の適応更新の演算量と同程度である。したがって、提案手法全体として勾配法と同演算量で、近似ではなく厳密に RLS 法を実現することができる。

参 考 文 献

[1] 趙晋輝, 猪股 篤, “Volterra 形非線型適応フィルタの

誤差曲面と収束特性の解析” 電子情報通信学会論文誌 (A), Vol.J82-A, No.6, pp.809-816 (1999-6)

- [2] 趙 晋輝, 宇野 晋平, 久保田 智規, 猪股 篤, “Volterra 形非線形 FIR 適応フィルタの高速収束算法に関する考察” 電子情報通信学会論文誌 (A) Vol.J83-A, No.4, pp.370-378, April, 2000 年
- [3] Jinhui Chao, Inomata “Convergence analysis of Volterra adaptive filters” Proceedings of ISCAS'97, Vol. IV, pp.2477-2480, Hong Kong, 1997-6.
- [4] Jinhui Chao, Atsushi Inomata, Shinpei Uno “Convergence analysis and fast converging algorithms for Volterra ADF” Proceedings of EURO-SISCO'98, Greece, 1998.
- [5] Jinhui Chao, Kubota Tomonori, Uno Sinpei “Fast RLS algorithm for quadratic Volterra adaptive filters” Proc. of Eusipco2000, pp.142-145, Tampere, Finland, Sept. 2000.
- [6] Jinhui Chao, Atsushi Inomata, Tomonori Kubota, Shinpei Uno “Error surface analysis and fast RLS adaptive algorithm of quadratic Volterra ADF” Proceeding of NSIP2001, the 2001 IEEE-EURASIP Nonlinear Signal and Image Processing Workshop, TuePmOr6, Baltimore, June, 2001.
- [7] Jinhui Chao, Miho Hoshino, Tasuku Kitamura, Ken Masuda “A Multilayer RBF network and its supervised learning” Proceeding of IJCNN2001, Washinton DC, pp.1195-2000, July, 2001
- [8] Jinhui Chao, Miho Hoshino, Tasuku Kitamura, Ken Masuda “A new pyramid network and its generalization performance” Proceeding of IJCNN2001, Washinton DC, pp.2811-2816, July, 2001
- [9] 猪股 篤, 趙 晋輝 “Convergence Analysis of Volterra Adaptive Filters” 第 11 回デジタル信号処理シンポジウム講演論文集, (鳥取)(1996-11)
- [10] 猪股 篤, 趙 晋輝 “Volterra 適応フィルタの収束解析と高速アルゴリズムの提案” 電子情報通信学会 1997 年総合大会 A-4-51, 1997-3.
- [11] 猪股 篤, 宇野 晋平, 趙 晋輝 “Volterra 非線形適応フィルタの収束解析と高速適応算法の一提案” 電子情報通信学会信学技報: CAS97-21, VLSI97-21, DSP97-36, p.31-38, (1997-06)
- [12] 宇野 晋平, 久保田, 猪股 篤, 趙 晋輝 “Volterra ADF の高速算法” 第 12 回デジタル信号処理シンポジウ

△講演論文集，(1997-11)

- [13] 久保田智規，宇野晋平，趙晋輝 “2次 Volterra FIR 適応フィルタの高速アルゴリズム”，電子情報通信学会信学技報，Vol. 98, No. 262, pp.7-14, 1998.
- [14] 久保田智規，宇野晋平，趙晋輝 “ボルテラ型非線形適応フィルタの高速適応算法の一考察” 1998 年デジタル信号処理シンポ，pp.531-536，1998
- [15] 久保田智規，宇野晋平，阿部和正，趙晋輝 “入力信号の白色化を用いた Volterra 非線形適応フィルタの RLS アルゴリズム”，電子情報通信学会信学技報，Vol. DSP-99, No. 505, pp.141-148, 1999.
- [16] 阿部和正・久保田智規・趙 晋輝「ガウス分布に従わない入力信号に対する Volterra 型非線形適応フィルタの高速 RLS 算法の有効性に関する考察」2000 年電子情報通信学会ソサアティ大会，A-4-6, p.97, Oct. 名工大，2000
- [17] 久保田智規，宇野晋平，阿部和正，趙晋輝 “Volterra 型非線形適応フィルタの高速で数値安定な RLS 算法とその非正規分布入力信号に対する有効性に関する考察”，15 回電子情報通信学会デジタル信号処理シンポジウム論文集，A2-1, pp.137-142, 2000.