

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 20 日現在

機関番号：32706

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23500189

研究課題名(和文) 学習データの与え方を改良した勾配法に基づく学習アルゴリズムとそのロバスト性の考察

研究課題名(英文) Robust training based on combined online/batch training techniques

研究代表者

二宮 洋(Hiroshi, Ninomiya)

湘南工科大学・工学部・教授

研究者番号：60308335

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円、(間接経費) 870,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、以下の2つの研究を進めることにより、非線形性の強い特性を持つ関数、もしくは、システムのニューラルネットワークによる近似を可能にすることが目的である。具体的には、「学習データの与え方を改良した勾配法に基づく新たな学習アルゴリズムの提案」及び、「提案学習アルゴリズムのロバスト性に関する解析」である。ここで、本研究におけるロバスト性とは、初期値に依存することなく最適解を得られる、つまり、大域収束性のことを示す。また、回路の設計や最適化への応用を考慮した、所望するシステムの詳細な近似モデルのニューラルネットワークによる実現を目的とした研究へと発展させる。

研究成果の概要(英文)：In this research, it is a purpose to enable the approximation model by the feedforward neural networks for the function or the system with the highly nonlinear behavior by the following studies. Specifically, "Proposal of a novel training algorithm using combined online/batch quasi-Newton techniques", and "Analysis on the robustness of the proposed algorithm". Here, robustness in this research means that the proposed algorithm has strong ability to search a global minimum without being trapped into local minimum. Furthermore, this approach is useful for the circuit modeling for the design and optimization, where analytical formulas are not available or original model is computationally too expensive. A neural model is trained once, and can be used again and again. This avoids repetitive circuit simulations where a change in the physical dimension requires a re-simulation of the circuit structure.

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・知能情報学

キーワード：ニューラルネットワーク 学習アルゴリズム 準ニュートン法 オンライン学習 バッチ学習 並列アルゴリズム

1. 研究開始当初の背景

従来、ニューラルネットワーク(以下、NN)による非線形関数(非線形システム)の高精度で簡便な近似モデルの実現に関しては様々な研究がなされてきた。これは、NNが、適切にその構造を決定すれば、任意の誤差の範囲であらゆる非線形関数を近似(モデル化)する能力を有することが理論的に証明されているためである。しかしながら、実際には非線形性の強い(以下、強非線形と呼ぶ)特性の近似モデルを実現することができるのは、次元が小さく、学習サンプル数がそれほど多くない問題に限られる。例えば、高周波回路のモデル化などでは学習サンプル数が数万の単位の問題となるが、現実には1つのNNでのモデル化は困難であり、学習サンプルをいくつかに分割し複数のNNでモデル化することが一般的である。この為、強非線形システムのNNによる近似モデルの実現には、ロバストな学習アルゴリズムが必要となる。これまで、NNの学習は非線形最適化問題の一種と見なされ、様々なアルゴリズムの改良がなされてきた。しかし、それらの多くが勾配法に基づく手法の為、局所解の問題は残ったままの改良にとどまっていた。従って、アルゴリズムをそのまま適用しただけでは強非線形システムの学習は困難であった。また、NN特有の問題として、その構造自体が起因する問題点(プラトー)も指摘されている。近年、学習における局所解の回避手法として、勾配によらないメタ・ヒューリスティック手法が注目されており、様々なアルゴリズムが提案されている。しかしながら、これらの手法は理想的には無限の時間を必要とする手法であり、実際にコンピュータを用いて解く場合、問題の規模によっては現実的な時間では解を得ることができなくなってしまう。一方、申請者によって、勾配法とメタ・ヒューリスティック手法を組み合わせることで強非線形特性の学習に応用することが試みられ、高周波回路モデリングに適用された。しかしながら、この手法においても、従来の手法と比較して高いロバスト性をシミュレーションにおいて示すことはできたが、計算時間が原因で問題規模を大きくできないことや、メタ・ヒューリスティック手法で得られる解を勾配法の初期値に用いるといった単純な組み合わせゆえに、理論的な説明はできていない。また、その他の同種なハイブリッド手法もほとんどが同様の問題を含んでいる。

2. 研究の目的

本研究では、第1に、以下の2つの研究を進めることにより、非線形性の強い特性を持つ関数(システム)のニューラルネットワークによる近似を可能にすることが目的である。

(ア) 学習データの与え方を改良した勾配法に基づく新たな学習アルゴリズムの提案

(イ) 提案学習アルゴリズムのロバスト性に関する解析

ここで、本研究におけるロバスト性とは、初期値に依存することなく最適解を得られる、つまり、大域収束性のことを示す。第2に、回路の設計や最適化への応用を考慮した、回路の詳細な近似モデルのニューラルネットワークによる実現を目的とした研究へと発展させる。具体的には、本研究では、学習時におけるNNへの学習サンプルの与え方を改良した、勾配法に基づく新たな学習アルゴリズムを提案する。さらには、提案アルゴリズムの初期値に対するロバスト性に関して理論的に解析することを目標とする。一方、学習アルゴリズムの開発のみではなく、回路設計における最適化への適用を視野に入れた実問題への応用に関する研究を行うことを目的としている。

3. 研究の方法

勾配法に基づく学習アルゴリズムに関する研究の1つに、学習時のデータの与え方に着目したオンライン学習及びバッチ学習がある。オンライン学習は確率的降下法としても知られており、学習データ毎にネットワークの重みを更新していく手法である。一方、バッチ学習は勾配法そのものであり、すべての学習データの入力後に重みを更新する手法である。これらの学習法には次の特徴がある。バッチ学習は、収束は速いが局所解等が原因となる学習の停滞を抜け出す能力は確率的動作を持つオンライン学習と比較して劣ることが知られている。最近では、学習の停滞はプラトーによるものであるとの報告もあり、学習時の反復中に継続的に発生する。これら学習の停滞する領域は勾配法では誤差の勾配ベクトルがゼロに近づき、結果として収束判定により早期に学習が終了することになる。また、バッチ学習は、機械学習の様な学習データ数が膨大となる問題に使用される場合、計算時間及びメモリ使用量に問題が生じる。この為、一般的に、機械学習等にはオンライン学習が使用され、その収束性についても理論的に研究がなされている。一方、本研究で対象とするような問題には一般的にバッチ学習が使用されている。そこで、本研究ではオンライン学習とバッチ学習を組み合わせることで、前者の局所解回避能力と後者の解周辺での強力な収束性を組み合わせた学習アルゴリズムを提案する。さらには、提案アルゴリズムと、メタ・ヒューリスティック手法の中でその大域収束性が証明されているアルゴリズムの1つである、連続値最適化問題に対するシミュレーテッド・アニーリング(SA)手法とのアナロジーを示すことにより、提案アルゴリズムの大域収束性、つまり、初期値に対するロバスト性を理論的に明らかにする。これにより、SAの様々な改良手法が適用可能となり、アルゴリズムの発展性は非常に高いものとなる。

さらに、従来、NNに対する新たな学習アルゴリズムは様々提案されている。しかしながら、本研究で注目しているオンライン手法とバッチ手法に関しては、それぞれ個別の研究はなされているものの、それらを組み合わせる研究はこれまでほとんど存在しなかった。この点に着目し、従来法と比較してロバスト性を保証したアルゴリズムを提案することはNNの実用性・応用可能範囲を発展させるために非常に有効な手段である。

4. 研究成果

本研究では以下の研究成果を得た。

- (ア) オンライン学習法とバッチ学習法の収束特性の考察
- (イ) それぞれの学習法の特徴を考慮に入れた学習サンプルデータの与え方に関する考察
- (ウ) (ア)及び(イ)の考察に基づくロバストな学習アルゴリズムの提案
- (エ) 計算機実験による提案アルゴリズムの有効性の検証
- (オ) 提案アルゴリズムとシミュレーテッド・アニーリングとのアナロジーに関する考察

それぞれの成果についての詳細を以下に示す。

(ア) オンライン学習法及びバッチ学習法の収束特性の考察

バッチ学習法はすべての学習データを用いて誤差関数を構成し、1回の反復でその勾配に従って学習を行う、一般的な勾配系最適化手法である。この為、解の軌道は誤差関数の勾配に沿って局所解(理想的には最適解)に向かう。これに対して、オンライン学習法は学習データの一部分を用いて誤差関数を構築し、各反復では異なる学習サンプルによる勾配を用いる。この為、解の軌道は局所解の周りを振動しながら、最終的には最適解へ収束させる手法である。この振動がいわゆるランダムウォークと同様な働きをすることで、学習の停滞(局所解)を抜け出す能力があることが指摘されている。しかしながら、オンライン学習法では解軌道を収束させるため、反復におけるステップサイズを0へ近づけていく必要がある。この為、強非線形性システムの学習を考えた場合、いくつかの局所解の周りを探索するだけで、実際のシミュレーションにおいては最適解を見つける前に1つの局所解へ収束してしまう。これに対して、バッチ学習法は、解軌道は振動することなく、また、ステップサイズを0へ近づける必要もなく局所解へと収束させることができる手法である。しかしながら、初期値に対するロバスト性、つまり、局所解を抜け出す能力はほとんど無く、初期値を適切に選ばなければならないという問題がある。さらには、問題の規模が大きく複雑な場合には、多くの場合、解が発散してしまうことになる。これらの考察から、それぞれの長所及び短所に関する知

見を得た。

(イ) 学習サンプルデータの与え方に関する考察

一方、申請者はオンライン学習法の1回の反復で与える学習サンプル数を徐々に大きくしながら、最終的にはバッチ学習法へと変形させる準ニュートン法に基づく学習アルゴリズム、“改良型オンライン準ニュートン法”を提案した。この手法は1回の反復で使用する学習サンプル数の増加を制御することで、オンライン学習法の学習の停滞を抜け出す能力とバッチ学習法の強力な収束性を併せ持つ手法となり、従来手法と比較して大幅に学習能力を向上させることができた。ここで、勾配系最適化手法として用いた準ニュートン法は、現在の勾配系最適化手法において最も有効な手法の1つである。この為、本研究においても勾配系最適化手法には準ニュートン法を用いる。しかしながら、改良型オンライン準ニュートン法の学習サンプル数の増加方法は、一定の反復回数後に1度に与えるサンプル数を2倍・3倍...と単純に増加させる手法であり、初期値に対するロバスト性は計算機実験によって示すことはできるが、解析的に示すことは不可能であった。この問題点を解決する1つの方法を本研究では提案した。

(ウ)・(エ) ロバストなアルゴリズムの構築及び計算機実験

本研究ではオンライン学習法とバッチ学習法の誤差関数を、パラメータを用いて組み合わせた新たな誤差関数を導出し、その誤差関数に対して準ニュートン法を適用する新たな学習アルゴリズムを提案した。また、提案アルゴリズムの有効性を計算機実験により明らかにした。実験結果より、従来手法よりもNNの学習に有効であることが分かった。また、より大規模で複雑な問題を考慮に入れば、アルゴリズムの並列化は不可欠であり、複数のマルチコアCPUを用いた並列化に関しても考慮にいれる必要がある。このため、提案手法の並列化を行い、マルチコアCPUを用いることで、学習の高速化を図ることができた。

(オ) 提案アルゴリズムのロバスト性の解析

提案手法では学習の初期においてオンライン学習法の能力を用いて複数の局所解の周りを探索し続けることを期待できる手法である。さらに、学習が進むに従ってパラメータを制御することで、アルゴリズムは徐々にバッチ学習法に近づき、最終的にバッチ学習法となる。この手法は複数の局所解を探索しながら、最終的には最適解への収束を期待したアルゴリズムとなる。つまり、オンライン学習法が最適化手法におけるランダムウォークと同様の効果があることを考慮すると、提案手法はパラメータによってその効果

を徐々に少なくする様な制御を行い、最終的には確率的な動きは抑制され、すべての学習サンプルによる誤差関数の勾配を用いるグリーディーな手法(バッチ学習法)へと変化させるアルゴリズムであると考えられる。従って、提案手法はシミュレーティッド・アニーリング(SA)最適化法と同様な動作であり、そのアナロジーからロバスト性を考察できることが予想された。具体的には、連続値最適化手法に対するSAと統計物理学におけるランジュバン方程式のアナロジーが指摘されており、ランジュバン方程式を最適化問題の解法へ応用した場合の温度パラメータの制御がSAと同様の大域収束性を持つことが示されている。この手法は、本研究で提案した手法と、解析的にアナロジーを示すことができ、提案手法の大域収束性に関して同様に示すことができた。

以上より、当初目的としていた、ロバストな学習アルゴリズムの提案に成功し、その実験結果に関して十分に有効性を示すことができた。今後の課題としては、実問題への応用が考えられる。現在は、回路設計CADへの応用を念頭に、その基礎研究に着手した状況である。具体的には、動的再構成可能なデジタル回路の最適設計を目標にした回路モデルのNNによる実現に関して検討をしているところである。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 9件)

- 1 Ninomiya, H. : "Parameterized Online quasi-Newton Training for High-Nonlinearity Function Approximation using Multilayer Neural Networks", *Proc. IEEE&INNS/IJCNN'11*, pp.2770-2777, Aug., 2011.(査読有)
- 2 Ninomiya, H. : "Microwave Neural Network Models Using Improved Online quasi-Newton Training Algorithm", *Journal of Signal Processing*, **vol.15**, no.6, pp.483-488, Nov., 2011. (査読有)
- 3 二宮 洋 : "パラメータ化オンライン準ニュートン法による階層型ニューラルネットワークの学習", *信学論 A*, **vol.J95-A**, no.8, pp.698-703, 2012年8月. (査読有)
- 4 阿倍俊和, 坂下善彦, 二宮 洋 : "階層型ニューラルネットワークの学習に対する online/batch ハイブリッド型準ニュートン法の有効性に関する研究", *Journal of Signal Processing*, **vol.16**, no.5, pp.451-458, 2012年9月. (査読有)
- 5 Kobayashi, M., Ninomiya, H., Matsushima, T., and Hirasawa, S. : "An Error Probability Estimation of the Document Classification Using Markov Model", *Proc. 2012*

International Symposium on Information Theory and its Applications (ISITA'12), pp.712-716, Oct., 2012. (査読有)

- 6 Ninomiya, H., Kobayashi, M. and Watanabe S. : "Reduced Reconfigurable Logic Circuit Design based on Double Gate CNTFETs using Ambipolar Binary Decision Diagram", *IEICE Trans. on Fundamentals.*, **vol.E96-A**, no.1, pp.356-359, Jan. 2013. (査読有)
- 7 Kobayashi, M., Ninomiya, H., Matsushima, T., and Hirasawa, S. : "A Linear Time ADMM Decoding for LDPC Codes over MIMO Channels", *Proc. 2013 RISP International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing (NCSP'13)*, pp.185-188, March, 2013. (査読有)
- 8 Ninomiya, H. : "Dynamic Sample Size Selection based quasi-Newton Training for Highly Nonlinear Function Approximation using Multilayer Neural Networks", *Proc. IEEE&INNS/IJCNN'13*, pp.1932-1937, Aug., 2013. (査読有)
- 9 Ninomiya, H., Kobayashi, M., Miura, Y. and Watanabe S. : "Reconfigurable Circuit Design based on Arithmetic Logic Unit Using Double-Gate CNTFETs", *IEICE Trans. on Fundamentals.*, **vol.E97-A**, no.2, pp.675-678, Feb., 2014. (査読有)

[学会発表](計 7件)

- 1 阿部俊和, 坂下善彦, 二宮 洋 : "online/batch ハイブリッド型準ニュートン法による階層型ニューラルネットワークのロバスト学習に関する研究", *電子情報通信学会 非線形問題研究会 信学技報*, **vol.111, no.276, NLP2011-105**, pp.75-80, 2011年11月
- 2 阿部俊和, 坂下善彦, 二宮 洋 : "Online/Batch ハイブリッド型準ニュートン法によるニューラルネットワークの学習アルゴリズム", *情報処理学会 第74回 全国大会*, **2**, pp.311-312, 2012年3月
- 3 小林 学, 八木秀樹, 二宮 洋, 平澤茂一 : "MIMO 通信における相互情報量基準に基づく量子化器の設計法", *電子情報通信学会 情報理論研究会 信学技報*, **IT2012-41**, pp.59-64, 2012年9月.
- 4 佐伯 誠, 坂下善彦, 二宮 洋 : "分散並列環境における準ニュートン学習アルゴリズムの有効性", *電子情報通信学会 信学技報 非線形問題研究会*, **vol.112, no.389, NLP2012-111**, pp.43-48, 2013年1月.

- 5 Ninomiya, H. : "Dynamic Sample Size Selection in Improved Online quasi-Newton Method for Robust Training of Feedforward Neural Networks", *The Fifth International Conference on Advanced Cognitive Technologies and Applications (COGNITIVE2013)*, May, 2013.
- 6 二宮 洋 : "動的サンプルサイズ選択法に基づく準ニュートン法による階層型ニューラルネットワークの学習", *電子情報通信学会 信学技報 非線形問題研究会*, **vol.113, no.116, NLP2013-38**, pp.63-68, 2013年7月.
- 7 佐伯 誠, 坂下善彦, 二宮 洋 : "改良型分散準ニュートン法によるニューラルネットワークの学習", *電子情報通信学会 基礎・境界ソサイエティ大会*, **A-2-9**, 2013年9月.

〔その他〕

<http://www.info.shonan-it.ac.jp/ninomiya-lab/ninomiya.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

二宮 洋 (NINOMIYA, Hiroshi)
湘南工科大学・工学部・教授
研究者番号：60308335

(3) 連携研究者

小林 学 (KOBAYASHI, Manabu)
湘南工科大学・工学部・教授
研究者番号：80308204