

令和 4 年 6 月 20 日現在

機関番号：32706

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2021

課題番号：17K00350

研究課題名（和文）慣性付2次近似勾配モデルを用いた大規模かつ強非線形データ学習アルゴリズムの高速化

研究課題名（英文）Acceleration Technique of Learning Algorithm for Large-Scale, Strongly Nonlinear Data using Quadratic Approximate Gradient Models with Inertia Term

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

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,800,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、大規模かつ複雑化するデータのニューラルネットワークによる学習を可能にする準ニュートン法の改良を目的とし、高精度かつ高速にこれを可能とする新たな学習アルゴリズムを開発した。さらに、その収束性の解析とハイパーパラメータの解析的な導出を行い、提案手法のロバスト性を確立することに成功した。これらの研究により、従来では実現不可能であった複雑さと規模を持つニューラルネットワークの学習問題を解決した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

IoTの発展により、あらゆる場面でデータが蓄積され、これまで全く無関係であると考えられてきたデータを同時に扱うことで新たな知見を得ることが可能な時代となった。従って、今後はデータ量が多くなるだけでなく、より複雑な関係性を内包する大規模データの解析を、AIを用いて行うことが必要となってきた。本研究では、これを可能とするAI技術の核となる、ニューラルネットワークの学習に焦点を当て、従来よりも強力な学習アルゴリズムの開発に成功したことに学術および社会的意義がある。

研究成果の概要（英文）：The objective of this study is to improve the quasi-Newton method, which enables neural networks learning of increasingly large and complex data. We have developed a new algorithm that enables high accuracy and high speed. Furthermore, we succeeded in establishing the robustness of the proposed method by proving convergence property and analytically deriving hyperparameters. As a result, we have solved the problem of neural networks learning with complexity and scale that were previously unfeasible.

研究分野：人工知能

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 モーメント法 ネステロフの加速勾配法

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

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。しかしながら、これまでの研究では複雑な非線形特性(以下、強非線形と呼ぶ)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ていた。一方、近年のIoTの発展により、膨大なデータの蓄積が可能になり、様々な分野で強非線形なビッグデータの高精度かつ高速な処理の必要性が増してきた。その一つが、深層学習をはじめとした大規模なNNの利用である。大規模データに対するNNの学習アルゴリズムの高速化の実現には、“クラウドシステムを用いた学習の並列化や学習データの分散化”及び“アルゴリズムの改良による学習の高速化及び使用メモリの削減”などが挙げられる。本研究では後者のアルゴリズムの改良に焦点を当てる。

近年のNNの学習は大規模データを対象としており、その学習法のほとんどが1次収束特性の最急降下法を基本とした反復法である。実際の学習にはモーメント法が高速化の為に使用されており、近年はその発展であるネステロフの加速勾配法の有効性も示されている。モーメント法は最急降下法に慣性を加えて探索を加速させる手法である。また、ネステロフの加速勾配法は勾配ベクトルの導出にも慣性項を導入した手法である。しかしながら、強非線形性を内包する学習データの高精度な学習に対しては、これらのアルゴリズムでは、現実的な時間で学習することが不可能であった。この為、目的関数の曲率情報を利用した、2次収束性もしくは超1次収束性を持つ強力な非線形計画法を学習アルゴリズムとして用いる必要があった。その中で最も効率的なアルゴリズムの1つが準ニュートン法である。その特徴は、超1次収束性を持ち、最急降下法のような解から離れた場所からの収束性とニュートン法のような解の周りでの高速な収束特性を併せ持つ手法である。準ニュートン法の強力な収束特性を最大限に引き上げるために、局所解やプラトーなどを回避する準ニュートン法に基づくアルゴリズムの提案も様々行われている。しかしながら、これらの手法は局所解を抜ける能力を飛躍的に向上させることはできたが、従来の準ニュートン法と比較すると非常に多くの学習反復が必要であった。

2. 研究の目的

本研究では、IoT時代の到来とともにより大規模かつ複雑化(強非線形化)するデータのニューラルネットワークによる学習を可能にする従来手法の準ニュートン法の改良を目的とし、これにより、高精度かつ高速に可能とする新たなアルゴリズムの開発を目指す。この目的の実現のために、以下の3点を中心に研究する。

- (1) 準ニュートン法とモーメント法との融合による慣性付2次近似勾配モデルの提案
 - (2) 提案モデルを用いたニューラルネットワークに対する学習アルゴリズムの高速化
 - (3) 複雑な非線形特性を内包する大規模データのニューラルネットワークによる学習への応用
- これらの研究により、従来では実現不可能であった複雑さと規模を持つニューラルネットワークの学習問題を解決する。さらに、提案アルゴリズムを実問題への応用に発展させる。

3. 研究の方法

本研究は以下に示す内容を実施することで、研究目的を達成する。まず、準ニュートン法とモーメント法の融合による慣性付2次近似勾配モデルを用いた高速な学習法の確立を目指す。これまでの研究により、その基礎となる学習法の有効性は計算機実験によって示されている。そこで、収束性の証明とハイパーパラメータの解析的な導出を行い、提案手法のロバスト性を確立する。次に、上記を大規模データに対応したアルゴリズムに拡張する。このため、ミニバッチ法、及び、記憶制限法を適用することにより、大規模化する学習データ数、及び、ネットワーク構造に対応したアルゴリズムの確立を目指す。最終的に、実問題に対する有効性を検討するために、回路設計技術への応用に発展させる。

4. 研究成果

本研究では、強非線形を内包する大規模データを対象にしたNNの高精度かつ高速な学習アルゴリズムの確立を目指した。また、学習アルゴリズムの開発のみではなく、回路設計技術への適用を視野に入れた、実問題への応用に研究を発展させた。具体的には以下を明らかにした。

- (1) 準ニュートン法とモーメント法の融合による慣性付2次近似勾配モデルの提案、及び、提案モデルを用いたNNに対する学習アルゴリズムの高速化手法の確立

モーメント法は最急降下法の学習反復において慣性項を導入することで解探索を加速させる手法である。一方で、準ニュートン法に対する慣性項の導入に関しては、これまで存在しなかった。そこで、本研究では準ニュートン法に慣性項を導入することで、モーメント法との融合を成し、準ニュートン法の解探索を加速させることに成功した。具体的には、NNの学習における誤差関数の2次近似を導出する段階から慣性項を用いて、慣性付2次近似勾配モデルを導出する。このモデルから慣性項を導入したニュートン反復を得る。さらには、その反復式からセカント条件を導き、ヘッセ行列の近似行列及びその更新式を導出した。アルゴリズムを“ネステロフの加速勾配準ニュートン法(Nesterov's quasi-Newton Method, NAQ)”として提案し、その有

効性をいくつかの強非線形な特性を持つベンチマーク問題(関数近似及び高周波回路モデル)に対して示した。

(2) 提案手法の収束性、及び、ハイパーパラメータの解析的な導出によるロバスト性の検証

(1)で提案したNAQは、ヘッセ行列の近似行列を勾配ベクトルを用いて更新するといった観点からは準ニュートン法である。従って、従来の近似行列の更新式(DFPやBFGS公式)と同様に近似行列の更新においては、その行列の正定値対称性は確保され、準ニュートン法と同様な探索能力は確保されることを示した。さらに、NAQは準ニュートン法とモーメント法との融合から生み出されたアルゴリズムであるが、その勾配ベクトルにはネステロフの加速勾配が用いられる。この勾配を用いたネステロフの加速勾配法はモーメント法の一つであり、NNの学習に対しても有効性が示されている。一方、モーメント係数(ハイパーパラメータ)の適応的な決定方法や収束速度の解析的な導出などに関して研究が盛んである。従って、NAQにおいても“準ニュートン法”と“ネステロフの加速勾配法”の多くの知見を利用し、ハイパーパラメータの決定方法やそれに基づく収束性の解析について検討した。これにより、本研究で提案するNAQが定性的にも有効性を示すことができ、よりロバストな学習アルゴリズムとして確立した。

(3) ミニバッチ法や記憶制限法を導入した大規模データ学習を考慮したアルゴリズムへの改良

(1)および(2)で提案したNAQは準ニュートン法と同様にバッチ処理、つまり、1回の反復ですべての学習サンプルを用いるアルゴリズムであった。一方で、大規模データを扱う場合、バッチ処理よりもミニバッチ処理、つまり、学習サンプルの一部をランダムに用いる、確率的(Stochastic)勾配法が効果的であることが示されている。準ニュートン法に対するミニバッチ法の導入は、近年になって研究が始まったところである。ここで問題となるのが、ミニバッチ処理を準ニュートン法に導入した場合の冗長性である。準ニュートン法は解空間において2点、つまり、現在と1反復前の勾配ベクトルが必要となる。後者はアルゴリズム内では記憶するだけで計算の必要はない。これに対して、ミニバッチ処理では反復毎に学習サンプルが異なる、言い換えれば、反復毎に解空間が変化するため、1反復前の学習パラメータにおける勾配ベクトルも反復毎に求める必要がある。つまり、各反復で2度、勾配ベクトルを導出する必要があった。これに対して、バッチ処理のNAQは潜在的に各反復で2度の勾配ベクトルが必要な手法であり、これが要因で1反復の計算時間が準ニュートン法と比較して大きくなる欠点を持っていた。しかしながら、ミニバッチ法への応用に関しては、この問題点はクリアされる。つまり、NAQには準ニュートン法では欠点となる2度の勾配計算が潜在的に含まれており、ミニバッチ処理の導入が欠点になることはない。また、大規模データ化に伴い、NNの規模も大規模になることが予想される。従って、学習時に使用するパラメータの規模が莫大となり、メモリの使用量も膨大となる。これに対応するために、準ニュートン法と同様に記憶制限(Limited Memory)法をNAQに導入した。記憶制限法を導入した準ニュートン法は大規模な最適化問題に対して、現在、最も有効な最適化手法として様々な用途に使用されている。以上より、強非線形な大規模データ学習を考慮した確率的(Stochastic)記憶制限(Limited Memory)NAQを構築し、その有効性を計算機実験により示した。

(4) (3)で提案するアルゴリズムの収束性の解析によるロバスト性の検証

確率的勾配法及び記憶制限準ニュートン法に関しては、これまで様々な検討がなされ、その収束性に関しても多数の研究がある。これに対して、本研究では、(2)で行ったNAQの収束特性の検討を拡張し、確率的記憶制限NAQに対する収束性に関して解析した。特に、モーメント項を含むパラメータを新たなパラメータと定義することで、これまでの収束性に関する解析手法を用いて解析することに成功した。これにより、複雑な非線形特性を内包する大規模データに対する学習アルゴリズムである確率的記憶制限NAQのロバスト性に関する検証を行った。

(5) 実問題の大規模データを用いた実験及び提案アルゴリズムの有効性の検証

実問題への応用を通して、提案手法の有効性の検証を行った。実問題としては、回路設計技術への応用を視野に入れた高周波回路の高精度なモデリングを行った。高周波回路の周波数応答には非常に複雑な非線形性を内包しており、NNによるモデル化は従来のモデルをはるかにしのぐ柔軟で有効なモデルが実現できることが分かっている。また、この実現により、回路設計工程の大幅な削減が期待できる。具体的には、Wave Guide Filter, Low Pass Filter および Patch Antenna等の周波数特性をニューラルネットワークでモデリングし、従来法では不可能であった規模の回路を高速にモデリングできることを示した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計13件（うち査読付論文 13件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Sendilkumaar, Indrapriyadarsini, Mahboubi, Shahrzad and Ninomiya, Hiroshi, and Asai, Hideki	4. 巻 vol.11, issue 4
2. 論文標題 aSNAQ : An Adaptive Stochastic Nesterov 's Accelerated Quasi-Newton Method for Training RNNs	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEICE NOLTA	6. 最初と最後の頁 409-421
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Sendilkumaar, Indrapriyadarsini, Mahboubi, Shahrzad and Ninomiya, Hiroshi, Takeshi Kamio and Asai, Hideki	4. 巻 N/A
2. 論文標題 A Nesterov's Accelerated quasi-Newton method for Global Routing using Deep Reinforcement Learning	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proc. NOLTA 2020	6. 最初と最後の頁 251-254
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 M. D. Sudeera H. Gunathilaka, Mahboubi, Shahrzad and Ninomiya, H	4. 巻 N/A
2. 論文標題 Acceleration Technique of Two-Phase Quasi-Newton method with Momentum for Optimization Problem	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proc. IARIA The Twelfth International Conference on Information, Process, and Knowledge Management, eKNOW 2020	6. 最初と最後の頁 17-19
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Mahboubi, Shahrzad, Sendilkumaar, Indrapriyadarsini, Ninomiya, Hiroshi, and Asai, Hideki	4. 巻 vol. 24, no. 1
2. 論文標題 A Robust quasi-Newton Training with Adaptive Momentum for Microwave Circuit Models in Neural Networks	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Signal Processing	6. 最初と最後の頁 11-17
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Yasuda, Sota, Sendilkkumaar, Indrapriyadarsini, Mahboubi, Shahrzad and Ninomiya, Hiroshi, and Asai, Hideki	4. 巻 N/A
2. 論文標題 A Stochastic Variance Reduced Nesterov ' s Accelerated Quasi-Newton Method	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proc. IEEE/ICMLA 2019	6. 最初と最後の頁 1874-1879
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Sendilkkumaar, Indrapriyadarsini, Mahboubi, Shahrzad and Ninomiya, Hiroshi, and Asai, Hideki	4. 巻 N/A
2. 論文標題 An Adaptive Stochastic Nesterov Accelerated Quasi Newton Method for Training RNNs	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proc. NOLTA 2019	6. 最初と最後の頁 208-211
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Sendilkkumaar, Indrapriyadarsini, Mahboubi, Shahrzad and Ninomiya, Hiroshi, and Asai, Hideki	4. 巻 N/A
2. 論文標題 A Stochastic Quasi-Newton Method with Nesterov ' s Accelerated Gradient	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proc. The European Conference on Machine Learning and Principles and Practice of Knowledge Discovery in Databases, ECML/PKDD 2019	6. 最初と最後の頁 N/A
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Mahboubi, Shahrzad, Sendilkkumaar, Indrapriyadarsini, Ninomiya, Hiroshi, and Asai, Hideki	4. 巻 N/A
2. 論文標題 Momentum acceleration of quasi-Newton Training for Neural Networks	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proc. The 16th Pacific Rim International Conference on Artificial Intelligence, PRICAI 2019	6. 最初と最後の頁 268-281
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Mahboubi, Shahrzad and Ninomiya, H.	4. 巻 1
2. 論文標題 A Novel Quasi-Newton with Momentum Training for Microwave Circuit Models Using Neural Networks	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proc. IEEE/ICECS 2018	6. 最初と最後の頁 629-632
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Sendilkumaar, Indrapriyadarsini, Mahboubi, Shahrzad and Ninomiya, Hiroshi, and Asai, Hideki	4. 巻 1
2. 論文標題 Implementation of a modified Nesterov's Accelerated quasi-Newton Method on Tensorflow	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proc. IEEE/ICMLA 2018	6. 最初と最後の頁 1147-1154
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Mahboubi, Shahrzad and Ninomiya, H.	4. 巻 vol.11, no.3&4
2. 論文標題 A Novel Training Algorithm based on Limited-Memory quasi-Newton Method with Nesterov's Accelerated Gradient in Neural Networks and its Application to Highly-Nonlinear Modeling of Microwave Circuit	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 International Journal On Advances in Software	6. 最初と最後の頁 323-334
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Hiroshi Ninomiya	4. 巻 vol.E8-N
2. 論文標題 A Novel quasi-Newton-based Optimization for Neural Network Training incorporating Nesterov's Accelerated Gradient	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 IEICE NOLTA	6. 最初と最後の頁 pp.289-301
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Mahboubi, Shahrzad and Ninomiya, Hiroshi	4. 巻 1
2. 論文標題 A Novel Training Algorithm based on Limited-Memory quasi-Newton Method with Nesterov's Accelerated Gradient for Neural Networks	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proc. IARIA The Tenth International Conference on Future Computational Technologies and Applications, FUTURE COMPUTING 2018	6. 最初と最後の頁 1-2
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計12件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 田中和真, マハブービ・シャヘラザード, 二宮 洋
2. 発表標題 慣性項付き記憶制限準ニュートン法を用いた深層強化学習のTensorflowへの実装
3. 学会等名 IEICE 総合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 マハブービ・シャヘラザード, センディルクマール・インドラプリヤダルシニ, 二宮 洋, 浅井秀樹
2. 発表標題 適応的慣性項を用いた準ニュートン学習法に関する研究
3. 学会等名 IEICE 総合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 センディルクマール・インドラプリヤダルシニ, マハブービ・シェヘラザード, 二宮洋, 浅井秀樹
2. 発表標題 Neural Networkを用いたAnalog回路設計
3. 学会等名 IEICE 総合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田中和真, マハブービ・シャヘラザード, 二宮 洋
2. 発表標題 慣性項を用いた記憶制限準ニュートン法による深層強化学習
3. 学会等名 IEICE 総合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 安田壮太, マハブービ・シャヘラザード, センディルクマール・インドラプリアダルシニ, 二宮洋, 浅井秀樹
2. 発表標題 確率的分散低減を用いたネステロフの加速準ニュートン法
3. 学会等名 IEICE 総合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 久保仁志, 二宮 洋, 浅井秀樹
2. 発表標題 MOGAを用いたCMOSオペアンプの最適化
3. 学会等名 電子情報通信学会 信学技報 非線形問題研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 藤瀬和洋, センディルクマールインドラプリアダルシニ, マハブービシェヘラザード, 二宮 洋, 浅井秀樹
2. 発表標題 様々な最適化法におけるCascade-correlationの性能調査
3. 学会等名 電気学会電子回路研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 ディバカラアピシェイク ベンカテシュ パルガワラン, センディルクマールインドラプリアダルシニ, 二宮 洋, 浅井秀樹
2. 発表標題 Neural Network Assistance for Determining Circuit Design Parameters
3. 学会等名 電気学会電子回路研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 北川 信, センディルクマールインドラプリアダルシニ, マハブーピシェヘラザード, 二宮 洋, 浅井秀樹
2. 発表標題 Knowledge Based Neural Network の概念を用いた学習モデルの効率について
3. 学会等名 電気学会電子回路研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐藤佑哉, Shahrzad Mahboubi, S. Indrapriyadarsini, 二宮 洋, 浅井秀樹
2. 発表標題 ネステロフの加速勾配を用いたBarzilai-Borwein法の高速化
3. 学会等名 2019年 電子情報通信学会 総合大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shahrzad Mahboubi, S. Indrapriyadarsini, 二宮 洋, 浅井秀樹
2. 発表標題 準ニュートン法における慣性項の影響に関する研究
3. 学会等名 電子情報通信学会 信学技報 非線形問題研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shahrzad Mahboubi, 二宮 洋
2. 発表標題 慣性付2次近似勾配モデルを用いた記憶制限準ニュートン法の有効性に関する研究
3. 学会等名 電子情報通信学会 非線形問題研究会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------