

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 30 日現在

機関番号：33910

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25330294

研究課題名(和文) 特異領域を活用する特異モデル探索法の開発と応用

研究課題名(英文) Development and Application of Singular Model Search Methods Utilizing Singular Regions

研究代表者

中野 良平 (NAKANO, Ryohei)

中部大学・工学部・教授

研究者番号：90324467

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,300,000円

研究成果の概要(和文)：実多層パーセプトロンの学習法として、探索空間の特異領域を利用して一連の隠れユニット数の最適解を系統的に求める特異階段追跡法SSFを開発し、解品質の良さと高速性を実験で確認した。また、複素多層パーセプトロンの学習法として、Wirtinger微分を用いつつ、特異領域を利用して一連の隠れユニット数の最適解を系統的に求める複素特異階段追跡法C-SSFを開発し、優秀な適合性能を対数螺旋近似やカオス予測問題で確認した。

研究成果の概要(英文)：We have developed a new smart learning method called SSF for a real-valued multilayer perceptron (MLP), which makes good use of singular regions to stably and successively find a series of excellent solutions for MLPs with different hidden units. Moreover, we have developed a new learning method called C-SSF for a complex-valued MLP, which utilizes singular regions and Wirtinger calculus. C-SSF showed excellent performance for both fitting of a heavily swirling function and prediction of chaotic behavior.

研究分野：知能情報学、ニューラル情報処理

キーワード：機械学習 特異モデル ニューラルネット 探索法 特異領域 複素ニューラルネット

1. 研究開始当初の背景

(1) ニューラルネットの主要モデルである実多層パーセプトロン(実 MLP)の学習法は長年研究され、その探索空間には学習を停滞させる領域があることが知られている。その領域の実体は勾配がゼロの特異領域である。通常、学習法は特異領域を避けようとするが、そこからさらなる良解へ降下できることに着目して、代表者は、特異領域を積極的に活用する特異階段追跡法(SSF: Singularity Stairs Following)を提案し、実装して実験を重ね、3種の可約性写像、 $f(x) = \frac{1}{x}$ 、 $f(x) = \frac{1}{x^2}$ 、 $f(x) = \frac{1}{x^3}$ をすべて用いて、安定して良解を系統的に求めることができる SSF1.2 を完成させていた(雑誌論文)。

(2) 入出力や重みが複素数となる複素多層パーセプトロン(複素 MLP)は、実 MLP にはない周期性や非有界性という魅力的な表現能力を持つが、その活用は今後の課題として残されている。複素 MLP の探索空間も実 MLP と同様に、条件数が巨大なクレバス形状に満ちており、通常の探索法では良解が得られない。また、複素空間では、通常の複素微分法では勾配が計算できない問題があり、その克服策として、Wirtinger 微分が有力である。代表者は、Wirtinger 微分を用いつつ、準 Newton 法の枠組みで BFGS 更新を行う複素 BFGS 法(C-BFGS)を実装して、従来法では得られない良解が得られることを確認した。

(3) 多層パーセプトロン、RBF、混合正規分布、隠れマルコフモデルなどよく知られた統計的学習モデルの多くは、Fisher 情報行列が縮退するため漸近正規近似が適用できない特異モデルである。特異モデルのモデル選択では、正則モデル用のモデル選択基準(AIC、BIC など)は適用できない。Watanabe は特異モデルの理論を長年研究し、その成果として、2010年に WAIC を、2013年に WBIC を完成させた。これらは、正則モデルにあっては、AIC と BIC に帰着するため、両者を包含する枠組みである。代表者は、渡辺理論に関心を持ち、WAIC と WBIC をフォローしていた。これらの評価法には、理論アプローチとサンプリングアプローチがある。代表者は、開発している SSF が WAIC と WBIC のサンプリングに有効であると考えている。

(4) 文脈自由文法の一種である L システム、特に、最もシンプルな確定的文脈自由 L システムを対象に、変異(ノイズ)を含む一つの文(植物モデル)から元の文法を発見する方法の研究を行い、枚挙法(enumeration)に基づく LGIC(L-system Grammar Induction with error Correction)法を考案し、計算機実験にて、その有効性を実証していた。

2. 研究の目的

統計的学習モデルの多くは特異モデルである。特異モデルの探索空間には、勾配がゼロの特異領域が存在し、学習法を停滞させるため、その回避や解消が模索された。しかし、

特異領域は、生物学の幹細胞に似て、任意の最適解へと分化できることがわかってきた。

本研究の目的は、特異モデルの探索において、特異領域を積極的に活用し、安定して良解を得る新学習法を代表的特異モデルの多層パーセプトロンにて確立するとともに、その原理を用いて、複素多層パーセプトロンの強力な学習法を確立し、SSF をサンプリング法として用いた特異モデル選択法を研究し、さらに、確率 L システムの文法発見へ応用して、SSF 方式の汎用性と有効性を実証することにある。

具体的には、本研究では以下の研究課題に取り組む。

(1) 実多層パーセプトロン(実 MLP)において、特異領域を積極的に活用することにより、安定して高速に良解を得る新学習法 SSF(V2)を確立する。

(2) 周期性や非有界性に特長のある複素多層パーセプトロン(複素 MLP)の学習に、SSF 原理を応用して強力な新学習法を確立する。

(3) SSF 技術を用いた MCMC 法を考案し、特異モデルのモデル選択として精度の高い情報量基準を模索する。

(4) 異色かつ未踏の特異モデルである確率 L システムの文法発見に SSF 原理を応用して新解法を考案する。

3. 研究の方法

以下の研究項目に分解して研究を進める。そのうち、(1)と(2)を先行して進め、その後、(3)と(4)に取り組む。

(1) 実 MLP において、新学習法 SSF(V2)を確立する研究項目：本研究開始時点で、SSF1.2 を開発済みである。SSF1.2 は良解を探索できるが、処理時間が多大にかかる課題があるので、高速化を目指す。

(2) 複素 MLP において、SSF 原理を応用して強力な新学習法を確立する研究項目：本研究開始時点で、ランダムな初期点からの優秀な学習法である複素 BFGS 法を実装済みである。これを探索の主エンジンとして用いつつ、SSF 原理を適用して、安定して系統的に良解を得る一層強力な学習法を開発する。

(3) SSF 技術を用いたサンプリング法を考案し、特異モデル選択を模索する研究項目：本研究では、渡辺理論で提案された WAIC と WBIC を軸に、サンプリング法として SSF を用いる方法の有効性を計算機実験で検証する。

(4) 確率 L システムの文法発見において、新解法を考案する研究項目：本研究開始時点で、確定的 L システムの文法発見法として、LGIC 法を考案済みである。これをベースに研究を進める。

4. 研究成果

(1) 実 MLP において、新学習法 SSF(V2)を確立する研究では、まず、すでに開発済みの SSF1.2 の処理時間が多大である課題を克服するテーマに取り組んだ。各隠れユニット数

の探索では、特異領域内に複数の初期点を作ってそこから多数の探索が進行するが、初期点の数が多割には、探索後に得られる解の数がそれほど多くないことがわかった。初期点は異なっている、途中で合流する探索があることを示している。そこで、以前の探索に合流する探索を途中で枝刈りする方法を考案して SSF1.3 として実装して実験評価したところ、3 倍～8 倍に高速化できた(雑誌論文、学会発表)。

さらに、高速にするために、初期点に優劣をつけて良いものから所定数だけ探索する探索数制限法を考案して SSF1.4 として実装して実験評価したところ、解品質を損なうことなく、SSF1.3 に比べて 5 倍～7 倍に高速化できた(学会発表)。

また、通常、SSF では隠れユニット数を 1 から一つずつ増やしながら探索するが、特定の範囲の隠れユニット数(例えば、15～25)だけを探索したいことも考えられるので、そのための学習法 SSF2 を考案した。SSF2 では、隠れユニット数を一つ減らす処理と一つ増やす処理が必要になる。探索範囲の上限から減少させて下限まで行き、そこから上限まで増加する行程となる。計算機実験にて、各種方式を比較検討した(学会発表、)。なお、学会発表は、IEEE Computational Intelligence Society Japan Chapter Young Researcher Award を受賞した。

(2) 複素 MLP において、SSF 原理を応用して強力な新学習法を確立する研究では、一貫して Wirtinger 微分を用いて、勾配や Hesse 行列を計算した。まず、実 MLP 用の SSF1.2 を複素 MLP 用に改造した複素 SSF を考案して C-SSF1.0 として実装して実験評価したところ、優秀な C-BFGS よりも格段に良い解を得ることができた(学会発表、)。

C-SSF1.0 は処理時間がかかるため、高速化する必要があった。そこで、探索枝刈りを導入して高速化した SSF1.3 を複素 MLP 用に改造した複素 SSF を考案して C-SSF1.1 として実装して実験評価したところ、解品質は維持しつつ、C-SSF1.0 に比べて 3 倍～4 倍の高速化が達成できた(学会発表、)。

この時点で得られた C-SSF1.1 を使っても、あるデータについてだけ、解品質が良くないことがわかった。一連の探索において、ある隠れユニット数のときに最良解を逃していると思われるので、探索を引き継ぐとき、ベスト 1 だけでなく、複数の最良解(例えば、ベスト 3 まで)を使うように改造したところ、最良解の見逃しがなくなった。その版を C-SSF1.2 と命名した(学会発表)。

この時点で得られた C-SSF1.2 をさらに高速にするため、実 MLP 用の SSF1.4 を複素 MLP 用に改造した複素 SSF を考案して C-SSF1.3 として実装して実験評価したところ、C-SSF1.2 に比べて 3 倍の高速化が得られた(学会発表、)。

この時点で得られた C-SSF1.3 は完成度の高い強力な学習法と思われたので、難しい学習問題を解かせて、極限性能を評価することにした。学習問題としては、長期予測が不可能とされる決定論的カオス(ローレンツアトラクタと二重振り子)の予測問題とした。計算機実験の結果、予測結果を次々と入力とするフリーラン予測を見ると、ローレンツアトラクタではかなり長期まで正確に予測できたが、難しいとされる 2 重振り子では、短期の予測に留まった(学会発表、)。

(3) SSF 技術を用いたサンプリング法を考案し、特異モデル選択を模索する研究では、渡辺理論で提案された WACI と WBIC をフォローした後、サンプリング法として SSF1.4 を用いる方法の有効性を計算機実験で評価した。他の情報量基準として、AIC と BIC も用いた比較実験を行い、WAIC と WBIC の優位性を確認する初期的成果を得て、現在、国際会議に投稿中である。

(4) 確率 L システムの文法発見において、新解法を考案する研究については、現在までのところ、確率的 L システムの文法発見法の改良に留まった。確率的 L システムの文法発見法として、枚挙法に基づく LGIC 法を考案済みであったが、3 種の変異のうち、置換型には強いが、挿入型や消去型には弱く、変異率が増えると元の文法の発見は困難であった。そこで、枚挙法ではなく、創発法に基づく方法を導入して、LGIC2 を実装して、実験評価したところ、挿入型や消去型の変異にも強い文法発見法が実現できた(学会発表、)。

(5) 今後の展望

- ・特異領域を利用した実深層学習法
- ・特異領域を利用した複素深層学習法
- ・SSF を用いた深層モデル選択法
- ・深層学習の新応用の開拓

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 2 件)

佐藤聖也, 中野良平, 特異領域を利用した多層パーセプトロン探索法の探索枝刈り, 電子情報通信学会論文誌, 査読有, Vol. J97-D, No.2, pp.330-340, 2014

http://search.ieice.org/bin/pdf.php?lang=J&year=2014&fname=j97-d_2_330&bst=

S. Satoh, R. Nakano, Fast and stable learning utilizing singular regions of multilayer perceptron, Neural Processing Letters, Springer 査読有, Vol.38, No.2, pp.99-115, 2013, doi:10.1007/s11063-013-9283-z

〔学会発表〕(計16件)

Seiya Satoh, Ryohei Nakano, How complex-valued multilayer perceptron can predict the behavior of deterministic chaos, International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN) 2016, 査読有, July 24-29, 2016, Vancouver, Canada (発表予定)

佐藤聖也, 中野良平, 複素多層パーセプトロンを用いたカオスの時系列の予測, 計測自動制御学会(システム・情報部門)第8回コンピューショナル・インテリジェンス(CI)研究会, pp.1-6, 2015年12月18-19日, 県立広島大学(広島県・広島市)

Seiya Satoh, Ryohei Nakano, A yet faster version of complex-valued multilayer perceptron learning using singular regions and search pruning, 7th International Conference on Neural Computation Theory and Applications (NCTA 2015), 査読有, pp.122-129, Nov 12-14, 2015, Lisbon, Portugal

Seiya Satoh, Ryohei Nakano, Complex-valued multilayer perceptron learning using singular regions and search pruning, International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN) 2015, 査読有, pp.1-6, July 12-17, 2015, Killarney, Ireland

佐藤聖也, 中野良平, 複素多層パーセプトロン学習における一層の探索枝刈りの効果, 計測自動制御学会(システム・情報部門)第7回コンピューショナル・インテリジェンス(CI)研究会, pp.37-42, 2015年5月29-30日, 東北大学(宮城県・仙台市)

佐藤聖也, 中野良平, 特異階段追跡法の一層の高速化と解品質の改善, 電子情報通信学会技術研究報告 ニューロコンピューティング(NC)研究会 NC2014-119, pp.289-294, 2015年3月16日, 玉川大学(東京都・町田市)

佐藤聖也, 中野良平, 複素特異階段追跡法の解品質の改善, 計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会 2014 (SSI 2014), pp.820-824, 2014年11月21-23日, 岡山大学(岡山県・岡山市)

Seiya Satoh, Ryohei Nakano, Singularity stairs following with limited numbers of hidden units, 6th International Conference on Neural Computation Theory and Applications (NCTA 2014), 査読有, pp.180-186, Oct 22-24, 2014, Rome, Italy

Ryohei Nakano, Emergent induction of L-system grammar from a string with deletion-type transmutation, 6th

International Conference on Knowledge Discovery and Information Retrieval (KDIR 2014), 査読有, pp.397-401, Oct 21-24, 2014, Rome, Italy

Seiya Satoh, Ryohei Nakano, Complex-valued multilayer perceptron search utilizing singular regions of complex-valued parameter space, 24th International Conference on Artificial Neural Networks (ICANN 2014), 査読有, Lecture Notes in CS 8681, pp.313-320, Sep 15-19, 2014, Hamburg, Germany

佐藤聖也, 中野良平, 探索枝刈りによる複素多層パーセプトロン探索の高速化, 計測自動制御学会(システム・情報部門)第5回コンピューショナル・インテリジェンス(CI)研究会, pp.91-96, 2014年7月2日, 慶応義塾大学日吉キャンパス(神奈川県・横浜市)

佐藤聖也, 中野良平, 隠れユニット数の範囲を限定した特異階段追跡法, 電子情報通信学会技術研究報告 ニューロコンピューティング(NC)研究会 NC2013-65, pp.69-74, 2013年12月21日, 岐阜大学(岐阜県・岐阜市), (IEEE Computational Intelligence Society Japan Chapter Young Researcher Award 受賞)

佐藤聖也, 中野良平, 出力が実数の問題に特化した目的関数を用いた複素多層パーセプトロン探索, 計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会 2013 (SSI 2013), pp.627-632, 2013.11.19, ピアザ淡海(滋賀県・大津市)

Seiya Satoh, Ryohei Nakano, Multilayer perceptron learning utilizing singular regions and search pruning, International Conference on Machine Learning and Data Analysis (ICMLDA) 2013, 査読有, pp.790-795, Oct 23-25, 2013, Berkeley, USA

佐藤聖也, 中野良平, 複素パラメータ空間の特異領域を利用した複素多層パーセプトロン探索法, 計測自動制御学会(システム・情報部門)第3回コンピューショナル・インテリジェンス(CI)研究会, pp.103-108, 2013年8月30日, 大阪大学(大阪府・大阪市)

Ryohei Nakano, Emergent induction of deterministic context-free L-system grammar, International Conference on Innovations in Bio-inspired Computing and Applications (IBICA) 2013, 査読有, Advances in Intelligent Systems and Computing 237, pp.75-84, Springer, Aug 22-24, 2013, Ostrava, Czech Republic

〔図書〕(計0件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.nipl.cs.chubu.ac.jp/~nakano/index-j.html>

6．研究組織

(1)研究代表者

中野 良平 (NAKANO, Ryohei)

中部大学・工学部・教授

研究者番号：9 0 3 2 4 4 6 7

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし