

平成22年6月7日現在

研究種目：若手研究（B）
 研究期間：2007～2009
 課題番号：19700214
 研究課題名（和文） 複素ニューラルネットワークの非線形ダイナミクス解析とその工学応用に関する研究
 研究課題名（英文） Nonlinear Dynamics Analysis of Complex-Valued Neural Networks and its Engineering Applications
 研究代表者
 田中 剛平（TANAKA GOUHEI）
 東京大学・生産技術研究所・助教
 研究者番号：90444075

研究成果の概要（和文）：波動現象や多階調画像などの複素数表現が適したデータを扱う情報処理技術を発展させるため、非線形ダイナミクスに着目して複素ニューラルネットワークの研究を行った。連続的な非線形性をもつ複素ニューロンの活性化関数を新しく提案し、多階調画像のノイズ除去やグラフ彩色問題の最適解探索などの課題へ応用し、従来の離散的な活性化関数を用いた手法より性能が向上することを数値実験によって示した。

研究成果の概要（英文）：Complex-valued neural networks have been studied from nonlinear dynamics viewpoint to develop the theory and the algorithm for addressing complex-valued information such as wave phenomena and gray-level images. I have proposed a new activation function with continuous nonlinearity for a complex-valued neuron and applied it to gray-level image restoration and graph coloring problem. Numerical results have shown that the performance of complex-valued neural network can be improved by the proposed continuous activation function compared with the conventional discrete activation function.

交付決定額

（金額単位：円）

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|-----------|---------|-----------|
| 2007年度 | 1,000,000 | 0 | 1,000,000 |
| 2008年度 | 1,300,000 | 390,000 | 1,690,000 |
| 2009年度 | 800,000 | 240,000 | 1,040,000 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総計 | 3,100,000 | 630,000 | 3,730,000 |

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・感性情報学・ソフトコンピューティング

キーワード：ニューラルネットワーク、非線形ダイナミクス、画像処理、複素関数

1. 研究開始当初の背景

(1) 生物の神経網を模倣する人工ニューラルネットワークは、パターン認識、データマイニング、時系列予測、組合せ最適化問題などの多くの現実的な問題に応用され、ソフトコ

ンピューティングの主要な分野の一つとして位置付けられてきた。近年では、従来と異なるコーディングスキームに基づく新しいネットワークも提案されてきており、その一つが複素ニューラルネットワークである。複

素ニューロンは、実数ニューロンに比べて、光信号、電気信号、風速風向データなどのように、振幅成分と位相成分を持つ波動現象と情報表現の上で相性が良いことが知られている。また、多階調画像や離散多値の集合を扱う問題に対しても、位相成分の周期性をうまく用いて適切な情報表現を与えることが多い。このように、複素空間で定義されるニューラルネットワークは、潜在的に広い応用範囲を持つが、実用化がさらに進むためには、そのネットワークダイナミクスを数理的な側面から体系的に理解することが必要である。特に、複素ニューラルネットワークの動作性能の向上に重要な役割を担うと考えられる非線形性に着目して、それがネットワーク挙動に与える効果を把握しておくことは、実際の工学応用を考える上で不可欠である。

(2) 研究代表者は、サークル写像の非線形現象を応用して多値情報を処理できる新しいニューラルネットワークを提案し、従来のニューラルネットワークよりも優れた連想記憶能力を持つことを示した結果を得ており、非線形性がニューラルネットワークの性能向上に役立つという実例をすでに得ていた。このように、ネットワーク構造と結合様式を工夫することにより、ネットワークに望ましいダイナミクスを与えることは、部分と全体の相互作用を持つような非線形ネットワークに対しては一般的に極めて難しい問題であるが、研究代表者が従事してきた非線形システム論の観点からネットワークの制御方法を考察することにより、複素ニューラルネットワークの性能を向上できる可能性がある。そこで、こうした観点から、複素ニューラルネットワークの基礎理論及び工学応用に取り組むこととした。

2. 研究の目的

(1) 全体の目標は、複素ニューラルネットワークのダイナミクスを非線形システムの観点から理解し、その工学応用を実現することである。そのために、以下のような具体的な課題の解決を通じて、複素ニューラルネットワークの数理的性質を明らかにし、実用研究の基礎となる理論と解析手法の確立を目指す。

(2) 研究代表者が提案した、サークル写像の結合系から成る多値連想記憶ネットワークは、 N 個の K 値ニューロンから成る。このネットワークの複雑な時空間ダイナミクスを非線形解析の手法を用いて理解し、定性的挙動を調べる。個々のニューロンは、パラメータに依存して現在の出力状態を保持するか、カオスダイナミクスによって出力状態をほぼランダムに変更するか、いずれかの振る舞

いを見せる。その調整パラメータがネットワークの持つエネルギー関数への寄与度に応じて値を更新すると仮定するとき、この調整パラメータの更新則を適切に与えることが、望ましいネットワークダイナミクスを得る上で重要である。しかし、ニューロン数 N や離散出力状態数 K が変わると、更新則も変える必要があった。より一般の活性化関数を得るため、サークル写像の出力の時間平均を複素ニューロンの活性化関数として用いるという着想を得た。そこで、これを用いた複素ニューラルネットワークについて考察する。

(3) より一般の複素ニューラルネットワークにおいても、実数ニューラルネットワークにおいてそうであったように、応用上の工夫として活性化関数に非線形性を取り入れることが考えられる。すなわち、離散的なステップ関数を閾値関数として用いる 2 値ニューロンを発展させて、連続的なシグモイド型の活性化関数を用いる実数ニューロンが考えられたのと同様に、複素ニューロンの活性化関数としても従来用いられてきた離散関数でなく連続関数を用いることができるのではないかと考えた。どのような連続的非線形性を導入するか、また実際に連続的非線形性を導入することで従来よりも複素ニューラルネットワークの性能が向上するか、は明らかではない。そこで、こうした新しい活性化関数の提案とその効果の検証を目指す。

(4) 以上のような新しい非線形を有する複素活性化関数を用いた複素ニューラルネットワークの挙動を理解した上で、画像処理、組合せ最適化問題、関数近似などの具体的課題に応用し、従来の手法との性能比較を行う。そして、非線形性の与える効果を体系的に理解する。

3. 研究の方法

(1) 申請者が提案した多値ニューラルネットワークは、カオスダイナミクスを利用することにより、従来よりも優れた連想記憶能力を持つことが分かっていたが、その数理的性質は明らかではなかった。まず、その基礎的性質を考察することにより、発見的なパラメータ調整を回避できるような、信頼性の高い活性化関数を導入する。そして、これを用いた複素ニューラルネットワークの挙動のパラメータ依存性を数値計算によって把握し、非線形性がどのような効果を持つかを明らかにする。

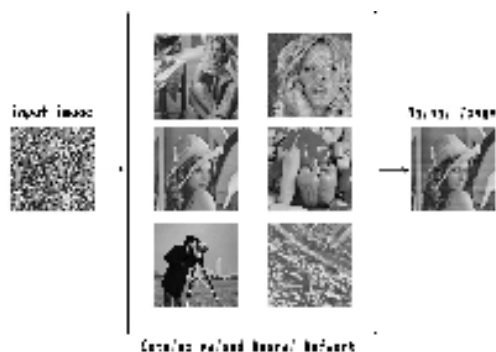
(2) より一般的な複素ニューラルネットワークの数理的性質を調べる。特に、複素関数として与えられる複素ニューロンの活性化関数において、非線形性に対応するパラメー

タが、ネットワークダイナミクスに与える影響に注目し、基礎理論と解析手法を構築する。具体的には、活性化関数の連続的な非線形性を一つのパラメータで調整できるようにし、そのパラメータの変化によってネットワーク全体のダイナミクスがどのような影響を受けるかを考察する。そして、実際の情報処理へ応用するにあたって望ましいパラメータ値を検討する。

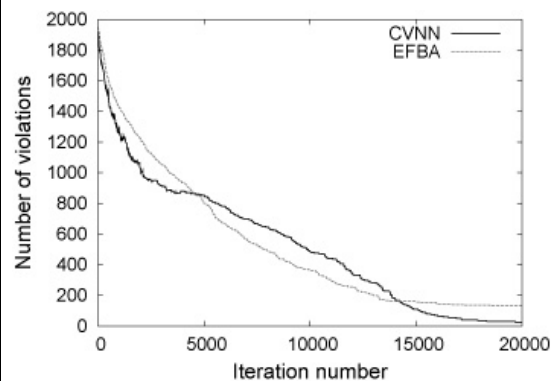
(3) 以上の理論的研究を踏まえ、複素ニューラルネットワークを用いてより実際的な応用課題に取り組み、その性能評価を行う。特に、画像処理や組合せ最適化問題といった応用課題を検討し、数値シミュレーションによって他手法との比較も行う。

4. 研究成果

(1) 非線形性を工夫することにより、新しい複素活性化関数（複素シグモイド関数）を提案した。この複素関数の出力は、2以上の複素の状態をとることが可能である点で、従来の2値出力のニューロンとは異なる。これは、従来の離散的非線形性をもつ複素関数とは異なり、連続的非線形性を実現したものである。シグモイド関数の傾きに対応する非線形性パラメータによって、この活性化関数の応答がどのように変わるかを調べた。次に、複素ニューロンの相互結合ネットワークを用いて連想記憶タスクを行ったところ、従来の複素ニューラルネットワークに比べて、出力状態数が大きいときに目立って性能が向上することが分かった。したがって、従来は応用されてこなかった精度の高い画像の処理に向いている可能性があることが示唆された。実際に、あらかじめ複数の256階調画像をネットワークに記憶させておき、その中の一枚にノイズを加えた画像を入力し、元画像を復元できるかを検証した（下図）。ガウシアンノイズ、ソルト・ペッパーノイズ、一様ノイズのそれぞれについて、画像復元の精度を数値シミュレーションにより評価し、ガウシアンノイズと一様ノイズの場合は形態学的ニューラルネットワークや実数ニューラルネットワークに比べて、ノイズ除去性能が良いことを示した。



(2) NP 困難というクラスに属する最適化問題ベンチマークの一つである、グラフ彩色問題の解法として、相互結合型複素ニューラルネットワークを用いる方法を提案した。頂点彩色問題は、隣接する頂点どうしが同じ色にならないように、全頂点を彩色する問題である。制約条件を満たさない隣接する頂点の個数を最小化するという問題に置き換え、対応する複素ニューラルネットワークのエネルギー関数を定義し、それを最小化するという解法を提案した。下図に示すように、提案手法 (CVNN) は従来のエネルギー関数が単調に減少する方法 (EFBA) に比べて、より良い解を与え得ることが数値計算で分かった。これは、提案手法が非線形性の影響で非単調なエネルギー関数の変化を示し、局所解からの脱出を可能にしているからだと考えられる。



(3) 階層型複素ニューラルネットワークの新しい学習アルゴリズムを提案した。従来の離散的非線形性を持つ活性化関数は不連続で微分不可能なため、誤算関数の微分計算が必要な最急降下法は適用できなかった。研究代表者の提案した連続的非線形性を持つ活性化関数は、こうした問題を克服し、最も基礎的な最急降下法による学習則および、多階層ネットワークに対する誤差逆伝播法を理論的に導出した。提案アルゴリズムが複素数データの学習において有効であることを関数近似タスクの数値シミュレーションを行い、すでに提案されていた線形修正則に基づく方法と比べてフィッティング誤差も汎化誤差も小さくなることを示した。

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)

- ① Gouhei Tanaka and Kazuyuki Aihara, Complex-Valued Multistate Associative Memory with Nonlinear Multilevel Functions for Gray-Level Image Reconstruction, IEEE Transactions on Neural Networks, Vol. 20, No. 9, pp.

- 1463-1473, 2009, 査読有
- ② Gouhei Tanaka and Kazuyuki Aihara, Backpropagation Learning Algorithm for Multilayer Phasor Neural Networks, C. S. Leung, M. Lee, and J. H. Chan (Eds.) Lecture Notes in Computer Science, Vol. 5863, pp. 484-493, Springer, Heidelberg, 2009, 査読有

[学会発表] (計4件)

- ① Gouhei Tanaka, Learning Algorithm for Multilayer Phasor Neural Networks, International Conference on Neural Information Processing, 2009年12月4日, バンコク (タイ)
- ② Gouhei Tanaka, A Heuristic Approach to Graph Coloring Problems Using Complex-Valued Neural Networks, 2008年9月9日, ブダペスト (ハンガリー)
- ③ Gouhei Tanaka, Complex-Valued Multistate Associative Memory Based on Nonlinear Multilevel Functions for Gray-level Image Reconstruction, World Congress on Computational Intelligence, 2008年6月2日, 香港
- ④ 田中 剛平, 非線形多値関数を用いた複素連想記憶モデル, 電子情報通信学会非線形問題研究会, 2008年2月1日, 札幌

[図書] (計3件)

- ① 田中 剛平, 合原 一幸, サイエンス社, 数理科学8月号, pp. 54-55, 2009
- ② 田中 剛平, 岩波書店, 科学11月号, pp. 1242-1245, 2008
- ③ 田中 剛平, ウェッジ, 社会を変える驚きの数学, pp. 193-197, 2008

[産業財産権]

- 出願状況 (計0件)
- 取得状況 (計0件)

[その他]

<http://www.sat.t.u-tokyo.ac.jp/~gouhei>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

田中 剛平 (TANAKA GOUHEI)
東京大学・生産技術研究所・助教
研究者番号: 90444075