

平成21年 5月22日現在

研究種目：若手研究（B）
 研究期間：2007～2008
 課題番号：19700221
 研究課題名（和文） 四元数ニューラルネットワークによる多次元情報処理に関する研究
 研究課題名（英文） Multidimensional Information Processing Based on Quaternionic Neural Networks
 研究代表者
 磯川 悌次郎（ISOKAWA TEIJIRO）
 兵庫県立大学・大学院工学研究科・准教授
 研究者番号：70336832

研究成果の概要：

本課題研究は、超複素数の一つである四元数を導入したニューラルネットワークモデルについて、それを実工学応用に供するための理論整備を行うことを目的としている。本課題研究では、特にカラー画像に代表される3次元データや4次元データを記録・想起することができる連想記憶システムを提案し、そのシステムの特性や性能の評価を行ってきた。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,200,000	0	1,200,000
2008年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
年度			
総計	1,800,000	180,000	1,980,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：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，四元数，複素ニューラルネットワーク，連想記憶システム

1. 研究開始当初の背景

近年、複素ニューラルネットワーク(以下複素 NN)と総称される研究分野において基礎理論から工学応用まで幅広い研究が行われている。複素 NN とは、NN における情報表現を複素数に拡張したものである。この拡張により、振幅・位相情報や2次元座標情報などの一つの物理量ではあるが個別のニューロンで扱わなければならないものを元々の一つの実体として取り扱うことが可

能となる。

脳のモデルとしての NN の観点からは、この複素数への拡張はニューロン間の情報伝達に位相表現が導入されたものと考えられることができる。ニューロンからの出力値がニューロンの平均発火率に加え位相情報を表現することができるため、各ニューロンの発火タイミングという脳内における重要な情報を自然な形で表現することが可能となる。

複素数により二つのパラメータを持つ物理量が一つの変数で表現可能となったが、よ

り多くのパラメータで一つの物理量を表現する場合については、NN 研究に限らず複素数ほど検討されていないのが現実である。日常的に用いられかつ工学問題としても重要な物理量の例としては、三次元物体の座標表現や色彩情報が挙げられる。これらはいずれも3つのパラメータを用いて一つの物理量を表現するものである。

このような複素数よりも次数が高い物理量を表現するためには、より高次の複素数、すなわち超複素数を用いることが有効である。四元数は超複素数の一つであり、一つの四元数は一つの実数成分および三つの虚数成分の四成分により表現される。この四元数を NN に導入することにより、三次元空間における制御問題や色彩画像処理などへの応用が広がることが期待できる。本研究申請者は、このような現状を鑑み、NN における四元数の導入についての基礎理論および工学応用に関する研究を展開してきた。

2. 研究の目的

本研究申請者は本申請課題以前より四元数 NN の高い情報処理能力を様々な問題を通して明らかにしてきたが、これらの NN を実工学応用に供するためには解決すべき問題がいくつか挙げられる。この問題を解決するために、これまでに提案および評価を行ってきた四元数 NN モデルを理論面および実装面についてさらに検討を行い改良してゆくことが本申請課題の目的である。

具体的な解決すべき問題として、階層型四元数 NN モデルにおいては、その処理能力の向上が挙げられる。四元数 NN は従来 NN と比較して内部演算量が多く必要となるために、ニューロン出力を得るまでの時間が長くなるという問題がある。この問題については、デジタル信号処理プロセッサ(DSP)によるハードウェア化についても視野に入れることを検討する。

また、四元数 NN による連想記憶システムについては、より大規模なネットワークにおける特性の解析を行うと共に、三次元パターン認識システムへの応用も検討する。

さらに、四元数 NN による多次元情報の効率的な処理の可能性を検討するために、階層型・相互結合型以外の NN モデルについても四元数 NN 化することを検討する。具体的には、セルラー型のニューラルネットワークモデルについてその四元数化を図り、カラー画像を実時間で処理することが可能となる NN モデルの構築可能性を検討する。また、自己組織化マップ型のネットワークについてもその枠組とデータマイニングへの応用について検討を行う。

3. 研究の方法

本申請課題においては、上記研究目的に述べられた中の相互結合型四元数 NN による連想記憶システムに関する研究について主に展開してきた。また、上記研究目的には含まれないが、複素 NN 研究の一分野である四元数 NN の有用性を広く告知するために、複素 NN に関する書籍について、その一章の執筆を担当した。

相互結合型四元数 NN における連想記憶システムの解析・応用に関する研究について、本申請課題において展開してきた研究内容を以下(1)~(3)に列挙する。

(1) 大規模なネットワークにおける連想記憶システムの特性解析

本申請課題以前の研究において、本研究申請者は相互結合型四元数 NN を提案し、ニューロン数が3または4から構成されるネットワークについて、その特性の解析を行ってきた。しかしながら、現実の連想記憶システムにおいては、ネットワークはより多くの数のニューロンから構成されるのが通例である。本課題における目的は、大規模なネットワークにおける連想記憶システムの特性解析、特にシステムに記憶したパターンの想起性能について精査することである。

(2) ニューロン値が連続値を取り得る相互結合型四元数 NN による連想記憶システムの特性解析

上記(1)において用いられている四元数 NN モデルは、各ニューロン状態における各四元数成分+1または-1のいずれかを取り得る、すなわち2値状態である。連想記憶システムの実用化の観点からは、記憶するパターンがより多彩な状態を取ることが必要不可欠である。そこで、本課題では、従来の2値モデルを基盤とし、ニューロン状態の各四元数成分が実数値を取り得るようにニューロンモデルを拡張する。これに伴い、ネットワークの安定条件、すなわちあるパターンを入力すると記憶パターンのいずれかに収束するために必要な条件を提示し、理論的に安定であることを示す必要がある。

(3) 位相表現を有する多状態相互結合型四元数 NN による連想記憶システムの特性解析

上記(2)において連続実数値を取ることができる四元数 NN を提案した。この NN の特性解析の際に、利用できる活性化関数の種類が限られており、それに伴

い、ニューロン状態およびネットワーク状態の取り得る状態数が少なくなることが明らかとなった。すなわち上記(2)のモデルにおいても、上記(1)モデルと比較してもその情報表現能力がそれほど向上していないことを示している。

この問題を解決するために、位相表現を導入した離散型四元数 NN モデルを提案する。これは複素数における直交表現および位相表現に対応したものを四元数に拡張することにより実現される。このモデルでは1つの四元数が1つの振幅ならびに3種類の位相角により表現される。ニューロン状態は、振幅を1とし、それぞれの位相角について任意数に等分割し、その分割された角度のいずれかに位相角を設定することにより表現される。これにより、ニューロン状態は離散的ではあるが、分割数を変更することにより多くの状態を取りうるが可能となる。

上記(2)の課題と同様に、ニューロンモデルの変更に伴い、ネットワークのエネルギーおよびネットワークの安定性についても理論的に証明する必要がある。

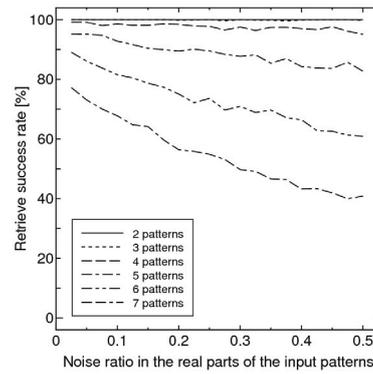
4. 研究成果

前節(1)~(3)に対応する研究成果を順に報告する。また、それらに対応した発表論文等についてもそれぞれの節に附記する。

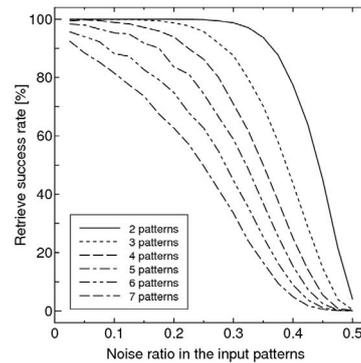
(1) 大規模なネットワークにおける連想記憶システムの特性解析

四元数 NN における連想記憶システムの性能・特性評価を行うために、40ニューロンおよび100ニューロンから構成されるネットワークについて、複数個(2~7個)のパターンを記憶させた。そして、その記憶されたパターンについて一定割合のノイズを重畳したパターンネットワークに入力させることによる想起実験を行った。同様の実験を従来の実数値型 NN に基づく連想記憶システムに対しても実施し、四元数 NN と実数値 NN の間の性能比較を行った。

入力パターンに対するノイズ重畳割合に対する想起成功率の結果を図1および図2に示す。図1(a)および図1(b)が40ニューロンのネットワークにおける結果であり、図2(a)および図2(b)が100ニューロンのネットワークでの結果である。これらの図より、四元数 NN は入力に対するノイズの影響を受けにくいことが明らかとなった。これらの結果は〔雑誌論文〕(1)において報告を行っている。

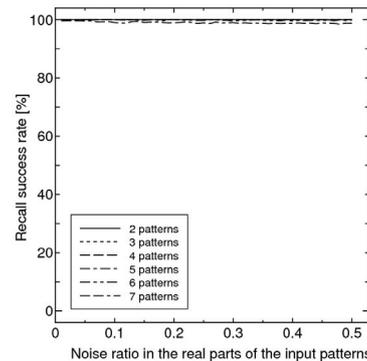


(a) 四元数 NN の場合

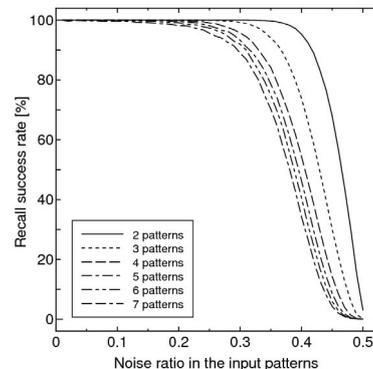


(b) 実数型 NN の場合

図1 耐ノイズ特性(40ニューロン)



(a) 四元数 NN の場合



(b) 実数型 NN の場合

図2 耐ノイズ特性(100ニューロン)

- (2) ニューロン値が連続値を取り得る相互結合型四元数 NN による連想記憶システムの特性解析

本課題においては、ニューロンの活性化関数として下記 f_1, f_2 を導入した。さらにそれぞれの関数についてネットワークの安定化条件を示した。

$$\begin{aligned} \mathbf{f}_1(\mathbf{s}) &= f_1^{(e)}(s^{(e)}) + f_1^{(i)}(s^{(i)})\mathbf{i} + \\ &\quad f_1^{(j)}(s^{(j)})\mathbf{j} + f_1^{(k)}(s^{(k)})\mathbf{k} \\ f_1^{(e)}(\mathbf{s}) &= f_1^{(i)}(\mathbf{s}) = f_1^{(j)}(\mathbf{s}) = f_1^{(k)}(\mathbf{s}) \\ &= \tanh(s / \varepsilon) \end{aligned}$$

$$\mathbf{f}_2(\mathbf{s}) = \frac{a\mathbf{s}}{1 + |\mathbf{s}|}$$

f_1 の場合は、自己に対する結合荷重が -2ε よりも大きい場合、 f_2 の場合は、パラメータ a が 0 よりも大きい場合にネットワークは安定となる。これらの結果ならびに証明の詳細は [学会発表] (3) および (4) にて公表している。

- (3) 位相表現を有する多状態相互結合型四元数 NN による連想記憶システムの特性解析

本課題では、状態を次式に示す位相状態により表現する四元数ニューロンモデルを導入する。

$$\mathbf{u}_p = e^{i\phi_p} \otimes e^{k\psi_p} \otimes e^{j\theta_p}$$

ここで、 ϕ, ψ, θ は位相角を表しており、ニューロン状態はこれらの位相角により表現する。このモデルは複素 NN モデルの一つである位相表現複素 NN モデルの四元数への拡張となる。ニューロン状態を更新するための活性化関数についても複素 NN モデルからの拡張として定義している。

このニューロンモデルを持つ相互結合型ネットワークについても、その安定条件を示し、その証明を行っている。このモデルでの安定条件は、自己に対する結合荷重が 0 よりも大きい場合となる。これらの結果ならびに証明の詳細は [学会発表] (1) および (2) にて公表している。

本課題研究で得られた研究成果の一部および申請以前に展開してきた研究の成果については、論文以外にも [図書] (1) にもまとめられた。四元数を導入した NN モデルについて、より多くの研究者に認知させることにより、

より幅広い基礎理論ならびに工学応用につながることを期待できる。

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 1 件)

- (1) T.Isokawa, H.Nishimura, N.Kamiura, and N.Matsui, "Associative Memory in Quaternionic Hopfield Neural Network," International Journal of Neural Systems, 査読有, Vol.18, 2008, pp.135-145

[学会発表] (計 4 件)

- (1) 磯川 悌次郎, "四元数に基づく多値連想記憶ニューラルネットワークの特性解析," 計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会 2008, 2008/11/27, イングレひめじ(兵庫県姫路市).
- (2) T.Isokawa, "On the Scheme of Quaternionic Multistate Hopfield Neural Network," Joint 4th Int. Conf. on Soft Computing and Intelligent Systems and 9th Int. Symp. On advanced Intelligent Systems, 2008/9/19, Nagoya University(Nagoya, Japan).
- (3) T.Isokawa, "Dynamics of Discrete-Time Quaternionic Hopfield Neural Networks," Int. Conf. on Artificial Neural Networks, 2007/9/10, Ipanema Park Hotel(Porto, Portugal).
- (4) 磯川 悌次郎, "四元数連想記憶ニューラルネットワークにおける安定状態の解析," 第 17 回インテリジェント・システム・シンポジウム, 2007/8/11, 愛知工業大学(愛知県名古屋市)

[図書] (計 1 件)

- (1) T.Isokawa, N.Matsui, and H.Nishimura, IGI Global, "Quaternionic Neural Networks: Fundamental Properties and Applications," in T.Nitta ed., Complex-Valued Neural Networks: Utilizing High-Dimensional Parameters, 2009, pp.411-439 (Chapter 16).

[その他]

なし

6. 研究組織

研究代表者

磯川 悌次郎 (ISOKAWA TEIJIRO)

兵庫県立大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号：70336832