

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 16 日現在

機関番号：24506
研究種目：基盤研究(C)（一般）
研究期間：2019～2021
課題番号：19K12141
研究課題名（和文）四元数に拡張された量子ビットニューラルネットワークの構築と信号処理への応用

研究課題名（英文）Construction of Quaternionic Qubit Neural Network and Its Application to Signal Processing

研究代表者
磯川 倣次郎（Isokawa, Teijiro）

兵庫県立大学・工学研究科・准教授

研究者番号：70336832
交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究申請は、量子情報処理に基づくニューラルネットワークモデルを構築し、その基本性能の解析と工学応用の展開を図ることを目的としている。これに対して、(1) 拡張された量子ビットニューロンモデルおよびそのネットワークの構築、(2) このネットワークの信号処理能力の評価、の二点について検討を行った。

(1)に関しては、四元数表現と演算を量子ビットニューロンに組み込んだニューロンモデルおよび階層型ニューラルネットワークを構築するとともに、このネットワークの学習アルゴリズムとして誤差逆伝播法の導出を行った。(2)に関しては、カオス時系列の一つであるローレンツ方程式の出力予測問題において評価を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来のニューラルネットワークでは、ニューロンと呼ばれる基本素子により信号を処理するシステムである。画像情報などの多次元データを処理するためには数多くのニューロンが必要となり、様々な学習アルゴリズムが提案されてきた。本研究課題では、ニューロンの数ではなく各ニューロンが有する性能を向上させることによって多次元のデータを処理という大規模化の方法を検討したものである。本課題で構成したニューラルネットワークでは、多次元のデータを処理するために量子情報処理および四次元の数体系を導入することにより、従来の実数に基づくニューラルネットワークよりも効率的に信号が処理できることを示し得た。

研究成果の概要（英文）：The purposes of this project are to construct neuron model and its feedforward network based on quantum information processing, to analyze the properties of the network, and to evaluate the effectiveness and performances of the neural network by using real-world signals, as compared to conventional (real-valued) neural network. The following outcomes have been achieved in this project: (1) A neuron model that incorporates quaternionic algebra into qubit neuron model with complex-valued representation, and its feedforward neural network, called Quaternionic Qubit Neural Network (QQNN), with an error-backpropagation algorithm as its learning method. (2) QQNNs have been evaluated through a prediction problem of three-dimensional outputs of Lorenz equations, and it is shown that QQNNs have superior performance in prediction accuracies than real-valued NNs.

研究分野：知能情報学

キーワード：複素ニューラルネットワーク 量子情報処理 四元数

1. 研究開始当初の背景

ニューラルネットワーク(以下 NN)は機械学習手法の一つであり、近年の NN 研究の発展により、画像認識のみならず音声などの信号処理、言語処理、情報生成などの様々な応用に適用されている。特に画像認識に関しては従来の機械学習手法よりも優れた識別性能が示されている。

また、NN の研究においては複素ニューラルネットワークと総称される研究分野において基礎理論から工学応用に至る幅広い研究が行われており数多くの研究報告がなされている[1]。複素ニューラルネットワークとは 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・位相情報や二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った。

複素数により二つのパラメータを持つ物理量を一つの変数により表現することが可能となるが、一つの物理量をより多くのパラメータにより表現することについては、NN 研究に限らず複素数ほど詳細に検討されていなかった。複素数(2次元数)よりも次数がより高い物理量を表現するためには、より高次の複素数である超複素数を用いることが有効である。四元数は、一つの四元数は一実数成分と三種の虚数成分の合計四成分により表現される超複素数である。本研究申請者らは四元数に基づく NN モデルを提案し、その性能評価ならびに工学問題への応用に関する研究を展開してきた。

また、複素数が必要不可欠となる情報処理機構として、量子力学に基づく情報処理装置すなわち量子コンピュータが挙げられる。量子コンピュータにおける基本的な情報処理要素は量子ビットと呼ばれるものであり、その内部状態は $|0\rangle$ と $|1\rangle$ という二つの状態の線形重ね合わせで表現されている。この重ね合わせにおけるパラメータは二つの確率振幅と呼ばれる複素数により表現されており、これらの確率振幅を量子ゲートと呼ばれる作用素にて操作することにより情報処理を行うことができる。重ね合わされた状態に対する操作により超並列演算および超並列探索を効率的に行うことができるため、これまでに様々な量子コンピュータのモデルならびに実装が提案されている。また、機械学習と量子情報処理の組み合わせも模索されている[2]。本研究申請者らは、この量子情報処理の優位性を NN に融合すべく、量子ビットに基づく階層型 NN モデルを提案し、信号処理や時系列予測問題において高い性能を有していることを示してきた。

2. 研究の目的

本申請課題の目的は、これまでに独立に研究を行ってきた四元数 NN と量子ビット NN を融合したニューロンモデルおよび NN モデルを構築し、実問題においてその性能を評価することである。量子力学と四元数の関連は様々な論文において議論されており、これらは量子ビットにおける演算処理が四元数により簡潔かつ自然に記述することができることを示している[3]。また、本研究申請者らが提案し評価してきた量子ビット NN においては、各量子ビットニューロンの状態は Bloch 球と呼ばれる球面上の点として表現されているが、この上を遷移する自由度は球上の一つの円周上に制限されている。四元数による次元拡張ならびに回転演算を導入することにより、この制約を取り除きつつも効率の良い状態遷移を行えることが期待できる。

本研究申請においては、四元数化された量子ビットニューロンモデルおよびその階層型ネットワークを開発することを第一の目的と設定した。また、量子ビットニューロンモデルを用いた他の構造のネットワークへの適用可能性や工学応用における優位性や問題点を明らかにすることも検討した。

3. 研究の方法

これまでに検討してきた(複素数で記述された)量子ビットニューロンにおいては、ニューロンの状態に対応する二つの確率振幅は複素数で表されている。ニューロンに入力される信号のそれぞれは 1bit 回転ゲートにより回転変換を行い位相状態の変換を行う。また、これらの信号が重畳された上で出力を決定するのは 2bit 制御 NOT ゲートにおいて確率振幅を変換することにより行っている。本申請研究では、これらのそれぞれについて四元数の演算を導入する。回転ゲートに関しては、3次元空間における回転軸および回転角度パラメータを用いて回転演算を導入した。また、制御 NOT ゲートに対する四元数拡張は、対象となる四元数と確率振幅を入れ替えた四元数を定義し、それらの間の遷移状態を作りだすことにより行った。

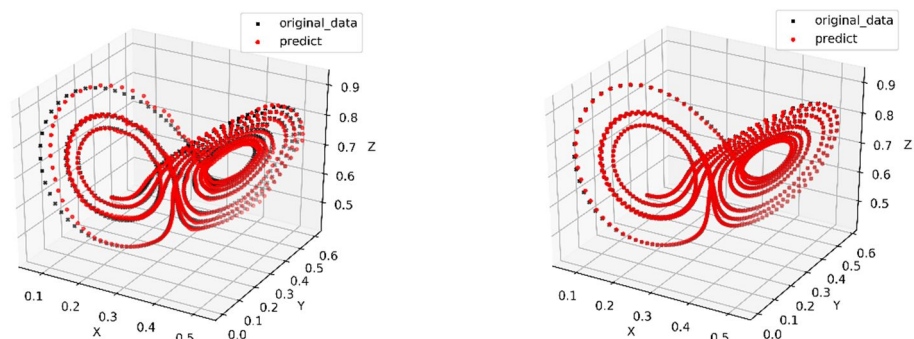
また、この拡張したニューロンモデル(四元数量子ビットニューロン)に基づいた階層型ネットワーク(四元数量子ビットニューラルネットワーク; QQNN)を構成し、誤差逆伝播学習法に基づく学習法を定式化した。このネットワークの性能を評価するために、カオス時系列における短

期・長期予測問題を設定し、予測精度性能の評価を行った。

4. 研究成果

性能評価を行うためのカオス時系列として、ローレンツ方程式と呼ばれる三元非線形微分方程式から生成される系列を用いた。この方程式群について、オイラー法で離散化した時間発展の系列データを学習データおよび評価データとした。NNに学習させるタスクは、ある時刻 t での3次元信号を入力として、 Δt 離散時刻だけ先の3次元信号を予測するという課題である。用いる時系列信号は、ローレンツ方程式から出力される最初の2000ステップ分の時系列信号をネットワークの学習に用い、それに続く1000ステップ分の時系列信号をテスト用のデータとして用いる。性能評価としては、四元量子ビット NN および従来の実数型の NN における予測精度の比較ならびに Δt の大きさを変化させた場合の予測精度の変化を用いる。図1に $\Delta t=10$ の場合のテストデータを入力した場合の実数型 NN、四元量子ビット NN の予測結果を示す。図中黒点がローレンツ方程式の出力(真値)であり、赤点が NN からの予測出力を表す。この結果より、 $\Delta t=10$ の場合では四元量子ビット NN はほぼ正しく方程式出力を予測できていることがわかる。また、実数型においても正しく予測できているが、軌跡が外れているところ(黒点と赤点がずれているところ)が多いことがわかる。同様に、 $\Delta t=30$ とした場合のネットワーク出力を図2に示す。この場合では、実数型 NN では方程式出力をほぼ予測できていないが、四元量子ビット NN では予測に多少のずれが見えるものの傾向は捉えられていることがわかる。

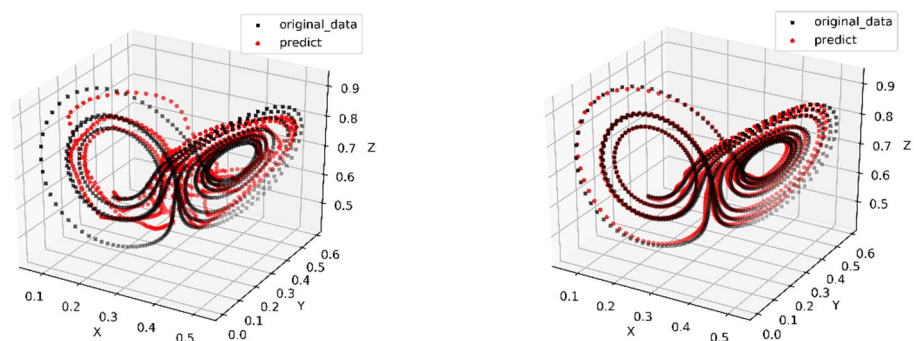
また、 Δt を変化させた場合における実数型 NN、四元量子ビット NN の予測誤差を比較した結果を図3に示す。この結果より、四元量子ビット NN による予測誤差は常に実数型 NN よりも低く、予測誤差の差が大きいところでは $1/10$ 以下まで予測誤差が下げられているということがわかる。これらの結果については、国内研究会および国際会議において公表しており、ニューロンモデルの改良やより詳細な解析などを行った結果について、論文投稿の準備中である。



(a) 実数型 NN による出力

(b) 四元量子ビット NN による出力

図1 ローレンツ方程式を学習した際のネットワーク出力($\Delta t=10$, 黒点: 真値, 赤点: 予測値)



(a) 実数型 NN による出力

(b) 四元量子ビット NN による出力

図2 ローレンツ方程式を学習した際のネットワーク出力($\Delta t=30$, 黒点: 真値, 赤点: 予測値)

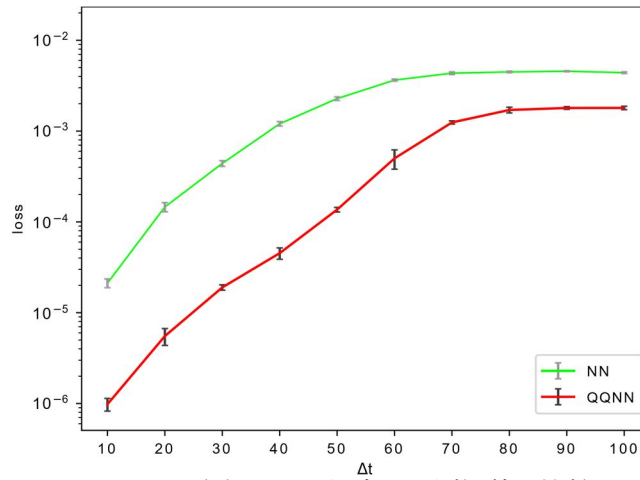


図3 Δt を変化させた場合の予測誤差の比較

参考文献

- [1] A. Hirose (ed.), Complex-Valued Neural Networks: Advances and Applications, Wiley-IEEE Press (2013).
- [2] A. Wichert, Principles of Quantum Artificial Intelligence: Quantum Problem Solving and Machine Learning (2nd edition), World Scientific Publishing (2020).
- [3] K. B. Wharton and D. Koch, "Unit quaternions and the Bloch sphere," Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical, Vol. 48, No. 23, p. 235302, 2015.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 T.Teguri (T.Isokawa, N.Matsui, H.Nishimura, and N.Kamiura)
2. 発表標題 Time Series Prediction by Quaternionic Qubit Neural Network
3. 学会等名 Proceedings of the 2020 International Conference on Neural Networks (IJCNN2020-WCC12020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 手操卓也
2. 発表標題 四元数表現を持つ量子ビットニューラルネットワークの時系列予測への適用
3. 学会等名 第16回コンピューテーショナル・インテリジェンス研究会
4. 発表年 2019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
研究分担者	松井 伸之 (Matsui Nobuyuki) (10173783)	兵庫県立大学・工学研究科・特任教授 (24506)	

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
---------	---------