

令和 5 年 5 月 19 日現在

機関番号：34310

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K11980

研究課題名（和文）四元数ニューラルネットワークによるダイナミカルシステムの制御系設計

研究課題名（英文）Design of control systems using quaternion neural networks for dynamic systems

研究代表者

高橋 和彦（Takahashi, Kazuhiko）

同志社大学・理工学部・教授

研究者番号：90332808

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 1,500,000円

研究成果の概要（和文）：ダイナミクスを有するシステムに対する適応・学習制御手法として、四元数代数表現に基づいて高次元化されたニューラルネットワークを用いて制御系を設計する手法を確立し、その特性を明らかにすることを目的に、四元数ニューラルネットワークの構造と学習法、サーボレベルの四元数ニューラルネットワーク制御系の設計法と安定解析を提案し、実問題への応用としてロボットマニピュレータや非線形システムの制御を行って実現性と有用性を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

高次元ニューラルネットワークの一つである四元数ニューラルネットワークの特徴と能力を明らかにし、システムの制御への可能性を解明した成果は、人工ニューラルネットワークの研究において深層学習と並び注目されている高次元化に関する新たな知見として学術的意義があるとともに、計算知能の応用領域の拡大や制御工学分野における適応・学習制御手法の拡充に貢献することから、工業的有用性の点からも意義を有している。

研究成果の概要（英文）：This study aims to establish a method for designing an adaptive/learning control of dynamical systems using a high-dimensional neural network based on quaternion algebra and to clarify the characteristics of using quaternion neural networks for control systems applications. Feedforward and recurrent quaternion neural networks and their learning algorithms are derived. Subsequently, a design method for servo-level controllers using quaternion neural networks is proposed and the stability analysis of the control system is also investigated. Furthermore, the feasibility and effectiveness of the proposed method are demonstrated via the computational experiments of controlling robot manipulators and non-linear systems for an application to real-world problems.

研究分野：制御工学

キーワード：高次元ニューラルネットワーク 四元数 適応・学習制御

1. 研究開始当初の背景

(1) 計算機の著しい進歩が高速並列演算を可能とし、インターネット環境やセンサ技術の発展が容易にビッグデータを入手・利用可能とした事などが背景となり、深層学習の研究と応用が国内外で盛んに行われ、画像処理、音声認識、機械翻訳などの分野で飛躍的な成果を挙げたことにより近年の人工知能ブームが形成されていたが、ニューラルネットワークにおける研究では、「深層化」の一方で「高次元化」も注目されていた。ニューラルネットワークの高次元化には、信号やパラメータレベル、構造レベルなど様々な形式があるが、複素数値化されたニューラルネットワークのように対象やデータの構造・表現に応じた代数系に基づきニューロンモデルやネットワークパラメータを高次元数表現して構成する高次元ニューラルネットワークは、実数値表現を用いる従来のニューラルネットワークでは対応が難しく十分な性能が得られないような問題に対し効果的な対応が可能で学習能力が優れているなどの特徴があり、多くの研究が進められていた。

(2) 超複素数の一つである四元数は、三次元や四次元の特徴量を効率的に表現することができるため、例えば、三次元空間における回転や並進などの座標変換を容易に取り扱えることより、剛体力学やコンピュータグラフィクスなどで利用されていた。四元数で高次元化されたニューラルネットワークは、フィードフォワード型、ホップフィールド型についてそれぞれ研究がなされ、画像処理や音声処理、パターン認識や時系列信号処理などの問題に適用されて実数値ニューラルネットワークに比べて優れた学習能力と情報処理を実現することも報告されていた。

(3) 多入力多出力で非線形なダイナミクスを有するシステムの制御には、従来各種の制御理論に基づく手法が提案、実用化されており、ニューラルネットワークを含めた計算知能によるデータ駆動型の適応・学習制御も研究と応用がなされていたが、高次元ニューラルネットワークをこのようなシステムの制御問題に用いることの有効性や利点について、十分に明らかにされているとは言い難かった。

2. 研究の目的

研究代表者は、知能制御システム研究の一環として、高次元ニューラルネットワークをシステムの制御問題へ適用するための制御系設計法を提案してきている。高次元ニューラルネットワークの一つの複素数ニューラルネットワークは、その特性と応用に関する研究が盛んに行われて成果が多数報告されており、四元数を含む超複素数による高次元ニューラルネットワークもニューロンモデルやネットワークの構成法、学習法を中心に研究が行われてその工学的応用も幾つか報告されていたが、ダイナミクスを有するシステムの制御へ適用する研究例は、研究代表者の知る限り僅少であった。そこで、研究期間内では、特に、ダイナミクスを扱える四元数ニューラルネットワークの構成法とその学習法、四元数ニューラルネットワークによる制御システム、実世界における制御問題への応用、を中心に研究を遂行することで、四元数ニューラルネットワークの特徴と能力を明らかにしてシステム制御問題への応用可能性を示すことを研究の目的とした。

3. 研究の方法

(1) 実数値ニューラルネットワークをベースとして、フィードフォワード型およびリカレント型のネットワーク構造を四元数により高次元化し、ネットワークの学習については、実数値ニューラルネットワークにおける教師あり学習の誤差逆伝搬法を四元数代数系によって拡張する。導出した学習アルゴリズムを用いた四元数ニューラルネットワークの特徴について、非線形プラントを対象とした計算機シミュレーションにより明らかにする。

(2) 四元数ニューラルネットワークにより適応・学習を行うサーボ制御システムについて、制御対象となるシステムの入出力特性を表す関数表現に基づいて設計する手法とその安定性解析の手法を検討する。更に、非線形システムを制御対象とした計算機シミュレーションによって設計した制御システムの実現性を評価する。

(3) 実世界における制御アプリケーションとして、非線形な動特性を有し多入力多出力な多次元構造の特徴を有するロボットマニピュレータの姿勢や運動を制御する問題を取り上げ、タスク達成のための操作入力を四元数ニューラルネットワークで合成する制御システムを設計する。ロボットマニピュレータを用いた計算機実験により、制御系の実現性と制御性能を明らかにする。

4. 研究成果

(1) 四元数は、1 とハミルトンルールを満たす 3 つの虚数単位 i, j, k から構成される超複素数の一つであり、四元数の全体は非可換な体をなすが、四元数体は、 $\{1, i, j, k\}$ を基底とする実数 4 次元の線形空間として取り扱うこともできる。そこで、四元数により高次元化したニューラルネットワークの特徴を調べるため、四元数と同様に 4 次元の線形空間を取り扱うことのできる多元数によりニューラルネットワークを高次元化し、性能比較を行った。多元数として、余四元数(分

解型四元数), 双曲四元数, 双複素数(テッサリン), 二重複素数を取り上げ, それぞれの多元数による階層型ニューラルネットワークを構成した. ネットワークの学習アルゴリズムは, ニューロンの活性化関数に分離型関数, 学習における評価関数の勾配計算に擬似微分を使用することで各多元数に対して拡張した誤差逆伝搬法を導出した. ロボットマニピュレータの運動制御問題に四元数ニューラルネットワークおよび多元数ニューラルネットワークを適用し, 計算機シミュレーションによってネットワークの学習性能と制御性能について評価を行った結果, 四元数ニューラルネットワークが他の多元数ニューラルネットワークと比較して学習速度で性能が優れていること, 汎化による制御性能が優れていることをそれぞれ評価誤差関数の統計的検定により明らかにした. 得られた成果をまとめた査読付雑誌論文(2021年)は, これまでにコンピュータサイエンス, 数学, 機械工学(ロボティクス)等の分野で発表された国外の論文において, 四元数や超複素数の情報処理への応用として引用・評価がなされている.

(2) 四元数は非可換体であるが, 虚数単位の演算ルールを変更した可換な四元数を構成することができる. そこで, 可換・非可換の性質が四元数ニューラルネットワークに与える影響を調べるため, 可換四元数によりニューラルネットワークを高次元化し, 性能比較を行った. 可換四元数として楕円型, 放物型, 双曲型, および楕円双曲型の4種類を取り上げ, それぞれの可換四元数による階層型ニューラルネットワークを構成した. ネットワークの学習アルゴリズムは, ニューロンの活性化関数に分離型関数, 学習における評価関数の勾配計算に擬似微分を使用することで各可換四元数に対して拡張した誤差逆伝搬法を導出した. ロボットマニピュレータの運動制御問題, および非線形離散時間プラントの制御問題に四元数ニューラルネットワークを適用し, 計算機シミュレーションによって性能評価を行った結果, 学習性能や制御性能において大きな差異を生じさせないことをそれぞれ評価誤差関数の統計的検定により明らかにした.

(3) タップ遅延入力方式を用いる階層型ニューラルネットワークによりダイナミクスを有する問題を処理可能であるが, ネットワーク内部にフィードバック結合を有するリカレントネットワークを用いることで効果的な取り扱いが可能となる. そこで, 四元数によりリカレントネットワークを高次元化し, 性能評価を行った. エルマン型, およびジョルダン型の四元数リカレントニューラルネットワークを構成した. ネットワークの学習アルゴリズムは, ニューロンにおける活性化関数として分離型関数を使用し, 学習における評価関数の勾配計算に擬似微分を採用することで四元数に対して拡張した通時的誤差逆伝搬法, および実時間リカレント学習を導出した. ロボットマニピュレータの運動制御問題, および非線形離散時間プラントの同定問題に四元数リカレントニューラルネットワークを適用し, 計算機シミュレーションによって性能評価を行った結果, ダイナミクスを有するシステムの学習や制御に有用であることを明らかにした. 得られた成果を学会発表した査読付国際会議プロシーディングス(2020年)は, これまでにコンピュータサイエンスの分野で発表された国外の論文において, 四元数ニューラルネットワークの応用として引用・評価がなされている.

(4) 四元数ニューラルネットワークがダイナミクスを有する問題に適用される場合のシステムの安定性については, 適応フィルター型のシステム構成に関する研究報告がいくつかなされていたが, 制御コントローラとするシステム構成については検討がなされていなかった. そこで, 四元数に拡張したフィードバック誤差学習を用いる階層型四元数ニューラルネットワークによる制御システムを対象として安定解析を行った. ネットワークの学習アルゴリズムは, ニューロンの活性化関数に四元数関数, 学習における評価関数の勾配計算に一般化ハミルトン実数微分を適用して四元数に対して拡張した誤差逆伝搬法を導出した. 線形系を仮定した局所解析により導出されるパラメータ誤差方程式に対してリアプノフ関数に基づく安定判別を適用することにより, 制御系における学習の安定条件を明らかにした. ロボットマニピュレータの運動制御問題に導出した学習アルゴリズムを用いる四元数ニューラルネットワークを適用し, 計算機シミュレーションによって性能評価を行った結果, 一般化ハミルトン実数微分による学習アルゴリズムが有効に機能すること, 擬似微分により導出された学習アルゴリズムに比べて学習性能が優れていることを評価誤差関数の統計的検定により明らかにした. 得られた成果をまとめた査読付雑誌論文(2022年)は, これまでに数理工学の分野で発表された国外の論文において, 四元数の情報処理への応用として引用・評価がなされている.

(5) 四元数によるニューラルネットワークの高次元化に関する研究過程において派生した成果として, 四元数を拡張した超複素数である八元数により階層型ニューラルネットワークを高次元化する手法を示した. ネットワークの学習アルゴリズムは, ニューロンにおける活性化関数として分離型関数を使用し, 学習における評価関数の勾配計算に擬似微分を採用することで八元数に対して拡張した誤差逆伝搬法を導出した. ロボットマニピュレータの運動制御問題に八元数ニューラルネットワークを適用し, 計算機シミュレーションによって性能評価を行った結果, ダイナミクスを有するシステムの学習や制御に八元数ニューラルネットワークが有用であることを明らかにした. 得られた成果を学会発表した査読付国際会議プロシーディングス(2021年)は, これまでにコンピュータサイエンスや数学の分野で発表された国外の論文において, 超複素数の応用として引用・評価がなされている.

(6) 四元数ニューラルネットワークによりダイナミクスを有するシステムの制御を行う問題として, ロボットマニピュレータの制御を取り上げて評価実験を実施する過程において派生した成果として, 四元数ニューラルネットワークおよび深層強化学習によるロボットマニピュレー

タの運動学問題解法を示した。計算機シミュレーションによって、適切な逆運動学問題の解を得るために必要な訓練データの構成方法とその学習手順について明らかにした。得られた成果を学会発表した査読付国際会議プロシーディングス（2021年）は、これまでにコンピュータサイエンスの分野で発表された国外の論文において、深層強化学習の応用として引用・評価がなされている。

(7) 四元数によりリカレントニューラルネットワークを高次元化してダイナミクスを有するシステムの制御に適用し、性能評価を実施する過程において派生した成果として、四元数リカレントニューラルネットワークによる制御性能を評価する際に比較対象とするリカレントネットワークであるエコーステートネットワークを用いて制御系を構成する手法を示した。計算機シミュレーションによって性能評価を行った結果、ダイナミクスを有するシステムの学習や制御にエコーステートネットワークも有用であることを明らかにした。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Kazuhiko Takahashi, Eri Tano, Masafumi Hashimoto	4. 巻 10
2. 論文標題 Feedforward-Feedback Controller Based on a Trained Quaternion Neural Network Using a Generalised HR Calculus with Application to Trajectory Control of a Three-Link Robot Manipulator	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Machines	6. 最初と最後の頁 333-1 ~ 333-14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/machines10050333	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 Takahashi Kazuhiko	4. 巻 26
2. 論文標題 Comparison of high-dimensional neural networks using hypercomplex numbers in a robot manipulator control	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Artificial Life and Robotics	6. 最初と最後の頁 367 ~ 377
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10015-021-00687-x	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 12件）

1. 発表者名 K. Takahashi, D. Kawamoto, T. Naba, H. Okamoto, T. Onodera, M. Hashimoto
2. 発表標題 Remarks on a Commutative Quaternion Neural Network-based Controller and Its Application in Controlling a Robot Manipulator
3. 学会等名 The 2022 Australian & New Zealand Control Conference (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 K. Takahashi, S. T. Hwang, K. Hayashi, M. Yoshida, M. Hashimoto
2. 発表標題 Remarks on Direct Controller using a Commutative Quaternion Neural Network
3. 学会等名 The 6th IEEE International Conference on Robotic Computing (国際学会)
4. 発表年 2022年

1 . 発表者名 K. Takahashi, N. Kita, M. Hashimoto
2 . 発表標題 Remarks on a Feedforward Feedback Controller Using an Echo State Network for Controlling Dynamic Systems
3 . 学会等名 The 2022 (12th) International Conference on Advanced Mechatronic Systems (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 K. Takahashi, N. Kita, M. Sasaki, M. Hashimoto
2 . 発表標題 Remarks on a Direct Controller based on an Echo State Network with Application to Dynamic Systems Control
3 . 学会等名 The 11th IIAE International Conference on Industrial Application Engineering 2023 (国際学会)
4 . 発表年 2023年

1 . 発表者名 K. Takahashi, S. Shibata, M Hashimoto
2 . 発表標題 Remarks on System Identification Using a Quaternion Recurrent Neural Network Trained by Backpropagation through Time
3 . 学会等名 The 2021 Australian & New Zealand Control Conference (国際学会)
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 K. Takahashi, E. Tano, M Hashimoto
2 . 発表標題 Remarks on Quaternion Multi-Layer Neural Network Based on the Generalised HR Calculus
3 . 学会等名 The 2021 Australian & New Zealand Control Conference (国際学会)
4 . 発表年 2021年

1. 発表者名 K. Takahashi, E. Tano, M Hashimoto
2. 発表標題 Remarks on Feedforward-Feedback Controller Using a Trained Quaternion Neural Network Based on Generalised HR Calculus and Its Application to Controlling a Robot Manipulator
3. 学会等名 The 2021 (11th) International Conference on Advanced Mechatronic Systems (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 K. Takahashi, M. Tsuji, M. Hashimoto
2. 発表標題 Remarks on Learning Inverse Kinematics of a Robot Manipulator Using a Quaternion Neural Network
3. 学会等名 The 10th IIAE International Conference on Industrial Application Engineering 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 C. Chu, K. Takahashi, M. Hashimoto
2. 発表標題 Comparison of Deep Reinforcement Learning Algorithms in a Robot Manipulator Control Application
3. 学会等名 IEEE International Symposium on Computer, Consumer and Control 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 K. Takahashi, L. Watanabe, H. Yamasaki, S. Hiraoka, M. Hashimoto
2. 発表標題 Remarks on Control of a Robot Manipulator Using a Quaternion Recurrent Neural-Network-Based Compensator
3. 学会等名 The 2020 Australian & New Zealand Control Conference (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 K. Takahashi
2. 発表標題 Comparison of High-Dimensional Neural Networks Using Hypercomplex Numbers in a Robot Manipulator Control
3. 学会等名 26th International Symposium on Artificial Life and Robotics (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 K. Takahashi, M. Fujita, M. Hashimoto
2. 発表標題 Remarks on Octonion-valued Neural Networks with Application to Robot Manipulator Control
3. 学会等名 International Conference on Mechatronics (国際学会)
4. 発表年 2021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
---------	---------