

令和元年6月10日現在

機関番号：24506

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K00337

研究課題名(和文) 量子情報理論と量子バイオロジーに立脚した計算知能論の確立と知的センシング処理応用

研究課題名(英文) Establishment of computational intelligence based on quantum information theory and quantum biology and intelligent sensing processing applications

研究代表者

松井 伸之 (Matsui, Nobuyuki)

兵庫県立大学・工学研究科・特任教授

研究者番号：10173783

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：本課題では、四元数に基づく量子計算知能記述法や量子力学的手法によるダイナミックマクロシステム記述の探究並びに量子生物知能としての実システム応用の探究を相互に関連させながら研究を進め、その結果、量子ビットニューロンモデルのもつれ効果の示唆や時系列予測における優位点を明示できた。さらにその拡張型モデルや深層化モデルの端緒を得るとともに、連想記憶型やExtreme学習における四元数表示の有効性の吟味も行い得た。また量子力学的手法による群ロボットの搬送システムを開発し、その性能評価を行い得た。実システム応用の探究としては、量子バイオロジーにヒントを得た臭気識別の端緒や疾病予測システムの構築も行い得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

得られた結果はまだ十分でなく、今後の精査とともに理論的根拠も明確にしていくことが課題として残ったが、本課題で達成し得た全体としての研究成果は、計算知能アルゴリズムに新展開をもたらす独創的な成果であると考えている。

また「量子力学的手法によるシステムと制御」と題した関連学会のテクノシリーズの書籍出版並びに招待講演も行い得て、本課題でめざした新手法の普及も達成できたと考えている。これらのことから、専門分野での一定の高い評価が得られたこと、そして社会的にも研究成果を発信できたことは当該分野に顕著な貢献をなし得たと考えている。

研究成果の概要(英文)：This project aimed to establish computational intelligence methods based on quantum information theory and quantum biology, and to construct a system application in which these methodical schemes function as a new dominant engineering method. As a result, we were able to clarify a new indication of the entanglement effect of the qubit neuron and its advantages in time series prediction. Furthermore, we made a progress in launching an extended quantum and deep learning, and evaluated the effect of quaternion equipped as an associative memory type and Extreme learning. We could then show the effectiveness of quaternion description. In addition, we developed a transport system of swarm robot by quantum mechanical methods, and were able to assess its performance quality etc.

As an outcome of practical system applications, we could start the followings: the construction of an odor identification system inspired by quantum biology and the construction of a disease prediction system.

研究分野：数理知能計算科学

キーワード：量子ビットニューロン 四元数表示ニューラルネットワーク 量子ダイナミクス 時系列予測 搬送システム 群ロボット 量子計算知能

1. 研究開始当初の背景

ビッグデータ時代を踏まえてデータマイニングや各種の識別・分類支援を優位に行うる深層学習などの機械学習手法が脚光を浴び始め、ディープマインド社のアルファ碁がトップ棋士に勝利(2016年3月)して以来、それらの人工知能(AI)技術が一般にも急速に広く周知され、第3次AIブームが加速しつつあったのが研究開発当初時期であった。深層学習は、自動運転などの実現において不可欠な技術要素となり、第4次産業革命を牽引する主AI技術となっている。しかしながら、あくなき性能向上のために学習規模・構造の巨大化複雑化の傾向にあり、巨大な計算機環境やクラウドコンピューティング環境がますます必要とされ、その中で量子コンピュータの利用も視野に入れた研究も開始されつつあった。動的状況における大規模な多次元の各種センシングデータをこれまで以上により高速に効率よく統合整理し、かつ潜在的なデータをも読み読み、創造的予測も可能な革新的な計算知能技術にさらに一步を進めることが切望されていた。また真に自律的なAIシステムを構築するためには大規模複雑化する深層学習性能と同等またはそれ以上の性能をエッジコンピューティングレベルで簡単に実現できることも切望されていた。本課題研究実施者は、量子ビットニューロンモデルの提唱(1998年)以来、量子情報概念とニューラルネットワークや遺伝アルゴリズム・粒子群最適化法などの計算知能との融合を量子計算知能として図り、この融合による計算知能モデルの性能向上をエッジコンピューティングレベルで追求してきた。近年になって、中国をはじめとする海外の研究において、この量子ビットニューロンモデルに基づいたニューラルネットワークの性能向上効果が認知され始め、それによる各種の応用研究が数多く報告され始めた。一方、国内に目を移すと、深層学習を中心とした応用の諸外国の後追い研究が大半であった。またAI研究においてはD-wave社を中心とする量子コンピュータ利用研究も活性化し、量子ニューラルネットワークなどの用語も使用されているが、この研究発想は量子計算知能研究とは異なるものであった。

2. 研究の目的

研究開始当初の背景を踏まえて、量子計算知能の優位性を創発している理論的基盤を明確にし、深層学習を凌ぐ量子計算知能手法を確立し、それらの実システム応用効能を顕著に示すことによって、量子計算知能の工学体系の確立と普及を行うことが本研究の目的である。さらに、近年、飛躍的に発展している量子バイオロジー研究も視野に入れて生物における量子現象に誘発された計算知能研究を量子生物知能研究として創出することを次にめざす。計測技術の発展に伴って生物における量子現象が明らかにされ始め、生物はそれらを利用して一見不可能なセンシングを行い、マクロシステムとして情報処理していることが確認されている。そこで、それらにヒントを得た何らかのマクロシステムを構築することによって、計算手法としての量子力学的手法の有効性を示すことを試みることも研究目的にしている。これによって新奇な知能化センシングおよび知能システムをナノサイズ規模で開発することも期待できる。

3. 研究の方法

これらの背景と目的に基づき、本研究で展開すべき主課題は以下の3点である。

(1) 四元数に基づく量子計算知能記述法の探究

研究の一環としてこれまでにやってきた量子ビットニューラルネットワーク及び量子遺伝アルゴリズム研究においては、複素数平面での量子状態記述を提唱し、それに基づいた応用展開を図り、その優位性を示してきた。現在この記述を基盤としたモデルによる各種の応用研究や解説が海外を中心として数多く報告されている。しかし、この複素数表現は一般的な量子状態記述ではなく、自由度を制限した特殊な表現であった。多モードの情報処理のように位相要素が複雑に絡む場合、この複素数平面記述では「量子もつれ」という量子情報特有の優位性が必ずしも表現されていない。そこで、本課題では、その完全記述であるブロッホ球表現に対し、四元数極表示の導入を行う。これが可能であればその優位性を示すことは比較的容易になり、量子計算知能としての理論的基盤を強固にしるので、量子情報表現の観点から、四元数に基づくニューラルネットワークを見直すべく研究を進める。

(2) 量子力学的手法によるダイナミックマクロシステム記述の探究

上記(1)とは異なる量子計算知能化法として、シュレディンガーの波動方程式を直接導入する量子粒子群最適化法もこれまで検討してきたが、これは静的な最適化問題に対しパラメータ数が多次元化するにつれて従来の粒子群最適化法より優位であることを示したに過ぎない。そこで本課題では、量子力学的手法が動的なマクロシステム記述に有効かどうかを調べるために、粒子群をエージェントロボット群と見做し、波動方程式におけるポテンシャルの導入において、ボーム流の量子力学解法を新たに試み、ダイナミックマクロシステムの量子力学的手法による有効性を明かにする。

(3) 量子生物知能としての実システム応用の探究

申請者は、これまで自然、特に量子体系を範とした計算知能研究を幅広く行ってきた。しかし、量子体系を基盤として”生物模倣かつナノスケール”にまで統合されたコンピュー

ティング研究はこれまであまりまとまって遂行してこなかった。そこで、最近年、生き物における量子現象が新たに確認されつつある量子バイオロジーからの知見を加味した量子情報理論からの計算知能、すなわち、量子生物知能を創出し、その観点を基盤とした脳機能やセンシング機能モデルを探り、モデルの優位性を自動認識や臭気識別システムなどの構築によりその可能性を探る。

これら(1)~(3)は個々ばらばらではなく並行して研究を行い、総体として量子計算知能開発研究を進める。

4. 研究成果

上記の研究目的、研究の方法に基づいて研究を推進した結果、上記の研究の方法(1)、(2)、(3)それぞれに関して次に示す研究成果を得た。

(1) 量子ビットニューロンの量子状態の完全記述である四元数極表示の定式化を試みた研究成果は得られている。しかし、その成果をさらに進展させる前に研究代表者が提唱した複素数表示量子ビットニューロンのさらなる効能・利点やその表現機能の量子的役割を吟味し直した。その結果、複素表示モデルによる量子ビットニューラルネットワークは、従来モデルでは予測が困難なカオス時系列予測問題においても優れた予測が行い得ること、複素表示量子ビットニューロンモデル単体でも XOR などの非線形分離問題解法に有効であることを示せた。これは今回初めて見出せた効果であり、量子もつれが起因していることを示唆するものと考えられるが、さらに明確に示すことは今後の課題として残った。また複素数表示量子ビットニューロンにさらに重みを付随させた拡張型量子ビットニューロンを提案し、これを畳み込みニューラルネットワークに融合させた多層ネットワークを構成して、従来の多層ニューラルネットワークとの性能比較を、MNIST データを通じて行った。四元数表示としては、連想記憶型や Extreme 学習における四元数導入効能の吟味を行ない、それらの性能特徴を明らかに示し得て成果なども発表できた。しかし、その量子情報表現としてはそのプロトタイプによる予備的な数値実験結果は得られたものの、成果発表とするためのさらなる吟味が課題として残った。

(2) ダイナミックマクロシステムの量子力学的手法による有効性を明かにするために、粒子群をエージェントロボット群と見做し、波動方程式におけるポテンシャルの導入において、ボーム流の量子力学解法を新たに試み、ミクロマクロを問わず、運動系の制御に量子ダイナミクスを効果的に導入しうる新手法の端緒を得た。それに基づいて群ロボットの搬送システム応用への性能評価などを多面的に行い得た。また、実際に簡易な搬送ロボットの作成も試み、運動制御における量子ダイナミクスの効果の実際上の問題点なども検討し得た。これらに関する研究成果の一部はいくつかの学会にて発表を行い得た。

(3) 最近年の量子バイオロジー関連の文献に注目し、嗅覚に関する量子現象の文献を精査するとともに、それにヒントを得たカーボンナノチューブに基づくセンサー体系構築も試みてきた。現状のセンサーシステムでどの程度の臭気識別が可能かを明らかにすることができ、それらについては成果発表もできた。しかし、量子嗅覚システムとしては、カーボンセンサーによるプレリミナリーな結果を得たものの成果発表には至っておらず、さらなる進展が今後の課題として残った。また疾病予測システムの構築の試みも行ってきたが、量子生物知能手法との融合は今後の課題となった。

今後の課題として残った研究もあるが、本課題で達成し得た全体としての研究成果は、計算知能アルゴリズムに新展開をもたらす独創的な成果であると考えている。

また「量子力学的手法によるシステムと制御」と題して関連学会のテクノシリーズの書籍として出版でき、本課題でめざした新手法の普及も達成できたと考えている。また招待講演としても取り上げられた。これらのことから、専門分野での一定の高い評価が得られたこと、そして社会的にも研究成果を発信できたことは当該分野に顕著な貢献をなし得たと考えている。本研究テーマは多面的なアプローチを含むものであり、そのために着手できなかった将来的な課題も残るが、研究成果を国内外に多数発表し得て、当初の研究目的は達成できたものと考えている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 11 件)

T.Ueguchi, N.Matsui, and T.Isokawa, "Chaotic Time Series Prediction by Qubit Neural Network with Complex-Valued Representation," Proceedings of the SICE Annual Conference 2016, 1353-1358, doi:10.1109/SICE.2016.7749232 (査読有)

T.Ueguchi, N.Matsui, and T.Isokawa, "Performance of Qubit Neural Network in Chaotic Time Series Forecasting," Lecture Notes in Computer Sciences, vol.9949, 253-260, 2016, doi:10.1007/978-3-319-46675-0_28 (査読有)

Y. Sakai, T. Minemoto, T.Isokawa, and N.Matsui, "A learning vector quantization approach for odor recognition," Proceedings of the 22nd International Symposium on Artificial Life and Robotics 2017 (AROB 22nd 2017), 396-400, 2017. (査読有)

T.Minemoto, T.Isokawa, H.Nishimura, and N.Matsui, "Feed forward neural network with random quaternionic neurons," Signal Processing, vol.136, 59-68, 2017.doi:org/10.1016/j.sigpro.2016.11.008 (査読有)

T.Minemoto, T.Isokawa, H.Nishimura, and N.Matsui, "Pseudo-Orthogonalization of Memory Patterns for Complex-Valued and Quaternionic Associative Memories," Journal of Artificial Intelligence and Soft Computing Research, vol.7, no.4, 257-264, 2017 doi:10.1515/jaiscr-2018-0018 (査読有)

M.Tsuji, T.Isokawa, T.Yumoto, N.Matsui, and N.Kamiura, "A Neural Language Model by Heterogeneous Recurrent Neural Networks," Proceedings of the 23rd International Symposium on Artificial Life and Robotics 2017 (AROB 23rd 2018) & the 3rd International Symposium on BioComplexity (ISBC 3rd 2018), 250-253, 201 (査読有)

T.Isokawa, H.Yamamoto, H.Nishimura, T.Yumoto, N.Kamiura, and N.Matsui, "Complex-Valued Associative Memories with Projection and Iterative Learning Rules," Journal of Artificial Intelligence and Soft Computing Research, vol.8, no.3, 237-249, 2018, doi 10.1515/jaiscr-2018-0015 (査読有)

T.Isokawa, F.Peper, K.Ono, and N.Matsui, "A universal Brownian cellular automaton with 3 states and 2 rules," Natural Computing, vol.17, no. 3, 499-509, 2018. doi:10.1007/s11047-017-9651-0 (査読有)

M.Tsuji, T.Isokawa, N.Yumoto, N.Matsui, and N.Kamiura, "Heterogeneous recurrent neural networks for natural language model," Artificial Life and Robotics, available online, <https://doi.org/10.1007/s10015-018-0507-1>, 2018. (査読有)

M.Tanaka, T.Isokawa, N.Matsui, T.Yumoto, and N.Kamiura, "A Convolutional Autoencoder for Detecting Tumors in Double Contrast X-ray Images," Proceedings of Joint 7th International Conference on Informatics, Electronics & Vision (ICIEV) and 2nd International Conference on Imaging, Vision, & Pattern Recognition (icIVPR), 384-387, 2018 (査読有)

Itami, T.; Matsui, N.; Kouda, N. , Macroscopic robots as microscopic liquid molecules -- Brownian motion and quantum dynamics , Proceedings of the SICE Annual Conference (SICE2018), 1776-1781, 2018. DOI: 10.23919/SICE.2018.849258 (査読有)

〔学会発表〕(計 21 件)

松井伸之, 量子描像ニューラルネットワーク第 13 回原子・分子・光科学 (AMO) 討論会理化学研究所大河内記念ホール(和光市広沢)6/3-4 (招待講演)

大平義輝, 幸田憲明, 松井伸之, 西村治彦, "改良型量子ビットニューロンモデルの提案," 平成 28 年電気学会 電子・情報・システム部門大会 Aug.31-Sep.3, 2016. 神戸大学(神戸市灘区六甲台)

笹川真人, 幸田憲明, 松井伸之, 西村治彦, "量子ビットニューラルネットワークの学習評価," 平成 28 年電気学会 電子・情報・システム部門大会, Aug.31-Sep.3, 2016. 神戸大学(神戸市灘区六甲台)

幸田憲明, 松井伸之, "重み付き量子ビットニューロンモデルによるネットワークの学習評価," 計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会, Dec. 6-8, 2016. ウカルちゃんアリーナ(滋賀県立体育館)(大津市におの浜)

酒井祐輔, 峯本俊文, 磯川梯次郎, 松井伸之, "ニューラルネットワークを用いた臭い識別システム," 計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会, Dec. 6-8, 2016. ウカルちゃんアリーナ(滋賀県立体育館)(大津市におの浜)

上口大晴, 松井伸之, 磯川梯次郎, "カオス時系列予測問題における量子ビットニューラルネットワークの性能評価," 計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会, Dec. 6-8, 2016. ウカルちゃんアリーナ(滋賀県立体育館)(大津市におの浜)

藤井航基, 峯本俊文, 磯川梯次郎, 松井伸之, "QELM ニューラルネットワークの性能評価," 電子情報通信学会 第 63 回機能集積情報システム研究会, FIIS-17-447, Jun. 16, 2017

幸田憲明, 松井伸之, 拡張した量子ビットニューロンモデルによるネットワーク, 計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会, 2017

伊丹哲郎, 松井伸之, 「量子ダイナミクス」に従うロボット群による巨視的物体の搬送システム, 計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会, 2017

松井伸之, 人工知能革命~ニューラルネットワークの復活: Deep Learning, そして量子へ~, 半導体産業人協会(SSIS)フォーラム (招待講演), 2017

伊丹哲郎, 松井伸之, ブラウン運動と量子ダイナミクス, 第 1 回分子ロボティクス年次大会, 2017

伊丹哲郎, 松井伸之, 幸田憲明, 簡素な数台のロボットを使ったトラッキング・システムにおける量子揺らぎ, 計測自動制御学会第 13 回コンピューテーショナル・インテリジェンス研究会 2018/6/16-17

成田健, 磯川梯次郎, 松井伸之, 湯本高行, 上浦尚武, 岡本稔, 高山哲郎, "高速ブロック学習型自己組織化マップに基づく健康診断結果による疾病予測システムの構築," 第 28 回インテリ

ジェント・システム・シンポジウム (FAN2018), ST-18-045, Sep. 26-27, 2018.

伊丹哲郎, 松井伸之, 分子としてのロボットによるブラウン運動 (招待講演)

東北大学電気通信研究所共同プロジェクト研究会「高次元ニューロダイナミクスとそのニューロハードウェア構築への展開」2018/11/9-10

伊丹哲郎, 松井伸之, 幸田憲明, 相互通信機能を持たない少数ロボット群による複数物体の搬送, 第 61 回自動制御連合講演会 7C3 *2018/11/17-18

伊丹哲郎, 松井伸之, 幸田憲明, 複数個の物体をトラックするための相互通信を持たない群ロボット・システム, 計測自動制御学会 システム・情報部門 学術講演会 2018 GS09-02 2018/11/25-27

成田健, 磯川悌次郎, 松井伸之, 湯本高行, 上浦尚武, 岡本稔, 高山哲郎, "機械学習による健康診断結果による疾病予測システムの構築ならびに評価," 計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会, GS04-06, Nov.25-27, 2018

伊丹哲郎, 松井伸之, 幸田憲明, エネルギーのボルツマン分布に基づく複数物体の搬送システム設計, 第 27 回計測自動制御学会 中国支部学術講演会 2018/12/1

岸田直也, 磯川悌次郎, 松井伸之, 湯本高行, 上浦尚武, "半導体アレイセンサとニューラルネットワークを用いた臭い識別システムの構築," 第 14 回コンピューターショナル・インテリジェンス研究会, Dec. 22-23, 2018.

松井伸之, "AI 技術革命: ディープラーニング、そして量子へ" エレクトロニクス実装会 in 東京 (招待講演) 2018

②伊丹哲郎, 松井伸之, 幸田憲明, 一般化されたボルツマン分布 巨視的な少数ロボット群の制御モデルとしての, 第 6 回 制御部門マルチシンポジウム 2019/3/6-9

〔図書〕(計 1 件)

1.伊丹哲郎, 松井伸之, 乾徳夫, 全卓樹, コロナ社, 2017, 総ページ数 242, 量子力学的手法によるシステムと制御

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

出願年:

国内外の別:

取得状況 (計 0 件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

取得年:

国内外の別:

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.eng.u-hyogo.ac.jp/eecs/eecs12/>

6 . 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名: 磯川 悌次郎

ローマ字氏名: ISOKAWA TEIJIRO

所属研究機関名: 兵庫県立大学

部局名: 大学院工学研究科

職名: 准教授

研究者番号 (8 桁): 70336832

(2)研究協力者

研究協力者氏名 : 幸田 憲明

ローマ字氏名 : KOUDA NORIAKI

研究協力者氏名 : 伊丹 哲郎

ローマ字氏名 : ITAMI TETURO

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。