

令和 2 年 6 月 2 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2017～2019

課題番号：17K18864

研究課題名（和文）ハードウェア実装を前提とした脳型量子計算アルゴリズムの学習に関する研究

研究課題名（英文）Learning of neuromorphic quantum computation algorithms

研究代表者

佐藤 茂雄（Sato, Shigeo）

東北大学・電気通信研究所・教授

研究者番号：10282013

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,700,000円

研究成果の概要（和文）：量子計算機が持つ量子並列超高速処理と、脳型計算機が持つアルゴリズム自動獲得機能を融合することを目的として、量子ビット間相互作用を学習によって更新しうる学習可能な量子計算機の実現方法について研究を行った。脳型量子計算アルゴリズムをベースに、量子ビット間の状態相関に応じて相互作用を適応的に変化させる学習則を提案し、量子連想記憶に応用しその学習性能を理論解析と数値シミュレーションにより明らかにした。また、ハードウェア実装のために、超伝導電荷量子ビットを用いた構成方法を示し、物理的特性を考慮した数値シミュレーションにより提案手法の有効性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ビッグデータに象徴されるようにICTの発展を背景に、高度情報化がより一層進んでいる現代社会において、莫大な情報を高速に処理しうる量子計算機の必要性が高まっている。量子計算機の開発においてアルゴリズムの整備が喫緊の課題となっており、本研究で提案する学習則は量子計算機にアルゴリズム自動獲得機能を付与するものであり、量子計算機の真の実用化に向けて大きく資するものである。

研究成果の概要（英文）：I studied the realization of a quantum computer which can update the interactions between qubits by learning in order to integrate high-speed parallel processing of quantum computer with automatic algorithm extraction function of brain computer. Based on neuromorphic quantum computation algorithm, I proposed a learning rule by which interactions between qubits can be changed adaptively according to correlations of qubits, and studied the learning ability by theoretical analysis and numerical simulation. Furthermore, I proposed device configuration using superconducting charge qubits for hardware implementation, and showed the effectiveness of the proposed method by numerical simulation in which physical property of qubits is taken into consideration.

研究分野：神経回路

キーワード：量子計算機 脳型計算機 量子ヘップ則 超伝導量子ビット

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

量子計算機のハードウェア実現に関する研究は 1990 年代の終わりからたくさんの研究開発が行われ、2000 年前後に複数の方法によりそれぞれ数ビットの量子ビットが実証され、量子計算機開発の機運が高まりを見せた。しかし、その後は量子コヒーレンスの確保が予想以上に難しく、多数の量子ビットをコヒーレントに動作させることは長い間、難しい課題であった。そんな中、2013 年にカナダの D-Wave 社が製作した量子アニーリングプロセッサは、512 ビットの超伝導量子ビットを搭載することに成功し、この分野におけるひとつのブレイクスルーとなった。このプロセッサはノイマン型計算機が苦手とする組み合わせ最適化問題を効率的に解くことが可能であり、量子計算の実用化に向けて具体的な応用方法が示されたと言える。

一方、ソフトウェアに目を移すと、量子計算機では対象とする問題ごとに専用アルゴリズムを用意することが必要不可欠であり、代表的なアルゴリズムとして、因数分解、量子アニーリング、データベース検索などが提案されている。しかしながら実用的なアルゴリズムはごく少数で、今なお新たなアルゴリズムの開発が重要課題となっている。ところで、ポストノイマン型計算機のもうひとつの候補である脳型計算機は、量子計算機には及ばないものの並列分散処理による高速な演算が可能であり、かつ並列処理に適したアルゴリズムを自動獲得する学習機能を備えている。このような観点から、申請者は、2001 年から神経回路のニューロンの相互作用を、量子ビット間の相互作用と対応させることで、人工神経回路の計算手法を量子計算に取り込むことに成功し、組み合わせ最適化問題への有効性を明らかにしている。

### 2. 研究の目的

本研究では、量子計算機が持つ量子並列超高速処理と、脳型計算機が持つアルゴリズム自動獲得機能を融合することを目的として、量子ビット間相互作用を学習によって更新しうる学習可能な量子計算機の実現方法について研究を行った。脳型量子計算アルゴリズムをベースに、量子ビット間の状態相関に応じて相互作用を適応的に変化させる学習則を提案し、量子連想記憶に応用しその学習性能を理論解析と数値シミュレーションにより明らかにした。また、ハードウェア実装のために、超伝導電荷量子ビットを用いた構成方法を示し、物理的特性を考慮した数値シミュレーションにより提案手法の有効性を示した。

### 3. 研究の方法

申請者が提案している脳型量子計算アルゴリズムでは、ニューロン間相互作用を量子ビット間相互作用に変換することにより、人工神経回路での計算手法（最適化問題への応用など）を、量子計算に応用することが可能となっている。この際、ニューロン間相互作用を表現するシナプス荷重値行列が、量子ビット間の相互作用を決定するハミルトニアン(HF)に変換される。また、量子ビット回路の状態遷移はハミルトニアンの断熱的变化、すなわち、すべての量子状態が基底状態を構成する初期ハミルトニアン(HI)から、解くべき問題に対応するハミルトニアン(HF)への準静的変化によって引き起こされる。脳型学習則の量子ビット回路への導入も同様の手法で行うことができる。

本研究では、まず、神経回路で行われる学習則(シナプス荷重値の更新)を量子ビット回路のハミルトニアン(HF)の更新則に変換した。神経回路の学習則としては、最も一般的で強力なヘップ則(ニューロンの発火相関を使った学習則)を用いた。こうして得られた学習則を用いて、量子ビット回路に適用し、連想記憶に応用し、学習則の有効性と問題点を明らかにした。

また、得られた学習則を具体的に実装するためのハードウェアを設計し、その性能を数値シミュレーションによって評価した。超伝導量子ビットのひとつである磁束量子ビットを用いること想定し、ジョセフソン接合や SQUID、各種フィルタを構成要素とする超伝導量子回路を構成する。引き続き、得られた量子回路での学習動作を数値シミュレーションによって評価し、その有効性と問題点を明らかにした。

### 4. 研究成果

まず、量子計算アルゴリズム自動獲得の実現に向け、脳型量子計算アルゴリズムをベースに、ハミルトニアンを学習によって獲得する手法を提案した。すなわち、学習対象パターンに応じて量子ビット間相互作用強度を徐々に変調することで学習対象パターンの重ね合わせ状態を基底状態に持つようなハミルトニアンを自動獲得する手法を考案した。より具体的には、人工神経回路で用いられる学習則の一種であるヘップ則と反ヘップ則を量子計算用に変換し、ハミルトニアンの更新則として適用した。こうして得られた量子ヘブ・量子反ヘブ学習則を用いて、量子ビットネットワークに適用し、連想記憶に応用し、学習則の有効性と問題点を明らかにした。500 回学習して獲得したハミルトニアンを用いた量子連想記憶の正解パターン想起確率を調べた結果、従来の自己相関(学習無し)から得られたハミルトニアンに比べ、7%程度想起性能が向上することが明らかになった。このことは、学習によるハミルトニアンの最適化が可能であることを意味している。

次に、量子計算アルゴリズムを自動獲得しうる断熱的量子計算用ハードウェアの構成について調査した。量子ビットハードウェアの中で最も研究が進んでいる超伝導量子ビットの中で、特

に超伝導電荷量子ビットネットワークに着目し、実装方法を具体的に検証した。その結果、電荷量子ビットを構成するジョセフソン接合のジョセフソンエネルギーと結合器を構成するジョセフソン接合のジョセフソンエネルギーの比が、ある値より大きい場合は抑制性結合、ある値より小さい場合は興奮性結合をそれぞれ実現できることを明らかにした。また、量子ヘブ・量子反ヘブ学習則に従って結合器のジョセフソンエネルギーを最適化した場合の量子連想記憶性能について数値計算により評価した結果、学習によって連想機能を獲得しうることを見出した。引き続き、超伝導体の物性データ等を加味した数値シミュレーションを行い、これまでに得られている成果の妥当性を再確認した。また、量子連想記憶モデルについて、量子ヘブ・反ヘブ学習時に連想能力が飽和する現象を数値シミュレーションによって検証した。その結果、学習時に常にKL 情報量が減少することとは限らないこと、その原因が量子ダイナミクスに由来することを確認した。

以上の結果から、脳型量子計算アルゴリズムの有効性と課題を明らかにすると共に、将来の実用化に向けて、ハードウェアの構成方法についても指針を示すことに成功した。

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 2件）

1. 著者名 S. Moriya, H. Yamamoto, H. Akima, A. Hirano-Iwata, S. Kubota, S. Sato	4. 巻 29
2. 論文標題 Mean-field analysis of directed modular networks	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Chaos	6. 最初と最後の頁 13142
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/1.5044689	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 Y. Osakabe, H. Akima, M. Sakuraba, M. Kinjo, S. Sato	4. 巻 E100-D
2. 論文標題 Quantum Associative Memory with Quantum Neural Network via Adiabatic Hamiltonian Evolution	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Information and Systems	6. 最初と最後の頁 2683-2689
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/transinf.2017EDP7138	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 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 1件/うち国際学会 6件）

1. 発表者名 Y. Osakabe, H. Akima, M. Kinjo, M. Sakuraba, S. Sato
2. 発表標題 Hebbian and anti-Hebbian Learning of Qubit Networks for Quantum Associative Memory
3. 学会等名 Collaborative Conference on Quantum Machine Learning 2018 (as a part of Energy Materials and Nanotechnology (EMN) Greece Meeting 2018) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 H. Akima, S. Kurihara, S. Moriya, S. Kawakami, J. Madrenas, M. Yano, K. Nakajima, M. Sakuraba, S. Sato
2. 発表標題 Motion Stereo Vision LSI for Spatial Perception
3. 学会等名 2018 Int. Symp. on Nonlinear Theory and Its Applications (NOLTA2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1 . 発表者名 Y. Osakabe, S. Sato, H. Akima, M. Sakuraba, M. Kinjo
2 . 発表標題 Neuro-inspired Quantum Associative Memory Using Adiabatic Hamiltonian Evolution
3 . 学会等名 Int. Joint Conf. on Neural Networks ( 国際学会 )
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 Y. Osakabe, H. Akima, M. Sakuraba, M. Kinjo, S. Sato
2 . 発表標題 Neuro-inspired Quantum Associative Memory Model
3 . 学会等名 The 30th International Symposium on Superconductivity ( 国際学会 )
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 S. Sato, Y. Osakabe, H. Akima, M. Sakuraba
2 . 発表標題 Hebbian and anti-Hebbian learning for a quantum associative memory
3 . 学会等名 The 6th RIEC International Symposium on Brain Functions and Brain Computer ( 国際学会 )
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 Y. Osakabe, H. Akima, M. Sakuraba, M. Kinjo, S. Sato
2 . 発表標題 Neuro-inspired Quantum Learning Rule Inspired by Boltzmann Machine
3 . 学会等名 APS March Meeting 2018 ( 国際学会 )
4 . 発表年 2018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
--	---------------------------	-----------------------	----