

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 30 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26330006

研究課題名(和文)量子計算機を用いたハミルトニアン動力学系の量子操作・量子測定アルゴリズム

研究課題名(英文)Quantum algorithms for implementing quantum operations and measurements on quantum systems evolving under Hamiltonian dynamics

研究代表者

村尾 美緒 (Muraio, Mio)

東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・教授

研究者番号：30322671

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：ハミルトニアン動力学の制御化の超写像を近似的に実装する量子乱択アルゴリズムを発見し、未知のハミルトニアン動力学系と量子計算機を組み合わせ、未知ハミルトニアンエネルギー基底状態に対する射影測定を実行する量子アルゴリズムの提案と、その精度および実装コストの評価を行った。また、ハミルトニアン動力学系を用いた量子計算として、断熱量子計算モデルにおける量子ゲート列の並列化可能性を示した。さらに、量子力学の範囲内で実装可能な超写像を高階量子演算と定義し、ユニタリ変換の制御化や複素共役化などを実装する量子アルゴリズムを提案し、高階量子演算における因果性・並列性・非局所性の関連を解析した。

研究成果の概要(英文)：We discover quantum random algorithm approximately implementing a supermap for controllization of Hamiltonian dynamics. Using this algorithm, we proposed a quantum algorithm for universally implementing a projective measurement on the energy eigenbasis of an unknown Hamiltonian system and analyze the accuracy and implementation costs. We also show parallelizability of quantum gates in an adiabatic quantum computation model. We define higher order quantum operations as supermaps implementable within quantum mechanics. We proposed quantum algorithms implementing controllization of unknown unitaries and unitary conjugation and analyzed the relationship among causality, parallelizability, and nonlocality in higher order quantum operations.

研究分野：量子情報理論

キーワード：量子計算 量子アルゴリズム 高階量子演算 超写像 オラクル 量子操作 量子制御 並列化

1. 研究開始当初の背景

量子計算機は、Shor の因数分解アルゴリズムを代表とする、量子力学に特有の重ね合わせ原理と量子測定の原理を巧みに用いた量子アルゴリズムの提案によって、従来の計算機を大きく超える計算のポテンシャルを持つことが示され、計算機科学としての量子計算に関する理論研究は飛躍的な研究発展を遂げてきた。量子計算機は、量子力学的に許されるすべての操作と測定を自由に行うことができる装置であるとみなすことができ、量子計算は、量子系を人工的に操作するという新しい視点を物理学にもたらした。

物理学において量子系は、エネルギーに対応するエルミート演算子(ハミルトニアン)によって記述される。量子計算機は、ハミルトニアンを人工的にデザインし操作できる量子系と考えることができる。しかし、実際には多くの量子系において、ハミルトニアン の形やパラメータの値は決まっており、人工的に操作できる余地は少ない。また、測定も粗視化された平均値に限定されることが多かった。これらの制限により、従来の方法では量子計算機との操作性のギャップが非常に大きく、人工的な操作によって得られる量子系の持つ応用可能性のポテンシャルを十分に引き出すことができなかつた。

一方、現代社会で計算機は、計算アルゴリズムを実行する独立した計算機としてのみならず、様々な機器の制御や計測を行なうための組み込みシステムとしても使われている。そこで、比較的小規模な量子計算機を、そのままでは制御性が低い量子系と組み合わせることで、量子系に対する人工的な量子操作や複雑な量子測定を行うための、いわば量子版の組み込みシステムとして活用することを考えた。

2. 研究の目的

量子計算機を、計算アルゴリズムを実行するだけではなく、量子系に対して人工的な量子操作や複雑な量子測定を実装するための組み込みシステムとして活用するための方法論の構築と具体的な量子アルゴリズムの提案を行なう。特に、ハミルトニアンオラクルで記述される未知のハミルトニアン力学系からなる量子系と量子計算機を組み合わせ、量子計算機上でハミルトニアンに依存しない普遍的な量子アルゴリズムを実行することによって、従来の方法では不可能や非効率的であった量子系への量子操作や量子測定を実装する新しい量子アルゴリズムを提案することを目的とする。ハミルトニアン力学系の操作や測定を行なうという物理学的な目的に対して、ハミルトニアンオラクルを用いた量子アルゴリズムを用いて実装するという計算科学的アプローチを用いることによって、計算科学・情報科学と物理学の双方向の学際的発展を目指す。

3. 研究の方法

量子計算機を用いたハミルトニアン力学系への量子操作・量子測定を、ハミルトニアンオラクルを入力として新たな写像を生成する、超写像を実装する量子アルゴリズムとして捉えることによって、量子アルゴリズムの構築を行なう。また、超写像における因果性、並列性、非局所性の性質に注目し、実装可能な量子操作・量子測定のクラスや実装に必要なリソースを解明する。

4. 研究成果

(1) 未知ハミルトニアン力学系へのエネルギー射影測定を近似的に実装する量子アルゴリズムの精度とリソースの解析：ハミルトニアンオラクルで記述される未知の物理系に対して、量子乱択アルゴリズムを用いることによって、ハミルトニアン力学系の制御化に対応する超写像を近似的に実行する量子アルゴリズムを構築した。また、あるクラスのハミルトニアンオラクルで記述される未知の物理系に対して、最大エネルギー固有値と最小エネルギー固有値の差を推定する量子アルゴリズムの提案を行った。これらを組み合わせることで、未知ハミルトニアン力学系へのエネルギー射影測定を近似的に実装する量子アルゴリズムを構築することができる。これらの量子アルゴリズムの詳細な精度評価を行った。

(2) 改良したハミルトニアン力学系の近似的制御化量子アルゴリズム：これまで得られていたハミルトニアンオラクルを作用させるターゲット物理系と同じ次元を持つ補助物理系が必要であったが、補助量子ビット系を用いずに同じ精度での制御化を実行できる新しい量子乱択アルゴリズムを構築した。

(3) 実際の物理系でのエネルギー射影測定アルゴリズムの実装方法の提案：超伝導量子ビット系とダイヤモンド NV 中心系からなるハイブリッド量子系に対して、エネルギー射影測定を実装するため、このハイブリッド量子系の特徴を生かして量子アルゴリズムを簡略化した、実際の物理系に合わせてチューニングをした量子アルゴリズムを提案し、実現可能性の評価を行った。

(4) 操作性の低いハミルトニアン力学系への量子情報の入出力を近似的に実装する量子アルゴリズム：制御性の低いハミルトニアン力学系と量子計算機との相互作用を記述するハミルトニアンがある性質を満たし、この相互作用のオン・オフが外部から調整できるときに、任意の近似精度で量子情報の入出力を実装する量子アルゴリズムを構築した。また、ダイヤモンドノルムを用いて近似精度の評価を行った。

(5) 断熱量子計算モデルにおける量子ゲート列の並列化可能性：ハミルトニアン動力学系を用いた量子計算として、断熱量子計算モデルと測定ベース量子計算の複合系である、断熱ゲートテレポーテーションモデルを拡張することで、断熱量子計算モデルにおける量子ゲート列の並列化可能性を示した。また、断熱ゲートテレポーテーションモデルを用いて、ハミルトニアンオラクルに対して、その逆写像を近似的に実装する量子アルゴリズムを提案した。

(6) 断熱量子計算と Grover 探索アルゴリズムを用いたユニタリオラクルの逆変換を実装する量子アルゴリズム：入力となるユニタリ変換を『保存』した量子状態をリソースとして、断熱量子計算のハミルトニアン動力学をシミュレートし、Grover 探索アルゴリズムと組み合わせで効率化を図るといふ、全く新しいアイデアに基づいた、ユニタリ変換の逆変換および転置変換に対応する超写像を実装する量子アルゴリズムを発見した。また、このアルゴリズムの近似精度の精密な評価を行い、現時点で知られている最良のスケーリングが与えられることを示した。

(7) 未知ユニタリ変換のルートが与えられた場合の正確な制御化量子アルゴリズム：ハミルトニアン動力学のように、ハミルトニアン動作時間を調整することでユニタリ変換の無限乗根が実装可能な場合でなくても、 d 次元の未知ユニタリ変換 U の d 乗根を実装するユニタリオラクルが与えられている場合には、このオラクルの d 回クエリによって、 U の普遍的かつ正確な制御化が可能であることを、量子アルゴリズムを構築することによって示した。

(8) ユニタリ変換の複素共役化に対応する超写像を実装する量子アルゴリズム：ハミルトニアンオラクルより一般的なユニタリオラクルに対して、 d 次元のユニタリオラクルの $d-1$ 回クエリによって、ユニタリの複素共役化に対応した超写像を実装する量子アルゴリズムを構築した。また、量子力学における複素共役化に対応する超写像の実装可能性について定式化を行った。

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 10 件)

Y. Matsuzaki, S. Nakayama, A. Soeda, S. Saito and M. Murao, *Projective measurement of energy on an ensemble of qubits with unknown frequencies*, Phys. Rev. A に掲載予定

(2017), arXiv:1611.03994, 査読有

E. Wakakuwa, A. Soeda and M. Murao, *A Coding Theorem for Bipartite Unitaries in Distributed Quantum Computation*, IEEE Trans. on Information Theory に掲載予定 (2017), arXiv:1505.04352, 査読有

E. Wakakuwa, A. Soeda and M. Murao, *The Cost of Randomness for Converting a Tripartite Quantum State to be Approximately Recoverable*, IEEE Trans. on Information Theory に掲載予定 (2017), 査読有

E. Wakakuwa, A. Soeda and M. Murao, *Markovianizing Cost of Tripartite Quantum States*, IEEE Trans. on Information Theory 63, 1280 - 1298 (2017), 査読有 DOI: 10.1109/TIT.2016.2639523

S. Akibue and M. Murao, *Network coding for distributed quantum computation over cluster and butterfly networks*, IEEE Trans. on Information Theory 62, 6620 - 6637 (2016), 査読有 DOI:10.1109/TIT.2016.2604382

K. Kato, F. Furrer and M. Murao, *Information-theoretical analysis of topological entanglement entropy and multipartite correlations*, Phys. Rev. A 93, 022317 (2016), 査読有 DOI:10.1103/PhysRevA.93.022317

K. Nakago, M. Hajdusek, S. Nakayama and M. Murao, *Parallelizable adiabatic gate teleportation*, Phys. Rev. A 92, 062315 (2015), 査読有 DOI:10.1103/PhysRevA.92.062316

S. Nakayama, A. Soeda and M. Murao, *Quantum algorithm for universal implementation of projective measurement of energy*, Phys. Rev. Lett. 114, 190501 (2015), 査読有 DOI:10.1103/PhysRevLett.114.190501

J. Miyazaki, M. Hajdusek and M. Murao, *Analysis of the trade-off between spatial and temporal resources for measurement-based quantum computation*, Phys. Rev. A 91, 052302 (2015), 査読有 DOI:10.1103/PhysRevA.91.052302

K. Kato, F. Furrer and M. Murao, *Information-theoretical formulation of anyonic entanglement*, Phys. Rev. A.

90.062325 (2014), 査読有,
DOI:10.1103/PhysRevA.90.06232

[学会発表](計 50 件)

Wakakuwa, A. Soeda and M. Murao, *A Four-Round LOCC Protocol Outperforms All Two-Round Protocols in Reducing the Entanglement Cost for A Distributed Quantum Information Processing*, The 16th Asian Quantum Information Science Conference (AQIS2016), Taipei (Taiwan), 2016 年 8 月 30 日

村尾美緒, 未知ハミルトニアンのエネルギ射影測定アルゴリズム, 「量子情報と有限長理論の新展開」研究会, 名古屋大学 (愛知県名古屋市), 2016 年 8 月 3 日 (招待講演)

M. Murao, *Entanglement assisted classical communication simulates "classical communication" without causal order*, The 3rd Seefeld workshop on Quantum Information, Seefeld (Austria), 2016 年 7 月 1 日 (招待講演)

M. Murao, *Entanglement assisted classical communication simulates "classical communication" without causal order*, Hong Kong workshop on quantum information and foundation, Hong Kong (China), 2016 年 5 月 3 日 (招待講演)

M. Murao, *Implementation of projective measurement of energy without knowing Hamiltonian*, UTokyo-ANU Workshop on Quantum Information and Control, 東京大学工学系研究科 (東京都文京区), 2016 年 3 月 9 日 (招待講演)

村尾美緒, 分散型量子情報処理とエンタングルメント理論, ナノ量子情報エレクトロニクス研究機構成果報告シンポジウム, 東京大学伊藤謝恩ホール (東京都文京区), 2016 年 3 月 1 日

K. Kato, F. Furrer, M. Murao, *Information-theoretical analysis of topological entanglement entropy and multipartite correlations*, The 19th Conference on Quantum Information Processing (QIP2016), Alberta (Canada), 2016 年 1 月 12 日

K. Nakago, M. Hajdusek, S. Nakayama and M. Murao, *Parallelized adiabatic gate teleportation*, Quantum

Information Processing and Communication (QIPC2015) Leeds (UK), 2015 年 9 月 18 日

S. Nakayama, A. Soeda and M. Murao, *Quantum algorithm for universal implementation of projective measurement of energy*, Quantum Information Processing and Communication (QIPC2015), Leeds (UK), 2015 年 9 月 17 日

S. Akibue and M. Murao, *Implementability of unitary operators over the cluster network with free classical communication*, The 15th Asian Quantum Information Science Conference (AQIS2015), Seoul (Korea) 2015 年 8 月 25 日

A. Soeda, S. Nakayama and M. Murao, *No error-free implementation of quantum controlled-gates is possible without prior knowledge of the target gate*, The 15th Asian Quantum Information Science Conference (AQIS2015) Seoul (Korea), 2015 年 8 月 25 日

K. Kato, F. Furrer, M. Murao, *Merging Marginal Quantum Markov States and Application to Topological Orders*, Workshop on Quantum Marginals and Numerical Ranges, Guelph (Canada), 2015 年 8 月 19 日

S. Akbue, M. Owari, G. Kato and M. Murao, *Entanglement as a resource for deterministically simulating acausal classical correlations*, CAUSALITY IN A QUANTUM WORLD, Sunshine Coast Queensland (Australia), 2015 年 8 月 19 日

E. Wakakuwa, A. Soeda, M. Murao, *A Coding Theorem for Bipartite Unitaries in Distributed Quantum Computation*, Hong Kong (Hong Kong), 2015 年 6 月 15 日

M. Murao, *Entanglement as a resource for deterministically simulating acausal classical correlations*, Workshop on Quantum Metrology, Interaction and Causal Structure 2014, Beijing (China), 2014 年 12 月 3 日 (招待講演)

S. Nakayama, K. Nakago, M. Hajdusek and M. Murao, *Parallelized adiabatic gate teleportation*, The 14th Asian Quantum Information Science

Conference (AQIS 2014), 京都大学芝蘭
会館 (京都府京都市), 2014 年 8 月 22 日

A. Soeda, S. Nakayama and M. Mura
o, *Circuit model implementation of
controllization supermap on unitary
with and without fractional query*, The
14th Asian Quantum Information
Science Conference (AQIS 2014), 京都
大学芝蘭会館 (京都府京都市), 2014 年 8
月 21 日

J. Miyazaki, M. Hajdusek and M.
Murao, *Translating
measurement-based quantum
computations with gflow into quantum
circuits*, The 14th Asian Quantum
Information Science Conference (AQIS
2014), 京都大学芝蘭会館 (京都府京都
市), 2014 年 8 月 21 日

M. Mura
o, K. Nakago, M. Hajdusek
and S. Nakayama, *Parallelized
adiabatic gate teleportation*, The 11th
workshop on Quantum Physics and
Logic (QPL2014), 京都大学理学研究科
セミナーハウス (京都府京都市), 2014 年
6 月 6 日

S. Akibue, M. Owari, G. Kato and M.
Murao, *Globalness of separable maps
in terms of time and space resources*,
The 11th workshop on Quantum
Physics and Logic (QPL2014), 京都大
学理学研究科セミナーハウス (京都府京
都市), 2014 年 6 月 5 日

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 1 件)

名称：マルチキャスト量子ネットワーク符号
化方法

発明者：加藤豪、尾張正樹、村尾美緒

権利者：日本電信電話株式会社、国立大学法
人東京大学

種類：特許

番号：特願 2014-102986

出願年月日：2014 年 5 月 19 日

国内外の別：国内

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.eve.phys.s.u-tokyo.ac.jp>

6 . 研究組織

(1)研究代表者

村尾 美緒 (MURAO, Mio)

東京大学・大学院理学系研究科・教授

研究者番号：30322671

(2)研究分担者 なし

(3)連携研究者

添田 彬仁 (SOEDA, Akihito)

東京大学・大学院理学系研究科・助教

研究者番号：70707653