

令和 5 年 4 月 10 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H01833

研究課題名（和文）光量子コンピュータを用いた連続量量子アルゴリズムの実証

研究課題名（英文）Demonstration of a continuous-variable quantum algorithm on a photonic quantum computer

研究代表者

武田 俊太郎（Shuntaro, Takeda）

東京大学・大学院工学系研究科（工学部）・准教授

研究者番号：80737304

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,600,000円

研究成果の概要（和文）：近年、光を用いた量子コンピュータにおいて、0・1を扱う量子ビットの手法ではなく、連続的な値を扱う連続量の手法が進展している。現状の連続量の光量子コンピュータはまだ小規模でエラーも多いが、うまく活用すれば実用的な意味のある問題に適用できる可能性がある。そこで本研究では、小規模な連続量光量子コンピュータを用いて、連続関数を最小化する量子アルゴリズムを実装し、その原理実証に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来、量子コンピュータを実用的な問題に適用して社会の役に立たせるためには、非常に大規模かつエラーの低いデバイスが実現できる必要があると考えられており、その実現にはかなりの年月が必要と考えられてきた。本研究では、小規模でエラーが多い光量子コンピュータが意味のある計算に適用できることを示し、光量子コンピュータの近未来応用の可能性を示唆する結果となった。

研究成果の概要（英文）：In recent years, progress has been made in optical quantum computers based on continuous-variable schemes that deal with continuous values, rather than qubit schemes that deal with 0s and 1s. Although the current continuous-variable optical quantum computers are still small-scale and noisy, they can be applied to practical problems if they are utilized properly. Here, we implemented and demonstrated a quantum algorithm for minimizing continuous functions using a small-scale continuous-variable optical quantum computer.

研究分野：量子光学

キーワード：量子光学 量子情報 量子コンピュータ 連続量量子情報処理 量子アルゴリズム

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、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

量子コンピュータは、量子力学の原理を計算に利用した次世代のコンピュータとして注目されている。特定の計算を現代のスーパーコンピュータよりも圧倒的に短時間で解くことが示されており、その応用は機能性材料・医薬品の開発、物流の最適化、人工知能の高性能化など多岐に渡る。現在、世界中で様々な方式で量子コンピュータの開発が進められており、情報単位である量子ビットを数十個搭載した量子コンピュータまで実現されている。

典型的な量子コンピュータは、「0と1の重ね合わせ」である量子ビットの情報を処理して計算を行う。一方、研究代表者はこれまで「任意の連続的な値（実数値）の重ね合わせ」の情報を扱う連続量の光量子コンピュータに着目し、その開発を進めてきた。具体的には、光量子コンピュータの演算を飛躍的に高効率化する技術の開発や、その技術を応用して光量子コンピュータを大規模化する「ループ型光量子コンピュータ」方式の発明、またそのコア技術として光回路の動作をプログラムを書き換えるだけで変更する技術の開発にも成功した。

一方で、現時点で光量子コンピュータはまだ開発初期段階にあり、規模が小さく計算のエラーも大きい。量子コンピュータの応用分野である材料開発等の計算を実行するには、規模も計算精度も桁以上改善しなくてはならない。このように、現状の技術と応用分野との間のギャップが縮まらず、量子コンピュータが当面は社会の役に立たないという状況が続くと、莫大なコストのかかる量子コンピュータの開発の継続も難しくなる。このギャップを埋めると共に、量子コンピュータの優れた計算能力をいち早く社会へ役立てる方法を見出すため、現状の小規模な量子コンピュータの実社会応用への可能性を探ることは急務である。

量子コンピュータは、小規模でエラーが大きいという制約があったとしても、「重ね合わせ」という通常のコンピュータで表現できない情報を処理できるため、高い潜在能力を持っている。特に、研究代表者が開発中の光量子コンピュータは、単なる量子ビットではなく、連続量という大きな自由度を利用できる上、プログラムによって動作を容易に変更できるという独自の強みがある。これらを「賢く」利用し、量子の機能を最大限まで活かすことで、現代のコンピュータが解くのが難しい問題を解くために活用できる可能性がある。このような知見が得られれば、光量子コンピュータを基礎研究のフェーズから応用研究のフェーズへと進め、近い未来に社会・産業へ役立てる糸口を探ることができる。

2. 研究の目的

本研究の目的は、独自に開発した光量子コンピュータを「賢く」使って問題を解く世界初のデモンストレーションとして、連続値の最適化問題を、量子近似最適化アルゴリズムという手法で解くことである。このアルゴリズムは任意の連続関数 $f(x)$ を最小化する実数値 x を近似的に求めるものであり、金融・機械学習・工学分野など多様な分野へ応用できる。このアルゴリズムの重要な性質は、まだ小規模でエラーも大きく、簡単な計算しかできない量子コンピュータであっても、動作プログラムを変更しながら繰り返し用いることでうまく計算に活かすということである。その動作の流れは以下の通りである（図1）。まず光量子コンピュータである計算を実行する。次に、その計算結果を通常のコンピュータで解析し、その解析結果を元に光量子コンピュータの動作プログラムを変更して別の計算を実行させる。この作業を繰り返し、量子コンピュータと通常のコンピュータを相補的に活用することで、現代のコンピュータが苦手とするような関数 $f(x)$ の最小化でも効率良く解ける可能性があることが理論的に示されている。本研究では、研究代表者が独自開発した光量子コンピュータを用いてこのアルゴリズムを実証し、研究代表者の量子コンピュータの応用可能性を探索する。



図1: 連続量の量子近似最適化アルゴリズムの概要

3. 研究の方法

本研究では、連続量の量子近似最適化アルゴリズムを最も単純な設定の下で実装し、現状の小規模な光量子コンピュータでも実用上重要な最適化問題を解くのに利用できることを明らかにする。このアルゴリズムは、一般に任意の関数 $f(x)$ を最小化する x を求めるものだが、本研究では最も単純な問題設定として2次関数を最小化する問題を光量子コンピュータに解かせる。2次関数の最小化において量子コンピュータで正しい答えが導かれることを確認できれば、この

アルゴリズムの動作の妥当性が検証される。将来的には用いる演算の種類を変更することで、現代のコンピュータでは取り扱いが難しい複雑な関数の最小化も量子コンピュータで実行できるようになる。

今回の量子近似最適化アルゴリズムの動作は次の通りである。まず量子コンピュータ上で初めに様々な実数 x の重ね合わせの情報を準備する。その情報に最適化したい関数 $f(x)$ の情報を含む演算を実行して、最後に x を測定する。測定値に基づいて演算のパラメータを更新し、再度量子コンピュータを動作させる。この繰り返しにより、最終的に x が最適解に収束し、答えが求まる。このアルゴリズムでは初めに様々な x の重ね合わせ状態が必要だが、これはスクイーズド状態の光に相当する（様々な電場振幅 x の重ね合わせ状態）。そこで、スクイーズド光源を開発してこの光を準備した（図 2(a)）。次に、今回の目的である 2 次関数 $f(x)$ の最小化の計算には、光の位相シフト演算とスクイーズ演算を組み合わせた演算（1 モードガウス型演算）が必要となる。この演算を、演算のパラメータ（位相シフト量やスクイーズの具合）をプログラム制御しながら実行できるシステムを構築した（図 2(b)）。最後に x の値を適切な基底で測定するため、基底をプログラマブル制御できるホモダイン測定システムも開発した（図 2(c)）。以上により光学系（光量子コンピュータ）が完成した。さらに、上記で実現した光量子コンピュータのシステムと通常の（古典）コンピュータをつなぎ、量子コンピュータと古典コンピュータの連携動作ができるシステムを構築した（図 2(d)）。以上によって量子近似最適化アルゴリズムを実行できる環境が整った。

以上の準備に加え、実験結果の妥当性を確認するため、数値シミュレーションも行った。実験系の不完全性も考慮しながら、量子アルゴリズムの振る舞いをシミュレートできる環境を整えた。

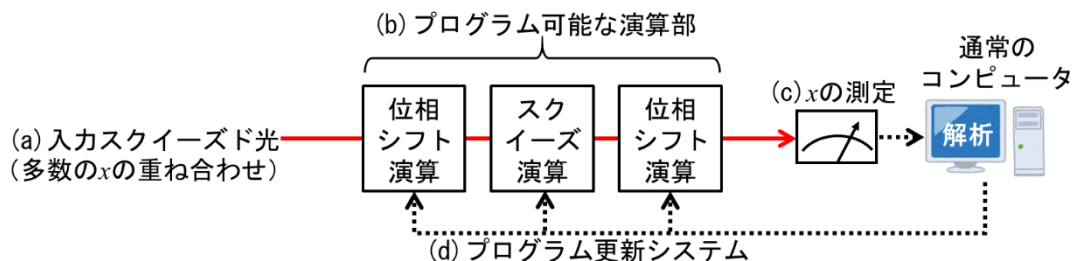


図2: 研究方法

4. 研究成果

本研究では、目的としていた連続量の量子近似最適化アルゴリズムの原理実証に成功した。具体的には、まず光量子コンピュータ単体で動作させて出力を評価し、正常に動作していることを確かめた。続いて、システム全体を用いて量子近似最適化アルゴリズムを動作させ、実際に正しい解（近似解）が求まることを確かめた。その解の収束の様子は、数値シミュレーションによる結果と一致することが確認され、量子コンピュータ上で量子アルゴリズムが期待通り正しく動作していることが確かめられた。今回用いた光量子コンピュータは、用いている入力1モードであり、なおかつ演算部における演算精度もそれほど高くない。しかし、それでも近似解が期待通りに得られているという事実から、本アルゴリズムは小規模でエラーの多い光量子コンピュータでもきちんと動作し、その近未来応用として可能性を持つことが示された。以上の成果を論文にまとめ、現在投稿中である (arXiv:2206.07214)。また国際学会でも本成果を口頭発表した。

今回の成果は、1変数の2次関数を最小化するものであり、最も単純な問題設定での原理実証実験である。しかし、本研究は多変数・多次元の関数へも応用可能であり、今後より複雑な関数への適用が期待される。また、現状では古典コンピュータ側での処理がこの量子アルゴリズム全体の計算速度を律速している。このため、古典コンピュータ側での処理方法をより改善していくことで、今後計算パフォーマンスを向上していくことが重要である。

本成果は、世界で初めて連続量の量子アルゴリズムを実装した例と言える。従来、量子コンピュータは量子ビットベースのハードウェアおよびアルゴリズムが主流であったが、本研究は連続量量子コンピュータの活用の可能性を示したものである。連続量は、1モード（1個の光パルス）で「0と1」の2次元しか扱えない量子ビットに対し、連続的な無限次元の空間を利用することができるため、量子コンピュータの近未来応用と言う観点ではアドバンテージがある可能性もある。今後、本アルゴリズムに限らず、連続量を用いた量子アルゴリズムの考案・実装へ向けた取り組みを進めていく予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計18件（うち招待講演 16件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 榎本雄太郎, 穴井啓太郎, 武田俊太郎
2. 発表標題 1モードガウス型光量子計算回路のパラメータ更新
3. 学会等名 日本物理学会 第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 武田俊太郎
2. 発表標題 ループ型光量子コンピュータ
3. 学会等名 応用物理学会 第49回薄膜・表面物理セミナー（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 武田俊太郎
2. 発表標題 光量子コンピュータの基礎から最前線まで
3. 学会等名 川崎市主催 ナノテクノロジーセミナー（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 武田俊太郎
2. 発表標題 光量子コンピュータの現状と展望
3. 学会等名 2021年電子情報通信学会ソサイエティ大会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 武田俊太郎
2. 発表標題 光量子コンピュータの現状と展望
3. 学会等名 2021年度量子情報工学研究会 量子情報工学の最前線（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 武田俊太郎
2. 発表標題 光量子コンピュータの現状と展望
3. 学会等名 第142回サイテックサロン（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 武田俊太郎
2. 発表標題 光量子コンピュータの現状と展望
3. 学会等名 第40回電子材料シンポジウム（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 武田俊太郎
2. 発表標題 光量子コンピュータの現状と展望
3. 学会等名 東京大学ナノ量子情報エレクトロニクス研究機構設立15周年記念シンポジウム（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 武田俊太郎
2. 発表標題 量子コンピュータのハードウェア開発最前線
3. 学会等名 企業研究会 第16期ソフトウェア開発マネジメント交流会議（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 武田俊太郎
2. 発表標題 光量子コンピュータの基礎と研究開発動向
3. 学会等名 2021年度 第4回 光材料・応用技術研究会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 榎本雄太郎，宇田川健太，武田俊太郎
2. 発表標題 リング型光パラメトリック発振器による通信波長スクイーズド光およびEPRビームの生成
3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 武田俊太郎
2. 発表標題 光量子コンピュータ開発の現状と展望
3. 学会等名 非ノイマン型情報処理へ向けたデバイス技術分科会（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 武田俊太郎
2. 発表標題 光量子コンピュータ開発の現状と展望
3. 学会等名 量子エレクトロニクス研究会（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 武田俊太郎
2. 発表標題 光量子コンピュータの現状と展望
3. 学会等名 先端ナノデバイス・材料テクノロジー第151委員会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 武田俊太郎
2. 発表標題 光量子コンピュータの基礎と将来動向
3. 学会等名 光部品生産技術部会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 武田俊太郎
2. 発表標題 光量子コンピューティングの現状と展望
3. 学会等名 光 x Computing ワークショップ（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 武田俊太郎
2. 発表標題 光量子コンピューティングの現状と展望
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季講演会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 武田俊太郎
2. 発表標題 光量子コンピュータの研究開発最前線
3. 学会等名 第158回微小光学研究会（招待講演）
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