

Title	Quantum-classical hybrid algorithms for noisy quantum computers
Author(s)	御手洗, 光祐
Citation	大阪大学, 2020, 博士論文
Version Type	
URL	<a href="https://hdl.handle.net/11094/76583">https://hdl.handle.net/11094/76583</a>
rights	
Note	やむを得ない事由があると学位審査研究科が承認したため、全文に代えてその内容の要約を公開しています。全文のご利用をご希望の場合は、 <a href="https://www.library.osaka-u.ac.jp/thesis/#closed">〈a href="https://www.library.osaka-u.ac.jp/thesis/#closed"〉</a> 大阪大学の博士論文について <a>〉</a> をご参照ください。

***Osaka University Knowledge Archive : OUKA***

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

## 論文内容の要旨

氏 名 ( 御手洗 光 祐 )	
論文題名	Quantum-classical hybrid algorithms for noisy quantum computers (雑音のある量子コンピュータに向けた量子-古典ハイブリッドアルゴリズム)
論文内容の要旨	
<p>量子コンピュータは、素因数分解などいくつかの問題を古典コンピュータよりも高速に解けることが期待されている。これら高速性が担保されたアルゴリズムの実行には、大量の量子ゲートが必須であり、計算途中で発生する誤りを訂正できる量子誤り訂正の実装が必要となる。一方で、現在もしくは今後数年の期間で実現できるデバイスは、誤り訂正機能を持たないものであり、素因数分解のような複雑なアルゴリズムは実行できない。しかしながら十分なゲート精度と量子ビット数を備えていれば、その動作を古典コンピュータでシミュレーションすることは、適当な仮定のもとで一般に難しいとされている。つまりそのようなデバイスは、ある意味で古典コンピュータよりも高い計算能力を持っていると考えられる。この計算能力を応用するために現在広く研究されている方式として、量子コンピュータと古典コンピュータを協働させる量子-古典ハイブリッド方式がある。この方式では、計算のうち量子コンピュータは真に量子性が必要な部分のみに利用され、それ以外の計算は古典コンピュータによって行われる。様々なアルゴリズムがこの考え方のもと提案されてきたが、未だ実問題への応用が可能かどうかは不明である。このような段階では、(1) さらに多くのアイデアやアルゴリズムを試すこと、また (2) それらのアルゴリズムに必要なハードウェア要件をできる限り削減すること、が重要だと考えられる。本論文は、これら二つの問題に対する学位申請者の取り組みをまとめたものである。</p> <p>本論文では、まず (1) に向けて、量子-古典ハイブリッド方式のもとで動作する機械学習アルゴリズムを提案する。提案手法は、指数的に大きな次元を持つ量子状態のベクトル空間を、機械学習のための特徴量空間として利用する方法である。提案アルゴリズムは、調整可能なパラメータを導入した量子回路を用いて、パラメータの調整によってそのベクトル空間を探索することで動作する。またモデルの訓練のために、観測量の期待値の勾配を求める手法についても提案した。</p> <p>次に (2) の課題解決に寄与するものとして、この勾配を求める手法を一般化すると、様々なアルゴリズムで頻繁に用いられるある種の量子回路を単純化できることを示す。この単純化によって、場合によっては大幅なゲート数削減が可能である。ここで得られたテクニックの応用先は、量子回路のパラメータ最適化の高速化に寄与する量の測定や、量子ダイナミクスの相関関数の測定など多岐にわたる。</p> <p>さらにここまでに得られた手法を応用することで、量子系の固有エネルギーを求めるために提案されていた既存アルゴリズムを拡張し、量子系の解析的なエネルギー微分を求める手法を提案する。エネルギーの微分値は様々な物理量の定義に含まれる量であり応用上重要だが、既存のアルゴリズムでは愚直に数値微分をしなければならず、実際に使用する際には精度の不安が残るものだった。本研究は解析的なエネルギーの微分値を求める手法を提供することで、精度への不安を払拭する。これは (1) の課題へと寄与するものである。</p> <p>最後に、ゲート数削減の手法に対し更なる一般化を施し、大きな量子回路を小さな量子回路へと分割する新たな手法を提案する。先行研究として、回路上で「切断」したい量子ビットに対して射影測定を行うことで小さな量子回路へと分割する手法が提案されていたが、本研究は先行研究とは異なり、2量子ビットゲートを「切断」する方法を与えるものとなっている。もちろん、量子回路を小さな部分、すなわち簡単な計算へと分割しているため、元の回路の出力を得るにはオーバーヘッドが避けられない。そのコストのスケールングについても考察し、先行研究と比較して、本研究で得た手法のほうが少ないオーバーヘッドで分割できる場合が多くあることも示した。</p> <p>本論文にまとめた研究成果は、雑音のある量子コンピュータを実問題応用へと近づけるものである。</p>	

## 論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 ( 御手洗 光祐 )			
	(職)	氏 名	
論文審査担当者	主 査	教 授	北川 勝浩
	副 査	教 授	藤井 啓祐
	副 査	教 授	山本 俊
	副 査	講 師	森前 智行 (京都大学基礎物理学研究所)

## 論文審査の結果の要旨

量子コンピュータは、Shorの量子アルゴリズムによる素因数分解など、古典コンピュータよりも指数的に高速に解ける問題が存在することから、古典コンピュータよりも高い能力を有していると期待されている。そのため、量子コンピュータの開発が盛んに行われており、2020年の時点で超伝導を用いた50量子ビット程度のものが複数作製され稼働している。しかし、量子コンピュータの量子ビットの状態は脆弱でデコヒーレンスなどの量子誤りを起こしやすく、量子ゲートの誤差や量子測定の誤りも不可避である。量子誤り訂正に基づく誤り耐性量子コンピュータを実現するには、冗長な量子ビットを大量に用意し、かつ、誤差を誤り耐性閾値以下に抑える必要があり、まだ数十年かかると予想されている。それまでの間も量子ビットの数は増え続け、量子ゲートの誤差は減り続けるであろうが、誤りから解放されることはない。そのような雑音のある中規模の量子コンピュータは、Noisy Intermediate-Scale Quantum (NISQ)デバイスと呼ばれ、現在盛んにその応用が研究されている。Shorのアルゴリズムを始め多くの量子アルゴリズムの心臓部に使われている量子フーリエ変換は、量子ビット数 $n$ に対して $O(n^2)$ 個の量子ゲートを持つ深さ $n$ の量子回路であり、NISQデバイスでは深過ぎて動作しないと考えられている。そのため、雑音のある量子コンピュータのアルゴリズムは、理想的な量子コンピュータのための量子アルゴリズムとは本質的に異なるものにならざるを得ず、まさに研究が開始されたばかりの新しい分野である。

本論文は、雑音のある量子コンピュータのためのアルゴリズムについて、既存のものを概説した後で、機械学習のための新しい量子-古典ハイブリッドアルゴリズムとして量子回路学習を提案し、勾配を用いた学習法を与えている。次に、この勾配を求める手法を一般化して間接測定を直接測定に置き換え、量子回路を簡略化する方法を与えている。これらの手法を用いて、既存の固有エネルギーを変分的に求めるアルゴリズム(VQE)を拡張し、様々な物性値の計算に必要なエネルギーの微分値を求めることを可能としている。

NISQデバイスでは、高速性を犠牲にしても量子回路を分割して簡略化せざるを得ない場合がある。量子並列性の一部を古典的な並列または繰り返して代替するので、オーバーヘッドが避けられない。本論文では、新たに2量子ビットゲートを分割する手法を提案し、既存の分割法よりもオーバーヘッドが少なくなる場合が多いことを示した。

以上のように、本論文は、雑音のある量子コンピュータのための新たな量子-古典ハイブリッドアルゴリズムとして量子回路学習、VQE法を拡張して物性値を求める方法を提案するとともに、量子回路を簡略化する新たな手法を与えており、NISQ量子コンピュータの実問題への応用に向けて大きく貢献するものである。よって博士(工学)の学位論文として価値のあるものと認める。