



Title	Benchmarking Noisy Quantum Computation through Quasiprobability Methods
Author(s)	八角, 繁男
Citation	大阪大学, 2022, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/88095
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

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

The University of Osaka

論文内容の要旨

氏 名 (八 角 繁 男)

論文題名

Benchmarking Noisy Quantum Computation through Quasiprobability Methods
(ノイズのある量子計算の擬確率分布による性能評価)

論文内容の要旨

現在、世界中で量子コンピュータ開発が進められている。これは、古典コンピュータよりも量子コンピュータの方が高速に解ける問題が素因数分解を含め複数発見されているためである。そのような問題には複雑な量子アルゴリズムの実行が必要であり、そのためには大規模な量子誤り訂正符号が必須となる。一方で、現在の量子コンピュータはそのために十分な量子ビット数を有しておらず、ノイズの影響は避けられない。しかし、そのような量子コンピュータでもランダム量子回路サンプリングなど、特定のタスクでは古典コンピュータよりも高速に解けることが実証されつつある。ただし、この実証ではタスクの実用性は要求されていない。従って現在は、古典コンピュータよりも高速に実用的な問題を解き、量子優位性を実証することが目標である。この目標を達成するためには、

(i) 量子優位性の必要条件として、ノイズの影響を受ける量子回路の古典シミュレーションの困難さの定量化を行うことが重要と考えられる。

他方で、誤り耐性量子コンピュータの実現を目指して、小規模な量子誤り訂正符号を実装することが目指されている。特に、他の符号よりも実装が容易で閾値が高い、表面符号による実装が有力視されている。数値計算により、確率的なノイズの下では許容しうるエラー確率のしきい値が約1%であることが分かっている。しかし、実機では過回転ノイズなどの確率的なノイズでは記述できないノイズも存在し、そのようなノイズに対しては10量子ビットほどから成る量子誤り訂正符号の性能評価が行われているのみである。完全な量子誤り訂正の実証には、50-100量子ビットほど必要であることを鑑みると、性能評価はまだ不十分である。従って、(ii) 現実的なノイズ下における量子誤り訂正をより効率的にシミュレーションする手法開発が求められている。

本論文では擬確率分布によるモンテカルロ型の古典シミュレーション方法を構築することで、上記の (i) , (ii) の両方の問題に取り組む。具体的には、(i) を解決するため、既存の擬確率分布に基づいた古典シミュレーション方法をノイズのある量子回路に適用できるよう改良し、ノイズのある量子回路の古典シミュレーションコストを定量化する。また、具体的な量子回路のコストを調べることで、他の古典シミュレーション方法とのコストの比較をし、量子優位性を示すよう量子回路をデザインするのに役立つ知見を提供する。

次に、改良した古典シミュレーション方法を実際に一般的なノイズを含む量子誤り訂正回路に応用することで (ii) を解決する。改良した古典シミュレーション方法を用いて過回転ノイズ下の量子誤り訂正符号を性能評価する方法について述べた後、状態ベクトルの確保では現在のスパコンでもシミュレーションできないサイズの表面符号のシミュレーションを行う。さらに、クラスターマシンが使えた場合にシミュレーション可能な表面符号のサイズを推定し、パラメタによっては1000量子ビットを超える表面符号がシミュレーション可能であることを示唆する。

以上の古典シミュレーション方法は全てClifford回路という効率的にシミュレーション可能なクラスを用いているが、量子回路に応じて効率的にシミュレーション可能なクラスは変更すべきである。我々は、自由フェルミオンのダイナミクスという異なるクラスを新たに用いることで、フェルミオン系のためにデザインされた量子回路の古典シミュレーション方法とそのコストの定量化方法を提案する。これにより、フェルミオン系のシミュレーションをする量子回路を、量子優位性の候補という観点でより精緻に選定することが可能となる。さらに、水素鎖の基底エネルギーを求めるための変分量子アルゴリズムの回路の古典シミュレーションコストを推定し、量子優位性の実証には強相関電子系のシミュレーションが適していることを示唆する。

本論文でまとめた量子コンピュータの性能評価法は、量子優位性の実証及び小規模量子誤り訂正符号の実装のどちらの目標にも寄与する内容となっている。

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 (八 角 繁 男)				
	(職)	氏 名		
論文審査担当者	主 査	教 授	藤 井 啓 祐	
	副 査	教 授	北 川 勝 浩	
	副 査	教 授	山 本 俊	
	副 査	准教授	水 上 渉	量子情報・量子生命研究センター

論文審査の結果の要旨

本論文では、量子コンピュータにおける重要な課題である、(i)量子コンピュータの古典コンピュータに対する優位性を定量化する、(ii)量子コンピュータの性能評価を行うために古典コンピュータを用いて高速にシミュレーションを実行する、という2つの課題に対して、擬確率サンプリング法の構築やそのサンプリングコストの評価によって解決する、ということが述べられている。

上記のこの2つの課題は、量子コンピュータは古典コンピュータによるシミュレーションが難しいということと、興味のある対象については古典コンピュータによるシミュレーションをして性能評価をする必要がある、という互い相矛盾する要求である。本論文では、適切な対象を絞り、擬確率分布サンプリングによるアプローチで系を特徴付けるとすることでこれら課題を解決している。擬確率サンプリングとは、古典シミュレーション可能な計算量クラス量子操作や量子状態の線型結合として、一般の量子操作や量子状態を分解し、その係数の符号を考慮してサンプリングを行うことによって、目的の物理量の値を知る方法である。線型結合の係数は負になる場合もあるので、擬確率とよばれる。また、古典シミュレーション可能なクラスへの分解がなされているため、サンプリングした1つのインスタンスに対しては、古典コンピュータで効率よくシミュレーションされる。ただし、その代償として、サンプリングコストが場合によっては指数関数的に増加する。

本論文では、このような擬確率サンプリングによるサンプリングコストを定量的に評価することによって、擬確率サンプリング法を用いて対象となる量子アルゴリズムを古典コンピュータによってシミュレーションすることがいかに難しいかということ定量的に評価している。本論にて新たに得られた知見としては、この方法であれば、ノイズの影響を取り込むことで、ノイズがある場合にはシミュレーションコストが圧縮される、つまりノイズがある環境下での量子アルゴリズムにおける量子性（古典コンピュータを用いたシミュレーションの難しさ）について定量的に評価できた、という点である。また、量子化学計算への応用に特化した量子アルゴリズムの優位性を正確に見積もるために、自由フェルミオンの可解性を利用した分解法と擬確率サンプリング法も新たに構築している。これらの結果は、現在実現されているノイズを含む小・中規模の量子コンピュータにおける量子アルゴリズムがノイズ環境において潜在的にどのような量子優位性を持つか、もしくは優位性を出すためにはどのように利用すべきか、ということを知る定量的な指標を与える。さらに、ここで構築したノイズがあるもとの擬確率サンプリング法を実際実装し、量子誤り訂正という量子コンピュータの実現に資するシミュレーションも行っている。特に、量子誤り訂正に限定をすれば、古典シミュレーション可能な演算が多く、現実的なノイズモデルを考慮しても擬確率法によるシミュレーションコストは、許容できる程度に留まることが明らかとなった。これに基づき、実際に現在シミュレーションができていない81量子ビットにおけるコヒーレントエラー下での量子誤り訂正をシミュレーションしている。さらに、大規模な計算機を用いれば1000量子ビット規模の量子誤り訂正もシミュレーションできることが示唆された。

上記の結果は、量子コンピュータの実現において重要な課題に対して、ノイズ環境下にある擬確率サンプリング法の構築、それを用いたサンプリングコストの定量化、さらにそれを用いたシミュレーション、というアプローチで解決法を提供するものであり、分野への貢献、学術的意義は大きい。以上の理由から博士（工学）の学位論文として価値があるものと認める。