OUKA
The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	Hybrid quantum-classical Markov chain Monte Carlo algorithms for near-term quantum computers
Author(s)	中野, 裕一郎
Citation	大阪大学, 2026, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/105534
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

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

The University of Osaka

様式３

論　文　内　容　の　要　旨

氏　　名　（　中野　裕一郎　）	
論文題名	Hybrid quantum-classical Markov chain Monte Carlo algorithms for near-term quantum computers （近未来の量子計算機に向けたハイブリッド量子古典マルコフ連鎖モンテカルロ法）

論文内容の要旨

量子計算は、因数分解、組合せ最適化、量子化学など社会的に重要な問題に対し、古典計算より指数的または多項式的な高速化をもたらすことが期待されている。しかし、理論的に量子優位性が保証される多くの手法は量子誤り訂正を必要とし、現状実現しているノイズの多い中規模量子デバイス（NISQデバイス）は誤り訂正を実装するには規模が不十分である。こうした中で、過去10年にわたりNISQデバイス向けのアルゴリズムが盛んに研究され、量子回路と古典処理を組み合わせるハイブリッド計算が中心的アプローチとなってきた。代表例である変分量子アルゴリズム（VQA）は、期待値推定に伴う測定コストの高さや、不毛の台地に代表される最適化の困難のため、明確な量子優位性がまだ確立していない。

そこで本論文は、量子回路から得られるサンプルを直接活用するサンプリング型NISQアルゴリズムとして、ハイブリッド量子古典マルコフ連鎖モンテカルロ(MCMC)法に注目する。これは、サンプル生成を量子側で行い、受理・棄却判定を古典側で実行することで、変分最適化や期待値測定を不要とし、量子回路の実行回数の削減を実現する。特に、組合せ最適化や機械学習への応用を持つイジング模型のボルツマン分布サンプリングを対象に、古典MCMCを上回る可能性を検証する。

本論文は、既存研究が抱える課題を解決するための3つの研究で構成される。はじめに、固定深さの量子回路を提案分布に用いるQAOA-MCを提案し、受理率と収束速度の関係に基づく最適化によって準二次的な高速化を実現する。さらに、量子回路出力をニューラルネットワークで近似する枠組みにより、柔軟な回路設計と低温域での多項式高速化を達成する。最後に、公平なサンプリング特性を解析し、充足可能性問題（2-SAT/3-SAT）の解のサンプリングでの有効性を示す。以上の研究を通じ、本論文は、NISQデバイスを活用した実用的なサンプリングアルゴリズムの実現に貢献するものである。

様式７

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏　　名　（　中野　裕一郎　）		
	（職）	氏　　名
論文審査担当者	主 査　教 授　藤井　啓祐 副 査　教 授　山本　俊 副 査　教 授　南川　丈夫 副 査　准教授　御手洗　光祐	

論文審査の結果の要旨

本論文は、ノイズを含む中規模量子デバイス（NISQ）環境において、量子計算の利点を引き出すための新たな計算枠組みとして、ハイブリッド量子古典マルコフ連鎖モンテカルロ（MCMC）手法を体系的に研究したものである。変分量子アルゴリズムとは異なるアプローチとして、量子回路から得られるサンプルを直接活用する点に本研究の独創性がある。

本論文では、量子回路の出力分布をMCMCの提案分布として用いる枠組みに注目し、期待値測定や変分最適化を必要としないことで、量子回路実行回数を大幅に削減できる利点を明確にしている。特に、組合せ最適化や機械学習の基盤となるイジング模型のボルツマン分布サンプリングを対象とし、既存の古典MCMC手法を上回る性能を数値的に示している。

具体的には、第一にQAOAに基づく固定深さ量子回路を提案分布として用いるQAOA-MCを提案し、受理率とスペクトルギャップの関係に基づく系統的なパラメータ最適化により、高速な混合を実現している。第二に、量子回路の出力分布を生成モデルで近似することで、対称性制約や確率評価の困難さを克服する新たなハイブリッドMCMC手法を構築し、低温領域における多項式的高速化を示した。第三に、公平サンプリングの観点から本手法を解析し、制約充足問題への応用可能性を示している。

以上のように、本論文はNISQ制約下において実用的な量子優位性を追求するための理論的・数値的枠組みを提示しており、量子ヒューリスティクスの応用範囲を大きく拡張するものである。統計物理、機械学習、組合せ最適化への波及効果も大きく、以上の理由から、本論文は博士（工学）の学位論文として十分な価値があるものと認める。