



Title	Tensor Network Methods for Quantum Computer Design: Simulation, Compilation, and Dequantization
Author(s)	真鍋, 秀隆
Citation	大阪大学, 2026, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/105535
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 (真 鍋 秀 隆)	
論文題名	Tensor Network Methods for Quantum Computer Design: Simulation, Compilation, and Dequantization (量子コンピュータデザインのためのテンソルネットワーク法: シミュレーション、回路最適化、脱量子化)
論文内容の要旨	
量子コンピュータは、素因数分解や量子多体系の性質解明など、古典コンピュータでは困難なタスクを実行できる可能性から大きな注目を集めている。近年では、数百量子ビット規模の量子デバイスが実際に開発されるなど、ハードウェア開発は着実に進展しているが、実用化には単に量子ビット数を増やすだけでは不十分である。アーキテクチャ、量子回路、量子アルゴリズムといったように、量子コンピュータをいくつかの抽象化されたレイヤー構造に分け、それぞれのレイヤーにおいてソフトウェアレベルの解析・最適化により計算オーバーヘッドを削減することが必要である。 ところが、これらのソフトウェア解析を実行するには、量子多体系のシミュレーション・評価を行う必要がある。一般に、量子多体系の性質やそれらの振る舞いを解析的・数値的に評価するのは難しく、量子コンピュータの設計における大きな障害となっている。 本論文では、テンソルネットワークを用いた量子コンピュータの解析・設計手法を考える。テンソルネットワークは、巨大なテンソルを小さなテンソルのネットワークとして表現する枠組みであり、物性物理学やデータサイエンスなど幅広い分野で応用されている。量子多体系の状態をテンソルネットワークで表現することで高速なシミュレーションが期待できるほか、量子回路全体をテンソルネットワークとみなして解析・数値計算することも可能である。 この観点に基づき、量子誤り訂正、回路コンパイル、量子優位性の解析という、量子コンピュータ設計における三つの課題にテンソルネットワークの手法を適用する。 まず、現実には発生しうるリークエラー下での量子誤り訂正符号の性能を調査するために、テンソルネットワークの一種である行列積状態を用いた効率的なシミュレーション手法を提案する。それにより、数百量子ビット系における複雑な量子誤り訂正のプロセスにおけるリークエラーの影響と、それらを除去するプロトコルの効果を正確に評価できることを実証する。 次に、より少ないゲート数や回路深さを達成するための量子回路コンパイル手法に、ツリーテンソルネットワークを組み込む枠組みを提唱する。特に多変量正規分布の状態準備回路に着目し、スケーラブルかつ高性能なコンパイルが可能であることを理論保証と数値計算を通して示す。 最後に、量子コンピュータが古典コンピュータよりも高速に問題を解くことができる量子優位性の主張の検証のために、テンソルネットワークを用いた脱量子化フレームワークを提唱する。この枠組みを用いることで、計算量理論の厳密さと数値計算による実用性を併せ持つ、量子・古典計算の境界の線引きが可能であることを示す。 これらの研究に一貫して、テンソルネットワークを単なるシミュレーション手法としてではなく、量子計算の解析と設計を統一的に記述する枠組みとして位置付ける。それにより、テンソルネットワークの整備された理論と洗練された数値計算手法を、量子コンピュータのアルゴリズムやアーキテクチャ解析の性能保証や実用性にそのまま反映することができる。本研究を通して、テンソルネットワーク法が、実用的な量子計算機に向けたアーキテクチャ・回路・アルゴリズム設計において必要不可欠であることを明らかにする。	

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 (真鍋 秀隆)			
	(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	藤本 聡
	副 査	特任准教授	杉本 貴則 (量子情報・量子生命研究センター)
論文審査の結果の要旨 本論文は、量子コンピュータの実用化に向けた理論的・数値的課題に対し、テンソルネットワークを中核的手法として用いることで、量子アーキテクチャ、回路設計、量子アルゴリズムの各層にまたがる体系的な解析と設計指針を与えたものである。量子計算が本質的に大規模量子多体系上で定義されるという困難さに着目し、低エンタングルメント構造を活用したテンソルネットワーク表現を用いることで、従来は困難であった大規模量子計算の解析を可能にしている点が特徴である。 具体的には、まずコヒーレントリークを含む現実的ノイズ下における量子誤り訂正符号の性能を、行列積状態を用いた大規模古典シミュレーションにより解析し、リーク除去手法の比較を含む有用な知見を与えている。次に、多変量正規分布状態準備回路に対して、木構造テンソルネットワークに基づくスケーラブルなコンパイル手法を提案し、理論的保証と数値的最適化を組み合わせることで、回路コストを大幅に削減できることを示した。さらに、基底状態エネルギー推定に対するデ量子化アルゴリズムをテンソルネットワークとして定式化し、古典・量子計算の境界を定量的に評価する枠組みを構築している。 以上のように、本論文はテンソルネットワークを単なる数値計算手法にとどめず、量子計算を記述・設計するための言語として位置づけ、理論的意義と実用的価値の両面で重要な成果を挙げている。量子情報科学および量子計算工学の発展、ならびに将来の実用的量子コンピュータ設計という観点からの貢献も大きい。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。			