OUKA
The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	Efficient Preparation and Consumption of Magic States for Fault-Tolerant Quantum Computing
Author(s)	平野, 裕
Citation	大阪大学, 2026, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/105547
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　（平野裕）	
論文題名	Efficient Preparation and Consumption of Magic States for Fault-Tolerant Quantum Computing （誤り耐性量子計算の実現に向けた効率的な魔法状態の生成と消費）

論文内容の要旨

量子計算は、素因数分解、量子化学計算、線形方程式系の求解など、幅広い問題において古典計算よりも高速な計算を実現できると期待されている。しかし、現在の量子デバイスはノイズの影響が大きく、これらの複雑なアルゴリズムを高い精度で実行することはできない。このノイズを克服し、量子優位性を達成するためには、誤り耐性量子計算機（FTQC）の実現が不可欠である。誤り耐性量子計算には膨大なリソースが必要であり、その低減は中心的課題である。

誤り耐性量子計算の実現には、万能量子計算に不可欠な非クリフォードゲートの実装が必要である。このためには、魔法状態蒸留という手続きによって生成される、特殊な量子状態（魔法状態）が必要である。魔法状態蒸留は、FTQCにおける主要なボトルネックとなっており、蒸留オーバーヘッドの削減はFTQC全体のオーバーヘッド削減にとって極めて重要である。

魔法状態蒸留のオーバーヘッドの大きさは、FTQCアーキテクチャ設計にも大きな影響を与えてきた。特に、蒸留が高コストであるという制約を前提とした最適化コンパイル手法が発展してきた。このため、FTQCオーバーヘッドの削減には、蒸留の効率化だけでは不十分であり、この制約の下でのアーキテクチャ設計を見直すことが求められる。すなわち、魔法状態の生成の効率化だけでなく、その消費方法の改善も必要となる。

本論文では、魔法状態の生成と消費の両方に着目することで、誤り耐性量子計算のオーバーヘッド削減を図る。従来の論理レベル蒸留とは異なり、物理ゲートのみで実装可能な物理レベル蒸留は、蒸留オーバーヘッドを大幅に削減できる可能性を有する。しかし、既存の物理レベル蒸留手法では、高精度な魔法状態を直接得ることができないという課題がある。本研究では、物理レベル蒸留技術を活用し、高精度な魔法状態を効率的に生成する二つの蒸留プロトコルを提案する。

さらに、本研究で得られる魔法状態を効率的に消費するFTQCアーキテクチャについて検討する。前述の蒸留手法により多数の魔法状態を同時に生成できるため、本研究では並列量子アルゴリズムの実行を主眼に、魔法状態の消費を効率化する二つの方式を提案する。第一に、確率的な手続きである蒸留の失敗に伴う計算遅延は、並列実行によって増幅されるため、蒸留失敗による性能低下を緩和する手法を提案する。第二に、並列量子アルゴリズムを対象としたFTQCコンパイル手法を提案する。局所的に蒸留を行い、並列に魔法状態を消費することで、高い並列性を活かした計算を実現し、時間オーバーヘッドを削減する。

以上より、本論文は魔法状態の生成と消費を一体として最適化することで、誤り耐性量子計算のオーバーヘッド削減に向けた統合的アプローチを示した。提案した方式は、空間・時間の両面での効率化に寄与し、実用的な誤り耐性量子計算機の実現に向けた基盤となる。

様式７

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏　　名　（　平野　裕　）		
	（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	五十嵐　浩司
	副 査　チームディレクター	鈴木　泰成（理化学研究所量子コンピュータ研究センター）

論文審査の結果の要旨

本論文は、誤り耐性量子計算の実現における最大の課題の一つであるリソースオーバーヘッドの削減に対し、魔法状態の生成および消費の両面から体系的に取り組んだ研究である。特に、非クリフォードゲート実装のボトルネックとなっている魔法状態蒸留に着目し、その高コスト性が量子計算全体の設計に及ぼす影響を踏まえた上で、新たな蒸留プロトコルおよびアーキテクチャ設計を提案している。

具体的には、物理レベル蒸留を第一段階に用いた二段階蒸留プロトコルを提案し、高忠実度の魔法状態を効率的に生成する手法を示した。また、格子手術を用いた物理レベル蒸留プロトコルを導入することで、時空間コストを削減し、中程度の忠実度領域において有効な蒸留手法を確立している。これらは、従来の論理レベル蒸留では達成が困難であった新たな設計空間を切り拓くものである。

さらに、蒸留失敗に起因する計算遅延が並列実行により増幅される点に着目し、魔法状態プールを導入することで性能劣化を抑制するアーキテクチャを提案している。加えて、複数の魔法状態を同時に生成可能である特性を活かし、高並列量子アルゴリズムに最適化されたコンパイル手法を構築し、計算時間オーバーヘッドの低減を実現している。

以上のように、本論文は魔法状態の生成と消費を統合的に最適化することで、誤り耐性量子計算全体の設計指針に新たな視点を与えている。誤り耐性量子計算アーキテクチャの理論的深化と実用化への貢献は極めて大きい。以上の理由から、本論文は博士（理学）の学位論文として十分な価値があるものと認める。