



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	Analog Quantum Computation and Communication with Digitized Continuous Variables [an abstract of dissertation and a summary of dissertation review]
Author(s)	福井, 浩介
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第13299号
Issue Date	2018-09-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/71838
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Kosuke_Fukui_review.pdf, 審査の要旨



学位論文審査の要旨

博士の専攻分野の名称 博士 (工学) 氏名 福井 浩介

審査担当者 主 査 准教授 岡本 淳
副 査 教 授 高橋 庸夫
副 査 教 授 池辺 将之

学位論文題名

Analog Quantum Computation and Communication with Digitized Continuous Variables
(連続量状態を用いたアナログ量子情報処理に関する研究)

量子コンピュータは従来のコンピュータでは不可能なある種の計算を効率的に実行することが知られている。量子コンピュータの可能性から、IBM, Google, Intel などの大企業が研究に参入し、数十量子ビット (qubit) の量子回路が報告されているが、現実的な問題を解けるだけの大きさの量子コンピュータの実現にはまだ遠いのが実情である。大規模な量子コンピュータの実現のためには多粒子の量子もつれが必要である。連続量状態であるスクィーズド状態を用いると大きな量子もつれを量子光学の手法で容易に作ることができ、実験的にも百万量子モードをもつれさせることに成功している。最近、スクィーズド状態に量子ビットをエンコードした GKP qubit を用いることによってスケラブルなフォールトトレラント量子計算が可能であることが示された。GKP qubit は量子もつれをスクィーズド状態と同じ手法で実現でき、大規模化に適している。しかし、必要とされるスクィーズの大きさが課題となっていた。

本論文はこのような状況下で GKP qubit を用いた量子計算・量子通信について研究した結果をまとめたもので、8 章からなっている。第 1 章は序論であり、連続量状態を用いた量子情報処理の中で量子計算について概観している。また、連続量状態を用いた量子計算を実現するために必要なスクイーディングレベルの低減の必要性について述べている。

第 2 章では離散量状態と連続量状態を用いた量子計算を概説し、GKP qubit を用いた量子計算のモデルを導入している。さらに、モデルを改良することで従来比 2dB 以上の所要スクイーディングレベル低減が得られている。

第 3 章では GKP qubit が持つアナログ情報に着目している。これは GKP qubit がもともと連続量状態を用いていることから測定結果も連続的であることを活用するものである。この連続量がもつ情報 (アナログ情報) を利用した量子情報処理の提案とその性能評価を行っている。まず、アナログ情報から尤度を得ることによる最尤法を用いたアナログ量子誤り訂正を提案し、Gaussian Quantum Channel というノイズモデルにおいて理論限界に達する誤り訂正能力をもつことを数値計算により明らかにしている。さらに GKP qubit の測定結果がもつアナログ情報を考慮し信頼性のある結果だけを事後選択することで、量子情報処理の精度を向上する測定手法を提案している。

第 4 章では、前章で導入した最尤法と測定手法を量子もつれ状態の大規模化へ応用する手法について述べている。量子計算や量子中継などを精度よく実行するためには大規模なもつれ状態を準備することが必要である。そのためにまず小規模なもつれ状態を事後選択することで精度よく準備し、それらをもつれさせることで高純度な大規模もつれ状態を構築する方法を導入している。さらに第

3 章で提案したアナログ量子誤り訂正と高純度な大規模もつれ状態構築法を組み合わせることで、必要なスクイーミングレベルを既存手法の 6dB 以上低減できることを数値計算により示している。

第 5 章では、トラッキング量子誤り訂正法を提案している。これは誤り訂正に必要なリソースを削減するために、誤り訂正の一部を単独の qubit の誤り情報測定に置き換えるものである。本来単独の qubit ではビット反転の回復といった誤り訂正は不可能である。トラッキング量子誤り訂正法では、単独の qubit の誤り情報を補助 qubit に保持しておき、その結果をアナログ量子誤り訂正に活用することで、ビット反転誤り訂正を可能にする。また、この手法による誤り訂正能力は最大の誤り訂正能力近くまで向上できることを数値計算により示している。本手法により量子計算に必要な qubit 数が 25 ~ 50 % 削減できることを明らかにしている。

第 6 章では、アナログ情報を活用した量子もつれの高純度化について提案している。エンタングルメント蒸留と呼ばれるプロトコルにおいて、アナログ情報を活用することで従来よりも高純度のもつれ状態が生成できることを明らかにしている。

第 7 章では、第 4 章で述べた高純度な大規模もつれ状態構築手法を量子中継へ応用して、精度良くもつれを中継する符号化手法を提案している。本手法の性能は、中継に必要な qubit 数と形成したもつれの精度、もつれ形成の成功確率が光子 qubit に比べてそれぞれ 1 ~ 2 桁上回ることを示している。

第 8 章は結論であり、本研究で得られた成果を要約している。

これを要するに筆者は大規模量子コンピュータの実現に不可欠な大規模量子もつれ状態の生成について、GKP qubit の持つアナログ情報を活用することを提案し、これにより現在の技術でも達成可能なスクイーミングレベル (10dB) で大規模量子もつれ状態が形成できることを示すとともに、アナログ情報の活用による qubit 数の低減、もつれの純度向上、量子中継法を提案しており、量子計算および量子通信技術に関する学術分野に貢献するところ大なるものがある。

よって筆者は、北海道大学博士 (工学) の学位を授与される資格があるものと認める。