



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_abstract.pdf, 論文内容の要旨



学 位 論 文 内 容 の 要 旨

博士の専攻分野の名称 博士（工学） 氏名 福井 浩介

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、量子力学の重ね合わせの原理を利用することで、素因数分解、分子の性質・化学反応のシミュレーションなどを現在のコンピュータより高速に処理できることから、Google、IBM 等の世界的企業や各国の研究機関で盛んに研究・開発されている。量子コンピュータの基本単位である量子ビットの実現には超伝導の磁束、電子のスピンなど様々な物理系の候補がある。しかしながら、大規模な量子計算には、量子ビットの高精度な制御技術と大規模な量子もつれ状態の準備が必要となる。ここで、量子もつれ状態とは量子力学的な相関関係を持つ状態である。超伝導や原子等では物理系の制御では高い技術レベルが達成されているが、大規模なもつれ状態は実現されていない。このように、量子ビットの高精度な制御技術と大規模な量子もつれ状態生成の 2 つの条件を同時に満たすことは非常に困難である。そのなかで、これまでにスクイーミングされた真空場と呼ばれる光では、大規模量子もつれ状態の生成に成功している。スクイーミングとは、光の複素振幅の雑音成分の分散を実部と虚部で変化させる操作である。ところがスクイーミングされた真空場は量子ビットに発生した誤りを訂正 (量子誤り訂正) できないという、制御技術の精度以前の重大な欠陥がある。その欠陥を克服するために、2014 年には GKP qubit を用いた大規模量子計算方式が提案された。GKP qubit は光の雑音の実部、虚部が離散的な確率密度分布を持つ特殊な量子状態であり、提案者の頭文字をとって GKP qubit と呼ばれている。GKP qubit は量子誤り訂正能力を備えた状態であり、さらに GKP qubit は大規模量子もつれの生成に有利である。現在のところ大規模量子計算実現のためのふたつの条件を唯一満たしていることから、GKP qubit は非常に有望な量子ビットとして認識されている。

本学位論文は、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、特に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要求されるスクイーミ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について説明し、最後に GKP qubit を用いた量子計算モデルについて概説している。そして、そのモデルを改良することで従来よりも 2dB 以上のスクイーミングレベルの低減が実現することを数値計算により示している。

第 3 章では GKP qubit が持つ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について述べている。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、その性能が Gaussian Quantum Channel というノイズモデルにおいて最大の誤り訂正能力を持つことを数値計算により明らかにしている。さらに GKP qubit の測定において、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手法について述べている。

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した手法につ

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説明している。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、量子計算に必要なスクイーミングレベルが既存手法の 6dB 以上低減す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。本来単独の qubit を使うだけではビット反転の回復といった誤り訂正が不可能であることは常識である。トラッキング量子誤り訂正法では、単独の qubit の情報を補助 qubit を用いて保持しておき、その結果にアナログ量子誤り訂正を活用することで、これまで単独で使えば不可能であったビット反転誤り訂正を可能にする手法を提案している。またその誤り訂正能力が最大の誤り訂正能力の近くまで向上できることを数値計算により示している。さらに、本手法により、従来多くのリソースを要した処理をシンプルな処理に置き換えることができる。その結果、量子計算に必要な qubit 数が 25 ~ 50 % 削減できることが示されている。

第6章では、アナログ情報を活用したエンタングルメント蒸留手法について提案している。純度の低い量子もつれ状態をいくつか集めてから、それらにエンタングルメント蒸留と呼ばれるプロトコルを施すと、純度の高い量子もつれ状態にすることができる。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いる。まず長距離の2者間にもつれ状態を形成するために、その間に用意された複数のノードを用いてもつれ状態を中継する量子中継について概観している。そしてもつれ状態を中継する際に精度良くもつれを中継する符号化手法を提案している。その性能評価では GKP qubit が光子に比べ、中継に必要な qubit 数と形成の精度、確率の各指標について、1 ~ 2 桁上回ることが示されている。

第8章は結論であり、論文で得られた成果について要約する。