

氏 名 Sebastien Gerald Roland Louis

学位（専攻分野） 博士（情報学）

学位記番号 総研大甲第 1201 号

学位授与の日付 平成 20 年 9 月 30 日

学位授与の要件 複合科学研究科 情報学専攻  
学位規則第 6 条第 1 項該当

学位論文題目 Distributed Hybrid Quantum Computing

論文審査委員 主 査 准教授 根本 香絵  
教授 藤山 秋佐夫  
助教 渡辺 曜大  
准教授 村尾 美緒（東京大学）  
教授 Timothy C. Ralph (University  
of Queensland)  
教授 Jens Eisert (University of  
Potsdam)

## 論文内容の要旨

In this thesis we have investigated three areas related to the implementation of QIP. As a starting point we argued that distributed approaches constitute the most promising route toward a scalable quantum computer, already allowing for nontrivial applications to be realized experimentally at the time of writing. We also pointed at the potential advantages of the cluster state model for information processing. This set the framework for the results obtained.

Having chosen the qubus scheme as a physical realization, in the third chapter we looked at the effects of dissipation on the bus. First we generalized previous work on dissipation during dispersive interactions. These interactions led to the conditional rotation which is one of the center pieces of the qubus proposal. We found that as well as causing decoherence in the qubit interacting with the bus, dissipation induces a known conditional phase on the qubit. This problematic phase is a function of the amount of loss incurred by the probe as well as its initial amplitude. We followed the entanglement dynamics between the bus and the qubit and found that the larger the initial amplitude of the probe the larger the maximum entanglement and the lower the entropy of the combined state at the entanglement peaking time.

The decoherence process corresponds to a phase-flip channel which can be combined with the phase-flip channel induced by inter-cavity loss. This enabled us to characterize the effects of loss in the complete measurement-free CZ gate. We obtained the quantum operations induced and their effect on the fidelity and entanglement of output states. These operations are essential to the development of a large scale architecture containing levels of error correction. We found that in the presence of moderate loss the gate operated with a high fidelity and that a simple reversal of the gate made the errors balance out to being independent single qubit phase-flip channels. This is the simplest quantum operation one could conceive of in this situation and could potentially simplify error correction on higher levels. Overall we find that dissipation in the bus leads to a well understood dephasing of the qubits and provide a general approach to characterizing decoherence effects in quantum bus schemes, through the calculation of overlaps.

In the fourth chapter we applied the qubus scheme to the distributed generation of cluster states of matter qubits. Keeping a simple homodyne measurement, we proposed a three qubit gate working with probability  $3/4$ . This increase in probability past the  $1/2$  limit is crucial, as it allows us to generate cluster states in a truly scalable fashion.

The improvements over previous proposals are significant. At this point we came to understand the importance of strategies for the probabilistic growth of cluster states. This led us to provide two new view points on cluster growth, independent of the physical realization. In the large flow approximation we obtained the optimal strategies for various cluster state lengths, which in other circumstances is a particularly tough problem solve. Coming back to the discrete growth of a single cluster we introduced absorbing Markov chains. We found that for a large range of probabilities, two-qubit pumping was the optimal pumping strategy, however we also found that strategies could be layered to improve their performance. These results introduce new tools and perspectives to cluster growth studies and have the potential to be extended to context dependent strategies.

Finally in the fifth chapter we addressed the important issue of composite system transmission. This application is vital for distributed approaches to QIP and also for cluster state quantum computing in the case that the preparation and measurement regions are istinct. We provided simple protocols for the deterministic transfer of states of arbitrary dimension via a single bus. We discussed in detail the cases of two-qubit and two-qutrit transmission, finding the interactions leading to a maximally entangling mapping. As a closing point the qubus scheme, or the use of a CV bus, proved to be a natural framework for the physical realization of such protocols. Overall these results illustrate the potential applications of higher dimensional buses and points to their use in increasing the information processing power by accelerating data transfer and entanglement distribution.

## 論文の審査結果の要旨

Sebastien Louis氏の博士論文は分散型のハイブリッド量子情報処理についてQubus (Quantum bus) 量子情報処理を用いて4つの観点、(1) Qubus量子ゲートのエラーの解析、(2) Qubus量子情報処理の方法のクラスター状態への応用、(3) クラスター状態の生成・成長特性の解析、(4) 分散型量子コンピュータにおける量子データ輸送の方法の提案と解析、からその特性と可能性を研究したものである。Qubus量子情報処理は数年前に提案された新しい量子情報処理の方法で、光を用いたインプリメンテーションをはじめ注目されている方法である。いろいろな物理系でのQubusの重要性が認識されつつあるが、同時に新しい考え方であり、ハイブリッドは構成をもつため、Qubus量子情報処理の方法の実現性の評価が必要であり、またその量子情報处理的な可能性を追求することが重要となっていた。本博士論文は実現性評価のためのエラー解析と、量子情報処理系での可能性の解析を、4つの観点から行ったものである。

エラーの解析では、Qubus型の量子ゲートの実現可能性を理論的に解析したものであり、ゲートの物理過程を分析して、主要なエラーと特定し、その影響をゲートの精度として評価している。エラー抑制のための独自の改良を提案していることなどが博士論文として特に評価できる。

測定ベースの量子計算の方法として注目されているクラスター状態への応用では、まず、すでに成熟した測定技術であるホモダイン測定を用いるという現実的な制約の中で、Qubus量子情報処理の考え方を応用し、これまで線形量子情報処理を用いたゲートの成功確率限界を超えるゲートを提案した。この新しいQubusゲートを用いた方法がこれまでの成長限界を破る方法であることを数値的に示した。これまでの線形量子情報処理でのクラスター状態の成長では、その成長のストラテジーが重要なテーマであったが、その限界を破ることで、新しい高成功確率の領域ではストラテジーの差が劇的に小さくなることがわかり、この分野の研究に新たな視座を与えることとなった。

Louis氏の博士論文ではこの研究成果をさらに発展させ、クラスター状態の成長の最適化の問題を取り扱っている。前の研究をもとに、任意のゲート確率に対してクラスター状態の成長を数値的に解析している。成功確率の領域を先のQubus型のゲートの応用により広げたことによって、このような大規模な量子ビットを対象にしたクラスター状態の成長の最適化へと発展させたところに独自性がある。

また、Qubus量子情報処理のもうひとつの重要な性質である分散型の量子情報処理という観点から、大規模な量子情報処理におけるQubusを用いたデータ輸送の問題を取り上げた。データ輸送は、量子ビット欠損回避、アーキテクチャー、量子情報メモリーなどさまざまな要因から重要な問題である。Qubus量子情報処理は本来的に分散型という優位性を持っているが、それをどう生かすべきなのかは全く自明でない。Louis氏はここで分散型の性質の利点を生かしたデータ輸送の方法という興味深い提案している。この新しいデータ輸送の方法で、さまざまなサイズのQubusを用いて、効率よく量子データを輸送する方法を解析しており、同様な方法を用いて高次元へと拡張できること、また現実的な実装化としてコヒ

ーレント光を用いる方法を提案しているところなどが評価できる。

以上 Sebastien Louis 氏の博士論文は、Qubus 量子情報処理の実現性の解析でそのゲートの性能を示し、また、クラスター状態とデータ輸送について新しい方法を提案することで、Qubus 量子情報処理の有効かつ効率的な実現化方法とその優位性を示した。Louis 氏の研究業績は国際的な学術雑誌論文 5 篇（内 1 篇は 8 月 8 日に掲載決定通知受理）および国際会議論文 2 篇があり、研究業績も学位（情報学）の授与に十分であると考ええる。