

# 研究計画書

## 量子ドットコンピュータの Cavity QED デバイス配置の最適化

慶應義塾大学 総合政策学部

自署：-----

学籍番号 70606802

希望プログラム名：CI

平成 21 年 5 月 8 日

### 概要

ムーアの法則の物理的限界により、現在のコンピュータの発展が行き詰まることは明らかである。量子コンピュータは、現在のコンピュータの発展が限界に達した後もコンピュータを発展させ続けるため、実現が急務となっている。しかし、量子コンピュータの実現には多くの課題がある。量子コンピュータで計算素子として扱う量子は、状態が壊れやすく、エラーが発生しやすい。量子ドットコンピュータ内での量子情報の通信を担う技術である Cavity QED には、計算素子間の情報転送の際のエラーレートが高いという問題がある。本研究では、この問題を解決するために、メタヒューリスティックアルゴリズムとシミュレーションを用いて Cavity QED デバイスの配置を最適化する。本研究によって、量子コンピュータのための実用に耐えうる量子コンピュータチップの構造が設計されることが期待される。また、量子コンピュータの設計は各所に置いて同様の問題を抱えている。本研究はこれらの問題の解決にも寄与することが期待できる。

### 1. はじめに

量子コンピュータは、現在研究開発中の新しいコンピュータである。現在のコンピュータでは、計算を行う電子回路の集積化が進められている。計算速度は、単位面積当たりのトランジスタの数に依存している。単位面積当たりにより多くのトランジスタを埋め込むためには、トランジスタをより小さくすることが必要である。1965 年に提唱された経験則であるムーアの法則では、IC におけるトランジスタの集積密度は 2 年でおおよそ倍になると言われている。これは、トランジスタの一辺の長さは 2 年毎に  $\sqrt{\frac{1}{2}}$  になることを示している。しかしこのムーアの法則には物理的限界が存在する。トランジスタの大きさが一定以上小さくなり、扱う電子の数が減ると、トランジスタは量子力学の影響を受け、トンネル効果により期待通りの動作を実行することができなくなる。ムーアの法則が限界に達してから先のコンピュータの発展として期待されるのが量子コンピュータである。ムーアの法則の問題に対する解決法として究極的なものは、全く異なる計算方法に移行することである。量子コンピュータの計算素子は、量子力学に従って演算をするように設計されているため、ムーアの法則の限界は関係がない。量子コンピュータは未だ実現されておらず、一時は実現性と有用性が疑われ研究が下火になった。これを破ったのが 1994 年に Peter Shor によって発表された超巨大数を因数分解する量子コンピュータアルゴリズムである。現在のコンピュータでは効率的に行う事ができない超巨大数の因数分解を、量子コンピュータでは並列計算により早く行うことができる。こ

の発表以後量子コンピュータの研究は再び加速したが、その実現には未だに多くの課題が残されている。計算素子の決定もその一つである。電子を閉じ込める技術である量子ドットを用いた人工原子は、計算素子として有力視されているものの一つである。また、計算のための量子状態転送の手法として Cavity Quantum Electrodynamics(Cavity QED) が提案されている。しかし、Cavity QED は技術的制限と特性を考慮して量子コンピュータチップ上のデバイス配置を最適化しなければ利用する事ができない。本研究では、この Cavity QED を用いた量子ドットコンピュータを実現するために、Cavity QED のデバイス配置の最適化を行う。

第 2 章では、本研究の背景として量子コンピュータについて纏める。第 3 章では、本研究で研究対象とする問題点について纏める。第 4 章では、本研究の内容について説明する。第 5 章では、本研究の成果について纏める。第 6 章では、本研究以前に、私がこれまで取り組んで来た活動について纏める。第 7 章では、慶應義塾大学政策・メディア研究科を志望する動機について説明する。

### 2. 要素技術

本章では量子コンピュータの概要について述べ、本研究において用いる技術について整理する。

#### 2.1 量子コンピュータ

量子コンピュータは、計算素子に量子を用いて計算を行うコンピュータである。現在のコンピュータの bit にあたるものを量子コンピュータでは

qubit(quantum bit) と呼ぶ。この qubit は一個の量子が表現する。0 や 1 の論理値は、qubit となっている量子の状態で表現する。qubit となっている量子の状態を測定した時に検出される論理値は、不確定性原理により確率で表現される。この、確率により 0 にも 1 にもなりうる状態を「重ね合わせ」と呼ぶ。重ね合わせは波動関数で表現される。量子コンピュータは、重ね合わせの波の干渉を利用して演算を行う。重ね合わせによって、 $2^{\text{qubit}}$  数個の数字を解として考慮に入れて演算を行う。演算の途中で誤った結果となった数字は干渉によって全て消去することで、正しい数字のみを解として残す。この結果、量子コンピュータは現在のコンピュータでは実現し得ない、単一の計算過程における並列計算を実現する。量子コンピュータを実現するシステムは複数提案されている。

## 2.2 エンタングルメント

複数の量子が、それぞれの状態が互いの状態に影響するという量子のみに見られる特殊な状態にあるとき、それらの量子はエンタングルしていると言い、またその状態をエンタングルメントと呼ぶ。量子 A と量子 B がエンタングルしていて、量子 A を測定したとき、量子 B は量子 A からどれほど離れていようと状態が一意に確定する。

## 2.3 Bell ペア

完全にエンタングルしている状態にある二つの量子。

## 2.4 量子テレポーテーション

## 2.5 量子ドット

量子ドットとは、電子の移動方向を 3 次元的に制限して内部に閉じ込めている物のことである。量子ドットは、閉じ込めている電子を電子とする人工原子として動作する。この人工原子を計算素子に用いる量子コンピュータを量子ドットコンピュータと呼ぶ。量子ドットコンピュータでは、人工原子の基底状態と励起状態を論理値に利用する。また、この量子ドットに電磁波を加え、電子に作用させ量子状態の操作を行う。

## 2.6 Cavity QED

Cavity Quantum ElectroDynamic(Cavity QED) は、共振器内に光子を捉え、共振器の中もしくは近くに配置した電子と相互作用させ、エンタングルさせる技術である。量子コンピュータでは、Cavity QED を、二地点間で量子状態の通信に利用する。まず、光子を一つ用意して、送信元で Cavity QED を実行し電子とエンタングルさせる。次に、同じ光子を送信先に送り、送信先でも Cavity QED によって電子とエンタングルさせる。その結果、一つの光子を介して二地点の電子はエンタングルする。purification や、量子テレポーテーションを行うことが可能となる。

## 2.7 purification

量子状態の伝達には量子テレポーテーションが必要である。量子テレポーテーションには、精度の高いエンタングルメント状態にある Bell ペアが必要である。purification は、複数の Bell ペアを用いて一つの精度の高い Bell ペアを作り出す技術である。purification を利用すると、量子状態を通信する際のエラーレートは下がり、誤りも小さくなる。図 1 では、精度 0.638 でエンタングルメントした 4 組の量子対から精度 0.797 のより高い精度を持つ量子対が作られる様子を示した。purification は、量子状態を通信する際の誤りを小さくすることに有用である。

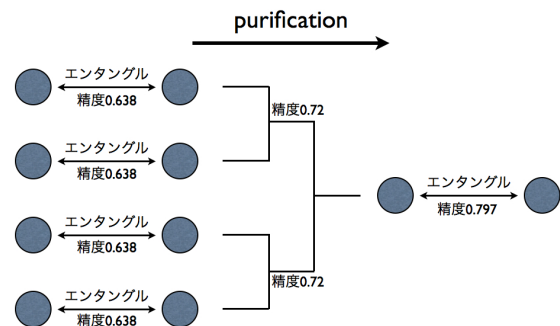


図 1: purification

## 2.8 Cavity QED を用いた量子ドットコンピュータ

Cavity QED を用いた量子ドットコンピュータでは、量子ドットの種類には qubit、ancilla、purification の 3 つがある。また、Cavity QED を用いた量子ドットコンピュータのチップには、量子ドット以外に、Cavity と二種類の waveguide が必要である。

### ・qubit 量子ドット

qubit 量子ドットは qubit となり、演算に利用される。演算を行う際には qubit ゲートと言う操作を行う。現在のコンピュータのゲートは、電子デバイスに電流を通す事で実現する。量子ドットコンピュータの qubit ゲートは、物理的なデバイスが存在しない。qubit に電磁波を加えて量子状態を遷移させることでゲート操作を実現する。

### ・ancilla 量子ドット

ancilla 量子ドットは、qubit の量子状態を通信する量子テレポーテーションに利用される。送信元と送信先の ancilla 量子ドット一つずつが Bell ペアとなり、qubit の情報を通信する。

### ・purification 量子ドット

purification 量子ドットは、purification に必要な

Bell ペアとなる量子ドットである。purification 量子ドットを利用して、ancilla 量子ドットのエンタングル精度が高くなるように purification を行う。

- **Cavity**

Cavity は、量子ドットと相互作用させるための光子を一時的にループさせる共振器である。そのため、qubit 量子ドットや ancilla 量子ドットの近くに配置する。光子は Cavity 内をループしている間に、qubit 量子ドットや ancilla 量子ドットとエンタングルメントを形成する。

- **logic waveguide**

waveguide は、電磁波の通り道である。logic waveguide は、通した電磁波を作用させる事により compute 量子ドットを操作し、演算を行う。

- **purification waveguide**

purification waveguide は、離れた purification 量子ドット同士、ancilla 量子ドット同士を Cavity QED で Bell ペアとするための光子を通す。

### 3. 問題点

#### 3.1 量子誤り訂正

現在のコンピュータと同様に、量子コンピュータにおいても、演算中に誤りが生じる。現在のコンピュータの演算は、物理的にデジタルで行っているため、誤りは反転した状態でのみ現れる。そして、情報を冗長化して見比べることで、誤りの存在や誤りが起こった箇所を特定する。よって、エラーレートが  $\frac{1}{2}$  以下である限り、検出・訂正が可能である。しかし量子コンピュータでは、アナログである、重ね合わせ状態にある量子の個々の論理値の発生確率を用いて演算を行うため、誤りもまたアナログで発生する。この訂正には無限の情報量が必要である。また量子コンピュータにおいては、量子状態をコピーすることは不可能であることが既に証明されている。そのため、量子情報は冗長化が容易ではない。さらに、量子情報には、誤りの存在や誤りが起こった箇所を特定するために量子を観測すると、波動関数が収束して量子状態が破壊され、以後の演算を続けることができなくなる問題がある。量子誤りは、上記の理由により現在のコンピュータと同じように訂正することは不可能である。そこで、波動関数を収束させる要素ではない量だけを観測して量子状態を壊さずに、誤りを量子状態で検出する方法が考えられた。量子誤り訂正は冗長化であり、複数の qubit を比較して誤りを検出する。そのため、エラーレートが  $\frac{1}{2}$  以上である場合、誤りを正しく検出・訂正する事は不可能である。

(論文を参照しましょう)

#### 3.2 問題点

量子コンピュータは、誤りに対してとても弱いものである。第 3.1 節の通り、量子コンピュータは、アナログな物理状態が演算に用いられて直接演算

結果に影響するため、物理状態において誤りに耐性を持つことができないためである。また、量子コンピュータは、とても小さな物を素子として用いることから非常にデリケートである。現在のコンピュータでは無視する事ができる小さなノイズでも、量子状態は影響を受けて誤りが発生する。第 3.1 節で述べたように、量子誤り訂正はエラーレートが  $\frac{1}{2}$  以下であることを前提とし、また、purification も同様にエラーレートが  $\frac{1}{2}$  以下でなければ実現しない。量子コンピュータに必要な演算方法、誤り訂正、qubit の実現方法などの各々の基礎理論はそれぞれ世界各地で研究されている。そのどれもがまだ十分ではなく、研究途上である。量子コンピュータチップのデバイス配置の研究もその一つである。量子コンピュータのノイズへの脆弱性を考えれば、チップ上のデバイス配置を決定する際に、できる限りノイズの影響が小さい配置を探さなければならないという問題がある。しかし、量子コンピュータチップ上のデバイス配置の適正調査システムは未だ存在しない。そのため、現在デバイス配置を効率的かつ根拠を持って決定することができないという問題がある。

また、チップにはエラーレート以外にも解決すべき問題がある。チップ上のデバイスの間隔が大きいと、必要なだけのデバイスがチップ上に載り切らない可能性がある。量子コンピュータを実現するためには、デバイスの載せ方を工夫して、実用に値するだけのデバイスを載せなければならない。

### 4. Cavity QED デバイス配置システム提案

第 3. 章の問題に対処することが、量子コンピュータの開発を支援する上で求められている。本研究では、Cavity QED デバイスの配置を、エラーレートの縮小と量子コンピュータチップ上に必要なデバイスを載せることを目的として最適化する。

#### 4.1 システム概要

Cavity QED デバイスそれぞれのエラーレートと初期配置を設定したときに、量子コンピュータチップ内部におけるエラーレートを全て計算し、自動的に最適なデバイス配置を探索し続けるシステムを構築する。

#### 4.2 システム設計

量子ドットコンピュータチップシミュレータを作成してエラーレートの算出を行い、そのエラーレートを適応度関数に利用する進化的アルゴリズムを利用することで、自動的に最適なデバイス配置を探索し続けるシステムは構築できる。図 2 に、本システムの全体図を示す。本システム利用には、QASM から Netlist を作成し、必要なデバイス接続を明らかにする必要がある。

- **QASM**

量子回路の構造を記述するための言語。

- **Netlist**

6 種類のデバイスの、接続の仕様について記述したデータ。

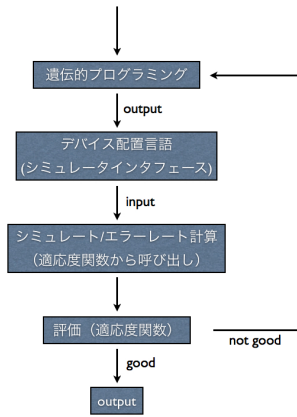


図 2: システム設計

進化的アルゴリズムには、電子回路の探索に向く遺伝的プログラミングを使用する。デバイス配置言語は、量子ドットコンピュータチップ内のデバイス配置について記述する言語である。量子ドットコンピュータチップシミュレータのインターフェースとするフォーマットが必要であるが、そのようなフォーマットは存在しないため、本研究において開発する。また本研究において、量子ドットコンピュータチップの動作をシミュレートし、同時にチップ内の電磁波などについても全て把握して動作検証とエラーレートの算出を行う量子ドットコンピュータチップシミュレータを開発する。これを用いて図2中のシミュレート エラーレート計算を行う

シミュレートの際、電磁場について算出するために3次元空間に関わる計算を行うことが予想されるため、デバイス配置言語はベクトルを用いて配置を記述する。量子ドットコンピュータチップシミュレータ作成の際には、以下の点に注意する必要がある。

- **電磁場の計算** 量子ドットコンピュータチップの中は、光子、電子が移動することにより電磁波が発生する。また、直接電磁波が流れることもある。

- **Cavity** 光子が中をループする。
- **logic waveguide** 電磁波が中を通る。
- **purification waveguide** 光子が中を通る。

これらが qubit や他の光子、電子に与える影響について考慮しなければならない。

- **経路長** waveguide の中を光子、電子、電磁波が通る際、waveguide から影響を受ける可能性がある。この際、誤りが生じる可能性がある。
- **各デバイスのエラーレートの推移** 研究の進展に伴い、各デバイスそれぞれのエラーレートは推移していくことが予想される。エラーレートの変更に対応できるよう予め対策を立てておく必要がある。

- **複数同時処理** 本研究では最初の量子コンピュータを目的としているため、チップ上での並列処理については考慮しない。

#### 4.3 システム課題

チップ上のデバイスが互いに影響を与えて発生する誤りを減少させるためにデバイスの間隔を広く取ると、チップ上に載るデバイスの数が減ることが予想される。このトレードオフを如何に巧く評価関数の中に実装するかがこのシステムの課題である。

### 5. 本研究の貢献

本章では、本研究に期待される成果について整理する。本研究は、量子コンピュータのアーキテクチャ：図3の第4層、”Interconnection topologies and floor planning”にあたる。また本研究は、量子

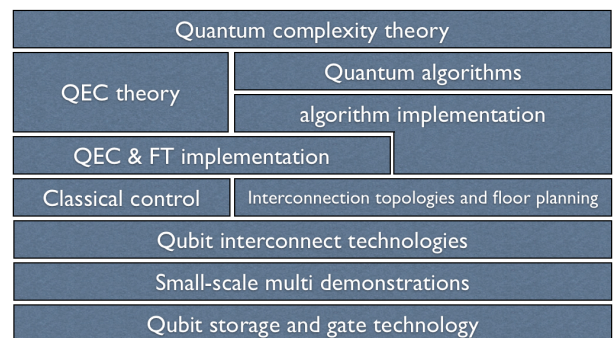


図 3: 量子コンピュータアーキテクチャ

コンピュータ以外にも、量子マルチコンピュータ、量子リピータの実現に貢献する事が目されている。

#### 5.1 本研究の成果

- **量子コンピュータデバイス配置のためのツール群**

本研究に取り組むために、デバイス配置言語、量子ドットコンピュータチップシミュレータを開発する。Cavity QEDを用いる量子ドットコンピュータ以外の量子コンピュータについて研究する際にも、応用が利くことが予想される。

- **Cavity QED 量子ドットコンピュータの最適なデバイス配置**

本研究の目的通り、Cavity QEDを用いた量子コンピュータの最適なデバイス配置が明らかになる。これにより、内部通信の際のエラーレートが最小になる。

- **デバイスや qubit ゲートに必要とされる正確性の計算**

本研究の結果から逆算して、チップ上の各デバイスに必要とされる正確性が明らかになる。これは各デバイスを開発する際の指標となり、デバイス開発



者へ貢献することが期待される。

## 5.2 本研究の利用シーン

### ・量子マルチコンピュータ

現在のコンピュータと同様に、一つの量子コンピュータについても、チップサイズは限られている。そのため、一つの量子コンピュータが持ち得るストレージの大きさやパフォーマンスも限られる可能性がある。量子マルチコンピュータは、量子コンピュータに依る分散計算である。量子マルチコンピュータを用いると、必要な計算力を一つの量子コンピュータチップで実現するよりも早く、量子コンピュータを使用する事ができる。本研究は、それぞれの量子コンピュータ内の計算素子のみに止まらず、量子コンピュータ同士を接続するための接続基盤の設計にも役立つことが期待される。

### ・量子中継機

量子中継機は、量子情報をルーティングするための機器である。量子中継機をネットワークの各点に配置する。各所に配置された量子中継機は、要求された通りにエンタングルメントスワッピングを行う。その結果、多地点中の任意の2地点の間でエンタングル量子対を作成することができる量子ネットワークが完成する。量子ネットワークの概念図を図4に示した。これにより、任意の地点に存在する量子コンピュータ同士を接続することや、任意の地点間で量子鍵配送を行うことが可能となる。

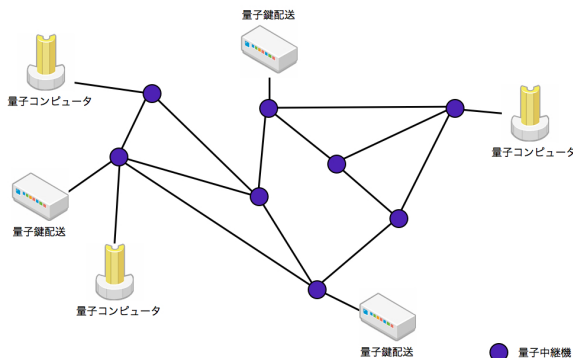


図 4: 量子中継機に依る量子ネットワーク

## 6. これまでの活動

私は二年次より、慶應義塾大学湘南藤沢キャンパス村井研究室に在席している。“Reversible Ternary Adder for Quantum Computation”の発表を、AQIS 2007 (Asian Conference on Quantum Information) にて行った。ORF 2007において、Re-

versible Differential EngineをLEGOブロックを用いて実装し、展示を行った。2008年には、NEC社の量子鍵配送装置を用いてIKEの実装であるracoon2に手を加えることで、量子鍵配送で作った共有鍵を用いてIPsecを行えるシステムを構築し実装した。この成果は、ORF2008とWIDEプロジェクトにおいて発表した。

## 7. 志望理由

現在私が所属し、また大学院進学後も所属する予定である村井合同研究室には、量子コンピューティングについて研究しているグループが存在する。また、本研究は、量子コンピュータについて扱っているが、研究手法は現在のコンピュータによるものである。よって、本研究には、現在のコンピュータについての大きな知識基盤・技術基盤を持つ量子コンピュータの研究環境が必要である。また、本研究は複数の異なる技術の集合であるため、様々な分野、側面から研究することができる環境が必要である。村井研究室には、本研究においてご指導頂ける方々が多数在席している。また、政策・メディア研究科には、様々な分野、側面からの研究ができる環境があるため、本研究に最適な環境であると考えている。以上の理由より、私は慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科への入学を強く希望する。

## 8. 参考資料