

研究計画書

量子ネットワークにおける最良経路選択問題の定義と

その解決アルゴリズムの構築

慶應義塾大学環境情報学部

自署: _____

学籍番号 70644229

希望プログラム名: CI

平成 21 年 05 月 28 日

概要

量子効果や熱リーク問題などの要因により、2020年代にはムーアの法則に則ったノイマン型コンピュータの速度向上は行き詰るであろうと予想されている。また、量子力学に則った新概念の計算機である量子コンピュータが提案され、それを運用するための量子ネットワークの研究も進められている。本研究では、量子ネットワークにおける経路コスト算出法を確立し、効率的な量子通信を行うためのアルゴリズム(量子経路選択アルゴリズム)を構築することを目的とする。

1 はじめに

1980年代に、1と0を任意の割合・任意の位相で重ね合わせた量子ビットを用いて計算を行う量子コンピュータが提案された。しかし、当時は量子コンピュータによってノイマン型コンピュータを遥かに凌駕し得る計算を行うアルゴリズムは発見されなかった。また、量子コンピュータ実現のための様々な技術的課題が当時の微細加工技術の水準では解決不能とされたこともあり、量子コンピュータの研究は現実性を欠いていた。

一方、ノイマン型コンピュータは現在においても計算機の中心であるが、その進歩は技術的到達点に近づきつつあるという見方がある。トンネル効果などの量子効果による計算エラー、処理速度の向上に伴うリーク熱量の増大、といった問題が無視出来ない水準になりつつあり、2年ごとに集積回路のトランジスタ数が2倍になるという“ムーアの法則”の維持が難しくなるであろうと考えられている。

微細加工技術の進歩は量子コンピュータ実現に関わる技術的課題を克服する可能性を示し始めた。また、Shor's アルゴリズム[1]の発見は量子コンピュータがRSA暗号を瞬間的に解く可能性を示した。これにより、再び量子コンピュータに関わる研究が盛んになっている。

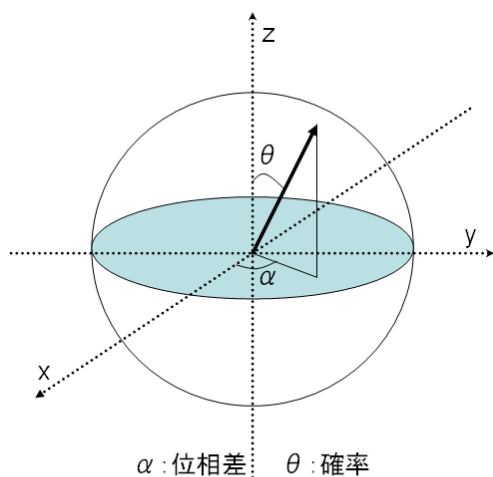
相互接続した量子コンピュータによる並列計算などを行うため、量子ネットワークの研究も進み始めている。このネットワークでは量子テレポーテーションを駆使して量子情報の通信を行う。そのため、量子中継機といった新概念のシステムの開発や、インターネット制御技術の量子ネットワークへの応用・再構築が必要となる。本研究では量子ネットワークにおける経路コストを定量化し、効率的エンタングルメント・スワッピングのための最良経路選択問題解決アルゴリズム(以下、量子経路選択アルゴリズム)の構築を行う。この研究は量子ネットワーク制御プロトコルの開発に必須であり、将来の大規模汎用量子ネットワーク構築への道筋となる。

2 量子ネットワーク

本章では量子ネットワーク[2]とその関連事項について流れを追って説明する。

2.1 量子ビット

ビットは0もしくは1、どちらかの状態をとる。それに対して量子ビットでは0と1、両方その状態が同時に“重ね合わさった”状態をとる。量子ビットの重ね合わせ状態は、0もしくは1である“確率”と、それぞれの確率波の“位相差”によって表記され、図1に示すような長さが1の状態ベクトルによっても表現することが出来る。



$z > 0$ ならば [0]である確率>[1]である確率

$z < 0$ ならば [1]である確率>[0]である確率

図1：量子ビット

2.2 エンタングルメント

集団を構成する個々の対象が独立した量子状態を持たない集団を“量子もつれ状態”にある、という。

“量子もつれ状態”にある集団を“エンタングルメント”と呼び、最大限にもつれた“エンタングルメント”を“Bell ペア[3]”と呼ぶ。“Bell ペア”を構成する量子対は相反する状態をとる。例えば“Bell ペア”を構成する量子ビット対の片方の量子ビットの状態を測定したときに“0”であれば、他方の量子ビットの状態は測定するまでもなく“1”であることが確定する。

2.3 Bell 測定

量子状態を直接観測するのではなく、二つの量子状態の間のパラメータを測定することを Bell 測定と呼ぶ。Bell 測定を行った場合、二つの量子状態は瞬時に破壊される。

2.4 フィデリティ

量子状態の忠実度。0.5~1.0 の間で表され、1に近いほど想定に近い観測結果が得られる。また、ノークローニング限界と呼ばれる 0.67 を下回るフィデリティのエンタングルメントは量子テレポーテーションに用いることが出来ない。

2.5 量子テレポーテーション

量子状態は直接観測された瞬間に破壊されてしまうため、量子状態の複製には特殊な方法が必要となる。まず、複製したい量子と Bell ペアの片方の量子の間で Bell 測定を行う。その瞬間に二つの量子状態は破壊され、Bell ペアの方の量子には複製したい量子の入力状態が転送される。さらに Bell 測定の結果に基づく変換操作を行うことでこの量子は複製したい量子の完全な複製となる。結果として、入力した量子とは別の場所に完全な複製となった量子が出力され、他の量子状態は破壊されているためにこの操作は量子テレポーテーションと呼ばれる。量子テレポーテーションの流れを図2に示す。

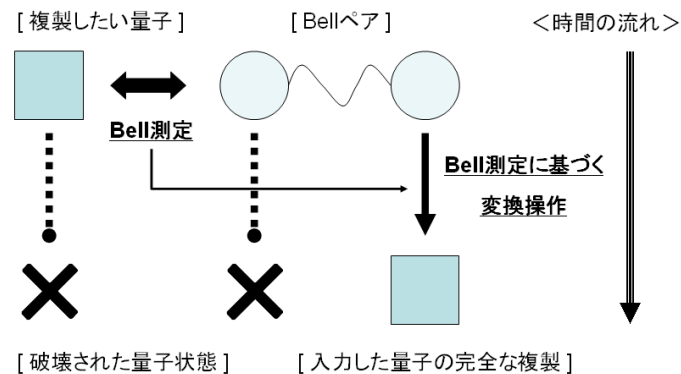


図2：量子テレポーテーション

2. 5 エンタングルメント・スワッピング

直接接続されていない二地点間で量子テレポーテーションを行うためには、量子中継機を用いてエンタングルメント・スワッピングを行う必要がある。

まず、直接接続されている量子中継機の間でそれぞれエンタングルメントを生成する。

次に中継点となる量子中継機が保持している二量子をベル測定することで、直接接続されていない量子中継機の上に長距離エンタングルメントが生成される。エンタングルメント・スワッピングを繰り返すことで、論理的に任意の2量子中継機間でエンタングルメントを生成することが可能になる。図3にエンタングルメント・スワッピングの概念図を示す。

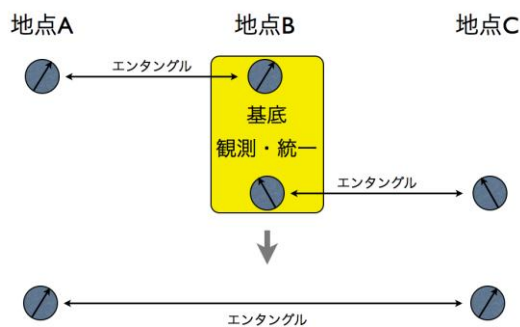


図3：エンタングルメント・スワッピング

2. 6 purification

エンタングルメントのフィデリティは時間と共に劣化してしまう。しかし、量子中継機は複数の低フィデリティ Bell ペアから一つの高フィデリティ Bell ペアを作り出すことが出来る。この操作を purification と呼び、概要を図4に示す。

[低フィデリティエンタングルメント]

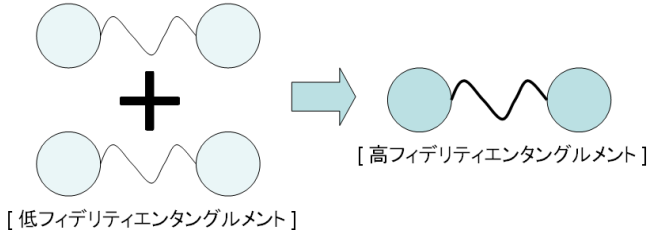


図4：purification

2. 7 量子ネットワーク

量子ネットワークとは、量子情報のみを扱うことが出来る PE(Physical Entanglement)層を持ち、エンタングルメント・スワッピングを行うための“量子中継機”および光ファイバによって構築された大規模・広域な量子テレポーテーションネットワークを指す。量子情報を通信することが出来るため、量子コンピュータへのアクセスや量子コンピュータ同士の相互通信などを行うことが想定されている。

3 量子経路選択アルゴリズム

3. 1 量子経路選択アルゴリズム

量子ネットワークにおいて、任意の2点間エンタングルメントを最良経路・最小手順のエンタングルメント・スワッピングによって生成する手法を量子経路選択アルゴリズムと定義する。

3. 2 問題点

本アルゴリズムを構築するにあたっての問題点として、現段階では最良経路の定義がされていないことがあげられる。

隣接する量子中継機間エンタングルメントを利用した量子通信における経路コストは通信距離と相関関係を持つので一見すると容易に定量化が可能だと考えられる。

しかし、エンタングルメント・スワッピングを使用したエンタングルメント生成に関する総経路コストと経由する量子中継機間の経路コストの単純合計は必ずしも一致しない。ノードの順番を入れ替えるだけで総経路コストが変動する、といった現象が確認されているが、現状では経路コストの単純合計との差異の発生要因はわかっていない。

計算方法が確立していない総経路コストの定量化は、本研究における量子最良経路探索アルゴリズム構築のための必要条件といえる。

4 研究内容

4. 1 研究目標

本研究は二段階からなる。第一に量子ネットワークの経路コストをフィデリティの低下を基準として定量化し、総経路コストの計算を可能にすること。第二に不定形の量子ネットワークにおける任意の2点間エンタングルメントを最良経路において、最小手順のエンタングルメント・スワッピングによって生成する手法を確立すること。以上の実現を量子経路選択アルゴリズムの構築と定義し、本研究の目標とする。

4. 2 研究手法

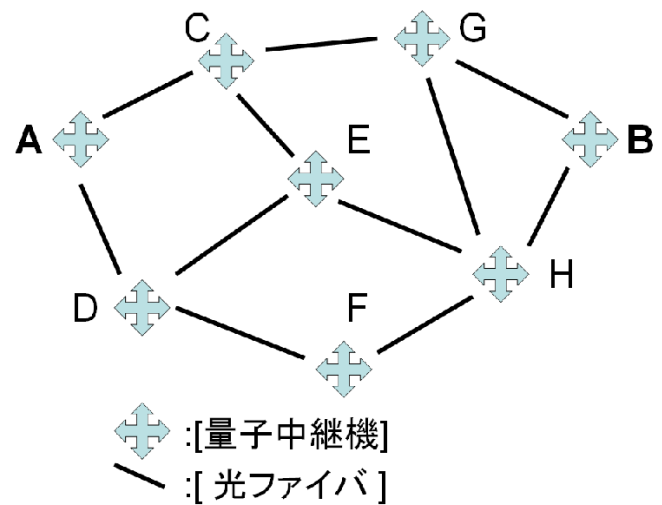
現時点では量子中継機など、量子ネットワークの構成要素の大半が実用化されていない。また、現実のネットワーク構築に先行して量子経路選択アルゴリズムの構築を行う必要があるため、本研究はシミュレーションを中心に進める。

まず、量子テレポーテーションの実験データを元にして、量子中継機間の距離に応じたフィデリティの損失を定量化し、それを元にノード毎の経路コストを算出する。

次に、シミュレータ上で図5に示すような量子ネットワークを構築する。

量子中継機AとBの間でエンタングルメントを生成する場合、エンタングルメント・スワッピングには12通りの実行手順が存在する。各実行手順における総経路コストと使用ノードの経路コストの単純和の差異を分析することで、差異の成因を把握し、総経路コストの算出法確立および定量化を行う。

その後、最良経路におけるエンタングルメント・スワッピングを最小手順で行うための最適解発見手法を整備する。最小手順とは、複数の量子中継機間で効率的にエンタングルメント・スワッピングを



3 hops: ACGB

4 hops: ACGHB

ACEHB

ADEHB

ADFHB

5 hops: ACEHGB

ADEHGB

ADECGB

ADFHGB

6 hops: ACECGHB

7 hops: ADFHECGB

ACEDCHGB

図5：量子ネットワークと経路

行うことで、もっとも速やかに任意のエンタングルメントを生成する手順を指す。

5 本研究の重要性

将来の大規模汎用量子ネットワーク構築のため、量子中継機の開発といったハードウェアの研究に平行して量子ネットワーク制御プロトコルの研究が進められている。量子ネットワーク制御プロトコルを開発するためには最良経路探索アルゴリズムの構築が必要条件となる。

6 これまでの活動

私は学部2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所属している。研究室では本研究の基礎となる量子情報科学及びアルゴリズムを中心に学び、また、実際に解析プログラムを作成することで古典コンピュータの計算限界と量子コンピュータの計算可能性を調査した。また、活動としてはAQIS2007において学会発表、ORFにおいてレゴによる可逆階差演算機関の発表、8次元超立方体の頂点構造解析および高次元正多面体の3次元描画メソッドの構築などがある。

7 志望理由

政策・メディア研究科では、インターネットの基盤技術であるプロトコルデザインに関する様々な研究が行われている。量子ネットワークのプロトコルデザインも本質的にはインターネットのプロトコルデザインと同様のものである。また、本研究科は研究を進める上で重要な機器環境が揃っており、インターネットや量子ネットワークに関わる様々な知見や経験を豊富に持つ指導者の方々が多数在籍している。そして現在、微細技術などの工学的な技術の方面から低レイヤを中心に研究が進められている量子ネットワークを、アルゴリズムの方面の研究を進めることが将来の量子ネットワーク構築の円滑化に繋

がり、また、量子ネットワークの根幹技術の整備に貢献出来ると考えている。本研究科は人材・機器・思想など総合的な環境が私の研究に非常に適していると考えており、私は政策・メディア研究科への進学を強く希望する。

8 参考文献

- [1]Peter W. Shor. Polynomial time algorithms for prime factorization and discrete logarithms on a quantum computer. SIAM J. Comp., (1997)
- [2]C. H. Bennett, G. Brassard, C. Crepeau, R. Jozsa, A. Peres and W. K. Wootters: "Teleporting an unknown quantum state via dual classical and einstein-podolsky-rosen channels", Phys. Rev. Lett., 70, 13, pp. 1895-1899 (1993)
- [3] C. H. Bennett, G. Brassard, S. Popescu, B. Schumacher, J. A. Smolin, and W. K. Wootters. "Purification of noisy entanglement and faithful teleportation via noisy channels", Physical Review Letters, 76(5):722-725, 1996