

卒業論文 2009年度（平成21年度）

広域量子ネットワークにおける
最良経路選択アルゴリズム

慶應義塾大学 環境情報学部

氏名：佐藤 貴彦

担当教員

慶應義塾大学 環境情報学部

村井 純

徳田 英幸

楠本 博之

中村 修

高汐 一紀

重近 範行

Rodney D. Van Meter III

植原 啓介

三次 仁

中澤 仁

武田 圭史

平成22年2月16日

広域量子ネットワークにおける最良経路選択アルゴリズム

本研究では、広域量子ネットワークにおける Entanglement を用いた量子通信を定量化し、経路情報に基づく最良経路選択アルゴリズムの構築を行った。

現在の量子ネットワークの研究は、主として均質な距離と品質を持つ経路によって構成された、理想的かつ抽象的なネットワークモデルを対象に行われている。現実の経路品質は非均質であり、量子通信のスループットに大きな影響を与えることは明らかである。しかし、現実的かつ複雑なネットワークトポロジを持つ量子ネットワークの研究は遅れている。本研究では、将来的に大規模量子ネットワーク制御アルゴリズムを実現するため、非均質な量子ネットワークにおける最良経路選択アルゴリズムの構築を行った。

量子ネットワークに対して Dijkstra's アルゴリズムを用いるため、まず、量子ネットワーク上にある任意の量子中継器間におけるスループットを測定し、経路品質の定量化によるリンクコストを定義した。さらに、量子通信に用いる経路情報を定量化し、経路コストおよび経路スコアの算出法を定義した。これにより、経路情報を用いて経路選択を行うための量子 Dijkstra's アルゴリズムが構築された。

量子 Dijkstra's アルゴリズムの有効性を検証するため、まず、さまざまな経路候補に対して同アルゴリズムを適用し、順位付けを行った。次に、同じ経路候補に対してシミュレータを利用し、スループットを算出して順位付けを行った。両方の順位付けを比較し、高い近似性を確認したことで量子 Dijkstra's アルゴリズムの有効性が示され、最良経路選択アルゴリズムとしての正当性が確認された。これにより、シミュレータを用いてスループットを算出することなく、経路情報に基づいて最良経路を選択することが可能になった。

キーワード

1. 量子コンピュータ, 2. 量子中継器, 3. 量子ネットワーク, 4. 量子テレポーテーション,
5. 経路選択アルゴリズム

慶應義塾大学 環境情報学部

佐藤 貴彦

Path Selection in Heterogeneous Quantum Networks

To date, research on entangled quantum networks has primarily focused on an abstract model consisting of a linear chain of repeaters, with a power of two number of hops of identical length and quality. This dissertation analyses the behavior of more complex network topologies. In a network of heterogeneous links and irregular topology, path selection affects both the performance of individual connections and global network load. I propose a definition for link cost and an algorithm for the decision sequence of entanglement swapping and ranking candidate paths to maximize the throughput of end-to-end connections, measured in high-fidelity Bell pairs per second. Simulations confirm reasonable agreement between the calculated path cost and the expected throughput. Thus, I propose the use of a quantum form of Dijkstra's algorithm.

Keywords :

1. quantum computer, 2.quantum repeater, 3.quantum network, 4.quantum teleportation,
5. Path selection algorithm

Keio University, Department of Environment and Information Studies
Takahiko Sato

目次

第1章	序論	1
1.1	はじめに	1
1.2	研究目的	2
1.3	研究結果	2
1.4	論文構成	3
第2章	量子情報科学	4
2.1	ブラ・ケット表記法	4
2.2	重ね合わせの原理	5
2.3	量子ビット (Qubit)	6
2.4	Entanglement	6
2.4.1	Bell ペア	7
2.5	Bell 測定	7
2.6	量子 teleportation	8
第3章	量子ネットワーク	9
3.1	量子中継器	9
3.1.1	Fidelity	9
3.1.2	Entanglement Swapping	9
3.1.3	Purification	11
3.2	量子ネットワーク	11
3.3	古典ネットワークにおける Dijkstra's アルゴリズム	13
第4章	設計	16
4.1	問題点	16
4.2	量子ネットワークの分類とその特徴	17
4.2.1	量子ネットワーク構成要素の呼称および表現方法	17
4.2.2	1 hop 量子ネットワークの場合 (隣接量子中継器間通信)	17

4.2.3	2^n hop 量子ネットワークの場合	18
4.2.4	非 2^n hop 量子ネットワークの場合	19
4.3	量子ネットワークにおける最良経路選択アルゴリズム	21
4.3.1	量子ネットワークにおける通信コストの算出法	22
4.3.2	スループットの定義	22
4.3.3	リンクコストの定義	23
4.3.4	量子 Dijkstra's アルゴリズムの定義	23
4.3.5	量子 Dijkstra's アルゴリズムの検証方法	23
4.4	まとめ	24
第 5 章	実装	25
5.1	データ取得環境	25
5.1.1	Inputfile について	25
5.1.2	Perl スクリプトによる Cellprot6 の制御	27
5.2	データ解析環境「R」によるグラフ描画	29
5.3	Cellprot6	29
5.3.1	非 2^n hop 量子ネットワークへの対応	29
第 6 章	評価	33
6.1	隣接量子中継器間における量子通信の解析	33
6.1.1	解析概要	34
6.1.2	解析環境	34
6.1.3	経路品質とスループットの相関性	35
6.1.4	リンクコストの定義	36
6.1.5	経路スコアの定義	36
6.2	2hop 量子ネットワーク解析	36
6.2.1	解析概要	37
6.2.2	解析環境	37
6.2.3	解析結果	38
6.3	4hop 量子ネットワーク解析	39
6.3.1	解析概要	39
6.3.2	解析環境	39
6.3.3	解析結果	40
6.4	8hop 量子ネットワーク解析	40

6.4.1	解析概要	41
6.4.2	解析環境	42
6.4.3	解析結果	43
6.5	量子 Dijkstra's アルゴリズムの有効性とまとめ	44
第 7 章	結論	45
7.1	まとめ	45
7.2	今後の課題と目標	46
7.2.1	量子中継器使用頻度補正項の導入	46
7.2.2	自由 hop 量子ネットワークへの対応	46
7.2.3	通信輻輳量子ネットワークへの対応	47
	謝辞	48
付 録 A	Cellprot による評価値出力手法	50
A.1	Cellprot の運用	50
A.1.1	評価手順	50
A.1.2	評価時に変更したパラメータについて	50
A.1.3	評価時に変更しなかったパラメータについて	51
付 録 B	Posters	52

目 次

2.1	二重スリット実験	5
2.2	量子ビット	6
2.3	量子 teleportation 直線は量子通信路，二重線は古典通信路を示す	8
3.1	Entanglement Swapping の概念図 . C で行われる Bell 測定によって Alice—C 間の Entanglement と C—Bob 間の Entanglement が接続され，Alice—Bob 間に Entanglement が保持される	10
3.2	Purification 概念図 . Alice—Bob 間に保持されている二つの低 Fidelity な Entanglement 同士の間で Bell 測定を行い，一つの高 Fidelity な Entanglement に精製する	11
3.3	量子ネットワーク：プロトコル階層図 . [8]	12
3.4	(4hop) 量子ネットワーク：通信概念図	13
3.5	Dijkstra’s アルゴリズムの実行手順	15
4.1	量子ネットワーク概念図 . 量子中継器内部に描かれた小円は保持可能な量子ビットの数を表し，不規則線で繋がれた中円は Entanglement を表す . また，光ファイバの幅は経路品質を表しており，一般に，光ファイバの経路品質は理想状態，高・中・低品質の 4 状態を扱う	18
4.2	(4hop 間) 対称型 Entanglement Swapping 概念図	19
4.3	非対称型 Entanglement Swapping 実行手順例	20
4.4	非対称型 Entanglement Swapping 実行手順例 2	21
4.5	複雑な量子ネットワーク	21
5.1	量子ネットワーク凡例	25
5.2	.in ファイル：調整するパラメータ	26
5.3	“.in ファイル”：調整しないパラメータ	27
5.4	.out ファイル (一部抜粋)	29
5.5	.result ファイルの (一部抜粋)	29
5.6	データ取得環境概念図	30

5.7	R による描画コード	31
5.8	非 2^n hop 量子ネットワーク凡例	31
5.9	2^n hop 量子ネットワーク生成部位	32
6.1	隣接量子中継器間におけるネットワークトポロジ	34
6.2	隣接量子中継器間における量子通信速度測定結果 . 点線は近似曲線であり , x について 0.2 毎にプロットした . 破円は非線形特異点であり , 詳細を本文 に示した	35
6.3	2hop 量子ネットワークトポロジ . 各量子中継器は 4 種類の光ファイバで接 続されており , $16(4^2)$ 種類の経路設定によってシミュレート可能となっ ている	37
6.4	2hop 量子ネットワーク解析結果 . 点線は特異点部分を除いた平均線である . また , 破円で囲んだ部分は【理想状態—中品質】および【中品質—理想状 態】の経路であり , 著しく平均線から乖離しているため , 特異点として扱っ た . 詳細と考察を本文に記す	38
6.5	4hop 量子ネットワーク概念図 . 各量子中継器は 4 種類の光ファイバで接続 されており , $256(4^4)$ 種類の経路設定によってシミュレート可能となってい る	40
6.6	4hop 量子ネットワーク解析結果 . 点線は特異点部分を除いた平均線である . また , 破円 a で囲んだ部分は【1hop 目に低品質経路が設定された】の経路 群であり , 破円 b で囲んだ部分は【高品質—理想状態—理想状態—理想状 態】の経路である . これらの部分は著しく平均線から乖離しているため , 特 異点として扱った . 詳細と考察を本文に記す	41
6.7	8hop 量子ネットワークトポロジ . 前半 4hop の量子中継器は 4 種類の光ファ イバで接続されているが , 後半 4hop の量子中継器は理想状態光ファイバで 接続されている . これにより , $256(4^4)$ 種類の 4hop 経路が経路延長によっ て引き起こす性質変化をシミュレート可能となっている	42
6.8	8hop 量子ネットワーク解析結果 . 点線は特異点部分を除いた平均線である . また , 破円 a,b で囲んだ部分はそれぞれ【1hop 目に最悪部位が設定された】 経路であり , これらの部分は著しく平均線から乖離しているため , 特異点 として扱った . 詳細と考察を本文に記す	43
B.1	ICQITposter	53

表 目 次

3.1	量子ネットワーク：プロトコル階層詳細	12
4.1	量子ネットワーク分類	17
4.2	量子ネットワークの構成要素	17
5.1	主要パラメータ詳細	28
6.1	隣接量子中継器間における量子通信の解析環境	34
6.2	光ファイバの分類	36
6.3	2hop 量子ネットワークにおける量子通信の解析環境	37
6.4	4hop 量子ネットワークにおける量子通信の解析環境	39
6.5	8hop 量子ネットワークにおける量子通信の解析環境	42

第1章 序論

1.1 はじめに

1980年代, 1と0を任意の割合かつ任意の位相で重ね合わせた量子ビットを用いて演算を行う“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フォン・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ためのアルゴリズムは発見されなかった。また, 量子コンピュータを実現するために解決する必要があるさまざまな技術的障害が, 当時の微細加工技術の水準では解決不能であると考えられていた。このような事情により, 実現性に乏しい量子コンピュータの研究は盛んにならなかった。

ノイマン型コンピュータは現在においても計算機を中心であるものの, その進歩は技術的到達点に近づきつつあるという観測がある。微細加工技術の進展に伴ない, 飛躍的な進化を遂げてきた古典計算機であるが, トンネル効果などの量子効果による計算エラーや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”を今後も維持していくことは難しくなるであろう, と考えられている。

一方, 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障害を克服する可能性を示し始めた。さらに, 1994年のPeter Shorによる超高速素因数分解アルゴリズムの発見は量子コンピュータが現代の主要暗号方式であるRSA暗号を瞬間的に解く可能性を示した。1990年代後半以降, 再び量子コンピュータに関わる研究が盛んになり始めた。

また, 量子ネットワークの研究も進み始めている。量子teleportation[1][2]を駆使して量子情報の通信を行う量子ネットワークは, 既存のネットワークとは根源的に異なったアーキテクチャを持つ。そのため, 量子中継器といった新概念の機器や制御プロトコルを開発する必要がある。しかし, 量子ネットワークの挙動・特性には不明な点が多く, 現在はインターネットを始めとする古典ネットワークの制御技術を量子ネットワークへ応用するための試行錯誤が行われている。

1.2 研究目的

本研究の目的は，量子ネットワーク上に設置された任意の二量子中継器間において量子通信を行う際，経路情報を基に最も効率的な通信経路を選択するための“広域量子ネットワークにおける最良経路選択アルゴリズム”を構築することである．

量子ネットワークとは，現在のインターネットでは不可能な量子情報の通信を行うための，長距離量子 teleportation ネットワークを指す．量子ネットワーク構築の意義は大きい．例えば，既の実装段階にある完全暗号方式である量子鍵配送 [3] [4] を長距離間で運用することが可能となり，実用段階に移行することが出来る．

また，将来的には指数関数的な加速効果が得られる量子コンピュータ同士の並列計算や量子コンピュータの遠隔操作をすることが想定されている．2020 年代に完成すると目されている量子コンピュータの開発と並行して量子ネットワークの開発を行う必要がある．

しかし，現在までの量子ネットワークの研究は，主に理想的な品質の経路と理想的な経路長を持った抽象モデルを対象に行われてきた．だが，現実世界に構築される量子ネットワークを想定した場合，このような抽象モデルの研究に終始することは許容されず，現実的な環境の量子ネットワークに関する研究を進める必要がある．

上記アルゴリズムの構築は，量子ネットワーク制御プロトコルの必須要素であり，将来の大規模かつ広域・汎用な量子ネットワーク構築の骨子となるため，本研究の意義は大きい．

同アルゴリズムの構築は，古典ネットワーク・アーキテクチャにおける最短経路選択手法である Dijkstra's アルゴリズムの量子ネットワーク・アーキテクチャへの拡張と考えることが出来る．Dijkstra's アルゴリズムを用いる際には各経路のリンクコストに関わる情報と各経路のリンクコストから経路全体の通信コストを算出する手法が必要になる．しかし，量子ネットワークにおける確立されたリンクコストの定義は未だに存在しない．また，量子通信は Entanglement Swapping や Purification，量子 teleportation といった技術を組み合わせる非常に複雑な手順を用いて行われるため，量子情報の劣化機会が多く，量子ネットワークにおける通信コストが線形性を有するかどうか不明である．最良経路選択アルゴリズムを構築するためには，これらの問題点を全て解決しなくてはならない．

1.3 研究結果

研究の第一段階として，まず，隣接量子中継器間における量子 teleportation の秒間実行速度をスループットとして測定した．次に，隣接量子中継器間におけるスループットの逆数をリンクコストとして量子ネットワークの経路品質を定量化するための基準とした．

さらに，リンクコストの和を量子通信における経路コストと定め，経路情報を定量化し，同コストを基に経路スコアの算出法を定義した．また，経路スコアを用いて経路選択を行う手法を量子 Dijkstra's アルゴリズムとした．

研究の第二段階として，前段階で定義した基準を用いてさまざまな品質の経路から構成される 2hop および 4hop の量子ネットワークにおける量子通信の解析を行った．これにより，経路スコアとスループットを比較することで，量子 Dijkstra's アルゴリズムの有効性を確認した．

研究の第三段階として，8hop の量子ネットワークにおける通信の解析を行った．これにより，ボトルネックの影響やスループットの変化といった長距離間量子通信の特性を明らかにした．また，量子 Dijkstra's アルゴリズムの最良経路選択アルゴリズムとしての正当性を確認し，ここに本研究の目的であった広域量子ネットワークにおける最良経路選択アルゴリズムが構築された．

1.4 論文構成

本論文は 7 章から構成される．第 2 章では，本研究の背景分野となる量子情報科学について述べる．第 3.1 章では，本研究の主題となる量子ネットワークおよびその関連事項について述べる．第 4 章では，第 3.1 章で述べた課題の要因を導き出し，その解決手法と設計について述べる．第 5 章では，開発した実装について述べる．第 6 章では，本提案手法と実装を定性的・定量的な側面から評価する．最後に第 7 章で本論文の結論と，今後の方針を述べる．

第2章 量子情報科学

本研究の主題である量子ネットワーク・アーキテクチャは“量子情報科学”を基盤として建設されており，“古典情報科学”を基盤としたインターネットを始めとする現在のネットワーク・アーキテクチャとは本質的に異なる．本章では，研究背景となる“量子情報科学”について，流れを追って説明する．

“量子情報科学”とは，量子力学に基づく量子効果を用いてシャノン情報と量子情報の統合を図るための技術確立を行う学問である．以下に，重ね合わせの原理から量子 teleportation に至る量子情報の物理に関する事項を述べる．

2.1 ブラ・ケット表記法

量子力学において，系の状態はヒルベルト空間のベクトルとして記述される．このベクトルをケット・ベクトル (ket vector) と呼び，以下のように表記される．

$$|\Psi\rangle = \begin{pmatrix} x_0 \\ x_1 \\ x_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ x_n \\ \cdot \\ \cdot \end{pmatrix}$$

また，双対空間におけるケットベクトルのエルミート共役，つまりケットベクトルの複素共役を取って転置行列にしたものをブラ・ベクトル (bra vector) と呼び，以下のように表記される．

$$\langle\Psi| = \left(x_0^* \quad x_1^* \quad x_2^* \quad \cdot \quad \cdot \quad x_n^* \quad \cdot \quad \cdot \right)$$

つまり,

$$|\Psi\rangle^\dagger = \langle\Psi|$$

となる.

2.2 重ね合わせの原理

重ね合わせの原理は量子情報に関するあらゆる考察, 量子力学に関するほとんどの思考実験, さらにパラドクスに関しても, 最も中心的な役割を持つ. “量子が複数の状態を確率的に併せ持ち, どの状態であるのか観測するまで決定されていない” という抽象的な文言によって説明されるこの原理は, “二重スリット実験 2.1” によって体感的に確認出来る. 二重スリットの手前に微弱な粒子源を設置し, 二重スリットに向かい粒子を放出する

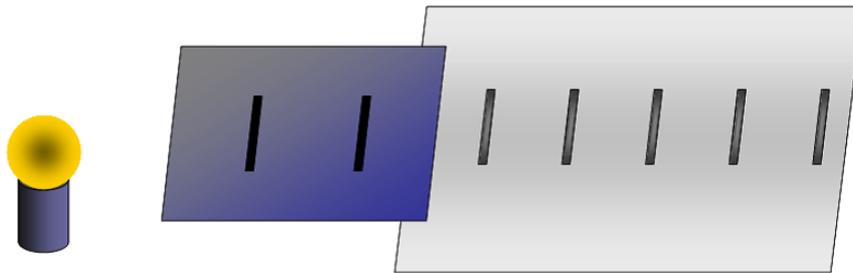


図 2.1: 二重スリット実験

と, 粒子の強度に関わらず—一時に存在する粒子の平均数が 1 個以下という微弱な強度であっても—二重スリットの背後にある観測面に干渉縞が描かれることが確認出来る. この実験における粒子の量子状態は,

$$|\Psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\Psi_{\text{左}}\rangle + |\Psi_{\text{右}}\rangle)$$

というコヒーレントな重ね合わせの状態で表記される. ただし, $|\Psi_{\text{左}}\rangle$ および $|\Psi_{\text{右}}\rangle$ はそれぞれ左スリット, 右スリットが開いているときの状態を示す.

この実験の特色は, 粒子一つだけがそれ自身と干渉するような微弱な強度においても観測されるという点である. その際, 干渉性を失わずに粒子が左右どちらのスリットを通ったかどうかについては言明することが出来ない. また, 粒子は局所性なものであるため左右のスリットを同時に通ったと言明することも出来ない. 量子情報科学ではこの原理を利用することで, 古典情報科学には不可能な演算・処理を行う.

2.3 量子ビット (Qubit)

古典的情報の最小単位である古典ビットは 0 もしくは 1 の 2 通りの状態を表現できる。それに対して量子情報の最小単位である量子ビットは 0 と 1 だけでなく、両方の状態が同時に“重ね合わさった”状態をとることができる。しかし、量子情報は観測することで古典的な情報に収束してしまい、1 量子ビットからは 1 古典ビットの情報しか取り出すことが出来ず、その際に量子情報は破壊されてしまう。また、量子情報には古典的情報と異なり、任意の情報の複製を作ることができないという性質がある。

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”，それぞれの確率波の“位相差”によって以下のような式で表記される。

$$|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle \quad (2.1)$$

このとき、 $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$ であり、観測時に“0”を得る確率が $|\alpha|^2$ であり、“1”を得る確率が $|\beta|^2$ と言うことである。また、図 2.2 に示すような長さが 1 の状態ベクトルによって表現することも出来る。

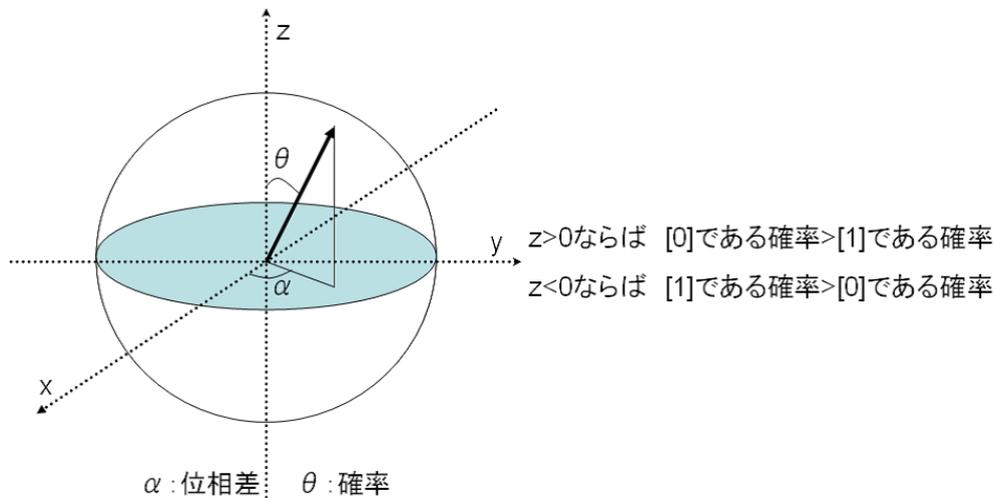


図 2.2: 量子ビット

2.4 Entanglement

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“Entanglement”と呼ぶ。

例えば，複数の量子によって構成された Entanglement において，どれかの量子の値を測定すると残りの量子の値は測定するまでもなく確定的に予測されてしまう．この性質はそれぞれの測定がどんなに離れていようと成り立ち，量子力学が局所实在論に基づく古典論とは異なることを示している．

2.4.1 Bell ペア

二つの量子ビットから成る最大限にもつれた “Entanglement” を “Bell ペア” と呼ぶ．“Bell ペア” を構成する量子ビット対の間には量子相関があり，一方の状態を観測すれば他方が一意的に確定する．相反する状態をとる．

例えば， $|\Psi^+\rangle_{12} = \frac{(|0\rangle_1|1\rangle_2 + |1\rangle_1|0\rangle_2)}{\sqrt{2}}$ で表される “Bell ペア” の状態は確定していないが，一方の状態を観測すると波束の収縮が起こり，他方は観測するまでもなく最初の観測結果とは逆の状態で確定する．以下に “Bell 状態” と呼ばれる直交基底により構成された四つの “Bell ペア” の状態を示す．

$$|\Psi^+\rangle_{12} = \frac{(|0\rangle_1|1\rangle_2 + |1\rangle_1|0\rangle_2)}{\sqrt{2}} \quad (2.2)$$

$$|\Psi^-\rangle_{12} = \frac{(|0\rangle_1|1\rangle_2 - |1\rangle_1|0\rangle_2)}{\sqrt{2}} \quad (2.3)$$

$$|\Phi^+\rangle_{12} = \frac{(|0\rangle_1|0\rangle_2 + |1\rangle_1|1\rangle_2)}{\sqrt{2}} \quad (2.4)$$

$$|\Phi^-\rangle_{12} = \frac{(|0\rangle_1|0\rangle_2 - |1\rangle_1|1\rangle_2)}{\sqrt{2}} \quad (2.5)$$

2.5 Bell 測定

二つの量子ビットにより構成される系において，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 測定の際，二つの量子ビットがそれぞれ別の量子ビットと Entanglement を構成していても，量子状態を直接観測したわけではないので別の量子ビットの状態は確定しない．また，Bell 測定によって状態間パラメータを測定された二つの量子状態は瞬時に破壊される．

2.6 量子 teleportation

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 ペアを構成する片方の量子との間で Bell 測定を行う。測定の瞬間に二つの量子状態は破壊され、Bell ペアの他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、入力した量子の量子状態は破壊され、別の場所に完全な複製となった量子が出力されるこの操作は量子 teleportation と呼ばれる。また、Alice と Bob の間で量子 teleportation を行う際の回路図を 2.3 に示す。

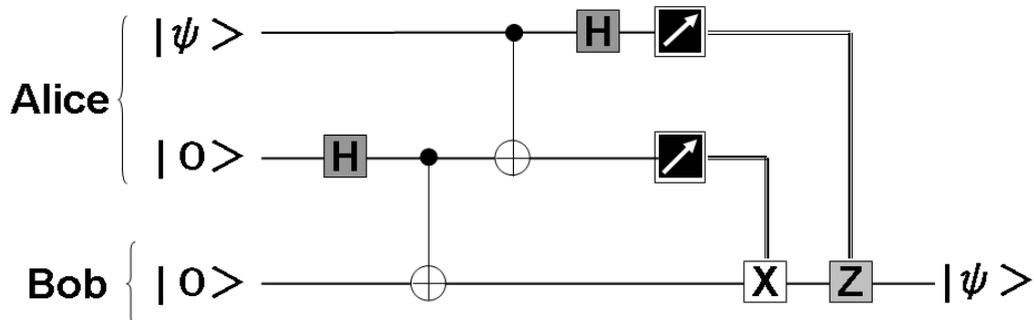


図 2.3: 量子 teleportation 直線は量子通信路，二重線は古典通信路を示す。

第3章 量子ネットワーク

本研究で取り扱う量子ネットワークでは、量子 teleportation を用いた遠距離間量子通信が行われる。量子中継器と光ファイバによって構成される同ネットワークは、現在のネットワーク・アーキテクチャとは本質的に異なった構造を持つ。本章では、量子ネットワークの概念および同ネットワークの重要構成要素である量子中継器とその関連事項、また、本研究の背景となる古典ネットワークにおける経路選択アルゴリズムについて述べる。

3.1 量子中継器

量子中継器は、光ファイバによって相互接続されることで量子ネットワークを構成する。量子通信の際には、任意の2量子中継器間で Entanglement を保持し、量子 Teleportation を行うことで量子情報を転送する。また、量子 teleportation を行う過程で必要になる Entanglement Swapping や Purification といった機能を備える必要がある [5]。量子中継器の関連事項について以下の項で述べる。

3.1.1 Fidelity

Entanglement を構成する二つの量子状態の近さを示す尺度。忠実度とも呼ばれる。想定通りの観測結果が得られる確率を示しており、量子 teleportation の成功率に直結するパラメータである。1に近いほど状態が良いが、0.5を下回った場合、もはや Purification を用いても Fidelity を回復させることが出来ず、Entanglement として扱われない。

3.1.2 Entanglement Swapping

直接接続されていない量子中継器の間で量子 teleportation を行うためには Entanglement Swapping によって Entanglement を接続する必要がある。以下に Entanglement Swapping の概念図 3.1 を示し、実行手順を述べる。

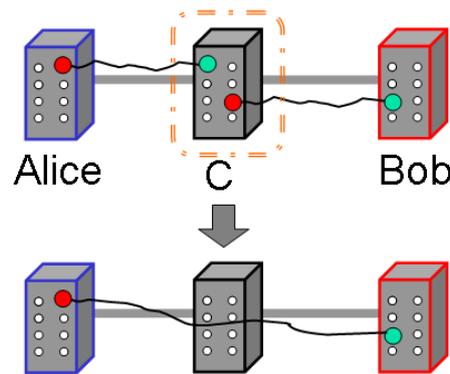


図 3.1: Entanglement Swapping の概念図 . C で行われる Bell 測定によって Alice—C 間の Entanglement と C—Bob 間の Entanglement が接続され , Alice—Bob 間に Entanglement が保持される

量子中継器 C を介して間接接続されている量子中継器 Alice , Bob の間で Entanglement を保持したい場合 , まず Alice~C 間 3.1 と C~Bob 間 3.2 に Entanglement を生成する .

$$|\psi^+\rangle_{AC} = \frac{(|0\rangle_A|1\rangle_C + |1\rangle_A|0\rangle_C)}{\sqrt{2}} \quad (3.1)$$

$$|\psi^+\rangle_{CB} = \frac{(|0\rangle_C|1\rangle_B + |1\rangle_C|0\rangle_B)}{\sqrt{2}} \quad (3.2)$$

量子中継器 C が保持している 2 量子の間で Bell 測定をおこなうと , Alice の所持している量子と Bob の所持している量子の状態差異が判明する . Bell 測定により , 式 3.3 に表される結果が得られた場合 ,

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle + |11\rangle) \quad (3.3)$$

Alice と Bob の所持している量子は式で表される状態にあることがわかる .

$$|\psi^+\rangle_{AB} = \frac{(|0\rangle_A|0\rangle_B + |1\rangle_A|1\rangle_B)}{\sqrt{2}} \quad (3.4)$$

また , Bell 測定により , 式で表される結果が得られた場合 ,

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|01\rangle + |10\rangle) \quad (3.5)$$

Alice と Bob の所持している量子は式??で表される状態にあることが分かる .

$$|\psi^+\rangle_{AB} = \frac{(|0\rangle_A|1\rangle_B + |1\rangle_A|0\rangle_B)}{\sqrt{2}} \quad (3.6)$$

この測定結果を量子中継器 C から Alice と Bob へ古典通信を用いて伝えることで、Alice と Bob の所持している量子が Entanglement になる。この一連の手順を Entanglement Swapping と呼称する。Entanglement Swapping を繰り返すことで、理論的には任意の 2 量子中継器間で Entanglement を保持することが可能である。しかし、Entanglement Swapping で生成される Entanglement の Fidelity は接続前の Entanglement よりも低下しているため、Entanglement Swapping を繰り返すと Fidelity は指数関数的に減少してしまう。よって、長距離間 Bell ペアを生成するためには Fidelity を回復させる手法が必要となる。

3.1.3 Purification

Entanglement の Fidelity は何らかの操作の実行や送信時における光ファイバとの相互作用、時間の経過といった様々な要因で減少してしまう。しかし、二つの低 Fidelity な Entanglement の間で Bell 測定を行うと、一つの高 Fidelity な Entanglement を生成される。Entanglement の数は減るものの、Fidelity が回復するこの操作をエンタングルメントの精製、“Purification[6][7]” と呼称し、概念図を 3.2 に示す。

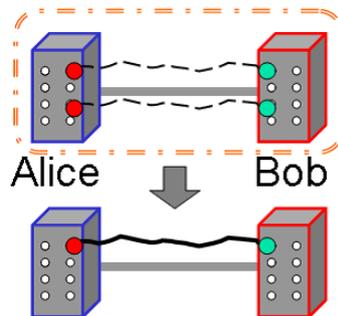


図 3.2: Purification 概念図。Alice—Bob 間に保持されている二つの低 Fidelity な Entanglement 同士の間で Bell 測定を行い、一つの高 Fidelity な Entanglement に精製する。

3.2 量子ネットワーク

量子ネットワークとは、量子中継器と光ファイバによって構成され、量子情報のみを扱うことが出来る Physical Entanglement 層を持つ大規模かつ広域な量子通信の実行を目的とした量子 teleportation ネットワークを指す。また、量子ネットワークの Protokol 階層を図 3.3 に示し、階層毎の機能詳細を表 3.1 に記す。

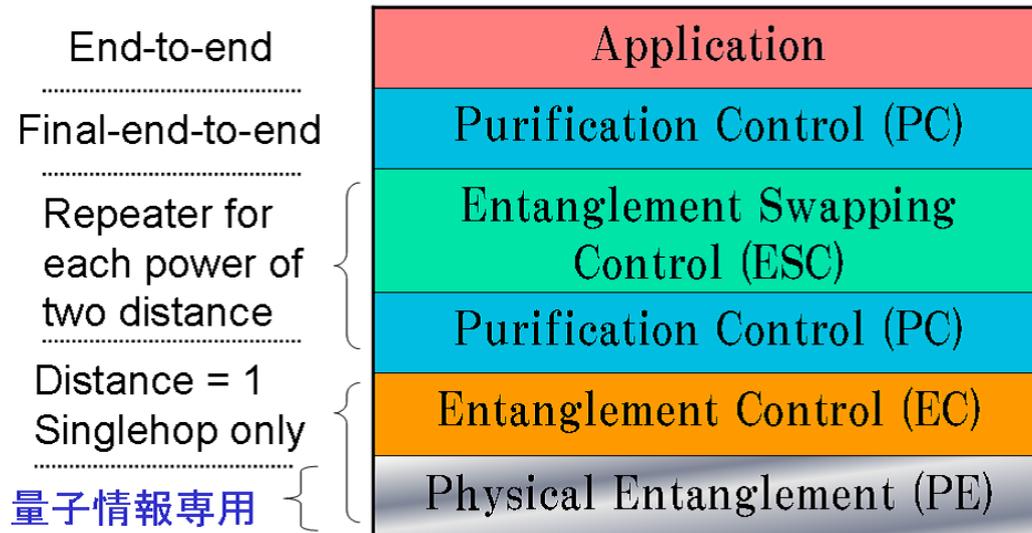


図 3.3: 量子ネットワーク：プロトコル階層図．[8]

表 3.1: 量子ネットワーク：プロトコル階層詳細

階層名	機能詳細
Application (App)	量子鍵配送など，量子情報を利用した機能を実行する階層．
Purification Control (PC)	保持している Entanglement の Fidelity を管理し，Purification の実行を制御する階層．
Entanglement Swapping Control (ESC)	他の量子中継器間で行われる量子通信を中継する際に行う Entanglement Swapping を制御する階層．
Entanglement Control (EC)	隣接中継器間での Entanglement を保持を制御する階層．
Physical Entanglement (PE)	量子情報のみを扱える階層．量子情報への直接的な操作は全てこの階層で行われる．

上記のプロトコルを基にした 4hop 量子ネットワークにおける通信概念を図 3.4 に示す．4hop 量子ネットワークでは，入れ子状に実行される 3 回の Entanglement Swapping で送信側量子中継器 Alice と受信側量子中継器 Bob の間に Entanglement が保持される．しかし，Entanglement Swapping の前後で Purification を繰り返し，最終的に Alice と Bob の

間に Bell ペアが保持された段階で量子 teleportation が実行され、量子通信が実現する。

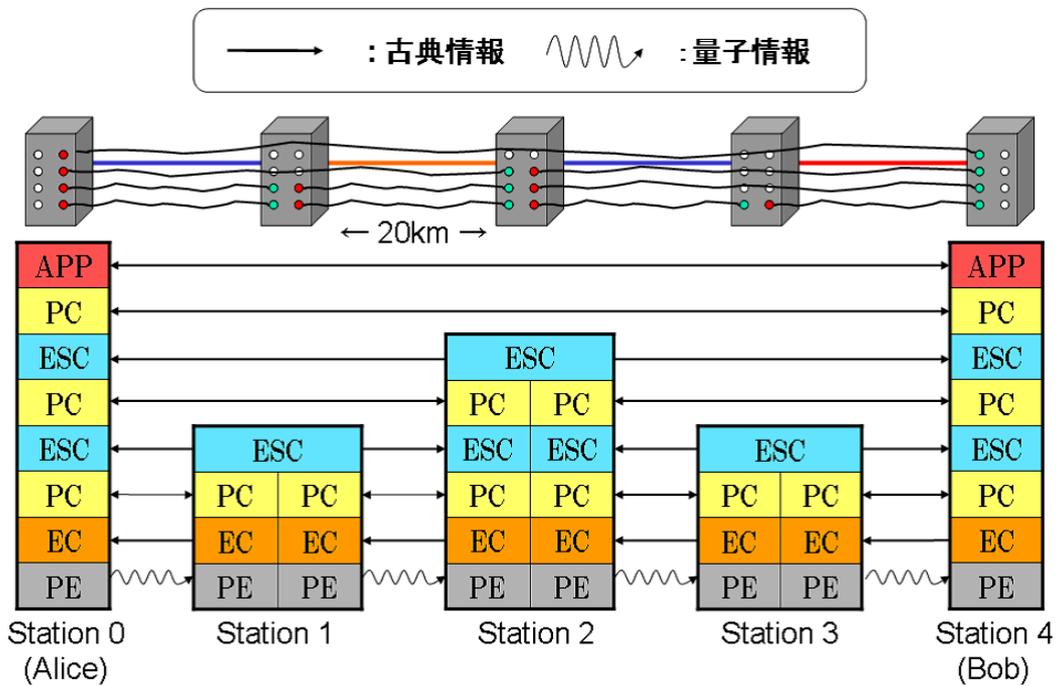


図 3.4: (4hop) 量子ネットワーク：通信概念図

量子ネットワークの用途としては量子情報の利用が必須となる技術，例えば完全暗号方式である量子鍵配送や量子コンピュータへの遠隔地からのアクセス，量子コンピュータ同士の相互通信による並列量子演算などの場面が想定されている。また，本研究では，NII(国立情報学研究所)の根本グループや山本グループなどによって研究されている，量子バス Entanglement を用いた遠距離量子通信の方式を量子ネットワークとして定義している。

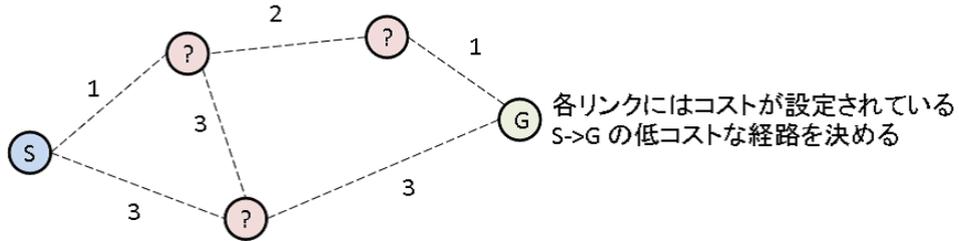
3.3 古典ネットワークにおける Dijkstra's アルゴリズム

Dijkstra's アルゴリズムはグラフ理論における最短経路問題解決アルゴリズムである [9]。経路コスト情報から最短経路を効率的に発見出来るため，古典ネットワークではルータがルーティングテーブルを作成するための OSPF アルゴリズムに応用されている。以下に Dijkstra's アルゴリズムの実行手順を図 3.5 示し，詳細を記す。

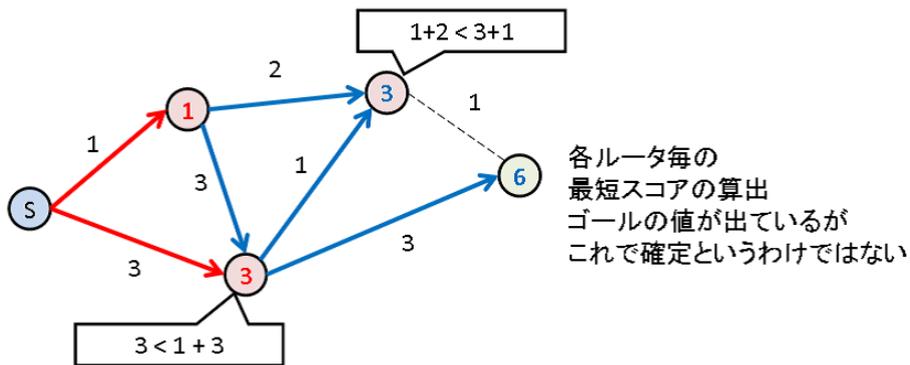
まず，Dijkstra's アルゴリズムを利用するには，スタートルータとゴールルータの間の経路情報を保持しておく必要がある (図 3.5(a))。各ルータまでのコストを経路コストの単

3.3. 古典ネットワークにおける DIJKSTRA'S アルゴリズム 第 3 章 量子ネットワーク

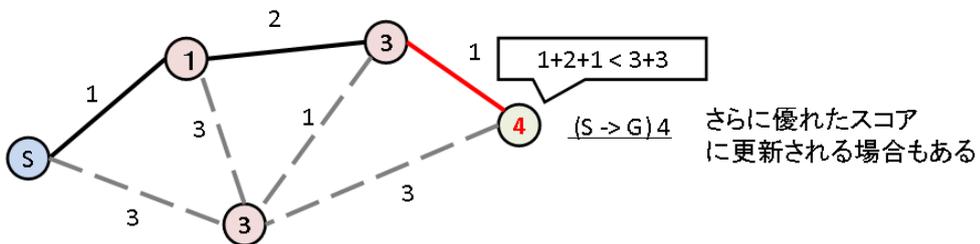
純和を用いて算出していく (図 3.5(b)) . 各ルータまでのコストは , より低いコストで到達できる経路が見つかる毎に更新される (図 3.5(c)) . 経路情報の変化に応じて各ルータまでのコストは動的に変更され , 状況に応じた最短経路を常に把握しておくことができる (図 3.5(d)) . これにより , ネットワーク全体の効率最適化が図られる .



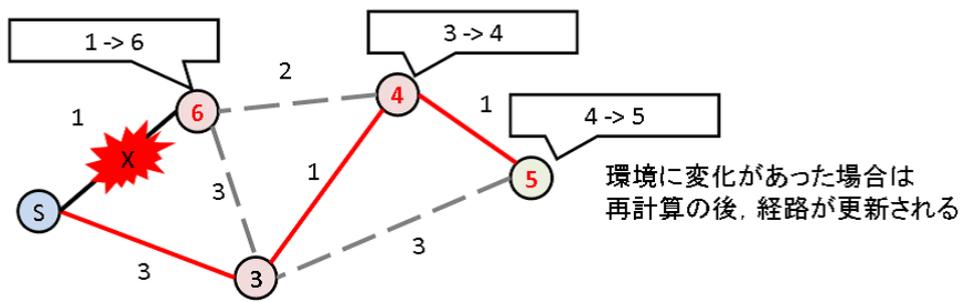
(a) Dijkstra's アルゴリズム実行手順



(b) Dijkstra's アルゴリズム実行手順 2



(c) Dijkstra's アルゴリズム実行手順 3



(d) Dijkstra's アルゴリズム実行手順 4

図 3.5: Dijkstra's アルゴリズムの実行手順

第4章 設計

本章では、まず、量子ネットワークの通信最適化に向けた問題点を整理する。次に、それらの問題に対する解決手法を提案し、広域量子ネットワークにおける最良経路選択アルゴリズムの設計を行う。

4.1 問題点

本節では、最良経路経路選択アルゴリズムを構築するために解決が必要な問題点について述べる。

量子ネットワークにおける経路品質の低下と、伝送される Entanglement の Fidelity 低下には線形相関性があることが知られている。量子通信において、経路品質の低下は Purification の回数増大を招き、最終的な通信速度を低下させることは明白である。しかし、経路品質と通信速度の相関性は明らかになっていない。

また、古典ネットワークにおける通信経路経路の選択には Dijkstra's アルゴリズムが用いられている。リンクコストの単純和によって経路コストを算出し、最良経路を決定する同アルゴリズムは経路選択における効率的かつ有効な手法として知られている。

量子ネットワークにおいて Dijkstra's アルゴリズムを用いるにはリンクコストおよび経路コストの算出法を定義する必要がある。しかし、経路品質の定量化はなされておらず、従って、リンクコストも定義されていない。当然ながら、リンクコストを用いる経路コストの算出法も定義することは出来ない。よって、現状では量子ネットワークに対して Dijkstra's アルゴリズムを適用出来ない。

また、上記の問題を解決したとしても、量子ネットワークにおける経路品質と通信速度の相関性が不明なため、Dijkstra's アルゴリズムによって選択される経路が最良経路であるかどうかの検証が必要になる。

以下の節において、まず、さまざまなタイプの量子ネットワークとその特徴について整理する。次に、経路品質情報を用いてリンクコストおよび経路コストの算出法を定義し、量子 Dijkstra's アルゴリズムを構築するための手法を述べる。さらに、量子 Dijkstra's アルゴリズムの最良経路選択アルゴリズムとしての正当性を確認するための手法を述べる。

4.2 量子ネットワークの分類とその特徴

量子ネットワークは，その経路に含まれる hop 数に応じた Entanglement Swapping の手順から，三種類に分類することが出来る．分類表を以下の表 4.1 に示す．

表 4.1: 量子ネットワーク分類

量子ネットワークの hop 数	Entanglement Swapping 実行手順
1 hop	Entanglement Swapping は不要
2^n hop	対称型 Entanglement Swapping
$n(\neq 2^n)$ hop	非対称型 Entanglement Swapping

本節では，まず，量子ネットワークの構成要素に関する呼称およびネットワークトポロジの表現方法について整理を行い，次に各種量子ネットワークの詳細について述べる．

4.2.1 量子ネットワーク構成要素の呼称および表現方法

本研究における量子ネットワークモデルの構成要素を整理するため，ネットワークトポロジの凡例を図 4.1 に表した．また，構成要素それぞれの呼称および表現方法を表 4.2 に記し，詳細事項を以下に述べる．本節以降，各要素の表記を統一する．

表 4.2: 量子ネットワークの構成要素

構成要素	呼称	表現方法
量子中継器	Alice, Bob, C~I	直方体
Entanglement	Entanglement	不規則線によって結ばれた小円
光ファイバ	光ファイバ・理・高・中・低	直線

4.2.2 1 hop 量子ネットワークの場合 (隣接量子中継器間通信)

隣接する量子中継器間において量子通信を行う場合，Entanglement Swapping は不要であり，Purification を繰り返し実行し，Bell ペアを作り出すことで量子通信を行うことが出来る．必然的に，スループットは Purification の必要実行回数および Entanglement の

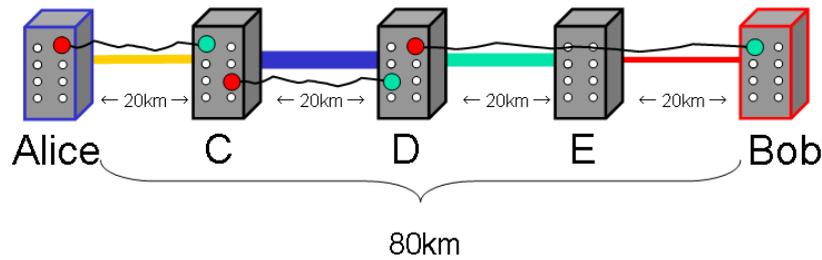


図 4.1: 量子ネットワーク概念図．量子中継器内部に描かれた小円は保持可能な量子ビットの数を表し，不規則線で繋がれた中円は Entanglement を表す．また，光ファイバの幅は経路品質を表しており，一般に，光ファイバの経路品質は理想状態，高・中・低品質の 4 状態を扱う．

生成数とほぼ連動しており，経路品質から直接的な影響を受けると想定される．よって，1 hop 量子ネットワークにおける通信速度と経路品質の相関性解析は，経路品質の定量化によるリンクコストの定義に重要な役目を持つ．

4.2.3 2^n hop 量子ネットワークの場合

2^n hop の経路長を持つ量子ネットワークを介して量子通信を行う場合，入れ子状に行う Entanglement Swapping が最良実行手順となる．この実行手順を対称型 Entanglement Swapping と呼称する．

Alice と Bob の間における対称型 Entanglement Swapping の実行手順を図 4.2 に示し，詳細を以下に述べる．

- (4hop 間) 対称型 Entanglement Swapping 実行手順
 1. (1hop おきの) 量子中継器 C と E で Entanglement Swapping を実行
Entanglement : Alice—C + C—D , D—E + E—Bob
 2. (2hop おきの) 量子中継器 D で Entanglement Swapping を実行
Entanglement : Alice—D + D—Bob
 3. 量子中継器 Alice と量子中継器 Bob の間で Entanglement が保持される．
Entanglement : Alice—Bob

実際には，Entanglement Swapping の前後において必要回数の Purification が行われることになるが， m Step 目において m hop おきの量子中継器で Entanglement Swapping を行うことで，効率的に目的の量子中継器間で Entanglement を保持することが出来る．

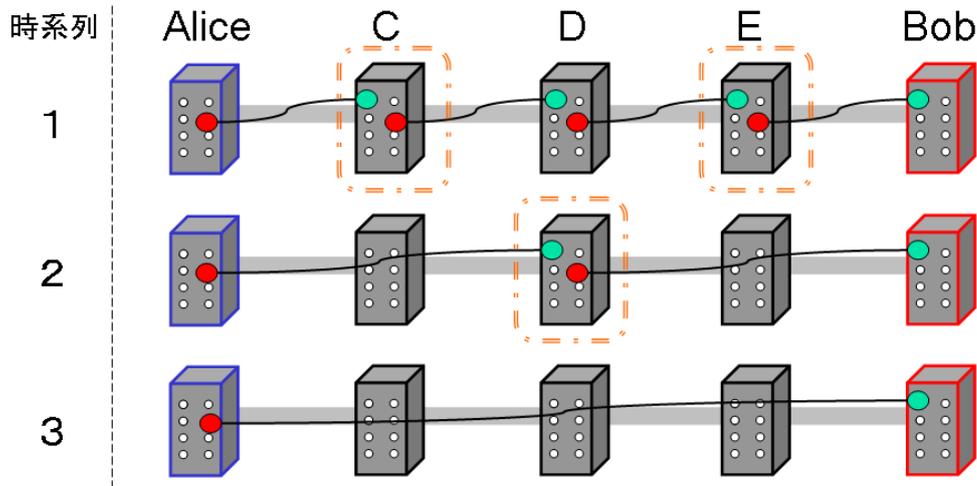


図 4.2: (4hop 間) 対称型 Entanglement Swapping 概念図

4.2.4 非 2^n hop 量子ネットワークの場合

2^n hop ではない経路長を持つ量子ネットワークを介して量子通信を行う場合，対称型 Entanglement Swapping を実行することは出来ない．任意の量子中継器間に Entanglement を保持しようとした場合，常に (hop 数-1) 回の Entanglement Swapping が行われることになる．しかし，その実行手順は以下に示すように多岐に渡る．

Alice と Bob の間における非対称型 Entanglement Swapping の実行手順例を図 4.3 に示し，詳細を以下に述べる．

- 非対称型 Entanglement Swapping 実行手順例

1. 量子中継器 C で Entanglement Swapping を実行
Entanglement : Alice—C + C—D , D—E , E—F , F—Bob
2. 量子中継器 D で Entanglement Swapping を実行
Entanglement : Alice—D + D—E , E—F , F—Bob
3. 量子中継器 E で Entanglement Swapping を実行
Entanglement : Alice—E + E—F , F—Bob
4. 量子中継器 F で Entanglement Swapping を実行
Entanglement : Alice—F + F—Bob
5. 量子中継器 Alice と量子中継器 Bob の間で Entanglement が保持される．
Entanglement : Alice—Bob

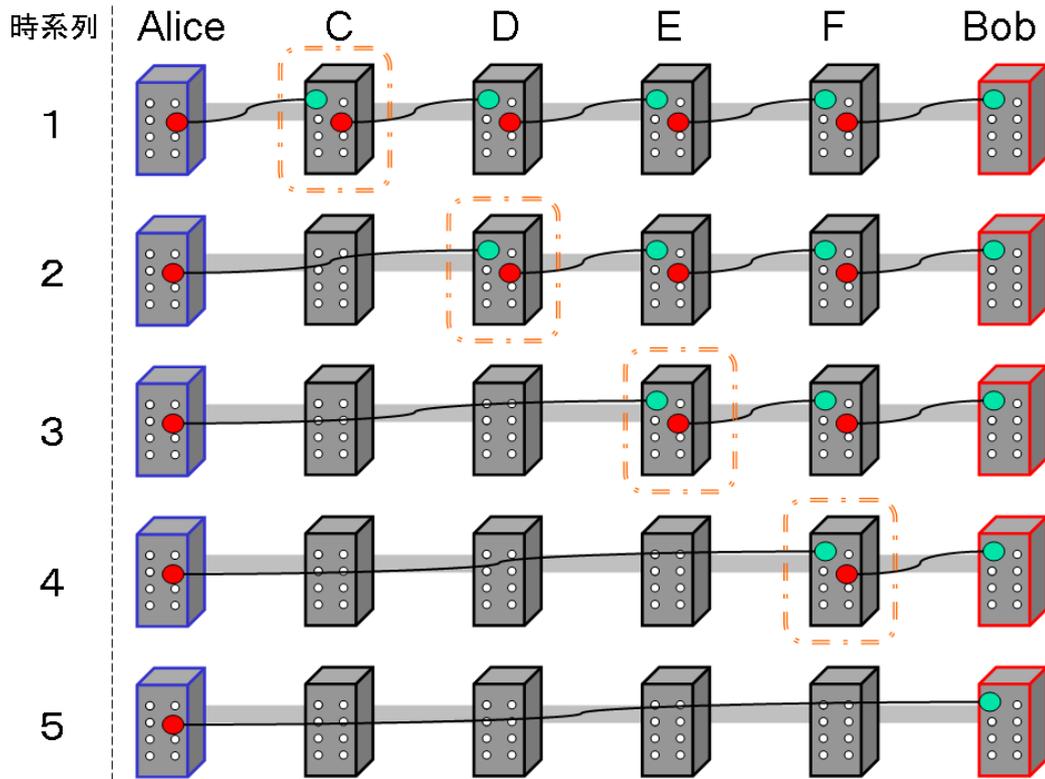


図 4.3: 非対称型 Entanglement Swapping 実行手順例

また，上記の例とは異なる非対称型 Entanglement Swapping の実行手順例を図 4.4 に示し，詳細を以下に述べる．

● 非対称型 Entanglement Swapping 実行手順例 2

1. 量子中継器 C と E で Entanglement Swapping を実行
Entanglement : Alice—C + C—D , D—E + E—F , F—Bob
2. 量子中継器 D で Entanglement Swapping を実行
Entanglement : Alice—D + D—F , F—Bob
3. 量子中継器 F で Entanglement Swapping を実行
Entanglement : Alice—F + F—Bob
4. 量子中継器 Alice と量子中継器 Bob の間で Entanglement が保持される．
Entanglement : Alice—Bob

このように，対称型 Entanglement Swapping を行えない基数の量子中継器を介する Entanglement Swapping を非対称型 Entanglement Swapping と呼称する．現在のところ，任

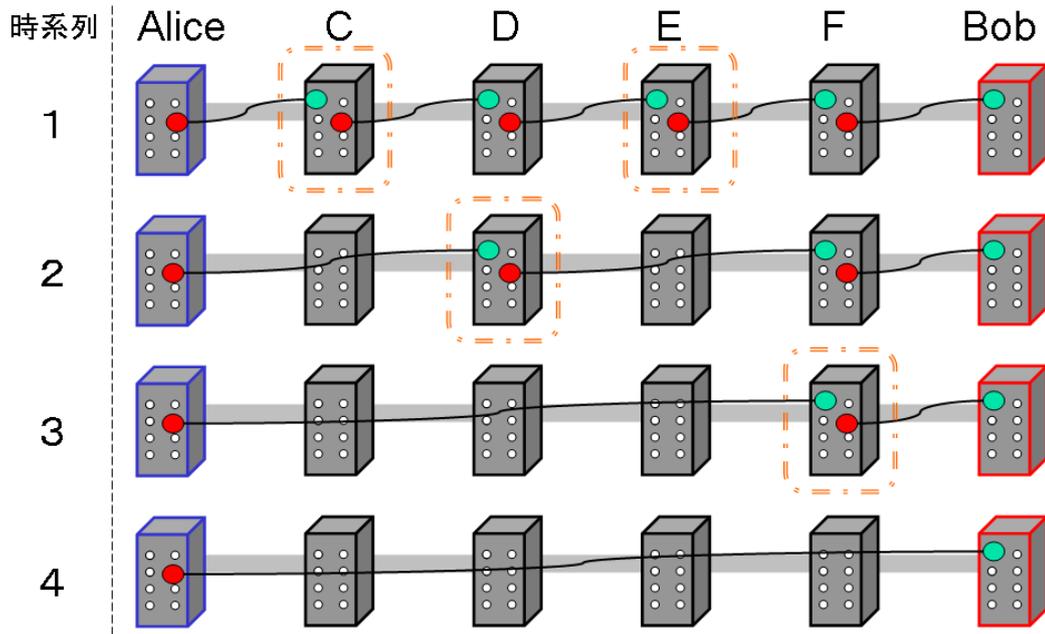


図 4.4: 非対称型 Entanglement Swapping 実行手順例 2

意の hop 数における非対称型 Entanglement Swapping の最良実行手順は明らかになっていない。また，最良実行手順の発見手法は今後の重要研究課題と考えられる。

4.3 量子ネットワークにおける最良経路選択アルゴリズム

量子通信を行いたい 2 基の量子中継器，Alice と Bob の間に複数の経路候補が存在する図 4.5 のような複雑な量子ネットワークを想定する。

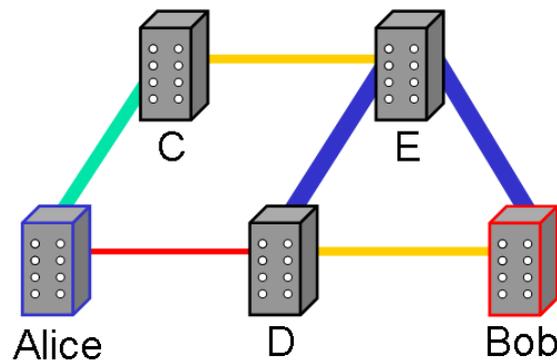


図 4.5: 複雑な量子ネットワーク

このネットワークには以下に示す四種類の経路候補が存在する .

- 図 4.5 における経路候補

1. 2hop 経路 : Alice—低—D—中—Bob
2. 3hop 経路 : Alice—低—D—理—E—理—Bob
3. 3hop 経路 : Alice—高—C—中—E—理—Bob
4. 4hop 経路 : Alice—高—C—低—E—理—D—低—Bob

このような経路候補群から最良経路を選択するためのアルゴリズムの構築手法について次項以降で述べる .

4.3.1 量子ネットワークにおける通信コストの算出法

経路情報を定量化し , 量子ネットワークにおける通信コストの算出するには ,

$$\text{通信コスト} = f(\text{Cost}_{AC} + \text{Cost}_{CE} + \text{Cost}_{EB}) \quad (4.1)$$

上式のように経路情報を基に線形計算を行いたい .

古典ネットワークにおける Dijkstra's アルゴリズムでは ,

$$\begin{aligned} \text{通信コスト} &= \sum_i \text{cost}_i \\ i &\in \{ \text{リンクコスト}_{AC} + \text{リンクコスト}_{CE} + \text{リンクコスト}_{EB} \} \end{aligned} \quad (4.2)$$

上式のようにリンクコストの単純和を用いることで通信コストを算出する . しかし , 量子ネットワークにおいては Dijkstra's アルゴリズムの有効性は確認されておらず , また , リンクコストの定義が行われていないため , 通信コストの算出法を定義することも出来ない . 従って , 最良経路選択アルゴリズムを構築するためには経路品質の定量化によるリンクコストの定義を行う必要があるが , そのためには量子通信の定量化を行う必要がある .

4.3.2 スループットの定義

量子通信を行う任意の 2 量子中継器間における量子 teleportation の秒間実行回数を , 本研究における “スループット” として定義する .

4.3.3 リンクコストの定義

Entanglement を転送した場合，転送距離に応じて Fidelity の不可避な劣化が発生する．また，転送経路（光ファイバ）の品質に応じてさらなる情報劣化が発生する．リンクコストを定義するため，隣接量子中継器間の量子通信において，さまざまな経路品質におけるスループットを測定する．その際，理想状態経路におけるスループットを基準値として，同経路のリンクコストを 1 と定義する．また，任意の品質を持った経路におけるリンクコストを以下の式を用いて定義する．

$$\text{リンクコスト} = \frac{\text{理想状態経路におけるスループット}}{\text{任意の経路におけるスループット}} \quad (4.3)$$

4.3.4 量子 Dijkstra's アルゴリズムの定義

本項では，経路コストの算出法および，経路コストを基に導出される経路スコア，さらに経路スコアを用いて経路選択を行う量子 Dijkstra's アルゴリズムについて述べる．

まず，経路コストは前項の手法で定量化された各経路リンクコストの単純総和によって算出する．

経路コスト = リンクコストの総和

次に，他の評価値と経路コストの比較を容易にするため，経路コストの逆数を用いて経路スコアを算出する．完全理想状態の経路を 100 点とした場合， n hop の経路の経路スコアは以下の式を用いることで算出できる．

$$\text{経路スコア} = \frac{n}{\text{経路コスト}} \times 100 \quad (4.4)$$

このスコアによってさまざまな経路候補を順位付けする手法を，量子 Dijkstra's アルゴリズムとして定義する．

4.3.5 量子 Dijkstra's アルゴリズムの検証方法

前項で定義された量子 Dijkstra's アルゴリズムが，最良経路選択アルゴリズムとしての正当性を持つのか検証する必要がある．そのために，量子 Dijkstra's アルゴリズムによって決定された経路候補の順位とシミュレータによって計測されたスループットに基づく経路候補の順位を比較する．それにより，量子 Dijkstra's アルゴリズムが最大のスループットを持つ経路候補を最良経路として選択出来ているのか，また，他の経路候補をスループット順に順位付け出来ているのかどうかを確認する．最終的に，量子 Dijkstra's アルゴ

リズムにおける経路スコアの算出法改善を経て、経路候補のスコアとスループットの順位が完全一致する経路選択アルゴリズムの構築を目指す。

4.4 まとめ

本章では、最良経路選択アルゴリズムの構築に向けた設計を行った。まず、量子ネットワークの特性把握のため、同ネットワークの分類を行った。次に、量子ネットワークの構成要素の表記を統一するための整理を行った上で、隣接中継器間における量子 teleportation の秒間実行速度を基準値として、スループットを定義した。また、経路品質の定量化によるリンクコストを定義を行った。そして、リンクコストを用いた量子 Dijkstra's アルゴリズムを定義し、同アルゴリズムの最良経路選択アルゴリズムとしての正当性検証手法を確立した。

第5章 実装

本章では、本研究に用いた量子ネットワーク・シミュレータ“Cellprot6”を運用するために構築されたデータ取得環境，グラフ描画環境およびCellprot6 関連の実装について述べる．

5.1 データ取得環境

5.1.1 Inputfile について

Cellprot6 では“InputFile”(以下.in ファイル)のパラメータを調整することで，任意の環境を持った量子ネットワークにおける量子通信のシミュレートを行うことが出来る．

以下に凡例として，図 5.1 に示した構成の量子ネットワークをシミュレートするための“.in ファイル”を記す．そのうち，第 6 章の評価を行う際に調整する必要がある部位を図 5.2 に示し，調整する必要のない部位を図 5.3 に示した．また，Inputfile に含まれる主要なパラメータの詳細を表 5.1 に記した．

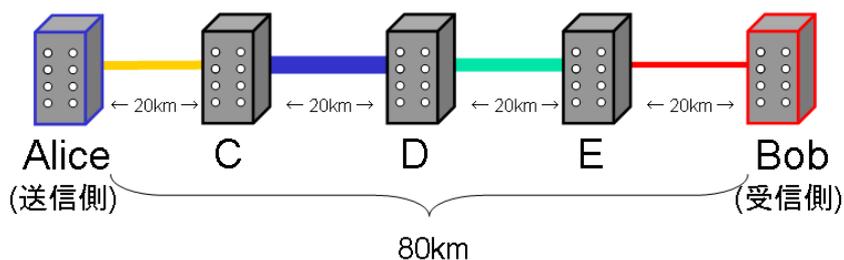


図 5.1: 量子ネットワーク凡例

```
thresholdbands: 0.60,0.75,0.90,0.94
endbands: 0.601,0.751,0.901,0.941
thresholdbanddeltas: 0.04,0.04,0.04,0.04
numqubits: 8
totalnumbits: 200 #量子ビット転送数
totaltime: 1000000 #最大試行時間
## 量子ネットワークの hop 数が  $2^7 = 128$  ならば numlevels == 7
numlevels: 2
levelthresholds: 0.98,0.98,0.98
endlevelthresholds: 0.981,0.981,0.981
levelthresholddeltas: 0.2,0.2,0.2
### ここから n-hop ネットワーク用パラメータ
numstations: <integer>
leftswapdistance: <vector>
leftswapthresholds: <vector>
rightswapdistance: <vector>
rightswapthresholds: <vector>
### ここまで n-hop ネットワーク用パラメータ
## totaldistance は減衰長表記, 4 が約 100km, 50 が 1280km に対応
totaldistance: 3.2
systemloss: 0 #単位は dB
## 何番目のリンクが弱い, 理論劣化に加えて何 dB 下がるか (20km で)
weaklinks: 1, 3, 4
weaklinklosses: 0.2, 0.1, 0.3
```

図 5.2: .in ファイル: 調整するパラメータ

```
toscreen: 1
model: 2
# Purification の実行順決定方針
# 0: 上位優先 1: 下位優先 2: 帯域制御
purschepol: 2
lowx: 1
highx: 1
numx: 1
loglinear: 1
arbnoise: 0.0
arbgatenoise: 0.0
# Entanglement Swapping の実行順決定方針
# 1: 入れ子状 2: dB 損失均衡 3: 任意手順
swapplan: 1
linkthrustmeth: 1
```

図 5.3: “.in ファイル” : 調整しないパラメータ

5.1.2 Perl スクリプトによる Cellprot6 の制御

本研究では、量子ネットワークにおけるスループットを計測するため、

- “.in ファイル” の適宜修正
- Cellprot6 の並列実行
- 同条件のシミュレートは 10 回ずつ実行

以上の 3 点を満たしたシミュレートを行った。また、出力された “.out ファイル群” (図 5.4) はデータ処理用 Perl スクリプトによって “.result ファイル” (図 5.5) に統合・処理される。

“.result ファイル” には、 “.out ファイル” の内容に対応した経路スコア、ファイル名、スループット、経路品質最悪部位の情報が記されている。上記の一連の過程を Perl スクリプトにより自動化し、効率的データ取得環境を構築した。同環境の概念図を図 5.6 に示す。

表 5.1: 主要パラメータ詳細

変数名	詳細
thresholdbands endbands thresholdbanddeltas	Purification を実行するための基準となる Fidelity の閾値 . 複数の値を設定することで, Purification の効率的実行が図れるが, 過度に多い値を設定すると却って Purification の実行効率は低下する . 凡例の値は, 手動による適切な調整が行われているが, 厳密な最適解ではない (また, 厳密解算方法は知られていない) .
numqubits	量子中継器一基が同時に制御可能な量子ビットの数 . 各量子中継器は送信用と受信用に numqubits の半数にあたる数の量子ビットを振り分けることになる .
totalnumbits	シミュレートにおいて転送する量子ビットの数 . 量子 Teleportation の成功数と等しい .
totaltime	シミュレートにおける最大試行 (内部) 時間 . totalnumbits もしくは totaltime の値が満たされた時点でシミュレートは終了し, ログファイルが生成される .
numlevels	対称型 Entanglement Swapping における実行 Step の数 . 量子ネットワークの hop 数を n としたとき, $\log_2 n$ の値を numlevels として設定する .
levelthresholds endlevelthresholds levelthresholddeltas	Entanglement Swapping および量子 Teleportation を行うための基準となる Fidelity の閾値 .
totaldistance	量子ネットワークの総延長 . 減衰率表記であり, totaldistance * 25km = 総延長 (km) となる .
systemloss	量子中継器内部における Fidelity の低下量 . 本研究では経路品質とスループットの関係に注目するため, systemloss は常に 0 として設定した .
weaklinks weaklinklosses	経路品質とその場所 . 理論値に加えて発生する 20km あたりの . 情報損失量と損失が発生する経路を設定する

```
setting link 1 to dBloss 0.1
setting link 2 to dBloss 0.2
setting link 4 to dBloss 0.3
In qubits/second:
throughput (least squares) = 5.75547
throughput std. dev. (least squares) = 0.0137817
X intercept (least squares) = 0.00128045
```

図 5.4: .out ファイル (一部抜粋)

```
throughput file pathscore worstlevel
83.6820 10.out 20.3995 1
71.9424 11.out 18.2163 1
67.1141 12.out 15.8163 2
54.6448 13.out 11.3346 3
```

図 5.5: .result ファイルの (一部抜粋)

5.2 データ解析環境「R」によるグラフ描画

本論文に用いたグラフはデータ解析環境「R」によって描画されている。Cellprot6 によって出力された“.result ファイルは”，図 5.7 に示したコードによって画像化されている。

5.3 Cellprot6

5.3.1 非 2^n hop 量子ネットワークへの対応

図 5.2 に示された“.in ファイル”のパラメータの以下のように修正する。

- numlevel を NULL に設定
- numstation と各 swapdistance, swapthreshold に値を入力

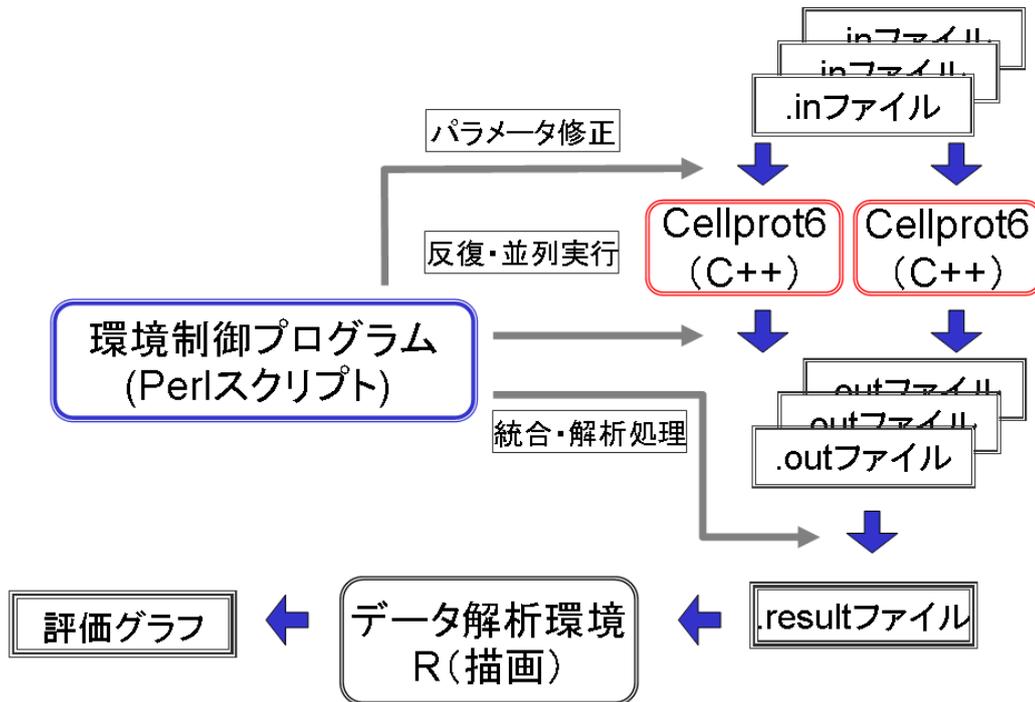


図 5.6: データ取得環境概念図

その結果、量子中継器の接続状況設定が拡張され、図 5.8 の凡例に示されるような非 2^n hop の経路から構成される量子ネットワークを構築出来る。

このようなネットワークでは、入れ子状の対称型 Entanglement Swapping を適用することが出来ないが、“swapdistance” と “swaphreshold” によって任意の Entanglement Swapping パターンを決定出来る。これにより、最適 Entanglement Swapping パターンの探索が可能になっている。よって、非 2^n hop の経路を持つ量子ネットワークは、“.in ファイル” の設定に基づいて、任意の Entanglement Swapping パターンが生成される。

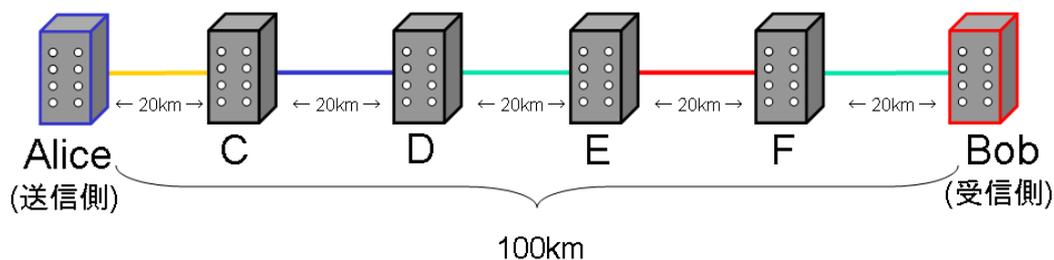
また、図 5.1 のような、 2^n hop の経路を持ち対称型 Entanglement Swapping を適用出来る量子ネットワークは、“.in ファイル” の設定に基づいて、図 5.9 に示される部位によって自動的に Entanglement Swapping パターンが生成される。

```

df<-read.table("2hop/2hopdata.result", header=F)
df2<-subset(df,df$V4==0)
plot(df2$V1, df2$V3, xlim=c(30,100), ylim=c(0,30), pch=0,col=2,
      xlab="path score", ylab="throughput(qubit/second)") par(new=T)
df2<-subset(df, df$V4==1)
plot(df2$V1, df2$V3, xlim=c(30,100), ylim=c(0,30), pch=1, col=3,
      xlab="", ylab="") par(new=T)
df2<-subset(df, df$V4==2)
plot(df2$V1, df2$V3, xlim=c(30,100), ylim=c(0,30), pch=2, col=4,
      xlab="", ylab="") par(new=T)
df2<-subset(df, df$V4==3) plot(df2$V1, df2$V3, xlim=c(30,100),
      ylim=c(0,30), pch=3, col=5, xlab="", ylab="")
leg<-c("No weak link", "Only contains weakish links", "Contains very
      weak links","Contains worst links")
legend(30, 30, leg, col=2:5, pch=c(0,1,2,3), ncol=1, cex=1.1,
      pt.bg="pink")

```

図 5.7: R による描画コード

図 5.8: 非 2^n hop 量子ネットワーク凡例

```
vector<vector<int>> IdentifySwapPoints(GraphPath *pathp) {
    int N = pathp->size();
    if (!ispoweroftwo(N)) {
        std::cerr << N << " is not a power of two,
        and that's all I understand." << std::endl;
        exit(-1);
    }
    vector<vector<int>> retval = vector<vector<int>>(N);
    for( int k=0; k <= parms.numlevels; k++)
    {
        int p = binpow(k); //binpow(k) = 2^k
        for (int l=0; l < N; l += p)
            retval[l].push_back(p);
    }
    return retval;
};
```

図 5.9: 2^n hop 量子ネットワーク生成部位

第6章 評価

本章では、第4章の設計および、第5章の実装に基づいて、最良経路選択アルゴリズムの適用とその評価を行う。

まず、隣接量子中継器間における量子通信のスループットと経路品質の相関性を解析する。それにより、量子ネットワークにおける経路品質と経路情報の定量化を行い、リンクコストおよび経路スコア算出法を定義する。

次に、さまざまな経路候補に対する最良経路選択アルゴリズムを用いた経路スコア付けを行い、シミュレータを用いて算出したスループットと比較する。両手法による経路評価ランキングの近似性を検証することで、最良経路選択アルゴリズムの有効性を評価する。

6.1 隣接量子中継器間における量子通信の解析

本節では、さまざまな状態の経路を介した隣接量子中継器間の量子通信を解析した。隣接量子中継器間で量子通信を行う場合、送信側量子中継器 Alice から受信側量子中継器 Bob に対して Bell ペアの一方をダイレクトに伝送することが可能なので、Entanglement Swapping を介在させることなく量子 Teleportation を実行することが出来る。そのため、量子情報の Fidelity が劣化する局面を経時劣化および、転送劣化に限定することが出来る。このことを利用して、以下の2点を目的とした解析を行った。

1. 経路品質の定量化：リンクコストの定義

経路品質の変化に応じたスループットを測定することで両者の相関性を解析する。これにより経路品質を定量化し、それを基にしたリンクコストの定義を行う。

2. 経路情報の定量化：経路スコア算出法の定義

リンクコストを定義することで、任意の量子通信において介する経路情報から経路コストを算出することが可能になる。最良経路選択アルゴリズムの有効性を検証するため、経路コストおよびそれを基にした経路スコアの算出法を定義する。

6.1.1 解析概要

隣接量子中継器間で量子通信を行う場合，量子中継器間で保持された Entanglement の間で Purification を繰り返すことで Fidelity を改善し，Bell ペアを生成して量子 Teleportation を行う．経路品質の劣化とともに Bell ペアの生成に必要な Purification の回数が増大し，結果として量子通信のスループットが低下する．本解析では光ファイバに 100 段階の経路品質を設定し，Entanglement 伝送時の情報劣化量とスループットの相関関係に注目した．

6.1.2 解析環境

本解析における量子ネットワークポロジを図 6.1 に示す．直方体は送信側量子中継器 Alice と受信側量子中継器 Bob，直線は光ファイバを，不規則線で接続された円は Entanglement を示している．

本解析に用いた量子中継器および光ファイバの詳細を，表 6.1 に記す．

表 6.1: 隣接量子中継器間における量子通信の解析環境

量子中継器		光ファイバ	
保持可能量子ビット数	8 qubits	単位経路長	20 km
転送量子ビット総数	200 qubits	総経路長	20 km
量子中継器使用数	2 基 (Alice・Bob)	情報劣化量	3.4(理論値) + x dB/20km
量子中継器経由数	0 基 (直結状態)	情報劣化幅	x = 0.01 ~ 0.99 dB/20km

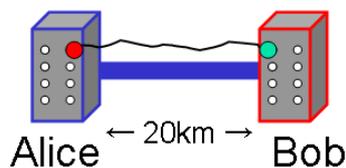


図 6.1: 隣接量子中継器間におけるネットワークポロジ

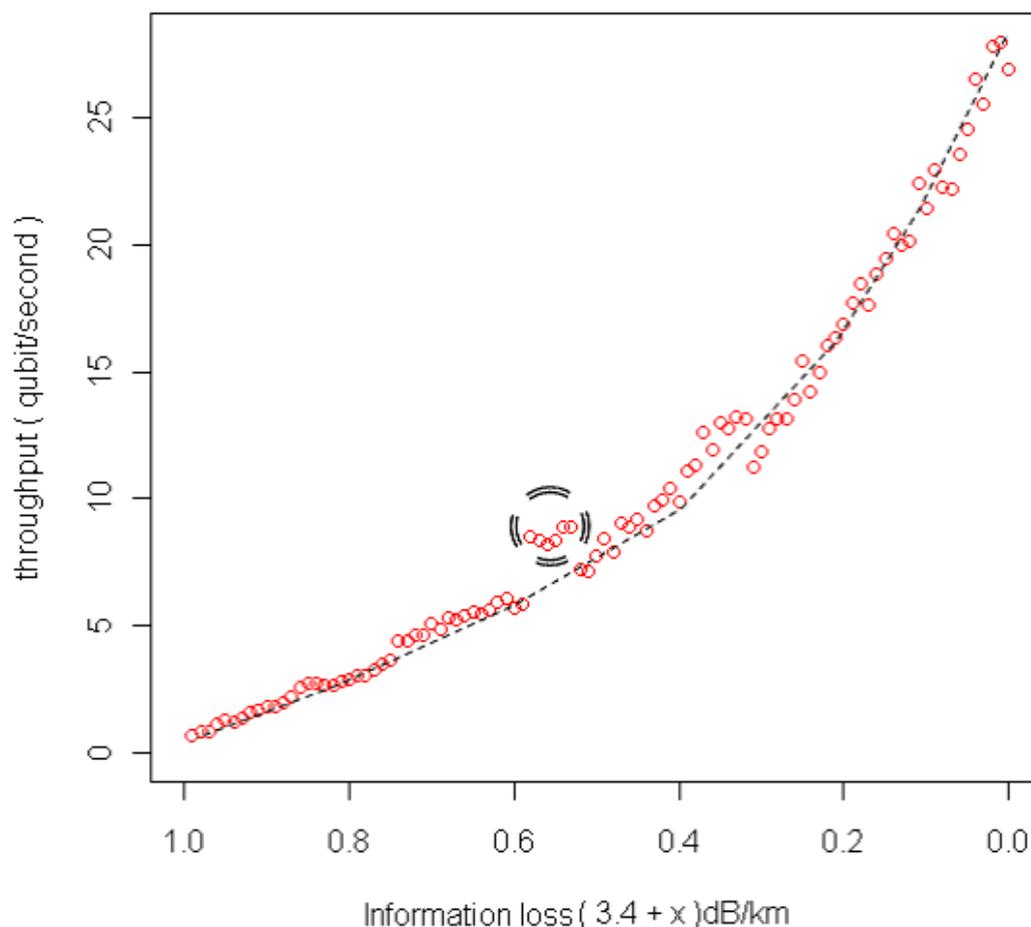


図 6.2: 隣接量子中継器間における量子通信速度測定結果．点線は近似曲線であり， x について 0.2 毎にプロットした．破円は非線形特異点であり，詳細を本文に示した．

6.1.3 経路品質とスループットの相関性

解析結果を図 6.2 に示す．

隣接量子中継器間の量子通信においては，測定結果から明らかなように，経路品質とスループットの間には強い線形相関性が確認できる．また，非線形特異点を確認出来るが，これは Purification を実行する際の Fidelity 基準値の調整問題である，“levelthreshold の最適化問題”に関連した現象だと考えられる．しかし，同問題の根本的解決は本研究の主旨と異なること，また，levelthreshold の手動調整により一応の最適化は果たしていることから特異点に関するこれ以降の言及は行わない．

6.1.4 リンクコストの定義

4.3.3 に基づいて，理想状態光ファイバの場合，リンクコスト = 1 と定義する．

また，各経路品質におけるスループットからそれぞれのリンクコストが算出される．

次節以降の評価に用いる 4 種類の光ファイバに関して，経路品質に応じたスループットおよびリンクコストを表 6.2 に示す．

表 6.2: 光ファイバの分類

経路品質	情報劣化量 (dB/20km)	スループット (qubits/sec)	リンクコスト
理想状態	3.4	26.90	1(基準値)
高品質	3.5	21.43	1.39
中品質	3.6	16.87	1.59
低品質	3.7	11.86	2.27

6.1.5 経路スコアの定義

4.3.4 に基づいて，任意の n hop 経路におけるリンクコストの総計を経路コストと定義する．また，以下の式を用いて同 hop の経路をランク付けするための経路スコア (完全理想状態経路 = 100) を算出する．

$$\text{経路スコア} = \frac{n}{\text{経路コスト}} \times 100 \quad (6.1)$$

6.2 2hop 量子ネットワーク解析

本節では，Entanglement Swapping を用いた量子通信を行うための最小構成である，2hop の経路長を持ち，さまざまな状態の経路から構成される量子ネットワークを介した量子通信を解析した．2hop 量子ネットワークの特性を調査し，また，各経路におけるスループットと経路スコアの比較を行うことで，同ネットワークにおける量子 Dijkstra's アルゴリズムの有効性を検証する．

6.2.1 解析概要

量子 Dijkstra's アルゴリズムの検証を行うため，量子ネットワークの経路スコアを算出し，計測されたスループットと比較する必要がある．そのために，まず，表 6.2 に示された 4 種類の光ファイバを用いて 2hop で構成されるあらゆる組み合わせの経路候補を設定した．そして，($4^2 = 16$ より)16 種類の経路を持つ 2hop 量子ネットワークの経路スコアとスループットを解析した．

6.2.2 解析環境

本解析における量子ネットワークトポロジを図 6.3 に示す．直方体は送信側量子中継器 Alice と経由する量子中継器および受信側量子中継器 Bob，直線は光ファイバを示している．また，各量子中継器は表 6.2 に定義された 4 種類の光ファイバによって接続されている．これらの光ファイバを全ての組み合わせで用いることで，16 種類の経路が解析可能となる．

本解析に用いた解析環境の詳細を，表 6.3 に記す．

表 6.3: 2hop 量子ネットワークにおける量子通信の解析環境

量子中継器		光ファイバ	
保持可能量子ビット数	8 qubits	単位経路長	20 km
転送量子ビット総数	200 qubits	総経路長	40 km
量子中継器使用数	3 基	解析経路数	16 種類
量子中継器経由数	1 基	経路品質	理想状態，高・中・低品質

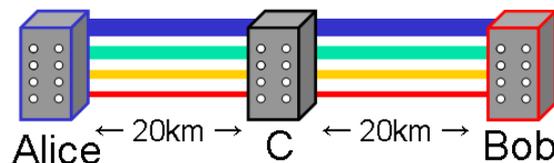


図 6.3: 2hop 量子ネットワークトポロジ．各量子中継器は 4 種類の光ファイバで接続されており， $16(4^2)$ 種類の経路設定によってシミュレート可能となっている．

6.2.3 解析結果

解析結果を以下の図 6.4 に示す。

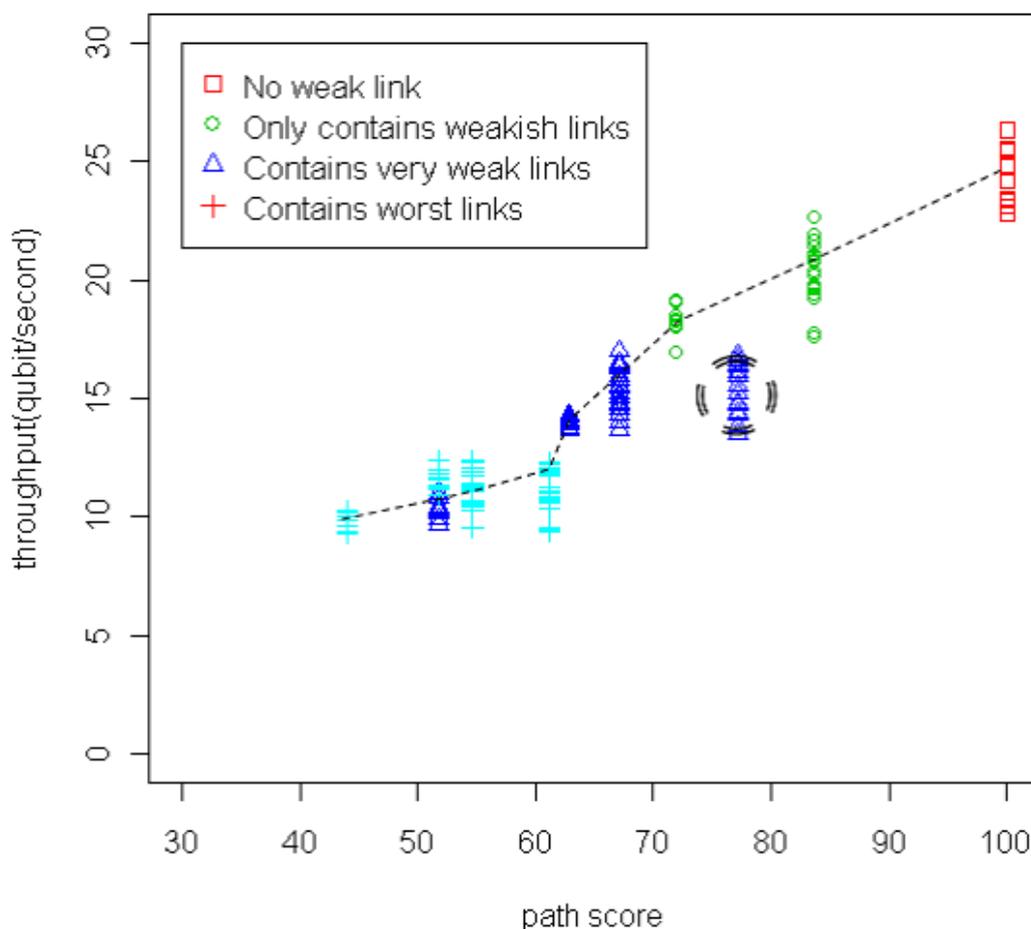


図 6.4: 2hop 量子ネットワーク解析結果．点線は特異点部分を除いた平均線である．また，破円で囲んだ部分は【理想状態—中品質】および【中品質—理想状態】の経路であり，著しく平均線から乖離しているため，特異点として扱った．詳細と考察を本文に記す．

2hop 量子ネットワークにおいて，部分的に経路スコアとスループットのランキングに逆転部位が確認される．これは【理想状態—中品質】および【中品質—理想状態】の経路であり，経路品質の最悪部位がボトルネックになったため，と考えられる．しかし，最悪部位が中品質である経路のスループットは経路スコアに応じて線形増加しており，また，大局的にも良好な線形相関性を保持されている．よって，2hop 量子ネットワークにおける量子 Dijkstra's アルゴリズムの有効性が確認できた．

6.3 4hop 量子ネットワーク解析

本節では，対称型 Entanglement Swapping を用いることになる，4hop の経路長を持ち，さまざまな状態の経路から構成される量子ネットワークを介した量子通信を解析した．Entanglement Swapping をおこなう量子中継器の数が 3 倍に増えたことで変化する量子ネットワークの特性を調査し，また，中距離間量子通信における量子 Dijkstra's アルゴリズムの有効性を検証した．

6.3.1 解析概要

4hop 量子ネットワークにおける 4 種類の光ファイバの組み合わせは，($4^4 = 256$ より) 256 種類に達するが，本解析では全ての均質経路 4 種類に加え，あらゆる連続的な経路接続 12 種類を設定し，合計 16 種類の幅広い経路スコアを持つ 4hop 量子ネットワークを選定した．これにより，解析試行回数を大幅に削減した上で多様な 4hop 量子ネットワークの解析を行うことが可能となった．

6.3.2 解析環境

本解析における量子ネットワークトポロジを図 6.5 に示す．直方体は送信側量子中継器 Alice と経由する量子中継器および受信側量子中継器 Bob，直線は光ファイバを示している．また，各量子中継器は表 6.2 に定義された 4 種類の光ファイバによって接続されている．これらの光ファイバを全ての組み合わせで用いることで，最大 256 種類の経路が解析可能となる．

本解析に用いた解析環境の詳細を，表 6.4 に記す．

表 6.4: 4hop 量子ネットワークにおける量子通信の解析環境

量子中継器		光ファイバ	
保持可能量子ビット数	8 qubits	単位経路長	20 km
転送量子ビット総数	200 qubits	総経路長	80 km
量子中継器使用数	5 基	解析経路数	16 種類
量子中継器経由数	3 基	経路品質	理想状態，高・中・低品質

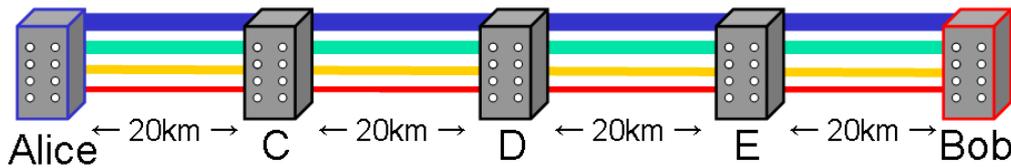


図 6.5: 4hop 量子ネットワーク概念図．各量子中継器は 4 種類の光ファイバで接続されており， $256(4^4)$ 種類の経路設定によってシミュレート可能となっている．

6.3.3 解析結果

解析結果を以下の図 6.6 に示す．

4hop 量子ネットワークにおいても，大局的には経路スコアとスループットは線形相関性を保持しているといえる．しかし，破円部 a に顕著なボトルネックが確認される．さらに，経路スコア 80 点付近において，僅かな逆転現象が確認される．リンクコスト算出時において，1 との解離度に応じた補正を行うことで上記の現象が解消出来る可能性もあるが，今後の研究課題としたい．

また，同スコアにおけるスループットが二群に分離している部位も確認される（破円部 b）．これは，直接的には 1hop 目の経路品質が 2hop 目以降の経路品質よりもスループットに影響を与えていることを示している．しかし，経路品質そのものよりも，Entanglement Swapping における各量子中継器の使用頻度がスループットに影響を与えていると考えられる．なぜならば，（量子 Teleportation を行うまで Entanglement を保持し続けるために）使用頻度の高い量子中継器 Alice に品質の低い光ファイバが接続されていた場合，Bell ペア生成のために必要な Purification の総計の増大と，空量子ビットの少なさが相乗効果的に負荷となるからである．前節に比べて必要な Entanglement Swapping の回数が増大した 4hop 量子ネットワークにおいて，より精度の高い経路スコアを算出するためには，量子中継器の使用頻度を考慮にいれた補正項の導入など，量子 Dijkstra's アルゴリズムの改善が必要だと考えられる．

6.4 8hop 量子ネットワーク解析

本節では，8hop の経路長を持ち，さまざまな状態の経路から構成される量子ネットワークを介した量子通信を解析した．Entanglement Swapping の実行数が飛躍的に増加したことで変化する量子ネットワークの特性を調査し，また，長距離間量子通信における量子 Dijkstra's アルゴリズムの有効性を検証した．

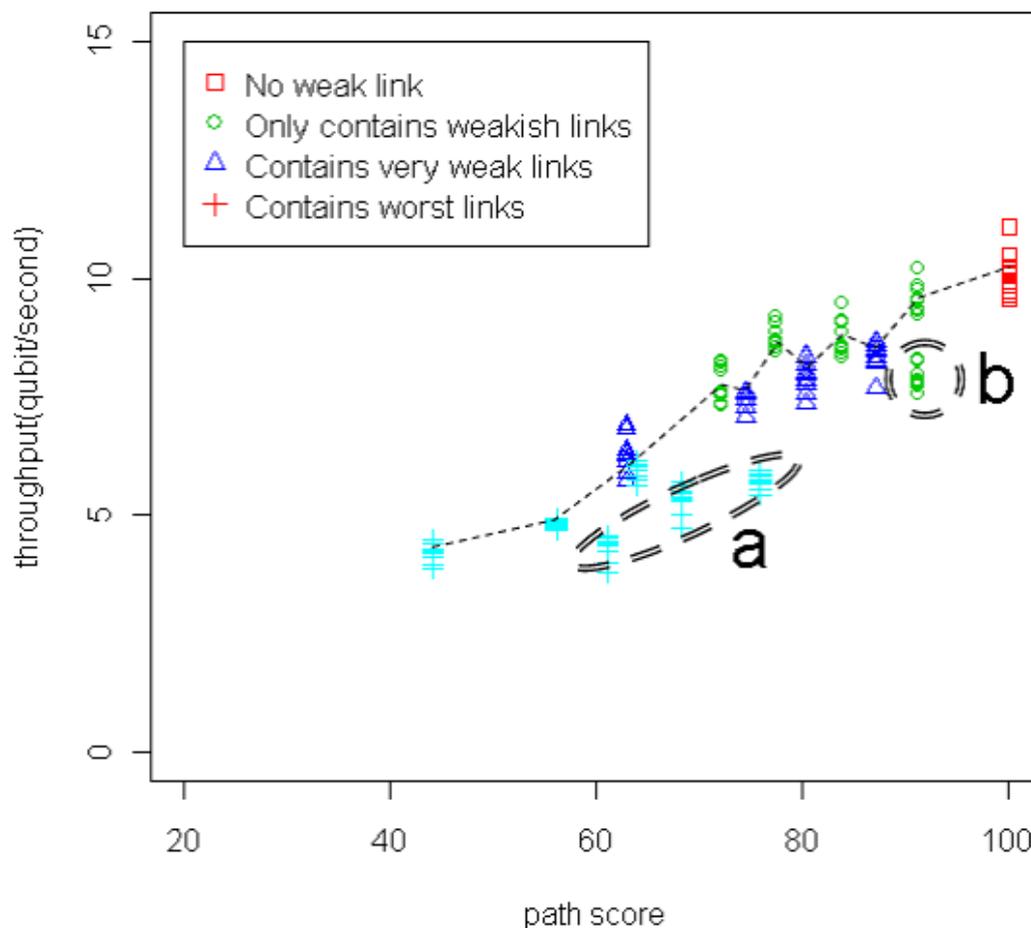


図 6.6: 4hop 量子ネットワーク解析結果．点線は特異点部分を除いた平均線である．また，破円 a で囲んだ部分は【1hop 目に低品質経路が設定された】の経路群であり，破円 b で囲んだ部分は【高品質—理想状態—理想状態—理想状態】の経路である．これらの部分は著しく平均線から乖離しているため，特異点として扱った．詳細と考察を本文に記す．

6.4.1 解析概要

前節で評価した 16 種類の 4hop 経路をそれぞれ理想状態の経路を用いて 4hop 延長し，8hop となった量子ネットワークの特性を解析した．これにより，Entanglement Swapping 試行回数の増加と，経路長の変化がスループットに与える影響を確認することが可能になった．

6.4.2 解析環境

本解析における量子ネットワークトポロジを図 6.7 に示す．直方体は送信側量子中継器 Alice と経由する量子中継器および受信側量子中継器 Bob，直線は光ファイバを示している．また，前半 4hop における各量子中継器は表 6.2 に定義された 4 種類の光ファイバによって接続されている．後半 4hop における各量子中継器は理想状態光ファイバによって接続されており，経路品質がスループットに与える悪影響は極小化され，Entanglement Swapping の影響を顕在化させた解析を行えると考えられる．

本解析に用いた解析環境の詳細を，表 6.5 に記す．

表 6.5: 8hop 量子ネットワークにおける量子通信の解析環境

量子中継器		光ファイバ	
保持可能量子ビット数	8 qubits	単位経路長	20 km
転送量子ビット総数	200 qubits	総経路長	160 km
量子中継器使用数	9 基	解析経路数	16 種類
量子中継器経由数	7 基	経路品質	理想状態，高・中・低品質

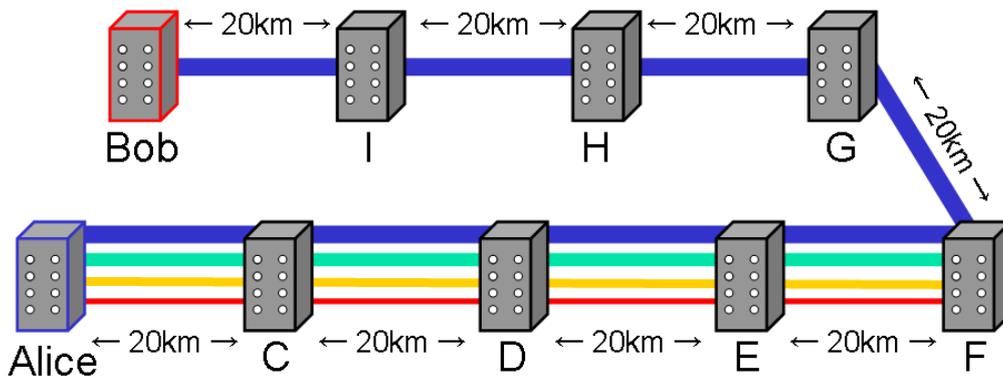


図 6.7: 8hop 量子ネットワークトポロジ．前半 4hop の量子中継器は 4 種類の光ファイバで接続されているが，後半 4hop の量子中継器は理想状態光ファイバで接続されている．これにより， $256(4^4)$ 種類の 4hop 経路が経路延長によって引き起こす性質変化をシミュレート可能となっている．

6.4.3 解析結果

解析結果を以下の図 6.8 に示す。

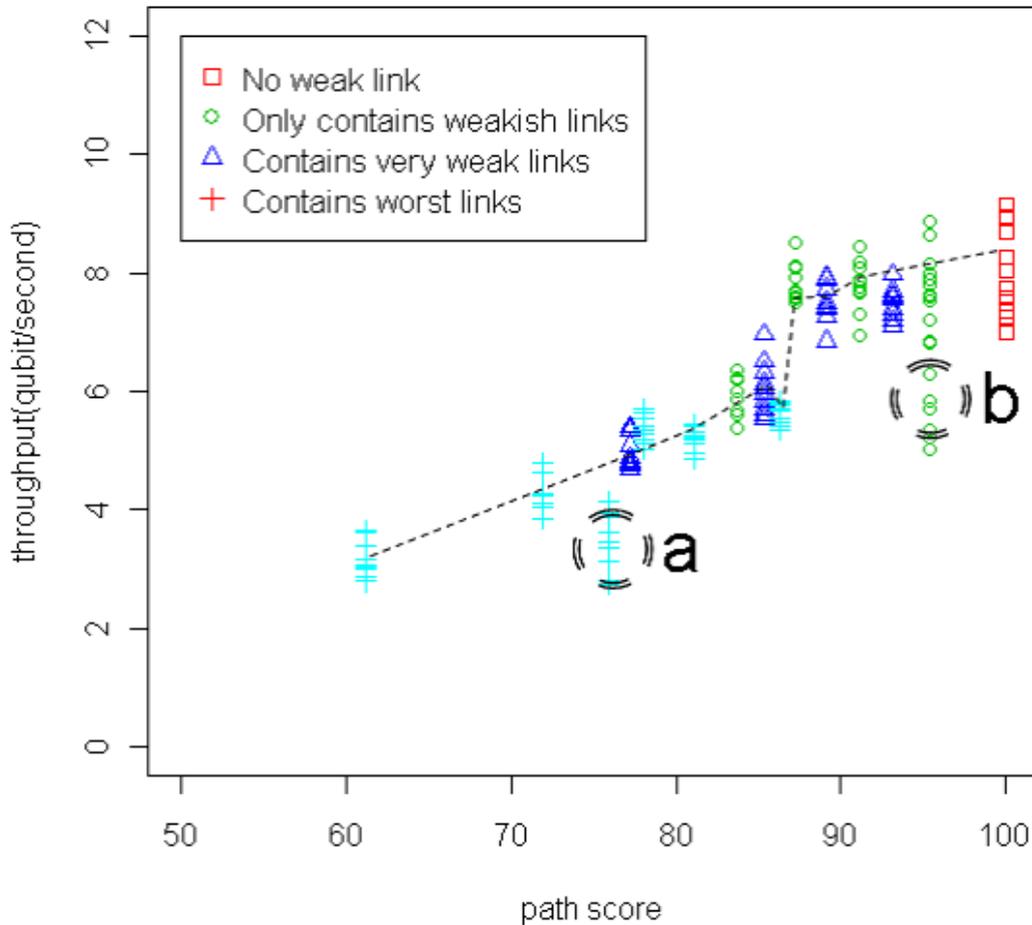


図 6.8: 8hop 量子ネットワーク解析結果．点線は特異点部分を除いた平均線である．また，破円 a,b で囲んだ部分はそれぞれ【1hop 目に最悪部位が設定された】経路であり，これらの部分は著しく平均線から乖離しているため，特異点として扱った．詳細と考察を本文に記す．

8hop 量子ネットワークにおいても，経路スコアとスループットは良好な線形相関性を保持しているといえる．また，経路延長により，4hop までに出現していたボトルネックの大半が潜在化した結果，量子 Dijkstra's アルゴリズムの精度が向上した点は注目に値する．しかし，前節の 4hop 量子ネットワーク解析において指摘された量子中継器の使用頻度がもたらすスループットへの影響がより顕在化している．

6.5 量子 Dijkstra's アルゴリズムの有効性とまとめ

経路スコアとスループットの線形相関性が確認されたことにより、量子ネットワークにおいても Dijkstra's アルゴリズムによる経路選択手法が有効であると言える。しかし、リンクコストを基にしたスループットの大きかな推計は可能であるが、より精度を高めるためには、Purification の levelthreshold 最適化および、量子中継器の使用頻度に応じたリンクコスト補正項の導入が必要であると考えられる。

第7章 結論

7.1 まとめ

本研究では、量子ネットワークにおけるスループットを解析し、広域量子ネットワークにおける最良経路選択アルゴリズムを構築した。

既存研究における、量子ネットワークの研究は、均質な距離と品質の経路によって構成され、対称的なエンタングルメント・スワッピングによって量子通信を行うことが出来る理想的かつ抽象的なネットワーク・モデルを対象に行われてきた。

現実の経路品質は非均質であり、経路品質の低下は量子通信のスループットを押し下げることは明白である。量子ネットワーク制御アルゴリズムに必須となる最良経路選択アルゴリズムを構築するためには、経路品質を考慮した、より現実的な量子ネットワーク・モデルの挙動を解析しなくてはならない。

しかし、そのような量子ネットワークを解析する際に直面する問題として、同ネットワークにおける通信の定量化が行われていないことが挙げられる。これにより、経路品質・経路情報をリンクコスト・経路スコアに変換することが出来ず、経路候補のポテンシャルを基にしたランク付けを困難にしている。

本研究では、まず、単位経路長あたりの情報劣化量とスループットの相関性に注目することで、経路品質の定量化を行った。これにより、量子ネットワークを構成する各経路に対して、その品質に応じたリンクコストを定義した。次に、経路が持つリンクコストの合計値とスループットの相関性に注目することで、経路情報の定量化を行った。これにより、経路情報を基にした量子ネットワークの経路コストおよび経路スコアの算出手法を定義した。

これらの定義を用いることで、経路候補にスコアを付け、そのランキングに応じて経路選択を行う量子 Dijkstra's アルゴリズムの適用が可能となった。また、同アルゴリズムの有効性を検証するため、まず、さまざまな経路候補に対して同アルゴリズムを適用し、順位付けを行った。次に、同じ経路候補に対してシミュレータを利用し、スループットを算出して順位付けを行った。両方の順位付けを比較し、高い近似性を確認したことで量子 Dijkstra's アルゴリズムの有効性が明らかとなった。これにより、量子 Dijkstra's アルゴ

リズムを量子ネットワークにおける最良経路選択アルゴリズムとして用いることが可能になった。

その結果、今後はシミュレートを必要とせずに経路情報からスコア付けを行うことで、大まかなスループットを推計し、最良経路の選定と経路候補群のランク付けを高い精度で行うことが可能になった。

本研究により、将来の大規模かつ広域な量子ネットワーク制御アルゴリズム構築に向けた課題の一つであった経路品質の定量化手法が確立した。また、量子ネットワークにおける Dijkstra's アルゴリズムの有効性を示したことで、より精度の高い経路選択手法の確立に向けた道筋が開かれた。

7.2 今後の課題と目標

本節では、最良経路選択アルゴリズムを改善・発展させるために解決する必要がある課題と今後の目標について述べる。

7.2.1 量子中継器使用頻度補正項の導入

最良経路選択アルゴリズムの精度向上のため、経路情報だけではなく、量子中継器に関する情報の定量化も行い、経路コスト算出時の補正項として扱う必要がある。以下に、現段階で解析が必要であると考えられている要素を述べる。

- 量子中継器に接続された上・下流の経路情報
- 量子中継器が量子ビットを保持していない空白時間
- Entanglement Swapping のタイミングと、それに伴う Purification の回数

これらの要素は関連性を持っていると推測されるが、定量化および体系化がなされておらず、補正項の導入に向けた今後の研究課題である。

7.2.2 自由 hop 量子ネットワークへの対応

本研究を継承するかたちで、任意の hop 数からなる量子ネットワークの解析を行い、エンタングルメント・スワッピングの最適化問題を解決する必要がある。以下に、現段階で研究が必要であると考えられている手法を述べる。

- hop 数と経路品質に応じた静的な Entanglement Swapping の最良実行手順
- もしくは、量子中継器の状況に応じた動的な Entanglement Swapping の最良実行手順

任意の hop 数からなる量子ネットワークにおいて、これらの手法はネットワーク・ポテンシャルを引き出すためにも重要である。同一経路における量子通信の最適化問題と複数経路からの最良経路選択問題は表裏一体であり、同時に解決されると想定される。また、これらの問題の解決は、任意の経路品質・hop 数を持った、より現実的な量子ネットワークのための最良経路選択アルゴリズムが構築を意味し、今後の重要研究課題といえる。

7.2.3 通信輻輳量子ネットワークへの対応

前項までの課題を解決した上で、量子通信が輻輳する量子ネットワークの通信最適化アルゴリズム構築を目指す。多元的な量子中継器の制御が必要な同アルゴリズムの構築は、大規模かつ広域な量子ネットワーク制御アルゴリズム構築に向けた理論分野における一つの到達点となり、将来の研究課題といえる。

謝辞

本論文の作成にあたり、ご指導頂いた慶應義塾大学環境情報学部教授村井純博士，同学部教授徳田英幸博士，同学部教授中村修博士，同学部教授武田圭史博士，同学部准教授楠本博之博士，同学部准教授高汐一紀博士，同学部准教授三次仁博士，同学部准教授植原啓介博士，同学部専任講師重近範行博士，同学部専任講師中澤仁博士に感謝致します。

また，絶えず御指導と御助言を頂きました慶應義塾大学環境情報学部専任講師 Rodney D. Van Meter III 博士に感謝致します。

本研究を進めていく上で，多大な助言，お手伝いを頂きました，東京大学助教石原知洋氏に感謝致します。

そして，本研究を進めていく上で，様々な励ましと助言を頂きました，慶應義塾大学政策・メディア研究科後期博士課程岡田耕司氏，堀場勝広氏，片岡広太郎氏，田崎創氏，工藤紀篤氏，久松剛氏，松園和久氏，水谷正慶氏，松谷健史氏，空閑洋平氏，同研究科修士課程六田佳祐氏，黒宮佑介氏に感謝致します。同大学環境情報学部吉田拓哉氏，石崎佳織氏，鶴飼佑氏，澤田暖氏，村上滋希氏，中村遼氏，三部剛義氏と徳田・村井・楠本・中村・高汐・重近・バンミーター・植原・三次・中澤合同研究プロジェクトの皆様感謝致します。

共に卒論を執筆した，慶應義塾大学総合政策学部永山翔太氏，上原雄貴氏，勝利友香氏，同大学環境情報学部波多野敏明氏に感謝致します。

また，研究室において，将棋の対局相手をしていただいた全ての方々に感謝いたします。この素晴らしい息抜きが無ければ，到底研究を継続することは出来ませんでした。

最後に，大学入学から4年間に渡る体育会兼研究生活において，多大なる支援を継続していただいた両親に心から感謝致します。

以上を持って，謝辞といたします。

参考文献

- [1] C. H. Bennett, G. Brassard, C. Crépeau, R. Josza, A. Peres, and W. Wootters. Teleporting an unknown quantum state via dual classical and EPR channels. *Physical Review Letters*, 70:1895–1899, 1993.
- [2] W. Dür, H.-J. Briegel, J. I. Cirac, and P. Zoller. Quantum repeaters based on entanglement purification. *Physical Review A*, 59(1):169–181, Jan 1999.
- [3] C. H. Bennett and G. Brassard. Quantum cryptography: Public key distribution and coin tossing. In *Proc. IEEE International Conference on Computers, Systems, and Signal Processing*, pages 175–179. IEEE, December 1984.
- [4] A.K. Ekert. Quantum cryptography based on Bell’s theorem. *Physical Review Letters*, 67(6):661–663, 1991.
- [5] H.-J. Briegel, W. Dür, J.I. Cirac, and P. Zoller. Quantum repeaters: the role of imperfect local operations in quantum communication. *Physical Review Letters*, 81:5932–5935, 1998.
- [6] W. Dür and H.-J. Briegel. Entanglement purification for quantum computation. *Physical Review Letters*, 90(6):067901, 2003.
- [7] W. Dür and H.J. Briegel. Entanglement purification and quantum error correction. *Rep. Prog. Phys.*, 70:1381–1424, 2007.
- [8] Rodney Van Meter, Thaddeus D. Ladd, W. J. Munro, and Kae Nemoto. System design for a long-line quantum repeater. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 17(3):1002–1013, jun 2009.
- [9] EW Dijkstra. A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische Mathematik*, 1(1):269–271, 1959.

付録A Cellprotによる評価値出力手法

A.1 Cellprotの運用

本研究で使用した量子ネットワークシミュレータ“Cellprot 6”はパラメータを設定したInputfileを用いることで任意の評価が可能となっている。

A.1.1 評価手順

- perlscriptによるinputfileにおけるパラメータの自動変更および並列演算
- shellscripによるoutputfileにおける評価値の抽出・編集
- Rによる抽出された評価値の描画

上記のようにscriptを用いた効率的データ収集を行った。

A.1.2 評価時に変更したパラメータについて

- thresholdbands, endbands, mthresholdbanddeltas
 - purification 実行基準値。
 - 隣接間量子通信評価時に手動による最適化を行った。
- weaklinks, weaklinklosses
 - 経路品質。
 - scriptによる自動変更を行った。
- numlevels
 - 量子中継器の設置数と連動。
 - 評価内容に応じて適宜調整した。

- totaldistance
 - 総距離
 - numlevels に応じて適宜調整した。

A.1.3 評価時に変更しなかったパラメータについて

- numqubits
 - 量子中継器のポテンシャルを表す。
 - 評価値に一貫性を保持させるため、固定した。
- totalnumbits,totaltime
 - 転送量子ビット数および最大評価時間。
 - 評価値に一貫性を保持させるため、固定した。
- levelthresholds,endlevelthresholds,levelthresholddeltas
 - 量子通信実行時におけるエンタングルメントの Fidelity。
 - 評価値に一貫性を保持させるため、固定した。
- systemloss
 - Fidelity に対するハードウェア損失。
 - 経路品質を評価の中心とするため、0 で固定した。
- toscreen
 - 出力対象 (コンソール出力, File 出力) を設定可能。

付録B Posters

本付録では、本論文に関わる学会発表で用いた資料を添付する。

B.1

Path Selection in Heterogeneous Quantum Networks

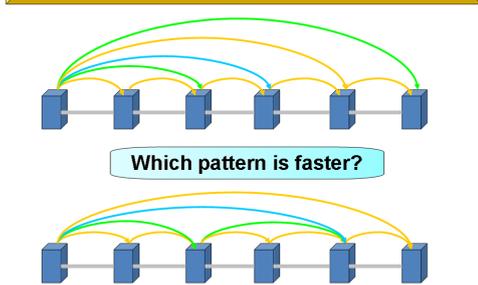
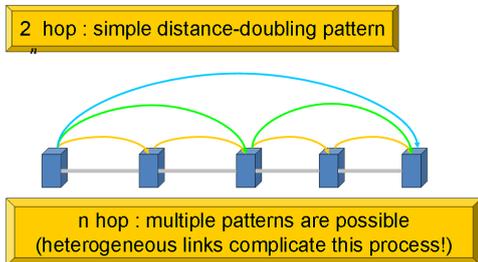


Keio University Takahiko Satoh, Rodney Van Meter
<http://www.sfc.wide.ad.jp/aqua> satoh@sfc.wide.ad.jp

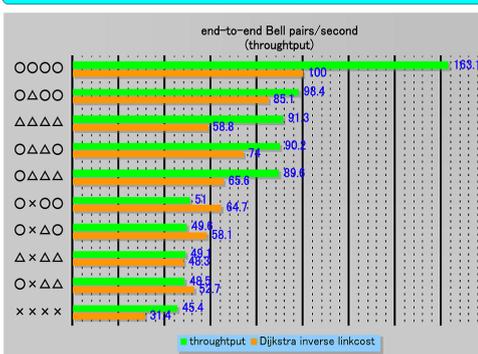
Goal Establish a method for selecting the best path in a complex, heterogeneous network.

Method ①Propose link cost definition.
 ②Evaluate with various entanglement swapping patterns to confirm effectiveness of Dijkstra's algorithm.

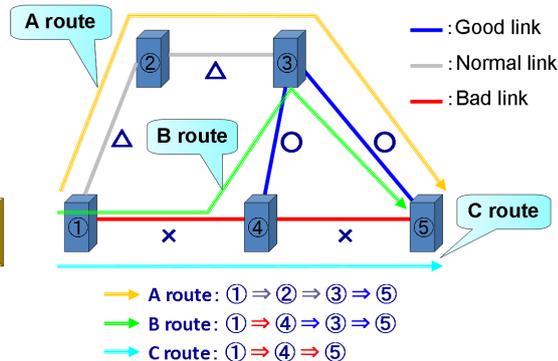
Selecting pattern for Entanglement Swapping Choosing Path Based on Link Characteristics



Simulations (4-hop heterogeneous network)



These sims are still just simple doubling pattern



Which route is the fastest?

Can we use Dijkstra's algorithm?

Calculating Path cost using Dijkstra's algorithm.

- Define link cost as number of pulses to create $F = 0.98$ Bell pair (normalized to best link).
- Sum link costs for each candidate path.
- Define minimum link cost path as the best path.

Dijkstra's score

Quantum Dijkstra's score(Max = 100)
 = number of hops/total link cost * 100
 Link cost ○ : 1.00 △ : 1.70 × : 3.18

Throughput

Throughput = Number of teleportation/sec

Conclusion

Throughput and Dijkstra score show good correlation, confirming our choice of link cost definition and that Dijkstra's algorithm can be used in quantum networks.

図 B.1: ICQITposter