

令和6年度 秋学期 卒業研究3 (BI)  
学士論文

題目 量子ネットワークの動的経路選  
択法

指導教員 上山憲昭 教授

立命館大学 情報理工学部 セキュリティ・ネットワークコース

学籍番号 26002005084

KimMinkyu

令和7年1月31日

# 概要

近年、量子ネットワークにおける End-to-End 通信の重要性が高まっている。既存の量子ネットワークでは、経路選択時に fidelity の動的な変化を考慮せず固定経路を使用しており、これは通信品質の低下につながる可能性がある。また、量子状態の脆弱性により、経路選択の精度が低下するという課題も存在する。そこで本稿では、これらの問題を解決するために、fidelity を基準とする経路探索方法と、MAB (Multi-Armed Bandit) アルゴリズムを活用した動的経路選択方法を提案する。具体的には、 $\epsilon$ -greedy MAB, Thompson Sampling, Round Robin の3つの方式を比較し、各経路の fidelity と遅延時間を考慮した最適な経路選択方法を提示する。提案方式の有効性を検証するため、50 ノードで構成される Waxman ランダムトポロジにおいてシミュレーションを実施した。シミュレーションの結果、Thompson Sampling が他の2つの方式と比較してより高い fidelity とより低い遅延時間を達成し、特に到着率が変化する動的環境においても安定した性能を示すことが確認された。この結果から、提案手法が量子ネットワークにおける動的経路選択の効率化に貢献し、ユーザの体感品質の向上が期待できることが示された。

# 目次

概要	1
<b>第1章 序論</b>	<b>3</b>
1.1 研究の背景	3
1.2 研究の目的	3
<b>第2章 量子ネットワークの概念</b>	<b>4</b>
2.1 量子ネットワークの構成要素	4
2.2 量子もつれと忠実度 (Fidelity)	4
2.3 量子蒸留 (Distillation)	4
2.4 量子スワップ, 量子テレポーテーション	5
<b>第3章 関連研究</b>	<b>8</b>
3.1 量子ルーティングの分類	8
3.2 既存研究	8
3.3 既存研究の限界	9
<b>第4章 提案方式</b>	<b>10</b>
4.1 量子通信の手順	10
4.2 詳細設定	11
4.3 比較アルゴリズムと報酬関数の設定	12
<b>第5章 性能評価</b>	<b>14</b>
5.1 実験環境及びシナリオ	14
5.2 性能評価結果	15
5.3 経路選択特性の分析	17
<b>第6章 結論</b>	<b>19</b>
謝辞	20

# 第1章 序論

## 1.1 研究の背景

量子通信は、量子もつれと量子テレポーテーションを活用した革新的な通信技術として注目されている。一方、量子コンピューティングの分野では、単一の量子プロセッサで制御可能な量子ビット数が現在 127 個程度に制限されており、大規模な量子計算の実現における重大な障壁となっている。この課題を解決するため、分散コンピューティングの概念と量子通信技術を組み合わせた分散量子コンピューティングという新しいアプローチが提案され、その実現に向けた基盤技術として量子通信の重要性が高まっている。

しかし、量子通信を実現する上で最も重要な課題の一つが、量子状態の忠実度 (Fidelity) の維持である。量子状態は環境との相互作用により劣化しやすく、特に長距離伝送時には著しく品質が低下する。さらに、量子ネットワークでは複数の中継ノードを経由する必要があるため、送信元から最終目的地までの End-to-End Fidelity を高く保つことが本質的な課題となっている。

このような背景から、量子ネットワークにおける経路選択は極めて重要な課題となっている。従来の経路選択方式では、ネットワークの負荷変動や量子状態の確率的な変動など、動的な要素を考慮した効率的な経路制御が実現できていない。特に、量子状態の品質を保ちながら、ネットワークリソースを効率的に利用する経路選択手法の開発は、実用的な量子ネットワークの実現に向けた重要な技術的課題である。

## 1.2 研究の目的

本研究では、量子ネットワークにおける多次元動的環境下での経路選択問題に取り組む。具体的には、複数の中継ノードを経由する量子通信において、ネットワークトポロジのランダム性、内部・外部ノイズの確率的変動、トラフィックパターンの急激な変化、および End-to-End fidelity を考慮した効率的な経路選択方式を提案することを目指す。従来の研究では、これらの複合的な動的要素が十分に考慮されていなかった。

この課題に対し、本研究では Multi-Armed Bandit (MAB) アルゴリズムを基盤とした新しいアプローチを提案する。特に、fidelity と遅延時間のトレードオフを考慮した経路選択を実現するため、Thompson Sampling を導入することで、多次元動的環境における経路選択の精度向上を図る。このアプローチにより、量子蒸留過程の確率的な性質や、到着レートの変動などの不確実性に対しても適応的に対応することが可能となる。

提案する方式は、従来の固定的な経路選択手法とは異なり、複合的な動的環境に対して積極的に適応する。これにより、量子ネットワーク全体の通信品質の向上と、より安定した量子状態の転送の実現を目指す。

## 第2章 量子ネットワークの概念

本章では、本研究の基礎となる量子ネットワークの基本的概念について説明する。量子ネットワークは、量子力学の原理に基づく特殊な性質を持つため、従来の通信ネットワークとは異なる概念や仕組みが必要となる。特に、量子もつれや量子テレポーテーションといった現象、そしてそれらを実現するための量子回路について詳しく解説する。これらの概念は、後章で提案する経路選択手法を理解する上で不可欠な基礎知識となる。

### 2.1 量子ネットワークの構成要素

量子ネットワークの構成は従来のインターネットとは根本的に異なる特性を持ち、量子状態を保存・処理できる量子メモリが必要不可欠である。ネットワークノードは送信者、受信者、中継器の役割に応じて量子状態を維持・操作する能力が求められる [1]。また、量子チャネルはエンタングルメントの分配に使用され、光ファイバーや自由空間光学リンクにより実現される [2]。さらに、量子状態の特性上、通信開始前に経路を設定する必要があり [1]、量子メモリの寿命制限、エンタングルメント状態の維持、量子誤り訂正などを考慮した効率的なリソース管理システムが必要となる [2]。

### 2.2 量子もつれと忠実度 (Fidelity)

量子ネットワークにおいて、量子もつれと忠実度は性能を特徴付ける最も重要な指標である。量子もつれは相関関係を示し、忠実度は量子状態の品質を定量的に評価する尺度となる。量子状態  $\sigma$  と理想的な目標状態  $\sigma'$  の類似度は以下の式で表される：

$$F = \left( \text{Tr} \sqrt{\sqrt{\sigma} \sigma' \sqrt{\sigma}} \right)^2 \quad (2.1)$$

0 から 1 の値を取り、1 に近いほど理想的な状態に近いことを示す [3]。しかし、量子状態の保持時間や操作精度の制限により、環境との相互作用による雑音や減衰で量子状態の忠実度は徐々に低下する [4]。このため、E2E 忠実度の維持が量子通信における重要な技術的課題である。

### 2.3 量子蒸留 (Distillation)

量子蒸留は、低フィデリティの量子もつれ対から高フィデリティの量子もつれ対を生成する技術として、量子ネットワークにおいて重要な役割を果たす。この技術は、特に長距離量子通信において不可欠な要素となっている。

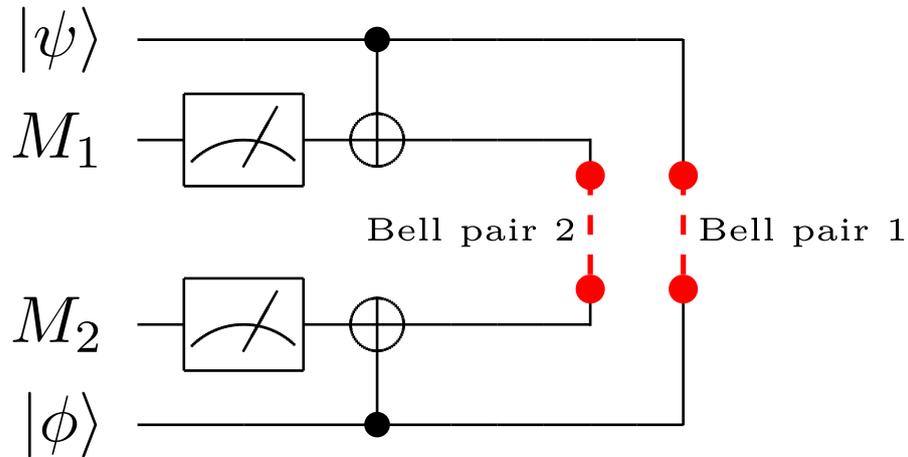


図 2.1: Circuit of Quantum Distillation

具体的蒸留プロセスでは、各ノードで CNOT ゲートを適用し、その後測定を行うこの過程は以下の量子回路図 2.1 で表現される：1. 二つのベル対を準備する．一つ目のベル対が精製対象となり、二つ目のベル対は補助状態（犠牲対）として使用される．2. アリスとボブは、それぞれの場所で CNOT 演算を行う．この時、第一量子ビットが制御ビットとなり、第二量子ビットがターゲットビットとなる．3. 二つ目のベル対に対して測定を実行する．測定結果が一致した場合、一つ目のベル対のフィデリティが向上する．この測定結果の一致は、量子状態が期待される状態に近づいていることを示す重要な指標となる．

さらに、エンドツーエンドのフィデリティを確保するために、複数回の蒸留プロセスを繰り返し適用することが可能である．これは入れ子型蒸留プロトコルと呼ばれ、各段階で量子もつれのフィデリティを段階的に向上させることができる [3]．各段階での理論的なフィデリティの向上は、以下の式で表現される：

$$F' = \frac{F^2}{F^2 + \frac{2}{3}F(1-F) + \frac{5}{9}(1-F)^2} \quad (2.2)$$

ここで、 $F$  は初期フィデリティ、 $F'$  は蒸留後のフィデリティを表す [5]．

しかしながら、この技術には重要な課題が存在する．高いフィデリティを達成するためには多くの量子リソースが必要となり、使用可能な量子もつれ対の数が減少する．また、量子蒸留は確率的なプロセスであり、その成功確率は初期状態のフィデリティに依存する．そのため、ネットワークのスループット、量子状態の品質、およびリソース管理の効率的なバランスを考慮した最適化が、将来の量子インターネット実現に向けた重要な課題となっている．

## 2.4 量子スワップ、量子テレポーテーション

量子スワップと量子テレポーテーションは、量子ネットワークにおける基本的な操作技術であり、量子状態を効率的に伝送するための重要な機構である．

量子スワップは、直接接続されていない二つの量子ノード間でエンタングルメントを確立するための技術である．この操作 [10] では、中間ノードにおいて二つのベル対を用いて

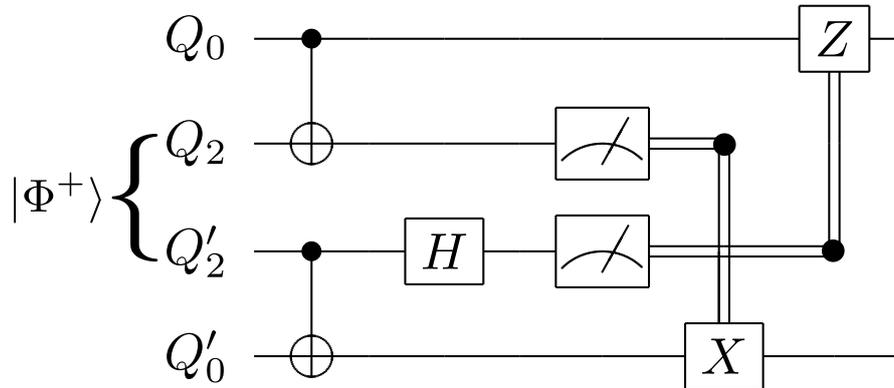


図 2.2: Circuit of Quantum Swap

量子状態を「スワップ」することで、離れた場所にある量子ビット間のエンタングルメントを生成する．具体的には、図 2.2 に示す量子回路において、2つのベル対  $|\Phi^+\rangle$  を入力として各ゲート操作と測定を順次実行し、最後に補正操作を行うことで、離れた量子ビット  $Q_0$  と  $Q'_0$  の間に新たなエンタングルメントを生成することができる．このプロセスは、量子中継において複数のノードを経由した長距離量子通信を実現する上で不可欠な要素となる．

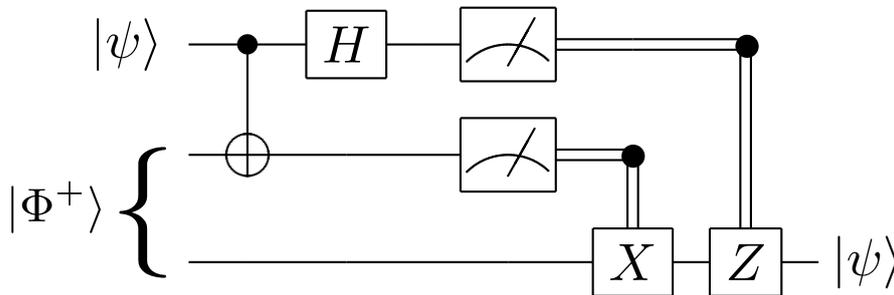


図 2.3: Circuit of Quantum Teleportation

一方、図 2.3 の量子テレポーテーションは、既存のエンタングルメントを利用して任意の量子状態を転送する技術 [6] である．この過程は以下の手順で実行される：

1. 送信者と受信者の間で事前に共有されたベル対を用意する
  2. 送信者は転送したい量子状態と、共有されたベル対の一方の量子ビットにベル測定を実行する
  3. 測定結果を古典通信で受信者に送信する
  4. 受信者は測定結果に基づいて適切な量子操作を実行し、元の量子状態を再現する
- この技術の重要な特徴は、量子状態を直接転送することなく、事前に共有されたエンタングルメントと古典通信を組み合わせることで、完全な量子状態の転送を実現できる点である．これにより、量子状態を物理的に輸送する際に生じる損失や雑音の影響を回避することが可能となる．

量子スワップと量子テレポーテーションは、それぞれ独立した技術であるが、実際の量

子ネットワークではこれらを組み合わせることで、より効率的な長距離量子通信が実現可能となる。これらの技術は、量子暗号通信や分散量子計算など、様々な量子ネットワークアプリケーションの基盤となる重要な要素技術である。ただし、その実装には高度な量子制御が必要であり、量子デコヒーレンスの影響や量子操作の精度限界など、技術的な課題が存在する。

## 第3章 関連研究

### 3.1 量子ルーティングの分類

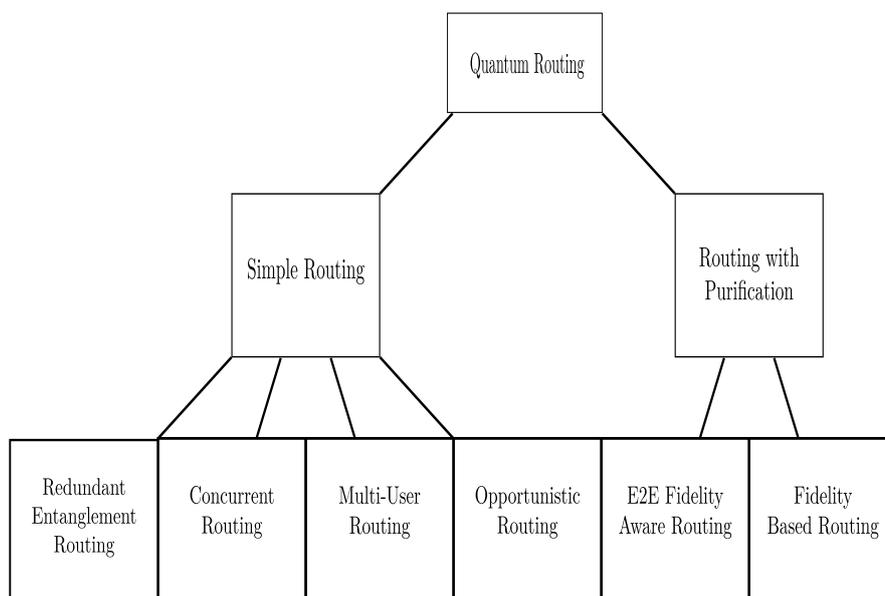


図 3.1: Classification of quantum routing

量子ルーティング技術の体系的な分類に関する研究 [7] によると、量子ルーティングは大きく Simple Routing と Routing with Purification の二つに分類される。Simple Routing には、冗長なエンタングルメントを用いる Redundant Entanglement Routing, 複数の経路を同時に使用する Concurrent Routing, 複数ユーザーに対応する Multi-User Routing, そして機会主義的なアプローチを取る Opportunistic Routing が含まれる。一方, Routing with Purification には, エンド・ツー・エンドの忠実度を考慮した E2E Fidelity Aware Routing と, 忠実度に基づいた経路選択を行う Fidelity Based Routing が含まれる。これらの分類は, 量子ネットワークにおける様々なルーティング手法の特徴と目的を明確に示している。

### 3.2 既存研究

これらの分類に基づき, 各ルーティング手法の特徴と実現方式について詳しく見ていく。

Simple Routing では、主にエンタングルメントの確立と経路選択に焦点を当てており、量子状態の品質よりもネットワークのスループットや効率性の向上を重視している。Redundant Entanglement Routing[8] は、リンク障害に対する耐性を高めるため、ソースとデスティネーション間の複数の経路に予備的なエンタングルメントリソースを確保する。特に、ネットワークリソースの制約内で最適な冗長性を実現するため、事前のリソースプロビジョニングと動的な経路選択を組み合わせている。一方、Concurrent Routing[9] は、ネットワークの状態とリソースの利用可能性に基づいて複数の経路を同時に確立し、複数の量子通信要求を効率的に処理する。また、Multi-User Routing[11] と Opportunistic Routing[12] は、それぞれ量子スイッチを活用した複数ユーザー間の通信最適化と、部分的に利用可能な経路の即時活用による待機時間の最小化を実現している。

一方、Routing with Purification では、エンタングルメントの品質を重視し、高い忠実度を維持しながら効率的な通信の実現を目指している。E2E Fidelity Aware Routing[3] は、経路上の各リンクの忠実度を考慮し、エンド・ツー・エンドでの量子状態の品質を定量的に評価することで、高品質な通信を実現している。特に、複数の中継ノードを経由する際の忠実度の低下を最小限に抑えるため、経路選択時に各リンクの忠実度を重要な指標として扱う。また、Fidelity Based Routing[13] は、ネットワーク内の各リンクの忠実度を監視し、純化技術を活用することで要求される忠実度閾値を満たす信頼性の高い通信を実現する。

### 3.3 既存研究の限界

前節で述べた既存の量子ルーティング手法には、以下のような共通の限界が存在する。

第一に、ネットワークの動的な状態変化への対応が不十分である。Simple Routing アプローチでは、Opportunistic Routing を除き、ほとんどの手法が静的な経路選択を行っており、ネットワークの状態変化に効果的に対応できない。一方、Routing with Purification アプローチでは、忠実度の変動に対する適応的な制御が限定的である。

第二に、End-to-End 忠実度と遅延時間のトレードオフに関する最適化が不十分である。特に Simple Routing では忠実度を考慮していないため、長距離通信における量子状態の品質劣化が問題となる。また、Routing with Purification では、忠実度の維持を重視するあまり、遅延時間の増加を十分に考慮できていない。

第三に、ネットワークリソースの効率的な活用が制限的である。多くの手法が事前に設定された固定的な経路に依存しており、利用可能なリソースの動的な再配分が困難である。特に、複数の通信要求が競合する状況下での効率的なリソース割り当てが課題となっている。

## 第4章 提案方式

本章では、前章で指摘した既存手法の限界を克服するため、Multi-Armed Bandits (MAB) アルゴリズムを活用した新しい動的経路選択手法を提案する。本手法は MAB アルゴリズムによりネットワークの動的な状態変化に適応的に対応し、End-to-End 忠実度と遅延時間のトレードオフを最適化する報酬関数を用いて、高い忠実度を維持しながら遅延時間を抑制する。さらに、経路選択の際にネットワークリソースの状態を動的に考慮することで、複数の通信要求に対して効率的なリソース割り当てを実現する。

### 4.1 量子通信の手順

はじめに、量子通信の基本的なフレームワークについて説明する。3.3 節で指摘したネットワークの動的な状態変化への対応という課題に対し、本研究では量子通信の実装方式を見直す。量子通信は従来の光学チャネルを利用し、量子リンクの生成と同時に purification 操作を行うことで高いフィデリティを保証する。基本的な量子通信の流れとしては、EPR ペアの準備、量子リンクの設定、送信元と宛先ノード間の量子スワップによるエンドツーエンド接続の確立、量子テレポーテーション後に従来の古典チャネルを介して結果値を転送するという手順となる。

量子通信には主に二つのアプローチが存在する。一つ目はオンデマンド方式であり、二つ目はアドバンスド生成方式である。

オンデマンド方式は、通信要求に応じて EPR ペアを生成し量子通信を行う理想的なアプローチである。しかし、実際のネットワーク環境では、突発的な通信要求に対して必要なリソースを即座に確保することは困難である。また、要求の到着パターンが不規則な場合、リソースの効率的な管理が極めて難しい。

一方、アドバンスド生成方式では、事前に distillation table を用いて EPR ペアの生成と distillation 作業を完了させておく。これにより、通信要求に対して迅速な応答が可能となり、より実用的なアプローチとなる。ただし、リソースの事前確保による一定の無駄は避けられず、この効率性の改善が今後の課題となる。

このように、オンデマンド方式は理想的ではあるものの、現実のネットワーク環境では実装が困難である。一方、アドバンスド生成方式は事前準備により効率的な通信が可能となるが、リソースの無駄が避けられないという課題がある。本研究では、この課題に着目し、アドバンスド生成方式を基盤としながら、リソース効率を改善するための動的な経路選択手法を提案する。

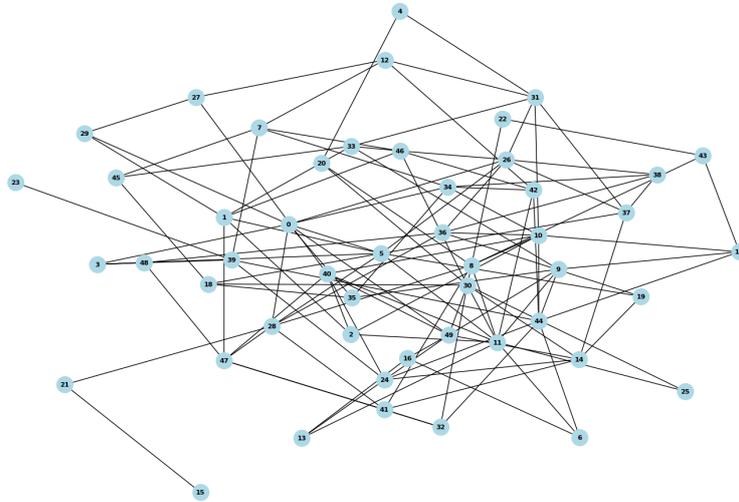


図 4.1: Waxman ランダムトポロジの例 (ノード数: 50, エッジ数: 121 個, 平均次数: 4.84)

## 4.2 詳細設定

End-to-End フィデリティと遅延時間のトレードオフという課題に対応するため、適切なネットワークトポロジと評価指標の設計が必要となる。本研究では、図 4.1 に示すような Waxman ランダムトポロジを採用し、実際のネットワーク環境に近い条件での評価を可能とする。この図は 50 個のノードと 121 個のエッジで構成され、平均次数が 4.84 のネットワーク例を示している。Waxman モデルはノード間の距離に基づいて確率的にエッジを生成するモデルであり、以下の式で定義される：

$$P(u, v) = \alpha e^{-l(u, v)/\beta L} \quad (4.1)$$

ここで、 $l(u, v)$  はノード  $u, v$  間のユークリッド距離、 $L$  はノード間の最大距離を表す。パラメータ  $\alpha$  と  $\beta$  は、それぞれネットワークの密度と長距離エッジの生成確率を制御するパラメータである。本研究では、各ノードが平均して 4 本の接続を持つように設計し、 $\alpha = 0.327$ ,  $\beta = 0.300$  と設定することで、現実的な通信ネットワークの特性を反映させている。この設定により、50 ノードで 121 本のエッジを持つトポロジが生成された。

システムパラメータとして、以下の構成を定義する。まず、各エッジには 3 つの量子チャネルを並列に配置する。これらの量子チャネルの状態は distillation table を用いて管理され、経路確定および経路消費による使用通知を受けた後の再生成動作が制御される。また、フィデリティの threshold は 0.8 以上を維持するものとする。

性能評価指標として、以下の二つの主要な指標を定義する：

1. 遅延時間 (Delay) 全体の遅延時間  $D$  は以下の式で表される：

$$D = t_{proc} + t_{teleportation} + t_{trans} \quad (4.2)$$

ここで、各項は以下を表す：

- $t_{proc}$ ：量子演算処理時間（伝搬，蒸留，スワップを含む）
- $t_{teleportation}$ ：量子テレポーテーション遅延
- $t_{trans}$ ：量子転送時間（発着 SD ペア間の総距離/光速）

2. エンドツーエンドフィデリティ (End-to-End Fidelity) 経路全体のフィデリティは、まず各リンクのフィデリティの積として計算され ( $F_{initial} = \prod_i F_i$ , ここで  $F_i$  は経路上の  $i$  番目のリンクのフィデリティ), ホップ数増加による急激な減少を考慮して対数スケールに変換し ( $F_{log} = \sum_i (-\log F_i)$ ), 最終的に 0 から 1 の範囲に正規化するためシグモイド関数を用いて定義する：

$$F_{e2e} = \left( 1 + \exp \left( \sum_i (-\log F_i) \right) \right)^{-1} \quad (4.3)$$

この評価指標により、経路全体での量子状態の品質を定量的に評価することが可能となる。値が 1 に近いほど高品質な量子状態が維持されていることを示し、ホップ数の増加に対しても適切な評価が可能となる。しかし、この評価指標を効果的に活用するためには、ネットワークの動的な状態変化に応じて適切な経路を選択する仕組みが必要となる。そこで、次節では MAB アルゴリズムを用いた経路選択手法について説明する。

### 4.3 比較アルゴリズムと報酬関数の設定

リソース管理の効率性という課題に対応するため、本研究では、Multi-Armed Bandits (MAB) アルゴリズムを用いた経路選択手法を提案する。MAB は、探索 (exploration) と活用 (exploitation) のトレードオフを効果的に扱うことができ、限られたリソースの効率的な割り当てに適している。本節では、まず提案手法で用いる報酬関数について説明し、その後、性能比較のための三つのアルゴリズムについて述べる。

報酬関数は、遅延時間  $D$  とフィデリティ  $F$  の両方を考慮し、以下の式で定義される：

$$R = w_1 \frac{1}{D} + w_2 F \quad (w_1 = w_2 = 0.5) \quad (4.4)$$

ここで、 $D$  は遅延時間、 $F$  は経路全体の End-to-End フィデリティを表す。 $w_1$  と  $w_2$  は重み付けパラメータであり、遅延時間とフィデリティのトレードオフを制御する。両パラメータを 0.5 に設定した理由として、End-to-End フィデリティは正規化により 0.3-0.4 の範囲で安定的に推移する一方、遅延時間は比較的大きな変動性を示すという特性の違いが挙げられる。このような特性の差異を考慮した結果、同等の重み付けを与えることで、報酬関数の変動性を適切に反映できると判断した。

比較アルゴリズムとして、以下の三つの手法を実装する：

1.  $\epsilon$ -greedy MAB：

確率  $\epsilon$  でランダムな経路を探索し、確率  $(1 - \epsilon)$  で最適な経路を選択する。本研究では、探索と活用のバランスを決定する重要なパラメータである  $\epsilon$  の値を 0.5 に設定している。

これは実験的な分析に基づく選択であり、より高い  $\varepsilon$  値では過度な活用により初期学習段階での性能低下を引き起こし、より低い値では不必要な探索による安定性の低下を招くことが確認された。0.5 という値は、このトレードオフを最適に調整する点として特定された。各経路の選択に応じて次式により Q 値を更新し、動的な学習を行う。

$$Q_{t+1} = Q_t + \frac{1}{n}(R_t - Q_t) \quad (4.5)$$

ここで、 $n$  は各経路の選択回数であり、動的な学習率として機能する。この更新式は、現在の推定値  $Q_t$  と実際の報酬  $R_t$  との差分に基づいて価値を更新する。 $(R_t - Q_t)$  は推定誤差を表し、これに  $\frac{1}{n}$  を乗じることで、選択回数が増えるにつれて更新幅が徐々に小さくなり、価値推定の安定性が向上する。これにより、経路選択の経験を積むほど、より正確な Q 値の推定が可能となる。

2. Thompson Sampling : Beta 分布を用いた経路選択を行い、成功/失敗に応じてパラメータ  $(\alpha, \beta)$  を更新する。サンプリング値が最大となる経路を選択することで、探索と活用のバランスを取る。

$$\theta_i \sim \text{Beta}(\alpha_i, \beta_i) \quad (4.6)$$

この式は、各経路  $i$  に対して Beta 分布からパラメータ  $\theta_i$  をサンプリングすることを表す。Beta 分布は  $[0,1]$  の範囲で確率分布を表現でき、 $\alpha$  と  $\beta$  のパラメータにより分布の形状が決定される。パラメータ更新は以下の式で行う：

$$\alpha_{t+1} = \alpha_t + r_t, \quad \beta_{t+1} = \beta_t + (1 - r_t) \quad (4.7)$$

ここで、 $r_t$  は正規化された報酬値 (0-1 の間) を表す。報酬が高い場合は  $\alpha$  が増加し、低い場合は  $\beta$  が増加する。これにより、成功経験が多い経路ほど高い確率でサンプリングされ、かつ不確実性を考慮した探索も自然に行われる。

3. Round Robin : 最も単純な比較手法として、経路候補を順番に選択するラウンドロビン方式を実装する。この手法は探索と活用のバランスを考慮せず、単純に順序に従って経路を選択する。

これらの比較アルゴリズムを用いて、提案手法の有効性を評価する。

## 第5章 性能評価

前章で設計したシステムモデルの性能を評価するためシミュレーションを実行した。本章ではシミュレーション環境と実験シナリオを説明し、性能評価結果を分析する。

### 5.1 実験環境及びシナリオ

実験のため50ノードで構成されるWaxmanランダムトポロジを使用した。各リンクの物理的距離は50kmから300kmの間でランダムに設定され、各リンクには3つの量子チャネルが配置された。3,000秒のシミュレーションを実施した。1,500秒の時点で、量子ビット転送の要求発生率を変化させた。具体的には、0~1,500秒の期間は、要求発生率を0.55~2.5に設定し、1,500~3,000秒の期間は、要求発生率を8~10に設定した。

本研究では量子リンク管理のためdistillation tableを導入した。これはLi et al.[13]が提案したQ-PATHアルゴリズムのテーブル構造による管理方式に着想を得たが、本研究では各エッジに対して複数の量子リンクを同時に制御し、状態追跡システムを実装するなど独自の拡張を行った。Distillation tableは量子リンクの生成から消費までの全過程でfidelity値と遅延時間を記録・管理し、リンクが消費された後の再生成プロセスまで担当する。

Distillation tableの動作は大きく2つに分かれる。1つ目はEPRペアの生成、2つ目はdistillation作業である。ここで注目すべき点は、coherence timeとfidelityの減衰率を別途定義しなかったことである。これは、Sequenceの研究[14]で報告されているように、coherence timeが1.3秒と制限的で、減衰率が $\alpha = 20dB/km$ 、フィデリティの減衰式 $F = e^{-\alpha L}$ ( $L$ は距離)と定義される場合、50km以上の距離ではfidelityが実質的に0に収束するためである。代わりに本研究では、外部ノイズを距離に比例してEPR生成とdistillation作業に適用する方式を採用した。

Distillation作業は最大20ラウンドまで実行可能に設定し、threshold値は0.8と定義した。この構成は、システム全体において量子リンク管理を担うdistillation tableとその他の量子動作に区分される大枠の中で設計された。

## 5.2 性能評価結果

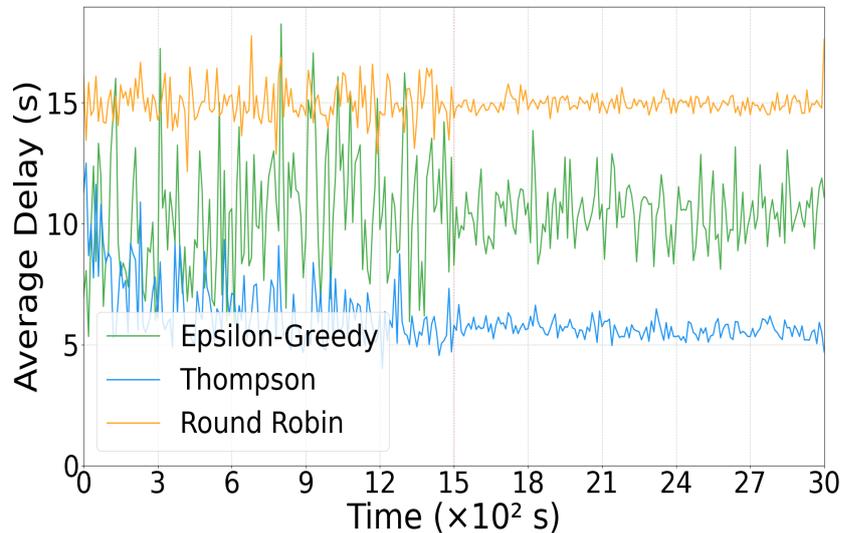


図 5.1: 平均遅延 (Delay) 時間の比較

図 5.1 に、各タイムスロット (10 秒) における平均遅延時間を経過時間に対してプロットする。Thompson Sampling は 5~6 秒の範囲で安定した遅延時間を示し、最も優れた性能を達成した。一方、Epsilon-Greedy は 8~12 秒の範囲で比較的大きな変動を示し、Round Robin は 13~15 秒と最も長い遅延時間を記録した。特に注目すべき点として、Thompson Sampling は 1,500 秒での到着レート変更後も安定した性能を維持している。初期の低到着レート区間では、三つのアルゴリズムとも同様の変動性を示すが、時間経過とともに明確な差異が現れる。Thompson Sampling はベータ分布による経路選択を通じて成功経路を段階的に学習し、遅延時間を効果的に削減する。一方、Epsilon-Greedy は固定された  $\epsilon$  による継続的な探索により、むしろ遅延時間が増加傾向を示す。Round Robin に見られる安定化は実際の学習効果ではなく、順次的な経路使用による平均への回帰現象である。

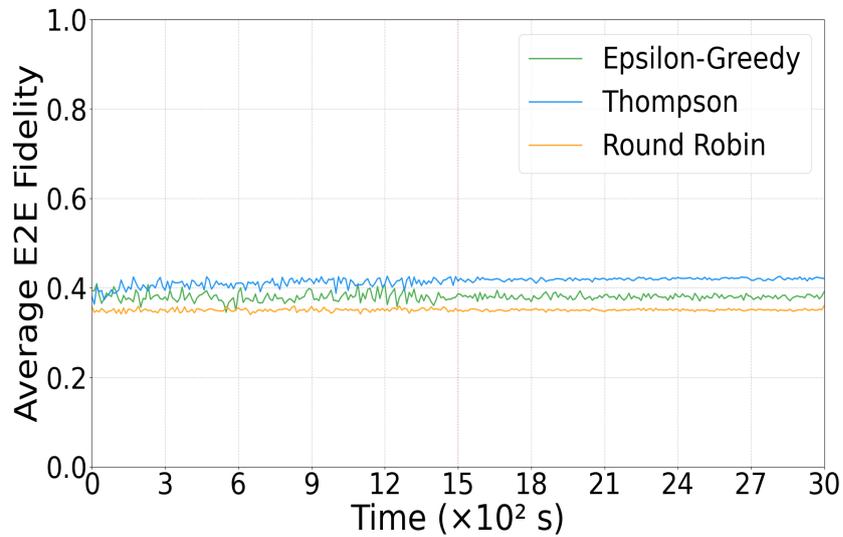


図 5.2: 平均 End-to-End Fidelity の比較

図 5.2 に、End-to-End 忠実度の推移を示す。Thompson Sampling は約 0.42 の最高値を安定的に維持し、Epsilon-Greedy (約 0.38)、Round Robin (約 0.35) を一貫して上回った。この結果は、Thompson Sampling が量子状態の品質維持において優れていることを示している。また、全てのアルゴリズムにおいて、到着レート変更後も End-to-End 忠実度は大きく変動せず、安定した値を保持している。特筆すべき点として、三つのアルゴリズム間の End-to-End 忠実度の差が比較的小さい (0.35-0.42 の範囲) のは、distillation 処理によって各リンクの品質が一定水準以上に保たれているためである。しかし、Thompson Sampling が最も高い忠実度を維持できているのは、経路選択時に過去の成功経験を効果的に活用し、品質の良い経路を優先的に選択できているためと考えられる。

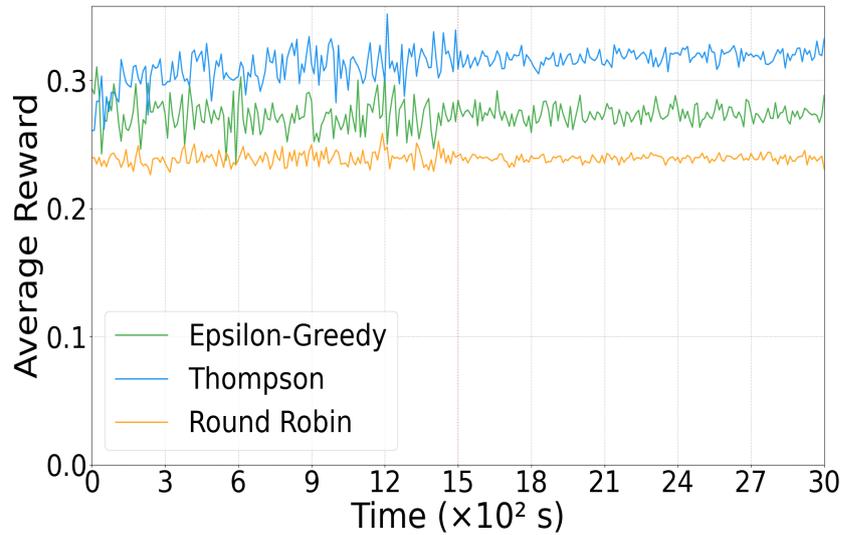


図 5.3: 平均報酬 (Rewards) の比較

図 5.3 は、遅延時間と End-to-End 忠実度を組み合わせた総合的な報酬値の推移を示している。注目すべき点として、Thompson Sampling は実験初期では比較的低い報酬値を示すものの、経路探索を重ねるにつれて性能が向上し、最終的に 0.32~0.33 の範囲で最高性能を達成している。一方、Epsilon-Greedy は初期段階で高い報酬値を示したが、1,500 秒での到着レート変更後、探索回数が増加しているにもかかわらず、顕著な学習効果による改善は見られず、0.27~0.29 の範囲に留まっている。Round Robin は 0.23~0.24 の範囲で推移し、変動が減少していく傾向を示すが、これは学習による改善ではなく、単純な順次探索による平均値への収束現象であると解釈できる。

### 5.3 経路選択特性の分析

本実験を通じて、各アルゴリズムの経路選択特性について、重要な知見が得られた。Thompson Sampling は遅延時間、End-to-End 忠実度、総合的な報酬値の全ての評価指標において最高性能を示した。特に、1,500 秒での到着レート変更時 (0.55-2.5 から 8-10 への上昇) においても安定した性能を維持できたことは、アルゴリズムが蓄積した経路品質の確率分布を基に、効率的な経路選択を継続できたことを示唆している。

学習の収束性という観点から見ると、各アルゴリズムは異なる特性を示した。Thompson Sampling は初期の低いパフォーマンスから段階的に性能を向上させ、安定した状態へ収束した。一方、Epsilon-Greedy は初期の高いパフォーマンスを維持できず、探索と活用のバランスが最適化されなかった。ただし、実験設定における制約 (忠実度 0.7-1.0、遅延時間 5-44 秒) により、学習効果の観察が限定的となった可能性がある。

実験において、fidelity の範囲を限定したことにより、各アルゴリズムは最短ホップ数や最短距離の経路を選好する傾向を示した。しかし、この選択が必ずしも最適な結果をもたらさない主要な要因として、distillation 作業による遅延の非一貫性が観察された。長距離経

路では外部ノイズの影響が強く、20 回の最大ラウンドを経ても fidelity が 0.8 以上に改善されないケースは予測可能である。しかし注目すべき点として、短距離経路においても同様の現象が発生することが確認された。この問題に対して、distillation のラウンド数を削減する方法も考えられるが、それは fidelity の更なる低下を招く。逆にラウンド数を無制限に増加させれば、最終的に threshold を超える可能性はあるものの、遅延時間の増大とリソースの過剰消費という新たな問題が発生する。

これらの結果は、量子ネットワークにおける経路選択の複雑性を示唆している。classical network とは異なり、距離だけでなく量子状態の品質も考慮に入れた多面的な経路選択が必要となる。特に、distillation 処理による fidelity の不確実性の予測と、効率的なリソース管理の両立が重要な課題として浮かび上がった。今後は、distillation 作業におけるリソース効率の最適化手法の開発と、より広範な条件下での評価を通じて、これらの課題に取り組む必要がある。

## 第6章 結論

本研究では、量子ネットワークにおける動的な経路選択手法として、MAB (Multi-Armed Bandits) に基づくアプローチを提案した。特に、Thompson Sampling と Epsilon-Greedy の2つのアルゴリズムを実装し、End-to-End 忠実度と遅延時間のトレードオフを考慮しながら、到着率の変動に適応的に対応する手法を実現した。

提案手法の有効性を評価するため、50 ノードの Waxman ランダムトポロジを用いたシミュレーション実験を実施した。その結果、Thompson Sampling は遅延時間 (5~6 秒)、End-to-End 忠実度 (約 0.42)、総合的な報酬値 (0.32~0.33) の全ての評価指標において最高性能を示した。特に、ネットワーク負荷が動的に変化する環境下でも安定した性能を維持することが確認された。

一方で、本研究を通じて量子ネットワークにおける経路選択の複雑性も明らかになった。特に、distillation 処理に起因する遅延の非一貫性や、fidelity の不確実性が重要な課題として浮かび上がった。これらの課題に対して、distillation 作業におけるリソース効率の最適化や、より広範な条件下での性能評価が今後の研究課題として挙げられる。

本研究の成果は、量子ネットワークの実用化に向けた重要な一歩となり、特に動的な負荷変動に対応可能な経路選択手法の基盤を提供するものである。

## 謝辞

本研究を行うに当たり,ご指導を頂いた上山教授に感謝します.また日常,有益な議論をして頂いた研究室の皆様に感謝します.

## 参考文献

- [1] Van Meter, R., & Touch, J. (2013). Designing quantum repeater networks. *IEEE Communications Magazine*, 51(8), 64-71.
- [2] Cuomo, D., Caleffi, M., & Cacciapuoti, A. S. (2020). Towards a distributed quantum computing ecosystem. *IET Quantum Communication*, 1(1), 3-8.
- [3] Zhao, Y., Zhao, G., & Qiao, C. (2022, May). E2E fidelity aware routing and purification for throughput maximization in quantum networks. In *IEEE INFOCOM 2022-IEEE Conference on Computer Communications* (pp. 480-489). IEEE.
- [4] Shi, W., & Malaney, R. (2023). Quantum routing for emerging quantum networks. *IEEE Network*.
- [5] Pan, J. W., Simon, C., Brukner, Č., & Zeilinger, A. (2001). Entanglement purification for quantum communication. *Nature*, 410(6832), 1067-1070.
- [6] Bouwmeester, D., Pan, J. W., Mattle, K., Eibl, M., Weinfurter, H., & Zeilinger, A. (1997). Experimental quantum teleportation. *Nature*, 390(6660), 575-579.
- [7] Kar, B., & Kumar, P. (2023). Routing Protocols for Quantum Networks: Overview and Challenges. arXiv preprint arXiv:2305.00708.
- [8] Zhao, Y., & Qiao, C. (2021, May). Redundant entanglement provisioning and selection for throughput maximization in quantum networks. In *IEEE INFOCOM 2021-IEEE Conference on Computer Communications* (pp. 1-10). IEEE.
- [9] Shi, S., & Qian, C. (2020, July). Concurrent entanglement routing for quantum networks: Model and designs. In *Proceedings of the Annual conference of the ACM Special Interest Group on Data Communication on the applications, technologies, architectures, and protocols for computer communication* (pp. 62-75).
- [10] Mao, Y., Liu, Y., & Yang, Y. (2023, May). Qubit allocation for distributed quantum computing. In *IEEE INFOCOM 2023-IEEE Conference on Computer Communications* (pp. 1-10). IEEE.
- [11] Zeng, Y., Zhang, J., Liu, J., Liu, Z., & Yang, Y. (2022, May). Multi-entanglement routing design over quantum networks. In *IEEE INFOCOM 2022-IEEE Conference on Computer Communications* (pp. 510-519). IEEE.
- [12] Farahbakhsh, A., & Feng, C. (2022, May). Opportunistic routing in quantum networks. In *IEEE INFOCOM 2022-IEEE Conference on Computer Communications* (pp. 490-499). IEEE.
- [13] Li, J., Wang, M., Xue, K., Li, R., Yu, N., Sun, Q., & Lu, J. (2022). Fidelity-guaranteed entanglement routing in quantum networks. *IEEE Transactions on Communications*, 70(10), 6748-6763.
- [14] Wu, X., Kolar, A., Chung, J., Jin, D., Zhong, T., Kettimuthu, R., & Suchara, M. (2021). Se-QUeNCe: a customizable discrete-event simulator of quantum networks. *Quantum Science and Technology*, 6(4), 045027.

## 学会発表リスト

- Kim Minkyu, 上山憲昭, “量子ネットワークの動的経路選択法“, 電子情報通信学会 2025 年総合大会, 東京, 2025 年 3 月
- Kim Minkyu, 上山憲昭, “量子ネットワークの動的経路選択法“, 電子情報通信学会 NS 研究会, 沖縄, 2025 年 3 月