

量子ネットワークにおける MAB を用いた経路選択手法

Kim Minkyu[†] 上山 憲昭[†]

[†] 立命館大学 情報理工学部 〒567-8570 大阪府茨木市岩倉町 2-150

E-mail: †is0592fe@ritsumeit.ac.jp, ††kamiaki@fc.ritsumeit.ac.jp

あらまし 近年、量子コンピュータの性能が使用可能な量子ビット数に大きく依存することから、より複雑な計算や大規模なタスクの実現には分散量子コンピューティングが不可欠となっている。しかし、量子状態の品質を示す fidelity は通信距離に応じて低下し、特に長距離通信では深刻な課題となる。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、End-to-End fidelity を保証できない問題がある。また、量子状態の脆弱性により、環境ノイズの影響を受けて fidelity が低下する課題があり、この問題に対しては purification の一種である distillation 技術を用いて fidelity の維持を図る必要がある。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、 ϵ -greedy MAB, Thompson Sampling, Round Robin の3つの方式に基づく、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案する。50 ノードで構成される Waxman ランダムトポロジでの評価実験では、Thompson Sampling が他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することを明らかにする。

キーワード 量子ネットワーク, 忠実度, 量子蒸留, MAB

Multi-Armed Bandit Based Routing Method for Quantum Networks

Minkyu KIM[†] and Noriaki KAMIYAMA[†]

[†] College of Information Science and Engineering, Ritsumeikan University 2-150 Iwakura-cho, Ibaraki, Osaka 567-8570, JAPAN

E-mail: †is0592fe@ritsumeit.ac.jp, ††kamiaki@fc.ritsumeit.ac.jp

Abstract Recent years have seen distributed quantum computing become essential for implementing complex calculations and large-scale tasks, as quantum computer performance heavily depends on the number of available qubits. However, fidelity, which indicates the quality of quantum states, degrades with communication distance and poses a serious challenge, especially in long-distance communications. Existing quantum networks use fixed routes without considering dynamic changes in fidelity during route selection, leading to issues with guaranteeing end-to-end fidelity. Additionally, quantum states are vulnerable to environmental noise causing fidelity degradation, which necessitates the use of distillation techniques, a form of purification, to maintain fidelity levels. In this paper, we propose a dynamic route selection method that utilizes both fidelity-based path exploration and the Multi-Armed Bandit (MAB) algorithm to address these challenges. Specifically, we compare three approaches - ϵ -greedy MAB, Thompson Sampling, and Round Robin - and present an optimal route selection method that considers both fidelity and delay time for each path. In evaluation experiments using a Waxman random topology consisting of 50 nodes, Thompson Sampling achieves higher fidelity and lower delay times compared to other methods, demonstrating stable performance even in dynamic environments with changing arrival rates. These results indicate that our proposed method contributes to more efficient dynamic route selection in quantum networks.

Key words Quantum networks, Fidelity, Quantum distillation, Multi-armed bandit

1. はじめに

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。量子コンピューティングでは、単一プロセッサでの制御可能な量子ビット数が

127 個程度に制限されており、この課題を解決するため、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、その基盤技術として量子通信の重要性が高まっている。一方、量子通信を実現する上で最も重要な技術的課題の一つとして、量子状態の忠実度 (Fidelity) の維持が挙げられる。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して認識されている。特に、ネットワークの負荷変動と量子状態の確率的な変動を同時に考慮した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。

本稿では、このような課題に対し、量子ネットワークにおける多次元的な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。そのために、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採用し、特に Thompson Sampling を導入することで、fidelity と遅延時間のトレードオフを考慮した経路選択の実現を目指す。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な対応が可能となり、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が期待できる。

2. 量子ネットワークの概念

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 σ と理想的な目標状態 σ' の類似度は以下の式で表される。

$$F = \left(\text{Tr} \sqrt{\sqrt{\sigma} \sigma' \sqrt{\sigma}} \right)^2 \quad (1)$$

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、長距離量子通信に

おいて不可欠な要素となっている。図 1 に示すように、二つのベル対 (精製対象と補助状態) を準備し、アリスとボブがそれぞれの場所で CNOT 演算を実行する。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し、これ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。

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

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、量子測定に伴う量子状態の破壊により量子リソースが消費され、リソース利用効率が大きく低下するという問題がある。

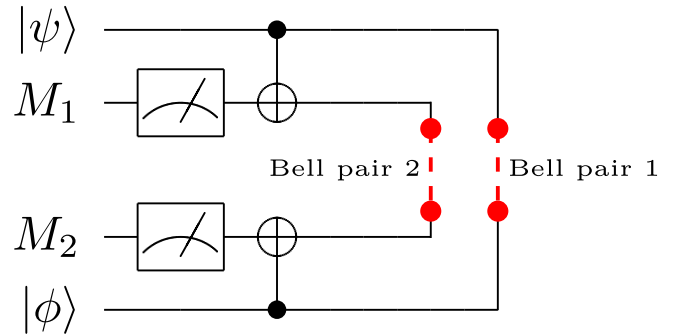


図 1 Circuit of quantum distillation

2.4 量子スワップと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 [10]。図 2 に示すように、中間ノードにおいて 2 つのベル対 $|\Phi^+\rangle$ を用いて量子状態を「スワップ」することで、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。このプロセスは、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技術となる。

一方、図 3 に示す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。送信者と受信者の間で事前に共有されたベル対を用意し、送信者は転送したい量子状態とベル対に対してベル測定を実行する。その後、測定結果を古典通信で受信者に送信し、受信者はその結果に基づいて適切な量子操作を実行することで、元の量子状態を再現する。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では組み合わせて使用され、効率的な長距離量子通信を実現する。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など、技術的な課題が存在する。

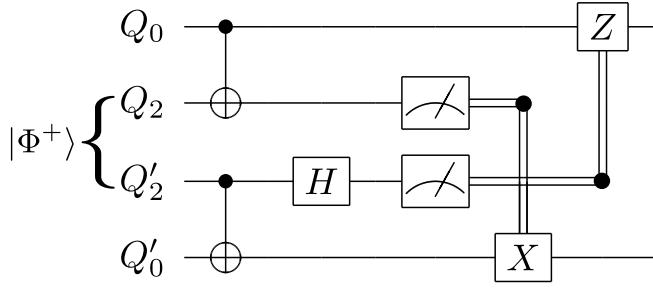


図 2 Circuit of quantum swap

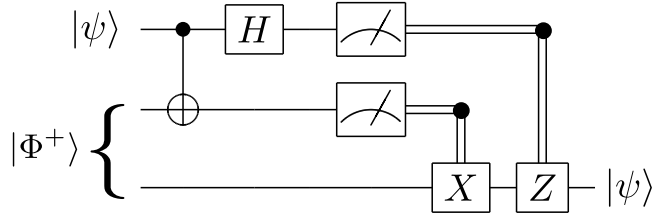


図 3 Circuit of quantum teleportation

3. 関連研究

図 4 に示すように、量子ルーティング技術は文献 [7] によると、大きく Simple routing と Routing with purification の二つのカテゴリに分類される。Simple routing カテゴリには、冗長なエンタングルメントを活用する Redundant entanglement routing, 複数経路の同時使用を特徴とする Concurrent routing, 複数ユーザーへの対応を可能とする Multi-user routing, そして機会主義的なアプローチを採用する Opportunistic routing が含まれる。一方、Routing with purification カテゴリには、エンド・ツー・エンドの忠実度を重視する E2E fidelity aware routing と、忠実度に基づく経路選択を行う Fidelity based routing が含まれており、これらの分類は量子ネットワークにおけるルーティング手法の特徴を体系的に示している。

Simple routing では、エンタングルメントの確立と経路選択に焦点を当て、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] は複数経路に予備的なエンタングルメントリソースを確保し、Concurrent routing [9] は複数の経路を同時に確立する。また、Multi-user routing [11] は量子スイッチを活用した複数ユーザー間の通信最適化を、Opportunistic routing [12] は部分的に利用可能な経路の即時活用を実現している。一方、Routing with purification では、エンタングルメントの品質維持を重視する。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。Fidelity based routing [13] は純化技術を活用し、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。

しかし、これらの既存手法には以下のような課題が存在する。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。多く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。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。第三に、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である。

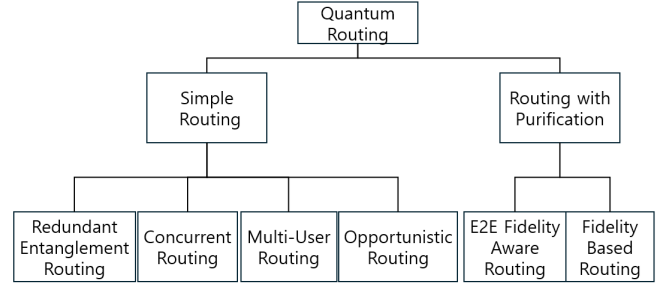


図 4 Classification of quantum routing methods

4. 提案方式

4.1 量子通信の手順

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 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、本稿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。

量子通信には主にオンデマンド方式とアドバンスド生成方式の二つのアプローチが存在する。オンデマンド方式は通信要求に応じて EPR ペアを生成する理想的なアプローチであるが、突発的な要求に対するリソース確保が困難である。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とで、迅速な応答が可能となる。本稿では、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。

4.2 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：

$$R = w_1 \frac{1}{D} + w_2 F \quad (w_1 = w_2 = 0.5) \quad (3)$$

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、遅延時間は比較的大きな変動性を示すという特性を考慮し、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。

4.3 MAB アルゴリズムと報酬関数

リソース管理の効率性という課題に対応するため、本稿では、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、MAB の三つのアルゴリズムについて述べる。

報酬関数を、遅延時間 D と経路全体のフィデリティ F の両方を考慮し、以下の式で定義する。

$$R = w_1 \frac{1}{D} + w_2 F \quad (4)$$

ここで w_1 と w_2 は D と F の重みパラメータである。

また MAB のアルゴリズムとして、以下の三つの手法を考える。

1. ϵ -greedy MAB: 確率 ϵ 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。数値評価では、探索と活用のバランスを決定するパラメータ ϵ の値を 0.5 に設定する。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。

$$Q_{t+1} = Q_t + \frac{1}{n}(R_t - Q_t) \quad (5)$$

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。この更新式により、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し、選択回数が増えるにつれて更新幅が徐々に低減することで、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 (α, β) 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。次式に示すように、各経路 i に対して Beta 分布からパラメータ θ_i をサンプリングする。

$$\theta_i \sim \text{Beta}(\alpha_i, \beta_i) \quad (6)$$

Beta 分布は $[0, 1]$ の範囲で確率分布を表現でき、 α と β 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。

$$\alpha_{t+1} = \alpha_t + r_t, \quad \beta_{t+1} = \beta_t + (1 - r_t) \quad (7)$$

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 α が増加し、低い場合は β 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。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。

5. 性能評価

5.1 実験環境及びシナリオ

数値評価では、図 5 に示す Waxman ランダムトポロジを用いた。Waxman モデルはノード間の距離に基づいて確率的にリンクを生成するモデルである。50 個のノードと 121 個のリンクで構成され、平均次数は 4.84 である。各リンクの物理的距離を 50km から 300km の間でランダムに設定し、各リンクには 3 つの量子チャネルを配置した。3,000 秒の計算機シミュレーションを実施し、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 の間に設定し、1,500~3,000 秒の期間は 8~10 の間に設定した。

量子リンク管理のため distillation table を導入した。これは Li ら [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もので、本稿では各リンク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。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、distillation 作業は最大 20 ラウンドまで実行可能に設定した。また、Fidelity の要求値を 0.8 に設定し、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を行った。

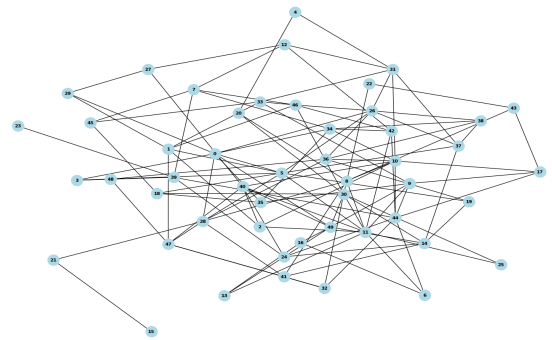


図 5 Example of Waxman random topology

5.2 性能評価指標

性能評価指標として、以下に定義する 2 つの指標を用いる。

1. 遅延時間 (Delay)

1 ビットの量子ビットの転送に要する全体の遅延時間 D を以下の式で定義する。

$$D = t_{proc} + t_{teleportation} + t_{trans} \quad (8)$$

ここで、各項を以下で定義する。

- 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、次式で定義する。

$$\prod_i F_i$$

ここで F_i は経路上の i 番目のリンクのフィデリティである。そして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する。

$$\sum_i (-\log F_i)$$

最終的に 0 から 1 の範囲に正規化するため、次式のようにシグモイド関数を用いて、経路全体のフィデリティ F_{e2e} を定義する。

$$F_{e2e} = \left(1 + \exp \left(\sum_i (-\log F_i) \right) \right)^{-1} \quad (9)$$

5.3 性能評価結果

図 6 に、各タイムスロット (10 秒) における 3 つの各方式の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、 ϵ -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となった。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。これは Thompson Sampling がベータ分布による経路選択を通じて効率的な学習を行い、遅延時間を効果的に削減できたためである。一方、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 7 に、End-to-End 忠実度の推移を同様に示す。Thompson Sampling は約 0.42 の最高値を安定的に維持し、 ϵ -greedy (約 0.38)、Round Robin (約 0.35) を一貫して上回った。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。なお、distillation 処理により閾値以上の高品質な量子リンクが生成され、報酬として End-to-End 忠実度を定義することで、三つのアルゴリズムは安定した量子リンクを利用できる一方、量子測定の不確実性による変動は主に遅延時間に影響を与えていることが分かる。

図 8 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。Thompson Sampling は経路

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た。一方、 ϵ -greedy は 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、この安定化は単純な順次探索による平均値への収束であることを示している。

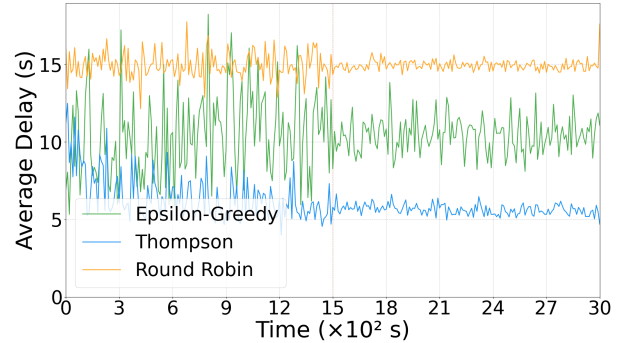


図 6 Time series of average delay

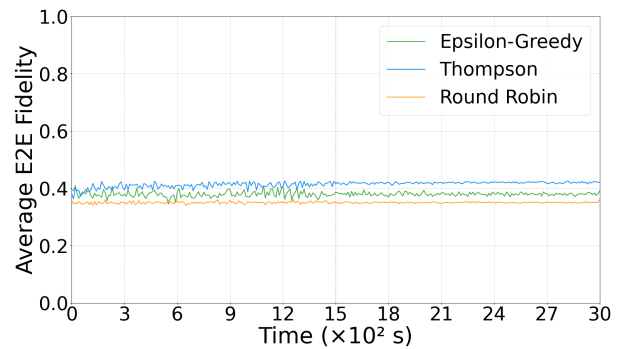


図 7 Time series of average end-to-end fidelity

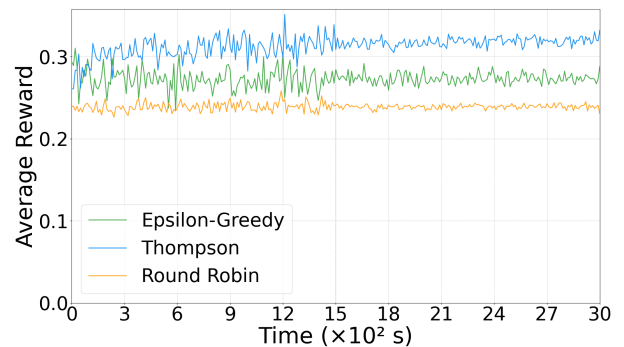


図 8 Time series of average rewards

本評価を通じて、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、 ϵ -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 선호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 fidelity の閾値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。

6. ま と め

本稿では、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 ϵ -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計算機シミュレーションを実施した。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明らかとなった。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。

謝辞 本研究成果は JSPS 科研費 23K21664, 23K21665, 23K28078 の助成を受けたものである。ここに記して謝意を

表す。

文 献

- [1] R. Van Meter and J. Touch, Designing quantum repeater networks, *IEEE Communications Magazine*, vol. 51, no. 8, pp. 64-71, Aug. 2013
- [2] D. Cuomo, M. Caleffi, and A. S. Cacciapuoti, Towards a distributed quantum computing ecosystem, *IET Quantum Communication*, vol. 1, no. 1, pp. 3-8, Jan. 2020
- [3] Y. Zhao, G. Zhao, and C. Qiao, E2E fidelity aware routing and purification for throughput maximization in quantum networks, in *Proc. IEEE INFOCOM*, pp. 480-489, May 2022
- [4] W. Shi and R. Malaney, Quantum routing for emerging quantum networks, *IEEE Network*, early access, 2023
- [5] J. W. Pan, C. Simon, C. Brukner, and A. Zeilinger, Entanglement purification for quantum communication, *Nature*, vol. 410, no. 6832, pp. 1067-1070, Apr. 2001
- [6] D. Bouwmeester, J. W. Pan, K. Mattle, M. Eibl, H. Weinfurter, and A. Zeilinger, Experimental quantum teleportation, *Nature*, vol. 390, no. 6660, pp. 575-579, Dec. 1997
- [7] B. Kar and P. Kumar, Routing Protocols for Quantum Networks: Overview and Challenges, *arXiv:2305.00708*, May 2023
- [8] Y. Zhao and C. Qiao, Redundant entanglement provisioning and selection for throughput maximization in quantum networks, in *Proc. IEEE INFOCOM*, pp. 1-10, May 2021
- [9] S. Shi and C. Qian, Concurrent entanglement routing for quantum networks: Model and designs, in *Proc. ACM SIGCOMM*, pp. 62-75, Jul. 2020
- [10] Y. Mao, Y. Liu, and Y. Yang, Qubit allocation for distributed quantum computing, in *Proc. IEEE INFOCOM*, pp. 1-10, May 2023
- [11] Y. Zeng, J. Zhang, J. Liu, Z. Liu, and Y. Yang, Multi-entanglement routing design over quantum networks, in *Proc. IEEE INFOCOM*, pp. 510-519, May 2022
- [12] A. Farahbakhsh and C. Feng, Opportunistic routing in quantum networks, in *Proc. IEEE INFOCOM*, pp. 490-499, May 2022
- [13] J. Li, M. Wang, K. Xue, R. Li, N. Yu, Q. Sun, and J. Lu, Fidelity-guaranteed entanglement routing in quantum networks, *IEEE Transactions on Communications*, vol. 70, no. 10, pp. 6748-6763, Oct. 2022