

量子ネットワークにおける量子特性を考慮した多腕バンディットによる経路選択法

Kim Minkyu[†] 上山 憲昭^{††}

† 立命館大学 大学院 情報理工学研究科
〒567-8570 大阪府茨木市岩倉町 2-150

†† 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@ed.ritsumei.ac.jp, ††kamiaki@fc.ritsumei.ac.jp

あらまし 量子通信を実現するためには、送信者と受信者の間でエンタングルメントを分配・確立する必要がある。さらに、マルチホップ量子ネットワークにおいては、中継ノードを経由した遠隔エンタングルメント接続の確立が求められ、この問題はエンタングルメントルーティングとして知られている。しかし、エンタングルメントルーティングを実現するためには、エンタングルメントの生成・分配、複数経路からの適切な経路選択、および中継ノードを経由した End-to-End 接続の確立という複合的な課題に対処する必要がある。既存研究では、これらの課題を個別に扱うことが多く、量子リソースの不確実性とトラフィック変動を同時に考慮した適応的な経路選択手法は十分に検討されていない。本稿では、明確な Bell pair 生成方式と継続的なリソース準備構造を基盤とし、Multi-Armed Bandit (MAB) アルゴリズムによる適応的経路選択手法を提案する。Waxman トポロジを用いた現実的なデコヒーレンス環境での評価実験を実施し、提案手法は End-to-End 成功率や忠実度においてベースライン手法を上回り、動的なトラフィック変化に対しても適応的な経路選択動作が可能であることを明らかにする。

キーワード 量子ネットワーク、エンタングルメントルーティング、Multi-Armed Bandit、経路選択、忠実度、デコヒーレンス

Multi-Armed Bandit Based Route Selection Considering Quantum Characteristics in Quantum Networks

Minkyu KIM[†] and Noriaki KAMIYAMA^{††}

† Graduate School of Information Science and Engineering, Ritsumeikan University
2-150, Iwakura-cho, Ibaraki, Osaka 567-8570, JAPAN

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

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

Abstract To realize quantum communication, it is necessary to distribute and establish entanglement between the sender and receiver. Furthermore, in multi-hop quantum networks, the establishment of remote entanglement connections via intermediate nodes is required, and this problem is known as entanglement routing. However, realizing entanglement routing requires addressing complex challenges including entanglement generation and distribution, appropriate path selection from multiple candidates, and End-to-End connection establishment through intermediate nodes. Existing studies often address these challenges individually, and adaptive path selection methods that simultaneously consider the uncertainty of quantum resources and traffic fluctuations have not been sufficiently explored. In this study, we propose an adaptive path selection method based on Multi-Armed Bandit (MAB) algorithms, built upon a clear Bell pair generation scheme and a continuous resource preparation structure. We conducted evaluation experiments in a realistic decoherence environment using Waxman topology. Experimental results show that the proposed method outperforms baseline methods in End-to-End success rate and fidelity, and demonstrates adaptive path selection behavior against dynamic traffic changes.

Key words Quantum networks, Entanglement routing, Multi-Armed Bandit, Path selection, Fidelity, Decoherence

1. はじめに

量子コンピュータは、従来の古典コンピュータでは困難な計算を可能にする技術として注目されている。特に、量子鍵配送や分散量子コンピューティングなどの応用が期待されており、これらを実現するためには遠隔ノード間での量子通信が不可欠である。量子通信では、送信者と受信者の間で事前にエンタングルメントを分配・確立する必要があり、マルチホップ量子ネットワークにおいては、中継ノードを経由した End-to-End 接続への拡張が求められる。この問題はエンタングルメントルーティングとして知られている。

マルチホップでの量子通信を実現するためには、複数の観点から課題を考慮する必要がある。Bell pair をどのように生成し配置するかというエンタングルメントの生成・分配、複数の経路候補から適切な経路を選択する経路選択、そしてスワッピングによる End-to-End 接続の確立と、マルチホップ通信に伴う品質劣化に対する品質維持である。これらの課題は相互に関連しており、統合的なアプローチが求められる。

既存研究では、これらの課題を個別に扱うことが多く、統合的に考慮した手法は十分に検討されていない。また、トライフィックの観点では静的な環境を前提としており、動的変動への適応に限界がある。

本稿では、エンタングルメントの生成・分配方式を明示し、リクエストの有無に関わらず事前に Bell pair を生成してルーティングに備える構造を提案する。経路選択には Multi-Armed Bandit (MAB) アルゴリズムを活用し、動的環境に適応可能なルーティング手法を実現する。本稿の構成は以下の通りである。2 節節では関連技術、3 節節では関連研究を紹介する。4 節節では提案方式、5 節節では性能評価を示し、6 節節でまとめを述べる。

2. 関連技術

本節では、量子ネットワークにおける基本的な技術要素について述べる。Bell pair の生成と品質評価、エンタングルメントスワッピングによる経路確立、および精製による品質向上の仕組みを説明する。

2.1 量子通信

量子ネットワークでは、2つの量子ビットが強い相関を持つ Bell pair を用いて通信する。遠距離ノード間の接続には、まず各リンクの両端ノードに Bell pair を事前に配置し、中継ノードを経由して接続を拡張することで End-to-End 接続を確立する。ただし、Bell pair 生成は確率的に成功し、生成後もデコヒーレンスにより量子状態は時間とともに劣化する [1]。

2.2 Bell pair 生成

本稿では、Bell pair 生成に Midpoint Heralding Protocol (MHP) を採用する [2]。図 1 に示すように、MHP では隣接する 2 つのノードがそれぞれ光子を生成し、中間地点に送信する。中間地点での Bell 状態測定 (BSM) が成功すると、両ノードのメモリ量子ビット間に Bell pair が確立され、その成功が両ノードに通知される。

1 回の試行で Bell pair が生成される確率は、両ノードから中間地点への光子到達、検出器での検知、および BSM の成功確

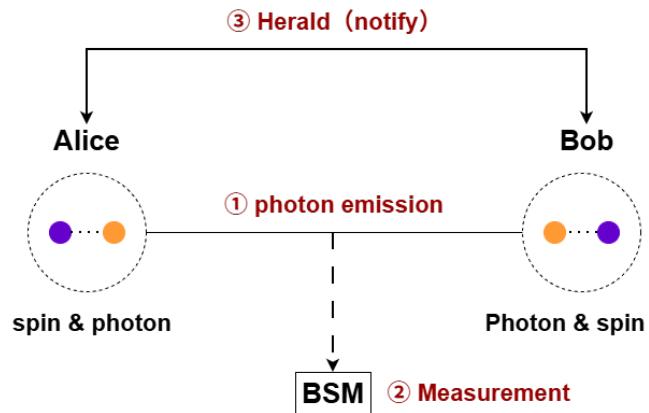


図 1: Midpoint Heralding Protocol の動作

率の積として決定される。

2.3 忠実度

忠実度 (fidelity) は、量子状態の品質を表す指標である。理想的な Bell 状態 $|\Phi^+\rangle$ に対する密度行列 ρ の忠実度は次式で定義される。

$$F = \langle \Phi^+ | \rho | \Phi^+ \rangle \quad (1)$$

$F = 1$ は完全な Bell 状態、 $F = 0.25$ は量子的相関が完全に失われた状態を意味する。精製には $F > 0.5$ が必要であり、スワッピングや伝送損失による忠実度低下に対して一定以上の品質維持が重要となる。

2.4 エンタングルメントスワッピング

エンタングルメントスワッピング (entanglement swapping) は、隣接リンクの Bell pair を接続してより長距離のエンタングルメントを確立する操作である。中継ノードが保持する 2 つの Bell pair に対して Bell 状態測定を実施し、その測定結果を古典通信で両端ノードに伝達する。 n 本のリンクで構成される経路では $n - 1$ 回のスワッピングが必要となる。忠実度 F_1, F_2 の Bell pair をスワッピングした結果の忠実度は次式で与えられる。

$$F_{swap} = F_1 F_2 + \frac{(1 - F_1)(1 - F_2)}{3} \quad (2)$$

各スワッピング操作により忠実度が低下し、スワッピング回数に対して指数的に減少する。

2.5 精 製

精製 (entanglement distillation) は、複数の低忠実度 Bell pair から少数の高忠実度 Bell pair を生成する操作である。本稿では DEJMPS プロトコルを採用する。忠実度 F_1, F_2 の Bell pair 2 個を用いた精製の成功確率 p と出力忠実度 F_{out} は次式で与えられる。

$$p = F_1 F_2 + (1 - F_1)(1 - F_2) \quad (3)$$

$$F_{out} = \frac{F_1 F_2}{p} \quad (4)$$

精製には $F > 0.5$ の忠実度が必要であり、スワッピングによる品質低下への対策として重要である。

2.6 量子テレポーテーション

量子テレポーテーションは、End-to-End Bell pair を用いて量子状態を転送する操作である。

送信ノードは転送する量子ビットと自身が保持する Bell pair

の量子ビットに対して Bell 状態測定を実施し、その 2 ビットの測定結果を古典通信で受信ノードに伝達する。受信ノードは測定結果に基づき Pauli 補正を適用し、元の量子状態を復元する。

テレポーテーションの忠実度は End-to-End Bell pair の忠実度に依存するため、経路上でのスワッピングや精製による品質管理が重要となる。

3. 関連研究

本節では、量子ネットワークにおける経路選択に関する先行研究を概観し、本稿の位置づけを明確にする。

Shi et al. の Q-CAST [3] は、複数の通信要求を同時に処理する経路選択手法を提案した。競合のない複数経路を探査し、同時要求に対するスループット向上を実現した。Zhao et al. の EFiRAP [4] は、精製を考慮した E2E Fidelity 保証とスループット最大化を実現した。どのリンクを精製するか、何個の補助 Bell pair を使用するかを最適化し、E2E 忠実度の閾値を満たす経路を選択する。Yang et al. の DER [5] は、ストリーム処理による動的ルーティングを提案し、要求の動的到着に対応した。細粒度のタイムスロットにより、エンタングルメント生成とスワッピングを柔軟にスケジューリングする。しかし、これらの研究は静的な要求環境や理想的な量子状態を前提としており、Bell pair 生成の確率的性質やデコヒーレンスによる品質劣化が十分に考慮されていない。

筆者らは先行研究において、MAB を用いた量子ネットワーク経路選択手法を提案した [6]。Distillation table を用いて各リンクに複数の Bell pair を事前に準備し、MAB による動的経路選択を実現した。しかし、Bell pair 生成を決定的に仮定しており、実際の量子デバイスにおける確率的な生成過程が反映されていない。また、デコヒーレンスを距離比例の初期忠実度低下として単純化しており、量子メモリにおける時間経過に伴う状態劣化が考慮されていなかった。

本稿では、MHP による確率的 Bell pair 生成、用途別に分離した量子メモリ管理、要求到着前のリンク単位での Bell pair 事前準備、および離散 Kraus 演算子によるデコヒーレンス計算を基盤とし、動的トラフィックに対する MAB による適応的経路選択を実現する。

4. 提案方式

本節では、提案方式の全体構成について述べる。まず、MHP と 2-Pool 構造を統合した Proactive Link Preparation を説明し、次に通信シーケンスと経路探索のコスト関数を示す。最後に、MAB による経路選択アルゴリズムを述べる。

4.1 Proactive Link Preparation

本稿では、MHP と 2-Pool 構造を統合した Proactive Link Preparation を導入する（図 2）。2-Pool 構造は、量子メモリを用途別に論理的に分離し、Bell Pool と Swap Pool で構成される。

Bell Pool は、MHP により確率的に生成された Bell pair を保管する。保管数には上限があり、上限到達時は新規生成を停止する。Swap Pool は、経路確立時に Bell Pool から Bell pair を受け取り、スワッピングおよび精製処理を実行する。経路をバイナリ分割して各セグメントでスワッピングを実行し、結果

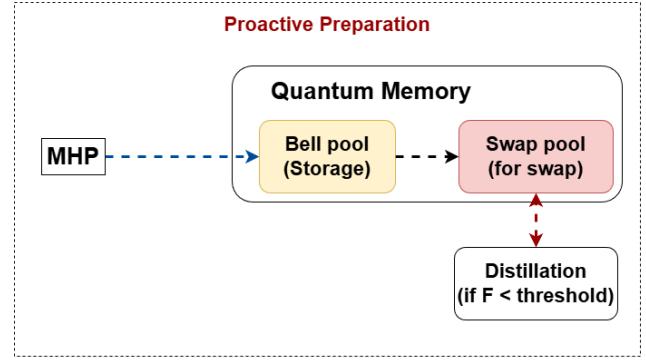


図 2: Proactive Link Preparation の構造

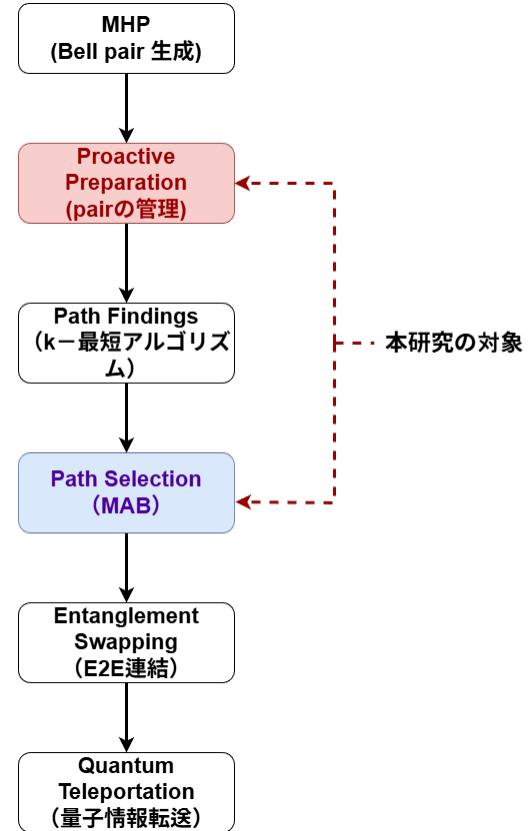


図 3: 提案方式の通信シーケンス

を Swap Pool に蓄積する。蓄積された Bell pair は、忠実度が閾値未満の場合に精製を適用し品質を向上させる。

本方式では、通信要求の到着を待たずに各リンクで Bell pair を事前に生成・保管することで、要求発生時の即時対応を可能とする。Bell pair の忠実度は、生成からの経過時間に応じて離散 Kraus 演算子により計算される。

4.2 通信シーケンス

図 3 に提案方式の通信シーケンスを示す。先行研究 [6] では、要求到着後に Bell pair を決定的に生成していたが、本稿では MHP と Proactive Link Preparation により、要求到着前に各リンクに Bell pair を事前準備する。通信要求が発生すると、 k -最短経路アルゴリズム ($k = 3$) により候補経路を探査し、MAB アルゴリズムが最適な経路を選択する。選択された経路上でスワッピングにより E2E Bell pair を確立し、量子テレポーテー

ションにより量子状態を転送する。伝送結果は MAB にフィードバックされ、次回の経路選択に反映される。

4.3 経路探索

候補経路の探索には、Yen の k-最短経路アルゴリズムを用いる。量子ネットワークでは、Bell pair の生成が確率的であり、各リンクの利用可能な Bell pair 数は時間とともに変動する。そのため、物理距離やホップ数のみに基づく従来のコスト関数では、リソース状況を反映した最適な経路を選択できない。

Santos et al. [7] は、各リンクの Bell pair 数が有限である環境において、リソース量に基づく経路探索アルゴリズムを提案した。本稿では、これを参考に、Bell pair 保有数と経路多様性を考慮したコスト関数を設計する。まず、リンク (i, j) のコストを式 (5) で与える。

$$w_{ij} = \frac{1}{n_{ij} + 1} \quad (5)$$

ここで、 n_{ij} はリンク (i, j) の Bell Pool 内の Bell pair 数である。Bell pair が多いリンクほどコストが低くなり、リソースが豊富な経路が優先される。次に、探索された経路の最終スコアを式 (6) で算出する。

$$S_p = 0.75 \times S_{\text{bell}} + 0.25 \times S_{\text{div}} \quad (6)$$

ここで、 S_{bell} は経路内の最小 Bell pair 数を正規化した値、 S_{div} は経路のホップ数多様性を表すスコアである。Bell pair 数に加えて経路多様性を考慮することで、異なる長さの経路を候補に含め、MAB の探索空間を確保する。

本シミュレーションでは $k = 3$ の候補経路を探索し、次節述べる MAB アルゴリズムにより最適な経路を選択する。

4.4 MAB による経路選択

本稿では、量子ネットワークの動的変動に適応するため、オンライン学習が可能な MAB アルゴリズムを採用する。具体的には、Thompson Sampling と UCB1 を用いる。Thompson Sampling は、各経路 i に対して Beta 分布からサンプリングし、最大値を持つ経路を選択する。

$$\theta_i \sim \text{Beta}(\alpha_i, \beta_i) \quad (7)$$

伝送結果に基づき、成功時は α_i 、失敗時は β_i を更新することで、探索と活用のバランスを取る。UCB1 は、平均報酬と探索項を組み合わせた次式により経路を選択する。

$$UCB_i = \bar{x}_i + \sqrt{\frac{2 \ln n}{n_i}} \quad (8)$$

ここで、 \bar{x}_i は経路 i の平均報酬、 n は総試行回数、 n_i は経路 i の選択回数である。信頼区間にに基づき、不確実性の高い経路を優先的に探索する。比較手法として、候補経路を順番に選択する Round-Robin と、ランダムに選択する Random を用いる。

5. 評価環境および評価指標

本節では、提案手法の有効性を検証するためのシミュレーション環境、物理パラメータ、および評価指標について述べる。

5.1 評価環境

本シミュレーションで使用した設定を表 1 に示す。ネットワークトポジは Waxman モデルにより生成し、20 ノード、

表 1: シミュレーションパラメタ

パラメタ	値
トポジ	Waxman
ノード数	20
リンク距離	20–80 km
シミュレーション時間	50 秒
候補経路数 k	3
E2E 試行回数/要求	6
Bell Pool 容量	15 pairs/link

表 2: 物理パラメタ

パラメタ	値	説明
T_1	75 ms	振幅減衰時間
T_2	25 ms	位相緩和時間
ファイバ損失	0.2 dB/km	@1550nm
光速 (ファイバ)	2×10^8 km/s	c/n
クロック周波数	5 kHz	MHP 試行頻度
BSM 成功率 (MHP)	50%	線形光学限界
BSM 成功率 (Swap)	90%	ローカル操作
検出器効率	90%	SNSPD
初期 Fidelity	0.92 ± 0.05	spin-photon
最小 Fidelity	0.55	廃棄基準

リンク距離 20–80 km の都市規模ネットワークを構築した。経路選択では $k = 3$ の候補経路を探索し、各通信要求に対して最大 6 回の E2E 接続を試行する。

動的な環境での適応性を評価するため、通信要求の到着率は式 (9) の正弦波パターンで変動させた。

$$\lambda(t) = 45 + 15 \sin\left(\frac{2\pi t}{50}\right) \quad [\text{req/sec}] \quad (9)$$

これにより、到着率は 30–60 req/sec の範囲で周期的に変動し、トラフィック負荷の変化に対する各手法の応答を観察する。

次に、本シミュレーションで使用した物理パラメータを表 2 に示す。ノードおよび量子メモリには NV center を採用した。NV center は電子スピンと核スピンを持ち、本シミュレーションでは電子スピンのコヒーレンス時間として $T_1 = 75$ ms、 $T_2 = 25$ ms を設定した。検出器には SNSPD (superconducting nanowire single-photon detector) を採用した。SNSPD は高い検出効率を持つ単一光子検出器であり、本シミュレーションでは 90% を設定した。スワッピング時の BSM は、遠隔光子伝送を伴わないローカル操作であるため、MHP の 50% より高い成功率となる。本シミュレーションでは 90% を設定した。

Bell pair 生成には MHP プロトコルを用い、光ファイバの損失と検出器効率を考慮した確率的に生成する。MHP プロトコルによる Bell pair 生成確率は式 (10) で与えられる。

$$p_{\text{success}} = p_{\text{BSM}} \cdot \eta_{\text{det}}^2 \cdot \eta_{\text{fiber}}^2 \quad (10)$$

ここで、ファイバ透過率は dB の定義より $10^{-\alpha L/10}$ で与えられるが、MHP プロトコルでは両端ノードから中間点へ光子を送信するため、伝送距離が $L/2$ となり、 $\eta_{\text{fiber}} = 10^{-\alpha L/20}$ ($\alpha = 0.2$ dB/km、 L はリンク全長) となる。

5.2 評価指標

評価指標は、MAB 学習性能、システム伝送性能、および補助分析の観点から構成する。まず、MAB 報酬関数の構成要素である $\mathbf{1}_{\text{success}}$ と F_{E2E} を定義し、次にこれらを用いた評価指標を導出する。

$\mathbf{1}_{\text{success}}$ は E2E 接続試行の成否を表す指示関数であり、entanglement 生成数の基本単位として広く用いられている [3]。

表 3: 各ルーティング方式の性能比較

手法	Avg Reward	Throughput (pairs/s)	E2E Fidelity	Success Rate (%)
UCB1	0.1263	38.83	0.8102	13.9
Round-Robin	0.1231	37.83	0.8111	13.6
Thompson	0.1194	36.73	0.8103	13.2
Random	0.1033	31.82	0.8076	11.4

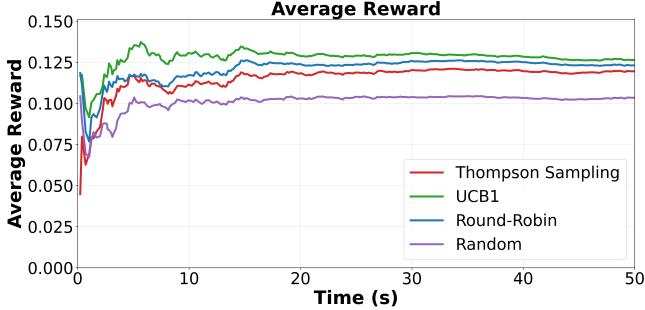


図 4: Average Reward の時系列変化

F_{E2E} は確立された Bell pair の E2E Fidelity であり、量子通信の品質評価に重要な指標である [4]。なお、 F_{E2E} は distillation や swapping を経た後の実測値を用いる。

MAB 学習性能の評価には、上記の要素を組み合わせた Average Reward を用いる。MAB は個別の E2E 接続試行ごとに経路選択の良否を判断し、次回の選択に反映する必要がある。そこで、報酬関数を式 (11) で定義する。

$$\text{Reward} = 0.5 \times \mathbf{1}_{\text{success}} + 0.5 \times F_{\text{E2E}} \quad (11)$$

両者を均等に重み付けすることで、成功率と品質のバランスを取る設計とした。

システム伝送性能の評価には、Throughput と E2E Fidelity を用いる。Throughput は単位時間あたりの成功回数であり、式 (12) で定義される。

$$\text{Throughput} = \frac{\sum \mathbf{1}_{\text{success}}}{T_{\text{sim}}} \quad [\text{pairs/sec}] \quad (12)$$

E2E Fidelity は、成功した接続における F_{E2E} の平均値であり、式 (13) で定義される。

$$\bar{F}_{\text{E2E}} = \frac{1}{N_{\text{success}}} \sum_{i=1}^{N_{\text{success}}} F_i \quad (13)$$

また、補助分析として、Success Rate と Path Length を観測する。Success Rate は試行に対する成功比率であり、システムの信頼性を確認する。Path Length は選択された経路の平均ホップ数である。量子ネットワークでは経路長の増加に伴い成功率と fidelity が指数的に低下するため [3]、MAB が長い経路にも適応的に対応するかを分析する。

6. 性能評価

本節では、各ルーティング方式の性能を評価する。表 3 に数値比較、図 4–6 に各指標の時系列変化を示す。

Average Reward に関して、表 3 より UCB1 は 0.1263 を達成し、Random の 0.1033 と比較して 22.3% の向上を示した。Thompson Sampling も 15.6% 向上したが、UCB1 には及ばない。

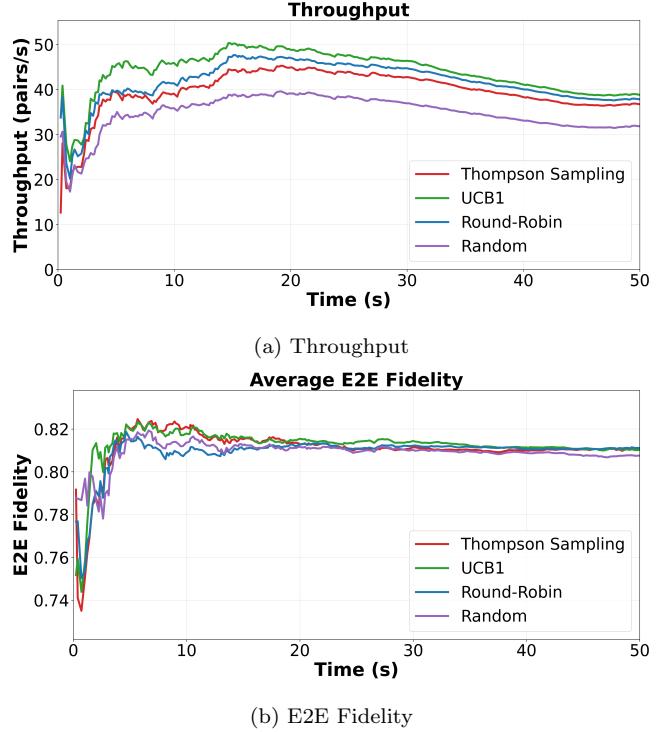


図 5: Throughput と E2E Fidelity の時系列変化

かった。図 4 の時系列変化では、UCB1 が早期に高い報酬を獲得し安定して推移する一方、Thompson Sampling は収束が遅い傾向が確認された。これは、Thompson Sampling が確率的サンプリングに基づくため、量子環境の高ノイズ下では事後分布が広く維持されることに起因する。一方、UCB1 は決定論的な選択により、高性能な経路への早期の収束が可能である。

Throughput に関して、表 3 より UCB1 は 38.83 pairs/s を達成し、Random の 31.82 pairs/s と比較して 22.0% 向上した。図 5(a) の時系列変化では、全手法でシミュレーション初期に値が上昇した後、安定した値に収束しており、MAB 手法が Random との差を徐々に拡大する傾向が確認された。

E2E Fidelity は全手法で 0.807–0.811 の範囲に収束した。これは、NISQ (noisy intermediate-scale quantum) mode における精製処理により、成功した接続の品質が一定水準以上に維持されることを示している。図 5(b) では、全手法が同様の推移を示しており、精製処理が品質維持に支配的な役割を果たしている。ただし、Round-Robin は最も短い経路長 (2.15 ホップ) で成功するため、高い品質を維持しやすい。

一方、MAB 手法はより長い経路 (2.40–2.41 ホップ) においても精製を適用しつつ同程度の E2E Fidelity を達成しており、経路長増加による品質低下を補償できることが確認された。

Success Rate は表 3 より 11.4–13.9% の範囲となり、UCB1 が最高値を達成した。この値は、Bell pair 生成およびスワッピングの確率的性質を反映している。図 6(a) では、全手法が同様の変動パターンを示しており、これはトラフィック到着率の周期的変動に起因する。

平均経路長に関して、図 6(b) より Round-Robin は最も短い平均経路長 (2.15 ホップ) を示した。これは、Round-Robin が候補経路を順番に試行する中で、短い経路でのみ成功する傾向

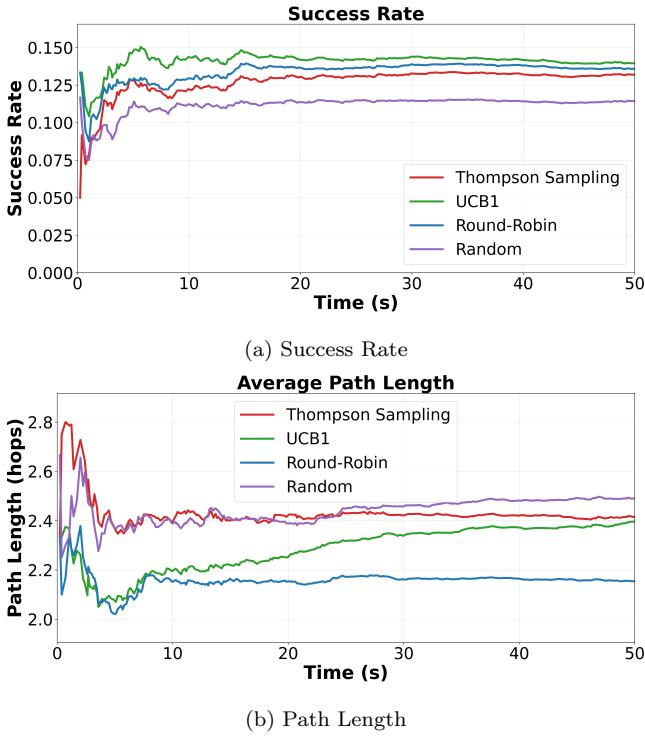


図 6: Success Rate と平均経路長の時系列変化

があることを反映している。一方、MAB 手法は平均 2.40–2.41 ホップのより長い経路でも成功を達成しており、学習による適応的な経路選択の有効性が確認された。

ただし、本評価では MAB の構造的限界も観察された。まず、UCB1 と Round-Robin の性能差は約 2.6% と小さく、これは候補経路数 $k = 3$ の制約により選択肢が限定されたことに起因すると考えられる。また、スワッピングのタイミングや戦略は経路選択と密接に関連しており、より効率的なスワッピング戦略との統合により改善の余地がある。

さらに、MAB は定常的な報酬分布を仮定するが、量子ネットワークではトライフィック到着率、Bell pair 状態、スワッピング成功率が同時に変動し、これらは互いに連動している。MAB は過去の平均報酬に基づき判断するため、図 4 ではトライフィック変動に対する応答の遅れが確認された。本評価ではスワッピング BSM 成功率を 90% としたが、線形光学系の理論限界である 50% を適用した場合、この非定常性の影響はより顕著になるとと考えられる。

7. まとめ

本稿では、量子ネットワークにおける MAB に基づく適応的経路選択手法を提案した。先行研究 [6] を拡張し、MHP による確率的 Bell pair 生成、2-Pool 構造による量子メモリ管理、および離散 Kraus 演算子によるデコヒーレンス計算を導入し、NISQ 環境を可能な限り忠実に再現したシミュレーション基盤を構築した。Waxman トポロジ (20 ノード、50 秒) での評価の結果、UCB1 は Random と比較して Throughput で 22.0%、Average Reward で 22.3% の向上を達成し、動的なトライフィック変動に対する適応的な経路選択の有効性を確認した。

今後の課題として以下が挙げられる。(1) NetSquid の MHP

計算量に起因するスケーラビリティの制約があり、より大規模なネットワークへの拡張が必要である。(2) MAB は定常的な報酬分布を仮定するため、量子ネットワークの非定常環境への適応が限定的である。(3) 現在の Bell pair 状態を考慮した経路選択、および経路選択とスワッピング戦略の統合的な最適化が求められる。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 (25K03113, 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] Abane, A., Cubeddu, M., Mai, V. S., & Battou, A. (2025). Entanglement Routing in Quantum Networks: A Comprehensive Survey. *IEEE Transactions on Quantum Engineering*.
- [2] Dahlberg, A., Skrzypczyk, M., Coopmans, T., Wubben, L., Rozpedek, F., Pompili, M., Stolk, A., Pawelczak, P., Knegjens, R., de Oliveira Filho, J., Hanson, R., & Wehner, S. (2019). A link layer protocol for quantum networks. In *Proceedings of the ACM SIGCOMM 2019 Conference* (pp. 159–173). ACM.
- [3] Shi, S., & Qian, C. (2020). Concurrent entanglement routing for quantum networks: Model and designs. In *Proceedings of ACM SIGCOMM 2020* (pp. 62–75).
- [4] Zhao, Y., Zhao, G., & Qiao, C. (2022). E2E Fidelity Aware Routing and Purification for Throughput Maximization in Quantum Networks. In *Proceedings of IEEE INFOCOM 2022* (pp. 1–10).
- [5] Yang, L., Zhao, Y., Xu, H., Huang, L., & Qiao, C. (2025). Dynamic entanglement routing based on stream processing for quantum networks. *IEEE Transactions on Networking*, 33(1), 382–397.
- [6] Kim Minkyu, 上山 憲昭, 量子ネットワークにおける MAB を用いた経路選択手法, 信学会 NS 研究会, NS2024-211, 2025 年 3 月
- [7] Santos, S., Monteiro, F. A., Coutinho, B. C., & Omar, Y. (2023). Shortest path finding in quantum networks with quasi-linear complexity. *IEEE Access*, 11, 7180–7194.