
量子ネットワークにおけるMABを用いた 経路選択法

立命館大学
Kim Minkyu 上山憲昭

量子ネットワークの概念

- 量子ネットワークとは
 - 量子もつれを用いた量子状態の転送・処理ネットワーク
- 量子ネットワーク構成要素
 - 量子リピータ : 長距離通信実現(量子もつれ生成・分配)
 - 量子メモリ : 状態保存
 - 量子リンク : 古典リンクと併用
- 量子もつれ(Entanglement)
 - 量子間の相関関係を示す量子力学特有の現象
 - 測定による瞬時の状態決定
 - 環境影響に敏感
 - coherence time・ノイズによる品質劣化

忠実度(fidelity)

■ 忠実度(Fidelity)

- 量子状態の品質指標(0-1)
- 理想状態からのズレを評価
- $F = \left(\text{Tr} \sqrt{\sqrt{\sigma} \sigma' \sqrt{\sigma}} \right)^2$

■ 量子通信の特性

- ゲート操作や測定誤差による劣化
- 通信距離の増加に伴う品質低下
- 環境ノイズの影響を受けやすい

■ 忠実度維持の課題

- 長距離通信での品質維持が必要
- エンタングルメントの再生成や蒸留による改善
- リソース消費と遅延増加のトレードオフ

量子蒸留(Distillation)

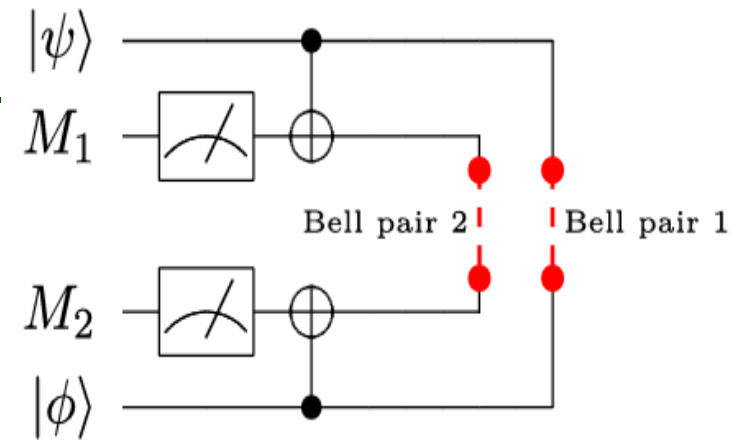


図 2.1: Circuit of Quantum Distillation

■ 量子蒸留(Distillation)

- 低品質な量子もつれから高品質な量子もつれを生成
- 複数ラウンドでFidelityを向上

■ 動作の基本原則

- 精製対象と補助用の2つのベル対を使用
- CNOT演算と測定結果の照合による品質改善

■ 実装上の課題

- 量子ビット・ゲート操作のリソース消費
- ラウンド数増加に伴う処理遅延

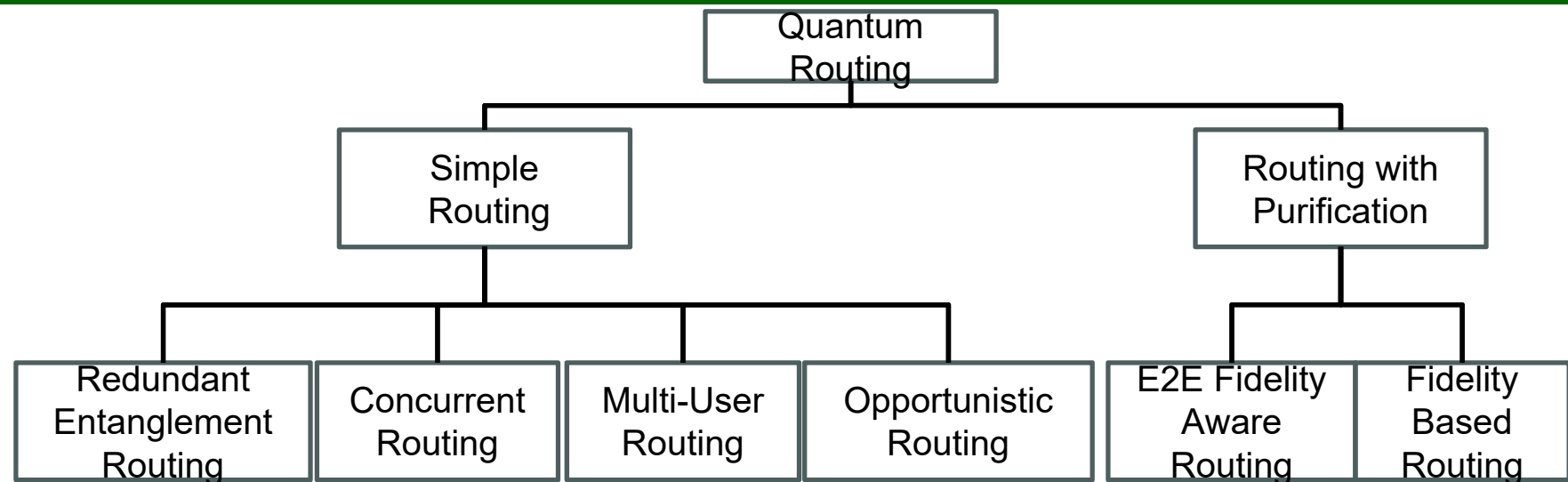
研究背景(1)

- 量子通信の重要性
 - 分散量子コンピューティングによる性能向上が必要
- 量子状態の忠実度(Fidelity)の課題
 - 環境と相互作用による劣化
 - 長距離伝送時の顕著な低下
- 量子ネットワークの不安定性
 - ネットワークの負荷変動や量子状態の確率的な変動

研究背景(2)

- 量子ネットワークの経路選択
 - 量子状態の不安定性(ノイズ・測定による劣化)
 - 経路選択による品質変化の制御
- 制御情報の伝送
 - Bell測定結果の古典通信
 - 経路選択による制御効率の最適化
- 経路選択の課題
 - 長距離通信でのFidelity低下
 - リソース消費の増大

既存研究(1) – 量子ルーティングの分類と手法



■ B. Kar and P. Kumar, "Routing Protocols for Quantum Networks: Overview and Challenges," arXiv:2305.00708v1 [quant-ph], May 2023, Fig. 4.

■ 分類

■ 量子ルーティングは「Simple Routing」と「Routing with Purification」に大別

■ Simple Routingの手法

- 冗長なエンタングルメント活用や複数経路の同時利用
- 主にホップ数や遅延を指標とした固定的な経路選択が中心

■ Routing with Purification

■ 各リンクのFidelityを重視し、長距離通信の品質維持を図る

既存研究(2) – 既存研究の限界

■ 動的環境への対応

- 静的な経路選択が前提
- ネットワーク状態の変化に非対応

■ 経路選択の問題

- 従来指標(ホップ数・遅延)のみ使用
- 量子状態のFidelity変化を考慮せず

■ Purification活用の課題

- Purification結果の経路選択への未反映
- End-to-EndのFidelity最適化と制御の分離

研究目的

■ 研究目的

- End-to-End FidelityとPurificationの統合的な考慮
- MABアルゴリズムを基盤とした新しい経路選択
- Thompson Samplingによる動的環境への対応

MABアルゴリズム

- MAB (Multi-Armed Bandit)
 - 複数の選択肢から**最適解**を学習
 - **探索**と**活用**の効率的なバランス



- 本研究での応用
 - 経路を**スロットマシン**として扱い、Fidelity・遅延を報酬
 - **動的**な変化に対応した経路選択の実現

Thompson Sampling

■ Thompson Sampling

- 多腕バンディット問題(MAB)において、各アクション(腕)の成功確率をベータ分布で推定

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

- 報酬(成功・失敗)を観測するたびにパラメータ(α , β)を更新

- $\alpha_i \leftarrow \alpha_i + r, \quad \beta_i \leftarrow \beta_i + (1 - r)$

- 確率的な探索と活用の特徴

- ベータ分布からのサンプリングにより自然な探索を実現
 - MABの明示的な選択と異なり、確率的な判断で暗黙的に調整

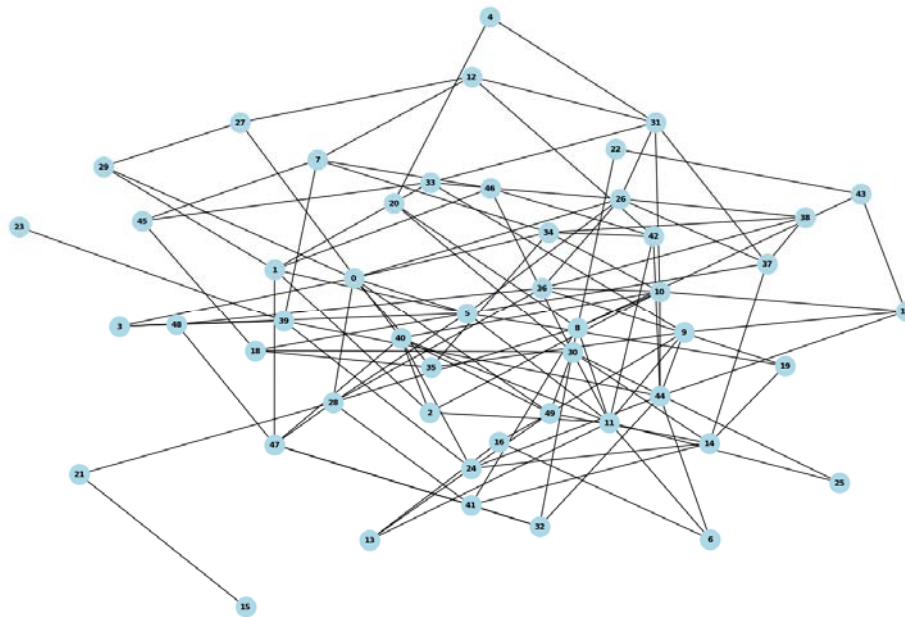
提案方式(1)

- Advance Generation モデル
 - EPRペアの事前生成とDistillation tableでの管理
 - 量子リンクの安定性確保
- On-demand Generation モデル
 - 要求時のEPRペア生成
 - リソース確保と応答性の制約
- 採用(Advance Generation モデル)モデルの利点
 - 安定した通信環境の実現
 - ネットワーク変動への柔軟な対応

提案方式(2)

■ システムモデル

- Waxmanランダムトポロジーを使用(平均連結状態4)
- 到着レートの変動を考慮(0.55-2.5から8-10に変化)
- Distillation tableによる量子リンクの管理



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

提案方式(3)

■ 経路選択アルゴリズム

- Thompson Sampling : 確率分布に基づく探索・活用の最適化
- ε -greedy : 確率 ε での探索と最良経路選択
- Round Robin : 順次選択方式

■ MABの評価指標

■ 遅延時間

- $D = t_{proc} + t_{tele} + t_{trans}$
- 量子処理、テレポーテーション、伝送時間の合計

■ End-to-End Fidelity

- $F_{e2e} = (1 + \exp(\sum_i (-\log F_i)))^{-1}$
- 各リンクのFidelityに基づく経路全体の品質指標

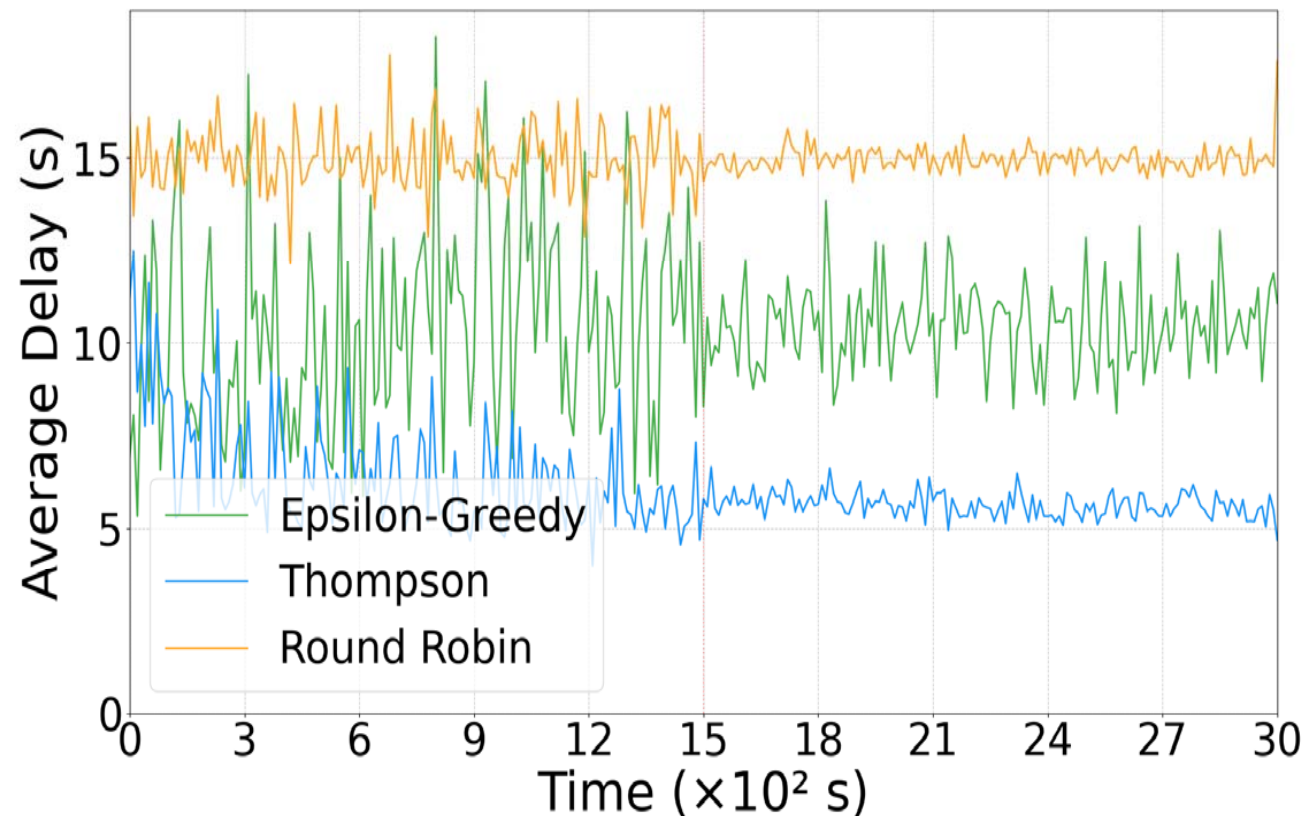
■ 総合的な報酬

- $R = w_1 \frac{1}{D} + w_2 F$ ($w_1 = w_2 = 0.5$)
- 遅延時間とFidelityを同じ重みで考慮した評価指標

性能評価(1)

■ 遅延

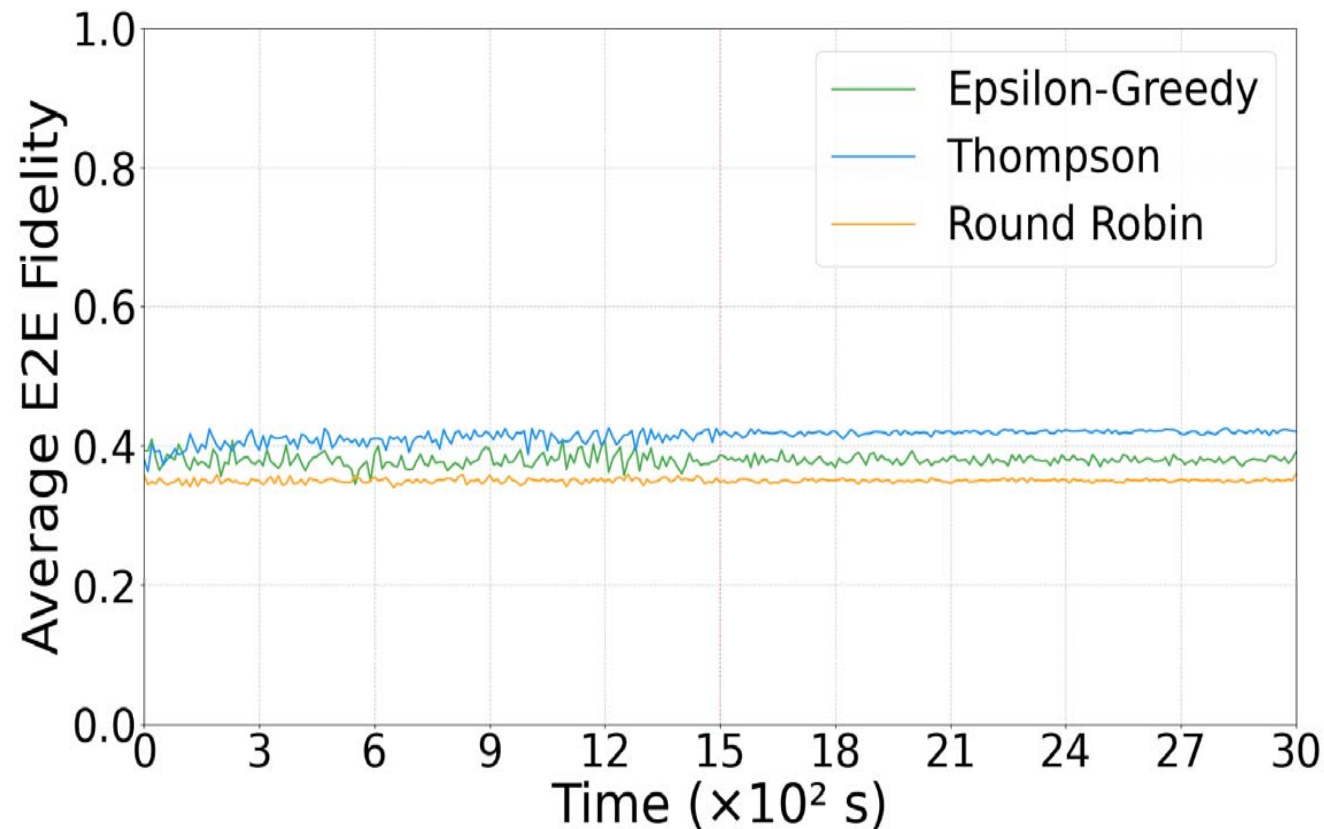
- Thompson Sampling: 最小遅延を安定達成
- ϵ -greedy: レート変動時に遅延増大
- Round Robin: 遅延が最大



性能評価(2)

■ End-to-End Fidelity

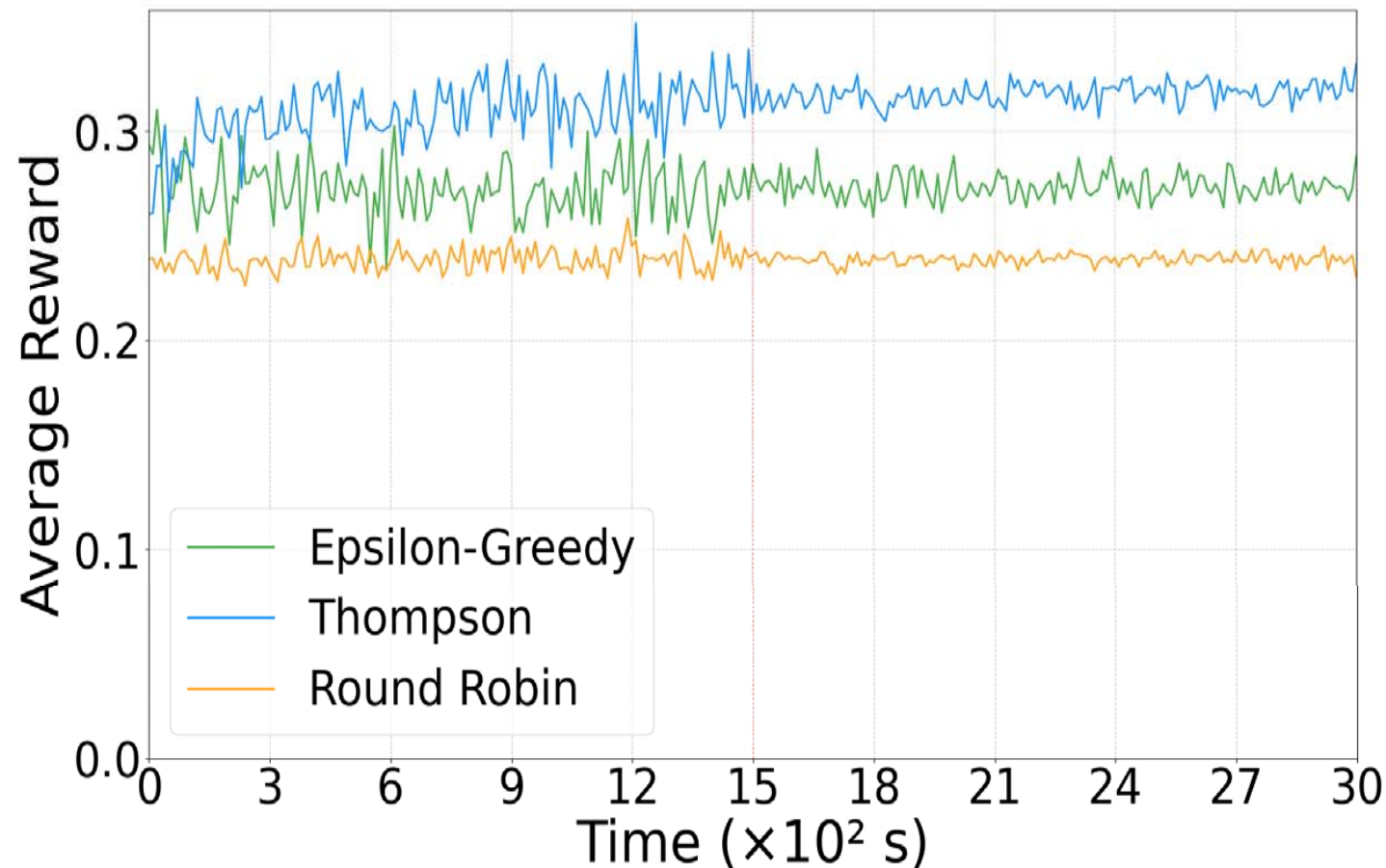
- 全手法で0.35–0.42を維持
- Thompson Samplingが最高値(≈ 0.42)を安定達成
 - distillation効果による品質確保



性能評価(3)

■ 報酬

- Thompson Sampling: 最高報酬(≈ 0.33)を達成
- ϵ -greedy: レート変動後0.27-0.29で推移
- Round Robin: 0.23-0.24で安定推移



総合評価

■ MABの動的環境適応

- Thompson Sampling: 到着率変動後も性能維持
- ϵ -greedy: 変動後の学習効果が限定的

■ Distillationの効果

- Fidelity閾値による品質保証
- 遅延時間との相互関係

■ Round Robinの特性

- 平均への収束による見かけの安定性
- 動的環境への適応性欠如

結論

■ 本研究の成果

- E2E FidelityとRewardsの定義による短距離経路の選好性
- Distillationの不確実性による遅延への影響
- MABによる動的経路選択の有効性

■ 今後の課題

- Distillationの不確実性を考慮したリソース最適化
- 大規模ネットワークでの総合評価

量子スワップ(swap)

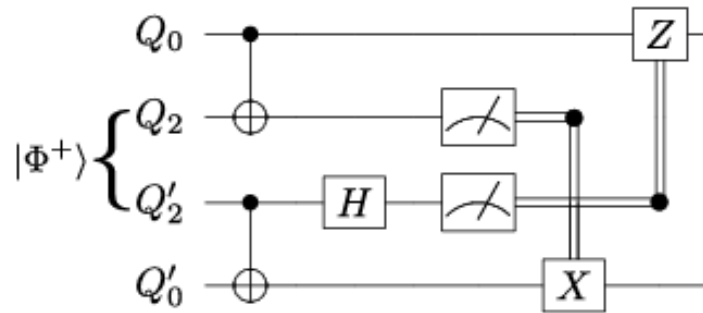


図2 Circuit of quantum swap

- 量子スワップとは
 - 量子リピータの基本操作
 - 2つの量子もつれペアから遠距離量子もつれを生成
- 回路動作の流れ
 - 量子リピータが2つの量子ビットを保持し、Bell状態測定を実行
 - 測定結果を古典通信で共有し、量子状態を補正
 - 遠距離の量子ビット間に新たな量子もつれを生成
- 意義
 - 距離制約を克服し、長距離量子通信を実現する重要技術

量子テレポーテーション(teleportation)

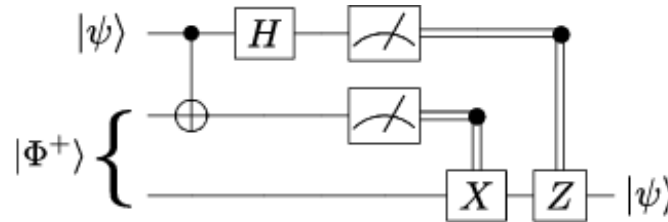


図3 Circuit of quantum teleportation

■ 量子テレポーテーション

- 量子もつれと古典通信を用いて量子状態を転送
- 量子状態を直接伝送ことなく遠隔地で再現

■ 回路動作の流れ

- 量子もつれペアを共有し、Bell状態測定を実行
- 測定結果を古典通信で伝達し、受信側で量子状態を再構築

■ 最新の研究成果(2024年12月)

- ノースウェスタン大学(Prem Kumar 教授)
- 30km光ファイバーでノイズフィルタを適用
- 4Gbpsでの量子テレポーテーションを実証

量子ネットワークの概念

■ 量子ネットワーク

- 量子状態を維持しながら量子情報を伝送するネットワーク
- 量子もつれという特殊な性質を利用して実現

■ Fidelity(忠実度)

- $F = \left(\text{Tr} \sqrt{\sqrt{\sigma} \sigma' \sqrt{\sigma}} \right)^2$
- 量子状態の品質指標(0-1)
- 通信距離に応じて低下

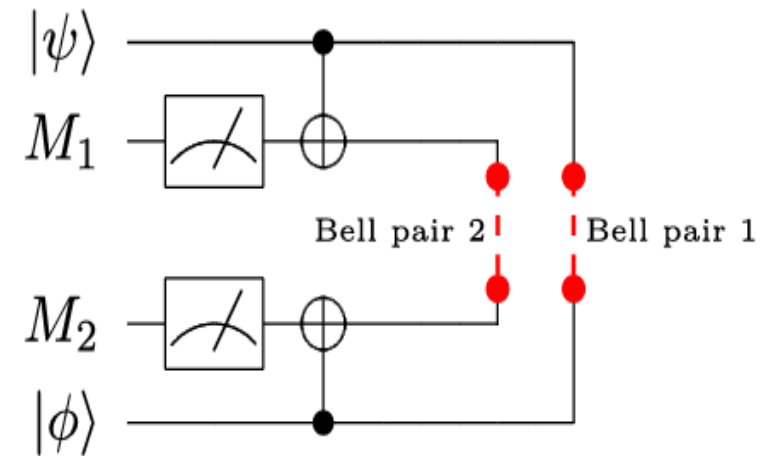


図 2.1: Circuit of Quantum Distillation

■ Quantum Distillation(蒸留)

- 低品質な量子状態から高品質な状態を生成
- Fidelityは向上するが、リソースを消費

量子通信のプロセス

- EPRペアの生成
- 量子もつれの分配
- 量子スワップを通して遠距離連結
- テレポーテーションを用いた量子情報転送
- 古典チャンネルを使って測定結果伝達

経路の探索コスト関数

■ K最短アルゴリズム

- Fidelity値の探索からコスト関数変更
- 経路安定性およびDistillation効率の基盤コスト計算
 - 経路選択の多様性を増やした

■ 経路安定性点数 R_{path}

- 安定的でDistillation効率が良い経路の優先的に選択
 - $R_{path} = \frac{\bar{f}}{1+\sigma_f} \times \left(1 - \frac{avg_rounds}{max_rounds}\right)$
 - $\bar{f}$: 経路内のリンクたちのFidelityの平均、 σ_f : 同一リンクの標準偏差
 - 平均と標準偏差を同時に考慮し、平たく高いFidelityを優先
 - $\frac{avg_rounds}{max_rounds}$: Distillationラウンド数の平均値を最大ラウンド数で正規化した値
 - 意図: 平たく小さいラウンド数でよいFidelityを出す経路探し
 - $\bar{f}$

経路の探索コスト関数

■ リンク重複ペナルティ $P_{overlap}$

- 重複したリンクを選ぶとペナルティがつくように設計
 - 互いに異なるリンクを含む経路を探索するようにした
 - 経路の多様性を確保
 - $P_{overlap} = \frac{\text{重複するリンク数}}{\text{全体リンク数}}$

■ 最終経路コスト

- $cost_i = w_s(1 - R_{path}) + w_p P_{overlap}$
- $1 - R_{path}$: Distillation効率がよいほど下がり、 $P_{overlap}$ で重複するリンクを含まないのが最小コスト

thresholdの動的更新

■ アプローチ1

- リンクごとにthresholdをばらばらにし、経路多様性の向上

■ Thresholdの動的設定(動的回帰分析)

- 初期値: 0.8から始まり、上限と下限を置いて毎回調整
 - $\hat{t}_{k+1} = \text{clip}(\hat{t}_{k+1}, \text{lower} = 0.65, \text{upper} = 0.9)$

■ SGDRegressor利用

- 確率的勾配降下法(Stochastic Gradient Descent)
- Sklearn.linear_model.SGDRegressorからpartial_fit(X,y)を呼出し、内部的にパラメータを η (学習率)分、アップロード
- 動的更新
 - $\hat{t}_{k+1} = \hat{t}_k - \eta \nabla(\hat{t}_k - y_{\text{target}})$
 - $\hat{t}_k$: 以前の予測値、 y_{target} : 今回のラウンドでの目標threshold