

通信需要を考慮した量子ネットワークの リンク忠実度計測手法に関する一検討

A Study on Link Fidelity Measurement in Quantum Networks Considering Communication Demand

山近 駿¹
Shun Yamachika

柿原 悠人²
Yuto Kakihara

井上 翔太²
Shota Inoue

大崎 博之²
Hiroyuki Ohsaki

関西学院大学 工学部 情報工学課程¹
Department of Computer Science, School of Engineering, Kwansei Gakuin University

関西学院大学 大学院理工学部研究科 情報工学専攻²
Department of Informatics, Graduate School of Science and Technology, Kwansei Gakuin University

1 はじめに

近年、量子コンピュータや量子通信といった量子技術の研究開発が世界的に加速している。中でも、量子ビットを情報媒体として遠隔地間で伝送・共有する量子ネットワークは、盗聴不可能な量子鍵配送 (QKD) や、分散量子コンピューティング、高精度な量子センシング網を実現する次世代の情報通信基盤として大きな期待が寄せられている。量子ネットワークの究極的な目標は、地球規模での高忠実度な量子状態の共有、すなわち量子インターネットの実現にある。

しかし、その実現に向けた道のりには数多くの技術的課題が存在する。最も根源的な課題の一つが、量子情報の担い手である量子ビットの脆弱性である。量子ビットは、光ファイバ等の伝送媒体や周辺環境との相互作用（環境ノイズ）によって、その繊細な量子状態が容易に破壊されてしまうデコヒーレンスと呼ばれる現象に常に晒されている。この状態の劣化は通信品質の低下に直結し、忠実度の低いリンク、すなわち入力された量子状態を正確に出力できないリンクを用いては、意味のある通信を行うこと自体が困難となる。したがって、量子ネットワーク上で高信頼な通信を実現するためには、ネットワーク内に物理的に存在する多数のリンクの中から、環境ノイズの影響を受けにくく、忠実度の高い量子リンクを効率的に選択することが不可欠である。

ここで重要となるのが、各リンクの忠実度をいかにして知るかという問題である。リンクの忠実度は、プロトタイプの量子もつれ光子源の性能揺らぎや、敷設された光ファイバの温度変化といった動的な要因によって時間的に変動しうるため、ネットワークを運用する上で定期的な計測と推定が不可欠となる。しかし、この忠実度を統計的に十分な精度で推定するには、対象リンクを用いて多数回にわたる量子状態の生成、伝送、そして測定を繰り返す必要がある。

この一連のプロセスは、ネットワークの貴重な資源、すなわち測定時間や量子ビットそのものを大量に消費する。測定に費やされる資源は、本来のデータ通信に利用できないため、過度な測定はネットワーク全体の通信スループットを著しく低下させる。ここに、忠実度推定の精度とコストの間に存在する根本的なトレードオフが生じる。この制約の下で、限られた測定資源をネットワーク上のどのリンクに、どれだけ分配するかを決定する測定資源配分は、量子ネットワークの実用化に向けた極めて重要な最適化問題となる。

この測定資源配分問題に対する有力なアプローチとして、Liu らによって提案された LinkSelFiE が存在する [1]。LinkSelFiE は、強化学習における多腕バンディット問題の知見を応用し、複数の並列リンクの中から最も忠実度の高い一本を特定する際に、有望なリンクの測定回数を動的に増やし、そうでないリンクの測定を早期に打ち切ることで、総測定コストを大幅に削減しつつ高い特定精度を実現する。これは、同一ノードペア間に複数の物理リンク（マルチパス）が存在する状況において、最良のリンクを効率的に見つけ出すという問題設定に対

する、非常に洗練された解法である。

LinkSelFiE は、すべてのリンク候補を等価な存在として扱い、その中から純粋に最も物理的な品質が高いリンクを探し出すことに特化している。しかし、より広域で多様なアプリケーションが動作する**実用的なネットワーク運用**の観点からは、異なる課題が見えてくる。実際のネットワークでは、各通信経路の**重要度（通信需要）**は様々ではない。例えば、国家の安全保障に関わる量子暗号通信に用いられる経路と、基礎科学実験のための低優先度なデータ転送に用いられる経路とでは、その通信品質を保証することの価値が本質的に異なる。前者の品質がわずかに低下することは許容しがたい一方、後者であれば多少の品質劣化は許容できるかもしれない。

このように、アプリケーションの要求やサービスレベル合意 (SLA) に応じて、各通信経路には異なる重要度が設定されるのが自然である。このような状況において、すべてのリンクを等価に扱う従来のアプローチでは、重要度の低い経路の忠実度を高精度に推定するために貴重な測定資源を費やす一方で、本当に重要な経路の品質保証が疎かになるという、ネットワーク全体の運用価値を損なう非効率な資源配分を招きかねない。したがって、ネットワーク全体の運用価値を最大化するためには、各通信経路の重要度を定量的な指標として導入し、**価値の高い経路へ優先的に測定資源を配分する、新たな資源配分フレームワーク**が求められる。

そこで本研究では、**通信需要を考慮したリンク忠実度計測**という新たな問題を定義し、その解決を目的とする。我々は、各通信経路の「価値」を、その経路が担う通信の**重要度**と、経路内で最も忠実度の高いリンクの**推定忠実度**の積として定量化する。この定義に基づき、本研究が取り組む問題を「与えられた総測定予算の制約下で、ネットワーク全体の総価値を最大化する測定資源配分を決定する最適化問題」として定式化する。

この問題は、どのノードペア（通信経路）に資源を配分し、さらにその中でどのリンクを測定するかという組合せ最適化問題であり、厳密解を求めることは計算論的に極めて困難である。そのため、本稿ではこの問題に対する効率的かつ実用的な準最適解法として、**二段階貪欲法 (Two-Phase Greedy Method)** を提案する。本手法は、第一段階（広域探索フェーズ）で、ごく少量の測定資源を全リンクに広く薄く配分して忠実度の初期推定値を得る。続く第二段階（活用フェーズ）では、第一段階で得られた初期推定忠実度と各経路の重要度から算出される価値スコアに基づき、最も価値創出が期待される有望な経路群に残りの測定資源を集中的に投下する。この戦略により、計算コストを低く抑えつつ、準最適な資源配分を実現する。

本研究の貢献は以下のとおりである。

- 従来の物理的なリンク品質の推定問題を発展させ、通信需要という経済的・運用的な価値尺度を導入した、より実践的なネットワーク総価値最大化問題を初めて定式化した。

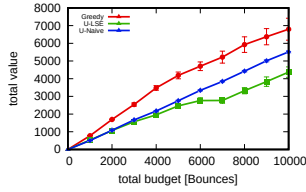


図 1: 隣接ノード数 3 における測定予算と総価値スコアの関係

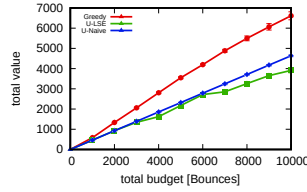


図 2: 隣接ノード数 5 における測定予算と総価値スコアの関係

- 上記の問題に対する効率的な近似解法として、二段階貪欲法を提案した。これは、探索と活用を明確に分離することで、大規模ネットワークにおいても実用的な計算時間で高品質な解を得ることを可能にする。
- 量子ネットワークシミュレータを用いた評価実験を通じて、提案手法が、通信需要を考慮しない既存のアプローチに比べて、ネットワーク全体の総価値を大幅に向上させることを定量的に明らかにした。

本稿の構成は以下の通りである。2 章で本研究が対象とする問題モデルと目的関数を定義する。3 章では提案手法である二段階貪欲法の詳細を述べる。4 章でシミュレーション評価の結果を示し、提案手法の有効性を考察する。最後に 5 章で結論と今後の課題を述べる。

2 通信需要を考慮したリンク忠実度計測問題

本問題は、通信需要 (重要度 I_n) が異なる N 個のノードペア (S, D_n) に対し、総測定予算 C の制約下で、ネットワーク全体の総価値を最大化する測定資源配分を決定する問題である。各ノードペアは並列リンク集合 L_n を持ち、各リンク l_{nj} の真の忠実度 f_{nj} は未知とする。

本問題は、価値が高いと判断したノードペア集合 S_{sel} 選択し、各ペア $n_k \in S_{sel}$ で最高と推定されたリンク忠実度 F_{nk}^* を用いて、以下の目的関数で定義される総価値を最大化することである。

$$\text{maximize} \sum_{n_k \in S_{sel}} I_{n_k} \hat{F}_{n_k}^* \quad (1)$$

このとき、制約条件は、全リンクにおける総測定コストが総測定予算 C を超えないこと、すなわち $\sum_{n=1}^N \sum_{l \in L_n} \text{Cost}(l) \leq C$ で与えられる。

3 提案手法：二段階貪欲法 (Two-Phase Greedy) による資源配分

本稿では、上記の問題を解くための効率的な近似解法として、広域的な探索と集中的な活用を組み合わせた二段階貪欲法を提案する。この手法は、組合せ最適化問題に対する現実的なアプローチとして、限られた測定資源を準最適に配分し、計算コストを抑えつつ高い性能を実現することを目的とする。

二段階貪欲法の第一段階は、広域探索フェーズである。ここでは、限られた測定予算の一部を、対象となる全てのリンクに少量ずつ均等に配分することで、各リンクの忠実度の初期推定値を低コストで得る。

本手法の第二段階は、活用フェーズである。ここでは、広域探索フェーズで得られた初期推定忠実度と各ノードペアの重要度の積から価値スコアを算出し、このスコアが高い有望なノードペア内のリンク群に残りの測定資源を集中的に投下する。具体的には、各ノードペア n に対して価値スコア $I_n \hat{f}_n$ を計算し、スコアの高い順にノードペアを選択する。

4 実験

本章では、提案手法がネットワーク全体の総価値を効率的に最大化できることを示すため、量子ネットワークシミュレータ NetSquid を用いた評価実験を行った。

本実験では、1つの対象ノードに接続する隣接ノード数が $N = 3$ および $N = 5$ の2種類のスター型トポロジを用いた。各ノードペア間には5本のリンクが存在し、そのうち1本の平均忠実度を0.95、残りの4本を0.85とする正規分布に従って忠実度を設定した。各ノードペアの重要度 I_n は、区間 $[0, 1]$ の一様乱数により決定した。

二段階貪欲法の設定として、広域探索フェーズでは、各リンクに対して初期予算 ($t_0 = 40$) を割り当て、全リンクを均等に測定し初期推定値を得る。活用フェーズでは、価値スコアによって選択されたノードペア内のリンク群に対して、LinkSelFiE を適用することで、最も忠実度の高いリンクを特定する。

比較手法として、Uniform-LinkSelFiE および Uniform-Naive を用いた。前者は、LinkSelFiE の枠組みで測定予算を全ペアに均等配分し、リンクが一意に定まればそのリンクを、そうでなければ推定忠実度が最大のリンクを選出する手法である。後者は、予算を全ペア・全リンクに均等配分する手法である。

評価指標には、測定予算を変化させた際のネットワーク総価値スコアを用い、各測定予算の値について、独立なシミュレーションを20回実施し、その平均値と95%信頼区間を算出した。

図1および図2の結果から、提案手法は比較手法よりも高い総価値スコアを達成し、価値の高いリンクへ優先的に資源を配分することが示された。ただし、実験で検証した範囲を超えて予算をさらに増加させた場合には、価値の低いリンクにもコストをかけてしまうため、スコアの上昇率は鈍化し、追加投資による価値の向上は限定的になると考えられる。

謝辞

本研究の一部は JSPS 科研費 24K02936 の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] M. Liu, Z. Li, X. Wang, and J. C. Lui, “LinkSelFiE: Link Selection and Fidelity Estimation in Quantum Networks,” in *Proceedings of the 43rd IEEE Conference on Computer Communications (INFOCOM 2024)*, pp. 1421–1430, May 2024.