

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

山近 駿*, 柿原 悠人[†], 井上 翔太[†], 大崎 博之[†]

* 関西学院大学 工学部 情報工学課程

† 関西学院大学 大学院理工学部研究科 情報工学専攻

Abstract—本研究では、量子ネットワークにおけるリンク忠実度計測の問題に対し、通信経路ごとの重要度（通信需要）を考慮した新たな資源配分手法を提案する。従来のリンク品質推定問題を発展させ、各経路の重要度と推定忠実度の積で定義される「価値」の総和を最大化する問題として定式化する。この問題に対する効率的な近似解法として、広域的な探索と集中的な活用から成る二段階貪欲法を提案する。シミュレーション評価を通じて、提案手法が限られた測定資源の下で、通信需要を考慮しない従来のアプローチに比べてネットワーク全体の総価値を効率的に向上させることを示す。

Index Terms—量子ネットワーク、忠実度計測、資源配分、通信需要、貪欲法

I. はじめに

量子コンピュータ間を接続する量子ネットワークは、次世代の通信基盤として大きな期待が寄せられている。複数の量子プロセッサを大規模に連携させる分散量子計算や、物理的な限界を超えたセンシング精度の実現など、単一の量子デバイスでは達成不可能な応用を可能にするためである。

量子ネットワーク上で高信頼な通信を実現するには、経由する物理リンクが高い忠実度を保つことが不可欠である。量子情報は環境ノイズに対して極めて脆弱であり、通信中に量子状態が破壊されやすい。そのため、量子もつれのような繊細な相関を遠隔地へ配送する際には、経路上に存在する物理リンクの品質が通信性能を直接的に決定づける。

したがって、ネットワーク内に存在する多数の物理リンクの中から、忠実度の高いものを効率的に選択する技術が極めて重要となる。特に、複数の並列リンクが存在する経路では、その中から最も通信品質の高いリンクを見つけ出し、データ転送に利用することで、通信の成功確率を最大化できる。

しかし、各リンクの忠実度を正確に推定するには多数回の量子測定が必要となり、その測定コストが実用上の大きな制約となる。忠実度は確率的な量であるため、その値を十分な精度で推定するには、同一の量子状態を何度も送受信し、統計を取る必要がある。このプロセスは、時間や量子ビットといった貴重な計算資源を大量に消費する。

限られた測定資源をいかに効率的に配分し、高忠実度なリンクを特定するかが重要な課題である。全てのリンク候補に対して十分な回数の測定を行うことは、ネットワークの規模が大きくなるにつれて現実的でなくなる。このため、測定コストと推定精度のトレードオフを考慮した、賢明な資源配分戦略が不可欠となる。

この課題に対する有望な解決策として、測定コストを削減しつつ高忠実度リンクを特定する LinkSelFiE が提案されている [1]。LinkSelFiE は、多腕パンディット問題にヒント

を得たアルゴリズムであり、有望なリンクを集中的に測定し、見込みの薄いリンクの測定を早期に打ち切ることで、全体の測定回数を削減する。

LinkSelFiE は、統計的な探索アルゴリズムを用いることで、最も忠実度の高いリンクを効率的に特定する優れた手法である。これにより、従来法では膨大なコストを要した高忠実度リンクの特定を、現実的な資源の範囲内で実現する道が拓かれた。

一方で、LinkSelFiE の問題設定では、全ての通信経路候補が均等な重要度を持つことを前提としている。これは、単一のノードペア間に存在する複数の並列リンクの中から、純粹に最も忠実度の高いリンクを一つ選択するという問題に特化しているため、自然な定式化である。

実際のネットワーク運用では、アプリケーションの要求などに応じて通信経路ごとに重要度は異なり、均等に扱うことが最善とは限らない。例えば、誤り訂正符号の検証といった基幹的なタスクに用いる通信経路と、優先度の低い補助的なデータ転送に用いる経路とでは、品質保証に割くべき測定資源の量は自ずと異なるはずである。

ネットワーク全体の価値を最大化するためには、各通信経路の重要度、すなわち通信需要を考慮した資源配分が求められる。重要度の低いリンクの忠実度を高精度に推定するよりも、重要度の高いリンクの品質を優先的に保証する方が、システム全体として得られる便益は大きくなる。

LinkSelFiE は優れたリンク特定手法であるが、通信需要という新たな指標を組み合わせることで、さらに実用性を高められる可能性がある。つまり、LinkSelFiE が持つ効率的なリンク特定能力を、通信需要に基づいて重み付けされた問題設定に適用することで、より現実の要求に即した資源配分が実現できると考えられる。

そこで本研究では、通信需要の概念を導入し、測定資源をより価値の高い通信経路へ優先的に配分する新たな手法を提案する。これにより、限られた測定資源から得られる全体的な価値の向上を目指す。

具体的には、各通信経路の重要度と推定忠実度の積をその経路の価値と定義し、ネットワーク全体の総価値を最大化する問題として定式化する。この定式化は、単に最も忠実度の高いリンクを見つけるだけでなく、それがどれだけ重要かという側面も同時に考慮するものである。

この問題に対し、本稿では効率的な近似解法として、広域的な探索と集中的な活用から成る二段階貪欲法を提案する。本手法は、まず限られた資源で全リンクを大局的に調査し、次いで得られた知見に基づき、価値が高いと見込まれる有望な経路の調査に資源を集中させる。シミュレーション

ン実験を通じて、提案手法が従来のアプローチに比べてネットワーク全体の総価値を効率的に向上させることを示す。

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。
- 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。

II. 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。

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

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 $\sum_{n=1}^N \sum_{l \in L_n} Cost(l) \leq C$ で与えられる。

III. 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 $I_n f_n$ を計算し、スコアの高い順にノードペアを選択する。

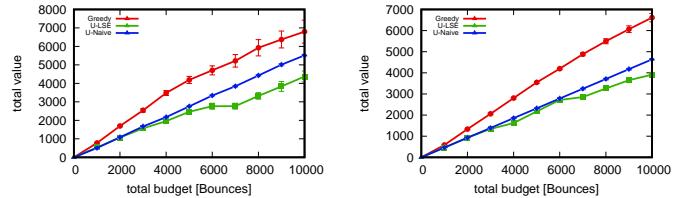


図 1: 隣接ノード数 3 における
測定予算と総価値スコアの関係

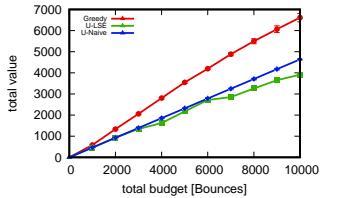


図 2: 隣接ノード数 5 における
測定予算と総価値スコアの関係

IV. 実験

図 IV および図 IV 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有効性が示された。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。

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、独立なシュミレーションを 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を考えられる。

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。

REFERENCES

- [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.