

量子ネットワークにおける量子メモリの最適配置法

Optimal Placement Method for Quantum Memories in Quantum Networks

森田 哲司

上山 憲昭

Satoshi Morita

Noriaki Kamiyama

立命館大学 情報理工学部 情報理工学科

College of Information Science and Engineering, Ritsumeikan University

1. はじめに

近年、量子コンピュータの実現に向け、様々な研究が行われている。量子コンピュータは、従来の技術では解決できない問題にも対処可能であると考えられ、既存の産業や市場を変えうる可能性を有する。量子ネットワークは、離れた場所にある量子コンピュータ間で量子情報を送信するためのネットワークであり、EPR ペアと呼ばれる量子資源を用いることで、量子情報が離れた地点間で転送される。EPR ペアは、通常生成できる距離に制限があり、EPR ペアを離れた地点に作成するためには、Entanglement Swapping と呼ばれる行為を行うことで、EPR ペア同士を繋ぎ合わせ、長距離の EPR ペアを作成する必要がある。EPR ペアには、Fidelity(忠実度) という品質を表す概念が存在する。

また量子ネットワーク内では、量子メモリと呼ばれる、量子や EPR ペアを保存するための技術が使用される。量子は通常の状態では放置すると、瞬時に劣化していくが、量子メモリに保存される場合は、ある程度の期間、状態を維持することができる。量子ビットが転送する際は、要求 Fidelity を満たすまで、EPR ペア生成に対して精製と呼ばれる処理を繰り返す必要があり、遅延時間が増大する。量子メモリに事前に EPR ペアを保存しておくことで、低遅延での量子ビット転送が可能となる。しかし、量子メモリは非常に高価な技術であるため、効果的な配置を行う必要がある。本稿では、ネットワーク上に設置可能な量子メモリの数に制約がある場合に、量子ビットの平均転送遅延時間が最小となるよう、量子メモリを最適に配置する方式を提案する。

2. 量子メモリの使用方法

本稿では量子メモリは EPR ペアを保存するためにノード間に配置する場合を想定する。事前に EPR ペアを量子メモリ上に配置することで、量子メモリが存在するリンク上では、EPR ペア生成にかかる時間を短縮できる。また、より Fidelity の高い EPR ペアを提供可能である。

3. 提案方式

K をユーザペアの総数、 $T_{av,k}$ をユーザペア k 間における EPR ペア生成に要する平均遅延時間、 $N_{p,k}$ をユーザペア k 間で生成された EPR ペアの Fidelity が、一定閾値 F_{min} 以上となるまでの精製処理の反復回数とする。量子ビットの転送に要する平均遅延時間 T_{av} は次式で得られる。

$$T_{av} = \frac{\sum_{k \in K} 2 \cdot T_{av,k} \cdot N_{p,k}}{K} \quad (1)$$

反復回数 $N_{p,k}$ は、式 (2) を反復的に用いて計算される。式 (2) は Fidelity が F の EPR ペアに対して、1 回の精製処理を行ったときに実現される Fidelity F' を表す式であり、ユーザペア k ごとに計算される Fidelity の初期値を用いて、計算された F' を新しい F の値として、繰り返し本式を適用する。そして F' が Fidelity の要求値 F_{min} を超過するまで、本計算を反復する回数が $N_{p,k}$ となる。

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

ユーザペア k ごとに計算される Fidelity の初期値は式 (3) を用いて計算される [1]。 F_1, F_2 は、それぞれのノード間の Fidelity である。これらを、式 (3) に代入していくことで、最終的にユーザペア間での Fidelity の初期値は計算される。

$$\frac{1}{4} + \frac{3}{4} \cdot \left(\frac{4F_1 - 1}{3} \right) \cdot \left(\frac{4F_2 - 1}{3} \right) \quad (3)$$

ユーザペア k 間の生成時間 $T_{av,k}$ は、 $T_{s,k}$ に成功確率をかけた値によって計算される。 $T_{s,k}$ は、式 (4) で表される。リンク間の生成時間 T_{link} とユーザペア間での EPR ペア生成が行われるために必要なノード数 N_{link} を掛け合わせたものに、swapping にかかる時間 T_{swap} とユーザペア間で EPR ペア生成をするために必要な swapping が行われる回数 N_{swap} を掛け合わせ、それらを合計した値をもとに計算される。

$$T_{s,k} = T_{link} \cdot N_{link} + T_{swap} \cdot N_{swap} \quad (4)$$

4. 性能評価

T_{av} を、提案手法と 3 つの比較配置方式とで比較する。ネットワークトポロジは、米国の AT&T のトポロジを使用する。それぞれのノード間にはユーザペアが存在し、最小閾値 F_{min} を持つ。 T_{link} 、 T_{swap} はそれぞれ、 $T_{link} = 200\text{ms}$ 、 $T_{swap} = 50\text{ms}$ に設定した。また、それぞれのユーザペアは最短ホップ経路を用いて量子ビットが転送され、その経路をもとに Fidelity や遅延時間が計算される。量子メモリは存在するすべてのリンク上に配置可能である。

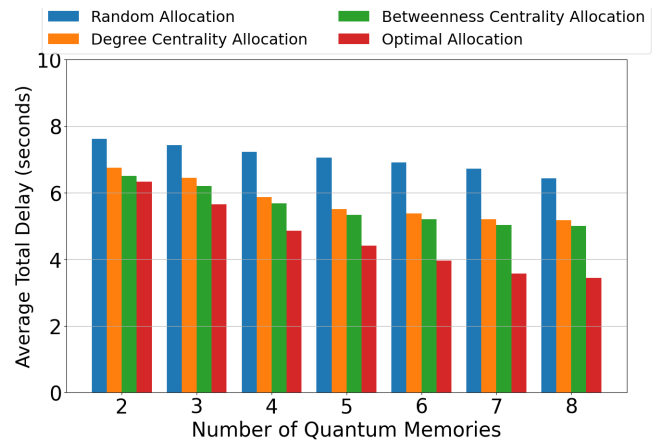


図 1: Comparison of total latency among quantum memory placement methods

図 1 に、4 つの各配置方式の平均遅延時間を、量子メモリの配置数に対してプロットする。赤色が提案方式、緑色が媒介中心性の、黄色が次数中心性の大きなノードに量子メモリを配置した場合、青色がランダムに量子メモリを配置した結果である。提案方式は、量子メモリが少ない場合でも、他方式と比較して平均遅延が小さく、効果的に量子メモリを配置できる。また量子メモリ数の増加に伴い、他の配置法と比べた提案方式の優位性が増加する。

謝辞 本研究成果は JSPS 科研費 23K11086, 23K21664, 23K28078 の助成を受けたものである。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- [1] Shahrooz Pouryousef, et al., A Quantum Overlay Network for Efficient Entanglement Distribution, IEEE INFOCOM, May 2023
- [2] Charles H. Bennett, et al., Purification of Noisy Entanglement and Faithful Teleportation via Noisy Channels, Phys. Rev. Lett. 78, 2031 (1997)