

量子ネットワークにおける量子メモリの効率的な配置手法

森田 哲司[†] 上山 憲昭[†]

[†] 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: †is0639hk@ed.ritsumei.ac.jp, ††kamiaki@fc.ritsumei.ac.jp

あらまし 近年、量子コンピュータ等の量子アプリケーションの実現に向け、様々な研究が行われている。特に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、離れた場所にあるノード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デバイスが使用される。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た場合は、ある程度の期間、状態を維持することができる。量子ビットを転送する際は、要求 Fidelity を満たすまで生成 EPR ペアに対して精製と呼ばれる処理を反復する必要がある、遅延時間が増大する。量子メモリに事前に要求 Fidelity を満たす 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デバイスであるため、量子メモリを効果的に配置する必要がある。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。

キーワード 量子ネットワーク、量子インターネット、量子メモリ、量子、最適配置

Efficient Placement of Quantum Memory in Quantum Networks

Satoshi MORITA[†] and Noriaki KAMIYAMA[†]

[†] College of Information Science and Engineering, Ritsumeikan University

2-150 Iwakura-cho, Ibaraki, Osaka 567-8570

E-mail: †is0639hk@ed.ritsumei.ac.jp, ††kamiaki@fc.ritsumei.ac.jp

Abstract In recent years, extensive research has been conducted to realize quantum applications such as quantum computers. Quantum computers, in particular, are expected to solve problems that are intractable with conventional technologies and have the potential to transform existing industries and markets. A quantum network is a network designed to transmit quantum information between nodes located at different locations. It utilizes quantum resources known as EPR pairs, which enable the transfer of quantum information over long distances. However, EPR pairs can only be generated within a limited range. To establish EPR pairs between distant nodes, a process called entanglement swapping is performed, where multiple EPR pairs are linked together to create long-distance entanglement. EPR pairs have a quality measure known as fidelity, which indicates how well the quantum states are preserved. Within a quantum network, quantum memory technology is used to store quantum states and EPR pairs. Quantum states naturally degrade over time, but when stored in quantum memory, they can be preserved for a certain period. When transferring qubits, it is necessary to purify EPR pairs through iterative processing until the required fidelity is met. This process increases latency. However, by pre-storing EPR pairs in quantum memory, quantum bit transmission can be achieved with lower latency. Since quantum memory is an extremely expensive technology, it is crucial to deploy it efficiently. In this paper, we propose an optimal placement method for quantum memory in a constrained network environment, where the number of deployable quantum memory units is limited. The proposed method aims to minimize the average qubit transfer latency by strategically allocating quantum memory across the network.

Key words Quantum network, Quantum Internet, Quantum memory, Quantum, Optimal placement

1. はじめに

量子インターネットは、量子鍵配送 (QKD) [1], 分散量子コンピューティング [2], 量子センシング [3], 量子クロック [4]

など様々な量子アプリケーションの実現のために必要である。中でも分散量子コンピューティングは、従来のシステムやビジネスを変える可能性を秘めている [5]。例えば、Shor のアルゴリズムは量子コンピュータ向けのアルゴリズムであ

る [6]. Shor のアルゴリズムは高速に整数を因数分解することが可能であり, RSA 等の暗号方式の安全性を脅かす可能性を持つ. そのため量子コンピュータは, Google や IBM で精力的に研究開発が進められており, ある条件では, Google の量子コンピュータは従来のコンピュータと比較し, 300 万倍の性能を達成したことが報告されている [8].

これらのアプリケーションを実装するための, 量子インターネットの役割は, 量子エンタングルメントを配布することである [7]. 量子エンタングルメントは量子同士が重なり合った状態のことを指す. 実際に量子鍵配送を目的とする量子ネットワークは現在も様々な場所に存在している. 例えば, 欧州の SECOQC ネットワーク, 日本の東京 QKD ネットワーク, 中国の 2,000km に及ぶ上海・北京ネットワークなど世界各地に存在する. しかし, これらのネットワークでは量子で送信を行う場合でも, 量子情報としての処理ではなく, 古典情報に変えてから処理が行われる. またこれらのネットワークでは, 任意のノードやユーザに量子エンタングルメントを配布することができない. たとえ量子鍵配送のみを行うネットワークとした場合でも, 使用されるすべてのノードが信頼できるノードである場合以外は, 安全な秘密鍵の配送は保証されない. この意味で, これら既存のネットワークは, 量子インターネットとは区別される.

一方で, 量子鍵配送を行う場合に, ノードを経由せず直接送受信を行う場合, つまりポイント・ツー・ポイント形式で量子通信を行う場合は, ノードの安全性が保障されるため安全な量子鍵配送ネットワークになる. しかし, このような形式で量子ネットワークを大規模かつ長距離に構築し拡大することは, コスト面や効率の問題から不可能に近い. 量子送信を通常の光ファイバを用いて行う場合, その透過率はその長さに対して指数関数的に減少する. 量子の直接配送を行う場合, 距離は大きな課題である. 実際には, 1,000km のポイント・ツー・ポイントの量子通信を行う場合, 必要な時間の期待値は 100 年オーダーとなる. このような状態で, 量子ネットワーク実装し実用化するのは現実的ではない. そのため, 量子ネットワークでは, 量子リピータと呼ばれる中継器が使用される. 量子リピータを用いることで, 量子エンタングルメントを任意のノードに配布する形で, 量子インターネットが構成される.

量子インターネットは, 量子ネットワークと同じ意味合いを持つ. 量子ネットワークでの実際の動作は, 量子リピータを経由して, 量子エンタングルメントを配布し, 離れた量子同士を作用させるネットワークである. また, これらの動作は, 古典的なネットワークと相互的に連携して使用される. 量子ネットワークでは, 量子リピータと呼ばれる中継器を用いて, 量子エンタングルメントで送信者と受信者を直接結び, 操作を行う. 量子リピータでは, 量子エンタングルメントが, 繋ぎ合わされる形で長さが延長される.

このような量子ネットワークにおいて, 量子メモリを用いて, エンタングルメントリソースを分散させるネットワークである, Quantum Overlay Networks (QONs) [15] が提案されている. このネットワークでは, 特定の量子メモリの機能を持つストレージノードペアに, 量子資源を保存しておき, 要求発生時に蓄えられた量子資源を使用するネットワークが提案されている. このネットワークでは, 従来の量子ネットワークと比較し, 4 割以上優れた性能を発揮したことが示されている. しかし量子メモリの最適配置については未検討である. そこで本稿では, QON ネットワークの量子メモリの使用法に基づき, 量子ネットワークにおける量子メモリの効率的な配置法を提案する. 提案配置法では, 平均転送時間の最小化を目的とした最適化問題を定義し, 量子メモリの効率

的・効果的な配置を行う. また, 最適化関数に対して 4 つの手法を用いて評価を行い, 提案手法の有効性を確認する.

以下, 2. 節で量子ネットワークについて簡単にまとめ, 3. 節で関連研究について述べる. また 4. 節で提案方式の概要を述べ, 5. 節で性能評価を行い, 6. 節で全体をまとめる.

2. 量子ネットワークの概要

量子ネットワークでは, 量子情報の送信のため, 量子固有の性質が利用される. 以下に, 量子ビットの基礎について述べた後, 量子ネットワークで主に使用される量子デバイスについて概要を述べる.

2.1 量子ビット

量子ビットは古典的なビットとは異なる性質を持つ. 古典的なビットでは, 必ず 0 か 1 のどちらかの値を取る. しかし, 量子ビットでは 0 と 1 とが重ね合わされた状態を持ち, 0 と 1 の両方の値を持つ固有の性質がある. 量子ビットは測定されるまでは値が確定せず, 0 と 1 の両方の値を持つ. そのため量子ビットは, 0 の値を取る状態と, 1 の値を取る状態を表す以下の二つの基底状態を用いて記述可能である.

$$|0\rangle = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad |1\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

二つの基底状態を用いて, 単一の量子ビットの状態は, 以下のように線形結合で記述される.

$$\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle = \alpha \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} + \beta \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \end{pmatrix}$$

α と β は複素数であり, $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$ を満たす. $|0\rangle$ が出現する確率が $|\alpha|^2$ であり, $|1\rangle$ が出現する確率が $|\beta|^2$ である.

2.2 量子エンタングルメント

量子エンタングルメントは, 古典世界には存在しない状態であり, 複数の量子ビット間に相関性がある状態である [9]. この量子エンタングルメントは古典世界と量子世界の最も大きな違いともいえる. 量子エンタングルメントは量子が複数重ね合わされた特別な状態であり, 独立して記述することはできない. 量子エンタングルメントの中で, 最大限エンタングルメントされたものは, EPR ペアと呼ばれる. EPR ペアは, 0 と 1 が均等に含まれる重ね合わせ状態である. そのため, EPR ペアの量子ビットを独立に測定すると, 0 と 1 のどちらかの結果がランダムかつ等しい確率で得られる. EPR ペアは, 量子テレポーテーションやエンタングルメントスワップ等に使用され, 量子ネットワークにおいて重要な状態である.

2.3 量子リピータ

量子リピータは, 離れた場所に EPR ペアを生成するために必要な装置である. 量子リピータでは, エンタングルメントスワップが行われる. エンタングルメントスワップとは, 量子エンタングルメント同士を結び付ける動作である. 量子リピータが配置されることで, 量子エンタングルメントが長距離や任意のノード間に配布可能になる. そのため, ポイント・ツー・ポイントでは不可能だった距離やノード間でも, 量子通信を行うことが可能になる.

図 1 に, 量子リピータ内での操作の様子を示す. ノード A と QR (量子リピータ) 間に生成された EPR ペアと, ノード B と QR 間に生成された EPR ペアがある状態 (図 1(a)) から, QR でエンタングルメントスワップが行われると, 図 1(b) の状態に移行する. このとき, QR ではエンタングルメントスワップが行われ, もともと QR と各ノードとの間に生成されていた二つの EPR ペアが結合され, 一つの EPR ペアが生成

される。その結果、ノード A と QR 間、ノード B と QR 間との距離でしか生成できなかった EPR ペアが、AB 間の距離でも生成できる。この QR でのエンタングルメントスワップの処理を複数回、複数の QR で繰り返すと、より長い距離で EPR ペアを生成可能になる。

図 2 に、複数の量子リピータを経由して EPR ペアが生成される様子を示す。量子リピータが複数の場合でも、図 1 と同様の手順で操作は行われる。まず、図 2(a) では、それぞれのノード間で EPR ペアが生成される。その後、複数存在する QR でそれぞれエンタングルメントスワップが行われると、図 2(b) の状態に移行する。このとき、QR ではエンタングルメント同士の結合処理が行われ、最終的にはノード AB 間の長距離の EPR ペアが作成された状態となる。図 1 のように、使用される QR が一つの場合は、延長される距離は一つのノード分のみとなる。一方で、複数の QR を経由させエンタングルメントスワップを行うことで、さらに長距離かつ、任意の場所に EPR ペアを配布可能になる。

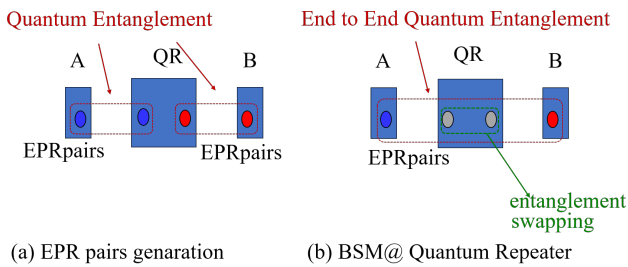


図 1 量子リピータでの操作

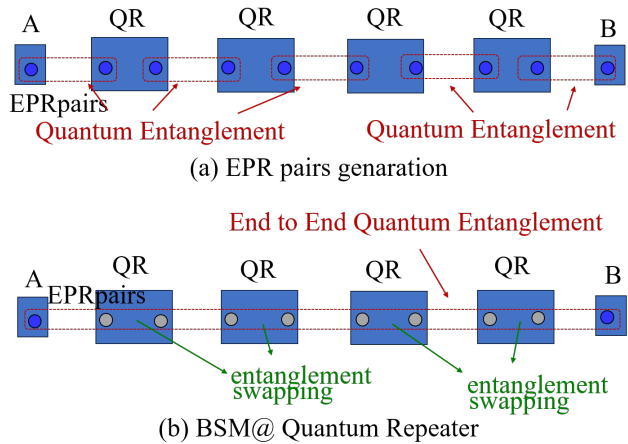


図 2 複数の量子リピータを経由した EPR ペアの生成

2.4 エンタングルメントスワップ

エンタングルメントスワップは、異なる量子エンタングルメントペア同士を間接的にエンタングルメントさせる行為である [10]。これにより、直接的に接続されていない場合でも、エンタングルメントを生成することが可能になる。図 3 は、エンタングルメントスワップの様子を図で説明したものである。図 3(a) は、エンタングルメントスワップの準備と測定について示している。図 3(a) では、2つの EPR ペアが準備されている状況を想定する。この時、ペア 1 は量子ペア (A,B) によって構成され、ペア 2 は量子ペア (C,D) によって構成される。図 3(b) では、ペア 1 とペア 2 の片方の量子、B と C に対して BSM 測定を行う。

図 3 は、測定後のそれぞれの量子の様子を表している。図 3(c) は、BSM 測定が行われたノード B と C の様子を表している。BSM 測定が行われた、B と C は状態が確定し、量子

としての情報を失う。図 3(d) は、ノード A と D がエンタングルメントされた状態を表し、B と C の操作に A と D は関与していないにもかかわらず、一連の操作後には、AD 間に量子エンタングルメントが生成されている。

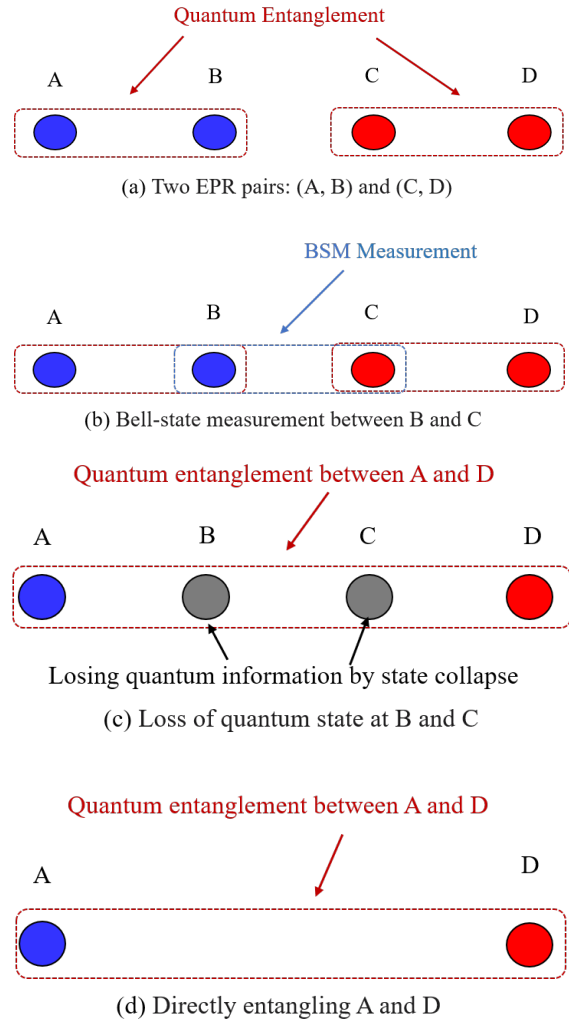


図 3 準備と測定

2.5 忠実度

各量子には、量子の品質を表す尺度として、忠実度 (Fidelity) という概念が存在する。量子は一般的に温度や空気等の周りの影響を受けやすく、状態が劣化しやすい特性を持つ。そのため通常の状態で放置すると短期間で劣化する。よって、忠実度と呼ばれる品質を表す概念が存在する。忠実度は 0-1 の値で表され、1 に近いほどよりよい品質である。量子アプリケーションに EPR ペアを使用する際には、忠実度に関して最小閾値が設定され、品質がよい量子であるほど、正確に量子操作を行える。また、エンタングルメントスワップなどに使用されるたびに、量子の忠実度は低下する。

2.6 量子精製

量子精製は量子の忠実度を上げるために行われる行為である [11]。送信の過程において、ノイズの影響を受け、忠実度が低くなった EPR ペアや量子に、量子精製が行われる。量子は忠実度が高いほど正確な操作が行えるため、量子精製を行い忠実度を増加させる。量子操作に最小閾値が定められる場合には、量子精製を行い忠実度を増加させる必要がある。量子精製は複数の量子を使用することで、より忠実度の高い量子を作り上げる。量子精製において、量子が大量に存在す

る場合、コストや忠実度を上げるために回数も変化する。

2.7 量子メモリ

量子メモリは量子を保存するために使用される。量子は通常の状態のままの場合、瞬時に劣化するが、量子メモリに保存された場合は、その状態を一定時間維持することができる[12]。現時点では、量子メモリの量子の保存時間は16秒から1分ほどであるが[12][13][14]、今後は量子の保存期間がさらに長くなることが期待される。量子メモリは量子を保存できる性質から、エンタングルメントスワップの成功確率の向上や、エンドノード間のEPRペア生成効率の向上に寄与する。そのため使用用途は多く、量子メモリが多く存在するほど量子ネットワークのエンタングルメント配布効率率は向上する。加えて、量子リピータにも配置されると考えられる。しかし量子メモリは特定の条件下でのみ作用する場合が多く、高価なデバイスである[12][13][14]。

3. 関連研究

3.1 QON

Pouryousef らによって、量子ネットワークで効率的にエンタングルメントを分散させるためのネットワークである、Quantum Overlay Network (QON) が提案された[15]。QONでは量子メモリを用いて特定のストレージノードペアにEPRペアを保存しておくことが可能である。保存されたEPRペアはユーザペアごとに発生する需要の増減に対して、動的に使用することが可能である。[15]では、計算機シミュレーションによってQONの性能が評価され、従来の量子ネットワークと比較して4割以上、収容可能な需要量を増加させることが示された。しかし量子メモリの配置は最適配置されていると仮定されており、量子メモリの最適配置問題については未検討である。

3.2 エンタングルメント分配の最適化

Chakraborty らは、量子ネットワークにおけるエンタングルメント生成レートの最大化手法を提案している[16]。複数のノード間で要求が発生する場合に、エンタングルメントの生成レートが最大化するよう、量子エンタングルメントを配布する。さらに、生成されたEPRペアが最小閾値を満たすように設計されている。生成率の最大化と最小閾値を満たすために、エッジベースでの定式化を行い最適化を行っている。[16]は量子ネットワークにおけるルーティングプロトコルの研究である。他にもルーティングプロトコルに関する研究が見られる[17][18]。しかしこれらの論文は、ルーティングプロトコルにのみ焦点を当てている。

3.3 分散量子における量子ビット割り当て

Mao らは、分散量子における量子ビットの最適配置問題を示している[19]。分散量子コンピューティングでは量子の割り当てが必要になる。そこで、量子回路における通信オーバーヘッド、すなわち回路操作における量子ネットワークの総コストを用いて、量子ネットワークを考慮したグラフの定式化を行っている。定式化では、また定式化された問題を解くために、メタヒューリスティクスなアルゴリズムを提案している。

4. 提案方式

本稿では、量子ネットワークにおける量子メモリの配置の最適化問題を定式化する。最適化関数は、量子メモリの配置結果を評価するための関数であり、各ユーザペア間の要求閾値を満たす、EPR生成までの遅延時間の平均値で定義する。量子メモリを配置する場所の効果を、平均遅延時間によって

評価する。

4.1 量子メモリの使用方法

本稿では量子メモリの使用方法として、量子をノード間に保存するために使用することを想定する。事前に配置された量子メモリを用いてEPRペアを蓄えておくことで、EPRペア生成要求発生時に一定閾値を満たすEPRペアの生成に要する時間を短縮することができる。図4に本稿で想定する量子メモリの使用法を示す。図4(a)では、量子メモリの存在するノード間にEPRペアが保存される。図4(b)では、事前に保存されたEPRペアを活用することで、EPRペア生成に要する時間を短縮する。量子ネットワークに配置された量子メモリはEPRペアのストレージとしての役割を果たし、忠実度の高いEPRペアを供給する。また量子メモリには、常に新しいEPRが供給されると仮定する。

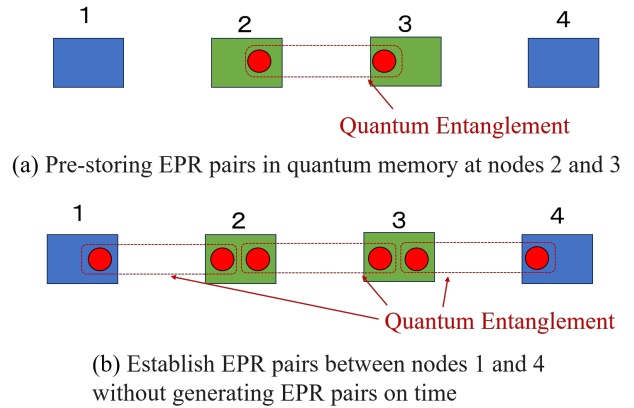


図4 量子メモリの使用方法

4.2 提案最適化問題に用いる式

式(1)は、量子の精製を表す式で[1]、精製処理による Fidelity 値は、本式を反復的に用いて計算される。式(1)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。精製処理を行うと、単調に F' の値は増加していく。この処理を一定閾値を満たすまで繰り返す。

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

エンタングルメントスワップの計算は、式(2)を用いて計算される[15]。 F_1, F_2 は、連結する各ノード間の Fidelity である。 F_{12} は、エンタングルメントスワップを F_1, F_2 の Fidelity を有する 2 つの EPR ペアの間で行った後の全体の Fidelity を示す。エンタングルメントスワップを行う F_1, F_2 を式(2)に代入することで、エンタングルメントスワップ後の Fidelity である F_{12} が計算される。

$$F_{12} = \frac{1}{4} + \frac{3}{4} \cdot \left(\frac{4F_1 - 1}{3} \right) \cdot \left(\frac{4F_2 - 1}{3} \right) \quad (2)$$

ユーザペア k 間の EPR ペアの平均生成時間 $T_{av,k}$ は、 $T_{s,k}$ に成功確率をかけた値によって計算される。ただし $T_{s,k}$ はユーザペア k 間の EPR 生成に要する時間を表し、式(3)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 に要する時間 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 回数 N_{swap} を掛け合わせ、それらを合計した値で計算される。

$$T_{s,k} = T_{\text{link}} \cdot N_{\text{link}} + T_{\text{swap}} \cdot N_{\text{swap}} \quad (3)$$

4.3 最適化問題の定義

前節で説明した数式を用いて、式 (4) に示す最適化問題を定義する。ただし 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。反復回数 $N_{p,k}$ は、式 (1) を反復的に用いて計算される。ユーザペア k ごとに計算される Fidelity の初期値を用いて、 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 $N_{p,k}$ である。この時、次式で得られる、量子ビットの転送に要する平均遅延時間 T_{av} が最小となる量子メモリの配置ノードを求める。

$$T_{av} = \frac{\sum_{k \in K} 2 \cdot T_{av,k} \cdot N_{p,k}}{K} \quad (4)$$

4.4 最適化問題の算出アルゴリズム

前節の最適化問題を解くためのアルゴリズムを以下に示す。最適化には遺伝的アルゴリズムを適応した。遺伝的アルゴリズムは、最適化問題を解くための手法のうちの一つであり、自然界の生物の進化を模倣したものである。選択、交叉、突然変異の過程を繰り返し行うことで、解を発見する手法である。量子メモリの配置個数 S に対し、最初に量子メモリを量子ネットワーク上にランダムに配置する。配置した際の、それぞれの遅延時間を計算し、世代数を経て得られた結果を配置結果として出力する。実行手順を、以下に示す。ただしノード間にメモリは配置され、パスとして使用されるため、配置場所はリンク上とする。

(1) 初期集団の作成: 初期個体は、存在する量子ネットワークのリンクの中から、量子メモリを配置する箇所数 S だけ、ランダムにリンクを選択する。選ばれたリンク集合を初期の遺伝子として扱う。この手順で遺伝子を 50 個作成し、遺伝子をリンクのリストとして管理

(2) 適応度の計算: 各個体のリンクリストを適応し転送遅延時間を計算。量子メモリの配置されたノード間では、EPR ペア生成時間 T_{link} と、ノード間の Fidelity が更新され、量子メモリの配置とその更新データをもとに、最適化関数を用いて T_{av} を計算

(3) 遺伝子の選択: 少ない世代数で解の収束が可能な、エリート保存を採用し、最良の個体を選択

(4) 新たな遺伝子集団を作成: 突然変異と交叉を行い、新たな集団を作成し、子孫の中から最も良い 49 個の個体を選択し、それにエリート保存で残された個体を加えたものを、次世代の遺伝子集団に設定。交叉には二点交叉を利用し、親個体の 2 点を選択し、その間の遺伝子を交換することで、新しい遺伝子を作成する方法を採用

(5) 終了条件: 初期集団作成後からの処理を繰り返す行い、一定の世代数になるまで反復

5. 性能評価

提案方式では平均転送遅延時間を用いて最適化を行っている。そこで本節では、提案方式の有効性の確認のため、複数のネットワークポロジに対して、複数の配置手法とで平均転送遅延時間を比較する。

5.1 想定環境

与えられたネットワークポロジ $G = (V, E)$ において、すべてのノード間にユーザペアが存在し、それらすべてのユーザペアは Fidelity の満たすべき最小閾値 F_{min} を有する。量子メモリはすべてのノードに配置可能とし、量子メモリに

保存された EPR ペアは隣接ノードとのエンタングルメントスワップに利用可能とする。表 1 に、評価に用いる 3 つの各ネットワークのノード数とエッジ数をまとめる。また表 2 に、性能評価で用いたパラメタの設定値を示す。

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。以下に示す、4 つの配置方式間で性能を比較する。

- (1) ランダム配置: ネットワーク上のランダムに選択した S 個のノード間に配置
- (2) 次数中心性配置: ネットワーク上の次数中心性が最も高い S 個のノード間に量子メモリを配置
- (3) 媒介中心性配置: ネットワーク上の媒介中心性が最も高い S 個のノード間に量子メモリを配置
- (4) 提案手法: 本稿で提案した方式で S 個のノード間に量子メモリを配置

表 1 評価に用いたネットワーク

Topologies	V	E
ATT	25	56
BICS	33	48
IBM	18	24

表 2 パラメタ設定値

Parameter	Value	Description
F_{min}	0.85	Minimum Threshold
T_{link}	200ms	EPR Pair Generation Time
T_{swap}	50ms	Swapping time

5.2 比較結果

3 つのネットワークポロジにおいて、4 つの各手法で量子メモリを配置したときの、EPR ペアの設定に要した平均遅延時間を、量子メモリの配置数 S に対して、図 5~7 に示す。赤色が提案方式、緑色が媒介中心性配置、黄色が次数中心性配置、青色がランダム配置の結果である。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。またネットワークポロジごとに、手法ごとの優位性は若干異なる。IBM では、ランダム配置と次数中心性配置の優位性が逆転している。BICS では、提案手法と媒介中心性配置の差が他の結果と比べて小さい。

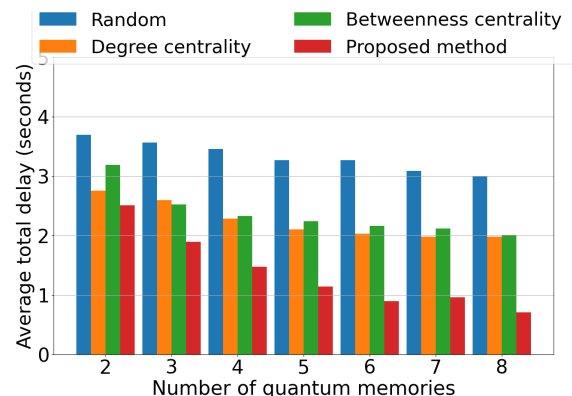


図 5 ATT における EPR 準備の平均遅延時間

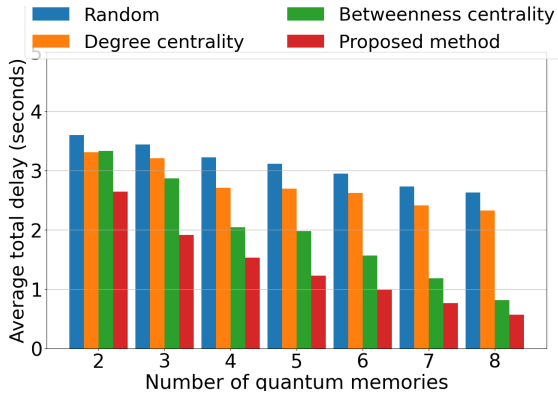


図 6 BICS における EPR 準備の平均遅延時間

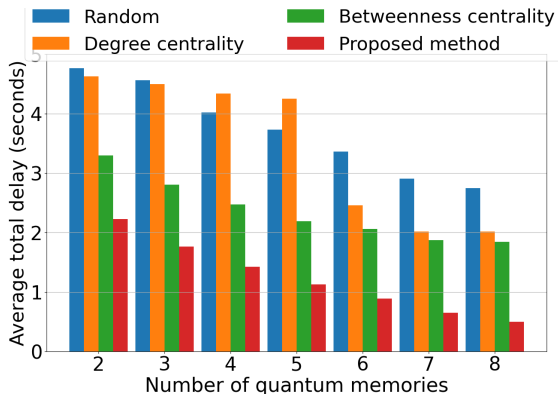


図 7 IBM における EPR 準備の平均遅延時間

5.3 分 析

提案手法において、ユーザペアに定められた、最小閾値が遅延時間に与える影響を評価する。量子メモリの個数と、トポロジや他のパラメタは変更せずに評価を行う。Number of Quantum Memories = 4 とし、ATT トポロジにおいて、ユーザペア間の満たすべき、最小閾値を変化させた結果を、以下の表 3 に示す。

以下の結果では、最小閾値が遅延時間に与える影響の大きさがわかる。これは、満たすべき最小閾値が大きくなると、その分最小閾値を満たすための、精製回数が増加し、遅延時間が増大するからである。比較結果では、閾値を 0.85 に設定したが、精製回数の増減が大きく結果に反映されるため、閾値を変えると、提案手法が与える有効性の変化率は変化する。

表 3 最小閾値ごとの、遅延時間の変化

最小閾値	遅延時間
0.925	3.54
0.9	2.87
0.875	2.01
0.85	1.47
0.825	1.06
0.8	0.71

6. ま と め

量子ネットワークにおいて、量子メモリは量子ネットワークの効率向上に有効であるが、容量が小さく、効果的・効率的に量子メモリを配置する必要がある。そこで本稿では、EPR 資源の準備に要する平均時間を最小化するよう、与えられた個数の量子メモリをネットワーク上に最適配置する方式を提

案した。提案方式では、遅延時間の計算式が簡単化されている。しかし実際の EPR 生成方法はより複雑で、成功率やメモリの保存時間などを考慮する必要がある。今後は、EPR の生成方法として現実的なモデルを想定し、より正確に遅延時間の評価を行う予定である。

謝辞 本研究成果は JSPS 科研費 23K21664, 23K21665, 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] Charles H Bennett and Gilles Brassard, Quantum cryptography: Public key distribution and coin tossing, arXiv:2003.06557, 2020
- [2] J Ignacio Cirac, AK Ekert, Susana F Huelga, and Chiara Macchiavello, Distributed quantum computation over noisy channels, Physical Review A, 59(6):4249, 1999.
- [3] David Deutsch, Artur Ekert, Richard Jozsa, Chiara Macchiavello, Sandu Popescu, and Anna Sanpera, Quantum privacy amplification and the security of quantum cryptography over noisy channels, Phys. Rev. Lett., 77:2818–2821, Sep 1996
- [4] Peter Komar, Eric M Kessler, Michael Bishof, Liang Jiang, Anders S Sørensen, Jun Ye, and Mikhail D Lukin, A quantum network of clocks. Nature Physics, 10(8):582–587, 2014.
- [5] P. Benioff, The computer as a physical system: A microscopic quantum mechanical Hamiltonian model of computers as represented by Turing machines, Journal of statistical physics, vol. 22, no. 5, pp. 563–591, 1980.
- [6] A. Politi, J. C. Matthews, and J. L. O’brien, Shors quantum factoring algorithm on a photonic chip, Science, vol. 325, no. 5945, pp. 1221, 2009.
- [7] <https://journal.ntt.co.jp/article/21666>
- [8] F. Arute, K. Arya, R. Babbush, D. Bacon, J. C. Bardin, R. Barends, et al, Quantum supremacy using a programmable superconducting processor, Nature, vol. 574, no. 7779, pp. 505–510, 2019.
- [9] Angela Sara Cacciapuoti, Marcello Caleffi, Francesco Tafuri, Francesco Saverio Cataliotti, Stefano Gherardini, and Giuseppe Bianchi, Quantum Internet: Networking challenges in distributed quantum computing, IEEE Network, 34(1):137–143, 2020.
- [10] J. W. Pan, D. Bouwmeester, H. Weinfurter, and A. Zeilinger, Experimental entanglement swapping: entangling photons that never interacted, Physical review letters, vol. 80, no. 18, pp. 3891, 1998.
- [11] Charles H. Bennett, Gilles Brassard, Sandu Popescu, Benjamin Schumacher, John A. Smolin, and William K. Wootters, Purification of noisy entanglement and faithful teleportation via noisy channels. Physical Review Letters, 76:722, 1996. Erratum: Physical Review Letters, 78:2031, 1997.
- [12] YO Dudin, L Li, and A Kuzmich, Light storage on the time scale of a minute, Physical Review A, 87(3):031801, 2013.
- [13] Georg Heinze, Christian Hubrich, and Thomas Halfmann, Stopped light and image storage by electromagnetically induced transparency up to the regime of one minute, Physical review letters, 111(3):033601, 2013.
- [14] Yu Ma, You-Zhi Ma, Zong-Quan Zhou, Chuan-Feng Li, and Guang-Can Guo, One-hour coherent optical storage in an atomic frequency comb memory, Nature communications, 12(1):1–6, 2021
- [15] Shahrooz Pouryousef, Nitish K. Panigrahy, and Don Towsley, A quantum overlay network for efficient entanglement distribution, arXiv:2212.01694, 2022.
- [16] Kaushik Chakraborty, David Elkouss, Bruno Rijsman, and Stephanie Wehner, Entanglement distribution in a quantum network, a multi-commodity flow-based approach, IEEE Transactions on Quantum Engineering, 2020. arXiv:2005.14304.
- [17] Mihir Pant, Hari Krovi, Don Towsley, Leandros Tassioulas, Liang Jiang, Prithwish Basu, Dirk Englund, and Saikat Guha. Routing entanglement in the quantum internet, npj Quantum Information, 5(1):1–9, 2019.
- [18] Yangming Zhao and Chunming Qiao, Redundant entanglement provisioning and selection for throughput maximization in quantum networks, IEEE INFOCOM 2021, pages 1–10. IEEE, 2021.
- [19] Yingling Mao, Yu Liu, Yuanyuan Yang, Qubit Allocation for Distributed Quantum Computing, IEEE INFOCOM 2023, 17–20 May 2023.