

令和6年度 秋学期 卒業研究3 (BI)
学士論文

題目 量子ネットワークにおける量子
メモリの最適配置法

指導教員 上山憲昭 教授

立命館大学 情報理工学部 セキュリティ・ネットワークコース

学籍番号 26002103922

森田哲司

令和7年1月31日

概要

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。量子ビットを転送する際は、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 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。

目次

概要	1
第1章 序論	4
1.1 研究の背景	4
1.1.1 量子インターネット	4
1.1.2 量子ネットワーク	5
1.1.3 量子	5
1.1.4 量子エンタングルメント	5
1.1.5 量子リピータ	5
1.1.6 エンタングルメントスワップ	7
1.1.7 忠実度	9
1.1.8 量子精製	9
1.1.9 量子メモリ	10
1.2 研究の目的	10
第2章 関連研究	11
2.1 QONs ネットワーク	11
2.2 量子ネットワークにおけるエンタングルメント分配の最適化	11
2.3 分散量子における量子ビット割り当て	11
第3章 提案方式	13
3.1 概要と特徴	13
3.2 量子メモリの使用方法	13
3.3 提案方式に用いられる数式	14
3.4 最適化関数の定義	15
3.5 最適化処理	15
第4章 性能評価	17
4.1 ネットワーク	17
4.2 評価条件	19
4.3 複数の評価手法	19
4.4 比較結果	19
4.5 分析	21
第5章 まとめ	22

概要	3
謝辞	23
学会発表リスト	26

第1章 序論

1.1 研究の背景

1.1.1 量子インターネット

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、量子コンピューティングは、従来の世の中で使用される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ることで、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 で開発が進められており、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 万倍の性能結果を出した [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、量子ネットワーク自体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 2000km 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。もし、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、1000km 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、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に配布する形で、量子インターネットが構成される。

1.1.2 量子ネットワーク

量子ネットワークは、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。

1.1.3 量子

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、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。量子ビットは測定が行われるまでは値が確定せず、0 と 1 の両方の値を持つ。

$$|0\rangle = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad |1\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (1.1)$$

二つの基底状態を用いて、単一の量子ビットの状態は、線形結合で記述される。

$$\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle = \alpha \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} + \beta \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \end{pmatrix} \quad (1.2)$$

このとき、 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。

1.1.4 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々に使用され、量子ネットワークにおいて重要な状態である。

1.1.5 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 1.1 は、量子リピータ内での操作の様子を表した図である。A と QR(量子リピータ) 間に生成された EPR ペアと B と QR(量子リピータ) に生成された EPR ペアがある状態 図 1.1(1) から、QR でエンタングルメントスワップが行われると、図 1.1(2) 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、この操作によって、もともとノード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。この操作を行うことで、A と QR 間、B と QR 間との距離でしか生成できなかった EPR ペアが、AB 間の距離でも生成することが可能になる。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。

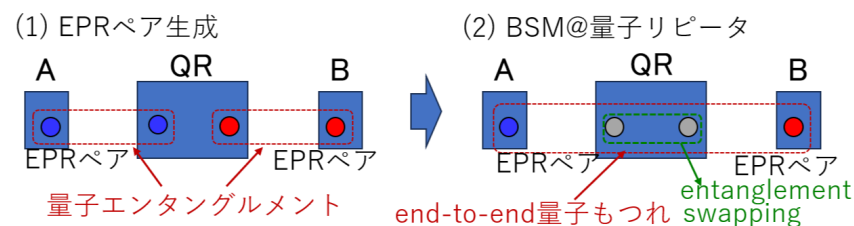


図 1.1: 量子リピータでの操作

図 1.2 は、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表した図である。量子リピータが複数の場合でも、図 1.1 と同様の手順で操作は行われる。まず、図 1.2(1) 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 1.2(2) 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 AB 間の長距離の EPR ペアが作成される状態となる。図 1.1 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。

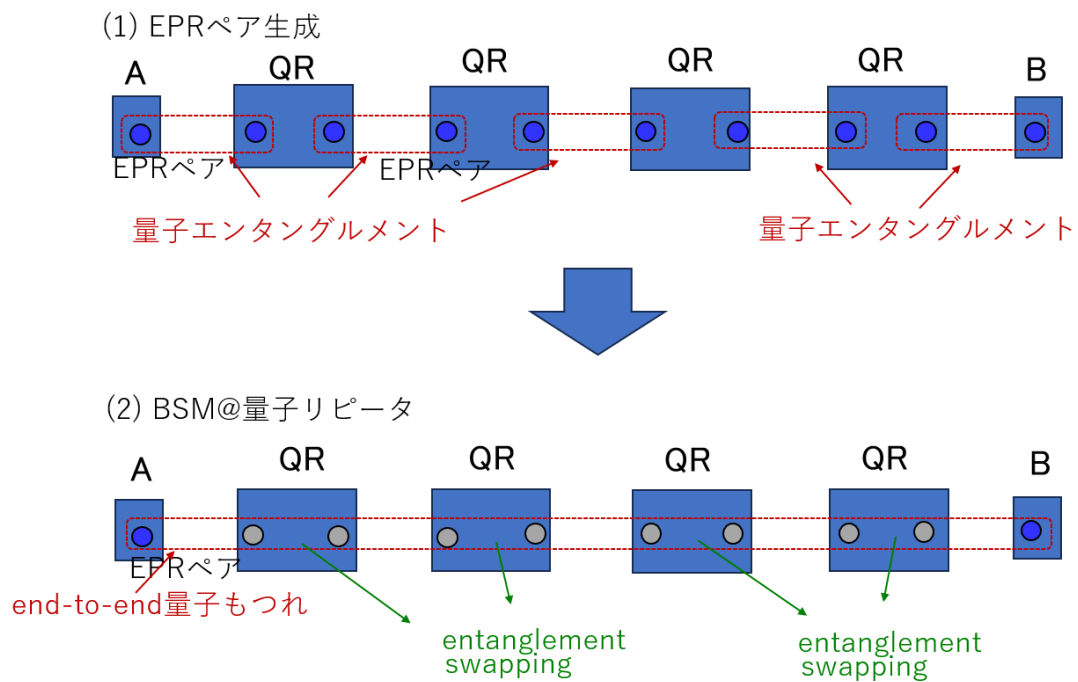
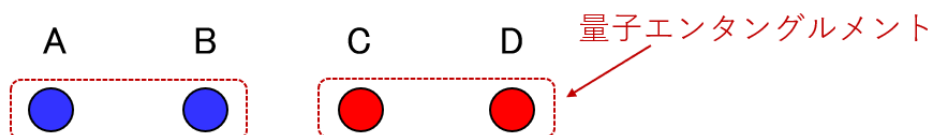


図 1.2: 複数の量子リピータを経由する場合

1.1.6 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 1.3 と、図 1.4 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 1.3 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た図である。図 1.3(1) 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 1.3(2) では、ペア 1 とペア 2 の片方の量子、B と C に対して測定を行う。

(1) 2つのEPRペア,ペア1(A,B)とペア2(C,D)が存在



(2) BとCでBSM測定を行う

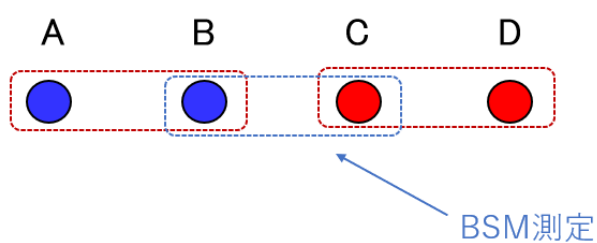
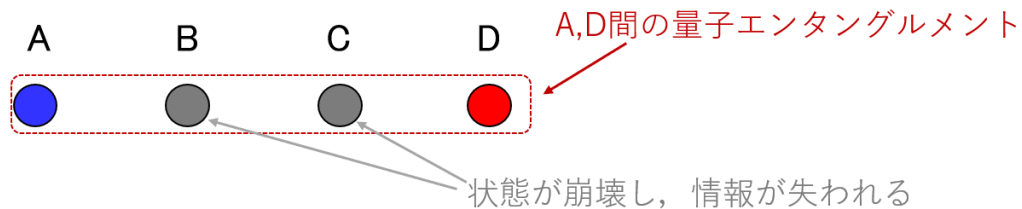


図 1.3: 準備と測定

図 1.4 は、測定後のそれぞれの量子の様子を表した図である．図 1.4(3) は、BSM 測定が行われた B と C の様子を表した図である．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．1.4(4) は、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ことがわかる．

(3)測定が行われたB,Cは量子の状態が失われる



(4)AとDは, BとCを介さずにエンタングルメント状態になる

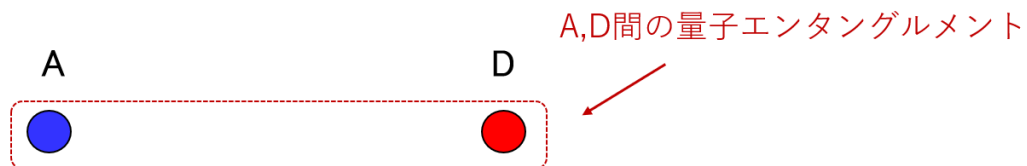


図 1.4: 測定後

1.1.7 忠実度

それぞれの量子には、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という特性を持つ。周りからの影響を受けることを、ノイズの影響を受けるともいう。そのため、通常の状態で放置すると、劣化が始まる。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と評価される。量子アプリケーションに EPR ペアを使用する際には、最小閾値が設定されている場合もあり、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。

1.1.8 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、忠実度が低くなってしまった 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、忠実度を上昇させる。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、忠実度を上昇させる必要がある。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。

1.1.9 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、量子メモリに保存する場合は、その状態を一定時間維持することができる [12]。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 [12][13][14]。今後は、もっと長い時間量子が保存できるように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、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は上昇する。加えて、量子リピータにも配置されると考えられ、使用用途は多い。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、高価な技術になることが予想される [12][13][14]。

1.2 研究の目的

量子ネットワークにおいて、量子メモリは重要な役割を果たすが、有限であり貴重なものである。よって、限られた量子メモリのリソースを、有効活用する必要がある。量子ネットワークに、量子メモリを効率的配布することで、量子ネットワークの EPR ペア配布効率に貢献する。量子ネットワークにおける、パス設計とは区別された、配置方法について取り組み、量子ネットワーク発展に貢献することを目的とする。

そこで、本稿では、量子メモリの使用方法について定義を行い、量子メモリの最適配置問題を解く。量子メモリがより効率的に使用されるために、量子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とし、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。正の評価では、複数の配置手法を用いて、提案手法との比較を行い、有効性を確認する。

第2章 関連研究

2.1 QONs ネットワーク

Shahrooz Pouryousef らによる研究によると、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、Quantum Overlay Networks (QONs) 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。QON では、シミュレーションによって、QON の性能評価が行われ、従来の量子ネットワークと比較して 4 割以上需要を満たすことが示された。この研究内では、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定義とされている。

2.2 量子ネットワークにおけるエンタングルメント分配の最適化

Kaushik Chakraborty らの研究では、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が提案された [16]. この論文では、複数のノードで、要求発生セットがある場合に、エンタングルメントの生成レートの最大化を行っている。量子エンタングルメント配布について、述べた論文である。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。定式化の式を用いて、最適化された要求と閾値を見たすパスを抽出する。

この論文は、量子ネットワークにおける、ルーティングプロトコルについての研究である。また、他にもルーティングプロトコルを実行している論文が存在する [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が当てられたものである。

2.3 分散量子における量子ビット割り当て

Yingling Mao らが、提出した論文では、分散量子における量子ビットの割り当て最適配置問題が解かれている [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、この論文では、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、量子回路における、通信オーバーヘッド、つまり、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、定式化を行っている。また、定式化された式を解くためには、計算量が NP 困難な解になるため、メタヒューリスティクスなアルゴリズムを用いて最適化を行っている。

量子ネットワークにおいての，オーバーヘッドを勘案し最適化を解いた論文である．量子ネットワーク全体での定式化や配置問題に取り組むための，アプローチを提案している．

第3章 提案方式

3.1 概要と特徴

提案方式では、量子ネットワークにおける、量子メモリの配置の最適化のため、数式を用いて最適化関数を定め、最適化を行う。この最適化関数は、量子メモリの配置結果を評価するための関数である。この関数では、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が計算される。これにより、それぞれの量子ネットワークにおける、遅延時間を計算することが可能になり、メモリを配置する場所の効果を、平均遅延時間の変化によって確認することができる。

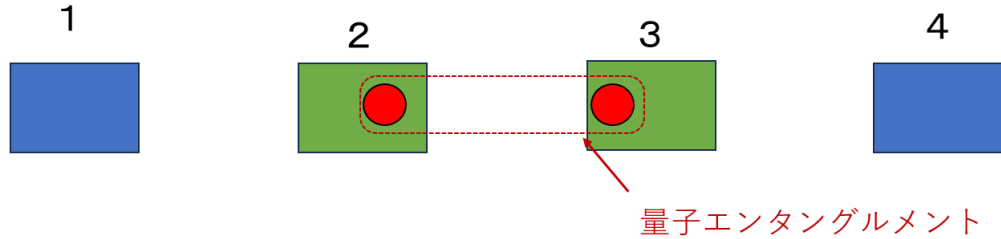
3.2 量子メモリの使用方法

量子メモリは、量子をノード間に保存するために使用される。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 ペア生成をより短い遅延時間で行うことができる。

図3.1は量子メモリの使用法を示したものである。図3.1(1)では、メモリの存在するノード間に EPR ペアが保存される。図3.1(2)では、保存された EPR ペアが EPR ペア生成時に、生成する時間を短縮し使用される。

量子ネットワークに配置された量子メモリは、ストレージとしての役割を果たし、EPR ペアを保存可能である。量子メモリに蓄えられた EPR ペアは、忠実度の高い EPR ペアが供給される。また、量子メモリに保存される EPR ペアは、時間以内に消費されない場合でも、常に新しいものが供給されると仮定する。

(1) EPRペアを量子メモリの存在するノードに事前に保存



(2) EPRペア生成要求発生時，生成時間を短縮し使用可能になる．

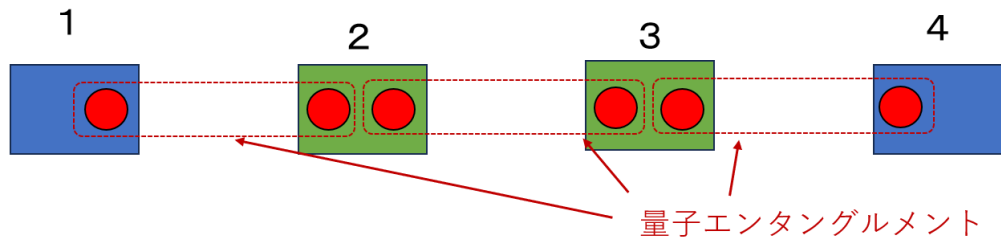


図 3.1: メモリ の 使用 方 法

3.3 提案方式に用いられる数式

数式 3.1 は，量子の精製プロトコルを表す式である [1]．精製処理は，式 3.1 を反復的に用いて計算される．式 3.1 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' を表す式であり，Fidelity の初期値 F を用いて，計算された F' を新しい F の値として，繰り返し本式が適用される．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．

$$F' = \frac{F^2 + \frac{1}{9}(1-F)^2}{F^2 + \frac{2}{3}F(1-F) + \frac{5}{9}(1-F)^2} \quad (3.1)$$

エンタングルメントスワップの計算は，式 3.2 を用いて計算される [15]． F_1, F_2 は，それぞれのノード間の 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 を持つ，EPR ペアに行った後の 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 3.2 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．

$$F_{12} = \frac{1}{4} + \frac{3}{4} \cdot \left(\frac{4F_1 - 1}{3} \right) \cdot \left(\frac{4F_2 - 1}{3} \right) \quad (3.2)$$

ユーザペア k 間の平均生成時間 $T_{av,k}$ は, $T_{s,k}$ に成功確率をかけた値によって計算される. $T_{s,k}$ は, ユーザペア k 間の生成時間を表し, 式 3.3 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.

$$T_{s,k} = T_{link} \cdot N_{link} + T_{swap} \cdot N_{swap} \quad (3.3)$$

3.4 最適化関数の定義

上記の数式を用いて, 最適化関数を定義する. 最適化関数は, 式 3.4 である. 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 3.1 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, 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.

$$T_{av} = \frac{\sum_{k \in K} 2 \cdot T_{av,k} \cdot N_{p,k}}{K} \quad (3.4)$$

3.5 最適化処理

最適化関数を用いた, 最適化処理は次の手順で行われる. 最適化処理では, 量子ネットワーク上に, 量子メモリの配置個数を決定後, 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, それぞれの遅延結果を計算し, 最も良い配置結果を最適配置として出力する. 実行手順を, 以下に示す.

1. 量子メモリの配置個数を決定し, 量子ネットワーク上にランダムに量子メモリを配置する. 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, 計算が行われる.
2. ランダムに配置された, 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} が計算される.

3. ランダム配置と, T_{av} の計算を繰り返し行い, 最も遅延時間が短くなる配置結果を出力.

第4章 性能評価

4.1 ネットワーク

使用するネットワークは, $G = (V, E)$ が存在するネットワークを想定する. このネットワークでは, 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満たすべき最小閾値 F_{min} をもつ. 量子メモリはすべてのノードに配置可能であるとし, 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である.

使用されるネットワークは以下のネットワークを使用し, 図 4.1, 4.2, 4.3 のネットワークを使用する.

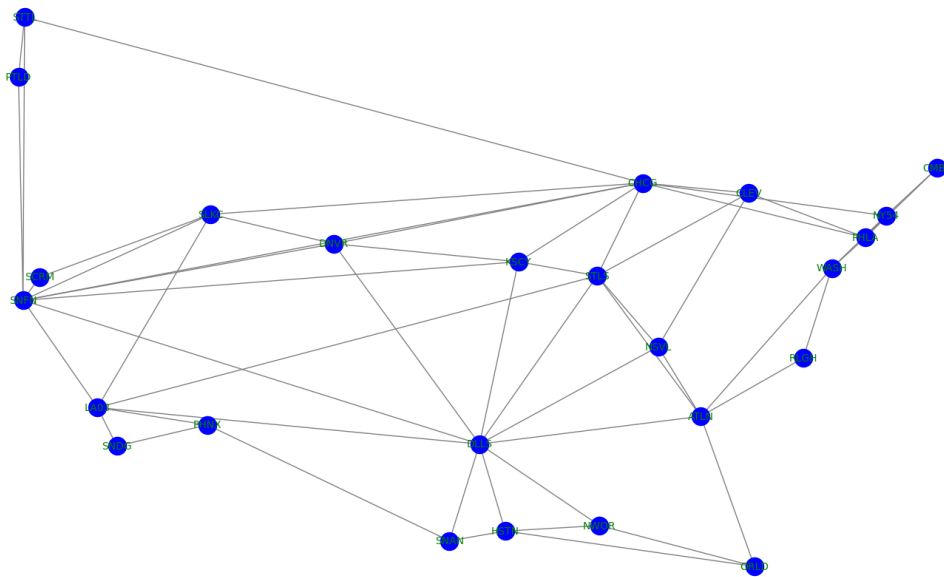


図 4.1: ATT トポロジ

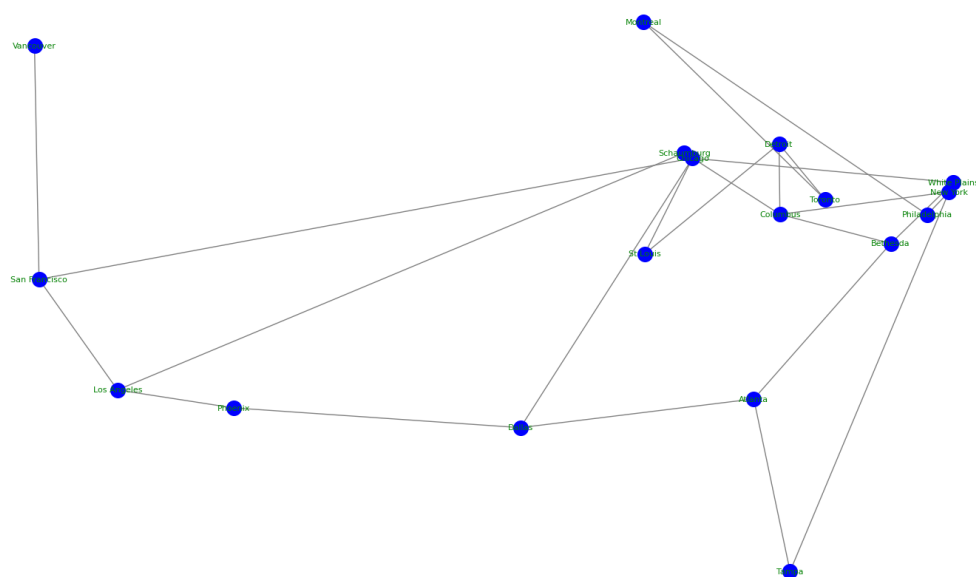


図 4.2: IBM トポロジ

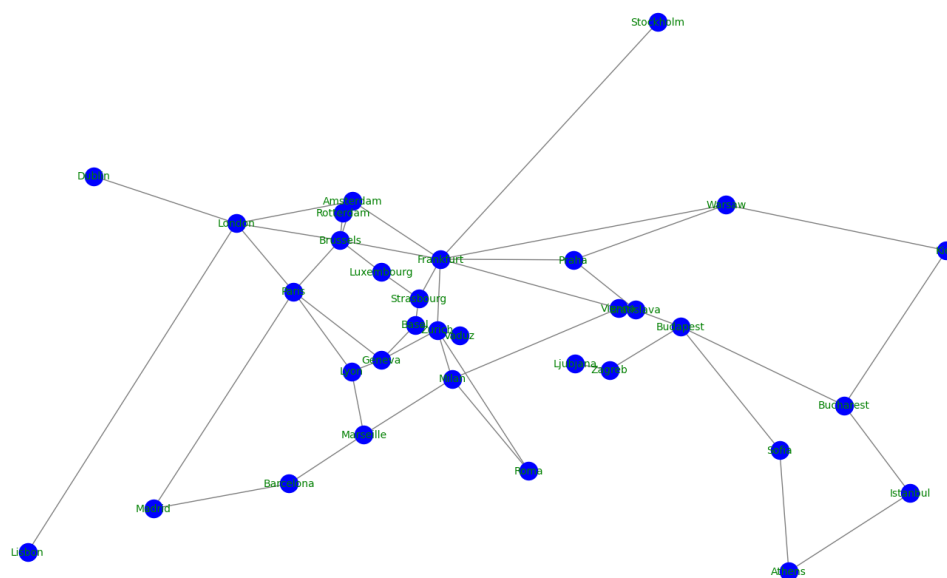


図 4.3: BICS トポロジ

4.2 評価条件

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，図 4.1, 4.2, 4.3 のネットワーク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 $F_{min} = 0.85$ 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．

4.3 複数の評価手法

評価手法は，4 つの評価手法を用いて性能を評価する．以下は，具体的な配置手法の説明である．

1. ランダム配置手法: ネットワーク上に，ランダムに配置を行う手法である．決められた個数分ランダムに量子メモリを配置し，計算を複数回行う．その平均値によって，ランダム配置の出力結果は計算される．
2. 次数中心性配置手法: ネットワーク上において，次数中心性の高いノードに，量子メモリを配置する手法である．
3. 媒介中心性配置手法: ネットワーク上において，媒介される可能性が高いノードに，量子メモリを配置する手法である．
4. 提案手法: ネットワーク上において，最適化関数を用いて計算された，最適化された位置に量子メモリ配置する．

4.4 比較結果

複数のネットワークトポロジにおいて，4 つの手法で配置を行い，遅延時間を計算した結果が以下の図 4.4, 4.5, 4.6 である．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．

また，ネットワークトポロジごとに，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手法の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手法の，差が他の結果と比べて少ない．どのネットワークトポロジにおいても，提案手法では安定して平均遅延を減少させることに成功している．

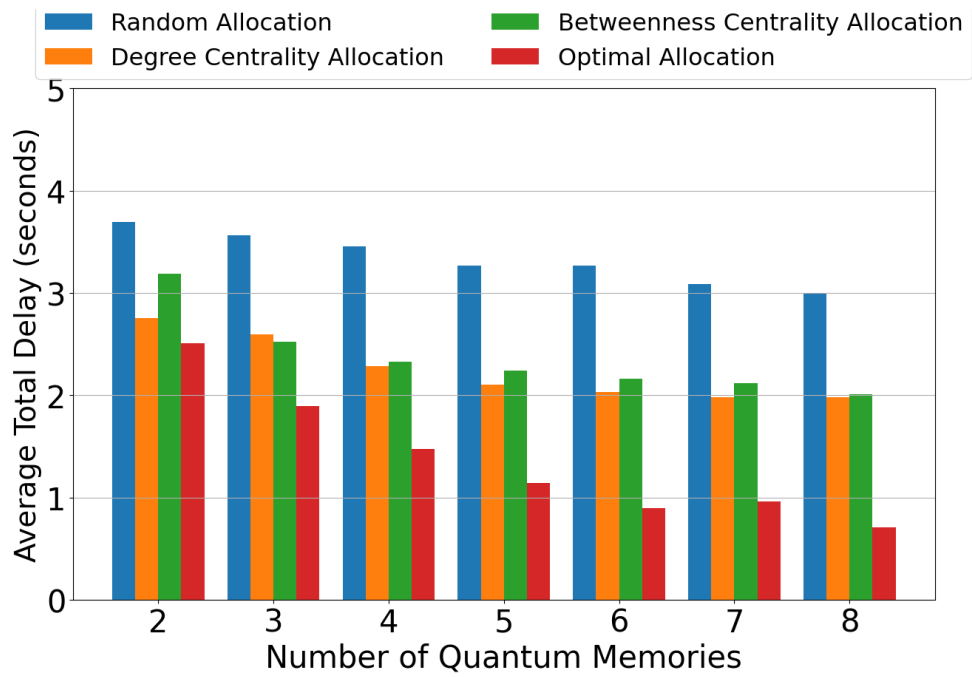


図 4.4: ATT

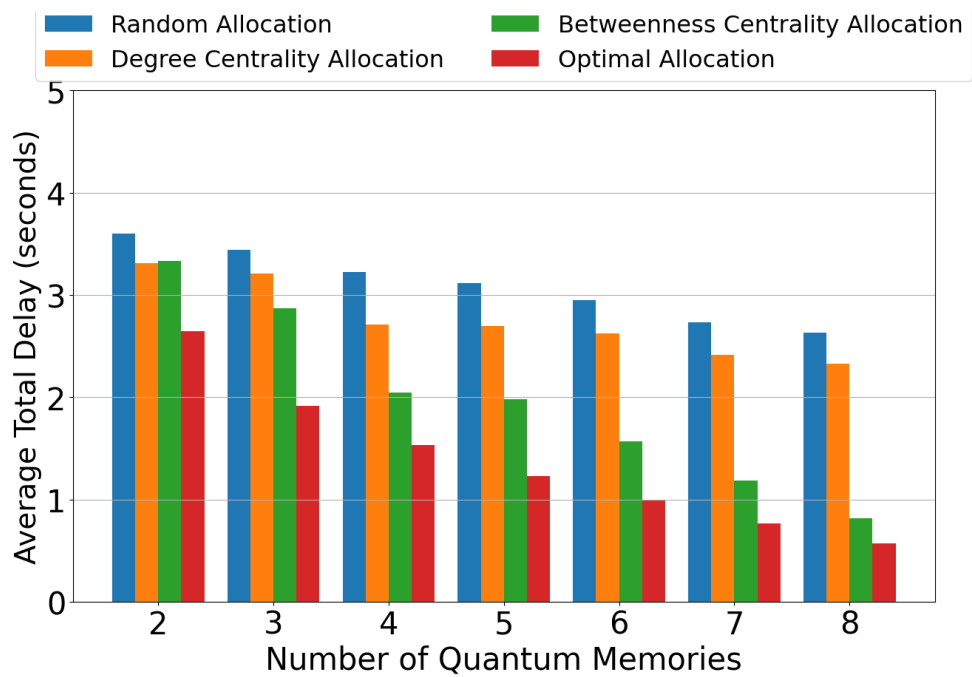


図 4.5: BICS

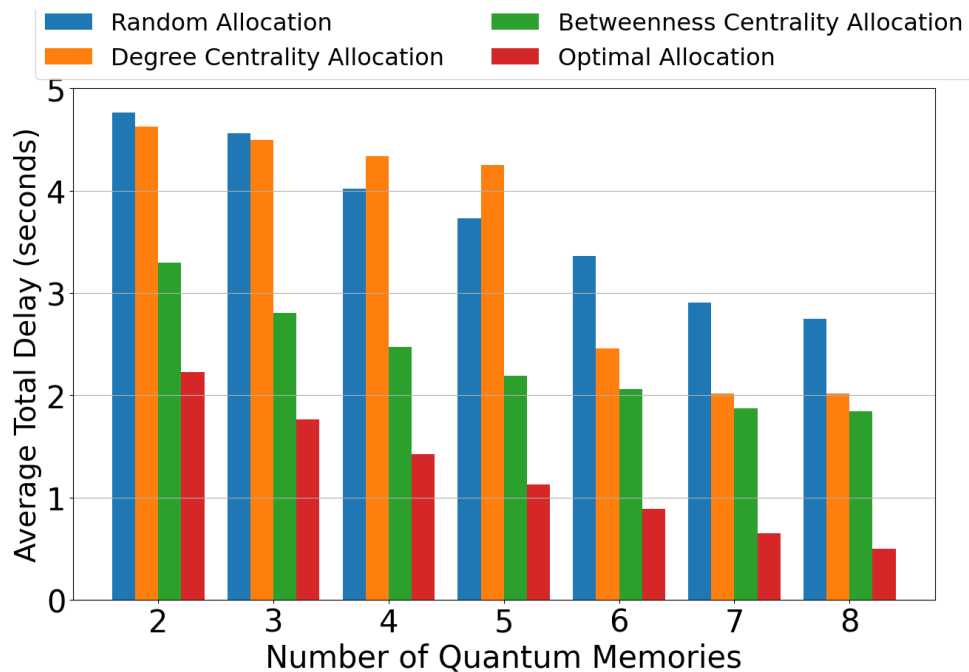


図 4.6: IBM

4.5 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ー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 6.1 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少し変化する。閾値が高くなると、その分精製回数が増加するため、有効性が減少する。

表 4.1: 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

第5章 まとめ

量子ネットワークにおいて、エンタングルメントリソースの有効活用のため、量子メモリの使用方法を定義し、量子メモリの最適配置法を提案した。量子メモリの最適配置を行うため、最適化関数を定め、最適化関数をもとに最適化を行った。提案手法の有効性を確認するため、複数の手法を用いて、複数のネットワークトポロジにおいて遅延時間の計算を行った。その結果、提案手法が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ことを示せた。

謝辞

本研究を行うにあたり, ご指導をいただいた上山教授に感謝します. また日常, 有益な議論をしていただいた研究室の皆様に感謝します.

参考文献

- [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, “Shor’s 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 Tassiulas, 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. In IEEE INFOCOM 2021, pages 1–10. IEEE, 2021.
 - [19] Yingling Mao, Yu Liu, Yuanyuan Yang, Qubit Allocation for Distributed Quantum Computing. IEEE INFOCOM 2023 - IEEE Conference on Computer Communications, 17-20 May 2023.

学会発表リスト

- 森田 哲司, 上山憲昭, “量子ネットワークにおける量子メモリの最適配置法“, 電子情報通信学会 2025 年総合大会, 東京, 2025 年 3 月
- 森田 哲司, 上山憲昭, “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“, 電子情報通信学会 NS 研究会, 沖縄, 2025 年 3 月