
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

NS研究会

立命館大学 情報理工学部
森田 哲司 上山憲昭

背景 量子ネットワークとは

■ 量子ネットワーク

- 量子アプリケーションを実現するために必要
- 量子アプリケーションの例: **量子コンピューティング**, 量子センシング

■ 量子ネットワークの役割

- 量子情報の送受信
- 送受信のためには, 任意のノードに**EPRペア**を配布
 - 配布には**量子リピータ**を使用

■ 量子ビット

- 古典的なビットとは根本的に異なる
- 測定されるまで, その状態は確定しない

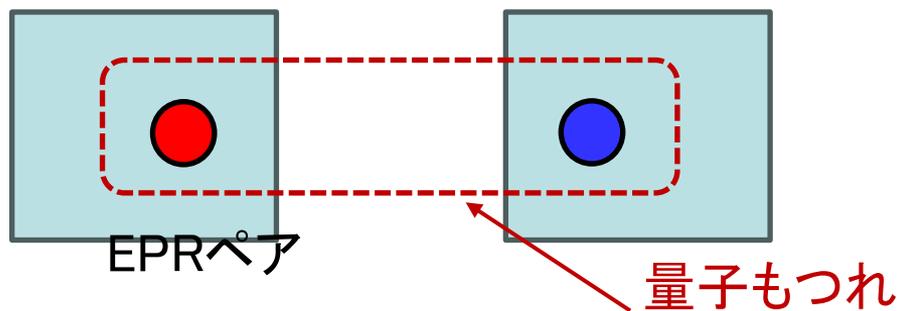
$$|0\rangle = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad |1\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

- 二つの基底状態を用いて, 以下のように記述

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

背景 量子ネットワーク: 量子エンタングルメント・EPRペア

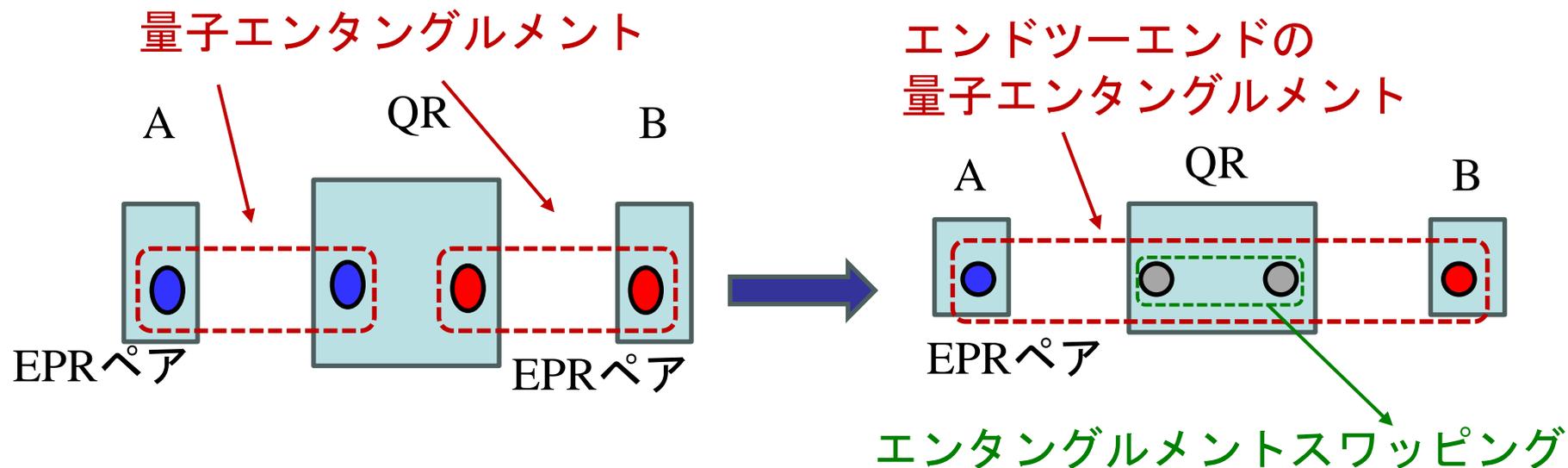
- 量子エンタングルメント(量子もつれ)
 - 複数の量子ビット間に相関性がある状態
- EPRペア
 - 量子エンタングルメントが**最大限もつれている状態**
 - EPRペアが準備されることで, **量子情報が送信可能**



背景 量子ネットワーク: 量子リピータ(1/3)

■ 量子リピータ

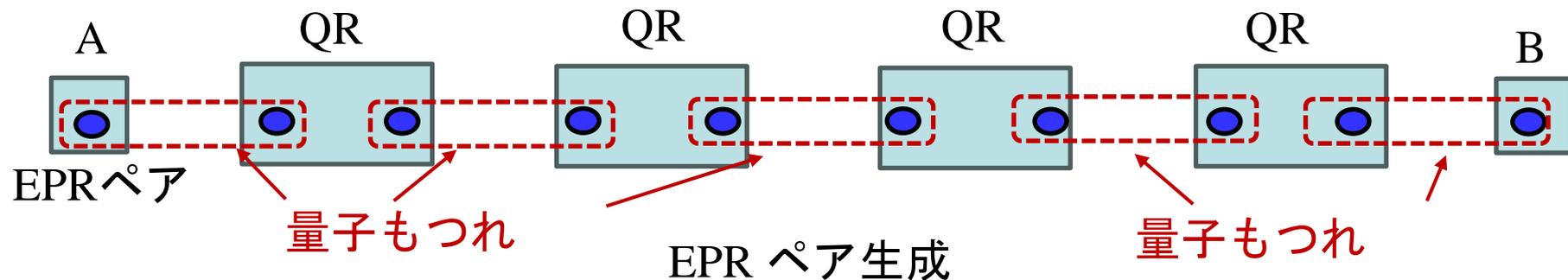
- 離れた場所にEPRペアを生成するために必要な装置



背景 量子ネットワーク: 量子リピータ(2/3)

■ 複数の量子リピータの場合

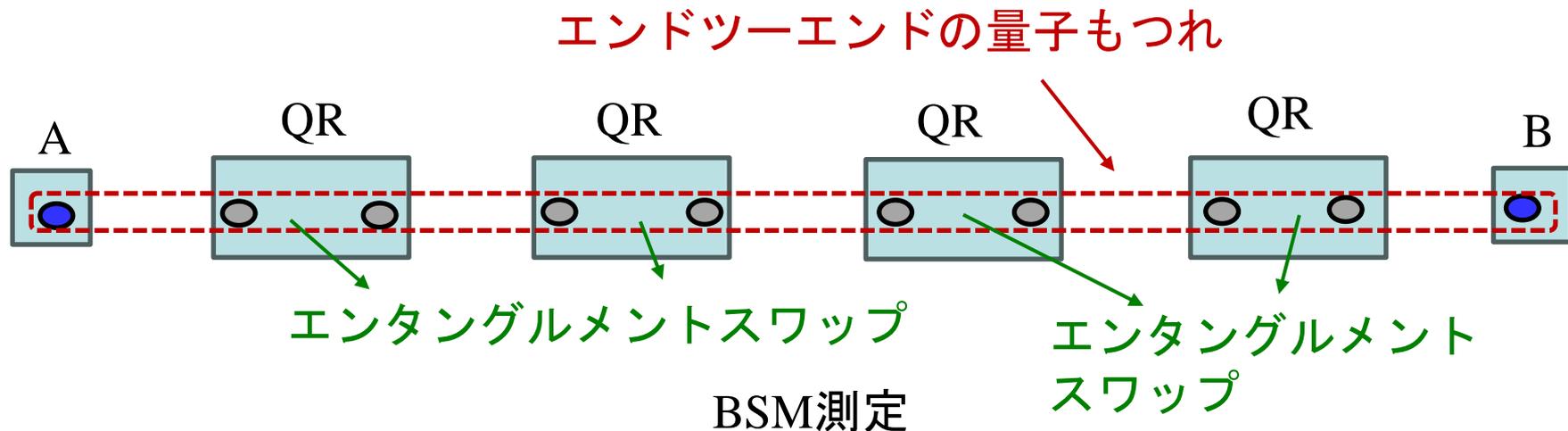
- 距離が延長され、配布ノードが任意に拡張



背景 量子ネットワーク: 量子リピータ(3/3)

■ 複数の量子リピータの場合

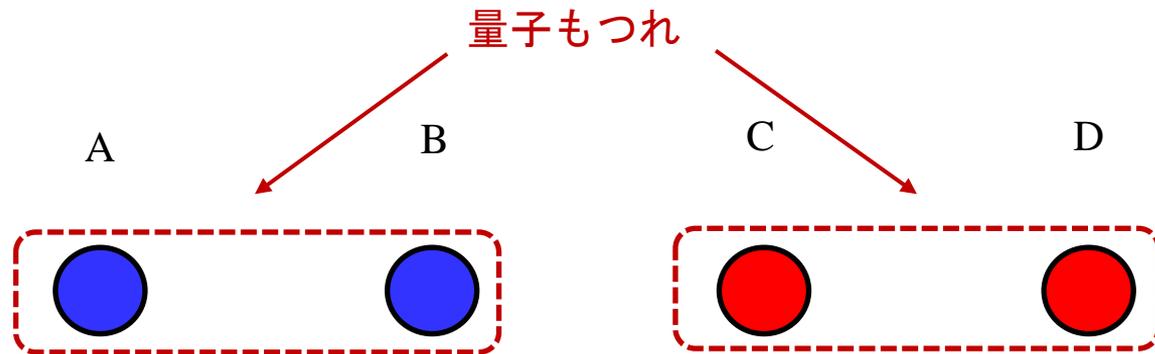
- 距離が延長され、配布ノードが任意に拡張



背景 量子ネットワーク: エンタングルメントスワップ(1/4)

■ エンタングルメントスワップ

- 量子リピータで行われる処理で, 量子同士を, **間接的に結び付ける行為**

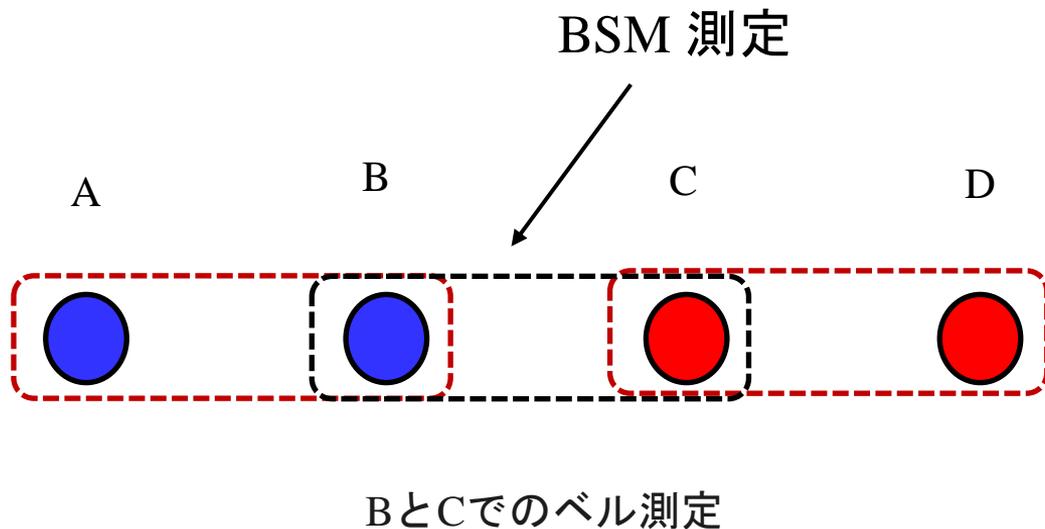


(A,B)と(C,D)の二つのペアを用意

背景 量子ネットワーク: エンタングルメントスワップ(2/4)

■ エンタングルメントスワップ

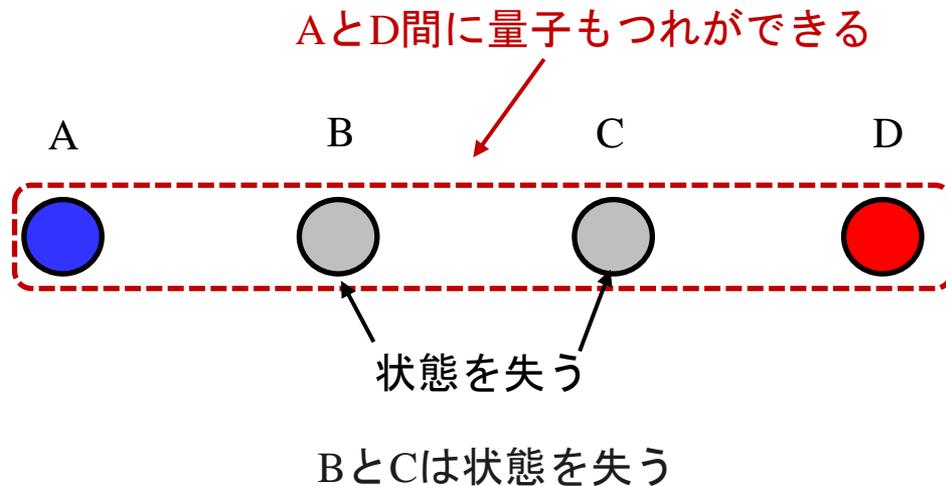
- 量子リピータで行われる処理で, 量子同士を, **間接的に結び付ける行為**



背景 量子ネットワーク: エンタングルメントスワップ(3/4)

■ エンタングルメントスワップ

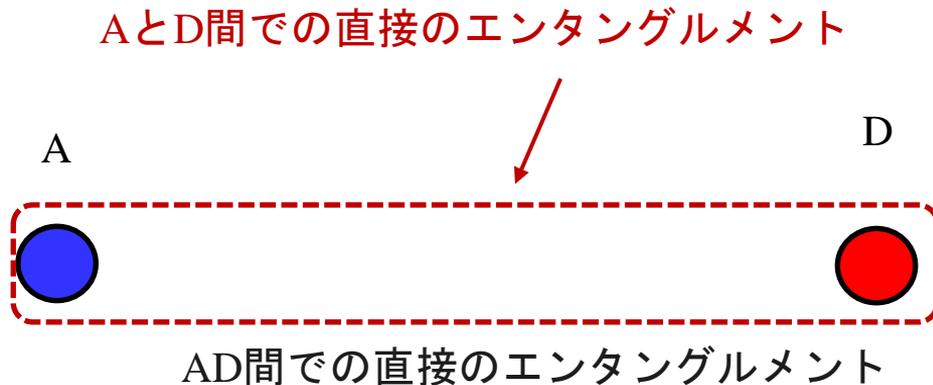
- 量子リピータで行われる処理で, 量子同士を, **間接的に結び付ける行為**



背景 量子ネットワーク: エンタングルメントスワップ(4/4)

■ エンタングルメントスワップ

- 量子リピータで行われる処理で, 量子同士を, 間接的に結び付ける行為



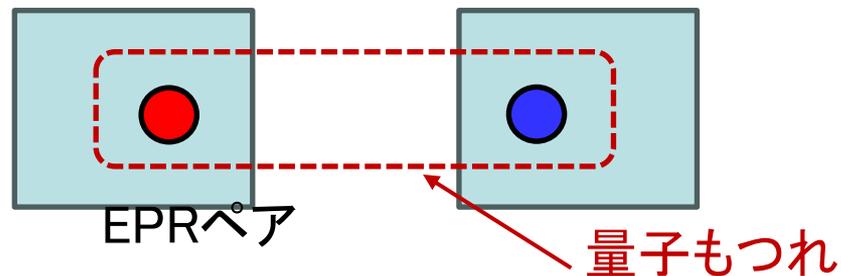
背景 量子ネットワーク: 忠実度(Fidelity)と量子精製

■ 忠実度(Fidelity)

- 量子の品質を表す概念: 0-1の値域
- 量子は通常すぐに劣化

■ 量子精製

- 忠実度を上昇させる処理
- EPRペアが使用の際, 最小閾値が存在する場合に使用



背景 量子ネットワーク: 量子メモリ

■ 量子メモリ

- 一定時間量子の状態を保存可能
- 通常量子の状態は時間で劣化

■ 量子メモリの特徴

- 効率向上に貢献
- 用途は多いが、貴重でリソースは有限



■ メモリの使用法

- EPRペアをパスとして使用する方法が提案される

研究目的・課題

■ 課題

- 量子メモリは有限なので有効活用が必要
- 量子メモリの使用法を定義し, 量子メモリを有効活用
- 量子メモリの配置が量子ネットワーク上での生成コストや性能を左右

■ 目的

- 量子ネットワークの量子メモリの効果的な配置法を提案
 - 最適化目標: 使用EPRが閾値を満たすまでの所要時間の最小化

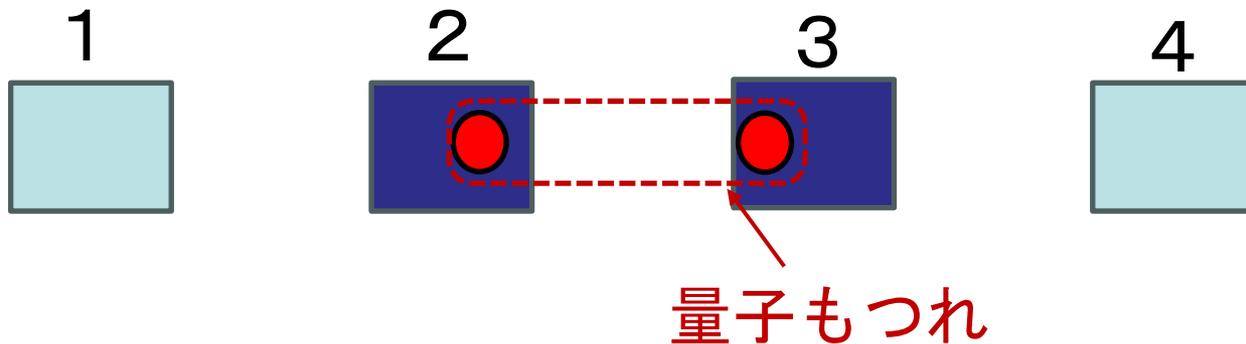
提案方式

提案方式: 実行手順

- 量子メモリの使用方法とネットワークを決定
- 量子ビットの転送に要する, 平均遅延時間を最適化関数として定式化
- 量子メモリ配置の最適化処理
 - 最適化手法: GA
 - ネットワーク上にメモリの配置を与え, 平均遅延時間を計算
- 提案手法と他手法を比べ, 性能評価

提案方式: 量子メモリの使用法(1/2)

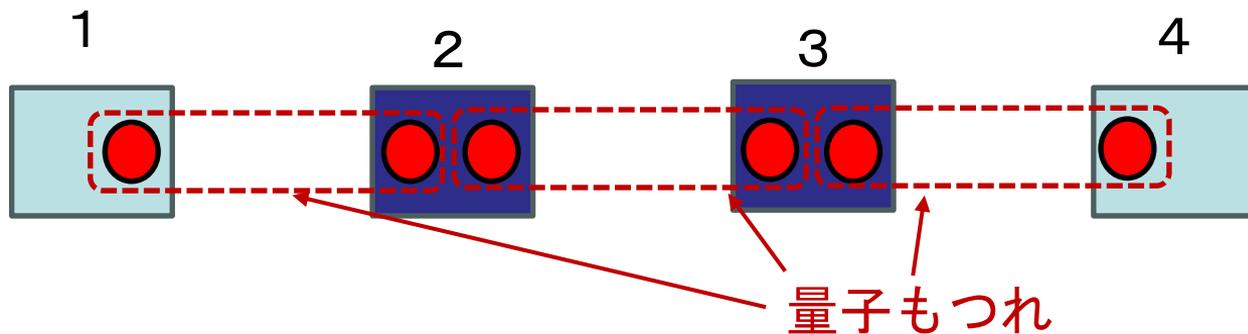
- メモリの使用法
 - 事前にEPRペアを保存



事前にEPRペアを量子メモリに保存

提案方式: 量子メモリの使用法(2/2)

- メモリの使用法
 - 生成時間を短縮する役割



生成に必要な時間を短縮

提案方式: 最適化関数定義のため使用される式

- 再帰式を用いて精製回数を計算

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

- 二つのEPRペアの忠実度を用いて, エンタングルメントスワップ後の忠実度を計算

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

- 定数 T_{link} , T_{swap} を用いて, ノード間の遅延時間を計算

$$T_{s,k} = T_{link} \cdot N_{link} + T_{swap} \cdot N_{swap}$$

提案方式: 最適化関数

- 平均遅延時間 T_{av}
 - K : ユーザペアの総数
 - $T_{av,k}$: EPR ペア生成に要する平均遅延時間
 - $N_{p,k}$: 精製処理の反復回数

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

提案方式: 最適化手法

■ 最適化手法

- 遺伝的アルゴリズムを適応
- 最適化問題を解くための手法, 自然界の生物の進化を模倣したもの

■ 実行手順

- 初期集団の作成: S 個の配置場所をランダムに選択
- 適応度の計算: T_{av} を計算
- 遺伝子の選択: エリート保存で選択
- 新たな遺伝子集団を作成: 突然変異と交叉を実行
- 終了条件: 一定の世代数になるまで反復

性能評価

性能評価: ネットワークとパラメタ, 経路選択

- 使用したネットワークとパラメタ
 - Vがノード数, Eがエッジ数
 - 最小閾値は0.85に設定
- 経路選択
 - 最短ホップ経路を利用

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

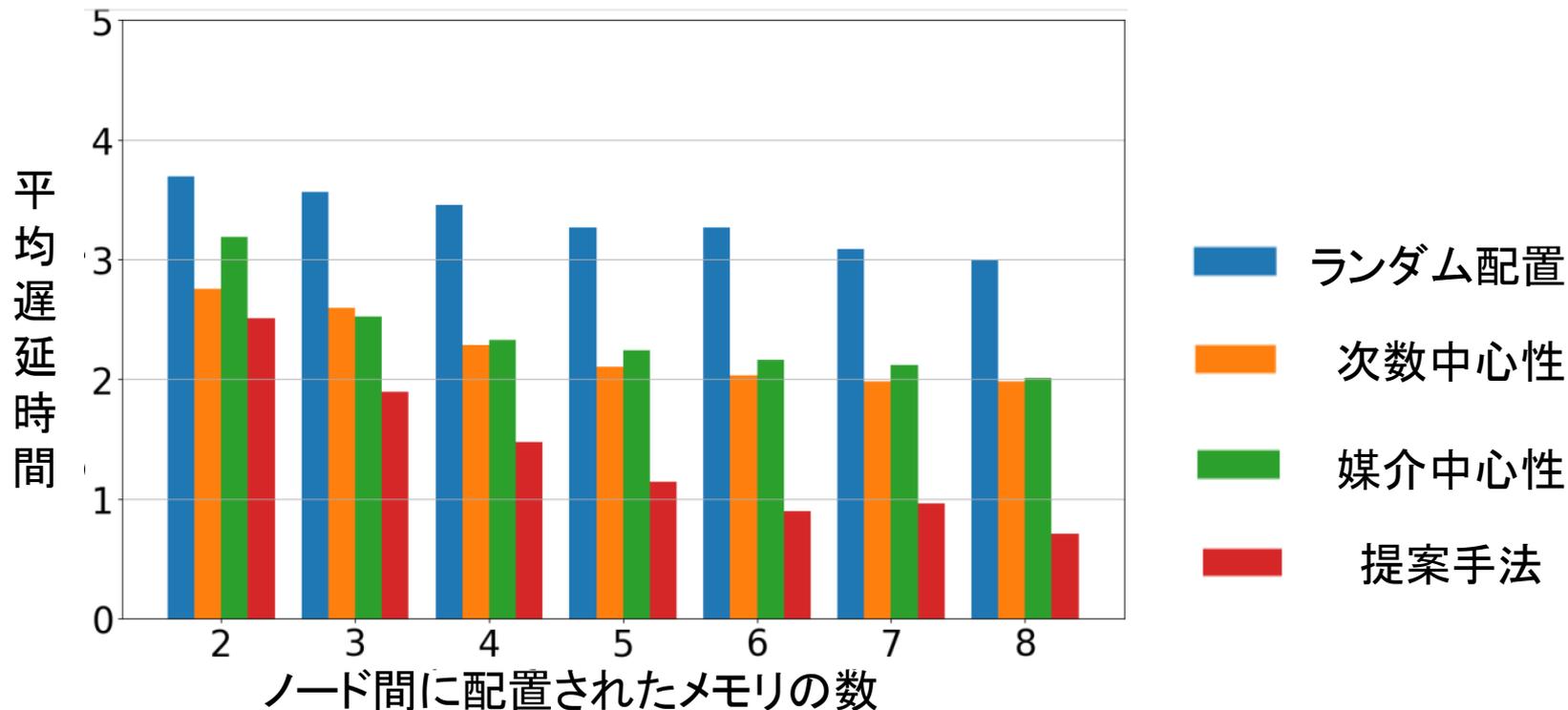
Parameter	Value	Description
F_{min}	0.85	Minimum Threshold
T_{link}	200ms	EPR Pair Generation Time
T_{swap}	50ms	Swapping time

性能評価: 配置手法

- 配置手法

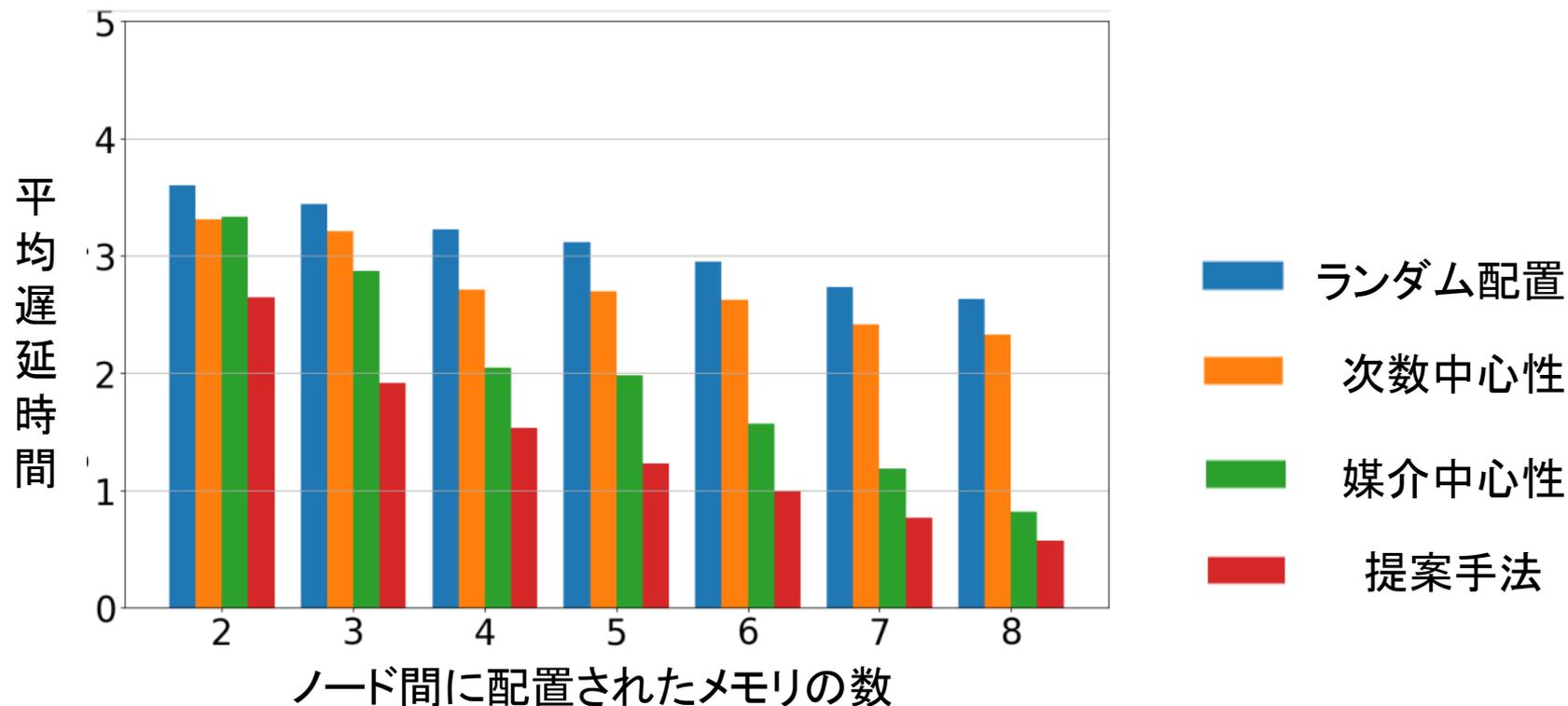
- ランダム配置: S 個のノード間にランダムに配置
- 次数中心性配置: 次数性が高い S 個のノード間に量子メモリを配置
- 媒介中心性配置: 媒介性が高い S 個のノード間に量子メモリを配置
- 提案手法: 本稿で提案した方式で S 個のノード間に量子メモリを配置

性能評価： 比較結果 ATT



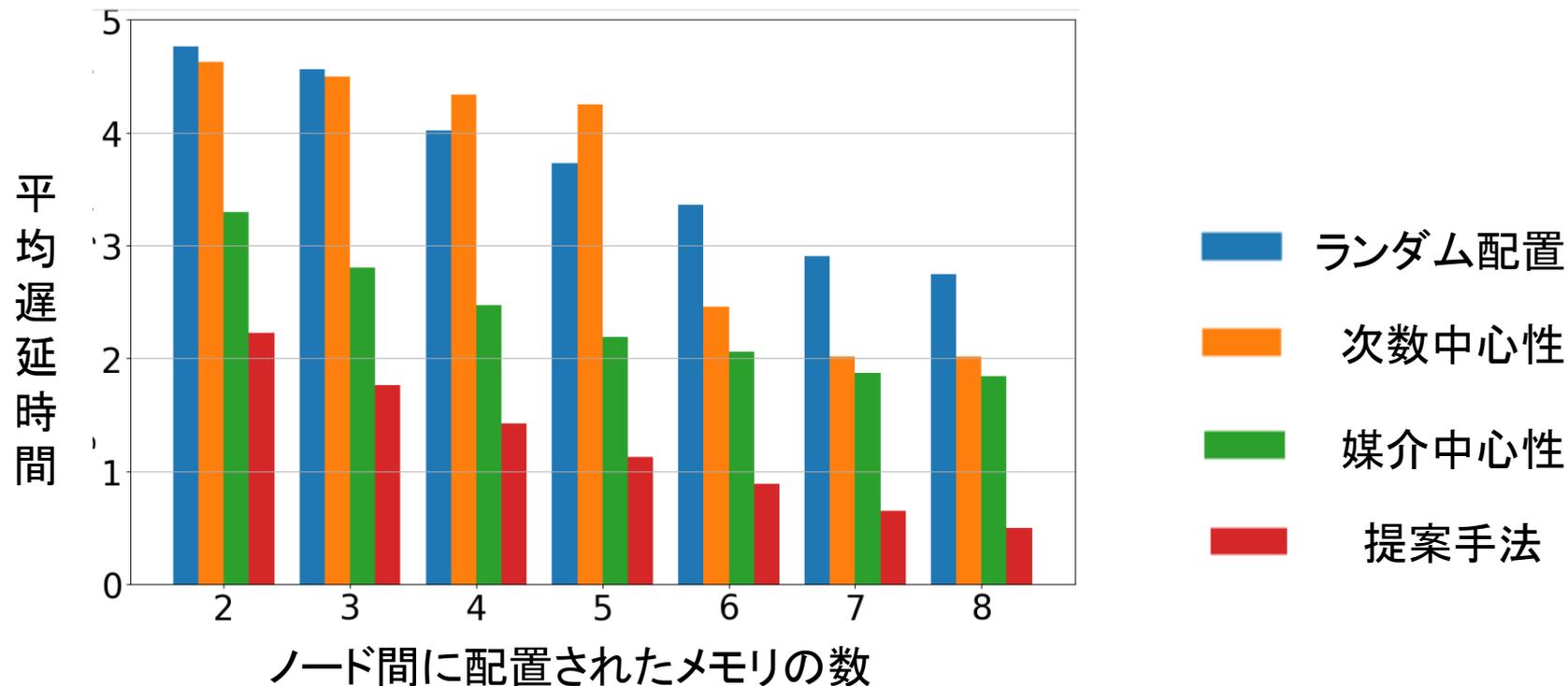
- 提案手法が一番有効的に配置可能で, 次数中心性と媒介中心性が並ぶ

性能評価： 比較結果 BICS



- 提案手法が一番有効的に働くが、媒介中心性がそれに並ぶ

性能評価： 比較結果 IBM



- 提案手法が有効に働き、次数中心性がやや性能でランダム配置に劣る

性能評価： 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
 - ノード間の量子メモリの配置個数 : 4
 - ATT トポロジにおいて、満たすべき**最小閾値を变化**
 - 閾値が遅延時間に与える影響が増大

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

まとめ

■ まとめ

- 量子メモリの最適配置法について提案
- 複数の配置手法と比較して、提案手法の有効性を示した

■ 今後の予定

- EPRペアの生成プロトコルを、ノードごとに生成時間と忠実度を考慮するモデルに変更し、遅延時間を計算
- 平均遅延時間以外の別の最適化パターンとして、要求を考慮した発生モデルにおける配置の最適化
- 現在は一つのノード間での配置問題になっているが、メモリの配置ノード間を複数ノード間に配置することを想定し、組み合わせ最適解を解く

ご清聴ありがとうございました