

## 平成 26 年度研究開発成果概要書

課題名 : 量子もつれ中継技術の研究開発  
採択番号 : 158 ア01  
個別課題名 : 課題ア 量子もつれ中継システムの設計・評価理論  
副題 : 量子中継ネットワークシステム設計とデバイスの技術仕様

### (1) 研究開発の目的

回線長 50km から日本全土をカバーする 3000km までの量子通信ネットワークの実現に向けて、実証中継システムから任意の量子通信ネットワーク上のシステムまで、スケーラビリティに優れた量子中継システム・アーキテクチャを具体的に示す。アーキテクチャの実装に不可欠な量子プロトコルを開発し、それを実現するデバイスの機能を明らかにする。中継システムの評価理論を確立し、システムが要請するデバイスの技術仕様を定量的に示す。これらを統合して実用的な量子中継ネットワークの設計指針の明確化を目指す。

### (2) 研究開発期間

平成 23 年度から平成 27 年度 (5 年間)

### (3) 実施機関

大学共同利用機関法人 情報・システム研究機構 国立情報学研究所  
(実施責任者 教授 根本香絵)

### (4) 研究開発予算 (契約額)

総額 45 百万円 (平成 26 年度 9 百万円)  
※百万円未満切り上げ

### (5) 研究開発課題と担当

幹事研究者・大学共同利用機関法人 情報・システム研究機構  
国立情報学研究所

課題(幹事者が統括)

課題ア-1: 量子中継のシステム設計

課題ア-1-1 線形量子中継のシステム設計

課題ア-1-2 量子中継ネットワークの設計

課題ア-2: 量子中継のための量子情報デバイス技術仕様

課題ア-2-1 量子中継のための量子プロトコルの改良・開発

課題ア-2-2 量子中継ネットワークのためのデバイス技術仕様

課題ア-3 量子中継システム評価

課題ア-3-1 線形量子中継システムの性能特性

課題ア-3-2 量子中継ネットワークの性能特性

課題ア-3-3 異なるシステム間の融合性評価

## (6) これまで得られた成果（特許出願や論文発表等）

		累計（件）	当該年度（件）
特許出願	国内出願	0	0
	外国出願	0	0
外部発表	研究論文	9	5
	その他研究発表	38	10
	プレスリリース・報道	6	4
	展示会	0	0
	標準化提案	0	0

## (7) 具体的な実施内容と成果

## 課題ア-1 量子中継のシステム設計

## 課題ア-1-1 線形量子中継のシステム設計

## ・（システムの改良）

目標通信距離500kmまでの量子中継システムの設計と解析を行った。ダイヤモンドNV中心と共振器を用いたノード量子デバイスをモデルとして、エンタングルメント生成とノード操作を具体的に示した。また、光の伝達時間により生ずる量子メモリの待ち時間の短縮方法について検討して、エンタングル光子源を用いた具体的な設計方法を示した。

## 課題ア-1-2 量子中継ネットワークの設計

## ・（マルチユーザー化）

量子中継のネットワーク化は、基本的に、ノードをスター型にすることで、枝の数の分の分岐を起こすことができる。ノード内で量子通信デバイスの数をリンクの数だけ用意しなくても、古典的なスイッチで切り替えが可能であり、基本的にマルチユーザー化によって技術要素が変えずに拡張できることが示された。

## 課題ア-2 量子中継のための量子情報デバイス技術仕様

## 課題ア-2-1 量子中継のための量子プロトコルの改良・開発

## ・（量子プロトコルの改良）

NVダイヤモンドを用いたノード技術を中心とした量子プロトコルの開発・改良では、ノードで必要となる演算の順序を、単純な線形システムの場合と、マルチプレキシングを行う場合とで、検討した。演算の順序と量子デバイスの配置を工夫することが有効であることがわかった。

## 課題ア-2-2 量子中継ネットワークのためのデバイス技術仕様

- (デバイスの技術仕様)

量子中継デバイスのエンタングルメント配信方法としては、複数の組み合わせが考えるため、これらの特徴をまとめ、利点と欠点について整理した。システムへの統合がもっとも有利なのは反射型の実現化方法であることが量子デバイス条件の考察より示された。開発の初期段階では、誤り訂正のない線形システムを考えるのが適切であり、また精製を行うにしても生成レートと量子メモリー時間を考慮すると、1%以下の誤り率であれば0.1%と達成することが望ましいとし、課題ア-3の量子中継システムの評価へ組み入れた。

### 課題ア-3 量子中継システムの評価

#### 課題ア-3-1 線形量子中継システムの性能特性

- (線形システムの評価)

量子中継システムにおいて、段階的な実現化の指針となる評価方法を提示するために、まず、200km、350km、500kmについて、それぞれ線形中継システムでのエンタングルメント忠誠度を評価した。エンタングルメント忠誠度のノード数依存性を数値的に評価することで、量子ネットワーク中での量子中継の役割を明確にし、量子メモリー時間とゲートの誤り率の関係を特徴付けた。この結果、最適化されたノード数では、すべて85%以上の忠実度を維持しており、マルチプレキシングや誤り訂正なしでも、量子鍵配送などの量子通信タスクに用いることが可能であることが示唆された。

また、生成レートの評価では、実用上大変重要な要素であるが、量子通信の場合、生成レートとエンタングルメント忠実度、さらにリソースを合わせて考慮する必要があるため、これを可能する方法として、生成レートとエンタングルメント忠実度を統合した指標としてセキュア鍵レートをを用いることを考え、200km、350km、500kmについてそれぞれ数値的に解析した。

#### 課題ア-3-2 量子中継ネットワークの性能特性

- (ネットワーク評価)

量子通信のタスクには、達成可能なエンタングルメント忠誠度も重要な要素である場合が多いため、ネットワーク化においては、限界値として忠誠度を保証するような量子ネットワークが必要と考えられる。課題ア-3-2で検討しているノード技術は、もっとも大規模となる誤り耐性のある量子中継ヘスケール可能なデバイスであるため、システムとして拡張

性を示せば良い。量子中継ではエンタングルメント配信が中心的な動作であるため、システムの動作領域の切り替えは容易に行えることが予想された。

#### 課題ア-3-3 異なるシステム間の融合性評価

- (システム融合性の検証)

ダイヤモンドNV中心を用いる量子通信システム間の融合性については、ある程度可能であることが予想される。これをよりシステム的に行うには、エンタングル光子源をノード技術に加えることで生成を加えることが有効である。エンタングルメント光子源は融合性を高めるだけでなく、課題ア-1で触れたように生成レート向上の利点もあることが示された。また、通信波長帯で動作するノード間ネットワークへ、異なる波長帯で動作するノード量子デバイスを波長変換で繋ぐことで、他の実現化に基づく量子デバイスとの融合の可能性が示された。