

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第4162687号  
(P4162687)

(45) 発行日 平成20年10月8日(2008.10.8)

(24) 登録日 平成20年8月1日(2008.8.1)

(51) Int.Cl.		F I			
<b>HO4L</b>	<b>9/12</b>	<b>(2006.01)</b>	<b>HO4L</b>	<b>9/00</b>	<b>631</b>
<b>HO4B</b>	<b>10/04</b>	<b>(2006.01)</b>	<b>HO4B</b>	<b>9/00</b>	<b>L</b>
<b>HO4B</b>	<b>10/06</b>	<b>(2006.01)</b>			
<b>HO4B</b>	<b>10/142</b>	<b>(2006.01)</b>			
<b>HO4B</b>	<b>10/152</b>	<b>(2006.01)</b>			

請求項の数 7 (全 19 頁)

(21) 出願番号 特願2006-161443 (P2006-161443)  
 (22) 出願日 平成18年6月9日(2006.6.9)  
 (65) 公開番号 特開2007-329865 (P2007-329865A)  
 (43) 公開日 平成19年12月20日(2007.12.20)  
 審査請求日 平成20年3月27日(2008.3.27)

(73) 特許権者 000003078  
 株式会社東芝  
 東京都港区芝浦一丁目1番1号  
 (74) 代理人 100089118  
 弁理士 酒井 宏明  
 (72) 発明者 古田 憲一郎  
 神奈川県川崎市幸区小向東芝町1番地 株  
 式会社東芝 研究開発センター内  
 審査官 青木 重徳

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 量子情報通信システム、量子情報中継装置、量子情報通信方法およびプログラム

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

送信ノードから受信ノードまでの古典通信路または量子情報通信路に設けられ、前記送信ノードから前記受信ノードへの光子の量子情報通信の際に、もつれ合った光子対であるEPR対を他のノードと共有し、前記EPR対の各光子間の距離を伸張する量子中継を行う複数の量子情報中継装置とを備えた量子情報通信システムであって、

前記量子情報中継装置のそれぞれは、

前記EPR対を生成するEPR対生成手段と、

生成された前記EPR対の一方の光子を隣接するノードの前記量子情報中継装置に送信する光子送信手段と、

隣接するノードの前記量子情報中継装置との間で、前記EPR対を共有するエンタングルメント交換処理を実行するエンタングルメント交換実行手段と、

前記エンタングルメント交換処理によって共有した前記EPR対の共有先のノードの前記量子情報中継装置との間で、前記EPR対の忠実度を回復するための処理であるエンタングルメント純粋化プロトコル処理を実行するエンタングルメント純粋化プロトコル実行手段と、を備え、

前記エンタングルメント純粋化プロトコル実行手段は、前記エンタングルメント純粋化プロトコル処理のうち最後の前記エンタングルメント純粋化プロトコル処理を実行する場合に、最後に実行された前記エンタングルメント交換処理および当該エンタングルメント交換処理以前に実行された前記エンタングルメント交換処理で使用された古典通信路、お

よび以前に実行された前記エンタングルメント純粋化プロトコル処理で使用された古典通信路のうちのいずれか1つ以上と異なる古典通信路を選択することを特徴とする量子情報通信システム。

【請求項2】

前記送信ノードから前記受信ノードまでの経路情報を記憶する記憶手段と、

前記送信ノードとなる前記量子情報中継装置からの要求により、前記経路情報に基づいて、前記送信ノードから前記受信ノードまでの経路を決定する経路決定手段と、

決定された経路を前記送信ノードとなる前記量子情報中継装置に送信する経路送信手段と、を備えた経路決定装置を更に備え、

前記量子情報中継装置は、送信ノードとなる場合に、前記受信ノードまでの経路を前記経路決定装置に要求し、前記経路決定装置によって決定された経路を受信する通信手段を更に備え、

前記エンタングルメント交換実行手段は、受信した前記経路に基づいて他のノードの前記中継装置と前記エンタングルメント交換処理を実行することを特徴とする請求項1に記載の量子情報通信システム。

【請求項3】

送信ノードから受信ノードまでの古典通信路または量子情報通信路に設けられ、前記送信ノードから前記受信ノードへの光子の量子情報通信の際に、もつれ合った光子対であるEPR対を他のノードと共有し、前記EPR対の各光子間の距離を伸張する量子中継を行う量子情報中継装置であって、

前記EPR対を生成するEPR対生成手段と、

生成された前記EPR対の一方の光子を隣接するノードの前記量子情報中継装置に送信する光子送信手段と、

隣接するノードの前記量子情報中継装置との間で、前記EPR対を共有するエンタングルメント交換処理を実行するエンタングルメント交換実行手段と、

前記エンタングルメント交換処理によって共有した前記EPR対の共有先のノードの前記量子情報中継装置との間で、前記EPR対の忠実度を回復するための処理であるエンタングルメント純粋化プロトコル処理を実行するエンタングルメント純粋化プロトコル実行手段と、を備え、

前記エンタングルメント純粋化プロトコル実行手段は、前記エンタングルメント純粋化プロトコル処理のうち最後の前記エンタングルメント純粋化プロトコル処理を実行する場合に、最後に実行された前記エンタングルメント交換処理および当該エンタングルメント交換処理以前に実行された前記エンタングルメント交換処理で使用された古典通信路、および以前に実行された前記エンタングルメント純粋化プロトコル処理で使用された古典通信路のうちのいずれか1つ以上と異なる古典通信路を選択することを特徴とする量子情報中継装置。

【請求項4】

前記エンタングルメント交換実行手段は、前記エンタングルメント交換処理のうち最後の前記エンタングルメント交換処理を実行する場合に、以前に実行された前記エンタングルメント交換処理で使用された古典経路、および以前に実行された前記エンタングルメント純粋化プロトコル処理で使用された古典通信路のうちのいずれか1つ以上と異なる古典通信路を選択することを特徴とする請求項3に記載の量子情報中継装置。

【請求項5】

前記送信ノードから前記受信ノードまでの経路情報を記憶する記憶手段と、

前記経路情報に基づいて、前記送信ノードから前記受信ノードまでの経路を決定する経路決定手段と、を更に備え、

前記エンタングルメント交換実行手段は、受信した前記経路に基づいて他のノードの前記中継装置と前記エンタングルメント交換処理を実行することを特徴とする請求項3または4に記載の量子情報中継装置。

【請求項6】

10

20

30

40

50

送信ノードから受信ノードまでの古典通信路または量子情報通信路に設けられ、前記送信ノードから前記受信ノードへの光子の量子情報通信の際に、もつれ合った光子対であるEPR対を他のノードと共有し、前記EPR対の各光子間の距離を伸張する量子中継を行う複数の量子情報中継装置の間で行われる量子情報通信方法であって、

もつれあった光子対であるEPR対を生成するEPR対生成ステップと、

生成された前記EPR対の一方の光子を隣接するノードの前記量子情報中継装置に送信する光子送信ステップと、

エンタングルメント交換実行手段によって、隣接するノードの前記量子情報中継装置との間で、前記EPR対を共有するエンタングルメント交換処理を実行するエンタングルメント交換実行ステップと、

10

エンタングルメント純粋化プロトコル実行手段によって、前記エンタングルメント交換処理によって共有した前記EPR対の共有先のノードの前記量子情報中継装置との間で、前記EPR対の忠実度を回復するための処理であるエンタングルメント純粋化プロトコル処理を実行するエンタングルメント純粋化プロトコル実行ステップと、を含み、

前記エンタングルメント純粋化プロトコル実行ステップは、前記エンタングルメント純粋化プロトコル処理のうち最後の前記エンタングルメント純粋化プロトコル処理を実行する場合に、最後に実行された前記エンタングルメント交換処理および当該エンタングルメント交換処理以前に実行された前記エンタングルメント交換処理で使用された古典通信路、および以前に実行された前記エンタングルメント純粋化プロトコル処理で使用された古典通信路のうちのいずれか1つ以上と異なる古典通信路を選択することを特徴とする量子情報通信方法。

20

#### 【請求項7】

送信ノードから受信ノードまでの古典通信路または量子情報通信路に設けられ、前記送信ノードから前記受信ノードへの光子の量子情報通信の際に、もつれ合った光子対であるEPR対を他のノードと共有し、前記EPR対の各光子間の距離を伸張する量子中継を行う量子情報中継プログラムであって、

もつれあった光子対であるEPR対を生成するEPR対生成ステップと、

生成された前記EPR対の一方の光子を隣接するノードの前記量子情報中継装置に送信する光子送信ステップと、

隣接するノードの前記量子情報中継装置との間で、前記EPR対を共有するエンタングルメント交換処理を実行するエンタングルメント交換実行ステップと、

30

前記エンタングルメント交換処理によって共有した前記EPR対の共有先のノードの前記量子情報中継装置との間で、前記EPR対の忠実度を回復するための処理であるエンタングルメント純粋化プロトコル処理を実行するエンタングルメント純粋化プロトコル実行ステップと、をコンピュータに実行させ、

前記エンタングルメント純粋化プロトコル実行ステップは、前記エンタングルメント純粋化プロトコル処理のうち最後の前記エンタングルメント純粋化プロトコル処理を実行する場合に、最後に実行された前記エンタングルメント交換処理および当該エンタングルメント交換処理以前に実行された前記エンタングルメント交換処理で使用された古典通信路、および以前に実行された前記エンタングルメント純粋化プロトコル処理で使用された古典通信路のうちのいずれか1つ以上と異なる古典通信路を選択することを特徴とする量子情報中継プログラム。

40

#### 【発明の詳細な説明】

##### 【技術分野】

##### 【0001】

本発明は、多者間で量子情報中継を利用して長距離の量子情報通信を行う量子情報通信システム、量子情報中継装置、量子情報通信方法およびプログラムに関する。

##### 【背景技術】

##### 【0002】

強力な暗号プリミティブとして提案されている量子鍵配送において、安全性を保証する

50

ためには、送信する信号の強度を十分に小さくしておく必要がある。信号強度が微弱であることには高い安全性を確保することができる一方、短い通信距離で量子状態が減衰するという問題がある。また、量子状態としての信号は、正確な観測基底を知らない場合には、複製できないという特徴も有しているため、一度、信号を読み取って新たに信号を生成することによって、信号の減衰を回復することができず、量子状態としての信号を増幅することは非常に困難となっている。このため、量子情報中継の技術が提案されている。

【 0 0 0 3 】

量子情報中継は、量子状態としての信号を遠隔地まで高い忠実度で送信する技術であり、エンタングルメントスワッピング ( E S : entanglement Swapping ) によって互いにもつれ合った光子対である E P R 対の長さを伸張し、エンタングルメント純粋化プロトコル ( E P P : Entanglement Purification Protocol ) によって忠実度を回復するという2つの操作を繰り返すことによって、E P R 対の長さを徐々に伸張していきつつ、忠実度を確保する技術である。ここで、忠実度とは、減衰後の量子状態が減衰前の量子状態にどの程度近いかを示す指標である。

10

【 0 0 0 4 】

より具体的には、量子情報中継プロトコルは以下の手順で進行する。まず、各中継地点において、E P R 対を発生させて、E P R 対の一方の光子を隣接する中継地点に送信する。これにより、隣り合った中継地点の間でE P R 対が共有される。その後、E S によりE P R 対をつなぎ合わせる。隣接する地点間でのE P R 対の共有やE S 操作の際に忠実度が低下するが、このように低下した忠実度をE P P により向上させる。そして、送信者と受信者との間でE P R 対が共有されるまでE S 及びE P P を繰り返し実行する。このようにしてE P R 対は送信者と受信者との間で共有され、量子状態としての信号を遠隔地まで高い忠実度で送信することができる(例えば、非特許文献1参照)。

20

【 0 0 0 5 】

【非特許文献1】H.J. Briegel et.al. Quantum repeaters:The role of imperfect local operations in quantum communication.Phys.Rev.Lett.,Vol.81,No.26,pp.5932, 1998.

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【 0 0 0 6 】

しかしながら、このような量子情報中継の技術では、次のような問題点がある。量子情報中継においては古典通信が使用されるが、E P R 対は、古典通信を行っている間は中継地点にある量子メモリ内に保存されることになる。量子メモリ内に保存されたE P R 対の量子状態の忠実度は時間とともに減衰するため、保存時間の増加は共有されるE P R 対の忠実度の低下につながってくる。このため、共有されるE P R 対の忠実度を高めるためには、古典通信の時間をできるだけ短くする必要がある。

30

【 0 0 0 7 】

また、量子情報中継で使用する量子情報中継器には、小規模な量子計算機や量子メモリが搭載される。これらの量子計算機や量子メモリは古典通信路に用いられる光ファイバーや古典信号の増幅器に比べて高価であるため、量子情報中継器を古典通信路が存在する全ての経路に設置すると、ネットワーク構築のためのコストが増大してしまう。このため、実際にネットワークを構築する際には中継器を備えた量子情報通信路の密度は古典通信路に比べて疎になると考えられる。従って、量子情報通信路は、必然的に古典通信路の最短距離に比べて遠回りとなってしまう。この場合、上述したように、信号の安全性を確保することが困難となるという問題がある。

40

【 0 0 0 8 】

本発明は、上記に鑑みてなされたものであって、量子情報中継を使用した量子情報通信において、受信者に対して量子状態の忠実度を維持しつつ、安全性を確保することができる量子情報通信システム、量子情報中継装置、量子情報通信方法およびプログラムを提供することを目的とする。

【課題を解決するための手段】

50

## 【 0 0 0 9 】

上述した課題を解決し、目的を達成するために、本発明は、送信ノードから受信ノードまでの古典通信路または量子情報通信路に設けられ、前記送信ノードから前記受信ノードへの光子の量子情報通信の際に、もつれ合った光子対である E P R 対を他のノードと共有し、前記 E P R 対の各光子間の距離を伸張する量子中継を行う複数の量子情報中継装置とを備えた量子情報通信システムであって、前記量子情報中継装置のそれぞれは、前記 E P R 対を生成する E P R 対生成手段と、生成された前記 E P R 対の一方の光子を隣接するノードの前記量子情報中継装置に送信する光子送信手段と、隣接するノードの前記量子情報中継装置との間で、前記 E P R 対を共有するエンタングルメント交換処理を実行するエンタングルメント交換実行手段と、前記エンタングルメント交換処理によって共有した前記 E P R 対の共有先のノードの前記量子情報中継装置との間で、前記 E P R 対の忠実度を回復するための処理であるエンタングルメント純粋化プロトコル処理を実行するエンタングルメント純粋化プロトコル実行手段と、を備え、前記エンタングルメント純粋化プロトコル手段は、前記エンタングルメント純粋化プロトコル処理のうち最後の前記エンタングルメント純粋化プロトコル処理を実行する場合に、最後に実行された前記エンタングルメント交換処理および当該エンタングルメント交換処理以前に実行された前記エンタングルメント交換処理で使用された古典通信路、および以前に実行された前記エンタングルメント純粋化プロトコル処理で使用された古典通信路のうちのいずれか 1 つ以上と異なる古典通信路を選択することを特徴とする。

10

## 【 0 0 1 0 】

また、本発明は、送信ノードから受信ノードまでの古典通信路または量子情報通信路に設けられ、前記送信ノードから前記受信ノードへの光子の量子情報通信の際に、もつれ合った光子対である E P R 対を他のノードと共有し、前記 E P R 対の各光子間の距離を伸張する量子中継を行う量子情報中継装置であって、前記 E P R 対を生成する E P R 対生成手段と、生成された前記 E P R 対の一方の光子を隣接するノードの前記量子情報中継装置に送信する光子送信手段と、隣接するノードの前記量子情報中継装置との間で、前記 E P R 対を共有するエンタングルメント交換処理を実行するエンタングルメント交換実行手段と、前記エンタングルメント交換処理によって共有した前記 E P R 対の共有先のノードの前記量子情報中継装置との間で、前記 E P R 対の忠実度を回復するための処理であるエンタングルメント純粋化プロトコル処理を実行するエンタングルメント純粋化プロトコル実行手段と、を備え、前記エンタングルメント純粋化プロトコル実行手段は、前記エンタングルメント純粋化プロトコル処理のうち最後の前記エンタングルメント純粋化プロトコル処理を実行する場合に、最後に実行された前記エンタングルメント交換処理および当該エンタングルメント交換処理以前に実行された前記エンタングルメント交換処理で使用された古典通信路、および以前に実行された前記エンタングルメント純粋化プロトコル処理で使用された古典通信路のうちのいずれか 1 つ以上と異なる古典通信路を選択することを特徴とする。

20

30

## 【 発明の効果 】

## 【 0 0 1 1 】

本発明によれば、量子情報中継を使用した量子情報通信において、受信者に対して量子状態の忠実度を維持しつつ、安全性を確保することができるという効果を奏する。

40

## 【 発明を実施するための最良の形態 】

## 【 0 0 1 2 】

以下に添付図面を参照して、この発明にかかる量子情報通信システム、量子情報中継装置、量子情報通信方法およびプログラムの最良な実施の形態を詳細に説明する。

## 【 0 0 1 3 】

## ( 実施の形態 1 )

実施の形態 1 にかかる量子情報通信システムは、従来、送信者と受信者とを結ぶ全区間にわたって量子情報中継装置を結ぶ経路と古典通信路が一致していたのに対して、量子情報中継装置を結ぶ経路よりも短い経路で古典通信が可能になる場合には当該古典通信の経

50

路を選択することにより通信を実現するものである。

【0014】

図1は、実施の形態1にかかる量子情報通信システムのネットワーク構成を示すブロック図である。図1に示すように、実施の形態1にかかる量子情報通信システムは、複数の量子情報中継装置100が光ファイバー140で接続された構成となっている。かかる光ファイバー140によって構成されるネットワークは、古典通信路と量子情報通信路の双方で構成されている。

【0015】

量子情報中継装置100は、送信ノードから受信ノードまでの古典通信路または量子情報通信路に設けられ、前記送信ノードから前記受信ノードへの光子の量子情報通信を中継するものである。ここで、本実施の形態では、量子情報中継装置100自体が送信ノードおよび受信ノードとなる構成となっている。

10

【0016】

量子情報中継装置100は、図1に示すように、制御用古典計算機110と中継器120とを備えている。制御用古典計算機110は、CPUやメモリ等を備えた通常のコンピュータの構成となっている。

【0017】

図2は、実施の形態1にかかる中継器120の機能的構成を示すブロック図である。中継器120は、図2に示すように、EPR対生成ユニット121と、光子入力ユニット122と、光子-固体EIT間変換ユニットと、内部にメモリ125を備えた光子-固体EIT量子計算機124と、光子送信ユニット126とを主に備えている。

20

【0018】

EPR対生成ユニット121は、EPR対を生成するものであり、光子対を発生するデバイスを用いることができる。ここで、EPR対とは、もつれあった光子対である。2つの光子のもつれ合いの度合いが最も大きいのは2光子がベル状態の場合である。ベル状態とは、次の(1)~(4)式で表される4つの状態である。なお、ベル状態を基底として2光子に対して行う観測をベル合同測定という。

【0019】

【数1】

$$|\phi^+\rangle = (|0\rangle|0\rangle + |1\rangle|1\rangle) / \sqrt{2} \quad \dots (1)$$

30

$$|\phi^-\rangle = (|0\rangle|0\rangle - |1\rangle|1\rangle) / \sqrt{2} \quad \dots (2)$$

$$|\psi^+\rangle = (|0\rangle|1\rangle + |1\rangle|0\rangle) / \sqrt{2} \quad \dots (3)$$

$$|\psi^-\rangle = (|0\rangle|1\rangle - |1\rangle|0\rangle) / \sqrt{2} \quad \dots (4)$$

40

【0020】

ここで、 $|0\rangle$  は光子の偏光が0度の状態であり、 $|1\rangle$  は光子の偏光が90度の状態である。また、 $(1/\sqrt{2})(|0\rangle + |1\rangle)$  は光子の偏光が45度の状態であり、 $(1/\sqrt{2})(|0\rangle - |1\rangle)$  は光子の偏光が135度の状態である。

【0021】

光子対を発生するデバイスの詳細については、技術文献「R.M. Stevenson, R.J. Young, P. Atkinson, K. Cooper, D.A. Ritchie, and A.J. Shields. A semiconductor source of triggered entangled photon pairs. Nature, Vol. 439, pp. 179 - 182, 2006.」に記載されている。

【0022】

50

光子送信ユニット126は、生成されたEPR対の一方の光子を隣接するノードの量子情報中継装置100に送信するものである。

【0023】

光子入力ユニット122は、EPR対の一方の光子を隣接するノードの量子情報中継装置100から受信するものである。

【0024】

光子-固体EIT間変換ユニット123は、受信した光子の量子状態および生成したEPR対の光子の量子状態を、原子核スピンの量子状態、具体的には、酸化物結晶( $Y_2SiO_5$ )中に分散させた希土類イオン( $Pr^{3+}$ )の核スピンの量子状態に置き換えて、光子-固体EIT量子計算機124に出力するものである。

10

【0025】

光子-固体EIT量子計算機124は、原子核スピンの量子状態で置換された光子の量子状態に対して、固体EIT(Electromagnetically induced transparency: 電磁波誘起透明化)現象を使用して、量子計算を行う計算機である。ここで、固体EIT現象とは、3つのエネルギー準位に2つの光を作用させることで誘起される現象である。作用させる光の片方、あるいは両方に対し、もともと不透明であるはずの物質が、透明になり、その際、3つのエネルギー準位のうち2つが量子力学的な重ね合わせの状態になる現象である。光子-固体EIT量子計算機の詳細については、技術文献「K. Ichimura. A simple frequency-domain quantum computer with ions in a crystal coupled to a cavity mode. Optics communications, 196, pp. 119-125, 2001.」および「H. Goto and K. Ichimura. Multiqubit controlled unitary gate by adiabatic passage with an optical cavity. Phys. Rev. A, Vol. 70, p. 012305, 2004.」に記載されている。

20

【0026】

本実施の形態では、光子-固体EIT量子計算機124は、エンタングルメント交換処理やエンタングルメント純粋化プロトコル処理を行っている。図3は、光子-固体EIT量子計算機124の機能的構成を示すブロック図である。

【0027】

光子-固体EIT量子計算機124は、図3に示すように、制御部301と、エンタングルメント交換実行部302(以下、「ES実行部302」という)と、エンタングルメント純粋化プロトコル実行部303(以下、「EPP実行部303」という)とを主に備えている。

30

【0028】

ES実行部302は、隣接するノードの量子情報中継装置との間で、EPR対を共有するエンタングルメント交換処理(以下、「ES処理」という)を実行するものである。ES処理は、複数のEPR対について、対のパートナーの光子(粒子)を交換する処理である。

【0029】

EPP実行部303は、エンタングルメント交換処理によって共有したEPR対の共有先のノードの前記量子情報中継装置との間で、EPR対の忠実度を回復するためのエンタングルメント純粋化プロトコル処理(以下、「EPP処理」)を実行するものである。EPP処理は、忠実度の低い複数のEPR対から忠実度の高いEPR対を生成するプロトコルである。ES処理とEPP処理は、量子情報中継の処理で実行される。

40

【0030】

ここで、エンタングルメント純粋化プロトコルには種々のバリエーションがあり、詳細については、技術文献「C.H. Bennett et.al. Purification of noisy entanglement and faithful teleportation via noisy entanglement. Phys. Rev. Lett., Vol. 76, No. 5, pp. 722, 1996.」、「R. Matsumoto. Conversion of a general quantum stabilizer code to an entanglement distillation protocol. quant-ph/0209091, 2002.」、「P.W. Shor and J. Preskill. Simple proof of security of the bb84 quantum key distribution protocol. e-print, quant-ph/0003004, 2000.」に記載されている。

50

## 【 0 0 3 1 】

制御部 3 0 1 は、送信者から受信者までの経路が決定された後に、送信者から受信者までの経路中の自己のノードの位置により、自己の量子情報中継装置 1 0 0 の役割を決定するものである。具体的な役割については後述する。

## 【 0 0 3 2 】

ここで、一般化量子中継プロトコルについて説明する。一般化量子中継プロトコルは、量子状態配送ステップと E P R 対の長さの伸長ステップからなっている。量子状態配送ステップは、もつれ合った光子対を短距離で共有するステップである。E P R 対の長さの伸長ステップは、長さの短い粒子対の長さを伸長するステップであって、量子状態の通信路による伝送は行わずに、古典情報の通信路による伝送のみを行うものである。

10

本実施の形態では、さらに、一般化量子中継を構成する量子状態配送ステップ及び E P R 対の長さの伸長ステップの中で、E P R 対の長さの伸長ステップを複数の段階に分けたときに、最終段階において使用される古典通信路がそれ以前の段階において使用される古典通信路のうちのいずれか 1 つ以上と異なるように経路選択を行っている。かかる経路選択については、後述する E P P 処理および E S 処理において詳細に説明する。

## 【 0 0 3 3 】

また、E S 処理および E P P 処理を利用した量子情報中継の処理について説明する。L を 1 回の E S 処理で同時に連結する光子対の個数とする。このとき、 $N = L^n$  とする。送信者 A と受信者 B とを結ぶ光ファイバーには、 $N - 1$  個の量子情報中継装置  $C_1$ 、 $C_2$ 、 $\dots$ 、 $C_{N-1}$  が接続されているものとする。かかる量子情報中継装置 1 0 0 には、光子を保存しておくための量子メモリ 1 2 5 と、1 キュービット演算量子回路と 2 キュービット演算量子回路が設置されているものとする。

20

## 【 0 0 3 4 】

まず、隣接するノードの量子情報中継装置 1 0 0 間で E P R 対を共有する。具体的には、各量子情報中継装置 1 0 0 で E P R 対を生成し、E P R 対の一方の光子を隣接するノードの 2 つの量子情報中継装置 1 0 0 の中で受信者 B の方向にある量子情報中継装置 1 0 0 に対して送信する。

## 【 0 0 3 5 】

そして、第 1 段階の E S 処理として、L 個の E P R 対を以下のように連結する。

## 【 0 0 3 6 】

量子情報中継装置  $C_L$ 、 $C_{2L}$ 、 $\dots$ 、 $C_{N-L}$  を除く全ての量子情報中継装置 1 0 0 で E S 処理を行い、E P R 対を連結する。その結果、長さ L のペアが  $N / L$  個生成され、 $A \& C_L$ 、 $C_L \& C_{2L}$ 、 $\dots$  間で共有される。

30

## 【 0 0 3 7 】

この E S 処理の操作により E P R 対の忠実度が低下するが、この値が E P P 処理によって回復可能な忠実度の下限よりも大きければ E P P 処理を実行することにより忠実度を回復させることができる。このため、第 1 段階の E P P 処理を行って、忠実度を回復する。

## 【 0 0 3 8 】

次に、第 2 段階の E S 処理として、生成された長さ L 倍の E P R 対をさらに L 個連結する。

40

## 【 0 0 3 9 】

$C_{kL}$  ( $k = 1, 2, \dots$ ) を満たす量子情報中継装置 1 0 0 であって、量子情報中継装置  $C_{L^2}$ 、 $C_{2L^2}$ 、 $\dots$ 、 $C_{N-L^2}$  を除く全ての量子情報中継装置 1 0 0 で E S 処理によって、E P R 対を連結する。その結果、長さ  $L^2$  の E P R 対が  $N / L^2$  個生成され、 $A \& C_{L^2}$ 、 $C_{L^2} \& C_{2L^2}$ 、 $\dots$  間で共有される。次いで、第 2 段階の E P P 処理を実行して E P R 対の忠実度を回復する。

## 【 0 0 4 0 】

このようにして、E S 処理と E P P 処理を交互に n 段階繰り返すことによって、送信ノード A と受信ノード B 間で忠実度の高い E P R 対が共有される。このため、距離が増加しても共有される E P R 対の忠実度を一定に保つことができる。図 4 は、 $N = 4$  の場合にお

50

けるES処理およびEPP処理によるEPR対の状態を示している。ここで、図4および以降に示す図5～9の各図において、実線で結線されている2つの光子は、互いにもつれあっていることを示している。

#### 【0041】

ここで、ES処理について詳述する。図5は、ES処理を説明するための模式図である。図5に示すように、例えば、光子1と光子2からなるEPR対及び光子3と光子4からなるEPR対にES処理を施すことによって、光子1と光子4からなるEPR対及び光子2と光子3からなるEPR対に変換される。ここで、送信者Aと受信者Bとの間に2つの量子情報中継装置C1、C2が存在する場合を考えると、A-C1間で共有されているEPR対とC1-B間で共有されているEPR対とを結び付けるES処理は以下のように実行される。

10

#### 【0042】

まず、AとC1で共有されているもつれ合った光子対のうちC1にある光子、及びC1とBで共有されているEPR対のうちC1にある光子に対してベル合同測定を行う。次に、ベル合同測定の結果を、光子送信ユニット126を介して古典通信を用いてA及びBに送信する。そして、A及びBで測定結果に対応する演算を施す。

#### 【0043】

次に、EPP処理の詳細について説明する。例えば、送信者Aと受信者Bとの間で共有されているEPR対に対してEPP処理を行う場合を考える。図6は、EPP処理を説明するための模式図である。ここで、図6に示すように、送信者Aと受信者Bとの間で2対のEPR対が共有されているとする。

20

#### 【0044】

A、Bともに、自己の2光子にランダムバイラテラル変換を施す。そして、A、B間で共有されている2対のEPR対に関して、Aにある2つの粒子に制御NOT(CNOT)を施すとともに、Bにおいても2つの粒子にも制御NOT(CNOT)を施す。そして、A及びBでの制御NOT(CNOT)の標的となったキュービットを観測し、Aでの観測結果を古典通信経路によってBに送信する。そして、BはAの観測結果と自己の観測結果とを比較しこれに対応した操作を施す。これによってEPP処理が実行され、EPR対の忠実度が回復することになる。

#### 【0045】

本実施の形態では、上述したES処理およびEPP処理を実行している。図7～9は、実施の形態1にかかる量子情報中継装置100において、EPR対生成からEPP処理までの光子の状態を示す説明図である。図7は、EPR対生成からEPR対の一方の光子を隣接する量子情報中継装置100に送信する前までの光子の状態を示し、図8は、光子が送信されることによって、EPR対が2つの量子情報中継装置100で共有された状態を示している。また、図9は、共有されたEPR対に対してES処理を実行した状態を示している。図7～9に示すように、共有されたEPR対の2つ光子は、光子-固体EIT量子計算機124のメモリ125に保持され、光子-固体EIT量子計算機124によって(E S実行部302、EPP実行部303)、ES処理、EPP処理が実行される。

30

#### 【0046】

実施の形態1では、さらに、EPP実行部303は、最後に実行されたES処理で使用した古典通信、最後に実行されたES処理以前のEPP処理で使用した古典通信路のうちいずれか1つ以上と異なる古典通信路を選択して最後のEPP処理を実行している。また、ES実行部302は、前段階で実行したES処理で使用し、かつ前段階で実行したEPP処理で使用した古典通信路のうちいずれか1つ以上と異なる古典通信路を選択して最後のES処理を実行している。

40

#### 【0047】

また、ES実行部302では、以前に実行されたES処理で使用された古典経路、および以前に実行されたEPP処理で使用された古典通信路のうちのいずれかと異なる古典通信路を選択してES交換処理を実行する。

50

## 【 0 0 4 8 】

制御部 3 0 1 は、このような E S 処理、E P P 処理における古典通信路の選択のため、経路中の自ノードの位置からどの古典通信路を選択して E S 処理、E S S 処理を実行すべきかの役割を決定している。

## 【 0 0 4 9 】

具体的には、隣接する送信ノード側の量子情報中継装置 1 0 0 と共有する E P R 対に対して第 1 段階の E S 処理を実行し、E S 処理を実行したノードの送信ノード側の隣接ノードと受信ノード側の量子情報中継装置 1 0 0 で第 1 段階の E P P 処理を行う。その後、E P P 処理を実行した受信ノード側の量子情報中継装置 1 0 0 において第 2 段階の E S 処理を行い、さらに、第 1 段階の E P P 処理を行ったノードで第 2 段階の E P P 処理を行う際、第 1 段階の E S 処理および E P P 処理と第 2 段階の E S 処理で使用した古典通信路とは異なる古典通信路の量子情報中継装置 1 0 0 との間で E P P 処理を行う。

10

## 【 0 0 5 0 】

次に、このように構成された実施の形態 1 にかかる量子情報通信システム、複数の量子情報中継装置 1 0 0 による量子情報通信処理について説明する。図 1 0 は、量子情報中継装置 A、B、C、D、E、F、X、Y が接続され、量子通信路と古典通信路とが一部で一致しないネットワーク構成の一例を示す模式図である。図 1 0 において、実線が量子情報通信路を示し、点線が古典通信路を示している。図 1 0 に示すように、量子情報中継装置 A - X、X - F、F - D、F - Y、Y - E、F - C 間では、量子通信路と古典通信路とが一致しているが、A - E、A - B、B - C、E - D、C - D 間では古典通信路のみ存在している。

20

## 【 0 0 5 1 】

ここで、本実施の形態の量子情報通信処理を、量子情報を送信ノードの量子情報中継装置 A から受信ノードの量子情報中継装置 E に送信する場合について説明する。

## 【 0 0 5 2 】

図 1 1 は、実施の形態 1 の各量子情報中継装置 1 0 0 における量子情報通信処理の手順を示すフローチャートである。

## 【 0 0 5 3 】

まず、量子情報中継装置 A、X、F、Y において E P R 対を生成する（ステップ S 1 ~ S 5）。次に、量子情報中継装置 A、X、F、Y で生成した E P R 対の一方の光子を、隣接する量子情報中継装置に送信する（ステップ S 6 ~ S 9）。これにより、A - X 間、X - F 間、F - Y 間、Y - E 間で E P R 対がそれぞれ共有されることになる。

30

## 【 0 0 5 4 】

そして、量子情報中継装置 X、Y において、第 1 段階の E S 処理を実行する（ステップ S 1 0、S 1 1）。これによって、A - F 間および F - E 間で E P R 対が共有される。

## 【 0 0 5 5 】

次に、量子情報中継装置 A、F において、第 1 段階の E P P 処理を A - F 間で実行し、量子情報中継装置 F、E において、第 1 段階の E P P 処理を F - E 間で実行する（ステップ S 1 2 ~ S 1 4）。これにより A - F 間および F - E 間で、E P R 対の忠実度が回復される。

40

## 【 0 0 5 6 】

次に、量子情報中継装置 F において、第 2 段階の E S 処理を実行する（ステップ S 1 5）。これによって、量子情報中継装置 A - E 間で E P R 対が共有される。

## 【 0 0 5 7 】

ここで、使用される古典通信路の経路については次のようになる。図 1 0 および図 1 1 に示すように、第 1 段階の E S 処理では、経路 A - X - F 及び経路 F - Y - E を古典通信路として使用している。第 1 段階の E P P 処理でも経路 A - X - F と経路 F - Y - E を使用している。また、第 2 段階の E S 処理では、経路 A - X - F 及び経路 F - Y - E を使用している。

## 【 0 0 5 8 】

50

次に、量子情報中継装置 A , E において、第 2 段階の E P P 処理を A - E 間で実行する (ステップ S 1 6 , S 1 7 )。これによって、A - E 間で E P R 対の忠実度が回復される。すなわち、第 2 段階の E P P 処理では、第 1 段階の E S 処理及び E P P 処理で使用される古典通信路および第 2 段階の E S 処理で使用する古典通信路とは、異なる古典通信路 A - E を使用している。これにより、A から E まで通信する際には、量子情報中継装置 F を経由せずに、短距離の A - E 間の古典通信路で直接通信することができ、かつ E P R 対の忠実度の減衰も防止されることになる。

【 0 0 5 9 】

なお、量子通信路と古典通信路とが一致するネットワークと、一致しないネットワークが結合したネットワークにおいても、量子通信路と古典通信路とが一致しないネットワークにおいては上述した量子情報通信処理を適用することができる。図 1 2 は、量子通信路と古典通信路とが一致するネットワークと、一致しないネットワークが結合したネットワークの一例を示す説明図である。図 1 2 の例では、量子情報中継装置 E - K 間では、量子通信路と古典通信路とが一致するネットワークとなっているが、量子情報中継装置 A - E 間では、量子通信路と古典通信路とが一致しないネットワークとして構成されている。

【 0 0 6 0 】

このような図 1 2 のネットワークにおいて、量子情報中継装置 A と K との間で量子情報通信を行う場合には、A から E までの経路は、図 1 0 に示した例と同様の処理で、量子情報中継装置 F を介さずに短距離の古典通信路 A - E を経路として行われ、かつ E P R 対の忠実度の減衰も防止されることになる。

【 0 0 6 1 】

このように実施の形態 1 にかかる量子情報通信システムでは、E S 処理で使用し、かつ前段階で実行した E P P 処理で使用した古典通信路と異なる古典通信路を選択して、選択された古典通信路の量子情報中継装置 1 0 0 と E P P 処理を実行しているので、量子情報中継を使用した量子情報通信において、受信者に対して古典通信路がより短距離で、かつ量子状態の忠実度を維持しつつ、安全性を確保することができる。

【 0 0 6 2 】

(実施の形態 2 )

実施の形態 2 にかかる量子情報通信システムは、経路決定を行うネットワーク管理装置を備え、ネットワーク管理装置で決定された経路で短距離に量子情報通信を行うものである。

【 0 0 6 3 】

図 1 3 は、実施の形態 2 にかかる量子情報通信システムのネットワーク構成を示すブロック図である。図 1 3 に示すように、実施の形態 2 にかかる量子情報通信システムは、複数の量子情報中継装置 1 0 0 とネットワーク管理装置が光ファiber 1 4 0 で接続された構成となっている。

【 0 0 6 4 】

実施の形態 2 にかかる量子情報中継装置 1 0 0 の機能的構成は、実施の形態 1 と同様である。実施の形態 2 にかかる量子情報中継装置 1 0 0 では、送信ノードとなる場合に、受信ノードまでの経路決定の要求、すなわち送信ノードの I P アドレス、受信ノードの I P アドレスを含む要求メッセージをネットワーク管理装置 1 3 0 に送信し、ネットワーク管理装置 1 3 0 によって決定された経路 (量子情報通信の経路と古典通信の経路) を受信する通信部を制御用古典計算機 1 1 0 に備えている。

【 0 0 6 5 】

図 1 4 は、ネットワーク管理装置 1 3 0 の機能的構成を示すブロック図である。本実施の形態にかかるネットワーク管理装置 1 3 0 は、図 1 4 に示すように、通信部 1 3 1 と、経路決定部 1 3 2 と、ハードディスクドライブ装置やメモリ等の記憶媒体に格納された経路テーブル 1 3 3 とを主に備えている。

【 0 0 6 6 】

通信部 1 3 1 は、量子情報中継装置 1 0 0 から上記経路決定の要求メッセージを受信し

10

20

30

40

50

、決定された経路（量子情報通信の経路と古典通信の経路）を含むメッセージを決定された経路中に存在する全てのノードの量子情報中継装置 100 に送信するものである。なお、決定された経路を含むメッセージを受信した各ノードの量子情報中継装置 100 では、経路中における自装置の位置により、自装置の果たす役割を決定する。すなわち、制御部 301 は、実施の形態 1 と同様に、ES 処理、EPP 処理における古典通信路の選択のため、経路中の自ノードの位置からどの古典通信路を選択して ES 処理、ESS 処理を実行すべきかの役割を決定している。

#### 【0067】

経路決定部 132 は、経路テーブル 133 を参照して、経路決定要求に含まれる送信ノードおよび受信ノードの各 IP アドレスから量子情報通信の経路と古典通信の経路とを決定するものである。ここで、図 15 は、送信ノードおよび受信ノードの IP アドレスのデータ形式の一例を示すデータ構造図である。図 15 に示すように、IP アドレスは複数のセグメントから構成されている。

10

#### 【0068】

このセグメントは、ネットワーク内の集合の階層を示すものである。例えば、IP アドレスの  $n$  個のセグメントのうち、最初の  $m_1$  個を第 1 階層の指定に用い、次の  $m_2$  個を第 2 階層の決定に用いる。同様にして第  $i$  階層の決定には  $m_1 + \dots + m_{(i-1)} + 1$  個目のセグメントから  $m_1 + \dots + m_i$  個目のセグメントまでを用いるように構成することができる。

#### 【0069】

20

図 16 は、IP アドレスが 4 個のセグメントから構成される場合の例を示す模式図である。図 16 の例では、上位のセグメントから順に、大陸、国、組織、個人の各階層で使用されるように構成され、図 16 の下部のような使用例が考えられる。

#### 【0070】

図 14 に戻り、経路テーブル 133 は、ネットワーク内の各ノード間の最短経路を保持するテーブルである。経路テーブル 133 は、古典通信路の経路テーブルと量子情報通信路の経路テーブルが別個に設けられている。図 17 は、経路テーブル 133 の例を示す説明図である。図 17 では、第 1 階層（大陸）と第 2 階層（国）の古典通信路における各経路の例を示している。

#### 【0071】

30

経路決定部 132 による経路決定は、かかる経路テーブル 133 を参照し、階層毎に行われる。例えば、図 17 の経路テーブル 133 の例の場合には、まず、経路決定要求に含まれる送信者のノードの IP アドレスおよび受信者のノードの IP アドレスを取得して、大陸アドレス 001 と 002 を比較し、第 1 階層でのルートを決する。そして、送信者の IP アドレスの国アドレスを用いて、送信者側の第 2 階層での経路を決する。また、受信者の IP アドレスの国アドレスを用いて受信者側の第 2 階層での経路を決する。

#### 【0072】

次に、送信者の IP アドレスの組織アドレスを用いて、送信者側での第 3 階層での経路を決する。また、受信者の IP アドレスの組織アドレスを用いて受信者側の第 3 階層での経路を決する。

40

#### 【0073】

そして、送信者の IP アドレスの個人アドレスを用いて、送信者側での第 4 階層での経路を決する。また、受信者の IP アドレスの個人アドレスを用いて受信者側の第 4 階層での経路を決する。このように、階層ごとに経路を決し、最終的に各階層の経路を結合して送信者のノードから受信者のノードまでの経路を決する。各階層における経路の決定に当たってはアドレスまたはアドレス対と経路とが対応した経路テーブルによって行われる。このような経路決定は、量子情報通信と古典情報通信のそれぞれに対して別個に設けられた経路テーブルを参照して行われる。

#### 【0074】

選択された経路の途中にある量子情報中継装置 100 では、ネットワーク管理装置 13

50

0 から受信した経路に従って各ノードの役割を決定し、実施の形態 1 と同様の E S 処理、E P P 処理を、それぞれ E S 実行部 3 0 2、E P P 実行部で実行するようになっている。具体的には、図 1 1 において、送信ノードである量子情報中継装置 A は、上記経路決定をネットワーク管理装置 1 3 0 に送信し、その応答（決定された経路）を受信して、ステップ S 1 ~ S 5 で E P R 対を生成する。そして、受信した経路に従って隣接ノードに光子を送信し（ステップ S 6）、各 E S 処理、E P P 処理が実行されることになる。量子情報中継装置 1 0 0 の E S 処理、E P P 処理等のこの他の機能については、実施の形態 1 と同様に行われる。

【 0 0 7 5 】

図 1 8 は、実施の形態 2 にかかる量子情報通信システムにおいて、送信ノード A から受信ノード B へネットワーク管理装置 1 3 0 の経路決定に従って量子情報通信処理を行った場合の経路の一例を示す模式図である。図 1 8 において、太実線が量子情報通信路で A から B への送信に使用された経路を示し、太点線が古典通信路で A から B への送信に使用された経路を示している。

【 0 0 7 6 】

このように実施の形態 2 にかかる量子情報通信システムでは、ネットワーク管理装置 1 3 0 の決定した経路に従って、E S 処理で使用し、かつ前段階で実行した E P P 処理で使用した古典通信路と異なる古典通信路を選択して、選択された古典通信路の量子情報中継装置 1 0 0 と E P P 処理を実行しているの、受信者に対して古典通信路がより短距離で、かつ量子状態の忠実度を維持しつつ、安全性を確保することができる。

【 0 0 7 7 】

本実施の形態では、送信ノードから受信ノードまでの経路の決定をネットワーク管理装置 1 3 0 で行っているが、これに限定されるものではない。例えば、図 1 9 に示すように、送信ノードとなる量子情報中継装置 1 0 0 の古典計算機 1 8 1 0 内に、上記と同様の経路決定部 1 3 2 と経路テーブル 1 3 3 を備え、送信ノード自身が、経路決定部 1 3 2 によって経路テーブルを参照して受信ノードまでの経路決定を行うように構成することもできる。

【 0 0 7 8 】

なお、本実施形態の量子情報中継装置 1 0 0 で実行される量子情報中継プログラムは、ROM 等に予め組み込まれて提供される。

【 0 0 7 9 】

本実施形態の量子情報中継装置 1 0 0 で実行される量子情報中継プログラムは、インストール可能な形式又は実行可能な形式のファイルで CD - ROM、フレキシブルディスク ( F D )、CD - R、DVD ( D i g i t a l V e r s a t i l e D i s k ) 等のコンピュータで読み取り可能な記録媒体に記録して提供するように構成してもよい。

【 0 0 8 0 】

さらに、本実施形態の量子情報中継装置 1 0 0 で実行される量子情報中継プログラムを、インターネット等のネットワークに接続されたコンピュータ上に格納し、ネットワーク経由でダウンロードさせることにより提供するように構成しても良い。また、本実施形態の量子情報中継装置 1 0 0 で実行される量子情報中継プログラムをインターネット等のネットワーク経由で提供または配布するように構成しても良い。

【 0 0 8 1 】

本実施形態の量子情報中継装置 1 0 0 で実行される量子情報中継プログラムは、上述した各部 ( E S 実行部、E P P 実行部、制御部 ) を含むモジュール構成となっており、実際のハードウェアとしては CPU ( プロセッサ ) が上記 ROM から量子情報中継プログラムを読み出して実行することにより上記各部が主記憶装置上にロードされ、E S 実行部、E P P 実行部、制御部が主記憶装置上に生成されるようになっている。

【 0 0 8 2 】

なお、本発明は、上記実施の形態そのままに限定されるものではなく、実施段階ではその要旨を逸脱しない範囲で構成要素を変形して具体化することができる。また、上記実施

10

20

30

40

50

の形態に開示されている複数の構成要素の適宜な組み合わせにより、種々の発明を形成することができる。例えば、実施の形態に示される全構成要素からいくつかの構成要素を削除してもよい。さらに、異なる実施の形態にわたる構成要素を適宜組み合わせても良い。

【図面の簡単な説明】

【0083】

【図1】実施の形態1にかかる量子情報通信システムのネットワーク構成を示すブロック図である。

【図2】実施の形態1にかかる中継器の機能的構成を示すブロック図である。

【図3】光子-固体EIT量子計算機の機能的構成を示すブロック図である。

【図4】ES処理およびEPP処理によるEPR対の状態の例を示す模式図である。

10

【図5】ES処理を説明するための模式図である。

【図6】EPP処理を説明するための模式図である。

【図7】EPR対生成からEPP処理までの光子の状態を示す説明図である。

【図8】EPR対生成からEPP処理までの光子の状態を示す説明図である。

【図9】EPR対生成からEPP処理までの光子の状態を示す説明図である。

【図10】量子通信路と古典通信路とが一部で一致しないネットワーク構成の一例を示す模式図である。

【図11】量子情報通信処理の手順を示すフローチャートである。

【図12】量子通信路と古典通信路とが一致するネットワークと、一致しないネットワークが結合したネットワークの一例を示す説明図である。

20

【図13】実施の形態2にかかる量子情報通信システムのネットワーク構成を示すブロック図である。

【図14】実施の形態2にかかるネットワーク管理装置の機能的構成を示すブロック図である。

【図15】IPアドレスのデータ形式の一例を示すデータ構造図である。

【図16】IPアドレスが4個のセグメントから構成される場合の例を示す模式図である。

【図17】経路テーブルの例を示す説明図である。

【図18】実施の形態2における経路決定に従って量子情報通信処理を行った場合の経路の一例を示す模式図である。

30

【図19】量子情報中継装置で経路決定を行う変形例の量子情報中継装置の機能的構成のブロック図である。

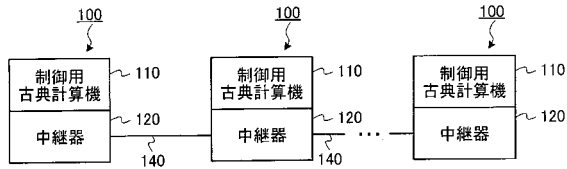
【符号の説明】

【0084】

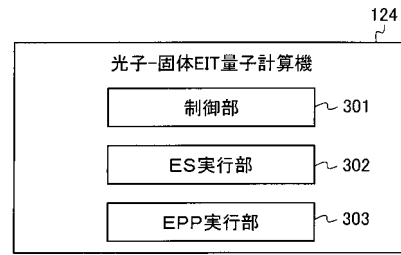
- 100 量子情報中継装置
- 110 制御用古典計算機
- 121 EPR対生成ユニット
- 122 光子入力ユニット
- 123 光子-固体EIT間変換ユニット
- 124 光子-固体EIT量子計算機
- 125 メモリ
- 126 光子送信ユニット
- 130 ネットワーク管理装置
- 132 経路決定部
- 133 経路テーブル
- 140 光ファイバー
- 301 制御部
- 302 ES実行部
- 303 EPP実行部

40

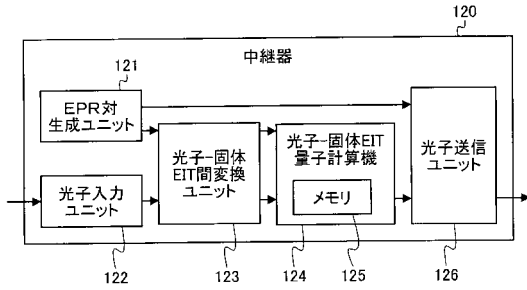
【図1】



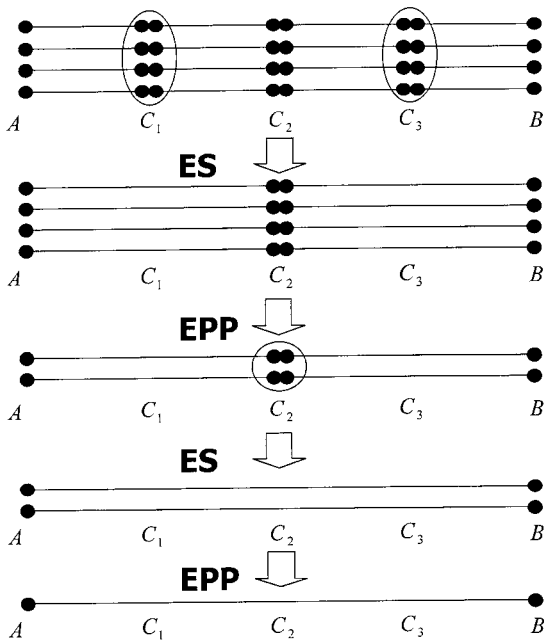
【図3】



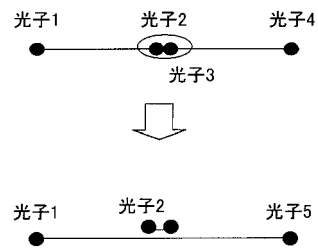
【図2】



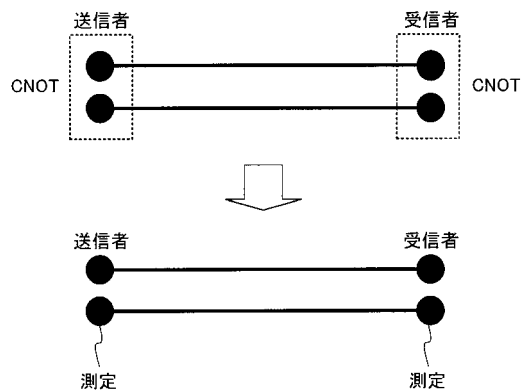
【図4】



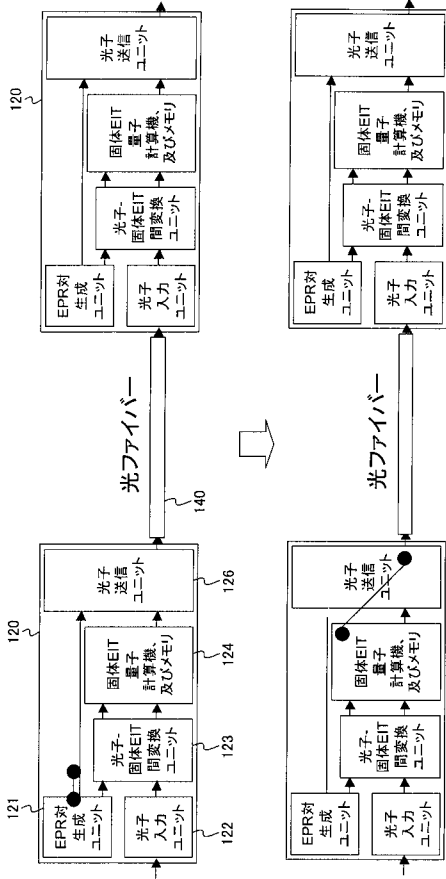
【図5】



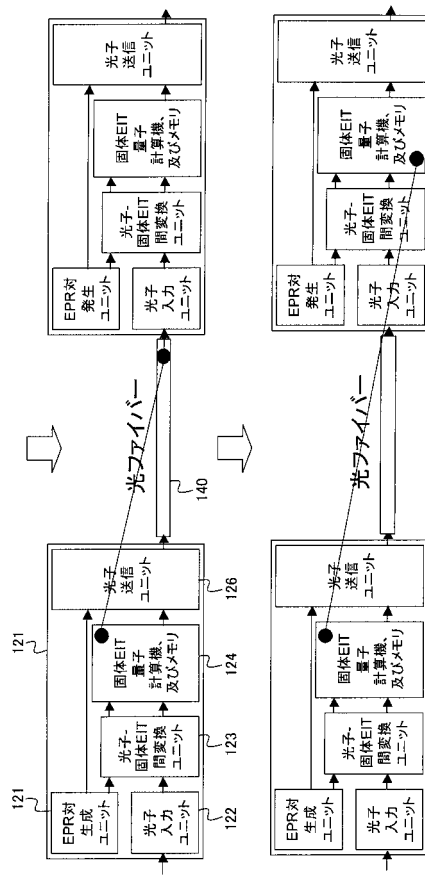
【図6】



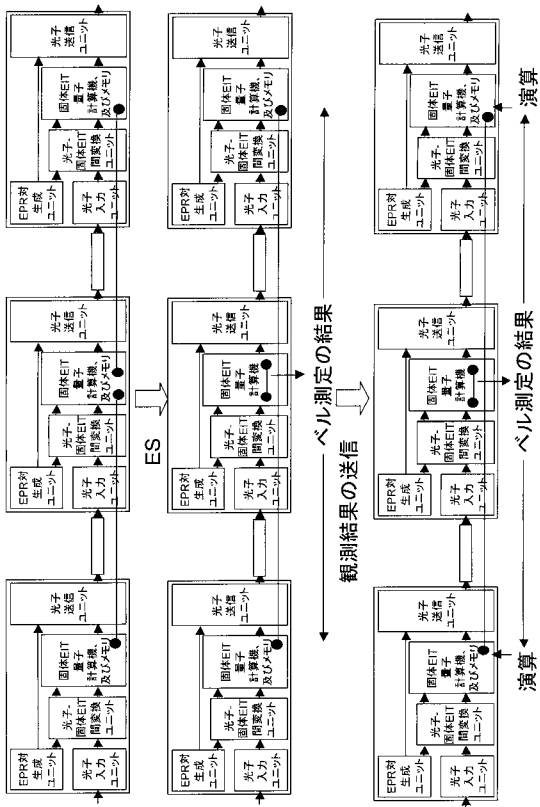
【 図 7 】



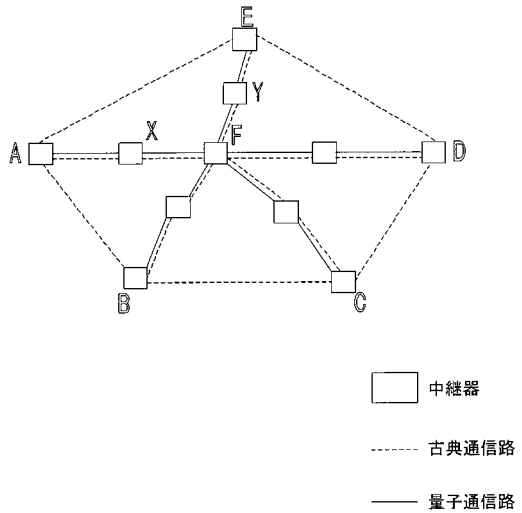
【 図 8 】



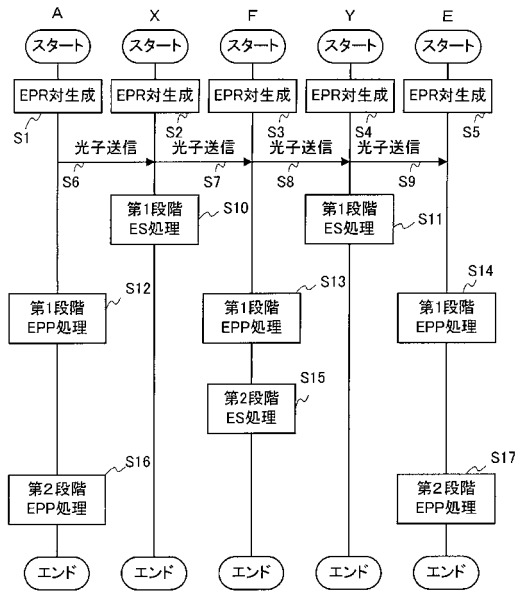
【 図 9 】



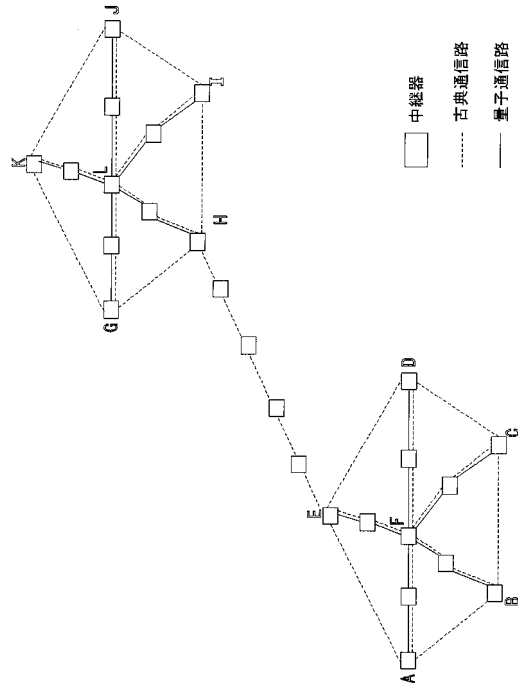
【 図 10 】



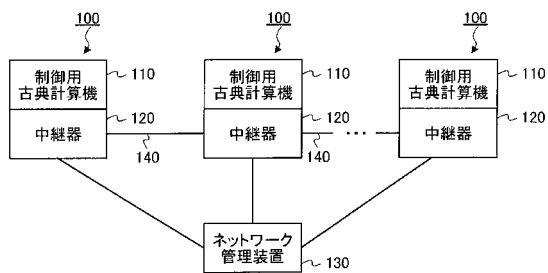
【図11】



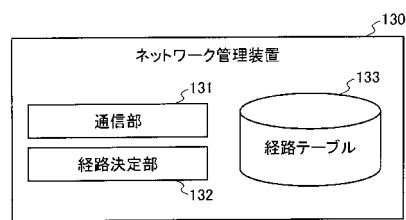
【図12】



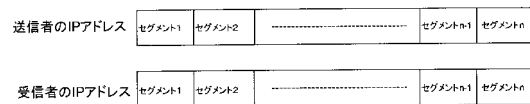
【図13】



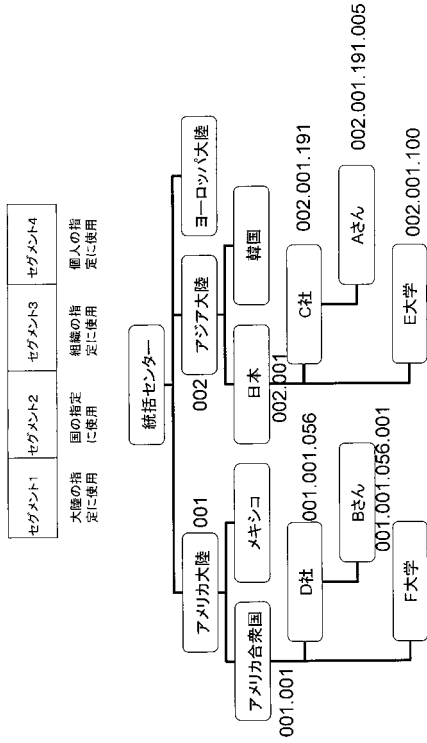
【図14】



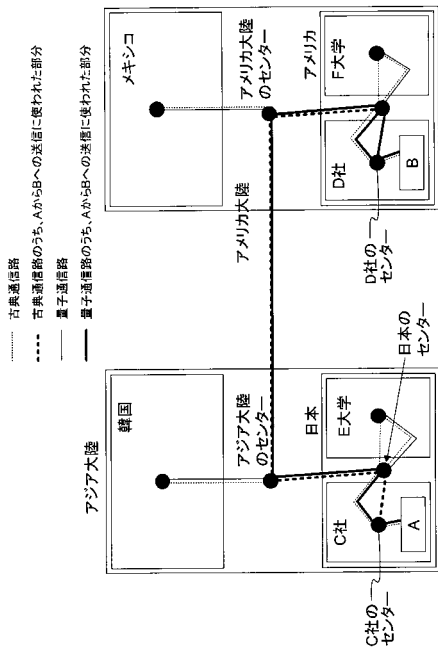
【図15】



【図16】



【図18】



【図17】

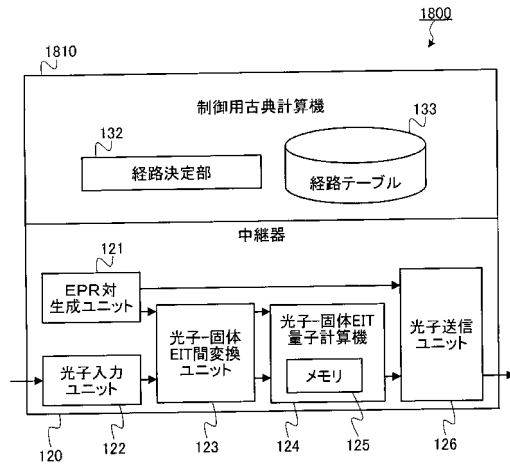
第一階層(大陸間ルート)のテーブル、古典通信路版

送信者アドレス	受信者アドレス	通信路
001	002	1
001	003	2
002	003	3

第二階層(国間ルート)のテーブル、アメリカ大陸版、古典通信路版

当事者アドレス	通信路
001	21
002	22
003	23

【図19】



## フロントページの続き

## (56)参考文献 特開2005-136721(JP, A)

H.-J. Briegel, W. Duer, J. I. Cirac, and P. Zoller, "Quantum Repeaters: The Role of Imperfect Local Operations in Quantum Communication", PHYSICAL REVIEW LETTERS, 1998年12月28日, Volume 81, Number 26(1), p.5932-5935

W. Duer, H.-J. Briegel, J. I. Cirac, and P. Zoller, "Quantum repeaters based on entanglement purification", PHYSICAL REVIEW A ATOMIC, MOLECULAR, AND OPTICAL PHYSICS, 1999年1月21日, Third Series, Volume 59, Number 1, p.169-181

Hans Aschauer and Hans J. Briegel, "Private Entanglement over Arbitrary Distances, Even Using Noisy Apparatus", PHYSICAL REVIEW LETTERS, 2002年1月28日, Volume 88, Number 4, p.047902.1-047902.4

M. Paternostro, W. Son, and M. S. Kim, "Complete Conditions for Entanglement Transfer", PHYSICAL REVIEW LETTERS, 2004年5月14日, Volume 92, Number 19, p.197901.1-197901.4

Demetrios Kalamidas, "Linear optical scheme for error-free entanglement distribution and a quantum repeater", PHYSICAL REVIEW A ATOMIC, MOLECULAR, AND OPTICAL PHYSICS, 2006年5月, Third Series, Volume 73, Number 5, p.054304.1-054304.3

小坂英男, "最近の展望 光子と電子スピンを用いた量子中継器・量子メモリーへ向けた取り組み", 応用物理, 日本, 社団法人応用物理学会, 2006年11月10日, 第75巻, 第11号, p.1335-1339

## (58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

H04L 9/12

H04B 10/04

H04B 10/06

H04B 10/142

H04B 10/152