慶應義塾大学学術情報リポジトリ
Keio Associated Repository of Academic resouces

Title	Design of large-scale quantum networks
Sub Title	
Author	Van Meter, Rodney
Publisher	
Publication year	2012
Jtitle	科学研究費補助金研究成果報告書 (2011.)
JaLC DOI	
Abstract	本研究では、多くの独立した量子リピータネットワークを接続して巨大な量子インターネットワークを構成する「Quantum Recursive Network Architecture」と言う量子ネットワークアーキテクチャを開発した。また、ネットワーク工学において重大な問題となる通信プロトコルとネットワーク資源の公平な割り当て手法、効率的な通信経路を選択するアルゴリズムのQRNA用のものを開発し、シミュレーションによって評価した。
Notes	研究種目：基盤研究(C) 研究期間：2009～2011 課題番号：21500020 研究分野：総合領域 科研費の分科・細目：情報学・情報学基礎
Genre	Research Paper
URL	https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=KAKEN_21500020seika

慶應義塾大学学術情報リポジトリ(KOARA)に掲載されているコンテンツの著作権は、それぞれの著作者、学会または出版社/発行者に帰属し、その権利は著作権法によって保護されています。引用にあたっては、著作権法を遵守してご利用ください。

The copyrights of content available on the KeiO Associated Repository of Academic resources (KOARA) belong to the respective authors, academic societies, or publishers/issuers, and these rights are protected by the Japanese Copyright Act. When quoting the content, please follow the Japanese copyright act.

様式Ｃ－１９

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成２４年5月３１日現在

機関番号：３２６１２
研究種目：基盤研究（C）
研究期間：2009～2011
課題番号：２１５００００２０
研究課題名（和文）Ｄｅｓｉｇｎ　ｏｆ　Ｌａｒｇｅ－Ｓｃａｌｅ　Ｑｕａｎｔｕｍ　Ｎｅｔｗｏｒｋｓ
研究課題名（英文）Ｄｅｓｉｇｎ　ｏｆ　Ｌａｒｇｅ－Ｓｃａｌｅ　Ｑｕａｎｔｕｍ　Ｎｅｔｗｏｒｋｓ
研究代表者
バンミーター　ロドニー（Van Meter Rodney）
慶應義塾大学・環境情報学部・准教授
研究者番号：９０４５８９７７

研究成果の概要（和文）：
本研究では、多くの独立した量子リピータネットワークを接続して巨大な量子インターネットワークを構成する「Quantum Recursive Network Architecture」と言う量子ネットワークアーキテクチャを開発した。また、ネットワーク工学において重大な問題となる通信プロトコルとネットワーク資源の公平な割り当て手法、効率的な通信経路を選択するアルゴリズムの QRNA 用のものを開発し、シミュレーションによって評価した。
研究成果の概要（英文）：
We developed an architecture we named *Quantum Recursive Network Architecture*, or QRNA, designed to work in large, complex quantum internetworks consisting of many smaller, independent quantum repeater networks. We proposed and evaluated via simulation network protocol designs, methods for fairly sharing network resources, and an algorithm for selecting an efficient path through the network, all of which are critical aspects of network engineering.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合　計
2009 年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2010 年度	800,000	240,000	1,040,000
2011 年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総　計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：総合領域
科研費の分科・細目：情報学・情報学基礎
キーワード：量子計算理論

１．研究開始当初の背景

ネットワークの重要な機能である経路選択と帯域制御に焦点をあてる。古典的なネットワークの分野において、現在までにもこのテーマは深く研究されてきているが、量子リピーターネットワークにおいては、この二つの機能はまだ開発されていない。
実際のネットワークのトポロジは複雑であり、通信資源の取り合いも発生する。実際のネットワークにおける通信は、ノードが一直線に接続された理想的なトポロジを持つネットワークにおける通信の挙動とは全く異なる。複雑なトポロジは、経路選択に動的経路制御プロトコル必要とする。古典的なネットワーク（インターネット）では Dijkstra アルゴリズム等を利用して最短経路選択をおこなっている。

２．研究の目的

量子ネットワークを実現するために、理想的な環境を想定した仮定と評価から、実世界の環境で運用することに目的とする。異なるネットワークリンクそれぞれが異なる品質、長さ、遅延などの特性を持ちながら、通信リクエストは独立なユーザーから非同期に発生するためので、ネットワーク資源の取り合いが発生する。この状況で発生しうる諸般のエラーやネットワークの環境変化に対して耐性のある手法、ネットワーク管理する手法などを開発した。

３．研究の方法

研究の方法として、我々は古典的なネットワークに経験は長いので、古典的なネットワーク概念を応用した。プロトコル有限状態機械、多重化、Dijkstra 経路選択アルゴリズムを使用して、量子リピーターネットワークをデザインした。

評価する方法として、二つの量子リピーターのシミュレーターを使用して、挙動の正当性を確認した。二つ目のシミュレーターは Sapphyre という名前をつけて、OmNet++古典的なネットワークシミュレーター上で開発した。実行中の様子は図 2 と図 1 に示す。

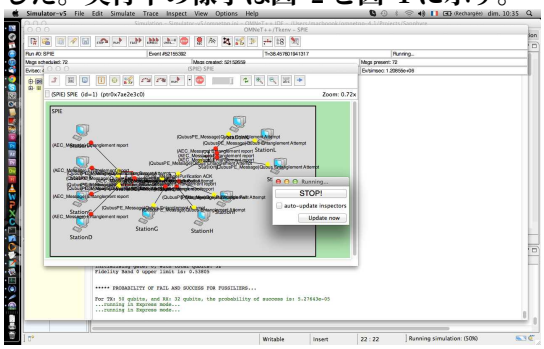

図 2 Sapphyre 量子リピーターネットワークシミュレーターの全体のスクリーンショット

４．研究成果

階層型のプロトコルアーキテクチャは図 3に示す。本研究では、最下層である物理層（Physical Entanglement）以上のレイヤーを全て検査した。巨大な量子ネットワークを実現するため、全体的なアーキテクチャが必要であり、図 9のような再帰的なアーキテクチャを開発した。このような工学的な問題をまとめて、*IEEE Network*で発表した。これにより、下記6点の結果を得た。

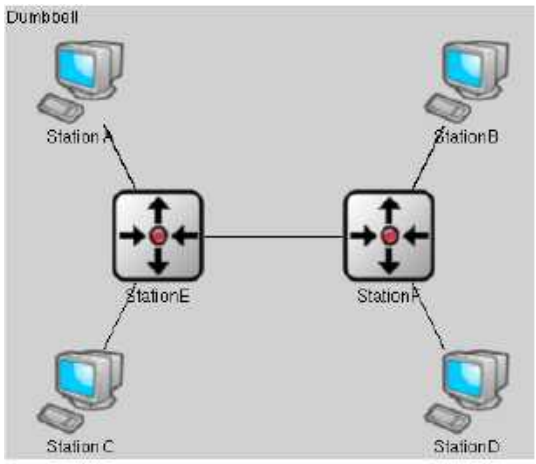

図 1 Sapphyre 量子リピーターネットワークシミュレーターのネットワークトポロジーの画面

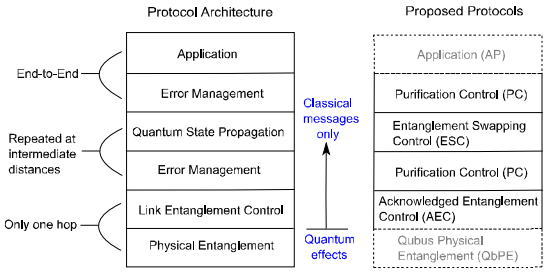

図 3 階層型のプロトコルスタック：概念（左）と提案した具体的な利用技術（右）

(1)量子リピーターのプロトコルを工学的にデザインした。Link Entanglement Control プロトコルは物理層のエンタングルメントが成功したかどうかの古典メッセージのフォーマットとセマンティックスの上で、お互いのノードが協力し、資源（とくに、量子メモリー）を制御する。プロトコルデザインの一つの重要な方法は有限状態機械を利用することである。例として、図 4にLink Entanglement Control層で提案しているAcknowledged Entanglement Control (AEC) プロトコルが示す。

Purification（エラー管理方法の一つ）と entanglement swapping（量子状態転送方法の一つ）のプロトコル有限状態機器を定義して、シミュレーションで挙動の正当性を確認した。結果はAINTEC学会で発表し、Best Student Paper賞を受賞した。

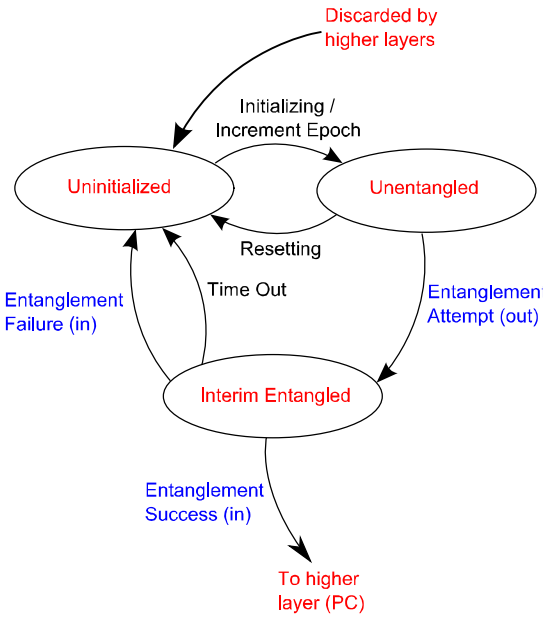

図 4 Entanglement Control Protocol 有限状態機械（送信側）青い字は転送するメッセージである。

(2)量子リピーターのエラー管理に関し、新しい方法を開発した。Austin Fowler(Melbourne大学)らと共同研究を行い、surface code quantum communication(SCQC) を開発し結果をPhysical Review Lettersで発表した。SCQCはsurface codeと呼ばれる量子誤り訂正符号を使い、量子通信のエラーを解決する。

(3)最上層のプロトコルレイヤーで分散アルゴリズムとエンタングルメント利用方法の研究行った。量子鍵交換の鍵をIPsec暗号で利用するソフトウェアのプロトタイプの開発を行なった。この技術をインターネットで使用可能とするための標準化を進めている。Internet Draftの標準提案を書いて、Internet Engineering Task Force (インターネットの標準化のグループ)に投稿した。IPsec/QKDのオープンソースソフトウエアと視覚化はグループのウエブページ掲載されている。

実際のネットワークの運用では、異なるリンクを利用し、複数のユーザーから非同期に通信リクエストが発生する。これに対応する技術も正当性を確認した。

(4)資源の動的割り当てでは、統計多重化や回路交換、その他の既存手法を応用可能である。我々は、統計多重化は少なくとも、特定の環境における資源の浪費を減らせることを明らかにした。ボトルネックリンク（つまり、帯域を制限するリンク）を共有している２つの管理されたコネクションが、１つのコネクションが資源を独占して通信を行なうよりも高いパフォーマンスを実現することを明らかとなった。

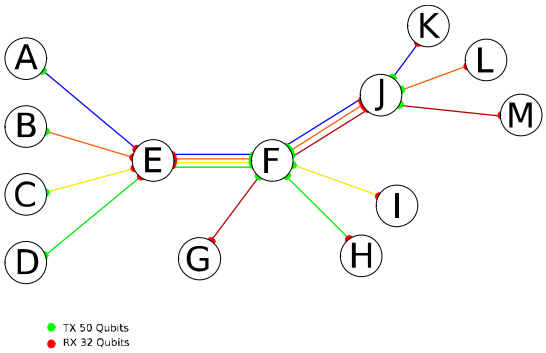

図 5 多重化の手法で探査したネットワークのトポロジーと通信のパターン

図 5で示してあるトポロジーでは、多重化の手法の効率とfairness（公平さ）を調査した。5つの通信（A-K, B-L, C-I, D-H, G-M）がの合計パフォマンスを調べた。Circuit switchingの方法は待機時間が長くなるので、他の多重化方法として、statistical multiplexing（古典的なインターネットの手法）、time division multiplexing (TDM,電話回線でよく使われている手法)、それからbuffer space multiplexing（リピーターノードで、有限なメモリーを割り当てて使う）の3手法について研究した。図 6に、Statistical multiplexingの複数の通信パターンの結果を示す。Statistical multiplexing は他の手法よりパフォーマンスが通信パターン次第で10%〜30%高かった。通信毎の帯域を比較すると、Jain氏のfairness measure

$$\mathcal{J}(x_1, x_2, \ldots, x_n) = \frac{(\sum_{i=1}^{n} x_i)^2}{n \sum_{i=1}^{n} x_i^2}$$

でほぼ完璧な0.99だった。また、実装しやすいので、本研究の結果としてこの手法を推したい。

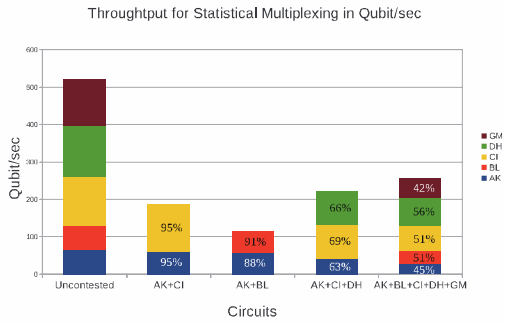

図 6 Statistical multiplexingにおける、実験通信パターンと達成された帯域

(5)「Quantum Dijkstra」というネットワーク経路選択のアルゴリズムを開発した。量子ダイクストラアルゴリズムは古典的なダイクストラのアルゴリズムを元に定義した。
経路選択では、リンクコストの定義及び複数のリンク経路コストの計算方法の二点が必須となる。リンクコストの定義および複数のリンク経路のコストの計算方法。ダイクストラアルゴリズムでは、経路のコストは

$$C_{\text{path}} = \sum_{i \in \{P\}} c_i$$

（c_i はリンク i のコストで、P は経路）だが、リンクコストの定義は問題になる。
シミュレーションによって、我々の提案する経路の帯域定義とリンク経路のコストとしてリンクコストの総和が利用可能であると証明した。このアルゴリズムは世界初の量子経路選択である。
量子リピーターのPurification Controlプロトコルのステートマシンをデザインした。Entanglement Swapping Controlプロトコルは経路選択と関係があり、量子ダイクストラの研究と同時に進めた。また、デバッグ、対外発表、解析、新手法の発見などのために、量子リピータシミュレーターの結果を動画で視覚化することを可能とした。

我々は、過去の研究において、Dijkstraアルゴリズムがpurificationとentanglement swappingをおこなう量子ネットワークで応用可能であることを示した。その中で、リンクコストは単位時間あたりにBellペアが作られる量であると定義し、経路コストはリンクコストの総計であるとした。また、"work"は観測操作の総数である。この結果、経路コストとwork（観測の数）の間に強い相関関係があることを示した。図 7で以前で開発したシミュレーターを利用し、一ホップのqubus型のリピーターをシミュレートした。4つのマークしてある□、○、△、×のタイプを選んで、いくつかの経路を調べた。結果は図 8であて、経路コスト、経路帯域、経路workの関係は強いと証明してある。

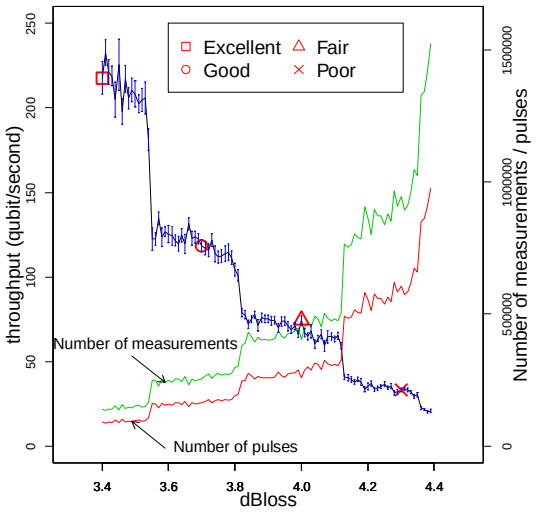

図 7 Qubus型のリピーターの一ホップのシミュレーション

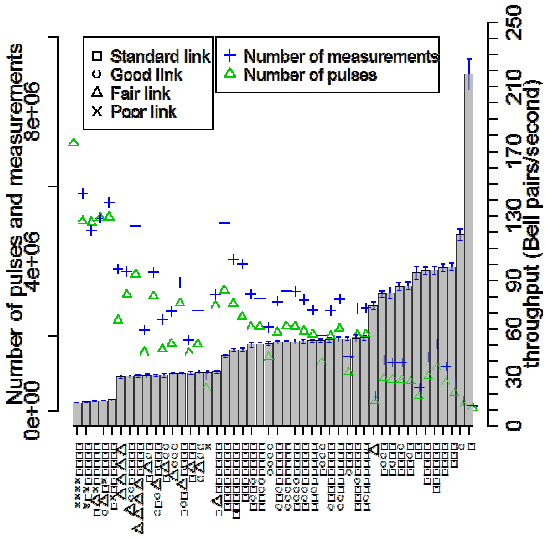

図 8 経路46種類の結果

これにより、数百ノードから構成されるネットワークで、効率的な経路選択が可能になった。その中で、古典的ネットワークにおけるOSPFのような分散経路制御プロトコルに利用するアルゴリズムの設計や実装をおこなう。また、数千ノード規模のネットワークへ応用できる程度のスケーラビリティを確保するため、ネットワークの階層化を図る。

最後に、以上の概念がネットワーク間で利用できるように、Quantum Recursive Network

Architecture (QRNA)のアーキテクチャを開発した。図 9 のように、複数の独立したネットワークが接続してあって、リクエストは左側の黄色いノードから発生して、任意のノード（この例ではピンクのノード）と繋いで分散量子状態を作りたい。
古典的なインターネットは2階層の経路制御システムを利用するが、量子リピーターネットワークは古典的インターネットより難しい。このような分散状況を作製したい場合、ネットワークの中心で発生させ、運ぶのが効率的である。しかし、惑星規模のネットワークの中心を突き止めるのは不可能なので、QRNAでは再帰型にネットワークをわける。また、一枚の層で必要な情報を減らす。
これによりリクエストの内容を、近いノード行きの通信では具体的に細かくし、遠いノード、ネットワークの中心などの通信では曖昧にする。目標付近に到達するととリクエストが分散されて、再発送する。QRNAを使うと、ネットワークの独立性、拡大などが確保される。

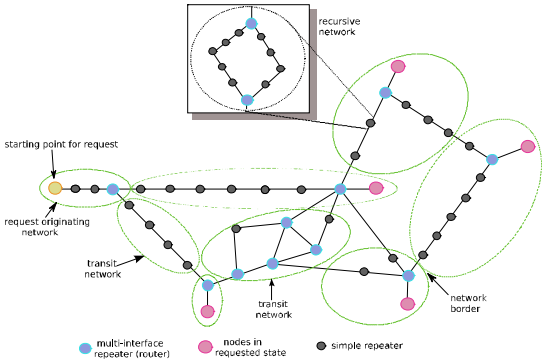

図 9 Quantum Recursive Network Architecture

以上の概念で、量子リピーターネットワークの全ての必要な機能を改善し、実現する日々が近くなっている。

５．主な発表論文等
（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計 3 件）

① Rodney Van Meter, Quantum Networking and Internetworking, *IEEE Network*, 査読有り、2012、掲載確定

② Rodney Van Meter, Joe Touch, Clare Horsman, Recursive Quantum Repeater Networks, *Progress in Informatics*, 査読有り、*No. 8, pp. 65-79*, 2011

③ Austin G. Fowler, David S. Wang, Thaddeus D. Ladd, Rodney Van Meter, and Lloyd C. Hollenberg, Surface code quantum communication, *Phys. Rev. Letters*, 査読有り *104, 180503*, 2010

〔学会発表〕（計 6 件）

① Luciano Aparicio, Rodney Van Meter, and Hiroshi Esaki, Protocol design for quantum repeater networks, Proc. Asian Internet Engineering Conference (AINTEC) 2011, Bangkok, Thailand, Nov. 2011 査読有り Best Student Paper 賞

② Luciano Aparicio and Rodney Van Meter, Multiplexing schemes for quantum repeater networks, Quantum Communications and Quantum Imaging IX, Conv. Ctr. 4,査読有り 2011. *Proc. SPIE 8163, 816308*

③ Rodney Van Meter, Getting to Internet-Scale Quantum Networks, *keynote speech*, Fourth International Workshop on the Network of the Future, Kyoto, Japan, Jun. 2011 査読なしキーノート招待講演

④ Shota Nagayama and Rodney Van Meter, RaQoon2: Extension of Internet Key Exchange to Use Quantum Key Distribution, Updating Quantum Cryptography and Communications 2010, Tokyo, Japan, 査読なしポスター発表, 2010.

⑤ Takahiko Satoh and Rodney Van Meter, Path Selection in Heterogeneous Quantum Networks,
10th Asian Conference on Quantum

Information Science (AQIS), Tokyo, Japan, 査読なしポスター発表 2010.

⑥ Luciano Aparicio and Rodney Van Meter, Multiplexing in Quantum Repeater Networks, 10th Asian Conference on Quantum Information Science (AQIS), Tokyo, Japan, 査読なしポスター発表 2010.

〔その他〕
ホームページ等
我々のウエブサイト：
http://aqua.sfc.wide.ad.jp/

２０１１年１１月に行なわれた慶應義塾大学湘南藤沢キャンパスの「Open Research Forum」展示会で、量子情報の概念を紹介する CG アニメーションを作製した。展示会に５千人以上来場した：
http://aqua.sfc.wide.ad.jp/ORF2011/ORF2011_teaching_videos.html

ウィキペディアの量子鍵配送のページを英語から日本語に通訳した：
http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%87%8F%E5%AD%90%E9%8D%B5%E9%85%8D%E9%80%81

“Internet-Scale Quantum Repeater Networks,” Microsoft Research で招待講演、２０１２年３月２日、ビデオは公開：
http://research.microsoft.com/apps/video/default.aspx?id=160804&l=i

６．研究組織
(1)研究代表者
バンミーター　ロドニー（VAN METER RODNEY）
慶應義塾大学・環境情報学部・准教授
　研究者番号：９０４５８９７７

(2)研究分担者
なし

(3)連携研究者
なし