

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 9 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23540463

研究課題名(和文)多資源ネットワークを介した分散型量子情報処理

研究課題名(英文)Distributed quantum information processing via multi-resource networks

研究代表者

村尾 美緒 (Muraio, Mio)

東京大学・理学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：30322671

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円、(間接経費) 1,170,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、情報処理の非局所性、複雑性、因果関係、並列性の4つの観点から分散型量子情報処理の特徴付けを行うことにより、分散型量子情報処理の基礎理論の構築を行った。多者間で量子通信と量子計算を効率良く同時に行うための量子計算ネットワーク符号化の定式化、2者間で分散型量子計算を行う場合に必要な非局所性資源の解析、量子相転移を示す系の熱平衡状態を非局所性資源として用いた測定ベース量子計算の提案、測定ベース量子計算における因果関係の考察による並列化機構と非局所性資源の関係の解明、対角量子ゲートのみによる近似的ランダム量子状態生成方法の提案とその非局所的複雑性の解析などの成果を挙げることに成功した。

研究成果の概要(英文)：We characterized distributed quantum information processing in terms of nonlocality, complexity, causality and parallelizability. We developed a formulation for the network coding of quantum computation to efficiently perform multi-party distributed quantum computation that simultaneously implements quantum computation and communication. We analyzed the amount of nonlocal resource necessary to perform two-party distributed quantum computation. We proposed a method to perform measurement-based quantum computation using symmetry-breaking thermal states of a many-body system exhibiting a quantum phase transition. We analyzed a parallelizing mechanism and entanglement of measurement based quantum computation in terms of causal order relations. We also proposed a method to generate approximate random states using only diagonal quantum gates and analyzed nonlocal complexity of the method.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・量子・分子・量子エレクトロニクス

キーワード：分散型量子情報処理 量子計算 量子通信 エンタングルメント ネットワーク符号化 測定ベース量子計算 因果関係 計算の並列化

1. 研究開始当初の背景

通信ネットワークを通じて小規模な量子計算機を結ぶことにより大規模な量子計算を行うことを目指す分散型量子情報処理は、大規模化可能な量子計算を実現する方法の一つとして、近年活発に研究が進められてきている。ネットワークを介して、ユーザーとは別の場所にある資源を用いて秘匿性の高い量子計算を行うクラウド型量子計算システムや、ネットワークとして非局所性資源であるエンタングルメントを用いる量子テレクローニングなども、分散型量子情報処理の一つと考えることができる。分散型量子情報処理を効率的に行うためには、量子計算と量子通信、そして量子暗号のすべての要素が関連するため、分散型量子情報処理の研究は、応用研究的への有効性のみならず、量子情報処理の本質を総合的に理解するための基礎研究としても、大きな意味を持つ。

ネットワークを介した量子通信については、近年、パタフライ通信路などの指向性を持つ通信路からなるネットワークを用いて多者間量子通信を行うための研究が発展してきている。これらの研究は、ネットワークの通信容量にボトルネックがある状況下において、ネットワーク符号化やエンタングルメント資源を用いることで、多者間での量子通信を最も効率良く行う方法を模索するものである。本研究では、量子パタフライ通信路を介して、量子通信のみならず量子計算を効率的に行うためのネットワーク符号化を考察することによって、分散型量子情報処理の実現を目指した基礎理論の構築を行なおうと考えた。

ところで、エンタングルメントは通信資源として用いられる一方で、測定ベース量子計算においては、グラフ状態と呼ばれる多体エンタングルメントを計算資源として用いている。測定ベース量子計算は、量子通信路を用いずに、多体エンタングルメントと古典通信路のみで量子計算と量子通信を同時に行なう分散型量子情報処理の特別な例であると考えられることもできる。測定ベース量子計算においては、多体エンタングルメントの特性に加えて、測定結果の因果関係と古典情報通信が非常に大きな役割を持つ。そこで、測定ベース量子計算における多体エンタングルメントと測定結果の因果関係を明確にすることで、分散型量子情報処理における古典情報通信の果たす役割をより明確にしようと考えた。

2. 研究の目的

小規模量子計算機、多体エンタングルメントなどの計算資源と、量子通信路、2体エンタングルメント、古典通信路などの様々な通信ネットワーク資源の組み合わせによって、量子計算と量子通信を同時に実行し、より効率的に分散型量子情報処理を行なう方法を探索する。特に、ボトルネックや指向性を持

つ通信路の存在など、パタフライ通信路などで表されるような通信資源に制限がある場合を考察し、量子計算ネットワーク符号化のための基礎理論の構築を目指す。また、測定ベース量子計算を実行するために必要な多体エンタングルメント資源の解析と、測定ベース量子計算における計算の並列化機構に関してエンタングルメント資源の果たす役割を明らかにする。

これらの研究を通して、情報処理の非局所性、複雑性、因果関係、並列性の4つの観点から分散型量子情報処理の特徴付けを行うことにより、分散型量子情報処理の基礎理論の構築を目指す。

3. 研究の方法

(1) 各入力と各出力のノードが全て異なるような状況での多者間での分散型量子情報処理を考える場合について、計算と通信の双方を含む量子計算ネットワーク符号化という新しい概念を提唱した。与えられた資源のみを用いて、ネットワーク符号化によってより効率的に分散型量子情報処理を実行する方法を探索した。各ノード内での計算資源は無制限とする一方で、通信資源に関しては、量子通信はネットワークの形状で制限される場合を考えた。そして、古典通信にもネットワークの形状による制限を付加する場合と、古典通信はネットワークの形状に依存せず無制限に許す場合の2種類の場合に分けて解析を行った。

(2) 各入力と各出力のノードは同じとするような2者間の分散型量子情報処理を効率的に行うために必要な非局所的資源量を、エンタングルメントを付加した場合の局所操作と古典通信(LOCC)の解析によって評価した。

(3) 熱揺らぎのある系において測定ベース量子計算を実行するために必要な非局所的資源である多体エンタングルメント資源の解析を行った。特に、量子相転移を示す系の有限温度の熱平衡状態を用いた測定ベース量子計算の実装可能性を解析した。

(4) 測定ベース量子計算における非局所性、複雑性、因果性と並列性との関連を、測定の順序関係を記述するgflowと呼ばれる因果関係の観点から解析した。

(5) 量子系の非局所的複雑性の指標としてのエンタングルメントの性質を考察した。特に、計算基底に対する対角量子ゲートのみを用いることによって、高いエンタングルメントを持つ典型的な量子状態の集合である、一様ランダム量子状態アンサンブルを近似的に生成するための方法を探索し、非局所的複雑性の解析を行った。

4. 研究成果

(1)まず、バタフライ通信路と呼ばれる通信ボトルネックを含むネットワークにおいて、ネットワークを構成する通信路を1量子ビットの量子通信または2古典ビットの古典通信のいずれかに用いるとした場合に、それぞれ別ノードで与えられる2量子ビットの入力量子情報に対して任意の制御ユニタリ演算を実装し、これらとも別ノードにある2量子ビットに出力する方法を示した。また、追加の量子資源を用いない場合には、このようなバタフライ通信路を用いて制御ユニタリ演算以外の演算を確実に実装することができないこと証明した。この研究は、これまで多者間通信という観点からのみ解析されてきたネットワーク符号化に対して、多者間での分散型量子計算というまったく新しい観点からネットワーク符号化を捉え、量子計算ネットワーク符号化という新しい分野を切り拓いた。

次に、ネットワークの通信容量は1量子ビットに制限されているが、古典通信は自由に行えるという条件下における量子計算ネットワーク符号化について、2次元格子上に配置されたノードに対して、再近接のノード間が2量子ビットの最大エンタングル状態(ベル状態)で接続されているクラスター通信路上で実装可能な k 量子ビット間のユニタリ演算のクラスを求めた。この結果を用いることによって、古典ネットワーク符号化で基本ネットワークとして知られているバタフライ通信路とグレイル通信路上では、任意の2量子ビットユニタリ演算が実装可能であることを示された。さらに、クラスター通信路上での確率的なユニタリ演算の実装可能性の解析を進めた。これらの研究成果は、多者間通信を目的に解析されてきたネットワーク符号化を多者間分散量子計算に拡張する量子計算ネットワーク符号化の基礎的な理論を与えるとともに、多者間の確率的量子情報処理の新しい解析方法を与える結果である。

(2)2量子ビット制御ユニタリ演算を、エンタングルメント資源と LOCC のみを用いて確実に実装するために必要な量子ビット系の最小エンタングルメント資源量を解析し、ユニタリ演算のエンタングルメント生成力に関わらず1 ebit のエンタングルメント資源が必要であることを証明した。この結果により、十分性が証明されて以来過去10年間にわたって未解決問題であった、2量子ビット制御ユニタリ操作の LOCC 実装に対する1 ebit 資源の必要十分性が証明されたことになる。この結果は、一般的な2量子ビット制御ユニタリ操作の LOCC 実装においては、エンタングルメント生成力で与えられる既知状態に対する操作での最小エンタングルメント資源量と、今回のような未知状態(量子情報)に対する操作で必要となる最小エンタングルメント資源量には差が生じることを示唆するため、分散型量子計算に必要な工

ンタングルメント資源は、入力情報を決定するタイミングに異存することが示される。

(3)相互作用クラスターハミルトニアンという量子相転移現象を示す新しいハミルトニアンを導入することで、このハミルトニアンの有限温度の熱平衡状態をリソースとして用いた測定ベース量子計算の実行可能性を示すことに成功した。すなわち、二次元格子上の相互作用クラスターハミルトニアン系では、相転移温度以下の長距離相関が量子計算の熱的エラー頑強性を著しく向上させることを確認し、三次元格子系では、系の臨界温度よりも低い温度であれば全ての熱的エラーを訂正可能な量子誤り訂正符号が存在することを厳密に示した。この結果は、より高い温度での量子計算を可能にただけでなく、多体系で現れる協力現象が量子計算においても有益であることを示しており、多体物理学と量子情報の関係をより緊密に結びつける結果となっている。

(4)測定ベース量子計算では、非局所性資源であるエンタングルメントの効果によって、量子回路モデルよりも並列性を高めることが可能となることが知られていたが、この非局所性資源による並列化の機構として、量子回路モデルでは禁じられている因果順序の操作を、非局所性資源の作用によってある範囲内で行なうことができると解釈できる場合があることを示した。

(5)一様ランダム量子状態アンサンブルとは、ヒルベルト空間に一様ランダムに分布した純粋状態の集合のことであり、一様ランダム量子状態は、非局所的複雑性の指標であるエンタングルメントが非常に大きいことが知られている。しかし、このような高い非局所的複雑性を表す一様ランダム量子状態アンサンブルを物理的に実現することは難しく、例えば、閉じた系の時間発展による生成のためには、極めて非局所な相互作用が必要となることが知られている。一方、位相ランダムユニタリアンサンブルは、与えられた基底に関して対角なユニタリ行列のランダムサンプリングを与えるアンサンブルである。

我々は、実装が比較的容易な計算基底に対する対角量子ゲートのみを用いて、位相ランダムユニタリアンサンブルの t 次までの統計的性質を再現する近似アンサンブル(t -design)を生成する量子アルゴリズムを構築した。そして、量子ビット数の大きな系については、この量子アルゴリズムを用いることによって、状態のランダムサンプリングを与える一様ランダム量子状態アンサンブルの t -design に漸近するアンサンブルを生成することが可能であることを示した。この結果によって、非局所的複雑性の高い近似的一様ランダム量子状態アンサンブルの生成には、互いに交換しない量子ゲートをかける

ことに内在する量子的効果は必ずしも必要ではないが、初期状態の重ね合わせ状態に内在する量子効果の貢献が大きいことが判明した。

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 12 件)

Y. Nakata, M. Koashi and M. Murao, Generating a state t-design by diagonal quantum circuits, *New J. Phys.* 16, 053043 (2014) 査読有, DOI:10.1088/1367-2630/16/5/053043

A. Soeda, S. Akibue and M. Murao, Two-party LOCC convertibility of quadripartite states and Kraus-Cirac number of two-qubit unitaries, accepted for publication in *J Phys. A special issue* 査読有

J. P. Garner, O. C. O. Dahlsten, Y. Nakata, M. Murao and V. Vedral, A framework for phase and interference in generalized probabilistic theories, *New J. Phys.* 15, 093044 (2013) 査読有, DOI:10.1088/1367-2630/15/9/093044

Y. Nakata and M. Murao, Diagonal-unitary 2-designs and their implementations by quantum circuits, *International Journal of Quantum Information* 11, 1350062 (2013) 査読有, DOI:10.1142/S0219749913500627

K. Fujii, Y. Nakata, M. Ohzeki and M. Murao, Measurement-Based Quantum Computation on Symmetry Breaking Thermal States, *Phys. Rev. Lett.* 110, 120502 (2013) 査読有, DOI:http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.110.120502

M. Hajdusek and M. Murao, Direct evaluation of pure graph state entanglement, *New J. Phys.* 15, 013039 (2013) 査読有, DOI:10.1088/1367-2630/15/1/013039

E. Wakakuwa and M. Murao, The Chain rule implies Tsirelson's bound: an approach from generalized mutual information, *New J. Phys.* 14, 113037 (2012) 査読有, DOI:10.1088/1367-2630/14/11/113037

Y. Nakata, P. S. Turner and M. Murao, Phase-random states: Ensembles of states with fixed amplitudes and uniformly distributed phases in a fixed basis, *Phys. Rev. A* 86, 012301 (2012) 査読有, DOI:http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevA.86.012301

J. Hide, Y. Nakata, M. Murao, Entanglement and the Interplay between Staggered Fields and Couplings, *Phys. Rev. A* 85, 042303, (2012) 査読有, DOI:http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevA.85.042303

Y. Nakata and M. Murao, Simulating typical entanglement with many-body Hamiltonian dynamics, *Phys. Rev. A* 84, 052321 (2011) 査読有, DOI:http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevA.84.052321

A. Soeda, Y. Kinjo, P. S. Turner and M. Murao, Quantum computation over the butterfly network, *Phys. Rev. A* 84, 012333 (2011) 査読有, DOI:http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.107.180501

A. Soeda, P. S. Turner, M. Murao, Entanglement cost of implementing controlled-unitary operations, *Phys. Rev. Lett.* 107, 180501 (2011) 査読有, DOI:http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.107.180501

[学会発表](計 8 件)

M. Murao, J. Miyazaki, H. Hajdusek, K. Nakago and S. Nakayama, Causal order manipulation in quantum computation, Japan-France Laboratories of Informatics (JFLI) Quantum Information, Interaction and Causal Structure 2014 年 3 月 4 日, 国立情報学研究所(東京)(招待講演)

S. Akibue and M. Murao, Implementing controlled-unitary operations over the butterfly, grail and cluster networks with free classical communication, The 17th Conference on Theoretical Aspects of Quantum Computing, Quantum Cryptography, and Quantum Information (QIP2014) 2014 年 02 月 03 日, スペイン(バルセロナ)

M. Murao, J. Miyazaki, H. Hajdusek, K. Nakago and S. Nakayama, Causal order manipulation in adiabatic and measurement-based quantum computation, Workshop on Quantum Metrology, Interaction and Causal Structure 2013年12月12日, 北京(中国)(招待講演)

M. Murao, Universal construction of controlled-unitary gate for unknown Hamiltonian dynamics, International Workshop on Cooperative Quantum Dynamics and Its Control (CQDC'12), ユーリッヒ(ドイツ), 2012年10月31日(招待講演)

S. Akibue and M. Murao, Implementing controlled-unitary operations over the butterfly network, The 11th international Conference on Quantum Communication, Measurement and Computing (QCMC2012) 2012年08月02日, ウィーン(オーストリア)

M. Murao, Simulating typical entanglement with many-body Hamiltonian dynamics, International Workshop on Simulation and Manipulation of Quantum Systems for Information Processing (SMQS-IP2011), ユーリッヒ(ドイツ) 2011年10月18日(招待講演)

M. Murao, Structural characterization of graph states for processing quantum information, The 11th Asian Quantum Information Science Conference (AQIS 2011), プサン(韓国) 2011年8月24日(招待講演)

M. Murao, "Globalness" of unitary operations on quantum information, The sixth Conference on the Theory of Quantum Computation, Communication and Cryptography (TQC2011), マドリッド(スペイン) 2011年5月24日(招待講演)

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕
出願状況(計2件)

名称: マルチキャスト量子ネットワーク符号化方法

発明者: 加藤豪、尾張正樹、村尾美緒
権利者: 日本電信電話株式会社、国立大学法人東京大学
種類: 特許
番号: 特願 2013-069470
出願年月日: 2013年3月28日
国内外の別: 国内

名称: バタフライネットワーク上でのマルチキャスト量子ネットワーク符号化方法
発明者: 尾張正樹、加藤豪、村尾美緒
権利者: 日本電信電話株式会社、国立大学法人東京大学
種類: 特許
番号: 特願 2012-069415
出願年月日: 2012年3月26日
国内外の別: 国内

〔その他〕
ホームページ等
<http://www.eve.phys.s.u-tokyo.ac.jp>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

村尾 美緒 (MURAO, Mio)
東京大学・大学院理学系研究科・准教授
研究者番号: 30322671