

平成22年5月27日現在

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2007 ～ 2009

課題番号：19700011

研究課題名（和文） ネットワーク符号と量子計算および通信の融合的研究

研究課題名（英文） Interdisciplinary research on network coding and quantum computation and communication

研究代表者

西村 治道 (NISHIMURA HARUMICHI)

大阪府立大学・理学系研究科・講師

研究者番号：70433323

研究成果の概要（和文）：ネットワーク符号とは、ネットワーク上の多者間通信において、ネットワーク経路途中での情報の符号化の有用性を研究する符号理論の一分野である。本研究では、ネットワーク符号の技術が量子情報においても有用か否かを詳細に研究した。その結果、ある妥当な付加条件のもとで、量子情報に対するネットワーク符号の可能性が明らかにされた。また、研究途上で得られた技術を量子計算および通信の理論に応用した。

研究成果の概要（英文）：Network coding is a field of coding theory that studies if coding information at intermediate points on a network is useful for the communication among multiple parties. In this research, whether the technique of network coding is also useful for quantum information has been deeply investigated. As a result, the possibility of network coding for quantum information has been clarified under some reasonable condition. Moreover, several techniques obtained in the research have been applied to develop the theory of quantum computing and communication.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	900,000	0	900,000
2008年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2009年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	2,800,000	570,000	3,370,000

研究分野：量子計算理論，計算量理論

科研費の分科・細目：情報学・情報学基礎

キーワード：ネットワーク符号，量子計算，量子通信

1. 研究開始当初の背景

(1) 量子ネットワーク符号の研究は、2006年に研究者のグループによって研究の端緒が切られた。研究者は、2006年度～2007年度に科研費若手研究（スタートアップ）の補助

のもとで、量子状態を量子通信路のネットワーク上において効率的に送信するために経路途中での符号化が有用であるかを研究してきた。その結果、バタフライネットワークと呼ばれる代表的なネットワークにおいて量子情報を近似的に送るためには符号化が

有用であることを示す一方で、正確に送るためには符号化は有用でないことが明らかになった。本研究開始時には、Leung らの研究など後続研究も開始されていた時期であった。

(2) 従来の(古典)ネットワーク符号は2000年の Ahlswede らによる導入以降、急速に研究人口は拡大し、多くの研究がなされていたが、計算量理論の立場からの研究はそれほど多くはなかった。研究者は、量子ネットワーク符号との比較上、古典ネットワーク符号の計算量的側面の研究の必要性を感じていた。

(3) また、本研究開始当初に前述の量子ネットワーク符号の研究過程で得た幾つかのアイデアが、量子ネットワーク符号や量子計算以外にも応用できる可能性を持ち始めていた。

2. 研究の目的

(1) 量子情報をネットワーク上で効率的に送るため、量子ネットワーク符号の有用性を一般的なネットワークに対して、様々な角度から検討する。これにより、一対一量子通信で保証される以上の通信効率が可能なネットワークのトポロジーを特徴付け、その通信効率の限界を見極める。

(2) 量子ネットワーク符号の研究成果を明確にするため、古典ネットワーク符号に関する対応する研究を行う。とくに k ペア通信問題と呼ばれる量子ネットワーク符号で中心的に考察されるべき問題に対して、古典ネットワーク符号の可能性を探求することで、古典ネットワーク符号と量子ネットワーク符号の完全な対応関係を明らかにする。また古典ネットワーク符号の計算量理論への応用も模索する。

(3) 量子ネットワーク符号の研究で必要とされる量子情報技術を量子計算の理論に応用し、通信を含む量子計算量理論に関する可能性とその限界を明らかにする。とくに通信計算量の理論への応用を目指し、量子通信計算量と古典通信計算量のギャップについて検討する。

3. 研究の方法

(1) 本研究は、情報理論と計算機科学にまたがる研究であるため、当該分野の研究者と積極的に交流を持つことで研究を進めることが重要であった。とくに京都大学の岩間教授、立命館大学の山下教授、日本 IBM のレイモンド博士らとは、京都大学などで研究打ち合わ

せを行うなど緊密に情報交換を行い、多くの研究を共同で進めた。

(2) 海外の研究者とは、主にメールで議論を重ねた。議論の端緒を付けたり、これまでの議論を整理したりするために、研究者を直接訪問したり、国際会議を利用したりした。

(3) 研究を進める上で得られたアイデアや着想が、当初は予想しなかった研究分野に応用できそうな場合は、その分野の研究も積極的に推進した。

(4) 得られた成果は、理論計算機科学、量子情報科学、数学の関連分野の研究集会で発表し、さまざまなフィードバックを得ることで新しい方向性や発展を模索した。

4. 研究成果

(1) 補助的な古典通信路を認めた量子ネットワーク符号[主要論文1など]

① 研究者らの本研究開始当初に得られていた成果や林および Leung らの後続研究により、「量子情報を量子ネットワーク上で正確に送信するために経路途上の符号化は有用でない」という結論が得られていた。一方で本研究では、「量子ネットワークに加えて『古典の補助的な通信路』を認めれば、経路途上の符号化は有用になりうる」ことが明らかにされた。

② より具体的には、あるネットワーク上で古典のネットワーク符号が有用となるならば、同じトポロジーの量子ネットワーク上で量子ネットワーク符号は、古典の補助情報を認める限り有用となりうることを証明した。この事実は、古典通信路が量子通信路に比べてはるかに安価な通信路であるために、将来的に量子ネットワーク符号が実装される上で大きな意味合いを持つと考えられる。

③ 今後の展望としては、付加的な古典通信路をどの程度制約できるかが重要な研究課題であると考えられる。

(2) 古典ネットワーク符号の多項式時間構成法[主要論文7など]

① ネットワーク符号の研究において、盛んに研究されているネットワークに k ペア通信問題がある。これは k 対の情報の送信者と受信者のペアがネットワーク上に配置されたとき、一定のキャパシティを持ったネットワークの各辺を通して、それぞれのペア間での情報送信が可能となるかどうかを明らかに

する問題である。この問題は一般に NP 完全問題であることが知られているが、 k を有限に制限した場合は多項式時間で解ける可能性がある。

② 2007 年の国際会議 ISIT で $k=2$ の場合に対する多項式時間アルゴリズムが Wang と Shroff により提案されたが、本研究では全く異なる方法で、有限体を通信単位として利用する場合に、任意の有限の k に対する多項式時間アルゴリズムを提案した。

③ 本提案アルゴリズムをより一般的な k ペア問題に適用することが今後の課題である。

(3) 量子通信計算量と古典通信計算量の関係[主要論文 8, 9 など]

① 量子通信計算量理論とは、個々にデータを持つ複数の通信者が通信を行うことで、あるタスクを実現するために必要な量子通信量を研究する理論であり、量子計算および通信の研究において重要な理論である。本研究では、非有界誤り型と呼ばれる確率プロトコルに関して、量子通信計算量を幾何的な特徴づけを利用して詳細に研究した。

② その結果、非有界誤りのブール関数に関する量子通信計算量は古典通信計算量のほぼ 2 倍であることを証明した。また、通信が双方向であるか一方方向であるかは、通信計算量にほとんど影響を与えないことも明らかになった。

③ より重要な有界誤り型プロトコルの研究において、今回利用したような幾何的特徴づけのアイデアが利用できるかは今後の課題であるが、現時点でよい着想を得ておらず、さらなる新しいアイデアを組み合わせることが必要と考えられる。

(4) 量子質問計算量の特徴付け[主要論文 4, 5 など]

① 質問計算量とは、入力として与えられるデータへのアクセス回数に対応する計算量のこと、データの様々な特性を調べるために必要な質問計算量の研究は、従来の計算量理論において盛んに研究されている。量子アルゴリズムを利用した場合の質問計算量は量子質問計算量と呼ばれ、量子計算理論における代表的なトピックである。

② 本研究では、データの特性を表わすブール関数のオンセットや成功確率に関連する多項式の次数などの尺度を利用して、量子質問計算量の特徴付けを試みた。また、量子質

問計算量と量子通信計算量の関係を研究し、Cleve らによって得られた 2 つの計算量間の関係がいくつかのアルゴリズム的条件のもとでは最適であることを証明した

(5) 量子ゲームと量子通信計算量の関係[主要発表 2, 5 など]

量子情報の非局所性を示す Bell の不等式の破れやその非局所性の限界を示す CHSH 不等式は、近年複数のプレーヤーによるゲームの形に再定式化され、計算量理論的なアプローチから研究されている。本研究では、CHSH 不等式とそのある種の一般化に対応する量子ゲームと量子ランダムアクセス符号などの量子通信計算量とのつながりを与え、量子通信計算量のプロトコルから得られる新しい量子ゲームの構築を行った。

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 18 件)

1. Hirotsada Kobayashi, Francois Le Gall, Harumichi Nishimura, Martin Rotteler, General scheme for perfect quantum network coding with free classical communication, in Proceedings of 36th International Colloquium on Automata, Languages and Programming (ICALP 2009), Lecture Notes in Computer Science 5555, pp. 622-633, 2009. 査読有

2. Harumichi Nishimura, Rudy Raymond, Quantum random access coding, IEICE Transactions 92-A (5), pp. 1268-1275, 2009. 査読有

3. 西村治道, 量子計算, 数学セミナー 48(12), pp. 26-31, 2009, 査読無

4. Ashley Montanaro, Harumichi Nishimura, Rudy Raymond, Unbounded-error quantum query complexity, in Proceedings of 19th International Symposium on Algorithms and Computation (ISAAC2008), Lecture Notes in Computer Science 5369, pp. 919-930, 2008. 査読有

5. Andris Ambainis, Kazuo Iwama, Masaki Nakanishi, Harumichi Nishimura, Rudy Raymond, Seiichiro Tani, Shigeru Yamashita, Quantum query complexity of Boolean functions with small on-sets, in Proceedings of 19th International

Symposium on Algorithms and Computation (ISAAC2008), Lecture Notes in Computer Science 5369, pp.907-918, 2008. 査読有

6. Masaru Kada, Harumichi Nishimura, Tomoyuki Yamakami, The efficiency of quantum identity testing of multiple states, Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical 41, Article no.395309, 2008. 査読有

7. Kazuo Iwama, Harumichi Nishimura, Mike Paterson, Rudy Raymond, Shigeru Yamashita, Polynomial-time construction of linear network coding, in Proceedings of 35th International Colloquium on Automata, Languages and Programming (ICALP 2008), Lecture Notes in Computer Science 5125, pp.271-282, 2008. 査読有

8. Kazuo Iwama, Harumichi Nishimura, Rudy Raymond, Shigeru Yamashita, Unbounded-error classical and quantum communication complexity, in Proceedings of 18th International Symposium on Algorithms and Computation (ISAAC2007), Lecture Notes in Computer Science 4835, pp.100-111, 2007. 査読有

9. Kazuo Iwama, Harumichi Nishimura, Rudy Raymond, Shigeru Yamashita, Unbounded-error one-way classical and quantum communication complexity, in Proceedings of 34th International Colloquium on Automata, Languages and Programming (ICALP2007), Lecture Notes in Computer Science 4596, pp.110-121, 2007. 査読有

[学会発表] (計24件)

1. Kazuo Iwama, Harumichi Nishimura, Rudy Raymond, Junichi Teruyama, Quantum counterfeit coin problems, 13th Workshop on Quantum Information Processing (QIP2010), Zurich (Switzerland), January 18-22, 2010.

2. Harumichi Nishimura, Worst-case winning probabilities for the sum of CHSH games, International Conference on Quantum Information and Technology 2009 (ICQIT2009), Tokyo (Japan), December 2-5, 2009. 招待講演

3. 西村治道, 古典及び量子通信計算量, 第21回量子情報技術研究会, 調布, 2009年11

月4-5日. 招待講演

4. 西村治道, 量子コンピュータに基づく計算量理論とその周辺, 日本数学会, 大阪, 2009年9月24日-27日. 招待講演

5. 岩間一雄, 西村治道, Rudy Raymond, Designing quantum game strategies from quantum communication protocols, コンピューテーション研究会, 埼玉, 2009年5月26日

6. 小林弘忠, Francois Le Gall, 西村治道, Martin Rotteler, General scheme for perfect quantum network coding with free classical communication, 第20回量子情報技術研究会, 広島, 2009年5月22-23日.

7. Andris Ambainis, 岩間一雄, 中西正樹, 西村治道, Rudy Raymond, 谷誠一郎, 山下茂, Quantum query complexity of Boolean functions with small on-sets, 第19回量子情報技術研究会, 堺, 2008年11月20-21日

8. 嘉田勝, 西村治道, 山上智幸, 多数の量子状態に対する等価性判定の効率的な方法, 第18回量子情報技術研究会, 東京, 2008年5月22-23日

9. Ashley Montanaro, 西村治道, Rudy Raymond, Unbounded-error quantum query complexity, コンピューテーション研究会, 大和, 2008年3月10日.

10. Kazuo Iwama, Harumichi Nishimura, Rudy Raymond, Shigeru Yamashita, Unbounded-error classical and quantum communication complexity, 11th Workshop on Quantum Information Processing (QIP2008), New Delhi (India), December 17-21, 2007.

11. 西村治道, 古典及び量子通信計算量, 数学基礎論若手の会, 焼津, 2007年10月28日-30日

12. 小澤正直, 西村治道, 量子Turing機械の停止問題, 日本数学会, 仙台, 2007年9月21日-24日

13. 岩間一雄, 西村治道, Rudy Raymond, 山下茂, 非有界誤り一方向量子および古典通信計算量, 第16回量子情報技術研究会, 厚木, 2007年5月17-18日

[その他]

ホームページ

<http://www.mi.s.osakafu-u.ac.jp/~hnishimura>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

西村治道 (NISHIMURA HARUMICHI)

大阪府立大学・理学系研究科・講師

研究者番号：70433323