

令和 3 年 5 月 17 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17H01694

研究課題名（和文）高階量子演算の解析による量子情報処理の研究

研究課題名（英文）Analysis of higher order quantum operations in quantum information processing

研究代表者

村尾 美緒（Murao, Mio）

東京大学・大学院理学系研究科（理学部）・教授

研究者番号：30322671

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 12,300,000円

研究成果の概要（和文）：関数型量子プログラミングの可能性を探索するために、量子演算を入力として量子演算を出力とする関数である高階量子演算の量子コンピュータ上での実装可能性や実装に必要なリソースを解析した。特に、入力となる量子演算の古典的記述を経ずに、ブラックボックスとして与えられる入力量子演算に対して高階量子演算を直接実行しうる量子情報処理の特性（匿名性）を生かした新たな量子アルゴリズムとして、ユニタリ変換の共役化・転置化・逆変換化・制御化を実装する量子アルゴリズムを提案および性能評価を行った。また、高階量子演算を応用し、完全量子学習および分散型量子情報処理における並列性・因果性の特性を解明した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

量子プログラミング上有益な多くの高階量子関数について実装不可能が知られており、このことが関数型量子プログラミングの発展の大きな障壁となっていた。本研究では、入力量子演算を複数回コールすることにより実装不可能性を回避し、匿名性を保ったままユニタリブラックボックスの逆変換化などの有用な高階関数を実装する方法を示した。このことにより、量子コンピュータの新しいプログラミング方法として、関数型量子プログラミングの可能性を切り拓き、量子コンピュータの新たな活用可能性を示した点が本研究成果の学術的意義・社会的意義である。

研究成果の概要（英文）：To explore the possibility of functional quantum programming, we analyzed implementability and resource requirements of higher-order quantum operations that map a quantum operation to another quantum operation. As quantum algorithms directly implementing higher-order quantum operations of a black-box unitary operation utilizing the anonymity of quantum information processing without knowing the identity of the black-box operation, we presented new quantum algorithms for unitary conjugation, transposition, inversion, and controllization and also investigated their performance. We further develop completely quantum learning schemes and distributed quantum information processing schemes as applications of higher-order quantum operations and discovered their parallelizability and causal properties.

研究分野：量子情報理論

キーワード：量子アルゴリズム 量子計算 高階量子演算 超写像 量子プログラミング 量子情報

1. 研究開始当初の背景

量子情報処理では、情報を量子状態で表し、量子演算によって量子状態を別の量子状態へと変換することで情報処理を実行する。量子演算には、ユニタリ変換に代表される決定論的な演算と量子測定に対応する確率的な演算の2種類が存在する。任意の量子演算は基本量子ゲートの組み合わせで近似することが可能であり、「どのような順序で、どの基本量子ゲートを、どの量子状態に作用させるか」を記した量子ゲートの列からなる量子回路で表すことができる。

量子情報処理の研究は、これまで主に量子状態および量子演算に焦点を当てた研究によって進展してきた。Shorの因数分解アルゴリズムの発見などによって量子情報処理の古典情報処理に対する優位性が期待される一方で、古典情報処理に対する優位性を持たない計算量複雑性クラスも知られており、量子情報処理の持ちうる性能については未解明の点も多い。量子情報処理の実用化の観点からも、非可換代数に基づく情報処理の特性を理解し、量子力学の基盤的理解を進めるといふ情報学基礎論および物理学基礎論の観点からも、「なぜ、どのように量子情報処理は古典情報処理より優位性を持ちうるのか」を解明することが重要である。

量子情報処理の優位性を探る方法論としては、量子力学に特有の非局所的相関を持ちうる量子状態であるエンタングル状態の特性や、非局所性が情報処理に果たす役割について、これまで活発に研究が進められてきた。我々も2者間で量子操作を行うために必要な非局所的リソースの評価や、量子演算を実装するための量子ネットワーク符号化理論の定式化など、この分野での研究進展に貢献してきた。しかし、系のサイズが大きくなるとエンタングルメントの複雑性が著しく増すために未解明な点が多く、従来の方法論での限界が見えてきつつある。

新しいアプローチとして、量子演算の高階(higher-order)演算である、量子演算を入力として量子演算を出力とする関数(超写像)、すなわち高階量子演算の概念が提唱され、その効率的な実装に関する研究が進展してきた。高階量子演算を実装する比較的自明な方法としては、入力量子演算の古典的記述(例:ユニタリ変換なら行列表現、未知の場合は量子推定で導出)から超写像の出力を古典情報処理で求め、さらに対応する量子回路を求めて量子情報処理を実行する方法がある。これに対して、高階量子演算では、古典情報処理を経由せずに入力量子演算を未知ブラックボックスとして扱って量子回路に取り込み、量子演算の古典的記述に依存しない、量子演算の匿名性を保ったままの量子情報処理を実行することができる。そのため、より効率的に高階量子演算を実装できるかを明らかにすることが、量子情報処理の特性や古典情報処理との相違点を理解する上で非常に重要となると考えた。

2. 研究の目的

量子情報処理の実用化の観点からも、非可換代数に基づく情報処理の特性を理解することで量子力学の基盤的理解を進めるといふ情報学基礎論および物理学基礎論の観点からも、「なぜ、どのように量子情報処理は古典情報処理より優位性を持ちうるのか」を解明することが重要である。そこで本研究では、新しい側面から量子情報処理の特性を解明するために、量子演算を入力として量子演算を出力とする高階関数である、高階量子演算の実装可能性や近似的実装に必要なリソースの解析を行う。量子演算に対する量子学習と分散型量子情報処理を高階量子演算の応用の対象として、量子情報処理における量子演算の並列性・因果性・非局所性を高階量子演算の観点から解析する。さらに、入力となる量子演算の古典的記述を経ずに高階量子演算を直接実行しうる量子情報処理の特性(匿名性)を生かした新たな量子アルゴリズムを探索する。

3. 研究の方法

本研究では、有限次元系における高階量子演算を考察し次の三つのテーマに分けて同時に研究を進行させ効率的に研究を遂行した。

1. ユニタリ変換に対する基本的・汎用的な高階量子演算の効率的な実装方法探索と精度評価

- (1) 同じユニタリ変換を実装するブラックボックスが複数与えられた場合に対するユニタリ変換の共役化・逆変換(undo)・転置変換(時間反転変換)の実装アルゴリズムを考察し、実装される高階量子演算の性能評価を行う。
- (2) ユニタリ変換の制御化アルゴリズムに関して、量子メモリ資源を用いるアルゴリズムと、ランダム化資源を用いるアルゴリズムの探索と精度評価を行う。
- (3) 高階量子演算による新たな量子プログラミング方法を考察する。

2. 高階量子演算の応用①：高階量子演算の量子学習への拡張と並列性・匿名性の解析
 - (1) 匿名性を保ったブラックボックスの判別問題に対して最適な量子コムを探索することにより、量子演算の量子学習における並列性・因果性を考察する。
 3. 高階量子演算の応用②：分散量子情報処理における並列性・因果性・非局所性の解析
 - (1) Oreshkov ら示した因果律に従う量子回路では表されない非因果的順序構造を持つ2スロットの高階量子演算について、特に可逆性を保証する高階量子演算の持つ特徴を明らかにする。
 - (2) 局所的変換と古典通信にエンタングルメント量を付加することによって、分散型量子情報処理において非局所的なユニタリ変換を実装する際に必要な非局所的量子リソースと古典通信のトレードオフ関係を解析する。
- #### 4. 研究成果

4.1 ユニタリ変換に対する基本的・汎用的な高階量子演算に関する研究

- (1) 同じユニタリ変換を実装するブラックボックスが複数回使える場合に対するユニタリ変換の共役化・逆変換 (undo) ・転置変換(時間反転変換)の実装アルゴリズムを提案し、その特徴付けに成功した。共役化に関しては、ブラックボックスとして与えられる d 次元のユニタリを $d-2$ 回以下しか使用できない場合には、非ゼロの確率での正確な実装は不可能であることを証明した。また、逆変換および転置変換に関しては、 n 個のブラックボックスを並列的、順列的 (非並列的)、非因果的に使用できる場合の実装成功確率を半正定値計画法により定式化し、数値計算によってそれぞれの場合の最適成功確率を求めることに成功した。
- (2) ユニタリ変換の制御化アルゴリズムに関しては、量子メモリ資源を用いるアルゴリズムと、ランダム化リソースを用いるアルゴリズムに共通する要素として、ユニタリ変換の無力化という新しい高階量子演算を見出して解析を行った。
- (3) ユニタリ変換に限らない一般的な量子変換の重ね合わせを利用した量子プログラミング方法の定式化に成功した。この定義では、制御化でのコヒーレンス度をパラメータとして導入することができ、最大コヒーレンスを得るための必要条件の導出に成功した。この定義と最大コヒーレンス度を満たすと、非因果的順序関係を持つ量子スイッチのランダム通信路に対する作用と同様の作用を因果的順序関係を保ったまま実装できることも示した。さらに、可逆性を持たない高階量子演算に対する制御高階量子演算への拡張を行い、その量子プログラミング法への応用として、ユニタリ変換の制御化アルゴリズムの再定式化を行なった。

4.2 高階量子演算の応用①：高階量子演算の量子学習への拡張と並列性・匿名性の解析

- (1) 完全に匿名性を保ったままブラックボックスを判別する問題である「完全量子学習」の定式化を行い最適な量子コムを探索することで、誤り確率の最も少ない最適化戦略とその時の誤り確率を導出した。また、ブラックボックスの使い方の因果構造によって誤り確率にどのような差ができるかを解明した。二種類の教師ブラックボックスと一つの判定ブラックボックスがある場合には、ブラックボックスは並列に使用することで最適解が出せることを示した。

4.3 高階量子演算の応用②：分散量子情報処理における並列性・因果性・非局所性の解析

- (1) 量子回路では表すことのできない非因果的順序構造を持つ2スロットの高階量子演算について、2者間で分離した入力演算に対して非因果的順序を持つ可逆的高階量子演算を作用させた場合の数学的定式化を行い、この高階量子演算では、量子スイッチと同様の構造しか持ち得ないことを証明した。
- (2) ユニタリ変換および等長変換を量子ネットワークで接続された複数の量子計算機間で分散量子情報処理として実行する際に必要な非局所的資源であるエンタングルメント資源量は、古典通信のラウンド数(因果構造)を増やすことによって節約できる場合があることを示した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計14件（うち査読付論文 14件 / うち国際共著 4件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Hayata Yamasaki, Alexander Pirker, Mio Murao, Wolfgang Dur, and Barbara Kraus	4. 巻 98
2. 論文標題 Multipartite entanglement outperforming bipartite entanglement under limited quantum system sizes	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Phys. Rev. A	6. 最初と最後の頁 52313
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevA.98.052313	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Hayata Yamasaki and Mio Murao	4. 巻 2
2. 論文標題 Distributed Encoding and Decoding of Quantum Information over Networks	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Adv. Quantum Technol. 2019	6. 最初と最後の頁 1800066
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/qute.201800066	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Akibue Seiseki, Owari Masaki, Kato Go, Murao Mio	4. 巻 96
2. 論文標題 Entanglement-assisted classical communication can simulate classical communication without causal order	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 62331
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevA.96.062331	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Yamasaki Hayata, Soeda Akihito, Murao Mio	4. 巻 96
2. 論文標題 Graph-associated entanglement cost of a multipartite state in exact and finite-block-length approximate constructions	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 62106
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevA.96.032330	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hayata Yamasaki and Mio Murao	4. 巻 65
2. 論文標題 Quantum state merging for arbitrarily-small-dimensional systems	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Trans. Inf. Theory	6. 最初と最後の頁 3950 - 3972
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TIT.2018.2889829	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Qingxiuxiong Dong, Marco Tulio Quintino, Akihito Soeda and Mio Murao	4. 巻 99
2. 論文標題 Implementing positive maps with multiple copies of an input states	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Phys. Rev. A	6. 最初と最後の頁 052352(11pages)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevA.99.052352	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 E. Wakakuwa, A. Soeda and M. Murao	4. 巻 122
2. 論文標題 Complexity of causal order structure in distributed quantum information processing: More rounds of classical communication reduce entanglement cost	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Phys. Rev. Lett.	6. 最初と最後の頁 190502(5pages)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.122.190502	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 J. Miyazaki, A. Soeda and M. Murao	4. 巻 1
2. 論文標題 Complex conjugation supermap of unitary quantum maps and its universal implementation protocol	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Phy. Rev. Research	6. 最初と最後の頁 13007
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.1.013007	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 R. Sakai, A. Soeda, M. Muraio and D. Burgarth	4. 巻 100
2. 論文標題 Robust controllability of two-qubit Hamiltonian dynamics	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Phys. Rev. A	6. 最初と最後の頁 042305 (7pages)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevA.100.042305	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Marco Tulio Quintino, Qingxiuxiong Dong, Atsushi Shimbo, Akihito Soeda, Mio Muraio	4. 巻 123
2. 論文標題 Reversing Unknown Quantum Transformations: Universal Quantum Circuit for Inverting General Unitary Operations	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Phys. Rev. Lett.	6. 最初と最後の頁 210502(5pages)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.123.210502	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Marco Tulio Quintino, Qingxiuxiong Dong, Atsushi Shimbo, Akihito Soeda, Mio Muraio	4. 巻 100
2. 論文標題 Probabilistic exact universal quantum circuits for transforming unitary operations	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Phys. Rev. A	6. 最初と最後の頁 062339(18pages)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevA.100.062339	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Jun-Yi Wu and Mio Muraio	4. 巻 22
2. 論文標題 Complementary properties of multiphoton quantum states in linear optics networks	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 New J. Phys.	6. 最初と最後の頁 103054 (30pages)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1367-2630/abb964	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Qingxiuxiong Dong, Marco Tulio Quintino, Akihito Soeda and Mio Murao	4. 巻 126
2. 論文標題 Success-or-draw: A strategy allowing repeat-until-success in quantum computation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Phys. Rev. Lett.	6. 最初と最後の頁 150504(5pages)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.126.150504	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 W. Yokojima, M.T. Quintino, A. Soeda and M. Murao	4. 巻 5
2. 論文標題 Consequences of preserving reversibility in quantum superchannels	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Quantum	6. 最初と最後の頁 441 (59 pages)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.22331/q-2021-04-26-441	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計55件 (うち招待講演 17件 / うち国際学会 49件)

1. 発表者名 Mio Murao
2. 発表標題 Using quantum computers for analyzing quantum physics
3. 学会等名 International Conference on Challenges in Quantum Information Science (CQIS 2018) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Mio Murao
2. 発表標題 Using quantum computers for manipulating and analysing quantum systems
3. 学会等名 The Bristol Quantum Information Technologies Workshop (BQIT2018) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Mio Murao
2. 発表標題 Higher order quantum operations of unitaries
3. 学会等名 Hong Kong - Shen Zhen Workshop on Quantum Information Science (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Mio Murao
2. 発表標題 Higher order quantum operations of unitaries
3. 学会等名 4th Seefeld workshop on Quantum Information (2018), (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hayata Yamasaki and Mio Murao
2. 発表標題 量子符号化・複号の非局所性の定量化
3. 学会等名 物性研短期研究会 量子情報・物性の新潮流
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Marco Tulio Quintino, Qingxiuxiong Dong, Atsushi Shimbo, Akihito Soeda and Mio Murao
2. 発表標題 Reversing unknown quantum transformations:
3. 学会等名 Modern Topics in Quantum Information (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Marco Tulio Quintino, Qingxiuxiong Dong, Atsushi Shimbo, Akihito Soeda and Mio Murao
2. 発表標題 Reversing unknown quantum transformations:
3. 学会等名 18th Asian Quantum Information Science Conference (AQIS2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hayata Yamasaki and Mio Murao
2. 発表標題 Partial quantum information and two-way classical communication,
3. 学会等名 post-AQIS18 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Qingxiuxiong Dong, Marco Tulio Quintino, Akihito Soeda and Mio Murao
2. 発表標題 Implementing positive maps with multiple copies of an input state
3. 学会等名 post-AQIS18 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Marco Tulio Quintino, Qingxiuxiong Dong, Atsushi Shimbo, Akihito Soeda and Mio Murao
2. 発表標題 Reversing unknown quantum transformations:
3. 学会等名 post-AQIS18 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Marco Tulio Quintino, Qingxiuxiong Dong, Atsushi Shimbo, Jisho Miyazaki, Shojun Nakayama, Akihito Soeda
2. 発表標題 Causal structure of blackboxes in higher order quantum operations
3. 学会等名 Quantum Maiwar 2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Akihito Soeda
2. 発表標題 Higher-order quantum operations on unitary operations with multiple calls,
3. 学会等名 2018 International Workshop on Quantum Information, Quantum Computing and Quantum Control (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Marco Tulio Quintino, 董青秀雄、新保淳、添田彬仁、村尾美緒
2. 発表標題 ユニタリ操作を複数回利用し、その逆操作を実装する
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Jisho Miyazaki, Akihito Soeda, Mio Murao
2. 発表標題 Universal complex conjugation of quantum states and unitaries: Implementation algorithm and implications
3. 学会等名 International Conference on Challenges in Quantum Information Science (CQIS 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Qingxiuxiong Dong, Marco Tulio Quintino, Atsushi Shimbo, Akihito Soeda and Mio Murao
2. 発表標題 Inverting unknown quantum operations
3. 学会等名 International Conference on Challenges in Quantum Information Science (CQIS 2018), (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Ryosuke Sakai, Akihito Soeda, Mio Murao and Daniel Burgarth
2. 発表標題 Robust control of two-qubit gates in Hamiltonian systems
3. 学会等名 International Conference on Challenges in Quantum Information Science (CQIS 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Marco Tulio Quintino, Qingxiuxiong Dong, Akihito Soeda and Mio Murao
2. 発表標題 The Cost of Implementing Non-Completely Positive Linear Maps: How to Construct “Forbidden” Quantum Operations and Supermaps
3. 学会等名 International Conference on Challenges in Quantum Information Science (CQIS 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Paula Belzig, Marco Tulio Quintino, and Mio Murao
2. 発表標題 Nonlocality with sequential measurements beyond local pre-processing
3. 学会等名 International Conference on Challenges in Quantum Information Science (CQIS 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hayata Yamasaki and Mio Murao
2. 発表標題 Entanglement cost of distibuted quantum encoding/decoding
3. 学会等名 International Conference on Challenges in Quantum Information Science (CQIS 2018), (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hayata Yamasaki and Mio Murao
2. 発表標題 Entanglement cost of distributed quantum encoding/decoding
3. 学会等名 4th Seefeld workshop on Quantum Information (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Jisho Miyazaki, Akihito Soeda, and Mio Murao
2. 発表標題 Universal complex conjugation of unitaries
3. 学会等名 The 13th Conference on the Theory of Quantum Computation, Communication and Cryptography (TQC2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hayata Yamasaki and Mio Murao
2. 発表標題 One-shot zero-error quantum state merging and splitting
3. 学会等名 The 13th Conference on the Theory of Quantum Computation, Communication and Cryptography (TQC2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Atsushi Shimbo, Akihito Soeda and Mio Murao,
2. 発表標題 Equivalence determination of unitary operations: "Quantum learning" of quantum objects
3. 学会等名 Workshop on Quantum Software and Suantum Learning (QSQL 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hayata Yamasaki and Mio Murao
2. 発表標題 One-shot zero-error quantum state merging and splitting,
3. 学会等名 The 13th Conference on the Theory of Quantum Computation, Communication and Cryptography (TQC2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Shimbo Atsushi, Akihito Soeda, and Mio Murao
2. 発表標題 Equivalence determination of unitary operations
3. 学会等名 18th Asian Quantum Information Science Conference (AQIS2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hayata Yamasaki and Mio Murao
2. 発表標題 Quantum state merging for arbitrarily-small-dimensional systems
3. 学会等名 18th Asian Quantum Information Science Conference (AQIS2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1 . 発表者名 Qingxiuxiong Dong, Marco Tulio Quintino, Akihito Soeda and Mio Murao
2 . 発表標題 Implementing positive maps with multiple copies of an input state
3 . 学会等名 18th Asian Quantum Information Science Conference (AQIS2018) (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 Ryosuke Sakai, Akihito Soeda, Mio Murao and Daniel Burgarth
2 . 発表標題 Robust control of two-qubit gates in Hamiltonian systems
3 . 学会等名 18th Asian Quantum Information Science Conference (AQIS2018) (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 Hayata Yamasaki and Mio Murao
2 . 発表標題 One-shot quantum state merging for arbitrarily-small-dimensional systems under one-way and two-way communication
3 . 学会等名 22nd Annual Conference on Quantum Information Processing (QIP2019) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Mio Murao
2 . 発表標題 Higher order quantum operations of unitaries and their implications
3 . 学会等名 The 17th Asian Quantum Information Science Conference (AQIS2017) (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1. 発表者名 添田彬仁
2. 発表標題 高階量子情報処理の最近の展開
3. 学会等名 第37回量子情報技術委員会 (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 添田彬仁
2. 発表標題 量子情報理論入門
3. 学会等名 ハイブリッド量子科学大規模若手会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 宮崎慈生, 添田彬仁, 村尾美緒
2. 発表標題 ユニタリ量子操作の複素共役化: 量子アルゴリズムとその帰結
3. 学会等名 日本物理学会第73回年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Jisho Miyazaki, Akihito Soeda, and Mio Muraio
2. 発表標題 Universal complex conjugation of quantum states and unitaries: Implementation algorithm and implications
3. 学会等名 The 21th Annual Conference on Quantum Information Processing (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Jisho Miyazaki, Akihito Soeda, and Mio Murao
2. 発表標題 Universal complex conjugation of quantum states and unitaries: Implementation algorithm and implications
3. 学会等名 International Workshop on Quantum Simulation & Computation (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Atsushi Shimbo, Akihito Soeda, and Mio Murao
2. 発表標題 Higher-order quantum computation for equivalence determination of unitary operations
3. 学会等名 The 21th Annual Conference on Quantum Information Processing (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Mio Murao
2. 発表標題 Higher order quantum operations of blackbox unitaries
3. 学会等名 XI-th International Symposium on Quantum Theory and Symmetries (QTS2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Mio Murao
2. 発表標題 Using quantum computers for processing quantum systems
3. 学会等名 Young Researchers Forum on Quantum Information Science (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Mio Murao
2. 発表標題 Higher order quantum operations of blackbox unitaries
3. 学会等名 57th Annual Allerton Conference 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Mio Murao
2. 発表標題 Higher order quantum operations of blackbox unitaries
3. 学会等名 Quantum Information Processing in Non-Markovian Quantum Complex Systems (QIPQC 2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Qingxiuxiong Dong, Jisho Miyazaki, Mio Murao, Shojun Nakayama, Atsushi Shimbo, Akihito Soeda, Marco Tulio Quintino
2. 発表標題 Higher order quantum operations of blackbox unitaries
3. 学会等名 International Symposium on Hybrid Quantum Systems 2019 (HQS2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Marco Tulio Quintino, Qingxiuxiong Dong, Atsushi Shimbo, Akihito Soeda and Mio Murao
2. 発表標題 Quantum circuit for inverting unknown unitary operations
3. 学会等名 新学術領域ハイブリッド量子科学 第9回領域会議
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Qingxiuxiong Dong, Shojun Nakayama, Akihito Soeda and Mio Murao
2. 発表標題 Controlled quantum operations and combs, and their applications to universal controllization of divisible unitary operations
3. 学会等名 23rd Annual Conference on Quantum Information Processing (QIP2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Marco Tulio Quintino, Qingxiuxiong Dong, Atsushi Shimbo, Akihito Soeda and Mio Murao
2. 発表標題 Adaptive circuits exponentially outperforms parallel ones for universal unitary inversion
3. 学会等名 23rd Annual Conference on Quantum Information Processing (QIP2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Marco Tulio Quintino, Qingxiuxiong Dong, Atsushi Shimbo, Akihito Soeda and Mio Murao
2. 発表標題 Reversing unknown quantum transformations: A universal quantum circuit for inverting general unitary operations
3. 学会等名 Topical Conference on Quantum Communication and Security 2019 (TCQCS2019) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Marco Tulio Quintino, Qingxiuxiong Dong, Atsushi Shimbo, Akihito Soeda and Mio Murao
2. 発表標題 Reversing unknown quantum transformations: A universal quantum circuit for inverting general unitary operations,
3. 学会等名 Japan-France Laboratories of Information (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Wataru Yokojima, Marco Tulio Quintino, Akihito Soeda, and Mio Murao
2. 発表標題 Consequences of preserving reversibility in quantum superchannels
3. 学会等名 Young Researchers Forum on Quantum Information Science 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Mio Murao
2. 発表標題 Higher-order quantum operations of blackbox unitaries
3. 学会等名 Q-Turn 2020 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Wataru Yokojima, Marco Tulio Quintino, Akihito Soeda, and Mio Murao
2. 発表標題 Consequences of preserving reversibility in quantum superchannels
3. 学会等名 Q-Turn 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Wataru Yokojima, Marco Tulio Quintino, Akihito Soeda, and Mio Murao
2. 発表標題 Consequences of preserving reversibility in quantum superchannels
3. 学会等名 The 20th Asian Quantum Information Science Conference (AQIS2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Jun-Yi Wu and Mio Murao
2. 発表標題 Complementary properties of multiphoton quantum states in linear optics networks
3. 学会等名 The 20th Asian Quantum Information Science Conference (AQIS2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Jun-Yi Wu and Mio Murao
2. 発表標題 Complementary properties and entanglement detection in boson sampling systems
3. 学会等名 24th Annual Conference on Quantum Information Processing (QIP2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Qingxiuxiong Dong, Marco Tulio Quintino, Akihito Soeda and Mio Murao
2. 発表標題 Success-or-draw: A strategy allowing repeat-until-success in quantum computation
3. 学会等名 24th Annual Conference on Quantum Information Processing (QIP2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 J. Bavaresco, M. Murao and M. T. Quintino
2. 発表標題 Strict hierarchy between parallel, sequential, and indefinite-causal-order strategies for channel discrimination
3. 学会等名 24th Annual Conference on Quantum Information Processing (QIP2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Mio Murao
2. 発表標題 Trial and error, finding a path to a quantum physicist/programmer
3. 学会等名 Women in Quantum Summit II (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	添田 彬仁 (Soeda Akihito) (70707653)	東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・助教 (12601)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
オーストリア	インスブルック大学	ウィーン大学	IQQI	
オーストラリア	Macquarie University			