

令和 6 年 5 月 30 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02168

研究課題名（和文）量子制御理論に基づく量子誤り訂正の理論・技術開発

研究課題名（英文）Development of theory and technology for quantum error correction based on quantum control theory

研究代表者

津村 幸治（Tsumura, Koji）

東京大学・大学院情報理工学系研究科・准教授

研究者番号：80241941

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,170,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、量子計算機の実現のためのキーテクノロジーである量子誤り訂正の高度化を目指し、誤り訂正の過程が誤り検出と訂正のフィードバック構造を持つことに着目し、量子制御理論の適用により、量子状態の推定および量子誤り訂正符号の設計と生成手法に関する諸結果を得た。具体的には、1.現実的な量子符号化および復号化の提案および熱ノイズに対するロバスト化、2.量子適応制御、3.量子推定のための適切な量子情報量の解析、4.量子状態スムージング、5.量子アニーラの性能解析、6.雑音駆動型量子アニーリング、7.量子イジングモデルの解析、8.量子イジングモデルの推定、について結果を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

結果の一つである量子符号化・復号化は、厳密な時間制御を必要としない散逸ダイナミクスを用い、また熱ノイズに対するロバスト化まで図ったものであり、世界的に見て新規であり、これまで実現性の議論が不十分な量子符号化の実現に大いに寄与するものである。また誤り検出の基礎となる量子情報量の導出や量子状態スムージングも、量子状態推定において新規の結果である。さらに量子ビットのエラーの実態を知るための量子アニーリングの性能解析の結果は、最新の量子計算機に関する性能解析であり、分野への貢献大である。また量子イジングモデルの解析は量子アニーリングの解析の基礎となるものであり、理論的貢献の大きな結果である。

研究成果の概要（英文）：In this research, we aim to advance quantum error correction, which is a key technology for realizing quantum computers. We focus on the error correction process, which consists of “error detection” (observation of quantum state) and “error correction” (manipulation to quantum state) based on the detected signal, and obtain various results on the estimation of quantum state and design and generation methods of quantum error correction codes. Specifically, we have the following results; 1. physically realistic quantum coding and decoding methods and their robustness against thermal noise, 2. quantum adaptive control, 3. analysis of reasonable quantum information for quantum estimation, 4. quantum state smoothing, 5. quantum annealer performance analysis, 6. noise-driven quantum annealing, 7. analysis of quantum Ising model, and 8. estimation of quantum Ising model.

研究分野：制御理論

キーワード：制御理論 量子誤り訂正 量子情報理論 量子統計 量子計算理論

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

#### 1.1 量子計算機開発の課題と量子誤り訂正の必要性

近年の量子計算機開発の進展は目覚ましいが、計算結果の信憑性の問題が浮き彫りとなり、実応用の点でさらなる進展が必要とされている。その主たる理由の一つに有効な量子誤り訂正が実現されていない点が挙げられる。量子ビットは相互作用に弱く情報を保持することが難しく、計算途中の量子ビットが物理的相互作用で引き起こされる外乱により変化し、計算結果の信頼性が著しく損なわれる。程度の差はあるが本問題は古典計算機でも起こりえる。そこで古典計算機では複数ビットをまとめて論理ビットを構成し、多数決などで誤りを検出し訂正するという手法が用いられている。ところが同様の仕組みをそのまま量子ビットに適用すると、測定により古典的な情報に収縮し量子的情報が壊れてしまい、古典系の誤り訂正の技術をそのまま量子ビットに応用することはできないことがわかっている。

#### 1.2 量子誤り訂正の仕組みと従来研究

これを解決するため量子誤り訂正法が 1990 年代から提案されてきた。量子誤り訂正とは、次の様な (a) 「誤り検出」と (b) 「誤り訂正」の 2 つの操作からなる。

(a) 「誤り検出」: 補助ビットを利用した間接測定と最尤復号および識別器での誤り判定

(b) 「誤り訂正」: 正しい量子状態への制御

ここで (a) 「誤り検出」での、情報の冗長化のための複数の補助ビットに情報を写す相互作用のさせ方と、補助ビットの測定によって本体に生じる誤りを小とする相互作用・測定の工夫が極めて難しい。これを解決した最初のブレークスルーは Peter W. Shor による量子誤り訂正である [R1]。一方、(b) 「誤り訂正」は、「誤り検出」の結果に基づく「対象の操作」であり、構造的にフィードバック制御の一つと考えることができる。

#### 1.3 量子誤り訂正の問題点・解決すべき点

このように量子誤り訂正は現在注目されている話題であるが、次のような問題点がある。

・雑音に関する想定: これまで提案されている量子誤り訂正の手法では限られた雑音の加わり方、つまり特定の量子ビットにのみ雑音が加わるものと想定しているが、現実には全ての量子ビットに雑音が加わるため、誤りを適切な確率で抑えることはできない。

・連続時間系での議論: 実装される物理デバイスは連続時間系であるが、例外を除き既存手法の多くは離散時間系の枠組みの上での議論に留まっている [R2]。物理デバイス上では量子系のダイナミクスと観測信号は連続時間的であり、雑音の種類やダイナミクスに関する先見情報に基づき量子ビットを適切に操作すれば、より高性能の量子誤り訂正が可能になると期待される。

・誤り確率および冗長性と誤り確率の関係の解析の欠如: 量子光学系に対する連続時間的量子誤り訂正の研究 [R3], [R4] があるが、誤り検出の推定精度と「訂正」に相当する「フィードバック制御」による誤り確率の関係の議論や、情報の冗長化と誤り確率の議論もない。量子ビットの集積化は現状進んでおらず、量子ビットを有効に使うには冗長化を抑えるべきだが、その場合誤り確率が高まり、冗長性と制御を含めた誤り確率の関係解明は応用上不可欠である。

[R1] Peter W. Shor: Fault-tolerant quantum computation, Proceedings of 37th Annual Symposium on Foundations of Computer Science, pp. 56-65, 1996. [R2] Daniel A. Lidar, Todd A. Brun: Quantum Error Correction, Cambridge University Press, 2014. [R3] C. Ahn, A. C. Doherty, A. J. Landahl: "Continuous quantum error correction via quantum feedback control," Physical Review A, 65, 0142301, 2002. [R4] S. Rosenblum, P. Reinhold, M. Mirrahimi, Liang Jiang, L. Frunzio, R. J. Schoelkopf: "Fault-tolerant detection of a quantum error," Science, Vol. 361, pp. 266-270, 2018.

### 2. 研究の目的

#### 2.1 課題解決の基本的指針

1 で説明したように量子誤り訂正の設計は、「誤り検出」つまり情報の符号化・冗長化の設計および観測系の設計と、誤り検出信号に基づく「誤り訂正」つまりフィードバック制御系の設計からなる。前者は量子情報理論に基づく量子状態の観測・推定問題である。後者は量子フィードバック系の問題であり、量子制御理論の適用が合理的である。

#### 2.2 学術的「問い」

以上から量子誤り訂正の課題を解決するには、次の学術的「問い」に答えなければならない。

「動的量子誤り訂正によって達成できる最適な誤り確率は何か？」

そしてこの「問い」は次の個別の課題を含んでいることがわかる。

・誤り検出とフィードバック制御による誤り確率の下限の導出

・冗長性の大きさと誤り確率の上界のトレードオフの解明

以下では上の「問い」と 2 つの課題を解決する方法を説明する。

#### 2.3 本研究の目的

2.2 で示した学術的「問い」に答えるため、本研究では量子制御理論の手法を用い、実機実装を踏まえて量子誤り訂正システムをモデリングおよび定式化し、高性能量子誤り訂正システムを設計するための新たな理論を構築する。特に (a) 「誤り検出」を実現する符号化器・冗長化・観測系の設計と、誤り検出後の (b) 「誤り訂正」を実現する量子フィードバック制御側の設計の

ための手法を確立する。

### 3. 研究の方法

2.1で説明したように量子誤り訂正のシステムは、誤りを生じさせるノイズの影響下にある連続時間動的量子フィードバックシステムとみなすことができる。そこで量子誤り訂正における符号化を量子制御理論・量子統計の観点で見ると、ノイズによるデコヒーレンス(量子相関の喪失)のないデコヒーレンスフリー部分空間に、すなわちノイズから不可観測・不可到達部分空間へ、制御入力を用いて量子状態を押し込める問題と考えられる。量子相関のある量子系の観測推定問題や量子フィードバック制御について本研究グループのメンバーは豊富な研究の経験と知見があり、量子状態を部分空間に閉じ込める制御手法を開発してきた(例えば[Ts-3])。そのような手法や知見を用いることにより、量子誤り訂正で用いる論理ビットをどの程度小さく構成できるのかという問題の解決につながると考える。このように量子誤り訂正の問題をフィードバック系の制御・観測・推定問題とみなす考えは世界的にユニークであり、本研究の独自性の現れと考える。また実際の量子計算機のデバイス毎に実装可能な観測方法に従って制限された状況下で、ノイズにさらされた元信号の復元確率をどのように高めるのかという問題には、量子計算に関する知見が不可欠と考える。このように動的量子誤り訂正の高性能化には、量子制御理論、量子統計、量子計算の分野にまたがる研究者が不可欠であり、本申請研究の分野をまたぐメンバー構成(津村(量子制御)、大木(量子制御・推定)、田中(量子統計)、大関(量子計算))は極めて適切でありかつユニークであると考えられる。

そこで2で示した目的を達成するため、本研究ではより具体的に次の4課題の解決を目指す。

課題1: 量子誤り検出のためのオンライン状態トモグラフィ(担当: 田中, 大木, 大関)

課題2: 量子フィードバック制御の制御性能解析(担当: 津村, 大木)

課題3: 連続時間量子系に対する冗長化と量子誤り訂正精度のトレードオフ解析

(担当: 大木, 大関, 津村)

課題4: 実機の不均一さを克服する論理ビット構成の機械学習的アプローチ

(担当: 大関, 田中)

理論の統合(全員)

ただし各々必要に応じて相互に担当項目を重複することにより、分野横断的で有機的組織体制を構築し、主たる研究テーマの解決を図った。また各々の研究活動は次の3つの点、1: 理論、2: 数値実験による検証、3: 研究発表、で実施するものとした。

[Ts-1] K. Ohki, K. Tsumura, R. Takeuchi, "Nonclassical state generation for linear quantum systems via nonlinear feedback control," Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics, Vol. 50, 125503 (2017). [Ts-2] H. Yonezawa, K. Ohki(7番目), K. Tsumura(8番目), (他10名), Quantum-Enhanced Optical-Phase Tracking, Science, Vol. 337, pp.1514-1517 (2012). [Ts-3] R. Suzuki, K. Tsumura, Distributed Feedback Control of Quantum Networks, 6th IFAC Workshop NECSYS (2016). [Ts-4] S. Yin, K. Tsumura, "The Second Law of Controlled Linear Stochastic Thermodynamic Systems under Communication Constraints," 57th IEEE Conference on Decision and Control, Miami Beach, FL, USA, December 17-19, 2018.

### 4. 研究成果

(1) 散逸ダイナミクスを用いた量子符号化・復号化と熱ノイズへのロバスト化(津村, 大木)

本研究では情報を担う対象の量子系を、散逸ダイナミクスを持つ系として適切に構成する手法を用いることにより、元の情報を持つ量子系を時間発展させ、量子誤り訂正のための量子符号語へ変換する過程、つまり量子符号化と、その量子符号語から元の情報を取り出す過程、つまり量子復号化を、連続時間散逸ダイナミクスの特性に立脚した同じ手法で統一して扱えることを示した。特に散逸ダイナミクスを持つ系の特性を利用し、符号化における目標の量子符号語、あるいは復号化における元情報を表現する量子状態を漸近安定な平衡点とすることによって、符号化・復号化における時間発展の終了時刻に関する厳密な制御が不要となり、符号化・復号化の実現性が高められる。さらに符号語の構成において基本となるスタビライザ群の自由度を用いて、本手法の一般化が可能であることを示した。

次に開発した散逸ダイナミクスを持つ量子符号化・復号化の量子系を対象とし、その時間発展における熱ノイズへの頑健性に関して解析した。はじめに本手法の系は熱ノイズの影響を受ける状況において、時間発展が進むに従って元の情報を失っていく、つまり熱ノイズに対する頑健性が弱いことを示した。また手法の一般化を利用し、符号語における冗長項の長さを様々に変えてもノイズ頑健性は変わらず、それを高めることが出来ないことを示した。そこでこの問題点を解決するため、元の量子符号化法・復号化法に、熱雑音による量子状態の乱れを補正する新たな機構を組み込んだ、熱ノイズに頑健な量子符号化法を提案した。また、提案する量子ダイナミクスの安定性を、対象符号語に対応する量子状態において解析し、数値実験により、提案手法の有効性を確認した。

(2) N準位量子系の適応ロバスト制御に関する研究(大木)

現実的な量子符号化では対象の特性が不確かな場合が想定され、それを推定する適応的なシ

システムが必要とされる。そこで本研究ではN準位量子系の適応ロバスト制御の手法を開発した。具体的には次のとおりである。量子情報技術の研究が進むにつれて量子系の安定化制御が注目されているが、実際には不確定性を考慮する必要がある。そこで Liang, Amini, Mason によるN準位量子系のロバスト安定化に関する研究(SIAM J. Control Optim., 59(1), 669-692, 2021)に基づき、大規模な量子系の不確定性を考慮した適応的パラメータ調整アルゴリズムを提案し、推定パラメータの収束性能を解析した。収束解析の結果、適切なチューニングには重み関数に対するある条件が必要であり、漸近収束率は関数の選択のみに依存することが示された。次に適応利得の設計方法について議論した。これまでの研究では、特定のクラスの適応利得関数を用いて、N準位量子系のロバスト適応安定化を理論的に扱ってきた。しかし既存研究では、適応利得を選択することによって、望ましい性能、例えば、高速な状態収束を達成することについては言及していない。そこで、本研究では、適応利得が満たすべき実用的な性質について議論し、数値実験を用いて適応利得の具体例を示した。

### (3) 量子情報量に関する研究 (田中)

誤り検出では量子状態推定は本質的な問題である。量子系の推定において、量子計算システムの誤差モデルを考えると、対象の量子ビットが属するパラメトリックモデルを想定するが、本研究ではこのことを念頭に置き、システムがパラメータ範囲内のモデルに属することがわかったときに得られる情報量の評価に焦点を当てた。古典的な揺らぎを除くと、系にはまだ不確定性が残っている。これを評価し作用素としての意味を持たせるために、純粋量子情報と呼ばれる情報量を提案した。これは量子ビットの場合、オペレーションズ・リサーチでよく知られている単位球面上の施設配置問題に関連することを示した。また一般的なケースとして、複素射影空間における施設配置問題に拡張した。さらに純粋な量子情報は量子系の不確定性を反映し、フォン・ノイマン・エントロピーではなく、最小エントロピーに関係することを示した。

### (4) 量子状態スムージング (大木)

過去時刻における量子状態の推定は、理論的な興味と実用的な必要性の両方から研究されており、論争の的となっている問題である。いくつかの研究では量子状態平滑化法が提案されているが、どのような状況で過去の量子状態が保証されるかは未解決の問題である。本研究では、過去時刻における量子観測量の推定が、その時刻における量子状態の推定になる条件を考察し、2つの再帰的量子状態スムージングを提案した。

### (5) 量子アニーラの性能解析 (大関)

本研究では、実際の量子ビットに生じるエラーの実態を知り、誤り訂正に必要な物理モデルの知見を得ることを主目的とし、そのために量子アニーラの性能解析を行った。以下、その詳細を説明する。最適化問題を解く際には、一般的に目的関数を最小化または最大化する必要がある。しかし、複雑な問題設定の場合、目的関数を常に数学的な形で明示的に定式化することはできない。いくつかの回帰による手法は目的関数の近似形を推論するが、その評価にはコストがかかる。このような場面では、「ブラックボックス」目的関数の最適点が、少ない手がかりを効果的に使いながら計算される。最近、2値変数を持つブラックボックス目的関数に対して、疎な事前分布を用いた推論による効率的な手法が提案された。この方法では、2次制約なし2値最適化(QUBO)問題の形で代理モデルが提案され、ブラックボックス目的関数の最適解を得るために繰り返し解かれる。そこで本研究では、量子ゆらぎによってバイナリ変数を駆動することでQUBOを解くことができるD-Wave 2000Q量子アニーラの適用を考えた。D-Wave2000Q量子アニーラは、途中の凍結効果により、一般にプロトコル終了時に基底状態を出力するとは限らない。そこでD-Wave量子アニーラの出力がブラックボックス最適化に与える影響を調査した。相互作用係数の疎密を制御するパラメータを導入することにより、ブラックボックス目的関数として疎なSherrington-Kirkpatrick(SK)モデルを採用し、ベンチマークテストを行った。D-Wave量子アニーラとシミュレーテッドアニーリング(SA)及び半正定値計画法(SDP)の結果を比較した結果、D-Wave量子アニーラとSAがSDPを用いたブラックボックス最適化において優位性を示すことがわかった。一方、SDPを用いたブラックボックス最適化では、D-Wave量子アニーラの優位性は見いだせなかった。

次にD-Wave量子アニーラの性能解析を行った。このアニーラにはハードウェアに内在するノイズや様々な環境要因が最適解の決定を妨げている。また、量子揺らぎが弱い領域での凍結効果は、極低温でギブス・ボルツマン分布にほぼ従う出力を生成する。このように、量子アニーラはイジングスピニングラス問題の高速サンプラーとしても機能する可能性があり、量子アニーラを用いたボルツマン機械学習の研究がいくつか行われている。これまでの研究では、古典計算機による従来の方法と量子アニーラによるサンプリングとの間で、得られた分布の標準距離における性能を比較することに焦点が当てられてきた。本研究では、生成モデルとしての量子アニーラの性能に、別の側面から着目した。量子アニーラの性能を評価するために、事前に用意したデータセットに対して学習させたニューラルネットワークによる識別器を用意した。その結果、生成モデルの学習において、量子アニーラは古典的なボルツマン機械学習と比較して高い性能を示した。一方で量子アニーラによるデータ生成は、量子揺らぎの影響を受ける。その結果、量子アニーリングと古典的モンテカルロサンプリングの理想的な比較において、量子アニーリングに

よる生成画像の品質が劣化することがわかった。

最後に複数のアニーラの性能比較を行った。具体的には次の通りである。近年、量子アニーリングに触発され、制約のない二項二次計画問題に特化したソルバが数多く開発されている。これらのソルバのさらなる改良と応用のためには、様々なタイプの問題に対する性能の違いを明らかにすることが重要である。本研究では、4つの2次制約なし2値最適化問題のソルバ、すなわち、D-Wave Hybrid Solver Service (HSS)、東芝 Simulated Bifurcation Machine (SBM)、富士通 Digital Annealer (DA)、およびパーソナルコンピュータ上のシミュレーテッドアニーリングの性能をベンチマークにより比較した。ベンチマークに用いた問題は、QMLib の実問題の例題、ランダムな非全等式 3-SAT (NAE 3-SAT) の SAT-UNSAT 相転移点の例題、イジングスピングラス Sherrington-Kirkpatrick (SK) モデルの例題である。QMLib の例題に関しては、HSS の性能が第1位、NAE 3-SAT に関しては、DA の性能が第1位、SK モデルに関しては、SBM の性能が第1位であった。これらの結果は、これらのソルバの長所と短所を理解するのに役立つと思われる。

#### (6) 雑音駆動型量子アニーリングの検討 (大木)

計算速度の向上は、組合せ最適化問題を解決する強力なツールである量子アニーリングの課題の一つである。これは、量子アニーリングが断熱定理に基づいており、極端にゆっくり変化する系のハミルトニアンを必要とするという事実による。代替ツールとして、雑音駆動型量子アニーリングを提案した。数値実験により、本提案が計算速度を向上させることが期待されることを示した。

#### (7) イジングスピングラスモデルにおける自由エネルギーに関する研究 (大関)

本研究は、量子アニーリングで基本となるイジングモデルに関するものである。一般に Gibbs-Bogoliubov の不等式は、系の自由エネルギーが常に試行関数で計算された値よりも小さくなることを示すものであるが、本研究では、その Gibbs-Bogoliubov に関連する不等式が、ガウスランダム性を持つイジングスピングラスモデルに対して西森線上で成り立つことを示した。この不等式は、系の急冷時における自由エネルギーが、急冷試行関数を用いて計算される自由エネルギーよりも常に小さいことを示す。その証明の鍵となるのは、圧力関数の凸性であり、従来の逆温度に対する凸性とは異なる。この不等式を Sherrington-Kirkpatrick 模型や p-spin 模型などの平均場模型に適用したところ、その境界はレプリカ対称解と一致し、等式が成り立つことが示された。次に、森 (2011 Phys. Rev. E 84 031128) による予想、つまり、非加法領域におけるべき乗ポテンシャルなどの Kac ポテンシャルを持つイジングスピングラス模型の自由エネルギーが、熱力学的極限におけるシェリントン・カークパトリック模型の自由エネルギーと厳密に等しいことについて解析した。本研究では、その予想が西森線上でどの次元のどの温度でも成り立つことを証明した。証明の重要な要素の一つは、西森線上の Gibbs-Bogoliubov の不等式を用いることである。また、相互作用の確率分布が対称である場合についても考察した。森の予想は1次元ではどの温度でも正しいが、2次元以上の低温領域では未解決の問題である。

#### (8) 量子イジングモデルに対する平均場型量子フィルタ (大木)

平均場ゲームあるいは平均場型の制御問題は、計算負荷を軽減する分散制御方式の一つである。本研究では、平均場ゲームの量子版を開発し、量子イジングモデルに対する平均場型量子フィルタを導出した。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 7件）

1. 著者名 Fuyuhiko Tanaka	4. 巻 24(4)
2. 論文標題 An Information Quantity in Pure State Model	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Entropy	6. 最初と最後の頁 541
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/e24040541	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 Manaka Okuyama, Masayuki Ohzeki	4. 巻 92(8)
2. 論文標題 Gibbs-Bogoliubov Inequality on the Nishimori Line	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 84002(1-4)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.92.084002	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 Manaka Okuyama, Masayuki Ohzeki	4. 巻 56(32)
2. 論文標題 Mean-field theory is exact for Ising spin glass models with Kac potential in non-additive limit on Nishimori line	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical	6. 最初と最後の頁 325003(1-14)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1751-8121/ace6e4	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 Ami S. Koshikawa, Masayuki Ohzeki, Tadashi Kadowaki, Kazuyuki Tanaka	4. 巻 90-6
2. 論文標題 Benchmark test of Black-box optimization using D-Wave quantum annealer	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 064001 (1-8)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.90.064001	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 Takehito Sato, Masayuki Ohzeki, Kazuyuki Tanaka	4. 巻 11
2. 論文標題 Assessment of image generation by quantum annealer	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Scientific reports	6. 最初と最後の頁 13523 (1-10)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-021-92295-9	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 Shunta Arai, Masayuki Ohzeki, Kazuyuki Tanaka	4. 巻 3-3
2. 論文標題 Mean field analysis of reverse annealing for code-division multiple-access multiuser detection	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 033006 (1-22)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.3.033006	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 Hiroki Oshiyama, Masayuki Ohzeki	4. 巻 12
2. 論文標題 Benchmark of quantum-inspired heuristic solvers for quadratic unconstrained binary optimization	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 2146 (1-11)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-022-06070-5	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 -

〔学会発表〕 計21件 (うち招待講演 7件 / うち国際学会 14件)

1. 発表者名 Kazuki Nishino, Kentaro Ohki, Koji Tsumura
2. 発表標題 Robust Quantum Coding for Thermal Noise Via Dissipative Dynamics
3. 学会等名 The 62nd IEEE Conference on Decision and Control (CDC 2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 江波 祥樹, 大木 健太郎
2. 発表標題 雑音駆動型量子アニーリングの検討
3. 学会等名 第66回システム制御情報学会研究発表講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 加藤雅己, 津村幸治
2. 発表標題 散逸ダイナミクスによる量子符号化・復号化の一般化について
3. 学会等名 第9回 制御部門マルチシンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Shoju Enami, Kentaro Ohki
2. 発表標題 Convergence analysis of adaptive tuning parameter for robust stabilizing control of N-level quantum systems
3. 学会等名 SICE Annual Conference 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shuto Yamada, Kentaro Ohki
2. 発表標題 Comparison of Estimation Error between Two Different Low-Rank Kalman-Bucy Filters
3. 学会等名 SICE Annual Conference 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年



1. 発表者名 Shoju Enami, Kentaro Ohki
2. 発表標題 A proposal of adaptive parameter tuning for robust stabilizing control of N-level quantum angular momentum systems
3. 学会等名 The 60th Conference on Decision and Control (CDC2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kentaro Ohki
2. 発表標題 On Recursive Quantum State Smoothing
3. 学会等名 The 53rd ISCTE International Symposium on Stochastic Systems Theory and Its Applications (SSS '21) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 江波祥樹, 大木健太郎
2. 発表標題 N準量子系のロバスト制御のための適応パラメータ推定
3. 学会等名 第65回システム制御情報学会研究発表会 (SCI '21)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 江波祥樹, 大木健太郎
2. 発表標題 N準量子系の適応ロバスト制御のための適応ゲイン設計の考察
3. 学会等名 第64回自動制御連合講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 江波祥樹, 大木健太郎
2. 発表標題 N準量子系の適応口バスト制御における可到達性解析
3. 学会等名 第9回 制御部門マルチシンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Masayuki Ohzeki
2. 発表標題 How to perform iterative-structured machine learning by quantum annealer
3. 学会等名 Adiabatic Quantum Computing Conference 2021 (AQC 2021) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Masayuki Ohzeki
2. 発表標題 Qubits21 presentations from Tohoku Univ./Sigma-i Co. Ltd.
3. 学会等名 Qubits 21 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Masayuki Ohzeki
2. 発表標題 Quantum Annealing and Its Application to Real World -A Unique Education Program-
3. 学会等名 2021 Bilateral Workshop between Tohoku University and National Tsing Hua University (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 下村光彦, 大木健太郎, 津村幸治
2. 発表標題 散逸ダイナミクスを用いた量子復号
3. 学会等名 第8回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム (2021年3月1日~4日・オンライン)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kentaro Ohki
2. 発表標題 Mean-field type quantum filter for a quantum Ising type system
3. 学会等名 The 1st Virtual IFAC World Congress (IFAC-V 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Shuto Yamada, Kentaro Ohki
2. 発表標題 On a New Low-Rank Kalman-Bucy Filter and Its Convergence Property
3. 学会等名 The 52nd ISCIE International Symposium on Stochastic Systems Theory and Its Applications (SSS '20) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 梶田健ノ介, 大木健太郎
2. 発表標題 パケットロスのあるシステムに対するイベント駆動型推定と通信量削減手法の提案
3. 学会等名 第63回自動制御連合講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Masayuki Ohzeki
2. 発表標題 Quantum annealing and machine learning - learning and Black-box optimization
3. 学会等名 Ellis QPhML 2020 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Masayuki Ohzeki
2. 発表標題 Quantum annealing, its theory and several applications in industry
3. 学会等名 School on Modern Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Masayuki Ohzeki
2. 発表標題 Quantum Annealing and Its Application to Real World
3. 学会等名 ISMVL 2020(IEEE International Symposium on Multiple-Valued Logic) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Masayuki Ohzeki
2. 発表標題 Quantum Annealing and its Application to Real Industry
3. 学会等名 RIEC International Symposium, When AI Meets Human Science: The 4th Tohoku-NTU Symposium on Interdisciplinary AI and Human Studies (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 Maria Schuld (著), Francesco Petruccione (著), 大関 真之 (翻訳), 荒井 俊太 (翻訳), 篠島 匠人 (翻訳), 高橋 茶子 (翻訳), 御手洗 光祐 (翻訳), 山城 悠 (翻訳)	4. 発行年 2020年
2. 出版社 共立出版	5. 総ページ数 368
3. 書名 量子コンピュータによる機械学習	

〔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	大木 健太郎  (Ohki Kentaro)  (40639233)	京都大学・情報学研究科・助教    (14301)	
研究分担者	田中 冬彦  (Tanaka Fuyuhiko)  (90456161)	大阪大学・基礎工学研究科・准教授    (14401)	
研究分担者	大関 真之  (Ohzeki Masayuki)  (80447549)	東北大学・情報科学研究科・教授    (11301)	

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
---------	---------