

令和 5 年 6 月 20 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2022

課題番号：18K03486

研究課題名（和文）量子状態の高速高精度制御に向けた量子加速理論とその応用

研究課題名（英文）Theory for fast and accurate manipulations of quantum systems and applications

研究代表者

増田 俊平（MASUDA, Shumpei）

国立研究開発法人産業技術総合研究所・エレクトロニクス・製造領域・主任研究員

研究者番号：90546897

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：量子コンピューティングなどの量子テクノロジーにはデコヒーレンスの影響を低減するために短い時間で正確に状態を制御する事が求められる。我々は研究期間全体を通して、量子系の高速制御の理論的枠組みを拡張を行った。量子コンピュータの中心的な構成要素である量子ビットへの応用も提案してきた。特に超伝導量子ビットやシリコン量子ビットなどの高速ゲート操作や初期化の理論を構築した。超伝導デバイス上の光共振器を電子トンネルを使って高速で冷却する手法も提案することができた。論文や学会発表を通して成果発表を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年、実用性のある量子コンピュータの実現に向けた研究が盛んに行われている。量子計算にはデコヒーレンスの影響を低減するために短い時間で正確に状態を制御する事が求められる。我々は研究期間全体を通して、量子系の高速制御の理論的枠組みを拡張を行った。特にシリコン量子ビット、超伝導量子ビット、光格子に閉じ込められた冷却原子などの高速ゲート操作や初期化の理論を構築した。超伝導デバイス上の光共振器を高速で冷却する手法も提案できた。この研究を通じて量子系の制御に関する学問の発展と量子コンピューティングなどの量子テクノロジーの発展に貢献できたのではないかと考えている。

研究成果の概要（英文）：Quantum technologies such as quantum computing require precise control of states in a short time in order to reduce the effects of decoherence. Throughout our research, we have extended the theoretical framework of fast control for quantum systems. We have also proposed applications to qubits, which are a central component of quantum computers. In particular, we have developed theories of fast gate manipulations and initialization for superconducting and silicon qubits. We also proposed methods for high-speed cooling of superconducting resonators using electron tunneling through a junction. We presented our results through papers and conference presentations.

研究分野：量子制御、超伝導デバイス、量子ドット

キーワード：量子制御 早送り理論 STA 量子ビット 電子トンネル 超伝導量子回路

## 1. 研究開始当初の背景

近年、実用性のある量子コンピュータの実現に向けて世界中で盛んに研究が行われている。量子計算を行うためには外系との相互作用によるデコヒーレンスの影響を低減するために短い時間で正確に状態を制御する事が求められる。量子状態のコントロールとその応用には精度とスピードが本質的に重要であり、理論的に裏付けられた擾乱を伴わない高速制御の方法、理論的枠組みの構築が量子科学技術の発展に重要な役割を担うと考えられる。現在、単一原子や電子スピン、超伝導量子ビットの動的制御が可能になってきているが、一方で高速高精度制御のために適した外場やコントロールパラメータの時間依存性を決定する系統的な方法が求められている。これは個々の研究者が経験則に基づき最適化するべき取るに足らない問題ではなく、量子科学技術の本質的な問題である。各々の研究者が適した量子制御の方法を得ることが出来るライブラリーとして、量子制御に関する学問分野のさらなる発展が望まれている。

## 2. 研究の目的

本研究では量子系の高速高精度制御の理論を発展させることを目指す。量子断熱過程を加速する STA の理論を多体系に拡張するとともに、異なる準位間の選択的遷移を高速で行うために STA の枠組みを超えた理論を構築する。さらに得られた理論や他の STA の理論を使った高速高精度な量子情報処理(ゲート操作)の提案を行う。特に2次元量子ドット中の電子や超伝導デバイスは量子コンピュータへの応用が期待されるので、これらの系への適用を提案する。これらの系の持つ量子情報における重要性にもかかわらず、まだ STA をゲート操作に応用する研究がほとんど行われていないのが現状である。本研究は理論の拡張と STA や他の理論を用いた応用の提案から構成されるが、その理由は量子コントロールの理論が実際の系や実験系における制限を考慮して構築されるべき、ということにある。系の制限が理論の多様性を生む(必要とする)ことがこの分野の特徴であるため、二つの研究の相互作用を意識して研究を発展させた。また、本研究は物理系の持つ構造をコントロールの立場から理解するという動機に基づいており、ダイナミクスの非自明なスケール則を明らかにし量子系の理解を深めることを目的としている。

## 3. 研究の方法

### 3.1 量子加速理論の拡張と応用

以前の申請者の研究や既存の研究では一部の多体系(一部の冷却原子気体など)に適用範囲が限られている。申請者の理論を多体系に拡張する事が出来れば、実用上も遥かに適用範囲が広がる事になる。複数の量子ビットからなる系の制御に適用できるよう理論応用・拡張を行った。また、量子系におけるエネルギー準位間の遷移過程を加速する理論を作り、超伝導量子ビットの制御に適用した。複数の超伝導量子ビット間でエネルギー励起を移動させる制御を最適化する。これまでの理論が適用できない制限をもつ系でも使える新規な量子系スピード制御の理論を構築する。それらの理論を超伝導量子ドットやシリコン量子ドットのゲート操作や状態準備に応用する。

### 3.2 他の手法を使った量子制御など

早送り理論や STA 以外の手法を使った以下の研究を行う。NIS(normal metal-insulator-super conductor) junction をトンネルする電子によるエネルギーの吸収を使

った超伝導量子回路の冷却の理論と実験研究；量子フィルターで保護された超伝導量子ビットの高速制御；cubic transmon という超伝導量子ビットを使い高速 2 量子ビットゲートの実証；オンチップマイクロ波サーキュレータの理論提案；超伝導量子回路における Lamb shift の理論と実験研究。実験家と密に連携をとりながら理論を修正しつつ実装可能な量子コントロールを提案してゆく。

#### 4. 研究成果

##### 4.1 超伝導量子ビット

- 我々は二つの共振器で構成された超伝導デバイスのマイクロ波光子を高速で制御する方法を提案した。研究結果は Scientific Reports に掲載された。
- 量子計算を行うためには外系との相互作用によるデコヒーレンスの影響を低減するために短い時間で正確に状態を制御する事が求められる。近年、量子ビットをデコヒーレンスの影響から守るフィルター(JQF)が提案されたが、量子ビットを純粋な二準位系として解析が行われて来た。我々は量子ビットをより正確に記述するため高準位を考慮にいれて解析を行った。フィルターがある状況下での高速量子ビット制御に最適な制御パルスのパラメータを求めた。結果は New Journal of Physics に掲載された。
- 高速高精度な 2 量子ビットゲートは量子コンピュータの実現に必須である。我々は cubic transmon という超伝導量子ビットを使い高速 2 量子ビットゲートを実証した。この 2 量子ビットゲートはマイクロを入射することで実現される。数十 ns の速さの CZ、iSWAP、SWAP ゲートを実証した。結果は Physical Review A に掲載された。
- 近年、超伝導量子パラメトロン量子ビットとしての応用が期待されている。超伝導量子パラメトロンは振動外場で駆動されるが、非共鳴な振動成分が実際には含まれるため制御の効率が下がる恐れがある。我々は超伝導量子パラメトロン量子ビットとしての性能を評価するため非共鳴な振動成分の影響を調べるとともに、その影響を大幅に低減する高速パラメトロン量子ビット制御の研究を行った。Scientific reports に掲載された。
- 我々はパラメトロンの状態を調べるための反射測定理論を構築した。結果は New Journal of Physics 23, 093023 (2022)に掲載された。
- 量子系におけるエネルギー準位間の遷移過程を加速する理論を作り、超伝導量子ビットの制御に適用した。複数の超伝導量子ビット間でエネルギー励起を移動させる制御を最適化した。この新規な理論は状態空間の仮想的軌道という画期的な考え方に基づいており、今後様々な系への応用が期待できる。本研究は Scientific Reports に掲載された。
- 量子系の位相空間における高速回転の理論を開発するとともに、最近特に注目されている Kerr-cat qubit という超伝導量子ビットのゲート操作に応用し、高い忠実度が実現できることを示した。本研究は Phys. Rev. Applied に掲載された。

##### 4.2 シリコン量子ビット

- シリコン量子ビットも量子コンピュータの担い手として期待され盛んに研究されている系である。我々によって以前に提案された手法をさらに発展させ、より実験的に実現しやすい高速 2 量子ビットの制御を理論的に提案した。以前の手法が 2 つの

制御パルスを使うものだったのに対して、新しい手法では一つのパルスで同程度の効率の制御が可能になった。結果は Universe (2020) に掲載された。

#### 4.3 超伝導デバイス

- マイクロ波は超伝導デバイスにおいてエネルギーや情報を運ぶ重要な役割を担っている。我々はマイクロ波を正しい方向に流すための役割をするサーキュレータをオンチップで実現する方法を提案した。結果は Phys. Rev. A に掲載された。
- CPW 共振器は超伝導デバイスを構成する重要な要素であるが、電磁場の真空揺らぎが CPW 共振器の Lamb shift と呼ばれる周波数シフトを引き起こすことが知られている。量子コンピュータへの応用には正確な制御が要請されるため、Lamb shift を正確に測定し理解することが重要である。我々は外部電圧で CPW 共振器と外部電子系との結合強度を広い範囲で制御し CPW 共振器の Lamb shift を直接測定することに成功した。結果は Nature Physics に掲載された。
- 我々は量子計算を行うための初期状態を高速で実現するため超伝導デバイス上の光共振器を高速で冷却する手法を提案した。研究結果は Applied Physics Letters に掲載された。

#### 4.4 その他

- スピードを制御するための理論「早送り理論」のレビュー論文を執筆し、Philosophical transactions A に掲載された。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計13件（うち査読付論文 13件 / うち国際共著 5件 / うちオープンアクセス 8件）

1. 著者名 Masuda S., Nakamura K.	4. 巻 380
2. 論文標題 Fast-forward scaling theory	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences	6. 最初と最後の頁 1-15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1098/rsta.2021.0278	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 該当する
1. 著者名 Masuda S., Kanao T., Goto H., Matsuzaki Y., Ishikawa T., Kawabata S.	4. 巻 18
2. 論文標題 Fast Tunable Coupling Scheme of Kerr Parametric Oscillators Based on Shortcuts to Adiabaticity	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review Applied	6. 最初と最後の頁 034076-034087
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevApplied.18.034076	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 Masuda Shumpei, Koenig Jacob, Steele Gary A.	4. 巻 12
2. 論文標題 Acceleration and deceleration of quantum dynamics based on inter-trajectory travel with fast-forward scaling theory	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 10744: 1-12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-022-14973-6	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 該当する
1. 著者名 Masuda Shumpei, Ishikawa Toyofumi, Matsuzaki Yuichiro, Kawabata Shiro	4. 巻 11
2. 論文標題 Controls of a superconducting quantum parametron under a strong pump field	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-021-90874-4	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 Masuda S, Yamaguchi A, Yamaji T, Yamamoto T, Ishikawa T, Matsuzaki Y, Kawabata S	4. 巻 23
2. 論文標題 Theoretical study of reflection spectroscopy for superconducting quantum parametrons	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 New Journal of Physics	6. 最初と最後の頁 093023 ~ 093023
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1367-2630/ac21e1	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 Noguchi Atsushi, Osada Alto, Masuda Shumpei, Kono Shingo, Heya Kentaro, Wolski Samuel Piotr, Takahashi Hiroki, Sugiyama Takanori, Lachance-Quirion Dany, Nakamura Yasunobu	4. 巻 102
2. 論文標題 Fast parametric two-qubit gates with suppressed residual interaction using the second-order nonlinearity of a cubic transmon	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 062408 ~ 062418
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevA.102.062408	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 Masuda Shumpei, Koshino Kazuki	4. 巻 23
2. 論文標題 Effects of higher levels of qubits on control of qubit protected by a Josephson quantum filter	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 New Journal of Physics	6. 最初と最後の頁 013006 ~ 013006
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1367-2630/abd809	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 Hyypa; E., Jenei M., Masuda S., Sevriuk V., Tan K. Y., Silveri M., Goetz J., Partanen M., Lake R. E., Gronberg L., Mottonen M.	4. 巻 114
2. 論文標題 Calibration of cryogenic amplification chains using normal-metal--insulator--superconductor junctions	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 192603 ~ 192607
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5096262	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 該当する

1. 著者名 Sevriuk V. A., Tan K. Y., Hyyppa E., Silveri M., Partanen M., Jenei M., Masuda S., Goetz J., Vesterinen V., Gronberg L., Mottonen M.	4. 巻 115
2. 論文標題 Fast control of dissipation in a superconducting resonator	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 082601 ~ 082604
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5116659	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 該当する

1. 著者名 Shumpei Masuda, Kuan Yen Tan, Mikio Nakahara	4. 巻 6
2. 論文標題 Theoretical Study on Spin-Selective Coherent Electron Transfer in a Quantum Dot Array	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Universe	6. 最初と最後の頁 2-19
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/universe6010002	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 該当する

1. 著者名 Silveri Matti, Masuda Shumpei, Sevriuk Vasilii, Tan Kuan Y., Jenei Mate, Hyyppa Eric, Hassler Fabian, Partanen Matti, Goetz Jan, Lake Russell E., Gronberg Leif, Mottonen Mikko	4. 巻 15
2. 論文標題 Broadband Lamb shift in an engineered quantum system	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nature Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41567-019-0449-0	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 Masuda Shumpei, Kono Shingo, Suzuki Keishi, Tokunaga Yuuki, Nakamura Yasunobu, Koshino Kazuki	4. 巻 99
2. 論文標題 Nonreciprocal microwave transmission based on Gebhard-Ruckenstein hopping	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 013816-013833
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevA.99.013816	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 Partanen M., Tan K. Y., Masuda S., Govenius J., Lake R. E., Jenei M., Gronberg L., Hassel J., Simbierowicz S., Vesterinen V., Tuorila J., Ala-Nissila T., Mottonen M.	4. 巻 8
2. 論文標題 Flux-tunable heat sink for quantum electric circuits	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 6325-6333
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-018-24449-1	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 -

〔学会発表〕 計8件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 5件)

1. 発表者名 Shumpei Masuda, Taro Kanao, Hayato Goto, Yuichiro Matsuzaki, Toyofumi Ishikawa, Shiro Kawabata
2. 発表標題 Fast tunable coupling scheme of Kerr parametric oscillators using shortcuts to adiabaticity
3. 学会等名 APS March Meeting 2023 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Shumpei Masuda, Jacob Koenig, Gary Steele
2. 発表標題 Acceleration and deceleration of quantum dynamics and shortcuts to adiabaticity based on inter-trajectory travel with fast-forward scaling theory
3. 学会等名 APS March Meeting 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Shumpei Masuda, Aiko Yamaguchi, Tomohiro Yamaji, Tsuyoshi Yamamoto, Toyofumi Ishikawa, Yuichiro Matsuzaki, Shiro Kawabata
2. 発表標題 Theoretical study of reflection spectroscopy for superconducting quantum parametrons
3. 学会等名 APS March Meeting 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Shumpei Masuda, Toyofumi Ishikawa, Yuichiro Matsuzaki, Shiro Kawabata
2. 発表標題 Influence of a strong pump field on controls of superconducting quantum parametrons
3. 学会等名 APS March Meeting 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shumpei Masuda, Kazuki Koshino
2. 発表標題 Theoretical study of on-chip single microwave photon source based on adiabatic population transfer and shortcuts to adiabaticity
3. 学会等名 SQ20th (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 増田俊平、越野和樹
2. 発表標題 Theoretical study on robust and fast single photon source in circuit QED system based on shortcuts to adiabaticity
3. 学会等名 2019 年日本物理学会年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 増田俊平、河野信吾、鈴木啓示、中村泰信、越野和樹
2. 発表標題 Theoretical study of nonreciprocal microwave transmission based on Gebhard-Ruckenstein hopping
3. 学会等名 APS march meeting
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Masuda, S. Kono, K. Suzuki, Y. Nakamura, K. Koshino
2. 発表標題 Theoretical study of on-chip nonreciprocal microwave transmission
3. 学会等名 International Conference on challenges in Quantum Information Science, NII
4. 発表年 2018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

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			
オランダ	Delft University of Technology			
フィンランド	Aalto University	IQM Finland Oy	VTT Technical Research Centre	
中国	Shanghai University			
オーストラリア	University of New South Wales			
フィンランド	Aalto University			