

研究終了報告書

「リアルタイム制御ソフトウェアによる量子ビット仮想化」

研究期間: 2020 年 11 月～2024 年 3 月

研究者: 中島 峻

1. 研究のねらい

日常的なデータ処理量の爆発的増加や、エネルギー・環境問題の解決に繋がる最適化問題、創薬や分子化学に必要なとされるシミュレーション等、要求される計算量の増大に反して、従来型コンピュータの微細化による高速化は限界を迎えつつある。この状況を打開するため、量子力学の本質である量子コヒーレンス、量子もつれを活用することで古典コンピュータを上回る情報処理を実現するべく、量子コンピュータの研究開発が盛んに進められている。近年、この量子力学的特性をうまく活用すべく、ゲート型、量子アニーリング、量子ニューラルネットワーク、量子リザーバ計算等の様々なアルゴリズムが研究されている。一方で、量子コヒーレンスを含む量子コンピュータハードウェアそのものの特性も、デバイス開発だけではなく制御アルゴリズム・ソフトウェアの改善により向上し得ることが明らかになってきた。

よく知られた一例は、誤り耐性量子計算を実現するための量子誤り訂正アルゴリズムである。これは現実の量子ビットに伴うエラーをアルゴリズムの力で訂正し、システムとしての量子コンピュータの性能向上を図るものに他ならない。一方、NISQ と呼ばれる現在の量子コンピュータにおいても、量子ビット性能を最大化するための核心技術として量子ビットデバイスのキャリブレーションの重要性が改めて注目されている。すなわち、いずれの例においても、ノイズに対して極めて敏感な量子ビットをうまく制御するためには、ノイズによって生じるあらゆるエラーを検出しシステムにフィードバックすることが不可欠であることを示している。

本研究では、物理量子ビットをリアルタイム制御するアルゴリズム・ソフトウェアを開発することで、実効的な性能を大きく向上させた仮想量子ビットを実現・検証する事を目指す。具体的な物理系としては、将来の大規模化・集積化に有利と目されるシリコン量子ビットデバイスを対象とし、以下4点の研究項目に取り組む。

- (1) 量子ビット読み出しセンサーの自動制御(読み出しエラーの改善)
- (2) 量子ビット共鳴周波数キャリブレータ(量子コヒーレンスの改善)
- (3) 量子ビットのフィードバック初期化(初期化エラーの改善)
- (4) 量子コンピュータハードウェアの制御API

これらはいずれも将来の量子誤り訂正の基盤技術である。また、これらのアルゴリズムは量子ビット動作の時間スケールでリアルタイムに実行される必要があり、集積回路(ASIC, FPGA)レベルでの量子ビット制御技術をいち早く確立することに大きな意義がある。

2. 研究成果

(1) 概要

研究の進捗に伴って当初予期していなかった進展を見せた部分はあるものの、概ね研究項目毎に計画に沿った研究進捗が得られた。

1)量子ビット読み出しセンサーの自動制御に関しては、市販の任意波形発生器・デジタイザーシステムのFPGAに、一般的なPID制御のアルゴリズムを単一電子センサーの制御に最適化して組み込むことにより、早期にデモシステムを完成させ実機検証を実施することができた。当初の目論見通り単一電子センサーのドリフトをほぼ完全に打ち消すと同時に高いダイナミックレンジを得ることができ、量子ビット単発測定への応用に有用であることを実証した。この開発技術については論文化[代表論文 1]に加えて特許の出願[特許出願 1]を実施している。

2)量子ビット共鳴周波数キャリブレーションの開発では、量子ビットそのものを高感度なノイズセンサーとして利用し、ベイズ推定によって周波数変動をリアルタイムで検出し量子ビット制御信号にフィードバックした。特に固体素子中の電氣的ノイズに敏感な2量子ビット制御にこの技術を適用することで、位相緩和時間の向上を実現することに成功し、論文化作業を進めている。また電氣的ノイズが遠隔クーロン相互作用に起因することを反映し、複数量子ビット間のノイズに相関があることを見出した[代表論文 3]。さらにこの研究過程において、量子ビット測定を一切用いずにデバイス中の核スピン集団を用いた *in situ* な量子フィードバック機構を発見し、これが量子ビット周波数の安定化に有効であることを見出した。本手法は大規模系への適用が容易であり、量子ビット性能の大幅な向上が実現することが期待される。

これと並行して3)量子ビットのフィードバック初期化についても同様に、量子ビットの非破壊測定結果から量子ビット状態を特定し、ビット反転パルスにフィードバックするシステムを実装した。実験によってシリコン量子ビットの初期化に有用であることを実証し[代表論文 2]、従来必要とされた量子ビット毎のリザーバーを省略することによって大規模デバイスの構造を大幅に簡略化できる可能性を示した。

以上の研究はいずれも量子ビット制御装置を通じた高度な操作を要求するものであり、これらを柔軟に実行するための4)制御APIの開発を継続的に進めている。

以上のソフトウェア側からのアプローチに加えて量子ビットデバイスの開発も進展しており、ムーンショット型研究開発事業の他、国内外の半導体関連企業との連携によるシリコン量子コンピュータの研究開発に発展させることができた。

(2) 詳細

1)量子ビット読み出しセンサーの自動制御

量子ビットデバイスにリアルタイム制御を施すことで実質的な量子ビット性能の向上を実証するという本課題の共通テーマの中で、まず古典的なシステムの安定化に用いられるPID制御の応用によって単一電子センサーの安定化および高ダイナミックレンジ化を実現した。シリコン量子ビットの測定に用いられる単一電子センサーは、単一電子電荷を高速検出可能な高感度を有する一方で、デバイス中の電荷ノイズやゲート電極間の電圧クロストークに対しても極めて敏感であり、ダイナミックレンジが狭いという問題があった。そこでノイズやクロストークによって生じるセンサー動作点のズレを自動的に補償し、センサー感度を一定に保持するフィードバック制御アルゴリズムをFPGAにより実装した。図1はこの効果を端的に示したもので、フィードバック制御を用いない場合には量子ビットデバイス中の電子数変化を表す電荷遷移線が電圧範囲のごく一部でしか測定できない(左)のに対し、電圧クロストークをフィードバック制御によって取り除

くことで電荷遷移線が全域に渡って明瞭に測定できる(右)ことがわかる。

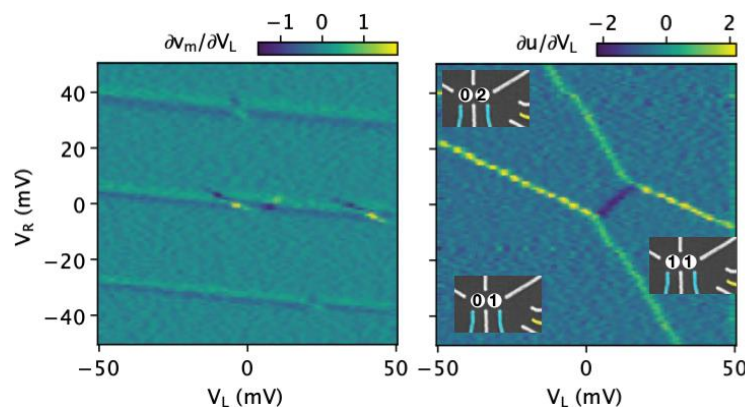


図 1 単一電子センサーフィードバック使用前（左）と使用后（右）の電荷状態測定例。左図では量子ビット制御電圧 (V_L , V_R) のクロストークによりセンサー動作点がずれて電荷遷移線が見えなくなるのに対し、右図では明瞭に観測されている。

センサーへの外乱に対してフィードバック制御が応答し安定化するまでに要する時間は、制御パラメータやフィルター回路の最適化により、およそ $2.2\mu\text{s}$ まで高速化することができた。さらにこのフィードバック制御を量子ビット制御パルスに同期してスイッチングすることにより、量子演算の実行時にオーバーヘッドを与えることなくセンサーを安定化させ、量子ビット単発測定の信号雑音比が向上することを実証した。これにより当初の目的を完全に達成することができ、論文化[代表論文 1]と特許の出願[特許出願 1]を行なった。

2) 量子ビット共鳴周波数キャリブレーションの開発

量子ビットの位相緩和時間は量子ビットの性能を表す代表的な指標であるが、それを支配する物理的メカニズムは様々である。特に固体系においては遅い時間スケールでの周波数ドリフト（準静的ノイズ）の影響が大きな割合を占める。そこで量子ビットそのものを高感度なノイズへのセンサーとして用い、FPGA 上でベイズ推定を実行してリアルタイムでノイズを検出し補償するフィードバック制御を実装した。特に本研究では高忠実度化が難しい2量子ビット操作である制御位相ゲートに応用した。わずか 200 ショットの量子ビット測定結果からリアルタイムで精度良く交換相互作用を推定することができ、約 10Hz の更新レートでの制御位相ゲートのキャリブレーションを実現した。この結果、交換相互作用のノイズスペクトルのうち 10Hz 以下の成分が抑制され、量子ビットの位相緩和時間を 60%程度改善することに成功した。量子ビットの動作条件にもよるが、制御位相ゲートの忠実度も大きく向上することが期待される。

一方、この手法では量子ビットそのものをノイズセンサーとして利用するため、一般的なキャリブレーション手法と同様に一定の測定オーバーヘッドを避けることができない。そこで量子ビットとは別のセンサーによってノイズを検出する可能性を探るため、デバイス上の複数量子ビット間のノイズ相関を調べた。この結果、電氣的ノイズが遠隔クーロン相互作用に起因することを反映し、特定周波数において強い相関が現れることを見出した[代表論文 3]。さらにこの研究過程で、当初は予想していなかったメカニズムによりデバイス中の核スピン集団を偏極させることによ

って量子ビット周波数を安定化させることが可能であることを見出した。これを利用すればノイズを測定することなく *in situ* な量子フィードバック機構によって量子ビット周波数の安定化を実現することができる。これにより大規模系への適用も容易な量子ビット安定化手法が実現するものと期待される。

3)量子ビットのフィードバック初期化

量子ビットを所望の状態に初期化できることは量子コンピューティングの最も基礎的な要件の一つであるが、シリコン量子ビット系の初期化忠実度は熱励起(実験系の温度)の制約を受けることに加え、デバイス構造上の制約も大きい。そこで量子ビットの状態を非破壊測定し、量子ビットが励起状態にある場合にのみビット反転パルスを照射するフィードバック操作(アクティブリセット)を実装した。この手法では原理的に初期化忠実度の上限が量子ビット測定の忠実度によって決まることになるが、同一量子ビットに対する複数回測定の結果から状態推定を実施することによって、量子ビット測定および初期化の忠実度が共に向上することを実証した(図 2) [代表論文 2]。当初のねらい通りに量子ビットの確実な初期化が実現できたが、このような制御はごく簡便な FPGA 上の処理によって実行可能であり、リソースのオーバーヘッドは少ない。また、実際の量子コンピューター上での応用においても、通常量子ビットの初期化は量子ビットの測定後に続いて行うことになるため、実行時間上のオーバーヘッドもほぼ存在しないことになる。一方でこの初期化方法の採用によってデバイス構造上の制約を回避できるメリットは大きく、大規模化に向けて重要な技術要素となることが期待される。

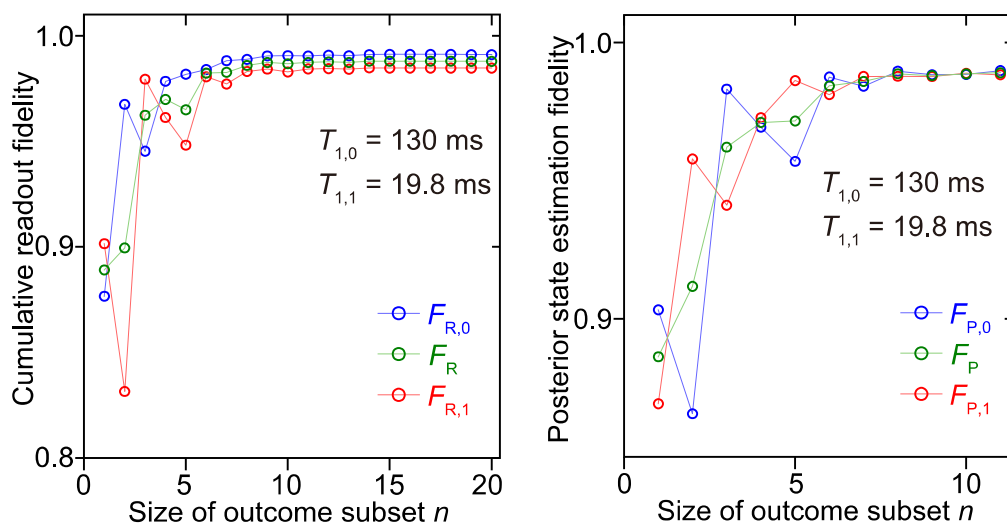


図 2 量子ビットの複数回非破壊測定による測定忠実度(左)と初期化忠実度(右)の向上。

4)量子コンピュータハードウェアの制御API

以上のようなリアルタイム制御を伴う高度な量子ビット制御実験を実施するための共通ソフトウェア基盤として、制御 API の整備を進めている。特にソフトウェア研究者にとってもアクセスしやすい環境を整えるため、Qiskit との部分的な統合を目指して作業を進めている。

3. 今後の展開

本課題の開発成果はいずれも現実の量子ビット実験において実用的な技術であり、今後量子コンピュータの大規模化が進むに連れてますます重要になると考えられる。現在は経験的に人間の手で実施している様々なキャリブレーション、エラー補正操作を本成果あるいはその発展形の活用により自動化・高速化することで、大規模な量子コンピュータの実現が視野に入ってくることが期待される。

また、本研究では市販の量子ビット制御装置とFPGAを用いることでアルゴリズムの実装を行なったが、現在精力的に開発が進められている量子ビット制御専用の集積回路にもいずれ組み込むことが可能である。大規模化の実現にはまだ多くの技術要素の開発が必要であるが、企業との連携も取り入れることで大きく発展することが期待される。

4. 自己評価

量子ビットデバイスに対するリアルタイム制御技術およびシリコン量子ビットデバイス開発のいずれにおいても、世界でトップレベルの研究に取り組むことができたと考えている。量子コンピュータの実用化に対する社会の期待は極めて大きい、その実現に向けた科学的・技術的な課題はまだ多い。本さがけ研究の成果は、実際に量子コンピュータハードウェアの基礎研究に携わる者の立場から見てその困難の一部に解決の糸口を見出すものであり、将来の量子コンピュータに不可欠な技術基盤を構成することになると考えている。

5. 主な研究成果リスト

(1) 代表的な論文(原著論文)発表

研究期間累積件数: 14件

1. <u>Takashi Nakajima</u> , Yohei Kojima, Yoshihiro Uehara, Akito Noiri, Kenta Takeda, Takashi Kobayashi, Seigo Tarucha, “ <i>Real-Time Feedback Control of Charge Sensing for Quantum Dot Qubits</i> ”, Physical Review Applied, 2021, 15, L031003
シリコンスピン量子ビットの読み出しには、単一電子の電荷状態をマイクロ秒程度の時間で識別することのできる高感度な単一電子センサーを用いる。この単一電子センサーはノイズに対しても非常に敏感であり、測定のダイナミックレンジが狭いという課題があった。そこでセンサーのノイズを検出し量子ビットデバイスに対してフィードバック制御をかけることで、高ダイナミックレンジ化と低ノイズ化を実現した。
2. T. Kobayashi, <u>T. Nakajima</u> , K. Takeda, A. Noiri, J. Yoneda, S. Tarucha, “ <i>Feedback-based active reset of a spin qubit in silicon</i> ”, npj Quantum Information, 2023, 9, 52
シリコン量子ビットの初期化にはリザーバーとの電子の交換が利用されるが、この方法では各量子ビットに付随するリザーバー構造と、量子ビットのエネルギーに対して十分に低い温度環境が必要とされる。この課題を克服するため、量子ビット状態を非破壊測定によって読み出し、結果に応じてビット反転パルスを照射することでフィードバックによる量子ビット初期化を実現した。さらに測定を複数回繰り返すことで測定・初期化忠実度を向上させた。
3. J. Yoneda, J. S. Rojas-Arias, P. Stano, K. Takeda, A. Noiri, <u>T. Nakajima</u> , D. Loss, S. Tarucha, “ <i>Noise-correlation spectrum for a pair of spin qubits in silicon</i> ”, Nature Physics, 2023,

10.1038/s41567-023-02238-6

量子ビットのノイズを検出し量子ビット制御パルスにフィードバックすることで、制御や測定の忠実度を向上させることができる。従来、量子ビット間のノイズには相関が無いものと仮定して様々な制御方法が検討されてきたが、複数の量子ビットのノイズを同時測定し相関を調べることで、遠隔クーロン相互作用によって特定周波数成分に相関が現れることを見出した。

(2) 特許出願

研究期間全出願件数：1 件(特許公開前のものは件数にのみ含む)

1	発 明 者	中島峻, 小嶋洋平, 樽茶清悟
	発 明 の 名 称	測定装置、測定方法、製造方法、量子コンピュータ、制御方法、及び、集積回路
	出 願 人	国立研究開発法人理化学研究所
	出 願 日	2021 年 1 月 29 日
	出 願 番 号	2021-013935
	概 要	シリコンスピン量子ビットの電荷状態を検出し量子ビット読み出しに用いる単一電子センサーを安定化し、高ダイナミックレンジ化と低ノイズ化を実現する自動調整回路の発明である

(3) その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

- [招待講演] “シリコンスピン量子ビットによる量子情報処理”, 応用物理学会量子情報工学研究会「量子情報工学の最前線」(2022)
- [招待講演] “シリコン3ビット量子プロセッサのユニバーサル制御”, 日本物理学会 第77回年次大会 (2022)
- [招待講演] “シリコンスピン量子ビットによる量子コンピュータ開発”, 電気情報通信学会量子情報技術研究会 QIT46 (2022)
- [招待講演] “Building a Tiny Quantum Computer with Silicon Quantum Dots”, 22nd International Conference on Electron Dynamics in Semiconductors, Optoelectronics and Nanostructures (2023)
- [受賞] 第14回 (2022年度) 応用物理学会 シリコンテクノロジー分科会 論文賞