

モデル予測制御を用いたハイブリッド型量子誤り訂正手法の開発 —現代の機関制御技術を量子コンピューティングの世界へ—

1. 背景

現在、実用的な量子コンピュータを作る上で大きな問題となるのが、ハードウェアのノイズである。このようなノイズにさらされる環境の中で量子誤り訂正は、誤り問題に取り組むための重要なツールとなっている。従来の誤り訂正符号は、時間離散的にシステムと結びついた補助系を測定し、そこから得られた情報をもとにシステムの状態を推定し、状態の訂正を行っていた。この手法では、測定を行った補助系のリセット中にシステムにエラーが発生した時に発生するエラーなどに対処できない。そこで、量子ハードウェアのエラーを訂正するもう一つの手法として、フィルタリングとフィードバック制御理論に基づいた連続的な量子誤り訂正が存在する。これは、システムと結びついた補助系に対して弱測定を連続的に行う。これによって補助系の崩壊を起こすことなく連続的に部分情報を得ることが可能になる。しかしながら、連続的な量子誤り訂正手法では、数理モデルに対する頑強性が求められる。つまり、誤り訂正のために指定したエラーモデルと実際にシステムに発生するエラーモデルに対してズレが生じた時に対応ができなくなってしまう。

2. 目的

本プロジェクトでは、モデル予測制御に注目した。モデル予測制御は、現代の機関制御技術で、自動運転やロボット、ロケットの制御など様々な産業分野で成功を収めている制御手法である。この手法では、システムの観測をもとにシステムのダイナミクスを推定し、それをもとにシステムの制御を行う。そこで、本プロジェクトでは、連続的な量子誤り訂正手法にモデル予測制御を組み合わせた新しい量子誤り訂正スキームの開発を行う。

3. ソフトウェア開発内容

はじめに、量子回路の定式化について説明していく。GHZ 状態生成のための量子回路(図 1)を例にとる。この時、第 1, 2 量子ビットの CNOT ゲート演算時にビットフリップノイズが発生すると仮定すると、以下のように CNOT ゲート演算時のシステムの時間発展のダイナミクスを定式化することができる。

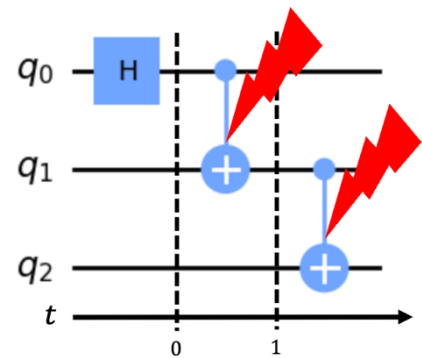


図 1. GHZ 状態生成のための量子回路

$$\begin{aligned}
 d\rho_c(t) = & -i[H_{cnot} \otimes I, \rho_c(t)]dt + \gamma(\mathcal{D}[XII] + \mathcal{D}[IXI])dt + \kappa(\mathcal{D}[ZII])\rho_c(t)dt \\
 & + \sqrt{\kappa}(\mathcal{H}[ZII]dW(t))\rho_c(t) - i\lambda(u_1(t)[XII, \rho_c(t)] + u_2(t)[IXI, \rho_c(t)] \\
 & + u_3(t)[IIX, \rho_c(t)] + u_4(t)[YII, \rho_c(t)] + u_5(t)[IYI, \rho_c(t)] \\
 & + u_6(t)[IIY, \rho_c(t)] + u_7(t)[ZII, \rho_c(t)] + u_8(t)[IZI, \rho_c(t)] + u_9(t)[IIY, \rho_c(t)])dt
 \end{aligned}$$

ここで、第二項がエラーによる状態変化を表しているので、第 1, 2 量子ビットの CNOT ゲートの演算時には第 1, 2 量子ビットにビット反転エラーが発生するという意味になっている。以上のように多量子ビット演算時には一般に大きなエラーが発生するとされているので、toffoli ゲートのような複数回量子回路による演算を行う時にもそれら全ての演算回路について定式化を行うことができる。

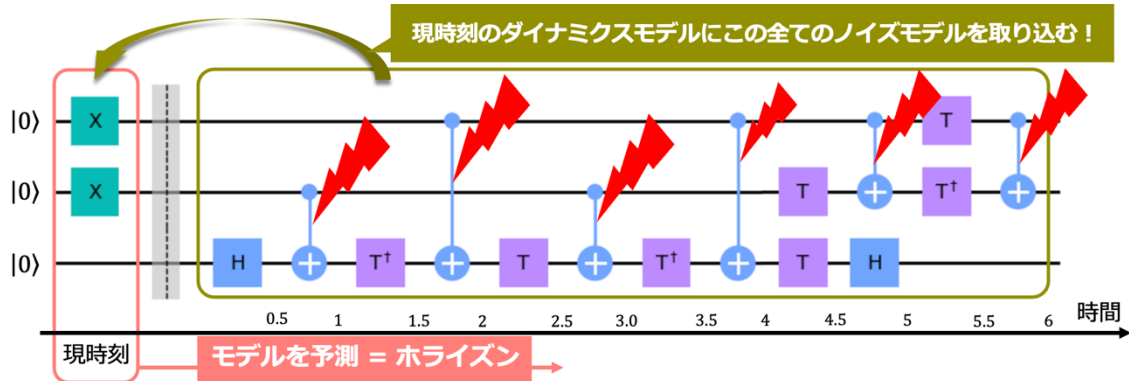


図 2. 予測モデルの定式化

実際、量子コンピュータで演算を行う際にはあらかじめ量子ゲートの適用するタイミングというものがわかっている。そこで、現時刻の段階で将来演算で利用するすべての量子回路についてエラーモデルを含めて定式化を行い、それを現時刻のモデル予測制御のためのダイナミクスモデルとして取り込むことで、演算中に発生するエラーをモデル予測制御を用いて予測して叩くような誤り訂正スキームの開発を行った。また、本プロジェクトでは、エラーを制御するためのモデル予測制御手法としてモンテカルロモデル予測制御を採用した。これは、確率非線形系においてもオンラインで実行できるサンプルベースのモデル予測制御手法で、量子系のダイナミクスも確率非線形系であるため適していると考えた。具体的な流れとしては、まず多数の解過程を用意し、そこから評価関数を用いて代表的な解過程を何個か選抜し、その加重平均をとるというものである。これにより、エラーに対処するための最適解が計算され、実際にシステムに入力される。全体の流れは図 3 にまとめた。

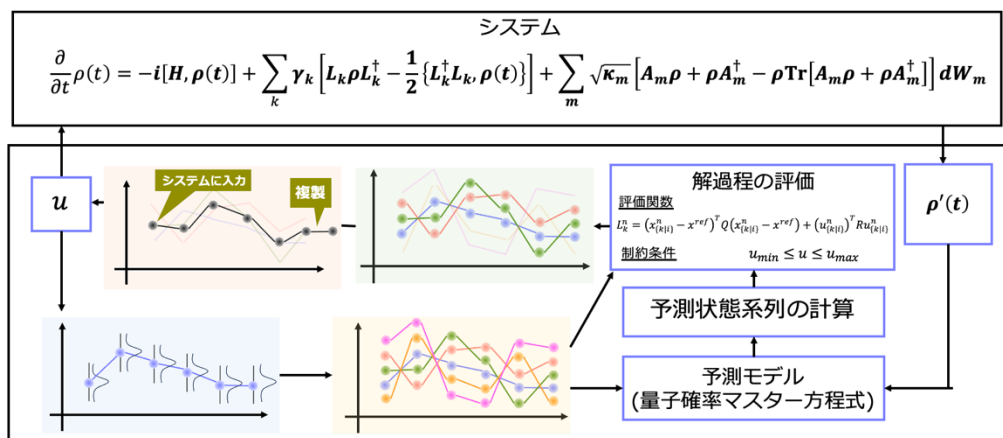


図 3. 提案手法の全体図

4. 新規性・優位性

モデル予測制御を量子誤り訂正の枠組みに組み合わせたのは本提案が初めてのものだった。そこで、まず従来の連続量子誤り訂正手法の性能と比較して、性能の検証を行った。従来手法に比べホライズンの長さを調整することで、オーバーシュートを起こさない安定した誤り訂正を可能にし、また誤り訂正完了までの時間も従来手法より優れたものとなった。しかし、ホライズンを長くしすぎると、エラー訂正にかかる時間が長くなり、ホライズンを短くしすぎると、オーバーシュートを起こしてしまっている。つまり、エラー訂正を行うための最適な予測ホライズンの長さが存在し、その時においては提案手法は、従来手法より応答性が良く、安定した量子誤り訂正を実現できるということがわかった。

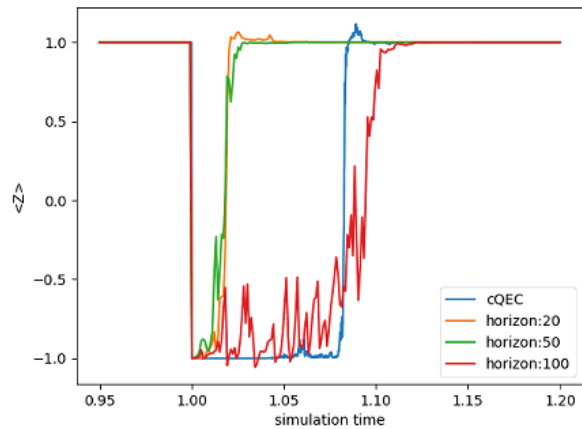


図 4.1 量子ビットでの誤り訂正の性能比較

次に、複雑に目標が変化する中での提案手法の性能検証を行った。検証のために図 2 で示した toffoli ゲートの演算回路を用い、最終的な目標状態と今いるべき状態の忠実度の変化を評価の指標として性能の検証を行った (図 5)。ホライズンの長さが短いときは目標とする忠実度の変化を追うことができていないが、ホライズンの長さを長くしていくことによって、徐々に目標とする忠実度の変化に追従するようになった。これは、将来生じるノイズを長く考慮することで提案手法の性能が大きく向上したということができ、モデル予測制御によるエラー訂正の効果を複雑にシステムのモデルが切り替わる制御対象に対しても確認することができた。本開発物であるモデル予測制御を用いた量子誤り訂正は、弱い測定から弱いフィー

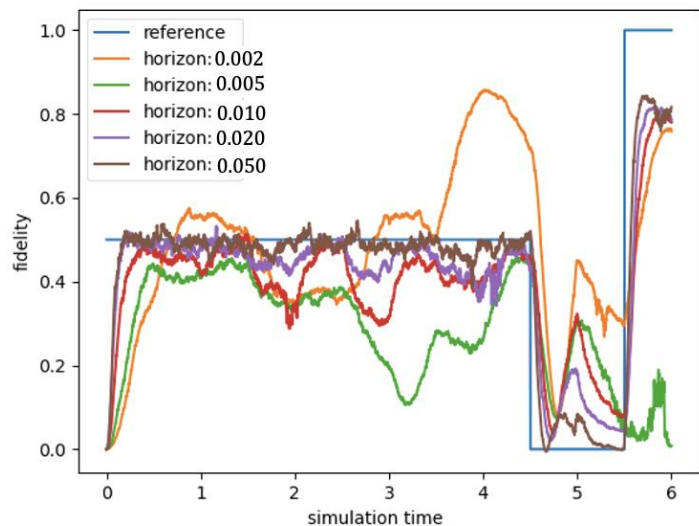


図 5. Toffoli ゲート演算中の忠実度の変化

ドバックを返している。そこで、現行の量子誤り訂正の問題点であるフィードバックのパルスが強いことが原因で再度エラーが発生するといった問題に直接的にアプローチできる。また、今回はエラーモデルが既知の中で検証を行ったが、エラーモデルが未知の中でもシステム同定などを行ってエラーモデルを同定するということが可能であれば、表面符号などの誤り訂正方式よりもより少ない補助量子ビットでエラー訂正が可能になり汎用型量子コンピュータ実現のための量子ビットのオーバーヘッドの問題にもアプローチできる。

5. 期待されるユーザー価値と社会へのインパクト

現行の量子誤り訂正手法には様々な問題点が存在する。例えば、エンコーディングやデコーディング、補助量子ビットのリセット中に生じるエラーに対しては検知することができずそのために、修正を行えないということがある。また、エラー訂正のためにかける修正フィードバックが強すぎるためにそのフィードバックが再びエラーを起こすというような問題も存在する。本提案手法では状態推定に予測モデルを用いたことから従来の連続的な量子誤り訂正手法よりも応答性よく安定したスキームを提供することができた。また、将来のノイズモデルを予測しながら訂正を行うためオーバーヘッドの問題にもアプローチできると考えられる。特に昨今報告されている機械学習を用いたシステム同定などの技術を本手法に応用することでより汎用性の広い誤り訂正手法になる可能性がある。そこで、本プロジェクトの成果によって汎用型量子コンピュータ実現のための量子誤り訂正スキームに新しい方向性を与えることができると考えられる。これにより、より様々な産業分野に量子コンピュータの応用が可能になる。実際に量子コンピュータのデバイス設計にこの技術を応用することでより良い量子コンピュータの設計が行えると考える。

6. 氏名（所属）

笠原 伸容(電気通信大学大学院基盤理工学専攻)