

量子情報処理のための 連続量光量子リザーバコンピューティング技術の開発 — 実用的な量子タスクの提案と検証 —

1. 背景

量子力学を用いて現行のコンピュータ(古典コンピュータ)とは根本的に異なる原理で働く計算機の開発として、量子コンピュータの研究が進められている。量子コンピュータは特定の問題に対して、古典コンピュータより計算量が大幅に削減できることが明らかになり、基礎研究から産業面まで幅広い注目を集めている。これを実現するための物理的な方式は様々考案され、実装へ向けて理論/実験の両面から開発が進められている。中でも超伝導体素子を使用した量子コンピュータは google 社や IBM 社など複数の大手 IT 企業らが開発を先導しており、古典コンピュータを用いると 10,000 年かかる計算を量子コンピュータの活用により 3 分で解決したことや誤り訂正符号を実装したことなど、実用化への期待を持たせる報告が続いている。

様々な実装方式の中に、光を使用した量子コンピュータがある。光を使用する場合、他の方式とは異なり、常温・大気中で量子性を保持できるため、大規模な冷凍装置や真空装置などが不要である。光はそれ以外の方式と比較して高速な量子操作が可能であることも利点である。また一般に、光量子技術は量子コンピュータのみではなく、量子通信や量子センシングなど量子情報処理分野において幅広く利用されている。

光を使用した量子計算を実現する手法として、光の偏光状態や単一光子状態などの“離散量”を量子ビットとして符号化する手法と、コヒーレント状態などの古典的な電磁場の振幅に対応する直交位相振幅を用いた“連続量”を量子ビットとして符号化する手法の2つが提案されている。特に連続量に関しては、Gottesman-Kitaev-Preskill (GKP) 状態と呼ばれる特殊な光の状態を使用した量子計算体系は、白色ノイズやフォトンロスに対して高い耐性を持ち、実装が難しい非クリフォードゲートと呼ばれる操作なしでの、比較的実装が簡単な線形光学操作の範囲でユニバーサルな誤り耐性型量子計算が可能とされている。この GKP 状態は光学系での生成が非常に困難なことが指摘されていたが、近年、生成の原理実証がなされた。これにより、大規模光量子コンピュータの実現への期待が高まっている。

リザーバコンピュータとは、ニューラルネットワークにおける大部分の学習変数を固定し最終出力層のみの学習を行うという大胆な仮定の下で、学習の低コスト化と精度の最低保証を達成するものとして提案された。始めは、再帰的ニューラルネットワーク(RNN)の学習変数を固定し、固定した部分の変換には「高次元・非線形な変換」と「短期記憶」の能力のみを残したりザーバ(ため池)にデータを流した計算結果に対して、小規模な線形学習層を接続し推論を行うエコステートネットワークとして提案された。この設定は、問題ごとに要求する推定精度を保ちながら、大部分の変数を固定しているため学習にかかるコストが大幅にカットされ、高速・低コストな時系列データ処理が可能となっている。上記の2つのリザーバ特性を保持してさえいれどのようなシステムでもリザーバとして使用できることを活かし、実際の物理系をリザ

バーに用いた、物理リザーバコンピュータが考案されている。ここで言う物理系は多岐にわたっており、リザーバの名前通り水面に発生させた波や、タコの足の複雑な動きを利用したものもある。そのうち、リザーバに量子系を用いるものを量子リザーバコンピュータと呼ぶ。例えば、量子ビット系をリザーバに用いた場合、量子状態の重ね合わせによって 2^N 個の状態ベクトルで表すことができる。これを活かすと、学習器に求められる「高次元性」は素朴に満たすことができる物理系となっている。連続量は原理上無限次元の量子状態であることから、この表現力を更に活用できる可能性を秘めている。

2. 目的

本プロジェクトでは連続量の光量子情報処理技術の実装における具体的な課題をリザーバコンピュータで解決することを目指す。最終的には、リザーバコンピュータを用いて光量子コンピュータを始めとする光量子情報処理技術の発展に寄与することが目標である。光量子情報処理技術を実現する上での“エッジ”になるような立ち位置での活用を期待したものであると言い換えることもできる。

3. ソフトウェア開発内容

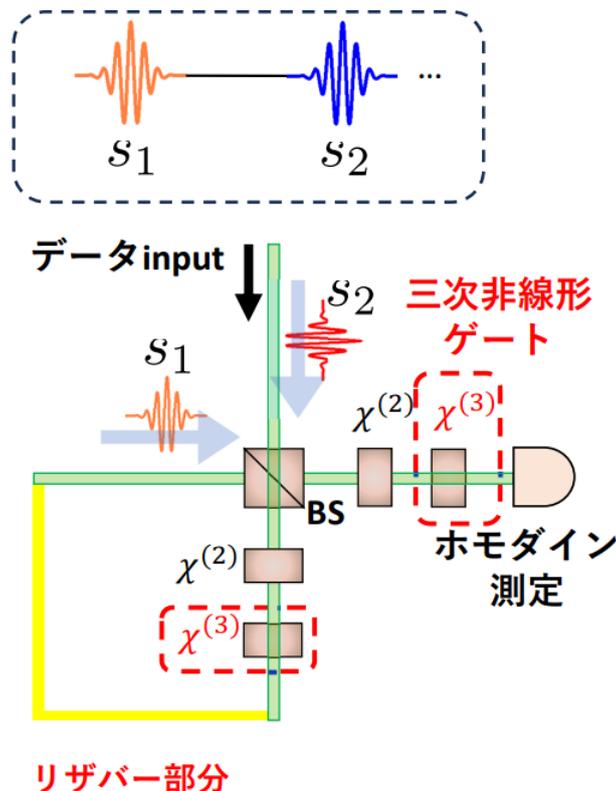


図 1 提案したリザーバの光学系。

プロジェクトでは、図 1 に示すような非ガウシアン操作を組み込んだ連続量光量子リザーバコンピュータを提案し、そのシミュレータを作成した。次に古典データに対

するリザーバーの非線形変換能力，及び短期記憶能力を測る指標である Information Processing Capacity(IPC) を実装し，提案手法の性能評価を行った．その後，入力を連続量量子状態とした連続量量子タスクを複数考案し，リザーバー計算のフレームワーク上に実装した．

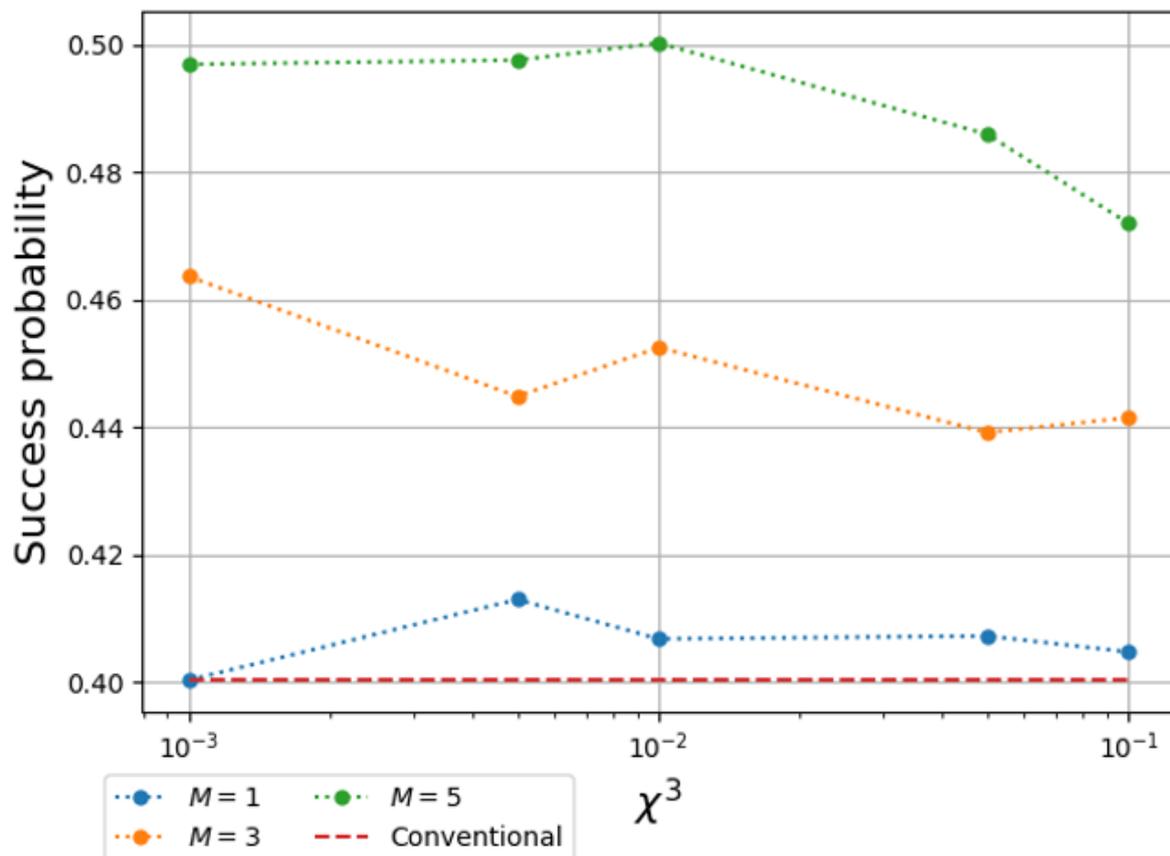


図 2 擬ベル測定の成功確率

図 2 は考案した連続量量子タスクのうち，擬ベル測定についてシミュレーションを実行した結果である．シミュレーションではデータ数を学習データ 14000，検証データ 6000 と設定した．この結果から，ステップ数が $M = 1$ の最小設定においても従来手法より高い確率での擬ベル測定が可能なることを明らかにした．その一方，今回計算したパラメータの範囲では三次非線形性 χ^3 に対する依存性が見られないことも明らかとなった．

4. 新規性・優位性

本プロジェクトで提案した連測量光量子コンピュータは入力を量子状態にすることができる．一方で古典リザーバーコンピュータでは量子状態の“測定結果”は入力可能であるが，“量子状態”を直接入力することはできない．つまり，リザーバーで処理を行いたい直接の対象である量子状態を入力とすることが可能である点が，古典リザーバーコンピュータに対する第一の優位性である．しかし現在に至るまで，この利点を活か

した量子リザーバー計算は提案されていない。この現状に対し、我々は擬ベル測定を、リザーバーを用いない従来の測定手法よりも高い確率で実行することが期待できるシステムを示した。

5. 期待されるユーザー価値と社会へのインパクト

本プロジェクトで検証した連続量量子タスクのうち、擬ベル測定は量子計算や量子通信といった量子情報処理技術で広く使われている。例えば、量子計算では連続無限次元状態をコヒーレント状態に符号化するキャット符号と呼ばれるものがある。この符号の下での論理量子ビットは以下のように定義される。

$$|0_{cat}\rangle = \frac{1}{\mathcal{N}_\alpha^+} (|\alpha\rangle + |-\alpha\rangle)$$
$$|1_{cat}\rangle = \frac{1}{\mathcal{N}_\alpha^-} (|\alpha\rangle - |-\alpha\rangle)$$

このような状態はスクイーズド真空状態に対して光子引き去りを行うことで生成可能であるが、現在の技術ではこの操作の忠実度が低く、振幅が小さい状態しか成功できない。また、このような手法で生成されたキャット状態は振幅が小さい。振幅が小さいほど、擬ベル測定の成功確率は低くなってしまう。

量子計算のみならず、量子通信分野でも擬ベル測定は行われる。コヒーレント状態を量子通信によって長距離伝送すると以下のように振幅が減衰する。

$$|\alpha\rangle \rightarrow |e^{-\eta}\alpha\rangle$$

ここで $\eta = L/L_{att}$ であり、 L が伝送距離、 L_{att} が減衰距離 (attenuation length) である。このようなロスの存在によって、量子状態を伝送可能な距離には限界がある。中間地点を設けることでこの課題の解決を行う、量子中継という方法がある。量子中継も、擬ベル測定によって実装可能である。このことから、小さい振幅でも高い確率で擬ベル測定が可能であれば、量子中継を行う回数を減らすことができると期待される。本研究において改善の兆しが見られた擬ベル測定を活用することで、量子コンピューティングの実用化への障壁を下げること、また量子通信のコストを低減することなど、多様な応用展開を見込むことができる。

6. 氏名 (所属)

小島 颯太 (北海道大学 大学院情報科学院)

桐生 翔平 (北海道大学 大学院情報科学院)

清水 忠臣 (北海道大学 大学院情報科学院)