

論文の内容の要旨

論文題目 古典非線形フィードフォワードと
非ガウス型補助状態を用いた非ガウス型量子測定の実現

氏名 阪口 淳史

1. 研究の背景

ムーアの法則にしたがう指数的な計算速度の増大に限界が見えつつある中、重ね合わせ状態や量子もつれといった、古典的には考えられない量子的な特性を活かして計算を行う量子コンピュータが注目を集めている。量子コンピュータは、従来の計算機では時間がかかるある種の問題を、圧倒的に速く解けると期待されているためである。

光は、高い量子化エネルギーを持ち、また通信との互換性が非常に高いという特徴から、量子コンピュータのハードウェアとして注目されている。特に光の直交位相振幅に着目した連続量量子計算は、クラスター状態と呼ばれる大規模なエンタングルド状態を比較的簡単に生成できることから、それに対する測定及びフィードフォワードによる演算（一方向量子計算[1]）を用いて、プログラマブルかつスケーラブルな演算が可能である [2]。実際、時間領域に局在した波束モードに着目した時間領域多重の方法を用いて、クラスター状態の生成や[3, 4]、それに対する様々なガウス型操作が実験的に実現されている [5, 6]。

一方、光の連続量量子計算を行う上でネックになっているのが、ガウス型操作しか実現されていないという点である。連続量の量子情報処理における操作は、ハミルトニアン \hat{H} の次数によって2次以下のガウス型操作、3次以上の非ガウス型操作に分類される。任意の量子操作を行うには、任意のガウス型操作に加えて、非ガウス型の操作が少なくとも一つ必要になることが知られている [7]。更に、クラスター状態とガウス型操作だけでは従来の計算機で効率的にシミュレートできてしまうことから [8]、残る非ガウス型

操作の実現こそが最大の課題である。

非ガウス型操作は高次の非線形光学効果に対応しており、量子的な効果が顕著になる微弱光に対して、十分な効果を得るのは難しい。しかし、この問題も、測定およびフィードフォワードを用いた測定誘起の手法により回避することができる[9]。近年、3次位相ゲートと呼ばれる非ガウス型操作を、非ガウス型測定と変位操作により実現する提案がなされた[10]。この提案では、非ガウス型測定自体も非ガウス型の補助状態と線形なホモダイン測定及び非線形な演算を含むフィードフォワードにより実装できる。

2. 研究の概要

本研究では、測定誘起の手法による3次位相ゲートの中核となる、非ガウス型量子測定の実装を世界で初めて行った。その内容は、具体的にはⅠ) 必要な非ガウス型補助状態の生成と、Ⅱ) それを用いた測定及びフィードフォワードによる非ガウス型測定の実装という2段階で構成される。

Ⅰ) 直交位相振幅をリアルタイムに測定可能な非ガウス型補助状態の生成

時間領域に局在する波束モードに対しては、測定及びフィードフォワードを用いた操作は素早く行うことが重要である。というのも、操作を受ける波束は測定及びフィードフォワードに対してタイミングを合わせる必要があり、その遅延が大きい場合、長大な光学遅延路が実験系を不安定にしてしまうからである。本章では、先行研究で開発された、リアルタイム測定可能な非ガウス型状態の生成手法に基づき[11]、高速に直交位相振幅を取り出せる時間幅20ns以下の波束モードに、真空場と単一光子の重ね合わせ状態を生成した。これは、適切な重ね合わせ係数の下で理想的な非ガウス型補助状態の低次の近似状態となる。

更に、生成する状態の重ね合わせ係数を変化させ、補助状態の不完全性に由来する非線形なノイズ項の評価を詳細に行った。その結果、高速に扱える波束モードにおいて、任意のガウス型状態及びその混合よりも、測定のノイズを抑制できる状態の生成に成功したことが確認できた。この特性を本論文では非線形スキージングと呼び、3次位相ゲートを構成する量子的な非ガウス型測定を実現する上で不可欠な性質である。Ⅱでは実際に生成した重ね合わせ状態を非ガウス型測定の補助状態として用いた。

Ⅱ) 非ガウス型補助状態を用いた非ガウス型量子測定の実装

非ガウス型測定は、非ガウス型補助状態と非線形な演算を含むフィードフォワードにより実装できる。これまで、3次位相ゲートの要素技術として、十分ゆっくりと変化する外部からの電気信号に基づく非線形フィードフォワードを実現する研究はあったが[12]、実際に非ガウス型補助状態を用いて、量子状態の測定結果をもとに非線形フィードフォワードを行った研究は初めてである。

非線形フィードフォワードでは、波束モードの直交位相振幅を取り出した後に非線形演算を行い、その値を一定期間ホールドする必要がある。特に、非ガウス型状態の入った波束の時間幅が短い場合、到来する一瞬に合わせて直交位相振幅の値を取得しなければ、非ガウス型状態の情報が失われやすいため、タイミングの精度が重要である。

この瞬間の値を捕まえてフィードフォワードに用いる技術は、本研究で新たにFPGA(Field Programmable Gate Array)の可変遅延機能を用いて高精度に波束の到来タイミングを判別する仕組みで実装した。これにより、時間幅の短い波束モードに入った非ガウス型補助状態を非線形フィードフォワードに導入することができた。

実装した測定では、真空場の被測定状態に対して、ガウス型状態の限界よりも測定の分散を減らせることを示した。適切な非ガウス型補助状態を用いなければ破れない限界値であるから、低次の非ガウス型補助状態の僅かなノイズ抑制効果を実際に活かした測定になっていることを証明できた。

より一般の状態に対する振る舞いは、様々なコヒーレント状態を用いて、実現された測定の射影先をトモグラフィーすれば評価でき、射影先の状態を表すQ関数として得られる。実際に本研究で得られたQ関数は、予想された放物線形状にフィットした形になっている。また、非ガウス型補助状態の精度として着目した非線形スクイーズは、射影先の状態にも同様の指標を用いることができ、かつQ関数から直接評価できるため、精度よく量子的な非ガウス性について検証できる。

本研究で実装した非ガウス型測定をクラスター状態と組み合わせることで、任意の量子操作が可能になる。非ガウス型補助状態として低次の近似状態を用いているため、クラスター状態への要求は厳しいが、補助状態の近似精度を上げることで条件は緩和される。また、本研究で開発した非線形フィードフォワードの技術は、使用する補助状態を変更すれば特定の誤り訂正符号におけるnon-Cliffordな演算を誤り耐性のある形で実装するのもにも直接使用でき、エラー訂正可能な汎用量子計算の実現に近づいたといえる。

参考文献

- [1] R. Raussendorf, D. E. Browne, and H. J. Briegel. Measurement-based quantum computation on cluster states. *Physical Review A* 68, 022312(2003).
- [2] A. Furusawa. Perspective on hybrid quantum information processing: A way for large-scale quantum information processing. *Journal of Optics*, 19, 070401-1-3(2017).
- [3] J. Yoshikawa, S. Yokoyama, T. Kaji, C. Sornphiphatphong, Y. Shiozawa, K. Makino, and A. Furusawa. Generation of one-million-mode continuous-variable cluster state by unlimited time-domain multiplexing. *APL Photonics* 1, 060801(2016).
- [4] W. Asavanant, Y. Shiozawa, S. Yokoyama, B. Charoensombutamon, H. Emura, R.

- N. Alexander, S. Takeda, J. Yoshikawa, N. C. Menicucci, H. Yonezawa, and A. Furusawa. Generation of time-domain-multiplexed two-dimensional cluster state. *Science* **366**, 373(2019).
- [5] W. Asavanant, B. Charoensombutamon, S. Yokoyama, T. Ebihara, T. Nakamura, R. N. Alexander, M. Endo, J. Yoshikawa, N. C. Menicucci, H. Yonezawa, and A. Furusawa. One-hundred step measurement-based quantum computation multiplexed in the time domain with 25 MHz clock frequency. Arxiv:2006.11537[quant-ph].
- [6] M. V. Larsen, X. Guo, C. R. Breum, J. S. Neergaard-Nielsen, U. L. Andersen. Deterministic multi-mode gates on a scalable photonic quantum computing platform. Arxiv:2010.14422[quant-ph].
- [7] S. Lloyd, and S. L. Braunstein. Quantum computation over continuous variables. *Physical Review Letters* **82**, 8(1999).
- [8] S. D. Bartlett, B. C. Sanders, S. L. Braunstein, and K. Nemoto. Efficient Classical Simulation of Continuous Variable Quantum Information Processes. *Physical Review Letters* **88**, 9(2002).
- [9] D. Gottesman, A. Kitaev, and J. Preskill. Encoding a qubit in an oscillator. *Physical Review A* **64**, 012310(2001).
- [10] K. Miyata, H. Ogawa, P. Marek, R. Filip, H. Yonezawa, J. Yoshikawa, and A. Furusawa. Implementation of a quantum cubic gate by an adaptive non-Gaussian measurement. *Physical Review A* **93**, 022301(2016).
- [11] H. Ogawa, H. Ohdan, K. Miyata, M. Taguchi, K. Makino, H. Yonezawa, J. Yoshikawa, and A. Furusawa. Real-time quadrature measurement of a single-photon wave packet with continuous temporal-mode matching. *Physical Review Letters* **116**, 233602(2016).
- [12] K. Miyata, H. Ogawa, P. Marek, R. Filip, H. Yonezawa, J. Yoshikawa, and A. Furusawa. Experimental realization of a dynamic squeezing gate. *Physical Review A* **90**, 060302(R) (2014).