

## 論文の内容の要旨

論文題目 大規模な量子光学系のデジタル回路による位相制御の研究

氏 名 岡田 将典

近年、様々な物理系を用いて、古典的なコンピューターを遥かに上回る性能を持つとされる量子コンピューターの実装が試みられている。伝搬する光を用いた手法では、エンタングルメントのリソースとしてスクイーズド光を用い、直交位相振幅の測定と、その結果に基づくフィードフォワード操作をすることによって計算が実現される。特に、伝搬する光を用いた実装では、時間方向に量子エンタングルメントを生成する時間領域多重を用いることができ、計算の大規模化において最も進歩した物理系となっている。

エンタングルメントの生成、測定、フィードフォワード操作は、光の干渉を用いて行なわれ、光の相対位相の制御が実験的な課題となる。位相を乱す外乱がある中で、適切な値に位相を留めるためには、フィードバック制御が用いられる。フィードバック制御の性能は、制御可能な周波数帯域に制限され、大きいほど外乱を抑制する性能が高い。

量子計算において光のロスは許容されないため、位相制御は、ピエゾ素子によって高反射ミラーの位置を動かし、光路長を変化させることで行われる。制御コントローラーとしては、アナログ回路による実装が容易であることから、PI 制御が用いられてきた。しかし、ピエゾ素子つき高反射ミラーの機械的な共振が PI 制御の帯域を制限するため、制御帯域は機械構造に対応して、10kHz 以下に留まることが多かった。また、アナログ回路による実装では、制御点を人間が設定せざるを得ず、数 10 もの干渉箇所ですべての制御点を最適値に設定することが事実上不可能となってきた。

機械的な共振を避けつつ広帯域に制御する方法としては、デジタル回路によって高次のフィルターを作り、機械構造を無効化して制御帯域を広げた例がある [A.Ryou and J. Simon, Rev. Sci. Instrum. **88**, 013101 (2017)]。しかし、この実装方法では  $2.5\mu$  秒の遅延を持ち、10kHz 以上にあるピエゾ素子の共振構造を打ち消すことはできず、本研究での用途に使うには高速化が求められる。また、この手法ではコントローラーはデジタルフィルターとは別のアナログ回路によって実装されていたために、制御箇所を人間が設定せざるを得ないという問題は依然として残っている。

本研究では、市販の redpitaya を用いて、遅延 350n 秒の 24 次 IIR フィルターを構成し、10kHz 以上の機械構造のキャンセルを実現した。また、redpitaya 単体でピエゾ素子の周波数応答を測定し、制御対象の伝達関数を測定できるようにした。これにより、ネットワークアナライザー等を用いずに、コントローラー単体でピエゾ素子に応じたフィルターを構成することが可能となる。また、実装したコントローラーをマッハツェンダー干渉計の位相制御に用い、PI コントローラーと比較してより広帯域に位相制御ができることを示した。さらに、実際に量子光学実験に用いられたスクイーズド光生成系を用いて、現実的な実験系で制御点の自動調整を実装して、大規模な干渉計の自動制御の基礎技術を確立した。

### 低遅延・高次 IIR フィルターの開発

フィードバック制御のコントローラーは、つまるところはフィルターであり、フィルターの次数が高いほど複雑な制御が可能となる。また、フィードバック制御は時間遅延が制御帯域を制限するため、フィルターの時間遅延が小さいことが重要である。

先行研究では、redpitaya を用いた 25600 次の  $2.5\mu$  秒の遅延の FIR フィルターが開発された[A.Ryou and J. Simon, Rev. Sci. Instrum. **88**, 013101 (2017)]。FIR フィルターは、時間領域のたたみこみを直接的に実装する形であり、所望のフィルターのインパルス応答をフィルターの係数として利用する。従って、フィルターの次数は必要な周波数分解能(インパルス応答の時間刻み)によって決める必要があり、高次のフィルターにならざるを得ない。FPGA に搭載されている掛け算のリソースは限られていて、Redpitaya で同時に実行できる掛け算は 80 個である。先行研究の FIR フィルターによる実装では、1 つの出力の計算に 25600 回の掛け算を必要としたために、余分な遅延が生じて  $2.5\mu$  秒の時間遅延となった。

本研究では、同じ redpitaya を用い、IIR フィルターを用いて高次フィルターを実装することで、350n 秒の遅延の 24 次フィルターを実現した。IIR フィルターは、伝達関数を直接構成する形で、フィルターの係数には伝達関数の多項式の係数に対応する。そのため、必要な掛け算の回数はフィルターの次数に比例し、高々数 10 回で十分である。一方で、IIR フィルターは数値誤差に対して脆弱であり、周波数精度が高く量子化ノイズの小さいフィルターを構成するには工夫が必要となる。具体的には、

a.伝達関数の係数に量子化誤差が含まれることにより、実現されるフィルターの周波数応答が設計とずれる係数誤差の問題。

b.フィルターの内部値に丸目誤差が蓄積して、出力に大きな誤差がのる問題。

があげられる。a に関しては、高次フィルターを 2 次フィルターのカスケードで実装することで、係数の量子化誤差に対する感度を低減することで解決した。さらに、FPGA 内での掛け算は DSP と呼ばれる専用の信号処理回路を用いて実装することになるが、個数に限りがある。これを、DSP で使用する係数を 1clock 毎に切り替えて、clock 毎に異なる係数の IIR フィルターとして使用することで、必要な DSP の個数を削減した。具体的には、一

つの 2 次 IIR の係数を 4 周期で係数を切り替えて、実質的に 4 個の 2 次 IIR フィルターとして動作させた。当然、フィルターとしてのサンプリング時間は 4 分の 1 となるが、サンプリング時間の低下は、同時にフィルターの係数感度を低減することにもつながり、2 つの問題を同時に解決することに役立った。

また、b に関しては、フィルター内部の状態を表現するための符号長を、フィルターの入出力より大きくとることで、誤差が無視できる範囲に収まるように設計した。

完成した IIR フィルターは、24 次元・96ns 遅延となった。アナログエンドや、ADC、DAC 等その他の遅延を含めると、350ns となった。

### Redpitaya によるシステム同定

PI 制御を超えた様々な制御理論を適用するには、制御対象のシステムをモデル化することが欠かせない。位相制御に用いるピエゾ素子つきミラーは、複雑な機械構造を有し、また光の反射角、ポインティング等にも応答が依存するため、数理的にモデルを構築することは現実的ではない。そこで、光学系を構築するたびにシステムの同定をする必要がある。

システムを同定する単純な方法は、ネットワークアナライザーを用いて、周波数応答を測定し、そこから伝達関数モデルを得ることである。量子光学での応用を考えたとき、数十もの位相制御を同時にする必要があり、すべての箇所ネットワークアナライザーを用いて周波数応答を測ることは難しい。

そこで、本研究では高次フィルターを実装した redpitaya にシステム同定機能を持たせることで、これを解決した。即ち、制御のコントローラー自身で周波数応答の測定し、伝達関数の推定を行えるようにした。

システム同定のための入力としては、M 系列信号と呼ばれる白色ノイズを用い、それに対するシステムの応答を測定する。M 系列信号を選択した理由は、シフトレジスターと論理和のみで構成できるため、FPGA での実装のコストが低いためである。白色ノイズとそれに対する出力の相関は、システムのインパルス応答と一致するため、そのフーリエ変換を計算することで、周波数応答を求めることができる。Redpitaya によるシステム同定の結果と、ネットワークアナライザーを用いて同じシステムの周波数応答を測定した結果を比較し、これらが一致していることを確かめた。

これにより、数十の制御箇所を含む量子光学の実験において、複雑な制御理論の適用が容易になる。

### 開発したコントローラーによる広帯域制御

開発したコントローラーにより、PI 制御より広帯域なフィードバック制御が可能となる具体的な手法の一つとして、逆フィルターによるピエゾ素子の周波数応答の平坦化を行った。逆フィルターは、位相制御に用いるピエゾ素子つきミラーの極と零を逆に配置したフィルターであり、これをピエゾ素子とカスケードすることで、全体としては周波数応答が

フラットなアクチュエーターとして用いることが可能となる。逆フィルターによる打ち消しによって 200kHz 程度までの構造が打ち消され、位相制御素子の周波数応答に依存せず広帯域な制御が可能になることを実験的に示した。

### 制御点の自動制御

本研究で開発したコントローラーは全てデジタル回路で構成され、各パラメーターの値を外部のパソコンから設定することができる。特に、干渉計の制御点を自動で設定することが、大規模な量子光学系の実装において必要となっているため、測定器、パソコン、Redpitaya と繋がるフィードバックを構成して、測定結果を用いたオフセット値自動制御を実装し、その結果を評価した。

評価の方法としては、コヒーレント光に EOM で 15MHz の位相変調をかけ、ホモダイン測定の測定基底に対応する制御点を、15MHz の位相変調成分が小さく見えるように、オフセットの値にフィードバックをかけ、最適値に収束することを確認した。また、測定した分散の値からフィードバックをかけたときの位相揺らぎの大きさを推定し、量子誤り訂正可能なクラスター状態生成のために必要な水準に達していることを示した。

この技術では、フィードバックの評価値を得るアルゴリズムの部分は、外部のパソコンで実装され、任意のプログラムを実行することができる。従って、大規模な干渉計の制御をする際にも有用な技術となる。