

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 岡田 将典

提出された学位論文「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」は、光を用いた量子情報処理の実現に必要な、高速かつフレキシブルなコントローラーの実装を目標とし、デジタル回路による実装と評価実験を行った論文である。

実用的な光を用いた量子情報処理を行うためには、数 10 か所に及ぶ位相制御を高精度に行う必要がある。しかし本論文では、そのような制御を効率良く行う手段がないことを問題に挙げ、これを高速なデジタル回路によって実装することを検討している。デジタル回路は、高次フィルターを用いたフィードバック制御を行う役割を担うが、従来は高速であることと高次であることを両立するデジタル回路は実現されていなかった。

本論文では、限られたリソースでデジタル高次フィルターを実装する際の誤差、遅延の詳細な検討がなされた。そして、IIR(Infinite-Impulse-Response)フィルターを用いた実装が、高速・高次フィルターにおいて有利であることを論じている。そして、実際に FPGA(Field-Programmable-Gate-Array)を用いて高次 IIR フィルターを実装し、コントローラーの性能の実証が行われた。また、大規模な光学系の制御において、制御点を人間を介さず自動で調整することが重要であることを述べ、デジタル回路による実装を生かして、その解決に取り組んだことが述べられている。

本論文は以下に述べるような 4 章から構成される。

第 1 章では、研究の前提となる制御理論の知識、およびデジタル回路の知識について述べている。特に、古典的な制御コントローラーである PID 制御の性能が制御素子の構造に制限されることを、具体例としてピエゾ素子の位相制御を挙げて示している。

第 2 章では、フィードバック制御を行うデジタル回路によって、制御対象のシステム同定を行うことの重要性を挙げ、その実装について述べている。デジタル回路の実装では少ないリソースでシステム同定の入力信号を生成することが必要であるとし、これは M 系列信号で実装された。次に、M 系列信号の入出力データから、コントローラーの設計に使用できる極・零点のシステムモデルの変換手順を示されている。そして、ピエゾ素子つきミラーのシステム同定にこの同定手法を用いて性能の評価が行われ、制御対象の構造を良く再現する結果が得られたことが示されている。

第 3 章では、限られたリソースを用いて高速・高次フィルターを実装する手法について述べている。先行研究として、FIR(Finite-Impulse-Response)フィルターによって高次フィルターを実装した例を挙げ、FIR フィルターでは量子光学実験に求められる性能

を満たさないことが、誤差と遅延の解析と共に示されている。続いて、代替の手段として IIR フィルターを用いた実装について述べて、直接的に IIR フィルターを実装した場合の問題点、2 次フィルターに分解して誤差を低減する手法、量子光学での制御対象を考慮した場合に必要な精度の詳細な解析が行われた。IIR フィルターの実装にあたっては、信号をダウンサンプルし、掛け算器をクロック毎に異なる 2 次フィルターの係数の計算に用いることで、必要な制度を確保しつつ、リソースあたりのフィルターの次数も高くする、という手段がとられた。実装されたフィルターは、24 次、遅延 350ns という性能であり、従来の高次フィルターに比べて 10 倍近い高速化が実現された。

第 4 章の前半では、2 章、3 章で実装されたデジタル回路の光学系を用いた評価が行われた。まず、マッハツェンダー干渉計の位相をピエゾ素子つきミラーによって制御し、ピエゾ素子のシステム同定が行われた。同定結果をもとに、ピエゾ素子の周波数応答を打ち消す逆フィルターを構成し、7 個の極と 6 個の零点を打ち消して、位相回転の生じない周波数帯域が改善できることが示された。そして、積分制御を行った場合の制御帯域を、高次フィルターによる逆フィルターの有無で比較し、感度関数を指標として性能の改善を示された。

第 4 章の後半では、制御点の自動調整の実証実験が行われた。スクイーズド光の測定基底の選択を例にして、ホモダイン測定の直交位相振幅の分散から測定基底を推定し、デジタル回路にフィードバックをかけて測定基底の最適化が行われた。本研究では、これをクラスター状態生成のような大規模な光学系の自動制御の基礎実験と位置づけられている。大規模な実験での最適化を応用先として見据え、測定基底の推定には、デジタル回路ではなく、機械学習等の高度なアルゴリズムが容易に実装できるパーソナルコンピュータが用いられた。このホモダイン測定、パーソナルコンピュータ、デジタル回路というフィードバックループを構成して、リアルタイムに測定基底が調整できることが、実験的に示された。また、ここでも逆フィルターによる性能の向上が示されたが、これは現実的なノイズ分布や信号雑音比においても、本研究で開発したデジタル回路が有用であることを意味している。

以上の通り、本論文はデジタル回路によるプログラマブルな高速・高次フィルターの実装、及び光学系の自動調整といった実験技術の探求を行ったものである。提案・実証された回路の実装手法、及び光学系の調整手法には新規性があり、かつ、大規模な量子光学実験の実現、ひいては量子情報処理の実現に関して重要な貢献があるものと認められる。

以上を勘案し、本論文を博士（工学）の学位論文として合格と認める。