

研 究 報 告 書

「フィードバック増幅による量子機能創出」

研究タイプ: 通常型

研究期間: 2016 年 10 月～2020 年 3 月

研 究 者: 山本 直樹

1. 研究のねらい

現代エレクトロニクスの爆発的な発展の立役者として、フィードバック増幅の発明と方法論の体系化が挙げられる。すなわち、増幅器(とくにオペアンプ)の入出力を適切にフィードバックすることで、能動フィルタ、ホールド回路、同期検出器、波形整形器、比較器などなど、安定で斬新かつ有用な機能システムを無数に実現することが可能となった。本研究の大きな目的は、このフィードバック増幅の方法論を量子レベルで展開し、現代エレクトロニクス・電子回路理論に比肩しうる、量子機能システム群の設計理論を構築することである。すなわち、「フィードバック増幅による量子機能設計論」の構築を研究の狙いとする。これにより、量子系の高度制御・高度機能実現のための汎用コア技術を提供し、量子科学の進歩発展に貢献することを目指す。本研究では、このコンセプトに則って、つぎの2つのねらいを設定する:

[1] 量子フィードバック増幅法に基づき、従来実現できなかった安定で高度な量子機能システムを数多く理論提案する。そして、数値シミュレータによる検証と実験研究者による支援をもとに、それらの実質的性能と実装可能性を理論的・数値的に明らかにする。

[2] 機能設計のために数理工学を整備する。すなわち、いかなるフィードバックがいかなる量子機能を生み出すのか、という根本的な問題を解析するための理論構築を行う。また、制御されたシステムの安定性・ロバスト性を評価するための方法論の体系化を行う。

2. 研究成果

(1) 概要

「研究のねらい」で記載した大項目[1]について、次の成果を得た。すべての小項目について数値計算を実施し、とくにフィードバック増幅により獲得された機能が有効な状況(周波数領域)を明らかにした。

[1-1] 量子系の微分器・積分器の実現法とその応用(量子信号の高感度検出、および量子PID 制御器による振動子の冷却)。[1-2] 能動フィルタの実現法とその応用(量子パタワースフィルタの構成法の開発と性能評価、および量子位相進みフィルタの実現と重力波検出器の広帯域化への応用)。[1-3] 一方向増幅器の実現法とその応用(超電導量子系のロバスト一方向増幅器の実現)。[1-4] 量子発振器の実現法とその性能評価。[1-5] ロバスト多体量子エンタングルメント生成器の実現法。

つぎに、「研究のねらい」で記載した大項目[2]について、次の成果を得た。とくに[2-5]はフィードバック増幅法のターゲットを拡大するものであり、また[2-6, 2-7]はフィードバック増幅によって機能化された量子系の性能を評価し解析するための一般論である。

[2-1] 量子理想増幅器(理想オペアンプの量子版)の特徴づけとフィードバック増幅で制御された量子系の入出力関係(伝達関数)の導出。[2-2] フィードバック増幅制御された量子系

の安定判別法および感度関数評価法の開発。[2-3] カスケード増幅のためのフィードバックの設計法開発。[2-4] 一般の量子開放系をフィードバック増幅制御したときの効果の解明。[2-5] 測定フィードバック系を全量子型フィードバック系へ置き換える一般的方法の開発。[2-6] デコヒーレンスの影響下にある量子制御性能を評価するための一般理論の構築。[2-7] 結合量子振動子系の同期現象を解析するための一般的方法論の開発。

(2) 詳細

「概要」欄にて示した各課題について、成果の詳細を説明する。

[1-1] 量子系の微分器・積分器の実現法とその応用。理想的な量子増幅器と周波数ロックされた対称キャビティをフィードバック結合しハイゲインリミットをとると、量子信号に対する微分器(D: Differential)と積分器(I: Integration)の量子版が構成できる。この入出力デバイスは、量子信号の交換関係を保持するように機能する。この量子積分器を量子ビットの高精度検出に応用できることを示した(以上、その他成果 1)。古典の場合、この機能素子の典型的な応用例は PID フィードバック制御である(P: Proportional は増幅器そのもの)。この量子 PID 制御器をオプトメカニカル系の冷却に応用した。とくに、D 制御器をコヒーレントフィードバック(測定器を介しないフィードバック)の形で組み込んだオプトメカニカル系において、振動子の冷却が効率よく行えることを数値シミュレーションで確認した(以上、その他成果 5)。

[1-2] 能動フィルタの実現法とその応用。制御器として周波数ロックされた非対称キャビティを用いる事で、能動フィルタを構成できることを示した。これを用いて、量子光学系の典型的な状況において、静的な受動フィルタに比べ2~3桁高い Q 値をもつ能動フィルタを実現できることを示した。次いで、同様に高い Q 値をもつ 2 次バターワースフィルタの構成法も示した。これは量子通信に応用できる。この能動フィルタは、パラメータを特別な値に設定することで位相進み(したがって非因果的)デバイスとして機能させることもできる。このデバイスは、以下のように重力波検出器の感度向上へ役立てることが出来る。重力波干渉計は光キャビティからなり、これによって光パワーの増加と感度向上を実現している。しかし、このキャビティは重力波信号にとってはローパスフィルタとして働くため、感度は上がるが帯域が狭まる。ここで上述の位相進みデバイスを組み込み、ローパス成分をキャンセルさせることで、広帯域で感度を向上させることができる。非因果性は、外部信号をフィードバックして全体系を安定化させることで解消する。このアイデアは[Miao et al, PRL 115, 211104, 2015]で提唱されたものだが、その効率的な実現法が不明であった。しかし本研究によって、位相進みデバイスを全光学的に、かつシステムティックに構築可能となった。これを干渉計に組み込んだ系について数値検証を行った。結果、ロバスト性を確保しつつ広帯域感度向上が可能であることが数値的に判明した。低周波帯域での感度改善はいわゆる反作用回避測定に基づく多くの提案があるが、高周波帯域での改善法は有効な方法が知られておらず、新規性の高い有意義な結果であると考えている。以上の成果は(その他成果 1, 2)にて発表している。

[1-3] 一方向増幅器の構成法、およびその応用。量子信号を増幅する際に、増幅された信号が信号源に戻るパスを通る、という状況がよくある。この増幅された信号は、例えばサーキュレータなどを用いて別パスに逃がし、測定系に送る。しかし一般にサーキュレータを通過すると信号雑音比が悪化するため、近年、増幅過程を一方向的に実現する「一方向増幅器」が理論実験ともに活発に研究されている。本研究では、フィードバック増幅の方法を利用する新

しい一方増幅器の実現法を開発した。フィードバック増幅を利用していることから、ロバストな入出力関係を実現することができ、これが従来法と比べて新規性が高くかつ有用である点である(その他成果 1)。

[1-4] 量子発振器の構成法。量子増幅器と周波数ロックしない対称キャビティをフィードバック結合することで、発振器を構成できることを示した(その他成果 1)。とくに、実現できる振動の振幅と持続性にトレードオフがあることを示した。これは量子特有の性質である。ここで示した量子発振器は線形系からなるため、非線形素子を組み入れることでより持続性の高い量子リミットサイクル振動が発生させられると考えている(成果[2-7]と関連)。

[1-5] 量子エンタングルメント生成器のフィードバック増幅による安定化。エンタングルとは、複数の量子変数(ここでは光のモード)の間に生じる非古典的な相関であり、これが量子計算等の基盤となっている。量子増幅器はエンタングル状態発生器として用いることができ、一方で、フィードバック増幅は機能をロバスト化するという利点をもつ。これらの組み合わせにより、ロバストなエンタングル生成器を構成できることを示した。とくに、4つのモード間までのエンタングルは効率よくロバスト化できることを示した。成果は(論文 1)で発表した。

[2-1] 量子理想増幅器(理想オペアンプの量子版)の特徴づけとフィードバック増幅で制御された量子系の入出力関係(伝達関数)の導出。フィードバック制御された全系のダイナミクスを解析し、増幅率無限大の理想極限における閉ループ系の入出力関係(伝達関数)を導出した。その際、古典オペアンプの場合と同様、増幅器に関係する量が伝達関数に現れないことが肝要であるが、これが成立するための条件を求めた。これは「量子理想オペアンプの特徴づけ」を得たことに相当する。この成果はすべての解析の土台となる。この成果は(その他成果 1)にて発表している。

[2-2] フィードバック増幅制御された量子系の安定判別法および感度関数評価法の開発。古典ナイキスト線図の方法を拡張し、閉ループ系の安定判別を行う手法を開発した(その他成果 1)。古典の場合と同様、ループを閉じなくても安定判別は可能であるが、増幅器・制御器共に2入力2出力系であり、ループのつなぎ方、測定すべき量子場などは古典と比べて非自明になる。

[2-3] カスケード増幅のためのフィードバックの設計法開発。カスケード接続された量子増幅器をフィードバック安定化する際、フィードバックの構造にいくつかの配置が考えられるが、感度の指標から最適なものが存在する。ここでは代表的な2つを対象に、一方が他方に比べてつねに優れていることを証明した。また、これらの差異は古典の場合に比べて小さいことを数値シミュレーションで確認し、その起源が量子系特有の構造によるものであることを明らかにした(論文 5)。古典電子回路の構造から分かる通り、一般にサーキットは複数の増幅器のカスケードからなり、従って本成果はそのようなマルチコンポーネントの量子サーキット設計論構築のための足がかりになると考えている。

[2-4] 一般の量子開放系をフィードバック増幅制御したときの効果の解明。古典の場合、オペアンプと線形に限らない一般の制御器をフィードバック結合すると、制御器の逆演算が機能として発現することが知られている。この事実の量子版を明らかにした。具体的には、量子増幅器と一般の量子開放系をフィードバック結合し、ハイゲインリミットで制御器の演算子を共

役化したものが現れることを確認した(その他成果 3)。

[2-5] 測定フィードバック系を全量子型フィードバック系へ置き換える一般的方法の開発。
本研究で開発している各種機能は、測定器などの古典的デバイスを含まないコヒーレントフィードバックにより生成される。一方で、量子測定に基づくフィードバック制御は、例えば量子誤り訂正等で効果を発揮する強力な手法である。本課題では、この測定+フィードバックというプロセスを全量子型で行う為の一つの一般的指針を提案し、その有効性を様々な量子系で確認した(論文 4)。

[2-6] デコヒーレンスの影響下にある量子制御性能を評価するための一般理論の構築。
制御された一般のマルコフ量子開放系について、その定常状態とターゲット状態の距離の下限を導出した。これは制御法、デコヒーレンスの種類などによらない完全な一般理論である。量子フィードバック増幅制御された系は不可避免的にノイズが加わるため、本理論を適用して制御系設計の指針として用いることができる。本成果は(論文 2)で発表した。

[2-7] 結合量子振動子系の同期現象を解析するための一般的方法論の開発。 オペアンプに基づく電子回路の重要な応用として発振器がある。典型的には、オペアンプにより負値抵抗値をもつ不安定素子(負性抵抗)を作り出し、これを内包する非線形回路を設計することで多彩な周期信号を発生する発振器を構築することができる。また、複数の非線形発振器を結合させると同期現象が起きるが、これは電子回路応用はもちろん、非線形物理の一大テーマである。成果項目[1-4]で記載した通り、フィードバック増幅を用いて量子発振器を作ることができる。本研究では、これにさらに非線形要素を入れて安定な量子発振器が構成できたと仮定したうえで、それらを結合して生じる同期現象の解析法を構築した。これは古典非線形同期理論の手法(とくに位相感度関数)を量子系に使えるように拡張したもので、基本的な理論構築とシミュレーションによる有効性の確認を実施した。この成果は(論文 3)にて発表した。

3. 今後の展開

まず、項目2「研究成果」の小項目すべてについて、実機を想定した詳細な数値シミュレーションを行い、各機能の実質的性能と実装可能性を理論的に明らかにする。成果[1-2]で説明した通り、位相進みフィルタの重力波干渉計への応用については基本的な設定でこのことを実施したが、振動子のより詳細なモデリングなどを含むより精緻なシミュレーションを実施する。同時に、新たな機能素子の提案と性能検証を行う。すなわち、フィードバック増幅法は特定の機能に関する理論ではなく、機能を強化 or 生成するための一般理論であることを、さらに多彩な物理系(量子光学、超伝導、オプトメカ、冷却原子、フォトニクス結晶系など)で実証する。また、成果[2-4]を軸に、量子性が強く現れる状況での有用性を示す。とくに制御器として非線形素子を採用し、いかなる機能が発現するかを解析する。この項目については、まず成果[1-4]を拡張し、非線形発振器の構成法を開発する。これを成果[2-7]と結びつけ、量子同期回路などに発展させる。

一方で、本研究は「古典情報処理系を量子情報処理系に置き換える」という方向性で意義を有するものである。このことを陽な形で実施したものが成果[2-5]である。例えば、ノイズフィルタリングについては、検出器を介して変換された古典信号に古典能動フィルタを作用させても古典ノイズしか除去できないため、量子のままで高度なノイズ除去を可能とする量子能動フィルタが必要となる。これは古典能動フィルタを量子のそれに置き換えたものと見ることが出来る。他にも、量子系をフィードバック制御したいときに、測定器を介した古典 PID 制御器よりも、応答速度がは

るかに速い分、量子のまま PID 制御器を構成した方が良い。これら2つは成果[1-1]で記載した結果である。共通の思想は「量子のままですべて信号処理したい」というものであり、この方向性を指向しながら第一段落で記載した課題を実施する。

4. 自己評価

当初掲げていた2つの大目的:

[1] 量子フィードバック増幅により、新規量子機能システムを数多く理論提案。それらの実質的性能と実装可能性を理論的・数値的に明らかにする。

[2] 機能設計のために数理工学の整備。

については、土台づくりのレベルではほぼ達成できたと考えている。研究費は、当初予定通り、主に国内外への研究出張・会議参加に使用し、成果の発表とネットワークの拡充に努めた。

フィードバック増幅は、約 90 年前に当時ベル研究所に勤務していた H. S. Black により「発見」された方法で、それは彼自身が述べている通り「シンプルで驚異的に有用」なものである。彼はこの技術の特許申請したのだが、あまりに革命的なアイデアであったためアメリカ特許庁は信用せず、9年に渡って保留されたというのも有名な話である。のち、この方法論は H. Bode, H. Nyquist によって、便利かつ強固な体系に仕上げられ、これが現代エレクトロニクスを支える方法論となった。この歴史を今後拡大していく量子科学技術の進展に当てはめると、本さきがけ研究で得られた成果はその核を担うものであるはずである。すなわち、量子科学の永続的な発展のため、必要な「シンプルで驚異的に有用」な基幹技術としての役割を果たすものになると信じる。

5. 主な研究成果リスト

(1) 論文(原著論文)発表

| |
|---|
| 論文 1. K. Gallock Yoshimura and N. Yamamoto, Generating robust entanglement via quantum feedback, J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys., 52, 055501 (2019) |
| 論文2. K. Kobayashi and N. Yamamoto, Control limit on quantum state preparation under decoherence, Phys. Rev. A, 99, 052347 (2019) |
| 論文 3. Y. Kato, N. Yamamoto, and H. Nakao, Semiclassical phase reduction theory for quantum synchronization, Phys. Rev. Research, 1, 033012 (2019) |
| 論文4. Y. Kashiwamura and N. Yamamoto, Replacing measurement feedback with coherent feedback for quantum state preparation, Phys. Rev. A, 97, 062341 (2018) |
| 論文 5. Y. Yokotera and N. Yamamoto, Sensitivity analysis of cascaded quantum feedback amplifier, IEEE Control Systems Letters, 3-1, 156/161 (2018) |

(2) 特許出願

研究期間累積件数: 0 件(公開前の出願件名については件数のみ記載)

(3) その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

(その他成果 1) R. Shimazu and N. Yamamoto, Quantum functionalities via feedback amplification, arXiv:1909.12822, 2019 (プレプリント)

- (その他成果 2) N. Yamamoto, Quantum active filtering and application to broadband gravitational wave detection, 1st Quantum Science, Engineering, and Technology, Canberra, Australia, 2019 (国際会議招待講演)
- (その他成果 3) 田中友里、山本直樹、量子オペアンプによる相互作用演算子の反転、第 41 回量子情報技術研究会、東京、2019 (国内会議ポスター発表)
- (その他成果 4) Y. Yokotera and N. Yamamoto, Sensitivity analysis of cascaded quantum feedback amplifier, 10th Principles and Applications of Control in Quantum Systems, Paris, France, 2018 (国際会議ポスター発表)
- (その他成果 5) 野尻裕紀、山本直樹、コヒーレント量子 PID フィードバック制御、第 38 回量子情報技術研究会、広島、2018 (国内会議ポスター発表)
- (その他成果 6) N. Yamamoto, Quantum op-amp and functionalities, APS March Meeting, Los Angeles, California, USA, 2018 (国際会議口頭発表)