

審査の結果の要旨

氏名 大木 健太郎

近年、量子力学的現象を積極的に活用した量子通信や量子計算といった量子情報技術の工学的応用が試みられるようになってきており、それらを高精度に再現性よく実現するための制御技術は、ますます重要となってきた。本論文は、このような背景のもとで、特に量子系が有する非可換性に着目し、そこから導出される不確定性関係・量子相関およびそれらのダイナミクスの諸性質をシステム制御理論的アプローチで解析し、主として混合状態を対象とした状態推定および制御の新しい方式の提案を目指したものである。

本論文は「量子ダイナミクスにおける非可換性と状態推定および制御」と題し、全6章と付録から構成されている。

第1章「はじめに」では、まず本研究の背景である近年の量子情報技術とその理論の発展について述べ、不確かさと量子相関の捉え方として作用素の非可換性による分類を紹介している。ついで、この非可換性に着目し、不確かさと量子相関を量子フィルタリング理論と量子フィードバック制御理論を用いてどのように扱えるかという本研究の目的について説明するとともに、従来の量子フィルタリング理論と量子制御理論の先行研究についてまとめている。

第2章「量子ダイナミクスと状態推定」では、本論文の準備として、量子雑音と量子確率解析の導入と、量子フィルタリング理論の概要について述べている。また、量子確率解析・フィルタリング理論の応用として、ホモダイン検出器の第一原理からの導出をレーザー光の位相の推定問題として扱っている。量子フィルタリング理論では一般にスムージングが適切に行えないが、量子系のダイナミクスにおいて本質的に可換な部分を非可換な部分から分離することで、古典論と同様にスムージングが有効な推定法であることを示している。

第3章「非可換性と不確定性、非古典相関」では、フィードバック制御によって量子相関を増加させる制御則を提案し、フィルタリング理論によって減少させることができる量子系の不確かさを明らかにしている。具体的には、量子相関の尺度を新たに提案し、量子相関が増大できるための十分条件と、それを達成させる制御則を導出している。また、量子系の不確かさを非可換性由来のものと可換性由来のものに分類し、ガウス状態の場合に量子フィルタによって減少できる不確かさは可換性由来のものであることを示している。さらに、非可換性に基づいた混合状態に対する新たな不確定性関係を導出している。

第4章「線形量子系のエンタングルメント状態生成制御」では、線形量子系と呼ばれる量子系において、エンタングルメントと呼ばれる特殊な量子相関をフィードバック制御によって生成する問題について検討している。まず、このエンタングルメント状態生成制御問題が、線形制御理論で知られる共分散指定制御を用いて定式化できることを述べ、観測信号数に対するある条件のもとで、エンタングルメントが生成可能か否かを判別する問題が非線形計画問題に帰着できることを示している。さらに、この定式化に基づいて、数値的にエンタングルメント状態を生成する方法を提案し、数値例題によりその有用性を示している。

第5章「ポイントコンタクトを用いた量子ドット系の状態推定」では、熱雑音の避けられない固体デバイスである量子ドット系に着目し、量子ドット系の確率解析モデルおよび量子フィルタの導出を行っている。熱雑音の避けられない量子系では、エンタングルメントの生成は非常に困難であり、より弱い条件である量子相関の生成が重要となる。また、固体物理系では従来の量子雑音とは異なり、雑音の統計的性質が複雑となるため、新たな枠組みが必要となる。ここでは、量子中心極限定理とマルコフ近似を用いてこの問題に取り組み、従来の結果をその特別の場合に含む結果を導き、得られた観測過程が実際に行われた電流実験とほぼ同じ性質を有することを示している。

第6章「まとめと今後の課題」では、本論文のまとめを行うとともに、今後の研究課題について述べている。

以上を要するに、本論文は、量子ダイナミクスが有する非可換性に着目し、そこから導出される不確定性関係・量子相関およびそれらのダイナミクスの諸性質をシステム制御理論的アプローチで解析し、状態推定および制御の新しい方式の提案を行ったもので、量子情報技術の工学的応用に対する基盤を与えるものとして工学上貢献するところ大である。よって本論文は、博士(情報理工学)の学位請求論文として合格と認められる。