

審査の結果の要旨

氏名 山本直樹

従来より量子系の制御は重要な問題として認識されてきたが、特に近年の量子力学を利用した情報技術(量子コンピュータなど)の提案により、それを実現するためのフィードバック制御の開発が望まれている。これを受け最近、Wisemanにより「連続測定」に基づく量子系のフィードバック制御法が提案され、また様々な量子系の制御(スクイズド光の生成、量子通信における量子ビットの誤り訂正など)への応用例により、連続測定による制御法の有効性が示されてきた。しかし、対象となる量子制御ダイナミクスは難解な方程式(作用素変数の、非線形確率微分方程式)で記述されており、ダイナミクスの構造解析は未解決となっていた。またそのため、方程式そのものは一般的な量子系を記述しているにも関わらず、コントローラの系統的設計手法はこれまで考えられておらず、上記の例でも発見的にコントローラが設計されていた。山本直樹君の博士論文の目的は、このような発見的制御系の設計に頼らず、従来の制御理論が目指してきた、系統だった量子制御系設計法を確立するための基礎理論を構築することであり、本論文において、それに足るだけの十分な結果が導出された。以下、論文の構成と内容について説明する。

1章では、上述した量子制御の研究の背景、本論文のアプローチと構成について説明される。

2章では、本論文で用いられる制御理論と量子ダイナミクスの基礎概念について説明される。制御理論に関するものでは、平衡点、安定性、可到達性・可観測性の定義、確率微分方程式およびそれらを解析するために必要な、数学の基礎概念と計算方法について説明される。一方量子ダイナミクスについては、シュレーディンガー方程式、観測、連続測定などが説明される。

3章では、本論文で鍵となる量子状態のベクトル表現を提案し説明している。近代の制御理論が状態空間表現をベースに展開されており、システムの解析と制御系設計のための豊かな知識とツールが用意されている。本論文では、そのような制御理論との整合性から、量子状態を等価なベクトル表現に変換することを考えている。ただし、ベクトル表現には量子力学系の制御理論の展開に耐えうる性質を持つ必要があり、場当たりの表現では難しい。本論文では、そこで提案するベクトル表現が十分その性質を満たしており、以下で展開する解析に耐えうることを示している。

4章では、3章で定義したベクトル表現を用いた、量子ダイナミクスの微分方程式について説明している。特に変数変換が微分方程式に及ぼす変換操作についてや、後に用いられる確率微分方程式のストラトノビッチ形式について説明される。

5章では、4章で紹介されたベクトル表現に基づく量子ダイナミクスを扱い、その平衡点の解析を行っている。ここでは量子ダイナミクスの平均的振る舞いと解釈される「アンサンブル」と、微細な振る舞いを扱うべく確率項を含んだダイナミクスのそれぞれについて、各種条件下で平衡点を求め、唯一性、アンサンブル平衡点が純粋状態となる条件、混合状態が平衡点となる条件等を具体的に導出している。

6章では、5章で求められた各平衡点の安定性について解析している。平衡点は状態遷移の目標点となり得るもので、とくにそれが不安定であるとき、制御入力によって安定化される必要がある。本章では先の章と同様、量子ダイナミクスのアンサンブルと、確率項を含むダイナミクスについて、それぞれ平衡点の安定性について解析している。

7章では、可到達性と可観測性について解析している。可到達性とは、制御入力による状態遷移の難易さを表す概念であり、また可観測性とは、測定データを用いて、どの程度内部状態がわかるのかを示す概念である。3, 4章で導入されたベクトル表現に対して、制御理論において開発されているツールを適用することにより、これらの性質が容易に判定できることが示されている。また1つの具体的結果として、従来物理学においても知られていなかった、連続測定による量子状態の局所的遷移の次元について明らかにされている。この結果は自然科学の解明に、制御理論が本質的役割を演じる重要な一例であることを意味する。

8章では、応用上極めて重要なスピン系に対して、これまでの論文の結果を適用し、そのダイナミクスの解析を行っている。具体的に、制御入力による不安定平衡点の安定化可能条件が導かれ、また、解析結果に基づいて、スピン系特有の性質を利用した1つのフィードバック制御法が提案されている。またシミュレーションによる検証も行われている。

以上が量子ダイナミクスの制御に関する結果である。なお本論文では、導入したベクトル表現を用いることにより、量子力学系を用いた情報システムの一つである量子チャンネルについても、有用な設計法が導出されることを9章で示している。

最後に10章において、本論文のまとめを述べている。その学術意義をまとめると、以下のようになる。

1. 量子力学系に対する系統だった制御系設計のための、スタンダードとなりうる理論的枠組みを確立した。
2. 自然現象の理解に制御理論が本質的役割を演ずる具体的結果を示した。

このように本論文の結果は、学術的にも、また量子コンピュータに代表される情報システムの実現のためにも十分な価値を有していると結論づけられる。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。