

平成 26 年 6 月 11 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2013

課題番号：22560439

研究課題名(和文)量子フィードバックシステムの設計と実現

研究課題名(英文)Design and realization of quantum feedback systems

研究代表者

津村 幸治 (Tsumura, Koji)

東京大学・情報理工学(系)研究科・准教授

研究者番号：80241941

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円、(間接経費) 990,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では量子光学系に焦点をあて、量子フィルタ理論・量子制御理論の有効性を示す系の設計・実現を主テーマとした。特に各理論を基礎とし、量子状態の推定や、エンタングルド状態の生成・保持を実現する系が持つべき性質を明らかにすることを具体的な目標とした。研究の結果、量子光学系の特定、あるいは量子光学系とスピン系の複合系の特定と、それらに対する測定および制御方策を提案し、それぞれに対応する量子フィルタ方程式を導いた。その方程式に基づき、状態推定の有効性や、数値実験によって量子系特有の量子もつれ状態が生成可能であることを確認した。またあるフィードバック系については理論的に可制御性が成り立つことを示した。

研究成果の概要(英文)：The main theme of this research is to design or realize quantum systems with optics systems for showing the effectiveness of the quantum filter theory or the quantum control theory. In particular, the actual objective is to clarify the indispensable property of systems for the quantum state estimations or generating and holding quantum entangled states based on the quantum filter theory and the feedback control theory. The results of this research is to specify a quantum optics system, a combined system composed of a quantum optics system and a spin system, and the corresponding control strategies. We also succeed to derive the corresponding quantum filter equations. With this equations, we can show the effectiveness of the quantum state estimation by the actual experiments or that the feedback systems can generate the entangled states by numerical simulations. Moreover, we can also prove the controllability of a quantum feedback system.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・制御工学

キーワード：フィードバック制御 量子力学 量子フィルタ 量子光学系 連続測定

1. 研究開始当初の背景

量子情報技術の実現におけるロバストネスの確保のため、あるいは量子力学的振る舞いが顕著な微小な系を制御対象とする場合、量子力学系のフィードバック制御の理論や技術が有効である。フィードバック制御の基本は観測と制御であり、古典的動的システムを制御対象とする限りにおいては、このメカニズムが本質的な問題となることはない。一方、量子力学系を制御対象とする場合、観測の量子状態への影響が不可避であり、連続的観測による量子状態の時間発展は複雑である。

この問題は 1980 年代に Belavkin による量子フィルタリング理論の確立によって解決される。つまり連続測定下にある量子状態の、観測値に基づくフィルタリング方程式が導出され、これにより量子状態の最適推定値に基づく連続的なフィードバック制御が可能となる。この枠組みに関する研究は 1990 年代に理論物理の分野で活発化し (Wiseman (94) など)、2000 年代には制御理論の研究者の注目するところとなった (van Handel ら (2005) など)。

このように制御理論の量子力学系への理論的拡張は活発に行われ、たとえば可制御・可観測性、安定化や最適制御において、古典系と量子系との類似性・差異について知見が得られてきているが、その一方で、制御理論に基づくこれらの諸性質を確認することを目指した実験は十分でない。その主たる理由は、精度、規模、構造に制約のある実験機器を用いて実現可能な、具体的な量子フィードバック制御系のクラスについて十分議論されてこなかったからと思われる。

2. 研究の目的

以上を踏まえ本研究では、量子力学系に拡張された現代制御理論の諸結果を確認するため、これが適用可能な現実的な量子力学系のクラスを特徴づけ、その上で具体的な制御系の設計を目的とした。また具体的な対象を量子光学系および光学系とスピン系の複合系とした。実験装置の精度・規模で扱うことのできる量子力学的現象は限られ、どのような動的システムが現実的に実現可能か、可能な測定および制御の形態、観測値は何かについて、不明な点が多い。このような状況のもと、本研究の主目的を達成するために、次の点を明らかにすることを考えた。

課題(1) 連続測定を可能とする量子光学系のクラスの特定と観測システムの設計

課題(2) フィードバック制御が可能である量子系のクラスの特定と制御部の設計

課題(3) 制御理論の諸問題を検証するために要求される実験機の性能・仕様の割り出し

3. 研究の方法

量子フィードバック系における制御理論の検証を実現するため、「研究目的」で説明した 3 課題を、研究期間においておおよそ以下の年次計画に従い解決することを計画した。平成 22 年度：課題(1)、(2) (プラントのクラスの特定、主として理論面における課題)、平成 23 年度：課題(3) (実験系の設計と検討)、平成 24 年度：課題(1)～(3)の検証。

なお提案する系の実現性を検証するために、制御理論と量子光学の各々の分野における研究者から研究グループを構成した。また各々の研究活動は主として理論研究と数値実験・実機実験による検証の 2 項目からなる。

4. 研究成果

研究結果は制御対象に応じて、(1) 量子光学系 I、(2) 量子光学系 II、(3) 量子光学系とスピン系の複合系、の 3 項目について説明する。

(1) 量子光学系 I

対象を量子光学系とし、その物理量(位相)の最適推定器を導出し、その有効性を数値シミュレーションおよび実機実験により確認した。対象は adaptive measurement と呼ばれる系であり、それによって、光の場の位相推定の性能を高めることを意図したものである。具体的な測定系の構造は、ランダム位相変調を受けた光をホモダイン測定するものであり、観測値からフィルタにより光の位相を推定し、測定系へフィードバックすることにより測定精度を高めるものである。従来はアドホックなフィルタによる結果が報告されているが、これに対して本研究では最適フィルタ(量子カルマンフィルタ)を導出した。さらにこの最適フィルタの有効性を、数値実験、および実機による実験により、理論値および従来のアドホックなフィルタとの比較において確認した。以上の結果は、量子光学系におけるオンラインでの最適状態推定が可能であることを示しており、同様の系による物理量の推定が可能であることを示唆するものである。

(2) 量子光学系 II

ここではキャビティ内の光の場の位相の制御により、光の非ガウス状態の生成が可能かどうかを考察した。具体的にはキャビティから出力される光の測定結果を、キャビティ内のポテンシャル場の操作と、キャビティと外界の光の場との相互作用の両方にフィードバックする構造を考え、その構造を実現する具体的な光学系を設計した。さらに、量子状態の時間発展を表す数値モデル、つまり対応する量子フィルタを導出し、その正当性を評価した。またその数値モデルにより、提案する光学系によって、光の非ガウス状態が生成

され得ることを数値実験により確認した。

(3) 量子光学系とスピン系の複合系

ここでは多スピン系を制御対象とする量子フィードバック系を考える。この系は、磁場の影響下にある単一 qubit を保持する複数のキャビティと、それらのうち幾つかを貫通する複数のレーザおよび測定系から構成される。キャビティ内の qubit とレーザ光との相互作用によって、干渉を受けたレーザ光の変化を測定し、その測定値から量子カルマンフィルタを経て量子状態を推定する。また各 qubit の状態は、各キャビティの磁場を制御することにより操作できる。

ここで考えるべき問題は、測定系の設計、すなわち各レーザ光が貫通するキャビティの選択と、観測値を用いた制御則の設計である。そのためここではフィードバック制御による、エンタングルド状態の一つである GHZ 状態の可制御性について明らかにした。測定系は GHZ 状態の安定化に整合する必要があるが、ここでは各スピン系と干渉する複数の光学系路を用いることを考え、そのあるべき構造を与えた。

このような量子系は、観測によって生じるノイズと、本来の制御入力によって駆動される確率システムとなる。そこで次に考えるべき問題は、量子状態空間内における量子状態のサンプルパスが、制御入力を適切に設定することにより、目標状態に到達しうるかどうかということである。そこで本研究において次の結果を得た。

定理「エンタングルド状態である GHZ 状態の一つが、量子状態空間のある部分多様体上で可制御である。」

この結果は、一般の N 粒子系のエンタングルド状態のうち量子情報理論において重要な GHZ 状態が、量子フィードバック制御によって可制御であることを示した初めてのものであり、その状態を安定化する制御則の存在の可能性を示唆する重要なものである。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 3 件)

H. Yonezawa, D. Nakane, T. A. Wheatley, K. Iwasawa, S. Takeda, H. Arai, K. Ohki, K. Tsumura, D. W. Berry, T. C. Ralph, H. M. Wiseman, E. H. Huntington, A. Furusawa, Quantum-Enhanced Optical-Phase Tracking, Science, Vol. 337, pp. 1514-1517 (21 September 2012)(査読有)

T.Sasaki, S. Hara, K. Tsumura, Local state transition of feedback controlled quantum systems with imperfect detector

efficiency: Part II: Accessibility analysis for quantum systems, SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, vol. 3, no. 6, pp. 417-423, (2010)(査読有)

T.Sasaki, S. Hara, K. Tsumura, Local state transition of feedback controlled quantum systems with imperfect detector efficiency: Part I: Differential geometric analysis for dynamical systems with matrix-valued states, SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, vol. 3, no. 6, pp. 409-416, (2010)(査読有)

〔学会発表〕(計 5 件)

平野正浩, 吉永悠馬, 津村幸治, 多スピン qubit システムの可制御性について: GHZ 状態生成に向けて, 第13回計測自動制御学会制御部門大会, 2013年03月05日 ~ 2013年03月08日, アクロス福岡

津村幸治, 多量子ビット系のフィードバック制御に向けて, 第56回システム制御情報学会研究発表講演会(招待講演), 2012年05月21日 ~ 2012年05月23日, 京都テルサ

D. Matsuna, K. Tsumura, Global Stabilization of Quantum Spin Systems via Discrete Time Feedback Control, Proc. the 49th IEEE Conference of Decision and Control, 2010/12/15-17, Atlanta

T. Sasaki, S. Hara, K. Tsumura, Accessibility Analysis for Controlled Quantum Systems under Continuous Quantum Measurement, Proc. 19th IEEE International Conference on Control Applications, 2010/9/8-10, Yokohama, pp.1749--1754 (2010)

D. Matsuna, K. Tsumura, Design of Observation for Multi-qubit Preparation based on Equilibrium Point Analysis, Proceedings of SICE Annual Conference 2010, 2010/8/18-21, Taipei

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

なし

6 . 研究組織

(1)研究代表者

津村 幸治 (TSUMURA, Koji)
東京大学・大学院情報理工学系研究科・准教授
研究者番号：80241941

(2)研究分担者

米澤 英宏 (YONEZAWA, Hidehiro)
東京大学・大学院工学系研究科・講師
研究者番号：50451802

(3)連携研究者

原 辰次 (HARA, Shinji)
東京大学・大学院情報理工学系研究科・教授
研究者番号：80134972

古澤 明 (FURUSAWA, Akira)
東京大学・大学院工学系研究科・教授
研究者番号：90332569

山本 直樹 (YAMAMOTO, Naoki)
慶応義塾大学・理工学部・講師
研究者番号：40513289