

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 27 日現在

機関番号：32612

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2015

課題番号：24760341

研究課題名(和文)デコヒーレンスフリー量子情報処理のためのシステム制御理論

研究課題名(英文)Systems and control theory for decoherence-free quantum information processing

研究代表者

山本 直樹 (Yamamoto, Naoki)

慶應義塾大学・理工学部・准教授

研究者番号：40513289

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、主に次の成果が得られた。(1)量子情報処理の実現に有用な概念である「デコヒーレンスフリー部分系(DFS)」の数理的特徴付けと設計理論を、「連続値線形」の場合に、システム制御理論に基づいて構築することに成功した。(2)フィードバック制御によってDFSを生成する手法を開発した。(3)システム制御理論において非常に重要な概念として利用されている「伝達関数のゼロ点」および「ゼロダイナミクス」の概念を用いて、DFSを量子メモリとして用いるための一般的方法論を構築した。

研究成果の概要(英文)：In this research project, mainly the following two results have been obtained. (1) Based on the systems and control theory, I have elaborated a general theory for characterizing and synthesizing a decoherence-free subsystem, for the general linear quantum systems. (2) A general theory to design a feedback controller for generating a DFS was obtained. (3) Using the important notions "zeros (of a transfer function)" or more generally "zero-dynamics", I have constructed a theory for building a DFS as a quantum memory for general linear quantum systems.

研究分野：量子制御理論・量子情報理論

キーワード：量子情報 制御理論

1. 研究開始当初の背景

量子計算をはじめとする量子情報科学は、現在、その多くの理論の実証実験が成功するに至っている。他方で、それらがまだ実用からは遠い段階にある最大の要因は、一般に、量子系が環境ノイズに対して極めて脆弱であるという事実にある。量子情報処理は、原子や光子などの量子ひとつひとつが「そろそろ」つまり「コヒーレンスを保つ」ときにのみ、本来の性能を発揮する。それを壊すという意味で、上記のノイズは「デコヒーレンス」と呼ばれる。

デコヒーレンスへの有効な対抗策としてデコヒーレンスフリー部分系(Decoherence Free Subsystem; DFS)の概念に基づく量子情報処理法が提案され、多くの実証実験も実施されている。DFSとは、数学的な意味での空間拡大により、ノイズの影響を受けないダイナミクス(情報処理プロセスに対応)を作り出すための概念である。

他方、研究提案当時、DFSの概念はスピントリプルス系などいわゆる「離散量子系」については提案されていたものの、光の振幅や粒子の位置などの連続値をとる物理量に量子情報を担わせる「連続値量子系」については、DFS理論は存在しなかった。連続値量子系は離散系と同様、様々な量子情報処理を可能とする重要なプラットフォーム群であり、そのDFS理論の開発は急務であった。とくに、「線形量子系」は量子光学系や感受率(伝達関数)で表される物質系など、広いクラスの連続値量子系のモデルであり、それについてDFS理論を構築する事は重要である。

2. 研究の目的

提案時において、本研究は次の課題の解決を目的としていた：

(1) 線形量子系のDFSを特徴付けかつ設計するための理論を、システム制御理論に基づいて構築する。

(2) システム制御理論の道具を用いて、DFSに基づく量子情報処理を安定・ロバスト化するための方法論を与える。また、具体的な物理系を提案する。

(3) DFS理論とその応用法をシステム制御理論の観点から捉え直す。具体的には、典型的なDFSの応用法である量子メモリの方法をシステム制御理論の手法で拡張整理し、さらなる応用へつなげる。

3. 研究の方法

課題解決の鍵となるアイデアは次である：連続値量子系は本質的に無限次元系であるが、上述の「数学的な意味での空間拡大によって作り出されたノイズの影響を受けないダイナミクス」は、システム制御理論における「可制御性」と「可観測性」の概念を用いることで完全に特徴付けられるのである。すなわち、DFSとは、「非可制御・非可観測部分系」に他ならない。この事実を初めて見出したのは研究実施者であった。この事実に基づいて、次の方法で上記課題の解決を図った(番号は項目2の課題に対応)。

(1) 対象が線形であるとき、非可制御・非可観測部分系の数理的特徴付けは、明示的にかつ完全な形で行う事が出来る。量子系ならではの構造を考慮に入れ、この特徴付けを得る。同時に、それが存在する為の条件を見出す。この条件によって、DFSの設計指針が得られる事になる。

(2) この課題は、「非可制御・非可観測部分系を安定化する」という、従来のシステム制御理論においては想定されていなかった問題である。しかるに、安定化のための数理的手法はそろっており、それらを積極的に利用する。とくにフィードバック制御でこの系を安定化する為の手法を構築する。

(3) DFSの量子情報における典型的な利用法は、量子メモリである。つまり、DFSが外界から切り離されている事から、DFSに量子状態を保存することが可能である。一方で、DFSへの状態の出し入れの精度が重要である。出し入れの際、DFSは相補部分系と結合し、つまり非可制御・非可観測ではなくなる。この系に対してシステム制御理論の方法を適用し、DFSへの状態の出し入れを高精度に行う為の方法を構築する。

4. 研究成果

各課題について、以下の成果が得られた(番号は項目2の課題に対応)。

(1) 上述の方法に従って、対象が線形量子系であるとき、DFS=非可制御・非可観測部分系の数理的特徴付けを完全な形で与えた。また、DFSが存在する為の必要十分条件を見出し、この条件によって、DFSの設計理論を与えた。とくに、原子アンサンブル系を考察し、構築したDFS上でいかなる量子情報操作が可能であるかを示した。(雑誌論文、学会発表で発表。)

(2) 対象量子系に対して制御量子系を適切に用意し、それらを測定過程を一切含まない形でフィードバック結合する「コヒーレントフィードバック」の方法をとる。とくに系が線形であるとき、全体系が DFS をもつための条件を求め、具体的に制御量子系を構成する方法を構築した。これにより、安定な DFS を構築する事が可能となる。さらに、このことが、測定を介するフィードバック制御によっては決して実現できないことを証明した。(雑誌論文、学会発表 で発表。)

(3) 一般的な線形量子系について、システム制御理論において重要な「ゼロダイナミクス」の理論を用いることで、DFS に対応する部分系への状態の出し入れを高精度に行う為の方法を構築した。具体的には、状態を DFS に書き込む際に、出力に相当する状態の漏れがなくなる(このことが、ゼロダイナミクスの「ゼロ」に対応する)ような一般的書き込み法を構築した。さらに、高精度な状態の転送の為の系の最適(オープンループ)制御理論を構築した。(雑誌論文、学会発表 で発表。)

以上のように、本研究では、重要な連続値量子系である線形量子系について、DFS の特徴付け、設計法、制御法、応用まで、システム制御理論をフル活用し一般的・統一的な視点で解析を行った。とくにシステム制御理論の重要な概念である可制御性、可観測性、フィードバック、ゼロダイナミクスが重要な役割を果たしており、従来の DFS ベースの量子情報科学に新しい視点・解析法を提供した結果である。成果は既に Physical Review Letter, Physical Review Xをはじめとする国際有力ジャーナルにおいて引用を受けている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 3 件)

N. Yamamoto, Coherent versus measurement feedback: Linear systems theory for quantum information, Physical Review X, 4, 041029 (2014), 査読有り
DOI: 10.1103/PhysRevX.4.041029

N. Yamamoto and M. R. James, Zero dynamics principle for perfect quantum memory in linear networks, New Journal of Physics, 16, 073032 (2014), 査読有り
DOI:10.1088/1367-2630/16/7/073032

N. Yamamoto, Decoherence-free linear quantum subsystems, IEEE

Transaction on Automatic Control, 59-7, 1845/1857 (2014), 査読有り
DOI: 10.1109/TAC.2014.2313218

〔学会発表〕(計 6 件)

中尾英明、山本直樹、最適制御による線形量子メモリへの完全状態転送、第 33 回量子情報技術研究会、NTT 厚木研究開発センタ(神奈川県厚木市)、2015 年 11 月

山本直樹、Zero dynamics principle for perfect quantum memory in linear networks, 第 31 回量子情報技術研究会、東北大学(宮城県仙台市)、2014 年 11 月

N. Yamamoto, Decoherence-free linear quantum subsystems, Engineering and Computational Mathematics (ECM), Hong Kong Polytechnic Univ., Hong Kong, 2013 年 12 月

N. Yamamoto, Coherent versus measurement feedback control: Some no-go theorems, 8th Principles and Applications of Control in Quantum Systems (PRACQSYS), Monterey, CA, USA, 2013 年 8 月

S. Iida and N. Yamamoto, Fault detection of decoherence free subsystems, 8th PRACQSYS, Monterey, CA, USA, 2013 年 8 月

N. Yamamoto, Decoherence-free linear quantum systems, 12th Asia Pacific Physics Conference (APPC12), 幕張メッセ(千葉県幕張市), 2013 年 7 月

〔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〕
ホームページ:
<http://www.yamamoto.appi.keio.ac.jp>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

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

(2) 研究分担者

なし

(3)連携研究者
なし