

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年3月31日現在

機関番号：32612

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21760336

研究課題名（和文） 線形量子ネットワークのフィードバック制御理論

研究課題名（英文） Feedback control theory for linear quantum networks

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

研究成果の概要（和文）： ネットワークの構成要素がそれぞれ量子系で与えられる「量子ネットワーク」を考察し、ノード間の量子相関を強化するフィードバック制御系の構築法を与えた。とくに、最大の量子相関を生成するシステムの完全な特徴付けを得た。また、スクイズド光を強化する量子制御器の実験的構築に成功した。

研究成果の概要（英文）： For a general “quantum network” system, each node of which is given by a quantum system, a designing theory of a feedback controller that enhances quantum correlation between the nodes was clarified. Also a complete characterization of the quantum system generating maximal correlation was obtained. Moreover, a quantum controller enhancing a squeezed light field was experimentally demonstrated.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2010年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2011年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
総計	3,100,000	930,000	4,030,000

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： システム制御理論、量子力学、量子情報

1. 研究開始当初の背景

近年、量子系がもつ情報の特殊な性質を利用した「量子情報技術」の研究が盛んに行われている。特に、複数の量子系のつながりで構成される「量子ネットワーク」は、様々な量子情報処理のプラットフォームであり、その上で量子情報を効率よく分配・保存・保護する方法の確立は、量子情報分野における中心的な課題の一つである。このような課題に対して、ダイナミク

スの操作を体系的に論じる「システム制御理論」が有力な方法論となり得ることが、近年、判明しつつあった。

2. 研究の目的

本研究では、光学系などを含む一般的な「線形量子ネットワーク」に注目し、以下の課題を設定した：

(1) 課題A：フィードバックループの構造は与えられたものとして、ノード間の

「量子相関」を強化するフィードバック制御器の効率的な設計法を与える。

(2) 課題 B: ネットワークが不確かなモデル化誤差を含む場合の、ロバスト制御器の設計法を与える。

(3) 課題 C: 系の安定性が量子相関の大きさにいかなる影響を及ぼすかを調べ、フィードバックループ構成法の一般的指針を与えることを目指す。

(4) 課題 D: 量子情報分野へのシステム制御理論適用の様々な可能性を探るとともに、考案された量子制御理論の物理的実現法を、実験も含めて検討する。

3. 研究の方法

課題 A は課題 B・C の土台である。ロバスト制御を扱う課題 B はより応用に近く、一方、課題 C は量子相関の原理的メカニズムの解明を目的とする基礎研究である。課題 A, D に対しては、オーストラリア国立大学・M. R. James 教授のグループ、ニューサウスウェールズ大学・I. R. Petersen 教授のグループの支援を得ながら、解決策を探る。課題 A を解決する手法として、システム制御理論における標準的な緩和法が有効となる。得られる制御法は、課題 D の範疇で、その物理的実現法が検討される。課題 B に対しては、研究代表者と、グループに所属する大学院生によって解決策を探る。課題 C は挑戦的な問題であるが、研究代表者と東京大学・原辰次教授による過去の共同研究の成果が有望な足がかりになり、そこで得られた方法論を軸に、引き続き原教授と協力して研究を進める。同時に、量子光学系での実験も見据えて、Petersen 教授らの支援のもと課題 D に当たる。

4. 研究成果

(1) 課題 A

①注目する線形系に対しては、量子相関は「共分散行列」で一意に指定できる。共分散行列の、制御入力のもとでの時間変化はシステム制御理論において従来より詳細に調べられており、とくに所望の共分散行列を指定する「共分散行列指定制御問題」として定式化され解が得られている。この結果を利用して、線形量子ネットワーク上に所望の量子相関を発生させるためのフィードバック制御機構の設計法を得ることができた。結果は、*Proceedings of 50th IEEE CDC* などで発表した。

②とくに光の量子相関を、「量子メモリ」であるイオンやナノ振動子などの固定系

へ転送する枠組みにおいて、メモリの量子相関をロバストに生成するためのフィードバック制御機構を考案し、その効果を検証した。結果は *Phys. Rev. A* などで発表した。本結果は、その有効性が広く認知されている LQG 制御法を量子情報の体系へはじめて適用したものであり、意義深いと考える。

③オーストラリア国立大学・M. R. James 教授のグループに所属するポスドク研究員 H. I. Nurdin 博士とともに、空間的に離れた量子光学ネットワーク間に強い量子相関を生じさせる FB 制御則を見出した。これはいわゆる LQG 制御器と呼ばれるもので、ある種のロバスト性を有していることが知られている。結果は *Phys. Rev. A* に投稿中である。

(2) 課題 B

対象系の情報抽出のために用いるレーザの位相が不確かさをもって揺らぐ場合に、その不確かさに対してロバストな情報推定ができる機構を提案した。結果は *Proceedings of 2010 IEEE MSC* などで発表した。ロバストフィードバック制御器の設計法に関しては、現在解析中である。

(3) 課題 C

アプローチを変更し、そもそも、いわゆる「純粋な」つまりもっとも望ましい量子相関を生成するようなシステムがもつべき性質を特徴づけることを出発点とし、実際に、完全な特徴付けを得ることに成功した。結果は *Phys. Rev. A* などで発表した。この結果を拡張し、系の安定性と最終的に生じる量子相関の大きさの間にトレードオフがあることを、定量的な評価も含めて明らかにした。結果は *Phil. Trans. Roy. Soc. A* に掲載決定している。

(4) 課題 D

測定機構を含まない「量子コヒーレント FB ネットワーク」の、とくに「スクイズド状態」を生成するシステムを、東京大学・工学部物理工学科・古澤明教授の研究室にて実験的に構築することに成功した。結果は、*IEEE Transaction on Automatic Control* に掲載決定している。他方、光学干渉系の大域的な位相ずれを補正するフィードバック制御機構の理論構築を行い、さらにそのシステムを、申請者の研究室にて実験的に実現した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 12 件 ; すべて査読有り)

1. S. Iida, M. Yukawa, H. Yonezawa, N. Yamamoto, and A. Furusawa, Experimental demonstration of coherent feedback control on optical field squeezing, IEEE Trans. Automat. Contr., to appear.
2. N. Yamamoto, Pure Gaussian state generation via dissipation: A quantum stochastic differential equation approach, Phil. Trans. Roy. Soc. A, to appear.
3. 山本直樹, 量子フィードバック制御の数理, 数理科学, 585, 21/27 (2012)
4. G. Tajimi and N. Yamamoto, Dynamical Gaussian state transfer with quantum error correcting architecture, Phys. Rev. A 85, 022303 (2012)
5. K. Koga and N. Yamamoto, Dissipation induced pure Gaussian state, Phys. Rev. A 85, 022103 (2012)
6. K. Ohki, S. Hara, and N. Yamamoto, On quantum-classical equivalence for linear systems control problems and its application to quantum entanglement assignment, Proceedings of 50th IEEE CDC, 6260/6265 (2011)
7. 山本直樹, 量子力学と確率システム理論, 計測と制御, 50-11, 993/999 (2011)
8. 山本直樹, 確率微分方程式の基礎, 計測と制御, 50-11, 937/943 (2011)
9. S. Iida, K. Ohki, and N. Yamamoto, Robust quantum Kalman filtering under the phase uncertainty of the probe laser field, Proceedings of 2010 IEEE MSC, 749/754 (2010)
10. N. Yamamoto, Exact solution for the max-min quantum recovery problem, Proceedings of 48th IEEE CDC, 1433/1438 (2009)
11. 山本直樹, 量子ダイナミクスのシミュレーション: 測定と制御の視点から, シミュレーション, 28-4, 142/148 (2009)

12. 山本直樹, 量子情報技術におけるシステム制御理論, システム制御情報学会誌, 53-6, 217/223 (2009)

[学会発表] (計 16 件 ; 10 以外査読無し)

1. 田中咲, 山本直樹, 弱測定による増幅の事後選択による効果, 日本物理学会, 第 67 回年次大会, 関西学院大学, 2012 年 3 月 27 日
2. N. Yamamoto, Generating pure Gaussian state by dissipation: A quantum stochastic differential equation approach, Theo Murphy meeting of the Royal Society, Principles and applications of quantum control engineering, London, UK, 招待講演, 2011 年 12 月 13 日
3. 山本直樹, 西澤勇紀, 最大・最小量子誤り訂正問題の繰り返し最適化による解法, 第 25 回量子情報技術研究会, 大阪大学, 2011 年 11 月 22 日
4. 杉山綱祐, 山本直樹, 志賀信泰, 竹内誠, 原子位相ロックの量子推定論的評価, 第 25 回量子情報技術研究会, 大阪大学, 2011 年 11 月 21 日
5. 武田陽一郎, 山本直樹, Photon Subtraction によるエンタングルメント蒸留のダイナミクス, 第 25 回量子情報技術研究会, 大阪大学, 2011 年 11 月 21 日
6. 多治見剛, 山本直樹, 協調制御による連続変数クラスター状態の安定化, 第 25 回量子情報技術研究会, 大阪大学, 2011 年 11 月 21 日
7. N. Yamamoto and K. Koga, Dissipation induced pure Gaussian state, 24th Quantum Information and Technology Symposium, 東京工業大学, 2011 年 5 月 12 日
8. 多治見剛, 山本直樹, 連続変数システムにおける動的量子誤り訂正, 第 23 回量子情報技術研究会, 東京工業大学, 2010 年 11 月 4 日
9. 山本直樹, 量子制御理論の基礎と応用, 第 23 回 量子情報技術研究会(QIT), 東京大学, 招待講演, 2010 年 11 月 4 日
10. S. Iida, M. Yukawa, H. Yonezawa, N. Yamamoto, and A. Furusawa, Practical coherent feedback for field squeezing, 10th Asian Conference on Quantum

Information Science、査読有り、東京大学、
2010年8月27日

11. 古賀圭, 山本直樹, 2モードカスケード量子光学系におけるエンタングルメントの解析、日本物理学会・第65回年次大会、岡山大学、2010年3月21日

12. 多治見剛、大木健太郎、山本直樹、連続変数システムにおける動的量子誤り訂正、日本物理学会・第65回年次大会、岡山大学、2010年3月21日

13. 大木健太郎、山本直樹、原辰次、線形量子系の構造と共分散指定制御、計測自動制御学会、第10回制御部門大会、熊本大学、2010年3月16日

14. 飯田早苗、大木健太郎、山本直樹、量子系のプローブレーザー揺らぎに対するロバストカルマンフィルタリング、計測自動制御学会、第10回制御部門大会、熊本大学、2010年3月16日

15. 山本直樹、確率微分方程式の基礎、計測自動制御学会、第10回制御部門大会、熊本大学、招待講演、2010年3月15日

16. K. Sugiyama, K. Ohki, and N. Yamamoto, Uncertainty limits in the quantum filtering, 21st Quantum Information and Technology Symposium (2009)、2009年11月4日

[その他]

<http://www.yamamoto.appi.keio.ac.jp/>
にて研究成果の一部を公開した。

6. 研究組織

(1) 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

(2) 研究分担者

該当なし

(3) 連携研究者

該当なし