

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 8 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25820178

研究課題名(和文)量子通信を用いたネットワーク化制御に関する研究

研究課題名(英文)A study of networked quantum/classical control via quantum channels

研究代表者

大木 健太郎 (Ohki, Kentaro)

京都大学・情報学研究科・助教

研究者番号：40639233

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、従来の通信方式とは異なる量子通信を用いたネットワーク系を考え、(1)量子通信を用いた場合の古典系あるいは量子系の安定化制御、(2)通信される信号の復元問題、および(3)量子ネットワークにおける量子相関生成に関する研究を行った。それぞれ、(1)量子通信を用いた場合は符号化とオブザーバの併用で安定化できることがわかった。(2)過去の状態推定を行うための量子スムージング理論を構築した。(3)合意形成アルゴリズムと呼ばれる手法により、ある種の量子相関を生成でき、また移動情報量と呼ばれる尺度で直列結合した線形量子系に相関を与えられることを解明した。

研究成果の概要(英文)：I focused on the networked systems which each system is connected to other systems via quantum communication. My study was divided into three parts: (1) stabilization problems of classical or quantum systems via quantum communication, (2) estimation problems of initial quantum state under measurement records of the systems, and (3) generation problems of quantum correlation in the quantum networked systems. The results are as follows: (1) designing the encoding and state estimator suitably, there were controllers that stabilize the networked system. (2) A quantum smoothing theory has been developed, which enables us to know what past state of the quantum system was. (3) A consensus algorithm was developed and applied to networked quantum systems, and the algorithm generates the quantum correlation among the systems. On the other hand, I characterized the connection which generates the quantum correlation between quantum systems by the transfer entropy.

研究分野：量子フィルタリング理論

キーワード：量子ネットワーク 量子スムージング

1. 研究開始当初の背景

インターネット技術の発展により、医療ロボットハンドのように、遠隔操作によって制御したい対象を制御することが行われるようになってきている。現在の情報通信技術では、画像や動画などの大容量の情報もほぼリアルタイムで伝送することが可能であり、遠隔地の制御は十分な情報に基づいて行うことができる。そのため、制御技術において深刻な問題が表面化したことはない。しかし、制御対象の数がより多くなり、より大規模なシステムをリアルタイムで制御するには、従来のように十分な情報に基づいて行う制御が難しくなることも予想される。これを解決するための一つの方法として、制御対象を安定に動作させるために、情報通信理論を考慮した制御理論の構築が行われている。このような情報理論に基づく制御理論は、ネットワーク化制御と呼ばれ、ネットワーク化されたシステムの安定動作のために必要な情報量（通信容量）や安定動作を保証するための制御器の設計などの研究が、2000 年半ば辺りから盛んに行われている。

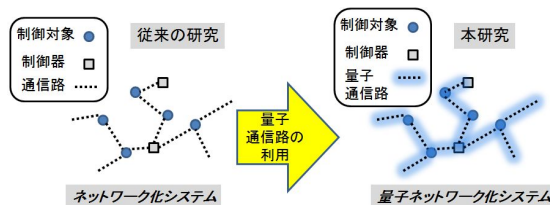


図 1. 従来研究と本研究の違い

一方、次世代情報処理技術として量子情報処理技術の研究が進んでおり、情報媒体の量子力学的な特性を適切に考慮することで、従来研究の 1000 倍以上の大容量の情報通信が可能であることを申請者らが理論および実験的に示した。量子力学を用いた通信においては、量子ビットと呼ばれる情報媒体を用いた通信方式（量子通信と呼ぶ）も提案されており、送ることのできる情報が従来の通信方式（古典通信と呼ぶ）よりも飛躍的に大きくなることが分かっている。量子通信の研究は理論・実験ともに盛んに研究されているが、ネットワーク化された系の制御のための量子通信の役割は、通信容量が増えるという点を除いて不明である。とくに量子力学における観測の問題や、量子計算や量子テレポーテーションを可能にする量子相関の制御問題への適用方法は明らかになっていない。

そこで、申請者が今まで行ってきた量子通信や推定技術の研究を活かし、量子通信を介したネットワーク化システムの制御問題について、その有用性や制御・推定性能限界、および量子情報処理に必要な量子相関の生成などを明らかにするという着想に至った（図 1）。

2. 研究の目的

本研究では、次世代情報通信技術と目されている量子通信を介したネットワーク化されたシステムの制御問題を考え、安定な動作のために必要な量子通信容量や制御性能限界、量子相関の生成法を明らかにすることを目的とした。これにより、通信技術が量子通信となった場合、従来の方式に比べた優位性を議論することができ、通信技術革新へと貢献する。具体的な研究目的は、以下の通りである。

- (1) 量子通信路を用いた場合の制御性能限界の解析
- (2) 測定から得られた情報に基づく推定精度の限界の調査
- (3) 量子通信路を用いた場合の量子相関生成

3. 研究の方法

本研究では、数値シミュレーションを併用しつつ、数理的なアプローチで量子通信路を用いたネットワーク化制御について解析した。研究目的は 3 種類であるが、まずは量子通信を用いた場合、制御則はどのように作らなければならないかを議論し、その上で必要な量子通信容量、および量子相関生成の問題に取り組んだ。具体的には、下記 3 項目を実施した。

- (1) 量子通信を用いた場合の制御問題の解析
- (2) 量子系における過去の信号の復号器（スムーザー）の設計
- (3) 量子通信路を用いた場合の量子相関生成法の設計

4. 研究成果

- (1) 最も簡単な通信方式と考えられる、量子ビットによる符号化・復号化を行う場合を考え、線形時不変な古典システムの制御が可能であるかどうかを調べた(図 2)。その結果、システムの可観測グラムアンから求める係数を満たす場合、1 量子ビットでも、システムをある確率以上で安定にすることが分かった。これは量子ビットに連続量を埋め込むことができるため、復号化としてオブザーバを利用することで、1 量子ビットに圧縮された情報の復元が高精度で可能になったためである。量子ビットに埋め込む情報を古典と同じく 0-1 に制限してしまうと不安定になる系においても、量子ビットに埋め込まれた豊富な情報のおかげで、安定化できたものと思われる。ただし、量子力学の原理により、量子ビットの測定値は確率的になってしまい、いつでも安定化できるわけではないこと

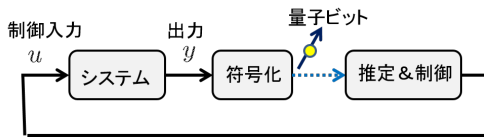


図 2. 量子通信路を介した安定化制御

もわかった。そこで確率論で知られる脱出確率を調べることで、安定化できる確率の上限を調べ、数値シミュレーションからその結果の妥当性を調べた。また、連続量を符号化することは可能であるものの、実数全体の情報を円周上に写しているため、システムの初期推定値が大幅に外れていると、安定化しにくくなる。これらの欠点は、符号化の工夫、およびオブザーバの設計によって調整することが可能である。本研究では、推定誤差の精度について解析的な結果を得、1度の通信に用いる量子ビットの数を増やすほど失敗確率が減ること、符号化に用いる関数の微分の最大値によって、推定誤差が有界に抑えられることがわかった。また、固有ベクトル配置と呼ばれる方法を用いることで、理論的には安定性を保証しきれなかった場合でも、安定化できることがわかった。

- (2) 通信容量は相互情報量によって特徴づけられ、動的システムに対して、それは最小二乗誤差推定であるフィルタリングとスムージングの誤差によって計算可能である。量子フィルタリング理論は1980年代からあるものの、量子スムージング理論はシステムを限定した場合の議論しかない。本研究では、最小平均二乗誤差を達成する量子スムージング理論を構築した。具体的には、量子系に対して内積を導入し、Gram-Schmidtの直交化を構成することで再帰的な推定器を構成した。これは、物理学では弱値 (weak value) と呼ばれる値を再帰的に得る推定器であり、推定値は複素数になる。この実部、虚部の意味づけも、別の内積を導入することではっきりとした。実部は、対称化内積と呼ばれる内積を用いた場合の最小平均二乗推定値になっており、虚部は被推定量が古典力学の世界からどのくらい離れているかを表す量である。数学的には、古典力学と量子力学の違いは、物理量を表すそれぞれの作用素が互いに可換であるか否かである。観測信号は古典力学に属しているため、そこから復元できる情報は古典力学で記述される。一方、被推定量は量子力学に属するものであり、古典力学の変数とは非可換になりうるものである。虚部は、平均的な非可換性を表しており、量子スムージングでは実部と虚部が互いに影響しながら時間発展する。また、時刻 $t > 0$ までの観測情報で、推定したい物理量が時刻 t 以降の場合はフィ

ルタリングと一致するため、量子フィルタリング理論を包含する理論である。この理論を用いることで、量子系の過去の状態を推定することができ、量子通信路で受けてしまう雑音の影響を除去した、状態の再構成への道が開けた。

- (3) 量子通信路を用いた量子相関生成法の設計について、2つのアプローチから調べた。

レーザー光でシステム間の相互作用が行われる量子ビット系をネットワーク系ととらえ、コンセンサスアルゴリズムと呼ばれる手法を量子系に適用し、量子相関を生成した。この方法は非常に簡易な方法で量子相関が生成できる。とくに、我々は疑似的なボゾン/フェルミオン状態をマクロな量子系で作成可能かどうかを試みた。手順は、以下の通りである。(ステップ1)各量子系の相互作用を表すネットワークトポロジーは強連結であるとし、そのグラフの枝をランダムに選んで枝につながった量子系をレーザーで直列につなぎ測定する。(ステップ2)次に、測定結果に基づいて、それぞれの量子系の状態の入れ替えに対して対称/反対称になるように操作を行う。これらを繰り返すことで、ボゾン/フェルミオン状態が、量子ビットからなる系で実現可能である。様々な状況を考えて数値実験すると、平均収束速度は指数的事であることがわかり、素早い収束を可能にする。ここで重要な点は、これらの操作は、ランダムに測定する量子系を選び、その測定結果に応じて量子系に入力を入れるという、非常にシンプルなものであり、全体の状態を計算する必要がない点で優れている。そのため、大規模なシステムであっても有用である。

量子情報処理では、ネットワーク化したシステムにおいて量子相関をどのように生成するかが問題であり、相関は情報の移動を伴って生成される。そこで、情報理論や生物物理学で用いられる、移動情報量と呼ばれる指標を用いて、複数の量子系が与えられたときに相関が得られるための条件を数値的に検証した。ただし、ここでは古典系との対応しやすさを考え、量子系は線形量子系に限定して議論した。その結果、線形量子系が直列結合でつながっている場合、移動情報量の値がある範囲に収まれば、2つの線形量子系に量子相関が生じることがわかった。これは、すでに与えられている量子系に別の量子系を付加する際、どのような情報伝達 (結合係数) を考えればよいかの指標になるものである。また、様々なネットワークトポロジーを調べたところ、直列結合する以外の場合は移動情報量と

量子相関の間に明確な関係が見いだせなかった。今回の研究成果は、直列結合にすべきであるという主張ではないが、システムを追加する際に、追加するシステムとの情報のやりとりがどの程度であれば量子相関を生ませることができるとわかる点で、有用であると考え。

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 0件)

[学会発表](計 12件)

大木 健太郎、`A smoothing theory for open quantum systems: the least square approach," 54th IEEE Conference on Decision and Control, 査読有、2015、pp. 4350-4355、

DOI: 10.1109/CDC.2015.7402898

大木 健太郎、量子フィルタリングと量子スムージング: 最小二乗誤差推定の視点から、量子統計モデリングのための基盤構築、2015

丹保 祐介、大木 健太郎、二つの線形量子系の情報の流れと量子相関先生の解析、第 59 回システム制御情報学会研究発表講演会、2015

大木 健太郎、`A recursive least mean square estimation for past open quantum dynamical systems," SICE Annual Conference, 査読有、2014

青山 紘己、大木 健太郎、量子ビットシステムにおけるスムージングと条件付き期待値、第 58 回システム制御情報学会研究発表講演会、2014

丹保 祐介、大木 健太郎、線形量子系のネットワーク構造と量子相関生成の解析、第 2 回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム、2015

大木 健太郎、線形量子系のスムージング問題とその古典系との比較、第 2 回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム、2015

丹保 祐介、大木 健太郎、ネットワーク構造と量子相関生成の解析: 線形量子系の場合、計測自動制御学会関西支部・システム制御情報学会若手研究発表会、2015

加門 駿平、大木 健太郎、合意形成アルゴリズムを用いた量子状態のボゾン化とフェルミオン化、第 1 回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム、2014

加門 俊平、大木 健太郎、射影測定と局

所的フィードバック制御による量子状態の合意形成、第 56 回自動制御連合講演会、2013

大木 健太郎、量子フィルタリングとその量子光位相推定への応用、高信頼制御通信研究会、招待講演、2013

大木 健太郎、量子ビット通信を用いたオブザーバに基づく線形確定システムの制御、第 57 回システム制御情報学会研究発表講演会、2013

[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]
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大木 健太郎 (OHKI, Kentaro)
京都大学・大学院情報学研究科・助教
研究者番号: 40639233

(2) 研究分担者
なし

(3) 連携研究者
なし