

令和 2 年 6 月 25 日現在

機関番号：94305

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17K05591

研究課題名（和文）間接操作を利用した高ノイズ耐性な量子制御の理論構築

研究課題名（英文）Theoretical development of high noise tolerance quantum control using indirect operations

研究代表者

加藤 豪 (kato, go)

日本電信電話株式会社NTTコミュニケーション科学基礎研究所・メディア情報研究部・主任研究員

研究者番号：20396188

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、量子間接制御の枠組みによって実現しうる動的リー代数に関して研究し、その完全な分類を実現した。具体的には、間接空間上のエルミート行列で表現されるジョルダン代数の分類と動的リー代数が深い関係にあることを鍵として、ジョルダン代数のエルミート行列表現を全て列挙することで実現した。さらには、求めた動的リー代数の分類と具体的な系との関連について考察をおこなった。その結果、量子システムが持つ対称性が間接制御における動的リー代数の構造に与える影響を明らかにした。さらには、スピン系などにおいても、わずかな状況の変化で、可能な操作の集合が急激に増加する現象が容易に起こりうることも発見した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

間接的に量子系を制御することによる量子情報処理は、個別の状況それぞれに異なる解析の困難さが存在すると信じられていました。そのため、量子計算機など、中規模以上の量子系を利用しようとする際、間接制御を用いた量子情報処理の実現は積極的には研究されてきませんでした。本研究では、規模がいかに大きな量子系であろうとも、そこに含まれる2個以上の量子ビットを任意に操作できれば、その量子ビットに間接的に繋がった量子系に対する任意の制御が本質的に普遍的に可能であることが示しました。これにより、中規模以上の量子系であったとしても、間接制御が、量子情報処理を実現する手段の一つとして候補になりうることを示されました。

研究成果の概要（英文）：In this work, we investigate the dynamical Lie algebras which is derived in the case of quantum indirect controls and obtain a complete classification of them. In order to give the classification, we use the discovered fact that the classification of the dynamical Lie algebras is deeply connected to the classification of the Hermitian matrix representations of Jordan algebra. In addition, we discussed the relationship between the classification of such dynamical Lie algebras and examples of indirectly-controlled quantum systems. The results reveal the effect of the symmetry of quantum systems on the structure of dynamical Lie algebras. Furthermore, we also found that the set of possible operations can easily increase drastically in spin systems due to a slight change of coupling constants.

研究分野：量子情報

キーワード：量子システム 間接制御

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年、量子計算機をはじめとする量子情報処理に対して、その実現への期待が高まっています。しかし、現在実現している数十量子ビット以上の量子情報処理においては、システムに混入するノイズが大きいためにコヒーレンス時間が十分には長くはできず、多くの場合においては量子的性質を有効に活用できるまでには至っていません。実際、実現へ向けたノイズ低減のための現在の研究は、実験においては電磁遮蔽などの物理的手段によるノイズ遮蔽の模索が中心であり、理論においては性能が良く使い勝手の良い量子誤り訂正符号を用いた理論的なノイズの影響の排除が中心となっていますが、未だ十分なノイズ低減の実現は見通せていません。

その一方、1量子ビットの量子メモリーなど、小規模の量子情報処理は、NV センタなどのように、外部からのノイズなどの影響を原理的に受けにくい量子系(E 系)を、超伝導量子ビットのような操作しやすい量子系(S 系)を利用して間接的に制御する量子的間接制御(図1)と呼べる手段によって、比較的長いコヒーレンス時間で実現しています。しかし、大規模な系で同様に量子的間接制御を実現しようとする場合、その制御設計が複雑になってしまうため、考慮の対象にさえなっていませんでした。

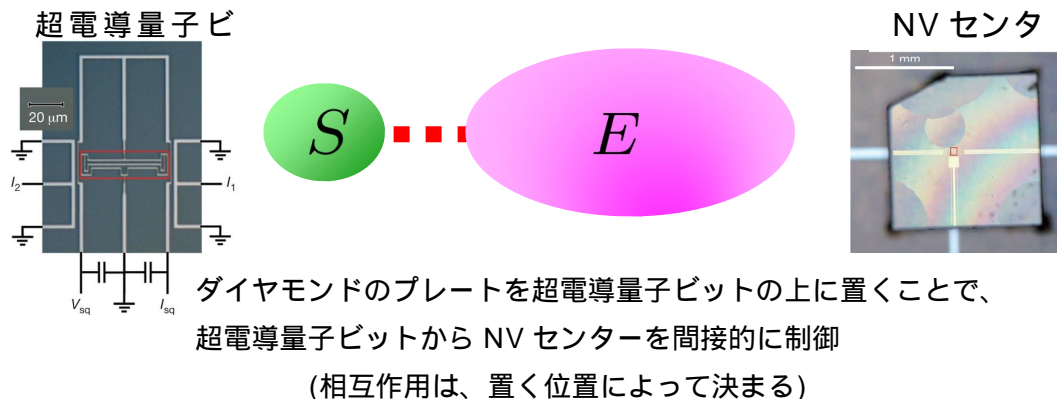


図 1. 量子的間接制御の具体例

2. 研究の目的

一般的に、量子系の操作は、外部環境の人為的変更によって実装します。そのため、量子系を操作するためには外部環境の変化に対して量子系が応答して変化することが必要不可欠です。しかし、人為的な操作以外の影響でも外部環境は変化するため、外部環境への応答性はノイズ侵入の原因にもなります。そこで、量子情報処理を実現する手段としては、適度な応答性を持つ量子系が利用されます。実際、応答性が低すぎる量子系では、ノイズの侵入が原理的に減少する代わりに、操作性も悪化します。つまり、量子系への操作の容易性とノイズ侵入の困難性との間にはトレードオフの関係が原理的に存在します。実際、現状の量子計算機においては、万能性が失われてアルゴリズムに制限が加えられるようなことがないよう、潤沢な操作性があることを前提としており、そのことがノイズ侵入を防ぐ上での原理的な限界を与えています。そのため、操作性が制限された中でも自由に全体制御が可能であることがわかれば、ノイズ低減を高いレベルで実現したうえで、量子情報処理を実現できることが期待されます。そこで、数十量子ビットを超える大規模な量子情報処理における、量子的間接制御の利用可能性をさぐることを目的として、十分な制御性を実現するために必要な条件を明確化することを目指しました。

3. 研究の方法

与えられた量子系全体への可能な制御の集合は、許容される個々の操作に対応する生成子から生成される動的 Lie 代数と呼ばれる歪エルミート行列の集合によって表現されることが知られています。そのため、量子系への制御性に関する情報は、当該量子系に対する動的 Lie 代数が何であるかを知ることによって得ることができます。例えば、現在考えられている典型的な量子計算機のモデルにおいては、量子アルゴリズムを実現するために十分な高い操作性を有することは、対応する動的 Lie 代数に全ての歪エルミート行列が含まれることから見て取ることができます。そこで、量子間接制御という枠組みが、動的 Lie 代数の構造に与える影響を明確化することによって、量子間接制御を量子情報処理に使うに当たって十分な制御性を持つかを判断できるようになります。

4. 研究成果

操作性が低い量子系の場合、実現しうる動的 Lie 代数には多様な可能性が存在します。それ故に、単に操作性が低いという事実のみから普遍的な性質を抽出することは困難でした。しかし、操作が量子的間接制御によって行われるという事実さえ仮定すれば、その動的 Lie 代数には Jordan 代数と深く関連する構造の存在が要求されることを発見しました。Jordan 代数は動的 Lie 代数に比べて多様性が非常に小さいことが知られています。この事実を使うことで、量子的間接制御の場合の動的 Lie 代数を完全に分類するとともに、そこから普遍的な事実を抽出することに成功しました。例えば、直接制御可能な系の次元が3以上の場合の動的 Lie 代数では特徴的な基底をとることができ、その基底においては必ず任意の元が同時ブロック対角化されると共に、個々のブロックは直接操作できる量子系(S系)に影響を与える空間への任意の歪エルミート行列と S系に影響を全く与えない空間への作用する行列の直積が当該動的 Lie 代数に含まれる(図2)。これは、量子系全体が、直接操作可能な系から見れ

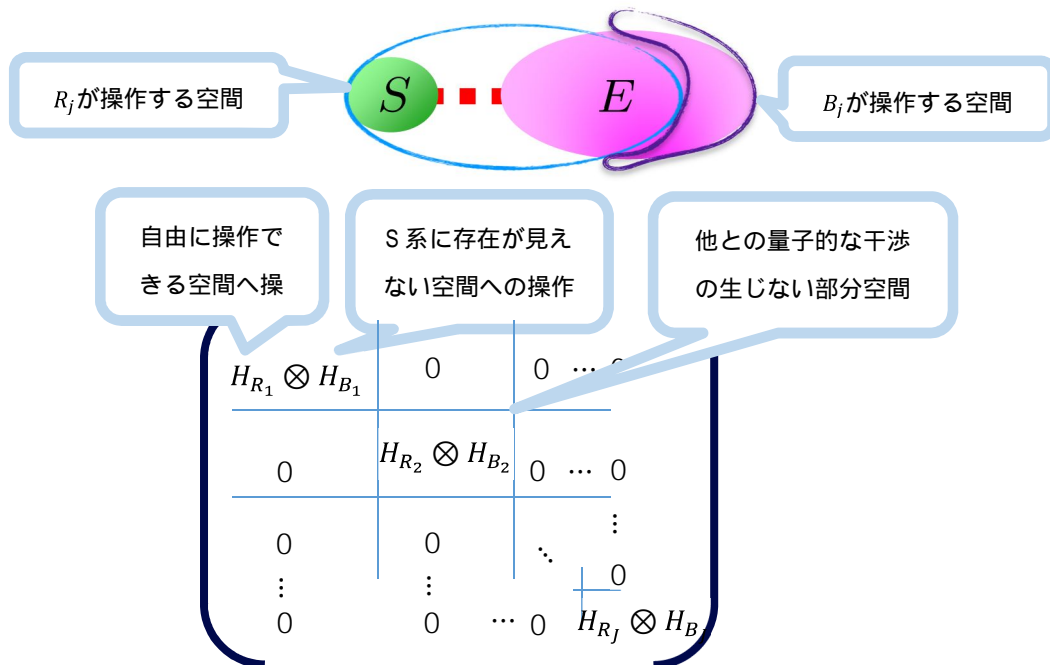


図2. 普遍的に量子的間接制御の動的 Lie 代数の元が持つ構造

ば本質的に全体を制御可能な系の確率的重ね合わせであることを示しており、量子情報処理を実現する手段として十分な制御性を有していることを意味している。さらには、当該分類は、直接制御可能な系の次元が2の場合にはより細かな構造を空間の特徴が存在すること

を示すと共に、作業用の量子系をつけることで、実行可能な制御が拡張される様子を完全に記述していることがわかった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

| | |
|---|-------------------------------|
| 1. 著者名 Kato Go, Owari Masaki, Maruyama Koji | 4. 巻 412 |
| 2. 論文標題 Algebra and Hilbert space structures induced by quantum probes | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Annals of Physics | 6. 最初と最後の頁 168046 ~ 168046 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.aop.2019.168046 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 2件）

| |
|---|
| 1. 発表者名 G. Kato, M. Owari, and K. Maruyama |
| 2. 発表標題 Hilbert space structure induced by quantum probes |
| 3. 学会等名 Proceedings of 11th Italian Quantum Information Science Conference, accepted for publication. (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Masaki |
| 2. 発表標題 Hilbert space structure induced by quantum probes |
| 3. 学会等名 2018 International Workshop on Quantum Information, Quantum Computing and Quantum Control (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 加藤 豪、尾張 正樹、丸山 耕司 |
| 2. 発表標題 間接制御により誘起されるヒルベルト空間と制御代数の構造 |
| 3. 学会等名 第41回量子情報技術研究会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Koji Maruyama |
| 2. 発表標題 Algebra and Hilbert space structures induced by quantum probes |
| 3. 学会等名 MINI WORKSHOP ON CLASSICAL AND QUANTUM RESOURCES |
| 4. 発表年 2019年 |

〔図書〕 計1件

| | |
|--------------------|---------------------|
| 1. 著者名 丸山耕司・加藤豪 | 4. 発行年 2018年 |
| 2. 出版社 日本物理学会 | 5. 総ページ数 134-142 |
| 3. 書名 日本物理学会誌 | |

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

| | 氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号) | 所属研究機関・部局・職 (機関番号) | 備考 |
|-------|--|---|----|
| 研究分担者 | 丸山 耕司 (maruyama Koji) (00425646) | 大阪市立大学・大学院理学研究科・客員教授 (24402) | |
| 研究分担者 | 尾張 正樹 (Owari Masaki) (80723444) | 静岡大学・情報学部・准教授 (13801) | |