

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 1 日現在

機関番号：34419

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25400422

研究課題名(和文) オープン・ループ制御による高忠実度量子ゲートの設計と実装

研究課題名(英文) Design and Implementation of High-Fidelity Quantum Gates without Feedback

研究代表者

近藤 康 (KONDO, Yasushi)

近畿大学・理工学部・教授

研究者番号：40330229

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)：エラーの影響を受けやすい量子ゲートを複数個組み合わせれば、ノイズやエラーの影響を受けにくい量子ゲート(複合量子ゲート)を構成できる。我々は、この複合量子ゲートの設計と実装(応用)を研究の中心に据え、量子エラー訂正、量子コンピュータのための新しい量子系の提案、選択的な2量子ビットゲートの提案と実装、平面幾何学を用いた任意のエラー耐性のある量子ゲートの設計、そして量子ゼノン効果による位相緩和抑制の実証実験を行ってきた。

研究成果の概要(英文)：Composite quantum gates made of possibly poor-quality ones can be made robust against systematic errors without feedback control. Very precise quantum gates are proposed by adding feedback control on these composite quantum gates. Therefore, composite quantum gates are important in order to realize precise quantum control.

We proposed a new and intuitive method how to design such composite quantum gates and applied these in order to demonstrate a quantum Zeno effect. Moreover, we demonstrated a simple yet interesting quantum error correction scheme and proposed a new quantum system of neutral atoms for a quantum computer. We also proposed and demonstrated a selective 2-qubit gate for NMR quantum computer experiments.

研究分野：数物系科学

キーワード：量子制御 量子情報 量子コンピュータ 複合量子ゲート 量子誤り訂正符号 NMR

1. 研究開始当初の背景

量子情報の研究は、少数量子ビットの実現に向けた研究を行っている実験家と多数の量子ビットの存在を前提に量子アルゴリズムの研究を行っている理論家に大別でき、その間の隔たりは大きいと言わざるを得ない。二つの例を挙げよう。

(1) 量子情報処理の基本操作は量子ビットへのユニタリー操作であり、これを量子ゲートと呼ぶ。精密な量子制御を実行するためには、エラーの影響を受けにくい(ロバストと言う)量子ゲートが必要である。エラーの影響を受けやすい量子ゲートを複数個組み合わせれば、ノイズやエラーの影響を受けにくい複合量子ゲートを構成できる。グレブナー基底を使うなどしてより高次のエラーに対応する研究が多く、実際の実験へ応用できるシンプルな複合量子ゲートの研究はあまり活発に行われていなかった。

(2) 量子誤り訂正符号は量子情報において重要な技術である。しかしながら、群論を駆使するその原理は高度に数学的でとても難解である。また、理論家が提供する具体例も複雑なものであった。

科学の進歩は、理論と実験が協調して進むべきであるが、このような状況は必ずしも理想的な状況とは言えない。

2. 研究の目的

1で述べた実験家と理論家との溝を少しでも埋めることを目指した。

(1) に関しては、高次のエラーの訂正を犠牲にして1次のエラー訂正だけを行うが、できるだけ分かりやすい複合量子ゲートの設計法を開発することを目標とした。また、複合量子ゲートを用いる必要がある、量子ゼノン効果などの興味深い実験を行うことによって、複合量子ゲートの有用性を多くの研究者にアピールすることも大きな目的であった。

(2) に関しては、特殊で人為的なエラーを訂正するアルゴリズムではあるが、できるだけシンプルで従って量子誤り訂正符号を理解する上で有用な例を示すことを目的とした。さらに、できるだけ簡単な実験を行うために、補助ビットとして任意の混合状態を用いて量子誤り訂正を行うことを目指した。

3. 研究の方法

本研究では理論と実験の間の溝を埋めるために、液体状態 NMR 量子コンピュータを量子コンピュータのテストベンチとして活用した。NMR 装置は所属大学の共同利用センターにある化学分析用の高分解能 NMR 装置を活用した。量子アルゴリズムを実装するために、代表者近藤がパルス・プログラム(パルス列を制御する手順書)を書き実験を行った。また、分担者中原は同じ大学に勤務しており、大学院生や博士研究員を含めて頻繁に議論を行った。連携研究者の落水と市川とは、研究室訪問や日本物理学会の際、あるいはメールを通じて議論を行った。

研究代表者近藤は夏季休暇中にドイツのドルトムント大学(2013年)、イギリスのオックスフォード大学(2014年)、そして合衆国のチャップマン大学(2015年)に出張し、その研究者と交流を行った。その結果、国外の研究者との共著の論文を得ることができ、さらに現在投稿準備中の研究もある。また、NMR 装置のメーカである日本電子 JEOL RESONANCE の研究者と複合量子ゲートの NMR 装置への応用研究を始めた。

研究成果は国内外の雑誌に出版するとともに、国内外の学会・研究会で発表し、その成果を世界的に公開した。また、成果を公開するホームページを作成した。

4. 研究成果

ドイツのドルトムント大学の研究者と共同で2個の量子ゲート(エラーがない場合には恒等演算子になるもの)を加えることによって、任意の量子ゲートをロバスト(エラーに対して耐性を持つ)にする方法を開発した。各量子ゲートのエラーにのみ注目すると、図1(発表論文3より転載)のようにこれらのエラーはある平面上のベクトルで表すことができる。これらのベクトルの和がゼロ・ベクトルになれば(これらのベクトルによって四角形を作ることができれば)、ロバストな複合量子ゲートができる。今までの複合パルスの設計法とは異なり、平面幾何学を用いて直感的に複合量子ゲートを設計する方法を開発することができた。

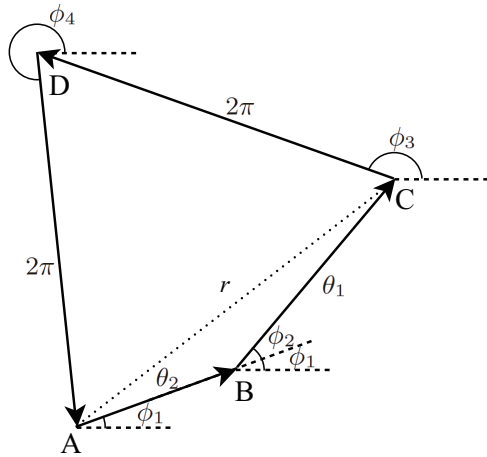


図1:個々の量子ゲートのエラーを表すベクトル \vec{AB} 、 \vec{BC} 、 \vec{CD} と \vec{DA} が、四角形を作ると全体でロバストな複合量子ゲートになる。

「測定によって量子系の時間発展を止める」と言う量子ゼノン効果によって位相緩和を抑制する実験をNMR量子コンピュータを用いて行った(発表論文1)。測定を行うことによって、位相緩和を起こしてしまえば意味がないので、精密な量子制御(測定)が必要である。そのために、複合量子ゲートを活用した。目的で述べたように、量子ゼノン効果という興味深い実験のなかで、複合量子ゲートの有用性を示すことができ、その有用性を広くアピールすることができた。また、この実験では測定を磁場勾配によってシミュレーションするのではなく、測定器として他の量子ビットを導入している点

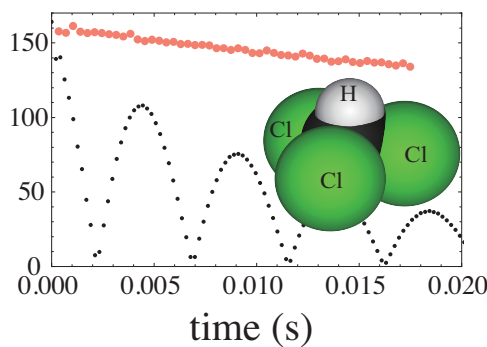


図2:赤い丸は量子ゼノン効果の実験結果である。比較のためにFID信号の絶対値を小さな黒丸で示す。FIDの振動はスカラー結合のためで、その振動の振幅の減少が位相緩和の効果である。赤い丸は小さな黒丸より常に大きく、位相緩和が抑制されていることがわかる。内挿された分子の構造モデルは使用したクロロホルム分子のものである。

が他のNMRによる量子ゼノン効果の実験とは大きく異なっている。

量子誤り訂正の実験は、3個の量子ビットに同じエラー $\{E_k\} = \{\sqrt{p_0}\sigma_0^{\otimes 3}, \sqrt{p_x}\sigma_x^{\otimes 3}, \sqrt{p_y}\sigma_y^{\otimes 3}, \sqrt{p_z}\sigma_z^{\otimes 3}\}$ が作用するという特殊な場合を考え、できるだけシンプルで理解することが容易な、しかし応用面でも興味深いアルゴリズムをNMR量子コンピュータを用いて実装した。Quantum Discordという量子相関を表す変数を計算したところ、図3(発表論文7より転載)に示すように奇妙な形のオブジェが得られた。この図はPhysical Review AのKaleidoscopeに採用され、我々の研究を広く公開するために役だった。

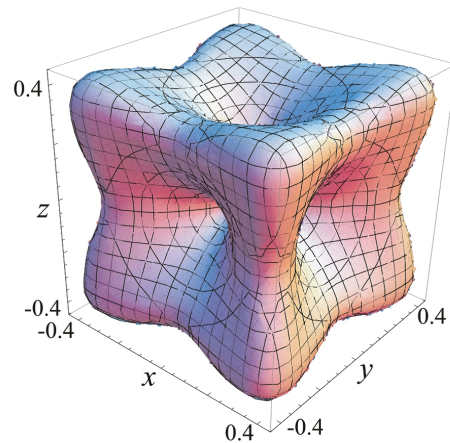


図3:データ量子ビットと2個の補助量子ビットの間の量子相関を表すQuantum discordをデータ量子ビットの初期状態の関数として表したもの。初期状態はブロッホ・ベクトルで表した。

上記の量子誤り訂正の実験では3個の量子ビットを扱い、3通りある特定の2個の量子ビット間のエンタングルメントを得る必要がある。その方法を発表論文4で議論した。以前から行われていた方法よりも精度の高い量子制御を実現することができた。

その他、発表論文5では光によって中性原子を格子状にトラップした量子系で2量子ビット演算を実行する方法を議論した。実験を行うことを念頭に、できるだけ簡単な方法を提案した。また、近畿大学総合理工学研究所の紀要に、論文2(人工的な位相緩和を起こす系について)と論文6(複合パルスについて)を発表

した。まだ論文執筆に至っていないが我々の研究成果をNMRのパルス列(量子コンピュータの量子制御に対応)にフィードバックする試みを行っており、学会発表9でその成果を公開した。連携研究者水落とはダイヤモンド中のNVセンターの電界による制御について議論している。学会発表8を参照のこと。

5. 主な発表論文など

(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8件)

1. Yasushi Kondo, Yuichiro Matsuzaki, Kei Matsushima and Jefferson G. Filgueiras, “Using the quantum Zeno effect for suppression of decoherence”, 査読あり, New J. Phys. **18** (2016) 013033, DOI: 10.1088/1367-2630/18/013033.
2. 岩倉愛, 坂東将光、近藤康、「位相緩和を研究するためのNMRモデル」、査読なし、近畿大学理工学総合研究所紀要 **27** (2015) 1-5、<http://ci.nii.ac.jp/naid/120005737332>.
3. Tsubasa Ichikawa, Jefferson G. Filgueiras, Masamitsu Bando, Yasushi Kondo, Mikio Nakahara, and Dieter Suter, “Construction of Arbitrary Robust One-Qubit Operations Using Planar Geometry”, 査読あり, Phys. Rev. A **90** (2014) 052330, DOI: 10.1103/PhysRevA.90.052330.
4. Chiara Bagnasco, Yasushi Kondo and Mikio Nakahara, “Efficient entanglement operator for a multi-qubit system”, 査読あり, Phys. Scr. **89** (2014) 085102-1-6, DOI: 10.1088/0031-8949/89/8/085102.
5. Elham Hosseini Lapasar, Kenichi Kasamatsu, Sile Nic Chormaic, Takeji Takui, Yasushi Kondo, Mikio Nakahara, and Tetsuo Ohmi, “Two-Qubit Gate Operation on Selected Nearest-Neighbor Neutral Atom Qubits”, 査読あり, J. of the Phys. Soc.

of Japan **83** (2014) 044005-1-7, DOI: 10.7566/JPSJ.83.044005.

6. 松島恵、坂東将光、市川翼、中原幹夫、近藤康、「複合パルスのNMR測定への応用」、査読なし、近畿大学理工学総合研究所紀要 **26** (2014) 33-39、<http://ci.nii.ac.jp/naid/40020025684>.
7. Yasushi Kondo, Chiara Bagnasco, and Mikio Nakahara, “Implementation of a simple operator-quantum-error-correction scheme”, 査読あり, Phys. Rev. A **88** (2013) 022314, DOI: 10.1103/PhysRevA.88.022314.
8. 坂東将光、市川翼、近藤康、中原幹夫、「頑強な量子ゲート：複合量子ゲート(最近の研究から)」、査読あり、日本物理学会誌 **68** (2013) 459-463、<http://ci.nii.ac.jp/naid/110009624996>.

[学会発表] (計15件)

1. Mikio Nakahara, Keynote speech “Designing Robust Quantum Gates against Errors”, Workshop on Quantum Computing and Computational Quantum Mechanics, University of Jyväskylä, Finland, 2016年8月12-13日(決定)。
2. Yasushi Kondo, Yuichiro Matsuzaki, Kei Matsushima, and Jefferson G. Filgueiras, “Suppression of decoherence by using the quantum Zeno effect”, 50'th Finnish Physical Society Meeting, Oulu Univ. (Finland), 2016年3月29-31日。
3. ギットスイントプチャイ チョンラテープ、坂元友哉、菅原賢吾、近藤康、「NMR量子コンピュータのための卓上NMR装置」、日本物理学会2016年春季大会、東北学院大学(仙台)、2016年3月19-22日。
4. 岩倉愛、近藤康、「バンバン制御のパルス間隔最適化」、日本物理学会2016年春季大会、東北学院大学(仙台)、2016年3月19-22日。

5. 近藤康、「NMRにおける量子ゼノンダイナミクス」、日本物理学会 2016 年春季大会、東北学院大学（仙台）、2016 年 3 月 19–22 日。
 6. Yasushi Kondo and Ai Iwakura, “*NMR system for studying phase decoherence*”, Int. Symp. on Dynamics in Artificial Quantum System, 東京大学（駒場）, 2016 年 1 月 12–14 日。
 7. Tsubasa Ichikawa, Mikio Nakahara, Yasushi Kondo, Nobuaki Nemoto, Yukihiro Ota, and Yutaka Shikano, and Masamitsu Bando, ICQOQI2015, Minsk (Belarus), 2015 年 10 月 27–30 日。
 8. 下岡孝明、森徹平、鈴木義茂、水落憲和、「電界効果を用いたダイヤモンド中の単一核スピンの量子制御」、日本物理学会 2015 年秋季大会、関西大学（大阪）、2015 年 9 月 16–19 日。
 9. Nobuaki Nemoto, Tomomitsu Kurimoto, Toshihito Nakai, Masamitsu Bando, Tsubasa Ichikawa, Mikio Nakahara, Yutaka Shikano, and Yasushi Kondo, “*Application of Concatenated Composite Pulses (CCCPs) to Solution NMR Experiments*”, IS-MAR2015, 上海（中国）, 2015 年 8 月 16–21 日。
 10. 岩倉愛、坂東将光、近藤康、「NMR による位相緩和モデルの実装」、日本物理学会 2015 年春季大会、早稲田大学（東京）、2015 年 3 月 21–24 日。
 11. 近藤康、松崎雄一郎、松島恵、J. G. Filgueiras、「量子ゼノン効果による位相緩和の抑制」、日本物理学会 2015 年春季大会、早稲田大学（東京）、2015 年 3 月 21–24 日。
 12. 坂東将光、近藤康、「最も単純な operator-quantum-error-correction の実装」、日本物理学会 2015 年春季大会、早稲田大学（東京）、2015 年 3 月 21–24 日。
 13. 松島恵、坂東将光、近藤康、「複合量子ゲートの有用性の実験的検証」、日本物理学会 2014 年春季大会、東海大学（神奈川）、2014 年 3 月 27–30 日。
 14. Chiara Bagnasco, Yasushi Kondo, and Mikio Nakahara, “*A Simple Operator Quantum Error Correction Scheme Avoiding Fully Correlated Noise*”, 日本物理学会 2013 年秋季大会、徳島大学（徳島）, 2013 年 9 月 25–28 日。
 15. 坂東将光、市川翼、近藤康、中原幹夫、鹿野豊、「複合パルスを用いた NMR パルス列の理論的考察」、日本物理学会 2013 年秋季大会、徳島大学（徳島）、2013 年 9 月 25–28 日。
- 〔図書〕（計 0 件）
（該当なし）
- 〔産業財産権〕（計 0 件）
（該当なし）
- 〔その他〕
ホームページ等
<http://qube.phys.kindai.ac.jp/users/kondo/research.html>
6. 研究組織
- (1) 研究代表者
近藤 康 (KONDO Yasushi)
近畿大学・理工学部・教授
研究者番号：40330229
 - (2) 研究分担者
中原 幹夫 (NAKAHARA Mikio)
近畿大学・理工学部・教授
研究者番号：90189019
 - (3) 連携研究者
水落 憲和 (MIZUOCHI Norikazu)
大阪大学・基礎工学部・准教授
研究者番号：0032311

市川 翼 (ICHIKAWA Tsubasa)
学習院大学・理学部・研究員
研究者番号：50572658