

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 5 日現在

機関番号：92704

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K17732

研究課題名(和文)ハイブリッド系を用いた量子計測学

研究課題名(英文)Hybrid quantum metrology

研究代表者

松崎 雄一郎 (Matsuzaki, Yuichiro)

日本電信電話株式会社 NTT 物性科学基礎研究所・量子電子物性研究部・研究主任

研究者番号：10618911

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)：ハイブリッド量子系を用いた量子計測について、理論的な解析を行った。特に、超伝導量子回路、電子スピン、核スピンを組み合わせることで、高感度なセンシングを行えることを理論的に示した。特に、絡み合いなどの量子性がいかに古典限界を超える際に、重要な役割を果たすかを明らかにした。また実験家と共同研究することで、実験実証までの道筋をつけて、いくつかのアイデアは実際に実験で成果を得ることに成功した。これらの成果は、ただ高感度なセンシングの実証に役立つだけでなく、量子計算や量子中継といったより高次のアプリケーションに向けたマイルストーンとしての役割も果たす。その点で、極めて重要な成果だといえる。

研究成果の概要(英文)：We have investigated how hybrid quantum systems can enhance the sensitivity of the quantum sensors. We have studied the role of quantum entanglement to beat the standard quantum limit that every classical sensors are bounded by. Especially, we have discussed the use of superconducting circuits, electron spin, and nuclear spins to improve the sensitivity of the hybrid sensors. We have collaborated with experimentalists, and discuss how our theoretical ideas can be demonstrated in the current technology. Moreover, some of our ideas have been tested by the actual experiments. Our results contributes not only the realization of the sensors but also a milestone for the more advanced quantum applications such as quantum computation, quantum repeater, and quantum simulation. Therefore, we believe that our results are significantly important in this quantum information society.

研究分野：量子情報理論

キーワード：量子センサ

1. 研究開始当初の背景

量子系を用いた情報処理は世界中で興味をもたれて研究が行われてきている。高速計算が可能になる量子計算や、完全な秘匿性が得られる量子通信などがその例である。その中でも、量子計測は実現までにかかる時間が比較的短いとして、着目を集めている。重ね合わせやエンタングルメントを用いることで感度を向上させて、古典センサよりも桁違いに高い感度のセンサを構築することが目的である。

量子計測の実現は、単に高感度のセンサを実用化するととどまらず、他の量子情報分野への波及効果も期待できる。量子計測の実現の過程で得た知識と技術は、量子計算などのより高次のアプリケーションを目指すうえで必ず役立つと考えられる。そのため、量子計測は量子情報処理分野でのマイルストーンとしての役割を果たす点でも、極めて重要な分野であると考えられている。

2. 研究の目的

従来の量子計測は主に、少数量子ビットを用いた実現がほとんどであった。しかし、古典センサと桁違いの感度を実現するには、多量子ビットでセンサを構築することが望ましい。本研究では、ハイブリッド量子系を集積化した際に得られる、高感度なセンサの理論提案を行うことである。具体的には、電子スピン、核スピン、超伝導量子回路などのシステムをコヒーレントに結合させていくことで、究極の感度を持つ量子センサを実現するための理論提案を目標とする。

このような多量子ビットのハイブリッド系の量子計測を考案することは、量子情報処理分野のマイルストーンとしても重要な意味を持つ。量子計算を実現するには、ハイブリッド量子系も用いること、集積化を行うこと、の二点が極めて重要であると考えられている。量子計測の実現過程で、ハイブリッド系の構築すること、集積化の技術を蓄えておくことで、より高次のアプリケーションへの応用がより容易に行えるようになる。

3. 研究の方法

ハイブリッド量子系を用いた高感度センサの理論提案を行う。その後、数値計算と解析計算により、センサの感度計算を行う。また実験家と議論をすることにより、現実的なパラメタを知り、その中で実現できる理論的提案を探っていく。また可能であれば、実験家と共同することで原理実証実験を行っていく。

特に、現実的なノイズの影響を理論モデルに取り込んでいく。従来の量子計測の理論は、ノイズのない理想的な状況を考えることが多かった。我々は、モデルの中に現実的なノイズを取り込み、その上でノイズロバストなプロトコルを提案していく。このような理論的な解析は、量子計測を数学上の抽象的なスキームに終わらせず、実際に役立つものとしていくためには決定的に重要なものとなる。

4. 研究成果

申請者ははじめに、超伝導量子回路と電子スピン集団の結合系に着目した。原理的には、超伝導量子回路の制御性の高さと、電子スピンのコヒーレンス時間の長さを用いることで、理想的なハイブリッド素子が構築できるはずである。しかしながら、この系にはまだ理解できていない点も多く、申請者はこの系を記述できる理論モデルを組み立て、実験結果を再現することを試みた。たとえば、超伝導量子ビットと電子スピン集団の分光測定の結果を、パワー広がりまで含めて理論で再現することに成功した。またこの系が、エンタングルメント磁場センサに役立つことを発見して、理論提案を行った。さらに、この系が高感度のスピン共鳴装置としても役立つことを発見して、実験家と協力することで、超伝導量子回路を用いた電子スピン共鳴の実験実証を行った。

さらに申請者は、超伝導量子ビットと電子スピン集団を記述するモデルを、マイクロ波共振器と超伝導磁束量子ビット集団の結合系にも適用できるように拡張した。たとえば、電子スピン1個と超伝導量子ビットの結合はkHzのオーダーで極めて小さいが、集団の電子スピンが結合する場合は、協調的な効果によりMHz程度の結合を得られることがわかっていく。申請者は、このロジックが、マイクロ波共振器と超伝導磁束量子ビット集団の結合系にも適用できることをシミュレーションにより確認した。具体的には、単一の超伝導量子ビットがマイクロ波共振器に結合するレートはMHz程度だが、集団の協調効果によりGHz程度の結合レートが得られる。この成果を実験家と議論することにより、実験実証の道筋をたてることができ、実際に4300個の超伝導量子ビットをマイクロ波共振器に結合させることに成功した。

また抽象的な理論面でも、感度を飛躍的に向上させるプロトコルをいくつか提案した。たとえば、量子誤り検知と呼ばれるスキームは量子計算において大規模化を達成させるために用いられるが、このアイデアが量子計測の感度向上にも役立つことを示した。また、量子テレポートは、一方向量子計算機や量子中継で用いられる技術だが、このスキームが位相緩和の抑制に役立ち、さらにセンサの感度向上に貢献することを理論的に示した。

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 17 件)

・Quantum Metrology beyond the Classical Limit under the Effect of Dephasing
Yuichiro Matsuzaki, Simon Benjamin, Shojun Nakayama, Shiro Saito, and William J. Munro
Phys. Rev. Lett. 120, 140501 - Published 5 April 2018

- Ai Iwakura, Yuichiro Matsuzaki, and Yasushi Kondo
" Engineered noisy environment for studying decoherence "
Phys. Rev. A 96, 032303 (2017)
- Sayaka Kitazawa, Yuichiro Matsuzaki, Soya Saijo, Kosuke Kakuyanagi, Shiro Saito, and Junko Ishi-Hayase
" Vector-magnetic-field sensing via multifrequency control of nitrogen-vacancy centers in diamond "
Phys. Rev. A 96, 042115 (2017)
- Y. Matsuzaki, S. Nakayama, A. Soeda, S. Saito, and M. Murao
" Projective measurement of energy on an ensemble of qubits with unknown frequencies "
Phys. Rev. A 95, 062106 (2017)
- Y. Matsuzaki and S. C. Benjamin
"Magnetic-field sensing with quantum error detection under the effect of energy relaxation "
Phys. Rev. A 95, 032303 (2017)
- N. Lambert*, Y. Matsuzaki*, K. Kakuyanagi, N. Ishida, S. Saito, and F. Nori (*equally contribution)
"Superradiance with an ensemble of superconducting flux qubits "
Phys. Rev. B 94, 224510 (2016)
- Y. Matsuzaki, T. Shimooka, H. Tanaka, Y. Tokura, K. Semba, N. Mizuochi
"Hybrid quantum magnetic field sensor with an electron spin and a nuclear spin in diamond "
Phys. Rev. A 94, 052330 (2016)
- K. Kakuyanagi, Y. Matsuzaki, C. Deprez, H. Toida, K. Semba, H. Yamaguchi, William J. Munro, and Shiro Saito
"Observation of Collective Coupling between an Engineered Ensemble of Macroscopic Artificial Atoms and a Superconducting Resonator "
Phys. Rev. Lett. 117, (editor's suggestion) 210503 (2016)
- S. Dooley, E. Yukawa, Y. Matsuzaki, G. C. Knee, W. J. Munro, and K. Nemoto
" A hybrid-systems approach to spin squeezing using a highly dissipative ancillary system "
New J. Phys. 18 053011 (2016)
- Y. Matsuzaki, H. Morishita, T. Shimooka, T. Tashima, K. Kakuyanagi, K. Semba, W. J. Munro, H. Yamaguchi, N. Mizuochi and S. Saito
" Optically detected magnetic resonance of high-density ensemble of NV centers in diamond "
J. Phys: Condens. Matter 28 275302 (2016)
- H. Toida, Y. Matsuzaki, K. Kakuyanagi, X. Zhu, W. J. Munro, K. Nemoto, H. Yamaguchi and S. Saito
" Electron paramagnetic resonance spectroscopy using a direct current-SQUID magnetometer directly coupled to an electron spin ensemble "
Appl. Phys. Lett. 108, 052601 (2016)
- Y. Kondo, Y. Matsuzaki, K. Matsushima, and J. G. Filgueiras
"Using the quantum Zeno effect for suppression of decoherence "
New J. Phys. 18, 013033 (2016)
- Y. Matsuzaki, and H. Tanaka
"Quantum Zeno Effect in an Unstable System with NMR "
J. Phys. Soc. Jpn. 84, 103001 (2015)
- J. Govenius, Y. Matsuzaki, I. G. Savenko, and M. Mottonen
"Parity measurement of remote qubits using dispersive coupling and photodetection "
Phys. Rev. A 92, 042305 (2015)
- T. Tanaka*, P. Knott*, Y. Matsuzaki*, S. Dooley, H. Yamaguchi, W. J. Munro, and S. Saito (*equally contribution)
"Proposed Robust Entanglement-Based Magnetic Field Sensor Beyond the Standard Quantum Limit"
Phys. Rev. Lett. 115, 170801 (2015)
- S. Endo, Y. Matsuzaki, W. J. Munro, T. Koike, and S. Saito
"Spin Amplification in an Inhomogeneous System"
J. Phys. Soc. Jpn. 84, 103001 (2015).
- H. Cai, Y. Matsuzaki, K. Kakuyanagi, H. Toida, X. Zhu, N. Mizuochi, K. Nemoto, K. Semba, W. J. Munro, S. Saito, and H. Yamaguchi
"Analysis of the spectroscopy of a hybrid system composed of a superconducting flux qubit and diamond NV- centers"
J. Phys: Condens. Matter 27, 345702 (2015)
[学会発表](計 12件)
• 応用物理学会、第65回応用物理学会春季学術講演会 (invited talk),
松崎 雄一郎, "企業の研究所で働くという

こと” ,
2018, 3/17, 早稲田大学

・ International Workshop on Quantum Information, Quantum Computing and Quantum Control (invited talk),
Y. Matsuzaki, “Magnetic-field sensing with quantum error detection under the effect of energy relaxation” ,
2017, 12/20, Shanghai, China

・ IWQD Camp for Young Researchers(invited talk),
Y. Matsuzaki, “hybrid quantum metrology” ,
2015, 10/8, Hiroshima, Japan

・ Diamond Quantum Sensing Workshop 2015 (invited lecture),
Y. Matsuzaki, "Quantum sensing basics"
2015/8/5, Takamatsu, Japan

・ 17th Asian Quantum Information Science Conference (Poster),
Yuichiro Matsuzaki and Simon Benjamin
“ Quantum metrology with quantum error detection ”
2017/9/4, Singapore,

・ International Symposium on Hybrid Quantum Systems 2017 (Oral talk),
Y. Matsuzaki and S. Benjamin
“ Magnetic-field sensing with quantum error detection under the effect of energy relaxation ”
2017, 9/11, Miyagi, Japan

・ Interdisciplinary Workshop on Quantum Device 2017 (Oral talk),
Y. Matsuzaki, K. Kakuyanagi, C. Deprez, H. Toida, K. Semba, H. Yamaguchi, W. J. Munro, and S. Saito
“ Observation of Collective Coupling between an Engineered Ensemble of Macroscopic Artificial Atoms and a Superconducting Resonator ” ,
2017, 3/7, Tokyo, Japan

・ International Symposium on Nanoscale Transport and Technology 2015 (Oral talk),
Y. Matsuzaki, X. Zhu, K. Kakuyanagi, H. Toida, T. Shimo-Oka, N. Mizuochi, K. Nemoto, K. Semba, W. J. Munro, H. Yamaguchi, S. Saito
“ Improving the coherence time of a quantum system via a coupling with an unstable system”

2015, 11/20, Kanagawa, Japan

・ International Conference on Quantum Cryptography 2015 (Poster),
Y. Matsuzaki, X. Zhu, K. Kakuyanagi, H. Toida, T. Shimooka, N. Mizuochi, K. Nemoto, K. Semba, W. J. Munro, H. Yamaguchi, and S. Saito
“ Improving the coherence time of a quantum system via a coupling with an unstable system”
2015, 9/29, Tokyo, Japan

・ 日本物理学会 (口頭発表),
松崎雄一郎, Simon Benjamin
“ エネルギー緩和下における量子誤り検知を用いた磁場センサ ”
2017年9月

・ 日本物理学会 (口頭発表),
松崎雄一郎, 仲山将順, 添田彬仁, 村尾美緒, 斎藤志郎
“ 未知の共鳴周波数を持った量子ビット集団に対するエネルギー射影測定 ”
2017年3月

・ 日本物理学会 (口頭発表),
松崎雄一郎, 角柳孝輔, 石田夏子, 樋田啓, 仙場浩一, 山口浩司, 齊藤志郎
“ 超伝導磁束量子ビットとマイクロ波キャビティを用いた超強結合の実現にむけて(理論) ”
2015年9月

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

取得状況(計 0件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
取得年月日:
国内外の別:

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

松崎 雄一郎

(Matsuzaki Yuichito)

日本電信電話株式会社 NTT 物性科学基礎研

究所 量子電子物性研究部 研究主任

研究者番号：10618911

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：

(4) 研究協力者

()