

令和 6 年 6 月 10 日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K11749

研究課題名（和文）量子情報幾何学に基づく非線形最適実験計画法における最適なデザインの探究

研究課題名（英文）Advances in optimal design of nonlinear experiments based on quantum information geometry

研究代表者

鈴木 淳（Suzuki, Jun）

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・准教授

研究者番号：70565332

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、非線形実験計画法における情報幾何学を議論するための定式化と最適なデザインの導出を行うことを目的として研究を行い、主に以下の成果を得た。

（1）ベイズ基準に基づく最適な実験計画法における推定誤差限界の提案、（2）最適なデザインを求めるための数値計算アルゴリズムの提案、（3）量子クラメル・ラオ誤差限界の達成可能必要十分条件について、（4）相対論的な物理系におけるパラメータ推定に対する誤差限界のトレードオフ関係、（5）量子ニューラルネットワークを用いたラベル分類における最適な測定による復号法、（6）有限サンプルに関する誤差限界と漸近的に達成可能な誤差限界の間に存在するギャップに関する性質

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で得られた成果は、量子情報幾何学的なアプローチを取ることにより、従来の実験計画法では議論されなかった、より一般の統計モデルに対する最適なデザインの設計を可能にする理論の構築である。本研究では、最適なデザインを効率的に求める方法の探究を行い、得られた研究成果を現在の実験技術でも実装可能な物理系を用いた精密測定法へと応用する。本研究成果の意義とは、情報幾何学と非線形最適実験計画法の相互作用により、最適なデザインを効率的に求める方法の探究、新しい数理統計学の理論の枠組みの発展、という数理工学・量子情報科学における基礎的な貢献である。

研究成果の概要（英文）：The aim of this project is to develop the general framework to discuss the differential geometrical analysis on the theory of optimal design of non-linear experiments. Based on techniques in quantum information geometry, we obtain optimal or near optimal estimation strategies for quantum estimation problems. The more detailed main results out of this project are as follows. 1. Derivation of lower bounds for the Bayesian risk in quantum estimation. 2. Implementation of numerical algorithms to obtain optimal designs. 3. Investigation of the necessary and sufficient condition for saturating the quantum Cramer-Rao inequality. 4. Tradeoff relation for estimating the position of a relativistic spin-1/2 particle. 5. Optimal quantum decoding method for label classification problems using quantum neural network. 6. Properties of the gap between a finite-sample estimation error bound and the asymptotic bound.

研究分野：量子推定

キーワード：量子状態推定 非線形最適実験計画法 量子情報幾何 量子ベイズ推定 最適な測定 量子Fisher計量

1. 研究開始当初の背景

情報幾何学は統計モデルを多様体として捉え双対接続構造を導入することにより、統計的推定問題に対する直感的かつ幾何学的な意味づけを与えた。近年は、機械学習や数理最適化等の応用問題における重要性が認識されている。狭い意味での情報幾何学では、統計モデルが1つ与えられそのモデルに対する幾何学的な考察を行う。それに対して本研究の目的の1つ目は、観測者が統計データを得るためにどのように測定を行うかという、「測定の自由度」を導入し、各々の測定に対して統計モデル(条件付き確率分布)が1つ定まるという問題設定へと情報幾何学を拡張することである。このような測定の自由度を持つ統計モデルに対する統計的解析は、実験計画法(Design of Experiment; 以下 DoE と略記)と呼ばれ、与えられた最適基準に対する最適なデザイン(測定方法)を求めることが研究目的の1つである。従来の DoE に関する研究では、線形回帰モデルや非線形回帰モデルの局所線形化したモデルに対する局所最適なデザインを求めることがほとんどであった。

本研究課題の1つ目は、より一般の非線形なモデルに対する非線形最適 DoE を扱い、情報幾何学的なアプローチにより統計モデルの大域的な性質を明らかにすることである。本研究課題の2つ目は、量子力学によって記述される数理モデルを扱う量子情報理論・量子統計理論における情報幾何学(量子情報幾何学)の開拓にある。

2. 研究の目的

本研究の目的は、非線形 DoE における情報幾何学を議論するための定式化と最適なデザインの導出を行う。新規性としては、量子情報幾何学的なアプローチを取ることにより、従来の DoE では議論されなかった、より一般の統計モデルに対して大域的に最適なデザインの設計が可能になること、また通常の情報幾何学の特徴である双対平坦構造を持たないような統計モデルに対する幾何構造を明らかにすることである。本研究では、最適なデザインを効率的に求める方法の探究を行い、得られた研究成果を現在の実験技術でも実装可能な少量量子ビット系を用いた精密測定法へと応用する。当初の具体的な目的は次の4つである。

- (1) 非線形最適 DoE 問題に対する情報幾何学的な定式化:
一般の非線形 DoE におけるモデルに対して、情報幾何学的な定式化を行う。具体的には、量子情報幾何学の枠組みを参考にし、状態空間、デザイン空間に対して、自然な計量、双対接続構造がどのように導入されるかを調べる。
- (2) 最適なデザインを求めるための数値計算アルゴリズムの提案:
凸最適化問題に対する拘束条件付き最急降下法を応用することで、非線形 DoE における最適なデザインを求めるためのアルゴリズムの実装・評価、および、コードの公開を目的とする。
- (3) 量子情報幾何学的なアプローチによる最適なデザインの導出:
量子系における推定問題で提案され、解析されている手法を非線形最適 DoE 問題へと適用・拡張する。また、従来の推定方法と比較・検討し、非線形最適 DoE 問題でどれくらい有効であるかを明らかにする。
- (4) 具体的な物理モデルを用いた量子精密測定技術への応用:
提案する最適なデザインを求める方法が量子系における現実のモデルでどれくらい有効かを評価する。そのために先行研究で調べられている物理モデルを考えて、提案手法を適用し既存結果との比較を行う。

3. 研究の方法

上で述べた4つの研究目的を達成するための研究方法は以下である。

- (1) 非線形最適実験計画法問題に対する情報幾何学的な定式化:
一般確率論で調べられているような、状態空間、デザイン空間がともにベクトル空間(正確には対称錐)の部分空間からなる場合を考え、状態空間上に定義される得る計量を接ベクトルの双対表現から求め、Fisher 計量が情報理論的に自然な性質(単調性、加法性等)を満たすための条件と双対接続構造を調べることで、情報幾何学的な定式化を行う。また、大域的に最適なデザインが存在するための条件を求め、統計的に良いモデルの特徴づけを行う。
- (2) 最適なデザインを求めるための数値計算アルゴリズムの提案:
従来の DoE においても、最適なデザインを求めるためのアルゴリズムは研究されているが、本研究では問題設定を一般化するために、そのままでは適用できない。そこで、凸最適化問題に対する拘束条件付き最急降下法を応用することで、非線形 DoE における最適なデザインを求めるためのアルゴリズムの実装・評価を行い、提案するアルゴリズムの有効性を検証する。

- (3) 量子情報幾何学的なアプローチによる最適なデザインの導出:
量子情報幾何では、導入される幾何構造に対応して様々な誤差限界を導出できるが、一般には誤差に対する下界となり達成可能ではない。本研究では、特に Holevo-長岡型限界や量子もつれを用いた推定方法の誤差限界について調べ、従来の推定方法と比較・検討し、非線形最適 DoE 問題でどれくらい有効であるかを明らかにする。
- (4) 具体的な物理モデルを用いた量子精密測定技術への応用: 提案する最適なデザインを求める方法が量子系における現実のモデルでどれくらい有効かを評価する。具体的には、盛んに研究されている、精密測定問題(量子センシング、量子メトロロジ)に対し、先行研究で調べられている物理モデルを考えて、提案手法を適用し既存結果との比較を行う。特に、本研究の結果から最適 DoE 問題として定式化することにより、量子情報技術に関する研究における統計学的なアプローチの必要性を明らかにできれば、工学的にも重要な成果につながる

4. 研究成果

本研究課題全体として、得られた研究成果は、論文 3 件(採録済)、論文 5 件(投稿中, arXiv で公開済)、国際会議発表 9 件(招待講演 4 件)、学会発表 13 件である。以下に 4 つの研究目的ごとに得られた主要な研究成果を記す。

- (1) 非線形最適実験計画法問題に対する情報幾何学的な定式化:

一般確率論で知られているモデルに対して情報幾何学的な考察を行なった。これに対しては、モデル自体がユークリッド空間の部分空間として定義されているため、本研究課題実施期間内では現在までに自明な結果しか得られなかった。

一方、量子状態空間を線形同型である Bloch ベクトル空間として捉えることで、情報幾何構造を調べ定式化した。特に、量子推定問題で有効である 1 パラメータ族の計量の性質と Bloch ベクトル表現を用いた統計モデルの分類について詳細に調べた [1,2]。

大域的に最適なデザインを求める方法として、ベイズ基準に基づく最適な DoE における推定誤差限界の提案を行った。この提案する誤差限界は既存の誤差限界よりもよりタイトであり、かつ半正定値計画として計算できることも示している [3]。さらには、この提案する誤差限界を弱める形で先行研究において提案されていた評価式を含むような 1 パラメータ族の誤差限界も導出し、量子ビット系における性質を解析している [4]。

- (2) 最適なデザインを求めるための数値計算アルゴリズムの提案:

当初の計画通り、量子系における最適な測定を導出するための MATLAB コードの実装・評価、GitHub での公開を行った [5,6]。有効性については、通常の計算機で 6 量子ビット系に対する最適なデザインを現実的な時間で探索できることを示した。(図 1: 提案アルゴリズムにより求めた最適な量子測定を用いた場合の推定誤差と既存研究で知られている誤差限界の比較。図に示した結果は 2 パラメータの量子ビット状態を M テンソル積乗したモデル) また、提案アルゴリズムで求めた最適なデザインについての解析も行い、量子ビット系における新しいクラスの最適な量子測定についても解析的に導出することができた。

成果(1)で得られた量子系におけるベイズリスクの下界を半正定値計画問題として計算するための Python コードの実装・評価を行った [7]。コードの公開については最終段階である。このコードにより、大域的に最適な量子測定方法の指針が得られ、またいくつかの場合には数値計算より解析的な表現を得ることもできている。

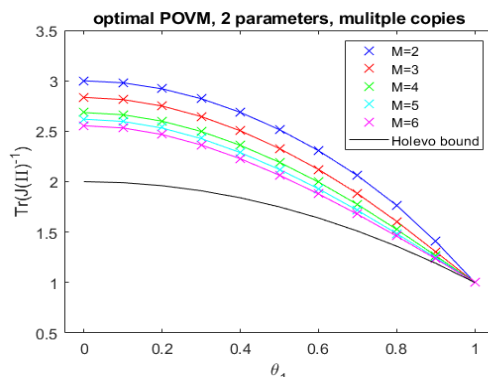


図 1 提案アルゴリズムによる最適な量子測定による推定誤差

- (3) 量子情報幾何学的なアプローチによる最適なデザインの導出:

純粋状態モデルに摂動が加えられたモデルに対する量子情報幾何構造を調べた。従来の研究で行われている通常の摂動計算では正しい接空間が得られず、特異摂動法を用いる必要があることが示された。接空間の構造より、最適な測定方法に関する正しい情報が得られることも示された [8]。

一般に推定したい量子状態に対する最適な測定は、ノイズの影響下では最適とは限らない。そこで、最適な DoE の最適性を保存するための条件は何かについて情報幾何学的な観点から調べ、必要十分条件を導出した。結果としては、得られた必要十分条件が強すぎたため多くの現実のモデルでは成り立たないこともわかった [9]。

量子推定問題では量子 Fisher 計量による量子クラメル・ラオ誤差限界は一般には達成可能ではなく、有限サンプル数において達成するための必要十分条件を求める問題は重要な問題であると認識されている。この問題に対してオーストラリアのグループと共同研究で、必要十分条件を精査し、また非自明な具体例を複数提示し、先行研究では見落とされていた量子系を Naimark 拡張することの必要性が重要であることを指摘した [10]。

(4) 具体的な物理モデルを用いた量子精密測定技術への応用：

量子状態のパラメータを推定する問題は古典系を用いた推定精度限界を超える精密測定が可能になることから近年注目を集めている問題である。現在までに様々な物理系において研究がなされてきたが、本研究では先行研究ではほとんど調べられてこなかった相対論的なスピン 1/2 粒子の位置の推定問題を解析した。特に、静止系では自明な統計モデルが運動している観測者に対しては量子性を持つ統計モデルとして振る舞い、推定誤差について不確定性関係のような非自明なトレードオフ関係が存在することを示した [11, 12]。

古典データを量子状態に符号化し、パラメトリック量子回路(学習モデル)を最適化することにより学習させる量子ニューラルネットは近将来に実現可能な量子情報処理プロトコルの重要な問題の 1 つである。しかしながら、量子回路をどのように設計することにより効率的かつ高精度な機械学習が可能になるかについてはよくわかっておらず、未解決問題として多くの研究がある。本研究では先行研究において注目されなかった量子状態に対する測定の最適化による復号法(Optimal quantum measurement decoding, OQMD)を提案し、人工データおよび実データに対してその分類性能について解析を行った。提案する方法を用いることにより、従来研究では十分な分類精度がないことから注目されなかった単純な量子回路を用いても先行研究で提案するような複雑な量子回路と同等の性能を持つことを示した。この結果から、量子リソースを大幅に減らしても十分な性能を持つ量子ニューラルネットを構成できることがわかった [13, 14]。(図 2 (a) 提案する量子ニューラルネットの構成概念図。(b) 線形データに対する提案手法(OQMD)の分類精度向上。左図での分類誤り(赤丸)が右図の OQMD により大幅に軽減されることがわかる。)

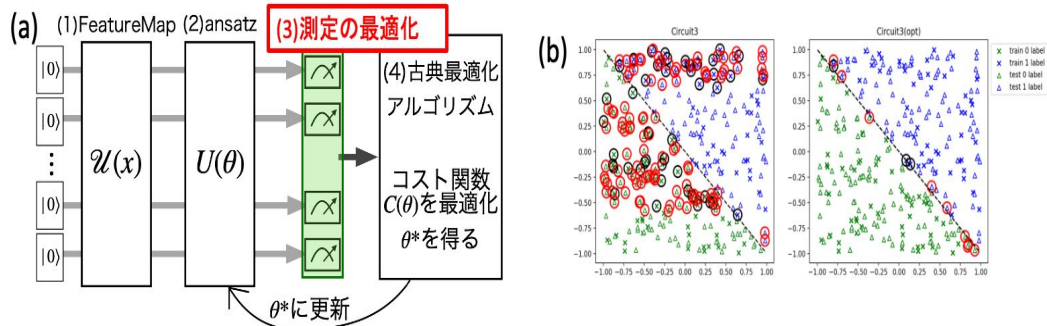


図 2 提案する最適な量子測定による復号法を用いたラベル分類性能評価

有限サンプルに関する誤差限界と漸近的に達成可能な誤差限界の間に存在するギャップに関する一般的な性質についての諸定理の証明。量子系においては、量子もつれを用いることで推定誤差をより小さくすることができることが知られている。しかしながら、その量子もつれの効果による量子優位性については、用いない場合に比べてどれくらいかについては具体例を除いてほとんど一般論が論じられていない。この問題について、オーストラリアのグループと共同研究で、量子もつれを用いた場合と用いない場合の 2 つの誤差限界について、それらの差や比について詳細な解析を行った。主要な結果としては、まずそれらの差については、一般にサンプル数を多くしても 0 にはいかないことを厳密に示した。次に、それらの比については最大でも量子系の次元に比例する程度で、量子もつれを用いることが現実的には難しい場合、量子資源を用いなくとも十分な効果が得られることも示された [15, 16, 17]。

<引用文献> (関連する研究成果のうち主要なものに限る)

- [1] 福田優太郎, 鈴木淳, 量子 3 準位系における量子 Fisher 計量の凸結合族の Bloch ベクトルに基づく解析, 第 46 回量子情報技術研究会 (QIT46), 2022 年 5 月.
- [2] Yutaro Fukuda, Jun Suzuki, Information geometry of the qutrit system based on the Bloch vector representation, Singapore-Japan Joint Seminar, 2023 年 2 月.
- [3] Jun Suzuki, Bayesian Nagaoka-Hayashi Bound for Multiparameter Quantum-State

- Estimation Problem*, IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences E107.A(3) pp. 510-518 (2024).
- [4] Jianchao Zhang, Jun Suzuki, *Bayesian Logarithmic Derivative Type Lower Bounds for Quantum Estimation*, preprint arXiv:2405.10525 (2024).
 - [5] Jianchao Zhang, Jun Suzuki, *QestOptPOVM: An iterative algorithm to find optimal measurements for quantum parameter estimation*, Preprint arXiv: 2403.20131 (2024).
 - [6] Qestoptpovm <https://github.com/ZHANGJianchao97/Qest> (2023).
 - [7] Kehan Zhao, Jun Suzuki, *Numerical computation of Bayesian Nagaoka-Hayashi bound for three-parameter qubit -state estimation*, 第49回量子情報技術研究会(QIT49), 2023年12月.
 - [8] Jun Suzuki, *Quantum Information Geometry of Weakly Contaminated Models*, 第44回情報理論とその応用シンポジウム (SITA2021), 2021年12月.
 - [9] Jun Suzuki, *Optimal measurement preserving map for quantum state estimation and hypothesis testing*, 電子情報通信学会 情報理論研究会, 2022年5月.
 - [10] Lorcan O. Conlon, Jun Suzuki, Ping Koy Lam, Syed M. Assad, *Role of the extended Hilbert space in the attainability of the Quantum Cramer-Rao bound for multiparameter estimation*, Preprint arXiv: 2404.01520 (2024).
 - [11] Shin Funada, Jun Suzuki, *Effect of Wigner rotation on estimating the unitary-shift parameter of a relativistic spin-1/2 particle*, Physical Review A, **106**(6), 062404(14 pages) (2022).
 - [12] Shin Funada, Jun Suzuki, *Error tradeoff relation for estimating the unitary-shift parameter of a relativistic spin-1/2 particle*, Physical Review A, **109**(1), 012425 (14 pages) (2024).
 - [13] Yusaku Yamada, Jun Suzuki, *Improvement of the performance for quantum neural networks based on optimal quantum measurement*, Singapore-Japan Joint Seminar, 2023年2月.
 - [14] 山田優作, 鈴木淳, *最適な量子測定に基づく量子ニューラルネットワーク分類器の性能特性*, 電子情報通信学会 情報理論研究会, 2023年3月(情報理論とその応用サブサイエティ学生優秀発表賞)
 - [15] Lorcan O. Conlon, Jun Suzuki, Ping Koy Lam, Syed M. Assad, *The gap persistence theorem for quantum multiparameter estimation*, Preprint arXiv: 2208.07386 (2022).
 - [16] Lorcan Conlon, Jun Suzuki, Ping Koy Lam, Syed M. Assad, *The Gap Persistence Theorem Between Nagaoka-Hayashi Bound and Holevo Bound for Quantum Multiparameter Estimation*, 電子情報通信学会 情報理論研究会, 2023年5月.
 - [17] Aritra Das, Lorcan Conlon, Jun Suzuki, Simon K. Yung, Ping K. Lam, Syed M. Assad, *Holevo Cramer-Rao bound: How close can we get without entangling measurements?*, preprint arXiv: 2405.09622 (2024).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 Funada Shin, Suzuki Jun	4. 巻 106
2. 論文標題 Effect of Wigner rotation on estimating the unitary-shift parameter of a relativistic spin-1/2 particle	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 62404
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevA.106.062404	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 -

1. 著者名 Funada Shin, Suzuki Jun	4. 巻 109
2. 論文標題 Error tradeoff relation for estimating the unitary-shift parameter of a relativistic spin-1/2 particle	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 12425
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevA.109.012425	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 -

1. 著者名 SUZUKI Jun	4. 巻 E107.A
2. 論文標題 Bayesian Nagaoka-Hayashi Bound for Multiparameter Quantum-State Estimation Problem	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences	6. 最初と最後の頁 510~518
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/transfun.2023TAP0014	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Lorcan O. Conlon, Jun Suzuki, Ping Koy Lam, Syed M. Assad	4. 巻 quant-ph
2. 論文標題 The gap persistence theorem for quantum multiparameter estimation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Preprint arXiv	6. 最初と最後の頁 2208.07386
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Jianchao Zhang, Jun Suzuki	4. 巻 quant-ph
2. 論文標題 QestOptPOVM: An iterative algorithm to find optimal measurements for quantum parameter estimation	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Preprint arXiv	6. 最初と最後の頁 2403.20131
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Lorcan O. Conlon, Jun Suzuki, Ping Koy Lam, Syed M. Assad	4. 巻 quant-ph
2. 論文標題 Role of the extended Hilbert space in the attainability of the Quantum Cramer-Rao bound for multiparameter estimation	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Preprint arXiv	6. 最初と最後の頁 2404.0152
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Aritra Das, Lorcan O. Conlon, Jun Suzuki, Simon K. Yung, Ping K. Lam, Syed M. Assad	4. 巻 quant-ph
2. 論文標題 Holevo Cramer-Rao bound: How close can we get without entangling measurements?	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Preprint arXiv	6. 最初と最後の頁 2405.09622
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Jianchao Zhang, Jun Suzuki	4. 巻 quant-ph
2. 論文標題 Bayesian Logarithmic Derivative Type Lower Bounds for Quantum Estimation	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Preprint arXiv	6. 最初と最後の頁 2405.10525
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計22件（うち招待講演 5件 / うち国際学会 9件）

1. 発表者名 山田優作, 鈴木淳
2. 発表標題 最適な量子測定に基づく量子ニューラルネットワーク分類器の性能特性
3. 学会等名 RCC・ISEC・IT・WBS合同研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Jun Suzuki
2. 発表標題 Nagaoka-Hayashi bound in multi-parameter estimation
3. 学会等名 Japan-Singapore(NUS) Joint seminar (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yutaro Fukuda, Jun Suzuki
2. 発表標題 Information geometry of the qutrit system based on the Bloch vector representation
3. 学会等名 Japan-Singapore(NUS) Joint seminar (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yusaku Yamada, Jun Suzuki
2. 発表標題 Improvement of the performance for quantum neural networks based on optimal quantum measurement
3. 学会等名 Japan-Singapore(NUS) Joint seminar (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Jianchao Zhang, Jun Suzuki
2. 発表標題 QestOptPOVM: Numerical search for finding an optimal POVM for multiparameter estimation
3. 学会等名 Japan-Singapore(NUS) Joint seminar (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Shin Funada, Jun Suzuki
2. 発表標題 Error trade-off relation for estimating momentum shift of relativistic spin-1/2 particle
3. 学会等名 第47回量子情報技術研究会 (QIT47)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Jianchao Zhang, Jun Suzuki
2. 発表標題 QestOptPOVM: Numerical search for finding an optimal POVM for multiparameter estimation
3. 学会等名 第47回量子情報技術研究会 (QIT47)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Jun Suzuki
2. 発表標題 On Local Attainability of Quantum Cramer-Rao Bound
3. 学会等名 第45回情報理論とその応用シンポジウム (SITA2022)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Jun Suzuki
2. 発表標題 Nagaoka-Hayashi bound in multi-parameter estimation
3. 学会等名 CQT Seminar, NUS, Singapore (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 福田優太郎, 鈴木淳
2. 発表標題 Introduction to Quantum Information Geometry and its Application to Qutrit system
3. 学会等名 芝浦 - 量子基礎論・量子情報オンラインセミナー (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 福田優太郎, 鈴木淳
2. 発表標題 量子3準位系における量子Fisher計量の凸結合族のBlochベクトルに基づく解析
3. 学会等名 第46回量子情報技術研究会 (QIT46)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Jun Suzuki
2. 発表標題 Optimal measurement preserving map for quantum state estimation and hypothesis testing
3. 学会等名 IT EMM 合同研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Shin Funada, Jun Suzuki
2. 発表標題 Effect of Wigner rotation on estimating momentum shift of relativistic spin-1/2 particle
3. 学会等名 The 45th Quantum Information Technology Symposium
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Jun Suzuki
2. 発表標題 Quantum Information Geometry of Weakly Contaminated Models
3. 学会等名 The 44th Symposium on Information Theory and its Applications
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Jun Suzuki
2. 発表標題 Bayesian Holevo and Nagaoka-Hayashi bounds for quantum-state estimation
3. 学会等名 電子情報通信学会, 情報理論研究会
4. 発表年 2021年 ~ 2022年

1. 発表者名 Shin Funada, Jun Suzuki
2. 発表標題 Effect of Wigner rotation on estimating momentum shift of relativistic spin-1/2 particle
3. 学会等名 25th Annual Conference on Quantum Information Processing (国際学会)
4. 発表年 2021年 ~ 2022年

1. 発表者名 Jun Suzuki
2. 発表標題 The Gap Persistence Theorem Between Nagaoka-Hayashi Bound and Holevo Bound for Quantum Multiparameter Estimation
3. 学会等名 IT EMM 合同研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Jun Suzuki
2. 発表標題 Introduction to Optimal Design of Experiments (DoE) and its Applications to Quantum Estimation
3. 学会等名 Quantum Information, Quantum Matter and Quantum Gravity (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Jianchao Zhang, Jun Suzuki
2. 発表標題 Optimal POVM with minimal size in two-parameter qubit-state estimation
3. 学会等名 第49回量子情報技術研究会 (QIT49)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kehan Zhao, Jun Suzuki
2. 発表標題 Numerical computation of Bayesian Nagaoka-Hayashi bound for three-parameter qubit-state estimation
3. 学会等名 第49回量子情報技術研究会 (QIT49)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Jianchao Zhang, Jun Suzuki
2. 発表標題 Tightness of the Nagaoka-Hayashi bound in i.i.d. qubit-state estimation
3. 学会等名 Quantum Information Processing 2024 (qip2024) (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Jun Suzuki
2. 発表標題 Bayesian Nagaoka-Hayashi Bound for Multiparameter Quantum-State Estimation Problem
3. 学会等名 Quantum TUT workshop 2024 on quantum statistics and quantum information theory (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔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

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
オーストラリア	Centre for Quantum Computation, ANU	Department of Quantum Science, ANU		
シンガポール	Centre for Quantum Technologies, NUS			
オーストラリア	Australian National University			
シンガポール	Agency for Sci Tech and Research			