

「高速な量子機械学習の基盤構築」

研究期間:2020年10月～2024年3月

研究者:山崎 隼汰

1. 研究のねらい

本研究のねらいは、機械学習の高速化における量子計算の広い有用性を示し、さらに高速化を損なわない誤り耐性量子計算の実装方法まで明確化することで、量子コンピュータがもたらす情報化社会の発展への道筋とその発展の基礎となる理論的基盤を築くことである。

2. 研究成果

(1) 概要

研究1:機械学習の効率化に有用な量子アルゴリズムの研究

- ・ **結果 1-1**: ランダム特徴量に基づくカーネル法やニューラルネットワークといった機械学習で広く使われる学習手法について、その効率化に有用なタスクを定式化した。またこうしたタスクの実行において、知られている中で最も高速な古典アルゴリズムに対して指数的な高速化を達成する量子アルゴリズムを開発した。
- ・ **結果 1-2**: 計算時間やエネルギー消費量といった点で、量子アルゴリズムによる学習タスクの実行が古典アルゴリズムよりも大幅に優位なことが証明できる一般的な手法を構築した。計算量理論の標準的な仮定のもとであらゆる古典アルゴリズムよりも量子アルゴリズムに優位性があることが証明でき、かつ将来的に量子実験でもデモンストラレーションできるように、タスクを具体的に構成した。

研究2:量子アルゴリズムを少ないリソースで効率的に実現するための方法の研究

- ・ **結果 2-1**: 量子アルゴリズムの高速性を損なわずに効率的に実装できるように、実行時間のオーバーヘッドが短くかつ量子ビット数のオーバーヘッドが定数 $O(1)$ に抑えられた誤り耐性量子計算の実行手順を具体的に構築し、その性能を解析した。
- ・ **結果 2-2**: 量子情報処理を物理系で実装する際に必要になるリソースの定量的な評価に広く適用できる一般的なリソース理論の枠組みを構築し、また実験でこうしたリソースが正しく準備できているかをテストするための実用的なプロトコルも示した。

こうした研究成果を通じ、情報化社会の発展に広く重要と考えられる機械学習の効率化のために量子計算が有用であることが定量的に理論的根拠を持って示された。またこうした有用な量子アルゴリズムの実現に向けて必要となる効率的な誤り耐性量子計算の実行方法とそのリソースの定量的解析に必要な理論基盤が構築された。

(2) 詳細

研究1:機械学習の効率化に有用な量子アルゴリズムの研究

結果 1-1:

量子機械学習における重要な課題として、ニューラルネットワークに代表されるような広く使われる学習手法において量子計算の応用を確立することがあった。ニューラルネットワーク

の理論的解析に使われるリッジレット変換は、積分変換の一種(フーリエ変換・ウェーブレット変換などの亜種)である。しかしリッジレット変換は、既存の古典アルゴリズムで実行するにはデータ次元に対して指数時間かかるため、実際のニューラルネットワークによる学習アルゴリズムの中で使うのは難しかった。

これに対し本研究では、量子計算の古典計算に対する優位性をニューラルネットワークによる学習に応用する際に有用な量子アルゴリズムとして、量子リッジレット変換を開発した。量子リッジレット変換により、量子状態のリッジレット変換を、データ次元に対して線型時間で達成できる。

さらに量子リッジレット変換の応用として、指数的に幅が大きい隠れ層1層のニューラルネットワークが与えられた際に、隠れ層のノードのうち学習を達成する上で重要なノードをサンプリングして高速に探し出すタスクへの応用方法を示した。これにより量子リッジレット変換は、量子フーリエ変換で達成されるような量子高速化をニューラルネットワークの学習タスクで達成するための基礎的なサブルーチンして使えることが明らかになった。

本さがけ研究の提案時には、機械学習を高速化する量子アルゴリズムは、極端な疎行列・低ランク行列を必要とする仮定のもとで初めて大幅な高速化を達成できるものが主で、大幅な高速化が達成可能な適用範囲が大きく制約されていた。これに対し本研究では、疎行列・低ランク行列の仮定がなくても大幅な高速化を達成できる量子機械学習アルゴリズムを構築した。

本研究では、カーネル法をスケーラブルに実行するために広く使われる手法であるランダム特徴量に基づく学習手法を効率化する。ランダム特徴量に基づく学習手法では、特徴量を(ガウシアン分布などの)ある決まった確率分布からランダムにサンプリングし、データに合わせてそれらの特徴量の最適な重みを決定することで、ランダムな特徴量写像を最適な重みで線型結合して学習したい関数を表して学習を達成する。しかしこの方法で学習を達成するには、一般には膨大な特徴量の数が必要であるという問題があった。

これに対してより近年、学習データに合わせて最適化された確率分布からサンプリングを行うことで、重要な特徴量をより高い確率でサンプリングして少数の特徴量で学習を達成できるようになり、学習を効率化できることが理論的に示された。しかし最適化された確率分布からのサンプリングには、既存の古典アルゴリズムではデータの次元に対して指数時間かかるという問題があった。そこで本研究では、学習データに合わせて最適化されたランダム特徴量をこうした確率分布からサンプリングして探す量子アルゴリズムを新たに開発し、疎行列・低ランク行列の仮定がなくても既存の古典アルゴリズムに比べてこのサンプリングタスクを指数的に高速に実行できることを示した。さらにこの最適化されたランダム特徴量を用いることで、回帰・分類といった機械学習の代表的な複数のタスクを広く効率化できることを示した。

結果 1-2:

量子機械学習における重要なマイルストーンとして、古典的なデータに対する教師あり学習に代表されるような広く使われる学習タスクについて、(既存の学習手法だけでなく)いかなる古典的な学習手法でも達成できないことが証明できるが量子機械学習を使えば達成できるタスクを明確化し、量子機械学習の優位性を実験的にデモンストレーションできるようにする

ことがある。しかし既存の量子機械学習の研究では、いかなる古典的な学習手法に対しても量子機械学習の優位性があることが証明できるタスクは、特定の量子アルゴリズム(ショアのアルゴリズム)に基づくタスクか、古典データでなく量子的なデータに対するタスクか、教師あり学習以外の学習タスクに限られていた。

これに対し本研究では、(ショアのアルゴリズムだけでなく)一般の量子アルゴリズムで古典アルゴリズムに対して優位性のあるものに対し、いかなる古典的な学習手法でも達成できないことが証明できるがこの(一般の)量子アルゴリズムを使った量子機械学習により達成できる教師あり学習タスクを具体的に構成した。さらにこの教師あり学習タスクを実験でデモンストレーションするために必要となる古典データの生成手順についても具体化した。これらの結果により、ショアのアルゴリズムだけでなく様々な種類の量子高速化を実現することで量子機械学習の優位性を実験的にデモンストレーションできる道が開かれた。

コンピュータの性能指標として、特定の計算問題を解く際に必要な計算時間が従来の指標として用いられてきたが、より近年では計算問題を解く際に必要なエネルギー消費量も重要な指標として用いられる。量子計算は様々な計算リソースについて古典計算よりも優位であることが知られているが、エネルギー消費量については解析に必要な理論的基盤が不十分で優位性を解析するのが難しかった。

本研究では量子計算や古典計算のエネルギー消費量の上界・下界を定量的に解析できる一般的な理論的枠組みを構築し、エネルギー消費量に関する詳細な解析を行った。ある未知の関数がオラクルとして与えられている時に、その入出力関係から関数の性質を推定する計算問題は、学習問題の一種であると考えられる。本研究ではこのような問題のクエリ複雑度をもとに、エネルギー消費量の上界・下界を得る一般的な手法を構築した。

さらにこの手法を具体的な問題(サイモンの問題)に適用することで、古典計算によるエネルギー消費量は指数的になるが量子計算によるエネルギー消費量は多項式的にできる状況設定を構築し、エネルギー消費量に関して量子計算に指数的に優位性があることを証明した。さらにこの優位性を実験的にデモンストレーションするための状況設定・実行手順も具体化した。これらの結果により、量子計算の古典計算に対する優位性について、計算時間などの従来の観点を超え、エネルギー消費量の観点から解析を行える理論基盤が新たに開拓された。

その他の結果

本さがけプロジェクトの実施のために既存の機械学習手法をサーベイする中で、機械学習の分野で使われる手法をもとに、パラメータ化されたゲートで記述される量子回路(パラメータ化量子回路)を最適化する古典アルゴリズムの性能を大幅に改善し、さがけ量子情報処理分野の他の研究者が多く取り組んでいた **variational quantum algorithm (VQA)** の性能を(量子化学・固体物理・量子機械学習などの応用先に関わらず)広く一般に高精度化・高速化できるという着想を得た。

VQA では、パラメータ化量子回路を何度も実行し、得られる測定結果からコスト関数を最小化する回路パラメータを探索する古典アルゴリズムが不可欠である。しかし既存の古典最適化アルゴリズムを用いると、コスト関数の期待値計算や最適化アルゴリズム内の反復のため

に多くの測定回数が必要となり、測定回数が量子アルゴリズムを実行する際のボトルネックとなるという問題があった。

そこで少ない測定回数でパラメータ化量子回路を最適化する汎用の古典最適化アルゴリズムを開発した。この古典最適化アルゴリズムでは、ノイズのある関数を少ない測定回数で最適化するためのベイズ最適化の手法と、勾配計算に必要な測定回数を少なくできる確率的勾配降下法を組み合わせる方針により、少ない測定回数でパラメータ化量子回路を最適化することができる。数値シミュレーションにより、収束速度・到達精度・ノイズ耐性において、本研究の提案手法が既存の state-of-the-art な複数の最適化手法すべてを上回る性能であることを実証した。

研究2: 量子アルゴリズムを少ないリソースで効率的に実現するための方法の研究

結果 2-1:

量子計算をスケールアップして古典計算に対して大幅な高速化を達成するには誤り耐性が不可欠ことが知られている。表面符号や接続7量子ビット符号などに基づく従来の誤り耐性量子計算の実行手順は、論理量子ビットあたり多くの物理量子ビットを用いるため、量子ビット数のオーバーヘッド(空間オーバーヘッド)が大きすぎるという問題があった。より近年提案された量子低密度パリティチェック符号(量子 LDPC 符号)に基づく実行手順を用いると、空間オーバーヘッドを定数 $O(1)$ に抑えることができるが、計算の実行時間のオーバーヘッド(時間オーバーヘッド)が多項式的に長くなってしまい、量子計算で達成できる有用な多項式的高速化の一部を損なってしまう問題があった。

これらの問題を解決するために、本研究ではサイズの大きな量子低密度パリティチェック符号を使うのではなく、複数の小さな量子符号を接続して定数空間オーバーヘッド誤り耐性量子計算を達成するという新たなアプローチを確立した。本研究では特に、異なるサイズの量子ハミング符号をサイズが徐々に大きくなるように接続していく手法を開発した。これにより、誤り耐性量子計算の空間オーバーヘッドを定数 $O(1)$ に抑えながらも、同時に時間オーバーヘッドについても quasi-polylogarithmic な短さを達成できる効率的な誤り耐性量子計算の実行手順を構築した。また既存の量子低密度パリティチェック符号を使う手順とは異なり、量子エラー訂正に用いるデコーダーの実行時間が符号サイズに対して増大するような現実的な設定下においても、本研究の手順で誤り耐性量子計算を達成できることを証明した。これにより、様々な種類の高速な量子アルゴリズムについて、達成される高速化をほぼ損なうことなく、小さい空間オーバーヘッドで量子アルゴリズムを実行することが可能となった。

ランダムな量子回路を符号化に用いることで定義される量子符号は、大きな符号化レートと符号距離を持つことが知られている。しかし完全にランダムな量子回路を得るには回路の深さを非常に深くする必要があり、こうした深い量子回路は実験での実現が難しいという問題がある。これに対し本研究では、より実用的な浅いランダム量子回路を符号化に用いるだけでも、量子符号に高い量子エラー訂正能力を持たせられることを数値的に実証した。従来は浅いランダム量子回路は、量子計算の古典計算に対する優位性(quantum computational supremacy)の実証のために実験で実現されてきた。これに対し本研究により、浅いランダム量子回路が量子エラー訂正のデモンストレーションにも活用できるための定量的な条件が明

らかになった。

結果 2-2:

量子情報処理を実装する際には、実験で実現しにくい(non-free な)操作がボトルネックとなることが多い。こうした操作に比べて、実験で実現しやすい操作(free operations)は自由に行えると仮定する。例えば光の系では non-Gaussian 操作は実行が難しいが、Gaussian 操作は実行しやすく free operations であると仮定して解析を行うことができる。このような状況のもとでは non-Gaussian 状態は量子情報処理のリソースと見なすことができる。また Gaussian 状態のようなリソースでない状態を free state と呼ぶ。こうした量子情報処理のリソースを定量化し、量子情報処理の可能性や原理的限界を解析する理論的道具として量子リソース理論がある。

物理的な制約から定義されるリソースは、数学的に解析しやすい構造を持っているとは限らない。最もリソースの多い量子状態は系のとりうる状態の中で一種類とは限らないし、リソースは凸性や有限次元性といった数学的に解析しやすい性質を持たない場合もある。そこで本研究では、特定のリソースではなく任意の一般的なリソースについて、凸性・有限次元性などの仮定を置くことなくリソースの定量化・変換可能性を統一的に解析できる一般的な量子リソース理論の枠組みを定式化した。さらにこの枠組みにおいて解析を行うことで、リソースの変換可能性や定量化の尺度に関して成立する普遍的な性質を解明した。本研究の結果は分散量子計算のリソースとなるエンタングルメント・誤り耐性量子計算のリソースとなるマジック状態・連続量量子計算のリソースとなる非ガウス性など物理的に重要なリソースの定量的解析に広く適用できる。また基礎物理としても、水が氷に変わる現象や金属が磁石に変わる現象の背後に従来の物理学者が普遍的な相転移の枠組みを見出してきたように、様々な異なる量子リソースを統一的に解析できる一般的な理論的枠組みを確立し、その変換可能性・定量化に関して普遍的な性質を解明した点で意義深い。

量子力学に現れる様々な物理的性質を活用し量子情報処理で優位性を得る方法を解明することは、量子技術の進歩のための中心的課題の一つである。量子リソース理論は、エンタングルメントやコヒーレンスなどの様々な量子物理的性質を統一的な理論の枠組みで扱うことができる。上記の性質は凸性を有する量子リソース(free state の集合が量子状態の凸結合に対して閉じた性質を持つリソース)であり、リソース理論の先行研究では、凸性を持つ量子リソース状態を使うと、リソースを持たない free state を使うよりも優位に達成できる情報処理のタスク(channel discrimination タスクの一種)が常に作れることが知られていた。しかし物理的な制約から定義されるリソースの中には凸性を持たないリソースも様々な考えられる。先行研究のタスクは数学的に解析しやすい凸構造を使って構成されているため、凸性を持たないリソースについてはその優位性が常に現れるかは解析が難しいという問題があった。

本研究では、凸性を仮定しない一般的な量子リソース理論に対して、量子リソース状態を使うことで free state を使うよりも優位に達成できるタスクが常に構成できることを示した。これにより、数学的に解析しやすい構造を仮定することなく、どのような物理的制約から生じる量子リソースであっても、そのリソースを活用して量子情報処理において優位性を得る方法が解明された。

エンタングルメントは量子情報処理において中心的に活用されるリソースの一つである。そのため、ある量子デバイスにより実験で準備された量子状態について、エンタングルメントがあるかないかを検知する手順が広く研究されてきた。例えば、与えられた量子状態にエンタングルメントがあることを検知するためには、**entanglement witness** と呼ばれるオブザーバブルを測定し、オブザーバブルの期待値がある閾値を超えている場合にはエンタングルメントが存在すると保証できる方法がある。こうしたエンタングルメント検知手順では、状態準備を行う量子デバイスはノイズがあっても信頼できない状況を考えるが、量子測定を行うデバイスについてはノイズのない理想的な測定ができると仮定する場合が多かった。

これに対して本研究ではより現実的な設定として、量子測定デバイスにもノイズがある設定を導入して解析を行なった。測定デバイスが実際に行う測定と理想的な測定との間の忠実度だけが保証されているが、実際に行う測定は正確にはわからない状況を考える。この際、理想的測定を行う場合に対して、エンタングルメントを検知する手順の性能がどれくらい劣化するかを定量的に解析した。こうした解析は、理想的な測定を仮定する理論的解析と、実際の量子デバイスを用いた実験との間のギャップを埋める新しい評価手法を提示する点で意義深い。

上記のエンタングルメント検知ではノイズの具体形を仮定せずに量子リソースの検証を行う手法の構築を行なったが、現実の量子デバイス開発ではノイズの種類に仮定を置いたとしても検証の効率性が優先される場合も多い。例えば誤り耐性のある測定型量子計算を実行して有用な計算問題を解く際には、100 万個以上の部分系にわたってエンタングルしたグラフ状態を生成する必要があるため、検証プロトコルの効率が重要になる。ある未知の量子デバイスがこうした大規模なグラフ状態が生成する際、量子計算の実行前に量子状態を測定してその結果から正しい状態が生成できているかテストする必要がある。量子トモグラフィを用いると生成した量子状態が正しい状態になっているか推定することができるが、量子トモグラフィを行うには多くの測定回数が必要になることが知られていて、現実的には量子トモグラフィより大幅に効率良くテストを行うプロトコルの開発が求められる。

一方、誤り耐性測定型量子計算を実現することを技術目標とする場合には、量子状態全体の密度行列を推定する必要はなく、誤り耐性量子計算の閾値よりも物理エラーレートが十分小さいことだけがテストできれば良い。そこで本研究では、任意に大きいグラフ状態に含まれる定数個の量子ビットだけを測定して物理エラーレートをテストする効率的な量子デバイスベンチマークの枠組みを構築した。このプロトコルの実行時間は量子状態の大きさに関わらず定数時間 $O(1)$ であり、また局所的に定数個の量子ビットの縮約密度行列の量子トモグラフィを行なって物理エラーレートを推定するプロトコルと比較してもエラーの大きさについて **quadratic** に効率的である。本研究により、量子状態の検証を行う既存の **state-of-the-art** なプロトコルに対して大幅な検証時間の短縮が達成され、大規模な量子状態生成をベンチマークするための高速で実用的な検証の新たな方式が切り開かれた。

その他の結果

本さがけ研究の関連研究・派生研究として、オーストリア・日本・台湾・韓国・オーストラリアに渡る複数の国際的なコラボレーションを通じて、エンタングルメント理論や分散量子情報

処理に関わる複数の結果を得た。

3. 今後の展開

研究1の今後の展開:深層学習での量子機械学習の活用

本さがけ研究を通じて、隠れ層が1層ある浅いニューラルネットワークでの学習の効率化に量子計算が有用であることが示された。しかし最先端の機械学習では、隠れ層が2層以上ある深いニューラルネットワークで様々なネットワークポロジーマを持つものが多用される。こうしたより一般のニューラルネットワークを用いた学習においても、量子計算の有効な活用方法を明らかにしていく必要がある。

本さがけ研究では、学習に必要となる重要な特徴量の探索に量子計算を使うアイデアの開拓や、ニューラルネットワークに量子計算を適用する際の基礎となる量子リッジレット変換の開発を通じて、従来の量子機械学習の研究の方向性の延長線上にはない先駆的な結果が得られた。こうした研究結果は今後の展開を広く支える重要な理論基盤となる。

研究2の今後の展開:高速な定数空間オーバーヘッド誤り耐性量子計算

近年の誤り耐性量子計算の研究は、広く研究されてきた表面符号を前提として、符号を部分的に変更したり誤り耐性量子計算の手順を一部工夫したりして改善を行う研究が大部分である。こうしたアプローチでどこまでいけるかは大変興味深いものの、誤り耐性量子計算を今後実現していくには、既存技術の単なる部分的改善の延長線上にはない技術的なブレークスルーが必要だと感じられる。これに対し本さがけ研究では、表面符号や量子LDPC符号を使うのではなく、接続符号に基づく新しいアイデアにより、時間オーバーヘッドをquasi-polylogarithmic程度に短く抑えつつ定数 $O(1)$ 空間オーバーヘッドを達成できる誤り耐性量子計算の手順を明らかにした。

しかし本さがけ研究の方法で達成できる時間オーバーヘッドは、誤り耐性量子計算の従来方式で達成できるpolylogarithmicな時間オーバーヘッドよりもわずかに長くなってしまっている。今後の誤り耐性量子計算の実現のためには、理論面からは時間・空間オーバーヘッドを極限まで減らすことが求められる。本さがけ研究の結果からわかることは、表面符号に必ずしも拘らなければオーバーヘッドを削減する理論的余地は十分にあったということである。今後の理論研究としては、符号設計から誤り耐性量子計算の実行手順の構築に至るまで最先端の手法を拡張して取り入れながら、オーバーヘッドを減らす要請に応えられるようにさらに理論の開発を行っていくことが求められるが、本さがけ研究で得られた知見はそのための重要な技術基盤となる。

将来的な社会実装につながるために必要なシナリオとタイムスパン

本さがけ研究の成果は量子コンピュータがもたらす情報化社会の発展への道筋を具体性と理論保証を持って明確化するものであり、もし従来の既定路線のアプローチにとらわれず本さがけ研究の萌芽的成果を産学連携により実現する方向性を取ることができれば、有限時間の技術進歩により量子コンピュータによる計算の高速化の恩恵を実際に社会実装することが可能になる。

4. 自己評価

本さがけ研究では、有用な量子機械学習アルゴリズムの開発とその実装方法の理論解析において複数の研究成果が得られ、量子計算を活用した情報化社会の発展に向けた理論基盤を構築するという研究のねらいが達成された。また自身の提案した研究に加えてさがけ量子情報処理の領域全体に対しても、Andrew Darmawan さんと共同でランダム量子符号の解析を行ったり、他の研究者の方々が取り組んでいた VQA に対し幅広く効率化が達成できるように古典最適化アルゴリズムの高効率化を行ったりといったように、領域全体の発展に貢献する成果が得られた。さらに、当初の計画を超え、定数空間オーバーヘッド誤り耐性量子計算の達成に接続符号を用いるアイデアや、エネルギー消費量における量子計算の優位性の解析手法といったように、従来の研究や世界の他の研究者の取り組みの延長線上にはない革新的な研究成果まで得られた。

こうした機械学習・誤り耐性量子計算にわたる総合的な研究成果は、NeurIPS・ICML といった機械学習のトップ会議から Nature Physics・Physical Review Letters といった物理学のトップジャーナルまで幅広い分野で重要性が評価されている。特に接続符号を用いた定数空間オーバーヘッド誤り耐性量子計算に関する成果は、表面符号や量子 LDPC 符号の研究が主流であった誤り耐性量子計算分野の今後の方向性を新たに開拓する成果であり、量子情報分野のトップ会議 QIP2023 でも plenary talk に選ばれ世界的に高く評価されている。こうした研究成果は、量子コンピュータによる計算の高速化の恩恵を将来的に社会・経済に波及させるための具体的な道筋として、今後の長期的な量子技術開発を支える理論基盤となることが期待される。

5. 主な研究成果リスト

(1) 代表的な論文(原著論文)発表

研究期間累積件数:17件

1. Hayata Yamasaki, Masato Koashi, “Time-Efficient Constant-Space-Overhead Fault-Tolerant Quantum Computation,” Nature Physics 20, 247, January 2024. arXiv:2207.08826

サイズの大きな量子低密度パリティチェック符号を使うのではなく、複数の小さな量子符号を接続して定数空間オーバーヘッド誤り耐性量子計算を達成するという新たなアプローチを確立した。特に、異なるサイズの量子ハミング符号をサイズが徐々に大きくなるように接続していく手法を開発した。これにより、誤り耐性量子計算の空間オーバーヘッドを定数 $O(1)$ に抑えながらも、同時に時間オーバーヘッドについても quasi-polylogarithmic な短さを達成できる効率的な誤り耐性量子計算の実行手順を構築した。また既存の量子低密度パリティチェック符号を使う手順とは異なり、量子エラー訂正に用いるデコーダーの実行時間が符号サイズに対して増大するような現実的な設定下においても、本研究の手順で誤り耐性量子計算を達成できることを証明した。これにより、様々な種類の高速度量子アルゴリズムについて、達成される高速化をほぼ損なうことなく、小さい空間オーバーヘッドで量子アルゴリズムを実行することが可能となった。

2. Hayata Yamasaki, Sathyawageeswar Subramanian, Satoshi Hayakawa, Sho Sonoda, “Quantum Ridgelet Transform: Winning Lottery Ticket of Neural Networks with Quantum Computation,” Proceedings of The Fortieth International Conference on Machine Learning (ICML2023),

Proceedings of Machine Learning Research 202, 39008, 2023. arXiv:2301.11936

量子計算の古典計算に対する優位性をニューラルネットワークによる学習に応用する際に有用な量子アルゴリズムとして、量子リッジレット変換を開発した。量子リッジレット変換により、量子状態のリッジレット変換を、データ次元に対して線型時間で達成できる。

さらに量子リッジレット変換の応用として、指数的に幅が大きい隠れ層1層のニューラルネットワークが与えられた際に、隠れ層のノードのうち学習を達成する上で重要なノードをサンプリングして高速に探し出すタスクへの応用方法を示した。これにより量子リッジレット変換は、量子フーリエ変換で達成されるような量子高速化をニューラルネットワークの学習タスクで達成するための基礎的なサブルーチンして使えることが明らかになった。

3. Simon Morelli*, Hayata Yamasaki* (*: equal contribution), Marcus Huber, Armin Tavakoli, “Entanglement detection with imprecise measurements,” Physical Review Letters 128, 250501, June 2022. arXiv:2202.13131

より現実的な設定として量子測定デバイスにもノイズがある設定を導入して解析を行なった。測定デバイスが実際に行う測定と理想的な測定との間の忠実度だけが保証されているが、実際に行う測定は正確にはわからない状況を考える。この際、理想的測定を行う場合に対して、エンタングルメントを検知する手順の性能がどれくらい劣化するかを定量的に解析した。こうした解析は、理想的な測定を仮定する理論的解析と、実際の量子デバイスを用いた実験との間のギャップを埋める新しい評価手法を提示する点で意義深い。

(2) 特許出願

研究期間全出願件数: 1 件 (特許公開前のものも含む)

(3) その他の成果 (主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

招待講演

1. Hayata Yamasaki, “Concatenate codes, save qubits,” 2024 YITP Quantum Error Correction Workshop, Kyoto, Japan, 21st March 2024.
2. Hayata Yamasaki, “量子機械学習 (Quantum Machine Learning),” Computational Physics Spring School 2024, Okinawa, Japan, 15th March 2024.
3. Hayata Yamasaki, “高速な量子機械学習の基盤構築 (Foundation of High-Speed Quantum Machine Learning),” さきがけ量子情報処理領域領域公開シンポジウム (2期生成果報告会), Tokyo, Japan, 7th March 2024.
4. Hayata Yamasaki, “Energy-Consumption Advantage of Quantum Computation,” Japanese-French Quantum Information workshop, Tokyo, Japan, 14th December 2023.
5. Hayata Yamasaki, “Time-Efficient Constant-Space-Overhead Fault-Tolerant Quantum Computation,” QI2023 satellite workshop, Osaka, Japan, 20th November 2023.
6. “高速な量子機械学習の基盤構築 (Foundation of High-Speed Quantum Machine Learning),” 「量子情報処理」×「革新的コンピューティング」合同セミナー, Fukuoka, Japan, 13th September 2023.
7. “高速な量子機械学習の理論基盤の構築 (Construction of Theoretical Foundation of

- High-Speed Quantum Machine Learning),” 3rd Quantum Software Workshop, Tokyo, Japan, 3rd August 2023.
8. Hayata Yamasaki, “Time-Efficient Constant-Space-Overhead Fault-Tolerant Quantum Computation,” Quantum error correction workshop, Kyoto, Japan, 20th March 2023.
 9. Hayata Yamasaki, “Outlook for Photonic Quantum Computing and Quantum Machine Learning,” Session CI-3 機械学習と光・ICT 技術, IEICE (The Institute of Electronics, Information and Communication Engineers) General Conference 2023, Saitama, Japan, 7th March 2023.
 10. Hayata Yamasaki, “Quantum Machine Learning with Optimized Random Features: Applications of Exponential Speedup without Sparse and Low-Rank Matrices,” the JSPS Japan-NUS (Singapore) Joint seminar, Tokyo, Japan, 20th February 2023.
 11. Hayata Yamasaki, “Quantum Machine Learning with Optimized Random Features: Applications of Exponential Speedup without Sparsity and Low-Rankness Assumptions,” satellite session “Quantum information and low dimensional systems” of the 20th International Symposium on the Physics of Semiconductors and Applications (ISPSA 2022), Jeju, Korea, 19th July 2022.
 12. Hayata Yamasaki, Shiro Tamiya, “Stochastic Gradient Line Bayesian Optimization: Reducing Measurement Shots in Optimizing Parameterized Quantum Circuits,” The 4th International Workshop on Quantum Resource Estimation (QRE2022), New York, America, 18th June 2022.
 13. Hayata Yamasaki, “Polylog-Overhead Highly Fault-Tolerant Measurement-Based Quantum Computation: Application of Entanglement without Geometrical Constraints,” Recent progress in theoretical physics based on quantum information theory (Yukawa Institute for Theoretical Physics (YITP) workshop), Online, 2nd March 2021.

Contributed Talks

1. Hayata Yamasaki, “Open problem: A perspective on generalized quantum Stein's lemma,” Towards Infinite Dimension and Beyond in Quantum Information (24w5274) workshop, Granada, Spain, 8th May 2024.
2. Hayata Yamasaki, “Open Problem: Efficient Maximum-Likelihood Decoder for High-Rate Concatenated Codes,” Advances in Quantum Coding Theory, Berkeley, United States, 16th February 2024.
3. Hayata Yamasaki, Kohdai Kuroiwa, Patrick Hayden, Ludovico Lami, “Entanglement cost for infinite-dimensional physical systems,” Quantum Information Processing 2024 (QIP2024), Taipei, Taiwan, 19th January 2024.
4. Florian Meier, Hayata Yamasaki, “Energy-Consumption Advantage of Quantum Computation,” Quantum Resources 2023, Singapore, November 2023.
5. Kohdai Kuroiwa, Ryuji Takagi, Gerardo Adesso, Hayata Yamasaki, “Every quantum helps: Operational advantage of quantum resources beyond convexity,” Quantum Resources 2023, Singapore, November 2023.

6. Hayata Yamasaki, Masato Koashi, “Time-Efficient Constant-Space-Overhead Fault-Tolerant Quantum Computation,” 6th International Conference on Quantum Error Correction (QEC23), Sydney, Australia, October 2023.
7. Hayata Yamasaki, Simon Morelli, Markus Miethlinger, Jessica Bavaresco, Nicolai Friis, Marcus Huber, “Activation of genuine multipartite entanglement: Beyond the single-copy paradigm of entanglement characterisation,” 23rd Asian Quantum Information Science Conference (AQIS2023), Seoul, Korea, 30th August 2023.
8. Hayata Yamasaki, Masato Koashi, “Time-Efficient Constant-Space-Overhead Fault-Tolerant Quantum Computation,” 26th Conference on Quantum Information Processing (QIP2023), Ghent, Belgium, 7th February 2023. **Selected to be a plenary talk.**
9. Hayata Yamasaki, Kohdai Kuroiwa, “General Quantum Resource Theories: Maximal Resources, Catalytic Replication, and Asymptotically Consistent Measures,” Quantum resources workshop, Singapore, 5th December 2022.
10. Hayata Yamasaki, Masato Koashi, “Time-Efficient Constant-Space-Overhead Fault-Tolerant Quantum Computation,” Quantum Confession, Älvkarleby, Sweden, 4th August 2022.
11. Hayata Yamasaki, Kohdai Kuroiwa, “General Quantum Resource Theories: Maximal Resources, Catalytic Replication, and Asymptotically Consistent Measures,” Quantum Information Entropy in Physics, Online, 24th March 2022.
12. S.Sonoda, H. Yamasaki, S. Subramanian, and M. Koashi, "Quantum algorithm for sampling optimal random features", RQC-AIP Joint Seminar, online, November 2021.
13. Hayata Yamasaki, Sathyawageeswar Subramanian, Sho Sonoda, Masato Koashi, “Regression and Classification with Optimized Random Features: Applications of Exponential Speedup by Quantum Machine Learning without Sparsity and Low-Rankness Assumptions,” Quantum Techniques in Machine Learning 2021 (QTML2021), Online, November 2021.
14. Hayata Yamasaki, Simon Morelli, Markus Miethlinger, Jessica Bavaresco, Nicolai Friis, Marcus Huber, “Activation of genuine multipartite entanglement: Beyond the single-copy paradigm of entanglement characterisation,” Beyond IID in Information Theory 9, Online, October 2021.
15. Hayata Yamasaki, Sathyawageeswar Subramanian, Sho Sonoda, Masato Koashi, “Regression and Classification with Optimized Random Features: Applications of Exponential Speedup by Quantum Machine Learning without Sparsity and Low-Rankness Assumptions,” 21th Asian Quantum Information Science Conference (AQIS2021), Online, September 2021.
16. Shiro Tamiya, Hayata Yamasaki, “Stochastic Gradient Line Bayesian Optimization: Reducing Measurement-Shot Number in Variational Quantum Algorithms,” 21th Asian Quantum Information Science Conference (AQIS2021), Online, September 2021.
17. Kohdai Kuroiwa, Hayata Yamasaki, “General Quantum Resource Theories: Maximal Resources, Catalytic Replication, and Consistent Measures,” SFB BeyondC Autumn Workshop 2021, Innsbruck, Austria, September 2021.

18. Hayata Yamasaki, “MBQC and device-independent verification of quantum computation,” Kraus-Huber mini-workshop, Online, March 2021.
19. Hayata Yamasaki, Sathyawageeswar Subramanian, Sho Sonoda, Masato Koashi, “Learning with Optimized Random Features: Exponential Speedup by Quantum Machine Learning without Sparsity and Low-Rank Assumptions,” 20th Asian Quantum Information Science Conference (AQIS2020), Online, December 2020.
20. Hayata Yamasaki, Madhav Krishnan Vijayan, Min-Hsiu Hsieh, “Hierarchy of quantum operations in manipulating coherence and entanglement,” lightening talk, Beyond i.i.d. in information theory VIII, Online, November 2020.

Posters (主要なもの)

- Florian Meyer, Hayata Yamasaki, “Energy-Consumption Advantage of Quantum Computation,” Quantum Innovation 2023, Tokyo, Japan, 16th November 2023, **Poster Presentation Awards for Young Researchers** given to our student coauthor, Florian Meyer.
- Hayata Yamasaki, “Fast and Versatile Quantum Machine Learning,” 4th Japanese-American-German Frontiers of Science (JAGFOS) Symposium, Dresden, Germany, 6th October 2023.
- Hayata Yamasaki, Sathyawageeswar Subramanian, Satochi Hayakawa, Sho Sonoda, “Quantum Ridgelet Transform: Winning Lottery Ticket of Neural Networks with Quantum Computation,” The Fortieth International Conference on Machine Learning (ICML2023), Hawaii, United States, 26th July 2023.
- Kohdai Kuroiwa, Hayata Yamasaki, “General Quantum Resource Theories: Maximal Resources, Catalytic Replication, and Consistent Measures,” 21st Asian Quantum Information Science Conference (AQIS2021), Online, September 2021, **Best Student Poster Award** given to a student coauthor, Kohdai Kuroiwa.
- Hayata Yamasaki, Sathyawageeswar Subramanian, Sho Sonoda, Masato Koashi, “Learning with Optimized Random Features: Exponential Speedup by Quantum Machine Learning without Sparsity and Low-Rank Assumptions,” Advances in Neural Information Processing Systems 33 (NeurIPS 2020), Online, December 2020.