

PRESS RELEASE

公立はこだて未来大学 入試・広報・就職課
〒041-8655 函館市亀田中野町 116 番地 2
TEL 0138-34-6444 FAX 0138-34-6383
E-mail: pub@fun.ac.jp
URL: <https://www.fun.ac.jp>

非可換量子ダイナミクスに基づくデータ表現の枠組みを構築

—非可換性と軌道が表現構造に与える影響を体系的に評価—

研究成果のポイント

- ・量子ダイナミクス（※1）に着目し、その軌道と非可換性を活用した、量子機械学習（※2）におけるデータ表現の枠組みを構築しました。
- ・非可換性（※3）や軌道が表現に与える影響を要因別に検証し、スペクトル解析や有効次元に基づき、表現の構造や複雑さを体系的に評価しました。
- ・得られた知見は、量子機械学習におけるデータ表現の構成に関する理解を深め、設計指針の整理に資し、新たな量子機械学習手法への応用可能性を示します。

研究成果の概要

公立はこだて未来大学の島内宏和准教授は、量子ダイナミクスの軌道に基づくデータ表現の枠組みを構築し、非可換性や軌道が表現構造に与える影響を体系的に検証しました。さらに、スペクトル解析や有効次元に基づく評価により、表現の構造や複雑さを特徴づけました。

（背景）

量子コンピュータは、従来の計算機とは異なる原理に基づく計算基盤として注目されています。特に、特定の問題においては従来のコンピュータでは困難な計算を効率的に実行できる可能性があることから、さまざまな分野での応用が期待されています。量子ダイナミクスが生み出す高次元かつ複雑な状態は、機械学習におけるデータ表現の構成原理として関心を集めています。しかし、量子リザーブコンピューティング（※4）などの従来研究では、量子ダイナミクスの特定の時刻や最終状態に基づく表現が主に用いられており、ダイナミクスの過程や非可換性といった構造的な性質が、表現構造や学習に関わる性質にどのように影響するかは十分には明らかにされていませんでした。

（研究手法）

本研究では、量子リザーブコンピューティングに見られるダイナミクス活用の考え方に着想を得つつ、量子ダイナミクスの時間発展における軌道に着目し、各時刻における観測量を統合することで、データの表現を構成する枠組みを構築しました。具体的には、量子操作を段階的に合成したダイナミクスを用いて、データの情報を埋め込んだ量子状態を時間発展させ、各時刻において得られる観測量

を連結することで、ダイナミクスの過程に沿った軌道情報を保持した高次元の特徴ベクトルを生成します。

さらに、量子コンピュータにおいては状態の統計的性質を推定するために多数の観測が必要となる一方で、利用可能な観測回数に制約がある点に着目し、異なるダイナミクスや初期条件を組み合わせるアンサンブル構造を導入しました。具体的には、複数のダイナミクスから得られる特徴を統合することで、個々の観測数を抑えつつ多様な表現を獲得できるようにし、観測数と表現の多様性との間のトレードオフを調整します。また、本枠組みによって得られる表現の構造や複雑さを評価するため、カーネル行列のスペクトル分布や有効次元といった指標に基づく解析を行いました。

(研究成果)

実験により、非可換性やダイナミクスの軌道がデータの見え方や表現の構造に影響する傾向が確認されました。特に、非可換な操作と軌道を組み合わせることで、従来の最終状態のみを用いる手法と比較して、異なる構造を持つ表現が得られることが示されました。また、履歴情報を取り入れた表現は、最終状態のみを用いる場合に比べて一貫して有効である傾向が確認され、これらの結果は、非可換性と軌道情報が表現の形成に重要な役割を持つことを示唆しています。

さらに、スペクトル解析および有効次元の観点から、本手法によって得られる表現は、特徴空間における多様な方向をより豊かに含む傾向があり、表現の幾何構造が従来手法とは異なる形で拡張されていることが確認されました。このようなスペクトル構造の違いは、タスクや正規化条件に応じて予測性能に影響する可能性が示唆されます。

一方で、有限ショットによる観測においては、このような豊かな表現構造が統計的なばらつきの影響を受けやすい側面も確認されました。段階的評価（理想的な期待値計算と有限ショット推定の分離）により、表現の幾何的性質と観測ノイズの影響を切り分けて評価できることが示されました。

これらの結果は、統計的学習論の観点からは、アンサンブル構造が複数のダイナミクスに基づく特徴を統合することで表現の多様性を高めるとともに、観測に伴うばらつきを抑え、有限サンプル下での安定性に寄与するものと解釈できます。また、本手法で得られる表現は、既存の手法による特徴と組み合わせることで補完的に機能する可能性も示されました。

(今後の展望)

本研究で得られた結果は、量子ダイナミクスに基づくデータ表現の構成原理への理解を深めるとともに、量子機械学習における表現設計に関する知見を与えるものです。より広範なタスクでの検証と理論的整理を通じて、設計原理の体系的理解につながることを期待されます。また、得られた知見は、量子ダイナミクスを活用した新たな量子機械学習手法の構築へつながる可能性があります。

論文発表の概要

研究論文名：Noncommutative Quantum Dynamics for Feature Representation Learning

著者：島内 宏和（公立はこだて未来大学システム情報科学部）

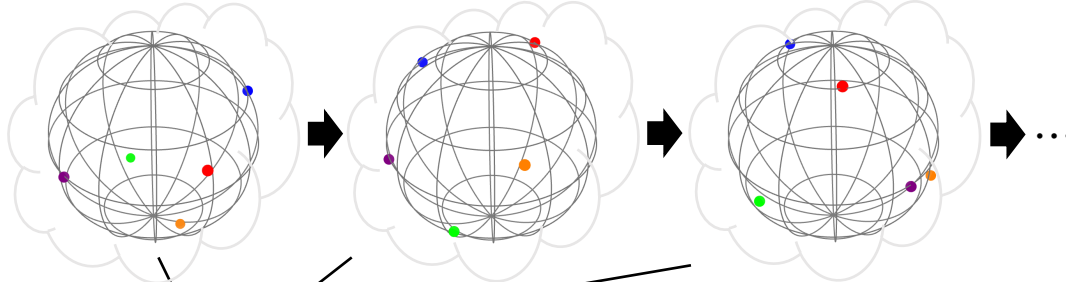
公表雑誌：IEEE ACCESS, vol. 14, 53529–53571, <https://ieeexplore.ieee.org/document/11458597>

公表日：2026年3月27日

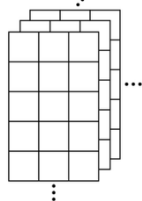
画像

量子ダイナミクスの軌道に基づくデータ表現の枠組みを構築

データを埋め込んだ量子状態の非可換操作による時間発展の概念図

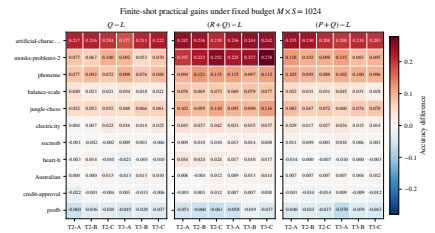
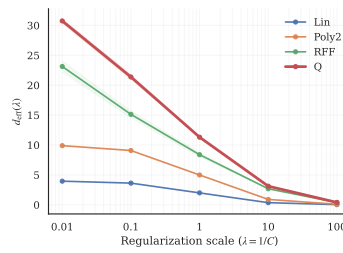
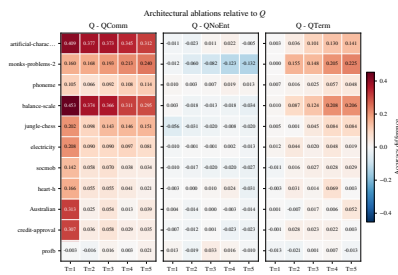


観測量に基づく表現



- ✓ ダイナミクスの過程に沿った軌道情報を保持した高次元の表現を生成
- ✓ 観測回数に制約があることに着目し、異なるダイナミクスや初期条件を組み合わせるアンサンブル構造を導入

非可換性と軌道が表現構造に与える影響を評価



$$\hat{K} = K + \frac{1}{n}EE^T, \mathbb{E}[\hat{K} | F] \approx K + \tau^2 I_n$$

非可換性と軌道情報が表現の形成に重要な役割を持つ

スペクトル解析・有効次元の観点から表現の幾何構造を特徴づける

アンサンブル構造が観測に伴うばらつきを抑え安定性に関与することを示唆

[図表出典] H.Shimauchi, Noncommutative Quantum Dynamics for Feature Representation Learning, IEEE ACCESS, vol. 14, 53529-53571.

今後の展開：量子ダイナミクスに基づく表現の設計原理と新たな量子機械学習法へ応用

【用語の解説】

- ※1 量子ダイナミクス：量子状態が時間とともに変化する過程を指す。ユニタリ変換やハミルトニアンによって記述され、重ね合わせや干渉といった量子特有の性質を含む。
- ※2 量子機械学習：量子コンピュータの計算原理を用いてデータ解析や学習を行う手法の総称。量子状態から得られる特徴やカーネルなどを用いて、分類や回帰などの問題を扱う。
- ※3 非可換性：複数の操作の順序を入れ替えると結果が異なる性質。
- ※4 リザーバーコンピューティング：リザーバーコンピューティングは、複雑なダイナミクスを持つ系に入力を与え、その応答を特徴として用いる枠組みである。量子リザーバーコンピューティングはこれを量子系に拡張したものであり、量子ダイナミクスを利用して入力データから特徴を抽出する。量子状態の特定の時刻や最終状態に基づく特徴が主に用いられてきた。

お問い合わせ先

所属・職・氏名：公立はこだて未来大学 准教授 島内宏和

掲載する連絡先（ TEL FAX E-mail 研究室ホームページ）

E-mail：simauti@fun.ac.jp

ホームページ：<https://www.fun.ac.jp/faculty/shimauchi-hirokazu/>