時間的量子トモグラフィーの学習

東大情 [1]　○(P) チャン　クオック　ホアン [1]，中嶋　浩平 [1]
Tokyo Univ.[1]　○(P) Quoc Hoan Tran[1]，Kohei Nakajima[1]
E-mail: tran_qh@ai.u-tokyo.ac.jp

量子システムにおける測定データに基づいて量子状態（量子データ）の密度行列を再構成するタスク，すなわち，量子トモグラフィー（Quantum Tomography）が注目されている [1]．量子トモグラフィーの応用として量子デバイスの動作を検証したり，量子データを制御・操作する能力を向上させたりすることが挙げられる．現在のトモグラフィー手法では量子デバイスの出力状態が時間に依存しないと仮定し，時間的処理能力を持つ量子デバイスが時間的量子写像を表す状況を考慮していない．例えば，量子データを連続して処理している間，量子デバイスには入力に依存する時間的ノイズが発生し，量子データにその時間的影響を及ぼすことが考えられる．このような時系列量子データの処理では量子トモグラフィーを行うために過去の情報を覚える必要があり，標準的なトモグラフィーとは根本的に異なる．

本研究ではこの問題を時間的量子トモグラフィー（Temporal Quantum Tomography）として定式化する．物理リザバー計算の枠組に属する量子リザバー計算 [2] と呼ばれる手法を用いて一つの実験セットアップのみで近似的なトモグラフィーを実現する手法を提案する [3]．入力の量子データ系列は量子リザバーと呼ばれる量子システムとシーケンス的に相互作用し，時間発展後の量子リザバーにおける測定によって入力系列の情報を含む高次元の特徴を得る．これらの特徴を線形読み出し（Readout）部に接続し，Readout の重みを調整することで時間的量子写像を学習できる（図 1）．ここでは，過去量子データや量子平均フィルターの再構成などといった代表的な量子学習タスクにおいて高忠実度（High Fidelity）のトモグラフィーを確立し，時系列量子データの処理における量子メモリ容量（Quantum Memory Capacity, QMC）という新たな概念を提案した．この QMC は近未来の量子デバイスの時間的処理能力を評価するための標準的な指標として使用することが期待できる．

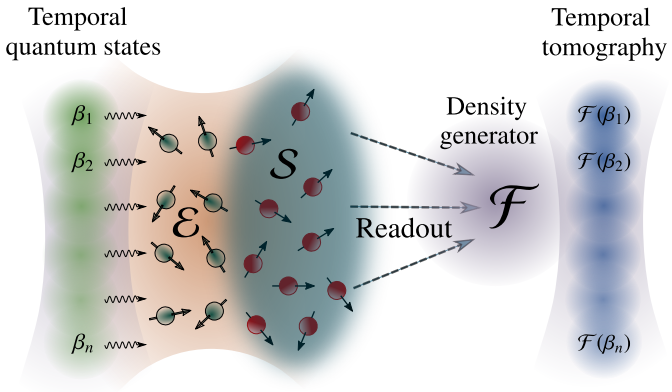

図 1: 時間的量子トモグラフィーの学習目標は入力量子状態の系列 $\beta_1, \beta_2, \ldots$ に適用する時間的量子写像 $\mathcal{F}$ の出力量子状態の系列 $\mathcal{F}(\beta_1), \mathcal{F}(\beta_2), \ldots$ の密度行列を再構成することである．提案システムでは入力系列を受け取る補助量子システム $\mathcal{E}$ と測定できる量子リザバー $\mathcal{S}$ で構成されている．入力が来るたびに $\mathcal{E}$ と $\mathcal{S}$ が相互作用し，量子ダイナミクスの時間発展によって入力データの情報は $\mathcal{S}$ の測定データに含まれる．この測定データを線形回帰などといった簡単な古典学習手法で用いて時間的量子写像 $\mathcal{F}$ をエミュレートする．

参考文献

[1] M. A. Nielsen and I. L. Chuang, Cambridge University Press, 2011.
[2] K. Fujii and K. Nakajima, Phys. Rev. Applied, vol.8, p.024030, Aug. 2017.
[3] Q.H. Tran and K. Nakajima, Preprint at arXiv:2103.13973, 2021.

© 2021年 応用物理学会