

【助成 41-22】

シリコン光集積回路による量子分類手法の確立

代表研究者 香川大学創造工学部 助教 小野 貴史

共同研究者 慶應義塾大学大学院 教授 武岡 正裕

〔研究の概要〕

近年、機械学習と量子回路を組み合わせた量子機械学習の研究が注目されている。量子機械学習では、機械学習の手法を用いて量子回路を最適化し、所望の処理能力を持つ量子回路を実装する。このような背景のもと、我々はシリコン光集積回路を用いて量子分類器を実装し、入力データを 90%以上の精度で分類することに成功した。この研究は、機械学習を光集積量子回路へ適用した点で新規性があるが、分類器の性能には制限があった。その主な要因は、レーザー光源を弱めた擬似単一光子を使用していたことである。本研究では、シリコンの非線形光学効果を利用した光子対光源を活用し、新たな量子分類器の実装手法を確立する。これにより、光量子分類器のさらなる応用可能性を探索することを目的とする。

〔はじめに〕

量子分類器は、入力データを特定のカテゴリに分類するものであり、画像認識、医療診断、交通システムなど幅広い分野での応用が期待されている。

先行研究では、シリコン光集積回路を用いた光子ベースの量子分類器が実装されている[1]。しかし、この研究には以下の 2 つの問題点があった。

1. 光源として擬似単一光子を使用していたため、光子の単一性が厳密に保証されていなかった。
2. 分類器の学習に使用した光子数を厳密に評価していなかった。

量子分類器の学習では、光子を光集積回路へ入力し、その出力結果を基に回路の訓練パラメータを最適化する。しかし、入力する光子数が少ないと、光子の粒子性による統計的なゆらぎの影響で測定結果に誤差が生じる。つまり、光量子分類器の学習では、回路の訓練に加えて「量子ゆらぎ」の問題が発生する。

本研究では、シリコンの非線形光学効果を利用

した光子対光源を用いることで、単一性が保証された光子による分類器を実装し、その定量的な解析手法を確立する。

〔光子を用いた量子分類器〕

光子を用いた量子分類器の概略を図 1 に示す。まず、量子状態 $|\psi\rangle$ を準備し、量子回路を用いて学習パラメータ $\vec{\phi}$ とともに入力データ $\vec{x}$ を符号化する。次に、出力として特定の量子状態が観測される確率 $P(\vec{\phi}, \vec{x})$ を測定し、この確率が閾値よりも高ければ「正」、低ければ「負」と分類する。本研究では、入力データの符号化に「Data Reuploading」手法を採用した。この方法はニューラルネットワークのモデルと等価であることが示されており、単一の光子を使って、ユニバーサルな量子分類器の実装が可能となる。

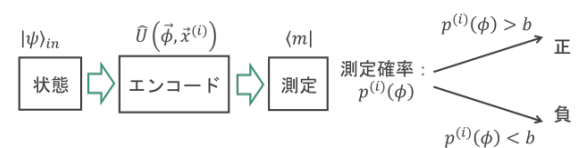


図 1：量子分類器の概略

〔学習で使用する光子数と学習の精度〕

学習では、機械学習の手法を用い、出力確率が教師データにできるだけ近づくように、以下のコスト関数を最小化するように $\vec{\phi}$ を最適化する。

$$C(\vec{\phi}) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (p^{(i)}(\vec{\phi}, \vec{x}) - y^{(i)})^2 \quad (1)$$

学習に使用する光子数が十分に多ければ、出力確率の誤差は小さくなる。一方、光子数が有限の場合、推定確率 $p^{(i)}(\vec{\phi}, \vec{x})$ には光子数に依存した推定誤差 Δp が生じる。この誤差は、使用する光子数を増やすことで低減できるため、式(1)のコスト関数を最小化する精度は、教師データの数と光子数を増やすことで向上する。

本研究では、式(1)のコスト関数の推定精度を定量的に解析し、教師データ数および光子数を変化させた際の分類器の性能を数値シミュレーションにより評価した。その結果、たとえ学習で使用する光子数が1個であっても、教師データの数十分に多ければ、90%程度 of 分類精度を達成できることが分かった。

〔伝令付き単一光子のための光子対生成〕

本研究ではシリコンの3次非線形光学効果を利用して光子対を生成し、一方の光子を伝令信号(トリガー)、もう一方を伝令付き単一光子として利用することで、単一性が保証された光子の生成に取り組んだ。具体的には、長さ約6mmのシリコン導波路に5mW程度のレーザー光を入射し、自発的四光波混合によってシグナル光子とアイドラー光子の対を生成した。この時、生成される光子対は極めて短い時間幅の中で同時に生成される。この特性を確認するため、実験では生成した光子対の一方に時間的遅延を与え、2つの光子の時間相関を計測した。図2にその結

果を示す。横軸は片方の光子に加えた遅延時間、縦軸は光子が同時に検出された際の同時検出係数を示す。実験の結果、約1ナノ秒の時間幅の中で2つの光子が同時に存在することが確認された。期待されるように、光子対は1ナノ秒という短い時間スケールで生成され、同時検出されることが観測された。

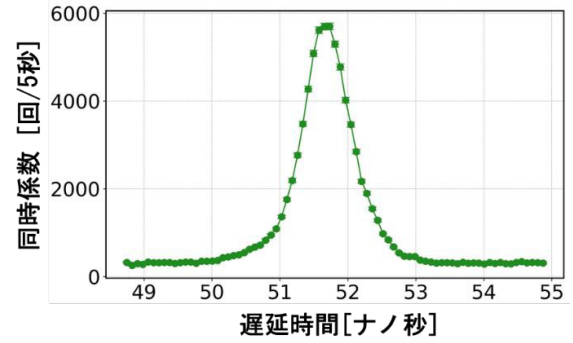


図2：シリコン導波路で生成した光子対

〔まとめ〕

本研究では、シリコン光集積回路を用いた量子分類手法の確立を目的とし、学習に使用する光子数に着目して分類精度の光子数依存性を調査した。その結果、光子数が少ない場合でも、教師データの数を増やすことで分類精度が向上することを確認した。さらに、シリコン光集積回路を用いた伝令付き単一光子の生成実験に取り組んだ。今後は、この伝令付き単一光子を用いた分類器を実装し、理論結果の実証を進める予定である。

〔発表論文〕

1. 安部駿佑、Wojciech Roga、武岡正裕、小野貴史、「少ない光子を用いた光量子分類器」、第50回量子情報技術研究会、2024年5月28日、筑波
2. 安部 駿佑、Roga Wojciech、立石 翔太、武岡正裕、小野 貴史、「単一光子を用いた量子分類器の性能評価」、レーザー学会学術講演会第45回年次大会、2025年1月22日、広島