HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	A study on Quantum-Classical Inter-Domain Classification Method
Author(s)	野原, 大靖
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(情報科学)
Dissertation Number	甲第17043号
Issue Date	2026-06-30
DOI	https://doi.org/10.14943/doctoral.k17043
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/100096
Type	doctoral thesis
File Information	Taisei_Nohara_abstract.pdf, 論文内容の要旨 https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

学　位　論　文　内　容　の　要　旨

博士の専攻分野の名称　　博士（情報科学）　　氏名　野原 大靖

学　位　論　文　題　名

A study on Quantum-Classical Inter-Domain Classification Method
（量子-古典ドメイン間クラス分類手法に関する研究）

量子機械学習は量子計算と機械学習の両方を取り扱う分野であり, 量子計算機の応用先の一つとして注目されている. 量子機械学習の問題設定はデータの生成および学習がそれぞれ古典計算機 (C, 古典計算機とは量子情報分野において量子計算機に対する既存の計算機を指す語) と量子計算機 (Q) のどちらで行われているのかにより CC,CQ,QC,QQ の 4 種類に区別できる. このうちデータの生成と学習で異なるデバイスを用いる CQ,QC の問題設定では問題を他方の領域に移すことで手法を扱いやすくすることが期待される. 例えば CQ の問題設定では量子アルゴリズムによる機械学習手法の将来的な高速化などの期待があり, また QC の問題設定では古典計算機による量子情報の扱いやすさへの期待がある. 本研究では古典系におけるリンク予測問題や量子系におけるエンタングルメント検出問題といったデータ点内の関係を予測する問題を対象としてクラス分類手法の提案を行う. これらの問題はいずれも実用的な問題設定であるが学習時間やデータセットの準備に大きな計算コストを必要とするという課題を抱えており, 手法のスケーリングを妨げる要因の一つとなっている. この課題に対して, ペアワイズ分類問題に対し適用可能な量子機械学習モデルと, エンタングルメント検出問題に対しデータ生成コストの小さい学習手法の提案を行う.

本論文は以下のような構成となっている.

1 章では, 本論文全体における研究背景について述べる. まず現在の機械学習研究の概要や情勢について述べる. 次に関連領域として量子計算を取り上げ, 当該分野の概要や機械学習とどのように関係するかを説明する. これらを踏まえ, 機械学習や量子計算の分野が直面している具体的な課題としてスケーラビリティや既存手法の実現可能性を取り上げる. この点について, 本論文の貢献点であるペアワイズ分類問題におけるスケーラビリティの改善およびエンタングルメント検出を行う実現可能な機械学習手法の提案について概要を説明する. 最後に, 本論文全体の構成について述べる.

2 章では, 本論文全体を通して重要となる機械学習や量子計算の基礎的概念について述べる. 機械学習に関しては,3 章以降の共通要素であるクラス分類問題の定式化を最初に行う. 次いで,3 章で登場するモデルであるカーネル法やサポートベクターマシン, ニューラルネットワークについて簡単な説明を行う. また学習手法として 4 章の関連手法である DeepSVDD や nnPU, およびその関連研究について説明を行う. 量子計算については, まず量子計算の根幹となる量子状態や密度行列, 測定の概念を線形代数の形式で記述する. また,3 章で使用する量子回路ダイアグラムの記法について説明する. 加えて,3 章で用いる HHL アルゴリズムの実装や関連研究について述べる.

3 章では, ペアワイズ分類問題の問題設定に対し, 量子計算機を用いて時間計算量の小さい学習手法を提案する. 具体的には, クロネッカーカーネルを組み合わせた量子サポートベクターマシンを提案する. まず背景としてペアワイズ分類問題の問題設定や, クロネッカーカーネル, 量子サポートベクターマシンなど提案手法が用いる道具について説明を行う. これらのことと量子計算機における状態表現にクロネッカー積が自然に現れることから, 提案手法ではクロネッカーカーネルのカー

ネル行列が量子計算機上で簡潔に表現できることを述べる. これにより, 提案手法は古典計算機上で同様の計算を行う手法と比較してボトルネック部分の時間計算量を削減することを示す. 数値実験として先行研究で用いられたデータセットを対象に古典計算機における計算手法と提案手法で分類精度の比較を行う. 結果として, 特定の条件下で提案手法が十分な分類精度を持つことを示す.

4 章では, エンタングルメント検出問題を PU 学習問題として定式化し,PU 学習に基づくデータセットと手法の適用を提案する. まずエンタングルメント検出問題の問題設定と既存研究, 特に本研究と関連の深い機械学習を用いたアプローチについて述べる. ここで, 多くの既存研究ではデータセットに正例および負例ラベルを持つデータが十分にあることを仮定していることと, その仮定の問題点, すなわちエンタングルメント検出問題におけるラベル付けの困難性について述べる. その後, 提案手法としてラベルなしデータが負例データに対して比較的容易に生成できることを述べたうえで PU 学習としての定式化を行う提案手法の説明を行う. また, 量子情報において用いられる Hilbert-Schmidt 測度に基づく分布に従うデータセット生成手法を説明する. このとき, データの生成領域を真の分類境界付近に絞ることでラベル付けの困難性を回避し, かつデータ点が十分広い領域に分布するようなデータセットが生成できることを示す. 数値実験として, 生成したデータセットを対象に 1 クラス分類モデルと PU 学習モデルで比較実験を行う. 結果として, 提案内容である PU 学習モデルを用いた方法がベースラインとする 1 クラス分類手法に対し高い性能を示すことを述べる.

5 章では, これまでの研究およびその結果についてそれぞれ議論を行い, 研究の目的に対してどのように取り組んだか, 結果はどのようなものであったか, 今後の展望としてどのような応用や課題が存在するかについて論じる.3 章についてはペアワイズ分類問題を対象にスケーラビリティの問題に取り組み, 既存手法と比較し計算量オーダーを改善したことと, 提案手法を量子計算機シミュレータ上で実装し動作を確認したことを述べる. また研究の限界や課題として, 量子ランダムアクセスメモリの実現性や誤り訂正能力のない環境における動作, 測定におけるサンプリング回数の影響や大規模データを用いた検証について言及する.4 章についてはエンタングルメント検出問題を対象に既存手法の実現可能性の問題に取り組み, 特定の量子状態をラベルなしデータとして利用することで既存手法が抱えるデータのラベル付けの問題を回避する手法を提案し, かつ提案手法は正例データのみを用いる手法との比較で高い性能を発揮することを確認したことを述べる. また研究の限界や課題としては量子ビット数に時間計算量や空間計算量の増大があり, この点については特徴選択による入力特徴量の次元削減や量子系での分類モデル実装による解決が今後の展望として考えられることを述べる.

6 章では, 本論文の結果についてまとめ, 今後の展望について述べる. 量子サポートベクターマシンを用いたペアワイズ分類手法はいくつかの仮定のもとで学習のボトルネック部分の計算量を改善し, 将来的な手法の有用性を示唆するとともにクロネッカー積構造に着目した量子機械学習アルゴリズムという新たな視点を与えたものとしてまとめる.PU 学習を用いたエンタングルメント検出手法は既存研究におけるデータセット準備の実現可能性の問題を回避し, エンタングルメント検出における負例ラベルを用いない手法の有用性を示唆するとともに量子状態に対するラベルなしデータの概念を提案したとしてまとめる.