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_review.pdf, 審査の要旨 https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

学位論文審査の要旨

博士の専攻分野の名称　博士 (情報科学)　氏名　野原 大靖

審査担当者　主　査　教　授　野田 五十樹
副　査　教　授　川村 秀憲
副　査　教　授　山本 雅人
副　査　教　授　坂本 大介
副　査　教　授　小山 聡　（名古屋市立大学 データサイエンス研究科）

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）

本論文は, 量子計算と機械学習の 2 つの領域において, 各々の領域で課題となっているテーマを考察し, 他方の領域の手法を用いてその課題を解決する学際的な手法を提案し, その有用性および将来的な可能性を検証・考察したものである.

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. 本研究では古典系におけるペアワイズ分類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 (第 3 章) 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 (第 4 章) の提案を行う.

第 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. 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示した. 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明らかにした. 数値実験として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い, 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した.

第 4 章では, エンタングルメント検出問題を半教師あり学習の 1 つ PU 学習の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した. 多くの既存研究では無視されている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を解決するため, 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 PU 学習としての定式化を行う提案手法を構築した. さらに,Hilbert-Schmidt 測度に基づく分布に従うデータセット生成手法を構成し, 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した. 数値実験では, 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い, 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.

第 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, 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た. まず, ペアワイズ分類問題においては, 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考察した. エンタングルメント検出問題においては, 量子ビット数に時間計算量や空間計算量の増大に対して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が今後の展望として考えられることを考察した.

これを要するに, 著者は, 量子計算と機械学習の学際的領域において, 機械学習分野におけるペアワイズ分類学習問題を, いくつかの仮定のもとでクロネッカー積構造に着目した量子サポートベクターマシンの手法を適用して計算量を改善し, 将来的な手法の有用性を示すとともに, 量子計算分野におけるエンタングルメント検出問題を, 機械学習における半教師あり学習を適用することで, 準備が困難である負例ラベルデータを欠いたままのデータセットでも精度の高い検出器を学習できる手法を確立し, 両領域の手法の組み合わせの可能性を示したものであり, 情報科学に関する貢献は大なるものがある. よって博士 (情報科学) の学位を授与するに値するものと認める.