REPORT

of the scientific advisor for the dissertation thesis submitted by Aksultan Mukhanbet for the degree of Doctor of Philosophy (PhD) in the specialty 8D06102 – Computer Engineering, entitled,

«Research and development of hybrid quantum-classical algorithms for pattern recognition»

I, Paulo Trigo Silva, adjoint professor at Instituto Superior de Engenharia de Lisboa (ISEL), Lisbon, Portugal, hereby submit this report to confirm that doctoral candidate, Aksultan Mukhanbet, has successfully completed all requirements for the PhD degree.

Research Overview and Objectives

The PhD work of Aksultan Mukhanbet addresses the research and development of hybrid quantum–classical neural networks for image recognition tasks. The research is well situated within the context of the inherent limitations of classical deep learning approaches, mainly in terms of computational complexity and scalability, as well as the constraints imposed on quantum machine learning by NISQ-era hardware, including limited *qubit* availability, noise, and restricted circuit depth.

The research is grounded on the hypothesis that hybrid quantum–classical models can achieve improved classification accuracy while simultaneously reducing the number of trainable parameters.

Given such hypothesis, the research achieves a coherent set of scientific and technical novel contributions, which include:

- the characterization of quantum data encoding methods,
- a quantum neural network (QNN) based on a parameterized quantum circuit,
- the design of a hybrid quantum-classical neural network (HQCNN) architecture,
- a HQCNN enhancement via data re-uploading and genetic-based optimization (HQCNN-REGA)

The dissertation is structured in a clear and coherent manner, comprising an introduction, core technical chapters, and a conclusion. It is supported by extensive experimental evaluation conducted on benchmark datasets, such as MNIST, FashionMNIST, CIFAR-100, and MNISQ. The research outcomes have been disseminated through peer-reviewed publications and international conference presentations, that confirm both the scientific relevance and the practical potential of the proposed contributions.

Rua Conselheiro Emídio Navarro 1
1959-007 Lisboa- Portugal
Tel: (+351) 218 317 000
www.isel.pt

Overall, the work reflects a clear problem-driven approach and a research methodology grounded in a well-defined hypothesis, aligned with current challenges in the adoption of quantum machine learning, particularly in the design of hybrid architectures.

Main Achievements

The PhD work achieves several relevant scientific and technical contributions. A central result is the development of the HQCNN-REGA model, which integrates data re-uploading techniques with a genetic algorithm to automate the optimization of quantum circuit architectures. This approach addresses the combinatorial nature of circuit design, including the selection of layers, gate operations and entanglement structures.

The work also proposes a hybrid quantum–classical neural architecture (HQCNN) incorporating quantum convolutional and fully connected layers, demonstrating the feasibility of integrating parameterized quantum circuits within deep learning pipelines.

From an experimental perspective, the contributions are quantified and express a high level of classification accuracy (on benchmark dataset) with improved performance relative to existing quantum-based approaches. The experimental evidence also shows strong parameter reduction when compared to classical convolutional neural networks.

The contributions are supported by experimental validation across benchmark datasets, with consistent performance improvements observed. The experimental evidence, together with dissemination via peer-reviewed publications and international conferences, confirm the scientific relevance and technical soundness of the work.

Observations and Recommendations

The dissertation is well structured and clearly written, demonstrating a solid understanding of both machine learning and quantum computing principles. The proposed contributions are technically sound, and the experimental results are consistent and supported by experimental validation on benchmark datasets, as well as dissemination in international conferences and peer-reviewed publications.

The contributions on hybrid architectures and optimization strategies show promising performance, particularly in terms of parameter efficiency and classification accuracy. At the same time, further validation on real NISQ hardware would be a valuable next step, allowing the assessment of the proposed methods under realistic noise conditions and operational constraints.

From a methodological perspective, future work could further explore the automated design and optimization of quantum circuits. In this context, the use of more advanced evolutionary strategies, such as grammar-based evolution, may offer additional flexibility and scalability in the generation of quantum circuit architectures.

Rua Conselheiro Emídio Navarro 1
1959-007 Lisboa- Portugal
Tel: (+351) 218 317 000
www.isel.pt

Assessment of Relevance, Novelty and Practical Value

The PhD work addresses a highly relevant problem at the intersection of quantum computing and machine learning, a fascinating and challenging research field in current computer science. The focus on hybrid quantum–classical architectures, combining quantum convolutional and fully connected layers, is well aligned with current efforts to overcome NISQ-era constraints, particularly the trade-off between computational efficiency and model accuracy under limited *qubit* resources.

The novelty of the work is grounded in the integration of parameterized quantum circuits, data re-uploading, and evolutionary optimization within a unified framework. In particular, the use of a genetic algorithm to automatically design quantum circuit architectures represents a novel approach in addressing the combinatorial complexity of circuit configuration. While the individual components are known, their combined application and adaptation to image recognition tasks under resource constraints demonstrate a clear degree of innovation.

The experimental evidence points to achievement of efficient model configurations with reduced parameter complexity while maintaining competitive predictive performance. The evidence gathered on different benchmark datasets suggests robustness across multiple evaluation metrics. The compatibility with NISQ-era devices reinforces applicability in near-term quantum computing settings. Additional validation on real quantum hardware would further strengthen the assessment of robustness.

Conclusion

The overall PhD work exhibits a high academic level in a research field that intersects both the quantum computing and the machine learning. The contributions are clearly presented, and the experimental work is systematic, technically sound, and supported by results with both theoretical and practical relevance.

The achieved contributions represent a relevant step toward scalable and automated quantum machine learning, a clear advance on the state of the art of this research field.

In view of the quality of research, methodology, results, and scientific dissemination, the dissertation meets the requirements for the award of the PhD degree. I therefore recommend that the candidate be admitted to the public defense of the dissertation.

Professor Doctor Paulo Trigo Silva
Scientific Advisor for the Dissertation

20.April.2026

Rua Conselheiro Emídio Navarro 1
1959-007 Lisboa- Portugal
Tel: (+351) 218 317 000
www.isel.pt

Лиссабон жоғары инженерлік институты (ISEL)

Ақсултан Муханбеттің 8D06102 — «Компьютерлік инженерия» мамандығы бойынша «Бейнелерді тануға арналған гибридті кванттық-классикалық алгоритмдерді зерттеу және әзірлеу» тақырыбындағы философия докторы (PhD) ғылыми дәрежесін алу үшін ұсынылған диссертациясына ғылыми кеңесшінің ПІКІРІ

Мен, Паулу Триго Сильва, Лиссабон жоғары инженерлік институтының (ISEL) адъюнкт профессоры (Лиссабон, Португалия), докторант Ақсултан Муханбеттің ғылым докторы дәрежесін алу үшін қажетті барлық талаптарды табысты орындағанын растай отырып, осы пікірді ұсынамын.

Шолу және зерттеу мақсаттары

Ақсултан Муханбеттің докторлық диссертациясы кескіндерді тану міндеттеріне арналған гибридті кванттық-классикалық нейрондық желілерді зерттеу мен әзірлеуге арналған. Бұл зерттеу терең оқытудың классикалық тәсілдеріндегі есептеу күрделілігі мен ауқымдылығына қатысты қолданыстағы шектеулер, сондай-ақ NISQ дәуіріндегі кванттық машиналық оқытуға аппараттық құралдар тарапынан қойылатын шектеулер (кубиттер санының аздығы, шулар және схемалар тереңдігінің шектеулілігі) тұрғысынан өзекті болып табылады.

Зерттеу гибридті кванттық-классикалық модельдер оқытылатын параметрлер санын азайта отырып, классификацияның жоғары дәлдігін қамтамасыз ете алады деген болжамға негізделген.

Осы болжамға сүйене отырып, зерттеу аясында ғылыми және техникалық жаңалықтардың біртұтас кешені алынды, соның ішінде:

- кванттық деректерді кодтау әдістерінің сипаттамасы,
- параметрленген кванттық схема негізіндегі кванттық нейрондық желі (бұдан әрі мәтін бойынша – QNN),
- гибридті кванттық-классикалық нейрондық желі архитектурасын жобалау (бұдан әрі мәтін бойынша – HQCNN),
- деректерді қайта жүктеу және генетикалық алгоритмдер негізінде оңтайландыру (HQCNN-REGA) арқылы HQCNN-ді жетілдіру.

Диссертация құрылымы нақты әрі қисынды құрылған, ол кіріспеден, негізгі техникалық тараулардан және қорытындыдан тұрады. Оның нәтижелері MNIST, FashionMNIST, CIFAR-100 және MNISQ сияқты эталондық деректер жиынтығында жүргізілген ауқымды эксперименталды бағалаумен негізделген. Зерттеу нәтижелері рецензияланатын журналдарда жарияланып, халықаралық конференцияларда ұсынылған, бұл ұсынылған әзірлемелердің ғылыми маңыздылығын да, практикалық әлеуетін де растайды.

Жалпы алғанда, бұл жұмыс кванттық машиналық оқытуды енгізудің, атап айтқанда гибридті архитектураларды әзірлеудің өзекті міндеттеріне сәйкес келетін, нақты тұжырымдалған гипотезаға негізделген айқын мәселелік-бағдарланған тәсіл мен зерттеу әдіснамасын көрсетеді.

Руа Конселейру Эмидио Наварро 1
1959-007 Лиссабон - Португалия
Тел: (+351) 218 317 000
www.isel.pt

Негізгі жетістіктер

Осы диссертациялық жұмыс аясында бірқатар маңызды ғылыми-техникалық үлестер қосылды. Негізгі нәтижелердің бірі - кванттық схемалар архитектурасын оңтайландыруды автоматтандыру үшін деректерді қайта жүктеу әдістерін генетикалық алгоритммен біріктіретін HQCNN-REGA моделін әзірлеу болып табылады. Бұл тәсіл қабаттарды, кванттық қақпалармен орындалатын операцияларды және шатасу құрылымдарын таңдауды қоса алғанда, схемаларды жобалаудың комбинаторлық сипатын ескереді.

Жұмыста сонымен қатар параметрленген кванттық схемаларды терең оқыту конвейерлеріне интеграциялау мүмкіндігін көрсететін, кванттық конволюциялық және толық байланысқан қабаттарды қамтитын гибридті кванттық-классикалық нейрондық архитектура (HQCNN) ұсынылған.

Эксперименттік тұрғыдан алғанда, авторлардың үлесі сандық деректермен негізделген және қолданыстағы кванттық тәсілдермен салыстырғанда жақсартылған сипаттамалары бар (эталондық деректер жиынтығындағы) жоғары классификация дәлдігімен көрінеді. Эксперименттік деректер сонымен қатар классикалық конволюциялық нейрондық желілермен салыстырғанда параметрлер санының айтарлықтай қысқарғанын көрсетеді.

Жұмыстың үлесі өнімділіктің тұрақты жақсарғаны байқалған эталондық деректер жиынтығындағы эксперименталды тексерумен дәлелденеді. Эксперименттік деректер, сондай-ақ нәтижелердің рецензияланатын басылымдар мен халықаралық конференциялар арқылы таратылуы осы жұмыстың ғылыми маңыздылығы мен техникалық негізділігін растайды.

Ескертулер мен ұсыныстар

Диссертация айқын құрылымға ие және түсінікті тілмен жазылған, бұл автордың машиналық оқыту мен кванттық есептеулер принциптерін терең түсінетінін айғақтайды. Ұсынылған ғылыми үлестер техникалық тұрғыдан негізделген, ал эксперименталды нәтижелер жүйелі болып табылады және эталондық деректер жиынтығындағы эксперименталды тексерумен расталған, сонымен қатар халықаралық конференцияларда және рецензияланатын басылымдарда ұсынылған.

Гибридті архитектуралар мен оңтайландыру стратегиялары саласындағы ғылыми үлестер, әсіресе параметрлердің тиімділігі мен классификация дәлдігі тұрғысынан үлкен үміт күттіретін өнімділікті көрсетіп отыр. Сонымен қатар, нақты NISQ аппараттық жасақтамасында әрі қарай тексеру жүргізу - ұсынылған әдістерді шынайы шу жағдайлары мен пайдалану шектеулерінде бағалауға мүмкіндік беретін маңызды келесі қадам болар еді.

Әдіснамалық тұрғыдан алғанда, болашақ зерттеулерде кванттық схемаларды автоматтандырылған жобалау және оңтайландыру мәселелерін егжей-тегжейлі зерделеуге болады. Бұл контекстте грамматикаға негізделген эволюция сияқты жетілдірілген эволюциялық стратегияларды пайдалану кванттық схемалар архитектурасын генерациялау кезінде қосымша икемділік пен масштабталуды қамтамасыз етуі мүмкін.

Руа Конселейру Эмидио Наварро 1
1959-007 Лиссабон - Португалия
Тел: (+351) 218 317 000
www.isel.pt

Өзектілігін, жаңалығын және практикалық құндылығын бағалау

Аталған диссертацияда қазіргі заманғы информатиканың қызықты әрі күрделі саласы - кванттық есептеулер мен машиналық оқытудың түйіскен жеріндегі аса өзекті мәселе қарастырылады. Кванттық конволюциялық және толық байланысқан қабаттарды біріктіретін гибридті кванттық-классикалық архитектураларға басымдық беру - NISQ дәуірінің шектеулерін еңсеруге бағытталған қазіргі талпыныстармен, атап айтқанда, кубиттер ресурсы шектеулі жағдайда есептеу тиімділігі мен модель дәлдігі арасындағы компромиссті табу қажеттілігімен толық үйлеседі.

Жұмыстың жаңалығы - параметрленген кванттық схемаларды, деректерді қайта жүктеуді және эволюциялық оңтайландыруды біртұтас құрылым аясында интеграциялауында. Атап айтқанда, кванттық схемалар архитектурасын автоматты түрде жобалау үшін генетикалық алгоритмді қолдану - схемалар конфигурациясының комбинаторлық күрделілігі мәселесін шешудегі жаңа тәсіл болып табылады. Жекелеген компоненттері бұрыннан белгілі болғанымен, оларды бірлесе қолдану және ресурстары шектеулі жағдайда кескіндерді тану тапсырмаларына бейімдеу инновациялық деңгейін айқын көрсетеді.

Эксперименттік деректер бәсекеге қабілетті болжау қабілетін сақтай отырып, параметрлерінің күрделілігі төмендетілген тиімді модель конфигурацияларын жасау мүмкіндігін айғақтайды. Әртүрлі тестілік деректер жиынтығында алынған мәліметтер бағалаудың көптеген көрсеткіштері бойынша нәтижелердің тұрақтылығын көрсетеді. NISQ дәуірінің құрылғыларымен үйлесімділігі бұл модельдердің жақын болашақтағы кванттық есептеулер жағдайында қолданылу мүмкіндігін нығайтады. Нақты кванттық жабдықтарда қосымша тексеру жүргізу нәтижелердің орнықтылығын бағалауды одан әрі бекіте түспек.

Қорытынды

Жалпы алғанда, бұл докторлық диссертация кванттық есептеулер мен машиналық оқытудың түйіскен жеріндегі зерттеулер саласында жоғары академиялық деңгейді көрсетеді. Автордың ғылыми тұжырымдары нақты баяндалған, ал эксперименталды жұмыс жүйелілігімен, техникалық негізділігімен ерекшеленеді және теориялық әрі практикалық маңызы бар нәтижелермен дәлелденген.

Зерттеу барысында алынған нәтижелер ауқымды әрі автоматтандырылған кванттық машиналық оқыту бағытын дамытудағы маңызды қадам болып табылады және бұл аталған ғылым саласындағы елеулі серпілісті айғақтайды.

Зерттеудің жоғары сапасын, қолданылған әдіснаманың дәйектілігін және ғылыми жарияланымдардың мазмұндылығын негізге ала отырып, диссертация философия докторы (PhD) дәрежесін иелену үшін қажетті талаптардың барлығына сай деп есептеймін. Осыған байланысты, кандидатты диссертацияны жария қорғауға жіберуді ұсынамын.

/Қолы қойылған/
Профессор доктор Пауло Триго Силва
Диссертациялық жұмыстың ғылыми кеңесшісі
2026 жылғы 20 сәуір

Руа Конселейру Эмидио Наварро 1
1959-007 Лиссабон - Португалия
Тел: (+351) 218 317 000
www.isel.pt