Муханбет Ақсултан Айтуарұлының 8D06102 – Компьютерлік инженерия білім беру бағдарламасы бойынша философия докторы (PhD) дәрежесін алу үшін ұсынылған «Бейнелерді тануға арналған гибридті кванттық-классикалық алгоритмдерді зерттеу және әзірлеу» тақырыбындағы диссертациялық жұмысына

АҢДАТПА

Зерттеу тақырыбының өзектілігі.

Кванттық есептеулер мен машиналық оқытудың қиылысуы қазіргі заманғы ғылым мен технологияның ең қарқынды дамып жатқан және стратегиялық маңызы жоғары бағыттарының бірі болып табылады. Соңғы онжылдықта классикалық терең оқыту әдістері, әсіресе терең нейрондық желілер (Convolutional Neural Networks, CNN), компьютерлік көру, үлгілерді тану және үлкен деректерді талдау салаларында айтарлықтай жетістіктерге жетті. Алайда, бұл жетістіктермен қатар, классикалық тәсілдердің іргелі шектеулері де айқындала бастады. Атап айтқанда, деректер көлемінің үздіксіз өсуі және жоғары есептеу қуатына деген сұраныстың артуы классикалық архитектуралардың тиімділігін төмендетіп, оларды масштабтауда елеулі қиындықтар туындатады.

CNN, ResNet, VGG сияқты заманауи терең архитектуралар жүздеген миллион, тіпті миллиардтаған оқытылатын параметрлерден тұруы мүмкін. Мұндай күрделі модельдерді оқыту мен қолдану айтарлықтай есептеу ресурстарын, энергияны және уақытты талап етеді. Параметрлер санының экспоненциалды өсуі есептеу шығындарының да сәйкесінше артуына алып келеді, бұл өз кезегінде ресурстарды тиімді пайдалану мәселесін өзекті етеді. Сонымен қатар, мұндай модельдер көбінесе үлкен көлемдегі белгіленген деректерге тәуелді болады, ал бұл барлық қолданбалы есептерде қолжетімді емес. Бұған қоса, таза кванттық нейрондық желілердің (Quantum Neural Networks, QNN) қазіргі даму деңгейінде де белгілі бір шектеулер сақталуда. Атап айтқанда, түрлі-түсті және күрделі бейнелерді жіктеу міндеттерінде олардың дәлдігі әлі де шектеулі болып отыр: NISQ (Noisy Intermediate-Scale Quantum) дәуіріндегі құрылғыларда қол жеткізілген дәлдік шамамен 82,78% деңгейінде қалып отыр. Бұл көрсеткіш кванттық модельдердің әлеуеті жоғары болғанымен, олардың практикалық қолданылуы үшін әлі де жетілдіруді қажет ететінін көрсетеді.

Кванттық машиналық оқыту (Quantum Machine Learning, QML) осы шектеулерді еңсерудің перспективалы жолдарының бірі ретінде қарастырылады. Кванттық механиканың негізгі принциптері - суперпозиция, кванттық шырмалу (entanglement) және интерференция - ақпаратты өңдеудің түбегейлі жаңа тәсілдерін ұсынады. Осы қасиеттерді тиімді пайдалану арқылы кванттық нейрондық желілер классикалық модельдермен салыстырғанда әлдеқайда аз параметрлер санымен жоғары өнімділікке қол жеткізе алады деген ғылыми гипотеза қалыптасқан.

Соған қарамастан, кванттық нейрондық желілерді нақты есептерде қолдану бірқатар техникалық және технологиялық қиындықтармен шектеледі. NISQ дәуіріндегі кванттық құрылғылар кубиттер санының шектеулілігімен, жоғары шу деңгейімен және декогеренция әсерімен сипатталады. Бұл факторлар кванттық есептеулердің тұрақтылығы мен дәлдігіне кері әсерін тигізеді. Сонымен қатар, кванттық схемалардың тереңдігі мен вентильдер санына қойылатын шектеулер күрделі модельдерді тікелей іске асыруға мүмкіндік бермейді. Осыған байланысты, кванттық алгоритмдерді тиімді әрі ықшам түрде жобалау мәселесі ерекше маңызға ие.

Аталған мәселелерді шешудің бір тиімді тәсілі ретінде гибридті кванттық-классикалық архитектуралар ұсынылады. Мұндай тәсілдерде классикалық нейрондық желілер мен кванттық есептеу элементтері біріктіріліп, әрқайсысының артықшылықтары тиімді пайдаланылады. Гибридті QNN модельдері жоғары жіктеу дәлдігін қамтамасыз ете отырып, оқытылатын параметрлер санын айтарлықтай азайтуға мүмкіндік береді. Сонымен қатар, олар қазіргі қолжетімді кванттық құрылғылар мен классикалық есептеу ресурстарын біріктіре отырып, практикалық қолдануға бейімделген шешімдер ұсынады.

Кванттық схема архитектурасын оңтайландыру мәселесінде генетикалық алгоритмдер ерекше қызығушылық тудырады. Бұл алгоритмдер жоғары өлшемді және күрделі іздеу кеңістіктерінде тиімді шешімдерді табуға қабілетті эволюциялық әдістерге жатады. Кванттық схемаларды автоматты түрде құрастыру және оңтайландыру үшін генетикалық алгоритмдерді қолдану - NISQ-үйлесімді, тиімді және ықшам архитектураларды әзірлеудің перспективалы бағыты болып табылады.

Осыған байланысты, кванттық конволюциялық нейрондық желілерде (Quantum Convolutional Neural Networks, QCNN) кванттық схема архитектурасын оңтайландыру мәселесін зерттеу ерекше өзектілікке ие. Ұсынылып отырған диссертациялық жұмыста гибридті кванттық-классикалық нейрондық желінің (HQCNN) жаңа архитектурасы әзірленіп, оның генетикалық алгоритм негізіндегі жетілдірілген нұсқасы - HQCNN-REGA моделі ұсынылады. Аталған модельдердің тиімділігі MNIST, FashionMNIST және CIFAR-100 сияқты кеңінен қолданылатын деректер жинақтарында жан-жақты эксперименттік зерттеулер жүргізу арқылы бағаланды. Зерттеу нәтижелері ұсынылған тәсілдердің жоғары дәлдікке, есептеу тиімділігіне және практикалық қолдану мүмкіндіктеріне ие екенін көрсетеді.

Диссертациялық жұмыстың мақсаты

Бейнені тану есептеріндегі кванттық алгоритмдердің дәлдігін арттыру және оқытылатын параметрлер санын азайту мақсатында кванттық тізбектерге негізделген гибридті кванттық-классикалық нейрондық желілерді әзірлеу және оңтайландыру.

Зерттеу міндеттері:

– кванттық машиналық оқыту (QML) және кванттық конволюциялық нейрондық желілер (QCNN) саласындағы қазіргі ғылыми зерттеулерге жүйелі әрі сыни

шолу жасау, олардың артықшылықтары мен шектеулерін талдау;
– классикалық деректерді кванттық күйлерге кодтаудың негізгі тәсілдерін (бұрыштық кодтау, амплитудалық кодтау, basis encoding және т.б.) зерделеу, олардың есептеу күрделілігі мен тиімділігін салыстырмалы түрде бағалау және жүйелендіру;
– классикалық және кванттық қабаттарды тиімді біріктіретін, QConv2D қабаттарын қамтитын гибридті кванттық-классикалық нейрондық желі архитектурасын (HQCNN) әзірлеу;
– кванттық схеманың негізгі параметрлерін, соның ішінде қабаттар санын, кванттық вентильдер жиынын және кубиттер арасындағы шырмалу құрылымын бір мезгілде оңтайландыратын генетикалық алгоритмді құру және жүзеге асыру;
– ұсынылған гибридті модельдің және оның генетикалық алгоритм арқылы оңтайландырылған нұсқасының (HQCNN-REGA) жұмыс істеу тиімділігін кешенді түрде бағалау әдістемесін әзірлеу;
– MNIST, FashionMNIST және CIFAR-100 деректер жинақтарында ауқымды эксперименттік зерттеулер жүргізу, алынған нәтижелерді классикалық және таза кванттық модельдермен салыстыра отырып, дәлдік, тұрақтылық және есептеу тиімділігі тұрғысынан жан-жақты талдау жүргізу.

Зерттеу әдістері:

Әдебиеттерге жүйелі шолу, кванттық есептеулер, параметрленген кванттық схемаларды (PQC) жобалау және оқыту, кванттық нейрондық желілер, гибридті кванттық-классикалық нейрондық желілер, генетикалық алгоритмдер, деректерді қайта жүктеу.

Зерттеу объектісі

Кескіндерді тану тапсырмаларына арналған гибридті кванттық-классикалық нейрондық желілер

Зерттеу пәні

Кванттық нейрондық желілердегі кванттық тізбектерді оңтайландыру әдістері.

Алынған нәтижелердің ғылыми жаңалығы:

1. Кванттық конволюциялық (QConv2D) және толық байланысқан (QDense) қабаттарды бірлесе қолдануға негізделген жаңа архитектура арқылы бейнелерді тану есептеріне арналған гибридті кванттық-классикалық алгоритм әзірленді. Бұл біріктірілген архитектурада параметрленген кванттық тізбектер сүзгілер мен өлшеу операторлары ретінде тиімді пайдаланылады.
2. Шектеулі кубиттер саны жағдайында кванттық тізбек архитектурасын оңтайландыруға арналған жаңа эволюциялық тәсіл ұсынылды. Кванттық кодтау мен генетикалық алгоритмдерді біріктіру нәтижесінде нейрондық желідегі оқытылатын параметрлер саны айтарлықтай қысқартылып, модельдің есептеу тиімділігі арттырылды.

Қорғауға шығарылатын тұжырымдар:

1. Ұсынылған кванттық конволюциялық (QConv2D) және кванттық толық байланысқан (QDense) қабаттарға негізделген гибридті кванттық-классикалық алгоритм CIFAR-100 деректер жинағында (dataset) 97,4% жіктеу дәлдігін

қамтамасыз етеді, бұл қолданыстағы баламалы кванттық әдістердің көрсеткішінен 9-10%-ға жоғары.

2. Кванттық тізбек архитектурасын шектеулі ресурстар жағдайында автоматты түрде анықтауға арналған эволюциялық алгоритм кванттық тізбектің минималды тереңдігін сақтай отырып, бұрыштық кодтау (angle encoding) кезінде оқытылатын параметрлер санын 18 690-ға дейін азайтады. Бұл дәстүрлі классикалық конволюциялық нейрондық желілермен (CNN) салыстырғанда параметрлер санын 47 есе қысқартып, есептеу тиімділігін айтарлықтай арттырады.

Зерттеудің теориялық және практикалық маңыздылығы

Теориялық маңыздылығы:

Зерттеу жұмысы параметрленген кванттық схемаларды (Parameterized Quantum Circuits, PQC) оңтайландырудың теориялық негіздерін одан әрі дамытуға елеулі үлес қосады. Атап айтқанда, кванттық нейрондық желілердің архитектуралық параметрлерін – қабаттар саны, вентильдер конфигурациясы және шырмалу құрылымын – біртұтас жүйе ретінде қарастырып, оларды бір мезгілде оңтайландыру мәселесі терең зерттеледі.

Практикалық маңыздылығы: Әзірленген гибридті кванттық-классикалық нейрондық желі архитектуралары (HQCNN және HQCNN-REGA) тәжірибелік тұрғыдан жоғары тиімділікті көрсетеді және оларды нақты қолданбалы есептерде пайдалануға мүмкіндік береді. Ұсынылған модельдер классикалық терең оқыту архитектураларымен салыстырғанда оқытылатын параметрлер санының айтарлықтай қысқаруын қамтамасыз етеді, бұл өз кезегінде модельді оқыту уақытын азайтып, есептеу шығындарын төмендетеді және энергия тұтынуды қысқартуға ықпал етеді.

Диссертациялық жұмыстың көлемі мен құрылымы

Диссертация кіріспеден, төрт негізгі тараудан, қорытындыдан және әдебиеттер тізімінен тұрады. Жұмыстың жалпы көлемі шамамен 80 бет, оның ішінде кестелер, суреттер және формулалар бар. Әдебиеттер тізімі 50-ден астам атауды қамтиды.

Бірінші тарауда кванттық машиналық оқыту, кванттық есептеулердің математикалық негіздері мен кванттық конволюциялық нейрондық желілерге қатысты әдебиеттерге шолу жасалады.

Екінші тарауда кескіндерді тануға арналған параметрленген кванттық схемалардың негіздері: деректерді кодтау әдістері, PQC құрылымы, вариациялық алгоритмдер.

Үшінші тарауда гибридті HQCNN архитектурасы, Data Re-uploading әдісі және QConv2D және QDence қабаттарының жобалануы сипатталады.

Төртінші тарауда кванттық схемаларды оңтайландыруға арналған генетикалық алгоритмнің әзірленуі, MNIST, FashionMNIST және CIFAR-100 деректер жинақтарындағы эксперименттік зерттеулер нәтижелері мен салыстырмалы талдау баяндалады.

Жұмыстың апробациясы

Жұмыстың нәтижелері әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университетінің

ақпараттық технологиялар және жасанды интеллект факультетінің ғылыми семинарларында талқыланып, сонымен қатар халықаралық конференцияларда баяндалған:

– International Conference of Computational and Information Technologies in Science, Engineering and Education (CITech-2025), (Алматы, Қазақстан, 2025);

– «IEEE Smart Information Systems and Technologie» атты Халықаралық ғылыми конференция (Астана, Қазақстан, 2024);

Жарияланымдар.

Диссертация тақырыбы бойынша 7 баспа жұмысы жарияланды, оның ішінде 4 жұмыс ҒЖБССҚК ҚР ұсынған басылымдарда, 3 жұмыс халықаралық дәйексөздер базасына кіретін рецензияланатын журналдарда («Web of Science» және/немесе «Scopus»), 1 жұмыс халықаралық конференциялар жинақтарында жарияланды.

- Mukhanbet, A., & Daribayev, B. (2025). A Hybrid Quantum–Classical Architecture with Data Re-Uploading and Genetic Algorithm Optimization for Enhanced Image Classification. Computation, 13(8), 185. (79th) https://doi.org/10.3390/computation13080185
- Daribayev, B., Mukhanbet, A., Makhmut, E., Azatbekuly, N., & Imankulov, T. (2025). Quantum–Classical Hybrid Architecture for Solving the Muskat–Leverett Model. IET Quantum Communication, 6(1). (79th) https://doi.org/10.1049/qtc2.70022
- Azatbekuly, N., Mukhanbet, A., & Bekele, S. D. (2024). Development of an Intelligent Video Surveillance System Based on YOLO Algorithm. In 2024 IEEE 4th International Conference on Smart Information Systems and Technologies (SIST) (pp. 498–503). 2024 IEEE 4th International Conference on Smart Information Systems and Technologies (SIST). IEEE. https://doi.org/10.1109/sist61555.2024.10629617
- Mukhanbet, A., Azatbekuly, N., & Daribayev, B. (2025). DEVELOPMENT OF HYBRID QUANTUM-CLASSICAL MODELS FOR COMPUTER VISION. Journal of Problems in Computer Science and Information Technologies, 3(1), 45–55. https://doi.org/10.26577/jpcsit20253105
- Mukhanbet, A., Azatbekuly , N., & Daribayev, B. (2024). OPTIMIZING QUANTUM ALGORITHMS FOR SOLVING THE POISSON EQUATION. Scientific Journal of Astana IT University, 18, 55–65. https://doi.org/10.37943/18REAT9767
- Mukhanbet, A. A., Nakibayeva, M. T., & Daribayev, B. S. (2023). Development of a quantum calculator on the IBM Quantum experience platform and its application for converting the decimal number system to binary. Bulletin of the National Engineering Academy of the Republic of Kazakhstan, 87(1), 65–76. https://doi.org/10.47533/2020.1606-146x.217.
- Mukhanbet, A., Nakibayeva, M., & Daribayev, B. (2023). IMPLEMENTATION OF QUANTUM ARITHMETIC OPERATIONS WITH INTEGER CHARACTERS USING THE QUANTUM FOURIER TRANSFORM. Journal of Problems in Computer Science and Information Technologies, 1(1). https://doi.org/10.26577/jpcsit.2023.v1.i1.09