

향상된 하이브리드 양자-고전적 컨벌루션 신경망

박성욱¹, 김준영¹, 박준¹, 정세훈², 심춘보¹

¹순천대학교 IT-Bio융합시스템전공

²순천대학교 컴퓨터공학과

411050@scnu.ac.kr, shjung@scnu.ac.kr, cbsim@scnu.ac.kr

Enhanced Hybrid Quantum-Classical Convolutional Neural Networks

Sung-Wook Park¹, Jun-Yeong Kim¹, Jun Park¹, Se-Hoon Jung², Chun-Bo Sim¹

¹Interdisciplinary Program in IT-Bio Convergence System, Suncheon National University

²Dept. of Computer Engineering, Suncheon National University

요 약

양자 컴퓨팅 환경에서 빅데이터를 이용하는 Quantum Artificial Intelligence(QAI)는 빠른 계산 속도를 추구한다. 최근 금융, 물류, 교통 분야의 QAI 모델과 이미지 분류용 quantum convolutional neural network가 소개됐지만 아직 완벽한 성능은 달성하지 못했다. 본 논문은 성능 향상을 위한 모듈을 새로 제시하고, 이를 소형 양자 컴퓨터에 적용하며 하이브리드 모델 구성을 가능하게 한다. 실험 결과, 제안하는 방법은 기존 네트워크와 비교해 우수한 성능을 보였다.

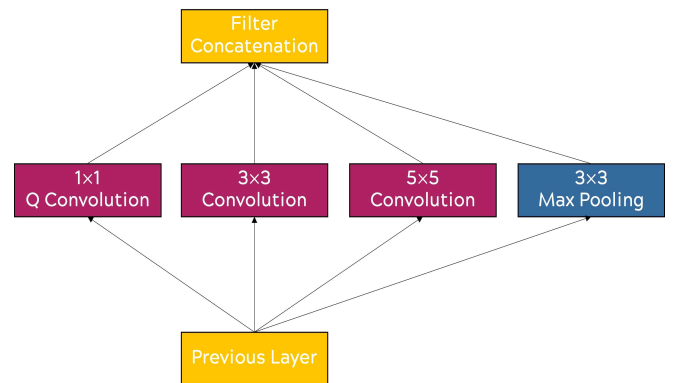
1. 서론

양자 컴퓨터는 기존 컴퓨터를 이용해 해결하기 어려운 문제에 대한 새로운 대안으로 주목받고 있다. 양자 컴퓨터는 중첩(superposition)과 얽힘(entanglement)과 같은 특별한 성질을 활용하며, qubit의 병렬성으로 높은 성능을 제공한다. 이러한 특성 덕분에 다양한 알고리즘 문제와 머신 러닝 분야에서 양자 컴퓨팅 모델을 적용한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 특히 Variational Quantum Eigensolver(VQE)와 Quantum Approximate Optimization Algorithm(QAOA)는 복잡한 문제를 해결하는 새로운 방법으로 주목받고 있다[1]. Quantum Convolutional Neural Network(QCNN)는 양자 컴퓨팅을 활용하여 이러한 문제를 해결하려는 연구 중 하나로, 본 논문은 기존 QCNN의 성능 향상을 목표로 한다[2].

2. 제안하는 방법

Deep Neural Network(DNN)는 네트워크의 깊이나 너비를 증가시켜 성능을 향상할 수 있다. 대표적인 예로 GoogLeNet의 inception 모듈이 있다[3]. 제안하는 방법은 inception 모듈의 일부 컨벌루션 계층을 양자 컨벌루션 계층으로 대체하여 네트워크를 설계하며, 이는 각 뉴런과 필터 뱅크의 특징을 기반으로 한다. 주된 목표는 최적의 지역 최소 구조를 찾고, 계산 효율성을 극대화하는 것이다. 이를 위해 Hebbian의 원리를 활용하고, multi-scale 처리를 했다. 이와 같은 접근법으로 네트워크의 깊이와 너비를 확장하면서도 계산 비용을 일정하게 유지할 수 있었다. 제안하는 모델에서는 **그림 1**과 같이 양자 inception 모듈을 활

용하여 네트워크를 효율적으로 구성하여, 각 계층에서 뉴런의 수를 크게 확장할 수 있는 주요 이점을 갖는다.



(그림 1) Quantum inception module, naive version

3. 실험 및 성능평가

3.1 실험 환경

운영체제는 Ubuntu 20.04.3 LTS, CUDA는 11.2.67, cuDNN은 8.1.0, Tensorflow는 2.8.0, Python은 3.8.10 버전을 사용했다. CUDA는 엔비디아의 GPU를 활용한 GPGPU 컴퓨팅 기술이며, Tensorflow는 Artificial Intelligence(AI) 알고리즘 개발 프레임워크다. 그 외 Tensorflow와 양자 컴퓨팅을 결합한 Tensorflow Quantum 프레임워크, 양자 컴퓨팅 프로그래밍 및 시뮬레이션 라이브러리 Cirq를 사용했다. 사용된 소프트웨어 버전은 **표 1**과 같다.

(표 1) Software versions

Software	Version
Operating System	Ubuntu Linux 20.04.3 LTS
Programming Language	Python 3.8.10
GPGPU	CUDA 11.2.67
DNN Library	cuDNN 8.1.0
AI Framework	Tensorflow 2.8.0
Quantum AI Framework	Tensorflow Quantum 0.6.1
Quantum Computing Library	Cirq 0.14.1

3.2 데이터 세트 구성

fashion MNIST 데이터 세트는 패션 아이템의 그레이스케일 이미지 모음으로, Zalando에서 제작했다. 이는 손글씨 이미지의 MNIST 대안으로 구축됐다. 60,000장의 훈련 이미지와 10,000장의 테스트 이미지로 구성되며, 이미지 크기는 28×28 pixel이다. 각 이미지는 10개의 패션 아이템 클래스 중 하나로 분류된다. 구체적인 정보는 표 2와 같다.

(표 2) Summary of fashion MNIST dataset information

Dataset Information	
Number of Images	70,000
Image Size	28 × 28 pixels
Image Channels	Grayscale(1 channel)
Number of Classes	10
Class Labels	T-shirt/top, Trouser, Pullover, Dress, Coat, Sandal, Shirt, Sneaker, Bag, Ankle boot
Training Images	60,000
Testing Images	10,000

3.3 실험 결과

테스트 데이터 세트를 이용하여 error rate, loss, duration을 측정했으며, 컴퓨터 비전 분야에서 분류 비율을 평가하기 위해 주로 사용하는 f1-score도 성능평가 지표로 활용했다.

표 3에서는 fashion MNIST 데이터 세트로 훈련된 여러 모델의 성능을 평가한다. 주로 error rate와 loss, f1-score에 중점을 둔 평가 결과, 제안하는 모델이 12.07%로 error rate가 가장 낮았고, loss도 0.3478로 가장 낮았다. 다른 모델들은 이와 비교했을 때 다소 낮은 성능을 보였다. f1-score 역시 제안하는 모델이 88%로 가장 높았다. 결론적으로, duration을 제외하면 제안하는 모델의 성능이 가장

우수했다.

(표 3) Compare the performance of various models on the fashion MNIST dataset in terms of error rate, loss, and duration

Model	Error Rate	Loss	F1-score	Duration
FC	15.51%	0.4426	84%	0:00:12
CNN	13.22%	0.3733	87%	0:00:34
QCNN	16.61%	0.4681	83%	0:22:36
Ours	12.07%	0.3478	88%	0:05:33

제안하는 모델은 QCNN보다 우수한 성능을 보이며, 양자 inception 모듈의 활용이 훈련 성능 향상에 기여했다. 제안하는 모델은 전통적인 Fully Connected(FC)와 Convolutional Neural Network(CNN)보다 나은 성능을 보였다. 따라서, 기존 모델의 구조나 목적 함수를 개선함으로써 고전적인 CNN보다 우수한 성능을 달성할 수 있다.

4. 결론

제안하는 방법은 CNN과 양자 컴퓨팅을 결합하여 더 효과적인 분류 모델을 만들 수 있다. Noisy Intermediate Scale Quantum(NISQ)를 활용한 복잡한 대규모 훈련에서도 높은 성능을 보여줄 수 있으며, 본 실험에서는 기존 QCNN보다 더 우수한 성능을 보였다. 제안하는 모델은 다양한 데이터 세트에 적용 가능하며, 하이브리드 양자-고전 방식의 정확성을 입증했다. 나아가, 컴퓨터 비전 분야에서 제안하는 방법을 적용하면 더 효율적인 훈련이 가능할 것으로 기대된다.

Acknowledgment

This research was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea(NRF) funded by the Ministry of Education.(2021R111A3050843)

참고문헌

[1] Peruzzo, A., McClean, J., Shadbolt, P., Yung, M. H., Zhou, X. Q., Love, P. J., et al., "A variational eigenvalue solver on a photonic quantum processor," *Nature communications*, Vol. 5, No. 1, p. 4213, 2014.

[2] Cong, I., Choi, S., and Lukin, M. D., "Quantum convolutional neural networks," *Nature Physics*, Vol. 15, No. 12, pp. 1273-1278, 2019.

[3] Szegedy, C., Liu, W., Jia, Y., Sermanet, P., Reed, S., Anguelov, D., et al., "Going deeper with convolutions," *In Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, pp. 1-9, 2015.