

데이터 표현력 및 확장성 향상을 위한 적응형 양자 컨볼루션 알고리즘

노지민, 김태환*, 김중현

고려대학교, *세종대학교

emilyjroh@korea.ac.kr, *kimth3951@sju.ac.kr, joongheon@korea.ac.kr

Adaptive Quantum Convolutional Algorithm for Enhanced Data Representation and Scalability

Emily Jimin Roh, TaeHwan Kim*, Joongheon Kim

Korea Univ., *Sejong Univ.

요약

Quantum convolutional neural network (QCNN)은 고차원 데이터의 복잡성을 처리하는 데 있어 양자 컴퓨팅의 병렬성과 높은 표현력을 기반으로 기존 고전적 CNN을 대체하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이러한 배경 속 QCNN은 실시간성이 중요한 자율 주행 시스템, 감시 시스템 등 다양한 응용 어플리케이션에서 활용되고 있다. 이러한 배경 속 실제 통신 환경에 따라 QCNN의 Depth와 데이터 표현력의 Trade-off 관계에서 활용 가능한 적응형 양자 컨볼루션 알고리즘(Adaptive quantum convolution algorithm, AQCA)을 제안한다.

I. 서론

고차원 데이터의 복잡성을 효과적으로 처리하기 위한 양자 컴퓨팅 기반 연구가 최근 활발히 진행되고 있다. 특히, 양자 컨볼루션(quantum convolution)은 양자 컴퓨팅의 병렬성과 높은 표현력을 활용하여 기존 고전적 컨볼루션의 한계를 극복할 수 있는 기술로 주목받고 있다 [1-4]. 이러한 양자 컨볼루션은 자율 주행 시스템, 감시 시스템 등 실시간성이 중요한 다양한 응용 어플리케이션에서 활용 가능성을 제시하고 있다 [5-6]. 그러나 실제 통신 환경에서 양자 합성곱 모델의 성능을 최적화하기 위해서는 네트워크의 깊이(depth)와 데이터 표현력 간의 Trade-off를 고려한 동적 조정이 필수적이다. 이에 본 연구는 이러한 문제를 해결하기 위해 양자 컨볼루션의 Depth와 데이터 표현력을 환경에 따라 적응적으로 조정할 수 있는 적응형 양자 컨볼루션 알고리즘(adaptive quantum convolution algorithm, AQCA)을 제안한다.

II. Related Work

주어진 통신 환경과 입력 데이터에 따라 모델의 정확도와 효율성을 위해 너비의 조정이 요구될 수 있다. Slimmable neural network (SNN)는 switchable batch normalization을 통해 네트워크 너비를 동적으로 조정 한다. 각 네트워크 너비마다 독립적인 배치 정규화 파라미터를 학습하여, 새로운 네트워크를 학습시키지 않아도 단일 네트워크가 여러 너비에서 동시에 높은 성능을 유지할 수 있다[7]. 이러한 방법은 이미지 분류, 객체 탐지, 인스턴스 분할 등의 다양한 작업에서도 높은 성능을 입증하였다. 최근에는 이러한 SNN 개념을 확장한 universally slimmable networks (US-Nets)가 제안되었다. US-Nets는 SNN과 다르게 사전에 정해지지 않은 임의의 너비에서도 실행 가능하도록 설계되었고 이를 위해 sandwich rule과 inplace distillation과 같은 학습 기법을 도입하였다. 이러한 방식은 US-Nets이 이미지 분류, Super Resolution, 심층 강화 학습 등 다양한 작업에서 높은 성능을 보일 수 있도록 한다[8]. 본 논문은 이러한 연구에 영감을 받아 실제 어플리케이션 자원 환경에 따라 depth를 조정 가능한 AQCA 제안한다.

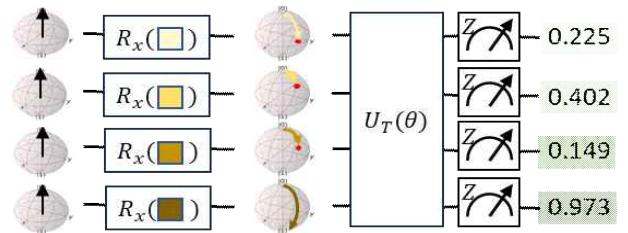


그림 1 양자 컨볼루션 전체 구조도

III. Quantum Convolution

양자 컴퓨팅에 사용되는 큐비트는 동시에 여러 상태를 가질 수 있는 중첩 상태와 서로 얹혀 정보를 공유하는 얹힘 특성을 가져, 데이터를 효율적으로 표현한다[9, 10]. 양자 컨볼루션은 큐비트 위에 CNN기반의 양자 회로를 사용하는 양자 신경망으로, 큐비트를 병렬처리하여 대규모 데이터 처리에서 높은 효율성을 보인다. 이러한 양자 컨볼루션의 전체 구조도는 그림 1과 같다. 입력값으로 이미지 데이터가 주어지며 합성곱 필터의 크기만큼의 큐비트를 활용하여 연산을 진행한다. 이때 첫 번째로 고전 데이터를 큐비트로 인코딩하는 과정이 필수적이다. 이때 이미지 픽셀값이 0에서 1 사이의 값으로 조정되며 양자 게이트를 통해 양자 상태로 변환된다. 이후 합성곱 연산을 위하여 학습 가능한 양자 회로(variational quantum circuits, VQC)를 수행한다[11]. 이때 VQC는 x, y, z 축으로의 각도를 나타내는 학습 파라미터를 갖는다. 이 과정에서 VQC는 큐비트 간 얹힘을 생성하여 복잡한 패턴을 효과적으로 학습할 수 있다. 이러한 방식으로 수행되는 양자 컨볼루션은 현재 noisy intermediate-scale quantum (NISQ) 환경의 하드웨어 제약으로 인하여 발생하는 불모지 고원 문제를 해결할 수 있는 유망한 알고리즘으로 주목받고 있다[12].

III. Adaptive Quantum Convolutional Algorithm

AQCA의 구조는 그림 2와 같이 구성된다. AQCA는 주어진 환경에 따라 웜텀 depth, γ 를 적응적으로 조정할 수 있으며, 이러한 매커니즘을 통

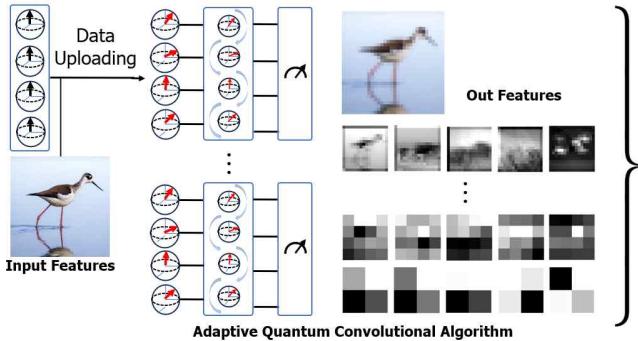


그림 2 Adaptive Quantum Convolutional Algorithm

하여 주어진 자원에 따라 데이터 표현력을 통한 합성곱 과정을 조정할 수 있다. 각 합성곱 연산은 양자 상태에서 의미 있는 패턴을 추출하도록 설계된 단위 변환을 적용하며 γ 에 따라 고전적 합성과 유사한 큐비트 하위 집합에 대한 국소적 변환을 적용하여 양자 정보를 보존하면서 효율적인 기능 추출을 가능하게 한다. 이러한 AQCA는 γ 에 따라 accuracy와 inference time 사이의 trade-off 관계가 형성된다. 따라서 자원이 풍부한 통신 환경이라면 최대 γ 를 늘려 accuracy를 확보할 수 있지만 처리해야 하는 디바이스의 큐 상태에 따라 병목 현상이 발생할 수 있다. 이러한 조건에서 Lyapunov 최적화를 활용한 AQCA의 모델 depth 조정을 통하여 실제 어플리케이션의 큐 상황에 따라 적응적 적용이 가능하다.

IV. 성능 평가

Model	Accuracy	Time
AQCA($\gamma=1$)	81.54	0.14
AQCA($\gamma=2$)	88.46	0.31
AQCA($\gamma=3$)	90.77	0.52

표 1 Depth γ 에 따른 AQCA Trade-Off 결과

성능 평가는 제안한 AQCA 알고리즘에서의 trade-off 결과를 평가하였다. 제안한 알고리즘은 depth γ 가 증가할수록 더욱 높은 정확도를 보이지만, 추론 시간의 경우 더욱 오래 걸린다. 이러한 성능 평가는 제안한 AQCA 알고리즘의 trade-off 결과를 중심으로 이루어졌다. 제안된 알고리즘은 네트워크의 depth가 증가할수록 더욱 높은 정확도를 보이는 장점이 있지만, 이와 동시에 추론 시간이 더 오래 걸리는 단점도 나타난다. 이와 같은 특성을 바탕으로, 어플리케이션의 통신 자원 및 큐 상태에 따라 정확도와 시간 간의 균형을 조절할 수 있는 적응적 메커니즘을 구현할 수 있음을 확인하였다.

V. 결론

본 논문에서는 AQCA 알고리즘을 기반으로 표현력과 확장성을 동시에 향상시키기 위한 새로운 접근법을 제안하였다. 이러한 알고리즘은 어플리케이션의 통신 자원 및 큐 상태를 고려하여 적응적으로 조정할 수 있는 토대를 제공한다. 이를 통해, QCNN 기반의 적응적 자원 활용 메커니즘을 더욱 강화할 수 있는 가능성을 제시하였다. 향후 연구에서는 Lyapunov 최적화 기법 등을 활용하여 QCNN 시스템 내 자원 관리와 효율성을 극대화할 수 있는 방안을 탐구하고자 한다. 추가적으로, 다양한 네트워크 환경에서의 성능 검증을 통해 알고리즘의 실질적 유용성을 평가하고자 한다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 대학ICT연구센터사업의 연구결과로 수행되었음 (IITP-2024-RS-2024-00436887). 본 논문의 교신저자는 김중현임.

참고 문헌

- [1] Li, Z., Liu, F., Yang, W., Peng, S., and Zhou, J., "A survey of convolutional neural networks: analysis, applications, and prospects," *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, vol.33, no.12, pp. 6999–7019, June 2021.
- [2] G. Brassard, I. Chuang, S. Lloyd, and C. Monroe, "Quantum Computing," *The National Academy of Sciences*, vol. 95, no. 19, pp. 11032–11033, September 1998.
- [3] I. Kerenidis, J. Landman, and A. Prakash, "Quantum Algorithms for Deep Convolutional Neural Networks," in Proc. *International Conference on Learning Representations (ICLR)*, Addis Ababa, Ethiopia, April 2020.
- [4] I. Cong, S. Choi, and M. D. Lukin, "Quantum Convolutional Neural Networks," *Nature Physics*, vol. 15, pp. 1273–1278, August. 2019.
- [5] E. J. Roh, H. Baek, D. Kim, and J. Kim, "Fast Quantum Convolutional Neural Networks for Low-Complexity Object Detection in Autonomous Driving Applications", *IEEE Transactions on Mobile Computing*, pp.1-12, 2024 (Early Access).
- [6] H. Baek, W. J. Yun, S. Park, and J. Kim, "Stereoscopic Scalable Quantum Convolutional Neural Networks," *Neural Networks*, vol. 165, pp. 860 - 867, Augus 2023.
- [7] J. Yu, L. Yang, N. Xu, and J. Yang, Thomas Huang, "Slimmable Neural Network", in Proc. *International Conference on Learning Representations (ICLR)*, New Orleans, Louisiana, United States, May 2019.
- [8] J. Yu, and T. Huang, "Universally Slimmable Networks and Improved Training Techniques", in Proc. *International Conference on Computer Vision (ICCV)*, Seoul, South Korea, October 2019.
- [9] Y. Kwak, W. Yun, S. Jung, and J. Kim, "Quantum Neural Networks: Concepts, Applications, and Challenges", in Proc. *International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN)*, Jeju Island, South Korea, August 2021.
- [10] I. Cong, S. Choi, and M. D. Lukin, "Quantum Convolutional Neural Networks", *Nature Physics*, vol. 15, pp. 1273 - 1278 August,2019.
- [11] S. Oh, J. Choi, and J. Kim, "A Tutorial on Quantum Convolutional Neural Networks (QCNN)", in Proc. *International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC)*, Jeju Island, South Korea, October 2020.
- [12] S. Oh, J. Choi, J. K. Kim and J. Kim, "Quantum Convolutional Neural Network for Resource-Efficient Image Classification: A Quantum Random Access Memory (QRAM) Approach", in Proc. *International Conference on Information Networking (ICOIN)*, Jeju Island, South Korea, January 2021.