

AI 기반 확산 모델로 양자 회로 생성

(2025.07.23., 양자정보연구지원센터)

□ 양자 컴퓨팅 발전 가속화

○ 연구 배경

- 펜실베니아 주립대 연구팀은 양자 회로 생성을 자동화하기 위해 확산 기반 모델 Q-Fusion 제안
- 이 모델을 100% 유효한 양자 회로를 자동 생성함으로써 기존 수작업 중심의 양자 프로그래밍을 대체할 가능성을 보여줌

○ 연구 목적 및 의의

- Quantum Architecture Search(QAS) 분야에서 기존 강화학습, LLM, 오토인코더 기반 기법의 한계를 극복하고자 함
- 복잡한 양자 논리를 자동으로 생성 가능한 프레임워크를 제시하여, 양자 소프트웨어 개발 효율 향상에 기여함

○ 연구방법

- (모델 구조 및 작동 원리) 양자 회로를 DAG(Directed Acyclic Graph)로 표현, 노드는 게이트, 엣지는 큐비트 연결을 나타냄
- 확산 모델을 깨끗한 회로에 잡음을 추가하고 이를 제거하는 방식으로 학습, 이후 무작위 잡음에서 유효한 회로를 생성함
- 기존 LLM이나 강화학습과 달리 휴리스틱 없이 회로 구조 자체를 데이터로부터 학습함
- (주요 특징) IBM Heron 아키텍처 호환 게이트셋 기반 회로 학습
- 비매개변수(non-parametric) 회로 및 매개변수(parametric) 양자 회로(PQC) 모두에서 100% 유효성 달성
- 회로 크기와 큐비트 수 증가에도 높은 확장성과 구조적 정합성 유지

○ 실험 결과

- (비매개변수 회로) 2큐비트 8게이트 회로에서 100% 유효성 및

40% 이상의 구조적 고유성 확보

- 5큐비트 32게이트 회로에서도 100% 유효성 유지, 다만 고유성과 의미성은 일부 저하됨
- 매개변수 회로(PQC) 100% 유효성, 양자 표현력(expressibility) 측면에서 우수한 성능
- 약 1/3 회로만 의미성 검증 통과, 이는 평가 지표의 한계 및 양자 회로 해석의 난이성을 반영함

○ 기술적/실용적 시사점

- (양자 소프트웨어 개발에 미치는 영향) 양자 회로 수동 설계의 병목을 해소하고, 실제 양자 하드웨어에 적합한 회로 구조를 자동으로 설계할 수 있음
- 제한된 큐비트 연결성 및 네이티브 게이트셋 등 하드웨어 제약을 반영하여 현실적인 회로 생성 가능
- NISQ 시대에 적합한 회로 자동화 기술로서 의미가 있음
- (기존 생성 모델 대비 강점) GAN 등 기존 생성 모델 대비 그래프 구조 학습에 안정적이며, 물리 기반 제약 반영이 유연함
- LLM 및 강화학습 기반 QAS 기법보다 적은 사전 지식과 휴리스틱 요구

○ 전망

- Q-Fusion은 그래프 기반 확산 모델을 활용한 새로운 QAS 프레임워크로서 높은 확장성과 유효성을 입증
- 향후 양자 머신러닝, 자동 코드 합성, 복잡한 문제 해결에 중요한 도구가 될 가능성이 높음
- 양자 컴퓨팅의 실용화를 가속화하며, AI 기반 양자 프로그래밍 패러다임을 선도할 기술로 기대됨

(원문)

1. <https://thequantuminsider.com/2025/07/01/ai-powered-diffusion-model-generates-quantum-circuits-opens-path-to-automated-quantum-programming/>