

인공지능과 양자 오류 수정

(2025.01.20., 양자정보연구지원센터)

- AI와 양자 오류 수정: 양자 컴퓨팅을 향상시키는 인공지능의 역할
 - AI와 양자 컴퓨팅의 상호작용
 - 대부분의 AI와 양자 관련 논의는 양자 컴퓨팅이 AI를 향상시키는 방향에 집중됨, 그러나 AI는 양자 컴퓨팅을 도울 수도 있다는 점에서 양방향의 논의가 필요함
 - 최근 연구에 따르면, 기계 학습(ML)과 같은 AI 도구는 양자 오류 수정(QEC)의 효율성과 확장성을 개선하는 데 사용될 수 있음, 이는 양자 컴퓨터를 보다 실용적으로 만드는 데 중요한 역할을 함
 - 양자 컴퓨팅의 잠재력과 도전 과제
 - 양자 컴퓨팅은 고전 컴퓨터로는 해결할 수 없는 문제를 해결할 잠재력을 가지고 있음, 그러나 양자 시스템은 오류에 취약하여 실용적인 구현에 큰 어려움이 따름
 - 오류는 주로 결잃음, 잡음, 게이트 불완전성 등에서 발생하며, 이러한 문제를 해결하지 않으면 양자 계산은 신뢰할 수 없게 됨
 - 기존의 양자 오류 수정 방법은 쇼어 코드나 surface 코드 등은 물리적 큐비트 수가 많고, 복잡한 디코딩 과정을 요구하는 등 한계가 있음, 예를 들어, surface 코드는 단일 논리 큐비트를 인코딩하기 위해 수천 개의 물리적 큐비트를 요구함
 - AI가 양자 오류 수정을 개선하는 방법
 - (디코딩 효율성 향상) 전통적인 디코딩 알고리즘은 계산적으로 집약적이며, 양자 시스템의 규모가 커짐에 따라 확장성이 떨어짐, AI 모델인 합성곱 신경망(CNN)은 surface 코드와 같은 격자 기반 코드에서 오류 패턴을 인식, 디코딩 시간을 크게 단축할 수 있음

- 이러한 AI 모델을 시뮬레이션된 데이터 세트를 통해 훈련되어 전통적인 방법보다 적은 계산 자원으로 더 빠르게 오류를 수정할 수 있음

○ 강인성 및 적응성 향상

- 양자 시스템은 환경 변화와 하드웨어 불안전성에 따라 오류율과 오류 유형이 변동함, 강화 학습(RL) 기법은 실시간 피드백을 통해 모델이 특정 시스템 조건에 맞는 오류 수정 전략을 조정할 수 있도록 도움
- 또한, 순환 신경망(RNN)은 마르코프적이지 않은 잡음과 같은 시간 의존적 오류 패턴을 처리하는 데 뛰어난 성능을 보임, 이러한 적응 능력은 실제 양자 시스템에서 QEC를 적용하는 데 중요함

○ 복잡한 오류 모델링 촉진

- 양자 오류, 특히 비폴리 오류와 비마르코프적 잡음의 모델링은 AI가 잘 처리하는 영역임, 생성 모델인 변분 오토인코더(VAE)와 RNN을 활용하여 오류 동역학을 더 정확하게 캡처할 수 있음
- 이러한 모델들은 오류 예측 정확도를 향상, 시스템의 퇴화를 예고하는 트렌드를 식별하여 적극적인 유지보수를 가능하게 함

○ AI를 활용한 양자 오류 수정 사례 및 응용

- (구글과 IBM의 AI 활용 사례) 구글 양자 AI는 신경망을 활용하여 surface 코드를 디코딩하고, 전통적인 알고리즘보다 빠르고 정확한 오류 수정을 구현함
- IBM의 연구에서는 ML 기술을 적용하여 초전도 양자 프로세서의 독특한 오류 패턴을 식별하고 완화는 작업을 수행함
- (AlphaQubit 모델) AlphaQubit 모델은 현실적인 잡음 조건 하에서 surface 코드를 디코딩하기 위해 설계된 순환 신경망임, 연구에 따르면 이러한 AI 기반 접근 방식은 전통적인 디코더보다 빠르고 정확한 오류 수정 성능을 보임

- AI를 통한 양자 오류 수정의 도전 과제 및 미래 방향
 - (데이터 부족 문제) 양자 오류 데이터셋은 제한적이기 때문에 ML 모델 훈련에 어려움이 있음, 데이터 증강 및 합성 데이터셋 생성과 같은 방법이 해결책으로 제안됨
 - (스케일링 문제) ML 모델을 차세대 양자 시스템에서 큐비트 수가 증가할 때 계산 자원 과부하 없이 확장될 수 있도록 최적화해야 함
 - (양자 하드웨어와 통합) AI 기반 QEC를 기존의 양자 컴퓨팅 플랫폼에 원활하게 통합하는 문제는 여전히 해결해야 할 과제로, 하드웨어-소프트웨어 공동 설계에 대한 연구가 필요함
 - (향후 협력의 중요성) 양자 물리학자, 컴퓨터 과학자 및 엔지니어 간 협력이 필수적임, 이러한 다학제적 협력이 AI가 양자 오류 수정에서 실질적인 성과를 거두는 데 중요한 역할을 할 것임

(원문)

1. <https://thequantuminsider.com/2025/01/06/ai-for-quantum-error-correction-a-comprehensive-guide-to-using-artificial-intelligence-to-improve-quantum-error-correction/>