

오류 보정된 큐디트로 양자 이득 기준 최초 돌파

(2025.05.21., 양자정보연구지원센터)

- 예일대 연구진, 오류 보정된 큐디트 ‘양자 이득 기준’ 최초 돌파
 - 연구 개요
 - 예일대 연구팀은 큐트릿(qutrit, 3레벨)과 큐쿼트(ququart, 4레벨) 기반 오류 보정 양자 시스템을 실험적으로 구현해, 기존 미보정 시스템보다 우수한 성능을 입증함
 - 이는 양자 오류 보정 분야에서 오랫동안 도달하지 못했던 “Break-even point(순이득 임계점)” 을 다중 상태 기반 큐디트(qudit)가 최초 돌파한 사례(*Nature* 게재)
 - 주요 성과 및 기술
 - Gottesman-Kitaev-Preskill(GKP) bosonic 코드를 이용해, 큐트릿 및 큐쿼트에 양자 정보를 인코딩하고 오류를 보정함
 - 실험 결과: 큐트릿의 오류 보정 이득(1.82배), 큐쿼트의 오류 보정 이득(1.87배)
 - 같은 장비로 구현한 기존 오류 보정 큐비트보다도 높은 성능임
 - 실험 구성 및 방법
 - 3차원 초전도 마이크로파 캐비티에서 양자 진동자를 구현하고, 탄탈륨 트랜스몬 큐비트를 보조 큐비트(ancilla)로 사용
 - GKP 코드를 기반으로 격자 형태의 위상 공간 상에 논리 상태를 인코딩함
 - 강화 학습 기반 AI 에이전트 통해 오류 보정 파라미터(총 45개) 최적화, 브루트포스나 수치 모델링보다 훨씬 정밀한 최적화 가능
 - 양자 시스템의 취약성과 보호 방법
 - 양자 시스템은 잡음, 열, 환경 간섭 등으로 인해 정보 소실 쉬움
 - 오류 보정을 통해 논리 연산을 실행할 수 있을 정도로 상태를 안

정적으로 유지해야 함

- 기존에는 이 기준을 큐비트에서만 달성했으나, 이번 연구는 큐디트에서도 이를 실현함

○ 큐디트의 의미와 이점

- 큐디트는 이진 시스템(큐비트)을 일반화한 다중 레벨 양자 시스템
- 장점: 하드웨어 구성 수를 줄일 수 있음
- 양자 시뮬레이션, 화학 계산, 최적화 문제 등에서 복잡성 감소
- 에러 보호 메모리, 논리 게이트 구현의 효율성 향상 가능

○ 기술적 한계와 trade-offs

- 레벨 수가 많아질수록 상태 간 위상 공간 간격이 커지고 더 많은 에너지 필요, 이는 특정 오류(예: 포톤 손실, 위상 붕괴)에 더 취약해질 수 있음
- 주요 오류 원인: 보조 큐비트의 열적 오염(thermal population), 실험 시작 전 이미 “warm” 상태로 인해 오류 확률 증가
- 해결 방안: 냉각 개선, 보조 하드웨어 분리, 고품질 재료 및 게이트 속도 향상

○ 보소닉 코드의 의미

- 전통적 오류 보정은 많은 물리적 큐비트를 필요로 함
- GKP 보소닉 코드는 단일물리시스템에 더 많은 논리 정보 집약 가능
- 결과적으로 하드웨어 부담 줄이고 양자 컴퓨터 확장성 향상 가능

○ 향후 전망

- 다중 레벨 기반 오류 내성 아키텍처 개발의 기초 마련
- GKP 큐디트는 기존 큐비트 게이트와 호환성 있음, 현재 시스템과 통합 용이

(원문)

1. <https://thequantuminsider.com/2025/05/15/google-and-yale-team-demonstrates-error-corrected-qudits-that-beat-break-even/>