

# 실시간 오류 수정으로 양자 정보 수명 연장

(2023.04.06., 양자정보연구지원센터)

## □ 예일 대학 연구팀, 실시간 오류 수정으로 양자 정보 수명 연장

- 양자 정보는 GKP 상태 같은 보다 복잡한 시스템에서 인코딩하여 보호됨
  - 양자 시스템에서 발생하는 오류를 실시간으로 관찰 및 수정, 또는 저장할 수 있는 시간보다 두 배 이상 정보 보존
  - 양자 상태는 섬세하고 노이즈에 민감하여 유지에 어려움, 오류가 발생할 때 수정하는 다양한 방법을 제안했으나 하드웨어 문제가 존재함
  - 일반적으로, 양자 정보는 동시에 두 가지 서로 다른 상태의 중첩에 있을 수 있는 양자 시스템 사용하여 큐비트로 저장됨
  - 이 정보는 관찰자에게 오류 발생을 알리고 오류 수정에 사용되는 세부 정보 제공에 사용되므로, 모든 오류 수정 체계는 시스템의 추가 정보를 사용해야 함
- 실험 최적화
  - GKP(Gottseman-Kitaev-Preskill) 코드\*로 알려진 큐비트 인코딩 방식 사용(Michel Devoret 팀)
    - ※ GKP 코드: 양자 시스템을 노이즈와 오류로부터 보호하는 양자 오류 수정 코드의 한 종류, 양자 통신 및 양자 센싱에서 사용하기 좋음
  - 초전도 큐비트(“트랜스몬\*”)가 있는 사파이어 칩에 연결된 알루미늄 캐비티(트랜스몬에 의해 제어되는 양자 정보 저장 주요 시스템)에 갇힌 빛 사용하여 구현
    - ※ 트랜스몬(transmon, transmon qubit): 양자 컴퓨팅과 양자 정보처리에서 널리 사용되며, 조셉슨 접합과 병렬로 연결된 작은 캐패시터로 이루어진 초전도 회로 기반의 큐비트
  - 오류 수정 후 측정된 GKP 큐비트의 연장된 수명은 1.82ms로 2.27 배 향상됨
  - 오류 측정 및 수정하는 각 주기에는 10 $\mu$ s 소요, 최신 하드웨어가

필요함, 실험 매개변수 최적화를 위해 ML 시스템 사용하여 평균 광자 수 선택

- 오류 수정을 사용하여 양자 상태의 수명을 연장하는 것이 실제로 가능함을 보여준 실험적 시연으로 양자 컴퓨팅의 주요 이정표가 됨
  - 다른 오류 수정 체계에는 많은 큐비트가 필요하며, 큐비트를 결합하여 전체 오류를 줄일 수 있기 전에 특정 품질 임계값을 통과해야 함

## □ 양자 오류 수정의 혁신, 대규모 양자 컴퓨터로 연결

- 내결함성 양자 컴퓨터 제작을 위한 주요 단계
  - Google Quantum AI 연구팀, 양자 오류 수정에 사용되는 양자 비트(큐비트) 수 확장으로 계산 오류율 줄일 수 있음을 보여줌
- 논리 비트(logical bits)
  - 양자 정보는 복사할 수 없으므로 고전 컴퓨터의 오류 수정 방식으로 수정할 수 없음, 양자 오류 수정 체계를 사용해야 함
  - 단일 “논리적 큐비트”로 작동하는 큐비트 앙상블에 약간의 양자 정보를 인코딩하는 작업이 포함됨
  - 이러한 기술 중 하나는 표면 코드(surface code)로, 약간의 양자 정보가 큐비트 배열로 인코딩 됨
- 비트 플립(bit flip) 및 위상 플립(phase flip)
  - 필요한 오류율(백만분의 일 정도)로 확장되어야 하는 표면 코드 체계를 만들어냄, 양자 프로세서는 작동을 위한 데이터 큐비트 또는 데이터 큐비트에 인접한 측정 큐비트로 구성
  - 큐비트에 영향을 미치는 두 가지 유형의 오류인 비트 플립 또는 위상 플립 측정이 가능한 초전도 큐비트로 구성됨
  - 디페이징(dephasing) 수명의 증가 포함, 개별 큐비트의 오류율 줄이기 위해 고급 제조 방법 사용, 신속 반복적인 측정 미 누출 재설정 같은 운영 프로토콜 개선

- 누출 상태(leakage states) 재설정
  - 오류수정은 각 오류 수정 주기에서 중간 측정 결과를 반복 검색, 시스템이 데이터 큐비트 오류가 발생한 위치를 감지할 수 있도록 측정 자체의 오류가 낮아야 함
  - 또한 큐비트 배열에서 결잃음(decoherence) 오류를 최소화하기 위해 측정은 빨라야 함, 결잃음은 큐비트의 양자 특성이 시간이 지남에 따라 악화되는 과정으로 누출 상태를 재설정해야 함
  - 큐비트 측정과 큐비트 간 누화 방지에 필요한 격리를 모두 허용하는 동정 디커플링(dynamic decoupling) 프로세스 구현
  - 큐비트는 얽힘 유지하고 측정된 이웃과 큐비트 상호 작용 최소화하기 위해 펄스화됨
- 설계의 확장성 평가
  - 총 17개의 물리적 큐비트로 구성된 “distance-3 배열” 논리 큐비트와 49큐비트로 구성된 “distance-5 배열” 비교
  - 5-큐비트 배열의 오류율(2.914%)이 3-큐비트 배열의 오류율(3.0278%)보다 성능이 우수함을 보임
  - 모든 하드웨어 플랫폼과 조직이 시스템 확장을 위한 필수 도전 과제임
  - 다음 단계는 오류 수정을 위한 임계값보다 훨씬 낮은 더 크고 강력한 논리적 큐비트 구축하는 것임

(원문)

1. <https://physicsworld.com/a/real-time-error-correction-extends-the-lifetime-of-quaum-information/>
2. <https://physicsworld.com/a/breakthrough-in-quantum-error-correction-could-lead-to-large-scale-quantum-computers/>