

시드니대 연구팀, GKP 코드 활용한 소형 양자 논리 게이트 구현

(2025.09.22., 양자정보연구지원센터)

□ 시드니대 연구팀, GKP 코드 활용한 소형 양자 논리 게이트 구현

○ 연구 배경

- 양자컴퓨터의 핵심 과제: 큐비트의 불안정성 → 작은 오류가 전체 계산을 무너뜨림
- 해결책: 여러 물리적 큐비트에 정보를 분산 저장 → 논리 큐비트로 오류 억제
- 문제점: 논리 큐비트 수가 늘어날수록 물리적 큐비트 수요가 기하급수적으로 증가 → 대규모 시스템 구현이 어려움
- 시드니대학교 양자제어연구소(Quantum Control Lab)는 새로운 오류정정 코드(GKP 코드)를 활용, 필요한 물리적 자원을 줄이는 실험적 접근 시도

○ 연구 개요(University of Sydney)

- 시드니대학교 Nano Institute 소속 양자제어연구소 주도(*Nature Physics* 게재)
- 핵심 성과: 단일 이온 내 GKP 코드 기반 보편적 양자 논리 게이트 구현
- 사용 기술: 단일 이터븀(Yb) 이온을 Paul trap에 가두고 레이저 제어 → GKP 코드로 인코딩된 상태 저장 및 얽힘 구현

○ GKP 코드 (Gottesman-Kitaev-Preskill)

- 별칭: 양자컴퓨팅의 “로제타 스톤”
- 특징: 연속적인 양자 진동을 이산적(디지털 유사) 상태로 변환
- 장점: 오류 검출·수정이 용이, 하드웨어 효율적 논리 큐비트 인코딩 가능
- 기존 과제: 구현 난이도가 높아 이론적 가능성에 머물러 있었음 → 이번 연구로 실험적 실현

○ 연구 방법 및 실험 결과

- 대상: 단일 Yb 이온, 실온 Paul trap 환경
- 방법: 이온의 *3차원 진동 모드(양자 상태)* 제어하여 GKP 큐비트 인코딩

- 실험: GKP 큐빗을 단일 이온에 저장, 개별 GKP 큐빗 조작 및 쌍으로 얽힘 구현, 총 3가지 실험 수행 → 인코딩·논리 게이트·얽힘 단계 확인
- 결과: 2개의 오류정정 가능한 논리 큐빗을 단일 이온에 저장하고, 보편적 논리 게이트 집합을 실현

○ 기술적 지원

- SW: Q-CTRL(시드니대 스핀오프 기업) 개발 쿼텀 제어 소프트웨어 활용
- 기능: 물리 기반 모델로 게이트 설계 → GKP 상태의 왜곡 최소화, 정밀한 제어 가능
- 성과: 실험적 제어와 소프트웨어 통합 → 고품질 논리 게이트 구현 성공

○ 연구 의의

- 하드웨어 효율성 극대화: 다수의 물리 큐빗 대신 단일 이온 내부 진동 활용
- 규모 확장성 확보: 수백만 물리 큐빗 필요성을 줄여 실용적 양자 컴퓨터 설계 가능성 제시
- 이론적 가능성이었던 GKP 코드 기반 게이트를 최초 실험 실현
- 신약개발, 금융, 암호 분야에서 안정적 대규모 양자계산 위한 기반 마련

○ 결론 및 제언

- 단일 trapped ion 내에서 보편적 논리 게이트 세트를 구현함으로써 GKP 코드 실현의 전환점을 마련
- GKP 오류정정 코드가 하드웨어 수요를 줄이고, 확장 가능한 양자컴퓨터 개발의 핵심 해법임을 실증
- 양자 진동 제어와 소프트웨어 기반 게이트 설계의 결합이 실험적 정밀도를 크게 향상시킴
- 다중 이온 시스템으로 확장, 더 복잡한 연산 대규모 논리 큐빗 구현 검증 필요
- 장기적으로 하드웨어 효율성과 오류정정 능력을 겸비한 대형 양자연산 시스템 구축을 위한 토대가 될 것

(원문) 1. <https://thequantuminsider.com/2025/08/21/university-of-sydney-team-demonstrates-compact-quantum-logic-gate-using-gkp-codes/>