

IonQ 최신 설계보다 우수한 단순 대칭 기반 오류 교정 코드 발표

(2025.11.21., 양자정보연구지원센터)

□ IonQ 단순 대칭 기반 양자 오류 교정 코드 연구

○ 연구 배경

- 양자컴퓨터는 작은 오류에도 민감하며, 대규모 내결함(fault-tolerant) 양자컴퓨터를 위해 효율적인 “오류 교정 코드(QEC)” 가 필수
- 기존 고성능 코드는 복잡한 최적화, 머신러닝 기반 설계를 필요로 했음
- IonQ 연구팀은 “단순한 수학적 대칭(cyclic symmetry)” 을 활용해 기존 설계를 능가하는 효율적 QEC 코드 발견

○ 연구 방법 및 코드 구조

- Cyclic Hypergraph Product(C2, CxR) 코드 개발
- 고전적 cyclic 코드를 구조적으로 결합하여 생성
- 글로벌 대칭 적용 → 탐색 공간 축소, 구현 용이, 노이즈 내성 강화
- 회로 수준 시뮬레이션 결과, 기존 ML 최적화 HGP 코드 대비 논리 오류율(logical error rate) 수~수천 배 개선
- 예: $[[882,50,10]]$ C2 코드 $\rightarrow 2 \times 10^{-8}$, ML-최적화 $[[625,25,8]] \rightarrow \approx 2 \times 10^{-5}$

○ 장점 및 하드웨어 구현

- 단순하고 규칙적인 회로 레이아웃 → ancilla qubit 배치 용이, 안정적 스테빌라이저 측정 가능
- 회로 깊이(constant depth) 유지 → 오류 누적 최소화, 하드웨어 친화적
- 적용 가능: 이온 트랩, 광자 큐비트, 중성자 큐비트 등 이동 가능

한 큐비트 아키텍처

○ 성능 비교

- 기존 Hypergraph Product 코드, Bicycle 코드 대비 논리 오류율 더 낮음, 유사 자원 대비 효율적
- 단순한 구조에도 불구하고 물리적 구현 가능성과 성능 모두 우수
- 블록 길이가 다소 길지만, 오류율 · 레이아웃 단순성에서 장점

○ 한계 및 향후 연구

- 현재 연구는 메모리 성능 중심 → 논리 게이트 fault-tolerant 구현은 추후 과제
- 블록 길이 증가 → 초기 하드웨어 요구 증가 가능
- 실제 하드웨어에서는 잡음 모델과 디코더 최적화 필요
- 향후 연구: 논리 게이트 구현, 하드웨어 통합, 트랩이온 · 광자 기반 실험 적용

○ 결론

- 단순한 대칭 구조만으로도 기존 복잡한 설계보다 뛰어난 성능 달성
- 대규모 양자 메모리 및 내결함 양자컴퓨터 설계에 유망한 방향 제시
- 글로벌 구조와 구현 효율성을 결합한 접근이 QEC 설계의 새로운 가능성을 열음

(원문)

1. <https://thequantuminsider.com/2025/11/16/ionq-researchers-report-simple-symmetry-based-error-correcting-codes-that-outperform-state-of-the-art-designs/>