

고전 LDPC 코드 설계이론을 양자컴퓨터에 적용

(2026.10.02., 양자정보연구지원센터)

- 고전 LDPC 설계 원리를 적용한 고효율 양자 오류 정정 코드 개발
 - 고전 LDPC 코드 설계 원리를 양자 오류 정정 코드에 적용
 - 일본 Science Tokyo의 Kenta Kasai 부교수, 고전적인 저밀도 패리티 검사(LDPC) 코드 설계 이론을 양자 LDPC 코드에 적용 방법 제안
 - 양자 오류 정정에서는 양자정보를 직접 측정하지 않고 오류를 검출·수정해야 하며, X형·Z형 오류 검사가 서로 간섭하지 않도록 직교성 조건을 만족해야 함
 - 기존에는 이러한 양자역학적 제약을 코드 전체에 적용하면서 짧은 루프와 취약한 구조가 발생해, 고전 LDPC 코드의 높은 최소거리와 임계값 특성을 동시에 확보하기 어려웠음
 - 활성 행에만 직교성 조건을 적용해 설계 자유도 확보
 - Kasai 연구진은 affine permutation matrix를 활용하고, 실제 오류 정정에 사용되는 ‘활성(active) 행’에만 직교성 조건을 적용하는 새로운 양자 LDPC 코드를 구성함
 - 오류 정정에 직접 사용되지 않는 ‘잠재(latent) 부모 행’에는 무작위성을 유지함으로써, 고전 LDPC 방식과 같이 연결 차수와 짧은 루프의 발생을 설계 단계에서 조절할 수 있도록 함
 - 이를 통해 양자역학적 제약을 유지하면서도 고전 LDPC 설계에서 활용해 온 높은 최소거리와 명확한 디코딩 임계값을 추구할 수 있는 기반을 마련함
 - 고효율 양자 오류 정정 코드의 성능 확인
 - 연구진은 (3,12)-regular, girth-8 구조를 갖는 양자 LDPC 코드를 설계했으며, 코드 크기는 $[[9216, 4612, d]]$, 최소거리는 현재까지 $d \leq 48$ 로 제시됨

- 9,216개의 물리적 큐비트로 4,612개의 논리 큐비트를 보호해, 논리 큐비트 1개당 물리 큐비트 약 2개가 필요한 높은 부호율을 달성함
- 이론적 구성과 저오류율 시뮬레이션에서 더 낮은 가중치의 논리 오류가 발견되지 않았으며, 연구진은 최소거리가 48에 가까울 가능성이 높다고 분석함
- 4-사이클과 6-사이 “트래핑 세트(trapping set)” 도 줄일 수 있는 것으로 나타남
- 고전 LDPC의 디코딩 한계 예측 방법론을 양자 코드 설계에 활용
 - BP 디코딩과 저복잡도 후처리를 적용한 시뮬레이션에서, 제안된 코드의 오류율은 4% 탈분극 잡음에서 약 10^{-8} 까지 낮아짐
 - 해당 코드의 오류율 감소 특성(waterfall)은 대응되는 고전적 비직교 무작위 (3,12)-regular LDPC 앙상블의 밀도 진화 예측값인 약 0.05702에 근접하는 양상을 보임. 다만 이 값은 제안된 양자 코드에서 직접 측정된 임계값은 아님
 - 이를 통해 연결 차수 등을 바탕으로 디코더의 성능 한계를 예측하고 그 한계에 맞춰 코드를 설계하는 고전 LDPC의 방법론이 양자 LDPC 설계에도 활용될 가능성을 제시함
- 중성원자 양자컴퓨터 등 실제 하드웨어 적용 연구로 확대
 - 연구 결과가 공개된 이후 Harvard University, MIT, QuEra Computing 등의 연구진이 해당 구조를 재구성 가능한 중성원자 양자컴퓨터에 적용하는 연구를 수행했으며, 이를 ‘Kasai codes’ 라고 명명함
 - 이후 다른 연구팀에서도 Cornucopia codes, GALA codes 등 관련 설계를 제안하면서 Kasai의 설계 원리를 하드웨어 배치와 보다 일반적인 코드 구조로 확장하고 있음
 - 다만 현재 결과는 이론적 설계와 수치 시뮬레이션에 기반한 연구로, 실제 양자 프로세서에서 동일한 성능이 구현되는지는 별도의 하드웨어 검증이 필요함

(원문)

1. <https://thequantuminsider.com/2026/09/09/bringing-classical-ldpc-code-design-theory-to-quantum-computers/>