MS 4차원 양자 코드, 결함 허용 양자컴퓨팅 실현 가능성 제고

(2025.07.07., 양자정보연구지원센터)

□ Microsoft 4차원 양자 오류 정정 코드 연구, 결함 허용 양자 컴퓨팅 실현 가능성 제시

○ Microsoft가 제안한 새로운 4차원 기하학적 오류 정정 코드(4D geometric codes)는 기존보다 훨씬 적은 물리 큐비트로 높은 오류 정정 성능을 달성함

- 해당 코드는 단일 측정 라운드(single-shot error correction)로 오류를 정정할 수 있어 하드웨어 요구사항을 줄이고 속도를 개선함
- 전체적인 목표는 범용 양자 컴퓨팅(universal quantum computing)을 가능하게 하는 오류 허용(fault-tolerant)시스템 개발임

○ 기존 2D 토폴로지(surface code)와 달리, 4차원 격자 구조(tesseract)를 사용해 더 높은 부호율과 오류 정정 효율을 확보

- [[96,6,8]] Hadamard 코드는 96개 물리 큐비트로 6개의 논리 큐비트를 부호화 가능, 최대 3개 오류 정정 및 4개 오류 탐지 가능
- 1,000배 감소된 논리 오류율(10^{-6}), 물리 오류율 10^{-3} 조건에서 작동

○ 코드 성능 및 임계값

- 논리 오류율 감소는 다양한 디코딩 전략 하에서 입증됨
- pseudo-threshold는 최대 1%까지 도달 가능, 기존 LDPC 및 surface code보다 우수한 성능
- 단일 라운드 및 다중 라운드 디코딩 전략 모두 유효

○ **하드웨어 호환성**

- 이론적 모델에 그치지 않고 실제 하드웨어 적용 가능성을 고려함
- 중성 원자 배열, 이온 포획, 광자 기반 등 전면 연결(all-to-all connectivity) 가능한 구조에 최적화
- 기존 surface code의 2D 지역성 제약을 벗어남

○ 구현 회로

- ‘compact’ 버전: 병렬 하드웨어용 설계
- ‘starfish’ 버전: ancillar 큐비트 재사용하는 큐비트 제한 시스템에 적합
- 깊이(depth)와 자원(resource) 효율성을 극대화함

○ 논리 연산과 범용성

- CNOT, Hadamard, 위상 게이트 등 Clifford 연산을 코드 내 수행 가능
- 공간군 대칭, fold-transversal gates, lattice surgery 조합으로 논리 Clifford 완전성 확보
- 범용 연산 위해 마법 상태 주입(magic state injection) 증류(distillation) 적용
- 다중 타겟 CNOT 및 대각 단위게이트(diagonal unitary injection) 등 고차 연산 최적화

○ **실용적 양자 컴퓨터 설계**

- [[96,6,8]] Hadamard 코드 기준으로 2,000 물리 큐비트로 54 논리 큐비트 구현 가능
- Det45 코드 사용 시 10,000 큐비트로 96 논리 큐비트 구현 가능
- 1,500 논리 큐비트 유틸리티급 양자 컴퓨터는 약 100,000 큐비트 모듈 10개로 구성 가능

○ 향후 연구 방향

- 심층 논리 회로(dep logical circuits), 마법 상태 증류 실험 추진 예정
- 4D 대칭 기반 국소 회로(local circuit)의 실현 가능성 검증 필요
- Clifford 완전성을 위한 토폴로지 연산 단독 가능 여부 검증 필요
- 격자 회전으로 인한 오버헤드 감소가 코드 거리 증가에 따라 1에 수렴할 수 있다는 가설 제시
- subsystem 버전의 성능 및 비용 분석은 향후 연구 과제로 남음

(원문)

1. https://thequantuminsider.com/2025/06/19/microsofts-4d-quantum-codes-promise-reduction-in-error-rates-boost-in-prospects-of-fault-tolerant-computing/