양자 디지털 트윈, 오류 정정 과제 해결로 QC 개발 가속

(2026.04.20., 양자정보연구지원센터)

□ **양자 ‘디지털 트윈’, 오류 정정 과제 해결로 신뢰성 있는 양자 컴퓨터 개발 가속**

○ 아마존웹서비스(AWS)·퀀텀 엘리먼츠·USC·하버드 공동연구, 양자 ‘디지털 트윈’ 기반 오류 정정 시뮬레이션 기술 개발

- 실제 양자 하드웨어를 모사하는 고정밀 시뮬레이션으로 오류 정정 성능 분석 및 개선 가능성 제시
- 클라우드 기반 고성능 컴퓨팅을 활용해 97큐비트 규모 표면코드 구현

○ 연구 목적 및 배경

- 양자컴퓨터의 핵심 한계인 노이즈 및 오류 누적 문제 해결
- 큐비트는 환경 잡음·제어 오차·상호작용으로 인해 오류 발생
- 논리 큐비트 구현을 위해 다수 물리 큐비트 기반 오류 정정 필수

○ **디지털 트윈** 개념 적용

- 실제 양자 시스템을 모사하는 가상 모델(디지털 트윈) 구축
- 실험 전 설계 검증 및 오류 정정 전략 최적화 가능
- 물리 장치 없이도 성능 예측 및 개선 가능

○ 기술 구현 방식

- 양자 몬테카를로 시뮬레이션 + 클라우드 HPC 결합
- 확률적 샘플링 방식으로 전체 상태 대신 대표 데이터 계산
- AWS EC2 기반에서 약 1시간 내 97큐비트 시스템 시뮬레이션 수행

○ 시뮬레이션 대상 및 범위

- 97큐비트 거리-7(surface code) 오류 정정 구조 모델링
- 약 400개 양자 게이트 포함 다층 회로 구성
- 에너지 손실, 위상 변화, 큐비트 간 간섭 등 실제 노이즈 반영

ㅇ 핵심 성과

- 기존 단순 모델보다 훨씬 현실적인 오류 패턴 재현
- 제어 신호 주파수 변화에 따른 공간적 오류 분포 확인
- 기존 모델의 “균일 오류 가정” 한계 지적

ㅇ **오류 정정 개선 효과**

- 실제와 유사한 데이터 생성으로 오류 정정 알고리즘 개선 가능
- 신경망 기반 디코더 등 고급 오류 정정 방식 테스트 가능
- 실험 전 알고리즘 성능 검증 및 최적화 지원

ㅇ 기술적 의미

- 양자 개발 과정에서 클래식 컴퓨팅의 역할 강화
- 양자컴퓨터 자체보다 시뮬레이션 인프라가 핵심 보조 역할 수행
- 설계-시뮬레이션-최적화 피드백 구조 형성

ㅇ 한계 및 제약

- 몬테카를로 기반 확률 모델로 인해 통계적 오차 존재
- 샘플 수 증가 시 정확도 향상되지만 계산 비용 증가
- 특정 실제 장치에 완전히 맞춘 모델은 아님

ㅇ 향후 발전 방향, 더 정밀한 장치 특화 오류 모델 개발 계획

- 장시간 다중 오류 정정 사이클 확장 연구 필요, 시뮬레이션과 실제 하드웨어 성능 연결 강화

ㅇ 결론 및 전망

- 디지털 트윈 기반 접근으로 양자 오류 정정 연구 가속화
- 하드웨어 구축 전 성능 예측 가능해 개발 효율 향상
- 양자컴퓨팅 설계・제어・보정 전 과정 통합 발전 기대

(원문)

1. https://thequantuminsider.com/2026/04/02/twinning-quantum-digital-twins-tackle-error-correction-task-to-speed-path-to-reliable-quantum-computers/