

IonQ, 연결된 양자컴퓨터가 더 큰 단일 시스템 능가 가능 확인

(2025.12.22., 양자정보연구지원센터)

□ IonQ 연구, 연결된 양자 컴퓨터가 더 큰 단일 시스템을 능가할 수 있음을 확인

○ 연구 개요

- IonQ와 핀란드 알토 대학교(Aalto University) 공동 연구진은 여러 대의 소형 양자컴퓨터(QPU)를 연결한 **분산형 시스템**이 느린 양자 링크 환경에서도 단일 대형 양자컴퓨터를 능가할 수 있음을 시뮬레이션으로 입증함
- 본 연구는 느린 양자 연결이 모듈형 양자컴퓨팅의 이점을 상쇄한다는 기존의 통념에 도전하며, 초고속 양자 네트워크를 기다리지 않고도 확장 가능한 현실적 경로를 제시함

○ 연구 배경, 양자 컴퓨터 확장의 난제

- (**대규모 단일 시스템의 한계**) 실용적 양자 응용을 위해서는 수백만 큐비트 규모의 시스템이 필요할 것으로 예상되나, 현 기술로 단일 프로세서에 이를 집적하는 것은 비현실적이라는 인식이 지배적임
- 이에 따라 다수의 QPU를 연결하는 모듈형·분산형 양자컴퓨팅이 대안으로 주목받고 있음
- (**연결, interconnect의 문제**) QPU 간 연결에는 얽힘 생성이 필수적이나, 얽힘 생성에는 밀리초(ms)가 소요되는 반면, QPU 내부 연산은 마이크로초(μs) 단위로 수행됨
- 이 속도 불일치로 인해 분산형 시스템은 연결을 기다리다 성능이 저하될 것이라는 우려가 제기되어 왔음

○ 핵심 아이디어, 분산형 CliNR

- (**CliNR, Clifford Noise Reduction 기법**) CliNR은 중요한 양자 회로 군인 “클리퍼드 회로(Clifford circuits)”를 대상으로 한 잡음 저

감 기법임

- 전체 회로를 한 번에 실행하지 않고, 더 작은 서브회로로 분해 · 사전 검증한 후 성공한 부분만 결합함
 - 오류가 발생한 서브회로는 폐기 후 재시도함으로써 오류 누적을 방지함
 - (분산형 CliNR 구조) 기존 단일 시스템이 아닌, 여러 QPU가 각자 서브회로를 병렬로 준비 · 검증함
 - QPU 간 얽힘은 최종 단계의 짧은 “주입(injection)” 과정에서만 사용됨
 - 이로 인해 느린 얽힘 생성은 준비 단계 동안 백그라운드에서 진행될 수 있어 대기 시간이 최소화됨
- 시뮬레이션 및 검증 결과
- (시뮬레이션 설정) 최대 100큐비트 규모의 무작위 클리퍼드 회로를 대상으로, 직접 구현, 단일 대형 QPU 기반 CliNR, 다중 QPU 기반 분산 CliNR의 성능을 비교함
 - 잡음 수준은 최근 이온트랩 실험 결과(2큐비트 게이트 오류율 $\approx 10^{-4}$)를 반영함
 - (주요 결과) 얽힘 생성 시간이 로컬 게이트 시간과 동일한 경우, 분산 CliNR은 단일 시스템 CliNR과 유사한 논리 오류율을 유지하면서 회로 깊이는 더 짧음
 - 얽힘 생성 속도를 최대 5배까지 느리게 설정해도, 분산 시스템은 여전히 더 낮은 오류율과 더 짧은 실행 깊이를 유지함
 - 연결 속도가 극단적으로 느려질 때에만 분산 구조의 이점 감소함
- 의미 및 시사점
- (양자 하드웨어 전략에 대한 영향) 본 연구는 느린 양자 링크라도 전략적으로 사용하면 충분한 성능 향상이 가능함을 정량적으로 제시함
 - 이는 이온트랩, 중성원자, 광자 등 본질적으로 모듈형인 양자 플

랫폼에 특히 유리한 결과임

- IonQ의 모듈형 이온트랩 로드맵을 이론적으로 뒷받침하는 근거를 제공함
- (양자 네트워크 개발 방향) 양자 인터커넥트가 로컬 게이트와 동일한 속도를 달성하지 않아도 실질적인 시스템 성능 개선에 기여할 수 있음을 시사함
- 이는 정부·산업계의 양자 네트워크 투자 전략에도 긍정적 근거를 제공함
- 한계 및 향후 과제
 - (적용 범위의 제한) 본 연구의 이점은 클리퍼드 회로에 한정되며, 범용 양자 계산 전체에 즉시 적용되지는 않음
 - 또한 실제 하드웨어 실험이 아닌 시뮬레이션 결과임
 - (향후 연구 방향) 실제 다중 QPU 시스템에서의 실험적 검증
 - 고전적으로 시뮬레이션이 어려운 conjugated Clifford 회로를 활용한 양자 우위 실험
 - QPU 수 증가에 따른 비대칭적 확장(asymptotic scaling) 특성 분석
 - 병렬 검증 및 서브회로 분할 전략 개선
- 종합 평가 및 의의
 - (의의) 본 연구는 분산형 양자컴퓨팅이 단순한 장기적 비전이 아니라, 현실적인 하드웨어 제약하에서도 성능 우위를 가질 수 있음을 최초로 체계적으로 입증함
 - (전망) 모듈형·네트워크 기반 양자컴퓨터가 대규모 단일 시스템을 대체하거나 보완하는 핵심 아키텍처로 발전할 가능성을 크게 높이는 결과로 평가됨

(원문)

1. <https://thequantuminsider.com/2025/12/16/ionq-study-finds-linked-quantum-computers-can-beat-bigger-single-systems/>