

광자 기술, 양자 규모 확장의 세 가지 오랜 한계 돌파에 도전

(2025.12.22., 양자정보연구지원센터)

□ 새로운 광자 기술, 양자 규모 확장의 세 가지 오랜 한계 돌파에 도전

○ 연구 배경 및 목적

- 광자 기반 양자컴퓨터는 상온 동작, 광섬유 네트워크와의 높은 호환성 등 장점을 지니지만, **얽힘 생성의 비결정성, 소프트웨어·컴파일 복잡도 폭증, 광 손실에 대한 취약성**이라는 구조적 한계로 인해 대규모 확장이 지연되어 왔음
- Aegiq 주도의 연구진은 이러한 세 가지 핵심 장벽을 동시에 극복하기 위한 새로운 아키텍처와 기법을 제시함.

○ 기존 광자 양자 컴퓨팅의 한계

- (**확률적 얽힘 생성 문제**) 기존 방식은 클러스터 상태(cluster state)를 확률적으로 연결하는 방식에 의존하며, 두 광자 클러스터의 결합 성공률은 약 50% 수준에 불과함
- 실패 시 광자가 소멸되어 시스템을 처음부터 다시 구성해야 하므로, 큐비트 수가 증가할수록 필요한 물리적 구성 요소가 급격히 증가함
- (**소프트웨어 및 컴파일 복잡도**) 많은 양자 알고리즘은 실행 전 수백만~수십억 개의 기본 게이트로 분해되어야 하며, 이 과정은 문제 크기에 따라 지수적으로 증가함
- 이로 인해 하드웨어 성능 향상이 실제 계산 이점으로 이어지지 못하는 경우가 많았음
- (**광 손실 문제**) 광자는 거울, 도파관, 검출기 등을 통과하면서 필연적으로 손실됨
- 기존 광자 오류보정 방식은 허용 가능한 손실 한계가 낮아, 대규모 시스템에서는 계산 실패 위험이 급격히 증가함

○ QGATE 시스템의 핵심 제안

- (결정론적 광자 얽힘 생성) 비선형 결정에 의존한 무작위 광자 생성 대신, “반도체 양자점(quantum dot)” 을 이용한 주문형 (on-demand) 단일 광자 소스를 활용함
- 정해진 시간에 광자를 방출함으로써, 작은 고얽힘 광자 블록을 의도적으로 구성 가능함
- (중복 인코딩 기반 내결함 구조) 하나의 논리적 큐비트를 여러 광자에 분산 저장하는 중복 인코딩을 적용함
- 일부 광자가 손실되거나 얽힘 시도가 실패하더라도 논리 정보는 유지되며, 얽힘을 반복 시도할 수 있어 성공률을 거의 확정적 수준으로 끌어올릴 수 있음
- 이를 통해 오류보정에 필요한 물리적 광자 수를 논리 큐비트당 수백 개 수준으로 낮출 가능성을 제시함

○ 연산 및 소프트웨어 측면의 혁신

- (텔레포테이션 기반 양자 연산, QGATE) 큐비트 간 직접 상호작용 대신, 미리 준비된 보조 얽힘 상태를 측정함으로써 연산 결과를 간접적으로 구현하는 방식임
- 이 방식은 큐비트를 장치 내부에서 이동시키기 위한 복잡한 스왑 연산을 제거함
- (컴파일 복잡도 감소) 기존에는 복잡한 연산을 기본 게이트의 긴 연쇄로 분해해야 했으나, 텔레포테이션 기반 방식에서는 고차 연산을 직접 구현 가능함
- 그 결과, 양자 프로그램 컴파일 비용이 지수적 증가에서 선형 증가로 전환될 수 있음을 제시함

○ 기대 효과 및 확장 가능성

- (대규모 실용 계산 가능성) 깊고 복잡한 회로가 필요한 분자·물질 시뮬레이션, 유체역학, 에너지 시스템 분석 등에서 기존 설계 대비 훨씬 적은 물리 자원으로 계산 수행 가능성이 제시됨

- (모듈형 확장 구조) 표준 광섬유와 통신급(optical telecom) 하드웨어를 활용하므로, 단일 장치에 모든 큐비트를 집적하지 않고 네트워크 방식으로 확장 가능함
- 이는 랙·룸 단위로 연결되는 분산형 대규모 양자 시스템 구축에 유리함
- 남은 과제와 한계
 - (실험적 검증 필요성) 제시된 높은 얽힘 성공률과 광 손실 허용 한계는 현재로서는 아키텍처 분석과 이론적 추정에 기반함
 - 수백만 광자가 동작하는 환경에서 동일한 효율을 유지하는 것은 여전히 중요한 공학적 도전 과제임
 - (소프트웨어 생태계 성숙도) 선형적 컴파일 이점을 실현하기 위해서는 해당 모델을 완전히 활용할 수 있는 제어·컴파일러 기술의 성숙이 필요함
- 종합 평가 및 의의
 - (의의) 본 연구는 광자 양자컴퓨팅이 지녀온 구조적 한계를 하드웨어·논리·소프트웨어 차원에서 동시에 해결하려는 최초의 종합적 접근임
 - 광자 기반 양자컴퓨터가 다른 방식(초전도, 이온트랩 등)과 실질적으로 경쟁 가능한 대규모 오류보정 시스템으로 발전할 수 있음을 시사함
 - (전망) 향후 실험적 검증이 뒷받침될 경우, 광자 양자컴퓨팅은 네트워크 친화적·상온 동작이라는 강점을 바탕으로 차세대 대규모 양자 인프라의 핵심 후보로 부상할 가능성이 큼

(원문)

1. <https://thequantuminsider.com/2025/12/11/new-photonic-techniques-aim-to-break-through-longstanding-barriers-to-quantum-scale/>