퀀티넘 양자 프로세서, 양자 오류 정정 연산 성능 연구에서 두각

(2026.11.19., 양자정보연구지원센터)

□ 퀀티넘(Quantinuum) 양자 프로세서, 양자 오류 정정 연산 성능 연구에서 두각을 나타냄

○ 퀀티넘 양자 프로세서, 양자 오류 정정 핵심 연산에서 높은 신뢰성 확인

- 독일 율리히 슈퍼컴퓨팅센터(Jülich Supercomputing Centre)의 J. A. Montañez-Barrera와 Kristel Michielsen 연구진은 퀀티넘(Quantinuum), IBM, IQM의 양자 프로세서 10종을 비교해 양자 오류 정정에 필요한 연산의 신뢰성을 평가함.
- 연구 결과, 퀀티넘 프로세서는 측정과 후속 제어 연산으로 발생하는 추가 오류가 상대적으로 적었으며, 특히 최신 Helios-1 프로세서는 오류 정정 관련 연산을 수행하는 데 우수한 성능을 보임.

○ 측정 과정에서 발생하는 추가 오류 부담 감소

- 양자 오류 정정은 큐비트의 오류 징후를 확인하기 위한 반복 측정과 측정 결과에 따른 후속 연산이 필수적이나, 이 과정에서 주변 큐비트의 상태가 교란되거나 연산 지연이 발생할 수 있음.
- IBM 프로세서에서는 측정을 포함한 연산의 유효 오류율이 측정이 없는 경우보다 대략 10배 높게 나타난 반면, 퀀티넘 프로세서에서는 측정으로 인한 추가 오류가 두 큐비트 간 연산에서 발생하는 오류와 비슷한 규모로 나타남.

○ Helios-1의 표면 코드 기반 시험에서 성능 개선 확인

- Helios-1은 양자 정보를 보호하기 위해 큐비트 격자에서 반복적인 오류 검사를 수행하는 표면 코드(surface code) 기반 시험에서 25개 데이터 큐비트를 사용했을 때, 비교 대상의 모든 회로 깊이에서 더 높은 점수를 기록함.

- 각 시험 지점에서 회로를 50회 실행했으며, 연구진은 측정 결과가 성능 개선을 뒷받침한다고 보고함. 다만 30개 큐비트 사슬을 활용한 별도 비교에서는 오차 불확실성이 커 개선 여부를 확정하기 어려웠음.

○ **최대 91개 데이터 큐비트 규모의 오류 정정 연산 시험 수행**

- Helios-1은 표면 코드 기반 81개 데이터 큐비트, 삼각형 컬러 코드 기반 91개 데이터 큐비트, 이변량 바이시클 코드 기반 48개 데이터 큐비트 시험에서 유의미한 결과를 유지함.
- 이는 다양한 오류 정정 연산 패턴을 수행하면서도 결과가 무작위 기준을 웃돌았음을 의미함. 다만 해당 시험은 오류 정정에 필요한 연산의 수행 능력을 평가한 것으로, 해당 규모에서 논리 큐비트의 오류를 실제로 성공적으로 정정했음을 입증한 것은 아님.

○ **연산 스케줄링 최적화를 통한 성능 향상 가능성 확인**

- Helios-1은 두 큐비트 연산과 측정을 수행할 수 있는 8개 구역을 갖추고 있으나, 동시에 실행할 수 있는 연산의 제약으로 일부 큐비트가 대기하면서 전체 연산의 오류 부담이 증가할 수 있음.
- 연구진은 연산을 순차적으로 수행하던 기존 방식을 개선해 두 큐비트 연산과 측정을 병렬화했으며, 동일한 하드웨어에서도 벤치마크 성능이 향상됨을 확인함. 이는 연산 순서와 병렬 처리 방식의 최적화가 양자 프로세서의 실효 성능 개선에 기여할 수 있음을 보여줌.

○ 양자 오류 정정 준비도를 평가하는 **간소화된 벤치마크 제안**

- 연구진은 양자 근사 최적화 알고리즘(QAOA)을 활용해 오류 정정에 필요한 연결 구조와 측정 패턴을 반영한 벤치마크를 개발함. 이를 통해 실제 오류 정정 실험을 수행하기 전에 하드웨어가 핵심 연산을 얼마나 안정적으로 처리하는지 평가할 수 있도록 함.
- 벤치마크 점수 1은 최적 해를, 0.5는 무작위 표본 추출에서 기대

되는 수준을 의미하며, 점수가 높을수록 회로가 유용한 알고리즘 정보를 유지하고 있음을 나타냄. 실제 오류 정정 메모리 실험보다 적은 실행 횟수로도 하드웨어 성능을 사전 평가할 수 있다는 점에서 활용 가능성이 있음.

○ **실제 오류 정정 메모리 실험과의 상관관계 검증 및 한계**

- IBM Phoenix 프로세서의 칩 내 11개 영역을 대상으로 벤치마크 결과와 실제 오류 정정 메모리 실험을 비교한 결과, 벤치마크 성능이 높은 영역에서 논리 메모리 오류가 적게 나타나는 경향을 확인함.
- 다만 검증은 단일 프로세서의 소규모 표면 코드에 한정되며, 더 큰 오류 정정 코드와 다양한 하드웨어에서도 동일한 관계가 성립하는지는 추가 연구가 필요함. 또한 벤치마크의 유효 오류율은 단순화된 잡음 모델을 기반으로 한 지표로, 프로세서 내부에서 발생하는 모든 물리적 오류를 직접 측정한 값은 아님.

○ **차세대 오류 내성 양자컴퓨팅을 위한 활용 전망**

- 이번 연구는 양자 프로세서의 오류 정정 준비도를 사전에 평가하고, 칩 내 신뢰성 높은 영역을 식별하며, 연산 스케줄링 개선 효과를 정량적으로 비교할 수 있는 방법을 제시함.
- 향후 다양한 하드웨어와 대규모 오류 정정 코드에 대한 검증이 이루어질 경우, 실제 논리 큐비트의 안정적인 구현에 앞서 하드웨어 성능을 효율적으로 평가하고 차세대 오류 내성 양자컴퓨터 개발을 지원하는 도구로 활용될 수 있음.

(원문)

1. https://thequantuminsider.com/2026/10/08/quantinuum-processors-stand-out-in-study-of-quantum-error-correction-operations/