

IBM, 양자컴퓨팅 내결함성 향상 이끌 수 있는 디코더 발표

(2025.08.25., 양자정보연구지원센터)

□ IBM, Relay-BP 디코더 개발로 내결함성 양자컴퓨터에 한 걸음 더

○ 연구 개요

- IBM 연구진, 양자 메모리에서 오류를 효과적으로 식별 교정할 수 있는 새로운 디코더 알고리즘 Relay-BP 개발
- 해당 연구는 arXiv에 공개된 논문에서 처음 소개되었으며, 향후 실험적 적용 가능성이 큰 혁신적 성과로 평가
- RElay-BP는 기존 디코더 대비 최대 10배 향상된 정확도, 그리고 자원 소모 감소를 동시에 달성

○ 양자컴퓨터와 오류 정정의 필요성

- 양자컴퓨터의 기본 단위인 “큐비트(qubit)”는 환경 잡음과 제어 불완정성에 민감 → 작은 외부 교란에도 오류 발생
- 오류 정정 없이는 대규모 문제 해결 불가능 → 물리적 큐비트를 묶어 논리 큐비트 구성 필요
- 오류 정정 과정의 핵심은 디코더: 신드롬(syndrome) 데이터를 해석해 오류의 위치와 유형을 추론하고 교정

○ Relay-BP의 원리와 기술적 특징

- 신드롬이라는 간접 측정값을 분석하여 오류 발생 위치 추론
- 기존 신념 전파(Belief Propagation, BP) 방식을 개선해 qLDPC 코드 디코딩에 최적화
- Relay-BP는 속도, 정확도, 유연성, 압축성 네 가지 성능을 모두 충족하는 유일한 실시간 디코더로 평가
- FPGA와 같은 하드웨어에서 구동 가능할 만큼 경량화되어 실시간

양자 오류 정정에 적합

○ BP에서 Relay-BP로의 진화

- BP는 메시지를 전달 갱신하며 오류를 추론하는 방식이나, 종종 불안정하게 수렴하거나 답을 내지 못하는 한계 존재
- 과거에는 BP와 OSD(Ordered Statistics Decoding)를 결합해 정확도를 높였으나 계산량이 많고 효율성이 낮음
- Relay-BP는 노드별로 “메모리 강도(memory strength)” 를 달리 부여 → 일부 노드는 과거 메시지를 강하게 반영, 일부는 완전히 무시
- 이를 통해 알고리즘이 “트래핑 세트(trapping set)” 에 빠지지 않고 안정적으로 수렴

○ 성능 및 의의

- 기존 선도적 디코더 대비 10배 향상된 정확도, 그리고 자원 절약 효과 입증
- 속도: 양자 오류 발생 속도에 맞춰 실시간으로 동작
- 압축성: 제한된 하드웨어에서도 실행 가능
- 유연성: 다양한 qLDPC 코드에 적용 가능
- 정확성: 모든 기존 방법보다 우수한 성능 확보
- IBM은 Relay-BP가 네 가지 조건을 모두 충족한 첫 실시간 디코더라고 강조

○ 개발 과정과 다학제적 접근

- 주도 연구원 Tristan Müller: 펌웨어 개발자 출신 → 다체물리학, 최적화 기법의 개념을 결합
- 개발 과정에서 비러생한 “음수 메모리 강도” 버그가 성능 개선에 기여 → 노드가 과거 메시지를 ‘잊는’ 방식이 효과적임을 발견
- 펌웨어 엔지니어링, 물리학, 수학, 소프트웨어 개발 등 다양한 분야가

협력

- IBM은 이러한 다학제적 접근을 양자컴퓨터 연구의 조직적 강점으로 강조
- 실시간 양자처리와 향후 계획
 - 현재 Relay-BP는 양자 메모리 안정화에 집중
 - 논리 연산을 포함한 완전한 실시간 양자 처리로 확장하려면 더 빠르고 더 소형화된 디코더 필요
 - IBM은 2026년 Kookaburra 시스템에서 Relay-BP를 실험적으로 적용 계획
 - 이는 Heron, Flamingo 등 중간 단계 시스템과, 최종적으로 Starling 아키텍처로 이어지는 IBM의 내결함성 로드맵에 포함
- 전망과 결론
 - Relay-BP는 최종 해법은 아니지만 실시간 양자 오류 정정의 중요한 진전으로 평가
 - 고전적 자원으로 구현 가능한 한계를 넓히고, 실험적 큐비트와 안정적 논리 회로 사이의 간극을 좁힘
 - IBM은 Relay-BP가 향후 양자 우위(quantum advantage) 달성을 위한 핵심 도구가 될 것이라 전망
 - 업계 전반에서도, 잡음 속에서 더 명확한 신호를 찾는 계기가 될 것으로 기대

(원문)

1. <https://thequantuminsider.com/2025/08/04/ibm-reports-decoder-could-push-quantum-computing-toward-fault-tolerance/>