

양자 알고리즘, 최적화 문제에서 고전적 해법 능가

(2025.05.20. 양자정보연구지원센터)

□ 양자 알고리즘, 최적화 문제에서 고전적 해법 능가하는 연구 결과 발표

○ 연구 배경

- Kipu Quantum과 IBM 공동 연구팀은 양자 컴퓨터가 특정 최적화 문제에서 고전적 알고리즘보다 실제 실행 시간(real runtime) 기준으로 빠르다는 실험 결과를 발표함
- 연구는 IBM의 156큐비트 양자 프로세서를 사용하여 수행되었으며, 고성능 고전적 소프트웨어(CPLEX, simulated annealing)를 능가함

○ 연구 목적

- 현재 존재하는 양자 하드웨어(NISQ 시스템)에서 실질적인 속도 우위를 달성할 수 있는지를 검증함
- 고전적 해법이 어려움을 겪는 고차 이진 최적화(HUBO) 문제에서 양자 시스템의 성능 평가

□ 연구 방법 및 알고리즘

○ HUBO 문제

- 고차 무제약 이진 최적화 문제(HUBO, higher-order unconstrained binary optimization)는 포트폴리오 구성, 네트워크 라우팅, 분자 설계 등 실제 문제를 모델링
- 해의 수가 지수적으로 증가하여 고전적으로 계산량이 많음

○ 사용한 양자 알고리즘, BF-DCQO(Bias-Field Digitized Counterdiabatic Quantum Optimization)

- counterbiatic 진화 방식: 양자 시스템이 낮은 에너지 상태로 빠르게 이동하도록 유도
- 디지털화된 얽은 회로(quantum gate layer)로 구성

- CVaR(Conditional Value-at-Risk) 필터링 사용: 최적 해에 가까운 측정 결과 상위 5%만 선택하여 다음 라운드에 반영
- 하드웨어 조건 및 최적화
 - IBM의 Marrakesh, Kingston 양자 프로세서 사용
 - 제한된 큐비트 연결성과 유한한 결맞음 시간에 맞춰 단일 swap layer로 문제를 임베딩
 - 고전적 사전처리(SA 기반 초기값) 및 후처리(로컬 서치)를 포함한 하이브리드 파이프라인 구성

□ 주요 결과

- 성능 비교
 - 156변수 문제에서 BF-DCQO는 약 0.5초 만에 높은 품질의 근사 해 도출
 - 동일 품질의 해를 얻는 데 CPLEX는 30~50초 소요(10 CPU 병렬 사용 기준)
 - 250개 고난도 문제 샘플에서 일부는 CPLEX 대비 80배, 시뮬레이티드 어닐링 대비 3배 빠름
- 성능 우위의 조건
 - INISQ 한계 내에서 문제 인스턴스를 정교하게 설계하여 큐비트 망에 효율적으로 임베딩
 - 고전적 해법에 불리한 난이도 높은 분포(Cauchy, Pareto)를 사용하여 양자 해법의 터널링 능력 부각
- 알고리즘 진화
 - BF-DCQO는 얇은 회로와 네이티브 연산(single-qubit rotation, 2/3-qubit interaction)만으로 구성되어 NISQ에 적합
 - 향후 고전 알고리즘보다 더 나은 해를 더 빠르고 정확하게 찾을 가능성 제시

□ 한계 및 향후 전망

○ 한계

- 보편적 양자 우위는 아님, 특정 구조의 문제 인스턴스에서만 효과 입증됨
- 제한된 회로 깊이와 노이즈로 인해 문제 설계가 필요하며 확장성에 제약 존재

○ 확장 가능성

- 문제 크기 증가 시 양자 알고리즘의 상대적 이점이 확대되는 경향을 확인
- 큐비트 간 연결성, 코히런스 시간, 게이트 충실도 향상 시 우위는 수 배에서 수십 배로 확대될 가능성

○ 실용적 가치

- 물류, 금융, 소재 등 최적화 기반 산업에 양자 시스템 실용화 가능성 제시
- IBM Jay Gambetta 부사장 발언: “현존 하드웨어에서 실용적 양자 최적화를 향한 또 하나의 진전이다”

(원문)

1. <https://thequantuminsider.com/2025/05/17/quantum-algorithm-outpaces-classical-solvers-in-optimization-tasks-study-indicates/>