

ParityQC, 게이트 수 및 회로 깊이 최적화 신기록 달성

(2025.02.14., 양자정보연구지원센터)

□ ParityQC의 Parity Twine, 게이트 수 및 회로 깊이 최적화 신기록 달성

○ 개요

- ParityQC는 최근 양자 푸리에 변환(Quantum Fourier Transform)과 같은 양자 알고리즘을 선형 체인에서 가장 효율적으로 구현하는 방법을 발표한 데 이어, 새로운 기술인 Parity Twine 소개
- Parity Twine 기법은 게이트 수와 회로 깊이라는 두 가지 핵심 지표에서 신기록을 수립, 기존의 모든 최첨단 방법을 능가하는 성능을 보임
- 이 방법은 선형, 사각 격자, 육각형, 사다리형 및 전체 연결(all-to-all connected) 양자 하드웨어를 포함한 다양한 플랫폼에서 최적의 성능 발휘함

○ 배경

- 최근 몇 년간 양자 컴퓨팅 분야는 급격히 발전을 이루었으며, 현재 양자 장치는 일부 특화된 작업을 최첨단 고전 컴퓨터와 동일한 수준으로 수행할 수 있음
- 양자 알고리즘을 다양한 하드웨어 플랫폼에서 효과적으로 구현하는 것은 여전히 중요한 도전 과제로 남아 있음
- 대부분 양자 하드웨어는 제한적인 큐비트 연결성을 가지며, 알고리즘 구현 시 추가적인 SWAP 게이트 또는 큐비트 셔들링과 같은 비용이 많이 드는 연산을 필요로 함

○ 혁신적인 해결책: Parity Twine, ParithQC 아키텍처 기반

- ParithQC와 인스부르크 대학 연구진은 이러한 문제를 해결할 수 있는 획기적인 방법 발표
- 논문(connectivity-aware Synthesis of Quantum Algorithms)에서

게이트 수와 회로 깊이를 동시에 최적화할 수 있는 일반적인 양자 알고리즘 구현 방법 제안

- 이를 통해 다양한 양자 하드웨어에서 최첨단 기법을 능가하는 성능 입증

○ Parity Twine 원리

- 이전 논문(Swap-less implementation of Quantum Algorithms)에서 Parity label tracking 기법을 도입, 게이트 수와 회로 깊이를 줄이는 방식으로 기존 알고리즘을 효율적으로 구현하는 방법 제시
- 게이트 수와 회로 깊이를 줄이는 방식으로 기존 알고리즘을 효율적으로 구현하는 방법 제시
- 새 논문에서 이를 더욱 확장하여, 연결성을 고려한 CNOT 기반 빌딩 블록인 Parity Twine 체인 도입

○ Parity Twine 체인 특징

- 양자 얽힘(entanglement)을 생성하면서 정보 전달
- 연결성에 따라 최적화된 CNOT 게이트 구성
- 선형 체인(LNN)에서는 쌍을 이룬 CNOT 게이트 시퀀스로 구성
- 전체 연결(all-to-all) 또는 기타 플랫폼에서는 단일 CNOT 게이트로 단순화 가능
- 연구진은 이를 활용하여 다섯 가지 주요 양자 하드웨어 플랫폼(LNN, all-to-all, 사각 격자, heavy hexagon, 사다리형)에서 알고리즘을 구현하는 일반적인 구성 방식 제시

○ 주요 성과 및 적용 사례

- 연구 결과, Parity Twine 방식은 두 가지 대표적인 양자 알고리즘에서 기존 방식보다 우수한 성능을 보임
- 양자 푸리에 변환(QFT): 양자 신호 처리 및 양자 컴퓨팅의 핵심 알고리즘
- 양자 근사 최적화 알고리즘(QAOA): 조합 최적화문제 해결에 사용

- 이 두 가지 알고리즘에서 게이트 수와 회로 깊이를 대폭 감소시켜, 현재까지 알려진 최고의 구현 방법보다 뛰어난 성능을 입증함

○ 연구의 핵심 포인트

(세계 최고 수준의 효율성)

- ParityQC 아키텍처는 물리적 연결서과 논리적 연결성을 분리하는 방식으로, 다양한 하드웨어 플랫폼에서 최적의 알고리즘 실행이 가능하도록 설계됨
- 선형 체인부터 전체 연결 시스템까지 모든 연결 구조에서 동작하며, 기존 구현 방식 대비 탁월한 성능을 보임

(특정 사례에서의 최적성 입증)

- 특정 하드웨어 환경에서 게이트 수 및 회로 깊이가 이론적으로 최소화될 수 있음을 엄밀히 증명함

(연결성을 고려한 알고리즘 설계)

- 다양한 연결성을 갖는 하드웨어에서 효율적으로 적용할 수 있는 일반적인 CNOT 회로 생성 프레임워크를 제공함

(QAOA 및 QFT에서의 성능 향상)

- 연구진은 두 가지 대표적인 양자 알고리즘(QAOA, QFT)에 Parity Twine을 적용하여 기존 알고리즘 대비 게이트 수와 회로 깊이를 크게 줄이는 데 성공함

○ 양자 알고리즘 최적화의 새로운 기준을 제시하였고, 다양한 하드웨어에서 효율적인 양자 연산을 가능하게 하는 획기적인 방법론 개발함

(원문)

1. <https://thequantuminsider.com/2025/01/28/parityqcs-parity-twine-sets-record-in-optimizing-gate-count-circuit-depth/>