

Grover search 알고리즘 기반 Zero-Noise Extrapolation 구현 및 분석

김보선, 손일권, 배광일, 송우영, 이창열, 이원혁

한국과학기술정보연구원

{boseon12, d2estiny, kibae, wysong, livezone, lcy253898}@kisti.re.kr

Zero-Noise Extrapolation for Grover Search Algorithm: Implementation and Analysis

Boseon Kim, IlKwon Sohn, Kwangil Bae, Wooyeong Song, ChangYeol Lee, Wonhyuk Lee

Korea Institute of Science and Technology Information.

요약

NISQ(Noise Intermediate-Scale Quantum)는 중간 규모의 노이즈가 있는 현재의 양자 컴퓨터로 양자 게이트, 큐비트 유지와 같은 과정에서 오류가 발생하는 노이즈와 같은 물리적인 한계점이 존재한다. 따라서 오류 영향을 줄이기 위해 노이즈가 없는 상태의 이상적인 결과값을 추정하는 양자 오류 완화(Quantum Error Mitigation) 기법 연구가 필요하다. Grover search 알고리즘은 검색 문제를 빠르게 푸는 양자 알고리즘으로 양자 오류 완화를 적용하여 노이즈가 있는 환경에서 노이즈가 없는 환경의 이상적인 정답 상태 확률을 추정할 수 있다. Zero-Noise Extrapolation은 동일한 양자 회로를 여러 노이즈 스케일에서 여러 번 실행하여 해당 실행 결과를 토대로 노이즈가 0일 때의 값을 추정한다. 본 연구는 4큐비트 Grover search 알고리즘 기반 Zero-Noise Extrapolation을 구현하여 노이즈가 0일 때의 정답 상태 확률을 높이는 것을 목표로 한다.

I. 서론

NISQ(Noise Intermediate-Scale Quantum)는 중간 규모의 노이즈가 있는 현재의 양자 컴퓨터로 물리적인 한계점이 존재한다. 양자 게이트, 큐비트 유지와 같은 과정에서 오류가 발생하는 노이즈 외에도 계산 도중 정보를 손실할 수 있는 디코히런스 시간, 게이트 오류, 측정 오류, 스케일 한계와 같은 문제점으로 인해 정확하고 복잡한 양자 알고리즘을 실행하기 어렵다. NISQ의 오류 영향을 줄이는 기법으로 결과를 조정하는 양자 오류 완화(Quantum Error Mitigation) 기법이 필요하다. 해당 기법은 양자 오류 정정(Quantum Error Correction)에 비해 큰 리소스가 필요하지 않고 결과를 노이즈 없는 값에 가깝게 조정할 수 있다. 양자 오류 완화의 대표적인 기법으로는 Zero-Noise Extrapolation과 Probabilistic Error Cancellation 등이 있다.

Grover search 알고리즘은 검색 문제를 빠르게 푸는 양자 알고리즘으로 Initialization, Oracle, Diffusion, Iteration, Measurement 과정으로 동작한다. Oracle은 정답을 표시하는 역할이고 Diffusion은 정답 상태 확률을 증폭시키는 역할이다. Oracle과 Diffusion을 반복해서 최종적으로 정답 상태 확률을 1에 가까워지게 한다.

본 연구는 Grover search 알고리즘 기반 Zero-Noise Extrapolation 기법을 구현하고자 한다. 정확한 정답 상태 확률 증폭은 Grover search 알고리즘의 핵심이다. 하지만 NISQ 노이즈는 반복할수록 게이트 오류가 누적되면서 증폭된 확률이 왜곡되어 알고리즘의 성능을 저하할 수 있다. 따라서 Zero-Noise Extrapolation을 통해 노이즈가 없는 상태의 결과를 추정하는 것이 중요하다. 우리는 4큐비트 Grover search 알고리즘에 적합한 Zero-Noise Extrapolation을 구현하여 정답 상태 확률을 극대화하고자 한다.

1장에 이어 2장은 Zero-Noise Extrapolation 기법을 소개하고 Grover search 알고리즘 기반 Zero-Noise Extrapolation 구현 및 동작 과정을 설명한다. 3장은 시뮬레이션 결과를 통해 양자 오류 완화 효과를 분석하고 마지막으로 4장은 구현 내용을 정리하고 향후 연구 방향을 제시하고자 한다.

II. 본론

i. Grover search 알고리즘 기반 Zero-Noise Extrapolation

Zero-Noise Extrapolation 기법은 동일한 양자 회로를 여러 노이즈 스케일에서 여러 번 실행하여 해당 실행 결과를 토대로 노이즈가 0일 때의 값을 추정한다. 노이즈 스케일에 따라 회로를 폴딩(folding)하여 실행한다. 이는 노이즈를 직접 제거하지 않고 노이즈가 0일 때의 결과를 외삽으로 추정하는 기법이다. 외삽 기법으로는 linear, polynomial, richardson이 있다.

본 연구에서 사용한 알고리즘은 특정 정답 상태인 '1001'을 찾기 위한 4큐비트 Grover search 알고리즘이다. Grover 반복을 통해 '1001'의 정답 상태 확률을 높이는 것을 목표로 한다. Grover search 알고리즘에 적용할 Quantum Error Mitigation 기법인 Zero-Noise Extrapolation은 노이즈가 있는 양자컴퓨터에서 노이즈가 없는 상태의 '1001'의 정답 상태 확률을 추정한다. 노이즈 스케일이 1이면 기본 Grover search 회로로 정답 상태 확률 $f(1)=0.73$ 일 때, 노이즈 스케일이 3이면 회로를 3번 폴딩하게 되고 정답 상태 확률이 $f(3)=0.57$ 일 수 있다. 노이즈 스케일이 5이면 회로를 5번 폴딩하게 되고 정답 상태 확률이 $f(5)=0.45$ 일 수 있다. 외삽을 통해 노이즈 스케일이 0일 때를 예측하여 높은 확률의 정답 상태를 추정할 수 있다.

ii. Zero-Noise Extrapolation 구현

Zero-Noise Extrapolation은 회로 실행 결과에서 노이즈를 제거한 이상적인 특정 상태가 측정될 확률 또는 기댓값을 추정하는 기법이다. 본 연구는 노이즈 스케일마다 상태 측정 횟수를 출력하고 추출한 노이즈 스케일을 통해 노이즈가 0일 때의 정답 상태 출력 확률을 출력하고자 한다. 4 큐비트 Grover search 알고리즘은 '1001' 정답을 목표로 한다. 시뮬레이션을 위해 백엔드는 AerSimulator 시뮬레이터에 노이즈 모델을 적용한다.

첫 번째로 Grover search 알고리즘을 여러 노이즈 스케일(1, 3, 5)로 폴딩하여 실행한다. 이는 회로를 노이즈 스케일만큼 반복하여 회로를 늘리는 과정이다. 폴딩 과정은 노이즈를 인위적으로 추가함으로써 이상적인 결과값을 추정하기 위해 사용한다. 그림 1, 2, 3은 노이즈 스케일이 1, 3, 5일 때 폴딩 결과를 보여준다. 노이즈 스케일이 1이 넘을 경우, 회로를 노이즈 스케일만큼 반복하고 측정한다.

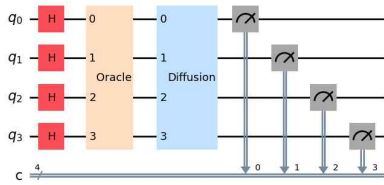


그림 1 Zero-Noise Extrapolation : folding(noise_scale=1)

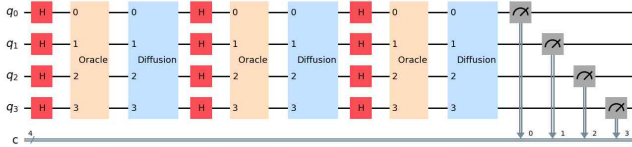


그림 2 Zero-Noise Extrapolation : folding(noise_scale=3)

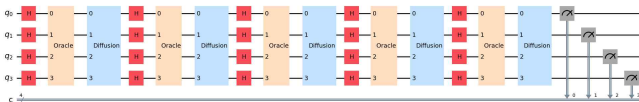


그림 3 Zero-Noise Extrapolation : folding(noise_scale=5)

두 번째로 원하는 회로 실행 횟수(shot=8192)만큼 폴딩한 회로를 실행하고, get_counts()를 통해 각 노이즈 스케일의 상태 측정 횟수를 추출한다. 노이즈 스케일마다 상태별 측정 횟수가 추출되고 횟수 총합은 회로 실행 횟수다. 그림 4는 노이즈 스케일 1과 5일 때의 상태별 측정 횟수다. 노이즈 스케일이 커질수록 정답인 '1001'의 측정 횟수가 감소하는 것을 알 수 있다.

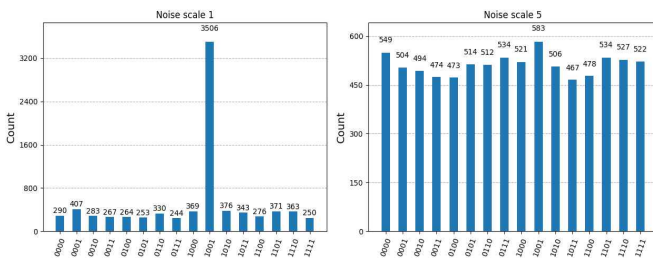


그림 4 Grover search 알고리즘 상태 측정 횟수
(noise_scale=1), (noise_scale=5)

세 번째로 외삽을 위해 get_counts()의 결과인 상태 측정 횟수를 확률 분포로 변환한다. 변환한 확률 분포는 정답 상태 확률을 나타내며 노이즈 스케일 1, 3, 5일 때의 정답 상태 확률을 외삽한다. 외삽 기법 중 polynomial을 적용한다.

노이즈 스케일 1, 3, 5를 통해 노이즈 스케일 0일 때의 정답 상태 확률을 추정하였고 그림 5와 같다. 기존 Grover search 알고리즘은 노이즈 1을 나타내는데 노이즈 스케일 0일 때의 정답 상태 확률이 더 높은 것을 알 수 있다. 이는 노이즈 스케일링인 회로 반복을 통해 이상적인 정답 상태 확률이 추정되었음을 나타낸다. 하지만 노이즈 스케일이 증가함에 따라 Grover search 알고리즘의 반복 횟수 또한 증가하여 역증폭(overshooting) 현상이 발생한다. Grover search 알고리즘에 Zero-Noise Extrapolation을 적용할 경우, 적절한 알고리즘 반복 횟수와 노이즈 스케일링이 필요하다.

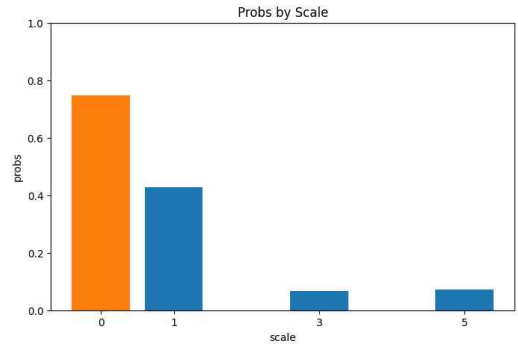


그림 5 Grover search 알고리즘 기반 Zero-Noise Extrapolation 결과
노이즈 스케일별 '1001' 정답 상태 확률

III. 결론

4큐비트 Grover search 알고리즘 기반 Zero-Noise Extrapolation 구현을 통해 노이즈가 있는 환경에서 노이즈가 없는 환경의 이상적인 정답 상태 확률을 추정함으로써 Grover search 알고리즘을 보다 좋은 성능으로 보였다. 하지만 Grover search 알고리즘의 반복과 Zero-Noise Extrapolation의 폴딩이 실행되면서 반복 횟수가 많아지면 오히려 정답 상태 확률이 떨어지는 역증폭되는 현상을 알 수 있었다. 정답 상태 확률은 이상적인 결과를 나타내지만, 적절한 반복 횟수를 사용하지 않을 경우, 성능이 좋지 않기 때문에 알고리즘 특성에 맞춰 적합한 폴딩 구현을 진행할 예정이다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 2024년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 국가과학기술연구회 창의형 융합연구사업(No. CAP22053-000)의 지원을 받아 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] Giurgica-Tiron, Tudor, et al. "Digital zero noise extrapolation for quantum error mitigation." 2020 IEEE International Conference on Quantum Computing and Engineering (QCE). IEEE, 2020.
- [2] Endo, Suguru, et al. "Hybrid quantum-classical algorithms and quantum error mitigation." Journal of the Physical Society of Japan 90.3 (2021): 032001.