

Quantum Error Mitigation을 위한 Qiskit 기반 Zero Noise Extrapolation Factor에 관한 연구

김보선, 손일권, 배광일, 이원혁

한국과학기술정보연구원

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

A Study on Zero Noise Extrapolation Factor based on Qiskit for Quantum Error Mitigation

Boseon Kim, IlKwon Sohn, Kwangil Bae, Wonhyuk Lee
Korea Institute of Science and Technology Information.

요약

고전 컴퓨터에 비해 양자컴퓨터는 양자 중첩 원리에 의해 더 많은 정보를 동시에 표현할 수 있지만, 노이즈에 매우 취약하여 연산 중에 오류가 발생할 수 있다. 따라서 양자컴퓨팅을 위해 오류를 줄이기 위한 연구들이 진행되고 있으며, 본 논문은 Quantum Error Mitigation을 위해 Qiskit 기반 Zero-noise Extrapolation 기법을 사용하여 Grover 알고리즘에 적합한 파라미터에 따른 실험 결과를 분석하여 효과적인 factor를 찾고자 한다.

I. 서론

고전 컴퓨터의 정보 단위인 비트는 0과 1로 표현되며, 2비트일 경우 00, 01, 10, 11 중 하나의 값을 가진다. 비트를 사용하여 동시에 여러 가지 정보를 갖지 못한다. 반면에 양자컴퓨터의 정보 단위인 큐비트의 양자 중첩 원리에 의해 0과 1의 상태를 동시에 가질 수 있으며, 2큐비트일 경우 가능한 정보의 가짓수인 네 가지 모두 동시에 가질 수 있다. 이에 큐비트는 현재 사용하는 비트보다 더 많은 정보를 동시에 표현할 수 있다. 따라서 큐비트 수가 늘어날수록 기하급수적으로 많은 상태를 처리하고 계산할 수 있다. 하지만 큐비트는 동시에 여러 상태로 나타나 노이즈에 취약하다 보니 연산 중에 오류가 발생할 수 있어서 이를 해결하는 것이 매우 중요한 과제이다. '노이즈'로 불리는 오류를 해결하기 위해 Google과 IBM 외에도 여러 분야에서 오류 영향을 줄이는 기법에 관한 연구를 진행하고 있다.

Error Mitigation 기법은 노이즈에 의한 양자 컴퓨터 오류를 줄이는 방법으로, 오류에 의해 결과가 왜곡될 경우 해당 오류를 최소화하거나 보정함으로써 이상적인 결과를 추론할 수 있게끔 한다[5].

우리는 Qiskit을 사용하여 Zero-noise extrapolation 기법을 통해 양자 오류 완화 실험을 통해 Grover 알고리즘에 적합한 파라미터에 따른 실험 결과를 분석하고자 한다.

1장 서론에 이어 2장에서 Zero-noise extrapolation 실험에 관해 설명하고 3장에서 실험 결과 및 비교 분석한다.

II. 관련 연구

Error Mitigation을 위한 기법은 크게 ZNE(Zero Noise Extrapolation), PEC(Probabilistic Error Cancellation), CDR(Clifford Data Regression)이 있다.

ZNE는 양자 게이트의 실행 시간을 조절하여 노이즈를 줄이는 방법으

로, 노이즈가 있는 상태의 결과를 통해 게이트의 실행 시간을 조절하여 노이즈가 없는 상태에서 결과를 계산한다. 비교적 간단하게 구현이 가능하지만, 게이트 실행 시간으로 인해 큐비트가 커질수록 계산이 복잡해진다 [1].

PEC는 여러 개의 양자 비트를 활용하여 오류를 감지하고 보정한다. 오류 발생 확률을 계산하여 오류를 보정하여 결과를 얻는다. 확률적으로 오류를 보정하기 때문에 유연한 구현이 가능하지만, 확률상 정확한 보정이 어려울 수 있고, 복잡한 경우 적용하기 어렵다[2].

CDR은 clifford 게이트를 사용하여 양자 연산하는데, 해당 게이트의 동작을 이해하고 예측하여 오류를 보정한다. clifford 게이트에 적합한 데이터의 경우 효과적인 구현이 가능하지만 적합하지 않을 경우 데이터 정확성이 떨어질 수 있다[3].

III. 본론

`zne.execute_with_zne`의 파라미터 `factory`를 통해 선택한 노이즈 수준에서 실행된 계산 결과를 기록하고, 다음 계산을 실행해야 하는 노이즈 스케일 팩터를 결정된 후 인자와 결과 기록이 주어지면, 관련된 `zne`를 평가한다[4]. `factory`는 ZNE 실험을 구성하는 방법을 결정하는 구성 요소로, `zne.inference`에서 사용되며, `BatchedFactory`, `AdaptiveFactory`, `LinearFactory`, `RichardsonFactory`, `PolyFactory`, `ExpFactory`가 있다.

`BatchedFactory`는 실험을 한번 실행한 후 결과를 처리하는 방법으로, 노이즈 스케일 인자가 고정되고 노이즈 스케일링 회로 배치가 측정된다. 모든 데이터를 동시에 처리하기 때문에 한 번에 모든 데이터를 계산할 수 있지만, 초기 데이터 준비 시간이 오래 걸릴 수 있다.

`AdaptiveFactory`는 노이즈 척도 인자가 측정된 결과의 기록에 따라 달라지는 방법으로, 실험은 여러 개로 나누어 실행하고 각 그룹의 결과를

토대로 다음 그룹의 실험을 조정하여 다시 실험한다. 적응형 외삽법으로 회로에 최적화된 기법이지만, 여러 실험을 통해 결과를 반영하기 때문에, 계산 시간이 오래 걸린다.

LinearFactory는 선형 보간을 사용하여 보정된 결과를 계산한다. 간단하게 사용할 수 있지만, 선형 계산으로 복잡한 계산을 수행하기 힘들다.

RichardsonFactory는 richardson extrapolation을 사용하여 더 다양한 데이터 포인트를 사용하여 보정된 결과를 계산한다. 하지만, 데이터 포인트가 많은 만큼 더 많은 계산력이 필요하다. 간단한 계산을 수행하면 LinearFactory가 효율적이지만, 더 정확한 결과를 얻어야 하면 RichardsonFactory가 좋다.

PolyFactory는 다항식 보간을 사용하여 보정된 결과를 계산한다. LinearFactory에 비해 더 정확한 결과를 얻을 수 있지만, 선형 보간에 비해 복잡하다.

ExpFactory는 지수 함수를 사용하여 보정된 결과를 계산한다. 지수 함수는 빠른 데이터 변화에 적합하지만, 복잡하여서 계산 비용이 많다.

우리는 Qiskit을 통해 Grover 알고리즘의 오류 완화를 위해 적합한 Zero noise extrapolation을 적용하기 위해 다섯 가지 factory를 조정하고자 한다. 여섯 가지 factory는 다음과 같다. BatchedFactory, LinearFactory, RichardsonFactory, PolyFactory, ExpFactory

IV. 실험

Grover 알고리즘에 적합한 factory를 찾기 위해 동일한 환경에서 실험을 진행했으며, 노이즈 스케일 팩터는 조정을 통해 적합한 팩터를 선택하여 실험을 했다. 노이즈가 없는 환경과 노이즈가 있는 환경, 노이즈가 있는 환경에서 Error mitigation을 수행하여 노이즈가 없는 환경에서의 측정값을 통해 노이즈가 있는 환경에서 Error mitigation 적용 여부에 따른 측정값의 결과를 비교하고자 한다. 노이즈가 있는 환경에서 Error mitigation을 수행했을 때, 측정값의 오류 영향이 줄어들었는지 확인하기 위해 측정값의 도출 횟수를 추출하여 비교한다.

BatchedFactory, LinearFactory, RichardsonFactory, ExpFactory 는 기댓값을 측정하는 노이즈 스케일 팩터의 시퀀스인 scale_factors가 있다.

PolyFactory는 scale_factors와 다항식 적합도를 위한 외삽 차수인 order가 있으며, len(scale_factors-1)을 초과할 수 없다.

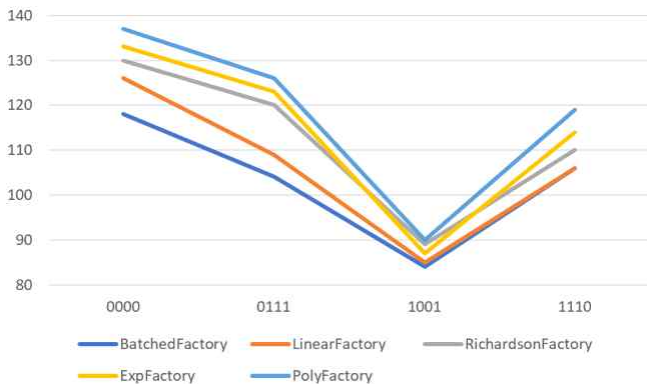


그림 1 Error Mitigation을 적용한 Factor에 따른 측정값 정확도

BatchedFactory와 LinearFactory는 비교적 간단한 방법으로 노이즈가 있는 환경에서 ZNE를 적용했을 때, BatchedFactory는 118%, 104%, 84%, 106%, LinearFactory는 126%, 109%, 85%, 106% 오류 완화 효과가

있었다.

RichardsonFactory는 130%, 120%, 89% 110%로, 위 두 가지 방법에 비해 더 정교한 오류 완화 효과가 있음을 알 수 있다.

ExpFactory는 지수함수를 사용하여 133%, 123%, 87%, 114%, PolyFactory는 다항식을 사용하여 137%, 126%, 90%, 119%로 높은 노이즈 레벨에서 오류 완화 효과가 있음을 알 수 있다.

실험 결과를 토대로 비교적 간단한 계산을 필요로 하는 BatchedFactory와 Linear Factory는 노이즈가 있는 환경에서 Error Mitigation을 적용했을 때 오류 영향이 감소했지만, 다른 방법에 비해 효과가 미비했다. RichardsonFactory와 ExpFactory, PolyFactory는 다양한 포인트 사용 및 함수 등을 사용하여 정교한 오류 완화를 볼 수 있다.

V. 결론

양자 컴퓨터의 문제점인 노이즈로 인한 계산 오류를 해결하기 위해 Quantum Error Mitigation 방법 중 Zero-noise extrapolation을 사용하여 실험을 진행하였다. Zero-noise extrapolation의 옵션 중 하나인 factor는 보정된 결과를 계산하는데 사용되는 방법으로 계산 효율성 및 경량화와 같은 여러 가지 장단점이 존재하기 때문에 각 데이터에 알맞은 factory를 사용해야 한다. 간단한 계산을 통해 보정할 경우 계산 시간이 단축되지만 간단한 데이터에 적합하고, 복잡한 계산을 통해 보정할 경우 계산 시간은 늘어나지만 많은 계산 비용이 들어간다. 따라서 데이터의 특성을 고려하여 적합한 factor를 선택해야 한다. 실험을 통해 Polyfactory와 ExpFactory가 상대적으로 높은 정확도를 제공하였으며, 해당 Grover 알고리즘에 효과적으로 작동하였다. 하지만 큐비트가 커질수록 계산 복잡도가 훨씬 증가할 수 있다. 따라서 PolyExpFactory, AdaExpFactory와 같은 계산 효율과 정확도를 모두 지닌 factory에 대한 분석이 필요할 것으로 보인다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 2023년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 국가과학기술연구회 창의형 융합연구사업(No. CAP22052-000)의 지원을 받아 수행되었고, 2024년도 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다. (No. (KISTI) N24NM022-241)

참 고 문 헌

- [1] LI, Ying; BENJAMIN, Simon C. Efficient variational quantum simulator incorporating active error minimization. *Physical Review X*, 2017, 7:2: 021050.
- [2] ENDO, Suguru; BENJAMIN, Simon C.; LI, Ying. Practical quantum error mitigation for near-future applications. *Physical Review X*, 2018, 8:3: 031027.
- [3] CZARNIK, Piotr, et al. Error mitigation with Clifford quantum-circuit data. *Quantum*, 2021, 5: 592.
- [4] Unitary Fund, Mitiq, (<https://mitiq.readthedocs.io>)
- [5] Cai, Z., Babbush, R., Benjamin, S. C., Endo, S., Huggins, W. J., Li, Y., ... & O'Brien, T. E. (2023). Quantum error mitigation. *Reviews of Modern Physics*, 95(4), 045005.