

실 환경 양자 오류 모델을 고려한 Quantum Error Mitigation 기법 개발

민건식, 오현수, 이상욱, 허준*

*고려대학교

mgs3351@korea.ac.kr, pypaul@korea.ac.kr, sbr06008@korea.ac.kr, junheo@korea.ac.kr

Development of Quantum Error Mitigation Techniques Considering Realistic Quantum Noise Models

Min Gun Sik, Lee Sang Uk, Oh Hyun Su, Heo Jun*

Dept. of Electrical Engineering, Korea University*

요 약

본 논문은 NISQ 환경 양자 컴퓨팅에 사용되는 양자 알고리즘의 오류를 경감시키는 기법에 대한 최근 연구 동향에 대해 기술한다. 양자 오류 완화 기법중 하나인 Zero Noise Extrapolation(ZNE), Probabilistic Error Cancellation(PEC), Symmetry Verification(SV), Virtual Distillation(VD) 기법을 실제 환경에서 구현하고 새로운 기법으로 개발하는 등의 최근 연구에 대해 기술한다.

I. 서 론

NISQ 환경의 양자 알고리즘에 해당하는 variational quantum algorithm, Quantum approximate optimization algorithm 등의 양자-고전 하이브리드 알고리즘은 양자 컴퓨터의 측정값을 토대로 계산된 기대값을 필요로 하다. NISQ 환경에서는 결함 허용 양자 컴퓨팅과 달리 오류를 정정하지 않아 기댓값에도 영향을 주므로, 결과적으로는 양자 알고리즘의 정확도 및 성능에 영향을 준다. 양자 오류 경감 기법은 양자 컴퓨터의 최종 측정값에 포함될 오류만을 타겟으로 하기 때문에 자원 부담이 적어진다. 본 논문에서는 이 양자 오류 경감 기법을 연구하는 과제의 최근 연구에 대해 다룬다.

II. 본론

● 양자 오류 완화의 기법 중 하나인 Zero Noise Extrapolation(ZNE)[1]을 IBMQ 시뮬레이션을 이용하여 그로버 알고리즘(Grover Algorithm)에 적용

그로버 알고리즘에 ZNE를 적용한 후, IBMQ 백엔드(ibmq_brussels)에 실제로 구현하여 target을 찾을 확률이 ZNE를 적용하지 않았을 때보다 증가한 것을 확인하였다. 그로버 알고리즘처럼 복잡한 회로를 여러 번 folding했을 때는 target을 탐색하는 능력이 거의 없어지는 것을 확인하였다.

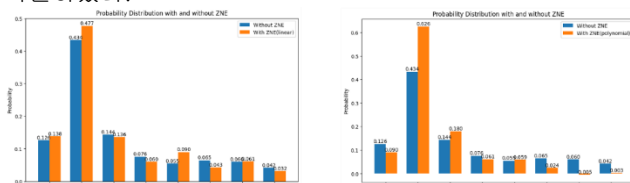


그림 1 IBMQ backend에서 그로버 알고리즘에 ZNE를 적용한 결과

● 양자 오류 완화의 두 기법 Symmetry Verification(SV)[2]과 Virtual Distillation(VD)의 결함을 통해 향상된 성능의 Symmetry Preserved Distillation(SPD) 기법 제안

성능을 확인하기 위해 Bell-State를 만드는 회로에 적용한다. 들어온 양자 상태에 대하여 SV를 선택한 이후 VD를 적용하는 상황에서 기존의 VD보다 더 적은 복사본 개수를 가지고도 향상된 오류 완화를 가질 수 있는 조건을 분석하였다. 양자 알고리즘 회로에 SV만 적용한 경우, VD만 적용하는 경우, SPD를 적용하는 세 가지 경우를 비교해 보았을 때, SV와 VD를 동시에 적용하는 것이 더욱 이상적인 값에 가까운 모습을 확인하였다.

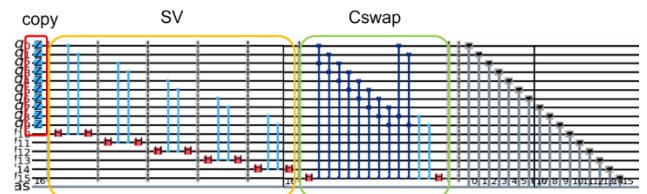


그림 2 Bell-state를 만들기 위한 회로에 SPD를 적용한 QISKIT 회로도

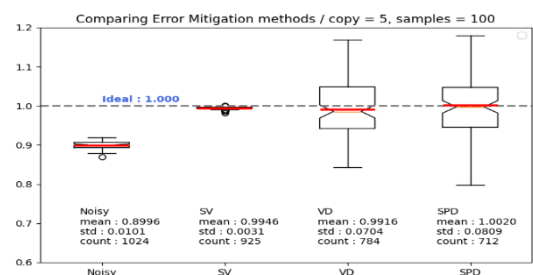


그림 3 QISKIT 시뮬레이션을 통해 구한 각 오류 완화 기법 성능 그래프

그림 3의 모집단 크기는 100, shot수는 1024, std는 표준 편차, count는 각 기법들의 특성으로 인해 버리지 않은 시행의 횟수이다.

● Variational algorithm에 적용한 symmetry verification 오류 저감 성능 개선 연구

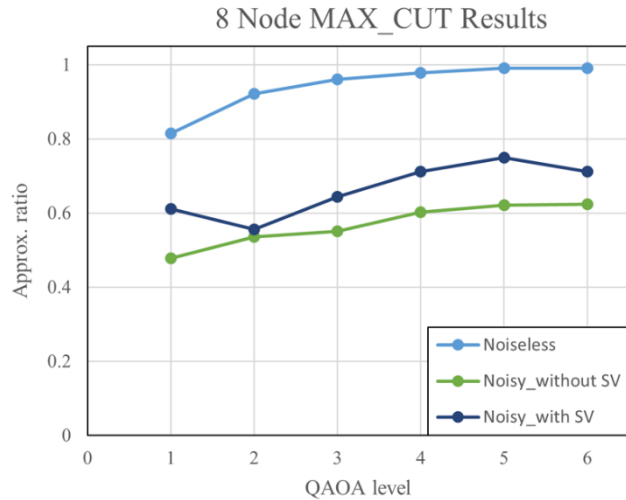


그림 4 QAOA 최종단에 적용한 noisy channel 에서의 SV 성능 그래프

그림 4는 8개의 node 로 이루어진 random graph MAX-CUT 문제를 해결하기 위한 variational algorithm QAOA 에 적용한 SV 기법 성능 비교 그래프이다.

$S|\beta, \gamma\rangle = |\beta, \gamma\rangle$ 조건을 만족하는 symmetry operator Pauli-X를 설정하여 알고리즘 최종단에서 오류를 검출하여 기대 값을 추출하는 그래프로 depolarizing noisy channel을 가정하여 시뮬레이션을 진행하였다. SV를 적용했을 때 성능 개선을 확인하였으나 실제 output state의 Pauli-Z 오류만 검출하여 높은 성능 개선을 얻진 못하였다.

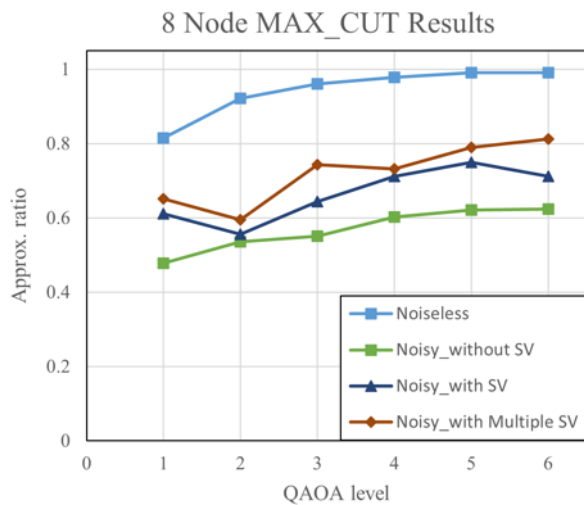


그림 5 QAOA 의 각 Hamiltonian unitary evolution 연산에 적용한 SV 성능 그래프

그림 5는 QAOA 의 각 단계마다 적용한 위와 같은 문제를 해결하는 알고리즘에 적용한 SV 의 성능 그래프이다. 각 단계의 오류 검출을 위한 symmetry operator 들은 모두 commute 하며 단계의 output state와 모두 stabilized 되어있다. 기존 SV 성능 대비 개선된 성능을 얻었으나

실제 이를 구성하기 위해서는 QAOA level(d)를 가정할 경우, 추가적인 ancilla qubit 개수 N 에 대하여 $N=2d+1$ 개수가 필요하고 이에 따른 측정이 필요하다. 측정 과정에서의 오류율을 가정하지 않았으므로 측정 횟수를 줄이는 기법 적용이 필요하며 이를 통해 측정 오류율을 개선할 것으로 기대된다.

III. 결론

본 논문에서는 양자 오류 완화 기법들의 실 환경에서 구현과 그 기법들의 성능을 개선한 새로운 설계법을 제시하였다. 실제 NISQ 환경에서는 양자 연산중의 idling error, 양자 큐비트 측정 중의 idling error 그리고 연산자 error 로 오류가 발생하는데 그 중 연산 오류를 가정하여 구현하였다. 이는 오류 모델을 완벽히 구현한 것은 아니며 실제로는 측정 과정에서의 오류가 더 치명적이기에 추가적인 연구가 필요하다. 또한, 제안하는 새로운 기법을 복잡한 양자 알고리즘에 적용하기 위해선 coherence time, qubit 등의 자원들이 뒷받침 되어야 실제 구현이 가능하기에 이러한 자원들이 해결될 경우 실효성이 증가 될 것으로 기대된다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원-대학 ICT 연구센터(ITRC)의 지원(RS-2021-II211810, 100/2)과 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원(No. RS-2023-00225385, 100/2) 지원을 받아 수행된 연구임

참 고 문 헌

- [1] A He, B Nachman, WA de Jong, CW Bauer, "Zero-noise extrapolation for quantum-gate error mitigation with identity insertions", Physical Review A 102 (1), 012426 e, 2020
- [2] X Bonet-Monroig, R Sagastizabal, M Singh, TE O'Brien "Low-cost error mitigation by symmetry verification", Physical Review A, 2018