MWPM 디코더를 이용한 SC-17 디코딩 구현

국성연, 강유진, 정유신, 오현수, 허준*
고려대학교

viviangood@korea.ac.kr, yujin20@korea.ac.kr, jeongys604@korea.ac.kr, pypaul@korea.ac.kr,
*junheo@korea.ac.kr

Implementation of SC-17 decoding using MWPM decoder

Sungyeon Kook, Yujin Kang, Youshin Chung, Hyunsu Oh, Jun Heo*
Korea Univ.

요 약

본 논문은 SC-17 의 논리적 큐비트를 IBM Qiskit 시뮬레이터에서 구현하였으며, MWPM 디코더를 이용해 신드롬 그래프를 통한 오류를 검출 및 정정하였다. SC-17 에서 MWPM 디코더의 신드롬 그래프 형태를 시뮬레이터를 통해 제시하고 디코더의 오류 검출 방식을 확인하였다.

Ⅰ. 서 론

양자 컴퓨터는 물리적 환경에 대한 민감성과 큐비트 간 상호작용으로 인해 오류에 취약하다. 오류에 의한 양자 정보 신뢰성 저하를 극복하기 위해 양자 오류 정정 부호 (Quantum Error Correction Code, QECC)가 개발되었다. QECC 는 큐비트의 물리적인 불안정한 특성을 보호하기 위해 여러 개의 물리적 큐비트를 하나의 논리적 큐비트로 인코딩하여 정보를 보호한다. 안정자 부호 (stabilizer code)는 측정 큐비트를 이용해 물리적 큐비트의 오류를 검출하는 양자 오류 정정 부호이며 큐비트의 안정성 향상에 효율적으로 기여한다.

서피스 부호(Surface Code)는 안정자 부호의 한 종류로, 초전도 큐비트 시스템에서의 구현에 적합해 주목받고 있다. 논리적 큐비트를 생성하고 유지하는데 필요한 높은 임계값과 낮은 오류율을 제공한다. 서피스 부호는 격자 구조를 통해 오류 신드롬을 효과적으로 식별할 수 있는데, MWPM (Minimum Weight Perfect Matching) 디코더는 격자 구조를 이용한 서피스 부호의 효과적인 디코딩에 적합하다. MWPM 디코더는 오류가 검출된 신드롬을 그래프 구조의 노드로 변환하고, 이 노드들 사이의 최소 가중치를 갖는 경로를 찾아 물리적 큐비트 간의 오류 패턴을 디코딩한다. 본 논문에서는 IBM Qiskit 시뮬레이터를 이용하여 거리가 3 인 서피스 부호 SC-17(Surface Code-17)의 논리적 큐비트를 구현하고 MWPM 디코더를 이용해 SC-17 의 오류를 검출, 정정하였다[1-2].

Ⅱ. 본론

1. SC-17

SC-17 은 9 개의 데이터 큐비트(data qubit)와 8 개의 측정 큐비트(measurement qubit)로 1 개의 논리 큐비트를 구현하는 d=3 인 서피스 부호이다. 서피스 부호의 안정자는 X, Z 안정자로 구성되며 측정 큐비트와 데이터 큐비트의 CNOT 연산으로 구현된다. SC-17 의 서피스 부호 구조와 구현 회로는 그림 1 과 같다. 시뮬레이션을 통해 데이터 큐비트의 측정 결과로 논리 큐비트가 16 개 상태의 중첩으로 이루어짐을 확률적으로 확인하였다.

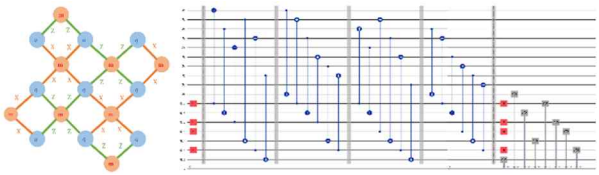

그림 1. SC-17 논리적 큐비트와 신드롬 추출 회로

그림 2. SC-17 논리적 큐비트 확인 시뮬레이션 결과

2. MWPM 디코더

MWPM 디코더는 격자 구조 상의 노드를 연결해 최소 가중치 (weight)의 엣지를 이용하는 디코딩으로 서피스 부호 디코딩에 적합하다. MWPM 디코더에서는 오류 신드롬을 노드로, 오류 사이 가능한 연결을 엣지로 표현하여 그래프를 구성한다. 그래프의 각 엣지에는 오류 쌍 사이 오류 발생 가능성을 토대로 가중치를 할당한다. 오류 발생 가능성은 신드롬 간 거리가 가까울수록 높다.

신드롬 그래프에서 최적화 알고리즘을 통해 최소 가중치 노드 쌍을 찾으며, 최소 가중치 완벽 매칭은 최적화 알고리즘의 성능에 기반한다. 최소 가중치의 매칭된 각 쌍은 실제로 오류가 발생한 위치를 나타내기 때문에, 오류 발생 위치의 데이터 큐비트에 오류 gate 를 적용하여 오류를 정정한다[3-8].

3. SC-17 MWPM 디코딩

그림 1 의 SC-17 부호 구조의 X, Z 오류 신드롬을 노드로, 오류 사이 연결을 엣지로, 신드롬 간 거리를 가중치로 그래프를 할당하여 MWPM 디코딩 그래프를 만든다. 그림 3 은 오류 신드롬을 노드로 갖는 SC-17 에 대한 신드롬 그래프이다.

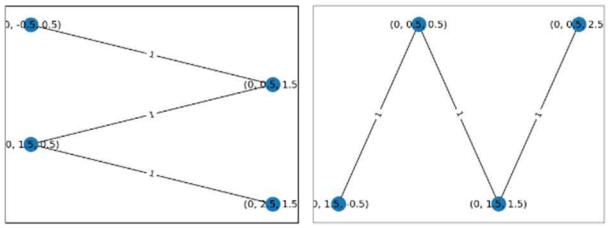

그림 3. SC-17 에서 X, Z 측정 큐비트 그래프

SC-17 에서 X, Z 오류의 신드롬은 각 2^4개가 나타날 수 있고 거리에 따른 가중치는 최소 1, 최대 3 이다. 최소 가중치는 1 이지만 신드롬의 위치에 따른 최소 가중치는 달라질 수 있다. Y 오류는 X, Z 오류의 합으로 나타내며, SC-17 의 부호 거리가 3 이기에 최대 가중치가 3 을 초과하지 않는다.

	개수	*가중치*	*최소 가중치*
X 신드롬	16	1,2,3	1
Z 신드롬	16	1,2,3	1
Y 신드롬	32	1,2,3	1

표 1. SC-17 MWPM 그래프 분석

그래프를 통한 디코딩을 위해 X 오류를 랜덤하게 발생시키는 오류 모델을 SC-17 X 측정 큐비트 그래프에 적용하였다. 오류 모델 적용 후 X 신드롬 그래프는 그림 4 의 시뮬레이션 결과를 얻었다. 최소 가중치가 1 인 노드 쌍을 갖는 그래프이므로 두 신드롬에 영향을 미친 데이터 큐비트 1 개에 X gate 를 적용해 오류를 정정하였다. 오류를 정정한 회로의 데이터 큐비트를 Qiskit 시뮬레이터를 통해 1024 회 측정한 그림 5 는 그림 2 와 동일한 SC-17 의 논리적 큐비트 결과를 얻어, 오류가 정정되었음을 확인하였다. Z 오류에 대해서도 동일한 과정을 진행해 신드롬 그래프를 통한 디코딩과 회로 구현 및 측정으로 오류 정정을 확인할 수 있다. Y 오류 그래프는 X, Z 신드롬 노드를 모두 포함한 그래프이며, X, Z 오류를 모두 검출한 신드롬 쌍에 영향을 미치는 데이터 큐비트에 Y gate 를 적용하여 오류를 정정한다.

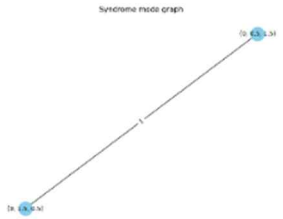

그림 4. X 신드롬 그래프

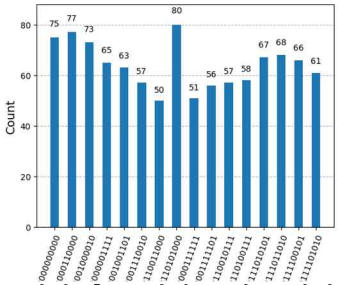

그림 5. 오류 정정 후 논리적 큐비트 확인 시뮬레이션

Ⅲ. 결론

본 논문에서는 SC-17 의 논리적 큐비트를 IBM Qiskit 시뮬레이터를 사용하여 회로로 구현 및 확인하였다. MWPM 디코더를 SC-17 에 적용한 신드롬 그래프를 통해 오류를 검출, 정정하여, 서피스 구조의 격자 구조를 그래프 구조로 나타내 디코딩하는 MWPM 디코더를 구현하였다. 신드롬을 bit 단위로 나타내 경우별로 오류를 분석하는 것보다 그래프를 통해 오류 발생 위치를 시각적으로 검출 가능한 점에서 MWPM 디코더가 유용하였다. 길이를 늘린 서피스 부호를 사용한 디코딩 연구를 통해 디코딩 성능 확인을 구체적으로 할 수 있을 것이며, 편향 오류에 대한 최적화 제약 조건을 도입하면 MWPM 디코딩 정확도를 향상시킬 수 있을 것이다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2024 년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. RS-2023-00225385, NISQ 환경에서 저부하, 고효율 양자 오류 경감 기술 개발 및 응용). 본 연구 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2020-0-00014, 결함허용 논리양자큐빗 환경을 제공하는 양자운영체제 원천기술 개발). 본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 대학 ICT 연구센터육성지원사업의 연구결과로 수행되었음(IITP-2024-2021-0-01810).

참 고 문 헌

[1] Fowler, A. G., Mariantoni, M., Martinis, J. M., & Cleland, A. N. (2012). Surface codes: Towards practical large-scale quantum computation. *Physical Review A*, *86*(3), 032324.

[2] Suppressing quantum errors by scaling a surface code logical qubit. *Nature*, 2023, 614.7949: 676-681.

[3] Higgott, O. (2022). Pymatching: A python package for decoding quantum codes with minimum-weight perfect matching. *ACM Transactions on Quantum Computing*, *3*(3), 1-16.

[4] Tuckett, D. K. (2020). *Tailoring surface codes: Improvements in quantum error correction with biased noise* (Doctoral dissertation).

[5] Yuan, Y., & Lu, C. C. (2022). A modified MWPM decoding algorithm for quantum surface codes over depolarizing channels. *arXiv preprint arXiv:2202.11239*.

[6] deMarti iOlius, A., Fuentes, P., Orús, R., Crespo, P. M., & Etxezarreta Martinez, J. (2023). Decoding algorithms for surface codes. *arXiv e-prints*, arXiv-2307.

[7] Azad, U., Lipińska, A., Mahato, S., Sachdeva, R., Bhoumik, D., & Majumdar, R. (2022). Surface code design for asymmetric error channels. *IET Quantum Communication*, *3*(3), 174-183.

[8] Wu, Y., Liyanage, N., & Zhong, L. (2022). An interpretation of union-find decoder on weighted graphs. *arXiv preprint arXiv:2211.03288*.