

초전도체 기반 양자컴퓨터 오류 특성에 따른 양자 오류 정정 방법

정유신, 강유진, 국성연, 이상욱, Heng Shengyue, 허준*
고려대학교

{jeongys604, yujin20, viviangood, sbr06008, shengyue98, junheo}@korea.ac.kr

Quantum error correction method according to error characteristics of superconductor-based quantum computer

Youshin Chung, Yujin Kang, Seongyeon Kook, Sanguk Lee, Heng Shengyue, Jun Heo
Korea Univ.

요약

최근 실제 물리 플랫폼 특화된 양자 오류 정정 프로토콜을 개발하고 구현하는 연구가 활발하게 진행되고 있다. 본 논문은 실제 초전도 기반 큐비트의 오류 상황을 분석하고 이에 적합한 서피스 부호를 개발하는 방법에 대해 제안한다.

I. 서론

최근 실제 물리 플랫폼 특화된 양자 오류 정정 프로토콜을 개발하고 구현하는 연구가 활발하게 진행되고 있다. [1,2] Depolarizing 오류 채널에서 높은 성능을 보이는 양자 오류 정정 부호로 정사각형 모양을 가진 평면 서피스 부호(surface code), 쇼어 부호 등이 있다. [3] 그리고 편향 오류 채널에서 높은 성능을 보이는 양자 오류 정정 부호로 직사각형 모양을 가진 서피스 부호나 XZZX 서피스 부호가 대표적이다.[4,5]

본 논문은 실제 초전도 기반 큐비트의 오류 상황을 분석하고 주어진 양자 컴퓨팅 시스템의 오류 모델에 따라 서피스 부호를 설계하는 방법을 제안한다.

II. 본론

1. 실제 시스템에 특화된 양자 오류 정정 기법 개발

[6]에서 제안된 실제 시스템에 특화된 양자 오류 정정 개발 방법을 초전도체 기반 양자 플랫폼 상에 적용하는 방법은 다음과 같다. 적용 예시를 위해 한국표준과학원 초전도 양자컴퓨터를 사용하였다.

① η 정도에 따라 서피스 부호 결정

하드웨어의 특성값인 relaxation time(T_1), dephasing time(T_2)을 통해 초전도 기반 양자 계에서 발생할 수 있는 오류율을 분석할 수 있다. T_1 , T_2 를 고려하여 각 X, Y, Z 오류율을 나타내는 방법은 다음과 같다. [7]

$$p_X = p_Y = \frac{1}{4}(1 - \exp(-t/T_1))$$
$$p_Z = \frac{1}{2}(1 - \exp(-t/T_2)) - \frac{1}{4}(1 - \exp(-t/T_1)) \quad (1)$$

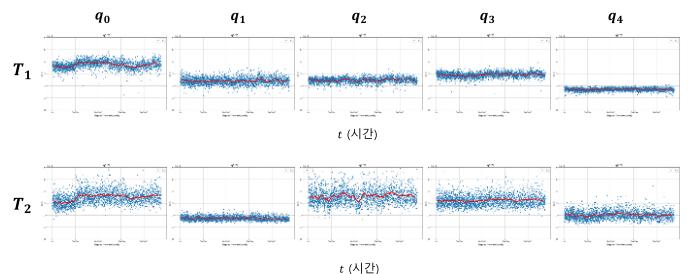
편향 오류 채널이란, 오류가 동일한 확률로 발생하는 것이 아닌 어느 한 오류로 몰려 편향 오류가 발생하는

채널을 의미한다. X, Y 오류 대비 Z 오류의 비를 bias로 정의하며 수식은 다음과 같다.

$$\eta = \frac{p_Z}{p_X + p_Y} \quad (2)$$

$\eta = 1/2$ 인 경우는 X, Y, Z 오류율이 모두 동일한 depolarizing 오류 채널을 의미하며, $\eta = \infty$ 인 경우 Z 오류만 발생하는 phase flip 채널을 의미한다.

KRISS 초전도 양자컴퓨터의 각 큐비트의 T_1 , T_2 를 측정한 결과는 다음과 같다.



<그림 1. 각 큐비트의 T_1 , T_2 측정 과정>

	q_0	q_1	q_2	q_3	q_4
T_1 [μ s]	28.0	23.5	27.3	32.3	17.0
평균	25.62				
T_2 [μ s]	36.3	27.7	45.3	23.3	21.0
평균	30.72				

<표 1. 각 큐비트의 T_1 , T_2 >

식 (1)에 의한 5 개의 큐비트의 T_1 , T_2 를 통한 각 X, Y, Z 오류율 및 bias는 다음과 같다.

	q_0	q_1	q_2	q_3	q_4
$p_{X,Y}$	0.0035	0.0042	0.0036	0.0031	0.0058
평균	3.9×10^{-3}				
p_z	0.0019	0.0029	0.0007	0.0054	0.0036
평균	2.9×10^{-3}				
η	0.2726	0.3495	0.1044	0.883	0.3113
평균	0.3351				

<표 2. 각 큐비트의 X,Y,Z 오류율 및 편향 정도>

$\eta < 0.5$ 일 경우 X 오류로 편향된 오류 채널이므로 직사각형 모양을 가진 서피스 부호나 XZZX 서피스 부호를 사용하는 것이 더 높은 임계값 및 낮은 오버헤드를 가질 수 있다.

② 시스템의 타겟 논리적 오류율 P_{target} 을 설정

원하는 알고리즘을 수행하기 위해 필요한 타겟 논리적 오류율을 설정한다. 예를 들어 쇼어 알고리즘을 수행하기 위해 필요한 논리적 오류율은 $10^{-14} \sim 10^{-15}$ 이하이고, 그로써 알고리즘을 수행하기 위해 필요한 논리적 오류율은 $10^{-6} \sim 10^{-9}$ 이다. [3,8]

③ 타겟 오류율을 만족하는 직사각형 크기 L_z, L_x 를 결정

전 단계에서 설정한 타겟 오류율을 만족하기 위해 필요한 직사각형의 크기를 결정한다. 즉, $P_L = f(p_x, p_z, L_z, L_x) < P_{target}$ 을 만족하는 $L_z \times L_x$ 를 결정한다. 해당 과정은 최적화 문제를 통해 최적의 직사각형의 크기를 도출한다.

④ 결정된 직사각형 크기로 η 에 따른 시뮬레이션을 진행하여 논리적 오류율 및 임계값 도출

논리적 오류율 및 임계값을 도출하기 위해 디코딩을 진행한다. 디코딩 알고리즘은 실제 발생 확률이 더 높은 오류 집합을 최종 오류로 판단하며, 결국 측정된 신드롬을 만들면서 가장 발생 확률이 높은 오류 집합을 찾는 것이 디코딩의 핵심이다.

대표적인 디코더로는 신드롬 간의 최소 가중치 매칭을 통해 가장 가능성 높은 오류 경로를 추정하여 복원 연산을 수행하는 MWPM (Minimum Weight Perfect Matching)가 있다.

III. 결론

본 논문에서는 실제 초전도 기반 큐비트의 오류 상황을 분석하고 이에 적합한 서피스 부호를 설계하는 방법에 대해 제안한다. 제안한 방법을 한국표준과학원 초전도 양자컴퓨터의 실제 데이터를 사용하여 분석하였다.

현재 국내외 양자 오류 정정 기법 연구는 시스템에 적용하는 것과는 별개로 이론적인 측면에서 고도화가 진행되고 있다. 제안한 방법을 실제 초전도 기반 양자 컴퓨터에 적용하여 성능을 분석하며 실용적인 결함 허용 양자컴퓨터에 다가갈 수 있을 것으로 기대된다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2025년도 정보(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단 양자기술연구개발선도(양자컴퓨팅)사업의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2024-00431853)

한국연구재단의 양자컴퓨팅 연구인프라 구축사업으로 구축된 양자컴퓨터를 활용함(2022M3K2A1083855)

참 고 문 헌

- [1] Suppressing quantum errors by scaling a surface code logical qubit. *Nature*, 2023, 614.7949: 676-681.
- [2] Krinner, Sebastian, et al. "Realizing repeated quantum error correction in a distance-three surface code." *Nature* 605.7911 (2022): 669-674.
- [3] Fowler, Austin G., et al. "Surface codes: Towards practical large-scale quantum computation." *Physical Review A—Atomic, Molecular, and Optical Physics* 86.3 (2012): 032324.
- [4] Lee, Jonghyun, Jooyoun Park, and Jun Heo. "Rectangular surface code under biased noise." *Quantum Information Processing* 20 (2021): 1-16.
- [5] Bonilla Ataides, J. Pablo, et al. "The XZZX surface code." *Nature communications* 12.1 (2021): 2172.
- [6] 국성연, et al. "양자 오류 정정 프로토콜 개발을 위한 초전도체 기반 양자컴퓨터 오류 특성 분석." *한국통신학회 학술대회논문집* (2025): 1717-1718.
- [7] Tomita, Yu, and Krysta M. Svore. "Low-distance surface codes under realistic quantum noise." *Physical Review A* 90.6 (2014): 062320.
- [8] Grover, Lov K. "A fast quantum mechanical algorithm for database search." *Proceedings of the twenty-eighth annual ACM symposium on Theory of computing*. 1996.