

양자 네트워크를 위한 양자 오류 정정 부호 설계 방향

국성연, 강유진, 이상욱, 허준*
고려대학교

viviangood@korea.ac.kr, yujin20@korea.ac.kr, sbr06008@korea.ac.kr, *junheo@korea.ac.kr

Direction of Quantum Error Correction Code Design for Quantum Networks

Kook Sung Yeon, Kang Yu Jin, Lee Sang Uk, Heo Jun*
Korea Univ.

요약

본 논문에서는 양자 네트워크 환경에서 지배적인 손실 중심 오류 모델과 운용 제약을 분석하고, 기존 양자 오류 정정 부호들이 네트워크 요구 조건을 부분적으로만 만족함을 보인다. 이를 통해 손실 오류와 연산 오류를 구조적으로 분리하는 계층적 설계를 중심으로, 일방향 통신과 얽은 회로 깊이를 고려한 양자 네트워크용 QECC 설계 방향을 제시한다.

I. 서론

양자 네트워크는 원격 노드 간 양자 상태 전송과 분산 양자 연산을 가능하게 하는 핵심 인프라로서, 장거리 양자 통신과 양자 인터넷 구현의 기반이 된다[1]. 그러나 광 채널을 통한 양자 정보 전달 과정에서는 광자 손실과 국소 연산 오류가 필연적으로 발생하며, 이러한 오류는 전송 거리 증가에 따라 누적되어 통신 성공률과 속도를 급격히 저하시킨다. 이러한 문제를 해결하기 위한 핵심 기술로 양자 오류 정정(Quantum Error Correction, QEC)이 제시되어 왔으나[2], 기존 QEC 연구는 주로 양자 계산에서의 결함 허용 연산을 목표로 발전해 왔다[3]. 그 결과, 양자 네트워크 환경에서 지배적인 오류 모델과 운용 제약을 충분히 반영하지 못하는 경우가 많다. 본 논문에서는 양자 계산과 구별되는 양자 네트워크 환경의 특성을 바탕으로, 네트워크에 적합한 양자 오류 정정 부호(Quantum Error Correction Code, QECC)가 가져야 할 요구 조건을 정리하고, 기존 QECC 들의 한계를 분석한 뒤, 양자 네트워크를 위한 QECC 설계 방향을 제시한다.

II. 본론

A. 양자 네트워크와 양자 계산 환경의 오류 모델 비교

양자 계산 환경에서 일반적으로 가정되는 오류는 디폴라라이징 오류와 같은 국소적 Pauli 오류이며, 오류 위치는 사전에 알려져 있지 않다. 반면, 양자 네트워크에서는 광 채널 감쇠와 결함 효율 한계로 인해 손실(loss)이 지배적인 오류로 나타나며, 손실 발생 여부와 위치가 명확히 인지되는 erasure 오류 모델이 형성된다[4].

이러한 차이로 인해 양자 네트워크용 QECC는 높은 코드 거리보다는 erasure 오류 대응 능력과 얽은 회로 깊이를 우선적으로 고려해야 한다. 또한 장거리 네트워크에서는 양방향 고전 통신 지연이 심각한 병목으로 작용하므로, QECC는 가능하면 일방향(one-way) 통신 구조를 지원해야 한다.

B. 양자 네트워크와 양자 계산 환경의 QECC 비교

양자 네트워크와 양자 계산 환경에서 요구되는 QEC의 차이는 표 1과 같다.

항목	양자 네트워크	양자 계산 환경
지배적 오류	Erasure	Pauli
오류 위치	명확	불명확
고전통신 활용범위	장거리	국소
목표	일방향 전송	결함 허용 연산
회로깊이 허용범위	얕음	깊음

표 1. QEC 요구 조건 비교

양자 계산용 QECC를 양자 네트워크에 그대로 적용하는 것은 부적절하며, 네트워크에서는 오류 정정 자체보다도 통신 구조의 단순화가 성능을 좌우하는 핵심 요소이다.

C. 기존 QECC의 네트워크 적합성 분석

대표적인 기존 QECC들은 네트워크 요구 조건을 부분적으로 만족한다. CSS 계열 부호는 전이적 게이트 구현에 유리하나, 손실 오류에 대한 직접적인 대응 능력이 제한적이다[5]. 서피스 코드는 국소성과 안정성이 뛰어나지만, 상대적으로 큰 공간 오버헤드와 반복적인 синдром 측정이 요구되어 네트워크 중계 노드에 적용하기에는 부담이 크다. 반면, 양자 패리티 부호는

erasure 오류에 강인하여 손실 중심 환경에 적합하지만, 일반적인 결함 허용 계산을 수행하기에는 제약이 따른다[6].

부호	손실대응	One-way 통신	디코딩 깊이	네트워크 적합성
CSS	낮음	제한적	깊음	△
Surface	중간	제한적	깊음	△
Parity	높음	가능	얕음	O

표 2. 대표적 QECC의 네트워크 적합성

D. 양자 네트워크를 위한 QECC 설계 방향

앞선 분석을 바탕으로, 본 논문에서는 양자 네트워크용 QECC 설계 방향을 다음과 같이 제시한다. 핵심 아이디어는 손실 오류와 연산 오류를 구조적으로 분리하여 처리하는 것이다. 이를 위해 erasure 오류를 처리하는 outer code 와, 국소 연산 오류를 억제하는 lightweight inner code 로 구성된 계층적 구조를 고려한다. 이 구조에서 outer code 는 손실 위치 정보를 활용하여 손실 오류를 흡수하거나 제거하며, inner code 는 얇은 회로 깊이를 유지한 채 중계 노드 내부의 연산 오류를 보완한다. 이는 완전한 결함 허용 계산을 목표로 하지 않고, 네트워크 환경에 특화된 오류 모델을 반영한 설계이다.

중계 기반 양자 네트워크에서 통신률 R 은 다음과 같이 근사적으로 표현할 수 있다.

$$R \propto \frac{1}{T_{local} + T_{classical}}$$

T_{local} 은 국소 연산 시간, $T_{classical}$ 은 고전 통신 지연을 의미한다. HEG/HEP 기반 방식에서는 $T_{classical} \sim O(L/c)$ 로 거리 L 에 따라 고전 통신 지연이 증가하는 반면, QEC 기반 일방향 전송에서는 $T_{classical} \approx 0$ 으로 근사할 수 있어, 통신률의 거리 의존성이 근본적으로 달라진다. 이는 QEC가 단순한 오류 완화 기법이 아닌, 네트워크 구조 자체를 변화시키는 요소임을 보인다.

이러한 설계 방향은 네트워크 환경에 따라 서로 다른 형태로 구체화될 수 있다. 예를 들어, 장거리 광섬유 네트워크와 같이 손실 오류가 지배적이고 중계 노드의 연산 능력이 제한적인 환경에서는, erasure 오류에 강인한 outer code 를 통해 링크 손실을 우선적으로 흡수하고, inner code 는 최소한의 국소 오류 억제만을 수행하는 구성이 적합하다. 이 경우 깊은 신드롬 추출이나 큰 코드 거리를 사용하는 대신, 얇은 디코딩과 빠른 의사결정을 통해 손실로 인한 실패를 최소화하는 것이 중요하다.

반대로, 중계 노드의 연산 신뢰도가 비교적 높지만 네트워크 거리가 길어 고전 통신 지연이 주요 병목으로 작용하는 환경에서는, QEC 기반 일방향 전송을 전제로 한 설계가 효과적이다. 이 경우 outer code 는 손실 오류를 처리하여 링크 성공 확률을 안정화하고, inner code 는 국소 연산 오류가 누적되지 않도록 제한된 깊이에서 오류를 억제한다. 이러한 구조는 통신률의 거리 의존성을 완화하여, 장거리 양자 네트워크에서 높은 전송 효율을 달성하는 데 유리하다.

종합하면, 양자 네트워크용 QECC 설계는 특정 부호의 성능을 극대화하는 문제가 아니라, 주어진 네트워크 환경에서 손실 오류의 비중, 중계 노드의 연산 제약, 그리고 고전 통신 지연을 종합적으로 고려하여 outer

code 와 inner code 의 역할과 복잡도를 배분하는 문제로 귀결된다. 본 논문에서 제시한 설계 방향은 이러한 환경 의존적 설계를 체계적으로 이해하기 위한 기준을 제공하며, 향후 양자 네트워크 아키텍처와 QECC의 공동 설계에 유용한 지침으로 활용될 수 있다.

III. 결론

본 논문에서는 양자 네트워크 환경에서 요구되는 양자 오류 정정의 특성을 정리하고, 기존 QECC 들이 이러한 요구를 부분적으로만 만족함을 분석하였다. 이를 바탕으로 손실 중심 오류 모델, 일방향 통신, 얇은 회로 깊이, 그리고 모듈성을 핵심으로 하는 네트워크 지향 QECC 설계 방향을 제시하였다. 본 연구는 새로운 최적 부호를 제안하기보다는, 양자 네트워크라는 응용 환경에 맞추어 QEC 를 재해석하고 설계 관점을 체계적으로 정리하는 데 의의가 있다. 이러한 설계 방향은 향후 양자 네트워크용 QECC 연구와 중계기 아키텍처 설계에 유용한 기준을 제공할 것으로 기대된다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원-대학 ICT 연구센터(ITRC)의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2021-II211810). 이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. RS-2023-00242396).

참 고 문 헌

- [1] Kimble, H. J. (2008). The quantum internet. *Nature*, 453(7198), 1023–1030.
- [2] Briegel, H.-J., Dür, W., Cirac, J. I., & Zoller, P. (1998). Quantum repeaters: The role of imperfect local operations in quantum communication. *Physical Review Letters*, 81(26), 5932–5935.
- [3] Muralidharan, S., Li, L., Kim, J., Lütkenhaus, N., Lukin, M. D., & Jiang, L. (2016). Optimal architectures for long distance quantum communication. *Scientific reports*, 6(1), 20463.
- [4] Ralph, T. C., Hayes, A. J. F., & Gilchrist, A. (2005). Loss-tolerant optical qubits. *Physical review letters*, 95(10), 100501.
- [5] Fowler, A. G., Wang, D. S., Hill, C. D., Ladd, T. D., Van Meter, F. R., & Hollenberg, L. C. (2010). Surface code quantum communication. *Physical review letters*, 104(18), 180503.
- [6] Muralidharan, S., Kim, J., Lütkenhaus, N., Lukin, M. D., & Jiang, L. (2014). Ultrafast and fault-tolerant quantum communication across long distances. *Physical review letters*, 112(25), 250501.