

양자 네트워크의 충실도 제약을 고려한 얽힘 라우팅 기술 동향

구희모, 김희원, 안예린, 백상헌*
고려대학교

{Hmku0415, harry0475, annie2ahn, shpack}@korea.ac.kr

A Survey on Fidelity-Constrained Entanglement Routing in Quantum Networks

Hwimo Ku, Heewon Kim, Yerin Ahn, Sangheon Pack*
Korea Univ.

요약

본 논문은 양자 네트워크에서 충실도 (fidelity) 제약 하에 얽힘 자원을 효율적으로 관리하기 위한 연구들을 다룬다. 특히, 얽힘 정제 스케줄링에서 시작하여 다중 요청 라우팅까지를 포괄하는 연구와, 링크 구성 최적화를 통한 얽힘 라우팅 개선을 제안한 연구를 분석한다. 두 연구는 각각 정제 순서와 얽힘 라우팅 경로의 결합 최적화 문제, 그리고 링크 구성 (link configuration) 수준에서의 충실도 제약 만족 문제를 탐구하며, 양자 통신 시스템의 성능과 자원 활용 효율을 높인다.

I. 서론

양자 네트워크는 양자 얽힘 (entanglement)을 기반으로 정보를 분산 처리하고 전송할 수 있는 차세대 통신 인프라로, 양자 키 분배, 분산 양자 컴퓨팅 등 다양한 응용 가능성을 제공한다. 이러한 시스템의 핵심은 멀리 떨어진 노드 간 고충실도 얽힘 상태를 안정적으로 분배하는 데 있으며, 실제 양자 상태가 이상적인 벨 상태 (Bell state)와 얼마나 유사한지를 나타내는 척도인 얽힘의 충실도 (fidelity)는 통신 신뢰도와 시스템 효율성의 지표이다. 그러나 얽힘 상태는 전송 중 환경 노이즈나 광자 손실 등으로 쉽게 열화되므로, 종단 (end-to-end) 간 일정 수준 이상의 충실도를 유지하는 경로를 구성하는 것이 주요 과제로 남아 있다. 기존 얽힘 라우팅 (entanglement routing)은 링크 충실도를 고정값으로 전제하고, 중간 노드에서 정제 (purification)를 수행해 종단 간 충실도를 향상시키는 방식에 주로 의존해 왔다. 하지만 정제 순서와 방식에 따라 결과가 달라지는 구조적 특성을 고려하지 않아, 동일한 자원을 사용하더라도 정제 스케줄링에 따라 성능과 자원 효율이 크게 달라질 수 있다. 또한 링크 충실도를 고정하면, 충실도와 얽힘 생성률 (entanglement generation rate) 간의 trade-off를 반영하지 못해 수용률 (acceptance ratio)과 처리량 (throughput) 측면에서도 최적화에 한계가 생긴다.

이러한 문제를 해결하기 위해 최근에는 정제 순서와 위치를 최적으로 계획하거나, 링크별로 충실도와 생성률 조합을 유연하게 설정함으로써 자원 소모를 줄이고 네트워크 성능을 개선하려는 연구들이 이루어지고 있다. 특히, 충실도를 고정된 파라미터가 아닌 조정 가능한 변수로 다루어, 전체 시스템의 수용률과 처리 효율을 함께 향상시키려는 다양한 최적화 접근이 제안되고 있다.

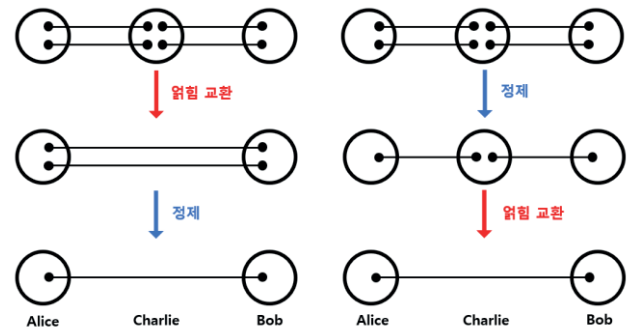


그림 1. 정제-얽힘 교환 순서에 따른 얽힘 처리 방식

II. 본론

A. 정제 스케줄링 기반의 충실도 보장 다중 경로 최적화

연구 [1]에서는 종단 간 충실도 제약을 만족하면서 얽힘 자원 소모를 최소화하는 정제 스케줄링 및 라우팅 알고리즘을 제안하였다. 이 알고리즘은 단일 홉 환경에서 최적의 정제 전략을 도출한 뒤, 이를 다중 홉 및 다중 요청 시나리오로 확장하는 방식으로 전개된다. 정제는 얽힘 상태의 충실도를 향상시키는 핵심 연산이지만, 그 순서와 조합에 따라 결과가 달라지는 비결합적 특성을 갖기 때문에, 가능한 많은 고충실도 EPR 쌍의 효율적 생성을 위해서는 정제 트리의 구조를 최적화하는 것이 중요하다. 연구 [1]은 이를 트리 탐색 문제로 모델링하고, 각 단계의 충실도와 성공 확률을 동적으로 추적하며 충실도와 생성률이 높은 우월성 (dominance) 조건을 적용하여 비효율적 전략을 제거하는 최적화 기법을 제시하였다. 이 알고리즘은 ϵ -근사 최적 경로를 제공하며, 정제 연산의 비결합성을 체계적으로 반영한다.

다중 홉 환경에서는 정제와 얽힘 교환의 수행 순서가 최종 경로 충실도에 큰 영향을 미친다. 연구 [1]은 먼저 정제를 수행하는 정제 후 얽힘 교환 방식이, 충실도 ≥ 0.7 및 BSM (Bell state measurement) 성공 확률 ≤ 0.818 조건 하에서 얽힘 교환 후 정제 방식보다 항상 우수하다는 사실을 수학적으로 증명하였다. 그림 1은 두 방식의 차이를 시각적으로 보여준다. 얽힘 교환 후 정제 방식은 교환 시 각 링크의 충실도가 연쇄적으로 곱해져 최종 충실도가 크게 낮아진 상태에서 정제를 진행하므로 더 많은 자원이 소모된다. 반면, 정제 후 얽힘 교환 방식은 링크 충실도를 미리 향상시켜 더 높은 최종 충실도를 유지하며 정제 횟수도 줄어든다. 다만 이 결과는 특정 조건에 한정되며, 정제 성공률이 낮거나 BSM 성공률이 높은 환경에서는 성능 차이가 달라질 수 있다. 따라서 자원 상황이나 네트워크 구조에 따라 적절한 방식 선택이 필요하다. 이러한 분석을 바탕으로 충실도 제약 하의 얽힘 라우팅 문제를 MILP (mixed integer linear programming)로 모델링하고, 문제의 NP-hard 특성을 고려해 완화 (relaxation) 및 확률적 반올림 (randomized rounding) 기반의 근사 해법을 적용해 계산 복잡성을 줄였다. 이후 이를 다중 요청 환경으로 확장하여 전체 수용률을 극대화하는 최적 경로 조합 문제로 일반화하였으며, 본 알고리즘은 기존 얽힘 라우팅 기법(Q-PATH, Q-LEAP, Q-STEP)보다 높은 성공률과 낮은 경로 비용을 달성함을 보였다.

B. 링크 구성 최적화를 통한 충실도-생성률 조절 기반 얽힘 라우팅

연구 [2]는 링크 수준에서 충실도와 얽힘 생성률 간의 trade-off 를 고려하여, 각 링크의 충실도를 상황에 맞게 유연하게 조정함으로써 정제 횟수를 줄이고 전체 자원 활용 효율을 높이는 방식을 제안하였다. 특히, 충실도 향상으로 인한 EPR 생성률 저하나 추가 비용을 함께 고려하여, 정제 부담을 최소화하면서도 중단 간 충실도 목표를 달성할 수 있는 링크 구성을 탐색한다. 이를 실용적으로 구현하기 위해 두 가지 근사 해법이 제안된다. 첫 번째는 SPFD (Shortest-Path Fidelity Determination)로, 각 요청의 최단 경로를 기준으로 링크별 요구 충실도를 빠르게 추정하는 경험적 기법이다. 두 번째는 BO-QPath 로, SPFD 결과를 초기값으로 활용하여 베이지안 최적화(Bayesian Optimization)를 수행하고, 연속적인 링크 구성 공간에서 더 정밀한 최적 설정을 탐색하는 방식이다.

그림 2는 이 전략이 실제로 어떻게 작동하는지를 보여준다. (a)는 기존 방식으로, 모든 링크의 충실도를 0.8로 고정해 각 구간에서 정제가 필요하다. 반면 (b)는 제안된 구성으로, 1-2번 링크는 유지하면서 2-3번 링크의 충실도를 0.9로 높이고 EPR 생성률을 절반(40→20)으로 줄인다. 이를 통해 정제 부담을 줄이고 자원 효율을 향상시킨다. 이 구성은 더 적은 EPR 쌍을 사용하면서도 중단 간 충실도를 만족시킬 수 있음을 보여준다. 다만 링크 충실도를 높이는 것은 생성률 저하나 장비 부담 증가 같은 추가 비용을 수반하므로, 이러한 trade-off 를 고려해 전체 수용률이 최적화되도록 조정하는 것이 필요하다. 실험 결과, 이 전략은 정제 과정을 줄이면서도 수용률을 최대 87%까지 향상시켰으며, SPFD는 MILP 대비 수천 배 빠른 계산 속도를, BO-QPath는 수용률과 최적성 측면에서 가장 우수한 성능을 보였다.

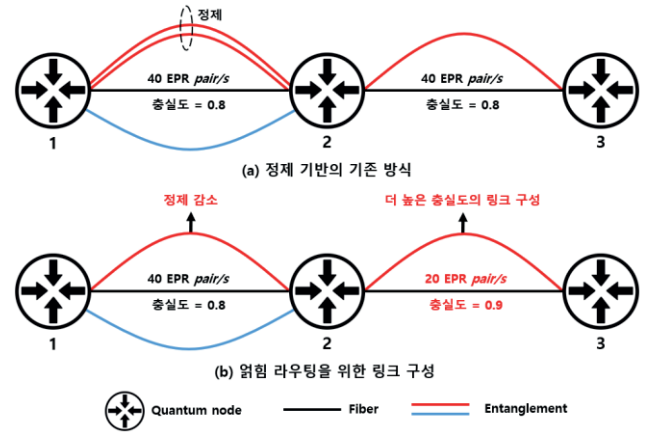


그림 2. 충실도 조정에 따른 정제 부담 완화 예시

III. 결론

본 논문은 충실도 제약 하에서의 얽힘 라우팅 문제를 자원 효율 관점에서 분석하고, 이를 효과적으로 최적화할 수 있는 접근 가능성을 확인하였다. 기존의 고정 충실도 기반 방식이 지닌 자원 낭비와 확장성 한계를 극복하기 위해, 충실도 수준을 조정 가능한 변수로 다루고 정제 전략과 경로 설정을 함께 고려하는 방식이 실제 성능 개선으로 이어질 수 있음을 보였다.

충실도 제약 하에서의 정제, 경로 선택, 링크 구성이 서로 밀접하게 영향을 주기 때문에, 이를 개별적으로 최적화할 경우 전체 자원 효율이 저하될 수 있으므로 향후 연구에서는 정제, 경로 선택, 링크 구성 간의 상호작용을 통합적으로 모델링하는 최적화 프레임워크가 요구된다. 또한 네트워크 부하, 얽힘 생성 성공률, 큐 상태 등 동적 요소를 반영한 적응형 얽힘 라우팅, 그리고 실제 양자 장비의 제약 조건을 포함한 물리 기반 모델링 역시 병행되어야 할 것이다. 나아가, 충실도 기준 자체를 네트워크 목적에 따라 유연하게 설정할 수 있는 가변 충실도 정책에 대한 연구는, 향후 응용 맞춤형 양자 네트워크 설계의 핵심 방향으로 발전될 것으로 전망된다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원-대학 ICT 연구센터(ITRC)의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2021-II211810)

참고 문헌

- [1] Jia, Ziyue, and Lin Chen. "From Entanglement Purification Scheduling to Fidelity-constrained Multi-Flow Routing." *arXiv preprint arXiv:2408.08243* (2024).
- [2] Zhang, Qiaolun, et al. "Link Configuration for Fidelity-Constrained Entanglement Routing in Quantum Networks." *IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM)*. 2025.