

Decision Transformer를 활용한 양자 네트워크 요청 스케줄링 최적화

석영준¹, 지창훈¹, 강대건², 허주성¹, 한연희^{1*}

¹한국기술교육대학교 컴퓨터공학과 미래융합공학전공

²한국기술교육대학교 컴퓨터공학과 컴퓨터공학전공

dsb04163@koreatech.ac.kr, koir5660@koreatech.ac.kr,

ahicraft1937@koreatech.ac.kr, js.heo@thinkonweb.com, yhhan@koreatech.ac.kr

Quantum Network Request Scheduling Optimization Using Decision Transformer

Yeong-Jun Seok¹, Chang-Hun Ji¹, Daegun Kang², Jooseong Heo¹, Youn-Hee Han^{1*}

¹Future Convergence Engineering, Dept. of Computer Science and Engineering, KOREATECH

²Dept. of Computer Science Engineering, KOREATECH

요약

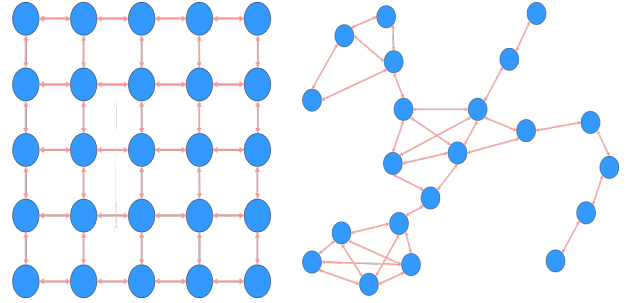
양자 네트워크는 고전적 네트워크 대비 강화된 보안성과 신뢰성을 제공하는 차세대 통신 기술로 주목받고 있으나, 제한된 양자 자원과 동적 환경에서 요청 처리를 효율적으로 수행하는 것은 여전히 해결해야 할 중요한 문제이다. 본 연구에서는 이 문제를 해결하기 위해 오프라인 심층강화학습 기반의 Decision Transformer(DT) 알고리즘을 활용한 양자 네트워크 요청 스케줄링 기법을 제안하였다. NetSquid 시뮬레이터를 통한 실험 결과, 제안된 DT 기반 알고리즘은 다양한 네트워크 토폴로지와 트래픽 조건에서 기존 Rule-Based 기법보다 높은 서비스율을 달성하였다. fidelity 측면에서는 소폭의 감소가 관찰되었으나 서비스율의 향상 폭에 비해 미미하여 실제 환경에서 허용 가능한 수준이었다. 특히 트래픽 부하가 증가한 환경에서도 우수한 성능을 유지하였다. 본 연구는 강화학습 기반 양자 네트워크 자원 관리의 가능성을 입증하였으며, 향후 실제 네트워크 환경에 적용 가능한 알고리즘 개발에 기여할 것으로 기대된다.

I. 서론

양자 네트워크는 고전적 네트워크보다 강화된 보안성과 신뢰성을 제공하는 차세대 통신 기술로 주목받고 있다[1, 2]. 그러나 양자 네트워크는 물리적으로 제한된 자원과 실시간으로 변화하는 동적 환경 특성을 가진다. 따라서 효율적인 네트워크 자원관리 및 서비스 품질(Quality of Service, QoS) 보장이 어렵다. 기존 연구는 주로 양자 네트워크의 정확성 및 신뢰성을 나타내는 Fidelity 향상에 초점을 맞추어 왔다[3]. 하지만, 실제 네트워크 서비스 관점에서는 사용자의 요청(Request)의 처리율(Service Rate) 향상 또한 중요한 요소이다.

기존의 양자 네트워크 요청 스케줄링 방식은 주로 Rule-Based 방식이나 휴리스틱(Heuristic) 접근법을 활용하고 있지만, 이는 복잡하고 동적으로 변화하는 환경에서 성능 향상에 한계를 보이고 있다. 최근 들어 강화학습(Reinforcement Learning, RL) 기반 접근법들이 동적 환경에서 우수한 성능을 보이며 주목받고 있으나, 일반적인 RL 알고리즘들은 학습 과정에서 환경과의 지속적인 상호작용을 요구하기 때문에 실시간 실험이 어렵고 자원 소모가 많은 양자 네트워크에 바로 적용하기에는 현실적인 제약이 존재한다[4].

본 논문에서는 이러한 한계를 극복하기 위해 Fidelity 중심의 기존 연구와 달리 실제 서비스 운영 측면에서 중요한 요청 서비스율을 높이는 데 초점을 맞추어 오프라인 심층강화학습(Offline Deep Reinforcement Learning) 기반의 Decision Transformer(DT)를 활용한 양자 네트워크 요청 스케줄링 최적화 기법을 제안한다. DT는 사전에



(a) Grid Topology

(b) Random Topology

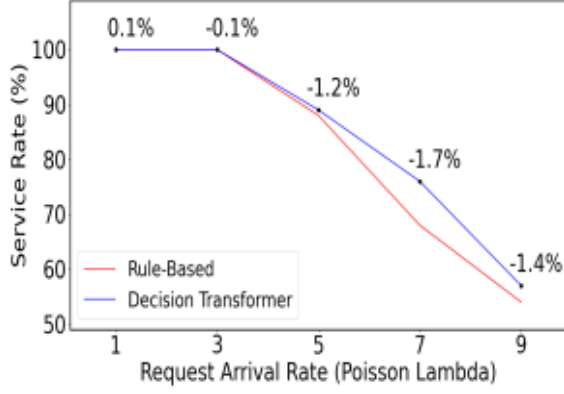
[그림 1] 양자 네트워크 토폴로지

수집된 데이터만으로 학습을 수행하여 환경과의 실시간 상호작용 없이도 높은 성능의 정책(Policy)을 생성할 수 있는 장점이 있으므로, 자원 소모가 큰 양자 네트워크 환경에서 적용 가능성이 크다[5]. NetSquid 시뮬레이터를 이용한 실험 결과, 본 논문에서 제안하는 DT 기반 알고리즘은 기존 방식과 비교하여 요청 처리율을 유의미하게 향상시켰으며, Fidelity는 다소 감소하였으나 실제 운용 환경에서는 충분히 허용 가능한 수준임을 확인하였다.

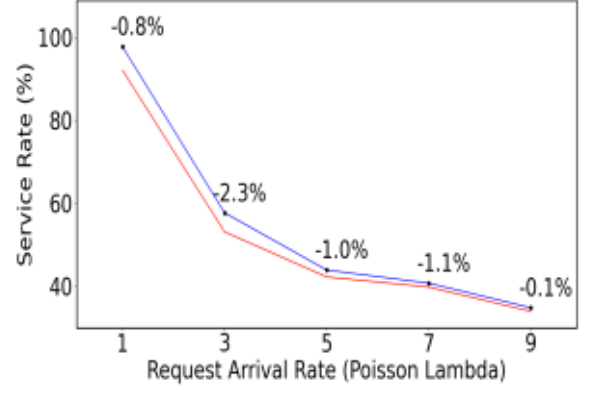
II. 양자 네트워크 요청 스케줄링 문제 정의

양자 네트워크에서 요청 스케줄링은 제한된 양자 얽힘 자원을 활용하여 노드 간 요청을 효율적으로 처리하는 문제로 정의된다[3]. 요청 처리 시에는 노드 간 양자 채널 경로(End-to-End Entanglement)가 필요

*한연희(Youn-Hee Han, yhhan@koreatech.ac.kr): 교신저자



(a) Grid 토폴로지에서 성능비교



(b) Random 토폴로지에서 성능비교

[그림 2] 요청 도착율에 따른 알고리즘의 요청 서비스율 및 fidelity 변화를 비교

하다. 각 요청은 요청거리(p), 큐에 들어온 시간(d), 서비스된 요청의 평균 거리($\hat{p}$), 최대 대기 가능 시간($\hat{d}$) 그리고 요청 ID 등으로 구성된다.

요청은 FIFO (First-In-First-Out) 방식으로 처리되며, 최대 대기 시간을 초과한 요청은 삭제된다. 또한, 각 요청의 양자 얽힘 자원의 Fidelity (F)는 요청에서 사용된 양자 얽힘 상태의 밀도 행렬(ρ)와 이상적인 얽힘 상태($|\psi\rangle$)에 따라 다음과 같이 계산된다.

$$F = \langle \psi | \rho | \psi \rangle \quad (1)$$

III. 제안하는 알고리즘

DT는 오프라인 데이터를 통해 강화학습 문제를 시퀀스 모델링 관점에서 접근한다[8]. 제안하는 DT 기반 요청 스케줄링은 요청 큐에서 FIFO로 요청을 선택하며, 각 요청의 특징을 상태로 DT에 입력하여 요청 처리 여부를 결정한다. 이후, DT가 대기로 판단 요청을 FIFO 순서로 재평가하여 양자 채널 경로가 확보된 경우 즉시 처리하는 두 번째 기회를 제공한다. 보상은 다음과 같은 식으로 정의된다.

$$R = \sum_{t=0}^{T-1} F_t - (\hat{d}_t - d_t) \quad (1)$$

IV. 실험

본 논문에서는 NetSquid 양자 시뮬레이터를 활용하여 Grid와 Random 두 가지 네트워크 토폴로지에서 DT 기반 요청 스케줄링 알고리즘의 성능을 평가하였다. 비교 대상으로 요청 간 거리가 짧은 순서로 처리하는 Rule-Based 알고리즘을 사용하였으며, 포아송 분포를 통해 다양한 트래픽 강도로 실험을 수행하였다.

실험 결과, DT 기반 알고리즘은 모든 토폴로지 및 트래픽 조건에서 Rule-Based 방식 대비 우수한 서비스율을 보였으며, 구체적인 실험 결과는 [그림 2]에 제시되어 있다. 특히 Grid 토폴로지에서는 요청 도착률이 낮은 구간($x=1, 3$)에서는 두 알고리즘 간 서비스율 차이가 미미하였으나, 도착률 증가 구간($x=5, 7, 9$)에서는 DT 알고리즘이 최대 약 6.9% 높은 성능을 나타냈다. 이는 낮은 트래픽에서는 기존 방식도 효율적이거나, 부하가 높아질수록 DT가 자원 할당과 스케줄링 복잡성을 더욱 효과적으로 처리할 수 있음을 의미한다. 다만 fidelity의 경우 도착률 증가 시 최대 1.7%($x=7$)의 하락이 관찰되었다.

한편, Random 토폴로지에서는 모든 도착률 구간에서 DT 알고리즘

의 꾸준한 서비스율 향상이 나타났다. 특히 낮은 도착률 환경에서 최대 약 8.68%의 성능 개선이 관찰되었으며, 도착률 증가에 따라 개선 폭은 점차 감소하였다. fidelity 측면에서도 모든 도착률 구간에서 소폭의 하락이 있었으나, 서비스율 향상 폭에 비해 매우 작아 실제 운용 환경에서 충분히 허용 가능한 수준으로 판단된다. 이는 불규칙한 네트워크 구조에서 DT가 기존 방식 대비 더욱 유연하고 효율적으로 요청을 처리할 수 있음을 시사한다.

V. 결론

본 논문에서는 DT 기반 양자 네트워크 요청 스케줄링 알고리즘을 제안했다. 실험 결과, DT 기반 알고리즘은 fidelity에서 미미한 감소가 있었으나 서비스율 측면에서 기존 Rule-Based 기법 대비 뚜렷한 성능 향상을 나타내어, 실제 양자 네트워크 환경에서의 효과적인 활용 가능성을 입증하였다. 향후에는 알고리즘의 일반화 성능 향상을 위한 추가 연구를 수행할 예정이다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2023년도 및 2018년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (No. NRF-2023R1A2C1003143 & No. 2018R1A6A1A03025526).

참고문헌

- [1] H. J. Kimble, "The quantum internet," *Nature*, vol. 453, no. 7198, pp. 1023–1030, 2008.
- [2] S. Wehner, D. Elkouss, R. Hanson, "Quantum internet: A vision for the road ahead," *Science*, vol. 362, no. 6412, 2018.
- [3] C. Cicconetti, M. Conti and A. Passarella, "Request Scheduling in Quantum Networks," in *IEEE Transactions on Quantum Engineering*, vol. 2, pp. 2–17, 2021, Art no. 4101917
- [4] V. Mnih et al., "Human-level control through deep reinforcement learning," *Nature*, vol. 518, no. 7540, pp. 529–533, 2015.
- [5] L. Chen et al., "Decision Transformer: Reinforcement Learning via Sequence Modeling," *arXiv preprint, arXiv:2106.01345*, 2021.