

SmartNIC 기반 XR 콘텐츠 전송 프레임워크

심준형, 김민혁, 이한준, 고한얼
경희대학교

{simjun10, kmh3339, 2hajpal, heko}@khu.ac.kr

SmartNIC-assisted XR Content Delivery Framework

Junhyung Sim, Minhyeok Kim, Hanjun Lee and Haneul Ko
Kyung Hee Univ.

요 약

시선 기반 적응형 스트리밍은 확장현실(XR) 서비스에서 대역폭 효율성과 사용자 경험(QoE)을 동시에 향상시키기 위한 핵심 기술로 주목받고 있다. 그러나 기존 연구들은 시야 정보 기반 콘텐츠 품질 조정을 서버 측에서 수행하는 구조를 채택해 왔으며, 이로 인해 종단 간 통신 지연에 따른 실시간성 저하와 콘텐츠 불일치 문제가 발생한다. 본 논문에서는 이러한 한계를 극복하기 위해, 네트워크 엣지에 배치된 SmartNIC 에서 시선 정보를 기반으로 패킷 필터링을 수행하는 SmartNIC 기반 XR 콘텐츠 전송 프레임워크(SXRDF)를 제안한다.

I. 서 론

확장현실(Extended Reality, XR) 기술의 급속한 발전은 초저지연, 고처리량, 상황인지형 콘텐츠 전송을 가능하게 하기 위해 네트워크 자원의 실시간 최적화와 지능적인 운용을 요구하고 있다. 특히 머리 착용 디스플레이(HMD, Head mounted display)를 사용하는 XR 시스템은 시선, 머리 움직임, 손 제스처 등 다양한 센서 데이터를 지속적으로 생성하므로, 데이터 처리와 전송 측면에서 높은 자원 효율성을 필요로 한다. 이러한 요구에 대응하기 위한 핵심 기술 중 하나로 시선 기반 적응형 스트리밍(Gaze-driven adaptive streaming)이 주목받고 있다[1]. 이 방식은 화면을 타일 단위로 분할하여, 사용자의 시야(FoV, Field of View)에 포함된 타일은 고해상도로, 그 외 영역은 저해상도로 전송하는 구조를 따른다.

그러나 이 방식을 적용한 기존 연구들은 시야 정보 기반 콘텐츠 품질 조정을 서버 측에서 수행하는 방식을 채택해 왔으며, 이는 무선 구간의 대역폭 절감에는 효과적이지만, 시선 반응성이나 실시간성 측면에서는 구조적인 한계를 드러낸다. 서버 측에서 시선 정보를 기반으로 콘텐츠를 조정하려면, 클라이언트에서 수집한 실시간 데이터를 서버로 전송하고, 서버는 이를 처리해 다시 클라이언트에 콘텐츠를 전달하는 종단 간(end-to-end) 통신 절차가 필수적이다. 광역 네트워크 환경에서는 이러한 종단 간 통신 과정에서 지연(latency)이 불가피하게 발생하며, 그 결과 콘텐츠가 사용자에게 도달하는 시점에는 이미 시야가 변해 있어, 전송된 콘텐츠와 실제 시야 사이에 불일치가 발생하게 된다[2].

본 논문에서는 이러한 한계를 극복하기 위해, SmartNIC 기반 XR 콘텐츠 전송 프레임워크(SXRDF)를 제안한다.

II. 본론

시스템 모델은 서버, 네트워크 엣지(SmartNIC 포함),

클라이언트의 세 구성 요소로 구성되며, 아래는 시스템 모델에 대한 그림이다.

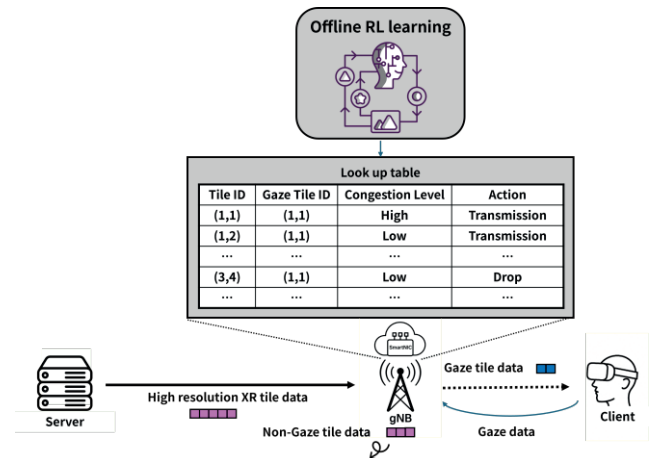


그림 1. 시스템 모델

우선, 서버는 모든 XR 콘텐츠 타일을 고화질로 생성하여 전송한다. 유선 구간의 대역폭은 충분하기 때문에 서버는 타일별 콘텐츠 품질을 조정하는 복잡한 로직을 생략할 수 있으며, 그 결과 서버 측 처리 구조가 단순해지는 이점을 엣지 네트워크로 전달되며, 이 과정에서 SmartNIC이 실시간 시선 정보를 바탕으로 필터링을 수행하게 된다.

SmartNIC은 패킷 내 포함된 타일의 위치 정보(Tile ID 혹은 좌표)와 실시간으로 수신된 시선 정보를 비교하여, 해당 타일이 현재 사용자의 시야 내에 포함되는지를 판단한다. 시야 내 타일은 그대로 전송되며, 그 외의 타일은 네트워크 혼잡 상황이나 정책 기준에 따라 드롭 여부가 결정된다. 이러한 방식은 사용자 경험(QoE)에 영향을 최소화하면서, 무선 구간의 트래픽을 효과적으로 제어할 수 있다.

특히, SmartNIC에서 수행되는 패킷 필터링은 사전에 학습된 정책을 기반으로 룩업 테이블(lookup table) 형태로 구현된다. 해당 정책은 변하는 사용자 시선 데이터 및 네트워크 상황을 가정한 시뮬레이션 환경에서 강화학습을 통해 오프라인으로 학습되며, 이 결과는 타일 ID, 시선 위치, 혼잡도 지표 등 입력 조합에 따라 각 패킷의 전송 여부(전송 또는 드롭)를 빠르게 결정할 수 있도록 구성된다. 이 구조는 강화학습의 정책 최적화 성능에 더해, 기반 처리의 빠른 처리 능력을 결합한 방식으로, SmartNIC 내에서 복잡한 연산이나 외부 추론 없이도 라인 레이트(line-rate) 수준으로 패킷 필터링을 수행할 수 있다[3].

제안하는 설계는 온라인 추론에 의존하지 않고, 사전에 학습된 정책을 룩업 테이블 형태로 SmartNIC 내에서 직접 실행함으로써 실시간(line-rate) 수준의 패킷 필터링을 가능하게 한다. 오프라인 정책 학습과 분산형(in-network) 실시간 실행을 통합한 구조는, 사용자 수가 증가하더라도 정책 판단을 중앙 서버가 아닌 SmartNIC이 처리하기 때문에 확장성(scalability)을 확보할 수 있다. 또한, 클라이언트의 시선 정보가 SmartNIC으로 직접 전달되고, 콘텐츠 필터링 또한 엣지에서 즉시 수행되므로 지연(latency)이 최소화된다. 이와 더불어, 룩업 테이블 기반 실행 방식은 복잡한 연산 없이 고속 처리를 가능하게 하여 QoE를 안정적으로 유지하며, 서버는 품질 조정 없이 전체 콘텐츠를 단순 송출하기 때문에 서버 아키텍처도 간결하게 구성될 수 있다.

결과적으로, 본 프레임워크는 시선 정보 기반 스트리밍을 위한 실시간성과 확장성, 자원 효율성을 모두 만족하는 새로운 콘텐츠 전송 구조를 제시한다.

III. 결론

본 논문에서는 확장현실(XR) 콘텐츠의 QoE를 보장하면서 무선 구간의 대역폭 효율을 향상시키기 위한 새로운 콘텐츠 전송 프레임워크를 제안하였다. 제안된 프레임워크는 기존의 서버 중심 시선 기반 적응 스트리밍이 가지는 지연 문제를 해결하기 위해, 네트워크 엣지에 배치된 SmartNIC을 활용한 콘텐츠 필터링 구조를 중심으로 설계되었다.

이러한 구조는 전체 시스템의 지연을 줄이고, 서버 아키텍처를 단순화하며, 사용자 수가 증가해도 안정적으로 동작할 수 있는 확장성을 제공한다. 더불어, 사용자의 시선 변화에 빠르게 반응할 수 있기 때문에 QoE를 유지하면서도 네트워크 자원을 효율적으로 활용할 수 있다는 점에서, 향후 XR 기반 스트리밍 서비스의 핵심 기술로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

향후 연구로는 실제 환경에서의 시뮬레이션 및 테스트 베드 기반 실험을 통해 본 프레임워크의 성능을 정량적으로 평가하고, 다양한 네트워크 조건에 맞춘 정책 최적화 방안을 추가로 탐색할 계획이다.

참 고 문 헌

- [1] C.-T. Hsiao *et al.*, "Towards Retina-Quality VR Video Streaming: 15ms Could Save You 80% of Your Bandwidth," *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, vol. 52, no. 3, pp. 9–16, Jul. 2022.
- [2] J. Shi, Y. Zhang *et al.*, "Mobile VR on Edge Cloud: A Latency-Driven Design," *in IEEE International Conference on Edge Computing (EDGE)*, 2019, pp. 1–8.
- [3] Z. Chen, L. Li *et al.*, "FlexiNS: Enabling Flexible Packet Processing with SmartNICs," *in Proceedings of the USENIX Annual Technical Conference (USENIX ATC)*, 2023.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 2024 년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(과제번호: RS-2024-00340698)