

GazeNIC: SmartNIC 기반 XR 스트리밍 프레임워크

이한준, 김민혁, 심준형, 고한얼*
경희대학교

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

A Study on GazeNIC: SmartNIC-Based Adaptive Streaming Systems for XR Services

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

요 약

확장현실(XR) 서비스는 사용자 몰입도를 보장하기 위해 고화질 콘텐츠의 실시간 전송과 초저지연 처리를 동시에 요구한다. 이를 충족하기 위해 사용자 시야(field of view, FoV) 영역만 고해상도로 전송하는 FoV 기반 타일 적응형 스트리밍 방식이 널리 활용되고 있다. 그러나 이 방식은 FoV 예측, 타일 선택, 해상도 결정을 모두 클라이언트에서 수행하기 때문에, 실시간 네트워크 혼잡 수준을 반영하기 어렵고 연산 부담과 전력 소모가 커져 비효율적인 요청과 기기 성능 저하를 유발할 수 있다. 본 논문에서는 이러한 한계를 해소하기 위해, FoV 예측과 타일 선택, 해상도 결정을 클라이언트에서 네트워크 엣지의 SmartNIC 으로 오프로드 하는 SmartNIC 기반 스트리밍 프레임워크인 GazeNIC 을 제안한다. GazeNIC 은 XR 클라이언트로부터 수신한 센서 데이터와 실시간 네트워크 혼잡도를 조합하여, 이를 기반으로 lookup table 을 조회하고 타일 인코딩 요청 메시지를 생성한다. 이를 통해 클라이언트의 처리 부담을 줄이면서, 자원 효율성과 사용자 체감 품질(quality of experience, QoE)의 균형을 달성할 수 있다.

I. 서 론

확장현실(XR) 서비스[1]는 가상현실(VR), 증강현실(AR), 혼합현실(MR)을 포괄하며, 몰입형 콘텐츠를 통해 다양한 산업 분야에서 활용 가능성을 넓혀가고 있다. 특히, 고해상도 360도 영상과 실시간 상호작용이 요구되는 XR 서비스에서는 실시간 전송과 초저지연성이 요구된다. 이를 충족하기 위해 대표적으로 사용되고 있는 기술이 사용자 시야(field of view, FoV) 기반 타일 적응형 스트리밍 방식이다[2]. 이 방식은 전체 화면을 타일 단위로 분할하고, FoV에 포함된 영역에 대해서만 고해상도 타일을 전송하며, 주변 영역은 저해상도로 전송한다. 이로 인해 자원을 효율적으로 사용하면서도 사용자 체감 품질(quality of experience, QoE)을 유지할 수 있다. 그러나 현재 대부분의 시스템에서는 이 FoV 예측과 타일 선택, 해상도 결정 과정을 XR 클라이언트 단에서 직접 수행하도록 설계되어 있다. 이러한 클라이언트 중심 구조는 다음과 같은 한계를 갖는다. 첫째, 클라이언트는 실시간 네트워크 혼잡 수준에 대한 정보를 알 수 없어, 비효율적인 타일 인코딩 요청이 발생한다. 둘째, FoV 예측과 타일 선택, 해상도 결정을 위한 지속적인 연산은 클라이언트의 연산 부담과 전력 소모를 증가시켜, 배터리 기반의 XR 기기 환경에서 지속성과 실용성을 저해한다.

본 논문에서는 이러한 한계를 해결하기 위해, 클라이언트의 FoV 예측과 타일 선택, 해상도 결정을 네트워크 엣지의 SmartNIC으로 오프로드하여, FoV 기반 타일 적응형 스트리밍 프레임워크 GazeNIC을 제안한다.

따라서 본 프레임워크는 클라이언트의 처리 부담을 줄이면서, 자원 효율성과 QoE의 균형을 달성할 수 있다.

II. 본론

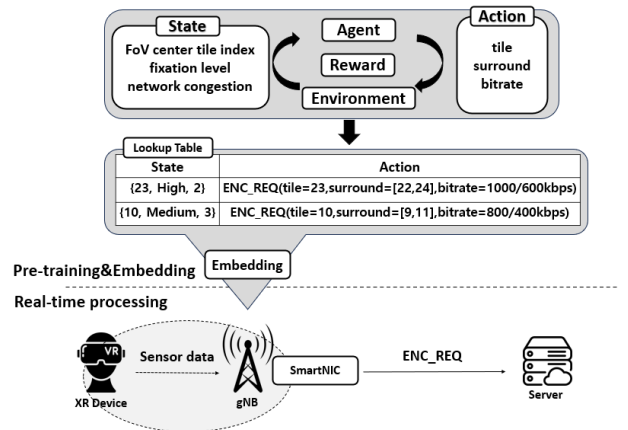


그림 1. 시스템 모델

그림 1은 본 논문의 시스템 모델이다. 시스템 모델은 크게 사전 학습 단계와 실시간 실행 단계로 구성된다.

사전 학습 단계에서는 사용자의 시선 정보, 머리 회전 등 센서 데이터와 큐 길이, 전송률, 패킷 손실률 등 네트워크 혼잡도를 모델링하여 강화학습 기반의 타일 인코딩 요청 정책을 학습한다. 구체적으로 강화학습의 state는 FoV 중심 타일 인덱스(FoV center tile index),

시선 고정 수준(fixation level), 그리고 네트워크 혼잡도(network congestion)로 구성된다. FoV 중심 타일 인덱스는 사용자가 바라본 타일을 의미하고 시선 고정 수준은 이 타일의 응시시간을 의미한다. 이 두가지를 이용하여 해당 타일의 중요도를 결정한다. 이로 인해 복잡한 예측 모델 없이도 현재 중심 타일에 대한 중요도를 반영할 수 있는 신뢰도 지표로 활용된다. 또한, 네트워크 혼잡도는 실제 네트워크 트래픽 데이터를 기반으로 계산되며, 큐 길이, 전송률, 패킷 손실률 등과 같은 지표를 통해 다양한 혼잡도를 모델링하였다. 이 state를 반영한 환경 속에서 강화학습 에이전트는 QoE와 자원 효율 간 균형을 고려하여 강화학습의 action인 FoV 중심 타일 인덱스와 적절한 타일 선택 범위, 해상도를 결정하는 타일 인코딩 요청 정책을 학습하며, 학습된 정책은 state-action 쌍으로 구성된 lookup table 형태로 변환되어 저장된다. 이 lookup table은 이후 SmartNIC으로 배포되어 실시간 실행 단계에서 사용된다.

실시간 실행 단계에서 XR 클라이언트는 주기적으로 센서 데이터를 gNB의 SmartNIC으로 전송한다. 이때, gNB는 네트워크 혼잡 수준을 측정해 센서 데이터와 함께 SmartNIC에 전달한다. SmartNIC은 전달받은 정보를 바탕으로 FoV 중심 타일 인덱스와 시선 고정 수준, 네트워크 혼잡도를 포함하는 state를 기반으로 lookup table을 조회하여 action을 결정한다. SmartNIC은 이 action을 바탕으로 타일 인코딩 요청 메시지인 ENC_REQ를 생성하고, 이를 서버에 전송한다. 예를 들어, ENC_REQ가 tile=23, surround=[22,24], bitrate=1000/600kbps인 경우, 이는 중심 타일 23번을 1000kbps의 고해상도로, 주변 타일인 22번과 24번을 600kbps의 저해상도로 인코딩하라는 의미이다. 서버는 이 ENC_REQ에 따라 불필요한 타일 전송을 줄이고, 필요한 타일만 적절한 해상도로 인코딩하여 클라이언트에 전송한다. 이를 통해 전체 시스템의 자원효율을 높이고 QoE를 향상시킬 수 있다.

III. 결론

본 논문에서는 클라이언트 중심으로 동작하던 기존 FoV기반 타일 적응형 스트리밍 방식의 한계를 해결하기 위해, SmartNIC기반 스트리밍 프레임워크인 GazeNIC을 제안하였다. GazeNIC은 FoV 예측, 타일 선택, 해상도 결정 등 기존에 클라이언트가 수행하던 복잡한 판단 과정을 네트워크 엣지의 SmartNIC으로 오프로드함으로써, 클라이언트의 연산 및 전력 소모를 줄이고 전체 시스템의 효율성을 향상시킨다. 특히, GazeNIC은 복잡한 예측 모델 없이도 시선 응시 시간을 이용하여 FoV 중심 타일과 그 중요도를 판단하며, 실시간 네트워크 혼잡 수준까지 반영하여 상황에 맞는 타일 인코딩 요청을 수행한다. 또한, 강화학습 기반의 정책을 lookup table 형태로 변환하여 SmartNIC에서 빠르고 안정적으로 실행할 수 있도록 구성함으로써, 실시간성을 확보하면서도 사용자 체감 품질과 자원 효율 사이의 균형을 달성한다.

현재 이 프레임워크는 아이디어 수준에서 정리된 것으로, 향후 연구로는 실제 SmartNIC 하드웨어 상에서의 구현과 성능 검증을 통해, 제안된 방식의 실효성을 정량적으로 평가할 예정이다.

ACKNOWLEDGMENT

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

참 고 문 헌

- [1] Z. Huang *et al.*, "Standard Evolution of 5G-Advanced and Future Mobile Network for Extended Reality and Metaverse," *IEEE Internet of Things Magazine*, vol. 6, no. 1, pp. 20-25, Mar. 2023.
- [2] F. Qian *et al.*, "Flare: Practical Viewport-Adaptive 360-Degree Video Streaming for Mobile Devices." in *Proc. MobiCom'18*, NY, USA, Oct. 2018.