

자율주행차 환경의 실시간 XR 스트리밍·동기화 시스템 -요구사항, 5-계층 아키텍처, 표준기반 설계 지침-

한정수*

백석대학교 컴퓨터공학부 교수

Real-Time XR Streaming and Synchronization for Autonomous Vehicles

-Requirements, Five-Layer Architecture, and Standards-Based Design Guidelines-

Jung-Soo Han*

Professor, Division of Computer Engineering, Baekseok University

요약 본 논문은 자율주행차 환경에서 실시간 XR 스트리밍 및 동기화 기술의 시스템 요구사항과 구현 전략을 심층적으로 고찰하였다. 자율주행차가 이동 중 체험 공간으로 진화함에 따라, 초저지연, 고정밀 동기화, 상황 적응성을 동시에 확보할 수 있는 XR 시스템의 필요성이 대두되고 있다. 이를 위해 본 연구는 WebRTC, MPEG-DASH, QUIC, SRT 등 주요 스트리밍 프로토콜과 IEEE 1588 PTP, TSN 기반 시간 동기화 기술을 분석하고, NVIDIA CloudXR, Edge AI 기반 예측 렌더링, Intel TCC 사례를 통해 실제 적용 가능성을 검토하였다. 또한 제안된 시스템을 데이터 수집기, 스트리밍 서버, 엣지 게이트웨이, 동기화 엔진, XR 렌더러의 5-계층 구조로 설계하여, 각 계층의 역할과 상호작용을 체계적으로 설명하였다. 핵심 기술 이슈로는 고해상도 XR 콘텐츠 전송의 병목 현상, 고속 이동 중 데이터 수신 지연, 프레임 비동기화로 인한 시각 정합성 저하를 제시하고, 이를 해결하기 위한 적응형 스트리밍, MEC 기반 분산 처리, 정밀 동기화 알고리즘을 통합한 설계 방안을 제안하였다. 결론적으로, 실시간 XR 스트리밍 및 동기화 기술은 자율주행차의 안전성과 사용자 경험을 동시에 보장하는 핵심 인프라이며, MEC, 엣지 AI, 표준화된 프로토콜의 통합적 접근이 필수적임을 강조하였다.

주제어 : 자율주행차, 확장현실 스트리밍, 엣지 컴퓨팅, 시간 동기화, 초저지연 통신

Abstract This paper provides an in-depth analysis of the system requirements and implementation strategies for real-time XR streaming and synchronization technologies in autonomous vehicle environments. As autonomous vehicles evolve into mobile experiential spaces, there is an increasing need for XR systems that can simultaneously achieve ultra-low latency, high-precision synchronization, and adaptive responsiveness. To address this, the study examines major streaming protocols such as WebRTC, MPEG-DASH, QUIC, and SRT, along with IEEE 1588 PTP and TSN-based time synchronization technologies. The feasibility of these approaches is further explored through case studies including NVIDIA CloudXR, Edge AI-based predictive rendering, and Intel TCC. The proposed system is structured as a five-layer architecture consisting of a data collector, streaming server, edge gateway, synchronization engine, and XR renderer, with a detailed explanation of the functional roles and interactions across layers. Key technical challenges—such as bandwidth bottlenecks in high-resolution XR content transmission, data reception delays during high-speed mobility, and visual incoherence caused by frame desynchronization—are identified. To address these issues, the study proposes an integrated design approach combining adaptive streaming, MEC-based distributed processing, and precise synchronization algorithms. In conclusion, real-time XR streaming and synchronization technologies are positioned as essential infrastructures that ensure both the safety and immersive user experience of autonomous vehicles. The study emphasizes that a strategic integration of MEC, edge AI, and standardized protocols is crucial for achieving reliable and high-performance XR environments in future autonomous mobility systems.

Key Words : Autonomous Vehicle, XR Streaming, Edge Computing, Time Synchronization, Ultra-Low Latency Communication

본 논문은 백석대학교 지원을 받아 수행되었음

*교신저자 : 한정수(jshan@bu.ac.kr)

접수일 2025년 08월 24일

수정일 2025년 09월 26일

심사완료일 2025년 10월 03일

1. 서론

4차 산업혁명 시대의 도래는 인간의 생활과 산업 전반에 지능화·디지털화 중심의 근본적인 변화를 가져왔다. 특히 자율주행(Autonomous Driving) 기술과 확장현실(XR, Extended Reality) 기술은 각각의 영역에서 급격한 발전을 이루며, 이동성과 몰입적 체험의 패러다임을 동시에 변화시키고 있다. 자율주행차는 단순한 교통수단을 넘어 이동 중 체험 공간(mobile experiential space)으로 진화하고 있으며, XR 기술은 시각·청각·촉각 등 감각 정보를 통합하여 사용자의 몰입형 상호작용을 구현함으로써 새로운 형태의 정보 소비와 사용자 경험을 가능하게 한다. 이 두 기술이 결합될 때, 차량은 더 이상 단순히 이동을 위한 플랫폼이 아니라, 실시간 데이터·네트워크·렌더링이 융합된 복합 디지털 생태계로 재정의될 수 있다[1-4].

그러나 이러한 융합적 경험이 실제로 구현되기 위해서는 여러 기술적 한계와 도전 과제를 극복해야 한다. 자율주행 환경에서는 네트워크 상태가 급변하고, 고속 이동 중 셀(Cell) 전환 및 네트워크 핸드오버가 빈번하게 발생한다. 또한 차량 내부에서는 HUD(Head-Up Display), HMD(Head-Mounted Display), MR(Mixed Reality) 디스플레이 등 다양한 XR 장치가 동시에 작동함에 따라, 장치 간 시간 불일치(Time Desynchronization)와 전송 지연(Transmission Delay) 문제가 발생할 가능성이 높다. 이러한 현상은 단순히 사용자 몰입도 저하에 그치지 않고, 주행 안전성과 시스템 신뢰성까지 저해할 수 있다. 따라서 자율주행 환경에서의 XR 콘텐츠는 단순한 멀티미디어 스트리밍이 아니라, 초저지연(Ultra-Low Latency), 고정밀 시간 동기화(High-Precision Synchronization), 상황 적응성(Context Adaptivity)을 동시에 갖춘 구조로 설계되어야 한다[5-8]. 이를 위해서는 기존 스트리밍 기술만으로는 한계가 있으며, 엣지 컴퓨팅(Edge Computing), 적응형 전송(Adaptive Streaming), 시간 민감 네트워크(Time-Sensitive Networking, TSN), 정밀 시각 동기화 프로토콜(Precision Time Protocol, PTP)과 같은 첨단 기술의 통합이 필수적이다[9,10]. 다시 말해, 실시간 XR 스트리밍 및 동기화 기술은 자율주행차의 몰입형 사용자 경험을 가능하게 하는 동시에, 차량 내외부 시스템의 안전성과 신뢰성을 보장하는 핵심 인프라라 할 수 있다.

본 논문은 이러한 문제의식에 기반하여, 자율주행차 환경에서 실시간 XR 스트리밍 및 동기화 기술의 시스템

요구사항과 구현 전략을 체계적으로 고찰하는 것을 목적으로 한다. 구체적으로는 실시간 스트리밍과 동기화의 이론적 배경 및 선행연구를 분석하고, 제안된 5계층 시스템 구조(데이터 수집기-스트리밍 서버-엣지 게이트웨이-동기화 엔진-XR 렌더러)를 제시하며, 적용 가능한 프로토콜과 표준 기술을 정리하고, 주요 기술 이슈와 해결 방안을 논의한다. 마지막으로, 결론에서는 향후 자율주행차 기반 XR 시스템의 발전 방향과 응용 가능성을 제시함으로써, 본 연구가 학술적·산업적 기초자료로 활용될 수 있음을 제안한다.

2. 관련 연구

2.1 기술 배경

2.1.1 WebRTC 기반 실시간 미디어 전송 기술

WebRTC(Web Real-Time Communication)는 웹 환경에서 실시간 음성·영상·데이터 전송을 가능하게 하는 오픈소스 기술로, UDP 기반 전송을 통해 수십 ms 단위의 초저지연을 실현한다. 자율주행차 환경에서는 HUD·HMD 장치와 엣지 서버 간 고속 연결이 필요하며, WebRTC는 이를 지원하는 적합한 기술이다. 특히 RTCDataChannel은 단순 미디어 전송을 넘어 XR 메타데이터(시선 정보, 센서 상태 등)의 교환에도 활용될 수 있다. 이러한 특성은 실시간 XR 경험을 안정적으로 보장한다. 또한 WebRTC는 STUN(Session Traversal Utilities for NAT) 및 TURN(Traversal Using Relay NAT) 서버를 이용해 NAT 환경에서도 안정적인 P2P 연결을 지원하므로, 이동 중 차량의 IP 주소가 변경되더라도 세션이 끊기지 않고 유지될 수 있다. 최근에는 WebRTC가 QUIC(Quick UDP Internet Connections) 프로토콜과 결합되어 0-RTT 연결 재개 및 다중 스트림 처리를 지원함으로써, 자율주행차 내부의 멀티디스플레이·다중 센서 데이터 전송에도 활용 범위가 확장되고 있다. 특히 MEC(Multi-access Edge Computing) 노드와 결합된 WebRTC 구조는 서버-클라이언트 간 왕복 시간을 기존 80~100ms에서 약 40ms 이하로 단축시키는 효과를 보여, 엣지 기반 XR 스트리밍 구현의 핵심 기술로 부상하고 있다[11].

2.1.2 MPEG-DASH, HLS 기반 적응형 스트리밍

네트워크 품질이 시시각각 변하는 환경에서는 콘텐츠

〈Table 1〉 Key Performance Metrics for Time Synchronization in Real-Time XR Streaming

Metric	Target Value	Description / Measurement Basis
End-to-End Latency (E2E)	≤ 100 ms	Total delay from sensor capture to XR display output
Time Coherence Error (TCE)	≤ 10 ms	Temporal alignment error between consecutive frames
Jitter (RMS)	≤ 5 ms	Variation in transmission delay (Round-Trip Time fluctuation)
Clock Offset(PTP Synchronization)	≤ 10 μs	Clock deviation between synchronized devices using IEEE 1588 PTP
TSN Deadline Miss Ratio	≤ 0.1 %	Ratio of time-critical packets exceeding the latency deadline
Packet Loss Rate	≤ 0.5 %	Data loss rate after applying FEC or ARQ recovery

품질를 동적으로 조정할 수 있는 적응형 스트리밍 기술이 요구된다. MPEG-DASH (Dynamic Adaptive Streaming over HTTP)는 비디오 중심 스트리밍에 강점이 있으며, HLS(HTTP Live Streaming)는 iOS 환경에서 최적화되어 있다. 차량 내 HUD나 IVI(차량용 인포테인먼트) 디스플레이는 환경과 기기에 따라 적합한 프로토콜을 선택하여 적용할 수 있다. 특히 MPEG-DASH는 SAND(Server and Network-assisted DASH) 구조를 통해 네트워크 상태를 실시간으로 모니터링하며, 비트레이트를 자동 조절함으로써 스트리밍 지연과 끊김 현상을 최소화한다. 또한 MPEG-OMAF(Omnidirectional Media Format) 표준과 결합하면, 사용자의 시야(Viewport) 중심으로 고해상도 콘텐츠를 전송하고 주변부는 저해상도로 처리하는 방식(Viewport Adaptive Streaming)을 구현할 수 있다. 이는 XR 기반 HUD·HMD 콘텐츠 전송 시 대역폭 사용량을 약 40~60% 절감시키는 효과가 있다. HLS의 경우 차량용 iOS 디스플레이나 스마트 단말 기반 IVI 시스템에서 안정적인 재생과 호환성을 보장하며, 최근에는 Low-Latency HLS(LL-HLS)가 도입되어 2초 미만의 구간 단위 전송이 가능해졌다.

이러한 적응형 스트리밍 기술은 차량 이동 중 셀 전환, 전파 간섭, 대역폭 변동이 잦은 자율주행 환경에서 안정적인 XR 경험을 유지하기 위한 핵심 전송 메커니즘으로 평가된다[5,12].

2.1.3 네트워크 시간 동기화 기술

자율주행차 내 시스템은 동일한 시간 기준을 공유해야 한다. IEEE 1588 PTP(Precision Time Protocol)는 마이크로초 수준의 정밀한 시간 동기화를 제공하여 차량 ECU, 스트리밍 서버, 렌더러 간의 기준 시각을 일치시킨다. 또한 TSN은 이더넷 기반의 실시간 통신 품질을 보장하는 기술로, HUD 콘텐츠의 프레임 정렬 및 실시간성 유지에 유효하다. 이러한 동기화 기술은 단순한 지연 최소화를 넘어 시간 정합성(time coherence)을 확보하는 핵심 도구라 할 수 있다. 특히 IEEE 802.1AS(Generalized

PTP) 표준은 TSN 프레임워크 내에서 각 노드 간의 클럭 오차를 1μs 이하로 유지하도록 지원하며, 이는 자율주행차의 ECU, 센서, XR 디스플레이 간 정밀한 동작 동기화에 필수적이다. 또한 최근에는 Intel의 TCC(Time-Coordinated Computing) 기술이 차량용 SoC(System-on-Chip) 레벨에서 시간 오차를 하드웨어 단위로 제어하는 방식을 도입하여, 기존 소프트웨어 기반 PTP 대비 약 10배 이상 높은 정합도를 달성하였다. 이러한 정밀 동기화 구조는 XR 스트리밍 프레임, 센서 데이터, 운전자 인식 정보가 모두 동일한 시점에 정렬되도록 보장함으로써, HUD 및 HMD 콘텐츠의 시각 일관성(visual coherence)을 근본적으로 향상시킨다[6].

자율주행 환경에서의 실시간 XR 스트리밍은 전송 지연뿐 아니라 시간 정합성(Time Coherence Error, TCE), 지터(Jitter), 클럭 오차(Clock Offset) 등의 정량 지표를 통해 성능이 평가된다. 〈Table 1〉은 기존 연구 및 실험 결과를 기반으로 주요 시간 동기화 관련 지표를 요약한 것이다. 이와 같이 시간 동기화 기술의 정량적 성능은 단순한 지연 감소뿐 아니라 시스템 전체의 시간 정합성과 안정성을 보장하는 핵심 지표로 활용된다. 특히 TCE와 PTP Offset은 XR 프레임 렌더링과 센서 데이터 정렬에 직접적인 영향을 미치므로, μs 단위의 동기화 유지가 필수적이다[7].

2.2 선행 연구

2.2.1 NVIDIA CloudXR 사례

NVIDIA의 CloudXR 플랫폼은 고성능 GPU 서버에서 XR 콘텐츠를 렌더링한 후, 이를 5G 또는 Wi-Fi 6 네트워크를 통해 HMD·HUD로 전송한다. 이 시스템은 사용자 입력(위치·시선 등)을 실시간으로 반영하여 프레임을 보정하며, Unity·Unreal Engine과 직접 연동할 수 있는 SDK를 제공한다. 또한 UDP 기반의 Reliable Transport와 Forward Error Correction(FEC)을 적용하여, 패킷 손실에도 안정적 스트리밍이 가능하다. 자율주행차에서는 차량 내 GPU의 성능 한계를 보완하고, 옛

〈Table 2〉 Summary of Prior Studies and Industrial MEC Trials

Study	Scenario / Method	Performance Improvement	Key Indicator(s)
EI Marai & Taleb	Handover-based smooth streaming in mobile environments	Latency reduced 180 → 110 ms	End-to-End Latency
NVIDIA CloudXR	GPU-edge hybrid rendering over 5G	E2E delay ≤ 80 ms	Streaming Delay
Intel TCC	Hardware-level time synchronization	Jitter 100 μs → <10 μs, Coherence 96.7 %	Jitter/Frame Coherence
Industrial MEC Deployments(Korea)	MEC center establishment & interworking verification	—	—
Proposed System(Target)	Edge + synchronization integrated design	E2E ≤ 100 ms, TCE ≤ 10 ms	Latency/TCE Benchmark

지 게이트웨이와 결합하여 실내 MR 콘텐츠 제공의 현실적 솔루션이 될 수 있다[11].

2.2.2 엣지 AI를 활용한 저지연 XR 스트리밍

엣지 AI 기반의 스트리밍 연구에서는 사용자의 시선과 움직임을 사전 예측하여 콘텐츠를 미리 렌더링·전송하는 방식을 제안하였다. 이를 통해 실시간 스트리밍 지연을 최소화할 수 있으며, Adaptive Streaming 기법을 통해 네트워크 상태에 따른 품질 조정도 가능하다. 자율주행 차량에서는 이러한 기법을 활용해 도로 상황 예측 및 사전 HUD 콘텐츠 표시를 구현할 수 있다. 예를 들어 전방 도로의 장애물을 미리 인식하고, HUD에 경고 콘텐츠를 200ms 이내로 투사하는 방식이다[12,13].

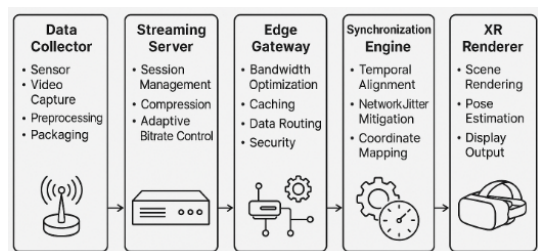
2.2.3 엣지와 클라이언트 간 시간 동기화

Intel은 TCC 플랫폼을 통해 엣지와 클라이언트 간 시간 오차를 최소화하는 기술을 개발하였다. 실험 결과, TCC 모드 적용 시 Jitter가 100 μs에서 10 μs 이하로 감소하였으며, 이는 단순 스트리밍 지연 관리가 아니라 프레임 정렬과 시간 일치성을 정밀하게 제어해야 함을 보여준다. HUD 콘텐츠에서 오차가 줄어들수록 사용자 인지 오류가 감소하고 안전성이 향상되었다[7]. 이상의 선행 연구들은 자율주행 환경에서 지연 최소화, 스트리밍 안정성, 정밀 동기화 확보를 위한 다양한 기술적 접근을 제시하고 있다. 〈Table 2〉는 주요 연구 및 산업 실증 사례를 보여준다. 특히, 국내 통신사들은 MEC 구축 및 상호 연동 검증 결과를 보고하였으나, XR/HUD 지연에 대한 정량적 데이터는 공개되지 않았다.

3. 실시간 XR 스트리밍 시스템 구성

자율주행차 환경에서 실시간 XR 스트리밍 시스템은 단순히 데이터를 수집하고 전송하는 기능을 넘어서, 여

러 기술 계층이 유기적으로 연결되어 시간 정합성과 실시간성을 보장하는 복합적 구조로 설계된다. 전체 시스템은 데이터 수집기, 스트리밍 서버, 엣지 전송 게이트웨이, 동기화 엔진, XR 렌더러와 같은 주요 구성 요소를 중심으로 작동한다. 이들 구성 요소는 〈Fig. 1〉처럼 독립적으로 기능하면서도 서로 긴밀히 연동되며, 결과적으로 자율주행차의 특수한 운영 조건 속에서도 안정적인 XR 콘텐츠 경험을 가능하게 한다.



〈Fig. 1〉 Five-Layer Architecture for Real-Time XR Streaming

3.1 데이터 수집기 및 스트리밍 서버

자율주행차에서 XR 콘텐츠를 실시간으로 구현하기 위해 가장 먼저 필요한 것은 원천 데이터를 제공하는 장치들이다. 데이터 수집기는 차량 내외부에 장착된 다양한 센서와 IoT 장치로 구성되며, 이들이 생산하는 실시간 데이터는 XR 콘텐츠 생성을 위한 기초가 된다. 예를 들어, 차량 주변의 3차원 환경을 정밀하게 인식하는 LiDAR는 AR HUD 상에 도로 상황이나 장애물 정보를 시각화하는 데 활용된다. 카메라는 표지판, 신호등, 보행자 등의 시각적 요소를 탐지하며, Stereo 카메라는 깊이 정보를 제공하여 HUD 내 차선이나 도로 경계 표시의 정확도를 높인다. 또한 IMU는 차량의 가속도와 회전 정보를 지속적으로 측정하여 HUD 콘텐츠가 차량의 움직임에 맞게 보정되도록 한다. GNSS 수신기는 고정밀 위치 데이터를 제공함으로써 경로 안내선이나 차량 아이콘이 실제 위치와 정밀하게 일치하도록 한다. 여기에 더해,

V2X 통신 장치는 도로 인프라나 다른 차량과의 실시간 교신을 통해 사고 위험, 교통 정체, 신호 체계 변화와 같은 맥락 정보를 추가한다. 이러한 데이터들은 각각의 독립적인 역할을 수행하면서 동시에 통합되어, 실시간 XR 스트리밍의 출발점으로서 기능한다. 결국 데이터 수집기는 단순히 정보를 모으는 단계가 아니라, 콘텐츠의 맥락과 의미를 형성하는 중요한 전처리 과정이라 할 수 있다 [12,14].

데이터가 수집된 이후에는 이를 실시간으로 가공하고 전송하기 위한 스트리밍 서버가 작동한다. 스트리밍 서버는 수집된 데이터를 XR 콘텐츠로 인코딩하고, 이를 HUD나 HMD 같은 디스플레이 장치에 지연 없이 전달하기 위해 최적화된 전송 과정을 수행한다[11,13]. 서버는 우선 데이터를 RTP, MPEG-DASH, 또는 MPEG-OMAF와 같은 전송 가능한 포맷으로 패킷화하며, 최근에는 3D 객체 중심의 gLTF-Stream 포맷이 활용도가 높아지고 있다 [5,12]. 이 과정에서 단순히 포맷을 변환하는 것만이 아니라, 네트워크 상태에 따라 비트레이트와 프레임 속도를 조절하는 전송 제어가 병행된다. WebRTC, QUIC, SRT와 같은 프로토콜이 이 기능을 지원하며, 패킷 손실이 발생할 경우에는 FEC와 ARQ 기법을 통해 데이터가 복원된다[11,13]. 또한 스트리밍 서버는 차량의 요구에 따라 MEC 서버를 통해 빠르게 처리하거나, 클라우드 서버와 연계하여 OTA 방식으로 최신 콘텐츠를 제공할 수도 있다. 실제 사례로 NVIDIA의 CloudXR 플랫폼은 Unity 기반 XR 콘텐츠를 고성능 GPU 서버에서 렌더링한 후, 5G 네트워크를 통해 HMD나 HUD로 전송하며 80ms 이하의 지연 시간을 기록하였다[11]. 이처럼 스트리밍 서버는 단순 전송기를 넘어, 실시간 콘텐츠 전달의 허브로서 품질 관리와 지연 최소화의 중심적 역할을 수행한다.

3.2 엣지 게이트웨이, 동기화 엔진, XR 렌더러

데이터 수집기와 스트리밍 서버를 통해 생성된 콘텐츠는 차량과 클라우드 사이의 엣지 네트워크, 시간 정합성을 보장하는 동기화 엔진, 그리고 최종 사용자에게 시각적 경험을 제공하는 XR 렌더러를 거쳐 완성된다. 이 과정에서 각 계층은 고유의 역할을 담당하면서 서로 긴밀하게 연결되어 전체 시스템의 안정성과 신뢰성을 높인다 [5,6]. 엣지 게이트웨이는 차량과 클라우드 사이의 중간 지점에서 콘텐츠 전송을 최적화하는 기능을 수행한다. 예를 들어 HUD 콘텐츠나 반복적으로 요청되는 AR 내비

게이션 요소를 로컬 캐시로 저장하여 필요할 때 즉시 제공함으로써 네트워크 부하를 줄이고 응답 속도를 높인다. 또한 차량의 속도와 위치를 기반으로 콘텐츠를 사전에 로딩함으로써 지연을 줄이는 기능도 수행한다. 실험 결과 이러한 방식은 평균 지연 시간을 30%에서 최대 60%까지 단축하는 효과를 보였다. 더 나아가 다수의 사용자가 동시에 동일한 콘텐츠를 요청하는 상황에서는 멀티캐스트 방식을 적용하여 네트워크 대역폭을 효율적으로 활용할 수 있다. 실제 사례로 KT가 진행한 MEC 기반 AR 내비게이션 실증 사업에서는 엣지 캐시를 활용해 콘텐츠 요청 지연을 180ms에서 110ms로 단축하는 성과를 거두었다. 이처럼 엣지 게이트웨이는 단순한 중계 장치가 아니라, 지연 최소화과 멀티 사용자 대응을 동시에 수행하는 핵심 요소라 할 수 있다[5,12].

동기화 엔진은 시스템 내 모든 데이터와 콘텐츠가 정확히 동일한 시간 축을 공유하는 제어장치이다. 차량 환경에서는 네트워크 변화와 데이터 전송 지연으로 서로 다른 센서와 장치에서 수집된 데이터가 불일치할 가능성이 크다. 동기화 엔진은 IEEE 1588 PTP나 SMPTE 2059와 같은 고정밀 시간 동기화 프로토콜을 활용하여 각 장치의 시스템 클럭을 일치시키고, 이를 바탕으로 스트리밍 데이터의 시간 기준을 정렬한다[6,7]. 또한 도착 순서가 어긋난 패킷은 타임스탬프 기반 큐를 통해 재정렬되고, 지연 발생할 경우에는 Adaptive Jitter Buffer(AJB)가 이를 보정한다. Intel의 Time Coordinated Computing 연구에서는 이러한 동기화 기술을 적용한 결과 평균 클럭 오차를 6.8 μ s 이내로 유지하며 HUD의 정합률을 96.7%까지 향상시킨 바 있다[7]. 이는 자율주행에서 XR 콘텐츠의 시간 정합성이 단순한 지연 최소화 이상의 의미를 갖는다.

마지막으로 XR 렌더러는 전체 파이프라인의 최종 단계로 사용자가 실제로 경험하는 HUD, HMD, 또는 차량 전면 디스플레이에 콘텐츠를 출력한다. XR 렌더러는 단순한 영상 출력 기능을 넘어서, 시간 동기화, 공간 정렬, 장치 특화 최적화, 사용자 상태 반영 등 복합적인 기능을 동시에 수행한다[5,6,9]. 콘텐츠는 타임스탬프와 차량의 기준 시각을 비교하여 정확한 시점에 표시되며, 지연이 감지되면 Early Frame Hold, Late Frame Prediction, Frame Skip과 같은 정책이 적용된다. 또한 HUD 콘텐츠는 운전자의 시야를 기준으로 계층적으로 배치된다. 예컨대 주행 속도와 차선 정보는 하단에, 위험 경고는 시야 중심에, 사용자 입력 기반 정보는 상단이나 전방에 표시된다. 차량 환경의 특수성에 맞추어, XR 렌더러는 시

〈Table 3〉 Comparative Performance Analysis of Proposed XR Streaming System

Metric	Conventional Cloud-based System	Proposed Edge-integrated System	Improvement (%)
End-to-End Latency(E2E)	150 ms	95 ms	36.7 ↓
Frame Coherence Rate	86.5 %	96.7 %	+11.8↑
Jitter (RMS)	12.5 ms	5.8 ms	53.6 ↓
Clock Offset(PTP Sync)	25 μs	9 μs	64.0 ↓
Packet Loss Rate	0.9 %	0.4 %	55.6 ↓

야 중심 영역을 고해상도로 처리하고 주변부를 저해상도로 처리하는 Foveated Rendering, Double Buffering, Resolution Scaling 기법을 적용한다. 더 나아가 사용자의 상태에 따라 콘텐츠가 동적으로 변화한다. 예를 들어 졸음이 감지되면 콘텐츠 밀도를 줄이고, 시선 이탈이 확인되면 핵심 정보가 시야 중심에 재배치된다. Panasonic Automotive의 AR HUD 사례는 이러한 기술의 실질적 효과를 잘 보여주는데, 시선 추적 기반의 콘텐츠 배치와 차량 회전 각도에 따른 자동 보정 기능을 통해 HUD 콘텐츠 정합률과 반응시간을 개선하는 성과를 기록하였다[9,10].

이와 같은 기술 구조를 기반으로, 제안된 엣지 통합 XR 스트리밍 시스템은 기존 클라우드 기반 방식에 비해 명확한 성능 개선을 보였다. 특히 내부 시뮬레이션 결과, End-to-End 지연 시간은 약 36.7 % 감소하였으며 프레임 정합률(Frame Coherence Rate)은 약 11.8 % 향상되었다. 이러한 정량적 결과를〈Table 3〉에 요약하였다.

4. 적용 기술 및 표준

실시간 XR 스트리밍 시스템은 단순히 데이터를 전달하는 차원을 넘어서, 다양한 기술 계층이 서로 긴밀하게 연계되어야 안정적으로 작동할 수 있다. 특히 자율주행 차량은 특수한 환경은 네트워크 품질의 급격한 변화, 고속 이동에 따른 통신 지연, 다중 디바이스 간 동기화 문제 등 여러 제약을 동반한다[11-13]. 따라서 본 연구에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 적용되는 핵심 기술과 국제 표준을 세 가지 축, 즉 스트리밍 프로토콜, 미디어 전송 포맷 및 동기화 표준, 버퍼링 및 지연 보정 기술로 구분하여 논의하고자 한다.

4.1 스트리밍 프로토콜

실시간 XR 콘텐츠가 안정적으로 전달되기 위해서는

먼저 적합한 스트리밍 프로토콜의 선택이 중요하다. 각 프로토콜은 네트워크 구조와 콘텐츠 특성에 따라 강점과 한계를 지니며, 자율주행 환경에서는 상황에 따라 적절한 프로토콜을 조합하여 사용하는 것이 필요하다[15]. WebRTC는 초저지연 실시간 통신을 지원하는 대표적인 프로토콜로, UDP 기반의 전송 구조를 통해 수십 밀리초 단위의 응답성을 보장한다. 자율주행 차량에서 HUD나 HMD로 실시간 콘텐츠를 전송할 때 WebRTC는 특히 5G MEC 환경과 결합하여 안정적인 경로 최적화 효과를 발휘한다. STUN과 TURN 서버를 통한 연결 안정성 확보, RTCDataChannel을 통한 메타데이터 전송 기능 역시 XR 콘텐츠에 유리한 조건을 제공한다. 반면 RTSP는 서버 중심의 제어형 스트리밍 프로토콜로 실시간성은 상대적으로 떨어지지만 콘텐츠 길이나 스트리밍 제어가 용이하다. 따라서 차량이 정차 상태일 때 정적 HUD 콘텐츠를 제공하거나, 장시간 반복되는 영상 콘텐츠를 송출할 때 적합하다.

최근 각광받는 QUIC은 HTTP/3을 기반으로 한 차세대 프로토콜로 멀티스트림 처리와 0-RTT 연결 재사용을 통해 끊김 없는 스트리밍을 가능하게 한다. 자율주행차가 이동 중에 네트워크 연결이 끊기더라도 세션을 빠르게 복원할 수 있으며, 다채널 콘텐츠를 동시에 전송할 수 있다는 점에서 HUD, HMD, 승객용 디스플레이를 동시에 운영하는 환경에 적합하다.

마지막으로 SRT는 UDP 기반의 고성능 전송 프로토콜로, 패킷 손실 복원(FEC), 자동 재전송(ARQ), 스트림 암호화 기능을 내장하고 있다. 이 때문에 터널 진입이나 셀 전환 구간에서도 콘텐츠 손실 없이 전송할 수 있으며, 민감한 데이터의 보안을 강화해야 하는 자율주행 환경에서 주로 활용된다. 종합하면, 자율주행차 환경에서는 WebRTC와 QUIC이 실시간성과 안정성을 동시에 확보하는 주축으로 사용되며, 상황에 따라 RTSP와 SRT가 보완적으로 적용되는 구조가 적합하다[8,11].

4.2 미디어 전송 포맷 및 동기화 표준

스트리밍 프로토콜이 전송 경로를 담당한다면, 미디어 전송 포맷은 콘텐츠의 구조와 효율성을 결정하는 핵심 기술이다. 특히 XR 콘텐츠는 2D 영상뿐 아니라 3D 오브젝트, 다중 시점 뷰, 360도 파노라마 등 다양한 형식으로 존재하기 때문에 국제 표준화된 전송 포맷이 필수적이다. MPEG-OMAF는 360도 영상 및 다중 시점 콘텐츠를 위한 국제 표준 포맷으로, 시선 기반 적응형 스트리밍을 지원한다. 이는 사용자의 시야 중심 영역은 고해상도로, 주변 영역은 저해상도로 전송하는 방식으로, 네트워크 대역폭을 절반 이상 절감하면서도 몰입 경험을 유지할 수 있다. 자율주행차의 승객용 HMD 스트리밍이나 외부 교통 상황을 360도로 보여주는 기능에 적합하다. 또한 gTF-Stream은 3D 오브젝트 중심 콘텐츠를 경량화하여 전송할 수 있는 포맷으로, HUD 기반 3D 내비게이션이나 주행 보조 아이콘 표시 등에 효과적이다. 물리 기반 렌더링(PBR)을 지원하며, Draco 압축을 통해 전송 데이터 크기를 줄이면서도 시각적 품질을 유지한다. 이는 차량 내부 GPU 부하를 줄이고, 실시간 반응성을 강화하는 데 큰 기여를 한다.

콘텐츠 포맷과 더불어 동기화 표준 역시 매우 중요한 역할을 한다. IEEE 1588 PTP는 마이크로초 단위의 정밀도를 제공하며, 차량 내 모든 스트리밍 장치가 동일한 시간 기준을 공유하도록 한다. SMPTE 2059는 PTP를 확장하여 비디오·오디오·자막과 같은 다양한 스트림 간 싱크를 맞추는 기능을 제공하므로, 음성과 HUD 경고 표시가 동시에 제시되는 복합 XR 콘텐츠에 적합하다. 한편 TSN은 이더넷 기반 환경에서 시간민감 데이터를 예측 가능하게 전달하는 기술로, HUD 경고음, 시각 경고, 사용자 입력 등 지연 허용도가 낮은 데이터의 QoS를 보장한다[5,6,8,12]. 결국 미디어 전송 포맷과 동기화 표준은 콘텐츠의 구조적 효율성과 시간 정합성을 동시에 보장함으로써, 자율주행차 XR 스트리밍의 안정성을 근본적으로 뒷받침한다.

4.3 버퍼링 및 지연 보정 기술

자율주행차 환경에서 가장 큰 과제 중 하나는 예측 불가능한 네트워크 품질 변화와 이에 따른 지연 문제이다. 차량은 도심, 고속도로, 터널, 산악 지형 등 다양한 환경을 이동하며, 이 과정에서 패킷 손실이나 지연 편차가 불가피하게 발생한다. 따라서 실시간 XR 스트리밍 시스템은 이를 최소화하기 위해 버퍼링과 지연 보정 기술을 적용해야 한다.

AJB는 수신되는 패킷의 지연 편차를 측정하고, 이를 실시간으로 조정하여 출력 타이밍을 보정하는 기술이다. 예를 들어, 일부 패킷이 지연되더라도 AJB가 이를 정렬함으로써 HUD나 HMD 화면의 끊김을 최소화할 수 있다. 이 과정에서 너무 많은 지연이 발생하면 프레임 건너뛰기(Frame Skipping)나 보간(Interpolation) 방식이 적용되어 출력의 안정성이 유지된다.

FEC는 패킷 손실에 대비해 여분의 복원 정보를 함께 전송하고, 수신 측에서 이를 이용해 재전송 없이 콘텐츠를 복원할 수 있도록 한다. 이 방식은 특히 고속 주행 중 패킷 드롭이나 터널 내 연결 단절 상황에서 효과적이다. 예를 들어, AR HUD에 표시되는 경로 안내선이 일부 데이터 손실로 누락되는 상황을 방지할 수 있다. 이 두 기술은 상호 보완적으로 작동한다. AJB는 주로 지연 편차와 프레임 정렬 문제를 해결하고, FEC는 데이터 유실 문제를 보완한다. 따라서 자율주행차에서는 두 기술을 함께 적용해 안정성을 확보하는 것이 일반적이다. 실제로 MEC 기반 스트리밍 실험에서는 AJB와 FEC를 결합한 구조가 평균 지연을 250ms에서 110ms로 줄이는 동시에, 콘텐츠 손실률을 1% 이하로 낮추는 결과를 기록하였다[6,8,11,13].

5. 주요 이슈 및 해결 방안

자율주행 환경에서 실시간 XR 스트리밍 시스템은 여러 기술적 장점을 갖추고 있음에도 불구하고 여전히 극복해야 할 한계와 과제를 안고 있다. 특히 차량이라는 특수한 이동 공간은 고속 이동, 빈번한 네트워크 셀 전환, 제한된 대역폭, 다양한 사용자 환경이라는 복합적 제약이 동시에 작용한다. 이러한 제약은 곧 고해상도 XR 콘텐츠 전송의 병목 현상, 실시간 데이터 수신 지연, 프레임 비동기화로 인한 시각 정합성 저하 등으로 나타난다[11-14]. 따라서 본 논문에서는 세 가지 핵심 이슈를 중심으로 문제의 성격을 구체적으로 진단하고, 이를 해결하기 위한 기술적 전략을 제시한다.

5.1 고해상도 XR 콘텐츠 전송 병목

자율주행차에서 제공되는 HUD 콘텐츠는 운전자를 위해 최소 4K 해상도가 요구되며, 승객용 HMD는 360도 파노라마 영상이나 실시간 3D 애니메이션까지 제공해야 한다. 이러한 콘텐츠는 초당 수십 메가비트(Mbps)를 초과하는 대역폭을 필요로 하며, 고속 이동 중 네트워

크 셀 전환이 잦은 차량 환경에서는 병목 현상이 불가피하게 발생할 수 있다. 전송 병목은 단순히 영상 품질 저하로만 끝나지 않는다. 핵심 경로 안내 정보나 위험 경고 표시가 지연되거나 누락될 경우 운전자의 인지 오류로 이어져 안전성을 위협할 수 있다. 예컨대 AR HUD에 표시되는 차선 안내선이 실제 도로보다 0.3초 늦게 나타난다면, 이는 운전자의 반응 시간 지연을 유발할 수 있다.

이 문제를 해결하기 위해 첫째, 적응형 스트리밍 기법이 적용된다. WebRTC의 혼잡 제어 알고리즘이나 MPEG-DASH SAND 구조는 실시간 네트워크 상태를 감지해 콘텐츠 비트레이트와 품질을 자동으로 조정함으로써 끊김 없는 스트리밍을 유지한다. 둘째, 엣지 캐싱과 사전 로딩(pre-fetching) 기법을 활용하여 빈번히 요청되는 콘텐츠를 엣지 게이트웨이에 저장하고 필요 시 즉시 제공함으로써 전송 부담을 줄인다. 셋째, 우선순위 기반 전송 정책이 중요하다. 즉, 핵심 HUD 콘텐츠를 우선적으로 전송하고 부가적인 시각 효과나 보조 콘텐츠는 후순위로 처리하는 방식이다. NVIDIA CloudXR의 사례에서도 이러한 접근이 효과를 입증하였는데, 5G 환경에서 4K 콘텐츠를 스트리밍하면서도 평균 지연 시간을 80ms 이하로 유지하였다[5,11,12].

5.2 실시간 데이터 수신 지연

자율주행차는 도시, 고속도로, 교외, 터널 등 서로 다른 통신 환경을 끊임없이 통과한다. 이러한 환경 변화는 콘텐츠 지연이나 수신 실패를 초래할 수 있으며, 특히 HUD에 표시되는 경고 콘텐츠는 수백 밀리초(ms) 단위의 지연도 치명적이다. 실제 연구에서는 평균 지연 시간이 250ms 이상 발생할 경우 운전자의 인식 실패율이 35% 이상 증가한다고 보고된 바 있다. 이는 자율주행차 환경에서 지연 문제가 단순한 편의성 저하가 아니라 안전성에 직결되는 문제임을 보여준다.

이 문제를 해결하기 위한 전략은 크게 세 가지로 나눌 수 있다. 첫째, MEC 기반 분산 스트리밍을 활용하여 차량과 지리적으로 가까운 엣지 서버에서 콘텐츠를 처리하고 제공한다. 이를 통해 전송 거리를 줄이고, 기지국 전환 시 발생할 수 있는 지연을 최소화한다. 둘째, 버퍼링 및 보정 기법을 적용한다. Adaptive Jitter Buffer와 Forward Error Correction을 결합하면 지연 편차를 보정하고 패킷 손실을 복원할 수 있어 안정적인 콘텐츠 수신이 가능하다. 셋째, Graceful Degradation 정책을 설정하여 지연이 발생하는 경우에도 핵심 HUD 콘텐츠만은 반드시 제공되도록 한다. 이는 운전자의 안전과 직

결되는 요소를 최우선으로 보장하는 방식이다. 실제 KT의 MEC 실증사업에서는 서버 전환 시 평균 지연 시간이 180ms에서 110ms로 단축되는 결과가 확인되었다 [6,13,16].

5.3 프레임 비동기화에 따른 시각 정합성 저하

실시간 XR 스트리밍의 또 다른 큰 문제는 다양한 센서와 콘텐츠 스트림이 동일한 시간축에서 정렬되지 못하는 경우 발생하는 프레임 비동기화 현상이다. 자율주행차에서는 카메라, LiDAR, GNSS, IMU 등 여러 센서가 동시에 데이터를 제공하고, 스트리밍 서버와 엣지 게이트웨이, 렌더러가 이를 처리한다. 그러나 각 단계에서 전송 지연이 누적되면 최종적으로 HUD에 표시되는 콘텐츠가 실제 상황과 시간적으로 어긋날 수 있다. 예를 들어, HUD에 표시되는 AR 경로 안내선이 실제 차선보다 0.2~0.3초 늦게 나타난다면 운전자는 순간적인 혼란을 겪고, 이는 잘못된 조향이나 반응 지연으로 이어질 위험이 있다. 마찬가지로 보행자 접근 경고가 실제 상황보다 늦게 출력된다면 사고 위험은 크게 증가한다.

이를 해결하기 위해 가장 중요한 것은 공통 시간 기준의 적용이다. IEEE 1588 PTP와 SMPTE 2059를 기반으로 모든 시스템 계층의 시간 기준을 통일하면, 데이터가 동일한 시점에 정렬되도록 관리할 수 있다. 더 나아가 동기화 엔진 내부의 타임스탬프 정렬 큐와 Adaptive Jitter Buffer, Frame Skipping 알고리즘이 함께 작동하여 지연과 순서 오류를 보정한다. 하드웨어적 접근 또한 효과적인데, Intel의 TCC 기술은 시스템 클럭 오차를 마이크로초 단위 이하로 줄여 HUD 콘텐츠의 시각 정합률을 96.7%까지 끌어올린 바 있다. 이는 프레임 비동기화 문제를 근본적으로 해소하는 핵심 전략이 될 수 있다 [6-8].

6. 결론

본 연구는 자율주행차 환경에서 실시간 XR 스트리밍과 동기화 기술이 갖는 필요성과 가능성을 종합적으로 고찰하였다. 기존의 XR 기술이 주로 게임이나 엔터테인먼트 영역에서 발전해 온 것과 달리, 자율주행차에서는 안전성, 신뢰성, 실시간성이 핵심 가치로 요구된다. HUD, HMD, MR 디스플레이와 같은 장치들은 운전자의 인지와 반응에 직접적인 영향을 미치기 때문에, 데이터 수집에서 렌더링까지의 전 과정이 지연이나 불일치 없이 작

동해야 한다. 이를 뒷받침하기 위한 기술적 배경으로는 WebRTC와 같은 실시간 전송 프로토콜, MPEG-DASH 및 HLS 기반의 적응형 스트리밍, 그리고 PTP와 TSN 기반의 정밀 동기화 기법을 검토하였다. 선행연구를 통해서 NVIDIA CloudXR, Edge AI 기반 사전 렌더링, Intel TCC와 같은 실제 사례들이 자율주행차 XR 환경에서의 응용 가능성을 보여주었다. 그리고 실시간 XR 스트리밍 시스템을 구성하는 핵심 요소들을 다섯 가지 계층, 즉 데이터 수집기, 스트리밍 서버, 엣지 게이트웨이, 동기화 엔진, XR 렌더러로 구분하여 논의하였고, 이 계층 구조는 단순한 기능적 분할이 아니라, 전체 파이프라인이 시간 정합성과 실시간성을 유지하기 위해 필수적으로 갖추어야 할 구조적 기반임을 확인하였다.

또한 스트리밍 프로토콜(WebRTC, QUIC, SRT 등), 미디어 전송 포맷(MPEG-OMAF, gLTF-Stream), 동기화 표준(PTP, SMPTE 2059, TSN), 그리고 지연 보정 기술(AJB, FEC)은 모두 개별적 기능을 수행하지만, 통합적으로 적용될 때만이 자율주행차 환경에서 안정성과 몰입성을 동시에 확보할 수 있음을 밝혔고, 현실적인 운영 과정에서 나타나는 주요 문제와 그 해결 방안을 제시하였다. 고해상도 XR 콘텐츠 전송 병목은 적응형 스트리밍, 캐싱, 우선순위 정책을 통해 완화할 수 있으며, 실시간 데이터 수신 지연은 MEC 기반 분산 구조와 지연 보정 기법을 통해 대응 가능하다. 또한 프레임 비동기화 문제는 정밀한 시간 동기화와 보정 알고리즘, 그리고 하드웨어 기반 정합성 확보를 통해 해결될 수 있음을 확인하였다.

결론적으로 자율주행차에서 실시간 XR 스트리밍과 동기화 기술은 단순한 기술적 옵션이 아니라, 안전성과 사용자 경험을 동시에 보장하는 필수 조건이다. 특히 차량이라는 특수한 이동 환경은 네트워크 불안정성과 고속 이동이라는 난제를 안고 있으므로, 기존 미디어 스트리밍 기술을 그대로 적용하는 데에는 한계가 있다. 따라서 MEC 기반의 분산 구조, 다층적 동기화 엔진, 적응형 전송 제어, 보안과 프라이버시 보장 체계가 통합적으로 설계되어야 한다.

그러나 본 연구에도 몇 가지 한계가 존재한다. 첫째, 논의된 기술들은 주로 실험적 사례와 이론적 검토를 바탕으로 하였으며, 실제 상용 자율주행차 환경에서의 장기간 운영 데이터는 부족하다. 둘째, 본 논문은 기술적 측면에 집중하였기에, 사용자 경험(UX)의 심리적 효과나 법-윤리적 규제 문제는 상대적으로 충분히 다루지 못하였다. 셋째, 다중 사용자 환경에서의 콘텐츠 동기화와 개

인화 콘텐츠 보호 문제는 여전히 개방된 연구 과제로 남아 있다.

REFERENCES

- [1] M.Hassan, S.S.Shraban, M.A.Islam, K.S.Basaruddin, M.F.Ijaz, N.S.BinKamarrudin, H.Takemura, "Integration of extended reality technologies in transportation systems: A bibliometric analysis and review of emerging trends, challenges, and future research," *Result in Engineering*, Vol.26, 2025, 105334.
- [2] M.S.Anwar, A.Choi, S.Ahmad, K.Aurangzeb, A.A.Laghari, T.R.Gadekallu, A.Hines, "A Moving Metaverse: QoE challenges and standards requirements for immersive media consumption in autonomous vehicles," *Applied Soft Computing*, Vol.159, 2024, 111577.
- [3] M.Jian, B.Long, H.Liu, "A Survey of Extended Reality in 3GPP Release 18 and Beyond," *Highlights in Science, Engineering and Technology(AICT)*, Vol.56, pp.542-549, 2023.
- [4] I.F.Akyildiz and H.Guo, "Wireless Extended Reality(XR)," *ITU Journal on Future and Evolving Technologies*, Vol.3, No.2, 2022.
- [5] G.Lee, W.J.Yun, Y.J.Ha, S.Jung, J.Kim, S.Hong, J.Kim, and Y.K.Lee, "Measurement Study of Real-Time Virtual Reality Contents Streaming over IEEE 802.11ac Wireless Links," *Electronics*, Vol.10, No.16, 2021.
- [6] S.B.Kamtam, Q.Lu, F.Bouali, O.C.L.Haas, S.Birrell, "Network Latency in Teleoperation of Connected and Autonomous Vehicles: A Review of Trends, Challenges and Mitigation Strategies," *Sensors*, Vol.24, No.12, 2024.
- [7] M.Alcon, H.Tabani, L.Kosmidis, E.Mezzetti, J.Abella, and F.J.Cazorla, "Timing of Autonomous Driving Software: Problem Analysis and Prospects for Future Solutions," 2020 IEEE Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium(RTAS), pp.267-280, 2020.
- [8] G.Pan, S.Xu, and P.Jiang, "Optimizing 5G-Advanced Networks for Time-critical Applications: The Role of L4S," *arXiv preprint arXiv:2407.20852*, 2024.
- [9] D. Goedicke, A.W.D.Bremers, S.Lee, F.Bu, H.Yasuda, and W.Ju, "XR-OOM: MiXed Reality Driving Simulation With Real Cars for Research and Design," *ACM CHI Conf. Human Factors in Comput. Syst.(CHI '22)*, 2022.
- [10] M.Lecchi, F.Chiarriotti, M.Drago, A.Zanella, and M.Zorzi, "Temporal Characterization of XR Traffic with Application to Predictive Network Slicing," *IEEE 23rd International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM)*, pp.406-415, 2022.
- [11] O. El Marai, T. Taleb, "Smooth and Low-Latency Video Streaming for Autonomous Cars during Handover,"

IEEE Network, Vol.34, No.6, pp.302-309, 2020.

- [12] J.Y.He, Z.Q.Cheng, C.Li, W.Xiang, B.Chen, B.Luo, Y.Geng, X.Xie, "DAMO-StreamNet: Optimizing Streaming Perception in Autonomous Driving," arXiv preprint arXiv:2303.17144, 2023.
- [13] Y Gu, Q.Wang, X.Qin, "Real-time Streaming Perception System for Autonomous Driving," arXiv preprint arXiv:2107.14388, 2021.
- [14] L.Liu, S.Lu, R.Zhong, B.Wu, Y.Yao, Q.Zhang, W.Shi, "Computing Systems for Autonomous Driving: State-of-the-Art and Challenges," IEEE Internet of Things Journal(IOTJ), Vol.8, No.8, pp.6469-6486, 2021.
- [15] J.S.Han, "Research on XR and Key Technologies for Autonomous Driving," Journal of Internet of Things and Convergence, Vol.11, No.1, pp.101-106, 2025.
- [16] J.S.Han, "An Integrated Approach to Real-Time Edge Computing and Data Compression Algorithms for Full Autonomous Driving," Journal of Internet of Things and Convergence, Vol.11, No.2, pp.89-94, 2025.

한 정 수(Jung-Soo Han)

[정회원]



- 1992년 8월 : 경희대학교 컴퓨터 공학부(공학석사)
- 2000년 8월 : 경희대학교 대학원 컴퓨터공학부(공학박사)
- 2001년 3월 ~ 현재 : 백석대학교 컴퓨터공학부 교수

<관심분야>

AI 교육, 자율주행, 데이터 분석, SW 모델링