

고도 자율주행 환경에서의 XR 적용 아키텍처 연구

한정수*
백석대학교 컴퓨터공학부 교수

Study on XR Application Architecture in Highly Autonomous Driving Environments

Jung-Soo Han*
Professor, Division of Computer Engineering, Baekseok University

요약 본 연구는 고도 자율주행 환경에서 확장현실(XR) 기술이 운전자 및 탑승자에게 실시간 정보 제공과 몰입형 경험을 동시에 제공할 수 있는 핵심 인터페이스로 작용함에 따라, 이를 구현하기 위한 다계층 기술 아키텍처를 제안하고 주요 사례를 분석하였다. 제안된 아키텍처는 데이터 수집 계층(LiDAR, 카메라, RADAR, V2X 등 센서 기반 환경 인식), 엣지 컴퓨팅 및 AI 분석 계층(객체 인식, 상황 예측), XR 콘텐츠 렌더링 계층(Unity/Unreal 기반 실시간 시각화), 사용자 디바이스 계층(AR HUD, HMD, MR 디스플레이 등), 보안 및 관리 계층(통신 암호화, 접근 제어, OTA 관리)으로 구성된다. Audi, 현대모비스, NVIDIA 등의 실제 적용 사례를 통해 기술의 구현 가능성과 성능을 검증하고, 실시간성 확보, 주의 분산 최소화, 통신 자원 최적화, 개인정보 보호 등 XR 시스템 운용 시 고려해야 할 핵심 이슈들을 제시하였다. 또한 OpenXR, glTF, ISO/SAE 21434 등 국제 표준을 기반으로 한 시스템 연동과 콘텐츠 호환 방안을 모색하였으며, 주행 중 AR HUD 내비게이션, 정차 중 MR 콘텐츠 체험, 차량 유지관리 및 감성 UX 제공 등 다양한 시나리오를 통해 XR 기술의 확장 가능성을 탐색하였다.

주제어 : 완전 고도 자율주행, 확장현실, 디지털 트윈, 엣지 컴퓨팅, 차량 인터페이스 아키텍처

Abstract This study proposes a multi-layered XR system architecture for highly automated driving environments, where XR serves as a core interface delivering real-time information and immersive experiences to users. The architecture consists of five layers: environmental sensing (LiDAR, RADAR, cameras, V2X), edge computing and AI-based situation analysis, real-time XR content rendering using Unity/Unreal, user devices (AR HUDs, HMDs, MR displays), and security and management (encryption, access control, OTA updates). Case studies of Audi, Hyundai Mobis, and NVIDIA validate the technical feasibility of the system. Key operational factors include real-time responsiveness, driver attention management, communication efficiency, and data privacy. The study also explores system integration based on OpenXR, glTF, and ISO/SAE 21434 standards. Various application scenarios—such as in-drive AR navigation, MR content consumption during stops, and emotionally responsive UX—demonstrate the scalability of XR in autonomous mobility.

Key Words : Highly Autonomous Driving, XR, Digital Twin, Edge Computing, Vehicle Interface Architecture

1. 서론

고도 자율주행 기술의 발전은 차량의 운전 개입을 최소화하며, 차량 내 사용자 경험(UX)에 대한 새로운 패러다임을 요구하고 있다. 이와 함께 XR(eXtended Reality)은 현실과 가상환경을 통합하여 운전자 및 탑승자에게 직관적이고 몰입감 있는 정보를 제공하는 기술로, 자율주행 환경에서의 핵심 인터페이스로 주목받고 있다. 특히 AR HUD(Augmented Reality Head-Up Display), MR(Mixed Reality) 디스플레이, 가상 동승자 등의 기술은 주행 안전성과 정보 접근성을 동시에 강화하며, 운전자 시야를 벗어나지 않으며 실시간 의사결정 지원이 가능하다는 점에서 주목할 만하다[1-2].

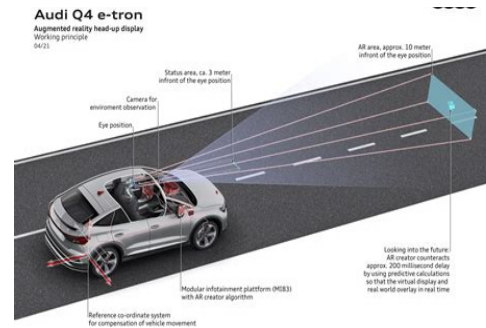
실제로 Audi, Ford, 현대모비스 등 주요 제조사들은 AR 기반 HUD 시스템, MR 콘텐츠 인터페이스를 실차에 시범 적용하고 있으며[3-5], NVIDIA Omniverse 기반의 XR 시뮬레이션 기술도 디지털 트윈 환경에서 현실 조건을 가상 재현하며 개발 효율을 높이고 있다[4, 6]. 또한, IEEE 2021 등에서는 몰입형 XR UI의 실제 주행 적합성을 정량적으로 입증한 바 있으며[7, 8], 산업 현장에서의 기술적 신뢰성과 도입 타당성도 점차 확대되고 있다. 이러한 흐름은 단순한 정보 전달을 넘어, 차량 내 인터페이스의 근본적인 전환과 사용자 중심 서비스 패러다임의 재정립이라는 측면에서도 중요하게 평가된다.

그러나 XR 시스템의 실질적인 적용을 위해서는 센서, 통신, 엣지 연산, 콘텐츠 렌더링, 보안까지 아우르는 다계층 기술 아키텍처 설계가 필수적이다. 특히 차량 내부 환경의 실시간 연동성과 사용자 상태에 따른 적응형 정보 전달을 고려한 아키텍처 구성이 핵심 과제로 부상하고 있다. 본 연구는 자율주행 차량 내 XR 시스템을 구성하는 주요 계층별 기술 요소를 통합적으로 분석하고, 각 계층에서의 동작 메커니즘, 보안 요소, 국제 표준 기반의 연동 구조를 정리한다. 나아가 실제 적용 시나리오 및 기술적 한계를 함께 제시함으로써, 향후 자율주행 기반 XR 시스템의 실현 가능성과 설계 방향에 대한 이론적 토대를 제공하고자 한다.

2. 선행 연구 및 주요 사례 분석

2.1 Audi 등 AR HUD 및 실내 MR 콘텐츠 적용

Ford, Audi, BMW 등 주요 제조사는 자율주행 차량에 AR 기반 HUD 시스템을 도입하여 실시간 주행 정보



[Fig. 1] Audi's AR-Based HUD

(경로, 표지판, 위험 요소 등)를 전면 유리에 증강 투사하고 있으며, 탑승자를 위한 실시간 MR 콘텐츠도 차량 내부에 적용하는 시범 서비스를 운영 중이다. 일부 모델에는 시선 추적 기반 UI까지 도입되어 운전 중 시야 이탈 없이 주요 정보를 확인할 수 있도록 설계되었다. 이는 운전자의 주의 분산 없이 정보를 제공할 수 있어, 주행 안전성과 사용자 경험을 동시에 향상시키는 기술로 평가된다.

2.2 디지털 트윈 + XR 시뮬레이션 연구

NVIDIA는 Omniverse 플랫폼을 활용하여, 현실 환경을 1:1로 가상 재현하는 디지털 트윈 환경에서 XR 콘텐츠를 실시간 시뮬레이션할 수 있는 구조를 개발하였다. 이 시스템은 Unity/Unreal Engine과 연동되어 실시간 객체 감지, 센서 시뮬레이션, 시각적 피드백이 가능한 자동화된 XR 테스트 플랫폼으로 작동한다. 이것은 실도로 없이 XR 콘텐츠 개발·검증이 가능하다는 점에서, 개발 효율성과 비용 절감에 매우 효과적인 기술로 주목받고 있다.

2.3 IEEE 2021: 몰입형 XR 인터페이스 성능 실증

IEEE 2021년 발표 논문 “Does Augmented-Reality Head-Up Display Help?”에서는 AR HUD 및 MR 콘텐츠 활용 시 운전자 주의 분산이 줄어들고 반응 시간이 단축되는 실증 결과를 제시하였다. 해당 실험에서는 AR HUD 사용 시 반응 시간 18.4% 향상, 몰입도 27% 증가, 시선 이동 거리 23% 감소 등의 수치가 확인되었다[9].

이것은 몰입형 XR UI의 운전 적합성이 수치적으로 입증되었으며, 실시간 주행 지원 도구로서의 실효성이 뒷받침되었다.

2.4 MR 기반 차량 안전 경고 시스템 시연

현대모비스는 MR(Mixed Reality) 기반 HUD 시스템을 통해 차량 내 보행자, 차선 이탈, 장애물 등 위험 요소를 실시간 시각적으로 경고하는 기능을 CES 2023에서 시연하였다[4]. 시스템은 카메라, LiDAR, RADAR 기반 센서 데이터를 통합 분석하여 위험 요소를 증강 표현하고, 물리 공간 위에 직관적으로 경고 정보를 투사한다. 이는 사고 예방 중심의 실시간 XR 시스템 사례로, 향후 일반 차량에도 적용될 수 있는 상용화 가능성이 높은 기술로 평가되고 있다.

2.5 AR HUD 상용화 협력 사례

Panasonic은 AR HUD 기술 전문 기업 Envisics와의 협력을 통해 디지털 레이저 기반의 홀로그램 HUD 시스템을 개발하였다[3, 5]. 이 시스템은 Jaguar Land Rover 등에 실제 상용 적용되었으며, 3D 안내선, 경고 아이콘, 방향 지시 정보를 도로 위에 실시간 정밀 투사한다. 또한, 거리 감지 및 사용자 시야 보정 기능이 포함되어 있어 고속 주행 상황에서도 안정적인 정보 전달이 가능하다. 이 기술은 고속 상황에서도 몰입도 높은 정보 제공이 가능하며, 향후 프리미엄 차량 인터페이스의 표준 모델로 주목받고 있다.

2.6 원격 가상 동승자 경험 제공

Valeo는 자율주행 차량 내에서 원격지의 사용자(가족·지인)를 실시간 아바타 형태로 구현하여, 가상 동승자처럼 상호작용할 수 있는 Voyage XR 시스템을 개발하였다[4]. 해당 시스템은 3D 아바타 렌더링, 표정·음성 스트리밍 동기화, MR 환경 내 감성 상호작용 기능을 통해, 정서적 교류가 가능한 미래형 차량용 XR 인터페이스를 구현한다. 이 또한 자율주행차 내에서의 정서적 연결성과 여가 경험을 확장한 사례로, 미래형 UX 플랫폼으로 가능성이 확인되었다.

3. 구성요소 및 시스템 구조

고도 자율주행 환경에서 XR 시스템은 센서, 통신, 연산, 렌더링, 사용자 인터페이스 등 다양한 기술 계층이 상호 연동된 통합 아키텍처 위에서 구현된다. 이 시스템은 차량 외부 환경을 인지하고 실시간으로 분석한 정보를 기반으로, 탑승자에게 직관적이고 몰입감 있는 콘텐

츠를 제공하기 위한 복합 구조로 설계된다.

3.1 데이터 수집 계층

자율주행 기반의 XR 시스템에서 가장 하위 계층인 데이터 수집 계층은, 차량 주변의 물리적 환경 및 위치 정보를 실시간으로 수집하는 역할을 수행한다. 이 계층은 차량에 탑재된 다양한 센서들과 외부 인프라와의 통신을 통해 정확하고 시의성 있는 데이터 확보를 목표로 하며, 이후 처리·분석 계층의 입력값으로 기능한다. LiDAR는 고속 회전 또는 솔리드스테이트 방식으로 레이저 펄스를 방출하여 주변 3차원 지형과 객체 정보를 획득한다. 수십만 개의 포인트 클라우드를 통해 객체의 거리, 모양, 위치 등을 정밀하게 인식할 수 있으며, 야간이나 역광 상황에서도 비교적 안정적인 성능을 보인다. 다만, 비·눈 등 악천후에 민감하고, 비용이 높다는 단점이 있다. 필요한 기술은 다음과 같다.

■ 카메라 (RGB/Mono/Stereo)

카메라는 차선, 신호등, 표지판, 보행자 등 시각 요소를 식별하는 데 사용되며, 인공지능 기반 객체 인식 기술과 결합될 경우 실시간 탐지 성능이 크게 향상된다. Stereo 카메라는 깊이 정보까지 추출할 수 있어 간접적인 거리 인식도 가능하지만, 조명 조건에 매우 민감하다는 한계를 지닌다.

■ RADAR (Radio Detection and Ranging)

RADAR는 전파 기반 센서로, 특히 차량의 전방·후방에 설치되어 이동체의 속도, 거리, 방향을 감지하는데 적합하다. 악천후에서도 안정적으로 작동하며, 다른 센서 대비 날씨 조건에 강한 이점을 가진다. 다만 해상도가 낮아 물체의 형태나 세부 윤곽을 구분하기 어려운 단점이 있다.

■ V2X (Vehicle-to-Everything)

V2X는 차량이 외부 인프라 또는 다른 차량, 보행자, 네트워크 등과 양방향으로 정보를 교환하는 통신 기술이다. 이를 통해 신호등 상태, 도로 공사 구간, 인근 사고 위험 등을 실시간으로 받아볼 수 있으며, 자율주행 시스템이 더욱 빠르게 경로를 조정하고 판단할 수 있도록 지원한다. DSRC 또는 C-V2X 기술이 대표적으로 사용되며, 후자의 경우 5G 기반 저지연 통신이 가능하다는 장점이 있다.

■ GNSS 기반 GPS

GPS(Global Positioning System)는 차량의 위치를 파악하는 핵심 기술로, 고정밀 위치 추정을 위해 RTK (Real-Time Kinematic), DGPS(Differential GPS) 등이 활용된다. 특히 정밀 맵과 결합하여 센티미터 단위의 정확한 위치 인식이 가능하나, 터널이나 고층 밀집 구역에서는 신호 수신에 어려워 보조 기술과의 융합이 필요하다.

■ 센서 통합 및 구조적 특징

다양한 센서로부터 수집된 데이터는 시간-공간 정렬과 객체 정합성을 확보한 통합 분석을 통해 XR 콘텐츠로 전환되기 위한 기반이 된다. 이 과정에는 Kalman Filter, Deep Sensor Fusion 등 고급 융합 알고리즘이 사용되며[10, 11], ROS2나 DDS 기반의 미들웨어를 통해 옛지-차량 간 데이터 전달의 실시간성과 표준화가 보장된다.

3.2 데이터 처리 계층

데이터 처리 계층은 차량 내외에서 수집된 데이터를 빠르게 분석하고, 상황 인식 결과를 XR 콘텐츠로 변환하기 위한 핵심 연산 단계이다. 이 계층은 옛지 컴퓨팅 유닛과 AI 기반 분석 모듈로 구성되며, 실시간성과 정확도를 동시에 요구받는다[6, 12, 13]. 여기에 필요한 기술은 먼저 옛지 컴퓨팅 유닛이다. 이는 차량 내부 또는 인근 인프라에 위치하며, 데이터를 클라우드로 보내지 않고 현장에서 직접 처리한다. 이 장치는 GPU 또는 NPU 기반 SoC를 활용해, 객체 인식, 경로 판단, 위험 탐지 등 고속 연산을 수행하며, 실시간 XR 콘텐츠 생성에 필요한 정보를 다음 계층으로 전달한다. 또한, 네트워크 단절 상황에서도 차량 단독 판단이 가능하여 시스템 신뢰성을 높인다. AI 기반 상황 분석 모듈은 전처리된 데이터를 기반으로, AI 모델을 통해 차량 주변의 객체, 위험 요소, 경로 등을 자동 분석한다. 대표적으로 YOLO나 PointNet 같은 딥러닝 모델이 적용되며, 예측 결과는 HUD나 MR 화면에 강조 표시, 경고 라인, 안내 콘텐츠 등으로 시각화된다. 상황에 따라 GNN, Self-supervised 모델 등도 함께 활용된다.

데이터 처리 계층은 XR 콘텐츠의 실시간성과 반응성을 결정짓는 핵심 영역이며, 옛지 연산 최적화, AI 모델 경량화, 계층 간 통신 속도 개선이 전체 시스템 품질에 영향을 미친다. 따라서 컴퓨팅 구조와 모델 설계는 자율 주행 환경에 맞춰 지속적으로 최적화되어야 한다.

3.3 XR 콘텐츠 렌더링 계층

XR 콘텐츠 렌더링 계층은 자율주행 차량에서 분석된 데이터를 시각 콘텐츠로 전환하여, 운전자와 탑승자에게 즉각적으로 전달하는 시각 중심 계층이다. 본 계층은 HUD, HMD, MR 디스플레이 등 다양한 장치에 맞춰 도로 기반 안내, 위험 경고, 실내 엔터테인먼트 등 몰입형 콘텐츠를 실시간으로 생성하고 출력한다.

필요한 것은 렌더링 엔진 및 콘텐츠 생성기이다. 이 계층의 핵심은 Unity 또는 Unreal Engine과 같은 실시간 렌더링 엔진이다. Unity는 확장성과 경량 렌더링에 강점이 있으며, Unreal은 고해상도 그래픽과 사실적 조명 표현에 유리하다. 두 엔진 모두 센서 데이터, 위치 정보, AI 분석 결과를 기반으로 동적으로 XR 콘텐츠를 생성한다. 예를 들어, 차량 주행 중 도로 위에 투사되는 AR 유도선, 사고 예측 경로 표시, 정차 중 제공되는 MR 관광 콘텐츠 등이 여기에 해당한다.

■ 렌더링 최적화 및 상황 적응 기술

차량 속도, 주행 상태, 주변 조도에 따라 콘텐츠는 실시간으로 자동 최적화되어야 한다. 이를 위해 대표적으로 Foveated Rendering 기술이 활용되며, 이는 사용자의 시선을 추적해 중심 시야는 고해상도, 주변 시야는 저해상도로 처리하여 GPU 부하를 줄인다. 또한, 고속 주행 시에는 단순 경고 위주로 정보를 최소화하고, 정체 구간이나 정차 상태에서는 시각적 풍부함을 강화하는 방식으로 콘텐츠가 조절된다.

■ 플랫폼 및 장치 연동

XR 콘텐츠는 다양한 디바이스에 대응해야 하므로, 렌더링 파이프라인은 장치별 해상도, 시야각, 응답 속도에 맞춰 자동 조정되어야 한다. OpenXR API는 서로 다른 장치 간 콘텐츠 호환성을 보장하며, Unity의 Addressable Assets, Unreal의 Pixel Streaming 등은 경량 콘텐츠 전송과 실시간 스트리밍을 지원한다. 이를 통해 HUD, HMD, 탑승자용 MR 화면 간 시간 차 없는 콘텐츠 동기화가 가능하다. 렌더링 계층은 단순한 시각화 엔진이 아니라, 실시간성, 시야 정렬, 몰입감, 안전성을 종합적으로 조율하는 XR 시스템의 핵심이다. 따라서 콘텐츠의 복잡도와 연산 부담 사이의 균형을 유지하고, 사용자 시점에 최적화된 정보 전달 인터페이스 설계가 필수적이다.

3.4 사용자 디바이스 계층

사용자 디바이스 계층은 생성된 XR 콘텐츠를 운전자와 탑승자에게 직관적이고 몰입감 있게 제공하는 최종 전달 인터페이스이다. 본 계층은 HUD, HMD, MR 디스플레이 등 다양한 장치를 포함하며, 주행 중 안전성과 정보 가시성을 모두 고려한 공간 정렬 기반 출력 시스템으로 구성된다.

- AR HUD

(Augmented Reality Head-Up Display)

AR HUD는 차량 전면 유리창에 실시간 주행 정보, 경고, 안내 콘텐츠를 증강 투사하는 장치로, 운전자의 시야를 도로에서 벗어나지 않고도 정보를 인지할 수 있도록 한다[14]. 최근에는 HUD 기술이 발전하여 도로 위의 실제 구조물과 정렬된 3D 안내선, 방향 아이콘 등을 고정밀로 표시할 수 있으며, SLAM 기반 시야 정렬과 광학 웨이브 가이드 기술이 적용된다.

- HMD (Head-Mounted Display)

HMD는 주로 탑승자를 대상으로 하는 몰입형 장치로, 정차 중 또는 비운전 시에 엔터테인먼트, 가상 회의, 실내 MR 콘텐츠 등을 제공한다. 대부분 SLAM 기반 공간 정합, 6DoF 트래킹, 그리고 공간 음향 및 햅틱 피드백 기능을 통합하여 높은 몰입감을 제공하며, 사용자의 움직임에 따라 시야 콘텐츠가 즉각 반응한다. 다만 장시간 착용에 따른 피로감과 사용자 적응력의 개인차는 고려해야 할 요소다.

- MR Cabin Display

MR Cabin Display는 차량 내 좌석 전면, 천장, 측면 등에 설치된 고정형 디스플레이 시스템으로, 실내 공간 전체를 정보 표시 영역으로 확장한다. 해당 장치는 투명 OLED 또는 투사형 윈도우 디스플레이를 활용하며, 주변 환경과 연동된 실시간 정보, 관광 콘텐츠, 안전 교육 영상 등을 탑승자에게 제공한다. 또한 멀티 유저 대응 UI, 콘텐츠 분할 표시 기능 등으로 탑승자 개별 맞춤형 인터페이스가 가능하다.

- 통합 운영 및 적응형 콘텐츠 전략

여러 장치 간 일관된 사용자 경험을 제공하기 위해, 콘텐츠 우선순위 조정, 디바이스 간 연동 알고리즘, 멀티 출력 관리 체계가 필요하다. 이를 위해 OpenXR 기반

통합 API, 시선 기반 콘텐츠 분배, 음성비서 연동 인터페이스 등이 활용되며, HUD와 HMD 간 콘텐츠 핸드오버나 시트 내장형 HUD와 같은 차세대 디스플레이 구조도 등장하고 있다.

3.5 관리 및 보안 계층

자율주행 기반 XR 시스템은 외부와 끊임없이 연결되고, 실시간으로 민감한 데이터를 다루기 때문에, 이를 안전하게 운영하기 위한 통합 보안 및 관리 계층이 필수적이다. 본 계층은 접근 통제, 통신 암호화, 소프트웨어 갱신, 시스템 무결성 검증 등을 통해 내부 자산 보호와 외부 위협 대응을 동시에 수행한다.

- 접근 제어 및 사용자 인증

XR 시스템은 다양한 사용자와 장치가 접근하는 구조이므로, 역할 기반 또는 속성 기반 권한 설정, 사용자 인증, 장치 신뢰 검증 등의 체계가 마련되어야 한다. 특히 차량 내·외부 통신 노드를 명확히 구분하고, 비인가 접근 시 세션 차단, 위치 기반 제어, 다중 인증 적용이 중요하다. 여기에 필요한 기능은 다음과 같다.

- 통신 보안 및 암호화

차량 내외에서 전달되는 XR 콘텐츠와 센서 데이터는 모두 암호화된 통신 경로를 통해 송수신되어야 한다. TLS/DTLS 기반의 데이터 보호, 차량 내부 이더넷 통신의 MACsec 적용, OTA와 API 연동 시 서명 기반 인증이 일반화되어야 한다. 특히, V2X 통신에서는 PKI 기반의 인증서 체계가 적용된다.

- OTA 소프트웨어 갱신 체계

XR 시스템은 자율주행 소프트웨어와 마찬가지로 지속적인 업데이트가 요구되며, 이를 위해 차량 내 OTA 클라이언트가 중앙 서버와 연동하여 보안 패치, 기능 개선, 긴급 대응을 수행한다. 갱신 과정에서는 이중 저장소 구조와 무결성 해시 검증, 오류 시 롤백 기능 등을 통해 안정성을 확보해야 한다.

- 시스템 무결성 검증 및 이상 탐지

운영 중인 시스템의 신뢰성을 유지하기 위해, 센서 데이터 흐름 감시, 콘텐츠 변조 탐지, 통신 트래픽 이상 감지 등 실시간 감시 체계가 작동되어야 한다. AI 기반 이상 탐지 기술이나 부팅 시 해시 검증, 포렌식 로그 기록

시스템이 적용되어야 하며, 차량 내에서 의심 이벤트 발생 시 자동 차단 및 보고 기능이 연계된다.

■ 통합 운영 플랫폼과 정책 자동화

이 모든 보안 요소는 통합 보안 플랫폼 내에서 정책 기반으로 자동 적용되어야 하며, 실시간 모니터링 대시보드, 패치 배포 시스템, 인증서 관리 도구 등이 연계되어 운영자의 개입 없이도 시스템 상태를 유지·관리할 수 있어야 한다. 이를 통해 복잡한 차량용 XR 구조에서도 지속 가능하고 복원력 있는 시스템 운용이 가능해진다.

4. 적용 기술 및 표준

자율주행 기반 XR 시스템은 고속 연산, 실시간 스트리밍, 장치 간 동기화, 그리고 보안을 동시에 만족시켜야 하므로, 다양한 기술적 기반과 국제 표준이 유기적으로 연동되어야 한다.

4.1 통신 기술

XR 시스템은 초저지연, 고속, 고신뢰 통신을 요구하며, 다양한 통신 기술이 목적에 따라 혼합 적용된다. 5G/6G는 자율주행과 XR 환경 모두에서 필수적인 통신 인프라로, 특히 URLLC(Ultra-Reliable Low Latency Communication) 기능을 통해 1ms 미만 지연 성능을 제공하며, 네트워크 슬라이싱을 통해 콘텐츠, 제어, 센서 트래픽을 분리 처리할 수 있다. DSRC는 5.9GHz 대역의 단거리 전용 통신 기술로, 차량 간 사고 경고, 교차로 정보 공유 등 근거리 고속 브로드캐스트에 효과적이다. C-V2X는 셀룰러 기반 차량 통신으로, LTE 및 5G 망을 활용해 다양한 주체(V2V, V2I, V2N, V2P) 간 실시간 데이터를 송수신하며, DSRC 대비 낮은 지연과 높은 커버리지를 갖는다. MQTT는 차량 내부 센서 및 장치 간의 상태 전파, 콘텐츠 알림 등에 활용되는 경량 메시징 프로토콜로, 통신 불안정 환경에서도 안정적으로 작동한다.

4.2 플랫폼 기술

XR 콘텐츠의 생성, 실행, 전송을 지원하는 플랫폼 기술은 성능, 장치 호환성, 스트리밍 효율에 따라 선택된다. Unity XR SDK는 AR 및 MR 콘텐츠 제작을 위한 통합 개발 환경을 제공하며, 다양한 디바이스(HoloLens, Magic Leap 등)와 호환된다. URP(Universal Render Pipeline)와 DOTS 기반 처리 구조를 활용하여 모바일

환경에서도 경량실행이 가능하다. Unreal XR Toolkit은 고품질 시각화와 정밀 물리 시뮬레이션에 강점을 가진다. 특히 Pixel Streaming 기술을 통해 서버에서 렌더링한 XR 콘텐츠를 차량 디바이스로 실시간 스트리밍할 수 있어 엣지-차량 간 분산 렌더링 구조에 유리하다. WebXR은 브라우저 기반 XR 콘텐츠 실행을 지원하며, 설치 없이도 차량 내 탑승자 디스플레이에서 다양한 콘텐츠에 접근할 수 있도록 한다.

4.3 데이터 표준

시스템 간 연동성과 콘텐츠 전송 효율성을 높이기 위해, 표준화된 데이터 포맷과 인터페이스 구조가 적용된다. 먼저 OpenXR은 XR 콘텐츠 플랫폼과 디바이스 간 호환성을 위한 API 표준으로, 단일 콘텐츠를 다수의 장치에서 일관되게 실행할 수 있도록 지원한다. glTF(GL Transmission Format)는 경량화된 3D 콘텐츠 전송 포맷으로, Unity, Unreal, WebXR 간 자산 교환에 쓰이며, JSON 기반 구조와 바이너리 버퍼, 텍스처 묶음으로 구성되어 실시간 렌더링에 최적화되어 있다. ISO/SAE 21434는 차량 사이버보안 국제 표준으로, XR 시스템과 연계된 통신, OTA, 클라우드 연동 등에서 발생할 수 있는 보안 위협을 예방하고 시스템 신뢰성을 확보하는 데 기여한다.

4.4 인증 및 보안 기술

XR 시스템은 실시간으로 차량 내외부와 연결되기 때문에, 통신 보안과 시스템 무결성 보장이 필수적이다. TLS/DTLS는 차량 내부 미들웨어 및 외부 네트워크 간 통신을 보호하는 표준 암호화 프로토콜로, 콘텐츠 무결성과 프라이버시를 보장한다. PKI(Public Key Infrastructure) 기반 인증 체계는 장치 간 상호 인증 및 메시지 서명 검증에 활용되며, C-V2X 통신과 OTA 환경에서 신뢰 기반을 형성한다. Secure Boot와 File Integrity Monitoring 기술은 시스템의 부팅 시점과 실행 중 상태에서 무결성 변조 여부를 실시간 감시하고 위협 발생 시 차단을 가능하게 한다.

5. 주요 이슈 및 해결 방안

실시간성 한계 극복을 위한 고속 연산 처리 구조 설계를 위하여 먼저 엣지 디바이스에서 1차 필터링 및 데이

터 전처리를 수행한 후, 딥러닝 추론은 GPU 가속을 이용한 AI SoC에서 처리한다. 그리고 TensorRT나 ONNX 기반의 경량화된 AI 추론 모델을 통해 연산 부하를 줄인다. 또한 중요도 기반 콘텐츠 관리 체계를 도입하여, 전방 위험 정보나 경로 전환 정보 등은 최우선 처리하고, 부차적 콘텐츠는 대기열로 전환하는 방식으로 설계하면 될 것이다.

운전자 주의 분산 최소화를 위한 콘텐츠 최적화 설계는 HUD 콘텐츠는 FOV(Field of View) 내에서 시선 고정선(gaze fixation line)을 기준으로 정렬하고, 정보 노이즈를 제거한 단일 아이콘 방식으로 구성한다. MR 콘텐츠는 HMD 착용 시 사용자의 뇌파, 심박수 등을 연동하여 스트레스 지표에 따라 콘텐츠 자극 강도를 자동 조절한다. 끝으로 주행속도, 회전 각도, 차선 변경 여부 등 주행 상황 인자를 기반으로 콘텐츠 표출 시점과 해상도를 다르게 설정하는 방식으로 가능하다.

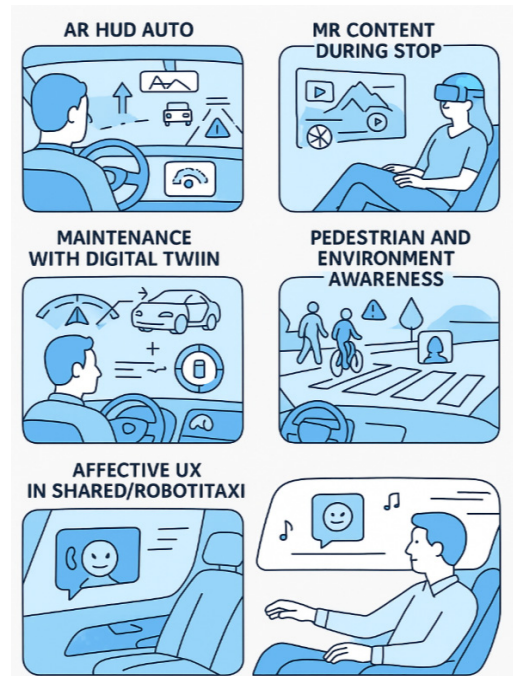
통신 대역폭 부족 대응을 위한 다중 계층 스트리밍 구조 해결 방안은 gTF 포맷은 기본적으로 JSON + 바이너리 구조로 구성되며, 이는 텍스처 압축(Draco)과 벡터 데이터 최적화를 병행해 최대 80%까지 경량화 할 수 있다. 또한 Level of Detail(LOD) 기법을 적용하여 시점 기반으로 낮은 해상도부터 고해상도로 순차 로딩되도록 구성함으로써 대역폭을 효율적으로 사용하면 된다. Edge 서버와 Cloud 서버 간 역할 분산을 통해, 자주 사용하는 데이터는 Edge에 캐시하고, 무거운 AI 분석은 Cloud로 전송하여 병렬 처리한다.

개인정보 보호 및 위치 정보 보안 강화의 해결 방안은 사용자의 시선 데이터나 얼굴 표정을 캡처할 경우, 딥러닝 기반의 비식별화 모듈(GAN 기반 마스킹)을 통해 실시간 익명화를 적용한다. 위치 기반 정보는 differential privacy 알고리즘을 적용하여, 통계적 분석은 가능하지만, 개별 사용자는 식별되지 않도록 한다. 저장되는 모든 민감 정보는 TTL(Time-to-Live)을 설정하고, 사용자가 '데이터 보존 정책'을 선택할 수 있도록 옵션화한다.

마지막으로 시스템 보안 및 무결성 강화 기술 구현을 위해서는 차량 내 모든 소프트웨어 모듈은 Secure Boot를 통해 부팅 시 서명 검증을 거쳐야 하며, 부적합 시 자동 격리되도록 한다. 하드웨어 보안 모듈(HSM)을 통해 암호 키를 물리적으로 보호하고, OTA 업데이트 시에는 서명 검증과 해시 체크를 통해 위변조를 방지한다. AI 모듈에 대한 '실행 정책 기반 접근 제어'를 적용하여, 시스템 외부에서 명령이 유입되더라도 신뢰 도메인 내에서만 실행되도록 제한한다[7, 8, 15].

6. 적용 시나리오

자율주행 차량에서 XR 시스템은 운전자의 안전 확보는 물론, 탑승자의 정보 접근성과 몰입 경험까지 동시에 제공할 수 있는 다양한 서비스 형태로 적용된다. 아래는 실제 차량 환경을 고려한 대표 적용 시나리오들이다.



[Fig. 2] XR Applications in Vehicles

■ 운전 중 AR HUD 안내

고도 자율주행 차량이 도심 또는 고속도로를 주행할 때, 운전자는 직접 운전하지 않더라도 상황 인지와 주행 흐름을 파악할 필요가 있다. 이때 AR 기반 헤드업 디스플레이(HUD)는 차량 전면 유리에 교통 흐름, 주변 차량, 도로 표시, 사고 구간 등의 정보를 증강하여 투사한다. 예를 들어 사고 발생 시 경로 변경 안내가 시야에 자연스럽게 띄워지고, 앞 차량의 급정거가 감지되면 위험 경고가 실시간으로 표시된다. 이러한 정보는 운전자 시야를 벗어나지 않고 투명하게 겹치기 때문에, 기존 내비게이션처럼 고개를 돌려 확인할 필요가 없다. HUD는 주의 분산을 줄이고 즉각적인 판단을 가능하게 하여, 자율주행 중 긴급 상황 대응력과 전체 주행 안정성을 높인다. 또한 운전자가 시스템에 대한 신뢰를 유지할 수 있도록, 차량의 판단 과정을 시각적으로 설명하는 인터페이스로도 작용할 수 있다.

■ 차량 정차 중 MR 콘텐츠 제공

정차 시간은 자율주행 차량의 새로운 사용자 경험 공간으로 활용될 수 있다. 차량이 신호 대기 중이거나 충전소에 머무는 동안 탑승자는 차량 내 설치된 MR 디스플레이나 개인 HMD(Head-Mounted Display)를 통해 몰입형 콘텐츠를 즐길 수 있다. 관광 정보, 날씨 예보, 업무 회의, 영화 스트리밍 등 다양한 콘텐츠가 제공되며, 실내 조명·소리·시트 움직임까지 연동되는 몰입형 환경이 구현된다. 예를 들어 여행 중 차량이 특정 관광지 근처에 정차하면 해당 지역의 증강 투어 가이드를 MR 콘텐츠로 제공하고, 탑승자는 실감형 정보 체험을 통해 대기 시간을 가지 있게 활용할 수 있다. 또한 업무용 콘텐츠와 연계해 화상 회의, 문서 열람, AR 기반 브리핑 등이 가능해지며, 차량이 단순한 이동 수단을 넘어 개인 오피스 또는 미디어 공간으로 전환된다.

■ 디지털 트윈 기반 유지관리 지원

자율주행 차량의 핵심은 차량 상태에 대한 지속적 모니터링이다. 차량의 디지털 트윈(Digital Twin) 기술은 물리적 차량의 센서 데이터를 기반으로 가상 환경에 실시간 복제본을 생성하며, 이를 XR 인터페이스와 결합하면 정비나 유지보수가 훨씬 직관적으로 이루어진다. 예를 들어 AR HUD 또는 MR 디스플레이를 통해 엔진의 온도, 배터리 상태, 타이어 공기압, 제동 계통 이상 여부가 시각화되어 탑승자나 운전자가 쉽게 확인할 수 있다. 이상 징후가 발생하면 해당 부위가 시각적으로 강조되고, 점검이 필요한 시기와 정비소 위치까지 안내된다. 이는 단순한 경고 표시를 넘어서, 차량을 잘 모르는 일반 사용자도 쉽게 이해하고 대응할 수 있도록 돕는 인터페이스다. 정비 인력이 차량을 점검할 때도 XR 기반 오버레이를 통해 부품 배치도, 교체 절차 등이 실시간으로 표시되므로 유지관리 효율이 획기적으로 향상된다.

■ 보행자나 외부 환경 인식 보조

자율주행 차량은 주변 환경을 정밀하게 인식하고 위험 요소에 사전 대응할 수 있어야 한다. 이때 MR 기반 HUD 시스템은 차량 주변의 보행자, 자전거, 교차로 신호 등을 실시간으로 시각화하여 운전자에게 직관적으로 전달한다. 예를 들어 횡단보도에 접근 중일 때, AR로 표시된 실선이 보행자 경로를 나타내고, 어린이나 시야 밖에 있는 자전거 등이 예측 경로에 진입할 경우 이를 시각적으로 강조하여 경고한다. 특히 야간이나 악천후 같은 가시성이 떨어지는 상황에서 MR HUD는 안전 확보에

핵심적인 역할을 한다. 차량의 인공지능은 카메라·LiDAR·RADAR 데이터를 통합 분석하여, 위험 발생 가능성이 높은 객체를 선별하고, HUD를 통해 이를 실시간 표시함으로써 사고 예방에 기여한다. 운전자의 직접적인 개입은 적더라도, 상황 인지 및 결정의 기반이 되는 정보는 더 직관적이고 시각적으로 제공되는 것이다[14, 16].

■ 차량 공유/로보택시 내 감성 UX 제공

무인 차량, 로보택시 등의 공유 이동 수단에서는 운전자 대신 차량 시스템이 탑승자와 직접 상호작용하게 된다. 이때 XR 기술은 단순한 안내 기능을 넘어서, 탑승자의 감성 상태를 고려한 맞춤형 인터페이스를 제공한다. 예를 들어, 차량 내 가상 동승자가 등장하여 친근하게 목적지를 안내하고, 탑승자의 음성이나 표정, 스마트폰 데이터를 바탕으로 음악, 조명, 콘텐츠 추천을 수행할 수 있다. 또한 탑승자의 성향에 맞춘 테마 콘텐츠(힐링, 업무 집중, 엔터테인먼트 등)를 자동으로 구성해 공간 전체를 감성적으로 연출한다. 어린이, 노인, 외국인 등 다양한 이용자의 요구에 따라 언어, 이미지, 안내 방식이 자동으로 변환되며, 차량 이용 경험의 만족도를 크게 향상시킨다. 로보택시 브랜드별로 감성 UX를 차별화함으로써 브랜드 경험 자체가 서비스 경쟁력이 될 수 있다[17-18].

7. 결론

본 연구는 고도 자율주행 환경에서 XR 시스템이 구현되기 위한 기술적 구성요소와 아키텍처를 통합적으로 제시하고, 국내외 주요 사례 및 응용 시나리오를 통해 그 실효성과 발전 가능성을 살펴보았다. 주요 결과를 종합하면, XR 시스템은 센서 기반의 환경 인식, 엣지 컴퓨팅 및 AI 분석, 실시간 렌더링 엔진, 사용자 디바이스 인터페이스, 그리고 이를 둘러싼 보안 및 관리 계층이 통합된 형태로 구성되어야 하며, 각 계층 간의 연계성과 실시간성이 전체 시스템 품질을 좌우한다.

특히 HUD, HMD, MR Cabin Display 등 사용자 디바이스는 정보의 정렬, 몰입감, 피로도 등 다양한 요소를 고려하여 설계되어야 하며, 콘텐츠는 주행 맥락에 따라 적응적으로 제공되어야 한다. 또한, DSRC, C-V2X, 5G/6G 등 통신 인프라와 WebXR, OpenXR, gLTF와 같은 플랫폼 및 표준의 조합은 다양한 장치 간 호환성과 스트리밍 효율성을 극대화할 수 있는 기술적 기반이 된다. 그러나 실시간성 확보, 시야 정렬, 보안 위협 대응 등

은 여전히 해결해야 할 과제로 남아 있다. 콘텐츠 경량화, 엣지 연산 최적화, AI 모델 경량화, 네트워크 부하 분산 전략 등은 이러한 문제 해결을 위한 핵심 전략으로 제시될 수 있다.

향후 과제로는 차량 환경 내에서의 사용자 피드백 기반 콘텐츠 적응 메커니즘 개발, 장시간 탑승 환경에 최적화된 UX 설계, 도시 및 고속도로 등 다양한 주행 조건에 맞는 콘텐츠 자동화 생성 기술 등이 있다. 또한, 윤리적 이슈와 개인정보 보호를 위한 제도적 정비도 병행되어야 한다.

결론적으로, XR 시스템은 자율주행 차량의 핵심 인터페이스로 자리매김할 가능성을 지니고 있으며, 그 실현을 위해서는 기술 간 융합, 표준화, 보안 전략, 사용자 중심 설계가 필수적으로 뒷받침되어야 한다.

REFERENCES

- [1] M. Schneider, "Navigation in the Augmented Reality Head-up Display," Ph.D. dissertation, Univ. Regensburg, Germany, pp.121-131, 2021.
- [2] A. Jansen et al., "AutoVis: Enabling Mixed-Immersive Analysis of Automotive User Interfaces," in Proc. CHI Conf. Human Factors Comput. Syst., Hamburg, Germany, pp.1-13, 2023.
- [3] R. Bellan, "Envisics closes \$100M to advance AR heads-up display tech in cars," TechCrunch, pp.11-21, 2023.
- [4] Hyundai Mobis, "Hyundai Mobis to Unveil New Technologies for Purpose-built Mobility at CES 2023," PR Newswire, pp.234-242, 2023.
- [5] R. Bellan, "Holographic startup Envisics partners with Panasonic to fast-track in-car AR tech," TechCrunch, pp.111-119, 2021.
- [6] W. Shi, J. Cao, Q. Zhang, Y. Li, and L. Xu, "Edge Computing: Vision and Challenges," IEEE Internet of Things Journal, Vol.3, No.5, pp.637-646, 2016.
- [7] K. Blankenbach, "Requirements and System Aspects of AR-Head-Up Displays," IEEE Consumer Electronics Magazine, Vol.8, No.1, pp.62-67, 2019.
- [8] N. de Oliveira Faria and J. L. Gabbard, "Inattentive Blindness with Augmented Reality HUDs: An On-road Study," Human-Computer Interaction, pp.1032-1044, 2025.
- [9] Xiangdong Ma, Mengting Jia, Zhicong Hong, Alex Pak Ki Kwok, Mian Ya, "Does Augmented-Reality Head-Up Display Help? A Preliminary Study on Driving Performance Through a VR-Simulated Eye Movement Analysis", IEEE Access, pp.123-129, 2021.
- [10] Adarsh S. Puranik & Swaroop Swamy K.M., "Sensor Fusion Using Kalman Filter in Autonomous Vehicles", International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), Vol.11, Issue03, pp.331-339, 2024.
- [11] Jamil Fayyad, Mohammad Jaradat, Dominique Gruyer & Homayoun Najjaran, "Deep Learning Sensor Fusion for Autonomous Vehicle Perception and Localization", Sensors, pp.1024-1033, 2020.
- [12] Y. Cui, S. Huang, J. Zhong, Z. Liu, Y. Wang, C. Sun, B. Li, X. Wang, and A. Khajepour, "DriveLLM: Charting the Path Toward Full Autonomous Driving with Large Language Models," IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, Vol.9, No.2, pp.1450-1464, 2023.
- [13] D. Fu, X. Li, L. Wen, M. Dou, P. Cai, B. Shi, and Y. Qiao, "Drive Like a Human: Rethinking Autonomous Driving with Large Language Models," IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, Vol.9, No.1, pp.123-135, 2024.
- [14] J. Teng, F. Wan, and Y. Kong, "Exploring Enhancement of AR-HUD Visual Interaction Design Through Application of Intelligent Algorithms," Int. J. Inf. Technol. Syst. Approach, Vol.16, No.2, pp.1-20, 2023.
- [15] E. Zablocki, H. Ben-Younes, P. Pérez, and M. Cord, "Explainability of Deep Vision-Based Autonomous Driving Systems: Review and Challenges," Computer Vision and Pattern Recognition, arXiv preprint arXiv:2101.05307, 2022.
- [16] A. Rasouli and J. K. Tsotsos, "Autonomous Vehicles That Interact With Pedestrians: A Survey of Theory and Practice," IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol.21, No.3, pp.900-918, 2020.
- [17] J. Horgan, C. Hughes, J. McDonald, and S. Yogamani, "Vision-Based Driver Assistance Systems: Survey, Taxonomy and Advances," IEEE Xplore, Robotics, arXiv preprint arXiv:2104.12583, 2021.
- [18] X. Dong and M. L. Cappuccio, "Applications of Computer Vision in Autonomous Vehicles: Methods, Challenges and Future Directions," Computer Vision and Pattern Recognition, arXiv preprint arXiv:2311.09093, 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