

멀티모달 센서 융합 기반 XR 콘텐츠 신뢰성 향상 프레임워크

한정수*
백석대학교 컴퓨터공학부 교수

XR Content Reliability Enhancement Framework Based on Multi-modal Sensor Fusion

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

요약 본 논문은 멀티모달 센서 융합 기반 XR 콘텐츠의 신뢰성 향상 방안을 중심으로 신뢰성 개념, 센서 융합 구조, 데이터 검증 체계 및 사용자 피드백 메커니즘을 분석하였다. 연구 결과, XR 콘텐츠 신뢰성은 정확성, 일관성, 정합성을 핵심 요소로 하며, 산업 현장에서는 작은 오차도 안전 문제로 이어질 수 있음을 확인하였다. 이를 위해 LiDAR, 카메라, IMU, 환경 센서를 통합한 멀티모달 센서 융합 기술이 중요하게 작용하였다. 또한 노이즈 제거, 시간 동기화, Kalman Filter, Graph Optimization, Cross-modal Fusion 등의 기술이 콘텐츠의 정확성과 안정성 향상에 기여하였다. 아울러 이상 탐지와 사용자 반응 기반 인터페이스는 시스템 안정성과 체감 신뢰성을 높이는 데 효과적인 것으로 나타났다. 결론적으로 멀티모달 센서 융합은 XR 콘텐츠 신뢰성 확보의 핵심 기술이며, 향후 XR 시스템은 지능형 상황인지 플랫폼으로 발전할 것으로 전망된다.

주제어 : 센서 융합, XR 신뢰성, 데이터 검증, 피드백 시스템, 상황인지

Abstract This paper investigates methods for enhancing the reliability of XR content based on multimodal sensor fusion, focusing on reliability concepts, sensor fusion architectures, data verification frameworks, and user feedback mechanisms. The results indicate that XR content reliability is primarily determined by three key factors: accuracy, consistency, and integrity, and that even minor errors can lead to safety risks in industrial environments. To address these challenges, multimodal sensor fusion technologies integrating LiDAR, cameras, IMUs, and environmental sensors play a critical role. Furthermore, techniques such as noise reduction, time synchronization, Kalman filtering, graph optimization, and deep learning-based cross-modal fusion contribute significantly to improving content accuracy and system stability. In addition, anomaly detection and user-response-based interfaces were found to enhance both system reliability and perceived trustworthiness. In conclusion, multimodal sensor fusion is a core technology for ensuring XR content reliability, and future XR systems are expected to evolve into intelligent context-aware platforms integrating sensing, decision-making, and feedback processes.

Key Words : Sensor Fusion, XR Reliability, Data Verification, Feedback System, Situational Awareness

1. 서론

최근 디지털 전환(Digital Transformation)의 가속화와 함께 XR(Extended Reality) 기술은 엔터테인먼트를 넘어 제조, 건설, 의료, 국방, 자율주행, 스마트시티 등 다양한 산업 분야의 핵심 인터페이스 플랫폼으로 확산되고 있다. XR은 가상현실(VR), 증강현실(AR), 혼합현실(MR)을 포괄하며, 현실과 가상 정보를 실시간으로 융합하여 사용자에게 몰입형 환경을 제공한다. 특히 산업용 XR은 실제 작업 환경과 디지털 정보를 결합하는 차세대 운영 플랫폼으로 발전하고 있다[1].

최근 XR 기술은 단순한 시각화 도구를 넘어 실시간 상황 판단과 의사결정을 지원하는 지능형 정보 시스템으로 진화하고 있으며, 이에 따라 XR 콘텐츠의 신뢰성(reliability)이 중요한 연구 주제로 부각되고 있다. XR 콘텐츠 신뢰성은 현실 세계의 정보가 가상 환경에 얼마나 정확하고 일관되게 반영되는지를 의미한다. 건설, 의료, 자율주행과 같은 분야에서는 객체 추적 오류, 위치 정합 오차, 데이터 불일치가 안전사고와 의사결정 오류로 이어질 수 있어 높은 수준의 신뢰성이 요구된다.

기존 XR 시스템은 카메라, LiDAR, IMU 등 단일 센서 기반으로 구현되는 경우가 많았으나, 환경 변화와 누적 오차에 취약하다는 한계를 가진다. 이를 해결하기 위해 최근에는 LiDAR, RGB/IR 카메라, IMU, GPS, 환경 센서 등의 정보를 통합하는 멀티모달 센서 융합(Multi-modal Sensor Fusion) 기술이 주목받고 있다. 또한 Kalman Filter, Graph Optimization, Cross-modal Fusion, Autoencoder 기반 이상 탐지 기술은 XR 시스템의 상황 인지 능력과 콘텐츠 신뢰성을 향상시키고 있다[2, 3]. 그러나 기존 연구는 개별 기술 중심으로 이루어져 XR 콘텐츠 신뢰성을 종합적으로 다루는 프레임워크 연구는 부족한 실정이다.

이에 본 연구는 멀티모달 센서 융합 기반 XR 콘텐츠 신뢰성 향상 프레임워크(XR Reliability Enhancement Framework)를 제안하고, 데이터 수집부터 사용자 피드백까지의 전 과정을 신뢰성 관점에서 분석하였다. 구체적으로 XR 콘텐츠 신뢰성을 정확성, 일관성, 정합성의 관점에서 정의하고, 센서 융합 기반 신뢰성 향상 구조와 핵심 기술의 역할을 통합적으로 분석하였다. 또한 산업용 XR 환경에 적용 가능한 평가 지표와 활용 시나리오를 제시하여 고신뢰 XR 시스템 설계를 위한 시사점을 도출하였다.

2. 연구 배경

2.1 XR 콘텐츠 신뢰성의 개념과 중요성

XR 콘텐츠 신뢰성이란 사용자가 경험하는 가상 정보가 현실 세계의 상태를 얼마나 정확하고 안정적으로 반영하는가를 의미한다. 이는 단순한 그래픽 품질이 아니라 현실 객체와 가상 객체 간의 위치·시간·의미적 정합성을 포함하는 개념이다. 특히 산업용 XR 환경에서는 사용자의 판단과 의사결정이 XR 콘텐츠에 의존하므로 신뢰성이 시스템 성능과 안전성을 결정하는 핵심 요소가 된다.

기존 연구에서는 XR 콘텐츠 신뢰성을 정확성(Accuracy), 일관성(Consistency), 정합성(Integrity)의 세 요소로 설명한다. 정확성은 현실 정보가 XR 환경에서 얼마나 오차 없이 표현되는지를 의미하며, 일관성은 시간에 따른 정보의 안정적 유지 정도를 의미한다. 또한 정합성은 센서 입력부터 콘텐츠 출력까지 데이터 무결성과 센서 간 시간적·공간적 일치성을 의미한다. 최근 XR 기술이 의사결정을 지원하는 지능형 인터페이스로 발전함에 따라 콘텐츠 오류는 산업재해, 의료사고 및 시스템 오작동으로 이어질 수 있어 신뢰성 확보의 중요성이 더욱 커지고 있다[4, 5].

본 연구에서는 XR 콘텐츠 신뢰성을 평가하기 위해 정확성, 일관성, 정합성 기반의 평가 체계를 제안한다. 정확성은 위치 정합 오차, 객체 인식 정확도, 객체 추적 정확도로 평가하며, 일관성은 지연 시간, 프레임 안정성, 데이터 결측률을 활용한다. 또한 정합성은 센서 데이터 일치율, 오류율, 무결성 검증 통과율을 통해 측정할 수 있다. 이를 기반으로 XR 콘텐츠 신뢰성(Reliability)은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$R = w_1A + w_2C + w_3I$$

여기서 R은 XR 콘텐츠 신뢰성 점수, A는 정확성, C는 일관성, I는 정합성을 의미하며, w_1 , w_2 , w_3 는 각 요소의 중요도를 반영하는 가중치이다. 이러한 평가지표는 향후 멀티모달 센서 융합 기반 XR 시스템의 성능을 객관적으로 평가하고 비교하기 위한 기준으로 활용될 수 있다.

2.2 멀티모달 센서 융합 기술의 개념과 특성

멀티모달 센서 융합은 서로 다른 특성을 가진 복수의 센서 데이터를 통합하여 보다 정확하고 안정적인 인식 정보를 생성하는 기술이다. 이는 단일 센서 기반 구조의

환경 의존성과 인식 한계를 보완하는 핵심 기술로 평가된다. 대표적으로 LiDAR는 거리 및 공간 깊이 인식에 강점을 가지며, RGB 카메라는 객체 인식과 시각적 정보 표현에 효과적이다. IR 카메라는 열 기반 감지에 활용되며, IMU는 사용자의 움직임과 장치 자세 추적에 사용된다. 또한 환경 센서는 온도·습도·소리·가스 등의 데이터를 수집하여 XR 환경의 상황 인지 정확도를 높인다[2].

멀티모달 센서 융합의 핵심은 서로 다른 데이터 구조를 시간적·공간적으로 정렬하는 데 있다. 각 센서는 서로 다른 샘플링 주기와 좌표계를 가지므로 데이터 통합 이전에 시간 동기화와 좌표계 보정이 필수적으로 요구된다. 멀티모달 센서 융합 구조는 일반적으로 데이터 수집 계층, 프리프로세싱 계층, 융합 알고리즘 계층, 해석 및 전파 계층으로 구성된다. 데이터 수집 계층에서는 다양한 센서 데이터를 실시간으로 획득하며, 프리프로세싱 계층에서는 노이즈 제거와 좌표 정합, 시간 정렬 등이 수행된다. 이후 융합 알고리즘 계층에서는 Kalman Filter, Graph Optimization, 딥러닝 기반 Cross-modal Fusion 등이 적용되며, 최종적으로 해석 및 전파 계층에서 XR 콘텐츠로 반영된다. 최근에는 Transformer 기반 Attention 구조를 활용한 딥러닝 융합 기술이 활발히 연구되고 있으며, 이는 객체 인식 및 행동 예측 정확도를 향상시키고 있다[6].

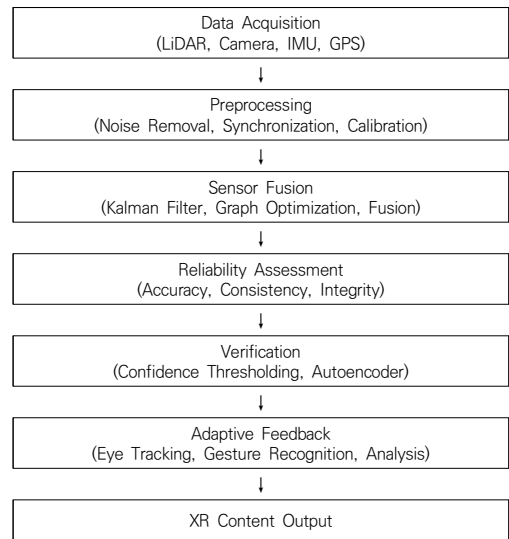
3. 센서융합 기반 XR 콘텐츠 신뢰성 구조

3.1 데이터 수집 및 프리프로세싱 구조

멀티모달 센서 융합 기반 XR 시스템에서 데이터 수집 계층은 전체 시스템 신뢰성을 결정하는 핵심 단계이다. 현실 정보를 정확하고 안정적으로 획득하는 것은 이후 데이터 처리와 콘텐츠 생성 품질에 직접적인 영향을 미친다. 또한 XR 환경은 실시간성을 요구하므로 데이터의 정확성뿐 아니라 시의성과 연속성 확보가 중요하다. [Fig. 1]은 본 연구에서 제안하는 XR 콘텐츠 신뢰성 향상 프레임워크를 나타내며, 센서 데이터 수집부터 사용자 피드백까지의 전 과정을 통합적으로 고려하여 정확성, 일관성 및 정합성 향상을 목표로 한다.

XR 시스템에서는 LiDAR, RGB/IR 카메라, IMU, GPS, 환경 센서 등이 주로 활용된다. LiDAR는 정밀한 3차원 정보를 제공하고, RGB/IR 카메라는 객체 인식과 환경 감지에 활용된다. IMU는 사용자 움직임과 장치 자세를 추적하지만 장시간 사용 시 드리프트가 발생할 수

있으며, 환경 센서는 온도·습도·소리 등의 정보를 수집하여 상황 인지 능력을 향상시킨다. 이처럼 각 센서는 고유한 장단점이 있어 단일 센서만으로는 복합 환경에 효과적으로 대응하기 어렵다. 따라서 XR 시스템에서는 다양한 센서 정보를 상호 보완적으로 활용하는 멀티모달 센서 융합 구조가 필수적이다[7].



[Fig. 1] XR Reliability Enhancement Framework

센서 데이터 수집 이후에는 프리프로세싱 과정이 수행된다. 프리프로세싱은 원시 데이터의 품질을 정제하고 이후 융합 과정에서 활용 가능한 형태로 정렬하는 단계이다. 주요 과정으로는 노이즈 제거, 좌표계 정합, 시간 동기화 등이 있다. 예를 들어 LiDAR 데이터에는 Statistical Outlier Removal(SOR) 알고리즘이 사용되며, 영상 데이터에는 Bilateral Filter와 CLAHE 알고리즘이 활용된다. 또한 서로 다른 센서 좌표계를 하나의 공통 좌표계로 통합하고, 센서 간 샘플링 주기를 정렬하기 위해 sliding window 기반 시간 정렬 기법과 interpolation 등의 시계열 처리 기술이 적용된다. 결국 프리프로세싱 계층은 XR 콘텐츠의 정확성과 실시간성을 확보하기 위한 핵심 처리 구조라고 할 수 있다.

3.2 융합 알고리즘 기반 신뢰성 향상 구조

프리프로세싱 이후에는 서로 다른 센서 데이터를 통합하는 융합 알고리즘 계층이 수행된다. 이 계층은 멀티모달 센서 융합의 핵심 단계로, XR 콘텐츠의 인식 정확도와 안정성을 결정한다. 대표적인 융합 알고리즘으로는 Kalman Filter 기반 구조가 있다. Kalman Filter는 상

〈Table 1〉 Roles of Sensor Fusion Algorithms in XR Reliability Framework

Algorithm	Primary Role	Applicable Sensors
Kalman Filter	Position and Motion Estimation	GPS, IMU
Graph Optimization	Spatial Alignment and Mapping	LiDAR, Camera
Fusion	Multi-modal Information Integration	LiDAR, Camera, IMU
Transformer	Feature Extraction and Attention-based Learning	Multi-modal Data
Autoencoder	Anomaly Detection and Reliability Verification	All Sensor Data

때 예측과 측정 업데이트를 반복 수행하여 노이즈에 강한 상태 추정을 가능하게 한다. 특히 GPS와 IMU 데이터 융합에 널리 사용되며, 비선형 환경에서는 Extended Kalman Filter(EKF)와 Unscented Kalman Filter(UKF)가 활용된다. Kalman 기반 구조는 비교적 낮은 연산 비용으로 실시간 처리에 적합하지만, 복잡한 비선형 환경이나 대규모 센서 구조에서는 성능 한계가 존재한다[6].

이를 보완하기 위해 최근에는 Graph Optimization 기반 융합 구조가 활용되고 있다. 이 방식은 센서 간 관계를 그래프 형태로 모델링하여 최적화 문제로 해석한다. 대표적으로 g2o, GTSAM과 같은 프레임워크가 사용되며, SLAM 기반 위치 추정과 포즈 정합에서 높은 성능을 보인다. 최근에는 딥러닝 기반 Cross-modal Fusion 구조도 주목받고 있다. 이 방식은 각 센서 데이터를 특징 벡터로 변환한 뒤 Transformer 기반 Cross-Attention 구조를 활용해 센서 간 상호 연관성을 학습한다. 예를 들어 LiDAR의 공간 깊이 정보와 카메라 영상 데이터 동시 분석으로 객체 인식 정확도를 향상시킬 수 있다. 또한 IMU 기반 움직임 정보와 시각 데이터를 결합한 위험 상황 인식 연구도 진행되고 있다. 최근에는 MobileNet, Tiny-YOLO와 같은 경량화 모델을 활용한 엣지 기반 융합 구조도 확산되고 있다[3, 8]. 〈Table 1〉은 XR 콘텐츠 신뢰성 향상 프레임워크 주요 알고리즘의 역할과 적용 대상을 나타낸다. Kalman Filter는 위치 및 자세 추정, Graph Optimization은 공간 정합, Fusion은 이중 센서 정보 통합, Transformer는 특징 추출 및 중요 정보 학습, Autoencoder는 이상 탐지와 신뢰성 검증을 담당한다. 이러한 알고리즘들은 상호 보완적으로 작동하여 콘텐츠의 정확성, 일관성 및 정합성을 향상시키는 데 기여한다. 융합 알고리즘 설계에서 중요한 요소는 정확성과 실시간성 간의 균형이다. 지나치게 복잡한 알고리즘은 높은 정확도를 제공하지만 실시간 처리 성능이 저하될 수 있으며, 반대로 단순한 구조는 실시간성은 확보할 수 있으나 인식 정확도가 낮아질 수 있다. 따라서 실제 XR 시스템에서는 정적 융합과 동적 적응형 융합을 병행하는 하이브리드 구조가 활용된다. 결국 융합 알고리즘

은 단순 데이터 통합 단계를 넘어, XR 시스템의 상황 인지 능력과 신뢰성을 결정하는 핵심 기술 구조라고 할 수 있다.

4. XR 콘텐츠 신뢰성 검증 및 적용 사례

4.1 데이터 무결성 검증 구조

멀티모달 센서 융합 기반 XR 시스템에서 중요한 요소 중 하나는 데이터 무결성(integrity) 확보이다. 입력 데이터에 오류가 존재하거나 처리 과정에서 데이터 손실이 발생할 경우 XR 콘텐츠의 신뢰성이 크게 저하될 수 있다. 데이터 무결성 검증은 센서 입력부터 콘텐츠 출력까지 전체 데이터 흐름의 안정성과 정확성을 유지하는 과정이다. 이를 위해 최근 XR 시스템에서는 Sensor-to-Output Trace Mapping 구조가 활용되고 있다. 이 방식은 XR 콘텐츠의 각 정보가 어떤 센서 데이터로부터 생성되었는지를 추적 가능하게 만드는 구조이다.

또한 최근에는 Confidence Thresholding 기반 검증 구조가 적용되고 있다. 이는 객체 인식 결과의 신뢰도가 일정 기준 이하일 경우 해당 정보를 시각화하지 않거나 사용자에게 경고를 제공하는 방식이다. 특히 산업용 XR 시스템에서는 잘못된 정보를 표시하는 것보다 정보 제공 자체를 제한하는 것이 더 안전한 경우가 많다. 최근에는 딥러닝 기반 Autoencoder 구조를 활용한 이상 탐지 기법도 적용되고 있다. Autoencoder는 정상 데이터 패턴을 학습한 뒤 재구성 오류를 분석하여 이상 여부를 판단한다. 또한 Dynamic Re-verification 구조를 통해 일정 시간 이후 동일 객체나 상황에 대한 재검증을 수행함으로써 일시적 센서 오류 문제를 최소화할 수 있다[9].

4.2 사용자 반응 기반 적응형 피드백 구조

XR 콘텐츠의 신뢰성은 센서 데이터의 정확성뿐 아니라 사용자가 정보를 어떻게 인지하고 반응하는가에도 영향을 받는다. 기술적 정확성이 확보되더라도 사용자가

정보를 신뢰하지 못하거나 정보 과부하로 인해 적절히 활용하지 못한다면 시스템 전체의 신뢰성은 낮아질 수 있다. 따라서 최근 XR 시스템에서는 사용자 반응 기반 적응형 피드백 구조의 중요성이 강조되고 있다. 기존 XR 시스템은 정적인 정보 제공 구조를 중심으로 설계되었으나, 실제 환경에서는 사용자의 시선 이동, 반응 속도, 제스처, 머리 방향 등에 따라 정보 처리 방식이 달라질 수 있다. 이를 해결하기 위해 최근 XR 시스템에서는 Eye-tracking, Gesture Recognition, Head Orientation, Biometric Signal 분석 등을 활용하여 사용자 상태를 실시간으로 분석하는 구조가 적용되고 있다[10].

시선 추적 기반 구조는 사용자가 실제로 어떤 정보에 주목하는지를 분석하며, 위험 경고 영역에 시선이 머물지 않을 경우 시스템은 경고 위치나 표현 방식을 조정할 수 있다. 또한 머리 방향 추적은 사용자의 시야 범위와 집중 방향을 파악하는 데 활용되며, 제스처 기반 분석은 인터페이스 구조를 재배치하는 데 활용된다. 최근에는 심박수, 피부 전도도, 뇌파 등의 생체신호를 활용하여 사용자의 스트레스 수준과 인지 부하(cognitive load)를 분석하고 콘텐츠 밀도와 알람 빈도를 조절하는 연구도 진행되고 있다[11, 12].

또한 적응형 피드백 구조는 AI 기반 개인화 인터페이스로 발전하고 있다. 시스템은 사용자 행동 이력을 학습하여 사용자별 반응 패턴과 인터페이스 선호도를 분석하고, 이를 기반으로 콘텐츠 배치와 정보 밀도를 자동 최적화할 수 있다. 결국 사용자 반응 기반 피드백 구조는 XR 콘텐츠 신뢰성을 인간 중심 인터페이스 설계 영역으로 확장시키는 핵심 요소라 할 수 있다[13].

4.3 산업별 적용 사례 분석

멀티모달 센서 융합 기반 XR 기술은 항공, 건설, 의료 산업 등 다양한 분야에서 활발히 적용되고 있다. 대표적으로 Airbus는 XR 기반 항공기 기체 점검 시스템을 구축하여 LiDAR, RGB 카메라, IR 카메라, IMU 등을 활용해 항공기 외부 상태를 실시간으로 분석하고 있다. 수집된 데이터는 Kalman Filter 기반 자세 보정과 이미지-포인트클라우드 정합 알고리즘을 통해 통합되며, 위험 부위와 손상 위치가 XR 인터페이스를 통해 시각화된다. Airbus는 해당 시스템 도입 이후 검사 시간과 검사 결과 편차가 감소하였다고 보고하였다[5].

건설 산업에서는 SK에코플랜트가 XR 기반 실시간 위험 감지 시스템을 개발하였다. 이 시스템은 IMU, 초음파 거리 센서, 소리 감지 센서, 360도 카메라 등을 통합하여

작업자의 위치와 주변 위험 상황을 실시간으로 분석한다. 또한 Autoencoder 기반 무결성 검증 구조를 적용하여 오경보(false alarm)를 줄이고 실제 위험 상황에 대한 경고 정확도를 향상시켰다. 사용자 반응에 따라 경고 색상과 크기를 자동 조절하는 적응형 인터페이스도 적용되었다[14, 15].

의료 분야에서는 Medtronic의 XR 기반 수술 내비게이션 시스템이 대표적인 사례로 제시된다. 이 시스템은 MRI-CT 영상, 실시간 초음파 데이터, 수술 기구 IMU, 생체 신호 데이터를 통합하여 환자의 해부학적 구조를 XR HUD 상에 실시간으로 중첩 시각화한다. 또한 Graph-based Multi-view Fusion 구조와 Deep Segmentation Model을 적용하여 주요 혈관과 신경 조직을 정밀하게 표현할 수 있도록 설계되었다. 이 사례는 XR 콘텐츠 신뢰성이 단순 사용자 경험을 넘어 환자 안전과 직결되는 핵심 기술 요소임을 보여준다[16].

5. 결론

본 연구는 멀티모달 센서 융합 기반 XR 콘텐츠 신뢰성 향상 프레임워크를 제안하고, XR 콘텐츠 신뢰성의 개념과 평가 요소, 센서 융합 기술, 데이터 검증 체계 및 사용자 반응 기반 적응형 피드백 구조를 통합적으로 분석하였다. 특히 데이터 수집, 전처리, 센서 융합, 신뢰성 평가, 검증, 적응형 피드백으로 구성된 XR 신뢰성 향상 프레임워크를 제안하고, 각 단계의 역할과 핵심 기술을 체계적으로 정리하였다.

연구 결과, XR 콘텐츠 신뢰성은 정확성, 일관성, 정합성을 중심으로 이해될 수 있으며, 산업·의료·건설·국방과 같은 고위험 환경에서는 작은 정보 오차도 안전 문제와 의사결정 오류로 이어질 수 있음을 확인하였다. 또한 LiDAR, RGB/IR 카메라, IMU, GPS 및 환경 센서의 융합은 보다 정확하고 안정적인 상황 인식을 가능하게 하며, Kalman Filter, Graph Optimization, Transformer, Cross-modal Fusion 및 Autoencoder 기반 기술은 XR 콘텐츠의 신뢰성 향상에 중요한 역할을 수행하는 것으로 분석되었다. 데이터 처리 및 검증에서는 Confidence Thresholding과 Autoencoder 기반 이상 탐지 기법이 시스템 안정성 향상에 효과적임을 확인하였다. 또한 사용자 시선, 제스처 및 행동 데이터를 활용한 적응형 피드백은 기술적 신뢰성을 사용자 체감 신뢰성으로 확장시키는 주요 요소로 나타났다.

본 연구는 위치 정합 오차, 객체 인식 정확도, 객체 추적 정확도, 지연 시간, 프레임 안정성 및 센서 데이터 일치율 등을 포함하는 신뢰성 평가 체계를 제안하였다. 이러한 지표는 향후 XR 시스템의 성능을 객관적으로 평가하기 위한 기준으로 활용될 수 있을 것이다. 한편 본 연구는 프레임워크 제안과 기술 분석 중심의 연구로서 실제 산업 현장 데이터를 활용한 정량적 검증에는 한계가 있다. 향후 연구에서는 공개 데이터셋, 디지털 트윈 기반 시뮬레이션 환경 및 실제 산업용 XR 플랫폼을 활용한 실증적 검증이 필요하다.

결론적으로, 멀티모달 센서 융합 기술은 XR 콘텐츠의 신뢰성과 정합성을 확보하기 위한 핵심 기술이며, 본 연구에서 제안한 XR 신뢰성 향상 프레임워크는 향후 고신뢰 XR 시스템 설계와 평가를 위한 기초 참조 모델로 활용 가능하며, 감지, 판단, 검증, 피드백이 통합된 지능형 상황인지 플랫폼으로 발전할 것으로 기대된다.

REFERENCES

- [1] T.B.Sheridan, "Human-Robot Interaction and Control in Telerobotics," IEEE Transactions on Human-Machine Systems, Vol.52, No.4, pp.455-468, 2022.
- [2] Y.Wang, J.Li, and H.Kim, "Multi-modal Sensor Fusion for Extended Reality Systems," IEEE Access, Vol.11, pp.22451-22468, 2023.
- [3] A.Dosovitskiy et al., "An Image is Worth 16x16 Words: Transformers for Image Recognition at Scale," International Conference on Learning Representations (ICLR), pp.1-21, 2021.
- [4] R.Smith and A.Gupta, "Sensor Integrity Verification in Real-time XR Platforms," IEEE Internet of Things Journal, Vol.10, No.14, pp.12144-12158, 2023.
- [5] J.Redmon and A.Farhadi, "YOLO-Based Lightweight Detection for Edge XR Devices," Computer Vision and Image Understanding, Vol.228, pp.103621, 2023.
- [6] B.Siciliano and O.Khatib, Springer Handbook of Robotics, Springer, pp.1421-1440, 2023.
- [7] D.Scaramuzza and F.Fraundorfer, "Visual-Inertial Odometry of Aerial Robots," Foundations and Trends in Robotics, Vol.10, No.1, pp.1-153, 2022.
- [8] P.Xu, J.Garcia, and W.T.Ooi, "SafeSpect: Safety-First Augmented Reality Heads-up Display for Safety-Critical Tasks," IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (IEEE VR), pp.233-241, 2025.
- [9] S.Madani and M.Kim, "Reliability Issues in Industrial Augmented Reality Environments," Sensors, Vol.23, No.8, pp.3721-3738, 2023.
- [10] H.Seo and K.Lee, "Adaptive Feedback Interface Design for XR Systems," Applied Sciences, Vol.14, No.2, pp.755-769, 2024.
- [11] J.Brooke, "Perceived Reliability in Human-Centered XR Interfaces," International Journal of Human-Computer Interaction, Vol.40, No.3, pp.315-329, 2024.
- [12] Z.Lv, J.Liu, and L.Xu, "A Multi-plane Augmented Reality Head-Up Display System Based on Volume Holographic Optical Elements," IEEE Photonics Journal, Vol.13, No.4, pp.1-11, 2021.
- [13] P.Putra, J.Park, and H.K.Kim, "In-Vehicle Human-Machine Interface Guidelines for Augmented Reality Head-Up Displays," Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, Vol.104, pp.266-285, 2024.
- [14] Airbus, "Aircraft Inspection using Augmented Reality Technologies," Airbus Technical Report, pp.1-18, 2023.
- [15] SK ecoplant, "XR-based Smart Construction Safety Management System," SK ecoplant Technical White Paper, pp.1-25, 2024.
- [16] Medtronic, "XR Navigation Platform for Surgical Assistance," Medtronic Medical Technology Report, pp.1-20, 2024.

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