

# 실시간 XR 협업을 위한 적응형 Edge-Cloud 통합 프레임워크

한정수\*

백석대학교 컴퓨터공학부 교수

## An Adaptive Edge-Cloud-Based Integrated Framework for Real-Time XR Collaboration

Jung-Soo Han\*

Professor, Division of Computer Engineering, Baekseok University

**요약** 최근 XR 기술은 스마트 제조, 디지털 트윈, 원격 교육 및 의료 등으로 확산되고 있으나, 실시간 협업에서는 네트워크 지연, 입력 동기화 오류, 전역 상태 불일치 및 정적 피드백의 한계가 존재한다. 이에 본 연구는 이를 개선하기 위한 적응형 Edge-Cloud 기반 XR 협업 프레임워크를 제안하였다. 제안 프레임워크는 입력을 State와 Event로 구분해 동기화하고, 지연 민감도, 상태 일관성 및 연산 복잡도에 따라 Edge와 Cloud의 처리 역할을 분담한다. 또한 AI 기반 상황 예측 및 적응형 피드백을 연계하여 입력 처리부터 사용자 피드백까지 통합하였다. 기존 구조와의 비교분석을 통해 입력 처리, 실시간 응답성, 데이터 일관성 및 피드백 측면의 특성을 검토하였으며, 입력 특성과 처리 요구도에 따라 동기화 방식과 처리 위치를 연계 결정하는 통합 메커니즘을 제시하였다.

**주제어** : XR 협업, Edge-Cloud 컴퓨팅, 입력 동기화, 적응형 피드백, 인공지능

**Abstract** Extended Reality (XR) technologies have recently expanded into various fields, including smart manufacturing, digital twins, remote education, and healthcare. However, real-time XR collaboration still faces challenges such as network latency, input synchronization errors, global state inconsistency, and limitations of static feedback. To address these issues, this study proposes an adaptive Edge-Cloud-based XR collaboration framework. The proposed framework classifies input data into State and Event information for synchronization and distributes processing tasks between Edge and Cloud according to latency sensitivity, global state consistency requirements, and processing complexity. It also integrates AI-based context prediction and adaptive feedback into a unified process from input processing to user feedback. Through a comparative analysis with conventional XR collaboration architectures, the proposed framework was examined in terms of input processing, real-time responsiveness, data consistency, and feedback. This study presents an integrated mechanism that jointly determines synchronization methods and processing locations according to input characteristics and processing requirements.

**Key Words** : XR Collaboration, Edge-Cloud Computing, Input Synchronization, Adaptive Feedback, AI

본 논문은 2026학년도 백석대학교 대학연구비 지원에 의하여 이루어졌음.

\*교신저자 : 한정수(jshan@bu.ac.kr)

접수일 2026년 07월 13일 수정일 2026년 08월 03일 심사완료일 2026년 08월 24일

## 1. 서론

디지털 전환(Digital Transformation)과 AI, 5G/6G 통신기술의 발전으로 확장현실(eXtended Reality, XR)은 단순한 몰입형 콘텐츠를 넘어 다수의 사용자가 실시간으로 상호작용하는 협업 플랫폼으로 발전하고 있다[1-3]. 특히 스마트 제조, 디지털 트윈, 원격 의료, 교육 및 메타버스 분야에서는 사용자 간 입력과 객체 상태를 실시간으로 공유하는 XR 협업 기술의 중요성이 증가하고 있다[2, 4]. 그러나 실시간 XR 협업 환경에서는 네트워크 지연, 패킷 손실, 단말 성능 및 입력 특성의 차이로 인해 입력 동기화 오류와 객체 상태 불일치가 발생할 수 있으며, Cloud 중심의 처리 구조는 지연에 민감한 상호작용의 실시간성을 저하시킬 수 있다[5, 6]. 또한 다중 사용자 환경에서는 전역 상태의 일관성 유지가 요구되며, 기존의 정적 피드백 방식은 사용자 행동과 시스템 상태의 변화를 충분히 반영하지 못하는 한계를 가진다[7]. 따라서 입력 동기화, 처리 지연, 전역 상태 일관성 및 사용자 피드백 문제를 하나의 처리 과정에서 연계하여 해결할 필요가 있다. 최근 이러한 문제를 해결하기 위해 Edge-Cloud 기반 분산 처리, 입력 동기화, AI 기반 상황 예측 및 적응형 피드백 기술이 제안되고 있다[8-12]. 그러나 대부분의 연구는 개별 기술이나 특정 처리 단계에 초점을 두고 있어 입력 특성에 따른 동기화 방식과 처리 요구도에 따른 Edge-Cloud 연산 분담을 연계하고, 이를 AI 기반 적응형 피드백까지 연결하는 통합적인 처리 구조는 충분히 제시되지 못하였다. 이에 본 연구에서는 실시간 XR 협업을 위한 적응형 Edge-Cloud 통합 프레임워크를 제안한다. 제안 프레임워크는 입력의 연속성과 발생 특성에 따라 상태(State)와 이벤트(Event) 정보를 구분하여 동기화하고, 지연 민감도, 전역 상태 일관성 요구도 및 연산 복잡도를 기준으로 Edge와 Cloud의 처리 역할을 결정한다. 지연에 민감한 입력은 Edge Server에서 우선 처리하고, 전역 상태 관리와 높은 연산량이 요구되는 처리는 Cloud Server에서 수행하며, 처리 결과를 AI 기반 상황 예측 및 적응형 피드백과 연계한다. 본 연구의 차별성은 개별 기술 자체보다 입력 분류-동기화 방식 결정-Edge/Cloud 연산 분담-전역 상태 동기화-상황 예측-적응형 피드백을 하나의 연속적인 처리 메커니즘으로 구성한 데 있다. 본 연구의 차별성은 개별 기술 자체보다 입력 분류-동기화 방식 결정-Edge/Cloud 연산 분담-전역 상태 동기화-상황 예측-적응형 피드백을 하나의 연속적인 처리 메커니즘으로 구성한 데 있다. 또

한 기존 XR 협업 구조와의 비교분석을 통해 제안 프레임워크의 문제 대응관계와 구조적 타당성을 검토한다.

## 2. 관련 연구

### 2.1 실시간 XR 협업 시스템

확장현실(XR) 협업 시스템은 공간적으로 분산된 사용자가 동일한 가상환경에서 객체를 공유하고 실시간으로 상호작용할 수 있도록 지원하는 기술이다. 최근 XR 기술은 디지털 트윈, 메타버스, 스마트 제조, 원격 의료 및 교육 등 다양한 분야에 적용되면서 협업 환경의 핵심 플랫폼으로 발전하고 있다[13, 14]. 특히 다수의 사용자가 동일한 가상 객체를 동시에 조작하거나 정보를 공유하는 환경에서는 모든 참여자가 동일한 시스템 상태를 유지하는 것이 협업의 정확성과 몰입감을 결정하는 중요한 요소이다[15]. 실시간 XR 협업 환경에서는 사용자의 위치, 자세, 시선, 제스처 및 음성 등 특성이 서로 다른 입력 데이터가 지속적으로 생성되며, 이러한 정보는 짧은 지연 시간 내에 다른 사용자에게 전달되어야 한다. 그러나 네트워크 지연, 패킷 손실, 단말 성능 차이 및 사용자 수 증가에 따른 처리 부하는 입력 동기화 오류와 객체 상태 불일치를 발생시켜 협업의 실시간성과 사용자 경험을 저하시킬 수 있다[16]. 따라서 다양한 입력 특성을 고려한 동기화와 처리 위치의 효율적 분담을 통해 실시간성과 상태 일관성을 함께 유지하는 것이 XR 협업 시스템의 중요한 과제이다.

### 2.2 XR 입력 동기화 기술

입력 동기화(Input Synchronization)는 다수의 사용자가 생성한 입력 데이터를 시간적·공간적으로 일관되게 유지하여 동일한 협업 환경을 제공하는 기술이다. 대표적인 방법으로는 상태 기반 동기화(State Synchronization)와 이벤트 기반 동기화(Event Synchronization)가 활용되고 있다[17]. 상태 기반 동기화는 객체의 위치, 회전, 속도 등 지속적으로 변화하는 상태를 주기적으로 전송하여 시스템의 일관성을 유지하는 방식으로 안정적인 상태 공유에 유리하지만, 사용자와 데이터 전송량이 증가하면 네트워크 부하가 증가할 수 있다. 반면 이벤트 기반 동기화는 객체 선택이나 명령과 같이 특정 시점에 발생하는 변화만을 전송하여 네트워크 효율성을 높일 수 있으나, 이벤트 순서 변경이나 패킷 손실에 따른 상태 불일치가

능성이 존재한다[13]. 최근에는 두 방식의 장점을 결합한 하이브리드 입력 동기화(Hybrid Input Synchronization)가 활용되고 있다. 하이브리드 방식은 지속적으로 변화하는 정보는 상태 기반으로, 특정 시점에 발생하는 입력은 이벤트 기반으로 구분하여 처리함으로써 실시간성과 데이터 일관성을 함께 고려할 수 있다[14]. 그러나 동기화 방식의 결합만으로는 네트워크 지연과 처리 부하까지 해결하기 어려우므로 입력 특성과 처리 요구도를 Edge-Cloud 연산 분담과 연계할 필요가 있다.

### 2.3 Edge-Cloud 기반 XR 처리 구조

실시간 XR 협업에서는 대용량 센서 데이터와 사용자 입력을 짧은 시간 내에 처리해야 하므로 단일 서버 기반 구조만으로는 지연시간과 확장성 문제를 해결하기 어렵다. 이에 따라 Edge Computing과 Cloud Computing을 결합한 분산 처리 구조가 연구되고 있다. Edge Computing은 사용자와 가까운 위치에서 입력 데이터의 전처리와 실시간 연산을 수행하여 응답 지연을 줄이고, Cloud Computing은 전체 협업 환경의 상태 관리, 대용량 데이터 저장, AI 모델 학습 및 사용자 간 전역 동기화를 담당하여 시스템의 확장성과 안정성을 지원한다[7]. 최근 연구에서는 Edge가 지연에 민감한 작업을 처리하고 Cloud가 복잡한 연산과 전역 상태 관리를 담당하는 하이브리드 구조가 실시간 XR 서비스의 효율적인 처리 방안으로 제시되고 있다. 그러나 기존 연구는 입력 동기화 또는 Edge-Cloud 분산 처리와 같은 개별 기능에 초점을 두는 경우가 많아, 입력 특성에 따른 상태/이벤트 동기화와 지연 민감도, 전역 상태 일관성 요구도 및 연산 복잡도에 따른 Edge-Cloud 처리 위치 결정을 연계하고, 이를 AI 기반 상황 예측 및 적응형 피드백까지 연결하는 통합 처리 구조는 충분히 다루어지지 않았다. 따라서 본 연구에서는 이러한 요소를 하나의 연속적인 처리 과정으로 연계하여 실시간 XR 협업의 입력 동기화, 처리 지연, 상태 일관성 및 사용자 피드백 문제에 대응하는 통합 프레임워크를 제안한다[8].

## 3. 적응형 Edge-Cloud 통합 프레임워크

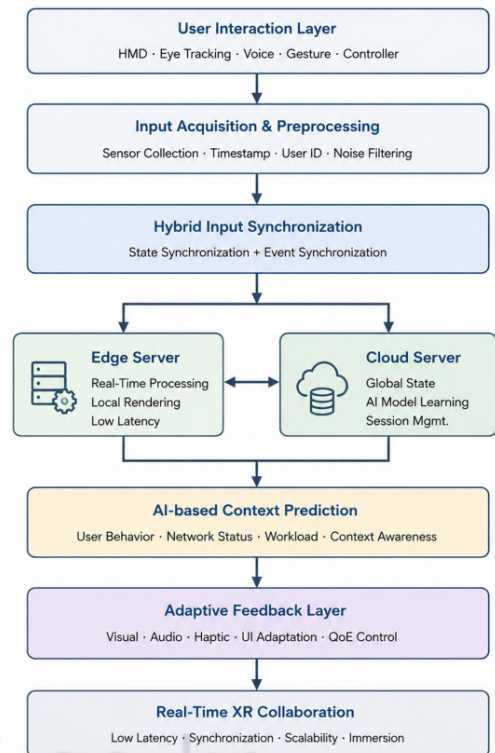
### 3.1 프레임워크 구조

실시간 XR 협업 환경에서는 다수 사용자의 입력을 실시간으로 처리하면서 상태 일관성과 낮은 지연시간을 유지하고, 상황에 따른 적응형 피드백을 제공해야 한다. 그

러나 기존 XR 협업 시스템은 입력 처리, 데이터 동기화 및 피드백 기능이 개별적으로 구성되는 경우가 많아 응답 지연과 상태 불일치가 발생할 수 있다. 또한 Cloud 중심 처리는 네트워크 지연으로 실시간성이 저하될 수 있고, 로컬 중심 처리는 전역 상태 관리에 한계가 있다. 최근에는 이를 보완하기 위해 Edge-Cloud 계층 구조와 AI 기반 상황 인식 기술을 활용하는 연구가 진행되고 있다[8-11].

이에 본 연구에서는 입력 특성과 처리 요구도에 따라 동기화 방식과 처리 위치를 연계하는 적응형 Edge-Cloud 통합 프레임워크를 제안한다. 제안 프레임워크는 입력을 상태(State)와 이벤트(Event) 정보로 구분하고, 지연 민감도, 전역 상태 일관성 요구도 및 연산 복잡도를 기준으로 Edge와 Cloud의 처리 역할을 결정하며, 처리 결과를 AI 기반 상황 예측 및 적응형 피드백과 연계하도록 설계하였다.

[Fig. 1]과 같이 프레임워크는 사용자 상호작용, 입력 수집 및 전처리, 하이브리드 입력 동기화, Edge-Cloud 협업 처리, AI 기반 상황 예측, 적응형 피드백 및 실시간 XR 협업의 7개 구성요소로 이루어진다. 지연에 민감한 입력은 Edge에서 우선 처리하고, 전역 상태 정보와 높은



[Fig. 1] Proposed Edge-Cloud Framework

연산량이 요구되는 처리는 Cloud에서 수행한다. 이를 통해 입력 분류-동기화-Edge/Cloud 연산 분담-전역 상태 동기화-상황 예측-적응형 피드백을 연속적으로 연결하여 응답 지연과 상태 불일치에 대응하도록 구성하였다.

### 3.2 하이브리드 입력 동기화

실시간 XR 협업 환경에서는 HMD, 시선 추적(Eye Tracking), 음성, 제스처 및 컨트롤러 등 다양한 입력장치에서 생성되는 데이터를 실시간으로 처리하고 모든 참여자에게 일관된 협업 상태를 제공하는 것이 중요하다. 그러나 입력 데이터는 발생 주기와 특성이 서로 다르므로 단일 동기화 방식만으로는 실시간성과 데이터 일관성을 동시에 고려하기 어렵다. 최근에는 이러한 문제를 해결하기 위해 상태(State) 동기화와 이벤트(Event) 동기화를 결합한 하이브리드 입력 동기화 기법이 XR 협업 시스템에 적용되고 있다[12-15].

[Fig. 2]는 본 연구에서 제안하는 하이브리드 입력 동기화 과정을 보여준다. 입력은 Input Acquisition 단계에서 수집된 후 입력의 연속성과 발생 특성을 기준으로 상태 정보와 이벤트 정보로 분류된다. 지속적으로 변화하는 입력은 State Synchronization으로, 특정 시점에 발생하는 입력은 Event Synchronization으로 처리한 후 Integrated Input Stream으로 통합되어 Edge-Cloud Processing 계층으로 전달된다.

상태 동기화는 사용자의 위치, 자세, 시선 방향 및 객체 상태와 같이 지속적으로 변화하는 정보를 일정한 주기로 갱신하여 공간적 일관성을 유지하는 과정이다. 이

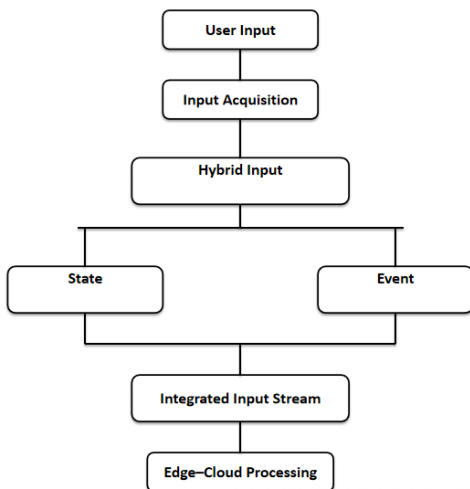
를 위해 시간 스탬프와 보간(interpolation) 기법을 적용하여 네트워크 지연에 따른 위치 오차를 줄이도록 구성하였다[13, 14]. 반면 이벤트 동기화는 객체 선택, 음성 명령 및 메뉴 조작과 같이 특정 시점에 발생하는 입력을 발생 순서에 따라 처리하며, 우선순위와 충돌 해결(conflict resolution) 기법을 적용하여 협업 상태의 불일치에 대응한다[15, 16].

제안한 하이브리드 입력 동기화 구조는 입력 특성에 따라 상태 정보와 이벤트 정보의 처리 방식을 구분하고 이를 Edge-Cloud 협업 처리와 연계한다. 지연에 민감한 상태 및 이벤트 입력은 Edge Server에서 우선 처리하고, 사용자 간 공유가 필요한 전역 상태 정보는 Cloud Server와 동기화하여 실시간 응답성과 데이터 일관성을 함께 고려하도록 설계하였다[10, 11, 17].

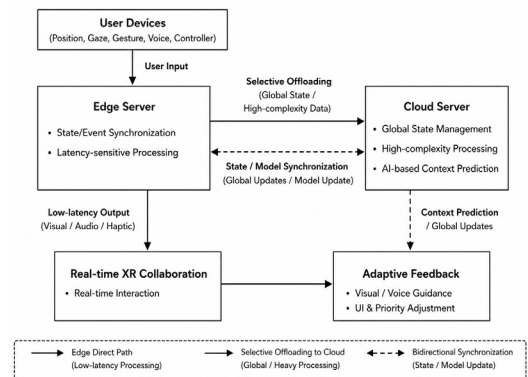
### 3.3 Edge-Cloud 협업 처리

실시간 XR 협업에서는 다양한 사용자 데이터를 신속하게 처리하면서 협업 상태의 일관성을 유지하는 것이 중요하다. 이에 본 연구에서는 지연 민감도(Latency Sensitivity), 전역 상태 일관성 요구도(Global Consistency Requirement), 연산 복잡도(Processing Complexity)를 기준으로 처리 위치를 결정하는 적응형 Edge-Cloud 협업 구조를 제안하였다. Edge Server는 상태/이벤트 동기화와 지연에 민감한 처리를 담당하고, Cloud Server는 전역 상태 관리, 높은 연산량의 처리 및 AI 기반 상황 예측과 모델 관리를 담당하도록 구성하였다[10, 11].

[Fig. 3]과 같이 즉각적인 반응이 필요한 위치, 시선, 제스처 및 객체 조작 등의 데이터는 Edge에서 우선 처리하여 실시간 XR 협업에 직접 반영하고, 전역 상태 정보



[Fig. 2] Hybrid Input Synchronization Process



[Fig. 3] Adaptive Edge-Cloud Processing for XR Collaboration

〈Table 1〉 Comparison between Conventional XR Collaboration and the Proposed Framework

| Comparison Item     | Conventional XR Collaboration       | Proposed Framework                                                                   |
|---------------------|-------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| Input Processing    | Single input synchronization        | State/event classification and hybrid synchronization                                |
| Processing Decision | Fixed or centralized processing     | Decision based on latency sensitivity, global consistency, and processing complexity |
| Data Processing     | Cloud-centric processing            | Edge-Cloud collaborative processing                                                  |
| Real-time Response  | Dependent on network latency        | Latency-sensitive edge-first processing                                              |
| Data Consistency    | Possible global state inconsistency | Cloud-based global state synchronization                                             |
| User Feedback       | Static interface                    | AI-based context prediction and adaptive feedback                                    |
| Scalability         | Limited by centralized processing   | Distributed Edge-Cloud architecture                                                  |

〈Table 2〉 Structural Validity Analysis of the Proposed Framework

| Problem                     | Decision Criterion             | Proposed Mechanism                | Expected Effect                            |
|-----------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------------|
| Input synchronization error | Input continuity / occurrence  | State/Event synchronization       | Improved synchronization consistency       |
| Cloud processing latency    | Latency sensitivity            | Edge-first processing             | Reduced processing path and response delay |
| Global state inconsistency  | Global consistency requirement | Cloud-based state synchronization | Consistent shared state                    |
| High processing load        | Processing complexity          | Edge-Cloud task allocation        | Distributed processing load                |
| Static feedback             | User/system context            | AI-based adaptive feedback        | Context-aware response                     |

와 높은 연산량이 요구되는 데이터는 선택적으로 Cloud에 오프로딩(Selective Offloading)한다. 또한 Edge와 Cloud 간 양방향 상태 동기화(State Synchronization)를 통해 전역 상태의 일관성을 유지하도록 하였다. 따라서 지연 민감도가 높은 처리는 Edge를, 전역 상태 일관성 또는 연산 복잡도 요구가 높은 처리는 Cloud를 우선하도록 구성하였다. Cloud의 AI 기반 상황 예측과 전역 상태 정보는 적응형 피드백과 연계하여 시각·음성 안내, 인터페이스 및 처리 우선순위 조정에 활용한다. 이러한 역할 분담을 통해 Edge의 낮은 응답 지연과 Cloud의 전역 관리 및 연산 확장성을 상호 보완하도록 설계하였다 [16, 17].

### 3.4 AI 상황 예측 및 적응형 피드백

실시간 XR 협업에서는 사용자 행동과 시스템 상태가 지속적으로 변화하므로 상황에 적합한 예측과 피드백이 요구된다. 이에 본 연구에서는 Edge-Cloud 처리 결과와 사용자 상호작용 정보를 분석하기 위해 LSTM(Long Short-Term Memory) 기반 시계열 예측 구조를 적용하도록 설계하였다. 사용자의 위치, 시선, 제스처 및 객

체 조작 이력 등을 기반으로 다음 행동과 협업 상황을 예측하고, 이를 상황 판단과 처리 우선순위 결정에 활용한다. 또한 반복되는 행동 및 객체 조작 패턴을 통해 다음 상호작용과 입력 충돌 가능성을 판단하도록 구성하였다 [14, 16].

적응형 피드백은 예측 결과와 사용자 및 시스템 상태에 따라 시각적 안내, 음성 알림, 인터페이스 정보 조정 및 데이터 전송·렌더링 우선순위 조정으로 구성하였다. 객체 충돌이나 입력 오류 가능성이 높은 경우 시각·음성 안내를 제공하고, 네트워크 지연이나 처리 부하가 증가하면 중요 객체의 전송 및 렌더링 우선순위를 조정한다. 이를 통해 상황 예측 → 상황 판단 → 피드백 및 처리 우선순위 조정으로 이어지는 적응형 구조를 구성하였다 [15-17].

## 4. 프레임워크 분석 및 타당성 검증

### 4.1 프레임워크 비교분석

제안한 적응형 Edge-Cloud 통합 프레임워크는 실시

간 XR 협업에서 발생하는 입력 동기화 오류, Cloud 중심 처리 지연, 전역 상태 불일치 및 정적 피드백의 한계에 대응하도록 설계하였다. 기존 XR 협업 시스템은 입력 동기화, 데이터 처리 및 사용자 피드백이 개별적으로 수행되는 경우가 많아 네트워크 지연과 다중 사용자 환경에서 협업 품질이 저하될 수 있다[10, 11]. 이에 본 연구에서는 상태/이벤트 동기화, Edge-Cloud 연산 분담, 전역 상태 관리 및 AI 기반 적응형 피드백을 하나의 처리 흐름으로 연계하였다.

〈Table 1〉은 기존 XR 협업 구조와 제안 프레임워크의 대응 메커니즘을 비교한 것이다. 입력 특성에 따라 상태(State)와 이벤트(Event)를 구분하여 동기화하고, 지연 민감도, 전역 상태 일관성 요구도 및 연산 복잡도를 기준으로 처리 위치를 결정한다. 지연 민감 입력은 Edge에서 우선 처리하고, 전역 상태 및 높은 연산량이 요구되는 처리는 Cloud에서 수행하며, AI 기반 상황 예측 결과를 적응형 피드백과 연계하도록 구성하였다. 따라서 제안 프레임워크는 입력 분류 → 동기화 방식 결정 → Edge/Cloud 처리 → 전역 상태 동기화 → 상황 예측 → 적응형 피드백의 연속적인 처리 메커니즘을 구성하며, 다음 절에서는 문제와 판단기준, 제안 메커니즘 및 기대 효과의 대응관계를 중심으로 구조적 타당성을 분석한다.

#### 4.2 제안 메커니즘의 구조적 타당성 분석

제안 프레임워크의 타당성은 실시간 XR 협업에서 발생하는 핵심 문제와 이에 대응하는 처리 메커니즘 간의 관계를 중심으로 분석하였다. 입력 동기화 오류에는 입력의 연속성과 발생 특성에 따른 State/Event 분리 동기화를 적용하고, Cloud 중심 처리에 따른 지연에는 지연 민감도를 기준으로 한 Edge 우선 처리를 적용하였다. 또한 다중 사용자 간 전역 상태 불일치에는 Cloud 기반 전역 상태 동기화를, 정적 피드백의 한계에는 AI 기반 상황 예측과 적응형 피드백을 대응시켰다.

〈Table 2〉와 같이 제안 프레임워크는 각 문제에 대응하는 판단기준과 처리 메커니즘을 명시적으로 연결하도록 설계하였다. 특히 처리 위치를 고정적으로 결정하지 않고 지연 민감도, 전역 상태 일관성 요구도 및 연산 복잡도에 따라 Edge와 Cloud의 역할을 분담한다는 점에서 기존 Cloud 중심 구조와 차이가 있다. 이러한 분석은 제안 구조의 논리적·구조적 타당성을 제시하는 것으로, 실제 지연 시간이나 성능 향상을 정량적으로 입증하는 것은 아니다. 이에 대한 실증적 검증은 실제 Edge-Cloud 기반 XR 프로토타입을 활용한 후속 연구에서 수행할 필요가 있다.

## 5. 결론

본 연구에서는 실시간 XR 협업 환경에서 발생하는 입력 동기화 오류, Cloud 중심 처리에 따른 지연, 전역 상태 불일치 및 정적 피드백의 한계를 개선하기 위해 적응형 Edge-Cloud 통합 프레임워크를 제안하였다. 제안 프레임워크는 하이브리드 입력 동기화, Edge-Cloud 협업 처리, AI 기반 상황 예측 및 적응형 피드백을 하나의 연속적인 처리 구조로 연계하여 실시간성과 데이터 일관성을 함께 고려하도록 설계하였다.

제안한 하이브리드 입력 동기화는 입력 특성에 따라 상태(State)와 이벤트(Event) 정보를 구분하여 처리하고, Edge-Cloud 협업 처리는 지연 민감도, 전역 상태 일관성 요구도 및 연산 복잡도를 기준으로 처리 위치를 결정하도록 구성하였다. 이에 따라 지연에 민감한 입력은 Edge Server에서 우선 처리하고, 전역 상태 관리와 높은 연산량이 요구되는 처리는 Cloud Server에서 수행하도록 역할을 분담하였다. 또한 처리 결과를 AI 기반 상황 예측 및 적응형 피드백과 연계하여 사용자와 시스템 상황에 적합한 정보를 제공하도록 설계하였다. 본 연구의 차별성은 개별 기술의 결합 자체보다 입력 특성에 따른 동기화 방식과 처리 요구도에 따른 Edge-Cloud 처리 위치를 연계 결정하고, 이를 전역 상태 관리와 적응형 피드백까지 하나의 처리 흐름으로 구성한 데 있다. 또한 기존 XR 협업 구조와의 비교분석을 통해 제안 프레임워크의 문제 대응관계와 구조적 특성을 분석하였다. 이러한 구조는 스마트 제조, 디지털 트윈, 원격 협업, 교육 및 의료 등 다양한 XR 응용 분야에 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 다만 본 연구는 제안한 프레임워크의 구조적 설계와 비교분석을 중심으로 수행되어, 실제 Edge-Cloud 기반 다중 사용자 XR 환경에서의 정량적 성능 검증에는 한계가 있다. 따라서 향후 실제 XR 프로토타입을 구현하고 다양한 네트워크 및 다중 사용자 환경에서 지연시간(Latency), 입력 동기화 정확도(Synchronization Accuracy), 시스템 확장성(Scalability), 대역폭 효율성(Bandwidth Efficiency) 및 사용자 경험(Quality of Experience, QoE)을 정량적으로 평가할 필요가 있다.

## REFERENCES

- [1] B.Sonkoly, B.G.Nagy, J. Doka, Z.K.Solymosi, J.Czentye, B.Formanek, D.Jocha, and B.P.Gero, "An Edge Cloud

- Based Coordination Platform for Multi-user AR Applications," Journal of Network and Systems Management, Vol.32, No.40, pp.1-27, 2024.
- [2] Z.Zhong, B.Landfeldt, G.Alce, and H.Caltenco, "Predictability-Aware Motion Prediction for Edge XR viaHigh-Order Error-State Kalman Filtering," Proceedings of the 2025 31st ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology, Article 88, 2025.
  - [3] Z.Lyu, M.Fridenfolk, "Digital Twins for Building Industrial Metaverse," Journal of Advanced Research, Vol. 66, pp.31-38, 2024.
  - [4] R. Krishna and A. Rahman, "Use Case for an Extended Reality Application on Edge Computing Infrastructure," RFC 9699, Internet Engineering Task Force, pp.1-24, 2024.
  - [5] C.Xu, Z.Chen, M.Tao, and W.Zhang, "Wireless Multi-User Interactive Virtual Reality in Metaverse With Edge-Device Collaborative Computing," IEEE Transactions on Wireless Communications, Vol.24, No.7, pp.6135-6150, 2025.
  - [6] Y.Huang, H.Wang, X.Qiao, X.Su, Y.Li, S.Dustdar, and P.Zhang, "SCAXR: Empowering Scalable Multi-User Interaction for Heterogeneous XR Devices," IEEE Network, Vol.38, No.4, pp.250-258, 2024.
  - [7] M.Schwab, D.Saffo, Y.Zhang, S.Sinha, C.Nita-Rotaru, J.Tompkin, C.Dunne, and M.A.Borkin, "VisConnect: Distributed Event Synchronization for Collaborative Visualization," IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, Vol.27, No.2, pp.347-357, 2021.
  - [8] H.W.Kao, Y.C.Chen, E.H.K.Wu, S.C.Yeh, and S.C.Kao, "Loka: A Cross-Platform Virtual Reality Streaming Framework for the Metaverse," Sensors, Vol.25, No.4, pp.1066, 2025.
  - [9] K. Todi and T. R. Jonker, "A Framework for Computational Design and Adaptation of Extended Reality User Interfaces," arXiv, 2023.
  - [10] M. Elfleet and M. Chollet, "Investigating the Impact of Multimodal Feedback on User-Perceived Latency and Immersion with LLM-Powered Embodied Conversational Agents in Virtual Reality," Proceedings of the 24th ACM International Conference on Intelligent Virtual Agents, pp.1-9, 2024.
  - [11] S.Davari and D.A.Bowman, "Towards Context-Aware Adaptation in Extended Reality: A Design Space for XR Interfaces and an Adaptive Placement Strategy," arXiv, pp.1-19, 2024.
  - [12] Z.Lv, J.Liu, and L.Xu, "A Multi-Plane Augmented Reality Head-upDisplay System Based on Volume Holographic Optical Elements With Large Area," IEEE Photonics Journal, Vol.13, No.4, 2021.
  - [13] Y.Liu, J.Xie, X.Qiao, R.Du, and X.Wang, "A Multi-Agent Mutual Trust Evaluation and Regulation Mechanism for Human-Robot-XR Collaborative Assembly System," Computers & Industrial Engineering, Vol.210, Article 111558, 2025.
  - [14] A.M.Gianni, A. Voulodimos, and N. Doulamis, "An LLM based learning framework for adaptive feedback mechanisms in gamified XR," A.M.Gianni, N.Nikolakis, N.Antoniadis, Computers & Education: X Reality, Vol.7, 2025.
  - [15] Z.Liu, S.Cheon, A.Stanbury, X.Jiao, W.Xing, H.Kang, "Towards contextual-based AI: A scoping review of artificial intelligence in X reality for personalized learning, Computers and Education: Artificial Intelligence," Vol.10, 2026.
  - [16] A.R.Y.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.
  - [17] H.Lin, Z.Gan, W.Gan, Z.Qi, Y.Wang, and P.S.Yu, "Interaction in Metaverse: A Survey," arXiv, pp.1-9, 2023.

#### 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