

이동형 공연장 환경에서의 신속한 안전 확보를 위한 디지털 트윈 기반 복합 이상탐지 시스템

정세린, 정영환, 이진영*

한국전자기술연구원

sr.jeong@keti.re.kr, cjstntjd@keti.re.kr, *jylee@keti.re.kr

A digital twin-based complex anomaly detection system for rapid safety in mobile performance venue environments.

Jeong Se Rin, Jeong Young Hwan, Lee Jin Young

Korea Electronics Technology Institute

Abstract

본 연구는 설치와 해체가 빈번하고 환경 조건이 지속적으로 변화하는 이동형 공연장에서의 신속한 안전 확보를 목표로, 디지털 트윈 기반 복합 이상탐지 시스템(COMA-AD)을 제안한다. 이동형 공연장은 지반 상태, 구조 응력, 군중 분포 등 다수의 위험 요인이 실시간으로 변동되지만, 기존 단일 알고리즘 기반 이상탐지 방식은 특정 시간 해상도나 분석 조건에 의존하여 판단 안정성이 저하되는 한계를 갖는다. 이를 해결하기 위해 본 시스템은 즉각적인 위험 신호를 감지하는 경량 탐지 계층과, 축적된 데이터를 기반으로 복합적 이상 패턴을 분석하는 고도화 분석 계층을 결합한 다중 추론 구조를 채택하였다. 또한 계층별 분석 결과를 구조적 신뢰도에 따라 통합함으로써, 개별 모델의 편향과 불확실성이 전체 판단에 과도하게 반영되는 문제를 완화하였다. 실험 결과, 제안 시스템은 관측 시간 해상도 변화에 관계없이 안정적인 탐지 성능을 유지하며, 단일 모델 대비 현저히 낮은 성능 편차를 보였다. 더불어 통합 해석 지표를 통해 이상 판단의 근거를 제시함으로써 현장 운영자의 신속하고 합리적인 대응을 지원한다.

I. Introduction

이동형 공연장은 설치와 해체가 반복되는 비정형 구조물로, 지반 상태, 구조 응력, 외부 환경 변화에 따라 안전 상태가 급격히 변동될 수 있다. 이러한 환경에서는 사고 발생 이후의 사후 대응보다, 붕괴 이전에 나타나는 미세한 이상 징후를 신속하게 포착하여 위험을 선제적으로 차단하는 것이 무엇보다 중요하다. 특히 공연 중에는 구조물 하중, 장비 배치, 군중 밀도가 실시간으로 변화하며, 이러한 변화가 복합적으로 구조 안정성에 영향을 미치기 때문에 밀리초 단위의 연속적인 상태 감시와 즉각적인 판단이 요구된다[1].

그러나 실제 공연장 운영 환경은 불안정한 네트워크 연결, 제한된 현장 연산 자원, 센서 노이즈 및 데이터 결손 등 다양한 제약 조건을 동반한다. 이로 인해 단일 알고리즘이나 특정 시간 해상도에 의존하는 기존 이상탐지 방식은 관측 조건 변화에 따라 성능 편차가 커지며, 장시간 운용 시 신뢰 가능한 안전 판단을 지속적으로 제공하는 데 한계를 보인다[2]. 최근 시계열 이상 탐지에 대규모 모델을 적용하려는 시도 역시 존재하지만, 높은 연산 비용과 외부 네트워크 의존성으로 인해 이동형 공연장과 같은 현장 중심 환경에서는 즉각적인 안전 대응을 보장하기 어렵다. 본 연구에서는 이러한 한계를 극복하기 위해, 이동형 공연장의 가변적 운영 환경에서도 안정적으로 작동 가능한 복합 계층 기반 이상탐지 시스템인 COMA-AD(Composite Multi-scale Anomaly Detection)를 제안한다. 제안 시스템은 현장 즉시 대응을 위한 경량 탐지 계층과, 시간적 누적 특성과 비선형 패턴을 분석하는 심층 분석 계층을 결합한 구조를 통해 단일 모델의 의존성을 제거한다. 나아가 각 계층은 서로 다른 시간 스케일의 이상 신호를 담당하도록 설계되어, 단기적 급변 상황과 중장기적 구조 이상을 동시에 고려할 수 있도록 구성된다.

또한 계층별 분석 결과를 구조적 신뢰도에 기반하여 통합함으로써, 특정 관측 조건이나 데이터 품질 저하 상황에서도 판단의 일관성을 유지하도록 설계되었다. 더 나아가 본 시스템은 디지털 트윈 상에서 물리 구조물의 상태 변화를 지속적으로 반영하고, 해석 가능한 이상 판단 지표를 제공함으로써 현장 운영자의 신속하고

합리적인 의사결정을 지원한다[3]. 실제 현장 데이터 기반으로 기존 단순 이상탐지 방법론과의 비교 결과 제안하는 방법이 추론 속도 및 다변적 시간 간격에서의 이상탐지 성능 측면에서 우수함을 확인하였다.

II. Proposed System: COMA-AD

제안하는 COMA-AD는 이동형 공연장 환경에서 신속한 안전 확보를 목표로, 디지털 트윈 기반의 시공간 정합 데이터 제공과 긴급도 기반 계층 판단을 하나의 운영 파이프라인으로 통합한 복합 이상탐지 시스템이다. 시스템 설계의 출발점은 “현장에서는 모든 센서 신호를 동일한 방식으로 처리할 수 없다”는 제약이며, 따라서 COMA-AD는 그림 1과 같이 (i) 센서 스트림을 디지털 트윈에서 일관된 상태 표현으로 변환하고, (ii) 긴급한 이상은 즉시 경고하며, (iii) 중·장기적 이상은 복합 분석으로 보강하고, (iv) 최종적으로 비숙련 관계자에게 설명 가능한 근거를 제공하는 구조로 구성된다.

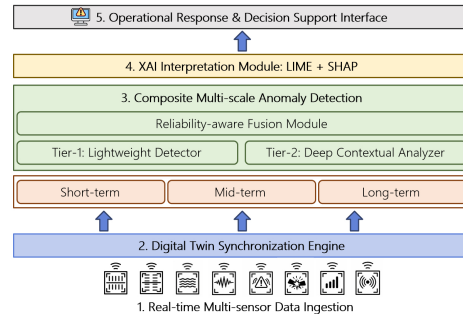


그림 1. COMA-AD 구조도

먼저 디지털 트윈 동기화 계층은 분산 배치된 다중 센서(구조 응력/진동/변위/환경/군중 등)에서 생성되는 비동기 스트림을 시공간적으로 정합(spatio-temporal alignment)한다. 이동형 공연장은 설치 조건과 구조 배치가 회차마다 달라지므로, 단순한 타임스탬프 정렬이나 센서별 독립 처리로는 “구

조물 단위의 안전 상태"를 안정적으로 구성하기 어렵다. COMA-AD의 디지털 트윈 동기화 계층은 센서 신호를 구조물 구성 요소(예: 트러스 구간, 지점, 연결 부)와 매핑된 상태 변화로 변환하여, 이후 탐지 계층이 "센서 값"이 아니라 "구조물 상태"를 입력으로 소비하도록 만든다. 이 과정은 노이즈, 부분 결손, 센서 품질 편차가 존재하더라도 판단 입력의 일관성을 유지하는 기반이 된다.

다음으로 이상 판단은 긴급도에 따라 계층적으로 수행된다. Tier-1(경량 탐지)은 현장 연산 제약을 전제로 설계된 고속 모듈로서, 급격한 변화, 충격성 패턴, 임계치 근접 등 즉시 대응이 필요한 단기 위험 신호를 밀리초 단위로 선별가능한 경량 시계열 예측 모델로 구성된다. Tier-1의 목적은 "정교한 원인 규명"이 아니라, 위험 가능성이 높은 구간을 빠르게 포착하여 경고 후보를 생성하고, 디지털 트윈 상의 관련 상태를 즉시 표시하는 것이다. 반면 Tier-2(심층 분석)는 일정 시간 누적된 상태 변화의 맥락을 활용하여, 단기 신호로는 드러나지 않는 점진적 편향, 반복적 미세 이탈, 장기 의존 패턴을 복합적으로 분석한다. 이를 위해 다양한 시간적 간격의 분석을 수행하는 Multi-model의 앙상블 전략을 활용한다. 즉, COMA-AD는 단일 시간 해상도에 종속되는 대신, 단기(즉시 위험)-중기(이상 누적)-장기(구조적 열화)관점을 동시에 수용하도록 설계되었다.

최종 판단은 특정 계층에 종속되지 않도록, 계층별 결과를 구조적 신뢰도에 기반하여 통합한다. 이동형 공연장에서는 관측 조건(센서 노이즈, 군중 변화, 설치 편차, 환경 요인)에 따라 특정 계층의 민감도가 일시적으로 흔들릴 수 있다. COMA-AD는 이러한 변동을 전제로, 한 계층의 불확실성이 커지는 상황에서 다른 계층의 분석 결과가 이를 상호 보정하도록 결합 로직을 구성한다. 그 결과 관측 시간 해상도나 데이터 품질이 달라져도 판단이 급격히 뒤집히는 현상을 억제하고, 단기·중기·장기 전 구간에서 일관된 경고 품질을 유지한다. 마지막으로 COMA-AD는 "경고에 대한 설명가능성"을 제시하기 위해 XAI 기반으로 특정 경고에 기여한 핵심 센서 채널과 디지털 트윈 상의 관련 구조물 상태 변화를 함께 제시한다. 구체적으로, LIME 기반의 국소 근사와 SHAP 기반의 기여도 할당을 선형결합하여, (i) 어떤 센서/상태가 경고를 유발했는지, (ii) 경고가 특정 구간/구성 요소와 어떻게 연결되는지, (iii) 우선 점검이 필요한 요인이 무엇인지를 신속히 전달하도록 구성하였다. 이를 통해 COMA-AD는 단순 탐지 성능을 넘어, 실제 현장에서 "즉시 판단-설명-조치"로 이어지는 페루프 안전 대응을 가능하게 한다.

III. Simulation Result

제안한 COMA-AD의 실효성 검증을 위해 이동형 공연장에서 수집된 다중 센서 데이터를 활용한 시뮬레이션을 수행하였다. 분석 관점은 단기, 중기, 장기로 구분하여 기존 단일 모델과의 성능 편차를 비교 분석하였다.

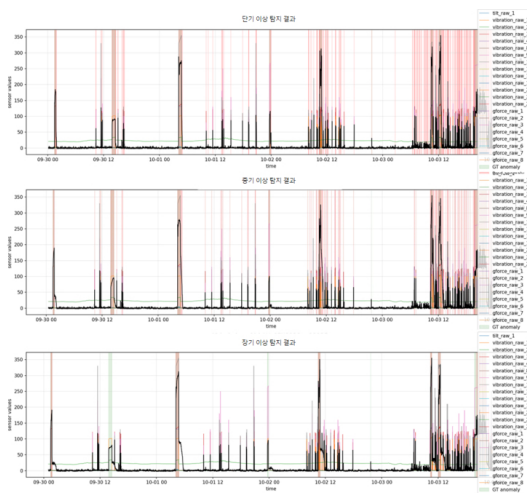


그림 2. COMA-AD 시스템을 활용한 이상 탐지 결과

그림 2에서 확인할 수 있듯이, 제안 시스템은 급격한 신호 변동 구간에서도 실제 이상 징후가 발생한 영역을 안정적으로 포착하였으며, 다양한 시간 해상도 변화에도 탐지 결과가 일관되게 유지되는 것이 관측되었다. 정량적 평가 결과(표 1)에서 COMA-AD는 단기 92.79%, 중기 95.23%, 장기 90.11%의 정확도를 기록하여 모든 분석 구간에서 90% 이상의 성능을 유지하였다. 반면 단일 알고리즘 기반 Baseline 모델은 분석 범위에 따라 성능 편차가 크게 나타났으며, 특히 경량 모델은 장기 구간에서 정확도가 74.09%까지 저하되어 환경 변화에 대한 민감도가 높게 나타났다.

Model Type	Baseline Variant	Short-term	Mid-term	Long-term
Single Model	Lightweight	86.37	83.62	74.09
	Large-capacity	86.92	90.38	83.92
Proposed system	COMA-AD	92.79	95.23	90.11

표1. 모델별 장·단기 이상탐지 정확도 비교

이러한 결과는 경량 탐지 계층과 심층 분석 계층의 상호 보완적 통합을 통해 전 구간에서 성능이 상향 평준화된 것으로 해석된다. 즉, 실환경 센서 데이터 기반 이상탐지에서 특정 시간 구간에 최적화된 단일 모델보다, 다각적 관점을 결합한 계층적 구조 설계가 탐지 성능의 일관성 확보에 더욱 유효함을 입증한다.

IV. Conclusion

본 연구에서는 설치와 해체가 반복되는 이동형 공연장의 가변적 운영 환경을 고려하여, 디지털 트윈 기반 복합 이상탐지 시스템인 COMA-AD를 제안하였다. 제안 시스템은 다중 센서 데이터를 디지털 트윈 상에서 시공간적으로 정합하고, 긴급도에 따라 계층적으로 이상을 판단함으로써 즉각 대응이 필요한 단기 위험과, 누적되는 중·장기 구조 이상을 분리하여 실환경에서 요구되는 신속성과 판단 일관성을 동시에 확보하였다.

또한 COMA-AD는 이상 탐지 결과에 대해 해석 가능한 정보를 함께 제공함으로써, 구조 전문가가 아닌 관제 인력도 경고의 원인과 영향을 직관적으로 이해하고 신속한 대응을 수행할 수 있도록 지원한다. 향후에는 제안된 시스템을 다양한 이동형 구조물 및 대규모 이벤트 환경으로 확장하여, 보다 폭넓은 실환경 안전 관리 시나리오에 적용할 예정이다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 문화체육관광부 및 한국콘텐츠진흥원의 2026년도 문화체육관광 연구개발 사업으로 수행되었음(연구개발과제명 : 이동형 공연장 안전 관리 최적화를 위한 디지털트윈 구축 기술개발, 연구개발과제번호 :

RS-2025-02221168, 기여율 100%)

참 고 문 헌

- [1] Farrar, C. R., and Worden, K., "Structural Health Monitoring: A Machine Learning Perspective," John Wiley & Sons, 2012.
- [2] Wu, R., and Keogh, E. J., "Current time series anomaly detection benchmarks are flawed and are creating the illusion of progress," IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, vol. 35, no. 3, pp. 2421-2429, Mar. 2023.
- [3] Fuller, A., Fan, Z., Day, C., and Barlow, C., "Digital twin: enabling technologies, challenges and open research," IEEE Access, vol. 8, pp. 108952-108971, 2020.