

영상 내 시계열 센싱 데이터의 비가시성 워터마킹을 활용한 복합 이상 감지 시스템

박진수, 신수용*

IT융복합공학과

국립금오공과대학교

jp@kumoh.ac.kr, wdragon@kumoh.ac.kr

A Composite Anomaly Detection System Using Invisible Watermarking of Time-Series Sensing Images in Video

Jin Su Park, Soo Young Shin

Department of IT Convergence Engineering

Kumoh National Institute of Technology

요약

스마트 팩토리, 자율주행 관제 등 다양한 환경에서 이상 징후 포착을 위해 영상과 다양한 센서 데이터를 사용하고 있다. 영상 정보와 IoT 센싱 데이터의 통합 분석은 좀 더 정확하고 강건한 이상 감지를 위해 필수적인 요소로 여겨진다. 그러나 기존 시스템은 여러 종류의 데이터를 개별적으로 전송·저장함에 따라 데이터 간의 시공간적 동기화 불일치 및 보안 취약성 문제를 안고 있다. 본 연구에서는 시계열 센싱 데이터를 2차원 이미지 형태인 ITS (Imaging Time Series)로 변환하고, 이를 비가시성 워터마크 기술을 통해 영상 프레임 내에 주파수 영역에서 은닉 삽입해 전송하는 시스템을 제안한다. 제안된 시스템은 단일 영상 스트림 내에 동일 시간 시계열 센서 정보를 결합함으로써 완벽한 데이터 정합성을 유지하고, 영상 분석과 센서 패턴 분석을 결합한 이중 이상 감지를 수행하여 탐지 정확도를 향상시킬 수 있다.

I. 서 론

4차 산업혁명 시대의 핵심 인프라인 스마트 시티와 스마트 팩토리에서 CCTV 영상 정보와 더불어 온도, 진동, 가속도와 같은 IoT 센싱 데이터가 실시간 이상 탐지에 사용된다. 특히 단일 센서 만으로 감지하기가 힘든 장비 고장, 품질 불량, 환경 불균형 등의 이상 전조의 감지를 위해 다양한 센서 데이터를 결합한 감지 기법이 필요되고 있다. 현재의 모니터링 시스템은 이들 데이터를 별도의 데이터베이스나 스트림으로 분리 관리한다. 이러한 방식은 네트워크 지연 또는 이동으로 인한 도플러 효과로 인해 영상과 센서 값의 시점이 일치하지 않을 경우 동기화 문제를 발생하며, 데이터 위변조 시 이를 즉각적으로 탐지하기 어렵다는 한계가 있다.

본 논문은 이러한 한계를 극복하기 위해 센싱 데이터를 ITS(Imaging Time Series) 기법을 사용해 이미지화하여 영상 프레임에 직접 삽입하는 시스템을 제안한다. 시계열 데이터를 이미지로 변환함으로써 기존의 강력한 이미지 기반 딥러닝 모델(CNN, ViT 등)을 센서 데이터 분석에 활용할 수 있으며, 비가시성 워터마킹을 통해 데이터 전송 효율과 보안성을 동시에 확보하고자 한다.

II. 본론

2.1. 복합 이상 감지 시스템 구조

본 연구에서 제안하는 시스템은 IoT 시계열 데이터를 2차원 이미지 (Imaging Time Series, ITS)로 변환하고, 이를 영상 프레임 내에 비가시성 워터마크로 은닉함으로써 데이터 간의 정합성을 보장하는 복합 이상 감지 프레임워크를 기반으로 한다. 시스템은 데이터 획득부터 최종 판단까지 유기적으로 연결된 5단계 모듈로 구성된다.

먼저, IoT 센서 수집 및 ITS 변환 모듈에서는 실시간 수집된 온도, 진동

등 시계열 데이터를 GAF, RP, MTF 기법을 통해 이미지화한다. 이어지는 워터마킹 프레임 생성 모듈은 카메라 프레임의 주파수 영역(DCT, DWT 등)에 ITS 이미지를 은닉하여 영상과 센서가 물리적으로 결합된 단일 프레임을 생성한다. 생성된 데이터는 영상 저장 및 전송 모듈을 통해 별도의 센서 스트림 없이 단일 채널로 송출된다.

수신 측의 복합 분석 모듈은 CNN을 통해 시각적 이상 행동을 감지함과 동시에 워터마크를 복원하여 센서 패턴을 별별 분석한다. 마지막으로 결합 이상 감지 및 최종 판단 모듈에서 두 데이터의 수치를 교차 분석함으로써 오탑(False Positive)을 최소화하고, 워터마크 추출 여부를 통해 데이터의 무결성을 검증한다.

2.2. 시계열 데이터의 이미지화 (ITS)

시계열 데이터를 이미지화하면 1차원 신호의 복잡한 결합 패턴을 2차원 시각 정보로 치환하여 비전 알고리즘의 장점을 극대화할 수 있다. 본 연구에서는 센서 데이터의 물리적 특성에 따라 다음과 같이 알고리즘을 선택적으로 적용한다.

그림 1은 GAF를 사용해 온도를 측정한 시계열 데이터를 이미지로 변환한 것이다. GAF(Gramian Angular Field)는 데이터를 극좌표계 기반 행렬로 변환하여 시간적 의존성을 보존한다. 이는 배터리 잔량이나 온도 변화와 같이 연속적인 추세 및 상관관계 분석이 중요한 시나리오에 적합하다.

그림 2는 MTF를 사용해 배터리 시계열 데이터를 이미지로 변환한 것이다. MTF(Markov Transition Field)는 상태 간 전이 확률을 기반으로 변환을 수행하며, 전력 소모의 급격한 변동이나 통신 노이즈와 같이 시스템의 동적 상태 전환이 빈번하게 발생하는 이상 탐지에 유리하다.

그림 3은 RP를 사용해 진동 시계열 데이터를 시각화 한 것이다. RP(Recurrent Plot)는 궤적 간 거리를 행렬로 표현하여 재귀성을 시각화

한다. 이는 반복 공정 로봇의 주기 이탈이나 기계적 마찰에 의한 주기적 소음 패턴 인식에 특화되어 있다.

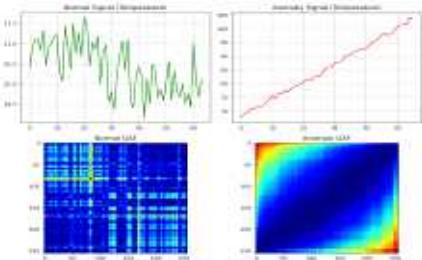


그림 1 GAF를 사용해 이미지화한 온도 시계열 데이터

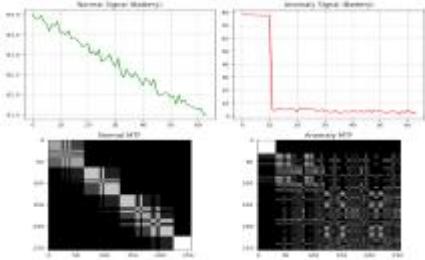


그림 2 MTF를 사용해 이미지화한 배터리 시계열 데이터

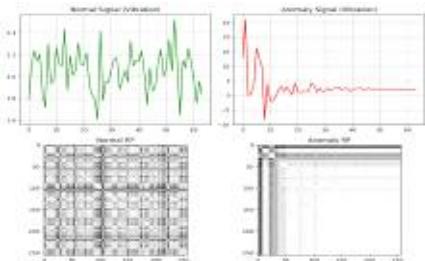


그림 3 RP를 사용해 이미지화한 진동 시계열 데이터

2.3. 비가시성 워터마킹 삽입 알고리즘

본 연구에서 제안하는 워터마킹 알고리즘은 영상의 품질 저하를 최소화하면서 은닉된 ITS(Imaging Time Series) 데이터의 강인성을 확보하기 위해 주파수 영역 변환 기법을 핵심적으로 활용한다. 시스템의 신뢰성을 높이기 위한 세부 메커니즘은 다음과 같다.

첫째, 제안 시스템은 DCT (Discrete Cosine Transform)와 DWT (Discrete Wavelet Transform)의 혼합 방식을 채택한다. DCT는 주파수 계수에 정보를 삽입하여 JPEG 등 영상 압축 환경에 대한 강인성이 우수하며, DWT는 다중 해상도 분석을 통해 특정 대역에 정보를 분산시켜 보안성을 극대화할 수 있다. 특히 ITS 이미지를 인간 시각 모델(HVS)이 인지하기 어려운 중·고주파 계수 영역에 선택적으로 삽입함으로써 높은 비가시성을 확보한다.

둘째, 워터마킹된 프레임은 시각 정보와 센서 ITS 정보가 주파수 대역에서 물리적으로 결합된 구조를 가진다. 이러한 구조는 데이터의 무결성 검증(Integrity Verification) 도구로 기능한다. 만약 전송 또는 저장 과정에서 영상 데이터에 임의의 변조가 가해질 경우, 추출된 워터마크 정보가 파손되어 ITS 이미지 복원이 불가능해지므로 이를 통해 데이터 위변조 여부를 즉각적으로 판별할 수 있다.

그림 4는 그림 1, 2, 3에서 표시된 데이터를 실제 영상 데이터에 워터마킹 한 모습이다. 본 연구에서 제안하는 시스템은 32x32 픽셀 크기의 ITS 이미지를 페이로드로 사용하여, 총 8,192 비트의 정보를 단일 비디오 프레임에 은닉한다. 워터마킹은 1280x720 해상도의 HD 영상 내 Y 채널을 대상

으로 수행되며, 8x8 블록 DCT 변환 후 중간 주파수 대역에 QIM 방식으로 블록당 2비트씩 삽입한다.



그림 4 시계열 센서 데이터를 워터마킹한 이미지

제안하는 워터마킹 메커니즘은 영상과 센서 데이터 간의 동기화 정합성을 유지함과 동시에, 별도의 스트림 없이 단일 영상 내에 모든 정보를 포함함으로써 전송 효율을 극대화하고 손실 환경에서도 시계열 정보를 복원할 수 있는 이중 보안 체계를 제공한다.

III. 결론

본 연구는 시계열 데이터를 이미지화하여 영상 프레임 내에 비가시 워터마크로 삽입하는 프로세스를 통해, 영상과 센서 데이터가 완전히 동기화된 통합 데이터를 생성할 수 있음을 확인하였다. 실험 결과, 제안한 방식을 통해 생성된 워터마킹 영상은 원본 영상의 품질 및 식별력에 저해를 주지 않으면서도 대용량의 시계열 정보를 안정적으로 포함할 수 있었고, 워터마크의 존재 유무를 통해 데이터의 무결성을 검증할 수 있는 가능성을 증명하였다. 다만, 본 연구는 시계열 데이터의 이미지화 및 영상 내 삽입 단계의 유효성 검증만 수행되었다.

향후 연구를 통해 워터마킹된 데이터로부터 정보를 역으로 추출하여 원래의 시계열 수치로 복구하거나 이를 활용하여 실제 이상 징후를 감지하는 단계를 수행해 제안하는 시스템의 가능성 및 성능을 검증하고자 한다.

ACKNOWLEDGMENT

This work was supported by the National Research Foundation of Korea(NRF) grant funded by the Korea government(MSIT) (RS-2025-00553810, 50%)

This research was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea(NRF) funded by the Ministry of Education (RS-2025-25436671, 50%)

참 고 문 헌

- [1] 오상원, 윤준철, 김영관, 김진술. (2022-02-09). 시계열 데이터의 이상 탐지를 위한 Recurrence Plot 알고리즘 기반 시계열 이미지 생성 방안. 한국통신학회 학술대회논문집 ,<https://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE11048093>
- [2] Wazirali, R.; Ahmad, R.; Al-Amayreh, A.; Al-Madi, M.; Khalifeh, A. Secure Watermarking Schemes and Their Approaches in the IoT Technology: An Overview. *Electronics* 2021, 10, 1744. <https://doi.org/10.3390/electronics10141744>