

이미지 텍스처 특징에 기반한 센싱 데이터 이상탐지 연구

최용훈, 김민서, 김민석*
상명대학교 휴먼지능로봇공학과

choiyonghoon1103@gmail.com, *minsuk.kim@smu.ac.kr

Image Texture Feature-Driven Anomaly Detection for Sensing Data

Yong-hoon Choi, Min-seo Kim, Min-suk Kim*

Dept. of Human Intelligence & Robot Engineering, Sangmyung University

요약

고위험 작업 공간 및 시설에서는 센서 데이터 기반의 상황 모니터링이 유지보수와 안전 확보를 위해 필수적이다. 특히 발전소와 같이 위험도가 높은 시설에서는 이상 징후를 신속하게 탐지하고 대응하는 것이 중요하다. 그러나 인력에 의존한 수동 모니터링은 탐지 지연과 실패 가능성을 내포하며, 이는 심각한 사고로 이어질 수 있다. 따라서 본 연구에서는 GADF(Gramian Angular Difference Field) 변환을 통해 센서 데이터를 이미지 형태로 변환하여 기계학습 모델의 입력으로 사용하며, 정상 패턴 학습을 위해 생성형 모델 DDPM(Denoising Diffusion Probabilistic Model)에 기반한 DDAD(Denoising Diffusion Anomaly Detection)기법을 적용한다. 또한, 변환된 GADF 이미지를 텍스처 형태로 간주하고 이를 효과적으로 처리하기 위해 CAPTN(Chebyshev Attention Depth Permutation Texture Network) 모델을 도입한다. 제안된 시스템은 환경 변화에 대한 추가적인 적응 과정 없이 일관된 이상 탐지 성능을 제공하는 것을 목표로 하며 다양한 환경에서의 센서데이터로 구성된 KAERI(한국원자력연구원)에서 수집한 데이터셋을 통해 이를 검증한다.

I. 서론

산업 현장을 비롯하여 고위험 작업 공간 또는 시설의 경우, 센서 데이터에 기반한 상황 모니터링 기술은 시설 유지보수와 작업자 안전을 위해 필수적으로 도입되어야 한다. 특히 발전소와 같이 위험도가 높은 시설에서는 이상 징후를 신속하게 파악하고 분석하여 적절한 조치를 취하는 것이 매우 중요하다. 그러나 인력에 의존하여 수동으로 수행되는 상황 모니터링 방식은 다양한 요인으로 인해 이상 탐지가 지연되거나 실패할 가능성이 존재하기 때문에 시스템의 일관성과 신뢰성을 보장하지 못한다. 이러한 한계점은 고위험 시설에서 치명적인 결과로 이어질 수 있으므로, 센서 데이터 기반의 자동화된 이상 탐지 연구가 요구된다.

본 논문에서는 이상 탐지 기법에 대한 검증을 위해 KAERI 에서 수집한 데이터를 기반으로 이상 탐지를 수행한다. 해당 데이터는 다양한 환경에서 발생한 이상 징후를 포함하고 있기 때문에 제안하고자 하는 이상 탐지 기법의 일관성과 신뢰성을 검증하는데 적합하다. 이를 위해 여러 환경에서 일관적인 이상 탐지를 구현하고자 센서 데이터를 GADF(Gramian Angular Difference Field) 방식으로 이미지화하여 기계학습 모델의 입력으로 사용한다. 따라서 GADF 이미지 세트에서의 정상 특징을 포착하기 위하여 본 논문에서는 생성형 모델인 DDPM(Denoising Diffusion Probabilistic Model)[1]에 기반한 이상 탐지를 제시한 DDAD(Denoising Diffusion Anomaly Detection)[2] 기법을 사용하여 다양한 형태의 변형 데이터로부터 정상 패턴을 학습한다. 또한, GADF 이미지로 변환된 센서 데이터가 텍스처적 특성을 가진다는 가정하에, 이를 효과적으로 처리하기 위해 CAPTN(Chebyshev Attention Depth Permutation Texture Network)[3] 모델을 도입하였다. 이를 통해 본 논문에서는 텍스처 모델의 도입을 통해 환경 변화에 대한 별도의 과정 없이 일관된 성능을 보이는 이상 탐지 시스템을 목표로 한다.

II. GADF 이미지 기반 이상 탐지

2.1. 데이터셋 분석 및 처리

본 논문에서는 A, B, C 로 정의된 환경에서 수집된 센서 데이터로 구성된 데이터셋을 활용하여 이상 탐지를 수행한다. 해당 데이터셋은 20kHz 에서 100kHz 범위의 주파수 영역에서 측정된 초음파 신호로 이루어져 있으며, 미세한 이상 징후를 탐지하기 위하여 4ms 구간에서 0.25kHz 간격으로 푸리에 변환을 수행하였다. 이를 통해 각 주파수 대역에서의 대표 값이 추출되며, 최종적으로 길이 320의 데이터 형태를 가지게 된다.

본 연구에서는 수집된 해당 데이터를 GADF 변환을 통해 이미지 형태로 변환하여 입력으로 사용하였고 변환된 데이터는 3x3 크기의 RGB 이미지 형태가 된다. 또한, 다양한 이미지 데이터로부터 공통적인 정상 패턴을 효과적으로 추출하기 위해 텍스처 기반 모델을 도입하였다. 이를 위해 학습 과정에서는 클래스 구분을 두지 않고 전체 데이터를 통합하여 학습을 수행하였으며, 그 결과를 기반으로 이상 탐지 성능을 평가하였다.

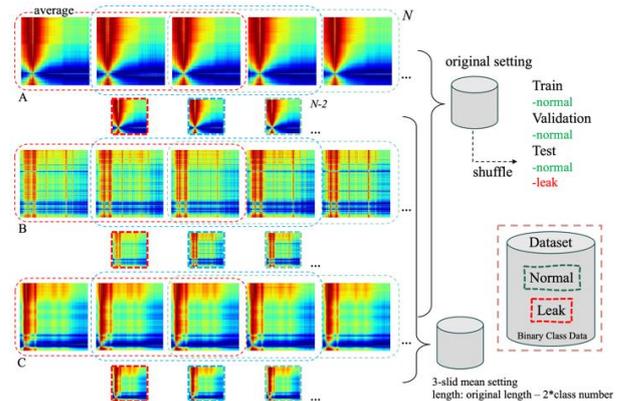


Figure 1. KAERI data formats and preprocessing workflow

또한, 상이한 데이터 간의 노이즈를 감소시키고 동일 클래스 내 데이터의 분산을 줄이기 위해, 각 이미지와 그 앞뒤 한 장을 포함하여 평균화하는 전처리 과정을 적용하였으며, 이를 통해 해당 기법의 효과를 검증하였다. 실험에 사용한 데이터셋의 구조와 처리 과정은 그림 1을 통하여 확인 가능하다.

2.2. Proposed Method: DDAD (Denoising Diffusion Anomaly Detection)

DDAD는 Denoising Diffusion 모델을 활용한 이상 탐지 제안 방법이며 DDPM의 확률론적 노이즈화, 복원 구조를 기반으로 정상 데이터의 분포를 학습하고 이상 점수를 산출하는 기법이다. 기존 DDPM은 전방 확산 과정에서 데이터에 점진적인 가우시안 노이즈를 주입하여 완전한 노이즈로 변환한 뒤, 역방향 복원 과정을 통해 데이터를 학습하는 모델이다. DDAD는 DDPM 구조를 변형하여, 역방향 복원 시 입력 데이터 자체를 참조하는 조건부 디노이징 과정을 통해 학습된 정상 패턴은 유지되고 이상 영역은 제거되어 생성하도록 유도하게 된다. 따라서 입력 이미지와 복원 이미지의 차이를 기반으로 이상 점수를 계산한다. 또한 사전 학습된 네트워크를 중간 계층 출력을 이용한 특징 공간 거리 이상 점수를 통합하여 정밀한 이상 탐지를 수행한다. 하지만 기존의 ImageNet와 같은 오브젝트 이미지셋을 학습한 사전학습 모델의 경우, 전체적으로 반복되는 패턴이 존재하는 형태의 텍스처 이미지인 실험 데이터에는 적합하지 않다. 따라서 본 연구에서는 DDAD에 CAPTN을 결합하여 텍스처 정보를 효과적으로 보존함으로써 다양한 환경에서의 정상 패턴을 효과적으로 포착하는 이상 탐지를 수행한다.

2.3. Proposed Method: CAPTN (Chebyshev Attention Depth Permutation Texture Network)

기존의 오브젝트 이미지의 경우 전역 형태를 기반으로 해당 객체를 인식하는 정보로 사용할 수 있으며, 합성곱 네트워크를 이용하여 높은 성능을 달성하였다. 하지만 KAERI 데이터와 같은 형태의 텍스처 이미지의 경우 전역적인 형태가 아닌 특징 패턴이 가변성을 가지며 반복되는 통계적인 특성을 가지고 있으므로 이를 처리할 수 있는 모델이 요구된다. CAPTN은 텍스처 특성이 중요한 데이터에 특화된 신경망 구조로서, 텍스처 내 복잡한 공간적 및 채널 간 관계를 효과적으로 고려하도록 설계되었다. 해당 모델의 경우, 체비쇼프 다항식 기반의 스펙트럼 그래프 컨볼루션을 활용하여 입력 이미지의 텍스처 패턴을 그래프 신호로 해석하고 국소 및 전역적 의존성을 동시에 반영한다. 또한, 순열 모듈을 통하여 특징 채널과 공간 차원을 재배열하여 텍스처 내 잠재적 상관관계를 높이고 모델의 표현력을 극대화한다. 따라서 본 논문에서는 CAPTN를 이용하여 DDAD로 재구성된 이미지의 텍스처 특징을 추출하여 특징 공간에서의 이상 탐지 성능을 보강한다.

III. 실험

본 논문에서는 두가지 형태의 데이터셋을 학습하고 이에 대한 성능 검증을 진행하였다. CAPTN의 경우 사전 학습된 convnext nano 모델에 기반하여 체비쇼프 다항식 모듈을 학습하고, 학습된 CAPTN을 이용하여 데이터의 특징을 추출하여 해당 특징 공간에서의 거리를 기반으로 이상 탐지를 수행한다. 이에 대한 실험 결과는 표 1과 같다.

Table 1. Dataset and Model Configurations Summary (AUROC)

| class | A | B | C | Binary |
|---------------------|-------|-------|-------|--------|
| DDAD | 70.4% | 89.4% | 79.6% | 74.3% |
| DDAD + 3slid | 72.4% | 97.6% | 76.1% | 71.5% |
| DDAD + CAPTN | 70.0% | 88.5% | 74.5% | 73.8% |
| DDAD + CAPTN + 3lid | 79.0% | 97.1% | 71.5% | 80.1% |

실험 결과, 기존 WideResNet 기반 DDAD 모델은 평균화된 데이터 세팅에서 일부 클래스의 성능이 향상되었으나, 전체 클래스에 대한 이상 탐지 성능은 오히려 저하되어 전반으로 낮은 성능을 보였다. 이는 해당 모델이 전체 데이터의 공통적인 특징을 효과적으로 포착하는 데 한계가 있음을 시사한다. 반면, CAPTN 기반 DDAD 모델의 경우 평균화 전처리 데이터를 대상으로 일부 클래스의 성능이 감소하였음에도 불구하고 전체 데이터를 대상으로 한 이상 탐지 성능이 향상되었으며 이는 가장 높은 성능을 기록하였다. 이를 통해 CAPTN 모델과 본 논문에서 제안한 데이터 처리 방식의 유효성을 검증 가능하였다.

III. 결론

본 논문에서는 고위험 작업 환경에서의 신뢰성 있는 모니터링 기술을 목표로, GADF 이미지 형식의 센서 데이터에 기반한 이상 탐지 기법을 제안하였다. 정상 패턴 학습을 위해 DDPM 기반의 DDAD 구조를 적용하여 이상 탐지를 수행하였으며 텍스처 특징을 효과적으로 처리하기 위해 CAPTN 모델을 도입하여 성능을 검증하였다. 또한 텍스처 특성을 강화하기 위해 평균화 전략을 적용한 결과, 높은 AUROC 성능을 달성할 수 있었으며, 이를 통해 CAPTN 모델이 데이터의 공통된 텍스처 특징을 효과적으로 포착함을 확인하였다. 결과적으로, 본 연구는 이미지 형태로 변환된 센서 데이터를 활용한 이상 탐지 방법론을 제시하였으며, 기존 모델을 기반으로 효율적인 이상 탐지 성능 향상에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

ACKNOWLEDGMENT

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korean government. (MIST) (No. RS-2022-00144000)

참고 문헌

- [1] Ho, J., Jain, A., Abbeel, P. "Denoising diffusion probabilistic models," *Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS)*, vol. 33, pp. 6840-6851, 2020.
- [2] Mousakhan, A., Brox, T., Tayyub, J. "Anomaly detection with conditioned denoising diffusion models," *DAGM German Conference on Pattern Recognition*, Springer Nature Switzerland, 2024.
- [3] Evani, R., Rajan, D., Mao, S. "Chebyshev Attention Depth Permutation Texture Network with Latent Texture Attribute Loss," *Proceedings of the Computer Vision and Pattern Recognition Conference (CVPR)*, 2025.