

장기 시계열 데이터의 시간 축 분석을 통한 송유관 건전성 모니터링 알고리즘 제안

박재한, 신수용

초연결 기반 협력형 무인자율이동체 연구센터, IT융복합공학과

국립금오공과대학교

rimitpark@kumoh.ac.kr, wdragon@kumoh.ac.kr

Oil Pipeline Integrity Monitoring Algorithm using Time-Axis Analysis of Long-Term Time-Series Data

Jae Han Park, Soo Young Shin

Super Connected and Collaborative Unmanned Autonomous Mobility Research Center, Department of IT Convergence Engineering

Kumoh National Institute of Technology

요약

본 논문은 장기간 축적된 송유관 데이터를 활용한 시계열 모니터링 알고리즘을 제안한다. 제안하는 기법은 시간 축 분리 분석을 통해 결함의 변화 추이를 직관적으로 제시하며, 기존 Feature Matching 방식의 한계인 좌표계 불일치 및 노이즈로 인한 오탐지 문제를 최소화한다. 또한, 시간 흐름에 비례하여 연산량이 증가하는 RNN 계열 모델 대비 높은 연산 효율성을 확보하였다.

I. 서론

송유관은 전 세계적으로 사용되는 에너지 수송의 핵심 시설 중 하나이다. 이런 송유관들은 일반적으로 수십 년 이상 사용되며, 이런 장기 운영에 따른 노후화로 인해 부식 및 균열과 같은 구조적 결함이 꾸준히 발생한다. 이런 결함을 사전에 감지하고 대처하기 위하여 배관 내 검사(In-Line Inspection, ILI)가 주기적으로 수행되어야 하며, 이를 통해 수집된 데이터는 배관의 수명을 예측하고 교체 시기를 결정하는 건전성 평가의 핵심 지표 중 하나로 사용된다. 최근에는 단일 입력 이미지를 사용하는 검사 방법이 아닌 다년간 축적된 데이터를 활용하여 부식 성장률을 확인하는 알고리즘에 제안되고 있다. 그중 하나인 Feature Matching 기법은 인접한 2개 년도의 검사점을 비교하여 송유관의 부식이 얼마나 성장했는지 확인하는 방법이다.[1] 하지만, 이런 방법의 경우 좌표계 불일치 또는 센서 노이즈와 같은 외인에 의하여 결함을 오 탐지 하는 경우가 있으며, 이를 해결하기 위해서는 데이터가 연차에 따라서 어떻게 특징이 변화하는지 확인이 필요하기 때문에 RNN과 같은 시계열 알고리즘을 접목한 방법들이 제안되었으나 입력 길이에 따라 연산량이 증가하는 단점이 있다.[2][3] 본 논문에서는 기존의 시계열 이미지 데이터들을 입력으로 사용하여 x, y, 성분이 연차에 따라 어떻게 변화하는지 시각적으로 표현하며 CNN 모델을 사용하여 분석 가능하다. 또한, 시간적 특성의 2차원화를 통해 시스템 경량화를 달성한다.[4]

II. 본론

그림 1은 본 논문의 시스템에서 사용된 10년의 입력 데이터 예시를 나타낸다. 일반적인 자연 부식 성장 데이터의 시간 경과에 따라 부식의 범위와 깊이가 점진적으로 증가하는 경향을 보인다. 기존의 시계열 분석 시스템

들은 이러한 변화를 학습하기 위해 10개의 프레임 전체를 개별적인 입력

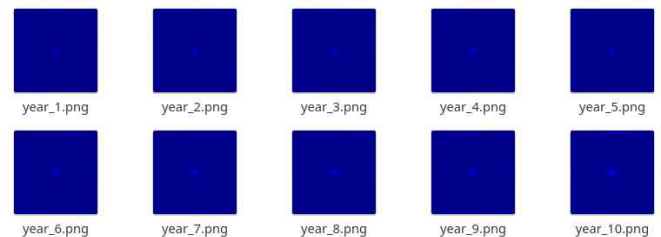


그림 1 일반적인 부식 성장 데이터 10년 예시

으로 사용하는 접근 방식을 취해왔다. 그러나 이러한 방식은 시퀀스의 길이가 길어질수록 모델의 입력 차원이 커지고, 이에 비례하여 연산 복잡도가 선형적으로 증가하는 한계가 있다.

본 논문에서 제안하는 시스템의 경우 위의 10장 이미지를 사용하여 2개의

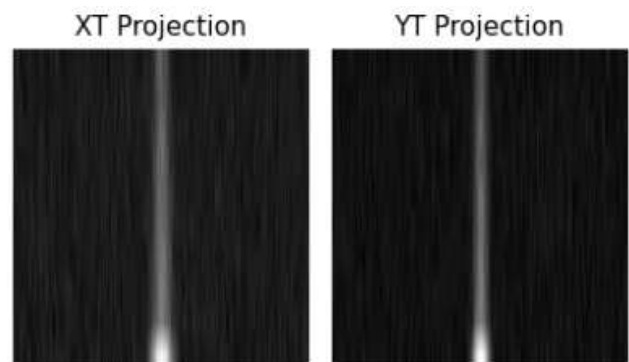


그림 2 급격히 증가하는 부식 성장 예시

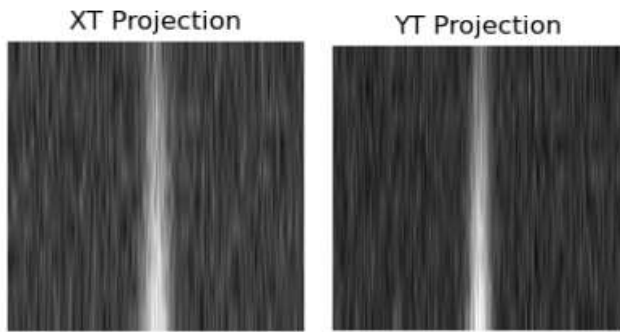


그림 3 일반적인 10년 데이터의 x 및 y 성분 특징 시각화

시간 특성 이미지를 추출한다. 추출된 시간 특성을 반영하는 이미지는 원본 이미지 10년의 x 성분과 y 성분이 어떻게 변화하는지 나누어 보여준다. 그림 2와 그림 3은 추출된 시계열 특징 이미지의 대표적인 예시를 보여준다. 그림 2는 정상적인 부식 성장의 사례로, 시간 축을 따라 성분의 크기와 깊이가 연속적이고 완만하게 확장되는 특징을 확인할 수 있다. 반면, 그림 3은 오탐지 또는 센서 노이즈로 간주되는 사례를 나타낸다. 정상 부식과 달리, 마지막 관측 시점에서 픽셀 값이 불연속적으로 급증하거나 비정상적인 형태 변화를 보이는 것을 확인할 수 있다. 이러한 시각적 패턴의 차이는 실제 부식 성장과 오탐지를 명확히 구분하는 척도가 된다. 최종적으로 추출된 두 장의 시간 특성 이미지는 CNN 기반 모델의 입력으로 사용되어, 부식 성장 유형을 분류하게 된다.

III. 결론

본 논문에서는 장기간 축적된 송유관 IILI 데이터를 효과적으로 분석하기 위해, 시간 차원을 공간 차원과 분리하여 투영하는 새로운 시계열 모니터링 시스템을 제안하였다. 제안된 기법은 10년 이상의 다변량 데이터를 x축 및 y축 기반의 시각적 특징 이미지로 변환하여 CNN 모델을 통해 결함의 성장 유형을 분류한다.

본 연구의 핵심 기여는 기존 방법론들이 가진 한계를 극복했다는 점에 있다. 첫째, 개별 좌표의 정확한 정합을 요구하는 특징 매칭 기법과 달리, 본 시스템은 결함의 시계열적 패턴 전체를 학습함으로써 좌표계 불일치와 센서 노이즈로 인한 오탐지 문제에 대해 높은 강건성을 확보하였다.

둘째, 시퀀스 길이에 비례하여 연산량이 증가하는 RNN 계열 모델과 달리, 데이터를 정적 이미지로 압축하여 처리함으로써 두개의 CNN 수준의 연산 복잡도를 달성, 시스템 경량화가 가능하다.

결론적으로, 제안된 시스템은 노이즈가 심한 현장 데이터에서도 실제 부식 성장과 오탐지를 명확히 구분할 수 있음을 확인하였으며, 향후 대규모 배관 데이터의 실시간 건전성 평가를 위한 연구를 추가로 진행 중이다.

ACKNOWLEDGMENT

“이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2025-00553810, 50%)“

“본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 대학ICT연구센터사업의 연구결과로 수행되었음” (IITP-2025-RS-2024-00437190, 50%)“

참 고 문 헌

- [1] Dann, M. R., & Dann, C. (2017). Automated matching of pipeline corrosion features from in-line inspection data. *Reliability Engineering & System Safety*, 162, 40-50..
- [2] Mikolov, T., Karafiát, M., Burget, L., Cernocký, J., & Khudanpur, S. (2010, September). Recurrent neural network based language model. In *Interspeech* (Vol. 2, No. 3, pp. 1045-1048)..
- [3] Huang, L., Hong, X., Yang, Z., Liu, Y., & Zhang, B. (2022). CNN-LSTM network-based damage detection approach for copper pipeline using laser ultrasonic scanning. *Ultrasonics*, 121, 106685..
- [4] Zhang, Y., Guo, Z., Wu, J., Tian, Y., Tang, H., & Guo, X. (2022). Real-time vehicle detection based on improved yolo v5. *Sustainability*, 14(19), 12274..