

베이지 정리 기반 동적 임계값을 활용한 벨트 컨베이어 고장 진단 방법 개발

조상묵*, 김동현*, 김태원*, 이종훈*, 김도윤*,
위드로봇(주)*,

Development of a Belt Conveyor Fault Diagnosis Method Utilizing a Bayesian-Based Dynamic Thresholds

SangMuk Cho*, DongHyeon Kim*, TaeWon Kim*, Jonghoon Yi*, Do-Yoon Kim*,
WITHROBOT. Inc*

Abstract - 본 논문에서는 자사에서 개발한 이동형 무인 벨트 컨베이어 감시 로봇의 고장 진단 알고리즘 결과의 신뢰성을 높이기 위한 2단계 고장 진단 방법을 제안한다. 기존 방법은 로봇이 와이어를 따라 편도 주행하는 동안에만 내장된 마이크를 통해 취득한 음향 데이터를 이용하여 DNN 기반의 고장 진단 알고리즘 결과를 출력하였으나 단위 측정만으로는 오검출(False Alarm)이 많이 발생하여 현장 조업자들은 신뢰성 확보 및 작업 효율 증대를 위해 오검출을 줄여달라고 요청하고 있다. 이러한 현장의 요구사항과 기존 방법의 오검출 한계를 해결하고자, Forward 주행 시 검출한 고장 진단 결과를 충전 스테이션으로 복귀하는 Backward 주행에서 검증하는 방법을 사용하였다. 로봇은 Forward 주행 시 벨트 컨베이어의 고장 의심 구간을 우선 매핑하고, Backward 주행 시 매핑된 고장 구간에서만 재진단을 수행하여 최종 결과를 확정한다. 특히, 복귀 주行的 재진단 시에는 베이지 정리를 통해 동적으로 계산된 임계값을 사용하여 고장 여부를 판단함으로써 신뢰성 및 효율성을 확보하였다. 제안하는 2단계 재진단 방식을 적용하면 기존의 측정 방식 대비 오검출(False Alarm)이 27.27%에서 0%로 감소한 것을 확인하였다. 이는 현장의 오검출 문제를 해결하고 작업 효율을 높이는 데 기여할 수 있다.

1. 서 론

최근 산업 현장에서는 작업자가 접근하기 어려운 설비의 점검을 로봇으로 대체하기 위한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 현재 벨트 컨베이어의 무인 점검을 위해 이동형 로봇이 실제 운영되고 있으며, 해당 로봇은 내장된 마이크를 이용하여 출발점에서 반환점까지 이동하면서 벨트 컨베이어의 음향 데이터를 수집한다. 수집된 데이터는 DNN(Deep Neural Network) 기반 알고리즘을 통해 분석되며, 이를 바탕으로 설비의 고장 여부를 진단한다. 그러나 편도 주행 결과만을 이용하는 기존 방식에서는 두 가지 유형의 오검출 문제가 발생한다. 첫째, 산업 현장의 환경 소음 및 로봇 구동 과정에서 발생하는 기계적 소음이 음향 데이터에 포함되는 경우이다. 둘째, 진단 대상이 아닌 인접 벨트 컨베이어의 소리가 함께 수집되는 경우이다. 이러한 경우 DNN 기반 진단 알고리즘의 오검출 가능성이 증가하며, 이는 현장 작업자의 유지보수 의사결정에 혼란을 초래하고 불필요한 현장 점검으로 인해 작업 효율을 저하시키는 원인이 된다.

본 논문에서는 이러한 문제 중 환경 소음 및 로봇 구동음으로 인한 오검출 문제를 해결하기 위해 이동형 로봇의 왕복 주행 특성을 활용한 2단계 고장 검출 방법을 제안한다. 먼저 출발점에서 반환점까지 이동하는 Forward 주행 단계에서는 전체 구간에 대한 고장 진단을 수행하고, 고장이 의심되는 위치를 매핑한다. 이후 반환점에서 출발점까지 이동하는 Backward 주행 단계에서는 매핑된 위치에 대해 재진단을 수행하여 최종 고장 여부를 판정한다.

2. 본 론

2.1 시스템 구성

본 연구에서 제안하는 알고리즘은 위드로봇(주)에서 개발한 무인 벨트 컨베이어 감시 로봇에 적용되었다. <그림 1> 해당

로봇은 컨베이어 라인을 따라 설치된 와이어를 주행하며 내장된 마이크를 통해 실시간 음향 데이터를 수집한다. 로봇 내부에는 주행 거리를 측정할 수 있는 엔코더와 데이터 처리를 위한 연산 장치가 탑재되어 있어, 수집된 음향 데이터의 위치 정보를 실시간으로 결합할 수 있다.



<그림 1> 무인 벨트 컨베이어 감시 로봇 외형

2.2 기존 고장 진단 방법의 한계

기존의 고장 진단 방식은 로봇이 충전 스테이션에서 출발하여 목적지까지 주행하는 Forward 주행 과정에서 모든 진단을 완료한다. 마이크로 수집된 음향 데이터는 DNN 기반 분류 모델의 입력값으로 사용되며, 모델은 매 순간의 상태를 실시간으로 정상 혹은 고장으로 판정한다. 이후 목적지에서 충전 스테이션으로 주행하는 Backward 주행이 완료되면 관제 시스템에 결과를 전송한다.

그러나 이러한 진단 방식은 벨트 컨베이어 주변의 강력한 환경 소음이 유입될 경우 모델이 이를 고장 신호로 오인할 가능성이 높다. 또한, 로봇 자체의 주행 진동이나 구동음이 데이터에 섞이면서 오검출(False Alarm)을 유발한다. 검증 단계가 결여된 기존 방식은 현장 조업자의 불필요한 확인 작업을 야기하여 시스템의 신뢰도를 저하시킨다.

2.3 동적 임계값 기반 2단계 고장 진단 방법

현장의 오검출 문제를 해결하고 진단 신뢰성을 높이기 위해, 본 논문에서는 이동형 로봇의 왕복 주행 특성을 활용한 동적 임계값 기반의 2단계 고장 검출 방법을 제안한다.

로봇은 충전 스테이션에서 목적지까지 이동하는 Forward 주행을 하며 전체 벨트 컨베이어 구간을 탐색한다. 이 과정에서 DNN 모델이 고장으로 판정한 지점의 위치 정보와 해당 지점의 손실값(Loss)을 저장하여 고장 의심 맵을 생성한다. 이후, 목적지에서 충전 스테이션으로 복귀하는 Backward 주행을 하며 Forward 주행에서 저장된 고장 의심 지점에 도달하면 주행을 멈추고 정지 상태를 유지한다. 로봇은 소음을 최소화한 채 정지 상태에서 데이터를 반복적으로 수집하며 재진단을 수행한다. 이 과정에서 베이지 정리를 사용하여 동적 임계값을 계산하고 재진단 결과가 임계값을 초과한 경우에만 최종 고장으로 판정한다.

2.3.1 동적 임계값 산출 및 최종 판정 로직

재진단 결과의 신뢰성을 확보하고 일시적인 환경 소음에 의한 오차를 통계적으로 배제하기 위해, Forward 주행 결과와 베이지 정리를 활용한 동적 임계값 산출 및 최종 판정 로직을 적용한다. 다만, 고장 의심 맵에 너무 많은 지점이 매핑된 경우 배터리

잔량이 부족하여 복귀를 못하는 문제가 생길 수 있어 최대 재진단 횟수는 고정된 값을 사용하였다.

먼저 Forward 주행이 완료되면 고장 의심 맵의 Loss 값을 활용하여 <식 1>와 같이 재진단 과정의 신뢰도를 확보하기 위한 사전 확률(P_{prior})을 설정한다. 이는 해당 Loss 값에 반비례하도록 Loss의 최댓값으로 정규화하여 산출하며, Forward 진단 Loss가 낮아 신뢰도가 높을수록 사전 확률을 높게 설정하여 재진단 시 필요한 최소 검출 횟수를 줄이고 효율성을 확보한다.

$$P_{prior} = 1 - \frac{Loss}{Loss_{max}}$$

<식 1> 사전 확률 계산식

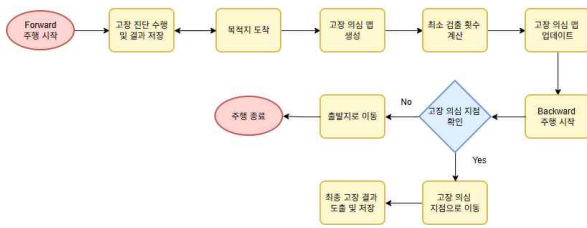
재진단 과정의 신뢰도를 정량적으로 확보하기 위해, 베イズ 정리를 적용하여 <식 2>과 같이 사후 확률을 계산한다. 사후 확률은 최대 진단 횟수 내에서 목표 사후 확률을 넘어서는 최소 검출 횟수를 계산하여 Backward 주행 시 고장 의심 지점에서 몇 번의 재진단을 수행할지 정의한다. 계산한 최소 검출 횟수는 고장 의심 맵에 추가하여 Backward 주행 시 사용할 수 있도록 한다.

$$P(F|k) = \frac{P(k|F)P_{prior}}{P(k|F)P_{prior} + P(k|N_F)(1 - P_{prior})}$$

$$P(F|k) = \frac{TPR^k(1 - TPR)^{N-k} \cdot P_{prior}}{(TPR^k)^{N-k} \cdot P_{prior} + FPR^k(1 - FPR)^{N-k} \cdot (1 - P_{prior})}$$

<식 2> 사후 확률 계산식

Backward 주행 시에는 로봇이 고장 의심 지점에서 정지한 상태로 데이터를 수집하여 재진단을 수행한다. 이 재진단 과정에서 DNN 모델의 고장 진단 결과를 최소 검출 횟수와 매 회차 비교하여 최소 검출 횟수 이상인 경우 최종 고장으로 확정하며 재진단을 중지하고 다음 고장 의심 지점으로 이동한다. 만약 최대 재진단 횟수 내에서 최소 검출 횟수를 넘어서지 못한 경우에는 해당 지점을 정상으로 확정한다. 모든 고장 의심 지점에서의 재진단이 완료되면 출발지로 이동 후 운행을 종료한다. 전체적인 동작 순서는 <그림 2>와 같다.



<그림 2> 이동형 로봇의 동작 순서도

2.4 실험 데이터 구성

실험에 사용한 데이터는 벨트 컨베이어로부터 약 2 m 떨어진 위치에 설치된 이동형 로봇이 약 75 m 구간을 주행하며, 내장 마이크를 통해 수집한 음향 데이터로 구성하였다. 수집된 데이터에 대해 레이블링을 수행하여 정상 데이터 75개와 고장 데이터 19개로 테스트 셋을 구축하였다. 본 테스트 셋은 실제 가동 중인 제철소 현장에서 취득되어 환경 소음 및 로봇 자체 구동음 등 가혹한 오검출 유발 인자를 포함하고 있으며, Backward 주행 시 각 지점별로 30초간 정지하여 반복 수집된 고밀도 샘플링 데이터가 반영되어 통계적 신뢰성을 보완하였다.

2.5 실험 결과

본 논문에서는 제안한 동적 임계값 기반 2단계 고장 진단 방법의 효율성을 검증하기 위해, 실제 산업 현장에서 수집한 데이터를 기반으로 기존 편도 주행 기반 고장 진단 방법과의 성능 비

교를 수행하였다. 실험 파라미터는 TPR 0.7, FPR 0.3, 목표 고장 확률 0.95로 설정하였으며, 최대 재진단 횟수는 주행 효율을 고려하여 4회로 제한하였다.

기존의 1단계 진단 방식과 본 연구에서 제안하는 2단계 재진단 방식을 비교한 결과, 진단 정확도는 기존 방식의 85.11%에서 제안 방식 적용 후 82.98%로 소폭 감소하였지만, 오검출률은 기존 방식의 27.27%에서 0%로 현저하게 감소하였다. 정확도의 미세 감소는 목표 사후 확률을 95%로 엄격하게 설정하여 발생한 통계적 트레이드오프(Trade-off)이다. 그러나 잦은 오검출로 인한 불필요한 현장 점검 방지가 최우선인 제철소 조업 환경의 특성을 고려할 때, 오검출률을 0%로 차단한 결과는 실무적으로 현격한 작업 효율성 향상을 의미한다.

또한, 베イズ 업데이트 기반의 사후 확률 분석 결과, 정지 상태의 반복 측정 데이터는 환경 소음에 의한 오차를 감소시켜 진단 신뢰성을 향상시킬 수 있음을 확인하였다. 특히, Forward 및 Backward 주행 결과를 종합함으로써 모터 구동음에 의한 오검출을 감소시킬 수 있었으며, 진단 Loss가 높은 구간에서는 낮은 사전확률을 적용하여 최종 고장 확정에 필요한 최소 진단 횟수를 증가시킴으로써 오검출을 효과적으로 방지할 수 있음을 확인하였다. 이를 통해 재진단 횟수를 최소화하면서도 진단 효율성을 향상시킬 수 있음을 검증하였다.

<표 1> 실험 결과 비교

	정확도	오검출률
기존 방식	85.11%	27.27%
제안하는 방식	82.98%	0%

3. 결 론

본 연구에서는 이동형 로봇 기반 벨트 컨베이어 고장 진단 시스템에서 발생하는 환경 노이즈로 인한 오검출 문제를 해결하기 위해 왕복 주행 특성을 활용한 2단계 고장 진단 방법을 제안하였다. 제안된 방법은 Forward 주행에서 고장 의심 위치를 매핑하고, Backward 주행에서 해당 위치를 재진단함으로써 진단 신뢰도를 향상시켰다. 또한 동적 임계값 기반의 검증 과정을 적용하여 일시적인 외부 소음에 의한 오검출을 효과적으로 감소시켰다.

실제 산업 현장 데이터 기반 실험 결과, 제안한 방법은 기존 방식 대비 오검출률을 27.27%에서 0%로 완벽히 감소시켰다. 비록 판정 임계값 강화로 인해 전체 정확도가 소폭 감소하였으나, 현장의 오검출 문제를 원천적으로 해결함으로써 무인 감시 시스템의 실무적 신뢰성을 크게 끌어올렸다. 향후에는 다중 마이크 기반 음원 분리 기법을 적용하여 인접 벨트 컨베이어 소음에 의한 오검출 문제를 추가적으로 개선할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부의 로봇산업기술개발(R&D)(No. RS-2024-00507783, 제철 공정의 AI 자율 예지보전 및 고위험 작업을 위한 모바일 자율로봇 기술 개발)의 지원을 받았습니다.

[참 고 문 헌]

- [1] 김태형, 박장식, “정성적 베이지안 네트워크를 이용한 모바일 로봇의 고장 진단 시스템,” 제어·로봇·시스템학회논문지, 제16권, 제10호, pp. 984-991, 2010.
- [2] 이정우, 윤병동, “딥러닝 기반 고장 진단을 위한 데이터 기반 동적 임계값 설정 방법,” 대한기계학회 논문집 A권, 제44권, 제11호, pp. 835-842, 2020.
- [3] 박정민, 최영진, “자동화 시스템의 고장 감지를 위한 동적 임계값 기반 딥러닝 예측 모델 성능 향상 연구,” 한국지능시스템학회 논문지, 제32권, 제4호, pp. 281-288, 2022.