

# 스마트팩토리 예지보전 AI 모델 개발을 위한 데이터 관리 및 모델 신뢰성 요구사항 분석

김진세<sup>1</sup>, 이정원<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>아주대학교 AI 융합네트워크학과

<sup>2</sup>아주대학교 전자공학과

jinsae913@gmail.com, jungwony@ajou.ac.kr

## The Requirements Analysis of Data Management and Model Reliability for Smart Factory Predictive Maintenance AI Model Development

Jinse Kim<sup>1</sup>, Jung-Won Lee<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Dept. of AI Convergence Network, Ajou University

<sup>2</sup>Dept. of Electrical and Computer Engineering, Ajou University

### 요 약

스마트팩토리는 협동 로봇과 같은 프로그래머블한 설비의 유기적인 협업을 통해 최적화된 공정을 수행한다. 따라서 수집되는 센서 데이터의 특징과 환경 조건의 복잡도가 높아, 예지보전을 위한 AI 소프트웨어의 개발 시 요구사항 기반의 체계적인 개발 및 검증이 필수적이다. 본 논문에서는 AI 소프트웨어의 요구사항을 사용자와 시스템 관점에서 정의하고, AI 모델 개발 프로세스와 스마트팩토리 예지보전 측면에서 분석한다. 도출된 요구사항을 CNN 기반의 협동 로봇 기어 마모 예측 모델의 개발에 적용하여 데이터 관리와 모델 신뢰성 관점의 요구사항을 분석 및 검증하였다.

### 1. 서론

고장 진단 및 건전성 관리 기술(PHM: Prognostics and Health Management)은 장비나 기계 시스템에 부착된 센서에서 수집된 데이터를 기반으로 상태를 모니터링하고 고장의 징후를 포착하는 진단기술을 말한다. 제조업 분야에서는 최근 스마트팩토리 플랫폼 개발 및 IIoT(Industrial Internet of Things) 기술의 발전에 따라 수집되는 설비 관련 빅데이터에 PHM 기술을 적용하여 효율성 및 생산성을 개선하려는 노력이 이어지고 있다[1]. 특히, 빅데이터의 의미 있는 패턴을 식별하고 해석하여 데이터 기반 의사 결정을 지원하는 AI 기술을 활용한 예지보전(Predictive Maintenance, PdM)은 설비 및 시스템의 결함, 고장이 발생할 가능성이 있는 시기를 AI 모델을 통해 예측하여, 계획되지 않은 가동 중단을 방지하고 유지보수 비용을 줄이기 위한 핵심 솔루션으로 관심 받고 있다[2].

산업 분야의 AI 활용 추세에 맞추어 ITU, IEEE 는 무인화, 헬스케어, 로봇 등 전 산업 영역에서 AI 기반 기술을 표준화하고 있으며, ISO/IEC JTC 1 은 AI 가

적용된 시스템의 표준화를 수행하고 있다. 하지만, 대부분의 표준은 AI 의 기능적/윤리적 평가에 초점을 맞추고 있으며, AI 소프트웨어의 개발 및 적용 관점에서 고려해야 할 요구사항에 대한 표준은 미비한 실정이다.

스마트팩토리 예지보전을 위한 AI 소프트웨어의 경우, 요구사항 기반의 가이드라인은 더욱 필수적이다. 협동 로봇과 같은 프로그래머블한 설비의 유기적인 협업을 통해 최적화된 공정을 수행하는 스마트팩토리는 수집되는 센서 데이터의 특징과 환경 조건의 복잡도가 높아, 예지보전에 고정된 AI 모델을 적용하기 어렵다[3]. 따라서 AI 소프트웨어 개발 관점의 요구사항과 시스템 적용 관점의 요구사항을 체계적으로 분석하는 과정이 요구된다.

본 논문에서는 AI 소프트웨어의 요구사항을 사용자와 시스템 관점에서 정의하고, AI 모델 개발 프로세스에 따른 요구사항 분석을 수행한다. 또한, 스마트팩토리의 가동 특성에 기반한 핵심 요구사항을 도출하여, AI 기반 예지보전 시스템 구축 시 체계적인 AI 소프트웨어 개발을 지원한다.

## 2. 예지보전을 위한 AI 소프트웨어 요구사항

### 2.1 AI 소프트웨어 요구사항 도출

AI 소프트웨어 요구사항은 AI 소프트웨어의 개발 및 시스템 적용 관점에서 고려되어야 하는 전반적인 요구사항을 말한다, 본 논문에서는 NIST(National Institute of Standards and Technology)에서 제공하는 CPS 프레임워크에서 AI 소프트웨어에 적용 가능한 요소를 차용하여, 사용자와 시스템의 두 가지 관점에서의 분석을 통해 AI 소프트웨어 요구사항을 정의하였다[4].

#### 2.1.1 AI 소프트웨어 사용자 요구사항

사용자 요구사항은 소프트웨어를 적용한 시스템이 사용자에게 제공해야 하는 서비스 규격과, 시스템을 활용하는 사용자가 준수해야 하는 제약사항과 관련된 요구사항이다. 사용자 요구사항은 ‘기능(Functional)’, ‘사용성(Usability)’, ‘신뢰성(Trustworthiness)’, ‘데이터(Data)’의 4 가지 측면에서 표 1 과 같이 정의한다.

<표 1> 사용자 요구사항 분석 관점

측면	정의
기능 (U-Fc)	AI 시스템의 기능(학습 특성, 도메인 적용, 시스템 사양 등)에 대한 관리가 가능해야 함
사용성 (U-Us)	AI 시스템은 입력 데이터의 형식, 결과에 대한 해석, 사용 목적 등의 정보를 명시해야 함
신뢰성 (U-Tr)	AI 시스템은 판단 결과에 대한 설명성을 제공하여야 함
데이터 (U-Dt)	AI 시스템은 적절한 학습 데이터 구성(특성, 편향성 고려)을 통해 구축 및 사용되어야 함

#### 2.1.2 AI 소프트웨어 시스템 요구사항

시스템 요구사항은 소프트웨어가 적용되는 시스템의 기능과 서비스, 동작 제약사항에 대하여 소프트웨어 개발자의 입장에서 서술한 요구사항이다. 시스템 요구사항은 ‘확장성(Scalability)’, ‘융복합성(Composability)’, ‘고신뢰성(Dependability)’, ‘실시간성(Timing)’, ‘상호운용성(Interoperability)’의 5 가지 측면에서 표 2 와 같이 정의한다.

<표 2> 시스템 요구사항 분석 관점

측면	정의
확장성 (S-Sc)	AI 시스템의 기능적/성능적/물리적 규모의 확장이 가능해야 함
융복합성 (S-Ca)	AI 시스템 혹은 하위 시스템 간의 복합 운용이 가능해야 함
고신뢰성 (S-Dp)	AI 시스템은 유지보수가 가능해야 하며, 안전성, 보안성이 보장되어야 함
실시간성 (S-Tm)	AI 시스템은 적용 조건을 만족하는 실시간 동작 및 동기화가 가능해야 함
상호운용성 (S-Io)	AI 시스템은 규모에 따른 이종성을 고려하여 데이터 및 모델의 상호호환성을 보장해야 함

## 2.2 AI 모델 개발 요구사항 분석

산업 분야의 AI 기반 솔루션에 적용되는 일반적인 AI 모델 개발 프로세스는 다음의 4 단계로 구성되며, 각 단계에서 수행하는 세부 작업은 다음과 같다[5].

- **데이터 관리:** 데이터 수집, 전처리, 증강, 분석
- **모델 학습:** 모델 선택, 훈련, 하이퍼매개변수 선택
- **모델 검증:** 검증 지표 선택, 테스트 기반 검증
- **모델 배포:** 모델 완성, 모니터링, 업데이트

각 단계의 순서는 표준화된 순서가 아닌 각 단계의 작업에 대한 추상화된 정의이며, 이러한 단계는 서로 병렬적으로 수행되어 단계 간의 피드백이 가능하다. 이러한 모델 개발 프로세스의 특성에 기반하여, 각 단계별로 고려해야 할 핵심 요구사항을 표 3 과 같이 정의한다.

<표 3> AI 모델 개발 프로세스 기반 요구사항 분석

단계	사용자 요구사항	시스템 요구사항
데이터 관리	• 데이터(U-Dt)	• 확장성(S-Sc) • 융복합성(S-Ca)
모델 학습	• 기능(U-Fc)	• 확장성(S-Sc) • 융복합성(S-Ca)
모델 검증	• 신뢰성(U-Tr)	• 실시간성(S-Tm)
모델 배포	• 기능(U-Fc) • 사용성(U-Us)	• 고신뢰성(S-Dp) • 상호운용성(S-Io)

## 2.3 스마트팩토리 예지보전 관점 요구사항 분석

스마트팩토리는 설비 간 협업을 통해 최적화된 공정을 수행한다. 따라서 설비 내의 부품에서부터 설비, 제조 시스템까지 예지보전 적용 범위에 따라 요구사항이 다르게 적용된다. 사용자 요구사항을 기반으로 개발된 AI 소프트웨어를 스마트팩토리 시스템에 적용하는 경우, 고신뢰성(S-Dp)을 포함한 전반적인 시스템 요구사항이 공통적으로 고려되어야 한다. 또한, 스마트팩토리 시스템에 대한 예지보전의 적용 범위에 따라 다음과 같은 핵심 요구사항을 도출한다.

- **설비 내 부품의 고장: 실시간성**  
하모닉 드라이브, 베어링, 인버터 등의 설비 부품은 스펙에 명시된 고정 범위 내 동작을 수행한다. 정의되는 고장 상태의 복잡도가 상대적으로 낮으며, 부품 단위의 데이터를 학습하여 고장 진단 및 예측 모델을 구축한다. 고장이 발생하는 경우 전체 시스템의 오작동으로 이루어질 수 있으므로, 고장 진단 및 예측의 ‘실시간성(S-Tm)’이 핵심 요구사항으로 작용한다.

- **설비의 건전성 저하: 확장성, 융복합성**  
협동 로봇 등의 설비의 건전성은 전반적인 물리적 /기능적 상태를 말한다. 건전성 저하는 설비 가동 중 발생하는 세부적인 결함 및 고장의 누적에 의해 발생하여, 부품 및 세부 요소의 단일·복합 연관성에 기반한 고장 예측 시스템의 ‘확장성(S-Sc)’, ‘융복합성(S-Ca)’이 핵심 요구사항으로 작용한다.
- **시스템의 작업 성능 저하: 확장성, 상호운용성**  
스마트팩토리 시스템의 작업 수행은 설비 간 협업을 기반으로 수행되며, 개별 부품 및 설비 상태의 복합 작용에 의한 작업 성능 저하의 진단이 요구된다. 동일 작업에 대해서도 수행하는 시스템의 규모가 유동적일 수 있으므로 ‘확장성(S-Ca)’, ‘상호운용성(S-Io)’이 핵심 요구사항으로 작용한다.

3. 실험 및 분석

스마트팩토리의 핵심 설비인 협동 로봇의 기어 마모를 예측하는 AI 모델의 개발 과정에 AI 소프트웨어 요구사항을 적용하였다. 협동 로봇에서 수집된 자이로 센서 데이터와 가속도 센서 데이터를 사용하였으며, 표 4 와 같은 구조의 CNN(Convolutional Neural Network) 모델을 적용하였다. AI 모델 개발 프로세스에 따라 기어 마모와 정상 상태를 예측하는 모델을 개발하였으며, 개발 단계에 따른 요구사항 적용 결과는 다음과 같다.

<표 4> 기어 정상-마모 예측 모델 구조

Layer	Output Shape	Parameter #
Conv2D	(None, 60,6,16)	80
Max_pooling	(None, 30,3,16)	0
Conv2D	(None, 30,3,32)	2,080
Max_pooling	(None, 15,1,32)	0
Conv2D	(None, 15,1,64)	8,256
Flatten	(None, 960)	0
Dense	(None, 64)	61,504
Dense	(None, 2)	130
Total Parameter		72,050

- **데이터 관리 단계**  
‘데이터(U-Dt)’ 요구사항을 고려하여 학습 데이터의 특징을 오토인코더(Auto-encoder)를 사용해 추출하고 군집화하여, 마모(W)와 정상(N) 상태 별 3 개의 특징을 도출하였다. 표 5 와 같이 데이터셋 내부 특징 간 데이터 개수 불균형을 확인하였으며, 특징 별 3,190 개의 데이터를 균등하게 샘플링하여 특징에 따른 학습 데이터의 편향성을 제거하였다.

<표 5> 학습 데이터셋 내부 특징 클러스터 분포

특징	W-1	W-2	W-3	N-1	N-2	N-3
개수	3,192	35,950	17,090	17,331	36,690	3,309

- **모델 검증 단계**  
‘신뢰성(U-Tr)’ 요구사항을 충족시키기 위해 10 번의 반복 검증을 거쳐 평균 테스트 정확도 98.21%로 개발된 모델의 특징 클러스터 별 정확도를 분석하였다. 표 6 과 같이, ‘W-2’와 ‘N-2’의 특징을 지닌 데이터에 대한 모델의 정확도가 상대적으로 낮음을 확인하였다. 구체적으로, ‘W-2’와 ‘N-2’ 특징은 나머지 특징 중 정확도가 가장 낮은 ‘W-1’ 대비 각각 6.4%, 3.1% 낮은 결과를 보였다. 이러한 분석 결과를 데이터 관리 단계에 피드백 하여 학습에 부적합한 특징을 지닌 데이터에 대한 전처리를 추가로 수행할 수 있다.

<표 6> 특징 클러스터 별 학습 모델 정확도

특징	W-1	W-2	W-3	N-1	N-2	N-3
정확도 (%)	99.7	93.3	100	99.8	96.6	99.9

4. 결론

본 논문에서는 AI 소프트웨어의 요구사항을 사용자와 시스템 관점에서 정의하고, 이를 기반으로 AI 모델 개발 프로세스의 단계별 요구사항과 스마트팩토리 예지보전 관점의 요구사항을 분석 및 도출하였다. 도출된 요구사항을 협동 로봇의 기어 마모 분류 모델의 개발에 적용하여, 데이터 관리와 모델 신뢰성 관점의 요구사항을 분석 및 검증하였다. 향후 연구에서는 AI 소프트웨어 요구사항을 실 적용 관점의 가이드 라인으로 확장하고, 다양한 스마트팩토리 제조 시나리오를 바탕으로 검증하여 사례연구를 다양하게 구성할 예정이다.

참고문헌

[1] B. Chen, J. Wan, L. Shu, P. Li, M. Mukherjee, and B. Yin, "Smart Factory of Industry 4.0: Key Technologies, Application Case, and Challenges," IEEE Access, vol. 6, pp. 6505–6519, 2018.

[2] Ochella, Sunday, Mahmood Shafiee, and Fateme Dinmohammadi. "Artificial intelligence in prognostics and health management of engineering systems." Engineering Applications of Artificial Intelligence, 108, 2022.

[3] Kaupp, Lukas, et al. "CONTEXT: An industry 4.0 dataset of contextual faults in a smart factory." Procedia Computer Science, 180, pp. 492-501, 2022.

[4] Griffior, Edward R., et al. "Framework for cyber-physical systems: Volume 1, overview.", 2017.

[5] Paleyes, Andrei, Raoul-Gabriel Urma, and Neil D. Lawrence. "Challenges in deploying machine learning: a survey of case studies." ACM Computing Surveys, 55.6, pp. 1-29, 2022.