

현장 AI 솔루션 “Equipment/Quality Easy Predictive Detection”

Jun Tsuzuki^{*1} Yoshihiro Imamura^{*2}
Yuya Katayama^{*1} Masanori Sakagami^{*1}

Yokogawa는 AI (artificial intelligence - 인공 지능)을 이용하여 다양한 공장의 고객 문제에 대한 솔루션을 제공합니다. Yokogawa는 이 기술과 경험을 활용하여 2020년 하드웨어에서 작동하는 세 가지 AI 제품을 동시에 출시하였는데, 이는 GX/GP Future Pen, GA10 Anomaly Detection 및 e-RT3 Plus Supports Python입니다. 또한 더 많은 고객의 요청에 부응하여 Yokogawa는 배치 공정 완료 후 장비의 성능 저하 및 제품의 품질 저하 정도를 건강 점수를 사용하여 정량적으로 표현할 수 있는 건강 모니터링 기능을 개발하였습니다. 한편 비정상적으로 변화하는 공정 값을 실시간으로 감지할 필요가 있는 경우에 대한 요구에 부응하여, Yokogawa는 프로파일링 기능을 개발하였습니다. 이 논문은 이러한 기능을 설명하며, “장비/품질 손쉬운 예측 감지” 솔루션의 개요를 소개하고, AI 알고리즘을 고객 데이터에 적용한 테스트 결과를 제시합니다. 또한 미래 전망에 대하여도 논의할 것입니다.

개요

제조공정에서는 생산성을 증가시키고, 이윤을 극대화하기 위해 기존 장비를 최적의 비용으로 유지하는 것이 필요합니다. 최근 몇 년 동안 AI 기반의 분석 도구를 활용하여 공장 내에 존재하는 문제를 사전에 예방하고 생산성을 향상시키기 위한 노력에 이목이 집중되고 있습니다.

석유, 화학물질, 철강, 식품 및 제약 분야를 포함하여 IA (Industrial Automation - 산업 자동화) 분야에서 수행하였던 다양한 연구 경험에 기초하여 Yokogawa Electric (이하 ‘우리’)는 IA 분야에 맞춤형인 독자적 AI 기술을 개발하였고, 많은 실용적인 분석 작업을 수행하였습니다⁽¹⁾⁻⁽⁹⁾. 우리는 플랜트 및 공장에서의 머신 러닝 기술에 기초한 컨설팅 서비스를 제공해 왔고, 특별히 장비의 이상에 대한 예측 분석, 이상의 원인에 대한 식별 및 분석, 제품 품질에 대한 예측 분석 등과 같은 서비스 분야에서 폭넓은 성과 기록을 보유하고 있습니다. 이러한 독자적인 AI 기술과 경험을 활용하여, 2020년에는 하

드웨어에서 작동되는 세 가지 AI 제품 (GX/GP Future Pen, GA10 Anomaly Detection 및 Python과 호환되는 e-RT3 Plus)을 동시에 출시하였습니다⁽¹⁰⁾. 우리는 현재 이 세 가지 AI 제품을 솔루션 비즈니스에 가치를 창출하는 제품으로 홍보하고 있습니다.

AI를 도입하기 위해서는 데이터 과학 및 기타 진보된 전문 지식이 필요하고, 기술 및 비용 측면에서 높은 장벽이 존재합니다. 따라서 우리는 사용자가 쉽게 접근하여 사용할 수 있는 “Equipment/Quality Easy Predictive Detection”라는 AI 기술 솔루션을 개발하였는데, 이는 현장에서 장비의 성능 저하 또는 제품의 품질 저하 징후를 간단하게 감지할 수 있는 기술입니다. 열처리 로, 멸균기, 혹은 Vulcanizer (가황기)와 같은 단일 장비에 중점을 둔 이 솔루션을 사용하여 AI를 더욱 더 직관적으로 사용할 수 있고, 특별한 전문 지식 없이도 예측 감지 기능을 손쉽게 사용할 수 있습니다. 결과적으로, 현장에서 이 시스템을 사용하여 장비의 성능 저하 또는 제품의 품질 저하에 대한 징후를 초기에 감지할 수 있게 되었습니다.

이 논문은 우리가 가장 최근에 개발한 장비/품질 손쉬운 예측 감지 솔루션에 대하여 설명합니다.

Equipment/Quality Easy Predictive Detection 솔루션

“Equipment/Quality Easy Predictive Detection” 솔루션은 SMARTDAC+ R5.0 레코더/데이터 로거 유닛과 Equipment/Quality

^{*1} Product Planning Department 3rd Section 1st Group,
Edge Solution Management Division, Control Center,
Yokogawa Product Headquarters

^{*2} Product Planning Department 3rd Section,
Edge Solution Management Division, Control Center,
Yokogawa Product Headquarters

Easy Predictive Detection 툴로 구성됩니다 (p. 2/6). 레코더/데이터 로거는 데이터를 수집하고, 이를 기반으로 “Equipment/Quality Easy Predictive Detection” 툴이 예측 감지 모델과 프로파일 파형을 생성한 후 이를 레코더/데이터 로거에 로딩하여 건강 모니터 기능에 및 프로파일 기능에 적용합니다 (그림 1).

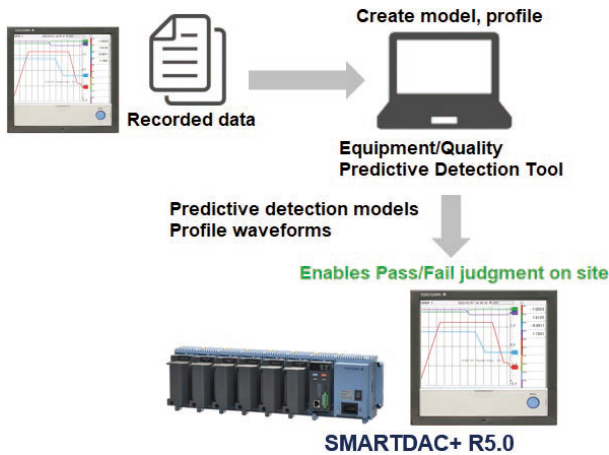


그림1 장비/품질 손쉬운 예측 감지 장비의 전반적인 구성

SMARTDAC+ R5.0

우리의 SMARTDAC+ R5.0 레코더/데이터 로거 GX, GP 및 GM의 세 가지 시리즈로 구성되어 있습니다 (그림 2). SMARTDAC+ GX/GP 시리즈는 터치 패널을 갖춘 이동식 정보 단말기와 유사한 높은 자동성을 가진 종이를 사용하지 않는 레코더이고, 시스템은 모듈 구조를 사용하여 유연하게 적용할 수 있으며 확장성이 탁월합니다. GX 시리즈는 주로 공정 모니터링을 위한 패널 장착형 제품입니다. GP 시리즈는 주로 실험 측정을 위한 휴대용 모바일 타입의 제품입니다. SMARTDAC+ GM 시리즈는 디스플레이 없이 PC나 태블릿에서 네트워크를 통해 모니터링 및 운용할 수 있는 소형 데이터 로거입니다.

레코더의 주요 기능은 실시간으로 측정 데이터를 기록하고 과거에 기록된 데이터를 신뢰성 있게 검색하는 것입니다. 일본에서는 1950년에 첫 번째 전자관 기반 자체 균형 레코더 ER을 출시한 이후, 우리는 적극적으로 마이크로컨트롤러 유닛, 메모리, 네트워크 기술과 같은 최첨단 기술을 적용한 제품들을 시장에 출시하면서 약 70년 동안 이 산업을 선도해 왔습니다. SMARTDAC+ GX/GP/GM 시리즈의 신뢰성과 기능을 저해하지 않으면서 통상적인 레코더에서도 간편한 예측 감지 작업을 가능하게 하기 위해, 이러한 기술의 정점을 대표하는 SMARTDAC+ GX/GP/GM 시리즈에 새로운 건강 모니터링 기능과 프로파일 기능을 AI 기술을 기반으로 개발하였습니다. 다음 단락에서는 이러한 기능에 대하여 설명합니다.

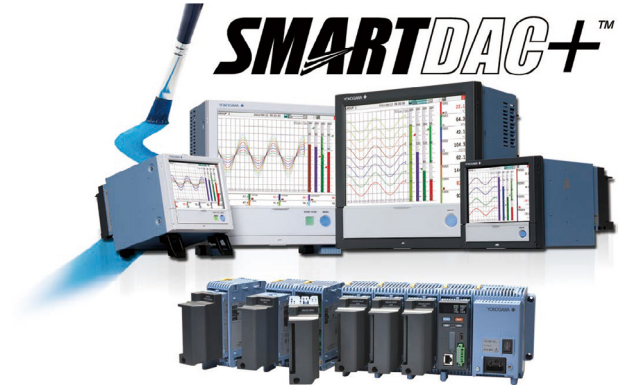


그림2 SMARTDAC+ GX/GP/GM 시리즈

건강 모니터링 기능

건강 모니터링 기능은 우리의 독자적인 AI 기술로, AI 모델을 사용하여 SMARTDAC+ R5.0 유닛에서 수집한 공정 데이터가 정상인지 여부, 즉 다시 말해 공정 통과 여부 (합격/불합격 판정)를 결정합니다 (OK/NOK 판정). 또한 이 기능은 머신에서 수집된 정상적인 공정 데이터가 얼마나 정상적인지 또는 비정상 데이터와 얼마나 가까운 운지에 대한 수치적인 Health Score를 제시합니다.

이 기능을 사용하여 현장작업자는 합격/불합격 판정과 기기 또는 제품의 품질에 어떤 문제가 발생하였는지 Health Score 값을 통해 결정할 수 있습니다 (그림 3). 공정의 합격/불합격 판정 작업을 수행하거나, Health Score를 사용하는데 사용하는 AI 모델을 예측 감지 모델이라고 합니다.

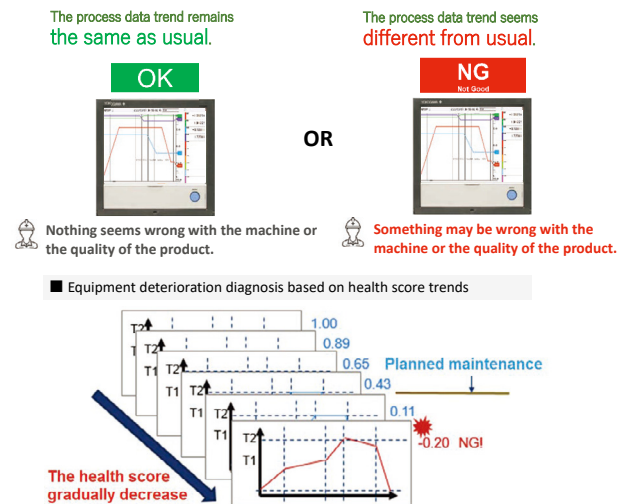


그림3 건강 모니터링 기능

프로파일링 기능

프로파일링 기능은 배치 또는 연속 공정에서의 공정 값이 사전에 생성된 위 및 아래 범위 내에 속하는지 실시간으로 확인합니다. 이 기능은 해당 범위를 벗어나 발생하는 모든 편차에 대해서 경고를 발생시킵니다 (그림 4). 이 때 위, 아래 범위를 나타내는 파형을 프로파일 파형이라고 합니다.

또한 이 기능을 사용하여 배치 공정에서 이상적인 공정 값 (골든 배치)을 현재 공정 데이터와 비교하여 표시할 수 있습니다.

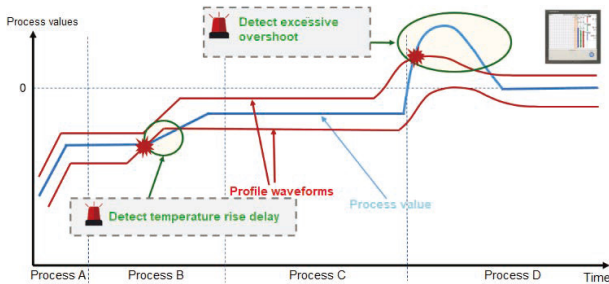


그림4 프로파일링 기능

Equipment/Quality Easy Predictive Detection 툴

Equipment/Quality Easy Predictive Detection 툴은 SMARTDAC+ R5.0 유닛의 건강 모니터링 기능 및 프로파일링 기능을 사용하기 위한 소프트웨어입니다. 우리의 자체 AI 학습 엔진이 내장되어 Equipment/Quality Easy Predictive Detection 툴을 사용하여 레코더에 의해 기록된 데이터를 기반으로 건강 모니터링 기능을 사용하기 위한 예측 감지 모델을 생성할 수 있고, 프로세스의 위 및 아래 한계를 정의하기 위한 프로파일 파형도 생성할 수 있습니다 (그림 5)

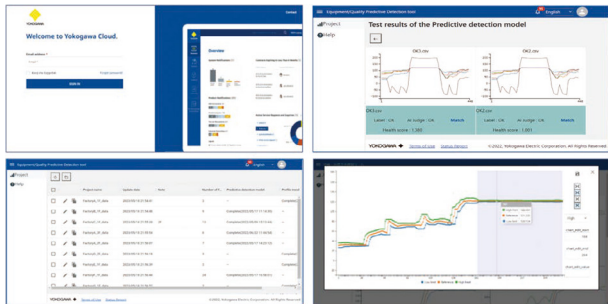


그림5 장비/품질 손쉬운 예측 감지 툴

Equipment/Quality Easy Predictive Detection 툴의 장점

a) AI에 대한 전문적인 지식 없이 상시 사용 가능

예측 감지 모델은 레코더에 의하여 기록된 하나 이상의 데이터에 대하여 정상 및 비정상 데이터를 명시할 수 있도록 표지 작업만을 수행합니다. 프로파일 파형은 하나 이상의 정상적인 기록 데이터로부터 자동으로 생성될 수 있고, 이렇게 생성된 파형은 툴에서 편집할 수 있습니다.

생성된 예측 감지 모델과 프로파일 파형은 SMARTDAC+ R5.0 유닛에 로딩됩니다. 이들 중 어느 하나도 AI에 대한 전문적인 지식이나 도움을 필요로 하지 않습니다. 필요한 것은 이미 획득한 레코더 데이터만 있으면 되고, 이로써 AI 기술을 손쉽게 활용할 수 있습니다.

b) 다양한 레코더 데이터 형식과 호환

예측 감지 모델과 프로파일 파형을 생성하는데 사용되는 레코더 데이터는 SMARTDAC+ 유닛에 의해 기록된 데이터에만 국한되지 않고, 우리 회사 제품인 DX Advanced 레코더의 데이터나 다른 브랜드의 레코더에 의해 기록한 데이터도 포함됩니다.

c) 예측 감지 모델의 판단 시뮬레이션 기능

SMARTDAC+ R5.0 유닛에서 사용하기 전에 생성된 예측 감지 모델에 대한 판정 테스트 작업을 시뮬레이션 할 수 있는 기능이 장착되어 있습니다. 이 기능을 사용하는 경우, 실제 기기에서 AI에 의한 판정 작업을 수행하기 전에 테스트 데이터에 대한 판정 결과 (OK/NOK) 및 건강 점수를 확인할 수 있습니다.

d) 클라우드 버전의 및 오프라인 버전의 두 가지 버전 사용 가능

Equipment/Quality Easy Predictive Detection 툴은 클라우드 버전과 오프라인 버전으로 출시되었습니다. 클라우드 버전은 미리 계정을 등록할 필요가 있지만, 예측 감지 모델이나 프로파일 파형을 생성하기 위해 PC의 웹 브라우저에서 소프트웨어를 설치하는 수고를 할 필요가 없습니다. 오프라인 버전은 PC에 설치하는 소프트웨어로, PC를 네트워크에 연결하지 않은 상태로 사용할 수 있습니다.

Equipment/Quality Easy Predictive Detection 기능의 응용 사례

Equipment/Quality Easy Predictive Detection 솔루션 개발 과정에서 우리는 실제 현장에서 AI의 유용성을 검증하기 위해 열처리로, 멸균기, 그리고 Vulcanizer 등 세 대의 기기에 대하여 PoC (proof of concept - 개념 증명) 작업을 수행하였는데, 이는 건강 모니터링 기능의 판정 결과를 확인하기 위함입니다. 다음 및 그 이후 단락에서는 이 세 대의 기기에 대한 AI의 PoC를 소개합니다.

열처리로

열처리로에 장착된 버너의 성능 저하로 인하여 또는로의 밀폐성의 결함으로 인하여로 내에서 온도 헌팅 (진동)이 발생한다고 가정해 보기로 합니다. 이 경우, 열처리 공정은 이상이 있는 것이 되고,로 내에서 제조되는 제품의 품질에 영향을 미치게 됩니다. 뿐만 아니라, 불량한 버너는 수리가 필요하고, 그 동안 생산이 중단되어 제품의 리드 타임 (생산에서 출고까지 시간)이 지연되게 됩니다.

PoC에서로 내의 온도에 헌팅이 발생한 후 건강 점수가 점진적으로 감소하게 된다는 사실을 관찰하기 위해 SMARTDAC+ R5.0 유닛의 건강 모니터링 기능을 사용하였습니다 (그림 6). 이러한 기능을 사용하여 Health Score가 낮아지고 결과적으로 제품의 폐기와 같은 이상 징후를 예측적으로 감지할 수 있다는 사실을 시연할 수 있었습니다.

Health Score가 낮아지는 것에 초점을 맞춘 이 기능을 사용하면 유지보수 작업을 계획적으로 수행할 수 있습니다. 또한 이 기능을 사용하여 장비의 이상 및 고장을 예방하고, 제품 로트의 불합격 및 다운 타임을 줄일 수 있습니다.

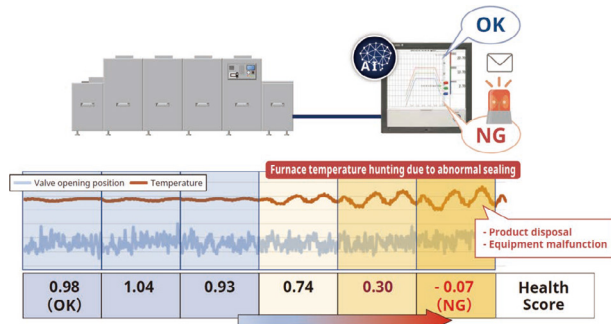


그림6 열처리 로에서의 예측적 감지

멸균기

멸균기에서 밸브가 느슨하게 되거나 가스킷의 기능 저하 등과 같은 원인으로 인하여 내부를 진공으로 만드는데 더 많은 시간이 소요되는 경우, 멸균 처리를 위한 진공을 유도하는 중 중기가 액화될 수 있고, 샘플을 멸균기로부터 꺼낼 때 다시 오염될 수 있는 위험이 발생할 수 있으며, 최악의 경우 제품 불량 로트가 발생하는 결과를 가져올 수도 있습니다.

우리는 PoC에서 SMARTDAC+ R5.0 유닛의 건강 모니터링 기능을 사용하여 멸균기가 진공에 도달하는 기간이 지연됨으로 인하여 건강 점수가 점진적으로 낮아지게 된다는 사실을 확인할 수 있었습니다 (그림 7).

수치적으로 보았을 때 이렇게 진공에 도달하는 기간이 지연되는 것은 정상이기 때문에 기존의 고정 방식의 상한가 및 하한가 경보 기능으로는 감지하기 어렵습니다. 그러나 Health Score 기능을 사용하는 경우, 이러한 지연을 수치적으로 감지 가능한 값으로 변환할 수 있기 때문에, 이 기능을 사용하는 경우, 불량 제품 로트나 기기의 고장을 예방하는데 도움이 될 수 있을 것으로 기대됩니다.

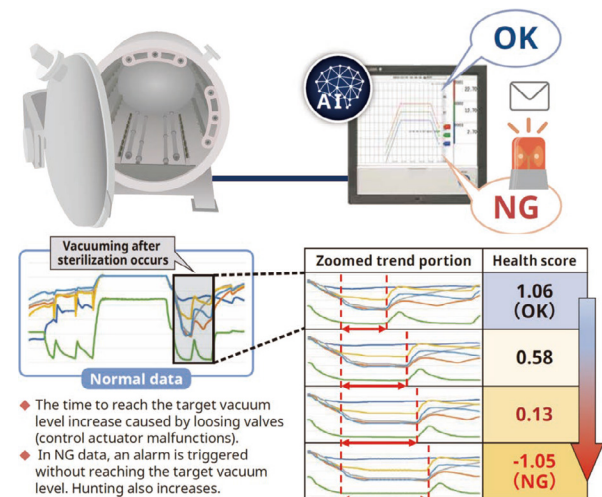


그림7 멸균기에서의 예측적 감지

Vulcanizer

타이어 및 기타 고무 제품의 고무 경화 공정에서 고무 Vulcanizer 내부에는 가스킷이 장착됩니다. 가스킷의 기능 저하가 발생하는 경우, Vulcanizer 공정 중 부적절한 가압 상태를 유도하게 되고, 제품 품질에 심각한 영향을 미치게 됩니다.

PoC에서는 건강 모니터링 기능을 통해 Health Score를 계산할 수 있도록 Vulcanizer 내부의 온도 및 압력과 같은 공정 값을 SMARTDAC+ R5.0 유닛에 입력하였습니다. PoC는 Vulcanizer 내부에 있는 가스킷의 기능 저하로 인한 압력 누출이 점진적인 Health Score의 감소를 유도한다는 사실을 확인할 수 있었습니다 (그림 8). Health Score가 낮아진다는 사실을 모니터링하는 경우 Vulcanizer에 장착된 가스킷의 교체 시기를 결정할 수 있고, 타이어와 같은 제품의 품질을 판단할 수 있으며, 유지보수로 인하여 발생하는 다운 타임을 감소시키거나, 제품의 결함율을 낮출 수 있습니다.

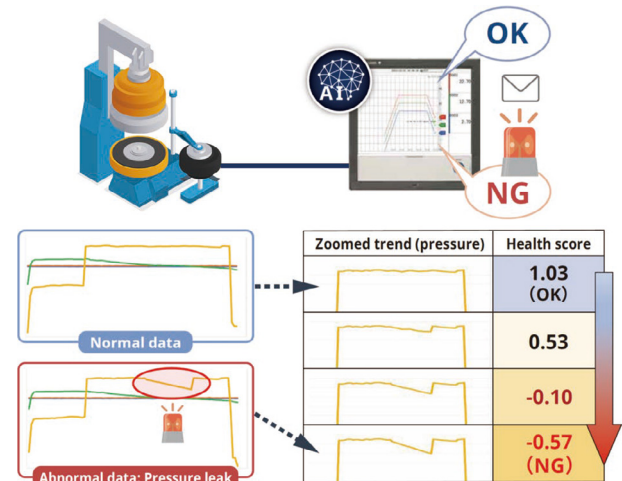


그림8 Vulcanizer에서의 예측적 감지

Equipment/Quality Easy Predictive Detection 기술

Equipment/Quality Easy Predictive Detection 툴은 다양한 조건 하에서 최적의 결과를 구하는 데 있어 많은 도전에 직면하였습니다. 이 섹션에서는 이러한 도전 중 두 가지를 소개하고 그에 대한 조치에 대하여 설명합니다.

첫 번째 도전은 공정 데이터의 길이가 매번 다르다는 사실입니다. 비록 제조하는 제품이 동일하다 할지라도 실제로 현장에서 레코터를 작동하는 시점이 다를 수 있습니다. 이로 인하여 그림 9와 같이 파형의 시작 지점이 바뀌게 되고, 공정 데이터의 전체 길이가 변하게 됩니다. 그림 9의 데이터 A와 B는 동일한 공정 데이터이지만 시작 위치는 서로 다릅니다. 동일한 타임 라인 상에서 두 값을 비교하면 그 차이가 너무 크기 때문에 양호한 결과를 구하지 못할 수도 있습니다. 따라서 우리는 두 파형 사이에서 유사한 지점을 찾아 시간이 이동된 타임라인을 일치시킬 수 있는 알고리즘을 사용하여 공정 데이터의 전체 길이를 표준화하였습니다. 이와 같이 우리는 이 알고리즘을 통

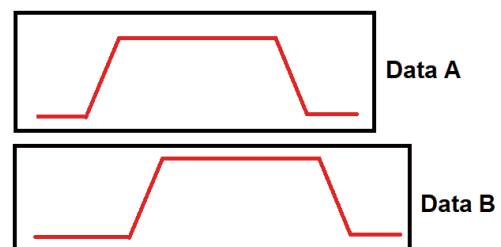


그림9 공정 데이터 길이의 차이

해 시간적으로 변동이 있는 파형에 대하여도 양호한 결과를 얻을 수 있게 되었습니다.

두 번째 도전은 사용할 적절한 AI 알고리즘의 선택이었습니다. 세계에는 다양한 AI 알고리즘이 존재하고, 각각의 장단점이 있습니다. 선택한 알고리즘에 따라 구할 수 있는 거동과 결과가 크게 다를 수 있습니다.

알고리즘은 크게 선형 모델에 기초한 알고리즘과 비선형 모델에 기초한 알고리즘으로 분류됩니다. 그림 10에서는 선형 및 비선형 모델 사이의 일반적인 차이를 확인할 수 있습니다. O와 X표 (○ vs. ×)는 각각 정상 데이터와 비정상 데이터를 의미합니다. 선형 모델에서는 직선이 O와 X를 분리합니다. 한편, 비선형 모델에서는 곡선이 O와 X를 분리합니다. 얼핏 보면 비선형 모델이 모든 데이터를 처리할 수 있는 것처럼 보일 수도 있습니다. 그러나 학습 데이터의 양이 적을 경우, 이 모델은 과학습의 경향이 있고, 사용하기 매우 어려울 수 있습니다. “Overlearning”(“과잉학습”)이라는 용어는 학습 중에 사용된 데이터에 지나치게 적응함으로 인하여 이상적인 모델과 큰 차이가 발생하는 것을 의미합니다(그림 11). 즉 과잉학습이 발생한 모델은 초기 운용 시 쓸모없다는 사실을 발견하게 될 것입니다.

우리 제품의 고객들은 종종 정상 데이터는 많지만 비정상 데이터는 거의 없는 경우가 많습니다. 따라서 우리는 대량의 정상적인 및 비정상적인 데이터를 필요로 하는 비선형 모델에 기초한 알고리즘보다는 부족한 데이터로도 일정 수준의 정확도를 가지고 판단할 수 있는 선형 데이터 알고리즘을 사용하기로 결정하였습니다.

우리가 사용한 AI 알고리즘에는 장비 이상, 이상 원인 분석 및 제품의 품질에 대한 예측적 분석이 포함됩니다. 이 알고리즘은 Equipment/Quality Easy Predictive Detection 솔루션의 PoC 결과를 바탕으로 개선되었습니다.

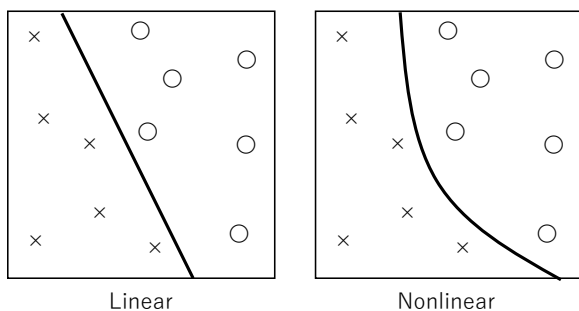


그림10 선형 및 비선형 모델의 개념도

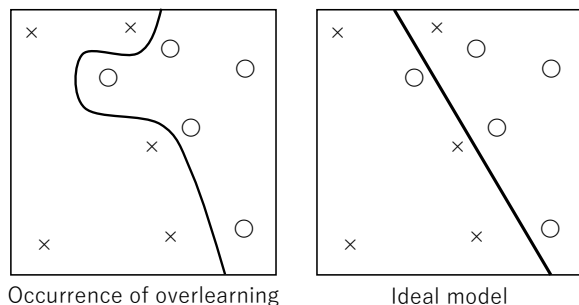


그림11 과학습 발생에 대한 개념도

전망

이제 Equipment/Quality Easy Predictive Detection 솔루션을 사용하는 경우 고객은 AI에 대한 전문적인 지식이나 고가의 컨설팅을 받지 않으면서도 AI 기능이 통합된 예측 감시 시스템을 손쉽게 공장 내에 구축할 수 있습니다. 예측 감지 솔루션을 사용하는 경우 고객은 큰 가치를 제공받을 수 있습니다. 또한 우리는 고객에게 부가적인 가치를 제공하기 위해 다음과 같은 활동을 지속적으로 수행하고 있습니다. 예를 들어, 이 예측 감지 시스템을 통해 장비가 변화하는 정도 및 다른 정보를 수치 데이터로 변환하여 다음 유지보수 시점을 추정할 수 있습니다. 그러나 우리는 공정 데이터의 어떤 입력 사항이 장비 이상 판단에 영향을 미쳤는지 알고 싶다는 고객의 요청을 받았습니다. 이러한 요청에 부응하여 우리는 이상이 감지된 장비의 변화에 영향을 미칠 수 있는 입력 데이터를 식별할 수 있는 기능인 속성 연구 분석 기능을 연구 및 개발하는 중입니다. 고객이 속성 분석 결과를 제공받을 경우 고객은 관련 부분에 초점을 맞춰 문제를 조사할 수 있기 때문에 유지보수 작업을 보다 효율적으로 수행할 수 있을 것입니다.

이에 더하여, 우리는 하나 이상의 프로세스 데이터로부터 자율적으로 학습하고 AI 판단 모델을 생성하며, 더 나은 모델을 자율적으로 선택하는 자가 진화 시스템의 개념을 개발하고 있습니다. 이 시스템은 먼저 사용자/고객에게 자신의 공정 데이터를 정상 데이터 및 이상 데이터로 분류하도록 요청하고, 그에 따라 분류 방법에 대한 모델을 생성합니다. 그 후, 이 시스템은 이 분류 모델에 따라 정상 데이터와 이상 데이터를 분류하고 분류된 학습 데이터를 기반으로 AI 판단 모델을 생성합니다. 우리는 우리가 획득한 AI 판단 모델을 고객이 보유하고 있는 테스트 데이터와 대조하여 정확도를 확인한 후, 더 나은 성능의 모델을 채택할 수 있는 시스템을 고려하고 있습니다. 이 시스템이 구현되면, 고객은 스스로 모델을 만드는 불편함으로부터 벗어날 수 있을 것입니다. 또한 이 시스템은 장기간에 걸쳐 정확도가 낮아짐으로 인하여 정상 데이터에서 거짓된 긍정적 판단을 내리는 경우(또는 그 반대의 경우) 모델의 지루한 유지보수 작업을 줄여줄 수 있을 것이고, 이러한 결과로 인하여 고객에게는 새로운 큰 가치가 부가될 수 있을 것입니다.

결론

이 논문은 우리의 자체적인 솔루션인 Equipment/Quality Easy Predictive Detection에 적용된 기술, 여러 가지 응용 사례 및 미래 전망을 소개하였습니다. 장기간에 걸쳐 개발한 도메인 지식과 많은 플랜트 및 공장에서의 실제적인 분석 작업을 통해 개발한 우리의 고유한 AI 기술에 기초하여, 우리는 장비/품질 손쉬운 예측 감지를 위한 다양한 기능을 개발하였고, 이로 말미암아 사용자는 고급 전문 지식을 사용하지 않으면서도 AI 기술을 활용할 수 있게 되었으며, 또한 이제 현장에서 예측 감지 시스템을 구현할 수 있게 되었습니다. 우리는 이러한 기능에 대한 효율성을 검증하기 위해 고객과 함께 PoC 실험을 진행하였습니다. 우리는 우리 자신을 이 논문에서 언급한 제품에만 국한하지 않고, 지속적으로 제품을 개발할 것이며, 고객들의 생산성을 향상시키는 데 도움이 될 수 있도록 더욱 노력할 것입니다.

REFERENCES

- (1) Y. Cui, L. Zhu, et al., “Factorial Kernel Dynamic Policy Programming for Vinyl Acetate Monomer Plant Model Control,” IEEE 14th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE), 2018, pp. 304-309
- (2) L. Zhu, Y. Cui, et al., “Scalable reinforcement learning for plant-wide control of vinyl acetate monomer process,” Control Engineering Practice, Vol. 97, 2020, Article 104331
- (3) Takamitsu Matsubara, Hiroaki Kanokogi, “Automatic Optimization of Process Control by Reinforcement Learning: Application to Vinyl Acetate Monomer Production Plant Model,” Chemical engineering of Japan, Vol. 83, No. 4, 2019, pp. 233-235
- (4) “Yokogawa and NAIST Reinforcement Learning for Chemical Plants, Realizing Advanced Control with Fewer Trials,” Nikkei Robotics, March 2019 issue, pp. 22-25 (in Japanese)
- (5) Go Takami, Moe Tokuoka, et al., “Machine Learning Applied to Sensor Data Analysis,” Yokogawa Technical Report English Edition, Vol. 59, No. 1, 2016, pp. 27-30
- (6) Hiroaki Kanokogi, Go Takami, “Machine Learning Applied to Sensor Data Analysis: Part 2,” Yokogawa Technical Report English Edition, Vol. 60, No. 1, 2017, pp. 35-38
- (7) Kazutoshi Kodama, “The Sushi Sensor and Machine Learning for Achieving Condition-based Maintenance (CBM),” Yokogawa Technical Report English Edition, Vol. 61, No. 1, 2018, pp. 25-28
- (8) Hiroaki Kanokogi, Takamitsu Matsubara, “Application of artificial intelligence and machine learning to plant operation and roadmap,” Efficiency, Introduction, and Practical Application of Research and Development Utilizing Artificial Intelligence <<Case Studies>>, Technical information association, 2019, pp. 449-458(in Japanese)
- (9) Youta Furukawa, Keiichiro Kobuchi, et al., “How Yokogawa Electric uses machine learning in plant equipment,” Efficiency, Introduction, and Practical Application of Research and Development Utilizing Artificial Intelligence <<Case Studies>>, Technical information association, 2019, pp. 459-467 (in Japanese)
- (10) Hitoshi Hattori, Masanori Sakagami, et al., “Easy-to-Use AI-enabled Recorders and PLCs,” Yokogawa Technical Report English Edition, Vol. 63, No. 1, 2020, pp. 27-32

* e-RT3 and SMARTDAC+ are either registered trademarks or trademarks of Yokogawa Electric Corporation in Japan and other countries.

* “Python” and the Python logos are trademarks or registered trademarks of the Python Software Foundation, used by Yokogawa Electric Corporation with permission from the Foundation.

* All other company names, organization names, product names, service names and logos that appear in this paper are either registered trademarks or trademarks of Yokogawa Electric Corporation or their respective holders.