

해상 무인 시설의 자율 점검을 위한 로봇 활용

Akari Hara^{*1} **Yasuki Sakurai^{*2}** **Youhei Tanigawa^{*1}**

^{*1} Innovation Center, Marketing Headquarters

^{*2} Business Center, Systems Business Division, Digital Solutions Headquarters

최근 몇 년간 플랜트 운영에 로봇을 도입하는 움직임이 가속화되고 있으며, 이에 따라 최종 사용자들에 의한 로봇의 실제 적용 가능성에 대한 초기 평가도 이루어지고 있다. YOKOGAWA 역시 로봇 사업 진출을 추진해 왔으나, 현재 공급업체와 사용자 모두에게 현실적인 사용 사례의 설계는 아직 미흡한 실정이다. 일본재단(Nippon Foundation)과 국제 해양 기술 컨소시엄인 DeepStar의 지원을 받은 본 연구는 해상 무인 플랫폼을 위한 로봇 사용 사례의 설계 및 실증에 중점을 두었다. 이를 위해 우리는 미쓰비시 중공업이 개발한 방폭형 플랜트 점검 로봇인 'EX ROVR'을 활용하여, 온프레미스 시스템 구성의 해양 플랫폼 모사 환경에서 검증 시험을 수행했다. 이러한 시험을 통해 실제 운영 조건과 관련된 기술적 과제를 파악했다. 본 연구 결과는 플랜트 시설에 로봇 시스템을 도입하기 위한 구체적인 지침을 제공한다.

서론

최근 몇 년간 플랜트 산업은 안전 확보 및 운영 효율성 향상과 같은 과제뿐만 아니라 숙련된 인력 부족 문제까지 해결해야 하는 상황에 직면해 있다. 이러한 배경 속에서 산업용 로봇 공학 및 AI의 발전은 전통적으로 사람이 수행해 온 순찰 점검 및 모니터링 업무의 자동화 및 원격 운영 추세를 가속화하고 있다. 특히, 전통적으로 사람이 수행해 온 위험하거나 반복적인 점검 업무를 자동화하기 위해 로봇을 도입하는 것은 안전과 운영 효율성을 모두 향상시키는 효과적인 수단이 될 것으로 기대된다.

석유 및 가스 산업을 대표로 하는 해양 플랫폼은 육지와 격리된 가혹하고 위험한 환경에 위치해 있어, 시설 내 정기 순찰 점검 및 비상 대응이 필수적이다. 이러한 작업은 고온 다습, 염분 피해, 강풍과 같은 극한 환경 조건과 황화수소와 같은 유독 가스 노출과 같은 심각한 위험 요인이 존재하는 상황에서 수행되므로, 근로자의 안전을 확보하는 것이 주요 과제이다. 게다가 인화성 가스를 취급하기 때문에 시설 전체가 위험 구역으로 운영되어 작업 환경이 더욱 까다로워진다. 또한, 이러한 시설들이 외딴 곳에 위치해 있어 인력 배치 및 교대 비용이 많이 들기 때문에 장기적인 운영 효율성 개선이 필요하다.

이러한 이유로, 해양 플랫폼 시설의 점검 작업에 로봇을 도입해야 할 필요성은 매우 높다. 그러나 이러한 환경에서 작동할 수 있는 방폭형 자율 주행 로봇의 도입은 여전히 제한적이다. 그 원인으로는 방폭 인증과 관련된 기술적 제약, 가혹한 해양 환경에서 장기적인 작동을 입증하고 신뢰성을 확보하기의 어려움, 실제 운영 조건에 기반한 사용 사례 설계 및 평가 사례의 부족 등이 있다. 이러한 배경 하에 Yokogawa는 일본재단(Nippon Foundation) 및 DeepStar(국제 해양 기술 개발 컨소시엄)의 지원을 받아 석유·가스 분야의 주요 기업들과 협력하여 해양 플랫폼에서의 로봇 운영을 위한 사용 사례 설계, 시스템 개발 및 실증 시험을 수행했다. 이를 통해 로봇의 실제 배치와 관련된 요구 사항 및 과제를 파악했다. 또한, 미쓰비시 중공업이 제조한 방폭형 자율 점검 로봇(EX ROVR)과 Yokogawa의 OpreX Robot Management Core(RMC; 그림 1) 로봇 통합 관리 시스템을 결합한 자율 순찰 점검 시스템을 개발했다.

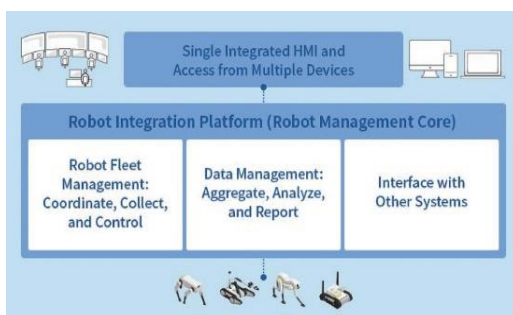


그림 1 OpreX Robot Management Core의 개념도
(HMI) 출처: 참고문헌 (1)에서 재인용

본 논문에서는 이 연구의 결과와 발견 사항을 보고하고, 플랜트 시설에 로봇 시스템을 도입하기 위한 구체적인 지침과 시설 유지보수의 향후 방향에 대해 논의한다.

해상 플랫폼 내 로봇 운용 환경의 현황 및 과제

일반적인 플랜트 시설은 사람이 작업하는 환경을 고려하여 설계되며, 계측기, 밸브 및 기타 장비의 배치(위치, 높이, 작동 방향, 접근 경로 포함)는 작업자의 신체 치수와 동작 범위를 기준으로 결정된다. 그 결과, 이러한 시설 곳곳에는 계단, 좁은 통로, 가파른 계단 등 로봇 이동에 부적합한 구조적 특징들이 존재한다.

해상 플랫폼의 경우, 제한된 공간에 장비와 배관이 밀집해 있어 로봇의 작동 조건이 훨씬 더 까다롭다. 뾰족하게 배치된 배관과 장비는 측정 센서를 가릴 수 있어 데이터 수집을 방해할 가능성이 있다. 또한, 출입 허가가 필요한 제한 구역을 포함한 안전 규정으로 인해 로봇의 운용 일정과 작업의 유연성이 제한된다.

이동형 로봇은 위험 지역에서 작동할 수 있도록 방폭 사양으로 제작될 수 있지만, 방폭 요구 사항과 호환되는 센서 및 탐재 장비는 제한적이며, 고출력 레이저와 특정 광학 측정 기기는 사용이 허용되지 않을 수 있다. 그 결과, 운영 범위가 평평한 통로로 국한되는 경향이 있어 시설 전체에서 점검원을 로봇 시스템으로 완전히 대체하기 어렵다.

통신 역시 상당한 과제를 제기한다. 보안상의 이유로 많은 해양 플랫폼 시설은 외부 네트워크와 격리된 폐쇄형 네트워크 환경에서 운영되므로, 클라우드 기반 제어 및 데이터 공유가 제한된다. 위성 통신은 높은 지연 시간과 낮은 대역폭으로 인해 적합하지 않으며, 광섬유 연결이 가능한 경우에도 외부 연결이 허용되지 않는 경우가 많다. 따라서 로봇 운용에는 현장 내 통신 및 관리 인프라가 필요하다.

현재까지 이 분야의 대부분의 시연은 방폭 기능이 없는 로봇이나 원격 조종 장비를 활용한 단기 시험에 그쳤으며, 위험 구역에서의 장기적인 자율 순찰 점검 사례는 거의 없었고, 여러 점검 과제를 포괄하는 통합 평가 사례도 거의 없었다. 이는 실제 현장 환경에 적합한 로봇 운용 모델을 수립해야 할 시급한 필요성을 강조한다. 표 1은 해상 플랫폼에서의 로봇 운용에 예상되는 과제와 이를 해결하기 위한 기술적 요구 사항을 제시한다.

범주	예상되는 과제	기술적 요구 사항 구현
로봇 관리	교대 근무 체제 전반에 걸친 24시간 로봇 모니터링 및 지원	자율 순찰, 이상 탐지 및 1차 판단 기능 구현
통신환경	높은 지연 시간 및 낮은 연결성	폐쇄된 환경 내에서 운영이 가능한 온프레미스 운영 플랫폼의 네트워크 환경
유틸리티	전력, 공기 공급 및 통신 설비의 영구 설치에 대한 제한과 엄격한 승인 절차	에너지 및 공간 효율을 고려한 설계와 기존 설비의 활용
시설 환경	염분 피해, 조류 손상, 태풍, 군용 레이더 간섭 넓은 작동온도 범위 (-25 ~ 50°C)	높은 내식성, 방수 및 내후성 넓은 작동 온도 범위 호환성 유지보수 주기 연장 지원
인증 요구 사항	방폭 및 선급 인증에 따른 중량, 크기 및 탑재 장비의 제한	방폭 인증을 충족하는 하드웨어 적용 및 대체 측정 방법 수립

표 1 해상 플랫폼에서 로봇 운용 시 예상되는 과제와 기술적 요구 사항

이러한 과제를 해결하려면 로봇 하드웨어 사양, 통신 구성 및 운영 절차를 포괄하는 최적의 시스템 설계가 필요하다. 이러한 요구 사항을 충족하기 위해 Yokogawa는 방폭형 자율 순찰 로봇, 폐쇄형 네트워크 통신 인프라 및 통합 애플리케이션 플랫폼을 중심으로 한 시스템을 개발했다.

전체 시스템 아키텍처

해상 플랫폼에서 로봇의 안정적이고 장기적인 작동을 가능하게 하는 전체 시스템 아키텍처(그림 2)는 다음과 같은 요소들로 구성된다.

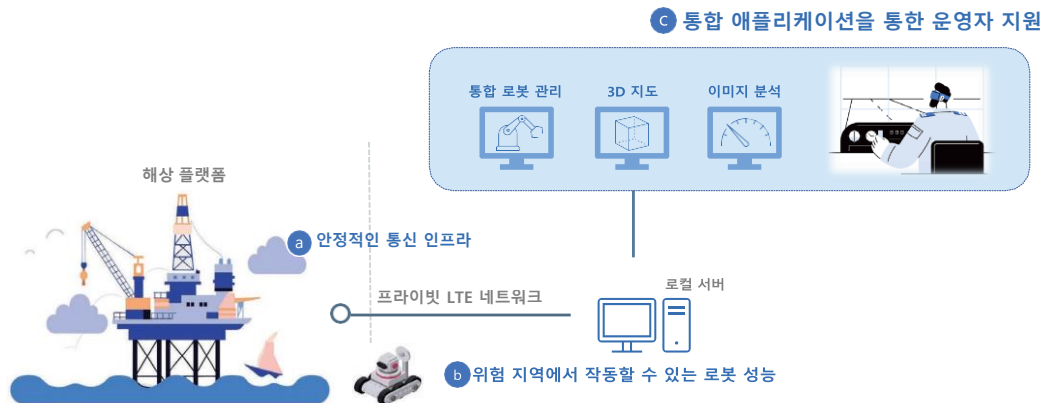


그림 2 해양 플랫폼에서 자율 순찰 점검을 수행하기 위한 시스템 아키텍처

폐쇄형 네트워크 환경에서 안정적인 작동을 위한 통신 인프라

전용 LTE(Long-Term Evolution) 네트워크를 사용하여 폐쇄형 네트워크 환경을 구축하고, 그 안에서 현장 서버를 운영하여 통신의 안정성과 보안을 보장한다.

위험 구역에서 장기간 자율 운용이 가능한 로봇

우리는 2세대 EX ROVR을 채택하였으며, 이 모델은 "ASCENT"는 일본의 방폭 전기 장비 인증(방폭 제품 기술 평가)과 폭발성 대기 환경에서 사용되는 장비에 대한 국제적으로 인정받는 인증 체계인 IECEx 인증을 보유하고 있다. EX ROVR은 Zone 1 환경(폭발성 가스 환경이 존재하거나 발생할 가능성이 있는 환경)에서 정상 작동 조건 하에 잠재적인 점화원을 제거하도록 설계하여, 위험 구역에서 자율 순찰 및 데이터 수집이 가능하다. 또한 계단을 오르내릴 수 있는 기능을 갖추고 있어, 여러 층에 걸쳐 높은 주행성을 확보할 수 있다 (그림 3).

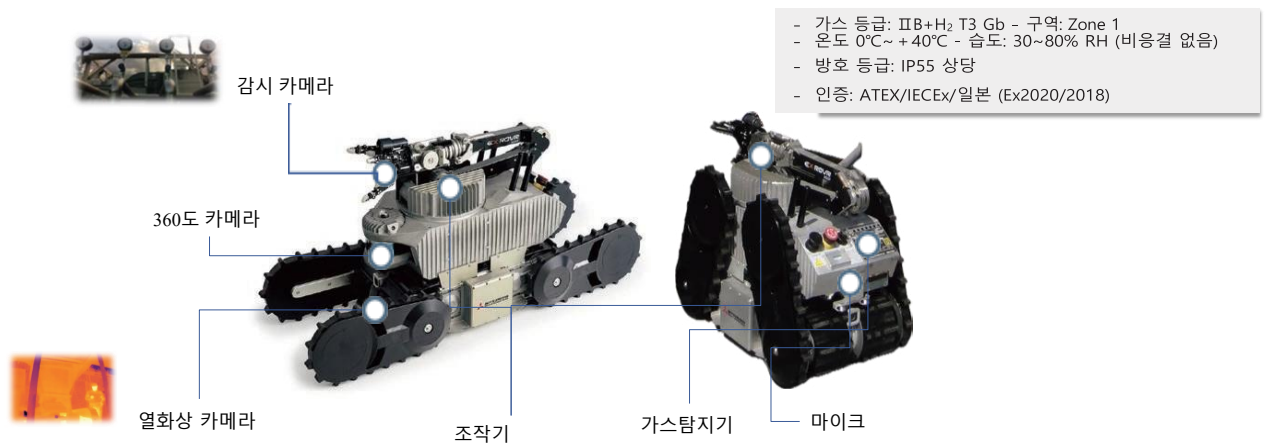


그림 3 EX ROVR의 주요 사양

운영자 지원을 위한 통합 애플리케이션

통합 관리 시스템은 로봇의 작동, 모니터링 및 관리를 중앙 집중화하며, AI 기반의 현장 계측기 자동 분석 기능과 3D 매핑을 활용한 원격 조작 지원 기능을 포함하고 있다. 이를 통해 플랫폼 운영을 담당하는 원격 조작자에게 포괄적인 의사 결정 지원을 제공한다.

시험 테스트 환경

시험 테스트는 해양 플랫폼을 모사하여 구축된 Yokogawa 코마가네 제조 공장에서 진행되었다. 이 시설에는 전용 LTE 네트워크가 구축되어 있으며, 옥상에는 압력 게이지, 밸브, 회전 장비 등 실제 현장을 대표하는 측정 대상들이 설치되어 있다. 환경에 대한 자세한 내용은 아래와 같다.

건물 외관 및 옥상 점검 구역

이 구역에는 압력 게이지, 밸브, 회전 장비 및 기타 계측기가 설치되어 있으며, 이곳에서 계측기 값을 판독하고, 온도를 모니터링하며, 소리를 수집하는 테스트가 수행되었다(그림 4).



그림 4 Yokogawa 코마가네 제조 공장의 건물 외관 및 옥상 검사 구역

옥상 접근 경로

해상 플랫폼의 특징인 다층 구조 환경을 모사하기 위해 순찰 점검 경로에 실외 계단이 포함되었다. 계단 오르내릴 때 안정성과 안전성을 평가하고, 이동 성능을 검증했다(그림 5).



그림 5 다층 구조 환경을 모사한 옥상 접근 경로

네트워크 구성

실제 해양 운영 조건을 재현하기 위해 사설 LTE 네트워크 기반의 폐쇄형 네트워크 환경을 구축하였으며, 구축된 인프라에서 로봇 관리 시스템 및 관련 서버를 운영하였다(그림 6).

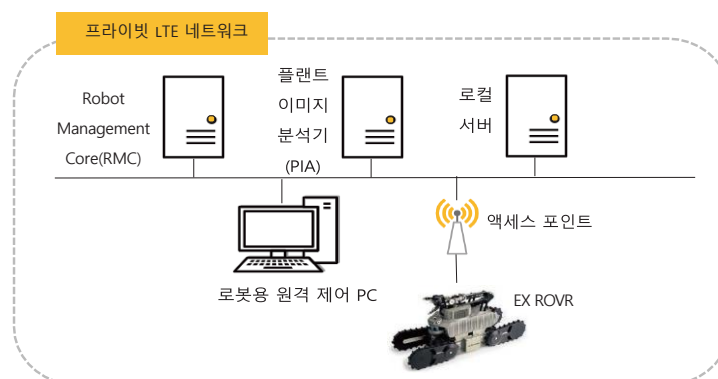


그림 6 시범 테스트를 위한 네트워크 구성

통합 관리 시스템 개발 및 실증 시험

이 절에서는 해양 플랫폼을 모사한 환경에서 통합 관리 시스템을 개발한 과정과 그 운영 성능 평가 결과를 설명한다. 환경 구축부터 개별 기능 구현, 실제 운영 조건을 가정한 테스트에 이르기까지 일관된 일련의 활동을 수행함으로써, 시스템의 효과성과 주요 운영 고려 사항을 모두 입증했다.

온프레미스 환경 구축 및 로봇 운용 평가

해상 플랫폼의 운영 조건을 모사한 온프레미스 환경을 구축하고, EX ROVR의 운영 서버를 이 구성으로 마이그레이션했다. 사설 LTE 네트워크를 통해 EX ROVR을 운용하며, 온프레미스 환경에서 로봇의 자율 운용 성능을 평가했다.

현장 조건에 맞춰 테스트 경로에는 계단, 단차, 좁은 통로가 포함되었다. 경로에는 계단참에 장애물이 있고 통로 폭이 부족한 구간이 있었는데, 장애물을 뚫고 통행 가능한 경로를 확보하기 위해 목재 받침대를 설치하여 로봇이 이를 통과할 수 있도록 했다(그림 7).

점검 작업은 다음과 같았다: (i) 밸브 개폐 상태 확인을 위한 영상 획득, (ii) 아날로그 계기판 촬영, (iii) 에어컨 주변의 가스 농도 측정, (iv) 회전 장비로부터의 음향 데이터 및 열화상 이미지 획득(그림 8). 합격 기준은 모든 점검 지점에서 지정된 데이터를 성공적으로 획득하는 것이었다.

시험 결과, 로봇이 계단과 계단식 경로를 포함하여 경로를 안정적으로 주행했으며, 광학 카메라, 열화상 카메라, 가스 감지기, 음향 센서를 포함한 각 센서 시스템이 만족스럽게 작동하여 모든 유형의 데이터를 성공적으로 수집했음을 확인했다. 역광이나 비와 같은 특정 조건에서는 광학 카메라의 화질 저하가 일부 관찰되었다. 그러나 로봇은 전반적으로 현장 환경에서 안정적으로 작동할 수 있으며, 가해진 조건 하에서 자율 점검을 수행하기에 충분한 성능을 발휘하는 것으로 확인되었다. 동시에, 이번 결과는 원활한 로봇 작동을 위해 로봇 친화적인 물리적 환경을 설계하는 것이 중요하다는 점도 확인했다.



그림 7 테스트 경로의 장애물 위치에 설치된 목재 받침대

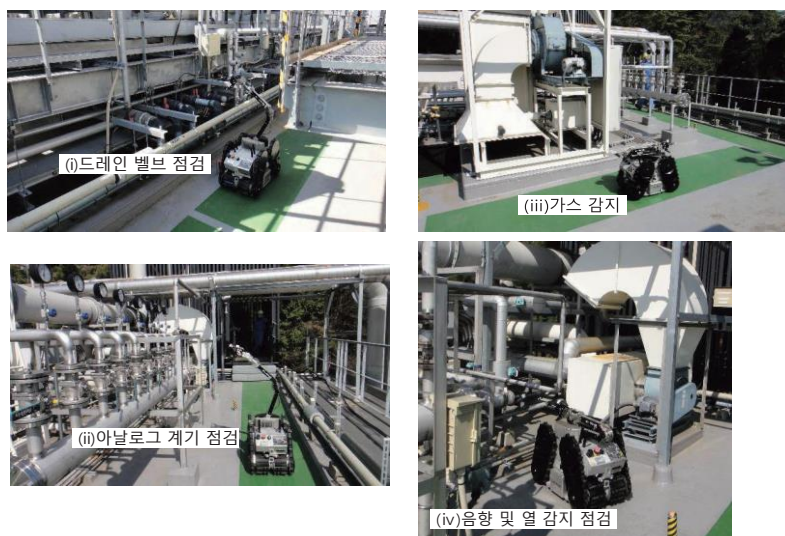


그림 8 시범 운영 중 수행된 로봇 검사 작업

공정 파라미터 판독 정확도 평가

우리는 EX ROVR의 영상 촬영 기능을 자사의 AI 영상 분석 애플리케이션인 OpreX Plant Image Analyzer(PIA)와 통합하여, 압력계 및 온도계와 같은 일반적인 계측기의 계기 판독값 정확도를 검증했다.

이번 검증에서는 세 가지 유형의 불리한 촬영 조건에서 계기 이미지를 획득했다. 이 조건들은 조명이 불량한 경우(계기가 그늘에 있거나 조명이 약한 환경), 먼지나 침전물로 인해 계기 표면이 부분적으로 가려진 경우, 그리고 주변 환경의 반사나 후광으로 인해 촬영 각도가 제한된 경우이다. 이후 측정값은 PIA를 사용하여 측정값을 자동으로 추출했다.

그 결과, 그림 9에 표시된 모든 조건에서 계기 판독값이 정확함을 확인했으며, 이는 이 애플리케이션이 광범위한 환경 조건에서 계기 값을 안정적으로 추출할 수 있으며 높은 측정 정확도와 환경적 변동성에 대한 견고성을 모두 제공함을 입증한다.

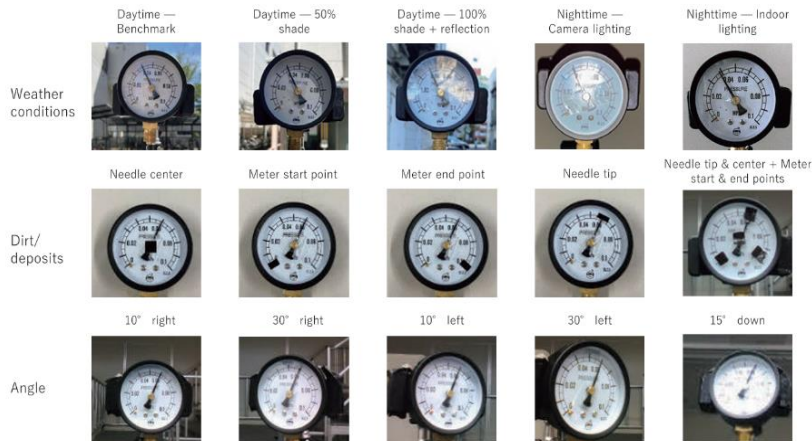


그림9 PIA가 계기 판독에 사용하는 계기 이미지

통합 3D 지도 표시 애플리케이션 개발

해상 플랫폼에서 로봇을 운용할 때 직면하는 과제 중 하나는 로봇이 플랜트 비상 상황에 신속하고 유연하게 대응할 수 있도록 보장하는 것이다. 비상 상황에서는 로봇이 자율 항법만으로는 처리할 수 없는 비정형 작업을 수행해야 하므로, 운영자의 원격 조종이 필요하다. 원격 조종은 로봇에 장착된 카메라의 영상 전송에 의존하기 때문에 신속한 상황 인지가 어려워, 특히 경험이 부족한 운영자에게는 이 작업이 매우 어렵다. 이를 해결하기 위해 본 연구에서는 미리 생성된 3D 지도에 로봇의 위치 및 점검 지점 정보를 통합하여 표시하는 사용자 인터페이스를 개발함으로써, 조작자가 시설 전체를 조감하는 포괄적인 시각을 유지할 수 있도록 했다. 이는 비상 상황 시 원격 조종을 지원할 뿐만 아니라, 온도 모니터링, 소음 모니터링, 가스 누출 감지, 주문형 점검, 원격 문제 해결 등 다양한 작업 전반에 걸쳐 획득한 데이터를 로봇의 위치와 직관적으로 연관 지을 수 있게 해준다.

따라서 모바일 기기의 라이더(LiDAR) 센서와 3D 스캐닝 애플리케이션을 활용하여 모사된 시설 전체의 3D 지도를 생성함으로써, 전용 3D 스캐너를 사용하는 기존 방식보다 더 빠르고, 비용적인 측면에서 효율적인 모델링이 가능해졌다(그림 10). 그러나 이 방법으로 생성된 3D 모델은 모든 물체를 단일 모델로 통합하므로, 광역 스캐닝에 내재된 해상도 제한을 피할 수 없다. 이러한 이유로, 로봇 점검 지점 역할을 하는 물체들은 개별적으로 스캔하여 고해상도 모델을 생성한 후, 이를 전체 모델과 함께 활용하였다(그림 11).

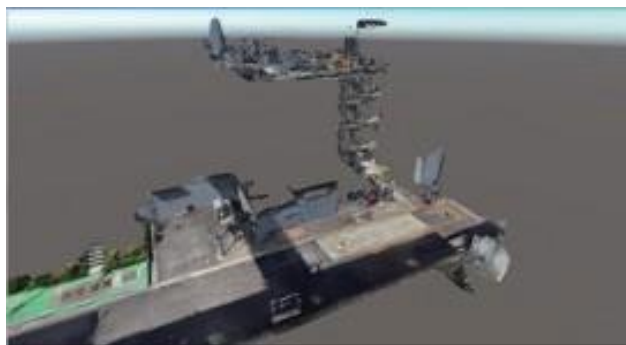


그림 10 모바일 기기를 사용하여 생성한 Yokogawa 코마가네 제조 공장의 3D 모델

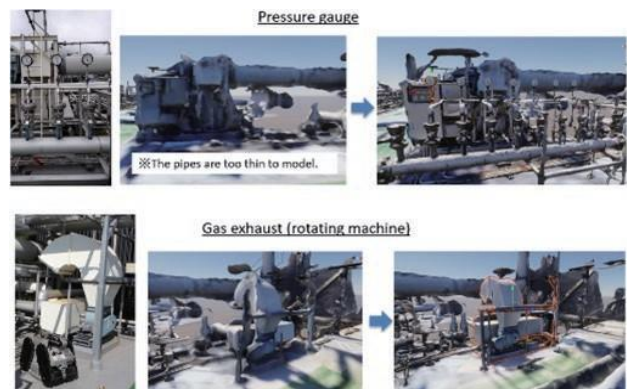


그림 11 고해상도 모델을 활용한 검사 대상 대체 예시

이러한 방식으로 구축된 3D 모델에 로봇의 위치를 중첩시킴으로써, 저렴한 비용으로 순찰 점검 경로를 시각화하고 운영자가 시설의 전반적인 상태를 직관적으로 파악할 수 있는 사용자 인터페이스를 구현할 수 있었다. 또한, 로봇이 획득한 이미지 데이터는 RMC에 집계되었으며, PIA 분석 결과는 3D 지도상의 점검 지점과 통합했다. 이를 통해 운영자는 단일 3D 지도 뷰어 내에서 로봇 운영 및 점검과 관련된 모든 데이터를 통합된 화면으로 확인할 수 있다(그림 12).

이러한 통합을 통해 3D 지도상에서 로봇 순찰 점검을 효율적으로 시각화할 수 있는 환경이 구축되었으며, 이는 원격 모니터링 및 운영 지원을 위한 유용한 기반을 마련해 주었다



그림 12 로봇 위치 및 검사 데이터를 시각화한 3D 지도 뷰어

통합 테스트

코마가네 제조 공장에 구축된 온프레미스 환경에서, 계단, 단차, 좁은 통로 등을 포함하도록 테스트 경로를 구성하였으며, 현장 환경의 3D 지도 생성부터 점검 작업의 자율 실행, 결과 회수에 이르는 종단 간 워크플로를 아우르는 다음 절차를 통해 통합 관리 시스템 전체에 대한 운영 검증을 수행했다:

1. 로봇의 순찰 점검 경로 및 시나리오를 생성한다.
2. Robot Management Core에서 준비된 시나리오를 실행한다.
3. 로봇이 자율적으로 점검을 수행하고, 3D 지도를 통해 원격으로 위치를 확인한다.
4. 점검 결과를 추출하고, 공정 매개변수에 대한 자동 분석을 수행한 후, 3D 지도상에서 결과를 확인한다.

통합 테스트 결과, 로봇이 사전 구성된 시나리오에 정의된 각 점검 작업을 문제없이 수행했으며, 획득된 이미지 데이터와 측정값이 PIA의 자동 분석을 거쳐 3D 지도에 통합되어 표시됨이 확인되었다. 이를 통해 로봇의 위치와 점검 결과를 원격지에서 통합적으로 모니터링할 수 있음이 검증되었으며, 통합 관리 시스템이 실제 운영 수준에서 순찰 점검 프로세스를 원활하게 수행할 수 있음을 입증했다.

토론

이번 시범 운영을 통해 해양 플랫폼에서 이동형 로봇을 활용한 자율 순찰 점검이 기술적으로 가능하다는 사실이 확인되었다. 다만, 로봇의 이동 경로와 점검 대상 배치에 따라 자율 이동형 로봇이 그 잠재력을 최대한 발휘할 수 있도록 플랜트 시설을 설계하는 것이 바람직하다. 고지대나 협소한 구역에 대한 접근성, 계기 및 밸브의 가시성, 통신 환경의 안정성은 향후 플랜트 설계 시 중요한 고려 사항이다.

결론

이번 연구 개발 활동을 통해 해상 플랫폼에서 자율 이동 로봇 운영의 기술적 타당성과 시스템 통합의 유용성이 입증되었으며, 이를 통해 전통적으로 수작업으로 수행되던 단순하지만 까다로운 점검 작업을 자동화할 수 있게 되어, 작업자의 부담을 줄이고 점검 품질을 표준화할 수 있게 되었다.

향후 이 시스템을 드론 및 생산 제어 시스템과 통합함으로써, 시설 전체를 포괄적이고 실시간으로 모니터링 및 관리할 수 있는 스마트 플랜트 운영의 실현을 가속화할 것이다. 또한, 석유·가스 분야뿐만 아니라 다양한 산업(예: 화학, 전력, 식품 제조 등)에서의 적용을 염두에 두고, 운영 조건과 시설 설계 지침을 표준화하며 해당 기술의 국제적 확산을 추진함으로써 플랜트 운영의 안전성, 효율성 및 지속 가능성을 향상시키는 통합형 차세대 플랜트 관리 플랫폼을 구축하는 것을 목표로 한다.

감사의 말

저자들은 본 프로젝트 진행 과정 전반에 걸쳐 아낌없는 협력과 지원을 아끼지 않은 일본 재단, DeepStar 및 미쓰비시 중공업 주식회사에 진심으로 감사를 표합니다.

참고문헌

(1) Yokogawa Electric Corporation, Robot and Drone Technology, <https://www.yokogawa.com/solutions/featured-topics/robot-and-drone-technology/>, (accessed 2026-03-16)

* EX ROVR and ASCENT are registered trademarks or trademarks of Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.

* OpreX Robot Management Core is a registered trademark or trademark of Yokogawa Electric Corporation.

* OpreX Plant Image Analyzer is a registered trademark or trademark of Yokogawa Electric Corporation.

* 본 논문에 등장하는 기타 모든 회사명, 조직명, 제품명, 서비스명 및 로고는 Yokogawa Electric Corporation 또는 각 소유권자의 등록상표 또는 상표이다.

Supported by 