

이종 로봇 시스템을 위한 운용 설계 기술

Hiroki Sugawara^{*1} **Yuya Okada**^{*2} **Takeshi Hatanaka**^{*2}

^{*1} DX Business Development Department, Innovation Center, Marketing Headquarters

^{*2} Hatanaka Lab, Department of Systems and Control Engineering, School of Engineering, Institute of Science Tokyo

최근 몇 년간 공장 플랜트에 배치할 수 있는 로봇이 등장하기 시작했으며, 현장 순찰 점검이나 비상 시 최초 대응자로서의 활용이 적극적으로 검토되고 있다. 그러나 현재의 로봇은 사전에 설계된 동작과 미리 학습된 행동을 기반으로 동작하기 때문에, 다양한 상황이 발생하는 실제 환경에서 수행할 수 있는 작업이 제한적이다. 한편, 로봇 기능 고도화 및 저비용 로봇 개발을 통한 작업 범위 확대로 인해 향후 현장에 배치되는 로봇의 수가 증가할 것으로 예상된다. 이러한 발전이 진행됨에 따라 로봇 운용 규모는 인간이 직접 관리하기 어려운 수준으로 확대될 것이다. 우리는 “산업 자율성(Industrial Autonomy)”을 실현하는 것을 목표로 하며, 현장에 배치된 모든 로봇을 로봇 관리 시스템이 제어하는 것이 바람직하다고 보고, 이를 위해 개별 로봇에 대한 운용 지침을 설계하는 기술을 개발해 왔다. 특히, 실제 현장에서 로봇을 운용하는 데 있어 필요한 시간 내에 작업 지시를 신속하게 생성할 수 있으면서, 현장 적용에도 적합한 설계 알고리즘을 개발했다.

서론

최근 몇 년간 플랜트 운영 현장에서는 인력 부족, 숙련된 근로자의 은퇴로 인한 젊은 후임자 양성 문제, 경쟁력 강화의 필요성⁽¹⁾ 등 다양한 과제가 대두되었다. 이러한 과제를 해결하기 위한 방안으로 디지털 전환(DX)이 추진되어 왔으며, 보스턴 다이내믹스(Boston Dynamics)의 SPOT, 미쓰비시 중공업(Mitsubishi Heavy Industries)의 EX ROVR, 엑스로보틱스(ExRobotics)의 ExR-2, 애니보틱스(ANYbotics)의 ANYmal, 타우롭(Taurob)의 Taurob Inspector 등 다양한 로봇이 개발되었다. 향후 더 많은 신형 로봇이 등장하고 기능이 더욱 향상될 것으로 예상되며, 플랜트 운영에 사용되는 로봇 시장은 연간 약 10%⁽²⁾의 연평균 성장률을 보일 것으로 전망된다.

Yokogawa는 산업 자동화에서 산업 자율성으로 나아가는 길로서, 플랜트 시설과 운영 자체가 학습하고 적응하는 ‘산업 자동화에서 산업 자율화(IA2IA)’를 추진하며, 로봇을 이를 가능하게 하는 핵심 기술 중 하나로 자리매김하고 있다⁽³⁾. 당사는 플랜트 운영 시스템과 다양한 유형의 로봇을 원활하게 연결하는 ‘OpreX Robot Management Core’를 개발했으며, 고객사와 협력하여 플랜트 현장에서의 로봇 도입을 검증하고 있다. 그림 1에서 볼 수 있듯이 자율 운영이 실현된 플랜트에서는 다양한 유형의 로봇이 배치되어 상호 보완적인 방식으로 자율적으로 작업을 수행할 것으로 예상된다. 그러나 현재 플랜트에 도입할 수 있는 로봇은 수동 제어 또는 미리 정의된 동작의 재생을 통한 자동 내비게이션⁽⁴⁾⁽⁵⁾을 기반으로 작동한다. 따라서 시스템이 사전 설정 시 예상하지 못했던 다양한 상황에 대응할 수 있도록 하기 위해서는 몇 가지 새로운 기능을 개발해야 한다.



그림 1 플랜트 내 미래 로봇 작동 개념도

본 연구에서는 자율 로봇 작동을 실현하기 위한 핵심 기술로서, 상황에 따라 적절한 로봇 운용 계획을 수립하는 기술을 개발했다. 본 논문에서는 개발된 기술에 대해 설명한다.

플랜트 내 로봇 작동의 쟁점 및 기술적 과제

로봇 운용의 문제점

현재 플랜트 내 점검 작업은 뛰어난 오감을 가진 사람이 수행하고 있다. 반면, 로봇은 기능이 제한적이기 때문에 로봇이 수행할 수 있는 작업과 수행할 수 없는 작업이 있기 때문에 로봇이 보유한 기능에 따라 작업을 배분할 필요가 있다. 작업자의 경우, 한 명의 작업자가 외관, 온도, 이상 소음 등 모든 항목을 검사할 수 있으며, 작업은 일반적으로 설비 또는 구역별로 배분된다(표 1). 반면, 로봇의 경우 각 작업 항목에 필요한 기능을 갖춘 로봇들이 업무를 분담하여 각 설비의 점검을 상호 보완적으로 수행하는 것을 전제로 한다(표 2).

표 1 인간의 작업 할당 예시

설비	작업 항목	작업자 A	작업자 B
X	육안 검사	✓	
	온도	✓	
	진동	✓	
	이상 소음	✓	
	액체 수위	✓	
Y	육안 검사		✓
	온도		✓
	진동		✓
	이상 소음		✓
	계기 점검		✓

표 2 로봇 작업 할당 예시

설비	작업 항목	로봇 α	로봇 β	로봇 γ
X	육안 검사	✓		
	온도		✓	
	진동			✓
	이상 소음		✓	
	액체 수위	✓		
Y	육안 검사	✓		
	온도		✓	
	진동			✓
	이상 소음		✓	
	계기 점검	✓		

작업 시간 측면에서, 사람은 예정된 근무 시간 내 언제든지 대응할 수 있다. 반면, 로봇의 경우 배터리 사양에 따라 연속 운용할 수 있는 시간이 결정된다. 이러한 제약을 무시할 경우, 작동 중 배터리가 방전되어 로봇이 현장에서 멈추는 등의 문제가 발생할 수 있다. 따라서 그림 2에 표시된 바와 같이, 충전을 위한 가동 중단 시간을 할당해야 한다.

시간	8:00	8:30	9:00	9:30	10:00	10:30	11:00	11:30	12:00	12:30	13:00	13:30	14:00
남성	일하는												
로봇	작동 중		충전 중				작동 중		충전				

그림 2 한 교대 근무 내 인간과 로봇의 예상 운용 상태

또한, 로봇은 플랜트 내 운용 제약 조건의 영향을 더 크게 받는다. 이러한 제약 조건의 예로는 현장 안전 규칙에 따라 현장 순찰 시간이 지정되는 경우나, 점검 중에 설비를 가동하거나 정지하는 경우 등이 있다. 설비가 가동되거나 정지하는 시점에 맞춰 점검해야 하는 경우가 있으며, 이러한 점검 시점은 현장의 운영 노하우를 바탕으로 사전에 정해져 있는 경우가 많다. 따라서 로봇은 정해진 시간에 맞춰 점검을 수행해야 하며, 이 또한 로봇 운용 시 고려해야 할 일정상의 제약 조건이 된다.

이러한 제약 조건을 충족하면서 적절한 로봇 운용을 설계하기 위해서는, 각 제약 조건과 로봇 운용 방침을 명확한 조건과 규칙으로 정의하여 다중 로봇 작업 할당(MRTA) 문제를 해결해야 한다. MRTA 문제에 대해서는 지금까지 표 3에 제시된 접근법들이 제안되어 왔다⁽⁶⁾.

시장 기반 접근법은 경매와 비슷한 방식으로 로봇에게 작업을 할당하는데, 각 로봇이 특정 작업을 수행하는 데 필요한 비용을 제시하면, 시스템은 가장 유리한 조건을 제시한 로봇에게 해당 작업을 순차적으로 할당한다. 반면, 최적화 접근법은 모든 운용 제약 조건을 수학적으로 정형화하고 로봇 운용 방침을 목표로 설정한다. 결과적으로 도출된 최적화 문제를 해결함으로써 원하는 운용 계획을 얻게 된다. 로봇 운용 방침의 예로는 작업을 가능한 한 빨리 완료하거나 로봇의 운용 비용을 최대한 절감하는 것 등이 있다. 일반적으로 최적화 접근법은 더 높은 성능의 결과를 산출하는 것으로 알려져 있다⁽⁷⁾.

표 3 MRTA 문제 해결 방안

접근 방식	개요
최적화	○운용 제약 조건, 요구되는 작업 함수 및 로봇 사양 제약 조건을 정형화하고, 운용 방침을 기술하는 목적 함수를 기반으로 적절한 할당을 도출 ○계산량이 높은 경향이 있음
시장	○각 작업에 대한 각 로봇의 실행 비용을 평가하고, 최적의 할당 패턴을 순차적으로 결정 ○최적화 방법에 비해 계산량이 낮은 경향 ○로봇의 운용 방침과 우선순위를 반영하는 평가 방법이 필요

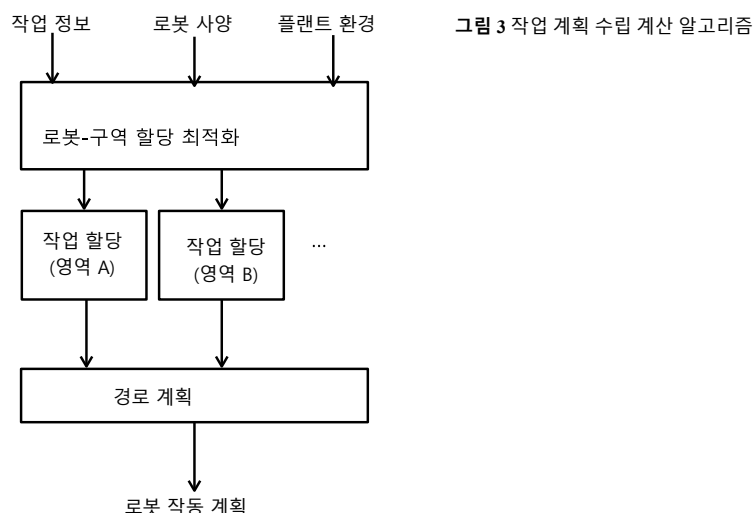
기술적 과제

MRTA 문제는 NP-hard 문제로 분류되며⁽⁸⁾, 플랜트 내 로봇 운용 계획에 필요한 규모로 정형화될 경우 계산량이 매우 높다. 그러나 실제 플랜트 운영에서는 설비 경로나 상태 변화로 인해 발생하는 추가 작업, 이전 교대조로부터 인계받은 항목, 로봇 고장 등 다양한 동적 요인을 고려해야 한다. 따라서 자율 로봇 운용을 실현하기 위해서는 현장 환경 변화 및 신규 작업 추가에 신속하게 대응할 수 있는 운용 계획 설계 방법을 개발해야 한다.

이러한 변화를 처리할 수 있는 한 가지 방법은 변화가 발생하는 시점의 로봇 운용 상태를 수집하여 운용 계획을 재설계하는 것이다. 그러나 이 접근 방식은 변화가 발생할 때마다 계산량이 많이 드는 MRTA 문제를 해결해야 한다. 계획 수정은 로봇 활동을 방해하지 않고 실제 운용 중에 수행되어야 하므로, MRTA 문제를 해결하기 위해 계산 부담이 적은 접근 방식을 채택할 필요가 있다.

제안된 방법

본 연구에서는 계산량을 줄이기 위해 그림 3에 표시된 계산 알고리즘을 제안한다⁽⁹⁾. 기존의 MRTA 문제에서는 로봇에 대한 작업 할당과 이동 경로 계획이 서로 상호 작용하여 계산해야 할 경우의 수가 너무 많아진다. 계산량을 줄이기 위해, 로봇 작업 할당과 경로 계획을 분리하여 각각 별도로 처리했다. 또한, 계산량을 더욱 줄이기 위해 플랜트를 사전에 여러 구역으로 나누고 각 구역별로 작업 할당 계산을 처리했다. 로봇은 구역 간에 공유되는 자원이므로, 각 구역에서 독립적으로 수행한 작업 할당 결과가 일관성을 유지할 수 있도록 상위 수준의 로봇과 구역 간의 할당 방식을 도입함으로써, 실행 가능한 전체 계획을 수립할 수 있게 했다. 이 알고리즘의 세부 내용은 다음과 같다.



문제 정의

먼저, 로봇 운용 계획 수립의 문제를 설명한다. 로봇에 할당된 각 작업은 [작업 위치, 요구 기능, 지정된 실행 시간]으로 정의된다. 작업 위치는 아래에서 설명하는 플랜트의 이동 환경에 부합하도록 정의된다. 시간은 30분을 단위 간격으로 하는 이산 단계로 표현된다. 지정된 실행 시간이 있는 작업의 경우, 실행은 해당 시간 단계 인덱스에서 실행하도록 지정한다.

플랜트의 이동 환경은 그림 4에 표시된 바와 같이, 각 로봇의 이동 경로, 작업 수행 위치 및 충전 위치로 구성된 그래프로 표현된다. 작업 수행 위치와 충전 위치는 노드(node)로 표현되며, 노드 간 이동이 가능한 경우 노드 사이에 엣지(edge)가 생성되어 이동 경로를 나타낸다. 노드 간의 이동 거리는 엣지에 가중치를 부여하는 방식으로 표현된다. 플랜트는 사전에 임의의 구역으로 나뉘며, 각 노드에는 구역 정보가 부여된다.

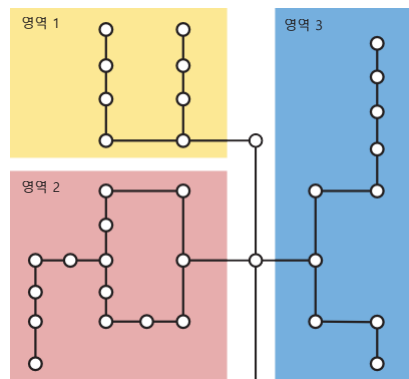


그림 4 플랜트 환경의 그래프 표현 예시

로봇-구역 할당 최적화

“문제 정의” 절에서 설명한 문제 정의를 바탕으로, 로봇을 구역에 할당하기 위한 최적화 계산을 수행하였다. 구역 할당 시, 시간적 제약 조건을 충족하면서 각 구역 내의 모든 작업을 수행할 수 있도록 로봇을 할당해야 한다. 이를 위해 구역 및 요구 기능별로 정보를 집계하였으며, 각 시간 단계에서 시작할 수 있는 작업 수와 각 시간 단계까지 완료되어야 하는 작업 수를 제약 조건으로 정의했다. 또한, 주어진 시간 간격 내에 완료되어야 하는 작업 수도 제약 조건으로 포함되었다.

로봇이 시간 단계당 수행할 수 있는 작업 수는 충전소의 위치와 각 구역까지의 거리를 바탕으로 결정되었다. 위 제약 조건을 충족하는 방식으로 로봇을 할당함으로써, 각 구역별 작업 할당 최적화가 가능해졌다. 또한, 어떤 구역에도 할당되지 않은 로봇들은 충전을 위해 충전 위치에 머물도록 스케줄링하여, 배터리 제약 조건을 문제 정의에 반영했다.

각 구역 내 로봇에 대한 작업 할당

“로봇-구역 할당 최적화” 절에서 제시된 결과를 바탕으로, 각 구역에 배분된 로봇들에게 해당 구역 내의 작업을 할당하기 위한 작업 할당 계산을 수행하게 했다. “문제 정의” 섹션에서 설명한 바와 같이, 각 작업에 필요한 함수와 지정된 실행 시간을 제약 조건으로 설정하고, 최적화 계산을 수행하여 작업 할당을 결정했다.

로봇 경로 계획

각 시간 단계마다 각 로봇에 대해 경로 계획을 수행했다. “로봇-구역 할당 최적화” 섹션에서 설명한 구역 할당 결과에 따라, 경로를 설계할 때 한 번에 하나의 구역에만 집중했다. 이전 및 다음 시간 단계의 할당 상태를 바탕으로, 고려 중인 구역 내에서 시작점은 이전 단계에서 할당된 구역에 가장 가까운 위치로, 종료점은 다음 단계에서 할당된 구역에 가장 가까운 위치로 결정했다. 그런 다음 “각 영역 내 로봇에 대한 작업 할당” 절에서 할당된 작업의 실행 위치를 중간 경유지점으로 정의했다. 이러한 방식으로, 이 문제는 모든 중간 경유지점을 통과하면서 시작점에서 종료점까지 이동해야 하는 경로 계획 문제로 정의했다.

이 경로 계획 문제 역시 NP-hard 문제이며, 정확한 해답을 구하는 것은 계산량 측면에서 실용적이지 않다. 본 연구에서는 근사 알고리즘인 ‘최저 비용 삽입법(cheapest insertion method)’과 그래프 내 임의의 두 노드 간 최단 경로를 찾는 데 사용되는 Dijkstra 알고리즘⁽¹⁰⁾을 함께 사용하여 경로를 계획하였다. 최저 비용 삽입법은 이동 거리의 증가량이 최소화되도록 경유 지점을 삽입하는 순서를 고려하여, 로봇의 이동 경로에 경유 지점을 하나씩 추가하고 모든 경유 지점이 추가될 때까지 이를 반복하는 알고리즘이다. Dijkstra 알고리즘을 활용하여 각 경유지점 삽입으로 인해 발생하는 실제 경로를 계산하고, 이에 따른 이동거리 증가량을 산출한다. 이 증가량을 기준으로 모든 검토 대상 경유지점-위치 조합을 평가함으로써, 최저 비용 삽입법을 이용한 경로 계획을 수행한다.

시뮬레이터 검증

이전 절에서 제시한 계산 흐름의 유효성을 검증하기 위해 시뮬레이터 기반 검증 실험을 수행했다. 검증 과정의 최적화 계산에는 Gurobi Optimizer(Gurobi Optimization, LLC) 최적화 솔버를 사용했다. 계산은 Intel® Xeon® Gold 5317 CPU에서 실행되었다.

검증 설정

그림 5는 8개의 구역과 511개의 작업으로 구성된 플랜트를 시뮬레이션한 가상 현장을 보여준다.

8개 구역과 511개의 작업으로 구성된 가상 현장을 보여준다. 작업 수행에 필요한 기능은 {카메라, 열화상 카메라, 마이크, 카메라 + 팔, 마이크 + 팔}의 5가지 유형으로 구성되었다. 로봇 사양 및 구성은 표 4에 표시된 대로 정의하였다. 이러한 로봇을 사용하여 8시간 이내에 모든 작업을 완료하는 운용 계획을 설계하기 위한 계산을 수행하고, 소요 계산 시간을 평가하였다. 구역 할당 시, 목적 함수는 작업의 조기 실행과 로봇이 먼 구역에 할당되는 것을 피하는 방침을 적용하였다. 각 구역 내의 작업 할당 시, 목표 함수는 작업을 조기에 실행하는 방침을 적용하였다.

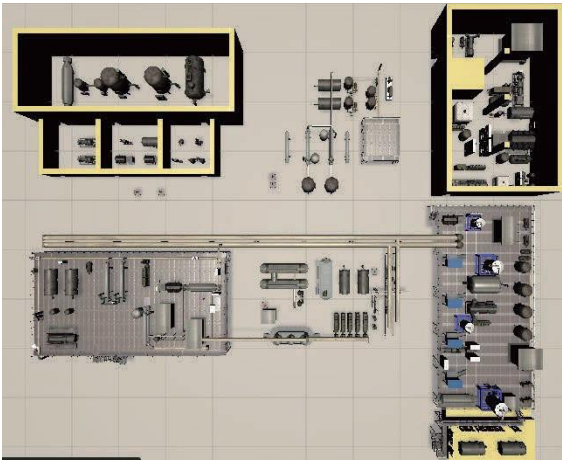


그림 5 시뮬레이터용 시뮬레이션 환경

표 4 로봇 사양 및 구성

	드론	사족 보행 로봇	트랙형 로봇
장착된 기능	• 카메라	• 카메라 • 마이크 • 팔	• 카메라 • 열화상 카메라 • 마이크 • 팔
충전 소요 시간 [분]	30	120	60
연속 작동 시간 [분]	90	180	120
배치된 장치 수 [대]	4	3	3

최적화 솔버에 적용된 계산 방법은 초기값에 따라 결과가 달라질 수 있기 때문에, 초기 설정이 달라지면 계산 결과와 최적화에 소요되는 시간에도 차이가 발생할 수 있다. 본 검증에서는 서로 다른 초기 조건을 적용하기 위해 5개의 서로 다른 랜덤 시드(random seed)를 사용하여 초기 설정을 생성하고, 이를 바탕으로 해당 방법을 평가했다.

계산 결과

그림 6은 본 검증에서 설계된 로봇 운용 계획에 따라 각 영역에서 실행된 작업 수의 예를 보여준다. 각 영역에서 완료된 작업의 누적 수는 녹색 막대로 표시되어 있으며, 각 영역의 작업 실행에 대한 시간 제약 조건은 파란색 및 빨간색 선으로 나타난다. 일부 작업에는 지정된 실행 시간 단계가 있다. 따라서 로봇이 해당 작업에 할당되어 있더라도 지정된 시간 단계에 도달하기 전까지는 작업을 수행할 수 없다.

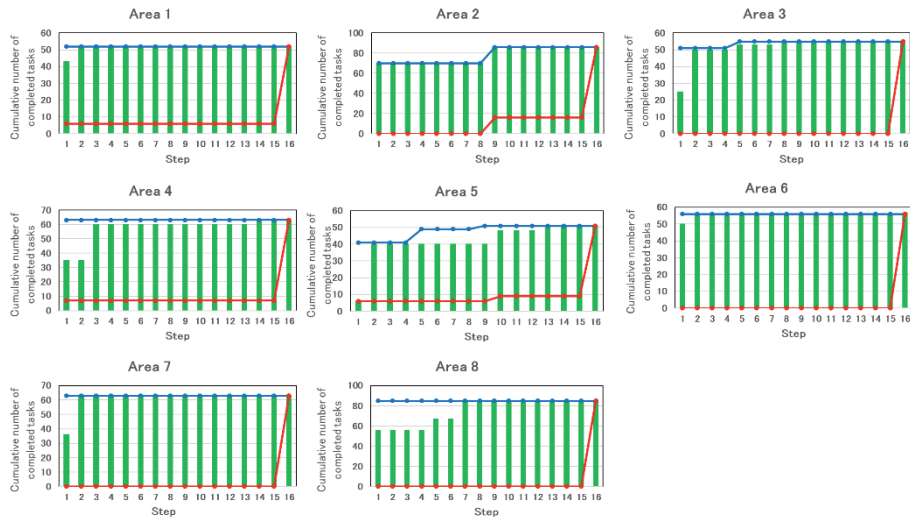


그림 6 설계된 계획에 따른 각 구역별 작업 실행 진행 상황 예시

파란색 선은 각 시간 단계에서 실행 가능한 작업 수의 변화를 나타낸다. 또한, 모든 작업은 근무 시간 내 또는 지정된 시간 범위 내에서 완료되어야 한다. 빨간색 선은 요구되는 누적 완료 작업 수를 나타낸다. 각 구역에 대한 계획에서 실행된 작업 수가 실행 가능 수(파란 선 아래)를 초과하지 않고, 필수 완료 수(빨간 선 위)보다 적지 않으면 제약 조건이 충족된 것이다. 그림 6에서 볼 수 있듯이, 생성된 계획에서 실행된 작업 수는 모든 구역에서 제약 조건을 충족한다. 이러한 결과는 본 논문에서 제안한 계산 알고리즘이 실행 가능한 계획을 생성할 수 있음을 확인해 준다.

표 5는 본 논문에서 개발된 계획 알고리즘의 소요 계산 시간과 설계된 운용 계획에서 각 로봇의 총 이동 거리를 보여준다. 본 연구에서 고려한 문제 규모에 대한 응답 시간은 약 1분으로, 이는 실제 적용에 적합한 수준인 것으로 판단된다.

이동 거리는 사용된 랜덤 시드(random seed)에 따라 달라졌다. 이는 랜덤 시드에 따라 구역 배분 및 작업 할당 결과가 달라지고, 그에 따라 각 로봇에 할당되는 작업과 이동 경로에도 차이가 발생하기 때문인 것으로 판단된다. 이러한 배분상의 편차는 특히 작업 할당과 경로 계획을 분리한 데서 기인하는 것으로 보인다. 기존 방법에서는 각 작업을 수행하는 데 필요한 이동을 포함한 경로 계획을 고려하면서 작업 할당이 이루어진다. 반면, 제안된 알고리즘에서는 이러한 문제들이 분리되어 있다. 그 결과, 작업 할당 시 영역 내 작업 수행 위치의 차이는 고려되지 않으며, 계산 과정에서 작업 할당 결과가 동등한 것으로 평가되더라도 이동 거리의 차이가 발생한다.

그러나 총 이동 거리의 표준편차를 보면 이러한 편차가 매우 작음을 알 수 있다. 이는 각 시간 단계에서 로봇의 운용 범위를 하나의 구역으로 제한했기 때문인 것으로 판단된다. 또한, 어떤 경우에도 로봇의 작동 제약 조건이 위반된 사례는 없었다. 따라서 이동 경로의 변동이 미치는 영향은 무시할 수 있을 정도로 미미하며 실제 운용에 영향을 미치지 않는다고 결론지었다.

표 5 계산 결과

	계산 시간 [s]	총 이동 거리 [km]
Run 1	55.0	5.06
Run 2	57.1	5.06
Run 3	56.6	4.97
Run 4	55.5	5.07
Run 5	59.2	5.04
평균	56.7	5.04
표준편차	1.5	0.03

결론

본 논문에서는 프로세스 플랜트에서 자율적인 로봇 운용을 실현하기 위한 운용 계획 수립 절차를 제안하고, 이와 관련된 계획 수립 기술의 개발 결과를 보고하였다. Yokogawa가 지향하는 산업 자율성(Industrial Autonomy)의 실현을 위해, 제안한 방법이 다양한 상황 변화에 유연하게 대응할 수 있을 만큼 낮은 계산량으로 실행 가능한 운용 계획을 수립할 수 있음을 확인했다. 최근 몇 년간 플랜트 현장에서는 인력 부족과 기술 전수가 중요한 문제로 대두되고 있다. 로봇 도입은 이러한 문제를 해결하기 위한 하나의 방법이며, 로봇의 기능이 지속적으로 발전함에 따라 현장에서 로봇이 수행할 수 있는 업무 범위도 더욱 확대될 것으로 예상된다. 이에 따라 로봇 운용을 관리하는 데 필요한 업무량과 현장 인력의 부담이 증가할 수 있다. 그러나 제안한 운용 계획 수립 기술을 적용하여 자율적인 로봇 운용을 실현함으로써, 플랜트 인력의 부담을 최소화하면서 로봇을 적용할 수 있는 운용 범위를 확대할 수 있다.

향후 자율적인 로봇 운용을 실현하기 위해서는 다음 두 가지 방향의 발전이 중요하다. 첫 번째는 플랜트 환경의 3D 모델링이다. 제안한 기술을 적용하기 위해서는 정확한 물리적 환경 정보가 필요하다. 플랜트 건설 당시의 도면을 활용할 수 있지만, 운전이 시작된 이후 설비가 교체되거나 추가 설치되면서 도면과 현재 현장 상태 사이에 차이가 발생할 수 있다. 이러한 경우에는 현재 현장의 실측 데이터를 기반으로 3D 모델을 구축함으로써 정확한 환경 정보를 생성할 수 있다. 두 번째는 설계된 동작을 기반으로 한 로봇 동작 제어이다. 현재의 로봇은 사전에 정의된 기능 범위를 벗어나 외부에서 설계된 동작을 수행할 수 있는 기능이 부족하다. 따라서 제안한 기술을 통해 설계된 동작을 로봇이 안정적으로 수행할 수 있도록 하는 동작 제어 기능이 필요하다. Yokogawa는 앞으로도 로봇을 통한 플랜트 운영의 실현을 위해 지속적으로 연구개발을 추진할 것이다.

REFERENCES

- (1) Ministry of Economy, Trade and Industry; Ministry of Health, Labour and Welfare; Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology, 2025 White Paper on Manufacturing Industries, <https://www.meti.go.jp/report/whitepaper/mono/2025/pdf/all.pdf>, (accessed 2025-7-22, in Japanese)
- (2) Tim Shea, "Robotics for the Process Industries Global Market Research 2023-2028," ARC Advisory Group, 2024
- (3) Yokogawa Electric Corporation, IA2IA- Industrial Automation to Industrial Autonomy, <https://www.yokogawa.com/solutions/featuredtopics/ia2ia/>, (accessed 2025-7-31, in Japanese)
- (4) Boston Dynamics, Inc., SPOT SDK, <https://dev.bostondynamics.com/>, (accessed 2025-7-31)
- (5) Mitsubishi Heavy Industries, Ltd., EX ROVR "ASCENT", the Autonomous, Explosion-proof, Plant Inspection Robot, <https://www.mhi.com/business/products-services/energy-environment/nuclear-power-generation/robot-mechatronics/explosion-proof-plantinspection-robot-ex-rovr>, (Accessed 2025-7-31)
- (6) Alaa Khamis, Ahmed Hussein, et al., "Multi-robot Task Allocation: A Review of the State-of the-Art," In: Cooperative Robots and Sensor Networks 2015, Springer, 2015, pp. 31-51
- (7) Mohamed Badreldin, Ahmed Hussein, et al., "A Comparative Study between Optimization and Market-Based Approaches to Multi-Robot Task Allocation," Advances in Artificial Intelligence, Vol. 2013, 256524, 2013
- (8) Brian P. Gerkey, Maja J. Mataric, "A Formal Analysis and Taxonomy of Task Allocation in Multi-Robot Systems," The International Journal of Robotics Research, Vol. 23, No. 9, 2004, pp. 939-954
- (9) Yuya Okada, Hiroki Sugawara, et al., "Feasibility-aware hierarchical task assignment for equipment inspection robots with heterogeneous work efficiency," Advanced Robotics, Vol. 39, No. 2, 2025, pp. 114-126
- (10) Masao Fukushima, Introduction to Mathematical Programming, New Edition, Asakura Publishing, 2011 (in Japanese)

* SPOT is a registered trademark of Boston Dynamics, Inc.* EX ROVR is a registered trademark of Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.

* ANYmal is a registered trademark of ANYBotics AG.* Gurobi Optimizer is a registered trademark of Gurobi Optimization, LLC.

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