

## 상황 및 작업지식 기반과 PDDL기반 협업 작업 계획에 관한 비교 실험

노명찬, 김중배

한국전자통신연구원

mcroh@etri.re.kr, jjkim@etri.re.kr

### A Comparative Experiment on Situation and Work Knowledge Base and PDDL-based Collaborative Work Plan

Roh Myung Chan, Kim Joong Bae

ETRI

#### 요 약

본 연구는 산업 현장에서의 협업 자동화를 목표로, 음료수 선별 및 적재 작업을 대상으로 상황 및 작업지식 기반 작업 계획과 PDDL 기반 작업 계획의 성능을 비교 분석하였다. 실험은 복수 장비-로봇 협업 환경에서 수행되었으며, 두 계획 방식이 작업 효율성, 유연성 측면에서 어떻게 상이한 결과를 도출하는지를 평가하였다. 그리고 상황 및 작업지식 기반 방식은 로봇의 현재 작업 상태를 실시간으로 반영하여 계획을 동적으로 조정하는 반면, PDDL 기반 계획은 사전에 정의된 도메인과 문제 정의에 따라 정형화된 계획을 수립하여 실행한다. 실험 결과, 작업 환경 변화나 예외 상황에 대한 대응력에서는 PDDL기반 계획이 더 높은 유연성을 보였으나, 작업 처리 속도와 효율성 측면에서는 상황 및 작업 지식 기반 계획이 우수한 성능을 나타냈다. 본 비교 실험은 협업 작업 계획 시스템 설계 시, 상황인지 중심의 유연성과 형식 언어 기반의 최적성 사이의 균형점을 고려할 필요성을 제시한다.

#### I. 서 론

최근 산업 자동화의 고도화와 함께 장비-로봇 협업 작업에 대한 관심이 증가하고 있다. 특히 제조, 물류, 식음료 산업 등에서는 반복적이고 단순하지만 예외 상황이 자주 발생하는 작업에 로봇을 투입함으로써 생산성 향상과 인력 부담 완화를 동시에 꾀하고 있다. 이러한 협업 환경에서는 단순한 자동 제어를 넘어, 로봇이 작업 상황을 이해하고 유연하게 계획을 조정할 수 있는 능력이 필수적이다.

기존의 작업 계획 시스템은 문제 정의를 기반으로 개발자가 계획을 생성하고 실행하는 방식이었다. 이 방식은 논리적 정확성과 계획 최적성 측면에서 강점을 가지지만, 작업 중 발생할 수 있는 예외나 환경 변화에 유연하게 대응하기에는 한계가 존재한다. 반면, 형식 언어 기반의 계획 언어, PDDL(Planning Domain Definition Language)은 사전에 정의된 작업 도메인과 문제 정의를 기반으로 정형화된 계획을 생성하고 실행한다.

본 연구는 이러한 두 계획 방식 간의 차이를 정량적으로 비교·분석하기 위해, 음료수 선별 및 적재 작업을 사례로 설정하고 복수 장비-로봇 협업 환경에서 실험을 수행하였다. 실험을 통해 작업 효율성, 유연성 등의 지표를 중심으로 성능을 평가하고, 각 방식이 어떠한 상황에서 더 효과적인지를 분석하였다.

실험 결과, 작업 환경 변화나 예외 상황에 대한 대응력에서는 PDDL 기반 계획이 더 높은 유연성을 보인 반면, 작업 처리 속도와 효율성 측면에서는 상황 및 작업지식 기반 계획이 더 높게 나타났다. 이로써, 협업 작업 계획 시스템을 설계할 때에는 상황 인지 기반의 유연성과 형식 언어 기반 계획의 최적성 사이의 균형점을 고려해야 함을 시사한다.

#### II. 본론

##### 1. PDDL 작업계획 언어

PDDL(Planning Domain Definition Language)은 인공지능(AI)에서 작업 계획(Planning) 문제를 모델링하는 데 사용되는 표준 언어이다.

상태 공간 탐색(State-space search)을 통해 주어진 목표를 달성하기 위한 행동을 계획하는 시스템에서 효율적이다. PDDL은 원래 1998년 국

제 계획 대회에서 사용하기 위해 개발되었으며, 현재는 AI 연구와 다양한 문제 해결에 널리 사용되고 있다. 작업계획을 위해서는 STRIPS(Stanford Research Institute Problem Solver), ADL(Action Description Language)와 같은 문법을 사용하여 “행동과 자원조건 등을 정의”하는 Domain과 “초기 상태와 목표 상태를 정의”하는 Problem 파일 정의를 통해 작업계획을 수행한다.

##### 2. 작업 대상 및 작업 시나리오

본 연구는 실제 산업 현장에서 자주 수행되는 음료수 선별 및 적재 작업을 실험 대상으로 선정하였다. 작업 시나리오는 복수 종류의 음료수를 컨베이어에 지정된 규칙에 따라 선별하고 적재하는 일련의 공정을 포함하며, 로봇과 장비 간 협력이 요구되는 구조로 구성되었다. 해당 작업은 선별 기준의 변경, 제품 누락, 장비 지연 등 다양한 변수가 존재할 수 있어 계획 시스템의 유연성과 효율성을 동시에 요구하는 특징을 가진다.

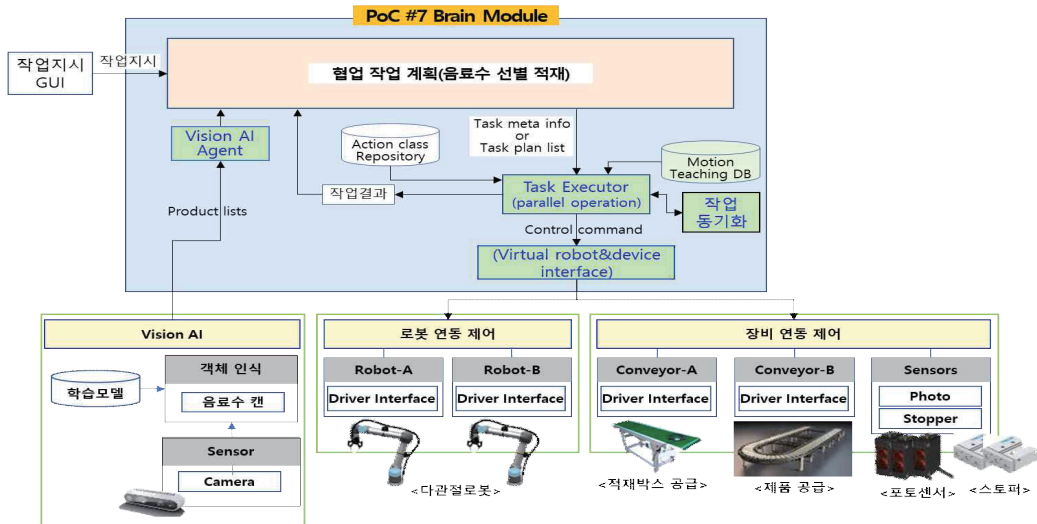
본 논문의 실험 검증을 위한 작업 대상물은 [1]에서 소개한 음료수 캔 3종류와 작업 대상물 인식을 위한 카메라로 Realsense D435를 사용하였다.

##### 3. 시스템 구성

###### 3.1 시스템 프레임워크

무작위로 공급되는 다종의 제품 선별 적재 작업을 위한 협업 작업은 작업 대상의 파지와 정해진 박스에 적재하는 단순한 과정의 반복으로 이루어진다. 이러한 단순한 과정의 작업을 반복 실행하기 위해서는 작업 파지 대상 결정과 로봇간 충돌 방식을 고려하면서 실행시간에 로봇의 작업을 계획하고 분배하여 로봇에 전달되어야 한다. 어떤 로봇이 어떤 제품을 파지할지에 대한 결정은 현재 로봇이 어떤 작업을 수행하고 있는지 현재 작업 상황 판단을 통해 결정된다.

또한, 무작위로 공급되는 다종의 제품 선별 포장 작업을 위한 협업 작업은 협업 작업 계획 방법에 따라 실행시간에 결정하고 로봇에 전달되어야 한다. 이러한 협업 작업 실행 프레임워크는 [그림1]과 같다.



[그림1] 협업 작업 계획 및 적재 실행 시스템 프레임워크

### 3.2. 협업 작업계획

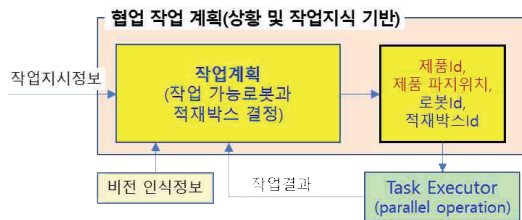
대상의 종류와 위치 변화가 없도록 그리퍼로 파지는 하지 않도록 하였다.

#### 3.2.1 상황 및 작업지식 기반 작업 계획

상황 기반 계획 시스템은 로봇의 현재 상태(작업 위치, 작업 단계, 센서 상태 등)와 실시간으로 수집되는 작업 환경 정보를 기반으로, 사전에 정의된 작업 지식(rule set)에 따라 다음 작업을 동적으로 결정하는 구조를 가진다.



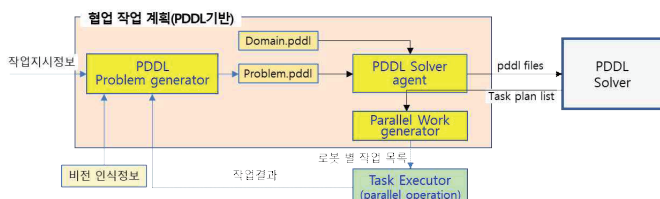
[그림4] 테스트베드 구성



[그림2] 상황 및 작업지식기반 작업 계획

#### 3.2.2 PDDL기반 작업계획

PDDL 기반 계획 시스템은 음료수 분류 작업을 위한 도메인(domain) 및 문제(problem) 정의를 포함한다. 도메인 파일에는 "이동", "집기", "적재" 등의 작업을 :action으로 정의하였으며, 문제 파일에서는 초기 상태와 목표 상태를 논리적으로 명시하였다. 계획 수렴은 Fast Downward와 같은 대표적인 PDDL 플레너를 사용하였으며, 계획 실행은 로봇 제어 시스템과 연동하였다. PDDL 기반 계획은 문제 정의를 해결하기 위한 입력 정보가 사전에 정의되어 있어야 하는데 본 논문에서 제시한 시나리오는 작업 대상이 무작위로 공급되기 때문에 문제 정의를 입력정보에 기반하여 실행시간에 작성되어야 한다.



[그림3] PDDL기반 작업계획

### III. 실험 결과 및 분석

본 논문에서 소개한 상황 및 작업지식 기반과 PDDL기반 협업 작업 계획은 모두 문제 해결에 대해 성공하였다. 다만, 작업계획을 수행하는 방법에서 차이가 발생하였으며, 본 논문에서 적용한 시나리오에 대해서 총 11종, 5회 반복 실험 결과 PDDL기반의 작업계획 보다는 상황 및 작업지식 기반으로 작업 계획을 수행하는 것이 작업 효율성 측면에서 높게 나타났다.

구분	상황 및 작업지식 기반	PDDL 기반
작업계획 방법	매 주기마다	PDDL Problem을 정의하여 계획하고 계획된 작업 목록만큼 일괄 수행
작업계획	11회	PDDL Solver 5회 수행
로봇작업	robotA: 6회, robotB: 5회	robotA: 7회, robotB: 4회
작업시간	5회 평균 3분 9초	5회 평균 4분 20초
주요 특징	<ul style="list-style-type: none"> <li>매 주기마다 계획하고 수행함으로써 로봇의 작업을 고르게 배분되어 특정 로봇에 집중될 가능성 낮음</li> <li>작업 계획을 위한 알고리즘을 개발자가 직접 구현</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Domain과 Problem 파일을 정의해 개발자가 작성</li> <li>입력 정보에 따라 특정 로봇에 작업이 집중될 가능성 높음</li> <li>작업 계획은 Domain과 Problem 파일 기반으로 PDDL Solver가 수행</li> </ul>

### ACKNOWLEDGMENT

본 논문은 스마트 제조혁신 기술 개발 사업에 따라 [RS-2023-00224053], 옛지 브레인 프레임워크 기반 장비.로봇 협업 기술 개발] 과제로 연구하였음.

### 참고 문헌

- [1] 노명찬, 김중배, '장비 및 복수 로봇을 이용한 협업 작업 시스템 프레임워크 연구', 2024년도 제5회 한국인공지능학회대회
- [2] 노명찬, 김중배, '장비\_로봇간 협업을 위한 작업 계획 및 분배에 관한 실험적 연구', 한국통신학회 2023년도 추계종합학술발표회

### 4. 테스트베드 환경 구성 및 실험

앞서 소개한 협업 작업계획 방법론 검증에 위하여 [1]에서 소개한 테스트베드 환경에서 실험하였으며, 실험 환경을 동일하게 하기 위하여 파지