

다품종 자율 수확을 위한 소프트웨어 정의 다기능 자율 로봇 시스템

이민석, 김성민, 조재민, 권진우, *김원태

한국기술교육대학교

alstjr7141@koreatech.ac.kr, sknumgoyo@koreatech.ac.kr, qweddw@koreatech.ac.kr,
chobblue95@koreatech.ac.kr, *wtkim@koreatech.ac.kr*

Software-defined multifunctional autonomous robot system for multi-variable autonomous harvesting

Min-Seok Lee, Seong-Min Kim, Jae-Min Cho, Jin-Woo Kwon, *Won-Tae Kim

Koreatech Univ.

요약

농업 인력 감소와 고령화로 인한 노동력 미달은 특히 과수 농가에서 생산성 저하를 초래하고 있다. 이에 따라 농업 자동화 및 과수 수확을 위한 자율 로봇 시스템이 등장하였다. 그러나 기존 시스템은 하드웨어 중심 구조로 개발되어 있어 환경 변화나 작업 확장에 대응하기 어렵다. 본 논문에서는 다양한 과수 품종의 수확 작업을 단일 로봇 플랫폼으로 수행할 수 있는 소프트웨어 정의 다기능 자율 로봇 시스템을 개념적으로 제안한다. 제안된 시스템은 대형 언어 모델을 활용해 사용자의 작업 요구를 해석하고, 실시간으로 인식된 농작업 환경에 따라 필요한 기능을 소프트웨어적으로 구성하여 로봇의 동작을 유연하게 제어한다. 이러한 소프트웨어 정의 접근은 과수 재배 환경의 다양성과 작업 요구 변화에 효과적으로 대응할 수 있는 기반을 제공하며, 농업 로봇의 확장성과 범용성을 향상시킬 수 있다.

1. 서론

국내 농업은 고령화와 인구 감소로 인해 심각한 인력 부족에 직면해 있다. 통계에 따르면, 농업 종사자 약 223만 명 중 65세 이상 고령 인구가 50%를 차지하며, 이러한 고령화와 인구 감소는 농작업 현장의 지속 가능성을 위협하고 있다 [1][2].

특히 과수 재배는 수확 시기가 단기간에 집중되고 인력 의존도가 높아 노동력 부족 문제가 더욱 심화되고 있다. 이러한 상황을 해결하기 위한 방안으로 과수 수확 자동화 기술이 지속적으로 논의되고 있으나, 과일은 품종별로 생육 조건과 수확 기준이 다양하여 기계화가 어렵고, 이로 인해 기술 구현이 제한적이다. 실제로 농촌진흥청은 과일 수확 자동화율이 5% 미만에 불과하다[3].

최근 지상형 로봇이나 드론 기반의 수확 시스템이 일부 등장하고 있으나, 이들 대부분은 특정 작물과 환경에 최적화된 하드웨어 중심 구조로 인해 경사 지형·장애물·하중 제한 등 다양한 조건에서 적용에 제약이 있으며, 작업 확장을 위해서는 구조적 개조가 필연적이다.

본 논문에서는 이러한 한계를 극복하기 위해 소프트웨어 정의 다기능 자율 로봇 시스템을 개념적으로 제안한다. 제안 시스템은 환경 인지, 기능 정의, 로봇 조작의 세 모듈로 구성되며, 대형 언어 모델을 통해 사용자의 작업 요구를 해석하고, 소프트웨어적 기능 조합으로 다양한 과업을 수행하도록 설계되었다.

이후 장에서는 제안 시스템의 구성 요소와 작동 방식, 기존 접근법과의 차별성과 기술적 이점을 논의한다.

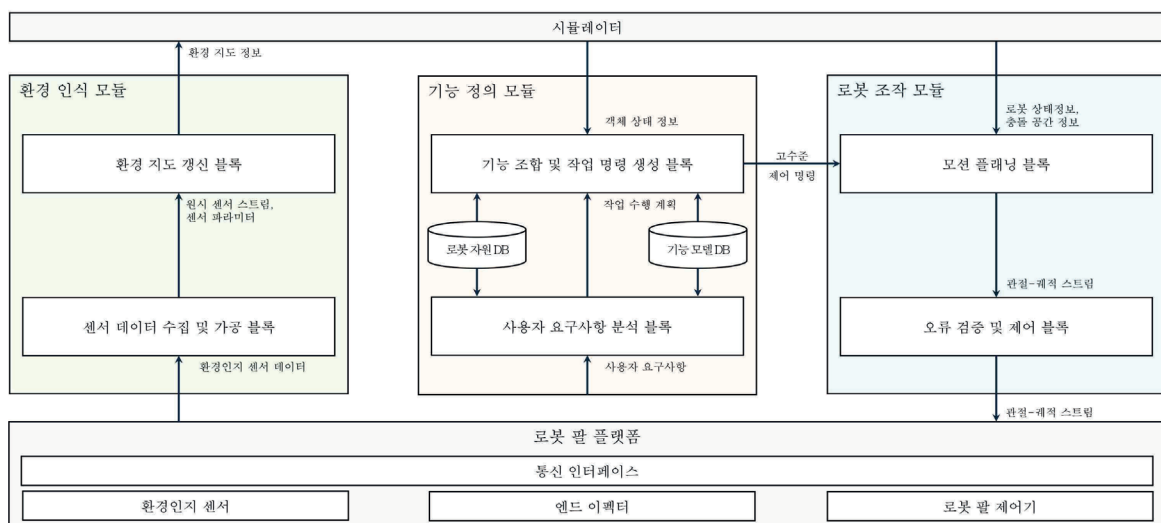


그림 1 소프트웨어 정의 다기능 자율 로봇 시스템

II. 본론

그림 1의 제안 시스템은 환경 인식 모듈, 기능 정의 모듈, 로봇 조작 모듈 세 부분으로 구성된다. 환경 인식 모듈은 RGB-D 카메라와 LiDAR 센서를 통해 작업 현장을 실시간으로 디지털 지도화한다. 기능 정의 모듈은 대형 언어 모델로 사용자의 요구를 분석하여 로봇이 처리할 수 있는 작업 명령으로 변환한다. 로봇 조작 모듈은 작업 명령을 바탕으로 로봇팔의 궤적을 계획·제어한다. 이하에서는 각 모듈의 세부 구성과 역할을 중심으로 제안 시스템의 작동 원리를 기술한다.

2.1 환경 인식 모듈

환경 인식 모듈은 로봇이 외부 세계를 실시간으로 인지하고 이해하는 역할을 수행한다. 센서 데이터 수집 및 가공 블록은 RGB-D, LiDAR 등의 다양한 환경 인지 센서로부터 실시간 데이터를 수집하고, 센서 간 캘리브레이션 및 노이즈 제거와 정규화를 통해 데이터를 정제한다. 이후 환경 지도 갱신 블록에서는 정제된 데이터를 기반으로 SLAM 기법을 활용하여 작업 공간의 디지털 트윈 지도를 생성하며, 생성된 지도는 시뮬레이터에 반영되어 가상 환경의 지속적인 업데이트에 사용된다[4]. 본 모듈은 실제 과수원의 형태, 작물 위치, 장애물 배치 등을 실시간으로 정확히 파악하여, 고정된 구조가 아닌 동적 환경 변화에도 즉각적으로 대응 가능한 기반을 제공한다.

2.2 기능 정의 모듈

기능 정의 모듈은 사용자 요구를 해석하여 필요한 작업 기능을 동적으로 조합하고, 이를 로봇 실행 명령으로 변환하는 역할을 한다. 사용자 요구사항 분석 블록은 자연어로 표현된 농작업 요청을 대형 언어 모델을 통해 해석한 뒤, 기능 모델 DB와 로봇 자원 DB를 연동하여 수행 가능한 기능 조합과 작업 시퀀스를 설계한다. 이 과정의 입력으로는 사용자 자연어 명령, 현재 환경 정보, 로봇 상태 정보가 포함되며, 출력으로는 로봇 조작 모듈에서 활용할 수 있는 고수준 작업 명령 집합이 생성된다.

기능 모델 DB는 다양한 과수 품종과 작업 조건을 포괄하는 범용 지식 기반 데이터베이스이다. 특정 품종이나 작업에 국한되지 않고, 과수 수확, 분류, 이동 등 하위 기능별 특화 모델을 저장하여 이를 조합함으로써 사용자의 요구에 부합하는 상위 작업 기능을 동적으로 생성할 수 있다. 로봇 자원 DB는 그리퍼 형상, 센서 장착 여부 등 로봇의 현재 상태 정보를 저장하며, 해당 정보를 바탕으로 로봇이 수행 가능한 기능과 제약 조건을 판단할 수 있는 기준을 제공한다.

기능 조합 및 작업 명령 생성 블록은 사용자 요구사항 분석 블록에서 해석된 작업 목적, 환경 정보, 기능 모델 DB·로봇 자원 DB의 참조 데이터를 입력으로 받아 로봇 동작 계획을 수립하고, 이를 고수준 제어 명령으로 변환하여 로봇 조작 모듈에 전달한다. 출력은 작업 명령, 동작 파라미터, 자원 할당 정보 등을 포함하는 순차적 또는 병렬적 실행 단위의 명령 집합으로 구성된다. 이를 통해 기존의 고정된 기능 정의 방식을 대체하여, 다양한 작업 목적에 따른 기능의 유연한 조합과 확장이 지원된다.

2.3 로봇 조작 모듈

로봇 조작 모듈은 생성된 작업 명령을 실제 로봇 동작으로 변환하는 역할을 하며, 모션 플래닝 블록과 오류 검증 및 제어 블록으로 구성된다.

모션 플래닝 블록은 수신된 작업 명령을 기반으로, 로봇의 상태와 작업 환경을 고려해 충돌 회피, 경로 최적화, 동작 안정성 등을 반영한 궤적을 계산한다. 이 과정에서 운동학 제약, 우선순위, 장애물 정보 등을 반영하며,

결과는 시간 축에 따라 제어 명령으로 변환된다.

계산된 궤적은 오류 검증 및 제어 블록으로 전달되어 센서 데이터를 바탕으로 적절성을 확인하고, 실시간 오차 보정을 통해 목표 동작을 정확히 수행하도록 한다. 비정상 상황이 감지되면 안전 정지나 재계획을 통해 시스템 안정성을 확보한다. 또한, 제안한 시스템의 동작 흐름을 점검하기 위해 사과 모형 기반의 수확 테스트를 수행하였다. 그림 2는 로봇 팔이 실제 환경을 모사한 테스트베드에서 모형 과일을 인식하고 수확 동작을 수행하는 모습을 보여준다. 이를 통해 각 모듈 간 연계성과 명령 실행의 타당성을 검토할 수 있었다.

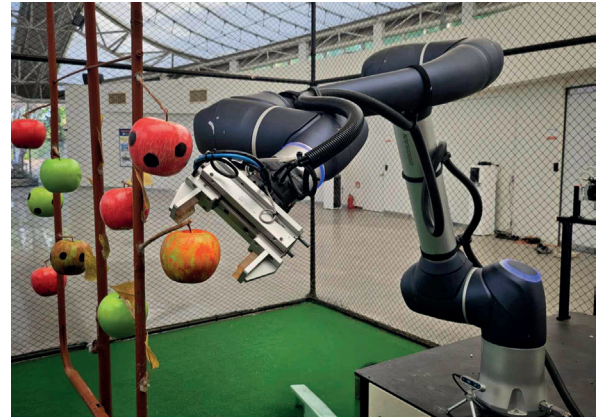


그림 2 제안 시스템 기반 자율 수확 장면

III. 결론

본 논문에서는 과수 수확 작업의 유연성과 확장성 문제를 해결하기 위한 방안으로, 소프트웨어 정의의 다기능 자율 로봇 시스템을 개념적으로 제안하였다. 제안된 시스템은 환경 인식, 기능 정의, 로봇 조작의 세 모듈을 통해 실시간 정보 기반의 작업 계획 수립과 실행이 가능하도록 설계되었으며, 대형 언어 모델과 데이터베이스 기반 기능 조합 구조를 통해 다양한 과수 품종과 작업 조건에 유연하게 대응할 수 있는 기반을 제공한다.

또한, 제안 아키텍처의 타당성을 점검하기 위해 실제 사과 모형을 활용한 수확 테스트를 수행하였으며, 이를 통해 각 모듈 간 연계성과 제어 흐름의 실행 가능성을 간접적으로 확인하였다.

향후에는 제안 시스템의 하드웨어 통합 및 실제 과수원 환경에서의 실증 실험을 통해 실효성을 검증하고, 다양한 재배 조건에 적응 가능한 맞춤형 자동화 솔루션으로의 확장을 모색할 계획이다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원-대학ICT연구센터(ITRC)의 지원을 받아 수행된 연구임 (IITP-2025-RS-2021-II211816)

참 고 문 헌

- [1] 통계청, “2022년 농림어업총조사,” 통계청, 2023
- [2] 통계청, 『장래인구추계: 2022~2072』, 세종: 통계청, 2022.
- [3] 농촌진흥청, “농업기계화 촉진 종합계획,” 농촌진흥청, 2021.
- [4] Cadena, C. et al., "Past, Present, and Future of Simultaneous Localization and Mapping: Toward the Robust-Perception Age," IEEE Transactions on Robotics, 2016.