

# 디지털 농업을 위한 양팔 농업용 로봇의 기술개발 동향 및 적용 분야

## Trends and Applications of Dual-arm Agricultural Robot for Digital Agriculture

조유성, 박용현, 김창조, 손형일

(전남대학교 융합바이오시스템기계공학과)

### Abstract

이 논문에서 디지털 농업을 위한 양팔 농업용 로봇의 기술 동향과 적용 분야를 문헌 검토한다. 양팔 로봇 시스템은 비정형적인 농업 환경에서 인간의 양팔 협동 동작을 모방하여 복잡한 작업을 수행할 수 있는 잠재력을 지니며, 이에 대한 연구와 관심이 증가하고 있다. 본 논문에서 문헌 분석을 통해 양팔 로봇의 주요 적용 작업, 제어 메커니즘, 그리고 관련 기술적 과제를 체계적으로 조사한다. 특히, 폐색과 공간적 제약 문제를 효과적으로 해결하고 전정, 수확 등에서 작업 효율성을 높이는 양팔 매니플레이션의 장점을 강조한다. 또한, 농업에 특화된 로봇 플랫폼, 엔드이펙터 설계, 제어 전략 등의 발전 현황과 농업 환경에서의 활용 가능성을 다룬다. 이 논문은 양팔 농업용 로봇 연구자들에게 최신 기술 동향과 실질적인 문제 해결 방안을 제공하며, 향후 연구 우선순위와 디지털 농업의 생산성 및 효율성 향상을 위한 로봇 시스템 통합 방향성을 제시한다.

### I. 서론

단순한 환경 내의 반복적인 작업의 로봇 기반 자동화는 이미 성공적으로 수행되었다. 그다음 단계로서, 제조, 물류, 농업, 개인 서비스 등 광범위한 분야의 산업을 중심으로 비정형적 환경에서 반복되지 않는 임무를 수행하는 로봇 연구가 활발하게 수행되고 있다[1-5]. 이 중 두 개의 매니플레이터를 기반으로 하는 인간과 유사한 로봇은 복잡한 환경 및 작업에서 인간의 행동을 모사하여 임무를 수행할 수 있을 것으로 기대가 되고 있다[6]. 이러한 양팔 로봇을 다루기 위해 단일 매니플레이터에서는 다루어지지 않았던 높은 단계의 제어, 모션 계획 및 추론 기술을 고려하여야 한다[7,8]. 가정 환경에 배치되는 개인 서비스용 양팔 로봇인 ARMAR-III는 취성 재료로 구성된 접시를 양팔

로 파지하거나 다른 로봇에게 건네줄 수 있다[9]. 이 적용 분야에서 양팔 협조 제어(coordinated control), 접시의 질량 중심 변화에 따른 재파지(regrasph) 기술이 적용되어 있다. 이렇듯 효과적인 양팔 로봇의 개발을 위해서 로봇을 통해 다루고자 하는 임무에 대해 세심한 조사가 필요하며 그에 적합한 높은 단계의 시스템 통합과 제어가 선행되어야 한다[10,11].

농업 환경은 다양한 강성으로 구성된 물체가 밀도 있게, 비정형적으로 구성되어 있다. 이러한 환경에서 로봇은 인식과 제어에 문제가 발생할 수 있다[12]. 예를 들어 앞과 가지에 의해 로봇 FOV (Field of View) 내 다수의 물체가 중첩된 경우, 물체가 가려지는 폐색(occlusion) 뿐만 아니라 로봇 역기구학적(inverse kinematics) 해가 없는 상태에 도달할 수 있다[13]. 이 문제를 해결하기 위해 매니플레이



터의 모션 계획을 개선하는 방법과 과실의 폐색된 영역을 복원하는 기술이 연구되고 있으나[14-16] 완전히 통합된 로봇으로 실제 환경에 투입된 사례는 거의 없다. 그림 1에 도시되어 있듯, 이러한 과실 폐색이나 모션 계획의 어려움은 양팔 매니플레이션을 통해 효과적으로 다루어질 수 있다[17].

표 1은 양팔 매니플레이션의 계층 분류 구조를 나타낸다. 이 표의 계층 분류 구조에 따르면, 로봇이 접근하기 어려운 위치의 과실을 수확하기 위해 인간과 유사한 방식으로 한 팔은 가지를 파지하고 치우는 작업을 수행, 다른 팔은 쉬운 역기구학적 해를 수행함으로써 과실의 줄기를 절단하는 작업을 수행하는 것을 기대할 수 있다. 다수개의 매니플레이터 협력을 포함하여 양팔 농업용 로봇에 대한 연구가 활발하게 수행 중이나 개별 기술로서 평가되거나, 랩 환경과 같은 제한적인 환경에서 평가되었다.

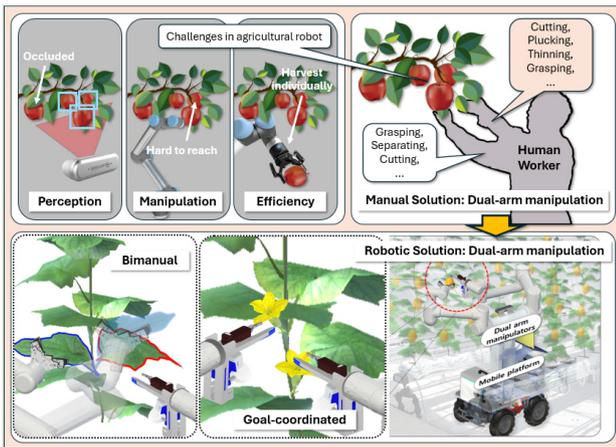


그림 1. 인간의 방식과 유사하게 작업을 수행할 수 있는 양팔 농업용 로봇의 개념.

표 1. 양팔 로봇의 계층적 제어 전략[17].

Dua-arm manipulator		
Un-coordinated	Coordinated	
	Goal-coordinated	Bimanual
Example: The left arm is palleting parts while the right arm is welding an unrelated scam.	Example: Both arms are palleting parts into the same box.	Example: Both arms are lifting and moving the same box full of parts.

실용적인 양팔 농업용 로봇을 개발 및 배치하기 위해서 여전히 해결해야 할 문제가 산재해 있다. 양팔 농업용 로봇의 주요 기술로서 이중 작업 공간, 자기 충돌(self colliding), 협력적 경로 계획, 작업 분할 및 협조제어, 엔드 이펙터, 인식, 위치추정 및 내비게이션 등 수많은 기술이 필요하다. 또한 농업 임무에 적합한(task-specific) 설계, IoT 기술, 햅틱(haptics) 및 멀티모달(multimodal) 제어, 다양한 추가 센서 등 목적과 임무에 따라 다양한 기술이 요구된다. 양팔 농업용 로봇의 모든 적용 기술을 다루기에는 너무 방대하므로, 본 논문에서는 다음과 같은 관심 기술 관점을 지정하고 문헌 검토를 수행한다.

관점 1: 어떤 양팔 농작업이 문헌에서 고려되었나?

관점 2: 어떤 양팔 농업용 로봇 플랫폼이 사용되었나?

관점 3: 양팔 농업용 로봇이 어떻게 제어되었나?

관점 4: 양팔 농업용 로봇에 어떠한 문제와 과제가 남았나?

본 논문에서 양팔 농업용 로봇의 성공적인 연구 개발을 위해 최신 문헌에 대한 체계적인 조사를 수행한다. 이 조사에서 앞서 정의한 관점에 따른 개발 단계, 상용화 과제, 그리고 미래 전망에 대한 검토와 토의를 포함한다. 본 논문에서 양팔 농업용 플랫폼, 제어 메커니즘 및 농업 응용 분야의 최신 문헌에 대한 상세한 검토를 제공하는 동시에 향후 연구 우선순위를 파악하는 것을 목표로 한다. 이 문헌 검토를 통해 양팔 농업 로봇의 최신 개발을 체계적으로 비교 분석함으로써 연구자가 유용한 플랫폼과 제어를 식별하고 효과적인 로봇 시스템을 개발하는 데 필요한 기술을 발전시키는 데 도움이 되기를 기대한다.

## II. 농업 작업

양팔 농업용 로봇의 최신적용 분야를 문헌 검토하는 것은 농업 작업 모델링, 로봇 설계 및 제어하기 위한 첫 단계이다. 이 섹션에서 양팔 로봇이 수행하는 농업 임무를 문헌검토한다. 이 단계에서 표 1에 따른 각 작업의 특성과

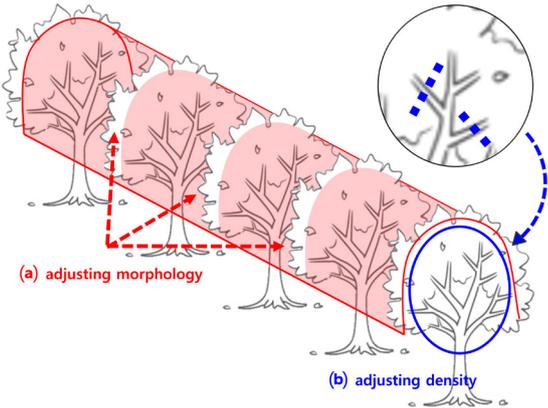


그림 2. 대표적인 전정 방법: (a) 형태 조정, (b) 밀도 조정.

분류에 대해 간략하게 검토한다. 또한 최첨단 기술 및 적용 분야의 주요 과제와 한계를 규정하고, 향후 연구를 위한 건설적인 방향을 제안한다. 표 2는 대표적인 작업별 양팔 농작업 로봇을 나타낸다.

### 1. 전정

전정은 식물의 구조를 유지하고 수확량과 성장을 늘리거나 질병 위험을 줄이기 위해 가지를 잘라내어 식물을 다듬는 것을 의미한다[18,19]. 이때 매니플레이터는 적절한 위치와 방향으로 가지에 도달할 수 있어야 하며, 어떤 가지를 잘라야 할지 결정할 수 있어야 한다[20]. 그림 2는 일반적인 전정 방법을 소개한다. 그림 2(a)는 주로 식물의 형태를 다듬는 데 초점을 맞추고 있는 반면, 그림 2(b)는 가지의 구성 밀도를 조정하는 방법을 나타낸다. 두 방법의 주요 차이점은 어떤 가지를 절단할지에 대한 결정을 내리는 방식에 있다. 밀도 조정 방식은 대부분의 가지를

식별한 다음 적절한 절단 지점을 결정해야 하는 반면, 형태 조정 방법은 고려 사항이 적고 더 쉽게 구현할 수 있다. 그러나 가지치기의 목표를 고려할 때 형태 조정보다 가지 밀도 조정을 우선시해야 한다.

그럼에도 불구하고 가지 밀도 조정에는 인식과 제어라는 두 가지 주요 과제가 남아있다. 두 과제 모두 가지가 중첩되고 성장 패턴이 비정형적이기 때문에 발생한다. 첫째로 인식의 관점에서, 중첩된 가지는 효과적인 절단 지점을 식별하기 위한 로봇 인식을 저해할 수 있다. 둘째로, 불규칙한 성장 패턴으로 인해 로봇 모션 제어에 문제가 발생하여 운동학적 특이점(singularity)이나 실행 불가능한 동작 계획으로 이어질 수 있다. 이러한 과제는 양손 작업(예: 파지 및 절단)을 통해 효과적으로 해결할 수 있다.

Korayem 등[21]은 중첩되거나 가려진 가지를 가지치기 위한 양팔 농업용 플랫폼 및 시스템 동역학을 제안하였다. 제안된 모델링에서 라그랑주 승수 계산을 피하는 방식으로 고고도의 나무 가지치기와 관련된 비홀로노믹 제약 조건을 해결한다. Nekoo 등[22]은 잎 샘플링을 위한 경량 양팔 협동 매니플레이터를 제안하였다. 각 매니플레이터는 각각 잎 파지를 위한 엔드 이펙터와 잎 절단을 위한 엔드 이펙터로 구성되어 잡고 자르는 작업을 수행할 수 있도록 하였다. 이러한 이중 엔드 이펙터는 인간의 잡고 자르는 동작을 모사할 수 있도록 구성되었다. Wu 등[23]은 찾임을 인식하고 가지를 절단하기 위한 양팔 농업용 플랫폼 및 딥러닝 기반 찾임 줄기 위치추정 프레임워크를 제안하였다. 구성된 프레임워크는 목표 찾임을 다수 포함하는 줄기의 3D 좌표를 인식하여 로봇의 모션 계획에 활용하였다.

표 2. 작업별 양팔 농작업 로봇.

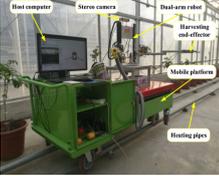
농업 작업	전정	적과&수확	운송	방제	파종
플랫폼					
Reference	Nekoo 등[22]	Ling 등[24]	Wang 등[26]	Katode 등[28]	Pramod 등[29]



그림 3. 수확 작업에서 양팔 협동 전략: 파지 및 수확[38].



그림 4. 수확 작업에서 임무 병렬 수행 전략: 동시 수확[25].

## 2. 적과 및 수확

밀도 높고 비정형적인 환경에서 단일 팔 로봇은 폐색, 동작 계획 및 운영 효율성과 관련된 문제를 마주한다. 그러나 인간은 양팔 협업을 통해 문제를 효과적으로 극복할 수 있다. 인간은 협조 동작을 활용하여 복잡한 공간적 제약을 관리하고 폐색에 동적으로 대응한다. 수확 작업은 이러한 양팔 협조 동작과 동적 대응의 이점이 직접 적용되는 분야이다. 여기에는 효율적인 과실의 영양분 분배를 위해 과실의 개수를 조정하는 적과 작업을 포함한다. 인간의 양팔 협업 방식을 모사함으로써 로봇 시스템은 비정형적 환경을 더 잘 탐색하고 작업 효율성을 개선하며 단일 팔 작업에 내재된 한계를 해결할 수 있을 것으로 기대한다. 예를 들어 과실이 잎이나 가지와 같은 장애물에 의해 가려지면 한쪽 팔을 할당하여 장애물을 잡거나 치워 로봇의 인식을 개선할 수 있다(표 1의 양팔 협동 전략: bimanual, 그림3). 이와 반대로, 로봇 수확의 효율성을 높

이기 위해 두 팔에 동일한 엔드 이펙터를 사용하여 수확을 동시에 수행할 수 있다(표 1의 임무 병렬 수행 전략: goal-coordinated, 그림 4).

Ling 등[24]은 온실 환경 내 토마토 수확을 위한 양팔 협동 수확 로봇을 제안하였다. 제안된 로봇 시스템은 양팔 협동 전략 수행을 위해 절단용 엔드 이펙터와 석션 컵 기반의 그리퍼를 각각 탑재하였다. 이러한 양팔 이중 엔드 이펙터는 작물을 잡고 분리하는 작업을 효율적으로 수행하는 데 기여한다[38]. 로봇의 수확 모션 계획은 스테레오 카메라의 시각 정보와 통합되어 10mm 미만의 제어 오차 내에서 수확할 수 있다.

Yoshida 등[25]은 사과 및 배 수확 자동화를 위한 임무 병렬 수행 전략의 양팔 로봇 시스템을 제안하였다. 과실 인식, 위치 추정, 다수의 RGB-D 카메라의 정보 통합, 역기구학 및 경로 계획의 5가지 핵심 단계로 구성되어 있다. 과실 인식 시스템은 폐색 및 다양한 광 강도와 같은 까다로운 야외 조건에서 강한 과실 감지를 위한 딥러닝 프레임워크를 사용하였다. 로봇의 모션 계획은 샘플링 기반으로 하는 고속의 모션 계획 기술을 활용하여 로봇이 충돌 없이 작동할 수 있다.

## 3. 운송

운송은 농업을 포함한 다양한 산업 분야에서 여전히 노동 집약적인 작업으로, 효율성과 자동화가 중요한 과제로 대두되고 있다. 특히, 여러 물체가 적재된 상자를 옮길 때 무게 중심이 변하는 문제는 운송 작업에서 흔히 발생하며, 이를 효과적으로 처리하는 것이 핵심이다. 단일 팔 로봇 플랫폼에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 모델 예측 제어(model predictive control)나 ZMP (Zero Moment Point) 제어와 같은 기법이 자주 사용된다. 그러나 양팔 운송 로봇의 경우, 양팔 협력을 통해 질량 모멘트의 변화를 효과적으로 관리하는 것을 기대할 수 있다. 양팔 운송 로봇의 추가 고려사항으로, 양팔 운송 로봇은 표면이 섬세한 농작물을 다루기 때문에 정교한 힘 제어와 연질의 그리퍼를 활용하여 작물의 표면에 상처를 내지 않고 다룰 수 있어



야 한다.

Wang 등[26]은 농업 환경과 같이 복잡한 지형에서도 작업이 가능한 모듈형 양팔 물류 시스템을 제안하였다. 제안된 양팔 물류 시스템은 광전자 스위치를 기반으로 수확 로봇과 협업하고 물류 이송할 수 있도록 설계되었다.

Kim 등[27]은 양팔 로봇의 심층 모방 학습(deep imitation learning)을 통해 섬세하고 변형 가능한 물체를 양팔로 다룰 수 있는 시스템을 제안하였다. 그림 5와 같이 제안된 시스템은 전역(global) 및 지역(local)의 이중 네트워크를 통해 모션 및 로봇 궤적 계획을 두 단계로 구성하였다. 전역 네트워크는 로봇 모션의 전체적인 계획을 담당하며 지역 네트워크는 연약한 물체에 근접하여 섬세한 제어가 필요한 경우 사용된다. 이러한 두 네트워크 사이의 적절한 전환을 통해 표면이 연약한 물체를 양팔로 다룰 수 있다. 제안된 프레임워크는 바나나 껍질 벗기기 시나리오에 대해 평가되었다.

#### 4. 그 외의 작업

이 절에서는 앞서 다루었던 전정, 적과, 수확 및 운송 외에 최근 연구에서 다루어졌던 양팔 농업 작업(방제 및 파종)을 다룬다. 방제와 파종은 농업에서 중요한 작업이지만, 복잡한 양팔 협력이나 폐쇄, 모션 계획 등과 같은 작

업 제약에서 비교적 자유롭다. 이 특성은 모니터링이나 샘플링과 같은 유사한 농작업에도 적용될 수 있다. 하지만 이 작업에서 작업 효율성은 여전히 중요한 문제로 남아 있다. 이를 해결하기 위해 여러 로봇 팔이 동일한 작업을 동시에 수행하도록 하여 로봇의 처리량을 향상시키는 방법이 사용되었다. 이 절에서는 농작업 동시 실행의 가능성을 논의하기 위해 양팔 로봇을 활용한 방제 및 파종 작업에 대해 문헌 검토한다.

Katode 등[28]은 두 개의 노즐이 장착된 양팔 방제 플랫폼을 제안하였다. 구성된 플랫폼에서 저자들은 제거기, 양액 분무기, 센서 시스템에 대한 실용적인 고려를 수행하여 높은 신뢰도의 양팔 농업용 플랫폼을 설계하였다. 제안된 플랫폼을 통해 다수의 방제 목표에 대해 양팔 동시 작업을 수행하여 시간 효율적인 방제를 수행할 수 있을 것으로 기대한다. Pramod 등[29]은 두 개의 PR (Prismatic-Revolute) 매니플레이터로 구성된 양팔 파종 로봇을 제안하였다. 구성된 로봇은 경운 모듈, 파종 모듈, 습도 센서 기반 급수 모듈, 주행 모듈로 하위구성 되어있다. 제안된 로봇은 운동학적, 정적, 동적 분석을 포함하여 양팔 메커니즘의 시간 이력(time history) 분석을 수행하여 설계의 효율성과 신뢰성을 확인하였다.

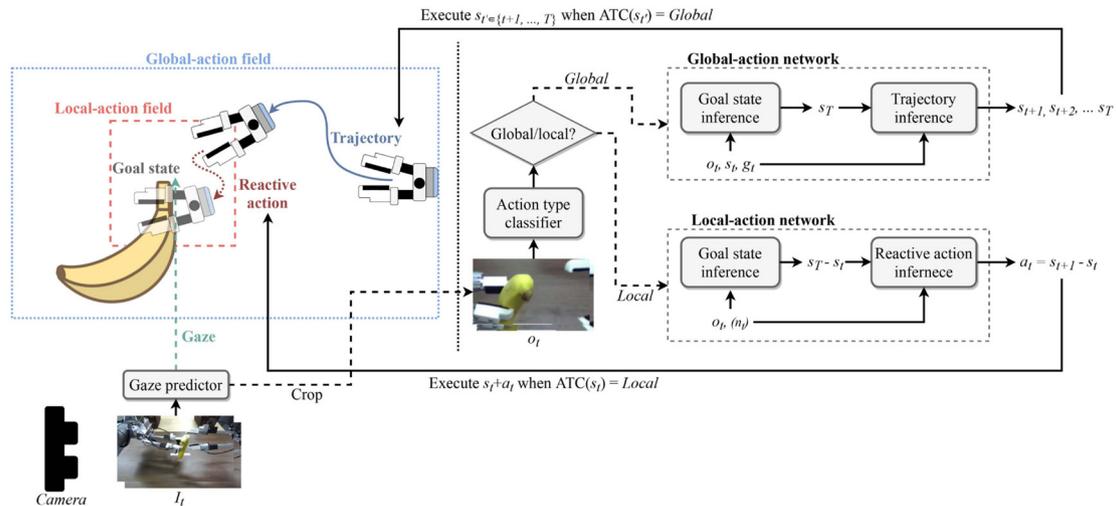


그림 5. 전역 및 지역 네트워크로 구성된 계층적 심층 모방 학습 프레임워크[27].

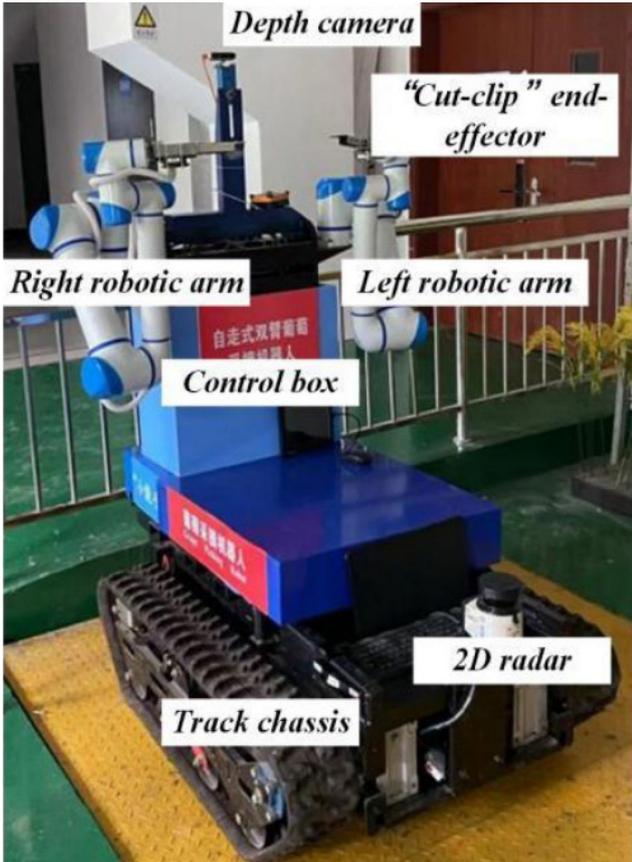


그림 6. 양팔 농업용 로봇의 기반 플랫폼: UGV [30].

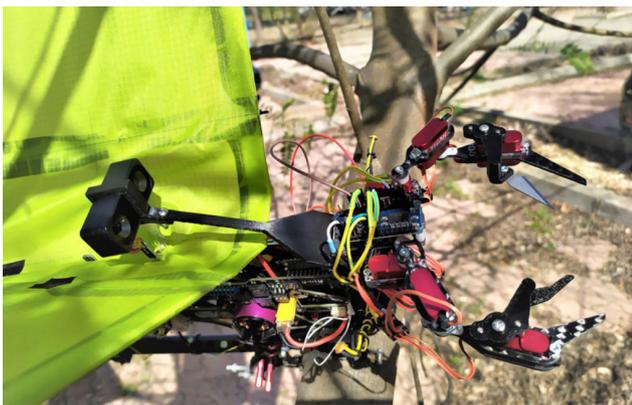


그림 7. 양팔 농업용 로봇의 기반 플랫폼: UAV [22].

### III. 농업 플랫폼

이 섹션에서는 기반 플랫폼인 UGV (Unmanned Ground Vehicle), UAV (Unmanned Aerial Vehicle), 다중 매니플레이

터 등 농업 작업에 사용되는 다양한 기본 플랫폼을 검토한다. 또한 이러한 로봇 플랫폼의 필수 구성 요소인 농작업 그리퍼와 활용된 센서를 다룬다.

#### 1. 기반 플랫폼

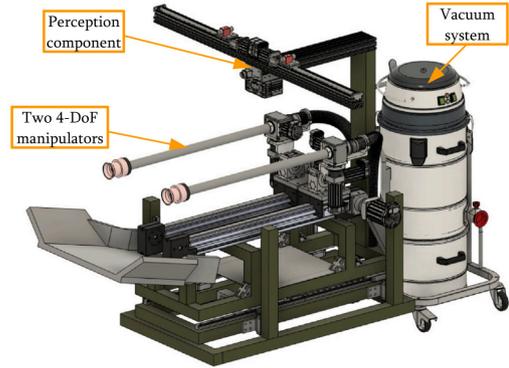
이 문헌 검토에서 기반 플랫폼을 이동성(mobility)을 목적으로 작동하도록 설계된 플랫폼으로 정의한다. 농작업은 광범위한 작업 영역을 가지며 로봇이 투입될 경우 이동성이 요구된다. 또한 기반 플랫폼은 안정성, 작업 효율성, 작동 가능 시간 등 작업별 요구 사항을 충족하도록 선택해야 한다. 농업 환경에서 이 요구 사항을 충족시킬 수 있는 대표적인 기반 플랫폼으로서 UGV와 UAV가 선택된다. 이 장에서는 다중 매니플레이터의 이동성을 개선시키기 위한 목적으로 사용되는 기반 플랫폼에 초점을 맞추어 플랫폼 선택에 영향을 미치는 요인을 강조한다.

UGV는 긴 작업 시간, 높은 가반 하중 및 안정성을 이유로 지상에서 수행되는 대부분의 산업에서 적합한 기반 플랫폼이다. 특히 주행 구조에 따라 궤도형과 차륜형으로 구분할 수 있다. 이러한 주행 구조는 로봇이 주행하고자 하는 지형 조건에 따라 선택될 수 있다. Jiang 등[30]은 과실 수확을 위해 그림 6과 같은 단안 양팔 로봇을 제안하였다. 이 로봇은 지면이 토양으로 구성된 수평 격자 재배 환경에 배치되는 것을 목표로 궤도형 차체를 기반 플랫폼으로 사용하였다. 궤도형 플랫폼은 차륜형에 비해 노지 농업 환경에서의 로봇 기동성과 가반 하중이 높다는 이점이 있지만 연구된 수는 많지 않다. 이와 대조적으로, 높은 적응성을 기반으로 토양 주행을 포함한 대부분의 연구가 차륜형 기반 플랫폼으로 연구가 수행되고 있다. 토양 주행에서의 슬립이나 토양 다짐(compaction) 등이 농업 분야에서 자세히 다루어지고 있는 문제이나 이러한 농작업 기계적 특성은 본 논문의 관심 영역을 벗어나 다루지 않는다.

UAV는 농업 환경 내 넓은 작업 영역, 높은 유연성 및 기동성 등으로 각광받고 있는 플랫폼이다. 그러나 UGV에 비해 비교적 짧은 작업 시간, 낮은 가반 하중 및 안정성은 여전히 해결해야 할 과제이며 특히 양팔 농업용 로봇의



(a)



(b)

그림 8. 양팔 농업용 로봇의 엔드 이펙터: (a) 이중 엔드 이펙터 및 양팔 협동 전략[36], (b) 동중 엔드 이펙터 및 임무 병렬 수행 전략[33].

경우 비교적 가벼운 물체를 다루는 등 그 사용범위가 제한적이다. 그림 7의 Nckoo 등[22]은 잎 샘플링을 적용 분야로 가반 하중이 500g인 직선익 오니토프터(ornithopter) UAV에 탑재하기 위한 94.1g의 경량 양팔 매니플레이터를 제안하였다. 또한 Liu 등[31]은 UAV를 기반 플랫폼으로 아보카도 수확을 위해 자중이 5.36kg인 양팔 로봇을 제안하였다. 이렇듯 UAV를 기반 플랫폼으로 하는 양팔 농업용 로봇은 가반 하중에 의해 크게 제한되며 이러한 문제는 실적용을 위해 필수로 해결해야 할 과제이다.

## 2. 양팔 매니플레이터

매니플레이터는 링크와 관절로 이루어진 계층적 구조를 가지며, 이를 통해 선형 및 비선형 궤적을 생성할 수 있다. 이러한 링크와 관절의 종류 및 조합에 따라 매니플레이터의 자유도(degree of freedom, DOF) 및 구성(configuration)이 결정된다. 자유도 및 구성은 로봇이 독립적으로 제어할 수 있는 운동 방향의 수를 결정하며, 작업 공간 내 유연성 및 복잡성과 관련된 중요한 요소이다. 밀집되고 비정형적인 환경에서 높은 자유도의 로봇은 복잡한 모션 및 궤적 계획이 가능하다는 장점이 있지만 구조가 복잡해짐에 따라 작업공간 내에서 역기구학적 비효율성이나 불필요한 링크 움직임이 발생할 수 있다. 이 한계는 양팔 로봇 시스템의 경우 자기 충돌 등의 문제(이후, 4장 1절에서 다룸)로 확대될 수 있다. 이러한 이유로 작업에 따라 적절한 로봇의 자유도 및 구

조를 선택하는 것이 효율적 로봇 설계를 위해 필요하다.

가장 범용적인 다관절 로봇(anthropomorphic robot)은 인간 팔과 유사한 구조로 유연한 움직임이 가능하다. 이 매니플레이터는 복잡한 농업 환경에서 임무를 수행하기에 적합한 궤적과 모션을 생성할 수 있다. 상기한 장점으로 인해 많은 수의 연구가 다관절 로봇을 기반으로 수행되었다. 그러나 다수의 링크 및 조인트로 구성되어 정방향 기구학(forward kinematics)이 상대적으로 복잡하여 모션 실행에 공간 효율성이 낮다는 단점이 존재한다. 더 나아가, 앞선 단락에서 설명한 자기 충돌 및 복잡한 모션 계획, 환경과의 로봇 충돌 등의 문제로 이어질 수 있다. 이를 해결하기 위해 Li 등[32], Lammers 등[33], Xiong 등[34], Zahid 등[35]은 직교 로봇(cartesian robot)을 로봇 시스템에 활용하였다. 직교 로봇은 큰 크기와 운동 범위가 제한된다는 명확한 문제가 존재하지만 자기 충돌에 비교적 자유로우며 모션 계획이 간단하고 농업 환경과의 충돌 가능성이 낮다는 명확한 이점이 있다. Ling 등[24], Wang 등[26], Zhao 등[36]은 작업 공간 및 높이가 정규화된 시설 농업 내의 작물을 수확하기 위해 스카라 로봇(SCARA robot)을 활용하여 로봇 크기를 최소화하였으며 평면상의 빠른 속도와 높은 반복 정밀도를 확보하였다.

## 3. 엔드이펙터

엔드이펙터는 로봇의 팔 끝단에 부착되어 작업을 수행



하는 장치로 농업용 양팔 로봇의 기본 모듈이다. 엔드이펙터의 사양은 각 작업의 요구 사항(예: 크기, 힘 및 토크, 물체의 강성)에 따라 조정되어야 한다. 양팔 로봇에서는 다수개의 엔드이펙터가 사용되며, 엔드이펙터들의 구성이 동종 혹은 이종일 수 있다. 이러한 구성은 표 1에서 앞서 정의한 제어 전략을 따르는 경향이 있다. 예를 들어, 두 팔이 공통 목표를 향해 서로 다른 작업을 수행할 때(양팔 협동 전략, bimanual) 로봇의 엔드이펙터는 이종으로 구성될 수 있다. 반면에 두 팔이 동시에 동일한 작업을(임무 병렬 수행 전략, goal-coordinated) 수행할 때 로봇의 엔드이펙터는 동종일 수 있다. 다음에서 각 제어 전략에 따른 사례들을 이종 및 동종성을 중심으로 소개한다.

양팔 협동 전략은 두 팔이 서로 다른 작업을 수행하면서 공통의 목표를 달성하는 방식이다. 그림 8(a)와 같이 각각의 제어 전략에서 효율적인 작업을 위해 각 작업에 맞는 이종 엔드이펙트가 필요하다. Pramod 등[29]은 한쪽은 경운 엔드 이펙터, 다른 한쪽은 파종 엔드 이펙터를 사용하여 작업을 수행한다. Stavridis 등[37,38]은 포도 양팔 수확을 위해 한 팔은 작물을 고정 및 파지하기 위한 그리퍼, 다른 한쪽 팔에는 줄기 절단 엔드 이펙터를 장착하였다. Zhao 등[36]과 Ling 등[24]은 양팔 토마토 수확을 위한 석션 그리퍼와 톱 절단 엔드이펙터로 시스템을 구성하였다. Ling 등[31]은 줄기를 고정시키는 고정 모듈과 작물을 잡고 수확하는 그리퍼를 이용하여 아보카도를 양팔수확하였다. Gursoy 등[39]은 한 팔이 작물을 절단하고 다른 팔은 수집하는 엔드이펙터를 사용하여 오렌지를 수확하였다.

임무 병렬 수행 전략은 두 팔이 동일한 작업을 동시에 수행하여 작업의 효율성을 극대화한다. 이 전략에서 엔드이펙터는 그림 8(b)와 같이 동일하게 구성되며, 동일한 작업 조건을 충족하도록 설계된다. Katode 등[28]은 효율적인 방제 작업을 위해 양팔에 분사 노즐을 부착하였다. Sepúlveda 등[40]은 양팔 모두 작물을 잡아 수확하는 그리퍼를 사용하였다. Yoshida 등[25], Jiang 등[30], Li 등[32] 또한 각 팔이 한 번에 하나의 작물 및 과실을 수확하는 절단 모듈로 병렬 임무 수행하였다. Lammers 등[33]은

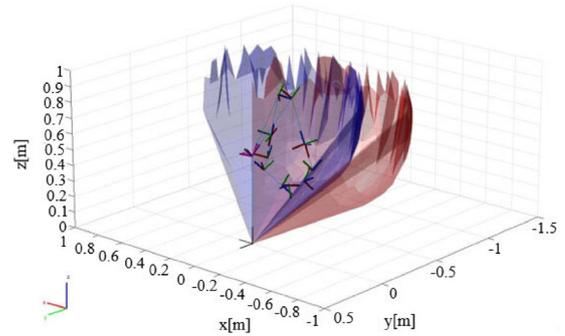


그림 9. 양팔의 작업 공간 및 엔드 이펙터 진입 자세 제약[40].

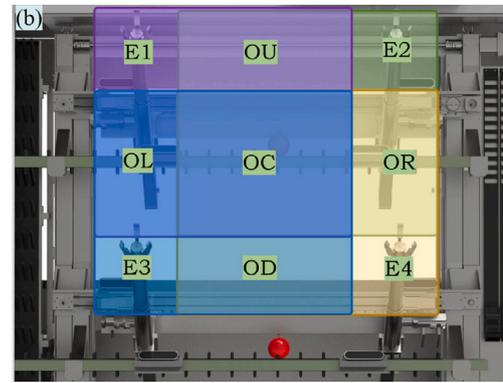


그림 10. 다수 매니플레이터를 갖는 로봇의 개별 작업 공간 (E1, E2, E3, E4) 및 공통 작업 공간 (OU, OL, OC, OR, OD) [32].

진공 기반 석션 엔드 이펙터를 다수 사용하여 동시 수확하였다.

#### 4. 센서

로봇 시스템의 센서는 데이터 수집, 분석, 그리고 제어를 위한 핵심 모듈로, 농작업의 정밀성과 효율성을 극대화하는 데 필요하다. 센서들은 작업의 특성에 맞게 설계 및 조정되며, 농작업 성능을 최적화하는 데 기여한다. 본 절에서는 양팔 농업용 로봇의 센서 응용 사례를 문헌 검토한다.

카메라는 종류에 따라 다중 분광 카메라, RGB-D 카메라, 적외선 카메라 등이 있으며, 양팔 로봇 플랫폼 또는 엔드이펙터에 부착되어 수확하고자 하는 작물이나 절단 지점을 인식하거나 작물의 위치 추정, 과실의 속도 분류 등 농작업 전반에 사용되고 있다[24-25,30-33,36,38-



39,40-44]. 카메라 외에도 LiDAR 또한 대표적으로 활용되는 센서이다. LiDAR는 주로 이동형 플랫폼에 부착되어 지형 분석이나 지도 작성, 네비게이션 등의 기반 플랫폼의 기동성을 개선하는데에 사용된다[30,41,43-44]. 이 외에도 LiDAR는 높은 해상도 및 정밀도를 기반으로 수확량 예측, 생육 모니터링, 살충제 인식에 사용되기도 한다. 이 외에도 IR 센서를 사용한 타겟 위치 오류 보정, 촉각 센서 기반 로봇 제어 등 작업에 적합한 다양한 센서가 로봇 시스템에 활용되고 있다[34].

## IV. 제어

이 섹션에서는 양팔 농업용 플랫폼에 활용되고 있는 핵심제어 기술의 현황을 검토하고 기술별 목적과 요구사항을 도출한다. 특히 단일 매니퓰레이터 기반의 농업용 로봇과의 차이를 중점으로 문헌 검토한다.

### 1. 모션 계획 및 장애물 회피

모션 계획과 장애물 회피는 로봇 시스템의 안전하고 효율적인 동작을 보장하기 위한 핵심 기술이다. 모션 계획은 로봇이 목표 위치에 도달하기 위한 최적의 경로를 생성하는 과정으로, 작업 공간 내의 동적 및 정적 장애물을 고려하여 설계된다. 장애물 회피는 모션 계획 과정에서 로봇의 링크나 엔드 이펙터가 환경의 장애물과 충돌하지 않도록 보장하는 기능이다. 특히 다중 매니퓰레이터 시스템에서 로봇 간 충돌을 방지하는 자기 충돌 회피 기술이 고려되어야 한다. 자기 충돌은 로봇 시스템 내의 여러 링크가 물리적으로 충돌하는 현상을 의미한다. 이 현상은 협업 작업이나 좁은 작업 공간에서 더욱 두드러지며, 이를 방지하기 위해 정교한 모션 계획과 충돌 감지 기술이 필요하다.

He 등[45]은 로봇의 다중 TSP (Traveling Salesman Problem)를 기반으로 브레인 스톰 최적화(brain storm optimization) 알고리즘을 통해 매니퓰레이터의 작업 영역을 분할하고 두 매니퓰레이터 사이의 충돌을 감지할 수 있는

경계(bounding) 영역을 설정하였다. 경계 영역 사이에서의 거리 기반 임계값 제약을 충족하는 경우를 충돌이 발생하지 않았으므로 정의하고 로봇의 모션을 계획하였다. Sepúlveda 등[40]은 그림 9와 같이 로봇 작업공간을 분할하고 작물에 엔드 이펙터가 접근하는 방향의 제약을 추가하여 역기구학 해의 개수를 제한하는 방식을 사용하였다. Stavridis 등[37]은 계층적 제약 최적화 프레임워크를 제안하여 조인트의 가동 범위, 동적 장애물, 자기 충돌을 제약 조건으로 정의하였다. 제안된 계층적 제약 최적화 프레임워크는 우선순위를 기반으로 각 제어 주기에서 순차적으로 만족시키는 방식으로 로봇의 충돌 없는 모션을 계산하였다.

### 2. 작업 순서 결정

순서 결정(ordering)은 농업 로봇의 작업 효율성과 생산성을 극대화하기 위해 상위 수준의 의사결정을 다루는 중요한 단계이다. 이는 단순히 로봇의 개별 동작을 제어하는 모션 계획과 같은 저수준 제어와 달리, 전체적인 작업 전략을 설계하는 고수준의 결정 모델에 해당한다. 이러한 순서 결정은 작물의 상태, 환경적 제약, 로봇의 자원을 종합적으로 고려하여 최적의 작업 순서를 계획한다. 작업에서 타겟이 되는 작물 등의 사이 거리를 계산하여 그 거리가 최소가 되도록 하는 것이 가장 일반적이지만 로봇의 상태와 작업 공간을 고려하는 방식으로 순서 결정 문제를 더 구체화할 수 있다.

Lammers 등[33]은 수확 작업 영역을 한 팔만 도달할 수 있는 영역과 양팔이 모두 도달할 수 있는 영역으로 나누어 작업 순서를 결정하였다. 한 팔만 도달 가능한 영역 내에 있는 사과를 각각의 매니퓰레이터에게 임무 할당되며 중복 영역 내에 있는 사과를 로봇 베이스의 기준 거리를 기반으로 할당된다. 작업 실행 또한 마찬가지로 로봇 베이스를 기준으로 가장 짧은 거리에 있는 사과를 시작으로 사과 사이의 거리를 계산하여 순서를 결정한다.

Li 등[32]은 기본적인 거리 기반의 작업 시간을 포함하여 매니퓰레이터의 유휴(idle) 및 축 이동 시간 등을 고려



하여 매니플레이터의 작업 상태를 모델링하였다. 이 상태 모델링을 기반으로 작업 시간을 최소화하기 위해 다중 에이전트 강화학습을 통해 작업의 순서를 계산하였다. 제안된 강화학습 프레임워크에서 로봇의 수확 과정을 접근(approach), 확장(extension), 파지(grasp), 분리(retraction), 놓기(placement)의 5단계로 나누고 다수 매니플레이터 내 조인트의 동시 가동 가능 여부에 따라 동시 수행 가능한 동작 그룹을 구성하였다. 또한 작업 경쟁을 그룹 내 충돌과 그룹간 충돌로 나누는 임무 파견(task dispatch) 메커니즘을 사용하여 그림 10의 공통 구역 내에서 작업 경쟁을 방지하고 다수의 매니플레이터를 효율적으로 배치할 수 있도록 하였다.

### 3. 햅틱 시스템 및 멀티모달 제어

햅틱 유도(haptic guidance)와 멀티모달 제어는 로봇 시스템이 복잡한 작업 환경에서 높은 정밀도와 적응성을 가지도록 설계하는 데 중요한 기술이다. 햅틱 유도는 로봇이 촉각 센서를 통해 외부 환경을 감지하고, 이를 기반으로 경로를 조정하거나 작업을 수행하도록 하는 기술로, 정교한 물체 조작이나 섬세한 접촉이 필요한 작업에서 특히 유용하다[46]. 햅틱 시스템을 통해 얻어진 촉각과 로봇 시스템 내 시각, 힘 센서 등 다양한 입력 데이터를 통합하여 멀티모달 제어를 수행할 수 있다. 이를 통해 로봇이 환경과 상호작용하며 최적의 제어 신호를 생성하도록 돕는다[47]. 폭넓은 강성 스펙트럼으로 구성된 환경에 배치되는 농업용 로봇에서 햅틱 유도와 멀티모달 제어는 핵심적인 기술이지만 그 양팔 농업용 로봇에 대한 연구 사례가 거의 없다. 따라서 다음 농업용 로봇에 대한 적용 사례를 통해 양팔 로봇에 대한 확장 가능성을 논의하고자 한다.

Nazari 등[48]은 예측이 어려운 군집 딸기 줄기의 거동을 제어할 수 있도록 촉각 센서를 활용한 심층 기능적 예측 제어(deep functional predictive control, d-FPC) 시스템을 제안하였다. 제안된 시스템은 그림 11과 같이 촉각 예측만으로 군집 딸기를 밀어내는 작업을 수행하였으며, 이후 양팔 작업으로 확대하여 작물 폐색을 제거하기 위한 밀어

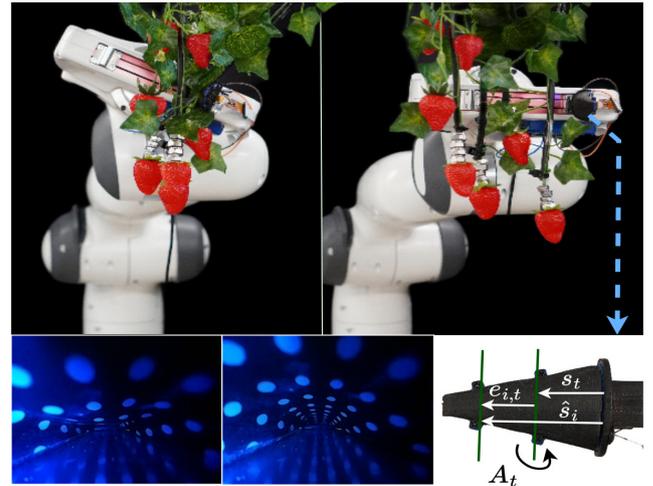


그림 11. 촉각 센서 기반 군집 딸기 밀기 작업[46].

내기 작업을 수행하기에 핵심적인 기술이 될 수 있을 것으로 기대한다.

Schuetz 등[49,50]은 농업용 매니플레이터에서 촉각 피드백에 기반한 모션 계획 프레임워크를 제안하였다. 제안된 프레임워크는 다양한 강성을 지닌 물체를 로봇과 접촉시키는 시나리오에서 평가하였으며 고무 밴드와 같은 약한 강성을 지닌 물체와의 접촉 또한 감지할 수 있음을 보여주었다. 제안된 모션 계획 기술은 Nazari 등[46]에 의해 제안된 d-FPC 기반의 밀어내기 동작과 융합하여 양팔 농업용 로봇의 강성에 따른 파지 및 밀어내기 동작을 수행할 수 있을 것으로 기대된다.

## V. 도전 및 미래 전망

단일 매니플레이터 농업용 로봇의 한계를 해결하고 더 높은 작업 효율성을 달성하기 위해 많은 농업용 로봇 연구들이 양팔 로봇 플랫폼으로 확장되고 있다. 이 장에서는 본 논문에서 다루었던 양팔 로봇의 해결되지 않은 과제와 그에 따른 미래 전망 및 발전 방향을 다룬다.

로봇 시스템 전반, 특히 양팔 로봇 분야에서 완전 자율(fully autonomous) 농업용 로봇의 미래 전망은 시스템 이론과 인지 방법론을 결합하는 데 있다. 특히 이 접근은 환경에 대한 정보가 불완전한 상황에서 필요하다. 특히 환



경과 작업의 최종 목표에 대한 전반적인 정보가 부족한 상황에서(주로 폐색 등 센싱의 제약으로) 양팔 협업이 어려운 경우가 존재한다. 이를 해결하기 위해 로봇은 양팔 협업이 어떻게, 어떤 방식으로 수행할 지 의사결정을 내릴 수 있어야 한다. 인간 작업자는 도메인 지식을 활용하여 의사결정 상황에 강인하게 대응할 수 있으나, 로봇은 그렇지 않으며 인간 도메인 지식을 학습하는 것이 필요하다. 이러한 맥락에서, 양팔 협업에 관한 의사결정을 위해 물체 간의 위치, 종속 관계, 속성을 다룰 수 있는 장면 이해 기술(visual scene understanding)이 활용될 수 있다[51].

이러한 상황 인지(situation-aware) 기술들은 장면-언어 변환이 필요한 자율주행, 의료 등 다양한 산업을 필두로 빠르게 발전하고 있다. 이러한 모델을 통해 로봇은 센서로 획득된 장면에서 물체(과실, 잎, 줄기), 위치(전, 후, 상, 하, 좌, 우 등), 종속 관계(줄기-잎 종속, 줄기-과실 종속), 속성(속도 등)을 이해할 수 있다. 이를 통해 양팔 로봇이 인간과 같은 유연한 양팔 협업을 수행할 수 있을 것으로 기대한다. 미래 연구는 이 논문에서 논의된 다양한 연구 요소들을 통합하여 복잡한 협력 작업을 수행하는 데 초점을 맞추게 될 것이다.

## VI. 결론

양팔 로봇은 농업 분야에서 많은 가능성을 보여주고 있지만 아직은 개발 초기 단계로 여전히 많은 해결과제가 남아있다. 본 논문에서는 농업용 양팔 로봇의 핵심 구성 기술인 제어 및 로봇 플랫폼에 대한 최근 동향과 개발 추세를 살펴보았다. 또한 실제 농업 환경에서 적용되고 있는 양팔 로봇의 사례들을 소개하며 적용 및 활용 가능한 분야를 고찰하였으며, 향후 농업용 양팔 로봇이 해결해야 할 과제와 전망에 대해서 기술하였다. 더 나아가 농업용 양팔 로봇의 필요는 커질 것으로 예상되며, 첨단 농업생산 시스템의 구축에 선도적 역할을 하게 될 것으로 기대한다.

## REFERENCES

- [1] Gao, Q., Ju, Z., Chen, Y., Wang, Q., Zhao, Y., Lai, S., "Parallel dual-hand detection by using hand and body features for robot teleoperation," *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, vol. 53, pp. 417–426, 2023.
- [2] Huan, Y., Ren, G., Sun, J., Jin, G., Ding, X., Du, W., "Efficient leather spreading operations by dual-arm robotic systems," *Scientific Reports*, vol. 14, pp. 16240, 2024.
- [3] Lee, D.H., Choi, M.S., Park, H., Jang, G.R., Park, J.H., Bae, J.H., "Peg-in-hole assembly with dual-arm robot and dexterous robot hands," *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 7, pp. 8566–8573, 2022.
- [4] Garabini, M., Caporale, D., Tincani, V., Palleschi, A., Gabellieri, C., Gugliotta, M., Settini, A., Catalano, M.G., Grioli, G., Pallottino, L., "Wrap-up: A dual-arm robot for intralogistics," *IEEE Robotics Automation Magazine*, vol. 28, pp. 50–66, 2021.
- [5] Korayem, M., Shafei, A., Seidi, E., "Symbolic derivation of governing equations for dual-arm mobile manipulators used in fruit-picking and the pruning of tall trees," *Computers and electronics in agriculture*, vol. 105, pp. 95–102, 2014.
- [6] Kadalagere Sampath, S., Wang, N., Wu, H., and Yang, C., "Review on human-like robot manipulation using dexterous hands," *Cognitive Computation and Systems*, vol. 5, pp. 14–29, 2023.
- [7] Smith, C., Karayiannidis, Y., Nalpantidis, L., Gratal, X., Qi, P., Dimarogonas, D.V., and Kragic, D., "Dual arm manipulation—a survey," *Robotics and Autonomous systems*, vol. 60, pp. 1340–1353, 2012.
- [8] Wang, Y., Li, H., Zhao, Y., Chen, X., Huang, and X., Jiang, Z., "A fast coordinated motion planning method for dual-arm robot based on parallel constrained ddp," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 29, pp. 2350–2361, 2024.
- [9] Vahrenkamp, N., Berenson, D., Asfour, T., Kuffner, J., and Dillmann, R., "Humanoid motion planning for dual-arm manipulation and re-grasping tasks," *In 2009 IEEE/RSJ international conference on intelligent robots and systems*, pp. 2464–2470, 2009.
- [10] Huang, H., Zeng, C., Cheng, L., Yang, C., "Toward generalizable robotic dual-arm flipping manipulation," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 71, pp. 4954–4962, 2024.
- [11] Cui, Y., Xu, Z., Zhong, L., Xu, P., Shen, and Y., Tang, Q., "A task-adaptive deep reinforcement learning framework for dual-arm robot manipulation," *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, pp. 1–14, 2024.
- [12] Park, Y., Seol, J., Pak, J., Jo, Y., Kim, C., and Son, H.I., "Human-centered approach for an efficient cucumber harvesting robot system: Harvest ordering, visual servoing, and end-effector," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 212, pp. 108116, 2023.
- [13] Park, Y., Kim, C., Son, H.I., "Fast and stable pedicel detection for robust visual servoing to harvest shaking fruits," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 220, pp. 108863, 2024.



- [14] Chen, B., Gong, L., Yu, C., Du, X., Chen, J., Xie, S., Le, S., Le, Y., and Liu, C., "Workspace decomposition based path planning for fruit-picking robot in complex greenhouse environment," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 215, pp. 108353, 2023.
- [15] Liang, J., Huang, K., Lei, H., Zhong, Z., Cai, Y., and Jiao, Z., "Occlusion-aware fruit segmentation in complex natural environments under shape prior," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 217, pp. 108620, 2024.
- [16] Gené-Mola, J., Ferrer-Ferrer, M., Gregorio, E., Blok, P.M., Hemming, J., Morros, J.R., Rosell-Polo, J.R., Vilaplana, V., and Ruiz-Hidalgo, J., "Looking behind occlusions: A study on amodal segmentation for robust on-tree apple fruit size estimation," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 209, pp. 107854, 2023.
- [17] Surdilovic, D., Yakut, Y., Nguyen, T. M., Pham, X. B., Vick, A., and Martin-Martin, R. "Compliance control with dual-arm humanoid robots: Design, planning and programming," *In 2010 10th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, pp. 275-281, 2010.
- [18] Gilman, E. F., "An illustrated guide to pruning," 2002.
- [19] Bertin, N., Buret, M., and Gary, C., "Insights into the formation of tomato quality during fruit development," *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, vol. 76, pp. 786-792, 2021.
- [20] Zahid, A., Mahmud, M. S., He, L., Choi, D., Heinemann, P., and Schupp, J. "Development of an integrated 3R end-effector with a cartesian manipulator for pruning apple trees," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 179, pp. 105837, 2020.
- [21] Korayem, M. H., Shafei, A. M., and Seidi, E., "Symbolic derivation of governing equations for dual-arm mobile manipulators used in fruit-picking and the pruning of tall trees," *Computers and electronics in agriculture*, vol. 105, pp. 95-102, 2014.
- [22] Nekoo, S. R., Feliu-Talegon, D., Tapia, R., Satue, A. C., Martínez-de Dios, J. R., and Ollero, A. "A 94.1 g scissors-type dual-arm cooperative manipulator for plant sampling by an ornithopter using a vision detection system," *Robotica*, vol. 41, pp. 3022-3039, 2023.
- [23] Wu, L., Liu, H., Ye, C., and Wu, Y. "Development of a Premium Tea-Picking Robot Incorporating Deep Learning and Computer Vision for Leaf Detection," *Applied Sciences*, vol. 14, pp. 5748, 2024.
- [24] Ling, X., Zhao, Y., Gong, L., Liu, C., and Wang, T. "Dual-arm cooperation and implementing for robotic harvesting tomato using binocular vision," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 114, pp. 134-143, 2019.
- [25] T. Yoshida, Y. Onishi, T. Kawahara, and T. Fukao, "Automated harvesting by a dual-arm fruit harvesting robot," *ROBOMECH J.*, vol. 9, 2022.
- [26] Wang, Y., Kong, L., Yang, H., Li, J., Xia, P., Gong, L., and Liu, C., "Building unmanned plant factory with modular robotic manipulation and logistics systems," *in: Recent Developments in Intelligent Computing, Communication and Devices: Proceedings of ICCD 2017*, pp. 11-19, 2019.
- [27] Kim, H., Ohmura, Y., and Kuniyoshi, Y., "Goal-conditioned dual-action imitation learning for dexterous dual-arm robot manipulation," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 40, pp. 2287-2305, pp. 1-11, 2024.
- [28] Katode, A., and Vyas, A., "Multipurpose agriculture pesticide sprayer robot (sprayro)," *International Research Journal of Engineering and Technology*, vol. 10, pp. 959-970, 2023.
- [29] Pramod, A.S., and Jithinmon, T., "Development of mobile dual pr arm agricultural robot," *in: Journal of Physics: Conference Series, IOP Publishing*, pp. 012034, 2019.
- [30] Jiang, Y., Liu, J., Wang, J., Li, W., Peng, Y., and Shan, H. "Development of a dual-arm rapid grape-harvesting robot for horizontal trellis cultivation," *Frontiers in Plant Science*, vol. 13, pp. 881904, 2022.
- [31] Liu, Z., Zhou, J., Mucchiani, C., and Karydis, K. "Vision-assisted Avocado Harvesting with Aerial Bimanual Manipulation," *arXiv preprint arXiv*: pp. 2408.09058, 2024.
- [32] Li, T., Xie, F., Zhao, Z., Zhao, H., Guo, X., and Feng, Q., "A multi-arm robot system for efficient apple harvesting: Perception, task plan and control," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 211, pp. 107979, 2023.
- [33] Lammers, K., Zhang, K., Zhu, K., Chu, P., Li, Z., and Lu, R., "Development and evaluation of a dual-arm robotic apple harvesting system," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 227, 109586, 2024.
- [34] Xiong, Y., Ge, Y., Grimstad, L., and From, P. J., "An autonomous strawberry-harvesting robot: Design, development, integration, and field evaluation," *Journal of Field Robotics*, vol. 37, pp. 202-224, 2020.
- [35] Zahid, A., Mahmud, M. S., He, L., Choi, D., Heinemann, P., and Schupp, J., "Development of an integrated 3R end-effector with a cartesian manipulator for pruning apple trees," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 179, pp. 105837, 2020.
- [36] Y. Zhao, L. Gong, C. Liu, and Y. Huang, "Dual-arm robot design and testing for harvesting tomato in greenhouse," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 49, pp. 161-165, 2016.
- [37] Stavridis, S., Falco, P., and Doulgeri, Z., "Pick-and-place in dynamic environments with a mobile dual-arm robot equipped with distributed distance sensors," *In 2020 IEEE-RAS 20th International Conference on Humanoid Robots (Humanoids)*, pp. 76-82, 2021.
- [38] Stavridis, S., Droukas, L., and Doulgeri, Z. "Bimanual Grape Manipulation for Human-Inspired Robotic Harvesting," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2024.
- [39] Gursoy, E., Navarro, B., Cosgun, A., Kulić, D., and Cherubini, A.. "Towards vision-based dual arm robotic fruit harvesting," *In 2023 IEEE 19th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*, pp. 1-6, 2023.
- [40] D. Sepúlveda, R. Fernández, E. Navas, M. Armada, and P. GonzálezDe-Santos, "Robotic aubergine harvesting using dual-arm manipulation," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 121889-121904, 2020.



[41] Peng, Y., Liu, J., Xie, B., Shan, H., He, M., Hou, G., and Jin, Y., "Research progress of urban dual-arm humanoid grape harvesting robot," *in: 2021 IEEE 11th Annual International Conference on CYBER Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER)*, pp. 879-885, 2021.

[42] Wang, F., Urquizo, R. C., Roberts, P., Mohan, V., Newenham, C., Ivanov, A., and Dowling, R. "Biologically inspired robotic perception-action for soft fruit harvesting in vertical growing environments," *Precision Agriculture*, vol. 24, pp. 1072-1096, 2023.

[43] Vikram, C., Jeyabal, S., Chittoor, P. K., Pookkuttath, S., Elara, M. R., and You, W. "KOALA: A Modular Dual-Arm Robot for Automated Precision Pruning Equipped with Cross-Functionality Sensor Fusion," *Agriculture*, vol. 14, pp. 1852, 2024.

[44] Jiang, Y., Liu, J., Zhao, S., Jiang, Y., Jin, Y., and Gao, W., "Multi-Source Heterogeneous Factor Target Feature Segmentation and Dual-Arm Servo Harvesting Method for Grape Dual-Arm Robot on Horizontal Trellises," *In 2024 IEEE 14th International Conference on CYBER Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER)*, pp. 364-369, 2024.

[45] He, Z., Ma, L., Wang, Y., Wei, Y., Ding, X., Li, K., and Cui, Y., "Double-Arm cooperation and implementing for harvesting kiwifruit," *Agriculture*, vol. 12, pp. 1763, 2022.

[46] Mandil, W., Rajendran, V., Nazari, K., and Ghalamzan-Esfahani, A.

"Tactile-sensing technologies: Trends, challenges and outlook in agri-food manipulation," *Sensors*, vol. 23, pp. 7362, 2023.

[47] Yu, Z., Lu, C., Zhang, Y., and Jing, L., "Gesture-Controlled Robotic Arm for Agricultural Harvesting Using a Data Glove with Bending Sensor and OptiTrack Systems," *Micromachines*, vol. 15, pp. 918, 2024.

[48] Nazari, K., Gandolfi, G., Talebpour, Z., Rajendran, V., Mandil, W., Rocco, P., and Ghalamzan-E, A., "Deep functional predictive control (deep-fpc): Robot pushing 3-d cluster using tactile prediction," *In 2023 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 10771-10776, 2023.

[49] Schuetz, C., Pfaff, J., Sygulla, F., Rixen, D., and Ulbrich, H., "Motion planning for redundant manipulators in uncertain environments based on tactile feedback," *In 2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 6387-6394, 2015.

[50] Sygulla, F., Schuetz, C., and Rixen, D., "Adaptive motion control in uncertain environments using tactile feedback," *In 2016 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*, pp. 1277-1284, 2016.

[51] Xiao, T., Liu, Y., Zhou, B., Jiang, Y., and Sun, J., "Unified perceptual parsing for scene understanding," *In Proceedings of the European conference on computer vision (ECCV)*, pp. 418-434, 2018.

### 조 유 성



2022년 전남대 지역 바이오시스템공학과 (공학사).  
 2024년 전남대학교 융합바이오시스템기계공학과 (공학석사).  
 2024년 ~ 현재 전남대학교 융합바이오시스템기계공학과 박사과정 재학 중. 관심분야는 agricultural robot, field robotics, multi-robot systems, robotic gripper.

### 박 용 현



2019년 경상대학교 생물산업기계공학과 (공학사).  
 2021년 경상대학교 생물산업기계공학과 (공학석사).  
 2021년 ~ 현재 전남대학교 융합바이오시스템기계공학과 박사과정 재학 중. 관심분야는 agricultural robot, field robotics, multi-robot systems, harvesting robot.

### 김 창 조



2024년 전남대학교 지역 바이오시스템공학과 (공학사).  
 2024년 ~ 현재 전남대학교 융합바이오시스템기계공학과 석사과정 재학 중. 관심분야는 agricultural robot, field robotics, multi-robot systems, harvesting robot.

### 손 형 일



1998년 부산대학교 생산기계공학과(공학사).  
 2000년 부산대학교 지능기계공학과(공학석사).  
 2010년 KAIST 기계공학과(공학박사).  
 2003년 ~ 2005년 LG전자 생산기술원 선임연구원.  
 2005년 ~ 2009년 삼성 전자 ITD센터 책임연구원.  
 2010년 일본 동경대학교 생산기술연구소 박사후 연구원.  
 2010년 ~ 2012년 독일 막스플랑크연구소 박사후 연구원.  
 2012년 ~ 2015년 삼성중공업 중앙연구소 수석연구원.  
 2015년 ~ 현재 전남대학교 융합바이오시스템기계공학과 교수. 관심분야는 field robotics, hybrid systems, systems and synthetic biology.