

시설원에 작물수확을 위한 이종 복수 로봇의 작업효율 분석

최태용[◦], 박종우^{*}, 김정중^{**}, 신영식^{**}, 김두형^{*}

Analysis of Work Efficiency of Multiple Heterogeneous Robots for Harvesting Crops in the Green House

Taeyong Choi[◦], Jongwoo Park[◦], Jeong-Jung Kim^{*}, Young-Sik Shin^{*}, Doo-hyung Kim^{**}

요약

최근 4차혁명 기술을 적용한 스마트팜과 같은 시설원예에 대한 연구가 많이 이루어지고 있다. 그 중 수확로봇과 사람 작업자의 수확물 이송을 위한 이송로봇 등의 로봇 기술이 연구되고 있다. 기존 연구는 대부분 단일 로봇의 기능 구현에 치중되어 있다. 본 연구에서는 시설원예에서 작물 수확을 위해서 복수의 수확로봇 및 이송로봇을 적절히 혼용했을 때, 단일 수확로봇만 사용하는 것보다 작업 효율이 높음을 보인다. 이를 위해서 수확로봇 및 이송로봇의 수확속도 및 이송속도 등을 시설 환경을 고려하여 모델링하고, 이를 기반으로 기존의 수확로봇으로 구성된 로봇 그룹과 수확로봇 및 이송로봇 혼용으로 구성된 그룹의 작업속도를 도출 및 분석한다. 또한 도출된 작업속도를 실제 개발한 수확로봇 및 이송로봇의 실험 데이터를 바탕으로 분석하여 수확만을 위한 수확로봇과 작물 이송만을 위한 이송로봇으로 구성했을 경우보다 수확로봇과 이송로봇을 적절히 혼용하고 로봇끼리 협동작업을 했을 때 전체적인 작업 속도가 더 높음을 보인다.

키워드 : 수확로봇, 이송로봇, 수확속도, 다수로봇운용, 그린하우스 로봇

Key Words : Harvesting robot, Trasporting robot, Harvesting speed, multi-robot operation, Green house robot

ABSTRACT

Recently, a lot of research on green house such as smart farms to which the 4th revolution technology is applied has been conducted. Among them, robot technologies such as harvesting robots and transporting robots to move crops by human workers are being researched. Existing research is mostly focused on the realization of functions of a single robot. In this study, it is shown that when a plurality of harvesting robots and transporting robots are properly mixed for harvesting crops in green house, work efficiency is higher than using only a single harvesting robot. To this end, the harvesting speed and transportingspeed of the harvesting

※ 본 결과물은 농림축산식품부의 재원으로 농림식품기술기획평가원의 첨단농기계산업화기술개발사업의 지원을 받아 연구되었음(과제 번호 321059-2)

◦ First and Corresponding Author : Department of Robotics and Mechatronics, Korea Institute of Machinery and Materials, taeyongc@kimm.re.kr, 정희원

* Department of Robotics and Mechatronics, Korea Institute of Machinery and Materials, jekiel@kimm.re.kr, kdh649@kimm.re.kr

** Department of AI Machinery, Korea Institute of Machinery and Materials, rightcore@kimm.re.kr; yshin86@kimm.re.kr

논문번호 : 202207-135-0-SE, Received June 29, 2022; Revised August 19, 2022; Accepted September 1, 2022

robot and the transporting robot are modeled in consideration of the facility environment, and based on this, the working speed of the robot group consisting of the harvesting robot and the group consisting of the harvesting robot and the transfer robot is derived. In addition, by analyzing the derived working speed based on the experimental data of the actually developed harvesting robot and transporting robot, it is shown that the overall working speed is higher when the harvesting robot and the transporting robot are properly mixed and cooperative work is performed between the robots.

I. 서론

기후위기에 따른 작물량 감소 대응 및 식량 주권 확보를 위해서 전 세계적으로 첨단농업에 대한 연구가 많이 이루어지고 있다. 그 중 농업 자동화 연구는 노지농업을 중심으로 주로 기존 농기계를 첨단화 하는 방향으로 연구가 이루어지고 있다. 대표적인 사례가 기술개발이 거의 완료된 자율 트랙터다. 반면 노지농업과 달리 시설농업의 경우에는 구조화된 환경 구축이 가능한 스마트팜 기술을 중심으로 연구 개발이 이루어지고 있다. 스마트팜은 노지농업과 달리 작물 재배환경이 구조화되고, 온·습도·일사량 등의 통제가 가능해 자동화에 적합하다. 다만, 여전히 적엽·적과·수확 등의 정밀작업은 수작업에 의존하고 있는데, 이중 수확을 자동화하기 위한 로봇 기술 연구가 최근 화두다.

수확용 로봇으로는 네덜란드 WAGENINGEN 대학팀이 개발한 SWEEPER^[1-2]가 가장 진보된 것으로 평가된다. 그림 1의 SWEEPER는 온실의 파이프 및 콘크리트 이동을 위한 모바일 플랫폼 위에 로봇팔을 장착하고, 파프리카 인식을 위한 비전 시스템 및 절단을 위한 커팅 메커니즘 등을 갖추고 있다.

미국 RootAI사에서는 여기서 딸기 수확용 로봇을



그림 1. 파프리카 수확용 로봇. SWEEPER
Fig. 1. Paprika harvesting robot, SWEEPER

개발하였다^[3]. 그림 2의 RootAI의 수확로봇은 SWEEPER와는 사용한 로봇팔과 딸단틀 면에서 확연히 다르다. SWEEPER가 6축 수직다관절 로봇을 사용한 반면 RootAI는 2차원 이동 및 작물 수확에 유리한 스카라 타입 로봇을 적용하였다. 딸단틀로 SWEEPER는 딱딱한 파프리카 줄기를 자르기 위한 특수 도구를 개발한 반면, RootAI는 부드러운 딸기 수확을 위해서 특수 소프트그리퍼를 적용하였다.

다른 온실용 농작물 수확 로봇의 구성도 이와 유사하다. 온실 이동을 위한 특수한 모바일 플랫폼에 수확을 위한 로봇팔과 딸단틀을 장착한다. 로봇팔은 수확 작물에 따라서 6축 수직다관절, 병렬로봇, 스카라타입 등이 적용 가능하다. 실제 작물 수확을 하는 딸단틀은 수확로봇에서 가장 중요한 기술이다. 작물에 따른 생육과정과 그에 따른 수확조건이 천차만별이고, 상품성을 고려한 수확 요구 조건도 까다로운 편이다. 이런 이유로 현재까지 국내의 수확 로봇 연구는 단일 로봇의 수확을 위한 메커니즘 혹은 방법론 등에 치우쳐 있다^[4].

한편, 스마트팜과 같은 시설에서 활용하는 로봇으로 이송로봇에 대한 연구도 활발하다. 이송로봇은 사람 작업자가 수확한 작물을 하역장으로 옮기는 것을 목적으로 개발되었다. 작업자를 따라가는 기능, 시설 환경 자율주행 기능 등이 요구된다. [5]는 이송로봇을 적용한 시설의 경제성 분석을 통하여 이송로봇의 실제 현장 적용가능성을 타진하였다.



그림 2. 딸기 수확용 로봇. RootAI
Fig. 2. Strawberry harvesting robot, RootAI

시설원예에서 수확로봇과 이송로봇이 별도로 연구 개발되고 있지만 현재까지 이런 수확로봇과 이송로봇을 동시에 협동작업으로 활용하는 사례는 드물다. 이는 기술적으로 수확로봇의 기술 수준이 다른 로봇과의 협동작업을 고려할 만큼 발전하지 못했고, 수확로봇도 통상 자체 작물 저장 공간이 있기 때문에 짧은 작업에서는 별도의 이송 수단이 필요 없기 때문이다. 하지만, 전체 시설원예의 수확을 고려했을 때 단일 수확로봇은 공간상의 제한으로 매번 작물 저장공간이 찰 때마다 후방 작물 하역공간에 이송을 해야하는 단점이 있다. 이런 후방 작물 이송은 시설의 크기와 로봇의 이동성능을 고려했을 때 시간소모가 큰 작업이다.

최근에는 이런 단점을 극복하기 위해서 수확로봇과 이송로봇을 조합한 복수개의 로봇으로 스마트팜과 같은 시설의 작물을 수확하는 연구가 이루어지고 있다 [6]. 다만, 이중의 로봇으로 팀을 만들어 시설 전체를 수확할 때 수확로봇과 이송로봇의 구성을 어떻게 하는 것이 작업효율 측면에서 적합한지에 대한 연구는 아직 없다. 다수의 수확로봇과 소수의 이송로봇으로 이루어진 수확용 로봇팀이 수확로봇만으로 이루어진 단일 로봇팀에 비해서 더 효율적일 것이라는 경험에 근거하고 있다. [6]에서는 경험적으로 수확로봇 2대와, 이송로봇 1대를 상정하여 개발을 진행하고 있다.

본 연구에서는 시설 전체를 수확하고자 할 때 수확로봇과 이송로봇을 활용한 무인 수확 및 이송 시스템의 작업속도를 모델링하고 분석하여 이중 로봇팀 구성에 대한 근거 및 가이드를 제시하고자 한다. 본 논문은 다음과 같이 구성된다. 2장에서는 시설의 공간특성 및 변수를 고려하여 단일 수확로봇 및 이송로봇의 수확속도 및 이송속도를 모델링하고, 이에 근거하여 전체 시설 수확을 위한 작업속도를 모델링한다. 3장에서는 개발한 실제 수확로봇 및 이송로봇 및 시설의 데이터를 바탕으로 수확로봇 및 이송로봇으로 이루어진 복합 로봇팀이 단일 수확로봇들로 이루어진 단일 로봇팀보다 시설 전체를 고려했을 때 더 작업속도가 더 높을 수 있음을 보인다. 4장에서는 본 논문의 연구를 요약한다.

II. 수확로봇 및 이송로봇을 적용한 시설원예의 작업속도 모델링

2.1 시설원예에서 수확로봇 및 이송로봇 작업속도

온실의 구조를 간략히 그림으로 표현하면 그림 3과 같다. 기본적으로 작물을 키우기위한 베드가 한 방향으로 길게 배치되고, 베드는 실제 작물이 자라는 배지

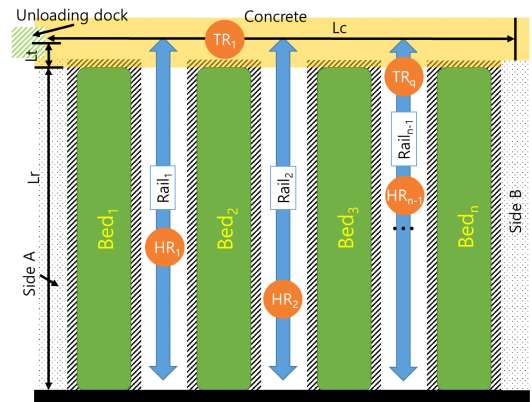


그림 3. 시설원예 구조도
Fig. 3. Structure of green house

로 구성된다. 베드 사이에는 난방을 위해 온수 파이프가 설치된다. 파이프는 그림 4와 같이 이중으로 구성되어 기차가 지나가는 레일과 유사하다. 시설의 로봇은 베드 사이의 이동을 위해서 파이프 위를 기차처럼 움직이도록 개발되고 있다. 본 연구에서 개발하는 로봇도 동일한 이동 메커니즘을 가지고 있다. 그림 3에서 Side A, B영역은 통상 파이프가 설치되지 않는 영역이다. 이 부분은 예외적으로 별도의 기술이 필요하며, 현재는 고려되지 않는 부분이다.

로봇이 이동하는 온실 레일은 통상 한 쪽이 막혀있다. 그림 3을 기준으로 콘크리트 바닥과 연결된 상부는 이동이 가능하지만, 바닥부분은 막혔다. 그림 3에서 Rail_n을 따라서 로봇이 이동한다. 한편 레일 자체는 한 쌍만 존재하는 단선이기 때문에 레일위에서 2대의 로봇이 교차하는 것은 불가능하다.

그림 3에서 시설에서 운용하는 복수의 수확로봇 각각을 HR_i, 복수의 이송로봇 각각을 TR_j로 정의한다.



그림 4. 시설원예의 베드 및 파이프
Fig. 4. Bed and pipe of green house

HR 은 Harvesting robot의 약자이며, TR 은 Transporting robot의 약자이다. 한편, 시설에서 운용하는 수확로봇 및 이송로봇의 전체 개수를 아래 (1)과 같이 정의한다. i, j 는 개별 로봇을 나타내는 인덱스로 i 는 수확로봇, j 는 이송로봇의 인덱스로 $\{i, j \mid 0 < i \leq p, 0 < j \leq q\}$ 를 만족한다.

$$\begin{aligned} p: & \text{수확로봇 운용 개수} \\ q: & \text{이송로봇 운용 개수} \end{aligned} \quad (1)$$

$$p, q \mid 0 < p, 0 < q$$

현재 기술로는 단일 종인 수확로봇 뿐만 아니라 이송로봇을 적용하고자 했을 때, 수확로봇의 수확속도보다 이송로봇의 전달 속도가 빠르기 때문에, 수확로봇의 운용 대수가 많아서 일반적으로 $q < p$ 이다. 수확로봇의 수확속도 및 이송로봇의 이송속도를 I_{HR_i}, I_{TR_j} 로 정의할 때, 각각의 구체적 의미는 아래 (2)와 같으며, 일반적으로 $I_{HR_i} \ll I_{TR_j}$ 이다.

$$\begin{aligned} I_{HR_i} : & \text{단위시간당 수확로봇이 수확하는} \\ & \text{작물의 개수. (unit/hour)} \\ I_{TR_j} : & \text{단위시간당 이송로봇이 이송하는} \\ & \text{작물의 개수. (unit/hour)} \end{aligned} \quad (2)$$

I_{HR_i}, I_{TR_j} 을 정의함에 있어서 단위시간은 ‘시간(Hour)’을 쓰기로 한다. 수확과 이송은 실제로는 지속적으로 벌어지는 연속적인 사건이 아니라 느리게 벌어지는 간헐적 이벤트에 가깝다. 따라서 유의미한 속도를 정의하기 위해서는 각각의 사건이 빈번히 발생하여 통계적 의미가 있는 단위시간을 상정해야 하고, 경험적으로 긴 시간이 적합하다.

수확로봇 HR_i 가 보관할 수 있는 작물 버퍼량을 β_{HR} , 이송로봇 TR_j 이 나를 수 있는 작물 수를 β_{TR} 이라고 하자. I_{HR} 은 수확로봇의 적재함이 충분히 커서 ($\beta_{HR} = \infty$) 수확된 작물을 수확 중 작물 하차장으로 이송하는 경우는 없으며, 수확로봇이 레일에서 이동하는 추가 시간도 없다고 가정한 연속 수확 속도를 의미한다. 수확로봇의 수확속도는 아래 (3)과 같이 표현할 수 있다.

$$I_{HR} = \frac{\beta_{HR}}{T_{\beta_{HR}}} \quad (3)$$

$T_{\beta_{HR}}$ 은 수확로봇의 작물 버퍼개수 β_{HR} 을 채우는 데 소요되는 시간이다. 실제로는 HR_i 가 $Rail_i$ 를 이동하면서 수확하기 때문에 동선에 따른 추가 시간이 필요하고 이는 I_{HR} 를 감소시킨다. 이동까지 고려한 실 수확속도는 $\hat{I}_{HR} = K_{HR} I_{HR}$ 로 표현한다. 이는 통상의 수확로봇에 대하여 비슷한 경향을 가지기 때문에 개별 로봇을 표현하는 인덱스 i 는 생략한다. K_{HR} 은 0과 1사이의 수다.

I_{TR} 은 수확로봇이 고속으로 작물을 수확하여 ($\hat{I}_{HR} = \infty$) 이송로봇이 대기시간 없이 작물을 나르는 경우를 가정한다. 즉, 시설원예에서 이송로봇이 오로지 이송만 할 경우이다. 이 때 이송로봇의 이송속도는 다음 (4)와 같이 정의된다.

$$I_{TR} = \frac{\beta_{TR}}{K_L \frac{L_r}{V_{m_{TR}}} + Tr_{TR} + K_C \frac{L_c}{V_{c_{TR}}}} \quad (4)$$

$V_{m_{TR}}$ 은 이송로봇의 속도로 m/h 를 사용한다. $V_{r_{TR}}, Tr_{TR}$ 은 각각 이송로봇이 복도의 콘크리트 영역에서 베드 사이의 파이프로, 혹은 파이프에서 콘크리트로 이동할 때의 속도 및 시간이다. 파이프와 콘크리트간 이동은 파이프와 콘크리트의 연결부의 비연속성 뿐만 아니라, 이동 후 추가로 방향 전환이 필요해서 일반적인 이동보다 시간이 더 소모되는 영역이다. K_L, K_C 는 각각 파이프 영역, 콘크리트 영역의 거리 상수다. 예를 들어 HR_1 이 $Rail_1$ 의 끝부분(그림 2의 바닥)에서 이송을 시작한다면 $K_L = 1$ 이고, 1/2지점에서 이송을 시작한다면 $K_L = 1/2$ 이다. K_C 도 마찬가지로 이송로봇이 콘크리트 전체길이를 이송하는 경우면 $K_C = 1$ 이고, 중간부터 이동하면 $K_C = 1/2$ 이다.

전체적인 경향성을 보는 것이 목적이기 때문에 콘크리트 영역에서의 이동속도 $V_{c_{TR}}$ 은 파이프 이동속도 $V_{m_{TR}}$ 의 상수배로 가정한다. 본 연구에서 사용할 이동로봇은 동일한 회전 축에 콘크리트 이동용 바퀴와 콘크리트 이동용 바퀴를 포함하고 있다. 따라서 동일한 회전 속도에서 바퀴지름에 따라서 선형적으로 로봇의 이동속도가 달라진다. 일반적인 운용에서 콘크리트 및 파이프 이동에 따라 회전축의 속도를 가변하지 않기 때문에 (5)의 관계가 성립한다. 콘크리트 이동용 바퀴의 지름이 파이프 이동용 바퀴의 지름보다 크기 때문에 일반적으로 $K_M > 1$ 관계가 성립한다.

$$V_{C_{TR}} = K_M V_{m_{TR}} \quad (5)$$

또한 수확속도에 영향을 주는 세부적인 사항이나, 이송속도에 영향을 주는 세부적인 사항을 무시하고 일관된 작업속도를 간주하며, 통계적으로 이송로봇은 시설원예의 가운데 영역, 즉 파이프의 중간지점, 콘크리트의 중간지점에서 이송을 시작하는 것으로 가정하면 $K_L = K_C = \frac{1}{2}$ 이고, (5)는 (6)와 같이 표현된다.

$$I_{TR} = \frac{2K_M \beta_{TR} V_{m_{TR}}}{K_M L_r + L_c + 2K_M T_{r_{TR}} V_{m_{TR}}} \quad (6)$$

수확속도 I_{HR} 과 마찬가지로 I_{TR} 도 이상적인 조건을 가정했기 때문에, 실 이송속도는 $\hat{I}_{TR} = K_{TR} I_{TR}$ 와 같이 표현할 수 있다. K_{TR} 는 0과 1사이의 수다.

2.2 이송로봇 및 수확로봇 구성의 필요성

앞서 단일 수확로봇 및 이송로봇의 수확속도 및 이송속도를 모델링 했다. 여기서는 시설원예의 수확대상량을 고려했을 때 수확로봇 외 이송로봇이 필요한 경우를 살펴본다.

현재의 시설원예 환경은 바다에 기설치된 온수 파이프를 이동용 레일로 활용한다. 이런 제한 사항은 로봇의 이동성에 큰 제약을 준다. 예를 들어 HR_1 은 그림 3에서 HR_1 이 $Rail_1$ 에서 $Rail_2$ 로 이동하기 위해서는 위로 이동하여 콘크리트 바다를 통해서 다시 $Rail_2$ 로 이동하는 경우만 가능하다. $Rail_1$ 에 HR_1 이 있는데, HR_2 가 콘크리트로 이동하여 $Rail_1$ 로 가는 것은 가능하지만, 이미 있는 HR_1 를 가로질러 더 밑으로 내려가는 것은 불가능하며, 거꾸로 HR_1 도 HR_2 를 가로질러 콘크리트 영역으로 이동하는 것은 불가능하다.

시설에 n 개의 베드가 설치된 경우 로봇의 이동을 위한 파이프(혹은 레일)의 수는 $n-1$ 이다. 시설원예의 이동상의 제한사항과 현실적인 가격 때문에 모든 레일에 수확로봇이 배치되는 경우는 매우 드물고, (7)처럼 통상 베드의 개수 혹은 레일의 개수가 수확로봇의 수보다 훨씬 많다.

$$p < n \quad (7)$$

n : 시설에 설치된 베드 개수

Bed_i 의 수확 가능한 작물 수를 C_i , 수확한 작물수를 γ_i 이라고 하면, 현재 남은 수확해야 할 작물 수는 $(C_i - \gamma_i)$ 이다. HR_i 는 Bed_i 와 Bed_{i+1} 와 접하는 면에서 수확을 할 수 있다. 평균적으로 베드의 수확가능한 작물의 밀도가 동일하다면 HR_i 의 수확가능한 작물수는 $\{\frac{C_i}{2} + \frac{C_{i+1}}{2}\}$ 이다. HR_i 가 Bed_i 와 Bed_{i+1} 에서 동일한 속도로 수확을 한다면 각각의 베드에서 수확한 양은 $\frac{\gamma_i}{2}$ 로 가정할 수 있다. 이때 인접한 작물의 생장이 비슷하다고 가정한다면, $C_i = C_{i+1}$ 이다. 이 가정에 따라서 HR_i 가 $Rail_i$ 에서 수확가능한 작물 총량은 C_i , 수확한 작물량은 γ_i , 수확 후 남아있는 작물량은 $(C_i - \gamma_i)$ 로 볼 수 있다. 세부적으로는 차이가 있겠지만, 통상 시설 내부의 환경 조건이 동일하고 동일한 작물을 동일한 밀도로 재배하기 때문에 위의 가정은 합당하고, 이를 다시 풀면 수확로봇 HR_i 는 Bed_i 에서 수확을 하는 것으로 단순화할 수 있다.

만약 Bed_i 에 대해서 $\exists HR_i$ 이고 HR_i 에 대해서 $C_i \leq \beta_{HR}$ 이면 실제 이송로봇의 역할은 거의 없다. 왜냐하면 수확로봇이 $Rail_i$ 에서 수확할 수 있는 모든 작물을 한 번에 담아서 $Rail_i$ 를 빠져나오면 되기 때문이다. 반면, $C_i > \beta_{HR}$ 이면 별도의 이송로봇이 있는 것이 작업의 효율성을 높이는데 도움이 된다. 수확로봇의 버퍼량인 β_{HR} 이 찰때마다 이송로봇이 수확로봇의 작물을 넘겨받아 이송하고, 수확로봇은 시간이 많이 걸리는 수확에 시간을 더 쓰는 것이 전체 작업 속도를 올리는데 유리함이 자명하다.

현재 수준의 로봇 개발 기술과 시설원예의 구성으로는 $C_i \gg \beta_{HR}$ 이기 때문에 이송로봇을 통해서 작업 효율을 높일 수 있다.

2.3 이중 로봇 구성과 단일 로봇 구성의 작업 효율

수확로봇 만을 활용했을 때와 적절하게 이송로봇과 수확로봇을 조합하여 활용했을 때의 작업 효율에 대해서 살펴보자. 앞선 장의 전개를 활용하여 아래 표 1의 두 가지 경우를 비교한다.

동일한 시설원예에서 $p > 0, q > 0$ 인 p 개의 수확로봇과 q 개의 이송로봇으로 구성된 Team 1이 수확 및 이송작업을 단위시간 동안 할 때, $(p+q)$ 개의 수확로봇으로만 구성된 Team 2가 수확 및 이송작업을 단위시간 동안 할 때를 비교하자. 이송로봇 단일종으로 구성된 팀은 원천적으로 수확을 못하기 때문에 비교대

표 1. 수확률 비교를 위한 비교군 설정
Table 1. Set up a comparison group to compare yields

	Number of total robot	Number of harvesting robot	number of Transporting robot
Team 1	$p+q$	p	q
Team 2	$p+q$	$p+q$	0

상에서 빠진다.

Team 2를 위해서 여기서는 수확로봇의 이송속도를 추가로 고려한다. 이송로봇과 동일하게 수확로봇의 이동속도를 다음과 같이 정의한다. Vm_{HR} 은 수확로봇의 속도로 m/h 를 사용한다. Vr_{HR} Tr_{HR} 은 각각 수확로봇이 콘크리트에서 파이프로, 혹은 파이프에서 콘크리트로 이동할 때의 속도 및 시간이다. 수확로봇과 이송로봇은 현실적으로 동일 이동플랫폼을 사용할 것이기 때문에 이동속도는 시설원에 전체영역(파이프, 콘크리트 등)에서 (8)과 같이 동일하다고 볼 수 있다.

$$\begin{aligned}Vm_{HR} &= Vm_{TR} \\ Vc_{HR} &= Vc_{TR} \\ Vr_{HR} &= Vr_{TR} \\ Tr_{HR} &= Tr_{TR}\end{aligned}\tag{8}$$

다만, 이송로봇과 수확로봇은 한 번에 나를 수 있는 작물 수에서 차이가 현격히 있다.

$$I_{T_{HR}} = \frac{2K_M\beta_{HR}Vm_{HR}}{K_M L_r + L_c + 2K_M Tr_{HR}Vm_{HR}}\tag{9}$$

위 수확로봇의 이송속도 $I_{T_{HR}}$ 와 (6)의 이송로봇의 이송속도 I_{TR} 와의 관계에서 이송속도의 관계는 (10)와 같이 단순히 적재함이 한 번에 나를 수 있는 작물 수의 비로 단순화된다.

$$I_{TR}/I_{T_{HR}} = \beta_{TR}/\beta_{HR}\tag{10}$$

Team 1과 Team 2가 단위시간 동안 수확 및 이송하는데 있어서 가장 큰 차이점은 Team 1은 수확과 이송을 병렬로 동시에 할 수 있고, Team 2는 개개의 로봇 입장에서는 수확 및 이송을 순차적으로 해야 한다는 것이다. 다만 로봇이 여러 대이기 때문에 로봇 간

에는 병렬 작업으로 볼 수 있다.

작업의 효율을 보기 위해서는 전체 n 개의 베드가 있는 시설원에 전체를 수확하고 작물 하차장으로 옮기는 완결된 작업을 하는데 들어가는 총시간을 비교할 수도 있고, 단위 시간에 수확 및 이송을 하는 작물 수를 비교할 수도 있다. 본 고에서는 기 전개된 수확 속도 및 이송속도 모델을 활용하여 후자의 방법을 이용한다.

문제를 단순화하기 위해서 Bed_i 의 수확가능한 작물 C_i 는 동일하다고 가정한다. 세부적인 운용에 따라서 달라질 수는 있겠지만, 앞서 살펴보았듯이 $p < n$ 이고 각각의 수확로봇은 개별 베드에 배치되어 동선의 간섭없이 작업을 하는 것으로 가정한다.

수확속도 및 이송속도는 이상적인 환경을 가정하고 연속적인 작업을 했을 때의 정의이다. 실제로는 연속 작업은 없다. Team 1의 경우 수확로봇이 연속 수확를 통해서 적재함의 버퍼 β_{HR} 가 다 차면 이송로봇을 호출하여 기 수확한 작물을 전달해야 한다. 수확로봇과 이송로봇의 거리를 줄이고, β_{HR} 개의 작물을 전달메커니즘으로 전달하는데는 실제 시간이 들어간다. 수확로봇과 이송로봇간의 유기적인 통신을 통하여 작물전달에 소요되는 시간이 전체시간에서 무시할만큼 작다고 가정하고 단위시간당 수확량을 계산한다. 이 때의 수확량은 작물 하역장까지 이송을 고려한 것이다.

위의 이상적 가정에서 Team 1의 수확량은 결국 p 개의 수확로봇이 단위시간동안 연속적으로 수확했을 때의 수확량이다. 수확로봇이 적재함 버퍼량인 β_{HR} 를 채우는데 걸리는 시간은 (11)과 같다.

$$T_{\beta_{HR}} = \beta_{HR}/I_{HR}\tag{11}$$

이상적 가정에 의해 이송로봇이 작물을 전달받고 이송을 하는 시간은 수확로봇의 연속적 수확에 영향을 주지 않으므로, Team 1의 단위시간당 수확 및 이송하는 작물량 M_{T1} 은 아래 식으로 근사할 수 있다.

$$M_{T1} = p \times I_{HR} = \frac{p\beta_{HR}}{T_{\beta_{HR}}}\tag{12}$$

Team 2의 경우는 Team 1보다 복잡하다. 단일 로봇 집단이 같은 작업, 즉 수확 후 이송, 을 병렬로 하는 방식이다. 수확로봇이 시설원에환경에서 수확물을 하역장에 두고 돌아오는 왕복시간은 아래 (13)와 같이 표현할 수 있다.

$$T_{t_{HR}} = 2 \left(\frac{K_M L_r + L_c}{2K_M V m_{HR}} + Tr_{TR} \right) \quad (13)$$

$$= \frac{K_M L_r + L_c}{K_M V m_{HR}} + 2Tr_{TR}$$

따라서 한 대의 수확로봇이 단위시간동안 수확 및 이송하는 작물량 M_{HR} 은 아래 (14)과 같다.

$$M_{HR} = \frac{\beta_{HR}}{T_{\beta_{HR}} + T_{t_{HR}}} \quad (14)$$

Team 2 의 수확로봇들은 서로 작업 간섭이 없으므로 Team 2의 단위시간당 작물 처리량은 단순히 전체 수확로봇의 수를 곱한 (15)로 표현된다.

$$M_{T2} = \frac{(p+q)\beta_{HR}}{T_{\beta_{HR}} + T_{t_{HR}}} \quad (15)$$

하지만 실제로는 복수의 로봇이 움직이기 때문에 콘크리트 영역에서는 로봇 간의 동선 겹침이 발생할 수 있다. $(p+q)$ 개의 수확로봇들이 동시에 작업을 시작하고, 수확속도가 동일하다고 가정했기 때문에 이상적으로 동작한다면 수확로봇들은 동시에 콘크리트 영역에 진입하게된다.

$$\frac{M_{T1}}{M_{T2}} = \frac{p}{(p+q)} \cdot \frac{(T_{\beta_{HR}} + T_{t_{HR}})}{T_{\beta_{HR}}} \quad (16)$$

많은 가정을 했지만, 단순화한 수식 (16)에서 Team 1과 Team 2의 수확속도 M_{T1} , M_{T2} 의 비는 직관적이다. 각 팀을 구성하는 수확로봇의 수의 비에 비례하고, Team 1은 이송로봇을 통하여 작물을 하역장으로 나르는 시간이 줄어든 만큼 수확량이 늘어난다. 이송로봇을 활용하는 Team 1은 이송로봇의 수 q 가 적고, 이송로봇 없이 수확로봇이 이송하는 시간 $T_{t_{HR}}$ 이 길 때 유리하다. 다시 말하면 필요 이송로봇의 수 q 가 적다는 것은 이송로봇의 적재량이 높고, 이송속도가 높아서 수확로봇이 연속적으로 수확을 할 수 있는 조건을 말한다.

III. 수확로봇 및 이송로봇 시스템 개발

앞서 살펴본 바 이송로봇의 성능이 높을 때는 수확로봇과 이송로봇을 섞어서 팀을 구성하는 것이 작업

속도 면에서 훨씬 이롭다. 본 연구에서는 실 구현을 위해서 수확로봇 및 이송로봇을 개발하였다.

그림 5에서 개발한 수확로봇을 보여주고 있다. 모바일 플랫폼은 시설원예의 파이프와 콘크리트를 이동할 수 있도록 [7]의 (주)하다의 시설이동을 위한 모바일 로봇을 활용하였고, 작물 수확을 위해서 [8] 두산로보틱스의 가반하중 5Kg급 6축 수직다관절 로봇을 탑재하였다. 온실 작업환경은 사람에게 맞추어져 배지사이의 거리가 좁고, 작업영역이 협소하여 소형로봇이 적합하다. 또한 필요한 힘 또한 단순 수확의 경우 그리퍼의 무게를 고려하면 페이로드 5kg급이 적합하다. 수확용 틀은 [9]의 OnRobot사 상용 소프트웨어 그리퍼를 적용하였다. 실험 대상 작물인 토마토는 크기가 균일하지 않고, 형태도 미세하게 달라서 소프트그리퍼가 적합하다. 개발한 수확로봇은 수확한 작물 적재 및 전달을 위한 적재함 메커니즘을 포함하고 있다. 수확용 로봇의 적재함이 차거나 미리 설정한 수만큼 작물을 수확하면, 수확로봇의 적재함을 위로 상승시킨 후 이송로봇의 적재함에 쏘는 방식이다. 그림 6은 수확로봇이 이송로봇에 수확한 작물을 전달하는 보여준다.

그림 7은 개발한 이송로봇을 보여주고 있다. 이송로봇은 최대 4개의 사람 작업자용 적재함을 탑재하여, 복수의 수확로봇의 수확물들을 한 번에 적재하여 이

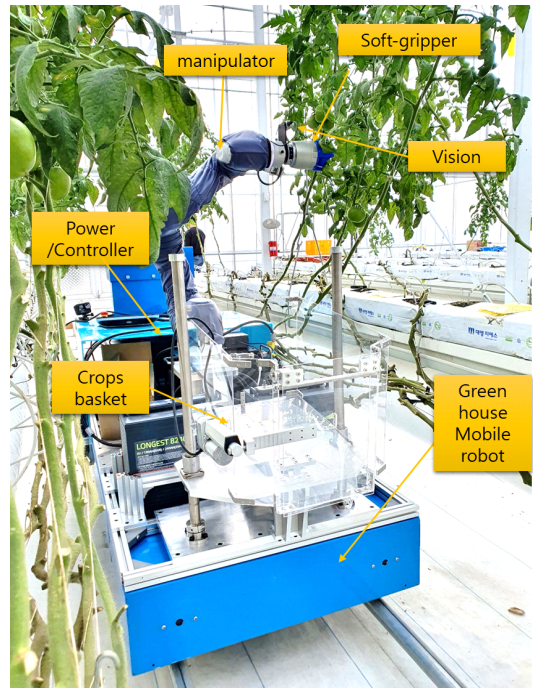


그림 5. 매니퓰레이터를 가진 작물 수확용 로봇
Fig. 5. Harvesting robot with manipulator

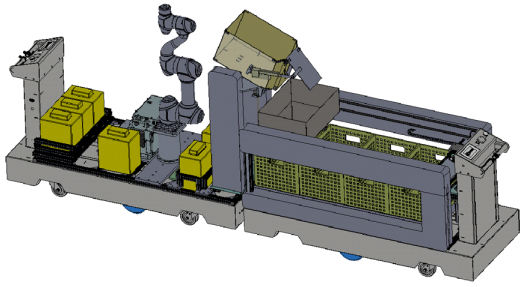


그림 6. 수확로봇에서 이송로봇으로의 작물전달 메커니즘
Fig. 6. Crops transferring mechanism

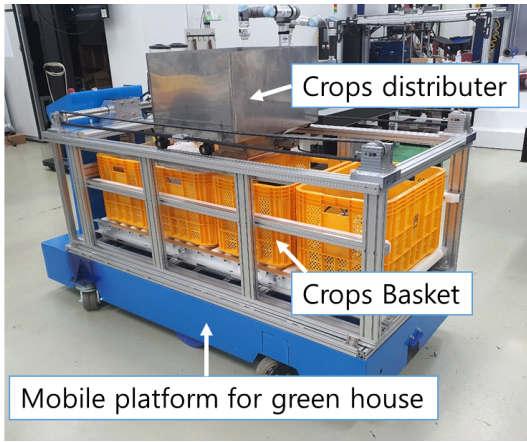


그림 7. 작업자용 적재함 이송용 이송로봇
Fig. 7. Transporting robot with crops basket for human workers

송할 수 있다. 특히 사용한 적재함은 사람 작업자 용을 그대로 사용함으로써 이송 후 사람에 의한 연계 작업이 가능한 장점이 있다.

IV. 수확로봇 및 이송로봇 혼용시스템의 실험적 분석

본 장에서는 실제 실험 데이터와 시설원의 환경 조건을 이용하여 수확로봇과 이송로봇으로 혼합 구성된 Team 1과 수확로봇으로만 구성된 Team 2의 작업 효율을 비교한다.

작물 이송에 실제 소요되는 작물 상·하차를 단순화하고 후속 작업과의 연계를 위해서 사람 작업자가 사용하는 적재함을 이용한다. 따라서 자연수 상수 K_b 에 대해서 $\beta_{TR} = K_b \beta_{HR}$ 의 관계가 성립하며, 실 개발에서는 $K_b = 4$ 이다. 실험적으로 $T_{\beta_{HR}}$ 를 구하기 위해서 단일 작물에 대해서, 본 실험에서는 토마토, 수확실험

을 했을 때 약 20초가 소모되었다. 그림 8은 개발 수확로봇으로 토마토를 수확 할 때의 소요시간과 과정을 순차적으로 보여준다. β_{HR} 은 설계 및 개발에서 20으로 결정하였다. 이는 당연히 대상 작물에 따라 변하는 값이다. 따라서 $T_{\beta_{HR}} = 400\text{sec} \cong 0.11h$ 이고, $I_{HR} \cong 180u/h$ 이다.

한편 개발한 이송로봇 및 수확로봇의 이동속도는 평지기준 $V_{m_{HR}} = V_{m_{TR}} = 50m/min$ 이며 $K_M = 1.5$ 이다. 또한 시설원에 환경 변수는 중규모 시설을 가정하고 $L_r = 40m$, $L_t = 2.5m$, $L_c = 20m$ 로 설정했다. 이송로봇이 파이프에서 콘크리트로 이동하고 목적각도로 회전까지 하는 시간은 실험에 근거에 $Tr_{TR} = 3min = 0.05h$ 로 설정했다. 수식 (13)에 따라서 $T_{t_{HR}} = 0.17h$ 이다. 이상을 수식 (16)에 대입하면 (17)과 같이 정리된다.

$$\frac{M_{T_1}}{M_{T_2}} \cong \frac{2.5p}{(p+q)} \quad (17)$$

정리하면 $M_{T_1} > M_{T_2}$ 인 경우는 $1.5p > q > 0$ 이고, 거꾸로 $M_{T_1} < M_{T_2}$ 인 경우는 $q > 1.5p > 0$ 이다.

즉, 일반적으로 이송로봇을 적용하는 것이 수확로봇만 쓰는 것보다 수확속도가 더 높지만, 이송로봇의 수가 수확로봇보다 상대적으로 너무 많으면 수확속도가 떨어짐을 알 수 있다. 수확로봇대비 이송로봇의 상대적 비는 본 연구에서는 1.5 이상이 적절한 것으로 볼 수 있다. 이 비율은 K_M 에 의존적이다.

경향성을 보기위해서 $K_M = 1$ 인 경우, 즉 콘크리트 영역과 파이프 영역의 이동속도를 동일하게 운영하는 경우를 보면 (18)과 같다. $M_{T_1} > M_{T_2}$ 인 경우는 $p > q > 0$ 이고, 거꾸로 $M_{T_1} < M_{T_2}$ 인 경우는 $q > p > 0$ 이다.

$$\frac{M_{T_1}}{M_{T_2}} \cong \frac{2p}{(p+q)} \quad (18)$$

이를 다시 풀면, 수확로봇 대비 과하지 않는 적절한 비율로 이송로봇을 적용하면 시설원에 전체적인 작업 효율을 높일 수 있다는 것이다.

추가적으로 작업효율을 나타내기 위해 도출한 작업 속도 모델을 좀 더 세밀하게 모델링함으로써 궁극적

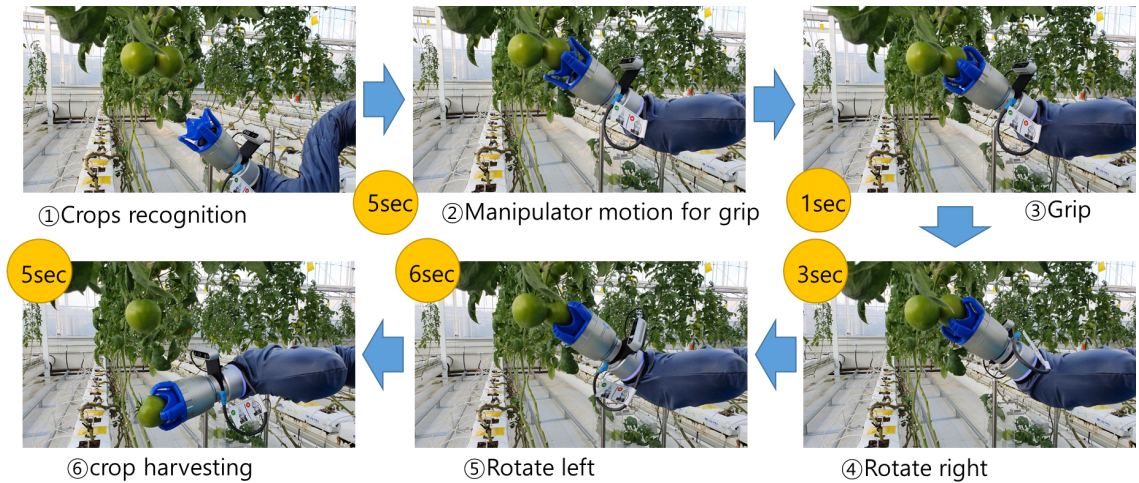


그림. 8. 수확로봇을 이용한 작물 수확 과정 및 속도 측정 실험
 Fig. 8. Crop harvesting process and speed measurement experiment using harvesting robot

으로는 주어진 시설원에 환경에 필요한 최적의 수확 로봇 및 이송로봇 조합을 도출하는 것도 가능하다. 이런 최적화 모델 연구는 추가 연구로 계획되어 있으며, 본 연구에서는 상대적으로 수확로봇만 사용할 때보다 이송로봇을 적절히 활용하는 것이 더 효율적일 수 있음을 보이는 것으로 한정한다.

V. 결 론

스마트팜과 같은 시설원에 사용하기 위해 수확로봇과 이송로봇이 개발되고 있지만, 수확로봇과 이송로봇을 동시에 활용하는 경우는 드물다. 수확로봇은 단일 로봇의 수확기술 확보를 위한 연구가 이루어지는 단계이고, 이송로봇은 작업자를 작물이송을 도와주는 것이 목적이다. 본 연구에서는 수확로봇과 이송로봇을 적절히 혼합하여 사용함으로써 시설원에 전체의 수확 작업효율을 더 올릴 수 있음을 보였다.

시설원에 전체의 로봇을 이용한 작업속도를 도출하였고, 실제 개발한 수확로봇 및 이송로봇을 이용한 실험데이터와 시설원에 환경 변수 등으로 작업속도 모델의 실용적 의미를 분석하였다.

다만, 수확로봇 및 이송로봇의 수확량 모델링을 위해서 많은 과정을 생략하고 단순화함으로써 정밀도가 떨어지는 단점은 있다. 수확로봇이 수확을 위해서 이동하는 시간, 수확한 작물을 수확로봇에서 이송로봇에 전달하는 시간, 로봇 간의 동선 겹침에 따른 회피 기동 등이 생략된 간략화 모델을 도출하였다.

추후 연구를 통하여 좀 더 정밀한 수확속도, 이동속

도, 작업속도 등의 모델을 도출하고, 주어진 시설원에 적용하기 위한 수확로봇 및 이송로봇의 조합을 구할 수 있는 최적화 연구가 계획되어 있다.

References

- [1] B. Arad, J. Balendonck, R. Barth, O. Ben-Shahar, Y. Edan, T. Hellstrom, J. Hemming, P. Kurster, O. Ringdahl, T. Tielen, and B. Tuijl, "Development of a sweet pepper harvesting robot," *J. Field Robotics*, Wiley, vol. 37, pp. 1027-1039, 2020. (<https://doi.org/10.1002/rob.21937>)
- [2] C. W. Bac, J. Hemming, B. Tuijl, R. Barth, E. Wais, and E. J. Henten, "Performance evaluation of a harvesting robot for sweet pepper," *J. Field Robotics*, Wiley, vol. 34, pp. 1123-1139, 2017. (<https://doi.org/10.1002/rob.21709>)
- [3] RootAI, "Strawberry harvesting robot-Intelligent motion," <https://root-ai.com/#tech>, accessed 2022.06.13.
- [4] J. Seol, S. Lee, and H.-I. Son, "A review of end-effector for fruit and vegetable harvesting robot," *J. Korea Robotics Soc.*, vol. 15, no. 2, pp. 91-99, 2020. (<https://doi.org/10.7746/jkros.2020.15.2.091>)
- [5] K.-C. Kim, Y.-K. Hong, G. Kim, H. Kim, D.

Seo, and Y. Kang, "A analysis economic on transfer robot for smart greenhouse," in *Proc. Korea Soc. for Agric. Mach.*, vol. 26, pp. 175-175, 2021.

- [6] T. Choi, J.-W. Park, J.-J. Kim, and Y.-S. Shin, "Development of greenhouse crop harvesting system using multiple robots," in *Proc. Int. Conf. Contr., Automat. and Syst.*, Jeju, Korea, Oct. 2021.
- [7] Hada Korea, "Mobile robot on green house, C EROS," http://www.hada-korea.com/product/full_automatic_robot_sprayer.php, accessed 2021.06.04.
- [8] Doosan Robotics, "Cooperative robot, M0609," <https://www.doosanrobotics.com/ko/products/series/m0609>, accessed 2022.06.04.
- [9] OnRobot, "Soft gripper - flexible food-graderobotgruooer," <https://onrobot.com/en/products/soft-gripper>, accessed 2021.06.04., accessed 2022.06.13.

최 태 용 (Taeyong Choi)



2003년 2월 : POSTECH 전기
전기 공학과 졸업
2010년 2월 : KAIST 전기전자
공학과 석.박사 졸업
2010년 2월~2010년 12월 : 삼
성전자 책임연구원
2015년 6월~2016년 6월 : Car-

negie Mellon Univ., PostDoc

2011년 1월~현재 : 한국기계연구원 책임연구원
<관심분야> 로봇제어, 농업용로봇, 산업용로봇
[ORCID:0000-0002-4752-849X]

박 종 우 (Jongwoo Park)



2007년 2월 : 고려대학교 컴퓨터
정보공학과 졸업
2009년 2월 : 고려대학교 제어계
측공학과 메카트로닉스 전공
석사 졸업
2016년 2월 : 고려대학교 제어계
측공학과 메카트로닉스전공
박사 졸업

2016년 3월~2019년 2월 : 한국기계연구원 로봇메카트
로닉스 연구실 Post-doc 근무
2019년 3월~현재 : 한국기계연구원 선임연구원
<관심분야> 로봇공학, 통합시스템, 네트워크 제어
[ORCID:0000-0002-7197-0069]

김 정 중 (Jeong-Jung Kim)



2006년 2월 : 전북대학교 전자
및 정보공학부 졸업
2008년 2월 : KAIST 로봇공학
학제 석사 졸업
2015년 8월 : KAIST 전기 및
전자공학과 박사 졸업
2015년 8월~2017년 4월 : 한국

과학기술연구원 박사 후 연구원
2017년 4월~현재 : 한국기계연구원 선임연구원
<관심분야> 로봇 지능, 로봇 제어
[ORCID:0000-0003-2825-8946]

신 영 식 (Young-Sik Shin)



2013년 2월 : 인하대학교 전기
공학과 졸업
2015년 2월 : KAIST 로봇공학
학제 석사 졸업
2020년 2월 : KAIST 건설 및
환경공학과(로봇공학학제)
박사 졸업

2019년 12월~현재 : 한국기계연구원 선임연구원
<관심분야> SLAM, Computer Vision, Autonomous
Robot
[ORCID:0000-0002-9653-0633]

김 두 형 (Doo-hyung Kim)



1982년 2월 : 서울대학교 기계설
계학과 졸업

1990년 2월 : KAIST 생산공학
과 석사 졸업

2003년 2월 : KAIST 기계공학
과 박사 졸업

1982년 3월~현재 : 한국기계연

구원 책임연구원

<관심분야> 로봇 및 자동화기계 설계, 기계제어 S/W.

[ORCID:0000-0001-5870-3196]