

# 비주얼 서보잉을 통한 시설 온실 참외 수확 로봇 매니플레이션 기술 구현

김만중\*, 김용현\*, 김원경\*, 이기범\*, 조병효\*, 홍영기\*, 김경철<sup>o</sup>

## Implementation of Facility Greenhouse Oriental Melon Harvesting Robot Manipulation Technology through Visual Servoing

Man-Jung Kim\*, Yong-Hyun Kim\*, Won-Kyung Kim\*, Ki-Beom Lee\*,  
Byeong-Hyo Cho\*, Youngki Hong\*, Kyoung-Chul Kim<sup>o</sup>

### 요 약

최근 지속적인 농업인구의 감소로 인하여 농업 자동화에 대한 관심과 확대가 이루어지고 있다. 본 논문에서는 수경재배 온실에서 재배되는 참외를 수확하기 위해, 비주얼 서보잉을 통한 수확 로봇의 매니플레이션 기술에 대하여 연구를 진행하였다. 수확 로봇은 6축 매니플레이터, 산업용 PC, RGB-D 카메라로 구성되며, 플랫폼에 부착된 카메라를 통하여 작물의 위치를 인식 후 비주얼 서보잉 기술을 이용하여 매니플레이터를 이동, 수확을 수행한다. 비주얼 서보잉을 통한 매니플레이터 제어를 위하여 매니플레이터의 정·역기구학식 도출과 작동 제한 범위 계산을 수행하였다. 제안된 수확 로봇 시스템의 성능 시험을 수행하였으며, 수행 결과 수경재배 참외 온실에서 로봇이 충분히 수확 작업을 수행할 수 있을 것으로 평가되었다.

**키워드** : 매니플레이터, 비주얼 서보잉, 수확 로봇, 수경재배 온실, 참외

**Key Words** : Manipulator, Visual Servoing, Harvesting Robot, Hydroponic Greenhouse, Oriental Melon

### ABSTRACT

Recently, due to the reduction in agricultural workers as a proportion of the population, it is an increasing need for automation conversion in agricultural fields. In this study, we studied the manipulation technologies of harvesting robots using visual servoing for oriental melons grown in a hydroponic greenhouse. The harvesting robot consist of a 6-axis manipulator, controller, and RGB-D camera. It recognizes the location of the crops using the camera installed on a platform, and then manipulator moves and harvests the oriental melons using visual servoing technology. For controlling the manipulator using visual servoing technology, we conducted the forward kinematics & inverse kinematics analysis, and the investigation of work space for manipulator. We performed the test of the proposed harvesting robot system, and as a result, it is considered that the robot system can be applied to the harvesting work of oriental melons in a hydroponic greenhouse.

※ 본 연구는 농림축산식품부 및 과학기술정보통신부, 농촌진흥청의 재원으로 농림식품기술기획평가원과 재단법인 스마트팜연구개발사업단의 스마트팜다부처패키지혁신기술개발사업의 지원을 받아 수행되었습니다(421031-04).

◆ First Author : National Institute of Agricultural Sciences, Jeonju, Korea, kmj0403@korea.kr, 정회원

◦ Corresponding Author : National Institute of Agricultural Sciences, Jeonju, Korea, kkcmmole@korea.kr, 정회원

\* National Institute of Agricultural Sciences, Jeonju, Korea

논문번호 : 202207-138-0-SE, Received June 15, 2022; Revised August 22, 2022; Accepted August 30, 2022

## I. 서론

최근 지속적인 농업인구의 감소로 인하여 농업 자동화에 대한 관심과 연구가 활발히 진행되고 있다. 국내 농업 분야는 크게 노지와 시설로 구분되며, 최근 자동화 및 무인화에 대한 연구가 급격히 증가하고 있다. 시설 자동화는 스마트팜의 한 분야이며, 기존의 농업인의 경험과 감각에 의존하는 주관적인 농사기술이 센서와 네트워크 기술을 기반으로 컴퓨터를 통해 지능화 및 자동화되고 있다. 이 중 시설원에 분야는 우리가 알고 있는 온실의 형태를 가지고 있으며, 온실 내부에 센서와 액추에이터를 설치하여, 온실의 정보를 획득하고 원격으로 환경제어가 가능하도록 구성되어 있다<sup>1)</sup>. 스마트팜에서 작업자는 원격으로 정보를 받을 수 있으며, 환경제어도 가능하기 때문에 노동력 절감 및 작업자의 건강 향상에도 큰 도움을 줄 수 있다. 그림 1과 같이 참외의 경우 일반적으로 토경재배방식으로 재배되며, 온실 내부의 바닥에서 재배하여 수확 및 가지치기 등을 사람이 직접 수행하기 때문에 다양한 근, 골격계 질환에 노출되어 있었다<sup>2)</sup>. 이를 방지하고자 바닥이 아닌 수경재배 베드에서 참외를 재배하기 위한 연구가 진행되고 있다. 따라서 본 연구에서는 수경재배 온실 내부에서 재배되는 참외를 수확하기 위한 로봇에 대하여 연구를 진행하였다.



그림 1. 토경재배 참외 온실과 수경재배 참외 온실  
Fig. 1. Soil greenhouse and hydroponic greenhouse for oriental melons

## II. 본론

### 2.1 수확 로봇 시스템

수확 로봇 시스템은 그림 2와 같이 동작한다. 로봇이 베드 사이로 진행하면 플랫폼에 부착된 카메라를 통해 참외를 인식하고, 인식한 참외의 X, Y 좌표와 거리를 계산하여 반환한다. 그 후, 익은 참외를 선별하고, 선별한 참외를 수확하는 작업을 수행한다.

#### 2.1.1 6축 매니플레이터

기존 수확 로봇 연구들은 작물에 매니플레이터를 맞춤 제작하여 연구를 진행한 것이 대부분이다. 그러

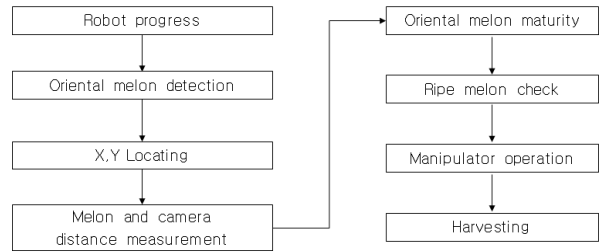


그림 2. 수확 로봇 알고리즘  
Fig. 2. Harvesting robot algorithm

나 최근 국내·외의 연구사례를 보았을 때, 실내·외 모두 상용 매니플레이터를 구매하여 사용하는 사례가 증가하고 있다<sup>3)</sup>. 매니플레이터를 따로 제작하는 것은 사용하는 목적에 따라 적절하게 구성할 수 있다는 장점이 있으나, 비용 및 제작 시간이 상당히 소요되는 단점이 있다. 상용 6축 매니플레이터의 경우에는 기존 산업용으로 제작된 제품이 많으나, 농업 시스템에 적용하기에는 크기 및 무게가 적합하지 않았다. 그러나 최근에는 소형이면서 3 kg 이상의 가반중량을 가지는 상용 매니플레이터가 많이 개발되고 있으며, 이는 유연성과 시간 단축 면에서 큰 장점을 가지고 있다. 이러한 이유로 상용 매니플레이터를 사용하는 연구들이 증가하고 있는 추세이다. 국내의 대표적 매니플레이터 기업으로는 두산로보틱스, 레인보우 로보틱스, 뉴로메카, 글로벌제우스가 있으며, 국외의 대표적 기업으로는 유니버설로봇(미국) 등이 있다. 각 회사의 로봇들은 장단점이 있으나, 본 연구에서는 글로벌제우스사의 ZRA-0515P 로봇(Global zeus, Korea)을 사용하여 연구를 진행하였다<sup>4)</sup>.

#### 2.1.2 매니플레이터 제원

본 연구에 사용한 매니플레이터는 ZRA-0515P로 5 kg의 가반중량과 850 mm의 도달거리를 가진다. 본체 중량은 17.5 kg으로 각 링크의 치수 및 관절에서 축의 방향은 그림 3과 같다<sup>5)</sup>. 회사에서 제공하는 프로그램을 사용하면 간단하게 제어가 가능하나, 현장에 유연하게 적용하기 어렵다는 문제가 있다. 따라서 실제 로봇의 움직임을 프로그램하기 위하여 매니플레이터의 정·역기구학 계산을 수행하였다.

#### 2.1.3 링크파라미터 테이블

정·역기구학을 수행하기 위해서는 매니플레이터의 각 관절에서의 좌표축과 각 링크의 길이 정보가 필요하다. 그림 4와 같이 각 링크의 좌표를 확인하고 표 1과 같이 링크파라미터 테이블을 작성하였다.

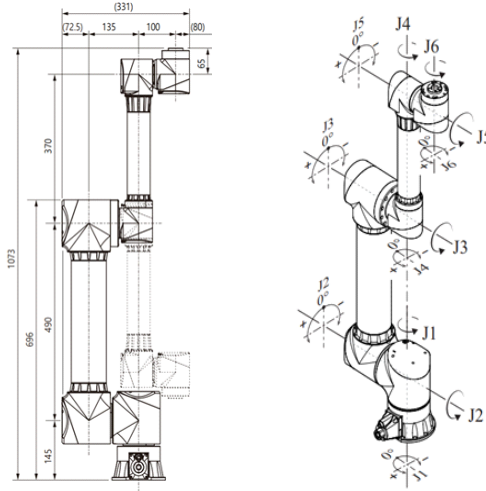


그림 3. ZRA-0515P 로봇 사양  
Fig. 3. ZRA-0515P robot specification

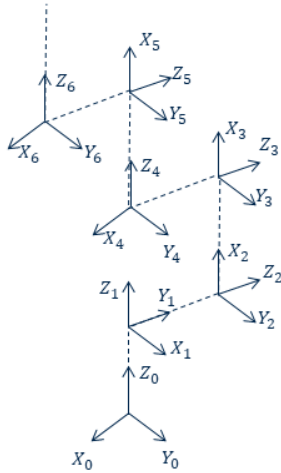


그림 4. ZRA-0515P 좌표축  
Fig. 4. ZRA-0515P axis

표 1. 링크 파라미터  
Table 1. Link parameters

i	$\alpha_i - 1 (^{\circ})$	$a_i - 1 (\text{mm})$	$d_i (\text{mm})$	$\theta_i (^{\circ})$
1	0	0	145	90
2	-90	0	0	-90
3	0	490	0	0
4	90	0	370	0
5	-90	0	100	0
6	90	0	65	-90

각 관절에서의 좌표축과 링크의 길이에 대한 상관 관계를 링크파라미터라 하며, 링크파라미터의 각 변수는 그림 5와 같이 정의된다<sup>[8]</sup>. 여기에서  $a_i$ 는  $\hat{X}_i$ 축에

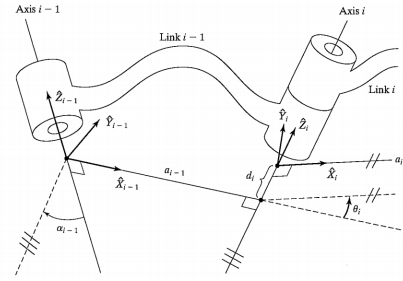


그림 5. i와 i-1축 사이의 관계  
Fig. 5. Relationship between i and i-1 axis

서  $\hat{Z}_i$ 축과  $\hat{Z}_{i+1}$ 축 사이의 길이이며,  $\alpha_i$ 는  $\hat{X}_i$ 축에서  $\hat{Z}_i$ 축과  $\hat{Z}_{i+1}$ 축이 이루는 각도이다.  $d_i$ 는  $\hat{Z}_i$ 축에서  $\hat{X}_{i-1}$ 축과  $\hat{X}_i$ 축 사이의 거리이며,  $\theta_i$ 은  $\hat{Z}_i$ 축에서  $\hat{X}_{i-1}$ 축과  $\hat{X}_i$ 축이 이루는 각도이다.

#### 2.1.4 정기구학

정기구학은 로봇의 각 관절의 각도를 통해 엔드이펙터의 위치를 결정하기 위한 기구학 계산 방법이다. 기구학 계산을 위한 행렬은 식(1)에 따라 각 관절에서의 기구학 행렬이 식(2)~식(7)과 같이 결정되며, 식(2)~식(7)을 곱하여 식(8)과 같이  ${}^0_6T$ 를 만들어 각 관절 각도에 따른 엔드이펙터의 위치를 계산할 수 있다<sup>[8]</sup>.

$${}^{i-1}_i T = \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i & 0 & a_{i-1} \\ s\theta_i c\alpha_{i-1} & c\theta_i c\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1} d_i \\ s\theta_i s\alpha_{i-1} & c\theta_i s\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1} d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$${}^0_1 T = \begin{bmatrix} -s\theta_1 & -c\theta_1 & 0 & 0 \\ c\theta_1 & -s\theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 145 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$${}^1_2 T = \begin{bmatrix} s\theta_2 & -c\theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ c\theta_2 & -s\theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$${}^2_3 T = \begin{bmatrix} c(\theta_3) & -s(\theta_3) & 0 & 490 \\ s(\theta_3) & c(\theta_3) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$${}^3_4 T = \begin{bmatrix} c(\theta_4) & -s(\theta_4) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & -370 \\ s(\theta_4) & c(\theta_4) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$${}^4_5 T = \begin{bmatrix} c(\theta_5) & -s(\theta_5) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 100 \\ -s(\theta_5) & -c(\theta_5) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$${}^5_6 T = \begin{bmatrix} s\theta_6 & c\theta_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 65 \\ -c\theta_6 & s\theta_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$${}^0_6 T = \begin{bmatrix} r^{11} & r^{12} & r^{13} & px \\ r^{21} & r^{22} & r^{23} & py \\ r^{31} & r^{32} & r^{33} & pz \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} r^{11} &= -s_1 s_{2-3} (c_4 c_5 s_6 + s_4 c_6) \\ &\quad - c_1 s_4 c_5 s_6 + c_1 c_4 c_6 + s_1 s_2 s_3 s_5 s_6 \\ r^{12} &= -s_1 s_{2-3} (c_4 c_5 c_6 + s_4 s_6) \\ &\quad - c_1 s_4 c_5 c_6 + c_1 c_4 s_6 + s_1 s_2 s_3 s_5 s_6 \\ r^{13} &= -s_1 (c_4 s_5 s_{2-3} + c_5 c_{2-3}) - c_1 s_4 s_5 \\ r^{21} &= c_1 s_{2-3} (c_4 c_5 s_6 + s_4 c_6) \\ &\quad - c_1 s_5 s_6 c_{2-3} - s_1 (s_4 c_5 s_6 + c_4 c_6) \\ r^{22} &= c_1 s_{2-3} (c_4 c_5 c_6 + s_4 s_6) \\ &\quad - c_1 s_5 c_6 c_{2-3} - s_1 (s_4 c_5 c_6 + c_4 s_6) \\ r^{23} &= c_1 (s_{2-3} c_4 s_5 + c_{2-3} c_5) - s_1 s_4 s_5 \\ r^{31} &= c_{23} (c_4 c_5 s_6 + s_4 c_6) - s_{23} s_5 s_6 \\ r^{32} &= c_{23} (c_4 c_5 c_6 - s_4 s_6) - s_{23} s_5 c_6 \\ r^{33} &= c_{23} c_4 s_5 + s_{23} c_5 \\ px &= 65 (s_1 c_4 s_5 s_{2-3} + s_1 c_5 c_{2-3} + c_1 s_4) \\ &\quad + 100 (s_1 s_4 s_{2-3} - c_1 c_4) - 370 s_1 c_{2-3} - 490 s_1 s_2 \\ py &= -65 (c_1 (s_{2-3} c_4 s_5 + c_{2-3} c_5) - s_1 s_4 s_5) \\ &\quad - 100 c_4 (c_1 s_{2-3} + s_1) + 370 c_1 c_{2-3} + 490 c_1 s_2 \\ pz &= -65 (c_{23} c_4 s_5 + s_{23} c_5) \\ &\quad - 100 c_{23} s_4 + 370 s_{23} + 490 c_2 + 145 \end{aligned}$$

### 2.1.5 역기구학

역기구학 계산은 정기구학 계산 결과를 바탕으로 수행하였다. 역기구학은 로봇의 엔드이펙터의 위치인 X, Y, Z와 RX, RY, RZ의 위치를 통해 로봇의 각 관절에 대한 각도를 알아내기 위한 계산 방법이다. 역기구학 결과는 식(9)에서 식(19)와 같이 계산되며, 각 관절의 각도인  $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6$ 은 식 (11), (14), (12), (15), (18), (19)을 통해 계산된다.

$$-s_1 px + c_1 py = 1 py \quad (9)$$

$$\begin{aligned} px &= p \cos \phi, py = \psi \sin \phi \\ p &= \sqrt{px^2 + py^2}, \phi = \text{Atan2}(px, py) \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \theta_1 &= \text{Atan2}(px, py) \\ &\quad - \text{Atan2}\left(\frac{1 py}{p}, \pm \sqrt{px^2 + py^2 - 1 py^2}\right) \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \theta_3 &= \text{Atan2}(a_3, d_4) \\ &\quad - \text{Atan2}(K, \pm \sqrt{a_3^2 + d_4^2 - K^2}) \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \theta_{23} &= \\ &\quad \text{Atan2}(-r_{13} s_1 + r_{23} c_1, -r_{13} c_1 c_{23} + r_{33} s_{23}) \end{aligned} \quad (13)$$

$$\theta_2 = \theta_{23} - \theta_3 \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \theta_4 &= \text{Atan2} \\ &\quad (-r_{13} s_1 + r_{23} c_1, -r_{13} c_1 c_{23} + r_{33} s_{23}) \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} s_5 &= -(r_{13} (c_1 c_{23} c_4 + s_1 s_4) \\ &\quad + r_{23} (s_1 c_{23} c_4 - c_4 s_4) - r_{33} (s_{33} c_4)) \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} c_5 &= r_{13} (-c_1 s_{23}) \\ &\quad + r_{23} (-s_1 s_{23}) + r_{33} (-c_{23}) \end{aligned} \quad (17)$$

$$\theta_5 = \text{Atan2}(s_5, c_5) \quad (18)$$

$$\theta_6 = \text{Atan2}(s_6, c_6) \quad (19)$$

## 2.2 비주얼 서보잉(Visual Servoing)

비주얼 서보잉(Visual Servoing)이란 로봇의 작업 공간 또는 매니플레이터의 말단장치에 장착된 비전 센서를 통해 입력된 영상을 처리함으로써 로봇이 지능화된 동작을 수행할 수 있도록 하는 기술이다. 비주얼 서보잉은 크게 위치기반 서보제어와 영상기반 서보제어로 구분할 수 있다<sup>9,10</sup>. 이러한 시스템은 그림 6 과 같이 카메라의 종류 및 구성에 따라 다섯 가지 유형으로 구분될 수 있다. 싱글 카메라와 스테레오 카메라를 각각 이용한 hand-in-eye 방식과 hand-to-eye 방식, 이 둘을 모두 혼용한 hybrid 방식으로 나뉜다. hand-in-eye 방식은 매니플레이터 말단장치에 카메라를 부착하여 운용하는 방식이다. hand-to-eye 방식은 매니플레이터 외부에 카메라를 부착하여 운용하는 방식이며, hybrid 방식은 매니플레이터의 말단장치와 외부에 각각 카메라를 부착하여 사용한다<sup>11</sup>.

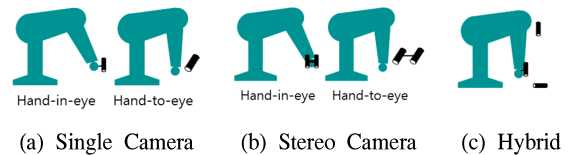


그림 6. 비주얼 서보잉 방식  
Fig. 6. Visual servoing methods



hand-in-eye 방식은 매니플레이터의 엔드이펙터에 카메라가 부착되기 때문에 엔드이펙터와 카메라 사이의 거리가 가까워 오차가 작은 장점이 있으나, 매니플레이터의 움직임에 따라 시야의 변화와 사각이 생성되는 단점이 있다. hand-to-eye 방식의 경우에는 카메라의 위치에 따라 원하는 물체를 지속적으로 감지할 수 있다는 장점이 있으나, 플랫폼 등에 카메라가 부착되어 정해진 부분만을 알 수 있다는 단점이 있다. 본 연구에서는 고정되어 있는 참외를 대상으로 하기 때문에 매니플레이터가 아닌 로봇 플랫폼에 카메라를 위치시키는 hand-to-eye 방식을 이용하여 비주얼 서보잉을 수행하였다.

2.2.1 3차원 좌표 획득

비주얼 서보잉은 카메라를 통하여 목표점의 좌표를 획득하는 과정을 가진다. 카메라를 통해 촬영되는 영상은 픽셀 좌표계를 통하여 화면에 출력됨으로 물체의 위치정보가 픽셀값으로 정해진다. 따라서 실제 물체의 거리정보를 취득하기 위해서는 카메라 좌표계와 픽셀 좌표를 실제 좌표인 월드 좌표로 변환하는 과정이 필요하다. 좌표변환을 위해서는 카메라의 중심점을 정확히 알아야 한다. 카메라의 중심위치는 사용한 렌즈, 대상과의 거리 등 내부요인의 영향을 받기 때문에 내부요인의 파라미터를 측정하는 캘리브레이션이 필요하다. 캘리브레이션을 통해 얻어진 내부 파라미터와 카메라를 통해 얻어지는 픽셀 좌표를 이용하여 식(20)과 같은 변환행렬을 구하고, 구해진 변환행렬을 이용하여 3차원 위치추정을 할 수 있다.

$$s \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & skew\_c & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_1 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_2 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$= A[R|t] \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}$$

식(20)에서  $\alpha$  항은 카메라 내부 매개변수,  $f_x, f_y$  는 Focal length,  $c_x, c_y$  는 Principal point이며 skew\_c는 Skew coefficient로  $\tan\alpha$ 로 계산된다.  $\beta$  항은 외부 좌표변환행렬 매개 변수이며,  $\gamma$  항은 월드 좌표계이다.

2.2.2 수확물 위치 검출

본 연구에서는 참외 인식 및 위치추정을 위하여

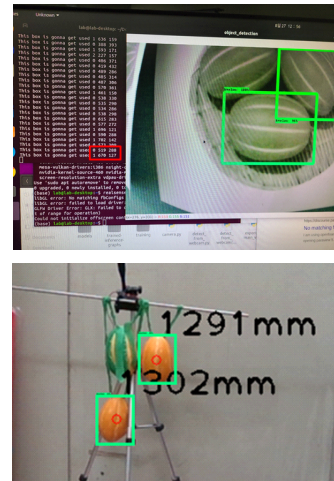


그림 7. (X, Y)좌표 및 거리정보 추출  
Fig. 7. Extraction of (X, Y) coordinates and depth information

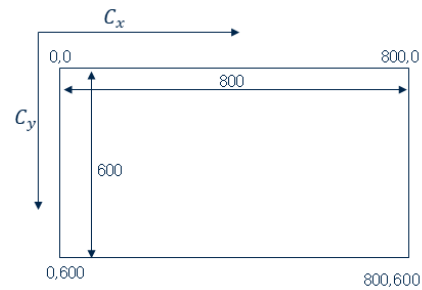


그림 8. 픽셀화면 좌표  
Fig. 8. Pixel screen coordinates

RGB-D 카메라(Realsense D435, Intel, California, US)를 사용하였다. 참외 인식은 Faster-RCNN모델<sup>[12]</sup>을 사용하여 참외 인식 모델을 학습하였다. 인식한 참외의 중심점은 그림 7 및 8과 같이 카메라를 기준으로  $C_x, C_y$  좌표로 나타내었다. 화면에서의 좌표는 해상도를 기준으로 한 픽셀 좌표계로 캘리브레이션 및 3차원 위치추정을 통해 실제 월드 좌표로 변환하여 위치정보를 추출하였다.

2.2.3 로봇의 동작

ZRA-0515P 로봇은 Python (Ver. 3.7, Python Software Foundation, Delaware, US) 프로그램을 사용하여 제어하였다. 로봇은 로봇의 끝단 위치 또는 각축의 각도로 제어할 수 있으며, 위치의 경우 프로그램 상에서 Position (X, Y, Z, Rz, Ry, Rx)의 형태로 입력되고, 각도의 경우 Joint ( $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6$ )의 형태로 입력된다. 동작 함수는 move(), line(), optline()이 있으며, move는 PTP (Point To Point) 동작, line은 직선보간 동작, optline은 직선보간 속도 변

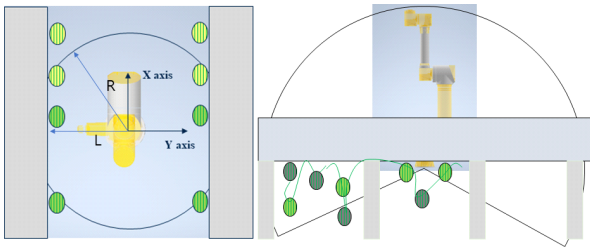


그림 9. 로봇의 작동 반경  
Fig. 9. Work space of robot

속 동작을 수행한다. 또한 Position과 Joint 값의 상호 변환이 가능하다. 로봇이 베드 사이에서 이동하는 경우 로봇의 작동 범위는 그림 9와 같이 구의 형태로 나타내어진다.

반지름 R인 구에서 중심으로부터 L만큼 떨어진 곳의 단면의 반지름은 식(21)에서 식(23)과 같이 계산된다.

$$\cos(\alpha) = L/R \quad (21)$$

$$\alpha = \cos^{-1}\left(\frac{L}{R}\right) \quad (22)$$

$$r = R\sin(\alpha) \quad (23)$$

R = 925 mm, 로봇이 베드 사이의 중심을 지난다고 할 때 L = 600 mm이기 때문에 r = 703 mm가 되어 로봇의 베이스 좌표계를 기준으로 엔드이펙터의 범위는 약  $y \leq 600$  mm이다. 또한, x와 z의 좌표는  $x^2 + z^2 \leq 703^2$  mm의 범위를 가진다.

### III. 실험

구성한 수확 로봇에 대한 실험은 참외 모형을 이용하여 가상의 시설 온실 환경을 구성하여 수행하였다. 로봇의 동작은 그림 10과 같으며, 참외의 위치를 인식하기 위한 RGB-D 카메라는 로봇 플랫폼 위에 설치하였다. 메인 PC를 통해 획득한 거리정보를 로봇 컨트롤러로 전송하여 로봇이 움직이도록 프로그램을 수행하였다.

카메라를 통해 얻어진 물체의 위치는  $C_x$ ,  $C_y$ , D로

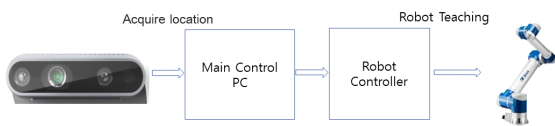


그림 10. 로봇 동작 데이터 흐름  
Fig. 10. Flow of robot operating data

얻어지며, 이는 매니플레이터 끝단의 X, Z, Y 좌표와 대응된다. 카메라의 중심위치를 로봇의 월드 좌표계로 설정하여, 카메라를 통해 얻어진 물체의 좌표로 로봇이 동작하도록 하였다. 로봇의 월드 좌표계 설정은 카메라의 중심을 기준으로 로봇의 기본 좌표축과의 오프셋을 하나의 포지션으로 만들어 설정하였다. 로봇과 카메라의 오프셋은 그림 11과 같이 X = 220mm, Y = 180 mm, Z = 150 mm 임으로 P1 = (220, 180, 150, 0, 0, 0) 이다.

카메라를 통하여 얻어진 참외의 위치 데이터를 로봇으로 전송하여 실험을 수행하였다. 참외와 로봇 사이의 거리를 550 mm, 600 mm 및 650 mm로 설정하여 진행하였다. 참외의 수확 순서는 그림 12와 같이 X와 Z좌표의 합이 가장 작은 순으로 결정하였다. 실험 내용은 그림 13과 같고, 결과는 표 2에 나타내었다.

실험 결과 카메라를 통해 얻어진  $C_x$ 와  $C_y$ 끼리의 차이는 1번 참외에서 모두 2 mm이었으며, 2번 참외에서는 각각 3 mm와 8 mm, 3번 참외의 경우에는 각각 20 mm와 5 mm로 나타났다. 참외의 크기는 출하 시 장축이 약 11 cm, 단축은 약 7.2 cm로 측정되었으며<sup>13)</sup>, 단축인  $C_x$ 에서는 최대 27%, 장축인  $C_y$ 에서는 최대 7%의 차이를 가지는 것으로 나타났다. 카메라 데이터와 로봇의 위치 차이는 표 3과 같이 X축의 경우 20 mm로 모든 측정에서 동일하게 발생하였다. 이는 카메라와 로봇 사이의 거리 측정의 문제로 판단된다. Z의 경우 550 mm와 600 mm일 때 3번 참외에서 -30 mm가 측정되었다. 거리데이터는 550 mm일 때 3번 참외에서 오차 55 mm가 확인되었다.

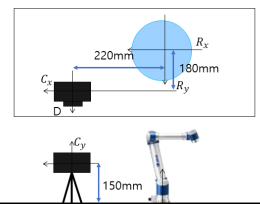


그림 11. 로봇과 카메라의 거리  
Fig. 11. Offset between robot and camera

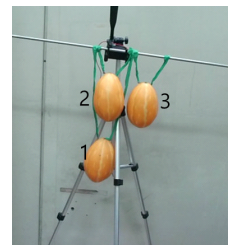


그림 12. 로봇 수확 순서  
Fig. 12. Robot harvesting sequence



그림 13. 거리별 로봇 성능 실험  
Fig. 13. Comparison of robot performance according to distance

표 2. 거리별 로봇 성능 실험 결과  
Table 2. Result of robot performance according to distance

	No.1			No.2			No.3		
	$C_x$	D	$C_y$	$C_x$	D	$C_y$	$C_x$	D	$C_y$
550	-170	338	55	-150	315	240	-40	425	270
	$R_x$	$R_y$	$R_z$	$R_x$	$R_y$	$R_z$	$R_x$	$R_y$	$R_z$
	30	518	205	50	495	390	160	550	450
600	$C_x$	D	$C_y$	$C_x$	D	$C_y$	$C_x$	D	$C_y$
	-172	421	53	-152	429	237	-60	475	265
	$R_x$	$R_y$	$R_z$	$R_x$	$R_y$	$R_z$	$R_x$	$R_y$	$R_z$
	28	601	203	48	609	387	140	655	445
650	$C_x$	D	$C_y$	$C_x$	D	$C_y$	$C_x$	D	$C_y$
	-171	503	53	-148	520	245	-40	546	268
	$R_x$	$R_y$	$R_z$	$R_x$	$R_y$	$R_z$	$R_x$	$R_y$	$R_z$
	29	683	202	-148	700	395	160	726	418

#### IV. 결론

본 논문에서는 비주얼 서보잉을 이용한 수경재배 온실에서의 참외 수확 로봇의 매니플레이션 기술에 관한 연구를 진행하였다. 참외 수경재배 온실은 토경

표 3. 카메라 데이터와 로봇 위치의 차이  
Table 3. Difference between camera data and robot position

	No.1			No.2			No.3		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
550	20	0	0	20	0	0	20	55	-30
600	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
	20	0	0	20	0	0	20	0	-30
650	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
	20	0	1	24	0	0	20	0	0

재배 방식이 아닌 양액 베드에서 아래로 늘어뜨리듯 재배하는 방식을 사용한다. 따라서 본 연구에서는 참외 수경재배 온실에 적용할 수 있는 수확 로봇 기술 개발을 하는데 그 목적을 두었다. 수확 로봇은 RGB-D 카메라와 산업용 PC, 6축 매니플레이터를 사용하여 구성하였으며, 사용한 매니플레이터의 링크 파라미터 테이블을 획득하고 정·역 기구학 계산을 수행하였다. 비주얼 서보잉을 위하여 카메라를 통해 획득한 참외의 픽셀 위치를 월드 위치로 변환하는 작업을 수행하였다. 매니플레이터 제어를 위하여 카메라의 중심좌표계와 매니플레이터 중심 좌표계를 일치시켰다. 카메라와 참외 사이의 거리를 550, 600, 650 mm로 설정하여 3개의 참외를 대상으로 실험을 수행하였다. 실험 결과 각 거리에서 측정된 최대 오차 값은 600 mm 일 때, 2번 참외의  $C_y$ 에서 8 mm, 650 mm의 경우 3번 참외에서  $C_x$ 는 20 mm를 가져 참외 장, 단축기준 27%와 7%로 계산되었다. 또한, 650 mm의 경우에는 3번 참외의  $C_x$  값을 제외하고 참외의 위치를 충분히 검출한 것으로 확인되었다. 실제 로봇의 위치와 참외 사이의 거리는 X축에서 20 mm로 동일하게 발생하여 거리 또한 동일한 위치로 이동하였음을 알 수 있었다.

Z의 경우 550 mm와 600 mm일 때 3번 참외에서 -30 mm가 측정되었다. 3번 참외의 경우 매니플레이터가 1, 2번 참외를 거쳐 이동하면서 3번 참외가 중간에 가려지는 문제가 있었으나, 카메라의 위치를 수정하여 해결할 수 있을 것이다. 따라서 본 연구를 통해 얻어진 비주얼 서보잉을 이용한 매니플레이션 기술은 참외 수경재배 온실에서 충분히 적용할 수 있음을 확인할 수 있었다. 최근 매니플레이터는 상용 엔드이펙터의 정보를 대부분 포함하고 있기 때문에 이를 통해 엔드이펙터의 변화에 따라 정보의 변경이 가능하다. 작물과 엔드이펙터의 무게가 로봇의 가반중량을 초과하지 않는다면 동일한 성능을 보일 것으로 예상된다. 향

후 매니플레이터에도 카메라를 부착하여 두 대의 카메라를 사용하는 하이브리드 방식의 비주얼 서보잉을 수행하고, 그러피도 추가하여 실제로 수확 작업을 위한 연구를 진행할 계획이다.

### References

[1] Rural Development Administration, *Korean Smart Farm Development Direction and Strategic Symposium*, 2015.

[2] K. S. Kim, K. R. Kim, H. C. Kim, and K. S. Lee, "Risk assessment and symptoms of musculoskeletal disorders in melon farm workers," *J. Korean Soc. Occupational and Environ. Hygiene*, vol. 16, no. 4, pp. 385-397, Dec. 2006.

[3] H. K. Seo, *Seo Hyun-kwon's Egg Tech Sketch 2*(2019), Retrieved Sep. 08, 2020, <https://m.blog.naver.com/nong-up/221581210425>

[4] J. Y. Kim, *US 'Root AI' develops tomato harvesting robot 'Vergo 1'*(2019), Retrieved Jun. 13, 2020, <http://www.irobotnews.com/news/articleView.html?idxno=17448>

[5] M. K. Kim, *Developing an evolving smart farm 'vegetable harvesting robot'*(2019), Retrieved Jul. 08, 2019, <https://www.fnnews.com/news/201907081003289172>

[6] Global zeus, *ZRA series*, Retrieved Jun. 13, 2020, <http://zero.globalzeus.com/6axis/>

[7] Global Zeus, *Manual\_ZRA\_6AXIS\_User-Guide\_M19-OC-2501\_software*, Global Zeus, 2022.

[8] J. C. John, *Introduction to Robotics Mechanical and Control*, 3rd Ed., Pearson Education International, pp. 68-75, 2005.

[9] B. Espiau, F. Chaumette, and P. Rives, "A new approach to visual servoing in robotics," *IEEE Xplore, IEEE Trans. Robotics and Automat.*, vol. 8, no. 3, pp. 313-326, Jun. 1992.  
(<https://doi.org/10.1109/70.143350>)

[10] S. Hutchinson, G. Hager, and P. Corke, "A tutorial on visual servo control," *IEEE Xplore, IEEE Trans. Robotics and Automat.*, vol. 12, no. 5, pp. 651-670, Oct. 1996.

(<https://doi.org/10.1109/70.538972>)

[11] D. Kragic and H. Christensen, "A Framework for Visual Servoing," *LNCS ICVS*, pp. 345-354, Mar. 2003.  
([https://doi.org/10.1007/3-540-36592-3\\_33](https://doi.org/10.1007/3-540-36592-3_33))

[12] S. Ren, K. He, R. Girshick, and J. Sun, "Faster R-CNN: Towards real-time object detection with region proposal networks," arXiv, Advances in NIPS 28, 2015. arXiv: 1506.01497v3

[13] Y. S. Shin, I. K. Yeon, Y. J. Seo, H. W. Do, J. E. Lee, C. D. Choi, and S. D. Park, "Selection of oriental melon (*Cucumis melo* L. var. makuwa Makino) cultivars for second cropping in summer season," *J. Bio-Environ. Contr.*, vol. 15, no. 3, pp. 270-276, Sep. 2006.

#### 김 만 중 (Man-Jung Kim)



2019년 2월 : 전북대학교 기계 시스템공학과 석사  
2022년 2월 : 전북대학교 기계 시스템공학과 박사  
2022년 3월~현재 : 국립농업과학원 스마트팜개발과 박사후 연구원

<관심분야> 농업 로봇, 농업자동화, 자동화시스템  
[ORCID:0000-0003-0600-489X]

#### 김 용 현 (Yong-Hyun Kim)



2021년 2월 : 성균관대학교 바이오메카트로닉스학과 석사  
2021년 7월~현재 : 국립농업과학원 스마트팜개발과 전문연구원  
2022년 3월~현재 : 충남대학교 바이오시스템기계공학과 박사과정

<관심분야> 인공지능, 컴퓨터비전, 스마트농업  
[ORCID:0000-0003-4774-2354]



**김 원 경 (Won-Kyung Kim)**



2014년 2월: 서울대학교 바이오시스템·소재학부 석사  
2022년 8월: 부산대학교 바이오산업기계공학과 박사  
2021년 7월~현재: 국립농업과학원 스마트팜개발과 박사후연구원

<관심분야> 스마트농업, 온실환경센서, IoT  
[ORCID:0000-0003-4774-2354]

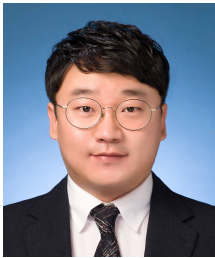
**홍 영 기 (Youngki Hong)**



2004년 3월: 일본 동경농업대 생물환경조절학전공 박사  
2007년 3월~2021년2월: 국립농업과학원 농업연구사  
2021년 3월~현재: 국립농업과학원 스마트팜개발과 연구관

<관심분야> 영상처리, 기계학습, 인공지능  
[ORCID:0000-0002-9772-9820]

**이 기 범 (Ki-Beom Lee)**



2014년 8월: 전북대학교 컴퓨터공학과 석사  
2021년 2월: 전북대학교 컴퓨터공학과 박사  
2022년 1월~현재: 국립농업과학원 스마트팜개발과 박사후연구원

<관심분야> 강화학습, 객체인식, 디지털트윈  
[ORCID:0000-0002-7251-0953]

**김 경 철 (Kyoung-Chul Kim)**



2015년 8월: 전북대학교 정밀기계공학과 박사  
2016년 7월~2019년 1월: 농업기술실용화재단 연구원  
2019년 2월~현재: 국립농업과학원 스마트팜개발과 연구사  
<관심분야> 농업로봇, 농업 인공지능

[ORCID:0000-0001-6699-881x]

**조 병 효 (Byeong-Hyo Cho)**



2017년 8월: 충북대학교 바이오시스템공학과 석사  
2021년 3월: 호카이도대학 농학원 공생기반학전공 박사  
2021년 7월~현재: 국립농업과학원 스마트팜개발과 박사후연구원

<관심분야> 영상처리, 농업 인공지능, 비파괴 분석  
[ORCID:0000-0001-7276-5617]