Journal of Korea Robotics Society (2021) 16(4):319-326
https://doi.org/10.7746/jkros.2021.16.4.319 ISSN: 1975-6291 / eISSN: 2287-3961



# 다목적 농업 로봇의 농작업 환경 기반 선회 특성 연구

# A Study on the Environmental-Based Turning Characteristics of Multi-Purpose Agricultural Robots

이 지 원[1] · 강 민 수[2] · 박 희 창[2] · 조 용 준[2] · 오 장 석[2] · 김 민 규[1] · 서 갑 호[3] · 박 민 로[†]
Ji-Won Lee[1], Minsu Kang[2], Huichang Park[2], Yongjun Cho[2], Jangseok Oh[2], Min-Gyu Kim[1], Kap-Ho Seo[3], Min-Ro Park[†]

**Abstract:** To improve the driving performance and work efficiency of the multi-purpose agricultural robot, this paper conducted a study on the turning and steering characteristics of the robot platform according to the characteristics of the working machine coupled to the multi-purpose agricultural robot considering the agricultural environment. First, the size and characteristics of the developed multi-purpose agricultural robot platform and working machine, and the targeted field farming work environment are analyzed. And based on this analysis, the problems that arise in multi-purpose robots with conventional turning methods are quantitatively presented. And to overcome this problem, an improved turning and steering method for multi-purpose agricultural robots is proposed considering the characteristics of various workstations and the agricultural working environment. Finally, by applying the proposed method, the turning characteristics of the multi-purpose agricultural robot according to the working machine are analyzed and the effectiveness of the proposed method is verified.

**Keywords:** Agricultural Environment, Multi-Purpose Agricultural Robot, Turning Characteristics

## 1. 서 론

국내 농업 환경은 65세 농가인구 비율의 증가로 고령화가 진행되고 있으며, 농림업 취업자수는 해마다 감소하면서 농업 인력 부족이 점점 심화되고 있다. 특히, 유행성 전염병 등의 팬데믹 상황에 따라 일시적으로 일손이 부족한 상황이 심각해지고 있다. 이에 농업환경에서의 기계화, 자동화는 필수적인 요구사항이 되었으며, 과거 다양한 노력의 결과, 농업 기계화를 통해 농촌 노동력 감소에 대응하여 노동력 부족과 안정적인 농산물 생산에 크게 기여하였다[1]. 이렇게 농업현장에 적용되고 있는 농기계는 농산물의 생육특성과 농업환경의 차이에 의해서 특화된 작업기를 시기적으로 선택적으로 사용하는 것이 일반적이다. 하지만, 이러한 선택적 활용에 의해서 비활용시기에 유휴장비로 방치가 되고 있으며, 농가에서는 생산비용이 상승하는 요인이 된다. 이를 경감하기 위해 하나의 다목적 범용플랫폼에 다양한 작업기를 결합하여 사용하려는 시도가 있다. 특히, 이러한 플랫폼을 무인화/로봇화 하려는 시도가 있으며, 이를 위해서는 농작업환경을 고려한 안정적인 주행성능을 기반으로 한 자율주행 기술이 필수적으로 활용되어야 한다.

자율주행 플랫폼의 주행성능을 향상시키기 위해 조향 및 제어에 관한 연구들이 활발히 수행되었다[2-6]. 하지만, 이 연구들은 농산물의 생육 특성에 따른 다양한 밭 사이즈의 농업 환경과 이에 따른 시기별 요구되는 작업의 종류와 고랑과 두둑을 따라 주행 및 두둑 간 선회를 하는 작업특성들을 고려하지 않아, 농업용 로봇에 적용하기 어려웠다. 또한, 농작업 환경에 적합한 4륜 주행 플랫폼 구조와 조향 제어 알고리즘을 제안하는 등의 연구들도 수행되었다[7,8]. 이 연구에서 제안된 기술들은

Received : Aug. 17. 2021; Revised : Oct. 1. 2021; Accepted : Nov. 7. 2021
※ This work was supported by Korea Institute of Planning and Evaluation for Technology in Food, Agriculture and Forestry (IPET) through Advanced Production Technology Development Program, funded by Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs (MAFRA) (317072-04)
1. Researcher Engineer, KIRO, Pohang, Korea (jiwon2, mingyukim@kiro.re.kr)
2. Researcher Engineer, KIRO, Andong, Korea (mskang, huichang.park, cyj, dueleldi@kiro.re.kr)
3. Chief Researcher, KIRO, Pohang, Korea (neoworld@kiro.re.kr)
Affiliate Professor, POSTECH, Pohang, Korea
Adjunct Professor, KNU, Daegu, Korea
† Senior Researcher, Corresponding author: Interactive Robotics R&D Division, Korea Institute of Robotics and Technology Convergence, Pohang, Korea (minro@kiro.re.kr)

공통적으로 주행 시 구동 플랫폼의 중심을 기준으로 위치 및 조향 제어를 수행하고 있다. 하지만, 다목적 농업 로봇에서는 작업기의 종류와 작업환경에 따른 조향 제어 기술이 적용되어야 한다. 다시 말해서, 실제 지면과 작업기와의 위치가 중첩되는 것이 보다 중요하기 때문에, 다목적 농업용 로봇에 기존의 기술을 적용하게 된다면 작업기의 작업 위치가 목표 궤적을 벗어나게 되는 문제점이 발생할 수 있다. 이러한 문제를 극복하기 위해 농업 로봇은 플랫폼의 구동기 기준 선회가 아니라 작업기 기준으로 선회하여 정확한 농작업을 수행해야 한다. 또한, 다양한 작업기와 결합하는 다목적 농업 로봇의 경우, 작업기에 따른 동작특성에 따라 선회 중심 설정을 달리하여, 작업거동의 연속을 유지할 수 있게 해야 한다.

본 논문에서는 다목적 농업 로봇의 주행 성능을 높이고 효율적인 작업을 가능하게 하기 위해, 다목적 농업 로봇에 결합되는 작업기의 작업점을 고려하여 작업기 변화에 따른 로봇 플랫폼의 선회 및 조향 특성에 관한 연구를 수행하였다.

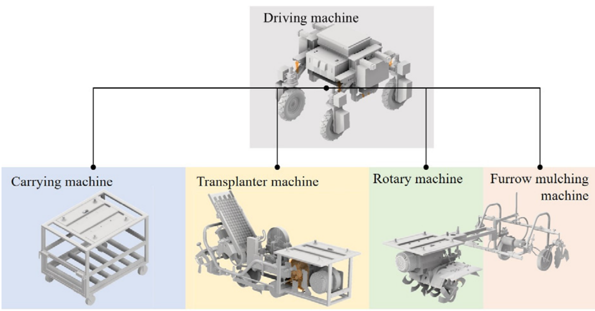
본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 개발된 다목적 농업 로봇 플랫폼과 작업기의 크기 및 특성 그리고 목표하는 밭농업 작업 환경을 분석하여 시뮬레이션 조건을 제시한다. 3장에서는 다목적 농업로봇에 기존 조향 제어 방식을 적용하였을 때의 문제점을 정량적으로 제시한다. 4장에서는 이러한 문제점을 극복하기 위해 다목적 농업 로봇의 선회 및 조향 특성을 개선하기 위한 방안을 제안하며, 작업기 별 선회 특성을 분석한다.

## 2. 다목적 농업 로봇 및 농작업 환경

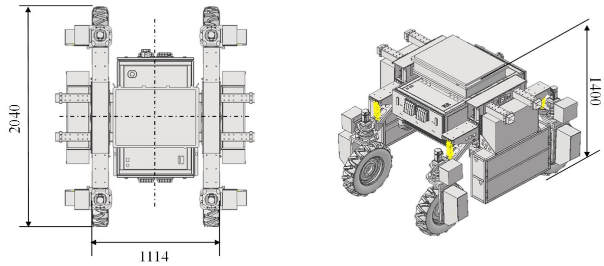
### 2.1 다목적 농업 로봇의 구조

[Fig. 1]은 본 논문에서 검토하는 다목적 농업 로봇의 구성을 보여준다. 농업 로봇의 주행을 담당하는 구동기와 작업 특성 및 목적에 따른 4종의 작업기들이 모듈 형태로 결합하여 주행한다.

먼저, [Fig. 2]에서 보여주는 구동기는 배터리, 전장부, 구동부, 현가부 등으로 구성되며 4-Wheel Drive/4-Wheel Steering의 구동 특성을 가진다. 구동기 내부에 작업기를 부착할 수 있는 리프트 장치가 있어 작업기를 부착한 상태로 상하 가변을 할 수 있다. 밭 두둑 하나를 중심으로 구동하는 것을 목표로 전체적인 크기는 너비, 폭, 높이가 2,040 mm, 1,114 mm, 1,400 mm이다.

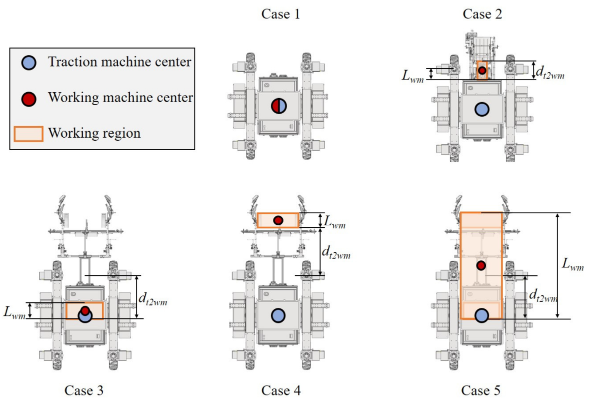



[Fig. 1] Agricultural robot & working machine




[Fig. 2] Traction part of agricultural robot

작업기는 운반기, 정식기, 로터리, 휴립 피복기 4가지로 요구 작업에 따라 모듈형으로 구동기와 결합하여 작업을 수행한다. 운반기는 작업과 관련된 모든 장비 및 작업물을 운반하는데 사용된다. 정식기는 모종판을 보관할 수 있으며 구동기의 진행에 따라 밭 두둑에 정식 작업을 수행한다. 로터리의 경우 밭 환경 조성 시 사용하며 회전날이 일정 간격으로 로터리 작업을 수행하게 된다. 휴립피복기는 밭 두둑을 따라 휴립피복 작업을 수행하며, 로터리와 같이 로터리 작업과 동시에 휴립 피복 작업을 수행할 수 있다. 있다 각각의 작업기는 구동기의 중심에 위치하도록 설계되었고, 전원부를 공유한다.




[Fig. 3] Connection status of agricultural robot and working machine

[Fig. 3]은 5가지 작업 조건(Case)에 따른 구동기와 작업기의 결합 상태, 작업 영역, 그리고 작업 별 작업점을 보여준다. 이때, 각 작업 조건 별 작업 영역의 위치와 너비의 치수들은 [Table 1]에 요약되며, 설명은 다음과 같다.

[Table 1] Dimension measurement for the Connection state of each working machine

| Unit: [mm] | | Case 1 | Case 2 | Case 3 | Case 4 | Case 5 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Dimension | $D_{t2wm}$ | - | 493 | 782 | 910 | 782 |
| | $L_{wm}$ | 1,460 | 293 | 400 | 270 | 2,082 |

· Case 1) 운반기
: 구동기 하부에 동일한 중심을 가지도록 결합되는 운반기의 작업점은 구동기의 중심과 동일하게 정의하였다.

· Case 2) 정식기
: 정식기 장착 상태에서 밭 환경과 정식 작업의 접촉 영역을 작업 영역으로 정의하였다. 정식기의 작업 영역과 작업점은 구동기의 내부에 위치한다.

· Case 3) 로터리
: 로터리의 작업 영역은 로터리 회전날의 영역으로 정의하였다. 로터리도 마찬가지로 구동기 내부에 작업 영역과 작업점이 위치한다.

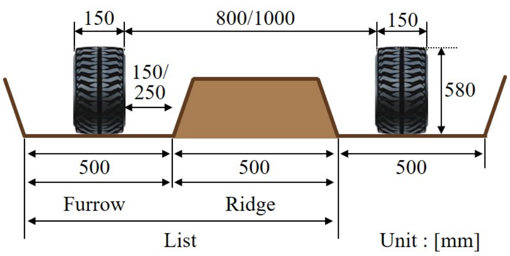
· Case 4) 휴립 피복기
: 휴립 피복기가 밭 환경과 접촉하는 영역을 작업 영역으로 정의하였고 구동기의 외부에 작업 영역과 작업점이 위치하며, 구동기의 중심과 작업점이 가장 떨어진 작업이다.

· Case 5) 로터리 + 휴립 피복기
: 로터리 작업과 휴립피복 작업이 동시에 수행할 경우로 작업 영역은 두 작업기의 전체 영역을 작업 영역으로 정의하였다.

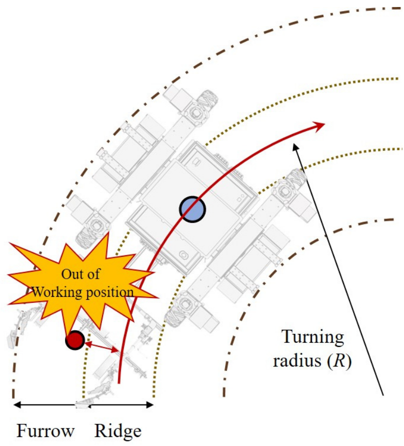
### 2.2 농작업 환경 및 시뮬레이션 조건

[Fig. 4]에서와 같이, 농작업 환경은 작물이 위치하는 두둑과 양 옆에 물 빠짐이나 공기 순환을 위한 고랑으로 구성되며, 두둑과 고랑을 하나의 이랑이라고 표현한다. 두둑과 고랑의 크기는 개발된 다목적 농업 로봇과 다양한 작물의 재배 환경을 고려하여 1:1 비율로 폭은 500 mm로 정의하였다[9-11].

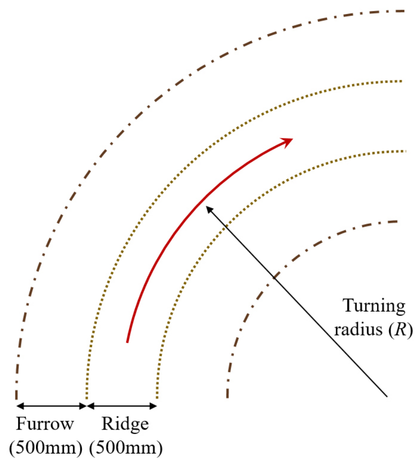
작업기가 체결된 구동기는 두둑을 중심으로 주행 또는 선회를 하며 로터리는 지면에서 두둑을 형성, 정식기와 휴립 피복기는 두둑 상부에 접촉하여 작업을 진행하게 된다. 이때, 구동기 중심의 선회 주행은 작업기의 접촉에 대한 고려를 하지 않은 주행으로, [Fig. 5]와 같이, 선회 시에 원하는 경로에 작업을 수행하지 못하는 문제가 발생한다. 따라서, 선회 환경에 따라 작업기 별 작업 특성을 고려하여, 주어진 농작업 환경에 대해 선회 특성을 검토하여야 한다.



[Fig. 4] Field environment definition



[Fig. 5] Example of driving problems



[Fig. 6] Simulation condition

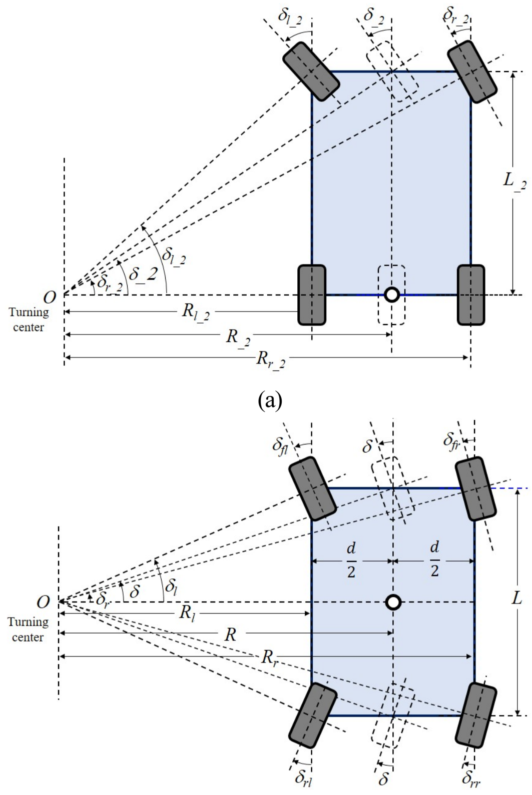
시뮬레이션 조건은 앞서 정의된 농작업 환경을 기준으로 [Fig. 6]과 같이 형성하였다. 여기서, 각각의 점선은 고랑과 두둑의 경계이다. 또한, 선회 반경($R$)은 농작업 환경의 다양성을 고려하여 10 m, 15 m, 20 m로 정의하였다.

## 3. 다목적 농업 로봇의 구동기 중심 선회 특성

기존의 4륜 기반 주행 플랫폼의 선회 및 조향 방식에 대해 설명하고 앞서 제시한 시뮬레이션 조건에서 다목적 농업용 로봇의 선회 및 조향 시뮬레이션을 수행하여 기존의 조향 방식을 적용할 경우 발생하는 문제점에 대해 분석한다.

### 3.1 구동기 중심 선회 시, 선회 중심과 조향각 관계

기존의 4륜 주행 플랫폼은 [Fig. 7]처럼 2륜 또는 4륜 조향 방식을 적용하여 플랫폼의 선회를 제어하며, 2륜 조향 방식은 뒷차축 선상에 선회 중심이 위치하고, 4륜 조향 방식은 플랫폼의




[Fig. 7] Simplified model of the four-wheel driving robot platform: (a) two-wheeled steering and (b) four-wheeled steering

중심 선상에 선회 중심이 위치하게 된다. 농업 분야에서 활발히 개발되고 있는 대부분의 다목적 로봇은 작업점이 주행 플랫폼의 중심부 근처에 위치하는 4륜 조향 방식을 적용하여 플랫폼의 중심을 선회점으로 선회하게 된다.

플랫폼의 중심을 선회점으로 구성하여 선회를 제어하기 위해서는 플랫폼의 선회 중심에 따른 조향각의 관계가 도출되어야 한다. 관련 수식은 다음과 같다[7].

$$R=\frac{L}{2\tan\delta} \tag{1}$$

$$R_l=\frac{L}{2\tan\delta}-\frac{d}{2} \tag{2}$$

$$R_r=\frac{L}{2\tan\delta}+\frac{d}{2} \tag{3}$$

$$\delta_{fl}=\tan^{-1}\frac{L}{R_l}=\tan^{-1}\frac{L}{2R-d}=\tan^{-1}\frac{L}{\frac{L}{\tan\delta}-d} \tag{4}$$

$$\delta_{rl}=-\tan^{-1}\frac{L}{R_l}=-\tan^{-1}\frac{L}{2R-d}=-\tan^{-1}\frac{L}{\frac{L}{\tan\delta}-d} \tag{5}$$

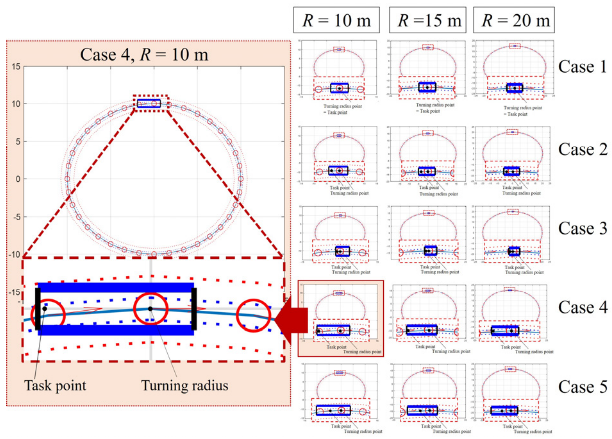
$$\delta_{fr}=\tan^{-1}\frac{L}{R_r}=\tan^{-1}\frac{L}{2R=d}=\tan^{-1}\frac{L}{\frac{L}{\tan\delta}+d} \tag{6}$$

$$\delta_{rr}=-\tan^{-1}\frac{L}{R_r}=-\tan^{-1}\frac{L}{2R=d}=-\tan^{-1}\frac{L}{\frac{L}{\tan\delta}+d} \tag{7}$$

### 3.2 구동기 중심 선회 특성 시뮬레이션

시뮬레이션은 4종의 작업기(운반기, 정식기, 로터리, 휴립피복기)의 다양한 작업환경을 고려하여 2.1 장에서 소개된 5가지 Case에서 수행되었으며 선회 반경 $R$(=10 m, 15 m, 20 m)에 따른 작업점의 궤적과 목표 궤적 간의 차이를 분석하였다.

시뮬레이션 결과는 [Fig. 8]과 [Table 2]에서 확인할 수 있다. [Fig. 8]에서는 각 시뮬레이션 조건에서 기존의 구동기 중심 선회 시에 다목적 농업 로봇의 구동 궤적을 확인 할 수 있으며 작업점의 위치와 목표 궤적의 차이를 직관적으로 확인 할 수 있다. [Table 2]에서는 각 조건에서의 작업점의 궤적과 목표 궤적 간의 오차를 정량적으로 분석하였다. Case 1에서는 작업점과 구동기 중심이 동일하므로 차이가 발생하지 않으며, Case 3에




[Fig. 8] Simulation results of five cases: trajectory of task point and turning radius trajectory

[Table 2] Simulation results of 5 cases: Error analysis between the trajectory of the task point and the target trajectory

| Unit<br>Length : [mm]<br>Error : [%] | | Target radius $R$ [m] | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 10 | | 15 | | 20 | |
| | | $R$-$R_{task}$ | Error | $R_{task}$ | Error | $R_{task}$ | Error |
| Case | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 2 | 23 | 0.2 | 15.6 | 0.1 | 11.7 | 0.1 |
| | 3 | 1 | 0.1 | 0.7 | 0.1 | 0.5 | 0.1 |
| | 4 | **156** | **1.6** | **104.7** | **0.7** | **78.6** | **0.4** |
| | 5 | 48 | 0.5 | 32.6 | 0.2 | 24.4 | 0.1 |

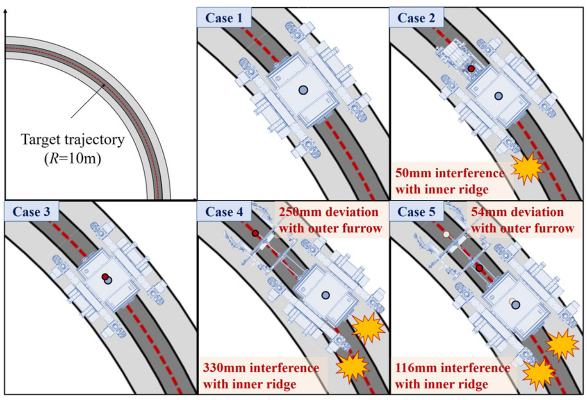
서는 로터리의 작업점 궤적은 목표 궤적 반경과 1 mm 이내의 차이를 보이기 때문에, Case 1과 Case 3에서는 기존의 4륜 조향 방식을 적용하여도 작업 성능에 영향이 없을 것으로 판단된다. 하지만, Case 2, Case 4, Case 5에서 정식기, 휴립피복기, 로터리와 휴립피복기의 작업점은 각각 목표 궤적과 최대 23 mm, 156 mm, 48 mm 차이가 난다. 또한 작업점의 궤적과 목표 궤적 간의 오차는 목표 궤적의 선회 반경 $R$이 작아질수록 커지는 것을 확인할 수 있다. 따라서 기존의 구동기 중심 선회를 다목적 농업 로봇에 적용한다면, 작업 성능을 확보하기 어려울 것으로 판단된다. 다목적 농업 로봇이 적용될 농작업 환경은 선회 반경이 10 m 보다 작은 경우를 포함하여 다양한 선회 반경을 가지기 때문에 다목적 농업 로봇의 주행 성능을 높이고 효율적인 작업을 가능하게 하기 위해서는 다목적 농업 로봇에 결합되는 작업기의 작업점을 고려하여 작업기 변화에 따른 로봇 플랫폼의 선회 및 조향 특성에 관한 연구가 필요하다.

## 4. 다목적 농업 로봇의 작업기 중심 선회 특성

### 4.1 농작업 환경 고려 작업기 중심 선회 특성 분석

다목적 밭농업로봇의 정밀 농작업을 위해 밭농업로봇의 작업기 중심을 작업점으로 하여 선회 시, 작업기 별/반경 별 선회 특성을 분석하고자 한다. 구동기 및 작업기 4종에 대하여 로봇의 목표 궤적과 두둑, 고랑의 농작업환경, 작업기 별 선회점에 대한 예시를 [Fig. 9]에 나타내었다. [Fig. 9]의 선회 예시와 같이 작업점을 기준으로 목표 궤적을 추종하는 경우 구동기 중심은 목표 궤적과 이격이 발생하게 된다. [Table 3]에서는 각 조건에서의 구동기 중심의 궤적과 목표 궤적 간의 오차를 정량적으로 분석하였다.

선회점이 구동기 내부에 위치하는 Case 1, 2, 3의 경우 5cm 이내의 이격 거리가 발생하였으나, 선회점이 구동기 외부에 위치하는 Case 4, 5의 경우 목표 궤적과 최대 211 mm, 81.5 mm 이격거리가 발생한다.




[Fig. 9] Example of turning for 5 types of working machine

[Table 3] Error between the trajectory of the platform and the target trajectory

| Unit [mm] | | Target radius $R$ [m] | | |
|---|---|---|---|---|
| | | 10 | 15 | 20 |
| Case | 1 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| | 2 | 47.3 | 31.6 | 23.7 |
| | 3 | 9.6 | 6.4 | 4.8 |
| | 4 | 211.0 | 141.5 | 106.3 |
| | 5 | 81.5 | 54.4 | 40.9 |

[Table 4] Error between the trajectory of the platform and the target trajectory

| Unit [mm] | | Interference distance with inner ridge | Deviation distance with outer furrow |
|---|---|---|---|
| Case | 1 | - | - |
| | 2 | 50.0 | - |
| | 3 | - | - |
| | 4 | 328.8 | 248.5 |
| | 5 | 116.6 | 54.4 |

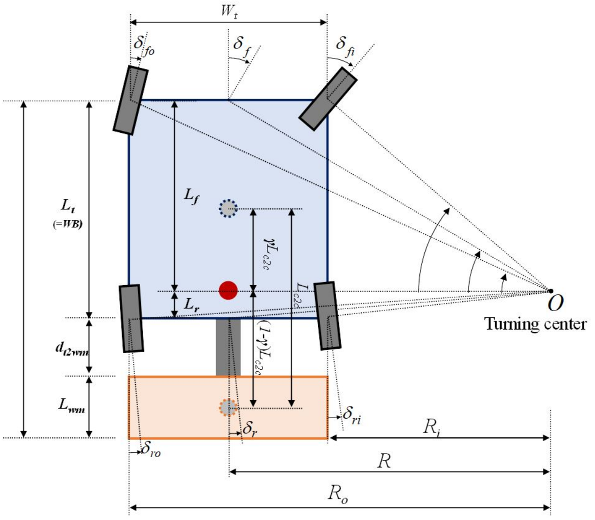
또한, 작업기 중심을 선회점으로 목표 궤적을 따라 선회하는 경우 구동기 중심과 목표 궤적과의 이격 거리가 발생함으로 인해 밭 간섭의 문제가 발생할 우려가 있다. [Fig. 9]의 밭 농업 환경을 고려하여 각 작업기 별 전/후륜의 바퀴 내/외측 기준 반경과 도랑 반경의 차이로부터 로봇과 밭 간 간섭 거리를 검토하였으며, 간섭이 가장 크게 발생한 선회반경이 10 m일 경우에 대한 결과는 [Table 4]와 같다.

[Fig. 9]와 [Table 4]에서 보여주듯이, Case 1, 3과 같이 작업기 중심과 구동기 중심이 가까울수록 간섭이 발생하지 않는다. 그리고 정식기의 경우 선회 반경이 작은 경우에 한해 전륜 바퀴의 내측과 밭 간에 간섭이 발생한다. 이와 대조적으로 작업 영역이 구동기 외부에 위치한 Case 4, 5 조건에 대해 선회 반경이 큰 경우에도 간섭이 일어났으며, 선회반경 10 m 인 경우 밭 간섭거리가 각 Case에서 330 mm, 116 mm로, 작업기 중심 선회 작업 시 상당한 밭 간섭이 발생한다.

따라서, 작업기 중심 선회 시에 발생하는 농업 로봇과 밭 간의 간섭을 최소화시키기 위한 조향 및 제어가 필요하다.

### 4.2 농작업 특성을 고려한 조향각 및 제어반경 수정

각 작업기의 작업점이 다양한 다목적 농업 로봇의 특성상 독립 4륜조향 시스템에 의해 작업기 종류에 따라 선회점 및 선




[Fig. 10] Turning center point by independent 4-wheel steering

회중심점을 변경할 수 있어야 한다. 또한 농업로봇의 작업 성능을 확보하고 앞 절에서 분석한 로봇과 밭 간섭 문제를 해결하기 위해 4륜을 독립적으로 조향함으로써 선회점을 [Fig. 10]와 같이 작업기 중심과 작업기 중심사이에 위치시킬 수 있다. 선회점 계수($\gamma$)가 0인 경우는 2장과 같이 구동기 중심을 선회점으로 주행하며, $\gamma$가 1인 경우는 3장과 같이 작업기 중심을 선회점으로 주행한다.

[Fig. 10]의 선회점 계수($\gamma$)에 따라 선회점 및 선회 중심점을 원하는 위치시키기 위한 조향각 수식을 제시한다.

$$\delta_f = \tan^{-1}\left(\frac{L_f}{R}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{(L_t/2 - \gamma L_{c2c})}{R}\right) \tag{8}$$

$$\delta_r = -\tan^{-1}\left(\frac{L_r}{R}\right) = -\tan^{-1}\left(\frac{(L_t - L_f)}{R}\right) \tag{9}$$

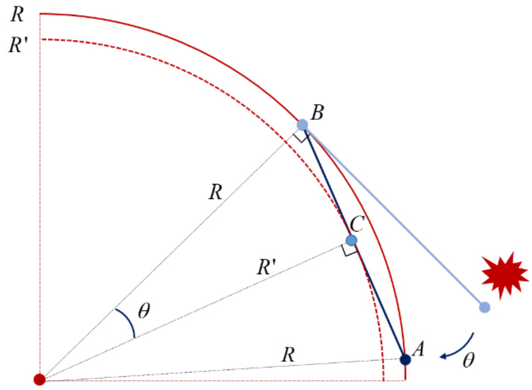
$$\delta_{fo} = \tan^{-1}\left(\frac{L_f}{R_o}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{L_f}{R + W_t/2}\right) \tag{10}$$

$$\delta_{fi} = \tan^{-1}\left(\frac{L_f}{R_i}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{L_f}{R - W_t/2}\right) \tag{11}$$

$$\delta_{ro} = -\tan^{-1}\left(\frac{L_r}{R_o}\right) = -\tan^{-1}\left(\frac{L_r}{R + W_t/2}\right) \tag{12}$$

$$\delta_{ri} = -\tan^{-1}\left(\frac{L_r}{R_i}\right) = -\tan^{-1}\left(\frac{L_r}{R - W_t/2}\right) \tag{13}$$

또한, 결정된 조향각을 따라 속도 $v$로 선회할 때, 슬립과 마찰을 최소화하기 위한 각 바퀴의 속도를 계산하면 다음과 같다.




[Fig. 11] Proposed correction control radius

$$v_{fi} = \frac{R_i}{R\cos\delta_{fi}} v \tag{14}$$

$$v_{fo} = \frac{R_o}{R\cos\delta_{fo}} \tag{15}$$

$$v_{ri} = \frac{R_o}{R\cos\delta_{ri}} v \tag{16}$$

$$v_{ro} = \frac{R_o}{R\cos\delta_{ro}} v \tag{17}$$

다음으로, 작업점과 구동기 중심이 모두 궤적을 추종하여 밭과 로봇 플랫폼 간의 간섭을 최소화하도록, 선회점과 수정 제어반경을 제안하고자 한다. 이때, 두둑을 기준으로 대칭적인 밭 환경과 대칭적인 형상의 로봇일 때, 구동기의 중심이 궤적(두둑의 중심)을 추종할 때, 양 쪽 바퀴(내/외측)와 밭과의 간섭거리가 최소화된다고 가정하였다. [Fig. 11]과 같이 작업점 B와 구동기 중심 A가 목표 궤적 위에 위치시키기 위해서는 작업로봇의 선회점을 A와 B의 중간지점 C ($\gamma = 0.5$) 에 위치시키고 선회점이 수정 제어 반경($R'$)을 갖는 궤적을 추종하여야 한다. 따라서, 기하학적 관계식에 의해 방향각과 수정 제어 반경 수식은 다음과 같이 도출된다.

$$\theta = \sin^{-1}\left(\frac{L}{2R}\right) \tag{18}$$

$$R' = R\cos\theta \tag{19}$$

### 4.3 제안 조향각 및 제어반경 기반 시뮬레이션

제안한 조향각과 제어 반경을 앞선 Case들에 대해 적용하여 시뮬레이션 하였다. 3-2절의 시뮬레이션 결과에서 보듯이, 구동기 중심과 작업점의 거리가 멀어질수록 밭간섭거리가 증가하였다. 따라서, 밭간섭거리가 가장 큰 휴립피복기에 대해

[Table 5] Steering angle: turning with correction control radius

| Unit<br>Length : [mm]<br>Angle : [ ° ] | | Target radius *R* [m] | | |
|---|---|---|---|---|
| | | 10 | 15 | 20 |
| Control radius | | 9.95 | 14.96 | 19.97 |
| Steering angle | Front inner wheel | 12.23 | 8.07 | 6.01 |
| | Front outer wheel | 11.13 | 7.57 | 5.73 |
| | Rear inner wheel | -0.07 | -0.05 | -0.04 |
| | Rear outer wheel | -0.07 | -0.05 | -0.04 |

[Table 6] Comparison interference between robot and field: case 4

| Unit [mm] | Target radius *R* [m] | | |
|---|---|---|---|
| | 10 | 15 | 20 |
| Turning based on working machine | Front inner/ outer wheel 328.8 | Front inner/ outer wheel 167.5 | Front inner/ outer wheel 86.4 |
| Turning based on modified turning point | Front inner wheel 9.8 | - | - |

중점적으로 분석 및 비교하였다. 제시된 제어 반경 수식에 의해 작업기 중심 궤적, 구동기 중심 궤적, 목표 궤적이 일치하였고, 목표 궤적 반경에 따른 수정제어반경과 바퀴 별 조향각은 [Table 5]와 같다.

또한, 작업기 중심을 기준으로 선회하였을 때의 밭간섭거리와 제안된 제어 반경 수식을 적용한 밭간섭거리의 비교 결과는 [Table 6]와 같다.

제안 수식을 적용한 결과 목표 궤적 반경이 10 m인 경우에 대해서만 전륜 내측의 10 mm이내의 밭 간섭이 발생하고 목표 궤적 반경이 충분히 큰 경우 밭 간섭문제가 발생하지 않았다. 또한, 다른 작업기들에 대해서도 수정 선회점 기준 선회시에 간섭이 발생하지 않는 것을 확인하였다. 따라서 농업환경을 고려할 때, 제안한 수정 조향각 및 제어 반경이 농업로봇의 작업 성능 향상에 효과적임을 확인하였다.

## 5. 결 론

본 논문은 다목적 농업 로봇의 작업 효율성과 주행 성능을 향상시키기 위하여, 결합되는 작업기 특성과 농작업 환경에 따른 다목적 농업 로봇의 선회 및 조향 특성에 대해 연구하였다.

먼저, 구동기를 중심으로 선회하는 기존방법을 다목적 농업 로봇에 적용하여, 작업기와 목표 궤적 간의 이격 거리를 분석하였다. 또한, 정밀 농작업을 위해 작업기 중심을 선회점으로 하여 주행하는 경우 발생하는 밭간섭 문제에 대해 수치적으로 확인하였다. 따라서, 이러한 문제를 극복하기 위해, 본 논문에서는 수정제어반경과 이를 고려한 조향각을 계산하는 수식을 제안하고, 이를 적용하여 농작업 환경을 고려한 선회특성을 분석하였다. 그 결과, 작업기와 구동기가 목표 궤적을 추종하면서 로봇플랫폼과 밭간섭거리가 감소하는 것을 확인하였다. 향후에는 수정제어반경에 따른 작업 각도 변화 특성을 검토하고, 실제 다목적 농업 로봇 플랫폼을 제작하여 제안한 선회방법을 적용하여 실험을 통해 검증할 계획이다.

## References


[1] K. H. Park, E. M. Jung, and H. M. Kwon, “Efficient operation plan through introduction of agricultural machinery management system,” *Korea Rural Economic Institute*, Naju, South Korea, Rep. 11-1541000-000859-01, July 2011, [Online], https://scienceon.kisti.re.kr/srch/selectPORSrchReport.do?cn=TRKO201600011886.

[2] H.-N. Kim, S.-I. Kim, D.-R. Kim, and K.-S. Kim, “A Study on the DYC 4WS control method for improving the dynamic characteristics of vehicle,” *The Korean Society of Automotive Engineers Conference*, pp. 63-70, 1996, [Online], https://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE00539762.

[3] K. Lohith, S. R. Shankapal, M. Gowda, and H. Ramaiah, “Development of four wheel steering system for a car,” *SASTECH Journal*, vol. 12, no. 1, pp. 90-97, April, 2013, [Online], http://archive.msruas.ac.in/pdf_files/sastechJournals/May2013/13.pdf.

[4] M. M. Topac, A. Kaplan, B. Kuleli, and U. Deryal, “Design of a multi-axle steering mechanism for a special purpose vehicle: kinematic design and optimization,” *8th International Advanced Technologies Symposium*, Elazig, Turkey, 2017, [Online], https://www.researchgate.net/publication/321360642_Design_of_a_multi-axle_steering_mechanism_for_a_special_purpose_vehicle_kinematic_design_and_optimization.

[5] M.-O. Kim, J.-H. Lee, and W.-S. Yoo, “A study on the optimum velocity of a four wheel steering autonomous robot,” *Transactions of KSAE*, vol. 17, no. 4, pp. 86-92, 2009, [Online], https://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE01212457.

[6] K.-S. Lee, Y.-J. Lee, Y.-H- Ko, H.-K. Park, and M.-H. Lee, “Steering control of independent 4 wheels vehicle applied ackerman geometry,” *ICROS Annual Conference 2010*, Chuncheon, Korea, pp. 639-644, 2010, [Online], http://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE02040558.

[7] X. Y. Tu, J.-Y. Gai, and L. Tang, “Robust navigation control of a 4WD/4WS agricultural robotic vehicle,” *Computer and Electronics in Agriculture*, vol. 164, August, 2019, DOI: 10.1016/j.compag.2019.104892.

[8] B.-S. Kim, S.-W. Cho, and H.-C. Moon, “Slip detection and control algorithm to improve path tracking performance of four-wheel independently actuated farming platform,” *Journal of Korea Robotics Society*, vol. 15, no. 3, pp. 221-232, September, 2020, DOI: 10.7746/jkros.2020.15.3.221.

[9] Y. Cho, S. Y. Woo, S. H. Song, H. G. Hong, H. Yun, J. S. Oh, J. Kim, D. W. Kim, K. H. Seo, and D. H. Kim, “A Study on Modular Agricultural Robotic Platform for Upland,” *The Journal of Korea Robotics Society*, vol. 15, no. 2, pp. 124-130, June, 2020 DOI: 10.7746/jkros.2020.15.2.124.

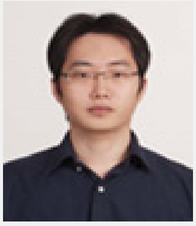
[10] H. J. Song, K. M. Yang, J. S. Oh, S. H. Song, J. B. Han, and, K. H. Seo, "Study on the Model based Control considering Rotary Tillage of Autonomous Driving Agricultural Robot," *The Journal of Korea Robotics Society*, vol. 15, no. 3, pp. 233-239, September 2020, DOI: 10.7746/jkros.2020.15.2.124.

[11] Yongin-si Agricultural Technology Center, [Online] https://www.yongin.go.kr/atc, Accessed: 15, 08, 2021.

**이 지 원**

2018 세종대학교 기계공학과(학사)
2020 세종대학교 항공우주공학과(석사)
2021~현재 한국로봇융합연구원 주임연구원

관심분야: 모델기반제어, 모바일로봇



**오 장 석**

2004 고려대학교 전자및정보공학과(학사)
2006 고려대학교 전자정보공학과(석사)
2016 고려대학교 전자정보공학과(박사)
2018 한국과학기술연구원 연구원
2018~현재 한국로봇융합연구원 선임연구원

관심분야: 3차원복원, 영상처리, 농업용 로봇

**강 민 수**

2018 안동대학교 기계설계공학과(학사)
2020 안동대학교 기계설계공학과(석사)
2020~현재 한국로봇융합연구원 주임연구원

관심분야: 로봇 설계 및 해석, 농업용 로봇

**김 민 규**

2003 한국항공대학교 전자공학과(학사)
2005 한국항공대학교 기계공학과(석사)
2012 University of Tsukuba(박사)
2015~현재 한국로봇융합연구원 책임연구원

관심분야: Human-Robot Interaction, Data Analytics, Artificial Intelligence

**박 희 창**

2017 고려대학교 기계공학과(학사)
2019 고려대학교 기계공학과(석사)
2021 LG전자 CTO 로봇선행연구소 연구원
2021~현재 한국로봇융합연구원 주임연구원

관심분야: 로봇 매니퓰레이터, 농업용 로봇, 로봇 메커니즘

**서 갑 호**

1999 고려대학교 전기공학과(학사)
2001 한국과학기술원 전기및전자공학(석사)
2009 한국과학기술원 전기및전자공학(박사)
2009~현재 한국로봇융합연구원 수석연구원
2020~현재 포항공과대학교 기계공학과 겸직교수
2021~현재 경북대학교 로봇 및 스마트 시스템 공학과 겸임교수

관심분야: 시스템제어, 임베디드 시스템, 웨어러블로봇

**조 용 준**

2007 안동대학교 전자공학교육학과(학사)
2009 안동대학교 바이오전자공학과(석사)
2019 세종공업(주) 전장연구소 선임연구원
2019~현재 한국로봇융합연구원 선임연구원

관심분야: 센서, 회로설계, 로봇제어, 농업용 로봇

**박 민 로**

2013 충남대학교 전기공학과(학사)
2020 한양대학교 미래자동차공학과(박사)
2020~현재 한국로봇융합연구원 선임연구원

관심분야: 전기 구동 액추에이터 설계