

# 농업용 무한궤도형 자율주행 플랫폼의 경로 추종 및 추종 성능 향상을 위한 가변형 전방 주시거리 알고리즘 개발

## Development of Path Tracking Algorithm and Variable Look Ahead Distance Algorithm to Improve the Path-Following Performance of Autonomous Tracked Platform for Agriculture

이규호<sup>1</sup>·김봉상<sup>1</sup>·최효혁<sup>2</sup>·문희창<sup>†</sup>

Kyuho Lee<sup>1</sup>, Bongsang Kim<sup>1</sup>, Hyohyuk Choi<sup>2</sup>, Heechang Moon<sup>†</sup>

**Abstract:** With the advent of the 4th industrial revolution, autonomous driving technology is being commercialized in various industries. However, research on autonomous driving so far has focused on platforms with wheel-type platform. Research on a tracked platform is at a relatively inadequate step. Since the tracked platform has a different driving and steering method from the wheel-type platform, the existing research cannot be applied as it is. Therefore, a path-tracking algorithm suitable for a tracked platform is required. In this paper, we studied a path-tracking algorithm for a tracked platform based on a GPS sensor. The existing Pure Pursuit algorithm was applied in consideration of the characteristics of the tracked platform. And to compensate for “Cutting Corner”, which is a disadvantage of the existing Pure Pursuit algorithm, an algorithm that changes the LAD according to the curvature of the path was developed. In the existing pure pursuit algorithm that used a tracked platform to drive a path including a right-angle turn, the RMS path error in the straight section was 0.1034 m and the RMS error in the turning section was measured to be 0.2787 m. On the other hand, in the variable LAD algorithm, the RMS path error in the straight section was 0.0987 m, and the RMS path error in the turning section was measured to be 0.1396 m. In the turning section, the RMS path error was reduced by 48.8971%. The validity of the algorithm was verified by measuring the path error by tracking the path using a tracked robot platform.

**Keywords:** Tracked Vehicle, Agricultural Robot, Path Tracking

### 1. 서 론

전 세계적으로 4차 산업혁명을 맞이하면서 AI (Artificial

Intelligence), 로봇틱스, 사물인터넷(IoT), 자율주행 등 다양한 기술이 급격하게 발전하고 있다. 그중 자율주행 기술은 각종 센서의 비용이 저렴해지면서 다양한 산업에서 로봇 혹은 차량을 이용한 자율주행 연구가 진행되고 있다. 특히 농업의 경우 농촌의 고령화가 급격하게 진행되면서 농업에 종사하는 인구가 감소하여 노동력 감소를 위해 다양한 자율주행 연구가 진행 중이다<sup>[1]</sup>.

현재 농업 분야는 크게 로봇 분야와 농기계 분야로 나뉘어 자율주행 연구가 진행되고 있다. 로봇 분야의 경우 LRF 센서<sup>[2]</sup>, 카메라<sup>[3]</sup>, 또는 LiDAR 센서<sup>[4]</sup>를 이용하여 모열을 검출해서 수행하는 ‘벼농사용 제초 로봇’이 개발되었다. 그 외에도 사용자를 추종하는 농업용 무한궤도형 로봇<sup>[5-7]</sup>이 개발되었다. 두 로

Received : Mar. 10. 2022; Revised : Apr. 12. 2022; Accepted : Apr. 19. 2022

※ This research was funded by Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs (MAFRA), ‘Development of eco-friendly small and medium-sized weeding robots for agricultural assistance in fields such as soy (Project number : 321061-2)’ and is currently supported by the publication grant

1. PhD Student, Autonomous Vehicle-Intelligent Robotics, Hongik University, Seoul, Korea (rbgh0214, bongasai@mail.hongik.ac.kr)

2. Master Student, Autonomous Vehicle-Intelligent Robotics, Hongik University, Seoul, Korea (gyehgur123@mail.hongik.ac.kr)

† Associate Professor, Corresponding author: Mechanical & System Design Engineering, Hongik University, Seoul, Korea (hcmoon@hongik.ac.kr)

봇의 경우 GPS 외에도 LiDAR와 카메라를 이용하여 조향각을 생성하여 주행한다. 농기계 분야에서는 콤팩트 트랙터에 관한 연구가 진행되었다. 시뮬레이터를 통한 콤팩트의 경로 추종을 위한 조향제어에 관한 연구<sup>[8,9]</sup>가 진행되었다. 국외의 경우 일본에서 자율주행 콤팩트를 위한 경로 생성 및 추종에 관한 연구<sup>[10]</sup>가 진행되었다. 트랙터의 경우 자동차와 유사하여 콤팩트보다 다양하게 경로 추종에 관한 연구들<sup>[11-13]</sup>이 진행되었다. 국내에서도 시뮬레이션에서 끝나는 것이 아닌 실제 트랙터를 이용하여 자율주행을 검증하였다.

또한, 농업 분야의 경우 플랫폼은 포장된 도로가 아닌 비포장도로, 험지 혹은 노지(露地)와 같은 지면이 고르지 않은 비정형 지형에서 주행한다. 그에 따라 지면과 플랫폼 간의 마찰, 비정형 지형의 형상, 주행 시 지면의 붕괴 등에 열악한 주행 환경이다. 그에 따라 차륜형 플랫폼보다는 지면과 접촉 면적이 넓어서 지면 붕괴에 강한 무한궤도형 플랫폼을 사용한다. 하지만 기존의 자율주행 연구는 에커먼 조향의 플랫폼 및 자동차 중심의 연구로 진행되어 왔기 때문에 저속에서 주행에 관한 연구는 미흡한 단계이다. 그에 따라 농업용 플랫폼에 적합한 경로 추종 알고리즘의 개발이 필요하다.

본 연구는 저속에서 경로 추종 성능 향상을 위해 경로의 곡률에 따라 전방 주시거리가 변하는 알고리즘을 제안한다. 그리고 제안한 경로 추종 알고리즘을 기반으로 경로 오차를 최소화하면서 정밀하게 경로를 추종하는 것을 목표로 한다.

## 2. 무한궤도형 플랫폼 기구학적 모델

### 2.1 무한궤도형 플랫폼 기구학적 모델

무한궤도형 플랫폼의 기하학을 고려하기 위해서는 플랫폼이 관성좌표계의 수평면( $X_0, Y_0, Z_0$ )에 위치한다고 가정한다. 플랫폼의 기준좌표축( $X_p, Y_p, Z_p$ )은 플랫폼의 무게중심(COG: Center of Gravity)을 기준으로 표현된다. 관성좌표계에서의 무게중심은  $(x, y, z)$ 로 표현한다. 플랫폼이 주행하면서 발생하는 진동에 의한 상하 운동은 무시하기 때문에  $(X_p, Y_p)$  평면에서의 수평운동만을 고려하기 때문에  $Z_p$ 축에서의 이동은 고려하지 않는다<sup>[14]</sup>.

무한궤도형 플랫폼의 속도는  $Z_p$ 축은 고려하지 않으므로  $(X_p, Y_p)$  평면 즉 수평면에서만 이동하여  $v_x, v_y$ 로 나타낼 수 있으며  $\vec{v} = [v_x, v_y, 0]^T$ 로 표기한다. 각속도의 경우 좌표상의 변화가 없으므로  $\vec{w} = [0, 0, w]^T$ 로 표기한다. 플랫폼의 무게중심 벡터가  $\vec{p} = [x, y, \theta]^T$ 라고 가정한다면 속도벡터는  $\vec{v} = [\dot{x}, \dot{y}, \dot{\theta}]^T$ 로 나타낼 수 있다. 변수  $\dot{x}, \dot{y}$ 는 다음과 같이 플랫폼의 속도벡터와 관계가 있고 수평면에서 회전 이동은  $\dot{\theta} = w$ 이다.

### 2.2 스키드 조향

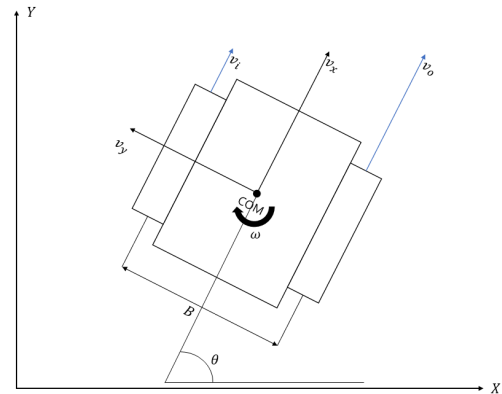
스키드 조향이란 무한궤도형 플랫폼이 선회할 때 내측 궤도의 속도와 외측 궤도의 속도 차이를 이용하여 선회하는 조향 방식이다. 내측 궤도와 외측 궤도의 속도비 그리고 각 궤도의 선회 반경 거리를 이용하여 플랫폼의 선회 반경으로 다음과 같이 수식으로 정의한다. 다만 본 연구에서는 플랫폼의 각 궤도와 지면 사이에서 발생하는 횡 방향 슬립에 대해서는 고려하지 않는다<sup>[15]</sup>.

[Fig. 1]은 무한궤도형 플랫폼의 자유물체도를 나타내고 있으며, [Fig. 2]는 무한궤도형 플랫폼의 회전 반경에 영향을 주는 요소들을 나타내고 있다.

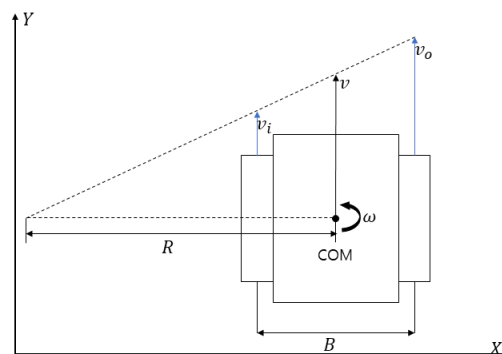
$$v_o : v_i = R + \frac{B}{2} : R - \frac{B}{2} \tag{1}$$

$$\frac{v_i}{v_o} = \frac{R - \frac{B}{2}}{R + \frac{B}{2}} = i \tag{2}$$

$$R = \frac{B(1+i)}{2(1-i)} \tag{3}$$



[Fig. 1] Free body diagram of a tracked platform



[Fig. 2] Factors of turning radius of tracked platform

- $v_o$  : 무한궤도형 플랫폼 외측 궤도의 속도
- $v_i$  : 무한궤도형 플랫폼 내측 궤도의 속도
- $R$  : 무한궤도형 플랫폼 선회 반경
- $B$  : 무한궤도형 플랫폼 폭
- $i$  : 무한궤도형 플랫폼의 속도비

### 3. 무한궤도형 플랫폼의 경로 추종 알고리즘

#### 3.1 개요

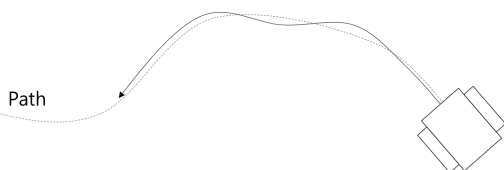
경로 추종이란 자율주행 플랫폼이 자율주행을 하기 위해 주어진 경로를 따라 플랫폼이 적절한 조향 동작을 수행하는 것이라고 정의한다. 정밀한 경로 추종은 플랫폼과 경로의 횡방향 거리 오차를 최소화하는 것이 중요하며 플랫폼 이동 방향과 경로 이동 방향을 근사화시켜 주행 안정성을 확보하는 것을 목표로 한다.

자율주행 플랫폼의 경로 추종 알고리즘은 플랫폼의 조향각을 산출하여 플랫폼이 주행 안정성을 유지하며, 경로상의 목적지에 도달할 수 있도록 역할을 수행한다.

#### 3.2 Pure Pursuit

Pure Pursuit은 Stanley Method와 함께 경로를 추종하는 대표적인 방법중 하나로, 플랫폼의 현재 중심 좌표점과 목표지향점을 두 점으로 하는 원호를 그려서 원호의 지름을 계산하여 플랫폼의 조향각을 산출하는 알고리즘이다. [Fig. 3]은 무한궤도형 플랫폼의 경로 추종을 간략하게 나타내고 있다.

플랫폼의 중심 좌표에서 목표지향점까지의 거리를 전방 주시거리라고 정의한다. 전방 주시거리가 변하는 경우 플랫폼 중심에서 그려지는 원호의 지름이 변하고 그에 따라 플랫폼의 조향각 또한 다르게 산출된다. Pure Pursuit에서 전방 주시거리가 짧은 경우에는 경로 추종 성능이 향상되지만, 조향각의 변화량이 많아 플랫폼이 경로를 추종하면서 Oscillation이 발생한다. 반면 전방 주시거리가 긴 경우에는 플랫폼의 경로 추종 성능은 저하되지만, 조향각의 변화량이 적어 플랫폼의 주행 안정성이 향상된다. 따라서 적절한 전방 주시거리를 설정하는 것이 경로 추종을 안정적으로 하는 데 중요한 변수로 작용한다<sup>[16,17]</sup>. [Fig. 4]는 전방 주시 거리에 따른 플랫폼의 거동을 간략하게 나타내고 있다.



[Fig. 3] Path tracking of the autonomous tracked platform

기존의 Pure Pursuit의 경우 자전거 모델을 기반으로 후륜의 중심 위치와 플랫폼의 목표지향점을 두 점으로 하는 원호의 곡률을 이용하여 조향각을 산출한다. 하지만 무한궤도형 플랫폼의 경우 조향각의 한계와 축거가 존재하지 않아 수정이 필요하다. 무한궤도형 플랫폼의 특성을 고려하여 플랫폼의 중심 좌표점( $x_P, y_P$ )과 전방 주시거리에 의해 정해지는 목표지향점( $x_L, y_L$ )을 이용하여 [Fig. 5]와 같은 기하학 모델을 그릴 수 있다. 기하학 모델을 이용하여 아래와 같은 관계식을 얻을 수 있으며 이를 통해 플랫폼의 조향각을 산출할 수 있다.

$$\tan \alpha = \frac{X}{Y} \tag{4}$$

$$\alpha = \tan^{-1} \left( \frac{X}{Y} \right) \tag{5}$$

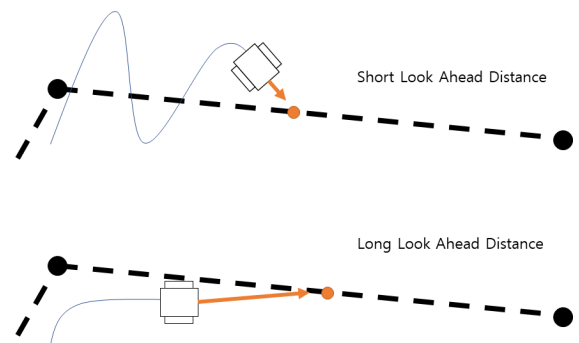
$$\theta = -\delta - \alpha \tag{6}$$

$X$  : 무한궤도형 플랫폼의 현재 중심 좌표와 목표지향점까지의 x축 거리

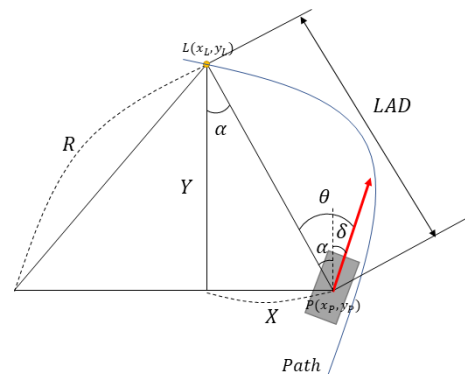
$Y$  : 무한궤도형 플랫폼의 현재 중심 좌표와 목표지향점까지의 y축 거리

$\theta$  : 무한궤도형 플랫폼의 조향각

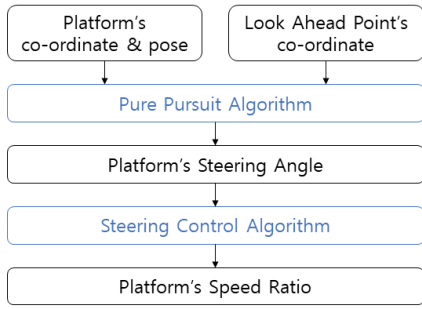
$\delta$  : 무한궤도형 플랫폼의 현재 진행 방향



[Fig. 4] Comparison of Look Ahead Distance



[Fig. 5] Pure Pursuit geometric model of the tracked platform



[Fig. 6] Steering command output flowchart

### 3.3 조향 제어 알고리즘

본 연구에서 무한궤도형 플랫폼의 조향인 스키드 조향의 특성을 고려한 Pure Pursuit 알고리즘을 구현했다. Pure Pursuit 을 통해서 계산되는 조향각을 이용하여 무한궤도형 플랫폼의 속도비를 산출한다. 식 (3) 선회 반경과 속도비의 상관관계 식 을 이용하여 선회 반경을 속도와 각속도로 대체하여 정리하면 식 (7)과 같다. 식 (7)을 조향비  $i$ 에 대해 정리하면 식 (8)과 같다. [Fig. 6]은 조향값이 출력되는 순서를 나타낸다.

$$\frac{v}{\dot{\theta}} = \frac{B(1+i)}{2(1-i)} \quad (7)$$

$$i = \frac{2v - B\dot{\theta}}{2v + B\dot{\theta}} \quad (8)$$

$v$  : 현재 플랫폼 속도

$\dot{\theta}$  : 목표 조향 각속도

$B$  : 플랫폼의 폭

$i$  : 조향비

### 3.4 경로 추종 알고리즘 검증 실험

#### 3.4.1 실험 장소 및 플랫폼

본 실험은 홍익대학교 화성 캠퍼스 운동장에서 실시하였다. 실험을 위한 플랫폼은 무한궤도형 로봇을 사용하였다. [Fig. 7] 은 실험에 사용된 무한궤도형 플랫폼의 사진이며, 무한궤도형 플랫폼의 사양은 [Table 1]과 같다.

#### 3.4.2 실험 방법 및 결과

본 추종 실험에서는 전방 주시거리를 변수로 설정하여 1 m 단위로 각 전방 주시거리에 따른 플랫폼의 거동을 실험하였다. 주행 속도는 3 kph로 실험하였으며 3 kph로 주행하는 이유는 농작업 시 평균 작업속도는 3 kph 이내이기 때문이다. 본 실험에서 위치 추정은 U-Blox 社의 ZED-F9P의 GPS 센서를 이용하였으며 사양은 [Table 2]와 같다. 플랫폼의 정확한 위치 데이터



[Fig. 7] Tracked platform used in the experiment

[Table 1] A specification table of tracked platform

Size	H × L × W : 600 × 1150 × 900 mm
Weight	90 kg
Drive Speed	Max. 5 kph
Driving mode	Remote control & Autonomous Driving
Drive source	Electric battery Li-ion 25.2 V/ 80 Ah, 2000 Wh * 1 EA (Full Charging 29.5 V)

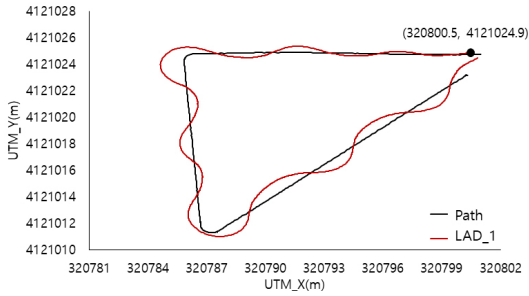
[Table 2] A specification table of ZED-F9P

Accuracy of time pulse signal	RMS	30 ns
	99%	60 ns
Frequency of time pulse signal	0.25 Hz to 10 MHz	
Velocity accuracy	0.05 m/s	
Dynamic heading accuracy	0.3 deg	
Operational limits	Dynamics	≤4g
	Altitude	80,000 m
	Velocity	500 m/s
Horizontal pos accuracy	PVT	1.5 m CEP
	RTK	0.01 m
Vertical pos accuracy	RTK	0.01 m

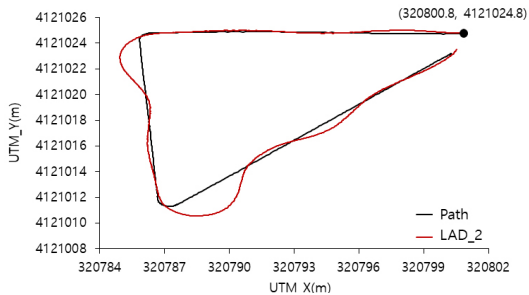
를 얻기 위해서 VRS-GPS 방식을 사용하여 GPS 오차를 1 cm 수준으로 줄여 보다 정확한 플랫폼의 위치 데이터를 획득하였다.

#### 3.4.3 경로 추종 실험 결론

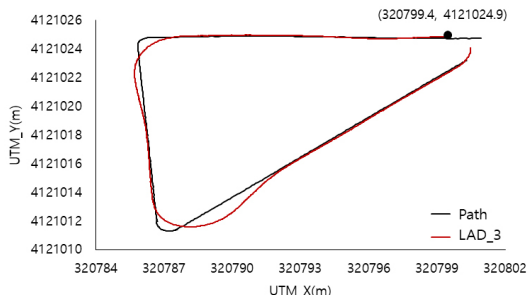
전방 주시거리가 짧은 경우 목표지향점이 가까워 곡률이 작아 경로에 빠르게 진입할 수 있다. 하지만 조향각의 변화가 심하고 과한 경우 [Fig. 8]과 같이 횡 방향 제어의 발산이 일어나 Oscillation 현상이 발생한다. 반면 전방 주시거리가 긴 경우 목표지향점과의 곡률이 커져 조향각의 변화가 적어 부드럽게 경로를 추종한다. 하지만 실제 플랫폼이 코너에 진입하지 않은 상태이지만, 목표지향점은 코너에 있으므로 선회 조향하여 실제 경로보다 안쪽으로 선회하는 ‘Cutting Corner’ 현상이 발생한다. 이는 전방 주시거리가 커질수록 심해지며 이는 경로 추종 실험 결과를 통해서 확인할 수 있다. [Fig. 8]-[Fig. 12]는 전방 주시거리에 따른 무한궤도형 플랫폼이 주행한 결과이다.



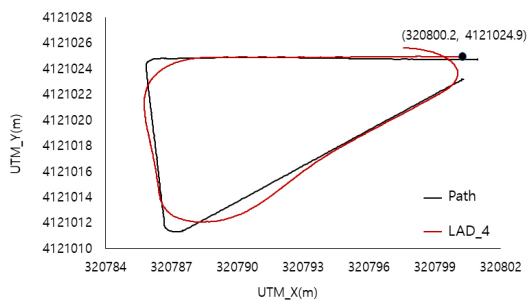
[Fig. 8] The trajectory of the platform according to the LAD 1 m



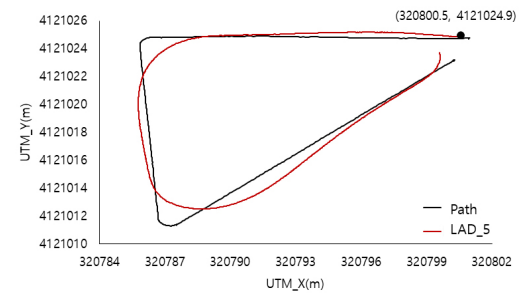
[Fig. 9] The trajectory of the platform according to the LAD 2 m



[Fig. 10] The trajectory of the platform according to the LAD 3 m



[Fig. 11] The trajectory of the platform according to the LAD 4 m



[Fig. 12] The trajectory of the platform according to the LAD 5 m

## 4. 경로 추종 능력 향상을 위한 가변 전방 주시거리 알고리즘

### 4.1 개요

전방 주시거리가 일정한 경우 전방 주시거리에 따라 경로 추종에 다른 오차 현상들이 발생한다. 전방 주시거리가 짧은 경우에는 조향각의 변화가 심해 ‘Oscillation’ 현상이 발생한다. 반면 전방 주시거리가 긴 경우에는 코너 구간에서 플랫폼이 코너에 진입하지 않았지만 목표지향점이 코너에 있어 실제 경로보다 안쪽으로 선회하는 ‘Cutting Corner’ 현상이 발생한다. 이러한 경로 추종 오차를 줄이기 위해서 자율주행 차량에서는 차량의 속도에 따라 전방 주시거리를 변경하여 제어 성능을 향상한다. 하지만 농업용 무한궤도형 플랫폼의 경우 지속적으로 농작업을 하므로 속도에 따른 전방 주시거리의 변경은 큰 영향을 줄 수 없다. 이를 보완 하기 위해서 플랫폼이 주행하는 곡률에 따라 전방 주시거리를 변경하는 알고리즘을 제안한다.

### 4.2 곡률 계산을 위한 전방 주시거리

곡률을 계산하기 위해서는 경로상 곡률을 계산할 위치를 선정해야 한다. 자율주행 차량의 경우 고속으로 주행하기 때문에 속도에 따라 곡률을 계산하기 위한 전방 주시거리를 실시간으로 변경하지만, 농작업 자율주행의 경우 지속적으로 주행하기 때문에 곡률을 계산하기 위한 전방 주시거리가 실시간으로 변경될 필요성이 없다. 하지만 곡률 계산을 위한 전방 주시거리는 경로 추종을 위한 전방 주시거리보다 크거나 같아야 한다. 왜냐하면 곡률 계산을 위한 전방 주시거리가 경로 추종을 위한 전방 주시거리보다 작으면 주행 중 플랫폼이 이미 선회 경로를 추종하고 있음에도 직선 경로의 곡률을 계산하는 상황이 발생하기 때문이다. 이런 상황에서는 플랫폼의 거동이 불안정해질 수 있다. 본 연구에서는 기존의 경로 추종 알고리즘 실험을 통해 플랫폼이 경로를 추종할 때 Oscillation 현상이 발생하지 않으며 Cutting Corner 현상이 가장 적게 발생하는 3m를 경로 추종을 위한 전방 주시거리의 기본값으로 설정하였다. 따라서 곡률 계산을 위한 전방 주시거리는 3m로 설정하였다.

### 4.3 경로상 곡률 계산 및 판단

경로상의 목표지향점 좌표와 GPS로 획득한 현재 플랫폼의 위치에서 경로상 최근접점의 좌표를 이용하여 곡률을 계산한다. 곡률을 계산하기 위해서 목표지향점의 단위 벡터와 경로상

최근접 위치에서의 단위 벡터를 구한다. 단위 벡터를 구하기 위해서 목표지향점의 좌표와 목표지향점 바로 다음 Waypoint 좌표를 통해서 단위 벡터를 구한다. 최근접 위치에서의 단위 벡터 또한 목표지향점의 단위 벡터를 구하는 방식과 동일하게 단위 벡터를 구한다.

$$P_n = (x_{P_n}, y_{P_n}), L_n = (x_{L_n}, y_{L_n}) \quad (9)$$

$$\hat{x}_{P_n} = \frac{x_{P_{n+1}} - x_{P_n}}{(x_{P_{n+1}} - x_{P_n})^2 + (y_{P_{n+1}} - y_{P_n})^2} \quad (10)$$

$$\hat{y}_{P_n} = \frac{y_{P_{n+1}} - y_{P_n}}{(x_{P_{n+1}} - x_{P_n})^2 + (y_{P_{n+1}} - y_{P_n})^2} \quad (11)$$

$$\hat{x}_{L_n} = \frac{x_{L_{n+1}} - x_{L_n}}{(x_{L_{n+1}} - x_{L_n})^2 + (y_{L_{n+1}} - y_{L_n})^2} \quad (12)$$

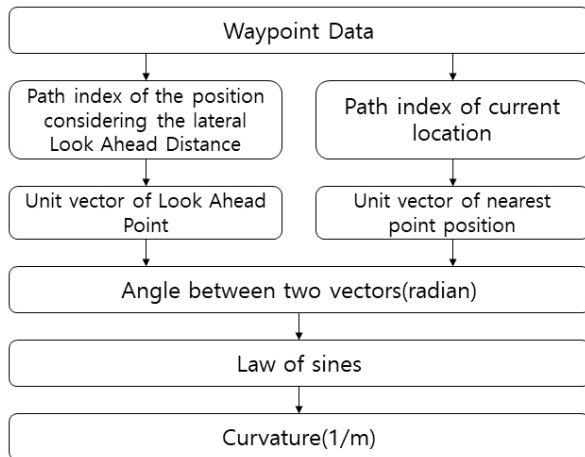
$$\hat{y}_{L_n} = \frac{y_{L_{n+1}} - y_{L_n}}{(x_{L_{n+1}} - x_{L_n})^2 + (y_{L_{n+1}} - y_{L_n})^2} \quad (13)$$

$P_n$  : 무한궤도형 플랫폼의 경로상 최근접점의 좌표

$L_n$  : 목표지향점의 좌표

두 단위 벡터 성분을 구한 후 두 단위 벡터 사이의 각을 계산한다.

$$\theta = \cos^{-1} \left( \frac{(\hat{P}_n \cdot \hat{L}_n)}{(\|\hat{P}_n\| \cdot \|\hat{L}_n\|)} \right) \quad (14)$$



[Fig. 13] Curvature calculation flowchart

두 벡터의 사이의 각에 사인 법칙을 이용하여 경로의 곡률을 계산한다.

$$\kappa = \frac{\sin \frac{\theta}{2}}{\frac{|P_n L_n|}{2}} \quad (15)$$

계산된 곡률을 통해 주행 중인 경로가 직선 형태의 경로인지 곡선 형태의 경로인지 판단하여 경로 추종을 하는 전방 주시거리를 결정한다. [Fig. 13]은 곡률을 계산하는 흐름을 나타내고 있다.

#### 4.4 경로오차

경로 추종 성능을 확인하기 위한 지표는 현재 플랫폼 위치의 경로오차이다. 플랫폼의 현재 위치를 기준으로 주행 중인 경로까지 수직으로 그인 선의 길이  $D$ 를 경로 오차라 정의한다. 실제 경로는 선이 아닌 점 성분인 waypoint로 이루어져 있다. 따라서 정확한 경로 오차를 측정하기 위해서 점 성분인 waypoint를 직선으로 보간한다. 직선으로 보간하는 점은 플랫폼과 최근접점을 기준으로  $n$ 번째 waypoint와  $n+1$ 번째 waypoint이다. 두 점을 통해 직선의 방정식을 구한 후, 점과 직선 사이의 거리를 구하는 공식으로 경로 오차를 측정한다. GPS에 대한 오차는 고려하지 않았다. [Fig. 14]는 경로 오차를 그림으로 나타내고 있다.

$$D = \frac{|(y_{n+1} - y_n)x_p + (x_n - x_{n+1})y_p + x_{n+1}y_n - x_n y_{n+1}|}{\sqrt{(y_{n+1} - y_n)^2 + (x_n - x_{n+1})^2}} \quad (16)$$

#### 4.5 가변 전방 주시거리 알고리즘 검증 실험

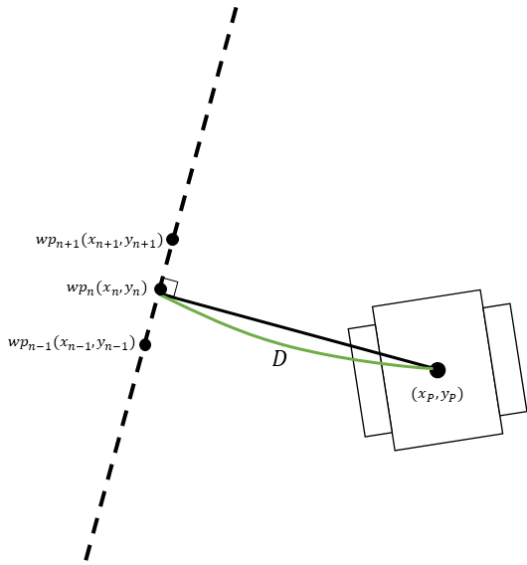
##### 4.5.1 실험 장소 및 플랫폼

본 실험은 경로 추종 알고리즘 검증 실험과 동일하게 홍익대학교 화성 캠퍼스 운동장에서 실시하였으며 플랫폼은 무한궤도형 로봇을 사용하였다.

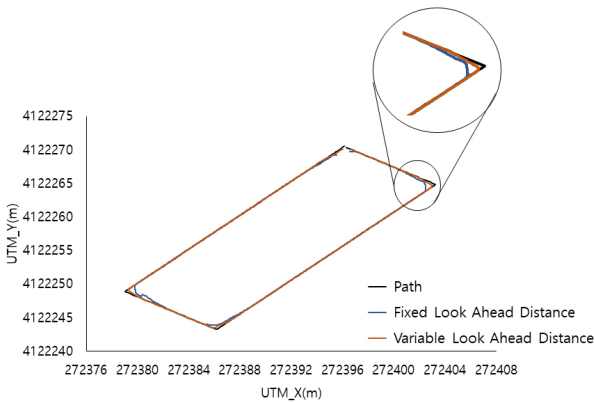
##### 4.5.2 실험 방법 및 결과

본 주행 실험에서는 기존의 고정형 전방 주시거리 알고리즘과 개발한 가변형 전방 주시거리 알고리즘을 실험하였다. 본 실험은 경로 추종 알고리즘 검증 실험과 동일한 GPS 센서를 사용하였다. 주행의 경우 동일한 경로를 3 kph의 속도로 실험하였다. [Fig. 15]는 경로 및 각 알고리즘의 주행 궤적을 도식화하였다. 기존의 고정형 전방 주시거리 알고리즘은 직선 구간에서의 RMS 경로 오차가 0.1034 m이고, 선회 구간에서의





[Fig. 14] Definition of path error



[Fig. 15] Experimental results of path following algorithm and variable LAD algorithm

RMS 경로 오차는 0.2787 m이다. 반면 가변형 전방 주시거리 알고리즘은 직선 구간에서의 RMS 경로 오차 0.0987 m이며, 선회 구간에서의 RMS 경로 오차는 0.1396 m이다.

#### 4.5.3 실험 결론

기존의 고정형 전방 주시거리 알고리즘은 직각으로 이루어진 경로에서 ‘Cutting Corner’ 현상이 발생하지만, 가변형 전방 주시거리 알고리즘의 경우 직각에 근사하게 선회하는 것을 확인할 수 있다. 직선 구간의 경우 경로 오차가 0.0047 m 차이로 큰 차이가 없는 반면 선회 구간의 경우 경로 오차가 0.1931 m 차이로 약 48.9% 감소하였다. 가변 전방 주시거리 알고리즘을 적용하여 선회 구간에서의 경로 오차를 효과적으로 감소시켰다.

## 5. 비정형 환경에서의 주행 실험

### 5.1 실험 개요

비정형 환경에서 직각 선회와 U-turn 선회가 포함된 각각의 경로를 변수로 설정하여 주행 실험을 진행했다. 각 경로에서 플랫폼이 주행하면서 발생한 경로 오차를 측정하여 플랫폼의 경로 추종 성능을 확인했다. 비정형 환경은 경기도 고양시의 노지이며 노지란 지면이 고르지 않고 잡초와 흙으로 이루어진 토지 환경이며, [Fig. 16]과 같다. GPS 센서는 비정형 환경에서의 주행 실험과 동일한 센서를 사용하였다.

### 5.2 직각 선회 경로 주행

[Fig. 17]은 무한궤도형 플랫폼이 주행한 직각 선회 경로 및 경로를 주행한 궤적이다. [Fig. 18]에서 보여지는 것 같이 직진 구간에서는 플랫폼이 경로와 유사하게 주행하지만, 직각 선회 구간에서는 직선 구간 대비해서 경로 오차가 발생하는 것을 확인했다. 직진 구간에서의 RMS 경로 오차는 0.1153 m이며 선회 구간에서의 RMS 경로 오차는 0.1457 m이다. 선회 구간에서 직선 구간 대비 RMS 경로 오차가 0.0304 m 증가했다.

### 5.3 U-turn 선회 경로

[Fig. 19]은 무한궤도형 플랫폼이 비정형 환경에서 U-turn 선회 경로 및 경로를 주행한 궤적이다. [Fig. 20]에서 보여지는 것 같이 U-turn 선회 구간에서도 직진 구간과 유사하게 경로를 추종하는 것을 확인했다.

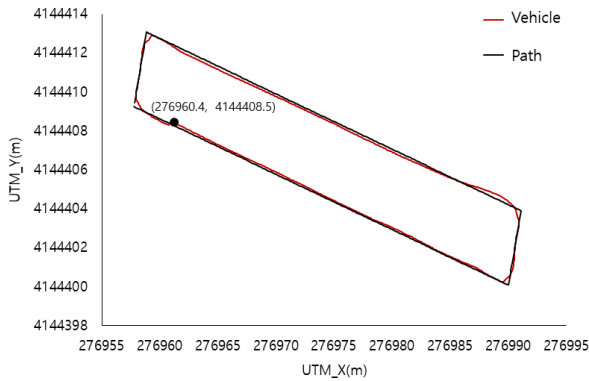
### 5.4 주행 실험 분석 및 고찰

#### 5.4.1 Cutting Corner 현상 개선

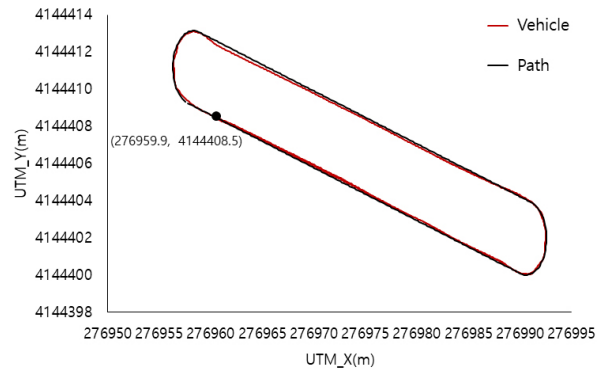
전방 주시거리가 3 m로 고정하여 주행하는 경우 직각 선회 시 경로보다 안쪽으로 선회하는 현상이 발생한다. 이를 보완하기 위해 주행 경로의 곡률을 계산하여 선회 구간에 진입했다 판단하면 전방 주시거리를 1 m로 변경하는 알고리즘을 개



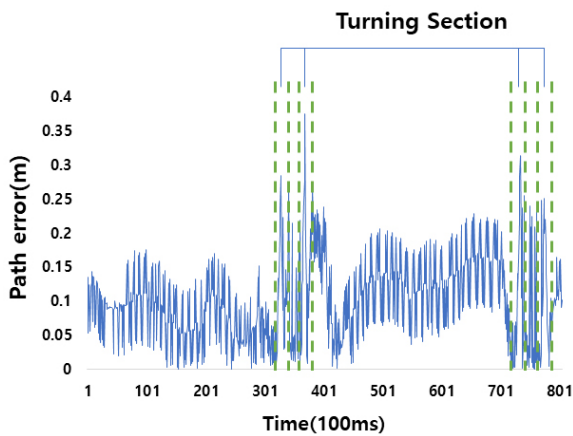
[Fig. 16] Outfield in Goyang-si, Gyeonggi-do



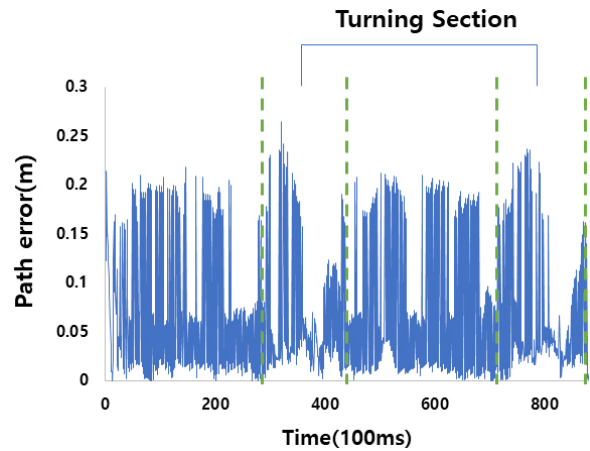
[Fig. 17] Right angle turning driving in an irregular environment



[Fig. 19] U-turn turning driving in an irregular environment



[Fig. 18] Right angle turning driving error result in an irregular environment



[Fig. 20] U-turn turning driving error result in an irregular environment

발하였다. 알고리즘을 통해서 Cutting Corner 현상을 개선하고 직각 선회 구간에서 경로 오차를 약 49% 감소시켰다.

하지만 현재 가변형 전방 주시거리 알고리즘은 전방 주시거리를 곡률이 커질수록 점진적으로 줄어드는 것이 아닌 3 m에서 1 m로 변경된다. 그에 따라 전방 주시거리가 변경되는 순간 목표지향점이 가까워지면서 조향각의 변화량이 급격하게 증가하는 경우가 발생할 수 있다. 조향각의 변화량이 급격하게 증가하는 경우 플랫폼의 주행 안전성이 떨어지므로 알고리즘에 개선이 필요하다. 추후 주행 경로의 곡률에 따라 전방 주시거리가 점진적으로 증가 및 감소하는 알고리즘을 개발하여 주행 안전성을 확보할 예정이다.

#### 5.4.2 다양한 경로 추종 실험

본 연구에서 주행한 경로의 경우 일반적 정형화된 경로로 실험하였다. 하지만 차륜형 플랫폼 대비 무한궤도형 플랫폼의 장점은 제자리 선회가 가능하고 험지에서 주행이 가능한 점이다. 따라서 추후 직각 선회와 U-turn 선회 외에도 나선형의 경로 혹은 지그재그 경로 등 조향각이 급격하게 변하는 경로를

추종하는 성능을 실험할 예정이다. 또한, 다양한 주행 환경에서의 실험을 진행하여 지면에 따른 경로 추종 성능을 실험할 예정이다.

#### 5.4.3 주행 시 플랫폼 안전성 확보

본 연구에서 무한궤도형 플랫폼은 GPS 센서만을 이용해서 경로 추종을 하였다. 실험 환경은 주변에 장애물이 존재하지 않고 통제된 환경이기 때문에 GPS 센서만 이용해도 안전에 문제가 없었다. 하지만 실제 자율주행 시 플랫폼이 어떠한 장애물이나 환경을 마주할지 모르기 때문에 주변 환경을 인지하는 센서가 필요하다. 인지 센서를 이용하여 장애물 검출 시 플랫폼의 정지 혹은 회피 주행을 판단하고, GPS 센서가 불안정한 경우 대체 할 수 있는 알고리즘이 연구되어야 한다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 무한궤도형 플랫폼의 특성을 고려한 Pure Pursuit을 기반으로 하는 경로 추종 알고리즘을 개발했다. 이



를 바탕으로 경로 추종 실험했으나 Pure Pursuit의 특성 중 하나의 Cutting Corner 현상으로 인해 선회 구간에서 경로 오차가 증가했다. 이를 개선하기 위해서 Pure Pursuit에서 조향각 산출에 중요한 변수인 전방 주시거리를 경로의 곡률에 따라 변경되는 알고리즘을 개발했다. 곡률에 따른 가변 전방 주시거리 알고리즘을 통해 기존의 경로 추종 알고리즘 대비 경로 오차가 감소한 것을 실험을 통해 확인했다.

마지막으로 무한궤도형 플랫폼이 자율주행을 하기 위해서는 GPS 외에 주변 환경을 인지할 수 있는 LiDAR나 카메라가 추가되어 GPS 센서에 오류가 발생하는 경우 주행할 수 있는 경로 추종에 관한 추가적인 연구를 진행할 계획이다.

## References

- [1] 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, 2020, DOI: 10.7746/jkros.2020.15.3.221.
- [2] G. H. Kim, S. C. Kim, Y. K. Hong, K. S. Han, and H. G. Choi, "Detection of Rice Seeding And Path Planning for an Autonomous Weeding Robot in a Paddy Field," *Korean Society for Agricultural Machinery Conference*, pp. 100-103, 2012, [Online], <https://kiss.kstudy.com/thesis/thesis-view.asp?key=3697182>.
- [3] G. H. Kim, S. C. Kim, and Y. K. Hong, "Method of Image Processing for Rice Seedlings Detection of Weeding Robot," *Korean Society for Agricultural Machinery Conference*, pp. 85-86, 2014, [Online], <https://kiss.kstudy.com/thesis/thesis-view.asp?key=3273682>.
- [4] C. Yang, J.-H. Won, Y. Hong, and G. Kim, "Study on Caterpillar Type Weeding Robot Based on Environment Recognition Using LiDAR," *Korean Society for Agricultural Machinery Conference*, vol. 26, no. 2, 2021, [Online], <https://kiss.kstudy.com/thesis/thesis-view.asp?key=3911353>.
- [5] J.-H. Kim, M.-J. Kim, S.-W. Beak, and J.-H. Kim, "Development of Leader-Follower Tracked Vehicle for Agriculture Convergence of Skid Steering and Pure Pursuit using  $\beta$  Compensation Coefficient," *Journal of Institute of Control Robotics and Systems*, vol. 24, no. 11, pp. 1033-1042, 2018, DOI: 10.5302/J.ICROS.2018.18.0163.
- [6] J.-H. Kim, H. W. Kim, and J. U. Lee, "Using  $\beta$  coefficient for Convergence of Skid Steering and Pure Pursuit Development of Rotation Ability Compensation Algorithm for Leader-Follower Agricultural Tracked Vehicle," *The Korean Society of Automotive Engineers Conference*, pp. 694-699, 2019, [Online], <https://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE09295642>.
- [7] J.-H. Kim, H. W. Kim, and J. U. Lee, "Development of Navigation Algorithm based on the Geometric Method for Self-Driving of the Tracked Vehicle: Convergence of Skid Steering and Pure Pursuit Using Compensation Coefficients," *The Korean Society of Automotive Engineers Conference*, pp. 738-742, 2020, [Online], <https://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE10519447>.
- [8] C.-W. Jeon, H.-J. Kim, X. Han, and J.-H. Kim, "Preliminary Study on Automated Path Generation and Tracking Simulation for an Unmanned Combine Harvester," *Korean Society for Agricultural Machinery Conference*, 2017, [Online], <https://kiss.kstudy.com/thesis/thesis-view.asp?key=3517454>.
- [9] C.-W. Jeon, H.-J. Kim, J.-H. Kim, and S. Y. Yi, "Application of a Combine Harvester Driving Simulator for Autonomous Path Tracking and Steering Control," *Korean Society for Agricultural Machinery Conference*, vol. 22, no. 2, 2017, [Online], <https://kiss.kstudy.com/thesis/thesis-view.asp?key=3556078>.
- [10] H. Kurita, M. Lida, W. Cho, and M. Suguri, "Rice Autonomous Harvesting: Operation Framework," *Journal of Field Robotics*, vol. 34, no. 6, pp. 1084-1099, 2017, DOI: 10.1002/rob.21705.
- [11] X. Z. Han, H. J. Kim, Y. T. Lee, H. C. Moon, J. H. Kim, Y. S. Kang, and Y. J. Kim, "Study on Path Planning and Tracking Algorithms for an Auto-Guided Tillage Tractor," *Korean Society for Agricultural Machinery Conference*, pp. 124-128, 2012, [Online], <https://kiss.kstudy.com/thesis/thesis-view.asp?key=3697188>.
- [12] X. Z. Han, H. J. Kim, H. C. Moon, S. Y. Yi, Y. Jekal, and J. H. Kim, "Research on Simulation of Path Tracking for Auto-guided Tillage Tractor," *Korean Society for Agricultural Machinery Conference*, pp. 36-40, 2012, [Online], <https://kiss.kstudy.com/thesis/thesis-view.asp?key=3862119>.
- [13] D. H. Han, S. J. Byeon, K. D. Kim, G. H. Han, M. H. Cha, and Y. J. Park, "Development of Path Tracking Control Algorithm for Tractor Autonomous Driving," *Korean Society for Agricultural Machinery Conference*, pp. 107, 2021, [Online], <https://kiss.kstudy.com/thesis/thesis-view.asp?key=3911249>.
- [14] M. H. A. Sidi, K. Hudha, Z. A. Kadir, and N. H. Amer, "Modeling and path tracking control of a tracked mobile robot," *2018 IEEE 14th International Colloquium on Signal Processing & Its Applications (CSPA)*, pp. 77-76, Penang, Malaysia, 2018, DOI: 10.1109/CSPA.2018.8368688.
- [15] Q.-J. Han and S.-J. Liu, "Path Tracking Control of Tracked Vehicle," *International Journal of Computer Science Issues*, vol. 10, no. 6, pp. 103-109, 2013, [Online], <https://www.proquest.com/docview/1500911450?fromopenview=true&parentSessionId=ox22fltW0eOj5JHgs42YhPSj0e4CHh%2BoFLv7%2FK5KLhM%3D&pq-origsite=gscholar>.
- [16] R. C. Coulter, "Implementation of the pure pursuit path tracking algorithm," *The Robotics Inst., Carnegie-Mellon Univ., Pittsburgh PA USA*, Rep. CMU-RI-TR-92-01, 1992, [Online], [https://www.ri.cmu.edu/pub\\_files/pub3/coulter\\_r\\_craig\\_1992\\_1/coulter\\_r\\_craig\\_1992\\_1.pdf](https://www.ri.cmu.edu/pub_files/pub3/coulter_r_craig_1992_1/coulter_r_craig_1992_1.pdf).
- [17] J. M. Snider, "Automatic steering methods for autonomous automobile path tracking," *The Robotics Inst., Carnegie-Mellon Univ., Pittsburgh PA USA*, Rep. CMU-RITR-09-08, 2009, [Online], [https://www.ri.cmu.edu/pub\\_files/2009/2/Automatic\\_Steering\\_Methods\\_for\\_Autonomous\\_Automobile\\_Path\\_Tracking.pdf](https://www.ri.cmu.edu/pub_files/2009/2/Automatic_Steering_Methods_for_Autonomous_Automobile_Path_Tracking.pdf).



**이 규 호**

- 2020 홍익대학교 기계·시스템디자인공학과 (학사)
- 2022 홍익대학교 자율주행·지능로봇학과 (석사)
- 2022~현재 홍익대학교 자율주행·지능로봇학과(박사과정)

관심분야: Agricultural robot, Platform control, Platform architecture, Future Mobility



**최 효 혁**

- 2021 홍익대학교 기계·시스템디자인공학과 (학사)
- 2021~현재 홍익대학교 자율주행·지능로봇학과(석사과정)

관심분야: Path planning, Agricultural robot, sensor fusion



**김 봉 상**

- 2012 한국기술교육대학교 메카트로닉스공학과(학사)
- 2017 (주)언맨드솔루션 주임연구원
- 2019 홍익대학교 기계공학과(석사)
- 2019~현재 홍익대학교 자율주행·지능로봇학과(박사과정)

관심분야: Agricultural robot, Unmanned ground vehicle, Platform architecture



**문 희 창**

- 2001 선문대학교 기계설계학과/제어계측학과 (학사)
- 2003 국민대학교 자동차공학전문대학원 전자제어시스템(석사)
- 2009 국민대학교 자동차공학전문대학원 전자제어시스템(박사)
- 2011 University of Florida, Researcher
- 2020 (주)언맨드솔루션 대표이사
- 2021 (주) 언맨드솔루션 CTO
- 2017~현재 홍익대학교 기계·시스템디자인공학과 부교수

관심분야: Unmanned ground vehicle, Field Robot(AG, Robot and Drone), Future Transportation(PRT, PM)