

# 차동 구동형 로봇의 비정형 환경 주행 경로 추종 성능 향상을 위한 Pure pursuit와 속도 계획의 융합 알고리즘

## A Fusion Algorithm of Pure Pursuit and Velocity Planning to Improve the Path Following Performance of Differential Driven Robots in Unstructured Environments

김 봉 상<sup>1</sup> · 이 규 호<sup>1</sup> · 백 승 범<sup>1</sup> · 이 성 희<sup>2</sup> · 문 희 창<sup>†</sup>

Bongsang Kim<sup>1</sup>, Kyuho Lee<sup>1</sup>, Seungbeom Baek<sup>1</sup>, Seonghee Lee<sup>2</sup>, Heechang Moon<sup>†</sup>

**Abstract:** In the path traveling of differential-drive robots, the steering controller plays an important role in determining the path-following performance. When a robot with a pure-pursuit algorithm is used to continuously drive a right-angled driving path in an unstructured environment without turning in place, the robot cannot accurately follow the right-angled path and stops driving due to the ground and motor load caused by turning. In the case of pure-pursuit, only the current robot position and the steering angle to the current target path point are generated, and the steering component does not reflect the speed plan, which requires improvement for precise path following. In this study, we propose a driving algorithm for differentially driven robots that enables precise path following by planning the driving speed using the radius of curvature and fusing the planned speed with the steering angle of the existing pure-pursuit controller, similar to the Model Predict Control control that reflects speed planning. When speed planning is applied, the robot slows down before entering a right-angle path and returns to the input speed when leaving the right-angle path. The pure-pursuit controller then fuses the steering angle calculated at each path point with the accelerated and decelerated velocity to achieve more precise following of the orthogonal path.

**Keywords:** Differential Drive Robots, Path Tracking, Speed Planning

### 1. 서 론

최근 장기화 된 우크라이나-러시아 전쟁 초기, 무인기를 이용한 전차 공격으로 인해 무용론이 제기되었으나 일진일퇴의 공방전이 계속되면서 그 가치를 증명하고 있다. 우크라이나 지역은 집중 호우인 ‘라스푸티차’로 인해 진흙탕이 된다. 이러

한 환경을 반영하여 전차를 설계했음에도 불구하고 [Fig. 1]과 같이 극복하지 못하는 상황이 발생한다. 전차의 경우 대부분 차동 구동(Differential drive) 방식을 사용하며 비단 전차뿐만 아니라 건설, 농업 등 다양한 분야에도 차동 구동형 제어방식이 적용된다. 각 분야 모두 험난한 지형 극복을 위해 차동 구동 형태의 플랫폼 제어 방법에 대한 연구가 진행되고 있다.

차동 구동 로봇은 구조상 종방향 제어와 횡방향 제어가 동시에 이뤄지며 횡방향 제어는 주행 안정성에 큰 영향을 미친다. 횡방향 제어를 위해 다양한 방법이 사용되고 있으며 기하학적 방법인 Pure-pursuit 제어기<sup>[1]</sup>와 동역학적 모델에 근거한 MPC (Model predict control)<sup>[2-5]</sup> 방법이 있다. 각 제어 방법 모두 장단점이 있지만 컨셉이 단순하여 환경적 요인에 강한 기하학적 기반의 제어 방법이 많이 사용되며 Pure-pursuit 제어기는 다양한 자율주행 플랫폼에 적용된 사례<sup>[6-8]</sup>들이 있다. 선

Received : May. 27. 2023; Revised : Jul. 13. 2023; Accepted : Jul. 26. 2023

※ This work was supported by Korea Research Institute for defense Technology planning and advancement (KRIT) grant funded by the Korea government (DAPA (Defense Acquisition Program Administration)) (No. KRIT-CT-21-009, Development of Realtime Automatic Mission Execution and Correction Technology based on Battlefield Information, 2022)

1. PhD Students, Autonomous Vehicle & Intelligent Robotics Program, Hongik University, Seoul, Korea (bongsai, rbgh0214, q001v@mail.hongik.ac.kr)

2. Engineer, Hanwha Systems Co., Ltd., Seongnam, Korea (glimlee82@hanwha.com)

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



[Fig. 1] Russian tanks in the mud and excavators scooping up mud. (Yonhapnews, 2022, 02.15)

행 연구로서 비정형 환경에서 차동 구동형 로봇 플랫폼을 이용하여 지정된 주행 속도와 Pure-pursuit 제어기가 적용된 로봇을 직사각형 주행 경로에서 로봇이 정지하지 않고 연속 주행할 때, 로봇이 직각(곡률 반경 2 m 이하)경로는 정확하게 추종하지 못하거나 과도한 조향 명령이 입력되어 모터드라이버의 과부하가 발생하기도 했다. 이는 Pure-pursuit 제어기의 경우 현재 로봇의 위치와 현재 목표경로점까지의 조향각만 생성하고 조향 성분에 속도 계획이 반영하지 않아 발생하는 것으로 정밀한 경로 추종을 위해 개선이 필요하다.

본 연구에서는 속도 계획이 반영되는 MPC 제어와 유사하게 곡률 반경을 이용하여 주행 속도를 계획하고 계획된 속도와 기존의 Pure-pursuit 제어기의 조향각을 융합하여 비정형 환경에서 강인한 주행 및 경로 추종이 가능한 궤도형 로봇 플랫폼에 적합한 주행 알고리즘을 제안한다.

## 2. 속도 계획이 반영된 융합 알고리즘

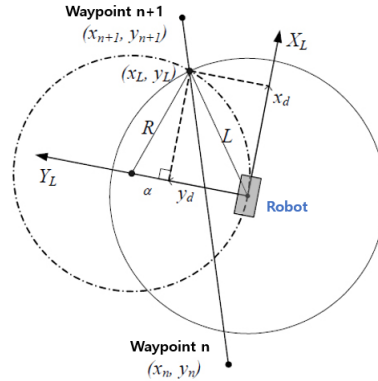
### 2.1 플랫폼에 적용된 Pure pursuit 알고리즘

Pure pursuit 알고리즘은 [Fig. 2]와 같이 플랫폼의 중심좌표에서 목표거리( $L$ ) 만큼 떨어져 있는 기준경로상의 한 점을 목표지향점( $x_L, y_L$ )으로 선정하고 이 때, 생성되는 2개의 교점을 바탕으로 진행방향에 가까운 점을 목표지향점으로 선정한다. 목표지향점이 이동로봇의 중심좌표에서( $x_d, y_d$ )의 거리만큼 떨어져 있다면, 식 (1)과 같은 관계식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} x_d^2 + y_d^2 &= L^2 \\ \alpha^2 + x_d^2 &= R^2 \\ \alpha + y_d &= R \end{aligned} \quad (1)$$

또한 식 (1)로부터 선회반경은 식 (2)과 같이 얻어진다.

$$R = \frac{L^2}{2y_d} \quad (2)$$



[Fig. 2] A geometry of the pure pursuit algorithm

이동로봇의 속도  $v_x$ 와 선회각속도  $w$ 의 관계식은 식 (3)과 같으며,  $v_x$ 가 일정하다고 가정하면  $w$ 을 구할 수 있다.

$$w = \frac{v_x}{R} = \frac{2y_d}{L^2} v_x \quad (3)$$

### 2.2 곡률 반영 기반 주행 속도 계획

대부분의 차동 구동형 로봇은 직각 형태의 경로 주행 시 제자리 회전을 이용하여 직각 주행을 수행한다. 제자리 회전의 초기 구동 시 모터에 발생하는 부하가 전진 또는 후진 주행할 때의 부하보다 크며 전장 상황에서 쉬운 표적이 될 가능성이 높다. 따라서 주행 로봇은 곡선 주행 시 정지 또는 제자리 회전을 하지 않고 주행한다는 가정하에 알고리즘을 구성했다.

안정적인 곡선 주행을 위해 차량은 주행 시 경로에서 곡률이 발생하면 속도를 줄이고 직선 경로에 진입하면 원래 속도로 복원하는 형태로 주행한다. 곡선 또는 직선 경로를 연속적으로 주행하는 로봇은 차량과 유사한 상황으로 가정하여 알고리즘을 구현했다. 속도 계획 알고리즘의 수식적인 기반은 도로 곡률에 따른 제한속도<sup>[9,10]</sup> 수식을 사용했으며 전개 과정은 다음과 같다.

차량이 곡선주행 시 작용하는 원심력은 차량의 속도와 곡률 반경에 대해 식 (4)과 같이 정리할 수 있다.

$$F = \frac{W}{g} \times \frac{V^2}{R} \quad (4)$$

$F$ : Centrifugal force

$W$ : Robot weight (kg)

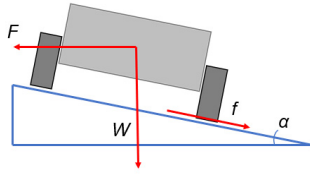
$V$ : Robot Speed (km/h)

$R$ : Radius of curvature (m)

$g$ : Acceleration of gravity ( $m/s^2$ )

$i$ : Superelevation (%)

$f$ : Road friction coefficient



[Fig. 3] Centrifugal force acting on a robot when driving on a curved slope. (F : Centrifugal force, W : Robot weight, f : Friction force, α : Superelevation)

[Fig. 3]와 같이 곡선부 주행 시 도로의 경사각  $\alpha$ , 로봇의 지면 마찰력  $f$ 라 할 때, 원심력과 마찰력, 편경사에 대한 관계는 식 (5)와 같다.

$$F \cos(\alpha) - W \sin(\alpha) \leq f(F \sin(\alpha) + W \cos(\alpha)) \quad (5)$$

편경사  $i = \tan(\alpha)$  이고 원심력  $F$ 를 식 (5)에 대입하면 식 (6)과 (7) 같이 정리할 수 있다.

$$\left(\frac{W}{g} \times \frac{V^2}{R}\right) - W i \leq f\left(\left(\frac{W}{g} \times \frac{V^2}{R}\right) i + W\right) \quad (6)$$

$$\left(\frac{V^2}{gR} - i\right) \leq f\left(\left(\frac{V^2}{gR}\right) i + 1\right) \quad (7)$$

식 (7)을 곡률 반경  $R$ 에 대하여 정리하면 식 (8)과 같다.

$$R \geq \left(\frac{V^2}{g} \times \frac{1}{i+f}\right) \quad (8)$$

플랫폼의 속도 단위는 km/h로 이므로 중력가속도  $g$ 를 고려하여 단위를 환산한다.

$$R \geq \left(\frac{V^2 \left(\frac{1000}{3600}\right)^2}{9.8} \times \frac{1}{i+f}\right) \quad (9)$$

$$R \geq \left(\frac{V^2}{127} \times \frac{1}{i+f}\right)$$

로봇의 목표 속도를 구하기 위해  $V$ 로 정리하면 식 (10)과 같다.

$$V = \sqrt{R \times 127(i+f)} \quad (10)$$

속도 계획은 곡률 반경에 따른 차량의 속도식을 이용하여 식의 결괏값이 입력 속도를 넘지 않도록 설정한다. 속도 계획을 적용하면 로봇은 직각 경로에 진입하기 전, 속도를 감속하고 직각 경로를 탈출할 때 입력 속도로 복귀한다.

## 2.3 실시간 곡률 반경 계산 알고리즘 구성

로봇은 전역 경로 데이터를 기반으로 주행하며 곡률이 발생하는 구간을 사전에 알 수 있다. 현재 위치점과 곡률이 발생했을 때 로봇의 감속하기 시작하는 위치점을 이용하여 두 개의 직선을 만들고 두 직선에 사이각에 해당하는 호에 대한 반지름을 알고리즘에 적용할 곡률 반경이라 정의한다.

두 직선은 [Fig. 4]와 같이 로봇의 현재 위치 경로점(n)과 n+2의 경로점을 이은 직선과 로봇이 감속을 시작하는 위치 경로점(p)과 p+2의 경로점을 이은 직선이다. 이 때 로봇이 감속을 시작하는 위치점은 로봇의 주행 속도에 따른 감속거리(m)이며 이것을 종방향 LAD (Look ahead distance)라 정의한다<sup>[11]</sup>.

전역 경로 데이터 종방향 LAD에서 계산된 감속 시작 위치점 Index와 현재 위치점 Index를 추출하고 추출된 값에 단위벡터를 구한다.

$$\vec{P} = (x_p, y_p), \vec{N} = (x_n, y_n) \quad (11)$$

$$\hat{x}_P = \frac{x_{p+2} - x_p}{(x_{p+2} - x_p)^2 + (y_{p+2} - y_p)^2} \quad (12)$$

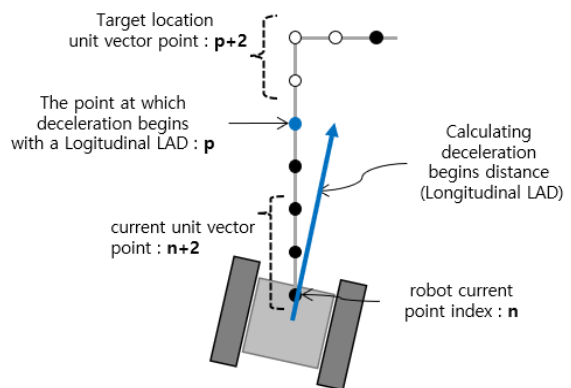
$$\hat{y}_P = \frac{y_{p+2} - y_p}{(x_{p+2} - x_p)^2 + (y_{p+2} - y_p)^2} \quad (13)$$

$$\hat{x}_N = \frac{x_{n+2} - x_n}{(x_{n+2} - x_n)^2 + (y_{n+2} - y_n)^2} \quad (14)$$

$$\hat{y}_N = \frac{y_{n+2} - y_n}{(x_{n+2} - x_n)^2 + (y_{n+2} - y_n)^2} \quad (15)$$

두 단위 벡터 사이의 각을 구한다.

$$\theta = \sin^{-1}\left(\frac{x_N \hat{y}_P - y_N \hat{x}_P}{\sqrt{x_N^2 + y_N^2} \sqrt{\hat{x}_P^2 + \hat{y}_P^2}}\right) \quad (16)$$



[Fig. 4] Concepts for Real-Time Radius of Curvature Calculations

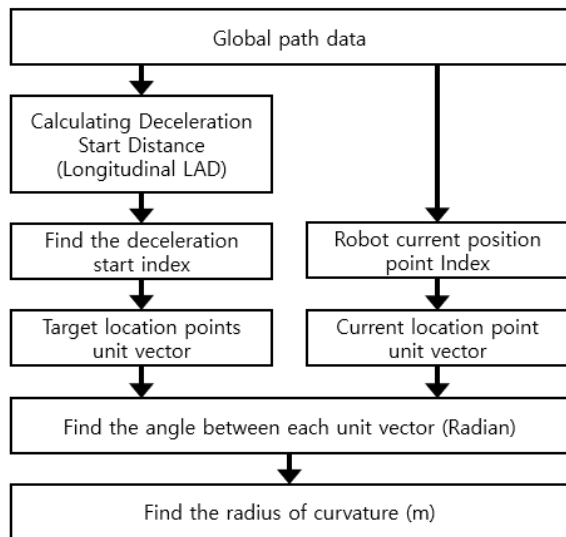
두 단위 벡터 사이의 각  $\theta$ 와 감속 시작위치점  $p$ 와 로봇의 현재 위치점  $n$ 을 이용하여  $\sin$  법칙에 통해 곡률 반경  $R$ 을 구한다.

$$R = \frac{\frac{\sqrt{(x_p - x_n)^2 + (y_p - y_n)^2}}{2}}{\sin \frac{\theta}{2}} \quad (17)$$

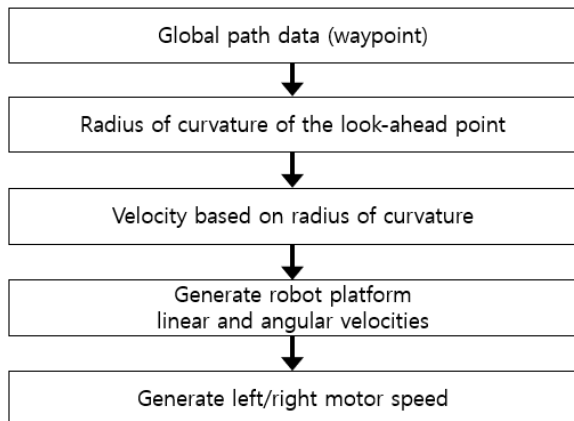
[Fig. 5]는 실시간 곡률 반경 계산 알고리즘의 흐름도를 나타냈다.

## 2.4 속도 계획이 반영된 융합 알고리즘

속도 계획이 반영된 융합 알고리즘의 구성은 [Fig. 6]과 같다. 전역 경로 데이터와 로봇의 현재 위치를 바탕으로 Pure-pursuit



[Fig. 5] Flowchart of the radius of curvature calculation algorithm



[Fig. 6] Flowchart of the fusion algorithm of pure pursuit and velocity planning for a differential driven robot

의 조향각 생성 목표점(Look-ahead point)과 다음 목표점 간의 단위 벡터를 이용하여 곡률 반경값을 계산한다. 곡률 반경값을 이용하여 곡률 반경 변화에 따른 주행 속도식을 통해 플랫폼의 최종 주행 속도를 계산한다. 곡률반영 속도 결괏값은 선택속도로 설정하고 Pure pursuit에서 생성된 조향각은 각속도로 설정하여 좌/우 모터 회전수 출력하여 플랫폼 주행 제어기에 입력한다. 이 때 Pure-pursuit 제어기는 각 경로점마다 계산된 조향각은 가감속된 속도와 융합되어 직각 경로를 보다 정밀하게 추종할 수 있도록 한다.

## 3. 로봇 주행 실험 및 결과

### 3.1 실험 환경

#### 3.1.1 차동 구동형 로봇 플랫폼

[Fig. 7]과 같이 차동 구동형 로봇은 콩 등 발 농작업에 다목적 활용이 가능한 자율주행형 로봇이며 구동원은 전기구동 방식이다. 노지 및 밭과 같은 비정형 환경에서 강건한 주행을 위해 케도형으로 구성했다. 차동 구동형 로봇은 좌, 우 케도륜의 독립구동을 위해 각각 2 kW의 BLCD 모터가 장착되어 있으며 최대 주행 속도는 7 km/h 이고 작업을 위한 주행 속도는 2.3 km/h 이다. 로봇의 사양은 [Table 1]과 같다.



[Fig. 7] Differential drive robot

[Table 1] Differential drive robot specification

Drive Type	Differential drive
Size (W x D x H)	1500 x 1480 x 1650 mm
Motor	4 kW (2 kW x 2 ea)
Battery	12 kW (50.3 V / 240 Ah)
Weight	590 kg
Speed	Max. 7 km/h (Working speed : 2.3 km/h)
Hill Climbing Ability	20 deg

### 3.1.2 로봇의 자율주행 시스템 구성

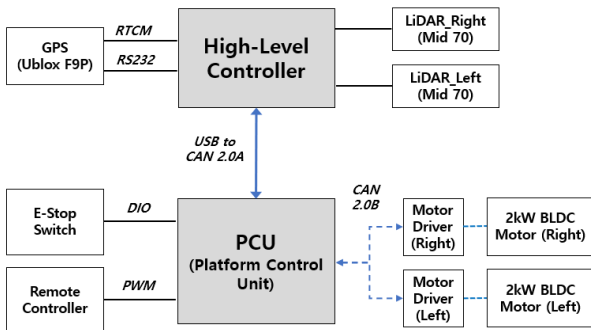
로봇의 자율주행 시스템은 [Fig. 8]과 같이 크게 상위제어기와 하위제어기로 구분되며 Windows OS 기반의 상위제어기에서 GPS와 LiDAR 데이터를 처리하고 앞서 설명한 속도 계획이 반영된 융합 알고리즘을 수행한다. 임베디드 컨트롤러 기반의 하위제어기는 알고리즘의 결과값인 좌, 우 모터의 속도 값을 각 모터드라이버의 통신 인터페이스에 맞게 변환하여 상위제어기의 명령을 실시간으로 수행한다.

GPS는 VRS-RTK 방식을 사용하여 GPS 오차를  $\pm 10$  cm 정도로 줄여 보다 정확한 위치 데이터를 획득했다.

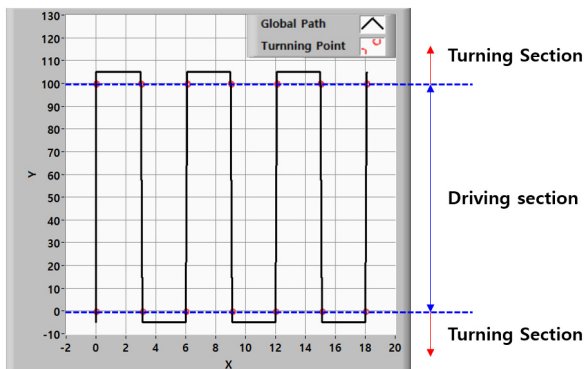
### 3.1.3 로봇의 자율주행 방식

로봇의 자율주행은 전역 경로 데이터를 바탕으로 2가지 방식을 번갈아가며 사용한다. [Fig. 9]과 같이 전역 경로는 선형 구간과 직선구간으로 구분되며 로봇의 직선 구간에 진입했을 때 로봇의 전방 좌, 우에 장착된 LiDAR를 통해 발의 두둑의 경계선을 검출한다. [Fig. 10]과 같이 각각의 LiDAR에서 검출된 두 경계선의 가운데를 중심으로 로봇의 조향각을 생성한다.

선형 구간 진입 시 조향각 생성 기준을 기존의 전역 경로 데이터를 기반으로 GPS를 이용한 경로점 주행을 변환하여 자율주행을 수행한다.



[Fig. 8] Configure a robot autonomous system



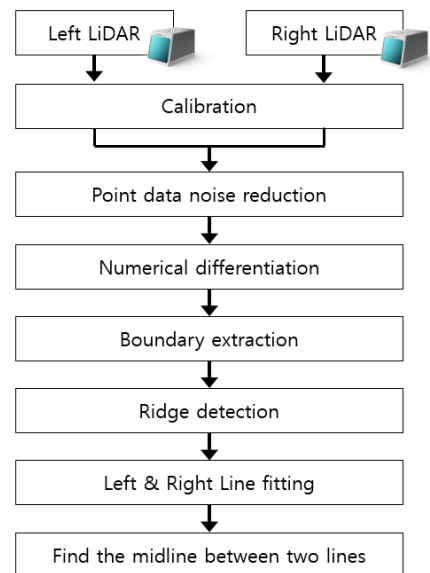
[Fig. 9] Global paths for robot driving

### 3.1.4 LiDAR를 이용한 두둑 인식 및 추종 알고리즘

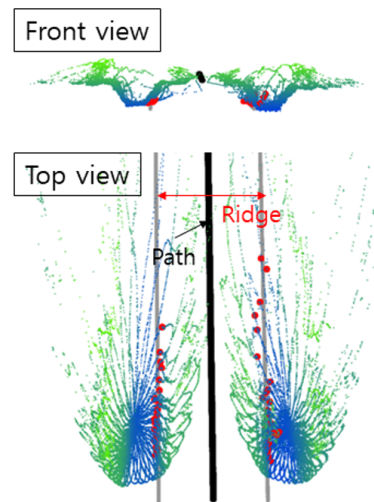
[Fig. 10]과 같이 전방의 LiDAR는 먼저 군집된 점 데이터의 노이즈를 제거한 후, 수치 미분을 사용하여 기울기의 변곡점을 찾아 두둑을 경계를 검출한다. 좌, 우 두 경계선의 중점을 잇는 직선을 이용하여 주행 경로를 생성한다. [Fig. 11]은 LiDAR를 이용한 두둑 인식 및 추종 알고리즘의 결과이다.

### 3.1.5 실험 환경

테스트 주행 환경은 [Fig. 12]와 같이 전북 김제시 광활면에 위치한 첨단농기계실증단지에서 진행했으며 [Fig. 13]과 같이 전역 경로는 직선 주행 거리는 80 m, 구간 간격 1.4 m, 선회를 위한 공간 거리 2.5 m, 의 직각 형태의 경로를 생성했으며 이때 전역 경로의 경로점간의 간격은 0.2 m로 설정했다.



[Fig. 10] Ridge detection and following algorithm using LiDAR

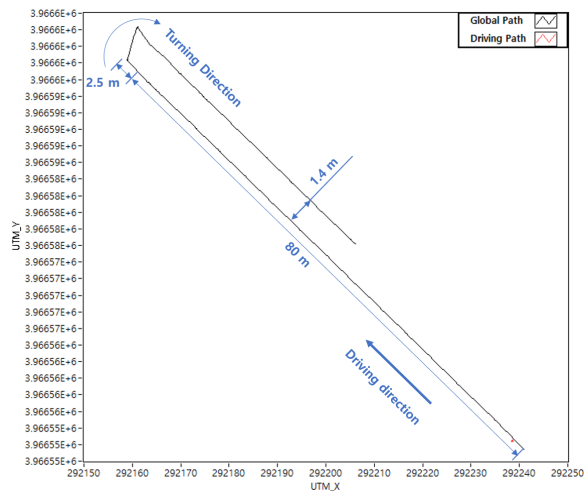


[Fig. 11] Create a driving section path using LiDAR





[Fig. 12] A robot driving around a test site



[Fig. 13] Setting a global path

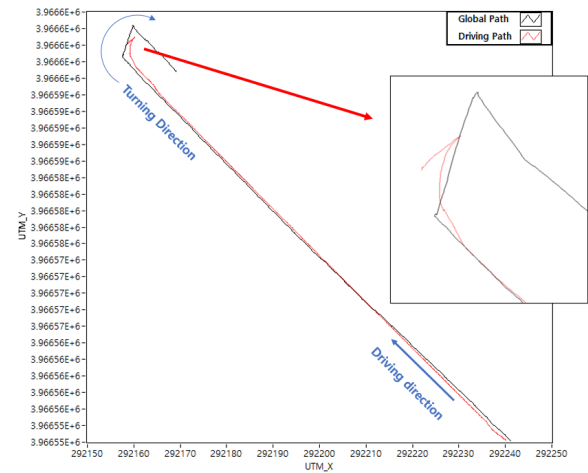
### 3.1.6 실험 방법

주행 로봇은 선회 시 제자리 회전을 하지 않고 연속주행 형태로 주행한다. 주행 속도는 2.3 km/h 로 설정하여 속도 계획 알고리즘의 출력된 속도값의 최대값 2.3 km/h, 최저값은 1 kph 미만으로 설정했다. 종방향 LAD는 1.5 m로 설정하였으며 두 돌 중심간 거리 1.5 m 에 대해 선회를 실시했다.

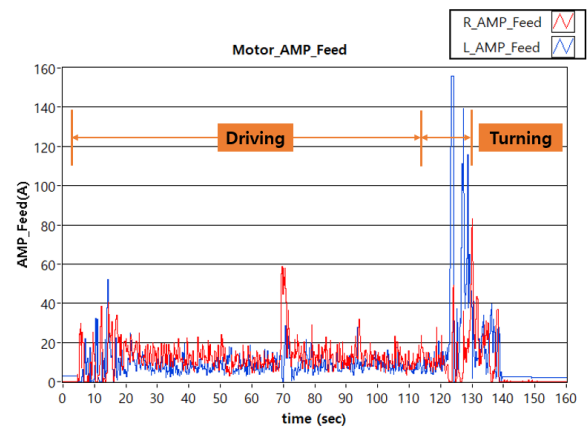
## 3.2 주행 실험 결과

### 3.2.1 알고리즘 적용 전 주행 결과

[Fig. 14]와 같이 직각 경로를 추종할 때 설정 주행 속도인 2.3 km/h를 그대로 추종했으며 이 때 선회 반경이 커지고 현재 두 돌 중심에서 다음 두 돌의 중심으로 선회하지 못하고 발산 현상을 보이다가 플랫폼이 정지했다.



[Fig. 14] Driving results before applying algorithms (Black : Global path, Red :Tracking path)

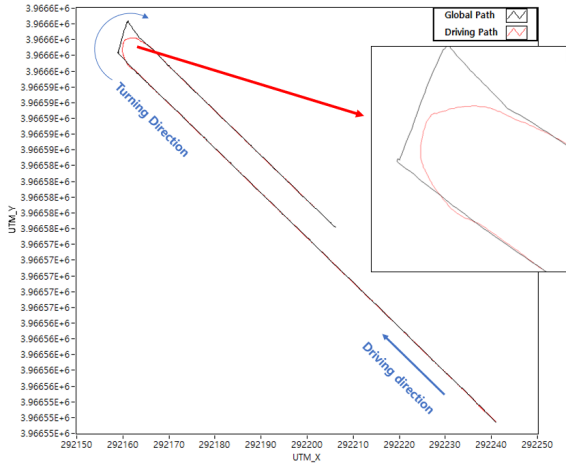


[Fig. 15] Current graph of the robot before applying the algorithm (Red :Right motor Amp, Bule :Left motor Amp)

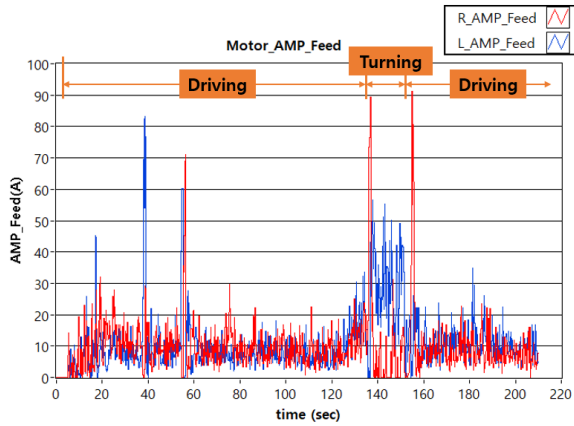
[Table 1]의 로봇의 사양과 같이 모터드라이버는 MDRobot의 MD2K라는 제품이며 2 kW 급으로 좌, 우 모터 각각 적용했다. 최대 허용전류는 100 A 이다. [Fig. 15]와 같이 직선 주행에서는 출력 전류값이 100 A 이하이며 선회 중 좌측 모터의 전류값이 156 A에 도달하여 과부하로 인해 정지한 것으로 나타났다. 차동 로봇의 선회 시 명령 속도를 2.3 kph를 수행하는 과정에서 우측 선회 시 로봇의 우측 궤도는 회전축이 되어 우측 모터는 감속한다. 좌측 모터는 로봇의 선회를 위해 속도를 올리게 되고 이 때, 좌측 모터의 전류값이 급격히 증가된 것이다.

### 3.2.2 알고리즘 적용 후 주행 결과

[Fig. 16]과 같이 직각 경로 추종할 때 선회 구간 진입 시 감속을 시작했으며 속도 범위는 1 ~ 2.3 km/h 가변했다. 선회 시 Pule-pursuit 조향알고리즘의 단점인 Cutting Couner 현상이 발생해 전역 경로보다 안으로 더 파고들었지만 안정적인 선회가 가능했다.



[Fig. 16] Driving results after applying the algorithm (Black : Global path, Red :Tracking path)



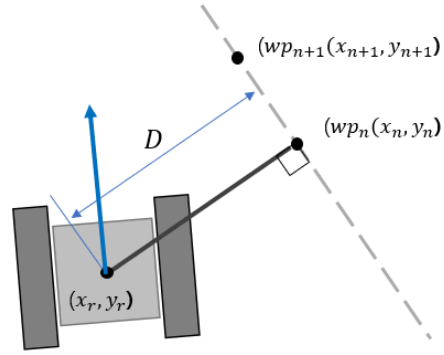
[Fig. 17] Current graph of the robot after applying the algorithm (Red :Right motor Amp, Bule :Left motor Amp)

[Fig. 17]과 같이 알고리즘 적용 후 좌, 우 모터의 전류값은 직선 및 선회 주행 모두 100 A 이하로 출력되었으며 선회 시 전류 최댓값은 우측 모터에서 91 A이 출력되었다.

### 3.2.3 경로 추종 오차 측정

[Fig. 18]과 같이 경로 주행 오차 측정은 플랫폼의 현재 위치를 기준으로 주행 중인 경로까지 수직으로 그인 선의 길이  $D$ 를 로봇의 경로 추종 오차로 정의한다. 주행 경로는 경로점으로 이뤄져 있으므로 선으로 변환해야 한다. 현재 로봇과 가장 가까운 경로점을  $n$ 이라 했을 때  $n$ 과  $n+1$  두 점을 이용하여 직선의 방정식을 구한 후, 식 (18)을 통해 점과 직선 사이의 거리를 구하여 경로 추종 오차를 측정한다.

$$R = \frac{|(y_{n+1} - y_n)x_r + (x_{n+1} - y_n)y_r + y_n x_{n+1} - x_n y_{n+1}|}{\sqrt{(y_{n+1} - y_n)^2 + (x_n - x_{n+1})^2}} \quad (18)$$

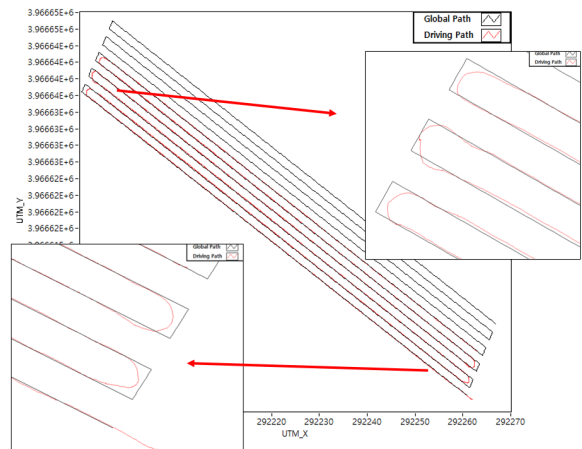


[Fig. 18] Measuring path following error

로봇의 경로 추종 오차는 직선 주행 구간에서는 RMS오차 0.132 m, 선회 주행 구간에서는 RMS오차 0.312 m 이다.

### 3.2.4 알고리즘 적용 후 반복 실험 결과

[Fig. 19]와 같이 직사각형태의 반복하는 경로를 생성하여 알고리즘의 강건성을 테스트했다. 선회는 총 5회를 반복 했으며 모두 안정적인 선회가 가능했으며 [Table 2]에서 주행 결과로 선회 시 경로 오차와 최대 전류값을 나타냈다.



[Fig. 19] Repeated experiment results after applying the algorithm (Black : Global path, Red :Tracking path)

[Table 2] Differential drive robot specification

no.	Path following error when turning	Maximum current value when turning
1	0.253 m	91 A
2	0.294 m	98 A
3	0.258 m	89 A
4	0.262 m	95 A
5	0.283 m	92 A
AVG.	0.27 m	93 A

## 4. 결 론

기존의 Pure pursuit 알고리즘에서 속도계획을 추가한 것만으로도 선회가 불가능한 상황을 가능하도록 구현할 수 있었다. 물론 비정형 환경이므로 이번 연구의 알고리즘이 모든 상황에서 대응이 가능하다고는 할 수 없지만 하나의 실마리가 될 수 있음을 확인했다.

향후 종방향 LAD에 계수에 대한 것을 모델화하여 적용할 수 있도록 보완해야 하며 다양한 환경 및 조건에서 주행 테스트를 진행하여 주행데이터를 확보하고 추후 토양에 따른 횡방향 미끄럼 마찰계수 등 다양한 주행 환경정보를 반영하여 차륜 주행 로봇의 더욱 정밀한 경로 추종 알고리즘을 구현할 예정이다.

## References

- [1] R. C. Coulter, "Implementation of the pure pursuit path tracking algorithm," *Carnegie Mellon Univ.*, Pittsburgh, PA, USA, Rep. CMU-RI-TR-92-01, Jan., 1992, [Online], <https://www.ri.cmu.edu/publications/implementation-of-the-pure-pursuit-path-tracking-algorithm>.
- [2] T. W. Kim and H. J. Kim, "Path Tacking Control for a Skid-steer Vehicle using Learning-based Model Predictive Control," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, Seoul, Korea, pp. 181-182, 2016, [Online], <http://www.dbpia.co.kr/Article/NODE06649521>.
- [3] C. Woo, M. Lee, and T. Yoon, "Robust Trajectory Tracking Control of a Mecanum Wheeled Mobile Robot Using Impedance Control and Integral Sliding Mode Control," *Journal of Korea Robotics Society*, vol. 13, no. 4, pp. 256-264, Dec., 2018, DOI: 10.7746/jkros.2018.13.4.256.
- [4] I. Hwang, S. Ko, M. Kim, Y. Shin, and D. Lee, "Development of a New Kinematic Model of Mobile Robot for Improving Trajectory-tracking Performances in Rough Terrains," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Jeongseon, Korea, pp. 2722-2725, 2016, [Online], <http://www.dbpia.co.kr/Article/NODE07105202>.
- [5] W. B. Baek and W. H. Kim, "A Study on Robust Trajectory Tracking Control of a Skid Steering Robots," *Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers*, vol. 19, no. 1, pp. 121-127, Feb., 2010, [Online], <http://www.dbpia.co.kr/Article/NODE01370083>.
- [6] J. M. Snider, "Automatic steering methods for autonomous automobile path tracking," *Carnegie Mellon Univ.*, Pittsburgh, PA, USA, Rep. CMU-RI-TR-09-08, Feb., 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).
- [7] B. Kim, S. Cho, and H. 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, Sept., 2020, DOI: 10.7746/jkros.2020.15.3.221.
- [8] 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.
- [9] Y. S. Kim and W. B. Cho, "A Study on the Relationship Between Road Design, Operation and Posted Speeds," *Journal of Korean Society of Transportation*, vol. 23, no. 7, pp. 35-42, Dec., 2005, [Online], <https://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE07500556>.
- [10] J.-H. Kim, H. W. Kim, and J. 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, Nov., 2020, [Online], <https://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE10519447>.
- [11] K. Lee, B. Kim, H. Choi, and H. Moon, "Development of Path Tracking Algorithm and Variable Look Ahead Distance Algorithm to Improve the Path-Following Performance of Autonomous Tracked Platform for Agriculture," *Journal of Korea Robotics Society*, vol. 17, no. 2, pp. 142-151, Jun., 2020, DOI : 10.7746/jkros.2022.17.2.142.





### 김 봉 상

2012 한국기술교육대학교 메카트로닉스 공학과(학사)  
2017 (주)엔맨드솔루션 주임연구원  
2019 홍익대학교 기계공학과(석사)  
2019~현재 홍익대학교 자율주행 · 지능로봇 전공(박사과정)

관심분야: Agricultural robot, Unmanned ground vehicle, Platform architecture



### 이 성 희

2014 동국대학교 전자공학과(학사)  
2016 동국대학교 통신 및 전자파 전공(석사)  
2019~2022 예비오시스 테크놀러지스 선임 연구원  
2022~현재 한화시스템 선임연구원

관심분야: MUM-T, Wireless Communications



### 이 규 호

2020 홍익대학교 기계 · 시스템디자인공학과 (학사)  
2022 홍익대학교 자율주행 · 지능로봇 전공 (석사)  
2022~현재 홍익대학교 자율주행 · 지능로봇 전공(박사과정)

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



### 문 희 창

2001 선문대학교 기계설계학과/제어계측학과 (학사)  
2003 국민대학교 자동차공학전문대학원 전자 제어시스템(석사)  
2009 국민대학교 자동차공학전문대학원 전자 제어시스템(박사)

2011 University of Florida, Researcher

2011~현재 (주)엔맨드솔루션 대표이사

2017~현재 홍익대학교 기계시스템디자인공학과 부교수

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



### 백 승 범

2021 홍익대학교 기계 · 시스템디자인공학과 (학사)  
2023 홍익대학교 자율주행 · 지능로봇 전공 (석사)  
2023~현재 홍익대학교 기계공학 전공 (박사과정)

관심분야: SLAM, Autonomous Mobility