

# 물류 이송을 위한 딥러닝 기반 특정 사람 추종 모빌리티 제어 연구

## Study of Deep Learning Based Specific Person Following Mobility Control for Logistics Transportation

유영준<sup>1</sup> · 강성훈<sup>2</sup> · 김주환<sup>2</sup> · 노성인<sup>2</sup> · 이기현<sup>2</sup> · 이승용<sup>2</sup> · 이철희<sup>1,2\*</sup>

Yeong Jun Yu, SeongHoon Kang, JuHwan Kim, SeongIn No, GiHyeon Lee, Seung Yong Lee and Chul-hee Lee

Received: 28 Jul. 2023, Revised: 3 Sep. 2023, Accepted: 4 Oct. 2023

**Key Words** : PID Control(PID 제어), SLAM(동시적 위치추정 및 지도작성), Deep learning(딥러닝), Following Mobility(추종 모빌리티)

**Abstract:** In recent years, robots have been utilized in various industries to reduce workload and enhance work efficiency. The following mobility offers users convenience by autonomously tracking specific locations and targets without the need for additional equipment such as forklifts or carts. In this paper, deep learning techniques were employed to recognize individuals and assign each of them a unique identifier to enable the recognition of a specific person even among multiple individuals. To achieve this, the distance and angle between the robot and the targeted individual are transmitted to respective controllers. Furthermore, this study explored the control methodology for mobility that tracks a specific person, utilizing Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) and Proportional-Integral-Derivative (PID) control techniques. In the PID control method, a genetic algorithm is employed to extract the optimal gain value, subsequently evaluating PID performance through simulation. The SLAM method involves generating a map by synchronizing data from a 2D LiDAR and a depth camera using Real-Time Appearance-Based Mapping (RTAB-MAP). Experiments are conducted to compare and analyze the performance of the two control methods, visualizing the paths of both the human and the following mobility.

### 1. 서 론

$A$  : first target

$B$  : second target

$b_{collide}$  : target congruency

$d_{target}$  : target distance,  $mm$

$L$  : Distance between wheels,  $mm$

$R$  : Wheel Radius,  $mm$

$\theta_{target}$  : target degree,  $^{\circ}$

$V_{Lim}$  : robot linear velocity,  $mm/s$

$V_{Ang}$  : robot angular velocity,  $rad/s$

$W$  : target width

$w_L$  : angular velocity of left motor,  $rad/s$

$w_R$  : angular velocity of right motor,  $rad/s$

$x_{min}$  : horizontal minimum of the boundary box

$x_{max}$  : horizontal maximum of the boundary box

$x_{center}$  : center of boundary box

$Z$  : target position

\* Corresponding author: chulhee@inha.ac.kr

1 Department of Construction Machinery Engineering, Inha University, Incheon 22212, Korea

2 Department of Mechanical Engineering, Inha University, Incheon 22212, Korea

Copyright © 2023, KSFC

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

### 1. 서 론

최근 로봇은 산업현장에서 많은 분야에서 활용되

고 있으며 기존 기계에 자율화를 도입하여 작업자의 업무를 도와 업무효율 향상을 위한 연구 또한 많이 진행되고 있다.<sup>1-5)</sup> 특히, 추종 모빌리티는 별도의 기계차 또는 수레 없이도 지정된 위치와 대상을 따라다니며 사람이 별도로 힘을 가하지 않기에 짐 적재 및 이송 작업 시 작업자에게 편리함을 제공한다. 추종 모빌리티는 다양한 추종 방법을 활용하여 동작할 수 있으며 크게 산업현장 바닥에 설치된 라인을 추종하거나 특정한 사람만을 따라가는 제어 방식으로 나뉜다.<sup>6,7)</sup> 본 논문에서는 산업현장에서 특정한 사람만을 추종하도록 제작된 추종 로봇에 관한 연구이며, 두 가지 추종 방법을 고안하였다. 첫 번째로는 카메라를 통해 모빌리티가 추종 대상을 인식하고 라이다를 통해 SLAM (Simultaneous Localization and Mapping)을 진행하여 추종하는 방법에 관한 연구를 수행하였으며, 최근 SLAM을 통한 사람추종로봇의 연구는 거의 없다. 두 번째 방법으로는 모빌리티의 위치와 추종 목표 사람의 위치를 기반으로 PID (Proportional Integral Derivative) 제어를 설계하여 추종할 수 있도록 연구하였다. PID 제어를 통한 사람 및 라인추종 PID 제어기는 모빌리티의 위치와 추종 목표 사람의 위치 오차를 감지하고 이를 피드백하여 모빌리티의 움직임을 조정하며, 관련 연구들이 많이 존재하기에 PID 제어방식을 선택하였다.<sup>8-10)</sup> 이를 통해 모빌리티는 추종 대상과 일정한 거리를 유지하며 원활한 추종 동작을 수행할 수 있게 된다. 로봇의 산업현장에서의 활용과 업무효율 향상은 매우 중요한 이슈이다.<sup>11-13)</sup> 로봇 기술의 발전으로 인해 산업현장에서 로봇의 활용이 더욱 증가하고 있으며, 이는 생산성 향상과 비용 절감을 가능하게 한다. 사람 추종 모빌리티의 두가지 제어 방식 연구를 통해 추종 효율성 및 신뢰도를 검증하였다.

## 2. 모빌리티 설계

Fig. 1에서는 본 연구에 사용된 물류 이송을 위한 딥러닝 기반 특정 사람 추종 모빌리티와 사람추종을 위해 사용된 장비인 카메라, LiDAR(Light Detection And Ranging), 관성측정장비 (Inertial Measurement Unit)를 나타낸다. 모빌리티는 전륜 구동 방식으로 설계되어 2개의 모터로 구동된다. 또한, 모빌리티 후방 부분에는 2개의 캐스터 휠로 지지되어 모터의 구동 시 모빌리티가 이동할 수 있도록 설계 하였다.



Fig. 1 Mobility to follow a specific person

## 3. 특정 사람 인식

본 연구의 주요 목표는 특정 사람만을 따라가며, 사람과 모빌리티 사이에 다른 사람이 끼어들어도 목표를 잃지 않는 추종 모빌리티를 개발하기 위함이다. 사람 인식을 위하여 카메라의 RGB 데이터에서 사람의 크기와 위치를 추출하였다. 추출을 위해서는 YOLO (You Only Look Once) 모델을 사용하였으며 하드웨어에서 30프레임을 안정적으로 유지할 수 있는 YOLO v5-m 모델을 사용하였다. 객체 탐지에서 높은 효율성으로 잘 알려진 YOLO v5는 주어진 환경 내에서 인간을 탐지하는 강력한 솔루션을 제공한다. 이를 통해 640x480 해상도의 RGB 데이터를 통해 경계 상자(Boundary box)를 추출하였으며, 학습된 모델에서 사람만을 Deep SORT (Simple Online and Realtime Tracking)로 전달하여 사람 인식이 가능하도록 제작하였다. Deep SORT에서는 경계 상자과 이미지의 입력을 이용하여 프레임마다 이전 프레임과 같은 객체인지 판단한다. 물체의 겹침(폐색)이 일어날 경우 매칭이 실패하고 새로운 번호가 매겨지는 문제가 있었으나, 그 단점을 Matching Cascade 과정을 통해 해결하였다.<sup>14)</sup> Matching Cascade는 CNN (Convolution Neural Network)를 이용하여 외형 공간 (Appearance space)에서의 위치를 추출한다. 이러한 위치를 이용하여 과거 프레임에서의 추적 데이터와의 내적이 1에 가까운 트랙과 상자를 매칭시킨다. 이러한 과정을 통해 사람마다 번호를 부여하였고 번호는 프레임 간에 연속성을 가지게 된다. 일정 시간의 여유를 주어 특정 사람이 화면상에 나타나지 않더라도 번호를 잃지 않도록 하였다. Fig. 2 는 YOLO를 통한 사람 인식 결과를 보여주며 인식된 사람에게 Person의 라벨과 경계 상자가 부여된 결과를 나타낸다.



Fig. 2 Results of people detection

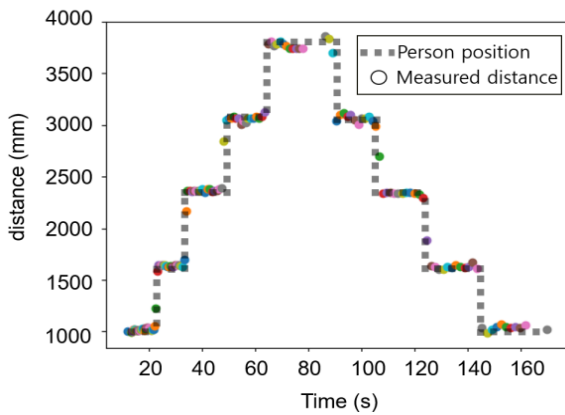


Fig. 3 Results of measured a person distance

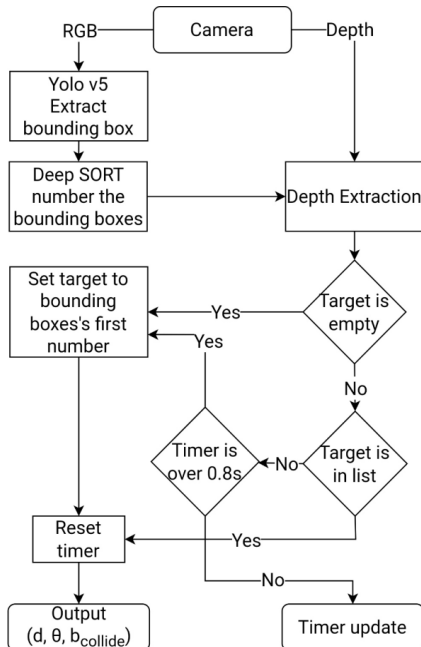


Fig. 4 Flow chart of detect specific person

Fig. 3은 깊이 카메라가 추종을 위한 사람의 위치를 정확히 추출하는지 확인하기 위해 사람이 700mm

씩 일정한 시간 간격으로 여유를 두고 앞, 뒤로 각각 4번씩 전, 후진하는 모습을 깊이 카메라를 통해 측정된 거리를 나타내는 그래프이다. 특정 사람의 위치를 추출하기 위해 사용한 깊이 카메라의 모델은 Realsense d435(d435, Intel co., USA)를 사용하였다. 본 카메라는 깊이 카메라로써 영상 처리 및 거리 추출이 가능하다. 사용한 깊이 카메라의 가로 시야각은 87°이므로 카메라의 중심을 기준으로 경계 상자의 중심이 떨어진 위치를 통해 타겟의 각도를 식 (1)을 사용하여 역산하였다.

$$\theta = \left( \frac{x_{\min} + x_{\max}}{2} \cdot \frac{1}{W} - 0.5 \right) \cdot 87^\circ \quad (1)$$

$$= \left( \frac{x_{center}}{640} - 0.5 \right) \cdot 87^\circ$$

특정 사람의 거리는 이미지를 행렬로 변환하여 인식된 경계 구역만을 추출하여 경계 구역끼리 특정 값보다 겹치는 비율이 낮으면 개별 계산하였으며 클 경우에는 한 객체만 계산하였다. 개별 계산에서는 식 (2)와 같이 서로소 집합 (Disjoint Set)으로 값을 계산하였다. 겹치는 부분의 경우 특정 인물이 아닌 다른 물체 및 사람의 깊이가 나올 수 있으며, 사람의 비율이 특정 변수 값 이상일 것으로 예상하였다. 이 계산 과정으로 인해 두 객체가 특정 변수 이상 겹칠 때 특정 인물의 서로소 집합 값이 너무 작아 배경 비율이 더 커질 확률이 높으므로 한 객체로 취급하기 위해  $b_{collide}$  값을 True로 설정하였다. 계산된 값들은 타겟 포지션은 식 (3)의  $Z$ 와 같이 각도, 거리, 논리값으로 구성된 변수가 전달된다. 각 제어기에 전달된다. Fig. 4는 깊이 카메라를 통한 특정사람 인식의 위치 정보 및 분류를 위한 알고리즘의 순서도를 나타내며 특정 사람 인식 방법에 대해 설명한다.

$$d_{target} = percentile \left( A - \sum_{i=0} A \cap B_i, p\% \right) \quad (2)$$

$$Z = (\theta_{target}, d_{target}, b_{collide}) \quad (3)$$

## 4. PID 제어기 설계

### 4.1 유전알고리즘(Genetic Algorithm)

유전알고리즘은 최적화를 위해 주로 사용된다. 특히 최적화를 위한 관련 식의 여러 개의 변수가 있을

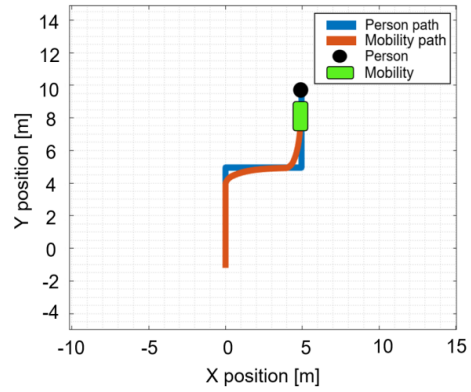
때 유용하다.<sup>15)</sup> 유전알고리즘에서 처음 세대를 생성하여 인자별 적합도를 계산한다. 이때 적합도는 선속도 및 각속도의 에러 값을 최소화하는 것이다. 최적의 값을 찾기 위해 반복을 통하여 선택, 교차, 변이를 거쳐 새로운 세대를 생성하고 종료 조건을 만족할 시 유전알고리즘은 종료된다. 본 연구에서는 정의한 에러와 속도의 변화량을 고려하여 에러와 진동을 최소화하는 방향으로 목적함수를 설계하였다. 모빌리티의 선속도, 각속도에 대해 제한 속도를 두어 안전하게 설계하였으며, 선속도, 각속도 각각의 제어기를 설계하여 유전알고리즘을 통하여 매개변수(Gain) 값의 최적점을 도출하였다.

#### 4.2 PID 제어

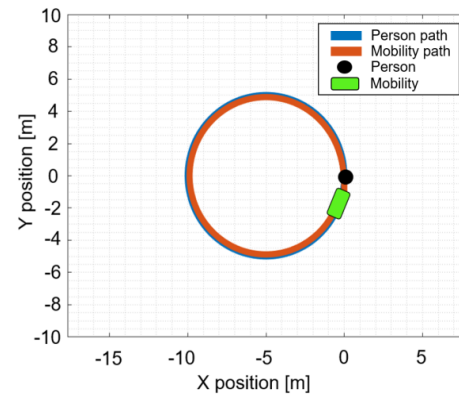
유전알고리즘을 통한 추출한 PID 제어기를 펄스 형식으로 설계하였다. 사람과 모빌리티 간의 지정된 거리값을 기준값으로 잡고 특정된 사람의 거리와 각도 값을 식(3)과 같은 형식으로 수신하여 피드백한다. PID 제어기를 통해서 추출된 값은 모빌리티 모터의 입력신호로 들어가 사람과 모빌리티 간의 거리를 기준값으로 점차 수렴시켜 나아간다. 본 연구에서 사용된 PID 제어기는 MATLAB을 이용하여 제작하였다. 본 연구에 사용된 BLDC 모터는 BLDC (Brushless direct current) 모터(MD400T, MDROBOT, Korea)를 사용하였으며, 모터 내 엔코더의 분해능은 16384 ppr이다. 제어기의 입력신호에 따라 모터의 엔코더의 펄스 수를 통하여 작동되는 모터의 속도를 계산하였으며, 식 (4), (5)를 사용하여 모빌리티의 선속도 및 각속도를 계산하였다. 이때 바퀴의 슬립은 없다고 가정하였다. Fig. 5는 유전알고리즘을 통해 최적의 매개변수를 대입한 PID 기반 사람 추종 시뮬레이션 결과이며, Fig. 5 (a)는 90°로 이동하는 직각 형태의 경로이며, Fig. 5 (b)는 360°크게 회전하는 원형 경로이다. Fig. 5 (c)는 3번의 직각형태의 코스를 지나 최종적으로 직사각형 모양이 완성되는 경로이며, Fig. 5 (d)는 여러개의 직각 경로와 같이 구성하였다. 이러한 경로를 추종 할 시 PID 매개변수 값이 에러를 최소화 하는 변수값임을 보여준다.

$$V_{Lin} = \frac{R(\omega_R + \omega_L)}{2} \quad (4)$$

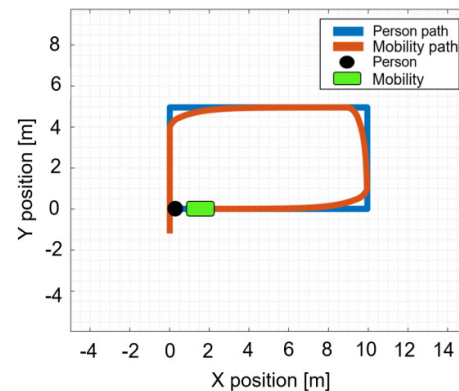
$$V_{Ang} = \frac{R(\omega_R - \omega_L)}{L} \quad (5)$$



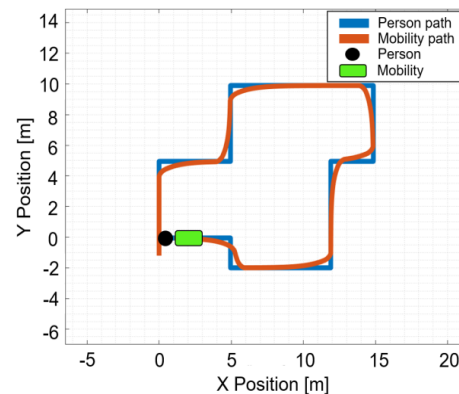
(a) Right angle turning path



(b) Circular path



(c) Rectangular Path



(d) Multiple right angle turning Path

Fig. 5 Simulation results of PID control to follow a specific person



## 5. SLAM(동시적 위치추정 및 지도작성)

### 5.1 타겟 추종 방법

실외에서의 지도작성 과정 중, 사람을 탐지하고 그 탐지한 대상을 추종하면서 주변 환경 지도를 작성하는 방법을 제안한다. 본 연구에서는 YOLO v5 시스템의 인간 탐지 능력을 활용하여, 탐지된 개체 주변에 생성된 경계 상자를 사용하고 모빌리티 좌표계 기준에서 사람의 상대적 위치를 계산한다. 이 방법을 논문에서는 데이터 전송을 위해 로봇 소프트웨어 작성을 위한 프레임워크인 로봇 운영 시스템(ROS) 환경 내에서 구현하며, 로봇 운영 시스템 내의 메시지 통신 기능을 활용한다. 상기 기술에 기반한 인간 추적 알고리즘의 구현은 모빌리티가 맵을 생성하는 동시에 인간의 위치를 추적하는 효율적인 메커니즘을 제공한다.

### 5.2 지도 작성

Gmapping과 같은 기존의 점유 격자 맵핑(OGM) 알고리즘들은 대체로 2D 라이다 스캔 데이터에 크게 의존한다. 이러한 방법들은 상대적으로 단순하고 제한된 실내 환경에서는 충분히 효과적이거나, 센서의 한계로 인해 규모가 크고 복잡한 실외 환경에서는 실질적인 사용에 한계가 있다. 본 연구에서는 고가형 센서의 사용을 줄이면서 위에서 언급한 문제들에 대해서 해결하기 위해 RTAB-map (RealTime Appearance-Based Mapping) 기반의 시각적 루프 클로저 (Visual Loop Closure)와 모빌리티의 엔코더 오도메트리 (Odometry) 정보를 결합한 라이다 맵핑을 진행했다. 이는 실외 환경에서의 충분히 신뢰할 수 있고 효율적인 지도작성을 가능하게 한다. 본 연구에서 사용된 방법은 베이스 오도메트리를 로봇 엔코더 오도메트리로 결정하고 2D LiDAR mapping을 RTAB-map 기반 시각적 루프 클로저를 이용하여 보정한다.<sup>16)</sup> 이때, RGB-D 이미지와 라이다 스캔 데이터의 동기화를 통해 루프 클로징과 라이다 격자 맵핑의 과정을 동기화하여, 지도작성 중 모빌리티 경로 및 자세 최적화 과정에서 발생하는 오차들을 최소화한다. 이러한 기술들을 통합함으로써, 실외 환경에서도 효과적으로 2D 맵을 생성할 수 있는 시스템을 구축한다. Fig. 6은 카메라를 통해 생성된 3D 맵과 라이다를 사용하여 2D 맵 생성 결과를 작성한 결과와 모빌리티의 위치를 보여준다.

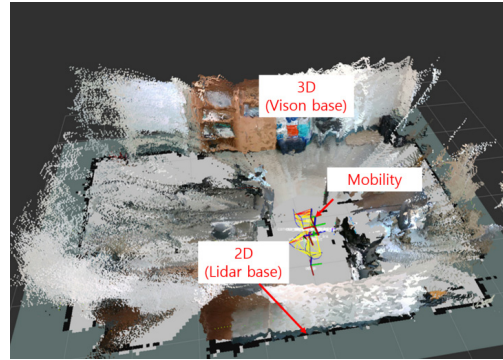


Fig. 6 Result of generated 3D point map and 2D grid map

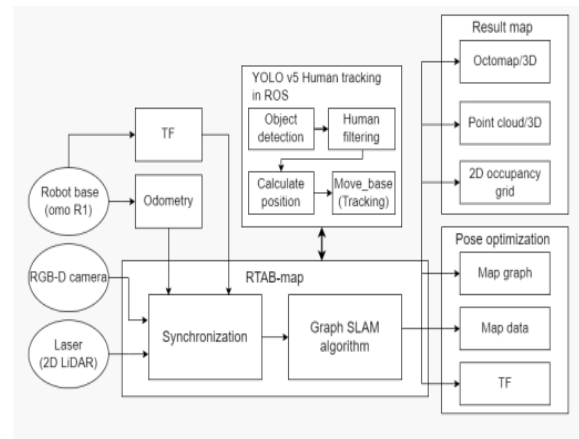


Fig. 7 Method of SLAM and person following

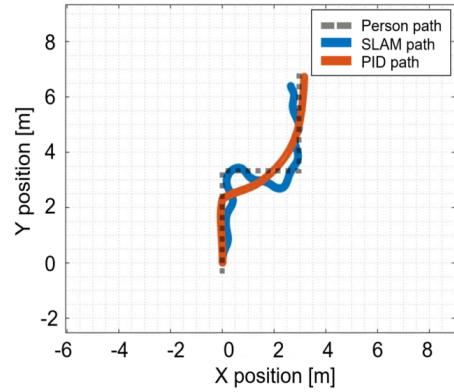
### 5.3 경로 설정

로봇 운영 시스템 기반 Robot navigation tool인 Move\_base는 Global planner와 Local planner라는 두 가지 주요 구성요소를 활용한다. Global planner는 시작 지점에서 목표 지점까지의 전체 경로를 계획하는 역할을 담당하며, 이 경로 계획은 일반적으로 장애물의 세부적인 회피는 고려하지 않는다. 반면 Local planner는 실시간 센서 데이터를 활용하여 모빌리티의 바로 앞부분에 대한 경로를 계획하고 장애물을 회피하며, 이를 통해 모빌리티가 실시간으로 동적 환경에서 안전하게 이동할 수 있도록 한다.<sup>17)</sup> DWA (Dynamic Window Approach)는 이러한 Local path planner의 한 예로, Move\_base에 의해 구현될 수 있다. 이 방법을 통해 모빌리티는 복잡하고 동적인 환경에서 안전하고 효율적으로 이동할 수 있다. Fig. 7은 본 연구에서 사용된 카메라와 라이다를 통하여 지도작성 및 사람 추종 방법을 나타내는 순서도이다.

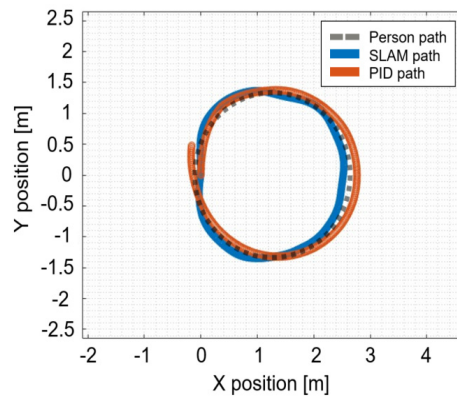
## 6. 사람추종 실험 및 결과

야외 및 실내 환경에서 특정 사람 추종 모빌리티의 실험을 진행하였다. 특정된 사람을 추종하는 실험을 위해 4가지의 코스를 설정하여, 정해진 경로를 따라 사람이 움직이면, 모빌리티가 사람을 따라가며 주행 경로를 작성하였다. 본 실험의 목적은 시뮬레이션 결과와 오류가 없이 PID 매개변수 값에 오차가 크게 발생하지 않고 추종을 성공하는지에 대한 검증과 SLAM 방식으로 제어하는 특정 사람 추종 알고리즘 또한 정확히 특정 사람을 추종하는지를 4가지의 경로를 주행하는 실험을 통한 검증이 목적이다. Fig. 8의 경로는 Fig. 5와 동일하게 코스를 설정하여, Fig. 8 (a)는 직각 경로, Fig. 8 (b)는 원형 경로, Fig. 8(c)는 사각형 경로, Fig. 8 (d) 여러개의 직각 형태 경로이며, 사람 추종 결과를 나타내는 모빌리티의 경로 정보이다. Fig. 8에서 검은색 점선으로 표시한 것은 사람의 이동 경로이며, 실선으로 나타낸 두 가지는 SLAM 방식과 PID 방식의 제어 결과 경로를 나타낸다. 제어 결과, PID 제어 기법과 라이다를 이용한 SLAM 기법에 추종의 성능 차가 존재하지만 두 방법 모두 성공적으로 추종을 하였음을 보여준다. 또한, 추종 시 사람이 중간에 들어와 시야를 잠깐 가리거나, 사람 두 명이 나란히 걸어갈 때 문제없이 특정인 사람만을 따라가는지 검증하였다. Fig. 9 (a)는 사람이 여러 명으로 인식되었을 때를 나타내며 Fig. 9 (b)는 특정 사람만을 추종하는지를 나타낸다. Fig. 9 (c), (d)는 특정된 인물만을 추종하며 회전 시에도 목표를 놓치지 않는 문제가 없음을 검증하는 것을 보여준다.

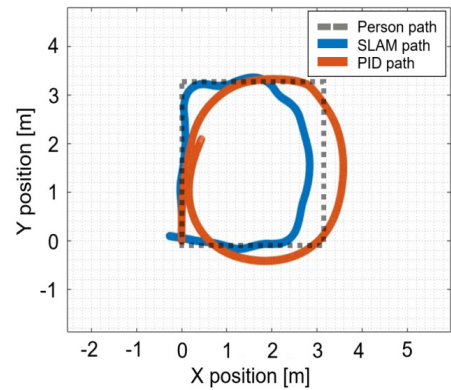
최종적으로 평균 제곱근 오차(RSME, Root Mean Squared Error)를 사용하여 사람의 이동경로와 모빌리티의 두가지 제어방식을 통한 이동경로를 Table 1과 같이 비교하였다. 원형의 경우 오차가 적게 진행되는 것이 추종적으로 좋으나, 직각형태의 경우 사람이 직각으로 보행했을시 모빌리티는 직각의 형태가 아닌 조금 더 완만하게 각을 이루며 회전하는 것이 모빌리티 운행 시 도움이 되기 때문에 모빌리티의 주행 성능을 향상시킨다. 또한, 두가지 제어방식에 대해 차이가 발생하는 이유는 두 제어방식에 따라 모빌리티의 속도가 차이 있기 때문에 경로상의 변화점도 존재한다. 그렇기에 최종적으로 평균 제곱근 오차의 값으로 확인하는 것이 아닌 주행경로를 보고 판단해야 하는 한계점이 존재한다.



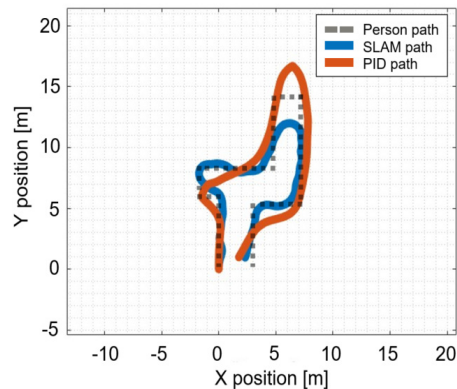
(a) Right angle turning path



(b) Circular path

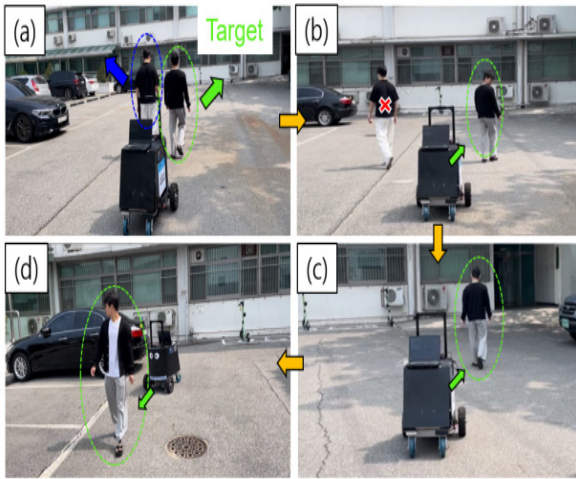


(c) Rectangular Path



(d) Multiple right angle turning Path

Fig. 8 Results of mobility and person paths to follow a specific person



(a) When there are two people  
 (b) Follow a specific person  
 (c) Follow while turning,  
 (d) Follow after turning

Fig. 9 Experiment with a mobility that follows a specific person

Table 1 Root mean squared errors of drive path

경로 (제어 방식)	RMSE
(a) 직각 경로 (PID)	0.66
(a) 직각 경로 (SLAM)	0.86
(b) 원형 경로 (PID)	1.92
(b) 원형 경로 (SLAM)	1.9
(c) 사각 경로 (PID)	1.31
(c) 사각 경로 (SLAM)	0.46
(d) 복합 경로 (PID)	2.53
(d) 복합 경로 (SLAM)	2.8

## 7. 결론 및 고찰

본 연구에서는 두 가지의 추종 기법을 사용하여 추종 알고리즘을 개발하였다. 딥러닝 기반 사람 인식을 통하여 사람마다 번호를 부여하여 특정 사람의 정보만을 송신한다. PID 제어 기법 및 SLAM 제어 기법들은 수신받은 특정 사람의 위치 정보를 활용하여 모터를 제어하고 추종하도록 하였다. 그 결과 사람 추종에 성공하였고 잠시 사람을 잃거나 여러 사람이 존재 하였을 때도 특정 사람만을 추종을 수행하였다. PID 제어의 같은 경우 사람 이동 속도에 맞추어 제어가 가능하여 직각 회전 등 추종 경로에서 부드러운 회전을 하지만, 라이다 기반에 경우 계산해야 될 식들 딜레이가 많아 속도가 빠르지 못하여 PID

제어 방법과 성능 차이가 존재한다. 또한, 평균 제곱근 오차를 사용하여 경로의 오차를 계산하였지만, 이 방법 또한 오차가 적다고 하여 좋은 성능이라고 판별할 수 없는 한계가 존재하며, 사람이 매우 빠른 속도로 뛰거나 모빌리티의 최고 속도보다 빠르게 된다면 시야각 밖으로 나가는 경우가 발생할 수 있다. 이러한 점을 보완하기 위해서는 다중 카메라를 사용해서 시야각을 늘리거나 카메라의 시야각이 향상된 제품을 사용하여 모빌리티의 시야 사각지대를 줄여줄 수 있다. 향후 지속적인 연구를 통해 사람 추종 모빌리티가 실용화된다면, 다양한 산업현장에서 사람들의 편의성 및 업무의 효율성을 향상 시킬 수 있다.

## 후 기

이 논문은 행정안전부 자연재난 정책연계형 기술 개발 사업의 지원을 받아 수행된 연구임 (2022-MOIS35-005)

## 이해관계(CONFLICT OF INTEREST)

저자는 이 논문과 관련하여 이해관계 충돌의 여지가 없음을 명시합니다.

## References

- 1) J. H. Won, et. al., "Study on Traveling Characteristics of Straight Automatic Steering Devices for Drivable Agricultural Machinery", Journal of Drive and Control, Vol.19, No.4 pp19-28, 2022
- 2) J. H. Choet. al., "Development of an Unmanned Test System Based on Forklift for Mast Operation Durability", Journal of Drive and Control, Vol.19, No.4 pp70-76, 2022
- 3) Y. K. Kang and J. S. Jang "A Study on the Automatic Impact Force Control Mechanism Design for the Hydraulic ", Journal of Drive and Control, Vol.19, No.3 pp1-8, 2022
- 4) S. W. Choi, et. al., "A Study on Simscape based 6DOF Field Robot Simulation Model ", Journal of Drive and Control, Vol.19, No.2 pp1-10, 2022
- 5) Eraliev, Oybek Maripjon Ugli, et al. "Sensing, perception, decision, planning and action of

- autonomous excavators." *Automation in Construction* 141 (2022): 104428.
- 6) Gupta, Meenakshi, et al. "A novel vision-based tracking algorithm for a human-following mobile robot." *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, Vol.47.7, pp1415-1427, 2016
  - 7) Martins, O. O., et al. "Prototype line following Automatic Guided Vehicle (AGV) for unit load dispatch in an office environment." *FUDMA Journal of Sciences* Vol.3.3, pp415-423, 2019
  - 8) GOMES, M. V., et al. "PID control applied on a line-follower AGV using a RGB camera." In: 2016 IEEE 19th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC). IEEE, pp. 194-198, 2016.
  - 9) Pati, Chandra Sekhar, and Rahul Kala. "Vision-based robot following using pid control." *Technologies* 5.2 : 34, 2017
  - 10) ALOUACHE, et al. "Genetic algorithms for trajectory tracking of mobile robot based on PID controller" *IEEE 14th International Conference on Intelligent Computer Communication and Processing (ICCP)*, pp. 237-241, 2018
  - 11) Villani, Valeria, et al. "Survey on human-robot collaboration in industrial settings: Safety, intuitive interfaces and applications." *Mechatronics* Vol.55, pp248-266, 2018
  - 12) Wu, Qiong, Yanjun Liu, and Chensheng Wu. "An overview of current situations of robot industry development." *ITM Web of Conferences*. Vol. 17. EDP Sciences, 2018.
  - 13) Vysocky, Ales, and Petr Novak. "Human-robot collaboration in industry." *MM Science Journal* 9.2 (2016): 903-906.
  - 14) WOJKE, Nicolai; BEWLEY, Alex; PAULUS, Dietrich. Simple online and realtime tracking with a deep association metric. In: 2017 IEEE international conference on image processing (ICIP). IEEE, pp3645-3649, 2017
  - 15) Mirjalili, Seyedali, and Seyedali Mirjalili. "Genetic algorithm." *Evolutionary Algorithms and Neural Networks: Theory and Applications* pp43-55, 2019.
  - 16) Labbé, Mathieu, and François Michaud. "RTAB-Map as an open-source lidar and visual simultaneous localization and mapping library for large-scale and long-term online operation." *Journal of field robotics* Vol.36.2, pp416-446, 2019
  - 17) S. Pütz, J. Santos Simón and J. Hertzberg, "Move Base Flex A Highly Flexible Navigation Framework for Mobile Robots," 2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Madrid, Spain, pp3416-3421, 2018