creative commons
COMMONS DEED

저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.

변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer

dCollection

공학석사 학위논문

온실용 로봇의 자율 주행을 위한 카메라 기반 레일 검출 및 로봇 자세 제어 기술 개발

2023년 8월

서울대학교 대학원

바이오시스템공학과

신 승 렬

온실용 로봇의 자율주행을 위한 카메라 기반 레일 검출 및 로봇 자세 제어 기술 개발

지도 교수 김 학 진

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함
2023년 8월

서울대학교 대학원
바이오시스템공학과
신 승 렬

신승렬의 공학석사 학위논문을 인준함
2023년 8월

위 원 장 박 영 준 (인)

부위원장 김 학 진 (인)

위 원 전 찬 우 (인)

초 록

온실 내 노동력 감소와 인적 손실을 줄이는 방안으로 농작업 자동화의 필요성이 대두된다. 온실의 가변적 조건 들은 자동화에 있어 제약사항으로 작용하고, 온실용 로봇이 무인으로 농작업을 수행하기 위해서는 온실 환경의 조건을 고려한 주행 방법이 필요하다. 본 논문에서는 기존에 연구되었던 온실용 로봇의 한계를 극복하고, 단순 명령을 통한 주행이 아닌 자율 주행 농작업을 위한 레일 검출 및 로봇 자세 제어 기술과 시스템을 개발하고자 하였다. 이를 검증하기 위해 온실 환경에서 로봇이 안정적이고 자율적인 농작업을 수행할 수 있도록 작업 경로 검출 알고리즘 성능, 다음 작업 경로 진입을 위한 로봇 자세 보정 알고리즘 성능을 분석하고 자율 농작업을 위한 주행 시나리오 평가를 통해 실제 현장 적용 가능성을 확인하였다. 그 결과 개발된 시스템은 온실 내의 조도 변화와 태양에 입사각의 영향을 크게 받지 않고 로봇의 야간 작업을 가능하도록 하며, 저비용 센서들을 이용해 개방된 지면 영역과 작물이 우거진 작업 경로를 공간적으로 구분하고 자율적으로 주행할 수 있음을 확인하였다. 본 연구에서 개발된 레일 검출, 로봇 자세 보정, 그리고 주행 알고리즘을 통해 다목적 농작업을 위한 온실용 로봇 플랫폼의 자율주행 요인 기술로서 활용될 것으로 기대된다.

주요어 : 온실용 로봇, 머신 비전, 자율주행 농기계, 메카넘 휠, 깊이 카메라
학 번 : 2021-22355

목 차

1. 서론 1

1.1 연구의 배경 1

1.2 연구의 목적 3

1.3 문헌 조사 4

2. 재료 및 방법 6

2.1 온실용 자율 주행 로봇 플랫폼 6

2.1.1 운영 환경 6

2.1.2 시스템 구성 7

2.1.3 운동학 14

2.2 작업경로 검출 및 자세 보정 알고리즘 17

2.2.1 Y-Correction 17

2.2.2 Yaw-Correction 21

2.2.3 X-Correction 24

2.3 주행 알고리즘 29

2.4 현장 평가를 위한 실험 설계 33

2.4.1 개요 33

2.4.2 전체 경로 주행 시나리오 검증 34

3. 결과 및 고찰 37

3.1 작업 경로 검출 및 로봇 자세 보정 37

3.1.1 Y-Correction 결과 분석 37

3.1.2 X-Correction 결과 분석 39

3.1.3 Yaw-Correction 결과 분석 40

3.2 전체 경로 주행 결과 분석 42

4. 결론 44

참고문헌 46

Abstract 50

그림 목차

Fig. 1-1 (a) Different distances between rails (b) The robot's posture when exiting the rail (c) Rails deviated with a lateral shift 3

Fig. 2-1 Operating environment of greenhouse robot 6

Fig. 2-2 Double wheel structure of greenhouse robot 7

Fig. 2-3 Moving direction of mecanum wheeled mobile robot 8

Fig. 2-4 How to enter the next working path according to wheel: (a) general robot wheels (b) mecanum wheels 9

Fig. 2-5 View of autonomous greenhouse robot 13

Fig. 2-6 Kinematics of mecanum wheeled mobile robot 14

Fig. 2-7 Y-axis driving of greenhouse robot 18

Fig. 2-8 Problems with RGB-based rail detection: (a) Fallen leaves or branches around the rail - daytime (b) Peeled off the paint on the rail - daytime (c) Before entering working path - nighttime (d) After entering working path - nighttime 18

Fig. 2-9 Comparison of RGB and Depth images for rails 19

Fig. 2-10 Rail detection algorithm for Y-Correction 20

Fig. 2-11 Correction information for Y-Correction algorithm21

Fig. 2-12 Rotational posture correction of greenhouse robot21

Fig. 2-13 Vanishing point detection algorithm for Yaw-Correction 22

Fig. 2-14 Correlation between vanishing point and robot posture: (a) When the rail and the robot are parallel (b) When the robot rotates to the left relative to the rail 23

Fig. 2-15 Correction information for Yaw-Correction algorithm 24

Fig. 2-16 Adjusting the X-axis distance of the greenhouse robot 24

Fig. 2-17 Problems with RGB-based ground boundary detection: (a) When the boundary is covered by plants (b) When the boundary is invisible 25

Fig. 2-18 Depth difference between working path area and ground area 25

Fig. 2-19 Correction information for X-Correction algorithm28

Fig. 2-20 Full path for greenhouse environment driving 29

Fig. 2-21 System node diagram based on ROS 2 30

Fig. 2-22 Flowchart of full path driving algorithm for greenhouse robot 32

Fig. 2-23 Test field and greenhouse robot for evaluation 33

Fig. 2-24 Robot position error measurement criteria for rail34

Fig. 2-25 Robot stop position error measurement criteria for ground boundary 35

Fig. 2-26 Robot rotation error measurement criteria for rail36

Fig. 3-1 Changes in cx_{error} by Y-Correction 37

Fig. 3-2 Results for Y-Correction 38

Fig. 3-3 Depth image comparison for rail: (a) Daytime (b) Nighttime 39

Fig. 3-4 Results for X-Correction 40

Fig. 3-5 Changes in vx_{error} by Yaw-Correction 41

Fig. 3-6 Results for Yaw-Correction: (a) Before (b) After ... 42

표 목차

Table. 2-1 Specifications of the depth camera 9

Table. 2-2 Specifications of the proximity sensor 10

Table. 2-3 Specifications of the 1D LiDAR 11

Table. 2-4 Specifications of the main controller (SBC) 12

Table. 2-5 Specifications of autonomous greenhouse robot. 13

Table. 3-1 RMSE of robot position error for rail 38

Table. 3-2 RMSE of robot stop position error for ground boundary 40

Table. 3-3 RMSE of robot rotation error for rail 42

1. 서론

1.1 연구의 배경

시설 농업은 노지 농업에 비해 통제된 환경조건에서 작물을 재배할 수 있어 자연환경과 기후에 대한 의존도가 크게 감소한다(Akrami et al., 2020). 지속가능한 농업 생산 형태로서 시설 농업은 생산물의 품질을 향상시키고, 계절에 상관 없는 작물을 제공할 수 있으며 재배에 필요한 자원을 크게 절약할 수 있다(Kochhar and Kumar, 2019). 이러한 이유들로 시설 농업은 2013부터 2019년까지 스마트농업 투자 비용 중 67.5%를 차지하고 있으며 연평균 21.3%의 증가율을 보이고 있다(Yoo and Yeo, 2021).

그러나 온실에서의 농업 생산은 여전히 노동 집약적인 산업이기 때문에 노동력 부족 문제에 특히 민감하다. 절대적인 규모의 차이와 변동성에도 불구하고 인건비는 농업 분야에서 비용 중 가장 큰 비중을 차지하며 평균적으로 전체 운영 비용의 최대 40%를 차지한다. (Bechar and Eben-Chaime, 2014). 이를 해결하기 위해 농업 분야에 로봇, IoT, 빅데이터와 같은 4차산업혁명 기술을 접목한 스마트 농업 기술의 개발이 필요한 상황이다(Kim et al., 2017). 농업용 로봇은 농업 생산부터 가공, 유통, 소비까지의 과정에 환경 인식, 상황 판단, 자율적 동작으로 지능화된 작업 또는 서비스를 제공하는 기계를 의미한다 (Park and Kim, 2015). 특히 온실용 로봇은 시설 농업에서 다양한 농작업을 자동화하기 적합하다는 장점이 있다(Grimstad et al., 2018).

다양한 연구 과제를 통해 농업용 로봇의 기술적 타당성이 광범위하게 검증되었지만 시설 농업 분야에서는 아직 상용화된 완전 자동화 솔루션이 성공적으로 구현되지 못하였다(Conesa-Muñoz et al., 2015). 또한 대부분의 온실용 로봇들은 한 가지 작업을 목적으로 개발되었고 정량화된 환경에서만 작동하기 때문에 온실 환경 자동화를 위한 농업용 로봇의 개발은 빠르게 진행되지 못하고 있다. 특히 대부분의 온실용 로봇은 사전 정보가 있는 유도 라인에 의존하는 방식으로 작동한다. 예를 들어 마그네틱 가이드

라인(magnetic guide line)의 경우 발생되는 자기장을 온실용 로봇이 읽어 주행방향을 결정한다. 이를 사용하기 위해서는 온실에 전자기 발생장치와 마그네틱 가이드 라인을 콘크리트 바닥에 매설해야 한다. 그러나 사용 중 라인이 단선되거나 오염될 경우 로봇이 명령을 읽을 수 없어 모든 라인을 다시 시공해야하는 큰 문제가 있다.

마그네틱 가이드 라인과 함께 사용하는 조합으로 범퍼가 있다. 범퍼는 로봇 정면에 부착되며 레일 위를 주행하다가 레일 끝에 도달했을 경우 로봇을 정지 시키기 위해 사용한다. 온실 작업 경로의 모든 레일에는 스토퍼(stopper)가 설치되며 로봇이 레일 끝에 도달하였을 때 범퍼가 스토퍼에 의해 눌러져 레일 끝에 도착했음을 인식할 수 있다. 이 방법을 사용할 경우 로봇이 작업 경로에 진입할 때 항상 레일 끝까지 도달해야 하며 레일 위에서 로봇의 위치를 알 수 없기 때문에 특정 위치에서 작업을 수행하기 힘들다.

온실에 설치된 레일도 로봇의 주행에 매우 큰 영향을 미친다. 설계 도면상으로 레일 간 간격이 1.6m로 정의되어 있다고 하더라도, 실제 환경에서는 설계 도면과 오차를 가진 채로 Fig. 1-1의 (a)처럼 설치된다. 이는 매번 정해진 간격만큼 주행할 때 설치 오차로 인해 레일에 진입하지 못하고 로봇의 탈선을 유발할 수 있다. 또한 이상적인 경우에서는 로봇이 레일에서 빠져 나온 뒤 로봇과 레일이 평행해야 하지만 Fig 1-1의 (b)와 같이 레일을 기준으로 로봇이 틀어진 채로 빠져 나올 수 있다. 따라서 로봇은 다음 작업 경로를 탐색하기 전 틀어진만큼 적절한 회전이 필요하다. 마지막으로 가공 절차 또는 설치 후 외부 충격에 의해 Fig. 1-1의 (c)와 같이 레일마다 좌우 방향으로 공차가 있거나 기구상 틀어짐이 있을 수 있으며, 이 역시 작업 경로를 빠져나올 때 로봇 자세의 틀어짐을 유발한다. 이 외에도 지면 콘크리트 바닥의 균열이나 고르지 않은 부분 및 기타 불규칙성이 있을 수 있다. 따라서 안정적인 작업 경로 진입을 위해 레일에 대한 신뢰도 높은 로봇 자세 보정이 필요하다.

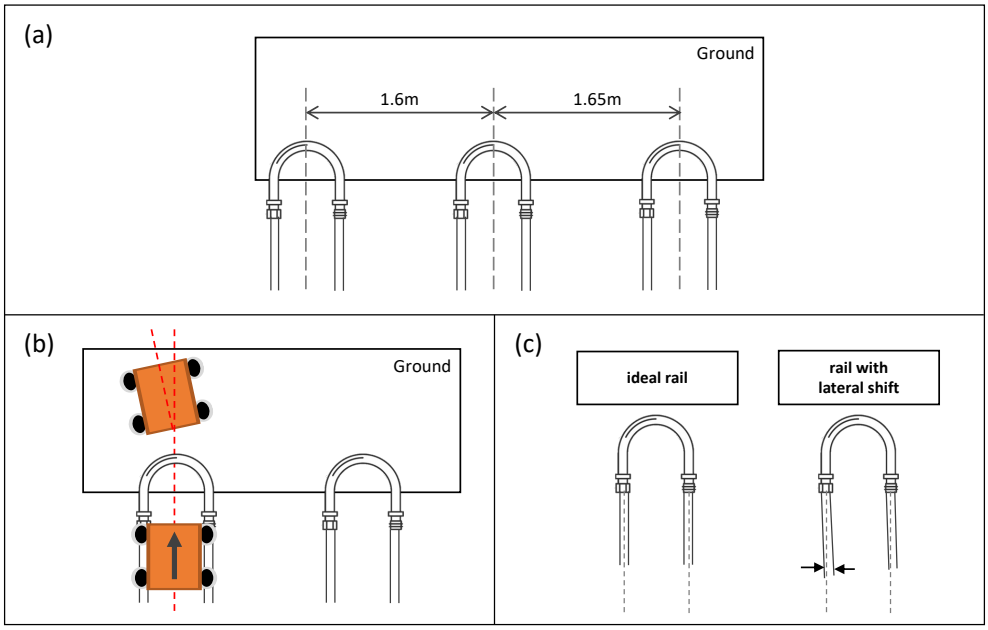


Fig. 1-1 (a) Different distances between rails (b) The robot's posture when exiting the rail (c) Rails deviated with a lateral shift

1.2 연구의 목적

본 연구에서는 기존에 연구되었던 온실용 로봇의 유도 라인 기반 주행 방식에서 오는 한계를 극복하고, 단순 명령을 통한 주행이 아닌 무인 주행 농작업을 위한 작업 경로 검출 및 추종 기술을 개발하는 것을 목적으로 하였다. 이는 대규모 온실의 조도 변화와 태양에 입사각의 영향을 크게 받지 않고 로봇의 야간 작업이 가능하도록 하며, 저비용 센서들을 이용해 개방된 지면 영역과 작물이 우거진 작업 경로 영역을 공간적으로 구분하고 자율적으로 주행하기 위한 시스템을 개발하고자 하였다. 또한 온실 환경에서 로봇이 안정적이고 능동적인 농작업을 수행할 수 있도록 레일 검출 성능과 다음 작업 경로 진입을 위한 로봇 자세 보정 알고리즘 성능을 검증하고, 최종적으로 자율 농작업을 위한 주행 시나리오 평가를 통해 실제 현장 적용 가능성을 검증하고자 하였다.

1.3 문헌 조사

온실에서는 위성과 로봇의 수신기 사이의 송수신이 원활하지 않기 때문에 GNSS(Global Navigation Satellite System)를 이용한 자율적인 농작업을 수행에 어려움이 있다(Mazhar et al., 2017). 이를 대신하여 Magnetic tracking, 추측 항법(dead reckoning), RFID(Radio Frequency Identification), UWB(Ultra-wideband), 음향, 마커(Marker) 등을 포함한 다양한 주행 방법들이 지난 10년 동안 활발하게 연구되었으며 그 결과 상용화되어 사용되고 있다(Mazhar et al., 2017; Shi et al., 2020).

Su 등(2017)은 AGV(Automated Guided Vehicle)의 실내 주행을 위해 자기장 측정 모델과 하이브리드 최적화 알고리즘을 제안했다. Lee와 Yang(2012)은 자속 밀도(magnetic flux density) 개념을 활용한 마그네틱 가이드 기반의 AGV 자율 주행 방법 및 제어 시스템을 제안했다. 이 방법들을 온실에 적용하기 위해 Tanabata 등(2022)은 상용 AGV 키트를 개조하여 작물 운반을 위한 온실용 로봇을 만들었다. 로봇의 경로는 쉽게 변경할 수 있도록 마그네틱 가이드 테이프를 사용하였다. 또한 주행 중 커맨드 테이프를 읽도록 하여 원하는 장소에 작물을 운반할 수 있도록 하였다. 그러나 마그네틱 가이드 기반의 주행 성능은 자기 센서의 수와 간격에 따라 달라지며, 경로 변경은 어렵고 비용이 많이 든다. 이러한 접근법은 고정 작업 경로 탐색에 적합하며 다양한 시나리오가 있고 다중 로봇이 함께 운영되는 온실에서는 사용하기 어려울 수 있다(Su et al., 2020).

추측 항법은 시스템의 동작 상태를 통합하여 로봇의 위치를 결정한다. 예를 들어 선형 가속도 또는 회전 가속도를 측정하는 IMU(Inertial Measurement Unit) 및 바퀴의 회전 각을 얻을 수 있는 엔코더에 의해 계산될 수 있다(Bechar and Vignault, 2016). 그러나, 초기 위치 오류 및 이동 중의 노이즈로 인해 오류가 누적되는 경향이 있어 로봇의 위치 추정치에 큰 오류가 발생한다(Mehta et al., 2008). 따라서 레일간 간격이 일정하지 않은 일반적인 온실에서 로봇의 탈선을 유발할 수 있다.

RFID 시스템은 리더와 태그 사이에서 데이터를 전송하기 위해 무선 주파수파를 사용한다(Wu et al., 2019). Choi 등(2011)과 Magnago

등(2019)은 RFID 기술을 통해 모바일 로봇의 센티미터 수준 실내 위치 정확도를 달성하였다. 그러나 이 방법은 많은 수의 RFID 태그가 필요하며 구조화되지 않은 온실 환경에서는 설치의 제약으로 인해 적합하지 않다.

UWB는 초광대역 신호를 사용하며 실내 환경에서의 로봇 자율 주행을 위해 가장 상용화된 기술이다(Mazhar et al., 2017). 그러나 환경이 복잡하고 변화가 많은 농업 분야에서는 UWB의 성능이 일반적인 실내만큼 높지 않은 것으로 입증되었다(Yao et al., 2021). 또한, UWB 시스템은 다른 무선 통신 시스템과 간섭할 수 있다(Nikookar and Prasad, 2008).

음향 기반 주행 시스템을 농업 환경에 적용한 연구들도 있다. Huang 등(2020)은 작은 온실에서 센티미터 수준의 위치 정확도를 달성한 확산 스펙트럼 사운드 기반 위치 추정 시스템을 개발하고 평가했다. Tsay 등(2020)은 온도 보상 음속 추정 방법을 사용하여 20.0mm의 위치 정확도를 달성했다. 명확한 정확도 이점에도 불구하고 음향 기반 위치 추정 기술은 커버리지 영역에 한계가 있다. 대표적인 해결책은 노드와 스피커를 더 많이 사용하는 것이며(Hwang et al., 2021), 이는 대규모 온실 환경에서 운영 비용의 급격한 증가로 이어질 수밖에 없다.

ApilTag(Olson, 2011)와 같은 기준 마커를 사용한 주행 시스템 연구도 있다. Zhang 등(2022)은 온실 각 구역마다 사전에 마커를 부착하고 로봇을 운영하였다. 불규칙적이고 특징이 가변적인 온실의 제약사항을 극복하기 위해 영상을 전처리하고 마커를 감지하며 특징점을 추출하였다. 또한 여러 센서의 정보를 통합하고 로봇의 움직임 특성을 고려하여 요인 그래프(Factor Graph) 기반으로 자율 주행 시스템을 구축하였으며 실험 환경에서 센티미터 수준 실내 위치 정확도를 달성하였다. 그러나 요인 그래프 기반의 시스템은 많은 연산량을 요구하며 장기간 운영 시 온실 특성상 마커가 쉽게 오염될 수 있기에 유지보수 측면에서 대규모 온실 환경에 적합하지 않다.

결과적으로 GNSS를 사용할 수 없는 온실에서 초기 설치 및 지속적인 관리가 필요한 마그네틱 가이드 라인, RFID, UWB, 음향, 마커 등을 사용한 시스템은 비용 및 관리 문제로 이어질 수 있다. 따라서 기존 온실에 부가적인 설비 없이도 로봇이 무인으로 주행할 수 있는 센싱시스템과 자율적인 농작업을 수행을 위한 관련 알고리즘이 중요하다.

2. 재료 및 방법

2.1 온실용 자율 주행 로봇 플랫폼

2.1.1 운영 환경

Fig. 2-1과 같이 유리 온실 환경은 일정한 간격으로 레일, 기둥, 거터(Gutter) 등이 설치되어 있으며 천장을 비롯한 벽은 유리로 되어있다. 작물들은 거터 위에서 양액을 공급받으면서 자라며, 온실용 로봇 및 작업용 리프트카 등은 레일 위에서 주행할 수 있는 바퀴 구조로 되어있다. 온실용 로봇이 방제, 수확, 예찰 등의 주요 작업을 수행하기 위해서는 레일 위를 주행해야 한다. 또한 작업 경로의 맨 끝은 유리 벽이기 때문에, 지면에서 레일을 통해 작업 경로로 진입 후에는 주행했던 경로를 그대로 다시 빠져나와야 다음 작업 경로로 진입이 가능해진다.

Fig. 2-1 Operating environment of greenhouse robot

최근 국내 농가에서도 국외 농가와 유사한 형태로 온실을 짓고 있으며, 농가별로 작물에 따라 거터의 길이나 레일의 길이는 상이하다. 일반적으로 레일의 폭은 550mm, 직경은 50mm이며 작물의 생장 및 거터의 폭을 고려하여 레일을 1.6m 간격으로 설치한다. 지면의 폭은 보통 2.0~4.5m이며 평탄함을 위해 콘크리트를 사용한다. 본 연구에서 제안하는 온실용 로봇은 위 조건의 환경에서 주행할 수 있도록 설계하였다.

2.1.2 시스템 구성

온실용 로봇을 설계할 때 지면과 작업 경로를 모두 이동할 수 있는 특수한 이중 바퀴 구조가 필요하다는 점에서 사용할 바퀴 유형은 매우 중요하다. 외부 바퀴의 경우 온실의 콘크리트 바닥을 주행할 수 있어야 하기 때문에 내부 바퀴 보다 직경이 커야 한다. 반면 Fig. 2-2와 같이 내부 바퀴는 레일을 탈 수 있는 폭을 가져야 하며 미끄러지거나 떨어질 위험이 없도록 설계되어야 한다.

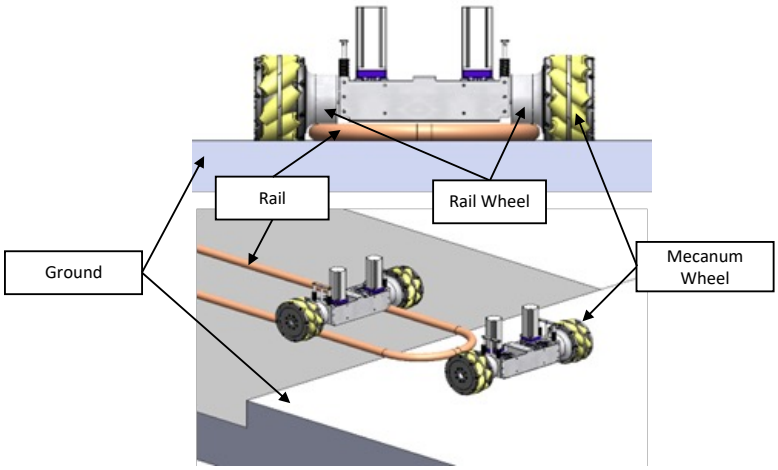


Fig. 2-2 Double wheel structure of greenhouse robot

본 시스템에서는 이중 바퀴 구조의 외부 바퀴로서 메카넘 휠(mecanum wheels)을 사용한다. 메카넘 휠은 바퀴의 회전축과 45도 각도를 이루는 작은 롤러들이 바퀴의 외부를 둘러서 하나의 큰 바퀴를 구성하는 형태이다. 하나의 이동로봇에 4개의 메카넘 휠이 설치되며, 각 바퀴의 전진 또는 후진에 따라 방향전환 없이 전·후·좌·우 기동 및 회전이 가능하다. Fig. 2-3은 메카넘 휠의 각 바퀴 회전에 따른 이동 방향이다. 이때, 초록색 화살표은 진행 방향, 파란색 화살표는 바퀴 회전방향, 빨간색 화살표는 작용하는 힘의 방향을 나타낸다. 메카넘 휠은 지면의 공간이 제한적이고 정밀한 이동이 필요한 온실 환경에서 특히 유용하다.

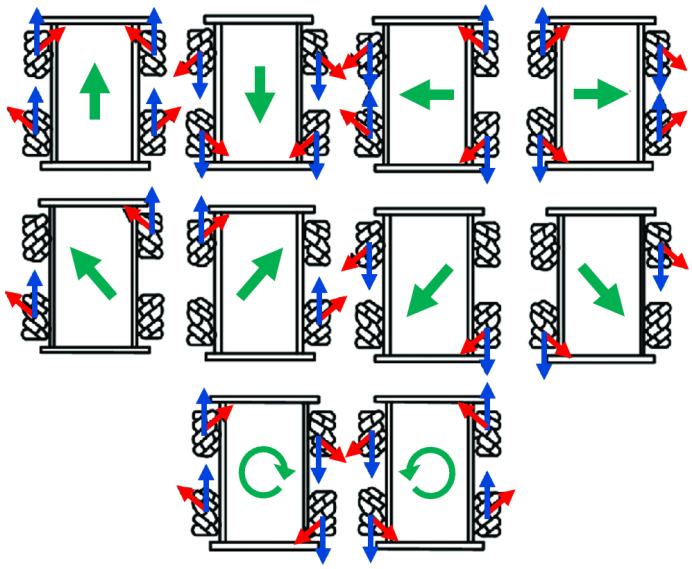


Fig. 2-3 Moving direction of mecanum wheeled mobile robot

로봇이 작업 경로에서 빠져나와 다음 작물 열 사이로 진입하기 위해 일반 바퀴를 사용하는 경우 총 5단계의 제어 프로세스를 거쳐야 한다. 먼저 작업 경로를 후진해서 빠져나와 시계 방향으로 90도 회전한 뒤, 다음 작업 경로를 향해 전진하고 다시 반시계 방향으로 90도 회전한 다음 작업 경로에 진입한다. 이 프로세스는 시간이 오래 걸리고 방향 전환 시 작업 경로 진입에 대한 정확도를 떨어뜨린다. 반면 메카넘 휠을 사용할 경우 로봇은 작업 경로에서 후진으로 빠져나온 뒤 방향 전환 없이 옆으로 이동한 다음 작업 경로로 진입하는 단순화된 3단계 제어 프로세스를 사용한다. 이 간소화된 프로세스는 동작 복잡성을 최소화하며 진입 시간을 줄이고 작업 경로에 잘못 진입할 가능성을 낮춘다.

Fig. 2-4 How to enter the next working path according to wheel: (a) general robot wheels (b) mecanum wheels

온실 환경에서 로봇 운영의 필수적인 측면은 작물 열 사이의 작업 경로에 정확하고 안정적으로 진입하는 것이다. 이를 위해 로봇은 온실 내에 있는 레일을 검출하고 진입할 수 있어야 한다. RGB 카메라는 이 작업을 위해 레일을 색상 기반으로 검출할 수 있지만, 몇 가지 한계점이 존재한다. 조도 변화로 인해 레일의 색상이 시간에 따라 불규칙적으로 보이며, 온실 내 장비가 레일 위에서 운영되면서 레일의 페인트가 벗겨질 수 있다. 이로 인해 조명의 영향을 많이 받는 RGB 색상 기반의 레일 검출 방법은 일관된 성능을 내기에 부적합하다. 이러한 문제점들을 고려하여, 본 연구에서는 Depth 카메라로 Intel社의 D435를 선정하였으며 작업 경로 검출 및 추종의 목적으로 사용하였다. 카메라의 Depth 센서는 가시광선에 의존하지 않으며 적외선 기술을 사용하여 시야 내에서 센서와 물체 사이의 거리를 측정하는 스테레오 비전 시스템을 사용한다. 조명 조건에 크게 영향을 받지 않는다는 뚜렷한 장점을 가지고 있어, 하루 중 시간이나 조명 수준에 관계없이 일관되고 신뢰할 수 있는 성능을 제공한다. 본 연구에서 사용된 Depth 카메라의 제원을 Table. 2-1에 나타냈다.

Table. 2-1 Specifications of the depth camera

Items	Specification
Depth Technology	Active IR Stereo
Depth Stream Output Resolution	1920 x 1080

Max Frame Rate	90fps
Field of View (H*V)	86° x 57°
Shutter Type	Global Shutter
Minimum Depth Distance (Min-Z)	0.1 m
Mechanical (L*D*H)	90 x 25 x 25 mm

온실 환경에서 작업 경로의 레일은 일반적으로 철제로 만들어지며, 이러한 레일은 온실 온도 조절의 주요 기능 외에도 로봇이나 장비의 이동을 위한 주행로 역할을 한다. 로봇은 지면의 콘크리트 바닥과 작업 경로의 레일을 구분하여, 시스템이 제공하는 속도 명령에 따라 각 바퀴에 필요한 RPM을 계산해야 한다. 여기서 근접 센서의 사용은 로봇이 작업 경로에 들어갔는지 여부를 판단하는 데 효과적이며, 제안하는 시스템에서는 오토닉스社의 PS50-30DN을 사용하였다. Table. 2-2는 본 연구에서 사용된 근접센서의 사양을 보여준다. 본 연구의 로봇은 온실의 콘크리트 바닥을 주행하는 외부 바퀴와 레일을 타는 내부 바퀴로 구성된 이중 바퀴 시스템으로 설계되었으므로, 근접센서를 통해 주행 영역을 구분하고 두 바퀴의 직경에 따른 운동학 모델을 고려한 제어 명령을 내리는 방식이다.

Table. 2-2 Specifications of the proximity sensor

Items	Specification
Sensing Distance	30 mm
Standard Sensing Target	90 x 90 x 10 mm (iron)
Response Frequency	50 Hz
Control Output	NPN Normally Open
Hysteresis (Distance)	Max 10%

로봇이 작업 경로에 진입한 이후에는 1D LiDAR(Light Detection and Ranging)을 활용해 작업 경로 끝에 있는 온실 벽까지의 거리를 측정하고 로봇의 정확한 위치를 파악한다. 1D LiDAR로 Benewake社의 TF-03을

선정하여 실내 및 실외 환경 모두에서 낮은 분해능와 넓은 측정 범위로 작업 경로 내 로봇의 정확한 위치 추정 및 정확하고 일관된 데이터 수집이 가능하다. 작업 경로에서 로봇의 위치를 정확하게 추정하는 능력은 농작업의 수행에 중요한 영향을 미친다. 정확한 위치 데이터를 통해 로봇이 특정 위치에 정지하도록 하여 작물 사진 촬영이나 수확 등 다양한 농작업을 수행할 수 있도록 한다. 1D LiDAR의 제원은 Table. 2-3과 같다.

Table. 2-3 Specifications of the 1D LiDAR

Items	Specification
Operating Range	0.1 ~ 180 m
Frame Rate	1 ~ 1,000 Hz
Distance Resolution	1 cm
Field of View	0.5°
Communication	UART / CAN
Mechanical (L*D*H)	44 x 43 x 32mm

로봇 시스템의 인지, 연산, 제어를 담당하는 SBC(Single Board Computer)로는 Intel社의 NUC11TNKi5를 선정하였으며, 제안하는 알고리즘 처리하고 연산을 수행하였다. 작업 경로 검출을 위한 이미지 처리, 로봇의 자세 보정, 로봇 제어를 위한 속도 명령 생성 등 여러 핵심 작업을 처리하는 방식이다. Table. 2-4는 본 연구에서 사용된 SBC의 사양이다. 구성된 시스템 및 알고리즘은 ROS 2(Robot Operating System 2) Humble 환경에서 개발되었다. ROS 2는 로봇 소프트웨어를 작성하기 위한 프레임워크이며 다양한 로봇 플랫폼에서 필요한 하드웨어의 추상화, 하위 수준의 디바이스 제어, 프로세스 간 통신, 개발 환경 등에 필요한 라이브러리와 다양한 개발 도구 및 디버깅 도구를 제공한다. 데이터를 Visualize 해주는 RViz와 Qt를 기반으로 한 GUI 응용 개발도구인 RQt, 시뮬레이터 제작 및 모델링에 이용할 수 있는 3차원 시뮬레이터 Gazebo 등을 지원한다. ROS 2에서는 노드라고 불리는 프로세스들의 실행으로 시스템이 동작되며, 제안된 알고리즘은 노드의 형태로 구성된다.

Table. 2-4 Specifications of the main controller (SBC)

Items	Specification
CPU	i5-1135G7 (up to 4.2GHz) (4-core / 8-threads)
GPU	Internal
Memory	16GB DDR4
Storage	256GB M.2 SSD
Power	12 ~ 24VDC (Max 120W)
Mechanical (L*D*H)	117 x 112 x 37mm

요약하자면 온실용 로봇은 작물들의 종류에 상관 없이 레일 위나 콘크리트 바닥을 주행할 수 있어야 하며 수확 및 방제 운송 작업이 가능해야 한다. Fig. 2-5는 무인 주행 농작업을 위한 온실용 로봇 플랫폼을 나타낸다. 로봇은 이중 바퀴 구조를 가지고 있기 때문에 외부 바퀴의 메카넘 휠을 이용해 방향 전환 없이 콘크리트 바닥에서 전방향 주행이 가능할 뿐만 아니라 내부 바퀴로 레일 위를 주행할 수 있다. 또한 작업 경로를 검출하고 추종하기 위한 센서로 Depth 카메라, 근접센서와 로봇 시스템의 인지, 연산, 제어를 담당하는 SBC가 장착되어 있다. 온실용 로봇은 Fig. 2-1에서 주어진 운영환경을 기준으로 설계되었으며 사양은 Table. 2-5와 같다.

Fig. 2-5 View of autonomous greenhouse robot

Table. 2-5 Specifications of autonomous greenhouse robot

Items	Specification
Mass	312 kg
Size (L*D*H)	1,830 x 880 x 465 mm
Diameter of the outer wheel	254 mm
Diameter of the inner wheel	141 mm
Length between outer wheels	0.752 m
Length between inner wheels	0.550 m
Max velocity on ground	1.45 m/s
Max velocity on rail	1.20 m/s
Driving Type	Holonomic Drive

2.1.3 운동학

Mecanum Wheel 이동 로봇의 위치를 추정하기 위해 기구학적 분석을 하였다. Mecanum Wheel 이동 로봇 기구학 분석에 사용되는 변수는 Fig. 2-6와 같다. 여기서 W는 이동 로봇의 회전 중심축에서 바퀴 중심까지 가로 축 거리이고, L은 이동 로봇의 회전 중심축에서 바퀴 중심까지 세로 축 거리이며, r은 바퀴 의 반경이다. 또한, v_{kw}는 k번째 바퀴의 회전에 의한 전진 속도이고, v_{kr}은 k번째 바퀴의 회전에 의한 실제 바닥에 작용하는 속도이며, v_x 및 v_y는 최종적으로 이동로봇에 작용하는 X축 및 Y축 방향 속도이다. 이때, 각 바퀴의 회전속도를 ω_k라고 하고, 바퀴의 반경을 r이라고 하면, 각 바퀴의 회전에 의한 전진 속도 v_{kw}는 $\omega_k \cdot r$과 같다. 또한, 각 색깔에 따른 각 화살표가 나타내는 의미는 Fig. 2-3과 동일하다.

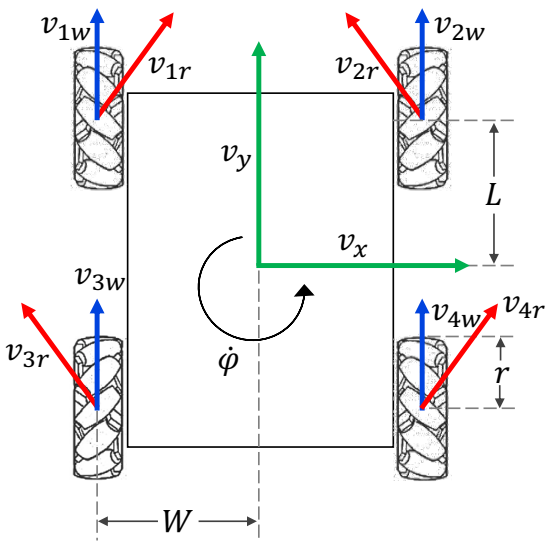


Fig. 2-6 Kinematics of mecanum wheeled mobile robot

먼저, 기구학 분석을 위해 각 바퀴의 X축, Y축 방향 속도는 각 바퀴의 롤러 가 회전축과 45도 각도로 기울어져 있는 것을 이용하여 v_{kw}와 v_{kr}을 이용하여 다음과 같은 식으로 구할 수 있다.

$$
\begin{aligned}
v_{1x} &= \frac{v_{1r}}{\sqrt{2}}, \qquad v_{1y} = v_{1w} + \frac{v_{1r}}{\sqrt{2}} \\
v_{2x} &= -\frac{v_{2r}}{\sqrt{2}}, \quad v_{2y} = v_{2w} + \frac{v_{2r}}{\sqrt{2}} \\
v_{3x} &= -\frac{v_{3r}}{\sqrt{2}}, \quad v_{3y} = v_{3w} + \frac{v_{3r}}{\sqrt{2}} \\
v_{4x} &= \frac{v_{4r}}{\sqrt{2}}, \qquad v_{4y} = v_{4w} + \frac{v_{4r}}{\sqrt{2}}
\end{aligned} \tag{2.1}
$$

위 식을 v_{kw}에 대해 정리하면 다음과 같다.

$$
\begin{aligned}
v_{1w} &= -v_{1x} + v_{1y} \\
v_{2w} &= v_{2x} + v_{2y} \\
v_{3w} &= v_{3x} + v_{3y} \\
v_{4w} &= -v_{4x} + v_{4y}
\end{aligned} \tag{2.2}
$$

또한, 이동 로봇의 속도와 각속도를 이용하여 다음 관계식을 구할 수 있다.

$$
\begin{aligned}
v_{1x} &= -v_x + L \cdot \dot{\varphi}, \quad v_{1y} = v_y - W \cdot \dot{\varphi} \\
v_{2x} &= -v_x + L \cdot \dot{\varphi}, \quad v_{2y} = v_y + W \cdot \dot{\varphi} \\
v_{3x} &= -v_x - L \cdot \dot{\varphi}, \quad v_{3y} = v_y - W \cdot \dot{\varphi} \\
v_{4x} &= -v_x - L \cdot \dot{\varphi}, \quad v_{4y} = v_y + W \cdot \dot{\varphi}
\end{aligned} \tag{2.3}
$$

식 (2.2)와 (2.3)을 연립하여 정리하면 다음과 같은 식을 구할 수 있다.

$$
\begin{aligned}
v_{1w} &= v_x + v_y - (W+L)\cdot\dot{\varphi} \\
v_{2w} &= -v_x + v_y + (W+L)\cdot\dot{\varphi} \\
v_{3w} &= -v_x + v_y - (W+L)\cdot\dot{\varphi} \\
v_{4w} &= v_x + v_y + (W+L)\cdot\dot{\varphi}
\end{aligned}
\tag{2.4}
$$

위 식을 행렬 형태로 표현하면 다음과 같이 역기구학을 구할 수 있다.

$$
\begin{bmatrix} v_{1w} \\ v_{2w} \\ v_{3w} \\ v_{4w} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & -(W+L) \\ -1 & 1 & (W+L) \\ -1 & 1 & -(W+L) \\ 1 & 1 & (W+L) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ \dot{\varphi} \end{bmatrix} \tag{2.5}
$$

한편, 각 바퀴의 회전에 의한 전진 속도 v_{kw}는 $\omega_k \cdot r$ 이다. 이것을 식 (2.5)에 대입하면 각 바퀴의 회전속도에 관한 이동 로봇의 역기구학 식으로 변경할 수 있다.

$$
\begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \\ \omega_4 \end{bmatrix} = \frac{1}{r} \begin{bmatrix} 1 & 1 & -(W+L) \\ -1 & 1 & (W+L) \\ -1 & 1 & -(W+L) \\ 1 & 1 & (W+L) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ \dot{\varphi} \end{bmatrix} \tag{2.6}
$$

마지막으로 위 식 (2.6)을 역행렬을 통해 다시 정리해 주면 다음과 같이 이동 로봇의 X축, Y축 방향 및 회전 속도에 관한 정기구학 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ \dot{\varphi} \end{bmatrix} = \frac{r}{4}\begin{bmatrix} 1 & -1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ -\frac{1}{(W+L)} & \frac{1}{(W+L)} & -\frac{1}{(W+L)} & \frac{1}{(W+L)} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \\ \omega_4 \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

최종적으로 얻은 Mecanum Wheel 이동로봇의 역기구학 식 (2.7)을 사용하여 Encoder 센서를 통해 얻은 각 바퀴의 회전속도를 대입함으로써 이동로봇의 속도를 얻을 수 있었다.

2.2 작업 경로 검출 및 자세 보정 알고리즘

온실용 로봇이 무인으로 농작업을 수행하기 위해 안정적으로 레일을 찾아 진입하고, 작업 경로에서 빠져나와 다음 작업 경로를 탐색하기 위한 자세 조정이 필요하다. 본 연구에서는 작업 경로 검출과 자세 보정을 위한 Y-Correction, Y-Correction 그리고 Yaw-Correction 알고리즘을 제안한다. 사용된 이미지는 640x480의 해상도를 가지며 카메라를 통해 획득하였다. 또한 영상 처리는 파이썬(python)과 컴퓨터비전 (computer vision)을 위한 프로그래밍 라이브러리인 OpenCV를 통해 수행되었다.

2.2.1 Y-Correction

로봇은 현재 작업 경로에서 빠져나와 Fig. 2-7과 같이 다음 작업 경로의 레일을 찾기 위해 Y축 방향으로 이동한다. 이 때 이동하면서 레일을 검출해야 하며, 로봇의 정중앙과 레일의 정중앙이 일정 범위 내에서 정렬되어야 로봇이 안정적으로 작업 경로에 진입할 수 있다. 레일의 정중앙으로부터 로봇의 정중앙이 멀리 떨어진 채로 진입을 하게 될 경우, 작업 경로 진입에 실패해 탈선하거나 온실 내 기둥 등 구조물과 충돌할 수 있다. 따라서 Y축 방향으로 이동하면서 레일을 높은 정확도로 검출하고 안정적으로 진입하기 위한 알고리즘이 필요하다.

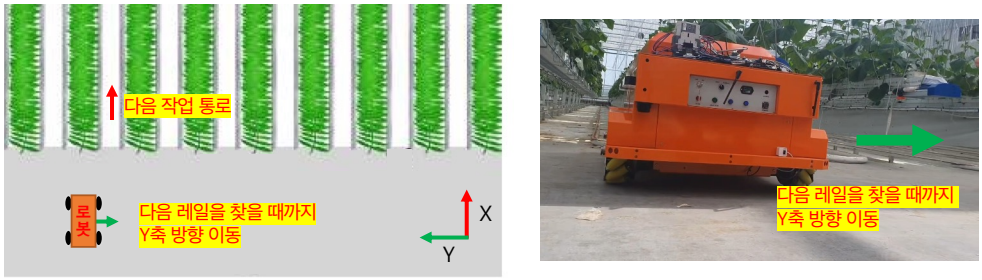


Fig. 2-7 Y-axis driving of greenhouse robot

RGB 이미지를 이용하여 레일을 검출할 경우 조도 변화로 인해 시간에 따라 레일의 색상이 불규칙적으로 보이거나 Fig. 2-8의 (a)처럼 작업 경로 영역에 떨어진 잎이나 가지에 의해 검출에 영향을 받을 수 있다. 또한 (b)와 같이 레일의 도색이 벗겨진 경우 사전에 정의해 놓은 검출 색상 범위를 벗어날 수 있으며, 작업 경로 바닥과 레일의 색이 비슷한 온실에 대해서는 레일을 검출하기 어렵다. 한편 야간 작업에 해당하는 (c) 또는 (d)의 경우, 작업 경로 진입 전 조명 각도에 따라 레일이 그늘지고 진입했을 때는 레일이 검출되지 않는다. 이와 같이 RGB 이미지에서 색상 범위 기반으로 레일을 검출할 때는 다양한 한계점이 존재하였다.

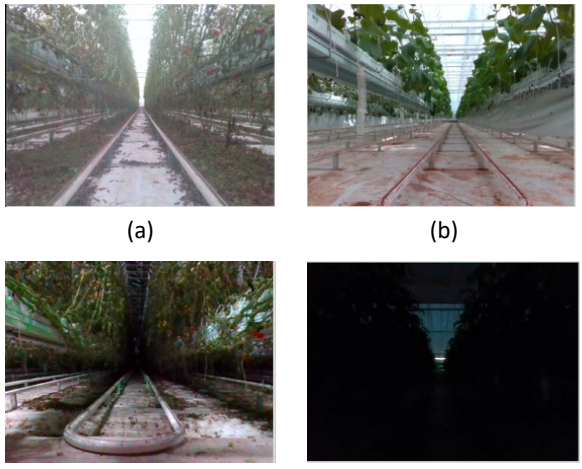


Fig. 2-8 Problems with RGB-based rail detection: (a) Fallen leaves or branches around the rail - daytime (b) Peeled off the paint on the rail - daytime (c) Before entering working path - nighttime (d) After entering working path - nighttime

하지만 Fig. 2-9처럼 Depth 이미지를 이용할 경우 주간/야간, 조도 변화, 주변 색상에 상관 없이 레일과 작업 경로 바닥의 깊이 차이를 통해 안정적으로 레일의 형상을 확인할 수 있다. 이렇게 Depth 이미지 상에서 레일의 윤곽선이 뚜렷하게 구분되기 때문에 일련의 과정을 통해 레일을 검출하고 진입 지점을 계산하여 로봇이 안정적으로 작업 경로에 진입할 수 있다.

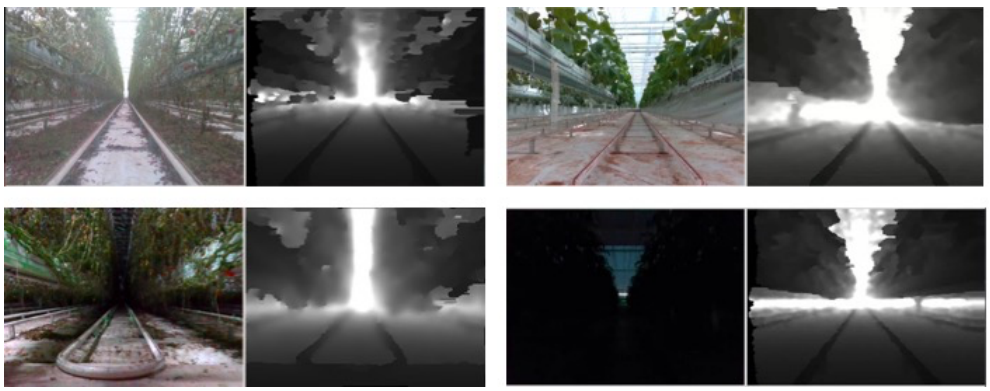


Fig. 2-9 Comparison of RGB and Depth images for rails

Depth 이미지를 통해 레일 검출하고 진입할 지점을 계산하기 위해서는 Fig. 2-10과 같은 과정을 수행하였다. 먼저 '8UC1' 포맷으로 인코딩된 Depth 이미지에 대해 이용하여 적응형 이진화(adaptive threshold) 작업을 수행하였. 여기서 적응형 이진화는 가우시안 필터(Gaussian filter)라고 하는 일종의 이미지 블러링 필터를 사용하여 이미지의 노이즈를 줄이고 Edge를 점출하기 위한 전처리로 사용되었다. 이어서 이진화된 Depth 이미지에 Canny Edge Detection 알고리즘을 적용하여 Edge를 검출하고, 레일이 검출될 가능성이 높은 영역에 대해 관심영역 ROI(Region Of Interest)를 설정하였다. 설정한 ROI 내에서 레일의 윤곽선에 해당되는 직선을 찾기 위해 허프 변환(Hough Transform) 사용하고, 기울기를 계산해 수평 및 수직 범위로 제한하여 레일과 관련 없는 검출된 다수의 직선을 효과적으로 제거할 수 있을 것으로 기대하였다. 또한 기울기를 기준으로 레일의 왼쪽과 오른쪽 직선들로 구분할 수 있도록 가장 바깥쪽 직선을 픽셀 끝까지 확장하여 레일에 해당되는 직선 2개를 최종적으로 얻었다. 다음으로 레일의

정확한 무게중심을 얻기 위해 검출된 직선 2개에 대해 특정 하단 사다리꼴 영역을 무게중심 계산 영역으로 설정하였다. 이 영역에 대해 무게중심 좌표 (cx, cy)를 계산하고 이는 로봇이 작업 경로로 진입하기 위한 자세보정의 기준점으로 사용하였다.

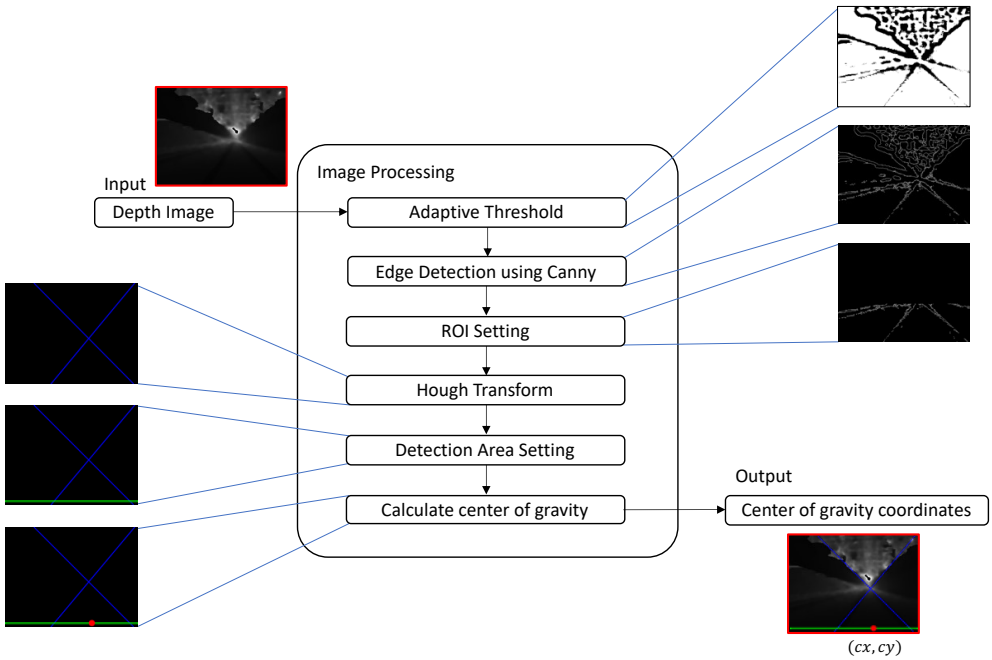


Fig. 2-10 Rail detection algorithm for Y-Correction

식 (2.8)의 cx_{error}는 Depth 이미지 가로 해상도의 절반 길이와 레일 무게중심의 x 좌표인 cx의 차이다. 이는 로봇을 레일의 중심에 정렬하고 이동하기 위한 피드백 역할을 하며, Fig. 2-11의 cx_{error}가 0에 가까워지도록 로봇을 Y축 방향으로 이동함으로써 작업 경로 진입 지점에 로봇을 맞출 수 있다. 식 (2.9)에서 $velocity_Y$는 로봇의 Y축 이동 명령을 위한 선형 속도 값을 의미하며 cx_{error}가 사전 설정된 임계값 T의 범위에 들어왔을 때 로봇을 정지시키는 방식이다. 이 알고리즘은 Depth 이미지의 가로 픽셀 중심이 로봇의 중심과 정렬되어 있다고 가정하였다. 결과적으로 로봇은 작업 경로에서 빠져나온 뒤, Y축 방향으로 이동하면서 다음 작업 경로의 레일을 검출하고 안정적으로 진입할 수 있도록 하였다.

$$cx_{error} = \frac{depth_image.width}{2} - cx \tag{2.8}$$

$$velocity_Y = \begin{cases} speed_Y, & if\ cx_{error} > T \\ -speed_Y, & if\ cx_{error} < -T \\ 0, & otherwise \end{cases} \tag{2.9}$$

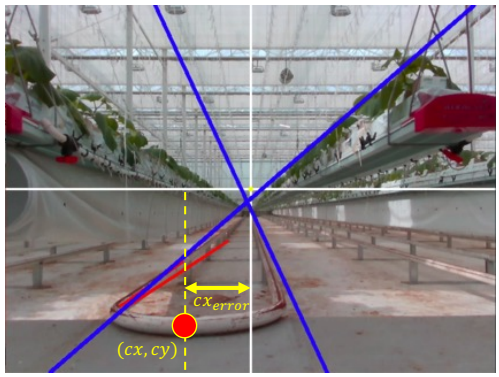


Fig. 2-11 Correction information for Y-Correction algorithm

2.2.2 Yaw-Correction

로봇이 레일을 빠져나왔을 때 로봇과 지면 경계가 수직이 아닐 경우, 다음 작업 경로를 향해 Y축으로 이동 시 거터(gutter)에 부딪히거나 지면 경계와 점점 멀어져 레일 검출 정확도가 떨어질 수 있다. 따라서 로봇이 현재 작업 경로에서 빠져나와 Y축 방향으로 이동하면서 Y-Correction을 수행하기 전에 Fig. 2-12와 같은 회전 자세 보정 과정이 필요하였다.

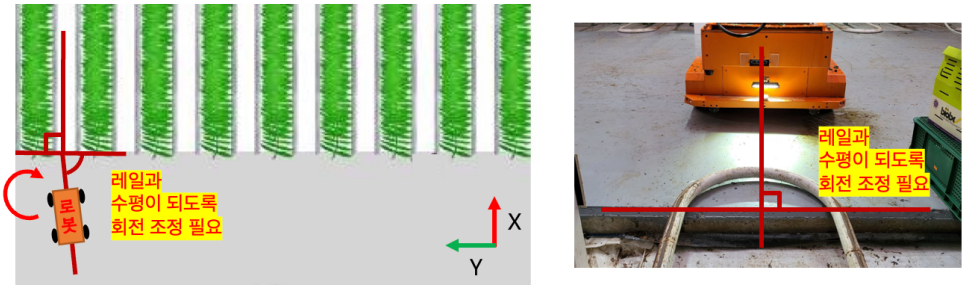


Fig. 2-12 Rotational posture correction of greenhouse robot

로봇의 자세를 지면 경계와 수직으로 만들기 위해 레일과 로봇이 서로 평행하게 정렬되도록 회전을 보정을 수행하고자 하였으며, 이를 위해 소실점(vanishing point) 원리 및 로봇의 회전 자세간의 관계를 활용하였다. 원근법(perspective) 투영에서 소실점은 이미지에서 평행선이 수렴하는 것처럼 보이는 점을 의미한다. 실제로 이 선들은 평행하게 유지되지만 원근법의 효과로 인해 만나는 것으로 보인다. 이 원리를 온실의 레일에도 적용할 수 있으며 Y-Correction 과정의 허프 변환을 통해 레일의 오른쪽, 왼쪽 직선을 추출 및 픽셀 끝까지 연장하고 확장된 직선의 교차점 좌표를 얻음으로써 Fig. 2-13와 같이 소실점의 좌표 (vx, vy)를 얻었다.

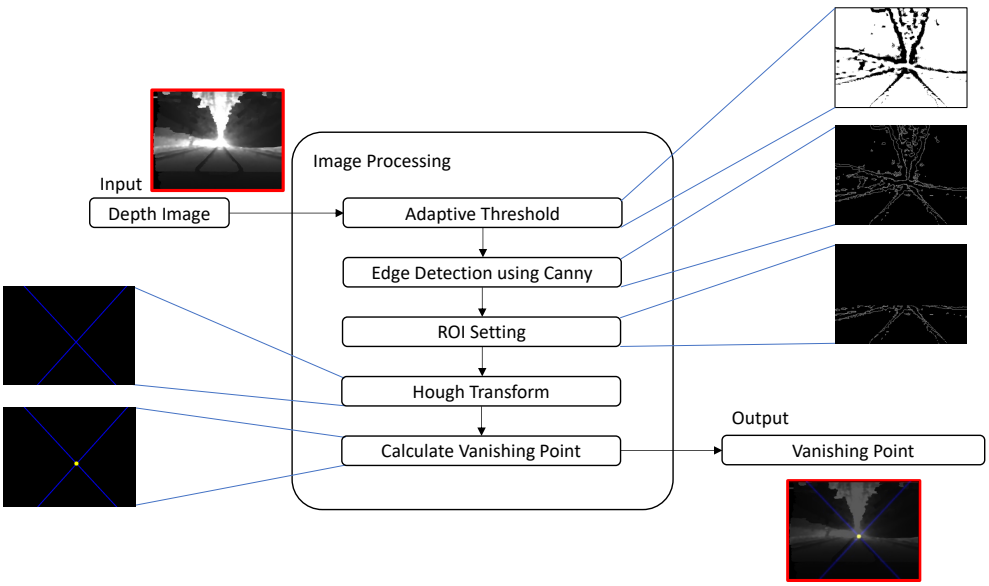
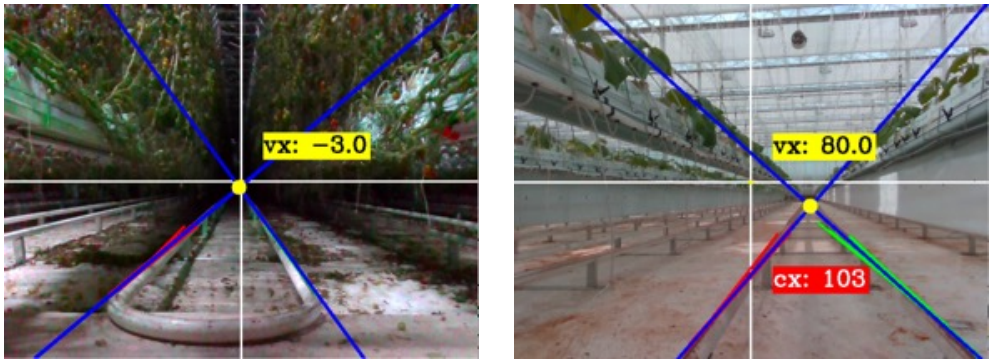


Fig. 2-13 Vanishing point detection algorithm for Yaw-Correction

영상에서 소실점의 위치는 카메라의 시점에 따라 직접 달라지기 때문에 로봇 카메라의 시야각에 따라 레일의 원근법이 결정된다. 이에 따라 Fig. 2-14의 (a)와 같이 로봇이 온실 레일과 완벽하게 평행하게 정렬되면 소실점은 영상의 중앙에 위치하게 된다. 반대로 로봇이 레일에 대해 회전하면 레일의 소실점은 이미지의 중심에서 벗어나게 된다. 예를 들어 Fig. 2-14의 (b)와 같이 로봇이 왼쪽으로 회전하면 소실점이 영상의 오른쪽으로 이동한다.



(a) (b)

Fig. 2-14 Correlation between vanishing point and robot posture: (a) When the rail and the robot are parallel (b) When the robot rotates to the left relative to the rail

식 (2.10)의 vx_{error} 는 Depth 이미지 가로 해상도의 절반 길이와 소실점의 x 좌표인 vx 의 차이다. 이는 로봇을 레일의 중심에 정렬하고 이동하기 위한 피드백 역할을 하며, Fig. 2-15의 vx_{error} 를 최소화하도록 로봇을 회전함으로써 레일과 로봇을 수평이 되도록 맞출 수 있다. 식 (2.11)에서 $velocity_{yaw}$ 는 로봇의 회전 명령을 위한 각속도 값을 의미하며 vx_{error} 가 사전 설정된 임계값 T 의 범위에 들어왔을 때 로봇을 정지시는 원리이다. Y-Correction과 마찬가지로 Depth 이미지의 가로 픽셀 중심이 로봇의 중심과 정렬되어 있다고 가정하였다. 결과적으로 Yaw-Correction을 수행함으로써 다음 작업 경로 탐색을 위한 Y축 이동 중 장애물과의 충돌 가능성을 최소화하고 안정적으로 레일을 검출할 수 있도록 자세를 보정하였다.

$$vx_{error} = \frac{depth_image.width}{2} - vx \tag{2.10}$$

$$velocity_{yaw} = \begin{cases} speed_{yaw}, & if\ vx_{error} > T \\ -speed_{yaw}, & if\ vx_{error} < -T \\ 0, & otherwise \end{cases} \tag{2.11}$$

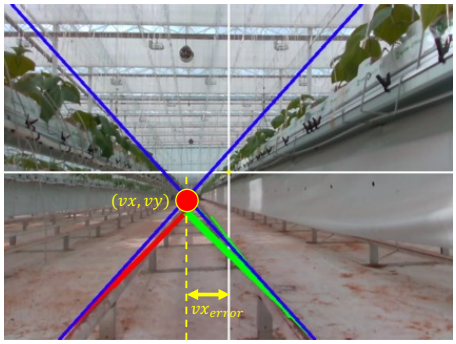


Fig. 2-15 Correction information for Yaw-Correction algorithm

2.2.3 X-Correction

로봇이 후진으로 레일을 빠져나온 뒤, 지면 경계선과 너무 가까운 위치에 정지했을 경우 다음 작업 경로로 이동할 때 거터(gutter)에 부딪힐 수 있고 너무 먼 위치에 정지했을 경우 레일 검출을 위해 Y축 방향으로 이동할 때 검출 정확도가 떨어지게 된다. 따라서 로봇이 지면 경계로부터 항상 일정한 위치에 정지하기 위해서는 Fig. 2-16와 같이 로봇의 위치를 X축 방향으로 조정하기 위한 자세보정 알고리즘을 고안하였다.

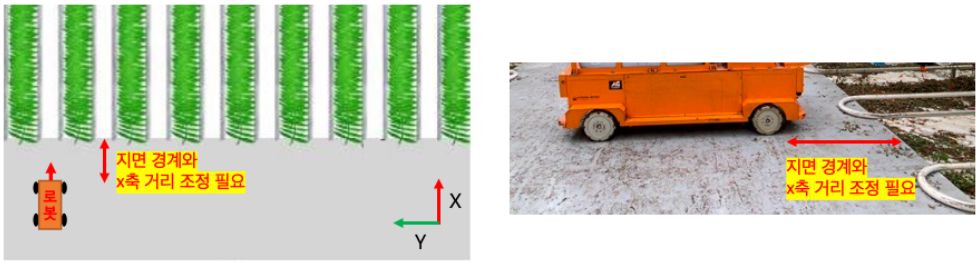
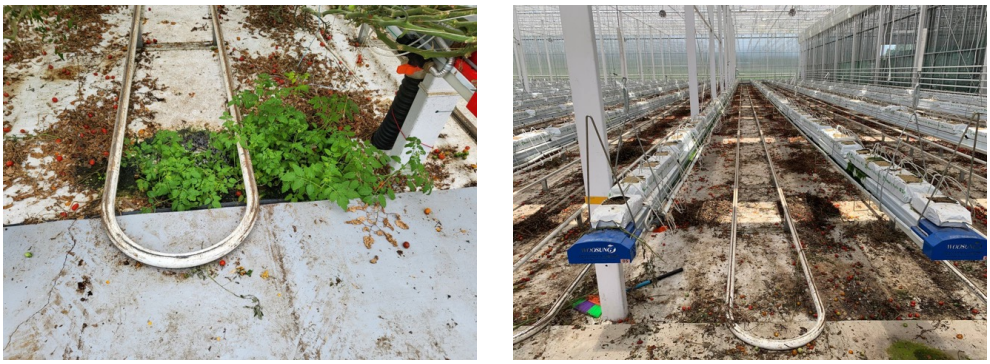


Fig. 2-16 Adjusting the X-axis distance of the greenhouse robot

RGB 이미지를 이용할 경우 조명의 영향을 받을 뿐만 아니라 Fig. 2-17처럼 식물이 경계를 가리거나 오염 등으로 인해 작업 경로의 바닥과 지면의 바닥이 시각적으로 구분이 불가능하여 지면 경계 검출이 어려웠다. 이를 고려해 Fig. 2-18처럼 Depth 이미지를 이용하여 작업 경로 영역과 지면 영역의 경계가 뚜렷하게 구분되도록 하였다.



(a) (b)

Fig. 2-17 Problems with RGB-based ground boundary detection: (a) When the boundary is covered by plants (b) When the boundary is invisible

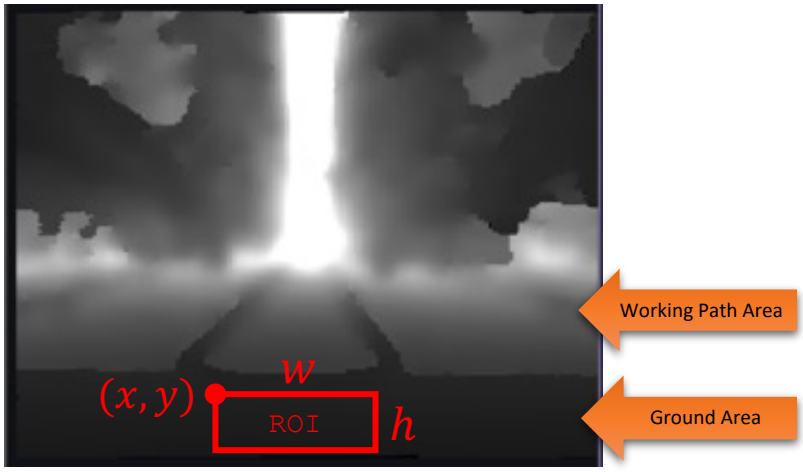


Fig. 2-18 Depth difference between working path area and ground area

Depth 이미지로부터 작업 경로 영역과 지면 영역의 깊이 차이를 계산하기 위해서는 다음과 같은 과정이 필요하다. 먼저 '32FC1' 포맷으로 인코딩된 Depth 이미지에 대해 깊이 측정을 원하는 관심 영역 ROI를 Fig. 2-18의 x, y, w, h로 표현하면 식 (2.8)로 정의할 수 있다. 영역의 깊이 차이 변화를 쉽게 얻기 위해 ROI는 영상의 하단 영역으로 지정했다.

$$roi_image = depth_image[y : y + h, x : x + w] \tag{2.8}$$

다음으로 픽셀 좌표를 정규화하기 위해 x축과 y축을 따라 초점 길이 fx와 fy의 역수를 각각 계산하였다. 이 과정을 통해 픽셀 좌표계는 실제 3D 공간 좌표계로 변환되었다.

$$inv_fx = \frac{1}{fx}$$
$$inv_fy = \frac{1}{fy} \tag{2.9}$$

그런 다음 ROI의 각 픽셀을 탐색하면서 식 (2.10)과 같이 유효한 깊이 값의 합계 Σ와 유효한 픽셀의 개수 n을 계산하였다. 여기서 깊이 값이 0.0보다 크면 유효한 것으로 간주하였다.

$$\sum = \sum_{i=0}^{roi_image.shape[0]-1} \sum_{j=0}^{roi_image.shape[1]-1} value$$
$$n = \sum_{i=0}^{roi_image.shape[0]-1} \sum_{j=0}^{roi_image.shape[1]-1} 1 \tag{2.10}$$

그 다음 식 (2.11)처럼 유효한 깊이 값의 합계 Σ를 n으로 나누고 단위 변환을 위해 0.001을 곱해 ROI의 평균 깊이 값 $point_z$를 얻었다.

$$point_z = \frac{\Sigma}{n} \times 0.001 \tag{2.11}$$

또한 픽셀 좌표계와 3D 공간 좌표계 간의 관계식을 사용하여 식 (2.12)와 같이 $point_x$와 $point_y$를 계산하였다. $point_x$와 $point_y$는 ROI의 중심 좌표 $\left(x + \frac{w}{2}\right)$ 및 $\left(y + \frac{h}{2}\right)$를 실제 3D 공간 좌표계로 보낸 미터 단위의 좌표를 의미한다. 여기서 cx와 cy는 Depth 카메라의 광학적 중심을 나타내며 fx와 fy와 마찬가지로 카메라의 제조업체에서 제공하거나

Camera Calibration을 통해 얻을 수 있는 내부 파라미터이다. ROI의 중심에서 cx 및 cy를 각각 빼고 평균 깊이인 $point_z$를 곱한 뒤 inv_fx와 inv_fy를 각각 곱해주면 ROI의 중심 좌표가 3D 공간 좌표계 상으로 투영되어 Depth 카메라로부터 x축과 y축의 상대적 거리를 얻을 수 있었다.

$$point_x = \left(\left(x + \frac{w}{2}\right) - cx\right) \times point_z \times inv_fx$$
$$point_y = \left(\left(y + \frac{h}{2}\right) - cy\right) \times point_z \times inv_fy \quad (2.12)$$

여기서 식 (2.13)을 통해 3D 공간상의 투영된 ROI의 중심으로부터 원점까지의 유클리드 거리 roi_depth를 얻을 수 있고, 이는 Depth 카메라에서 ROI에 해당하는 실제 3D 공간상의 거리를 의미한다.

$$roi_depth = \sqrt{{point_x}^2 + {point_y}^2 + {point_z}^2} \quad (2.13)$$

마지막으로 ROI에 대한 깊이 측정 값 roi_depth와 작업 경로와 지면 영역의 전환에 대한 임계값 T_{area}를 이용해 식 (2.14)의 조건을 만족할 때까지 로봇은 후진하도록 하였다. 이를 기반으로 Fig. 2-19의 그래프 같이 작업 경로와 지면 영역에 대해 뚜렷한 깊이 차이가 발생하며 경험적으로 T_{area}를 사전에 설정하였다.

$$velocity_{\mathrm{X}} = \begin{cases} -speed_{\mathrm{X}}, & if\ roi_depth \geq T_{area} \\ 0, & otherwise \end{cases} \quad (2.14)$$

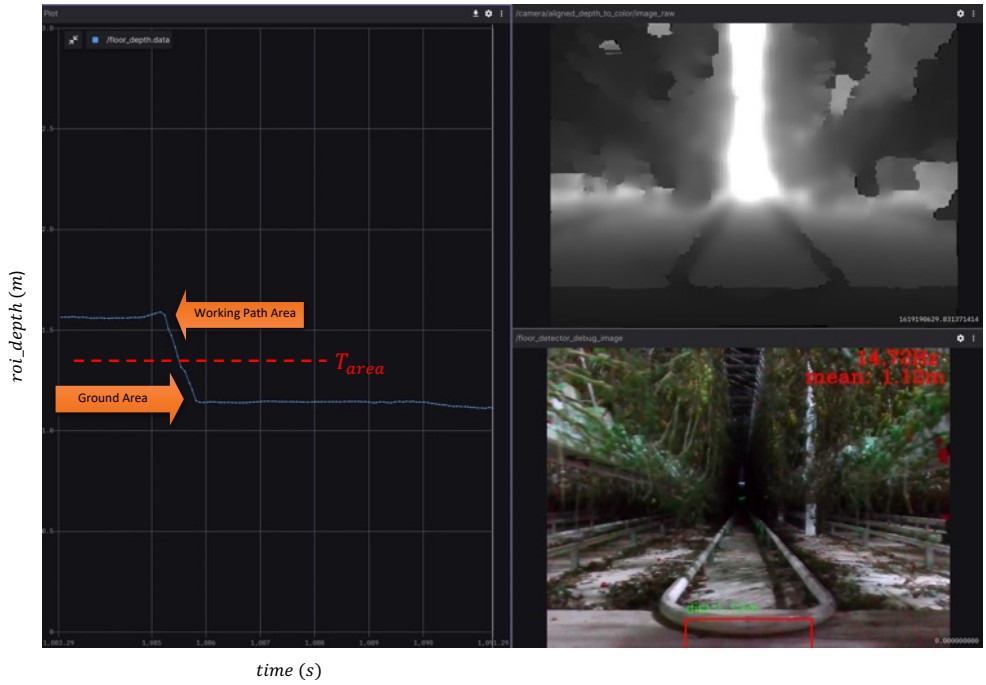


Fig. 2-19 Correction information for X-Correction algorithm

결과적으로 로봇이 작업 경로에서 빠져나온 뒤, 지면 경계로부터 항상 일정한 위치에 정지하도록 하여 구조물과의 잠재적 충돌 위험을 최소화하고 하드웨어 손상을 방지하도록 하였다. 또한 X-Correction 수행 후 일정한 위치에서 Y-Correction 작업을 수행하게 되면, 다음 작업 경로 진입을 위한 레일 검출에 대해 안정적인 성능을 보장할 수 있도록 하였다.

2.3 주행 알고리즘

로봇이 Fig. 2-20과 같이 온실의 모든 작업 경로에 대해 주행하기 위해서는 작업 경로 탐색 진입 및 탈출 과정이 필요하다. 이 과정에서 Y-Correction, Yaw-Correction 및 X-Correction을 수행함으로써 로봇의 적절한 정렬 및 자세 보정을 보장하므로 주행 중 주변 구조물과의 충돌 및 작업 경로 진입에 대한 부정확성을 낮춘다.

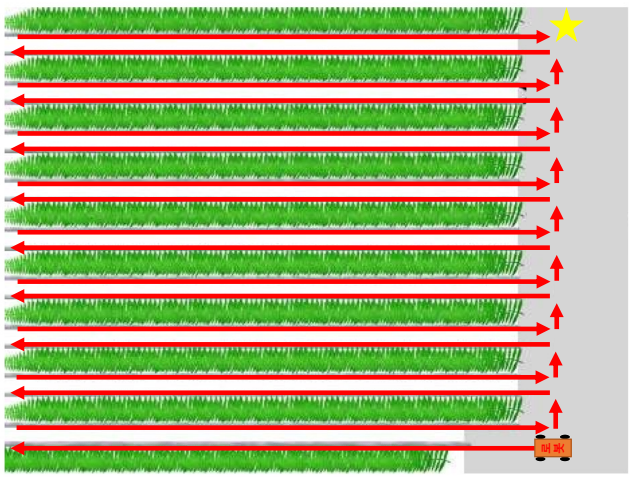


Fig. 2-20 Full path for greenhouse environment driving

로봇이 온실 전체 영역에 대해 주행하기 위한 ROS 2 기반의 노드 구성도는 Fig. 2-21과 같다. 먼저 Depth Camera Handler Node, Proximity Sensor Handler Node 및 1D LiDAR Handler Node의 주요 역할은 로봇에 부착된 Depth 카메라, 근접 센서 그리고 1D LiDAR에서 데이터를 수집하는 것이다. 또한 데이터의 수집을 위한 초기 감도 조정, 측정 범위 변경 등의 센서 설정 구성을 담당하며, 센서 데이터에 대한 오류 및 예외를 처리하는 역할을 한다. 수집된 원시 데이터(raw data)는 다른 노드에서 사용할 수 있는 형식(format)으로 일부 가공 과정을 거쳐 전달된다. 한 노드에서 다른 노드로 전달되는 데이터는 ROS 2의 토픽(topic) 형태로 전달된다. 먼저 Depth Camera Handler Node에서 전송하는 토픽인 /camera_info는 Depth 카메라의 왜곡(distortion) 계수, 내부 파라미터(intrinsic parameter) 정보를

포함하며, /depth_image는 해상도와 Depth 이미지를 포함한다. Proximity Sensor Handler Node에서는 로봇의 전면 및 후면에 부착되어 있는 4개의 근접 센서의 측정 값을 바탕으로 로봇이 레일 위에 있는지 여부를 판단한다. 이 노드의 /on_rail 토픽은 로봇이 레일 위에 있을 경우 참(True), 그렇지 않을 경우 거짓(False)이 된다. 한편 1D LiDAR Handler Node에서 전송하는 /front_range에는 로봇 전방에 부착된 1D LiDAR에서 전방 장애물 또는 벽까지 측정한 거리 정보가 포함된다.

온실 환경 주행 프로세스는 Driving Node에서 처리되며, 주행 과정 중 작업 경로 검출과 로봇 자세 보정을 위한 요청인 /correction_request를 X-Y-Yaw Correction Node로 전송한다. /correction_request는 X-Correction, Y-Correction 그리고 Yaw-Correction 중 어떤 요청인지에 대한 정보가 포함되어 있으며 X-Y-Yaw Correction Node에서는 요청에 대한 기능 수행 후 다시 Driving Node에 결과를 전달한다. 결과 정보인 /correction_result는 자세 보정에 대한 성공 여부를 포함하고 있으며, 요청에 대한 결과를 수신하기 전까지 Driving Node는 유휴(idle) 상태로 대기하며 결과 수신 시 이어서 다음 동작을 위한 명령을 수행한다. X-Y-Yaw Calibration Node와 Driving Node에서 필요한 제어 명령 토픽 /velocity_command는 Motor Controller Node로 전달되며 이 노드에서 요청 받은 목표 속도 값을 RPM으로 환산하여 모터 드라이버로 전달한다.

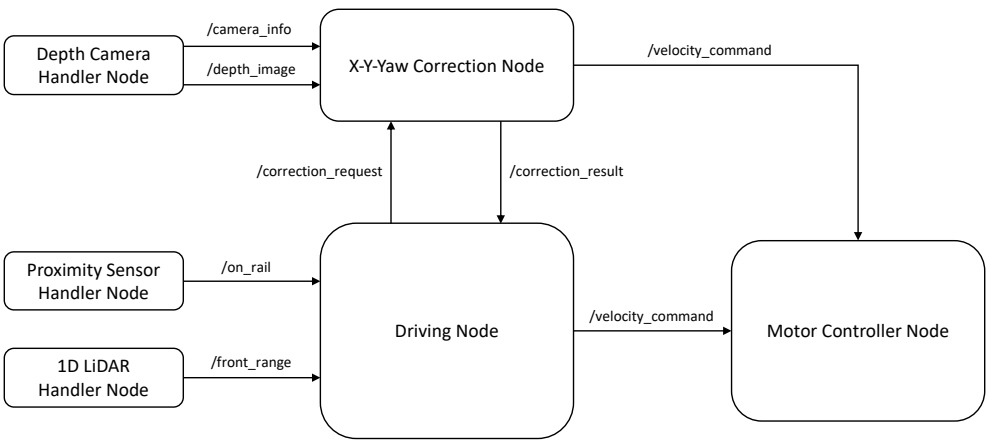


Fig. 2-21 System node diagram based on ROS 2

Fig. 2-22는 Driving Node에서 처리되는 주행 프로세스를 플로우 차트로 나타낸 것이다. 로봇은 온실 지면의 초기 작업 시작 위치에서 Y축 방향으로 이동하며 Y-Correction을 수행한다. 레일 검출과 동시에 안정적으로 작업 경로에 진입할 수 있도록 로봇의 정중앙과 레일의 정중앙을 일정 범위 내에서 정렬 후 정지한다. 이후 로봇의 내부 바퀴가 레일에 자연스럽게 맞춰 들어갈 수 있도록 사전에 설정된 전진 속도의 10%로 전진한다. 전진하는 중 근접 센서에 의해 레일이 감지되면 로봇의 운동학을 내부 바퀴 구동용으로 전환한다. 같은 속도 명령에 대해 내부 바퀴와 외부 바퀴가 요구하는 RPM양이 다르기 때문에 지면 및 작업 경로에 따른 운동학 모델 적용이 필요하다. 레일 위에서는 전진 속도를 정상 속도로 재설정하고 작업 경로 끝까지 이동한다. 이 때 1D LiDAR로 전방 거리를 측정하여 작업 경로의 끝을 확인하고 레일 끝에 도달하면 로봇을 정지시킨다. 다음으로 레일에서 빠져나오기 위해 로봇은 근접 센서를 통해 레일 감지 여부를 확인하면서 후진한다. 레일이 감지되지 않는 순간 레일에서 빠져나온 것으로 간주하고 운동학 모델을 외부 바퀴용으로 전환한다. 이와 동시에 외부 바퀴가 지면 경계를 빠져나올 때, 차체의 충격과 레일에 대한 로봇 자세의 틀어짐을 최소화하기 위해 후진 속도를 기존 속도의 10%로 재설정한다. 후진 과정에서 로봇을 지면 경계로부터 항상 일정한 위치에 정지시키기 위해 X-Correction을 수행한다. 이후 로봇의 자세를 지면 경계와 수직으로 만들기 위해 레일과 로봇이 서로 평행하게 정렬되도록 Yaw-Correction을 수행한다. 이 두 가지 로봇 자세 보정 알고리즘 수행을 통해 다음 작업 경로로 이동할 때 거터(gutter)에 부딪힐 가능성을 낮추고 레일 검출에 대한 안정적인 성능을 보장할 수 있었다. 만약 현재 작업 경로가 마지막일 경우 주행을 종료하고, 그렇지 않을 경우 Y-Correction 작업부터 반복한다. 이 주행 프로세스를 통해 로봇은 온실 내 모든 작업 경로에 대해 안정적으로 주행할 수 있었다.

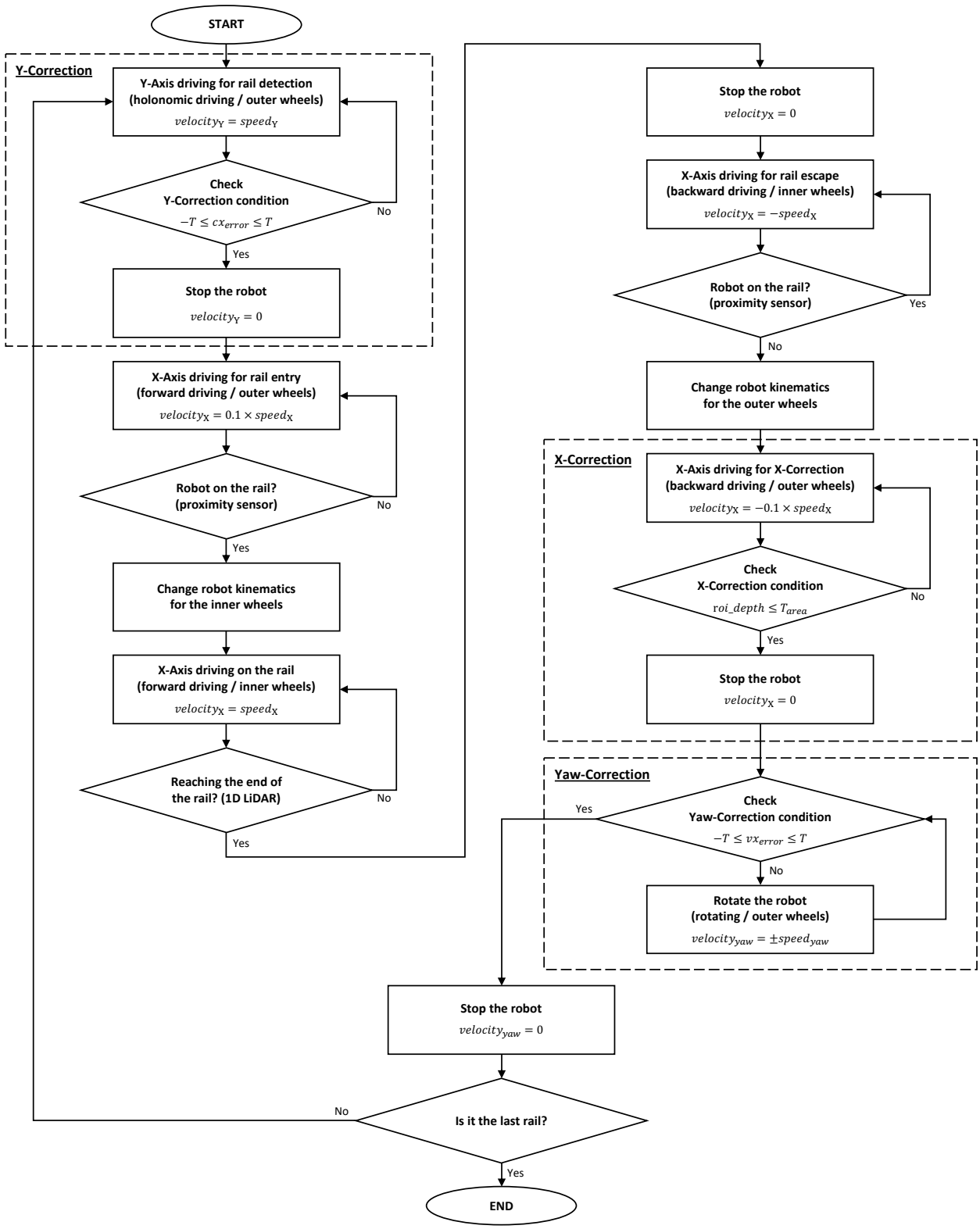


Fig. 2-22 Flowchart of full path driving algorithm for greenhouse robot

2.4 현장 평가를 위한 실험 설계

2.4.1 개요

본 연구에서 개발한 온실용 로봇의 작업 경로 검출 및 로봇 자세 보정 알고리즘을 평가하기 위해 전체 경로 주행 실험을 수행하였다. Fig. 2-23은 실험에 사용된 자율주행 온실용 로봇과 평가 환경을 보여준다. 성능 실험 실시 장소는 전라남도 나주시에 위치한 전라남도농업기술원 에너지 자립형 스마트팜 연구동이며 25m 길이의 레일을 포함한 작업 경로 20개가 존재한다. 시작 위치에서 Fig. 2-20과 같이 모든 작업 경로에 대해 온실 벽 끝까지 주행을 하며 마지막 레일에서 빠져나온 뒤 정지하는 방식이다. 여기서 조명 조건이 Y-Correction, X-Correction, Yaw-Correction에 미치는 영향을 살펴보기 위해 주간/야간에 대해 각 2회 반복 실험을 수행하였다.

Fig. 2-23 Test field and greenhouse robot for evaluation

2.4.2 전체 경로 주행 시나리오 검증

전체 경로 주행에 대해 각 작업 경로 마다 수행하는 Y-Correction, X-Correction, Yaw-Correction에 대해 알고리즘 성능을 평가하고 로봇이 레일의 끝에 도달했을 때 정지한 위치를 측정하였다. 주행 알고리즘 중 평가를 위한 측정이 필요한 시점마다 로봇에게 일시정지 신호를 주고, 측정 완료 후 다시 작동을 재개하여 전체 주행 시나리오에 영향 없이 성능을 평가하였다. Fig. 2-22의 주행 프로세스에서 주행 속도에 해당하는 $velocity_{X}$, $velocity_{Y}$, $velocity_{yaw}$의 적용 속도 $speed_{X}$, $speed_{Y}$, $speed_{yaw}$는 각각 $1.50\ m/s, 0.15\ m/s$ 그리고 $0.10\ rad/s$로 설정하였다.

먼저 로봇이 다음 작업 경로의 레일을 찾기 위해 Y축 방향으로 이동할 때, Y-Correction을 통해 레일 검출과 동시에 로봇의 정중앙과 레일의 정중앙이 일정 범위 내에서 정렬시켜 로봇이 안정적으로 작업 경로에 진입시킨다. Y축으로 이동 중 로봇 정지를 위한 식 (2.9)의 임계값 T를 25 pixel로 설정하였고, Y-Correction를 수행 결과에 대해 Fig. 2-24와 같이 레일의 정중앙에서 로봇의 정중앙까지 거리를 측정하였다. 이는 레일 기준 로봇의 위치 오차를 의미하며, 레일의 정중앙을 기준으로 ±150mm 이내로 로봇이 정렬되었을 때 안정적으로 작업 경로로 진입할 수 있었다.

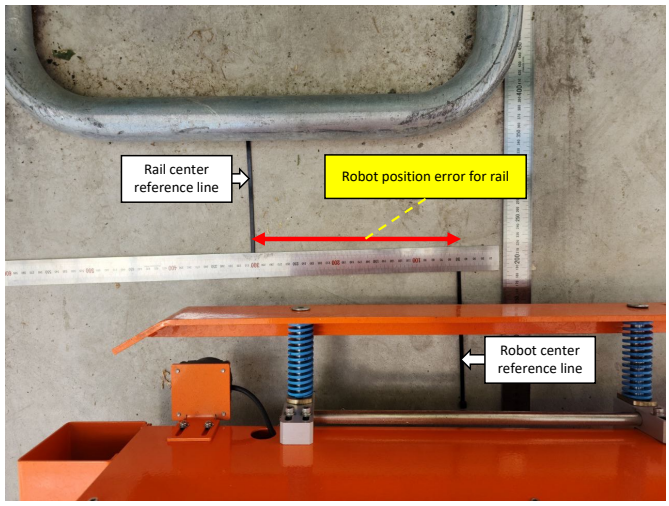


Fig. 2-24 Robot position error measurement criteria for rail

다음으로 로봇이 후진으로 레일을 빠져나온 뒤, X-Correction을 통해 로봇을 지면 경계로부터 항상 일정한 위치에 정지시킨다. 정지 기준선은 로봇이 Y축으로 이동 시 거터와의 충돌 가능성을 줄이고 안정적으로 레일을 검출할 수 있는 거리인 900mm로 설정하였다. 후진 중 로봇 정지를 위한 식 (2.14)의 영역 전환 임계값 T_{area} 를 1,300mm로 설정하고, X-Correction를 수행 결과에 대해 Fig. 2-25와 같이 정지 기준선에서 로봇의 실제 정지 위치까지 거리를 측정하였다. 이는 로봇 정지 위치 오차를 의미하며, 정지 기준선에 얼마나 가깝게 로봇이 멈췄는지에 대한 척도가 된다.

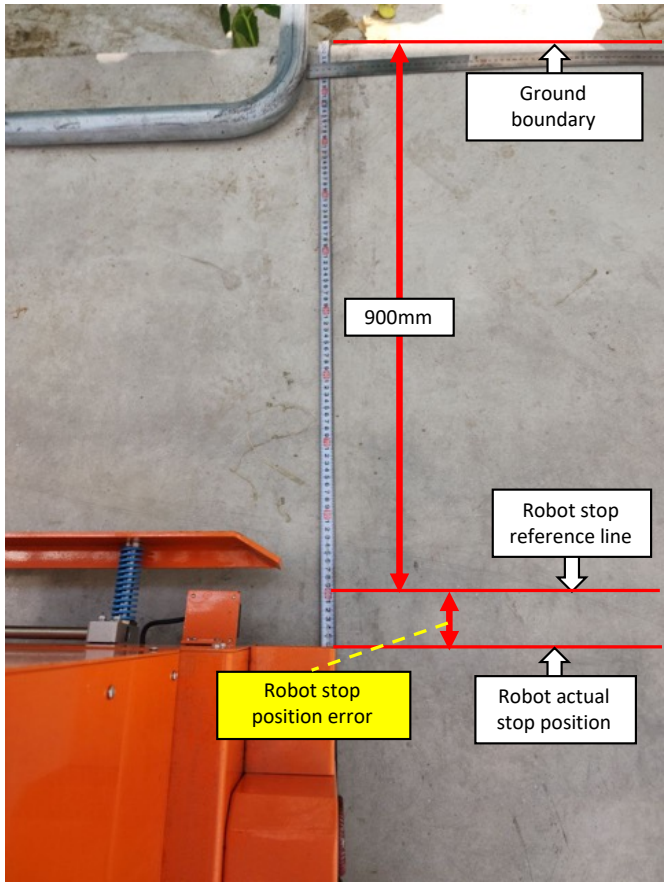


Fig. 2-25 Robot stop position error measurement criteria for ground boundary

X-Correction을 수행한 후 Yaw-Correction을 통해 로봇을 회전시켜

레일과 수직이 되도록 자세를 수정한다. 회전 보정 중 로봇 정지를 위한 식 (2.11)의 임계값 T를 Y-Correction과 마찬가지로 25 pixel로 설정하였고, Yaw-Correction 수행 결과에 대해 Fig. 2-26과 같이 레일과 로봇의 평행한 정도를 측정하였으며 측정 각도가 0° 에 가까울수록 레일과 로봇이 평행한 것으로 본다. Yaw-Correction 수행 전과 후의 각도를 비교해 보정의 영향을 확인하였다. 측정한 각도는 레일 기준 로봇의 회전 오차를 의미하며, 레일을 기준으로 ±4° 이내로 로봇이 정렬되어야 다음 작업 경로 진입에 대한 후속 작업을 안정적으로 수행할 수 있었다.

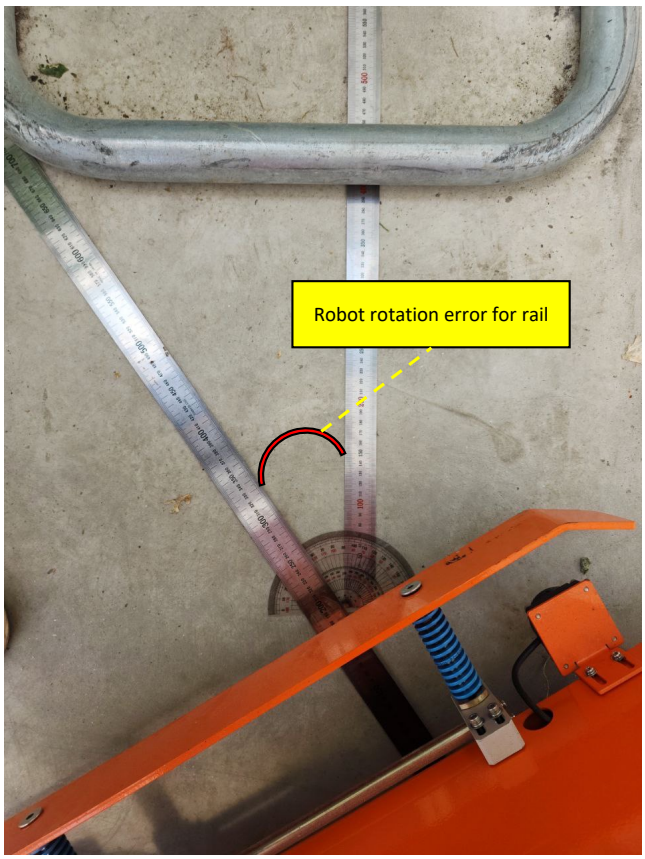


Fig. 2-26 Robot rotation error measurement criteria for rail

Y-Correction, X-Correction, Yaw-Correction 알고리즘 모두 20개의 작업 경로에 대해 수행되었으며, 각 시나리오에 대해 보정 알고리즘 성능을 비교 평가하기 위해 평균 제곱근 오차를 이용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 작업 경로 검출 및 로봇 자세 보정

3.1.1 Y-Correction 결과 분석

Fig. 3-1에서 볼 수 있듯이 cx_{error}는 레일 검출 전 0을 유지하다가 Y-Correction에 의해 레일이 검출되면 초기 픽셀 오차를 갖게 된다. 이후 Y축으로 계속 이동하면서 계단식으로 오차를 줄여 나가게 되고 식 (2.9)에서 사전 설정된 임계값 T 의 범위에 들어왔을 때 로봇이 레일의 정중앙에 정렬되도록 정지하였다. 임계값 T를 25 pixel 보다 작게 설정할 경우 로봇 정중앙을 레일 정중앙에 더욱 가깝게 멈출 수 있었지만, 레일의 검출 정확도에 따라 레일 중앙을 기준으로 좌우 진동하는 불안정한 보정 동작을 보였다. 로봇이 좌우 진동하지 않는 범위 내에서 레일 정중앙 근처에 정지할 수 있도록 하는 적절한 임계값 T를 선택해야 한다.

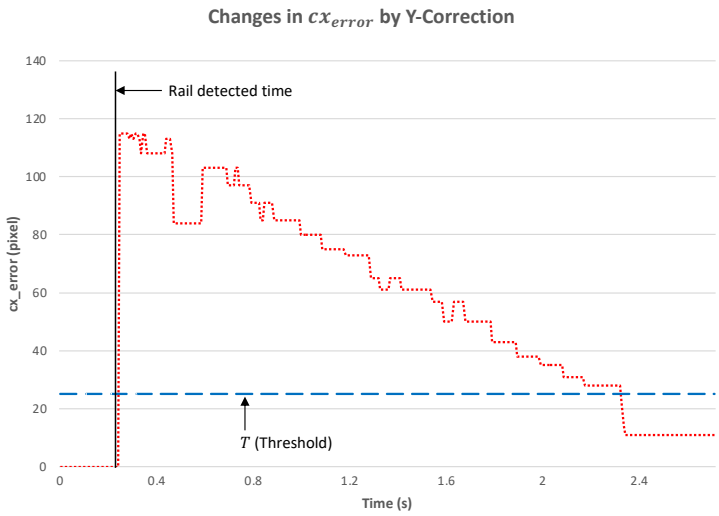


Fig. 3-1 Changes in cx_{error} by Y-Correction

결과적으로 로봇은 20개의 레일에 대해 네 번의 실험에서 모두 안정적으로 작업 경로에 진입하였다. Fig. 3-2에서 볼 수 있듯이 모든 결과에

대해 레일의 정중앙을 기준으로 150mm 이내로 정지하였고 이후 사전에 설정된 속도의 10%로 전환함으로써, 로봇의 내부 바퀴가 레일에 자연스럽게 맞춰 들어갈 수 있었다. Y-Correction 수행 후 레일 정중앙에 대한 로봇 위치 오차의 RMSE는 2회의 주간 실험에 대해 각각 42.74mm, 55.75mm였으며 2회의 야간 실험에 대해 각각 23.62mm, 17.52mm였다.

Table. 3-1 RMSE of robot position error for rail

	Test1 (Daytime)	Test2 (Daytime)	Test3 (Nighttime)	Test4 (Nighttime)
RMSE (mm)	42.74	55.75	23.62	17.52

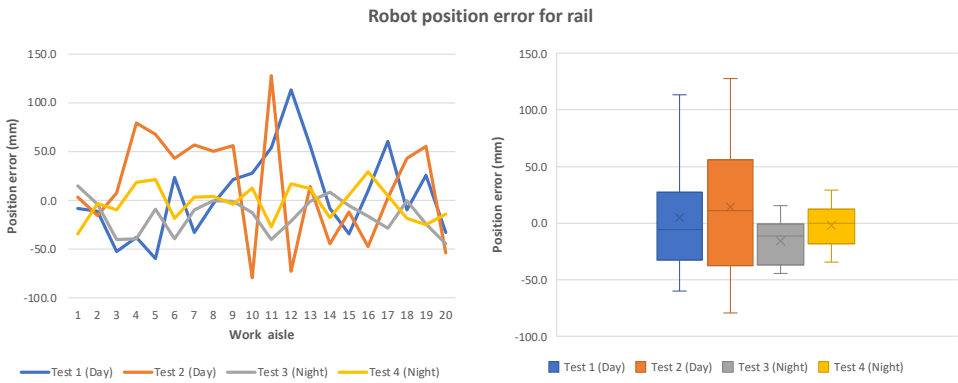
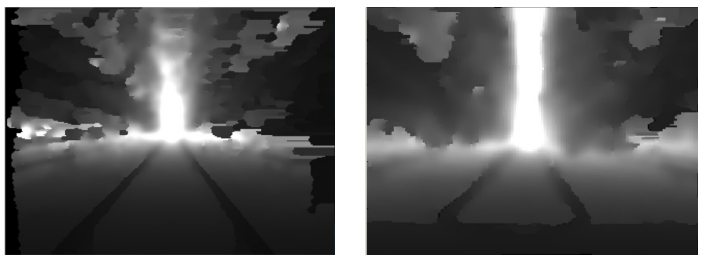


Fig. 3-2 Results for Y-Correction

Table. 3-1의 결과를 보면 전반적으로 주간보다 야간에 더 안정적으로 레일을 검출하고 작업 경로에 대해 로봇을 잘 정렬할 수 있었다. 이는 레일 검출 및 보정에 사용되는 Depth 이미지의 적외선이 주간의 햇빛의 영향을 받기 때문인 것으로 분석된다. 본 연구에 사용되는 Depth 카메라인 D435는 IR 프로젝터를 사용하여 적외선 패턴을 쏘고 두 개의 IR 센서의 영상에서 투영된 적외선 패턴의 시차(disparity)를 기준으로 깊이를 계산한다. 여기서 햇빛은 상당한 양의 적외선을 포함하고 있기 때문에 D435이 쏘는 적외선 패턴을 방해할 수 있다. 또한 기상 조건이나 시간의 경과, 태양의 위치 등으로 인해 조명 조건이 급격하게 달라질 수 있는 낮과 달리 야간 조명

조건은 대체로 일정하다. 이러한 간섭으로 인해 주간에는 깊이 측정이 부정확해질 수 있지만 야간에는 안정적인 조명으로 인해 노이즈가 적은 이상적인 Depth 이미지를 얻을 수 있었다. 실제로 Fig. 3-3처럼 야간의 경우 주간에 비해 두껍고 노이즈가 적은 레일의 Depth 이미지를 얻을 수 있었고 이는 Y-Correction 성능에 큰 영향을 미쳤다.



(a) (b)

Fig. 3-3 Depth image comparison for rail: (a) Daytime (b) Nighttime

3.1.2 X-Correction 결과 분석

로봇은 작업 경로를 빠져나와 지면 경계로부터 항상 일정한 위치에 정지하기 위해 X-Correction을 수행하였다. 후진 중 작업 경로와 지면 영역의 전환에 대한 임계값인 T_{area}와 사전에 정의된 ROI의 평균 깊이인 roi_depth를 비교하였고, 로봇은 roi_depth가 T_{area} 보다 작아지는 시점에서 정지 기준선인 900mm 지점에서 안정적으로 정지하였다. Table. 3-2는 X-Correction 수행 후 지면 경계에 대한 로봇 정지 위치 오차의 RMSE를 나타내며, 2회의 주간 실험에 대해 각각 20.24mm, 21.21mm였으며 2회의 야간 실험에 대해 각각 17.13mm, 20.48mm였다. 로봇 정지 위치 오차는 전반적으로 주간 및 야간에 큰 영향을 받지 않았다. 이는 Depth 이미지의 하단면으로 설정하였던 ROI에 대해 평균 값을 활용하였기 때문에 비교적 안정적인 roi_depth를 얻을 수 있었던 것으로 분석된다. 즉 주간 및 야간에 상관 없이 온실에서는 작업 경로와 지면 영역에 대해 뚜렷한 깊이 차이가 발생한다. ROI를 넓게 가져갈수록 안정적인 roi_depth를 얻을 수 있지만 연산시간이 늘어나게 되며 변경한 영역에 대해 임계값 T_{area}를 재설정해야

한다. Fig. 3-4의 최대 및 최소 오차에서 확인할 수 있듯이 모든 경우에 대해 정지 기준선으로부터 ±6mm 이내로 로봇은 정지하였으며, 이를 통해 후속 동작 시 구조물과의 잠재적 충돌 위험을 최소화하고 하드웨어 손상을 방지할 수 있었다.

Table. 3-2 RMSE of robot stop position error for ground boundary

	Test1 (Daytime)	Test2 (Daytime)	Test3 (Nighttime)	Test4 (Nighttime)
RMSE (mm)	20.24	21.21	17.13	20.48

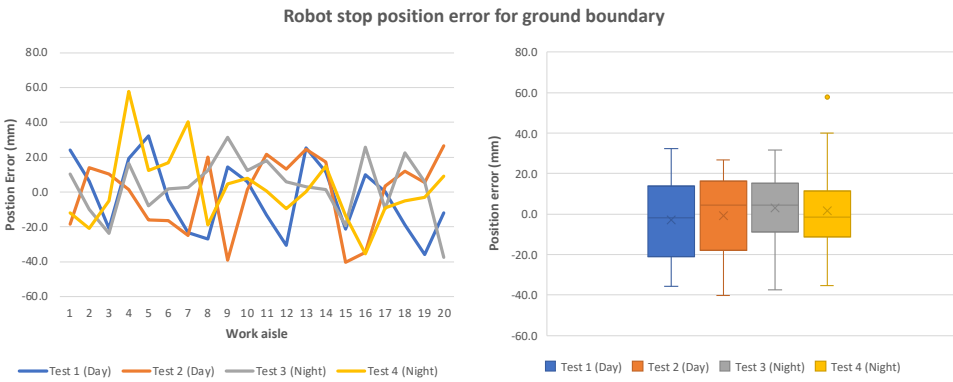


Fig. 3-4 Results for X-Correction

3.1.3 Yaw-Correction 결과 분석

X-Correction 수행 직후 Yaw-Correction을 수행하면 Fig. 3-5와 같이 소실점을 바탕으로 레일에 대한 로봇 회전 오차 vx_{error}가 결정된다. 이후 소실점이 Depth 이미지의 가로 픽셀 중심에 오도록 로봇을 회전함으로써 레일과 로봇을 수평이 되도록 맞출 수 있었다. 이 과정에서 vx_{error}는 계단식으로 감소하게 되고 식 (2.11)에서 사전 설정된 임계값 T의 범위에 들어왔을 때 로봇은 안정적으로 정지하였다. Y-Correction과 마찬가지로 임계값 T를 25 pixel 보다 작게 설정할 경우 레일의 검출 정확도에 따라 로봇이 레일과 수평을 정확하게 맞추기 위해 시계 및 반시계 방향으로 반복

회전하는 불안정한 보정 동작을 보였다. 로봇이 2초 이내로 레일과 수평이 되도록 자세를 보정할 수 있게 하는 적절한 임계값 T를 선택해야 한다.

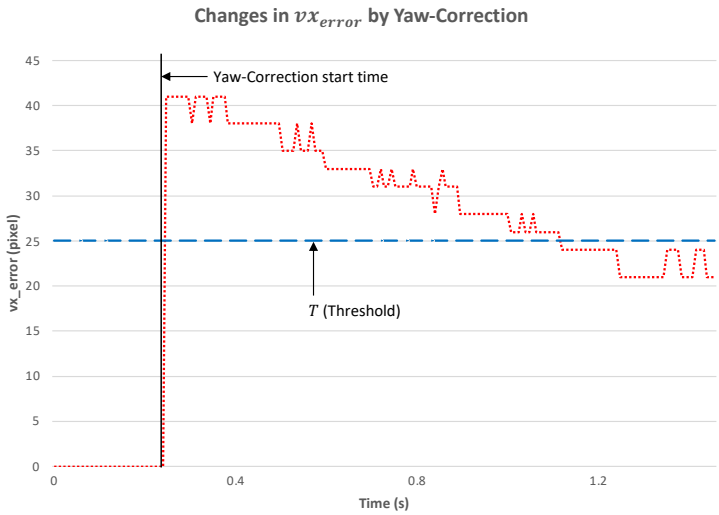


Fig. 3-5 Changes in vx_{error} by Yaw-Correction

Table. 3-3에서 확인할 수 있듯이 후진을 통해 작업 경로를 빠져나왔을 때, 4가지 실험에서 레일에 대한 로봇 회전 오차의 RMSE가 모두 2° 가 넘음을 확인할 수 있었다. 특히 Fig. 3-6 (a)의 Test 2 (Daytime)에서는 로봇이 레일에 대해 4° 이상 틀어진 경우가 많았으며, 이대로 Y축으로 다음 작업 경로를 검출하기 위해 이동할 경우 각도에 따라 거터에 부딪히거나 지면 경계와 점점 멀어져 레일 검출 정확도가 떨어질 수 있다.

하지만 Yaw-Correction 수행 후에는 로봇 회전 오차의 RMSE는 모두 1° 이상 감소하여 최종적으로 주간 실험에 대해 각각 1.28° , 1.39° 그리고 야간 실험에 대해 각각 1.10° , 1.27° 로 나타났다. 또한 Fig. 3-6의 박스 플롯 변화에서 확인할 수 있듯이 Yaw-Correction 수행 전후로 로봇 회전 오차의 크기와 그 편차가 뚜렷하게 감소하였다. 모든 실험에서 ±4° 이내로 로봇이 레일에 대해 정렬되었으며 이를 통해 다음 작업 경로 진입을 위한 후속 작업을 안정적으로 수행할 수 있었다.

Table. 3-3 RMSE of robot rotation error for rail

	RMSE before Yaw-Correction (°)	RMSE after Yaw-Correction (°)
Test 1 (Daytime)	2.35	1.28
Test 2 (Daytime)	2.67	1.39
Test 3 (Nighttime)	2.46	1.10
Test 4 (Nightime)	2.54	1.27

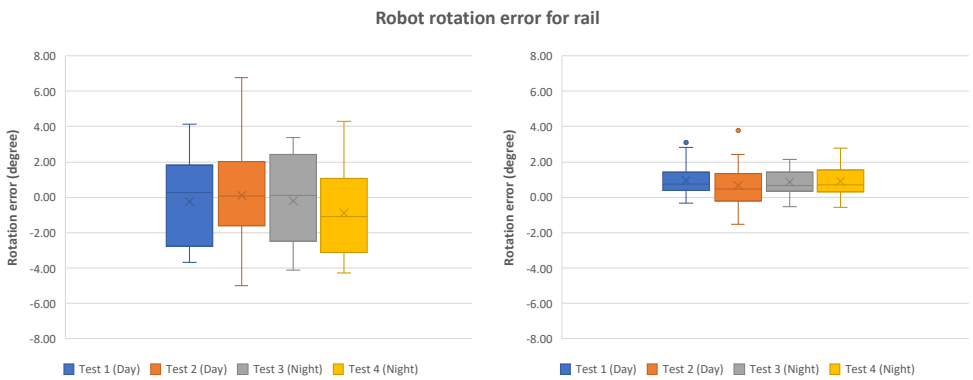


Fig. 3-6 Results for Yaw-Correction: (a) Before (b) After

3.2 전체 경로 주행 결과 분석

시나리오당 20개의 작업 경로에 대해 Y-Correction, X-Correction, Yaw-Correction의 수행하면서 안정적으로 레일을 타고 빠져나올 수 있었다. 또한 각 작업 경로마다 1D LiDAR를 통해 온실 벽까지 남은 거리를 파악할 수 있었으며 로봇은 전체 경로 주행 시나리오대로 레일 끝까지 모두 도달 후 후진하였다. 작업 경로에서 빠져나온 뒤에는 로봇 방향 전환 없이 다음

작업 경로를 찾아 Y축으로 이동하기 때문에 차체 조향 시 생길 수 있는 단점을 줄이고 주행 복잡성을 최소화할 수 있었다. 특히 Y-Correction 수행 후 작업 경로에 완전히 진입하기 전까지 전진 속도를 사전에 설정된 속도의 10%로 전환함으로써, 로봇의 내부 바퀴가 레일에 자연스럽게 맞춰 들어갈 수 있었다. 마찬가지로 후진 도중 근접 센서를 통해 레일이 감지되지 않는 순간 기존 속도의 10%로 재설정함으로써, 외부 바퀴가 지면 경계를 빠져나올 때 차체의 충격과 레일에 대한 로봇 자세의 틀어짐을 최소화할 수 있었다. 이는 로봇 운영을 안정적으로 할 수 있음과 더불어, 장기적인 운영 관점에서도 바퀴의 마모나 손상을 줄이고 충격에 의한 치명적인 고장을 막을 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 기존에 연구되었던 온실용 로봇의 한계를 극복하고, 단순 명령을 통한 주행이 아닌 자율 주행 농작업을 위한 작업 경로 검출 및 추종 기술을 개발하였다. 이를 검증하기 위해 온실 환경에서 로봇이 안정적이고 자율적인 농작업을 수행할 수 있도록 작업 경로 검출 알고리즘 성능, 다음 작업 경로 진입을 위한 로봇 자세 보정 알고리즘 성능을 분석하고 자율 농작업을 위한 주행 시나리오 평가를 통해 실제 현장 적용 가능성을 확인하였다.

현장 실험 결과 Y-Correction을 통해 레일 검출과 동시에 로봇의 정중앙이 레일의 정중앙에 대해 150mm 이내에서 큰 편차 없이 정렬되었으며 안정적으로 작업 경로에 진입할 수 있었다. 레일에 대한 로봇의 위치 오차는 17.52mm에서 55.75mm 사이의 RMSE였으며, 야간에 더 나은 성능을 보였다. 한편 X-Correction을 통해 로봇이 작업 경로를 빠져나온 후 모든 실험에서 평균 19.76mm의 RMSE 오차를 가진 채로 지면 경계로부터 900mm 위치에 정지하였으며, 구조물과의 잠재적 충돌 위험을 최소화하고 다음 작업 경로 탐색을 할 수 있었다. Yaw-Correction도 마찬가지로 로봇이 레일과 수평이 되도록 자세를 보정하면서 후속 작업을 안정적으로 수행할 수 있도록 하였다. Yaw-Correction 수행 전에는 1.10° ~2.67° 범위의 RMSE를 보였으며, 보정 후에는 1.28° ~1.39° 범위로 감소하였고 모든 실험의 레일에 대해 ±4° 이내로 정렬하였다.

전체 시나리오 검증 결과 로봇은 실험 설계 요건을 모두 만족하였으며 대체로 야간에 레일을 안정적으로 검출하고 자세 보정을 잘 수행하였음을 보여주었다. 이는 레일 검출 및 로봇 자세 보정에 사용되는 Depth 이미지가 야간에 햇빛으로부터 적외선 간섭의 영향을 덜 받기 때문으로 볼 수 있다. 또한, 로봇은 회전 없이 한 작업 경로에서 다음 작업 경로로 성공적으로 이동할 수 있어 조향 시 발생할 수 있는 잠재적인 문제를 줄이고 주행 프로세스를 단순화할 수 있었다. 주행 과정 중 지면과 작업 경로 경계 부분에서 속도를 조절함으로써 바퀴에 가해지는 충격을 최소화하고 레일에 대한 로봇 자세의 틀어짐을 완화하여 바퀴의 마모나 손상을 최소화하고

수명을 증가시킬 수 있을 것으로 기대된다. 결과적으로 개발된 시스템을 통해 대규모 온실의 조도 변화와 태양에 입사각의 영향을 크게 받지 않고 로봇의 야간 작업을 가능하도록 하며, 저비용 센서들을 이용해 개방된 지면 영역과 작물이 우거진 작업 경로 영역을 공간적으로 구분하고 온실 전체 영역에 대해 자율적으로 주행하였다.

향후 연구 에서는 인공지능(AI)을 통해 더욱 다양한 조명 조건을 처리하고 레일 감지에서의 강건성을 향상시키기 위한 연구가 포함될 수 있다. 본 연구에서 개발된 안정적인 레일 검출, 로봇 자세 보정, 그리고 주행 알고리즘을 통해 다목적 농작업을 위한 온실용 로봇 플랫폼의 기초 자율 주행 기술로 활용될 것으로 기대된다.

참고 문헌

1. Akrami, Mohammad, et al. “Towards a Sustainable Greenhouse: Review of Trends and Emerging Practices in Analysing Greenhouse Ventilation Requirements to Sustain Maximum Agricultural Yield.” Sustainability, vol. 12, no. 7, 2020, p. 2794.
2. Kochhar, Aarti, and Naresh Kumar. “Wireless Sensor Networks for Greenhouses: An End-to-End Review.” Computers and Electronics in Agriculture, vol. 163, 2019, p. 104877.
3. Yoo, and Yeo. “Smart Agriculture.” Korea Institute of S&T Evaluation and Planning, 2021, p. 36.
4. Bechar, Avital, and Moshe Eben-Chaime. “Hand-Held Computers to Increase Accuracy and Productivity in Agricultural Work Study.” International Journal of Productivity and Performance Management, vol. 63, no. 2, 2014, pp. 194 – 208.
5. Kim, et al. “Development of Smart Agriculture Coping with the 4th Industrial Revolution.” Korea Rural Economic Institute, 2017, p. 136.
6. Park, and Kim. “Trend of technology and industrial prospect of agricultural robot.” KEIT PD Issue Report, 15(2), 2015, p. 35-49.
7. Grimstad, Lars, et al. “A Novel Autonomous Robot for Greenhouse Applications.” 2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2018.
8. Conesa-Muñoz, Jesús, et al. “Distributed Multi-Level Supervision to Effectively Monitor the Operations of a Fleet of Autonomous Vehicles in Agricultural Tasks.” Sensors, vol. 15, no. 3, 2015, pp. 5402 – 5428.
9. Mazhar, Fazeelat, et al. “Precise Indoor Positioning Using UWB: A Review of Methods, Algorithms and Implementations.” Wireless Personal Communications, vol. 97, no. 3, 2017, pp. 4467 – 4491.
10. Shi, Yinggang, et al. “Integrated Navigation by a Greenhouse Robot

Based on an Odometer/LIDAR." Instrumentation Mesure Métrologie, vol. 19, no. 2, 2020, pp. 91－101.

11. Su, Shijian, et al. "Investigation of the Relationship between Tracking Accuracy and Tracking Distance of a Novel Magnetic Tracking System." IEEE Sensors Journal, vol. 17, no. 15, 2017, pp. 4928－4937.
12. Lee, Sok-Yong, and Hai-Won Yang. "Navigation of Automated Guided Vehicles Using Magnet Spot Guidance Method." Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, vol. 28, no. 3, 2012, pp. 425－436.
13. Tanabata, Takanari, et al. "Development of a Plant Conveyance System Using an AGV and a Self-Designed Plant-Handling Device: A Case Study of Diy Plant Phenotyping." Breeding Science, vol. 72, no. 1, 2022, pp. 85－95.
14. Su, Shijian, Xianping Zeng, et al. "Positioning Accuracy Improvement of Automated Guided Vehicles Based on a Novel Magnetic Tracking Approach." IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine, vol. 12, no. 4, 2020, pp. 138－148.
15. Bechar, Avital, and Clément Vigneault. "Agricultural Robots for Field Operations: Concepts and Components." Biosystems Engineering, vol. 149, 2016, pp. 94－111.
16. Mehta, S.S., et al. "Vision-Based Localization of a Wheeled Mobile Robot for Greenhouse Applications: A Daisy-Chaining Approach." Computers and Electronics in Agriculture, vol. 63, no. 1, 2008, pp. 28－37.
17. Wu, Changzhi, et al. "Differential Received Signal Strength Based RFID Positioning for Construction Equipment Tracking." Advanced Engineering Informatics, vol. 42, 2019, p. 100960.
18. Magnago, Valerio, et al. "Ranging-Free UHF-RFID Robot Positioning through Phase Measurements of Passive Tags." IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 69, no. 5, 2020, pp. 2408－

2418.

19. Mazhar, Fazeelat, et al. “Precise Indoor Positioning Using UWB: A Review of Methods, Algorithms and Implementations.” Wireless Personal Communications, vol. 97, no. 3, 2017, pp. 4467–4491.
20. Yao, Lijian, et al. “Wireless Positioning and Path Tracking for a Mobile Platform in Greenhouse.” International Journal of Agricultural and Biological Engineering, vol. 14, no. 1, 2021, pp. 216–223.
21. Nikookar, Homayoun, and Ramjee Prasad. “Introduction to Ultra Wideband for Wireless Communications.” SpringerLink, link.springer.com/book/10.1007/978-1-4020-6633-7. Accessed 12 June 2023.
22. Huang, Zichen, et al. “Position and Orientation Measurement System Using Spread Spectrum Sound for Greenhouse Robots.” Biosystems Engineering, vol. 198, 2020, pp. 50–62.
23. Tsay, Lok Wai, et al. “Temperature-Compensated Spread Spectrum Sound-Based Local Positioning System for Greenhouse Operations.” IoT, vol. 1, no. 2, 2020, pp. 147–160.
24. Huang, Zichen, Tomoo Shiigi, et al. “A Sound-Based Positioning System with Centimeter Accuracy for Mobile Robots in a Greenhouse Using Frequency Shift Compensation.” Computers and Electronics in Agriculture, vol. 187, 2021, p. 106235.
25. Olson, Edwin. “Apriltag: A Robust and Flexible Visual Fiducial System.” 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2011.
26. Zhang, Wei, et al. “Factor Graph-Based High-Precision Visual Positioning for Agricultural Robots with Fiducial Markers.” Computers and Electronics in Agriculture, vol. 201, 2022, p. 107295.
27. Taheri, Hamid, et al. “Kinematic Model of a Four Mecanum Wheeled Mobile Robot.” International Journal of Computer Applications, vol. 113, no. 3, 2015, pp. 6-9.

28. Kumra, Sulabh. "Navigation System for OMNI-Directional Automatic Guided Vehicle with Mecanum Wheel." IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering, vol. 2, no. 3, 2012, pp. 35 – 39.

Abstract

Development of Camera-based Rail Detection and Robot Posture Control Technology for an Autonomous Greenhouse Robot

Seung-ryeol Shin
Biosystems Engineering
The Graduate School
Seoul National University

The necessity of automating agricultural work in greenhouses has arisen as a solution to the decreasing labor force and minimizing human losses. The variable conditions of greenhouses are a constraint for automation, and a driving method that considers the conditions of the greenhouse environment is necessary for greenhouse robots to perform unmanned agricultural tasks. In this paper, the rail detection and robot posture control technology for autonomous agricultural tasks in greenhouses is proposed, aiming to overcome the limitations of existing greenhouse robots that rely on simple commands for navigation. To validate this, the performance of the rail detection algorithm and the robot posture correction algorithm for entering the next working path is analyzed, and the autonomous driving scenarios for agricultural tasks in the greenhouse are evaluated to confirm their practical applicability. As a result, the developed system enables robots to perform stable and autonomous agricultural tasks in the greenhouse, without being significantly affected by changes in

illumination or the angle of incidence of sunlight. Using low-cost sensors, the system spatially differentiates the ground area from the working path area densely covered with crops and navigates autonomously. The stable rail detection, robot posture correction, and driving algorithms developed in this study are expected to serve as fundamental autonomous driving technologies for a multi-purpose greenhouse robot platform.

Keywords : greenhouse robot, machine vision, autonomous driving agricultural machinery, mecanum wheel, depth camera
Student Number : 2021-22355