

논문 2020-15-31

과수원 환경에서의 방제기 무인주행 기술 개발

(Development of Unmanned Driving Technologies for Speed Sprayer in Orchard Environment)

이 송, 강 동엽, 이 혜 민, 안 수 용, 권 우 경*, 정 윤 수

(Song Li, Dongyeop Kang, Hae-min Lee, Su-yong An, Wookyong Kwon, Yunsu Chung)

Abstract : This paper presents the design and implementation of embedded systems and autonomous path generation for autonomous speed sprayer. Autonomous Orchard Systems can be divided into embedded controller and path generation module. Embedded controller receives analog sensor data, on/off switch data and control linear actuator, break, clutch and steering module. In path generation part, we get 3D cloud point using Velodyne VLP16 LIDAR sensor and process the point cloud to generate maps, do localization, generate driving path. Then, it finally generates velocity and rotation angle in real time, and sends the data to embedded controller. Embedded controller controls steering wheel based on the received data. The developed autonomous speed sprayer is verified in test-bed with apple tree-shaped artworks.

Keywords : Autonomous Sprayer, Orchard Sprayer, Embedded control systems

1. 서 론

센서 기술의 발달로 인한 자율주행 기술의 보급에 따라 기존의 사람이 직접 탑승하여 운전하는 형태의 승용 농기계들은 원격제어나 무인 자율주행 형태로 진화해 가고 있으며, 생산성 및 작업편의성 향상에 대한 지속적인 경쟁으로 인해 세계적으로 농기계 시장에서 자율주행 기술에 대한 수요가 증가하고 있다 [1]. 이에 따라 국내에서도 최근 RTK GPS를 기반으로 실시간 위치를 감지하여 주행하는

무인트랙터와 이앙기에 대한 연구가 수행되었다 [2, 3].

현재 농기계 분야에서는 농업 자동화를 위해 작물과 재배환경에 적합한 다양한 형태의 자동화 기계들이 연구되고 있다 [4-6]. 특히, 최근 딥러닝 기술의 발달에 따라, 영상 및 시각 인지기술의 성능향상은 농업자동화에도 크게 기여하고 있으며, 이에 따라 기존에 자동화하기 힘들었던 수확과 같은 고난이도 작업에서도 로봇을 활용하여 수확물을 분류하는데 있어 RCNN과 같은 알고리즘이 활용된 사례가 보고되고 있다 [7].

농기계를 활용한 여러 농작업 중에서 작물에 약제를 살포하는 방제작업은 농약으로 인한 인체의 피해를 방지하기 위해 방제복을 입고 농작업을 수행해야 해 작업 편의성을 저해할 뿐 아니라, 작업환경에 따라 전복의 위험도 있다. 따라서, 방제작업은 자동화가 시급한 분야로, 안전하고 정밀한 방제 작업을 할 수 있는 자동화 기술개발이 필수적이다. 방제 작업을 위한 농기계로는 봄 스프레이어, 동력살분기, 무인헬기, 스피드 스프레이어 등의 장비들이 주로 사용되며, 특히 과수원 환경에서의 병충해 방제 작업에는 그림 1과 같은 형태의 스피드 스프레이어가 효과적이다 [8].

*Corresponding Author (wkwon@etri.re.kr)

Received: Sep. 2, 2020, Revised: Oct. 6, 2020,

Accepted: Oct. 22, 2020.

Song Li: ETRI (Senior Researcher)

Dongyeop Kang: ETRI (Senior Researcher)

Hae-min Lee: ETRI (Researcher)

Wookyong Kwon: ETRI (Researcher)

Suyong An: ETRI (Senior Researcher)

Yunsu Chung :ETRI (Principal Researcher)

※ 본 논문은 한국전자통신연구원 연구운영비지원 사업의 일환으로 수행되었음 [20HS1410, 노동환경 개선을 위한 로봇 작업지능 핵심기술 개발].



그림 1. 스피드 스프레이어 (방제기)

Fig. 1 Speed Sprayer (Orchard Sprayer)

스피드 스프레이어 형태의 과수 방제기는 분무 탱크를 이동체의 후방에 장착해 과수원의 방제 작업을 위해 강한 엔진을 통해 공기 증으로 퍼뜨리는 방식 (송풍)을 통해 살충제를 분무하며 이때 전자제어 장치를 통해 효율적으로 분무량을 제어하는 것이 중요하다 [9]. 분무 효율성 향상을 위해 영상 또는 초음파 센서를 이용하여 사과나무의 밀집도를 인지하고 이로부터 전자기밸브를 조정하는 방법이 개발되었다 [10]. 포도밭에서 방제를 위해 라이다 센서를 활용해 잎들의 분포를 특성화하고 이를 통해 농약 살포 성능을 향상시키는 방법 또한 제안되었다 [11]. 기존의 방제기에 대한 연구는 주로 과수 나무들의 풍성한 정도를 더 정밀하게 인지하고 어떻게 농약을 효율적으로 사용할 것인가를 판단하는 내용에 대한 연구가 많다. 해당 연구들도 유해한 농약 살포량을 줄이기 위해 중요하지만 사람이 직접 방제기를 탑승해 작동하는 경우를 가정하였기 때문에 방제 작업의 근본적인 위험성을 피할 수는 없으며, 이를 해결하기 위한 무인주행 방제기에 대한 연구가 필수적이다. 하지만 과수원 환경에서 무인주행 방제기의 구현을 위해서는 일반 도로 환경에서 움직이는 차량들과는 달리 과수원의 상황에 따라 신호의 수신에 어려움이 있을 수 있어 GPS (Global Positioning System)를 사용하여 위치를 인식하는데 제약이 존재한다. 이러한 제약조건을 피하면서 무인주행 기능을 구현하기 위해서 GPS 없이 방제기 차체에 LIDAR (Light Detection And Ranging) 또는 카메라 등의 센서들만을 설치하여 주변 환경을 인지하고 경로를 생성하도록 설계할 수 있는데 [12-15], 이러한 환경에서 원활하게 자율주행 기능을 구동시키기 위해서는 환경 인지를 위한 모듈과 자동 주행제어가 가능한 모듈의 통합 개발이 필수적이다.

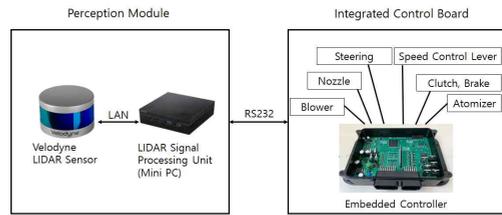


그림 2. 스피드 스프레이어의 무인주행 제어 모듈

Fig. 2 Module configuration of autonomous speed sprayer

본 논문에서는 무인주행 방제기의 정밀 속도/조향 제어를 위한 임베디드 시스템의 개발 및 LIDAR 센서를 이용한 과수원 지도작성, 위치인식, 경로계획 방법에 대해 기술하였다. 개발한 통합 임베디드 제어시스템은 모터드라이버 및 실린더 제어를 통해 방제기의 이동 속도 제어와 조향 제어를 중앙에서 관제하며 방제기 시스템의 노즐, 센서 신호들을 연동하여 처리한다. 과수원 내에서의 방제기 위치인식을 위해 3D LIDAR 센서를 이용하여 지도를 만드는 방법과 과수열 기반 Line 추출을 통해 방제기의 이동경로를 생성하는 방법을 제안하였다. 개발된 자율주행 시스템은 상용 방제기에 적용되어 인공과수원 테스트베드 환경에서 검증되었다.

논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 전체적인 자율주행 방제기 시스템에 대해 설명하였다. 프로세서, 센서, 보드와 관련된 세부 사양 및 임베디드 통합 제어 시스템의 설계 방법은 3장에 기술하였다. 설계한 시스템을 바탕으로 구성된 전반적인 시스템의 알고리즘과 개발에 관한 내용이 4장에 실렸고, 구성된 방제기 시스템을 통한 테스트베드 주행결과가 5장에 수록되었다.

II. 무인주행 방제기 시스템

무인주행 방제기의 전체 구성은 그림 2의 개념도와 같이 인지부와 제어부의 2가지 모듈로 이루어져 있다. 인지부는 3D LIDAR 센서를 이용하여 지도 생성, 위치인식, 주행 경로생성을 담당하는 모듈이며, 최종적으로 방제기의 직진 주행속도와 회전 각도를 제어부에 전달한다. 제어부는 임베디드 제어 모듈과 모터 드라이버, 센서 등으로 구성되며, 인지부로부터 전달된 제어값을 이용하여 실시간으로 방제기를 구동한다.

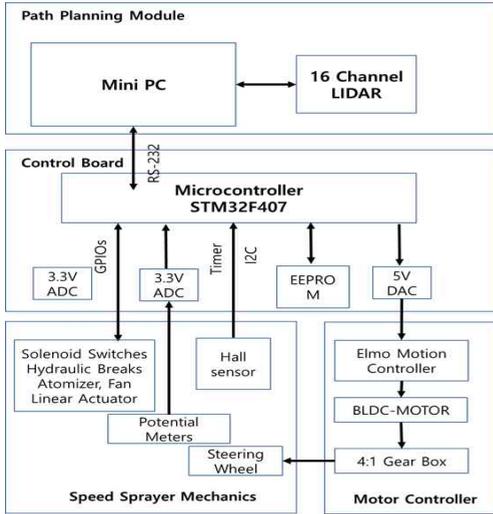


그림 3. 스피드 스프레이어의 통합제어기 구성도
Fig. 3 The structural diagram of autonomous speed sprayer electronic controller

3D 라이더 센서 데이터를 처리하기 위해서는 고 사양의 컴퓨팅 환경이 필요하며, 이는 인지용 미니 PC를 통해 분리된 구조로 구현되었다. 인지모듈에서는 3D 공간상에서 과수나무를 하나의 군집점으로 모아 나무들의 위치를 인식하고 나무의 위치로부터 방제기의 이동 경로를 설정한다. 설정된 경로상에서 목표 각도와 속도를 제어 모듈로 송신하고, 제어 모듈에서는 해당 신호를 수신하여 구동부를 작동시키도록 구성된다. 세부적인 알고리즘과 구현 방법은 각각 다음 장에 기술되어 있다.

III. 임베디드 제어 시스템 설계

방제기 시스템은 전체적으로 3개 부분으로 구성되어 있다. 각각 전자시스템 (마이크로 컨트롤러, 드라이버와 센서 등) 및 기계부 (샷시, 액추에이터, 휠 등), 제어시스템으로 구성되며, 각 시스템 간의 연결 및 구성을 나타내는 무인방제기의 임베디드 제어기 블록 다이어그램은 그림 3과 같다.

최상위 계층인 주행경로 생성 모듈은 미니PC가 LIDAR 센서로부터 들어온 포인트 클라우드데이터를 이용하여 로컬 맵을 만들면서 경로계획을 수행하고, 계획된 경로로부터 제어해야 할 속도와 각도 정보를 RS-232통신을 통해 방제기의 임베디드 제어 보드에 전송한다. 제어 보드는 홀센서로부터 들어온 속도 정보와 Potentiometer로부터 측정된 값

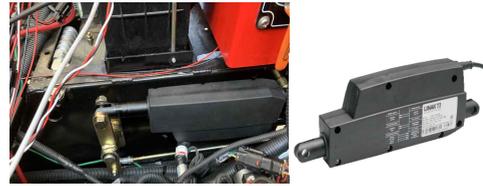


그림 4. 포텐서 미터가 장착된 리니어 액추에이터
Fig. 4 Linear Actuator with potentiometer

을 바퀴의 각도로 환산하여 상위 제어기에 전달한다.

자율주행 방제기를 위한 임베디드 제어시스템의 보드는 STMicroelectronics사의 STM32F407를 기반으로 2층 PCB 기판 구조로 설계되었다. 마이크로프로세서는 32-bit ARM Cortex-M4 제품을 사용하며 해당 프로세서는 168MHz로 작동한다. 디버깅 인터페이스로는 Joint Test Action Group (JTAG)를 사용하였다.

기존 승용방제기의 수동으로 동작하는 방제기의 전후진 레버를 전자식으로 자동제어하기 위하여 potentiometer가 내장된 LINAK 사의 리니어 액추에이터 (그림 4)를 사용하였으며 해당부는 12V 전원을 사용하며 최대 750N의 힘으로 구동할 수 있다.

또한, 방제기의 속도 제어를 위하여 액추에이터 상태를 알 수 있는 리미트 센서와 바퀴 각도 측정용으로 각 전륜과 후륜에 potentiometer를 설치하였다. 방제기에 사용한 센서와 액추에이터 목록은 표 1에 정리되어 있다.

또한, 방제기의 속도 제어를 위하여 액추에이터 상태를 알 수 있는 리미트 센서와 바퀴 각도 측정용으로 각 전륜과 후륜에 potentiometer를 설치하였다. 방제기에 사용한 센서와 액추에이터 목록은 표 1에 정리되어 있다.

방제기는 차체는 4륜구동 방식으로 주행하며, 4륜구동 자율주행을 위해 전륜과 후륜에 모두 회전형 potentiometer를 설치하였다. 방제기의 조향제어를 위해 바퀴 각도가 중앙 위치에 있는 경우의 센서값과 가장 왼쪽, 가장 오른쪽 각도에 있는 경우의 값들을 각각 측정하고 이를 선형화하여 바퀴의 각도를 계산하였다.

또한 방제기의 기계적인 구성과 센서의 설치 위치에 따른 오차를 보정하고자 SPI 인터페이스를 가진 EEPROM을 설치하였으며 상위 제어기와와의 통신과 디버깅 목적으로 RS-232 인터페이스를 구축하였다.

표1. 무인주행 방제기의 센서와 액추에이터
Table 1. Sensors and actuators used in autonomous speed sprayer

	Sensors	Actuators
Engine Speed	Potentiometer	Linear Actuator
Steering	Encoder, Potentiometer	BLDC Motor
Odometry	Hall Sensor, 16-channel Lidar	-
Clutch and Brake	Limit Sensor	Clutch Valve Brake Valve
Atomizer	-	Solenoid Valve
Blower	-	Solenoid Valve
Safety	Supersonic sensor	-
Perception	16-channel Lidar	-

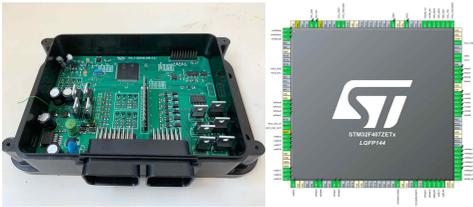


그림 5. 임베디드 통합제어기
Fig. 5 Embedded Controller

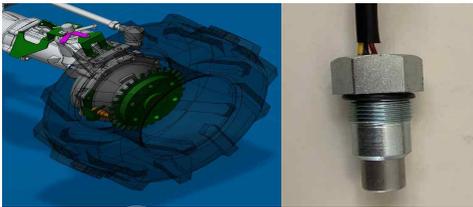


그림 6. 속도 측정을 위한 홀센서
Fig. 6 Hall sensor for speed measurement

실시간 OS로는 FreeRTOS를 사용하였으며 Supervisor Task, IO task, Steering Task, Speed Control Task, Sprayer Task 등이 실시간으로 작업별로 따로 분리되어 동작한다. IO task는 1ms 단위로 ADC 값과 스위치 입력신호를 측정한다. 스위치 입력값이 바뀔 때마다 Sprayer 작업에 메시지 큐를 통하여 신호를 전달하며 Sprayer 작업에서 사용자 입력에 따른 스프레이 명령을 집행한다. 그리고 항상 제어가 필요한 조향 및 속도 제어는 별도의 작업으로 수동주행 모드와 자동주행 모드의 선택에 따라 다른 동작을 수행한다.

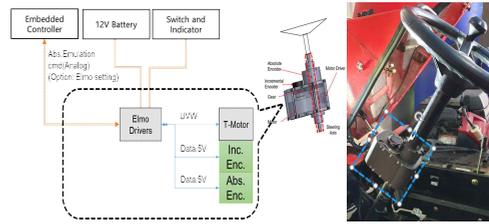


그림 7. 전자 조향 시스템
Fig. 7 Electronic steering system

임베디드 통합제어기 (그림 5)는 60핀 커넥터를 통하여 방제기와 연결되어 있으며, 전원은 방제기의 12V 전원을 그대로 사용하도록 구성되었다.

차량의 속도는 그림 6과 같이 Hall Sensor로 측정 가능하며 바퀴가 1회 회전할 때마다 펄스 30개를 발생시킨다. 고속에서는 통합제어기가 타이머를 이용하여 펄스 카운팅을 하여 속도를 측정하며 직진 구간에서는 펄스를 사용하여 속도를 측정하고, 회전구간에서는 저속 주행을 하게 되는데, 저속에서 홀센서를 이용할 시 측정 오차가 크기 때문에, 홀센서가 아닌 인지 모듈로부터 계산되는 속도 측정 값을 이용하였다.

IV. 조향시스템

방제기의 조향시스템은 핸들과 연결된 유압으로 동작하는 유압제어시스템이다. 전자제어를 통한 자동조향시스템을 구현하고자 기존핸들과 유압시스템이 맞물리는 부분에 BLDC모터와 기어를 연동하여 조향시스템을 구성하였다. 전체 시스템 구성은 그림 7과 같다. 조향모듈 개발 초기에는 NI시스템의 myRIO를 이용하여 시스템 테스트 및 검증을 진행하였으며 조향시스템 모듈이 검증이 완료된 후 방제기 제어보드의 DAC를 통하여 조향을 제어하였다. 조향 시스템내부에 포함된 ELMO (이스라엘 회사)의 제어기는 내부적으로 속도제어로 설정하고 상위제어의 경우 P제어를 이용하여 위치를 제어하였다.

테스트를 거쳐 최종적으로 사용된 조향시스템의 제원은 표 2와 같다.

유압의 경우 바퀴의 왼쪽 회전과 오른쪽 회전의 경우 30%의 성능차이를 보여 조향 모듈 자체의 인코더를 사용할 수 없어, 바퀴에 붙어 있는 회전형 potentiometer를 이용하여 위치제어를 하도록 구현하였다.

표 2. 조향시스템의 사양

Table 2. Specification of steering system

	Content	Unit
Power Source	DC 12V, 50A	V, A
Max Speed	150	RPM
Max Torque	7	Nm
Idle Friction	1	Nm
Encoder Res	10,000	pulse/turn
Diameter of Axis	18	mm
Length of Axis	30	mm
Weight	3.5	kg



그림 8. 무인주행 시스템 다이어그램

Fig. 8 Diagram of autonomous steering

V. 경로생성 및 위치 인식 방법

방제기의 위치인식 및 경로생성을 위한 인지부의 자율주행 소프트웨어는 크게 Task planner를 위한 4개의 메인 모듈과 각 하위 모듈들로 구성된다 (그림 8).

Task planner하위 4개 메인 모듈은 독립적으로 실행되며 ROS에서 통신을 이용하여 데이터를 전달한다. global_mapper (SLAM module)는 Velodyne사의 VLP 16 LIDAR 센서로부터 측정되는 3D 포인트 클라우드와 IMU (Inertial Measurement Unit) 센서값을 기반으로 방제기의 주행 지도를 작성하며, 동시에 방제기의 위치를 실시간으로 계산한다. 3D 포인트 클라우드 데이터는 SLAM 모듈에서 처리되어 주행경로 생성을 위한 local point들을 생성하여 local_path_planner에 전달하는 방식이다. 각 모듈의 기능은 표 3과 같다.

방제기의 경로생성 및 위치인식 방법의 동작환경은 표 3과 같으며 자율주행 모듈 기능을 요약하면 표 4와 같다.

표 3. 무인주행시스템의 구성

Table 3. The configuration of autonomous steering

Item	Content	
MINI PC	CPU	Intel i7 6700HQ 2.6 GHz
	GPU	Nvidia GeForceGTX 960M
	RAM	8GB
Sensor	LIDAR	Velodyne PUCK(16ch), Ethernet
	IMU	myAHRS, Interface: USB
S/W	OS	Ubuntu 16.04 LTS
	ROS	Kinetic
	Library	PCL, OpenCV
	Parallel	OpenMP

표 4. 무인주행 모듈의 기능

Table 4 Functions of autonomous steering module

Module	Submodule	Function
Task Planner		- General management of information of each module
SLAM	Scan Matching	- Generalized ICP matching - Extract odometry by matching continuous LIDAR sensor values - Pose correction through global matching
	EKF	- Estimation of position(x, y, z) and speed(vx, vy, vz)
Path Planning	2D Grid Map	- Generate 2D grid map from 3D point cloud
	Tree Extraction	- Tree extraction from grid map
	Line Manager	- Clustering using the extracted tree center point - Line extraction in the same cluster - Line life-time management and line merging
	Path Planner	- Strait and turn path creation
Obstacle Detection		- Obstacle detection
Motion Control	Differential Wheel	- (v, w) generation for differential wheel type robot
	Ackermann	- (v, δ) generation for ackermann type robot
	Double Ackermann	- (v, δ) generation for double-ackermann type robot

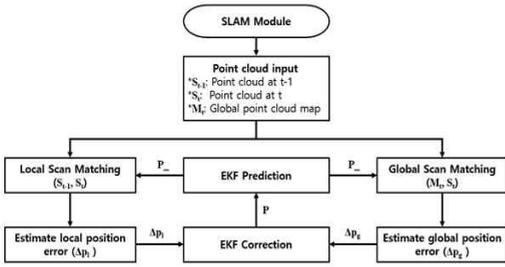


그림 9. 스캔 매칭 모듈과 EKF
Fig. 9 Scan matching module and EKF flow diagram

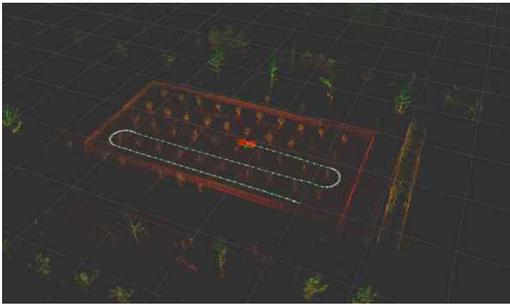


그림 10. 글로벌 스캔 매칭을 통한 지도 구성과 위치 추정

Fig. 10 Map construction and speed sprayer position estimation using global scan matching

1. SLAM 모듈

SLAM 모듈은 LIDAR 센서로부터 측정되는 3D point cloud와 IMU센서를 입력으로 받아 3D 지도를 작성함과 동시에 지도기반 방제기의 위치를 실시간으로 계산하는 모듈이다. SLAM 모듈의 프로세스가 시작되는 위치가 초기위치 (x, y, z, roll, pitch, yaw)가 되며 실시간 3D point cloud의 매칭을 통하여 이후의 위치를 계산하고, Scan 매칭의 결과는 EKF (Extended Kalman Filter)의 update 단계에서 방제기의 상태변수의 갱신에 이용된다. 따라서 지도작성 및 위치인식에 있어 중요한 모듈은 Generalized ICP (Iterative Closest Point) 기반 Scan 매칭 모듈과 EKF 모듈이다. Scan 매칭 모듈과 EKF의 동작 흐름도는 다음 그림 9와 같다.

Scan 매칭은 두 단계로 이루어지는데 연속적으로 들어오는 3D point cloud의 Local 매칭과 Global 매칭이다. 방제기 자율주행을 위해서는 odometry 정보가 필요한데, 방제기 자체에서 제공

되는 odometry 정보가 없으므로, Local 매칭을 통하여 odometry를 생성한다. 즉, (t-1) 시점에서 획득한 point cloud와 t 시점에서 획득한 point cloud를 매칭하여 Δp (pose)를 추출한다. Δp 를 연속적으로 누적하게 되면 방제기의 위치를 추정할 수 있다. Local 매칭을 통해서 방제기의 위치를 추정할 수 있지만, Local 매칭만을 이용할 경우 주행을 계속함에 따라 위치 오차는 커지는 현상이 발생한다. 따라서 Global 매칭 (현재 point cloud와 지도상의 유효 point cloud의 매칭)을 통하여 위치 오차가 누적되지 않도록 주기적인 Scan 매칭을 하여 방제기의 위치를 보정해주어야 한다 (그림 10).

2. Path Planning 모듈

일반적인 과수원의 나무는 종횡 축으로 일정한 간격 (종축: 1.5~2m, 횡축: 3~4m)으로 배치되어 있다. 이러한 과수원의 특징을 방제기의 주행경로 생성에 활용하기 위해 우선 각 나무의 중심점을 추출한다. 추출된 각 나무의 중심점 사이의 거리를 이용하여 군집화 (cluster)하여 동일 군집 내에서 local line을 추출하며, Path Planning Module은 최종적으로 추출된 line 정보를 이용하여 직진 경로 생성 및 회전 경로를 생성한다 (그림 11).

LIDAR 센서로부터 획득한 3D point cloud에서 나무의 중심을 추출하기 위해 먼저 z축의 차원을 축소해 3D point cloud를 2D grid map으로 변환하는 과정이 필요한데, 이는 3D point cloud에서 직접 나무 중심을 추출하는 방법보다 2차원 공간에서 추출하는 것이 프로세스 속도 면에서 유리하기 때문이다. 3D point가 투영될 평면 (즉, 지면)을 추출은 주행 중 생성된 지도의 지면 후보 point를 그룹화한 후 RANSAC (Random sample Consensus) 기반의 plane fitting을 통해 가능하다.

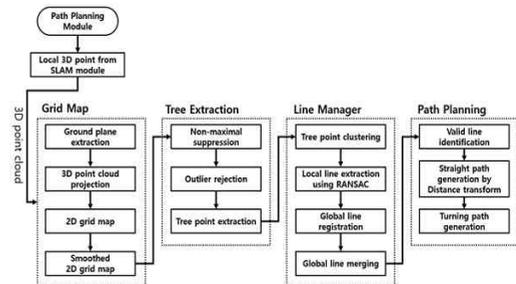


그림 11. 경로 계획 모듈
Fig. 11 Path planning module

각 3D point는 LIDAR 센서의 중심을 지나가는 지면과 평행한 평면에 투영되는데 point와 평면의 거리값이 작을수록 (LIDAR 센서의 중심 평면에 가까울수록) 더 많은 weight를 주어 각 grid의 점유율을 계산한다. 이렇게 할 경우, 나뭇잎이 무성할 경우 나무의 정확한 중심점을 찾기가 힘들 수 있다. 이를 개선하기 위해 각 grid의 주변부 (neighboring grid) 값을 이용하여 smoothing 과정을 거치면 개선된 중심점을 찾을 수 있다. 각 grid의 주변부 값의 합을 빠르게 추출하기 위해 integral image 방법을 이용한다.

Grid map 모듈에서 생성된 smoothed grid map에서 grid의 점유율이 가장 높은 지점이 나무의 중심점일 확률이 높다. 따라서 Non-maximal suppression 방법을 이용하여 local 영역에서의 최대 점유율을 가지는 grid의 (x, y)좌표를 추출하여 먼저 나무 후보군을 생성한다. 나무 중심점 추출의 오류에 대비하기 위하여 연속적으로 추출되지 않는 나무는 후보군에서 제외한다. 또한 구조화된 물체나 건물의 평면 등에서 나무 후보가 추출될 수 있다. 이를 제거하기 위하여 추출된 나무 후보 중심 주위의 raw 3D point cloud 중 가까운 k개의 point를 이용하여 (x-y)평면에 투영된 2D covariance matrix를 생성 후 이의 eigenvalue의 비율을 조사한다. Eigenvalue의 비율 또는 그 역이 특정값 이상의 큰 값을 가지면 나무 후보군에서 제외한다 (그림 12).

Tree extraction 모듈에서 추출된 나무 중심점들을 거리기반으로 clustering하여 각 cluster내에서 RANSAC기반의 line fitting을 수행하여 방제기 주변의 local line을 추출한다 (그림 13).

안정적인 local line 추출을 위하여 연속적으로 추출된 local line만 채택하여 noisy line을 줄인다. 안정적으로 추출된 local line은 기존에 등록된 global line과의 유사도 (두 line의 각도, 거리, overlapping 정도)를 측정하여 기존 global line에 병합될지 아니면 새로운 global line으로 등록될지 결정된다.

Global line으로 등록되더라도 다음 스텝에서 추출되는 local line과의 지속적인 매칭이 되지 않으면 global line에서 삭제될 수 있다. Global line으로 등록된 후 특정 횟수 이상 local line과의 연속적인 매칭이 이루어졌다면 permanent line으로 등록되어 추후 local line과 매칭이 되지 않더라도 삭제되지 않는다 (그림 14).

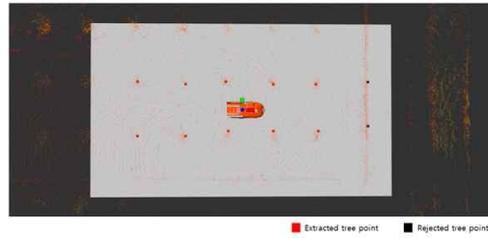


그림 12. Smoothed grid map을 이용한 나무 위치 추출

Fig. 12 Tree position extraction using smoothed grid map



그림 13. 나무 연결선 추출

Fig. 13 Local line extraction

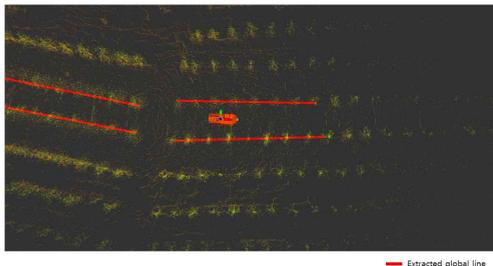


그림 14. 글로벌 나무 연결선 추출

Fig. 14 Global line extraction

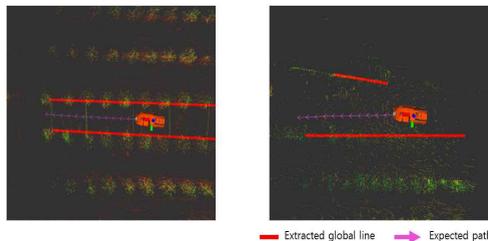


그림 15. 나무 라인을 이용한 경로 계획

Fig. 15 Path planning using tree lines

Global line은 주기적으로 서로의 유사도를 비교하여, 유사도가 높다고 판단되면 두 global line은 병합된다. 병합 후 global line을 구성하는 나무 중심점들은 재정렬되며 line의 end point도 갱신된다.

현재 방제기의 위치와 가까운 유효한 왼쪽/오른쪽 line이 직진 주행 경로 생성을 위한 기본 line이 된다. 왼쪽/오른쪽 line이 모두 추출되었을 경우 두 line의 끝점(end point)의 중심점이 방제기 주행의 목적지가 되며, 방제기가 주행함에 따라 line의 끝점도 갱신되기 때문에 목적지 역시 갱신된다. 왼쪽/오른쪽 line 중 하나만 추출되었을 경우 다음 회전 방향을 고려하여 추출된 line에 수직하게 일정거리(예: 나무 배열의 횡축간격의 반) 떨어진 지점에 목적지를 생성한다. 목적지가 생성되면 현재 생성된 grid map 정보와 Distance Transform (DT) 방법을 이용하여 최단거리 주행경로를 생성한다(그림 15).

VI. 실험결과

개발한 방제기 자율주행 시스템의 검증을 위해 Gazebo 기반 시뮬레이션(그림 16), 실제 과수원 데이터 수집, 모의 과수원 실험 총 3가지 환경에서 실험을 진행하였다.

1. 시뮬레이션

Gazebo는 사용자가 원하는 시뮬레이션 환경을 꾸밀 수 있으며, 다양한 구동 타입의 로봇을 실험할 수 있다. 또한 2D laser scanner, velodyne, 카메라, IMU 등의 센서를 로봇의 특정 위치에 가상으로 부착 후 데이터를 실시간으로 얻을 수 있어 방제기의 위치인식 및 경로생성 시뮬레이션에 유용하다. 실제 과수원과 유사한 환경을 갖추기 위하여 중형 축으로 나무를 2~4m 간격으로 배치하였고, 실제 지면의 울퉁불퉁한 면을 모사하기 위해 2~5도의 경사도를 주어 환경을 구성하였다(그림 16).

2. 실제 과수원 데이터 수집

방제기 주행 실험 전, 인지 모듈의 사전 테스트를 위해 Velodyne/IMU센서 모듈을 구성하여 실제 과수원 데이터를 확보하여 이를 기반을 시뮬레이션을 수행하였다. 방제기 주행 시 얻는 데이터와 유사하게 하기 위하여 센서의 위치는 지면으로부터 0.7m 높이로 하였으며, 평균 0.6 m/s 속도로 이동 후 시작점으로 돌아오는 경로를 설정하였다.

총 이동거리는 880m이다(그림 17). 이동 시작점과 종료점의 위치 차이는 20cm 이내의 결과를 보였다.

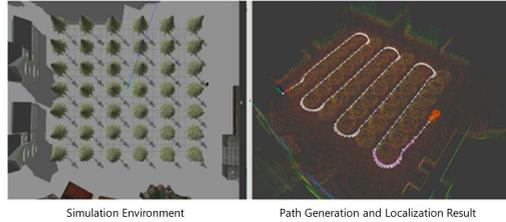


그림 16. 시뮬레이션 환경, 경로 생성 및 위치 추정 결과

Fig. 16 The simulation environment and the result of path generation and positioning

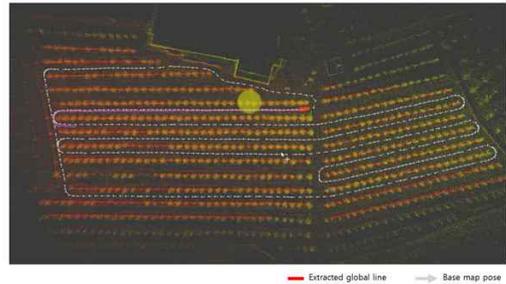


그림 17. 과수원 지도 매핑과 위치 추정 결과

Fig. 17 The results of orchard mapping and localization



그림 18. 모의 과수원에서의 주행 테스트

Fig. 18 Autonomous driving test in the test bed.

표 5. 모의 과수원 환경 구성
Table 5. The specification of test-bed

Environment	Content
Dimensions	20 x 44m
Tree arrangement	4 lines of trees, 10 trees per line
Distances	Line to line distance: 4.4m Tree to tree distance: 3.8m
Running speed	0.6 m/s (50% reduction in turning)

3. 모의 과수원 실험

최종적으로 실제 방제기를 이용한 자율주행 실험을 위해 20 x 44m 크기의 영역에 지면에 고정된 나무를 4행 x 10열로 3.8 ~ 4.4m 간격으로 배치하여 모의 과수원을 구성하였다 (표 5). 직진시 주행속도는 0.6 m/s로 설정하였고, 안전한 회전 주행을 위해 회전 시에는 직진속도의 50%로 자동 감속하도록 구현하였다 (그림 18).

VII. 결론

본 논문에서는 자율주행 방제기 시스템 설계 및 개발에 대해 다루었다. 자율주행 방제기 시스템은 크게 인지 및 경로 생성 모듈, 임베디드 제어 통합 모듈로 구성된다. 각, 시스템의 센서 및 액츄에이터 설계 사양에 대해 구체적으로 기술하였으며, 이를 구성하기 위한 구조도 및 세부 구현 알고리즘에 대해 논했다. 개발한 자율주행 방제기 시스템은 Gazebo 시뮬레이션과 실제 과수원 데이터를 바탕으로 위치인식 및 경로생성모듈을 고도화를 통해, 모의 과수원 환경에서 안정성 및 주행성능을 검증하였다.

References

[1] FS.G. Vougioukas, "Agricultural Robotics," Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems Vol. 2, pp. 365-392, 2019.

[2] M. Gang, H.J. Kim, C.W. Jeon, C. Yun, "Preliminary Study on Development of Path Generation and Tracking Algorithms for Autonomous Rice Transplant," Proceedings of Agricultural Machinery, Vol. 24, No. 2, pp. 27-27, 2019 (in Korean).

[3] Benjamin Cates, "A Study to Consider the

Specification of Posture Sensor for Autonomous Tractor," The Korean Society of Mechanical Engineers Conference, 2018.

[4] Mai, X, Zhang, H, Jia, X., Meng, M. Q. H. "Faster R-CNN With Classifier Fusion for Automatic Detection of Small Fruits," IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2020.

[5] Berenstein. R, Y. Edan, "Automatic Adjustable Spraying Device for Site-specific Agricultural Application," IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, Vol. 15, No. 2, 641-650, 2017.

[6] D.K. Giles, M.J. Delwiche, R.B. Dodd, "Control of Orchard Spraying Based on Electronic Sensing of Target Characteristics," Transactions of the ASAE, Vol. 30, No. 6, pp. 1624-1636, 1987.

[7] G.D. Hong, J. Park, "Novel Embedded OS for Soccer Robot System," IEMEK J. Embed. Sys. Appl., Vol. 1, No. 1, pp. 1-12, 2004 (in Korean).

[8] J Llorens, E Gil, J Llop, "Ultrasonic and LIDAR Sensors for Electronic Canopy Characterization in Vineyards: Advances to Improve Pesticide Application Methods," Sensors, Vol. 11, No. 2, pp. 2177-2194, 2011.

[9] B. Boyd, A. John, V.H. Mellenkamp, Handbook of Embedded Control Systems, SIAM, Philadelphia, 2005.

[10] J. Park, P. Kim, "Implementation of Embedded Software for Mobile Robot," Proceedings of 3rd Asian Embedded Systems Conference, Vol. 2, pp. 100-105, 2006.

[11] A Segal, D Haehnel, S Thrun, "Generalized-icp," Robotics: science and systems, Vol. 2, No. 4, pp. 435, 2009.

[12] J Weingarten, R Siegwart, "EKF-based 3D SLAM for Structured Environment Reconstruction," 2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. IEEE, 2005.

[13] A. Asvadi, C Premevida, P Peixoto, U Nunes, "3D Lidar-based Static and Moving Obstacle Detection in Driving Environments: An Approach Based on Voxels and

Multi-region Ground Planes," Robotics and Autonomous Systems Vol. 83, pp. 299-311, 2016.

- [14] D Bradley, G Roth, "Adaptive Thresholding Using the Integral Image," Journal of graphics tools Vol. 12, No. 2, pp. 13-21, 2007
- [15] I Afanasyev, A Sagitov, E Magid, "ROS-based SLAM for a Gazebo-simulated Mobile Robot in Image-based 3D Model of Indoor Environment," International Conference on Advanced Concepts for Intelligent Vision Systems, pp. 273-283, 2015.

Song Li (이 송)



He is received his M.S degree in Computer Engineering from Inha University, Incheon, Korea in 2008. he is currently a senior research with ETRI. His research interests includes Embedded Real-Time System, Multi-agent AGV Scheduling.

Email: li.song@etri.re.kr

Dongyeop Kang (강 동 엽)



He received the B.S., M.S., and Ph.D. degrees from POSTECH, Pohang, Korea, in 2006, 2008, and 2013, respectively.

He is currently a senior researcher with ETRI, Daegu, Korea. His research interests include control theory, nonlinear systems, and robotics.

Email: kang@etri.re.kr

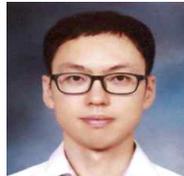
Hea-min Lee (이 해 민)



She is received M.E. degree in electronic engineering from Kumoh National Institute of Technology in 2016.

Email: leehaemin90@etri.re.kr

Suyong An (안 수 용)

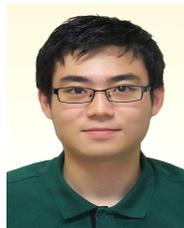


He is received the B.S and Ph. D. degree in POSTECH, Pohang, Korea in 2006 and 2012 respectively. He is currently a senior researcher with ETRI.

His research interests include LIDAR/vision-based SLAM, autonomous exploration of mobile robot, pattern recognition, and smart farm system.

Email: syong.an@etri.re.kr

Wookyong Kwon (권 우 경)



He is received B.E. degree in electrical engineering from POSTECH, Pohang in 2011, and the M.S. and Ph.D. degrees from GIFT, POSTECH in 2012

and 2017, respectively. He is currently a researcher with ETRI. His research interests include control theory, networked control systems, and event-triggered control.

Email: wkwon@etri.re.kr

Yunsu Jung (정 윤 수)



He is received his Ph.D degree in electronic engineering form Kyungbook National University in 1998.

he is currently working as a principal researcher at ETRI. His research interests include Artificial Intelligence, Robot Vision, and etc.

Email: yoonsu@etri.re.kr