

사과 과원 무인 제초를 위한 작업 경로 생성 및 경로 제어 시스템 개발 Development of the Path Generation and Control System for Unmanned Weeding Robot in Apple Orchards

전진택^{1,2} · 장호승¹ · 양창주¹ · 권경도¹ · 홍영기¹ · 김국환^{1*}

Jintack Jeon, Hoseung Jang, Changju Yang, Kyoung-do Kwon, Youngki Hong and Gookhwan Kim

Received: 16 Oct. 2023, Revised: 10 Nov. 2023, Accepted: 16 Nov. 2023

Key Words : Weeding Robot(제초로봇), Autonomous Driving(자율주행), Orchard(과수원), RTK-GNSS(고정밀측위시스템), Path Generation(경로생성), Path Tracking(경로추종)

Abstract: Weeding in orchards is closely associated with productivity and quality. The customary weeding process is both labor-intensive and time-consuming. To solve the problems, there is need for automation of agricultural robots and machines in the agricultural field. On the other hand, orchards have complicated working areas due to narrow spaces between trees and amorphous terrain. Therefore, it is necessary to develop customized robot technology for unmanned weeding work within the department. This study developed a path generation and path control method for unmanned weeding according to the orchard environment. For this, the width of the weeding span, the number of operations, and the width of the weeding robot were used as input parameters for the orchard environment parameters. To generate a weeding path, a weeding robot was operated remotely to obtain GNSS-based location data along the superheated center line, and a driving performance test was performed based on the generated path. From the results of orchard field tests, the RMSE in weeding period sections was measured at 0.029 m, with a maximum error of 0.15 m. In the steering period within row and steering to the next row sections, the RMSE was 0.124 m, and 0.047 m, respectively.

1. 서 론

r : sprocket diameter

w : rotational velocity of track

u_p : inner product

ψ_p : global vector angle, radian

ψ_d : pointing angle command, radian

ψ_c : current vector angle, radian

k_p : proportional gain

k_i : integral gain

k_d : derivative gain

e_ψ : error between pointing angle command and current angle

1. 서 론

과수원의 제초작업은 사과, 배 등 과일 생산량과 품질에 밀접한 관련이 있는 중요한 작업으로 인식되고 있다. 과수원에서 잡초는 한정된 양분 자원을 놓고 작물과 경쟁하며 균락을 형성하고, 잡초균락은 과일 품질에 부정적인 영향을 주는 것으로 확인되었다.^{1,2)} 현재 관행적으로 이뤄지는 제초 작업은 예

* Corresponding author: meceng93@korea.kr

1 Department of Agricultural Engineering, National Institute of Agricultural Sciences, Jeonju 54875, Korea

2 Department of Agricultural Machinery Engineering, Chungnam National University, Daejeon 34134, 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.

초기를 이용한 물리적 제조와 제조제를 이용한 화학적 제조가 있다. 물리적 제조 방법은 작업자가 무거운 장비를 사용하여 신체적으로 힘들고 노동 집약적이다. 대규모 과수원의 경우, 제조작업을 위한 더 많은 시간과 노동력이 요구된다. 그러나 지속적인 농가 인구의 고령화는 노동력 부족 문제로 이어져 과수원에서 제조작업의 효율성을 감소시키고 있다.³⁾ 물리적 제조 방법의 대안으로 과수원에서 잡초를 효과적으로 관리하기 위해 화학적 제조 방법을 사용한다. 하지만 대부분의 과수원에서 비선택성 제조제로 처리하고 있는 실정이며, 이는 저항성잡초의 발생과 과도한 제조제 사용으로 인한 토양오염 문제의 원인으로 이에 대한 대책 마련이 시급한 실정이다.^{4,5)}

노동력 문제를 해결하고 농작업의 효율성 확보를 위해 농업용 로봇 및 기계의 자동화 필요성이 크게 요구되고 있다.^{6,7)} 이에 따라 농업용 로봇의 자율주행 기술에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 무인 및 자동 제조의 연구로는 발작물을 대상으로 콩 작물 위치 인식 기반 콩 재배용 제조로봇 연구와⁸⁾ 수도작물을 대상으로 모열 인식 기반 벼농사용 제조로봇 연구가 수행되었다.⁹⁾ 그 외에도 국내 밭 지형에 맞게 작업이 가능한 중경제조기 개발 등 현재 까지도 많은 제조 관련 연구가 수행되고 있다.^{10,11)} 국외의 경우 제조로봇의 실용화가 되어 있지만 높은 가격과 국내의 지형에 맞게 사용하기 어려운 실정이다.¹²⁾ 국내 대부분의 과수원은 세장방추형으로 지면으로부터 원가지까지 거리가 약 60 cm이며, 10 ~ 30 cm 높이의 두둑을 만들어 경사지가 형성되어 있다.¹³⁾ 한편 영상 및 라이다 기반 인식 기술을 이용한 제조로봇의 경우, 과수원 환경에서 원줄기 아래로 자란 가지, 복잡하게 뻗은 잎 등의 간섭요인이 주행 성능을 저하시킬 수 있다.¹⁴⁾ 또한 논밭에서 사용되는 기존의 GNSS 기반 무인 농작업 기계는 밭 포장에서 4개의 좌표점을 입력하여 경로를 생성하는데, 이는 과수원에서 제조작업 영역과 과수 영역을 구분할 수 없어 과수원 환경에서 적용하기 어려운 실정이다.^{15,16)} 과원 내에서 무인 제조 작업을 위해선 제조작업 폭, 과수열 내 제조작업 횟수, 제조작업기 넓이 등을 고려한 과수원 환경 맞춤형 경로 제어 기술 개발이 필요하다.

본 연구는 과수원 환경 맞춤형으로 무인 제조작업을 위해 과수원 환경 파라미터를 입력 값(제조작업 폭, 작업 횟수, 제조작업기 넓이)으로 사용하였다. 경로 생성을 위해 제조로봇에 GNSS 모듈을 설

치하여 위치 정보를 얻고, 과수열 중심선을 따라 경로점(waypoint)을 생성하였다. 제조작업 경로는 과수열 중심선을 따라 생성된 경로점과 과수원 환경 파라미터를 입력 값으로 생성하였다. 주행 제어는 제조로봇 플랫폼을 기반으로 주행 파라미터 값을 튜닝하여 주행 시스템을 개발하였다. 또한 과수원 환경에서 생성된 제조작업 경로를 기반으로 주행 평균 오차를 산출하여 과수원 환경에서 무인 제조 적용 가능성 판단을 위한 실험을 수행하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 제조로봇 제원 및 시스템 구성

본 연구에서 사용된 제조로봇은 Fig. 1과 같다. 제조로봇의 구동륜은 케도형으로 설계하였고, 1.5 kW@3000 rpm 정격출력 성능을 가지는 2개의 구동모터와 감속기 조합으로 주행 장치의 파워트레인을 구성하였다. 자세한 로봇의 제원은 Table 1과 같다.



Fig. 1 Platform of weeding robot

Table 1 Specification of weeding robot

Description		Specification
Size(H×L×W)		930×1,400×1,520 mm
Expected load		Max. 650±30 Kg
Driving speed		Max. 4 Km/h
Motor*2ea	Rotational Frequency	Max. 3,000 RPM
	Rated Output	64 kg·cm
	Efficiency	80%
Decelerator	Deceleration Ratio	16:1
	Efficiency	95%
Drive source		Electric battery 50.8V/120Ah*2ea, 12.2kWh(6.1kWh*2ea)
Sprocket Peach		200 mm
Sprocket Diameter		195 mm

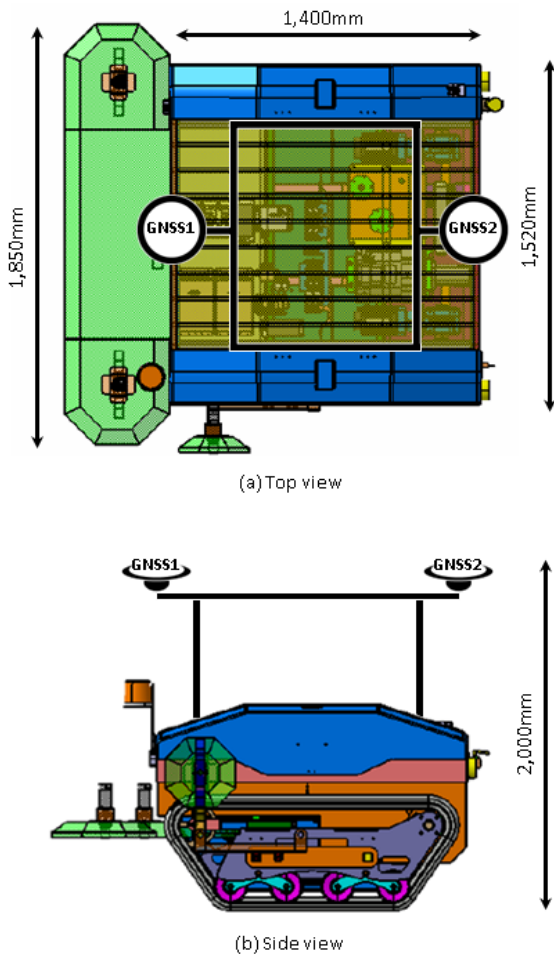


Fig. 2 Schematic of GNSS module installation top view (a), side view (b)

측위 시스템은 듀얼 안테나를 사용하여 RTK (real-time kinematics) 모드와 방위각 산출이 지원되는 모델(TDR-3000, SYNEREX, Korea)을 사용하였다. 과수원 환경에서 위성 신호의 원활한 통신을 위해 지면으로부터 2 m 높이에 GNSS 안테나가 위치하도록 Fig. 2와 같이 프레임 제작하여 설치하였다. 측위 시스템으로부터 수신된 위치 정보를 처리하고 제어 명령을 내리기 위한 제어 시스템 구성은 산업용 PC에 Ubuntu 18.04 LTS OS에 로봇 소프트웨어 개발 프로그램(robot operating system, ROS)을 사용하여 측위 시스템 및 하위 제어기의 연계가 가능하도록 구성하였다.

2.2 제조로봇 기하학적 모델링

본 연구에 사용된 제조로봇의 주행 장치는 궤도형 플랫폼으로 로봇의 기준 좌표축(X, Y, Z)은 기하학적 중심에 위치하는 무게중심(center of gravity, CG)을 기준으로 표현하고, 지면에서 2차원 평면 운

동만 한다고 가정한다. 이를 제조로봇의 기준 좌표 벡터로 정의하면, 제조로봇의 기구학적 모델의 관계식은 식 (1)과 같이 표현할 수 있다. 여기서, (x, y) 는 제조로봇의 기준 위치 좌표이고 θ 는 주행 방향을 나타낸다.¹⁷⁾

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 \\ \sin\theta & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ w \end{bmatrix} \quad (1)$$

무한궤도형 플랫폼은 좌우 궤도트랙의 속도 차이를 이용하여 선회하는 미끄럼 조향(skid steering) 방식을 이용한다. 내측 트랙 선속도 V_i 와 외측 트랙 선속도 V_o 는 슬립이 없다는 조건에 의해 식 (2)과 같이 표현된다.¹⁸⁾ 여기서, w_i, w_o 는 내측과 외측 트랙의 각속도, r 은 트랙의 스프라켓 반경을 의미한다.

$$\begin{aligned} V_i &= r w_i \\ V_o &= r w_o \end{aligned} \quad (2)$$

제조로봇의 선속도 v 와 회전 각속도 w 는 Fig. 3의 기구학적 모델에 따라 식 (3)과 식 (4)로 표현하였으며, 여기서 B 는 내·외측 트랙 사이의 간격으로 정의한다.¹⁹⁾

$$v = \frac{V_o + V_i}{2} = \frac{r(w_o + w_i)}{2} \quad (3)$$

$$w = \frac{V_o - V_i}{B} = \frac{r(w_o - w_i)}{B} \quad (4)$$

Fig. 3에서 순간회전중심(instantaneous center of rotation, ICR)은 두 트랙 축이 이루는 직선 위에 위치하고, 여기서, 제조로봇 내·외측 트랙의 선회반경(turning radius)은 R_i, R_o 로 표현하였다. 제조로봇 선회반경 식을 도출하기 위해 양측 트랙의 속도비와 선회반경 비를 사용하였다.²⁰⁾ 이를 식 (5)과 같이 나타내고, R 에 대하여 정리하면, 식 (6)과 같다.

$$V_o : R + \frac{B}{2} = V_i : R - \frac{B}{2} \quad (5)$$

$$R = \frac{B(V_o + V_i)}{2(V_o - V_i)} \quad (6)$$

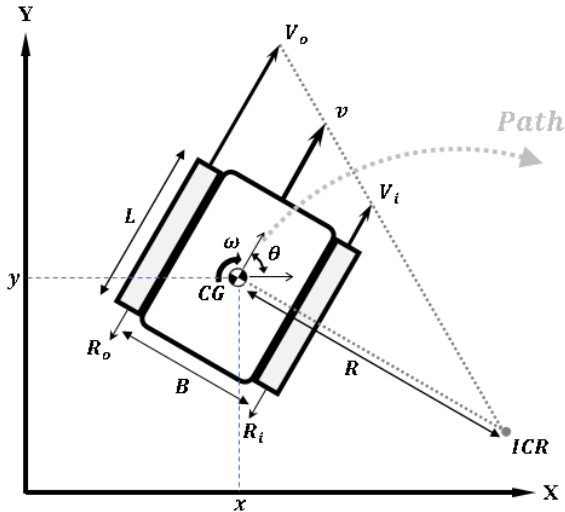


Fig. 3 Kinematic skid steering model of weeding robot

2.3 Follow the Carrot 경로추종 방법

제초로봇의 경로추종 방법은 Fig. 4와 같이 로봇의 중심좌표와 목표지향점을 지나는 직선을 찾아 로봇의 방향이 직선의 방향과 일치하도록 제어하는 FTC (follow-the-carrot) 알고리즘을 사용하였다.²¹⁾

Fig. 4에서 현재 경로점과 다음 경로점은 각각 (X_n, Y_n) , (X_{n+1}, Y_{n+1}) 으로, 로봇의 중심좌표는 (X_c, Y_c) 으로 표현하였다. 이때 경로점 n 과 $n+1$ 이 이루는 직선의 수직인 점을 내분한 벡터 내적은 식 (7)과 같다.

$$u_p = \frac{(X_c - X_n)(X_{n+1} - X_n) + (Y_c - Y_n)(Y_{n+1} - Y_n)}{(X_{n+1} - X_n)^2 + (Y_{n+1} - Y_n)^2} \quad (7)$$

이때 벡터 내적으로부터 제초로봇 중심좌표에서 최단 거리의 경로상 위치는 식 (8), (9)과 같이 산출된다.

$$X_o = X_n + u_p(X_{n+1} - X_n) \quad (8)$$

$$Y_o = Y_n + u_p(Y_{n+1} - Y_n) \quad (9)$$

글로벌 좌표에서 경로점 사이의 벡터 각도 ψ_p 는 식 (10)과 같이 계산할 수 있으며, 이에 따라 지향각 명령 ψ_d 은 경로상의 지향점 (X_d, Y_d) 과 제초로봇의 중심좌표 (X_c, Y_c) 에 대해서 다음과 같이 계산된다.²²⁾

$$\psi_p = \tan^{-1} \left(\frac{Y_{n+1} - Y_n}{X_{n+1} - X_n} \right) \quad (10)$$

$$X_d = X_o + d_n \cos(\psi_p) \quad (11)$$

$$Y_d = Y_o + d_n \sin(\psi_p) \quad (12)$$

$$\psi_d = \tan^{-1} \left(\frac{Y_d - Y_c}{X_d - X_c} \right) \quad (13)$$

지향각 명령 ψ_d 과 현재 제초로봇의 지향각 ψ_c 사이의 오차 e_ψ 는 다음과 같이 정의한다.

$$e_\psi = \psi_d - \psi_c \quad (14)$$

정의된 오차를 0으로 수렴시키는 제어 명령을 위해 다음과 같이 PID 제어를 적용하였다.

$$k_p e_\psi + k_i \dot{e}_\psi - k_d \ddot{e}_\psi = 0 \quad (15)$$

2.4 주행 경로 생성 방법

본 연구에서는 Fig. 5와 같이 과수열의 중심선을 따라 제초로봇을 원격 운용하여 주행한 경로상의 위치 데이터를 기반으로 주행경로를 생성하는 방법을 제안하였다.²³⁾

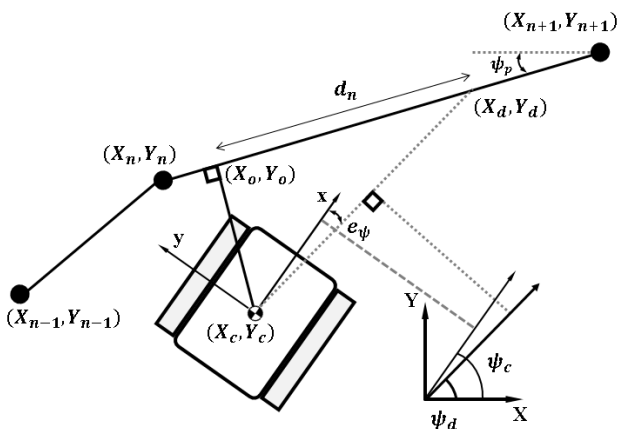


Fig. 4 Concept of follow-the-carrot path tracking

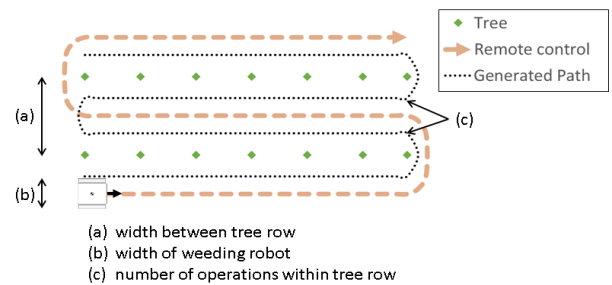


Fig. 5 Example of path generation method

주행한 경로상의 위치 데이터는 GNSS 수신기를 통해 얻은 위경도 좌표를 UTM (universal transverse mercator) 좌표계로 변환하여 사용하였다.

Fig. 6은 과수원 환경에서 원격으로 운용하여 수집한 위치 데이터를 이용하여 제초작업 경로를 생성하는 과정이다. 이를 기반으로 과수열의 제초 작업 폭과 작업기의 폭을 파라미터로 설정하면 이에 맞춰 과수열 사이의 주행 횟수가 결정된다.

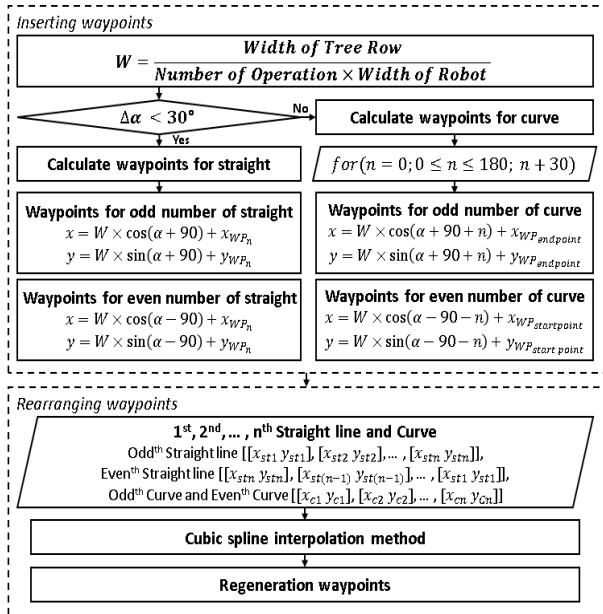


Fig. 6 Flowchart of regeneration path algorithm from center of fruit tree row path

각 글로벌 좌표를 기준으로 경로점 벡터 각도는 식 (16)로 표현할 수 있고, 이를 이전 경로점과 현재 경로점 사이의 벡터 각도 차는 식(17)로 나타내었다.

$$a_n = \text{atan2}(\text{Waypoint}_n - \text{Waypoint}_{n-1}) \quad (16)$$

$$\Delta a = |a_n - a_{n+1}| \quad (17)$$

이를 기준으로 직선 구간 및 곡선 구간을 구분하였다. 구분된 구간은 각 파라미터 조건 변수로 제초 작업 폭, 작업 횟수, 제초작업기 넓이를 입력 값으로 하여 구분된 구간에 따라 경로점을 추가하였다. 이를 통해 입력된 작업 조건에 따라 작업 경로가 생성된다. 각 조건에 따라 추가된 경로는 운행의 부드러움을 위해 UTM 좌표계(x, y)와 time stamp 값을 파라미터 변수로 3차원 스플라인 곡선으로 보간한 후, 경로점 기반 자율 주행을 위한 속도를 결정한다.²⁴⁾

2.5 주행 경로 생성 및 주행 시험

과수원 제초 작업 환경은 거의 직선 또는 완곡한 곡선으로 이루어진 작업 구간과 다음 작업 열로 이동하기 위한 선회 구간으로 크게 두 가지 구역이 존재한다. Fig. 7과 같이 주행 경로 생성 및 주행 성능 시험을 위해 작업 폭을 3 m로 설정하고 원격으로 주행하여 위치 데이터를 얻었다. 이를 기반으로 직선의 작업 구간을 포함하는 경로 A와 곡선의 작업 구간을 포함하는 경로 B의 경로점을 이용하여 주행 경로(interpolated path)를 생성하였다.

주행 성능 시험은 국립농업과학원 농업공학부 농기계 주행 시험장 내 콘크리트 포장에서 수행하였다. 제초로봇의 주행 속도는 2km/h로 고정하였으며, 다수의 경로 조건에서 경로추종 반복 시험(trial and error)을 통해 제어기 계수는 $k_p=2$, $k_i=0.0005$, $k_d=0.0005$ 로 결정하였다.

Table 2는 생성된 경로 A, B를 3회 반복 추종한 횡오차 결과를 구간별로 최대 평균 주행 오차, 최대 주

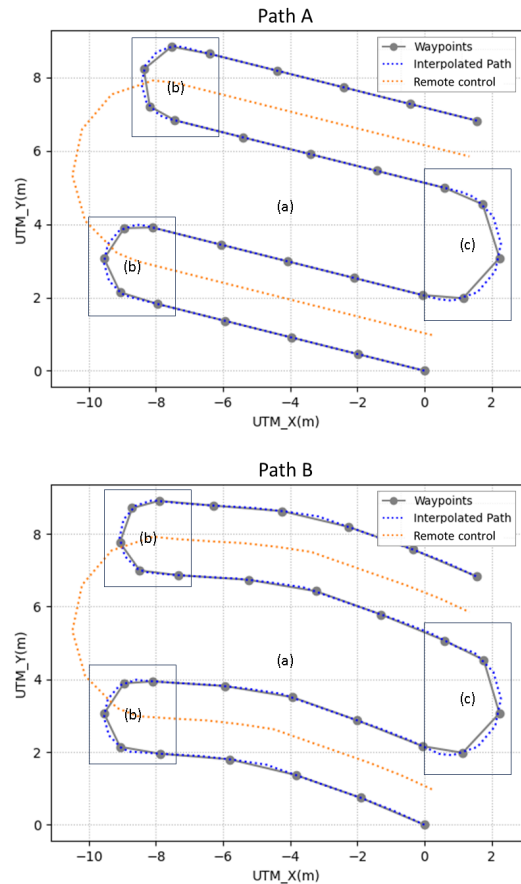


Fig. 7 Case of regeneration path method and division of the weeding section (a), steering section (b) and (c) to Path A and Path B

Table 2 Lateral deviation of Path A and Path B according to section (a), (b), (c)

section		RMSE (m)	max (m)	maximum deviation (m)
Path A	(a)	0.031	0.125	0.19
	(b)	0.155	0.297	0.567
	(c)	0.128	0.267	0.51
Path B	(a)	0.048	0.127	0.241
	(b)	0.166	0.299	0.597
	(c)	0.119	0.256	0.479

행 오차, 최대 주행 오차 폭을 나타냈다. 직선의 작업 구간을 포함하는 경로 A의 주행 시험 결과 작업 구간 (a)에서는 지정한 경로에서 최대 평균 주행 오차 0.031 m, 최대 주행 오차 0.125 m, 최대 주행 오

차 폭이 0.19 m 로 확인하였다. 선회 구간에서 최대 평균 주행 오차는 선회 구간 (b)에서 0.155 m, 선회 구간 (c)에서 0.128 m 이고, 최대 주행 오차는 모든 구간에서 0.3 m 이내로 확인하였다. 완곡한 곡선의 작업 구간을 포함하는 경로 B의 경우, 작업 구간 (a)에서 최대 평균 주행 오차 0.048 m, 최대 주행 오차 0.127 m, 최대 주행 오차 폭이 0.241 m 크기로 경로 A 대비 약 0.05 m 크게 확인되었다. 선회 구간의 최대 평균 주행 오차는 선회 구간 (b)에서 0.166 m, 선회 구간 (c)에서 0.119 m 크기로 확인하였다. 경로 B의 모든 선회 구간에서 최대 주행 오차는 0.3 m 이내로 확인하였다. 주행 실험 결과, 제초 작업 구간에서 최대 평균 주행 오차 0.05 m, 최대 주행 오차 0.13 m 이내로 과수원 환경에 형성된 두둑은 약 0.4 m 넓이인 것을 감안하면 과수원 포장 시험이 가능하다고 판단하였다.

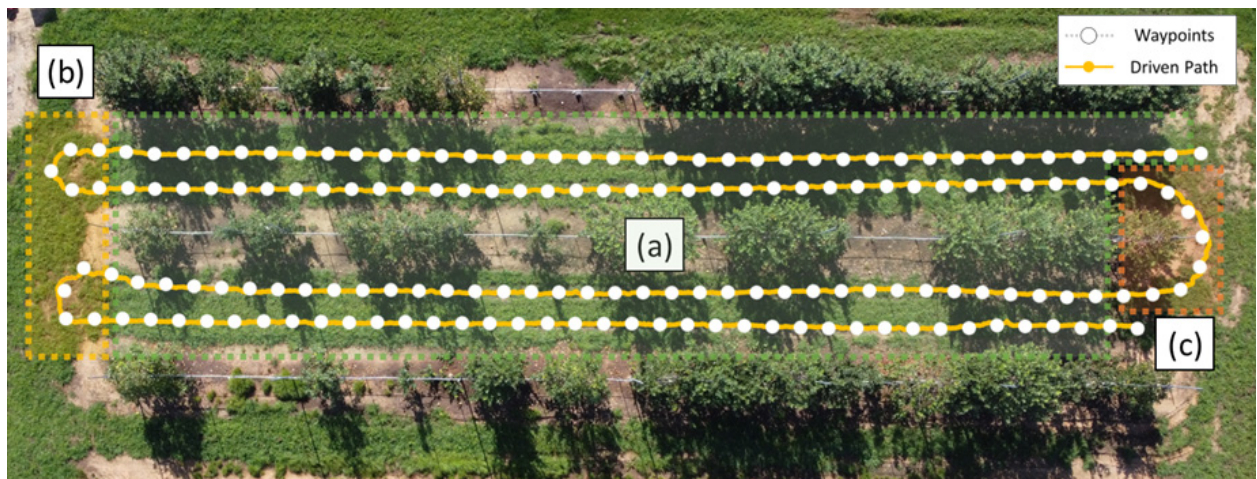


Fig. 8 Generated path and driven path of weeding section (a), steering section within tree row (b), steering to next row (c) in orchard

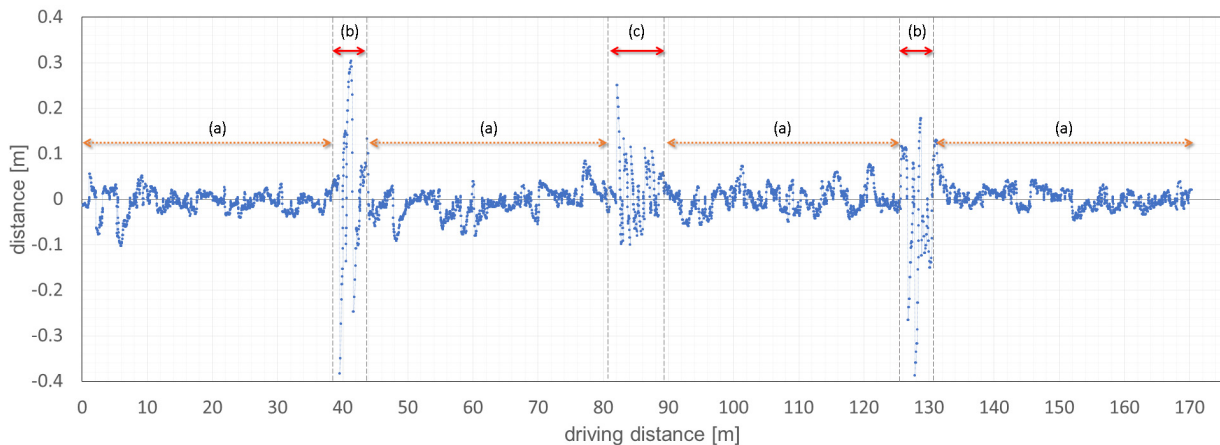


Fig. 9 Lateral position error of weeding section (a), steering section within tree row (b), steering to next row (c) in orchard

2.6 과수원 포장 시험

제초로봇의 과수원 포장 주행 성능 시험을 위해 원예특작과학원 사과 과수 시험 포장에서 경로를 생성하였다. Fig. 8은 사과 과수원 시험 포장에서 과수폭 5m (과수폭 4m + 안전거리 1m) 이고 작업횡수는 2회로 생성된 경로이다. 과수 사이에 위치한 흰색 점은 경로 생성 경로점이다. 생성된 경로는 작업구간 (a) 및 선회 구간 (b), (c)로 구분하여 표시하였고, 자율주행은 노란색 선으로 표현하였다.

Fig. 9는 과수원 내 계획 경로에서 수행한 경로 추종의 주행 거리에 따른 횡오차를 나타낸 결과이다. 작업 구간 (a)에서 지정한 경로에서 평균제곱근 오차(RMSE) 값은 0.029 m 이고, 최대 주행 오차 0.15 m 이내로 주행을 하였으며, 주행경로를 이탈하여도 수렴하는 양상을 확인할 수 있었다. 선회 구간 (b)에서 평균 주행 오차는 0.124 m 이고, 상대적으로 선회 반경이 큰 선회 구간 (c)에서 평균 주행 오차는 0.047 m로 확인하였다.

3. 결론

본 연구는 과수원 환경에 따라 무인 제초를 위한 경로 생성 및 경로 제어 방법을 개발하였다. 이를 위해 과수원 환경 파라미터를 입력 값으로 제초작업 폭, 작업 횡수, 제초작업기 넓이 등을 사용하였다. 제초작업 경로 생성을 위해 제초로봇을 원격 운용하여 과수열 중심선을 따라 GNSS 기반 위치 데이터를 얻었고, 생성된 작업 경로를 기반으로 주행 성능시험을 수행하였다.

본 연구를 통해 개발된 과수원 제초로봇의 도입은 농가 인구 감소와 노동력 부족 문제를 해결하고 농작업의 생산성을 향상시키는 데 큰 기여를 할 수 있다. 무인 제초로봇은 제초작업에 필요한 노동력과 소요 시간 절감하고 작업 효율성을 증가시킬 수 있다. 또한, 제초로봇은 화학물질 사용을 최소화하면서도 정확하고 효과적인 제초 작업을 수행할 수 있어 환경 친화적인 농업 실현에 도움이 될 것이다. 이러한 첨단 기술의 도입으로 과수원 제초 작업에서의 노동 집약성과 화학물질 사용으로 인한 부작용을 최소화하며, 고령화되고 노동력 부족한 농가에서도 지속 가능한 농업 생산을 유지할 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 농촌진흥청 연구사업(세부 과제 번호:

PJ015595012023, 사과 과수원용 지능형 제초기 연구) 지원에 의하여 수행되었음을 밝힙니다.

이해관계(CONFLICT OF INTEREST)

“저자는 이 논문과 관련하여 이해관계 충돌의 여지가 없음을 명시합니다.”

References

- 1) E. ATAY et al., “The Effect of Weed Competition on Apple Fruit Quality,” *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, Vol.45, No.1, pp.120-125, 2017.
- 2) S. Y. Shin et al., “Basic study on the development of weeding robot for upland field (I)-Analysis of weeding effect for a yield of vegetable,” conference proceeding of Korean Society for Agricultural Machinery, Vol.26, No.2, pp.218-218.
- 3) H. G. Kim, “Agriculture, Forestry and Fishery Survey in 2022,” *Statistics Korea*, Press Release, April, 2023.
- 4) I. Y. Lee, “Occurrence of Weed Flora and Changes in Weed Vegetation in Orchard Fields of Korea,” *Weed & Turfgrass Science*, Vol.6, No.1, pp.21-27, 2017.
- 5) D. L. Shaner and H. J. Beckie, “The future for weed control and technology,” *Pest Management Science*, Vol.70, No.9, pp.1329-1339, 2014.
- 6) H. N. Lee and Y. J. Kim, “Development of a multi-purpose driving platform for Radish and Chinese cabbage harvester,” *Journal of Drive and Control*, Vol.20, No.3, pp.35-41, 2023.
- 7) Y. T. Kim et al., “Technology Trend on Autonomous Agricultural Machinery,” *Journal of Drive and Control*, Vol.19, No.1, pp.95-99, 2022.
- 8) S. H. Cho et al., “Estimation of two-dimensional position of soybean crop for developing weeding robot,” *Journal of Drive and Control*, Vol.20, No.2, pp.15-23, 2023.
- 9) G. H. Kim, S. C. Kim and Y. K. Hong, “Traveling Performance of a Robot Platform for Unmanned Weeding in a Dry Field,” *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*,

- Vol.31, No.19, pp.43-50, 2014.
- 10) S. H. Lee et al., "Development of Small-Sized Walking-Type Weeding Cultivator," Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol.23, No.3, pp.1-8, 2022.
 - 11) 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, pp.19-28, 2022.
 - 12) X. Wu et al., "Robotic weed control using automated weed and crop classification," Journal of Field Robotics, Vol.37, pp.322-340, 2020.
 - 13) D. G. Choi, J. H. Song and I. K. Kang, "Effect of Tree Height on Light Transmission, Spray Penetration, Tree Growth, and Fruit Quality in the Slender-spindle System of 'Hongro'/M9 Apple Trees," Korea Journal of Horticultural Science and Technology, Vol.32, No.4, pp.454-462, 2014.
 - 14) J. H. Kim et al., "Development of Leader-Follower Tracked Vehicle for Agriculture: Convergence of Skid Steering and Pure Pursuit using β Compensation Coefficient," Journal of Institute of Control, Robotics and Systems, Vol.24, No.11, pp.1033-1042, 2018.
 - 15) Y. J. Yoon, J. H. Kim and D. J. Kang, "The Study of The Autonomous Driving Method for Tracking Way Point at The Unmanned Vehicle," conference proceeding of the Korean Society of Control, Robotics and Systems, pp.1-5, 2011.
 - 16) X. Z. Han, "Development of Path Generation and Robust Tracking Controller for Unmanned Tillage Tractor in Polygonal Fields," doctoral dissertation, Seoul National University, Seoul, Republic of Korea, 2017.
 - 17) M. H. A. Sidi et al., "Modeling and path tracking control of a tracked mobile robot," 2018 IEEE 14th International Colloquium on Signal Processing & Its Applications (CSPA), Penang, Malaysia, pp. 72-76, 2018.
 - 18) S. H. Lee, C. S. Han and C. J. Kim, "A development of a Military type multi-purpose tracked robot," Proceeding of Korean Society for Precision Engineering 2007 Autumn Conference, pp.57-58, 2007
 - 19) J. Morales et al., "Power Consumption Modeling of Skid-Steer Tracked Mobile Robots on Rigid Terrain," in IEEE Transactions on Robotics, Vol.25, No.5, pp.1098-1108, 2009.
 - 20) K. H. Lee et al., "Development of Path Tracking Algorithm and Variable Look Ahead Distance Algorithm to Improve the Path-Following Performance of Autonomous Tracked Platform for Agriculture," Journal of Korea Robotics Society, Vol.17, No.2, pp.142-151, 2022.
 - 21) S. M. Yoon et al., "A Simulation Study for Performance Analysis of Path Tracking Method of Follow the Carrot and Pure Pursuit," Joint Academic Conference of the Korean Association of Ocean Science and Technology Societies, Vol.1, No.1, pp.1582-1585, 2012.
 - 22) J. H. Sohn, C. H. Lee, Y. J. Kim and S. S. Kim, "Evaluation of Path Tracking Performance of a Self-driving Tracked Vehicle," Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A, Vol.45, No.12, pp.1167-1176, 2021.
 - 23) G. Y. Song and J. W. Lee, "Path Planning for Autonomous Navigation of a Driverless Ground Vehicle Based on Waypoints," Journal of Institute of Control, Robotics and Systems, Vol.20, No.2, pp.211-217, 2014.
 - 24) T. M. Jensen, "Waypoint-Following Guidance Based on Feasibility Algorithms," master dissertation, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway, 2011.