

승용형 농기계용 직진 자동조향장치 주행특성 연구

Study on Traveling Characteristics of Straight Automatic Steering Devices for Drivable Agricultural Machinery

원진호^{1,2} · 전진택¹ · 홍영기¹ · 양창주¹ · 김경철¹ · 권경도¹ · 김국환^{1*}

Jin-ho Won, Jintack Jeon, Youngki Hong, Changju Yang, Kyung-chul Kim,
Kyung-do Kwon and Gookhwan Kim

Received: 09 Sep. 2022, Revised: 13 Oct. 2022, Accepted: 13 Oct. 2022

Key Words : Agricultural machinery(농업기계), Autonomous steering(자율조향), GNSS RTK(고정밀측위시스템), Steering control(조향제어)

Abstract: This paper introduces an automatic steering system for straight traveling capable of being mounted on drivable agricultural machinery which user can handle it such as a tractor, a transplant, etc. The modular automatic steering device proposed in the paper is composed of RTK GNSS, IMU, HMI, hydraulic valve, and wheel sensor. The path generation method of the automatic steering system is obtained from two location information(latitude and longitude on each point) measured by GNSS in advance. From HMI, a straight path(AB line) can be created by connecting latitude and longitude on each point and the device makes the machine able to follow the path. During traveling along the reference path, it acquires the real time position data every sample time(0.1s), compares the reference with them and calculates the lateral deviation. The values of deviation are used to control the steering angle of the machine using hydraulic valve mounted on the axle of front wheel. In this paper, Pure Pursuit algorithm is applied used in autonomous vehicles frequently. For the analysis of traveling characteristics, field tests were executed about these conditions: velocity of 2, 3, 4km/h which is applied to general agricultural work and ground surface of solid(asphalt) and weak condition(soil) such as farmland. In the case of weak ground state, two experiments were executed about no-load(without work) and load(with work such as plowing). The maximum average deviations were presented 2.44cm, 7.32cm, and 11.34cm during traveling on three ground conditions : asphalt, soil without load and with load(plowing).

1. 서 론

최근 우리나라는 농업인의 고령화, 여성화로 인한 노동력 감소로 큰 어려움을 겪고 있다. 외국인의 유입으로 어느 정도 회복되는 추세였으나 COVID-19로

인해 이마저도 어려운 실정이다.

노지에서 노동력 부족을 해결하고 농작업 편이를 제공하기 위해 개발된 농업기계인 트랙터, 이앙기 등은 힘든 일들을 대신해 주지만 농작업 과정에서 운전이나 조작 미숙으로 인한 사고 사례가 꾸준히 발생하고 있다. 안전사고를 미연에 방지하고 농업 효율성을 향상시키기 위해 최근에 농업기계에 자율주행 기술을 접목한 무인 농작업 기술 개발 및 산업화가 많이 이루어지고 있다. 자율주행 기술은 센서 가격의 하락과 함께 로봇, 차량을 중심으로 활발한 연구 및 상용화가 진행되고 있다¹⁾.

2021년 기준 세계 농기계 시장의 규모는 약 1,568억 달러로 지속적인 증가가 이루어지고 있고, 그 중

* Corresponding author: meceng93@korea.kr

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

2 Department of Bioindustrial Machinery Engineering, Jeonbuk National University, Jeonju 54896, Korea

Copyright © 2022, 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.

가장 많은 비중을 차지하는 농기계는 트랙터이다²⁾. 트랙터는 이앙기, 콤바인과 더불어 대표적인 농업기계 중 하나로, 자율주행 및 무인화 기술을 접목한 제품이 꾸준히 상용화되고 있다. 해외의 경우, John Deere는 트랙터에 6쌍의 스테레오 비전센서를 사용하여 360° 전방위에 걸쳐 실시간으로 장애물 등을 감지할 수 있는 기술을 개발하였으며, 스마트폰을 이용하여 원격제어가 가능하도록 시스템을 구축하였다³⁾. 일본의 경우 Iseki 사에서 개발한 자율 조향 트랙터와 양분 센서를 활용하여 위치별로 양을 다르게 비료를 살포할 수 있는 이앙기를 상용화하였으며, Yanmar 사의 로봇 트랙터는 2018년 10월부터 판매를 시작하였다. 또한 Kubota 사에서는 직진 주행을 보조해주는 자동 조향 이앙기가 2016년 9월에 상용화되었으며, 자율주행 콤바인과 함께 기존의 콤바인에 탈부착이 가능한 모듈형 자동 조향 키트를 개발하여 2018년 12월에 상용화 하였다⁴⁾. 또한, Topcon 사의 경우, 승용형 농기계에 장착 가능한 자동 조향장치(Auto-guidance system)를 개발 및 상용화하였다.

우리나라에서도 자율주행 기술의 국산화를 위해 꾸준한 연구를 진행하고 있으며, 최근 상용화가 진행되었다. 대동은 2019년에 직진 구간에서 자동조향이 가능한 이앙기를 생산, 상용화하였으며, 2021년에는 직진 자동 조향이 가능한 트랙터를 상용화하였다. LS엠트론은 선회 구간에서 K-Turn이 가능한 주행 알고리즘을 개발하여 자율작업이 가능한 트랙터를 개발, 상용화를 진행하고 있다³⁾. 또한 시뮬레이션을 통해 자율주행 콤바인의 포장 자동 경로 생성 및 추종 연구가 진행되었으며⁵⁾, 트랙터의 자율주행 정밀도 향상을 위해 조향제어를 통한 경로 추종 알고리즘 연구가 진행되고 있다⁶⁾.

이처럼 우리나라에서도 농업기계에 적용 가능한 자율주행 기술의 국산화를 위해 꾸준히 연구하고 있지만, 고가의 자율주행 농업기계를 별도로 구매해야 한다는 점이 자율주행 기술의 상용화가 가속화 되지 못하는 이유로 분석된다.

본 논문은 자율주행 기술을 승용형 농업기계에 적용하여 농작업 편의성 및 생산성을 향상시키기 위해 기존의 승용형 농기계에 부착 가능한 자동 조향장치를 개발하여 그에 대한 주행 특성을 분석하였다. 2장에서는 장치의 구성과 농기계에 적용, 직진 자동 조향 방식과 경로 추종 알고리즘에 대해 설명하였고, 3장에서는 자동 조향장치를 실제 농기계에 장착하여 수행한 시험 결과를 분석하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 모듈형 직진주행 자동조향 장치 구성

본 논문에서 제안한 기존 승용형 농기계에 장착 가능한 모듈형 직진주행 자동조향 장치는 장착된 농기계의 현재 위치를 정밀하게 측정할 수 있는 고정밀 측위 시스템(RTK-GNSS, Real Time Kinematic - Global Navigation Satellite System), 농기계의 자세 변화를 측정할 수 있는 관성측정장치(IMU, Inertial Measurement Unit), 농기계의 조향축에 장착하여 조향 제어를 수행할 수 있는 조향 액추에이터와 사전 경로 설정 및 상태, 제어 환경 등을 설정할 수 있는 사용자 인터페이스 환경(HMI, Human Machine Interface) 등으로 구성되어 있다.

Fig. 1에서 보는 바와 같이 본 논문에서 사용한 고정밀 측위 시스템은 기존 하나의 안테나를 사용하여 RTK(Real-Time Kinematics) 모드가 지원되는 모델이 아니라, 듀얼 안테나를 통해 얻어진 위치값을 토대로 방위각까지 산출할 수 있는 모델을 사용하였다(TDR-3000, SYNEREX, Korea). 이 시스템은 인공위성과 GNSS 수신기의 원활한 통신을 위해 트랙터 캐빈의 상부에 장착하였으며, 측정 오차는 ± 2cm 이다.

관성측정장치는 노지와 같은 불규칙한 형태의 노면이나 경사 등의 영향으로 발생하는 트랙터의 자세 변화를 측정하여 오일러각 등으로 산출해 주는데, 이는 측위 시스템에 의해 측정된 위치값을 보정하여 위치 정밀도를 향상시키고, 진행하는 방향의 방향각을 측정하여 측위시스템으로부터 얻은 데이터가 불안정할 때 발생하는 오차를 예측하여 주행정보 보정에 활용된다. 고정밀 측위 시스템과 관성측정장치의 제원은 Table 1과 Table 2에 나타내었다.

Fig. 2에 나타난 사용자 인터페이스 환경은 고정밀 측위 시스템과 관성측정장치를 통해 취득 및 보정한 데이터를 기반으로 트랙터의 경로를 사전에 지정할 수 있고, 현재 농기계의 위치 정보를 모니터링 할 수



Fig. 1 GNSS RTK(Left), IMU(Right)

Table 1 Specifications of RTK GNSS

Description	Specification
Model	TDR-3000 (SYNEREX, Korea)
Receive Satellite	GPS L1/L2/L5 GLONASS : L1/L2 BeiDou : B1/B2 Galileo : L1/E5 QZSS : L1/L2 SBAS : L1/L5
RTK Accuracy	0.01[m] + 1[ppm] RMS
Heading Accuracy	2[m] Baseline < 0.28[°] 1[m] Baseline < 0.4[°]
I/O Port	RS232 (D-sub 9 pin)

Table 2 Specifications of IMU

Description	Specification
Model	LPMS - CANAL 2 (LP - Research, Japan)
Wired Interface (Max. baudrate)	USB [921.6 Kbit/s] CAN Bus [1 Mbit/s]
Accuracy	< 0.5[°] (Static) < 2[°] RMS (dynamic)
Size , Weight	48*40*25[mm], 66.2[g]
Orientation Range	Roll : ±180[°] Pitch : ±90[°] Yaw : ±180[°]

있는 시스템으로, 농기계의 높이와 차륜 간 거리 등 농기계에 따라 달라질 수 있는 규격을 시스템상에 반영할 수 있도록 해준다. 또한, 주행 속도, 작업 폭 등 작업 조건의 설정 및 변경이 가능하여 다양한 크기의 농기계의 여러 주행 조건에 맞춰 적용이 가능하도록 개발되었다.



Fig. 2 HMI (A : Main display, B : Vehicle specification setting, C : Field management, D : Lateral controller)



Fig. 3 Hydraulic valve(Left), wheel angle sensor (Right)

Table 3 Specifications of Agricultural tractor

Description	Specification
Model	LUXEN 74
Length	3,980[mm]
Width	1,920[mm]
Height	2,680[mm]
Engine	75/2500[PS/RPM]
Displacement volume	3,409[cc]

본 논문에서 승용형 농기계의 조향 제어를 위해 앞차축의 핸들과 연결된 유압 실린더 사이에 유압 밸브를 장착하였고, 유압 밸브에 의한 앞바퀴의 회전량(각변위)을 측정하기 위해 앞바퀴 회전축에 홀센서를 장착하였다(Fig. 3).

Fig. 4에서 보는 바와 같이 본 논문에서 제안한 직진 주행을 보조하기 위한 모듈형 자동조향장치 요소 품들을 국제농업기계 74마력급 트랙터의 각각 정해진 위치에 장착하였고, 그 제원은 Table 3과 같다.

2.2 모듈형 자동조향 장치 경로 추종 알고리즘

본 논문에서 제안한 직진 자율주행을 도와주는 자동조향장치를 트랙터에 장착하여 사용자가 목표 경



Fig. 4 Agricultural tractor with modular steering control system(A : RTK-GPS, B : IMU, C : Hydraulic valve, D : Wheel angle sensor)

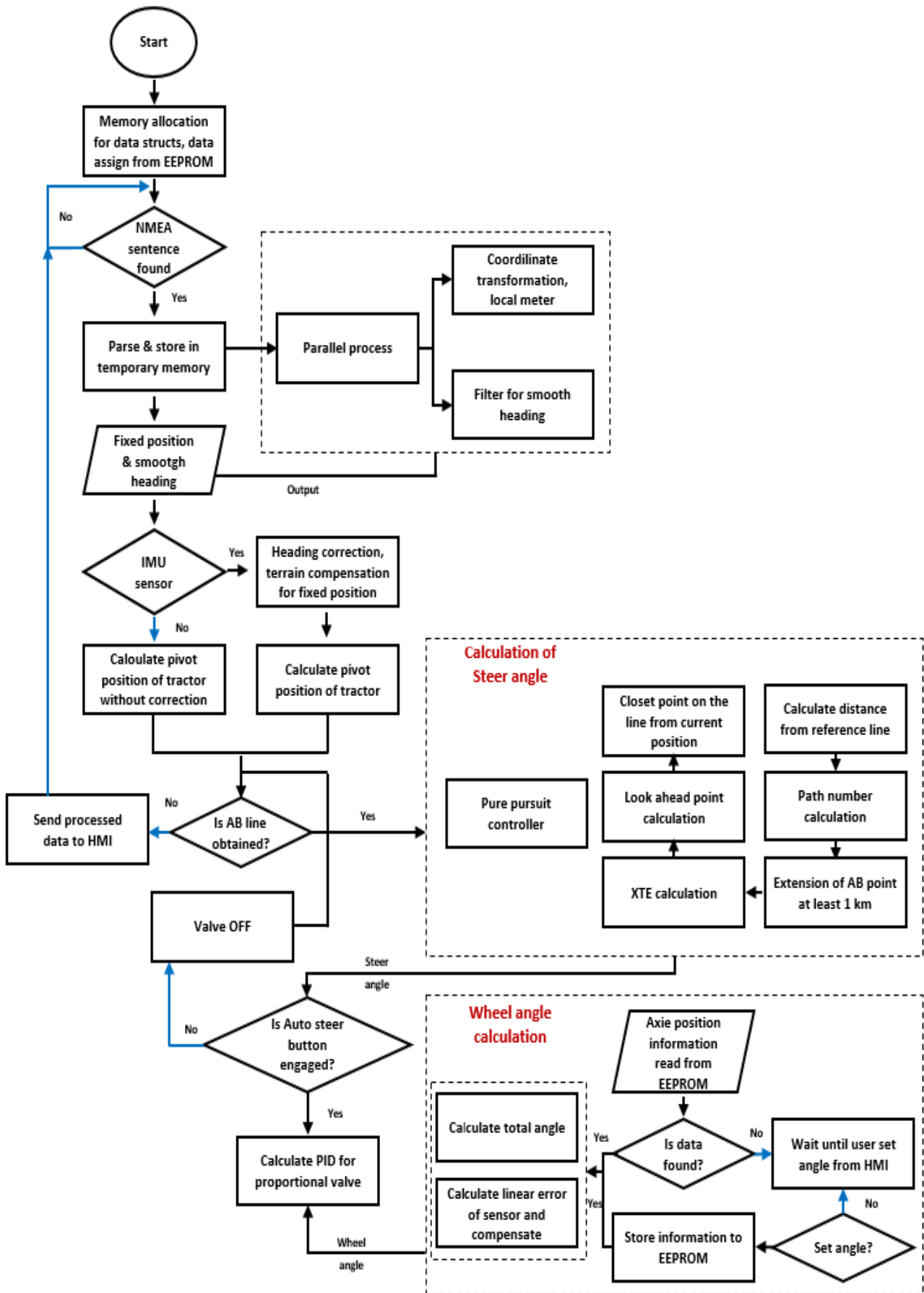


Fig. 5 Block diagram of modular steering system

로(AB라인)를 지정하고, 이를 기반으로 경로를 생성한 후, 개발된 알고리즘을 기반으로 조향 제어가 이루어지기까지의 과정은 Fig. 5와 같이 블록 다이어그램으로 표현하였다. 그림에서 보는 바와 같이 직진 자율 조향에 대한 기능을 주로 구성하였고, 외부 충격이나 고장, 장애물 등 돌발상황에 대한 부분은 추후 개발, 추가할 계획이다.

Fig. 6에서 보는 바와 같이 모듈형 자동조향 시스템은 고정밀 측위 시스템, 관성측정장치, 휠각도센서로부터 얻어진 측정값을 기반으로 조향각을 결정하여 유압밸브 형태의 액추에이터를 통해 조향 제어를 수행하여 사전에 설정해 놓은 경로(AB라인)를 따라 직진 자율주행을 수행하는 장치이다. 고정밀 측위 시스템으로부터 얻은 고정밀 위·경도 데이터를 통해 현재 트랙터의 위치를 측정하고, 관성측정장치를 이용하여 노면의 상태에 따른 트랙터의 자세 변화를 측정하여 위치 정보를 보정한다. 사용자는 작업 공간에서 작업할 위치에 대해 시작점(A)과 끝점(B)을 정하고, 이를 기반으로 추종할 경로를 생성한다(AB라인). 이 때, 작업 폭과 작업 공간을 고려하여 AB라인과 평행한 작업 경로를 자동으로 생성한다. 이렇게 생성된 경로를 따라 고정밀 측위시스템과 관성측정장치로 보정된 트랙터의 현재 위치값과 AB라인과의 오차를 구하고, 조향축과 연결된 유압밸브를 동작시켜 그 오차를 최소화하는 방식으로 경로를 추종한다. 이 때, 고정밀 측위 시스템으로부터 얻은 위치값은 위·경도 값으로 2차원 평면좌표값으로 변환하는 과정이 필요하다⁷⁾. 본 논문에서는 UTM 좌표 변환식을 사용하여 미터 단위의 직교좌표계로 변환하여 사용하였다. UTM 좌표 변환에 대한 지배방정식은 식 (1)에 나타내었다.

$$\begin{aligned} \text{Easting} &= (\text{Current}_{lon} - \text{ref}_{lon}) \\ &\quad \times \text{length of longitude per degree}(\text{ref}_{lon}) \\ \text{Northing} &= (\text{Current}_{lat} - \text{ref}_{lat}) \\ &\quad \times \text{length of latitude per degree}(\text{ref}_{lat}) \end{aligned} \quad (1)$$

2.2.1 차량 자세각 보정

본 논문에서 사용된 고정밀 측위 시스템은 한 쌍의 안테나를 장착하여 트랙터의 진행 방향을 산출할 수 있지만, 보다 정확한 진행 방향과 자세각을 결정하기 위해 관성측정장치를 사용하였다. 관성측정장치를 사용하여 진행 방향각을 결정하는 과정에서 발생하는 잡음 제거를 위해 방향코사인행렬(Direction

cosine matrix; DCM)을 적용하였고⁸⁾, 그 수식은 식 (2), 개략도는 Fig. 6에 나타내었다.

$$\begin{pmatrix} X_n \\ Y_n \\ Z_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{pmatrix} - R^{-1}(\theta_p, \theta_r, \theta_y) * \begin{pmatrix} B \\ A \\ h \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$R^{-1} = \begin{bmatrix} \cos\theta_r \cdot \cos\theta_y + \sin\theta_r \cdot \sin\theta_p \cdot \sin\theta_y & \cos\theta_r \cdot \sin\theta_y & -\cos\theta_r \cdot \sin\theta_p \cdot \sin\theta_y + \sin\theta_r \cdot \cos\theta_y \\ -\cos\theta_r \cdot \cos\theta_p \cdot \sin\theta_y + \sin\theta_r \cdot \cos\theta_y & \cos\theta_r \cdot \cos\theta_p \cdot \cos\theta_y & -\cos\theta_r \cdot \sin\theta_p \cdot \cos\theta_y - \sin\theta_r \cdot \sin\theta_y \\ -\sin\theta_r \cdot \cos\theta_p & \sin\theta_p & \cos\theta_r \cdot \cos\theta_p \end{bmatrix}$$

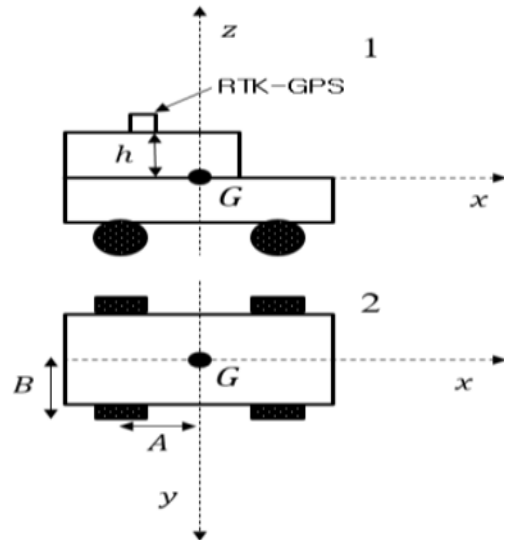


Fig 6 Schematic diagram of DCM (1 : Tractor of right side view, 2 : Tractor of plane figure)

이 때, X_n, Y_n, Z_n 은 GPS 안테나에서 수신되는 위치 별 좌표값이며, X_0, Y_0, Z_0 는 GPS 안테나 위치를 의미한다. A, B, h는 무게 중심으로부터 GPS 안테나까지의 거리를 의미하고, $\theta_r, \theta_p, \theta_y$ 은 관성측정장치로부터 측정된 오일러각(roll, pitch, yaw) 값이며, R은 오일러각의 회전 행렬식이다⁹⁾.

2.2.2 경로 추종 알고리즘(Pure pursuit algorithm)

본 논문의 모듈형 자동조향장치는 4륜형 이동체의 경로 추종에 많이 사용하는 Pure Pursuit 알고리즘을 적용하였다. Pure Pursuit 알고리즘의 경로 추종 방법에 대한 개략도는 Fig. 7과 같다¹⁰⁾.

이 알고리즘은 후륜 축의 중앙으로부터 AB라인상의 목표지점까지의 거리를 나타내는 전방 주시거리(Look-ahead distance, L_d)를 계산한다. 이는 애커만 방식의 차량이 전방 주시거리가 목표지점과 만나기 위해 원호(회전 반경, R)를 그리는 형태로 진행하는데, AB라인 상의 목표지점과 만나는 곳과 후륜 축(차량 방향)이 이루는 각(α)을 계산하여 조향 각도를

결정할 수 있다. Fig. 7에서 보는 바와 같이 에커만 방식의 전륜 조향각 δ 는 식 (3)을 사용하여 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다¹¹⁾.

$$\frac{L_d}{\sin(2a)} = \frac{R}{\sin(\frac{\pi}{2}-a)} \Rightarrow \frac{L_d}{\sin(a)} = 2R \quad (3)$$

$$R = \frac{L_d}{2\sin\alpha}$$

$$\tan(\delta) = \frac{L_w}{R} = \frac{2L_w\sin(\alpha)}{L_d} \quad (4)$$

$$\delta(t) = \tan^{-1}\left(\frac{2L_w\sin(\alpha(t))}{L_d}\right)$$

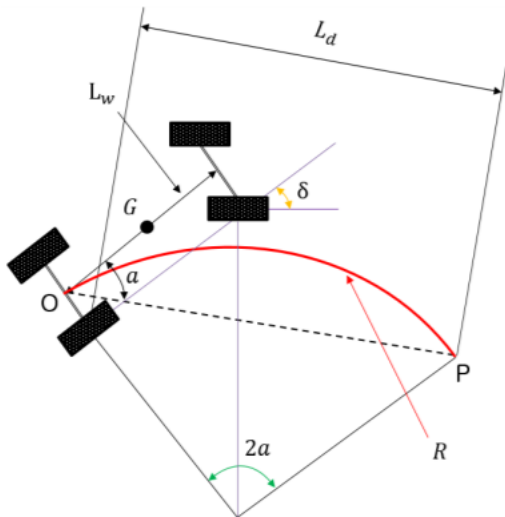


Fig. 7 Schematic diagram of Pure pursuit algorithm

2.3 시험 방법

본 논문에서 제안한 시스템의 주행 특성 분석을 위한 시험은 농촌진흥청 국립농업과학원 농업공학부 내 농기계 주행 시험장에 구성된 환경에서 수행하였다. Fig. 8에서 보는 바와 같이 주행 시험은 아스팔트 노면과 밭 포장에서 작업기를 사용하지 않고 주행하는 무부하 상태, 쟁기를 장착하여 밭을 갈면서 주행하는 작업기(쟁기) 장착 주행 총 3 경우에 대해 수행하였다. 트랙터 주행 속도는 농작업 속도를 고려하여 2, 3, 4km/h에 대해 시험을 수행하였고, 주행거리는 50m로 설정하였다.

첫 번째 시험은 미끄러짐 등의 발생을 최소화 한 강건한 토양 상태(아스팔트)에 대하여 수행하였다. 이는 노면의 상태에 따른 영향을 최소화하여 적용한 알고리즘이 얼마만큼의 경로 추종 성능을 갖고 있는지를 확인하기 위함이다. 두 번째 시험은 실제 농작

업을 수행하는 포장에서의 시험을 통해 제안한 시스템이 농작업 환경에서의 경로 추종 오차를 갖고 있는지를 검토하였고, 마지막 세 번째 시험은 실제 작업 부하가 작용하는 상황에서 제안한 시스템에 대한 경로 추종 오차를 분석하기 위함이다.

시험에 앞서 자동조향 시스템의 사전 경로 설정을 위해 트랙터를 임의의 지점으로 이동시킨 후 사용자 인터페이스 장치를 이용하여 임의의 위치 A, B 지점을 지정한 후, A점으로 복귀하여 직진 자율 조향시험을 수행하였다. 시험 환경, 트랙터 주행 속도에 따른 주행 오차와 주행 중 조향각 변위를 측정하였으며, 3가지 경우에 대해 각각 4번의 시험을수행하여 그 결과를 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 노면 상태와 주행 속도에 따른 횡편차 분석

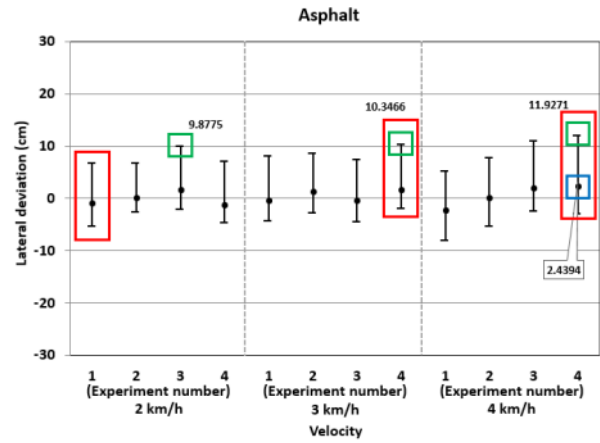
Fig. 9는 제안한 직진 자동조향 시스템을 앞에서 제시한 노면 상태와 주행 속도에 따른 횡편차(Lateral deviation)에 대한 경향을 나타내고 있다. Fig. 9는 각 조건에 대한 최대, 최소(위·아래 바 형태)와 평균(점) 편차를 보여주고 있다. Fig. 9에서 빨간 상자로 표시한 데이터는 각 속도별 최대 최소 편차가 가장 큰 것을 의미하고, 녹색 상자의 경우는 속도별로 최대 편차를 나타내고 있다. 또한, 파란 상자의 경우, 속도별 평균 편차 중 최대값을 표시하고 있다.

Fig. 9의 (a)는 아스팔트 상태로 노면이 강건하여 토양 강도의 영향으로 발생할 수 있는 슬립 등의 요인들을 최소화하여 수행한 결과를 나타내고 있다. 각 속도별 최대 편차 폭은 2km/h일 때는 12.09cm, 3km/h일 때는 12.32cm, 4km/h일 때는 14.95cm의 크기로 나타났다(빨간 상자). 기준 경로(AB) 대비 최대 편차는 2km/h일 때는 9.88cm, 3km/h일 때는 10.37cm, 4km/h일 때는 11.93cm의 크기로 나타났다(녹색 상자). 평균 편차는 최대 2.44cm(파란 상자) 이내로 주행함을 알 수 있다.

Fig. 9의 (b)는 농작업 환경과 동일한 토양 강도 하에서 자동조향 제어를 하였을 때의 결과를 나타내고 있다. 이 때, 농작업 부하가 가해지지 않은 무부하 상태에서 주행 시험을 수행하였고, 그 결과를 나타내고 있다. 각 속도별 최대 편차 폭은 2km/h일 때는 27.20cm, 3km/h일 때는 26.72cm, 4km/h일 때는 23.54cm의 크기로 나타났다. 기준 경로(AB) 대비 최대 편차는 2km/h일 때는 24.33cm, 3km/h일 때는



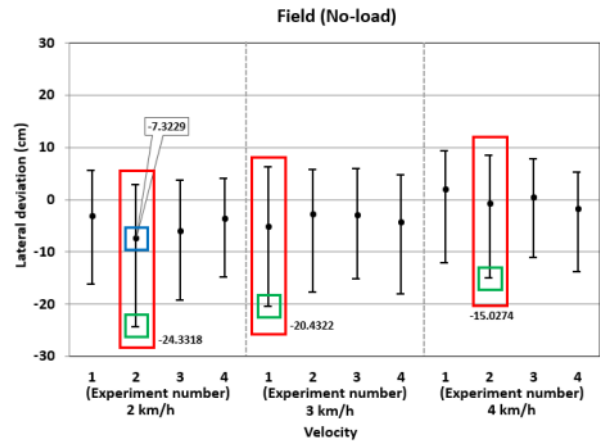
(a) Asphalt(solid soil condition)



(a) Asphalt(solid condition)



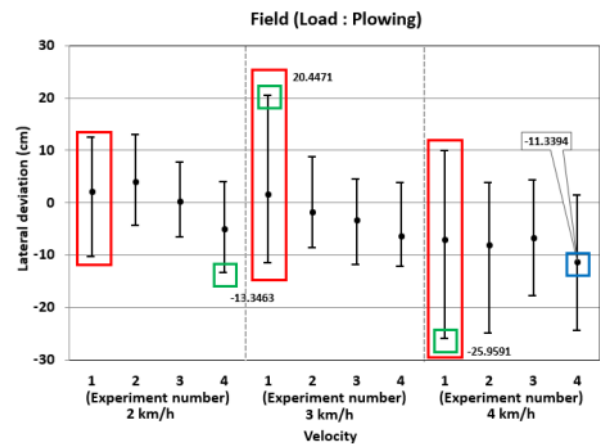
(b) Field(weak soil condition, no load)



(b) Field(no load)



(c) Field(weak soil condition, load : plowing)



(c) Field(load, plowing)

Fig. 8 Environment condition for field test of the automatic steering system

Fig. 9 The result of each velocity for lateral deviation according to soil condition and working load

20.43cm, 4km/h일 때는 15.03cm의 크기로 나타났다. 토양의 강건한 상태인 아스팔트(Fig. 9 (a))와 비교해보면, 토양 강도의 영향으로 2km/h일 때, 15.11cm의 크기만큼 더 큰 주행 횡편차를 나타내었는데, 이는 토양 강도의 영향으로 발생하는 슬립 등에 의한 편차로 분석된다. 하지만, 평균 편차를 보면 최대 7.32cm로 10cm 이내의 편차 내에서 주행함을 알 수 있다.

Fig. 9의 (c)는 농작업 환경과 동일한 토양 강도 하에서 쟁기 작업을 수행할 때 발생하는 작업 부하가 가해졌을 조건 하에서의 주행 결과를 나타내고 있다. 각 속도별 최대 편차 폭은 2km/h일 때는 22.70cm, 3km/h일 때는 32.06cm, 4km/h일 때는 35.86cm의 크기로 나타났다.

기준 경로(AB) 대비 최대 편차는 2km/h일 때는 13.35cm, 3km/h일 때는 20.45cm, 4km/h일 때는 25.96cm의 크기로 나타났다. Fig. 9의 (a)와 (b)의 결과와 비교해보면 두 결과에 비해 큰 횡 편차로 조향 제어함을 알 수 있다. 이는 작업기(쟁기)가 토양을 가는 과정에서 발생하는 슬립과 작업기가 토양에 박혀 작용하는 반력에 의해 트랙터의 주행에 간섭을 받은 것으로 판단된다. 또한 이로 인해 추종 경로에서 벗어나거나 조향 제어하더라도 그 반력으로 인해 제대로 기준 경로에 수렴하지 못하는 양상이 나타나는 걸로 분석되었으나, 최대 평균 편차는 11.34cm로 쟁기질이나 경운 작업을 수행할 때 겹치는 정도를 고려하더라도 안정적인 주행이 가능함을 알 수 있다.

3.2 주행 거리에 따른 횡편차 분석

Fig. 10은 위의 시험 결과 중, 속도별, 토양 상태별로 최대 편차를 갖는 데이터(Fig. 9의 빨간 박스)를 선택하여 50m를 주행하면서 조향 제어를 하였을 때 발생하는 횡 편차에 대한 결과값을 보여주고 있다. Fig. 10에서 보는 바와 같이 아스팔트 위에서 주행한 경우, 4km/h로 주행하였을 때, 최대 14.96cm의 편차 폭 이내에서 안정적으로 주행함을 알 수 있다. 최대 편차 폭 내에서 기준 경로를 따라 안정적으로 수렴하는 양상을 나타내고 있음을 알 수 있다. 논, 밭 포장인 토양 상태에서 주행한 결과를 살펴보면 2km/h일 때 27.2cm의 최대 편차 폭의 양상을 나타내었는데, 토양 강도가 약하여 바닥면과 바퀴의 마찰력이 충분히 확보되지 않아 발생한 미끄러짐 등의 영향으로 인해 조향 제어 입력이 제대로 반영되지 않아서 발생한 결과로 분석된다. 작업기를 사용하여 농작업을 수행하면서 기준 경로를 추종한 결과는 기준 경

로 대비 최대 25.96cm의 편차의 양상을 나타내는 경우도 나타났다. 그럼에도 수렴 속도가 느림을 알 수 있는데, 이는 작업기의 작업 반력과 약한 토양 강도로 인해 조향 제어 입력의 영향이 크게 반영되지 않았을 것으로 분석된다. 농작업 공간을 고려하였을 때, 최대 평균 편차가 11.93cm이고, 작업 시 겹침 정도(10 ~ 15cm)를 고려하였을 때, 작업 되지 않는 곳 없이 충분히 농작업이 가능할 것으로 판단된다.

Fig. 11은 각 조건에 대해 50m의 주행거리를 기준 경로를 따라 주행하면서 적용된 바퀴의 회전축 각변위를 나타낸 것이다. 이 결과에서 보는 바와 같이 토양 강도가 강한 상태(Asphalt)에서는 큰 각변위 없이 기준 경로를 따라 잘 주행하였음을 알 수 있다. 토양 강도가 약한 경우(Field(no load))의 경로 추종을 수행한 결과는 아스팔트에서 시험한 결과에 비해 다소 큰 각변위를 나타내고 있음을 알 수 있다. 이는 토양 상태에 따른 영향을 반영하여 제어 입력이 적용되고 있음을 알 수 있다. 논, 밭 포장에서 농작업을 수행할 경우(Field(load: Plowing))는 기준 경로를 추종하기 위한 회전축 각변위에 대한 제어 입력이 크게 적용되어 그만큼 반영되었음을 의미한다.

한편, Fig. 10에서 보는 바와 같이 큰 각변위를 적용하기 위한 제어 입력이 적용되었음에도 토양 상태와 작업기 반력 등으로 인해 실제 트랙터의 경로 추종에 반영된 정도가 적어 기준 경로 추종 편차가 다른 상황에 비해 크게 나타남을 알 수 있다.

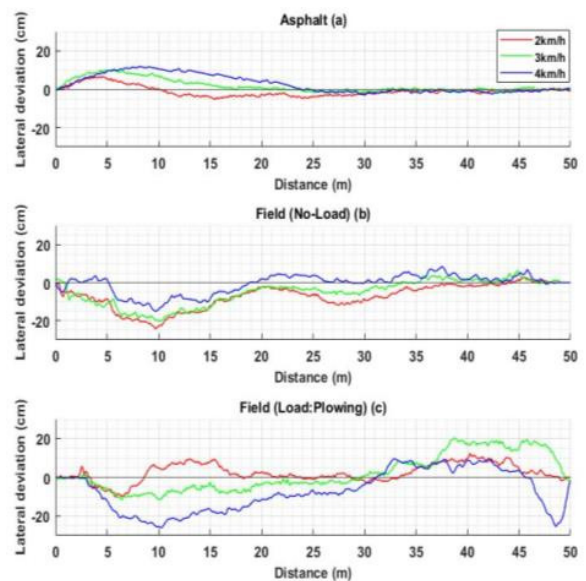


Fig. 10 Driving error according to tractor velocity and driving environment(a : Asphalt, b : Field (No-Load), c : Field (Load:Plowing))

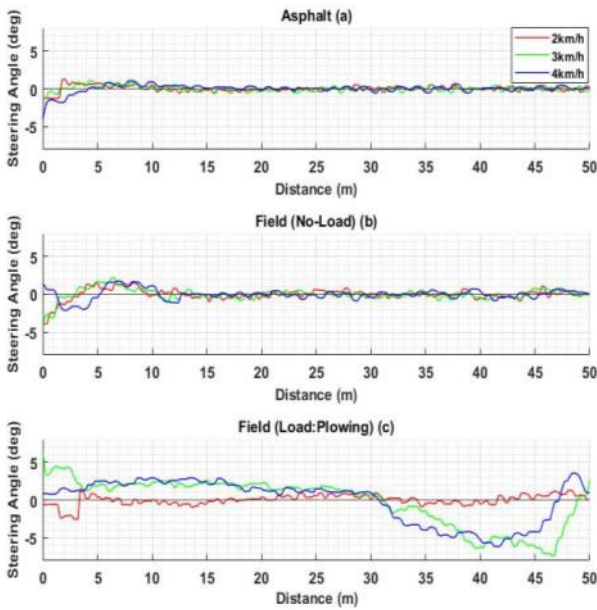


Fig. 11 Steering angle according to tractor velocity and driving environment(a : Asphalt, b : Field (No-Load), c : Field (Load:Plowing))

4. 결론

본 논문은 자율주행 기술의 국산화 및 확산의 가속화를 위해 기존의 승용형 농기계에 장착 가능한 모듈형 직진 자동조향 시스템을 개발하였고, 그에 대한 주행 특성을 분석하였다. 본 논문에서 제안한 시스템은 크게 고정밀 측위 시스템, 관성측정장치, 사용자 인터페이스 환경, 유압밸브 및 휠각도 센서로 구성되어 있으며, 직진 경로 추종을 위한 자동 조향 알고리즘은 Pure Pursuit 알고리즘을 적용하였다.

시험 조건은 강건한 노면 상태(아스팔트)와 논, 밭 토양 상태에서 무부하 주행, 작업기(쟁기) 시 발생하는 부하 상태 주행, 이 3가지 경우에 대해 수행하였고, 트랙터의 주행 속도는 2, 3, 4km/h, 주행 거리는 50m로 시험하였다. 기준 경로(AB라인)로부터 주행 오차(횡 편차)와 조향각을 측정하여 그 결과를 분석하였는데, 아스팔트에서 직진 경로 추종의 경우, 4km/h의 속도에서 최대 편차 폭 14.96cm, 최대 평균 편차 2.44cm로 주행함을 확인하였다. 토양 위에서 무부하로 주행하였을 경우는 2km/h의 느린 속도로 주행하였을 때 최대 편차 폭 27.2cm로 가장 큰 편차 특성을 나타내었는데, 이는 느린 속도로 인해 토양 강도가 약한 지반에서 기준 경로로 수렴하는 것이 느려 나타난 양상으로 분석된다.

작업기를 장착하여 토양 상태에서 주행한 결과는 4km/h에서 가장 큰 편차 폭인 25.86cm를 나타내었다.

데, 이는 약한 토양 상태와 작업기의 반력으로 인해 기준 경로를 다른 경우들보다 크게 벗어난 것으로 분석하였다. 이를 수렴하기 위해 트랙터의 앞바퀴 회전축의 각변위를 크게 하였으나, 토양 강도와 작업기 반력으로 인해 전부 반영되지 못해 큰 편차값을 나타낸 것으로 분석하였다. 이는 작업기로 작업할 때, 중첩되는 부분을 고려하면 충분한 허용 범위 안에 속한다고 판단된다.

후 기

본 연구는 농촌진흥청 연구사업(세부 과제 번호 : PJ014899012022)에서 지원하여 수행하였음을 밝힙니다.

이해관계(CONFLICT OF INTEREST)

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

References

- 1) B. S. Kim, S. W. Cho and H. C. Moon, “Slip Detection and Control Algorithm to Improve Path Tracking Performance of Four - Wheel Independently Actuated Farming Platform”, Journal of Korea Robotics Society 15(3), pp. 221-232, 2020.
- 2) S. M. Baek, W. S. Kim, Y. S. Kim, S. Y. Baek and Y. J. Kim “Design of the Hydro-Mechanical Transmission for a 55kW-Class Agricultural Tractor, Journal of Drive and Control, Vol. 17(2) 19-27, 2020.
- 3) Y. T. Kim, Y. H. Kim, S. M. Baek and Y. J. Kim, “Technology Trend on Autonomous Agricultural Machinery”, Drive and Control, Vol. 19(1) pp. 95-99, 2022.
- 4) J. H. Lee, “Japan’s Smart Agricultural Policy : The Reality and Implication”, GS&J Institute, No. 273, 2020.
- 5) C. W. Jeon, H. J. Kim, X. Han, J. H. Kim, “Preliminary Study on Automated Path Generation and Tracking Simulation for an Unmanned Combine Harvester”, Korean Society for Agricultural Machinery Conference 22(1) pp.20, 2017.
- 6) D. H. Han, S. J. Byeon, K. D. Kim, G. H. Han, M. H. Cha, Y. J. Park, “Development of Path

- Tracking Control Algorithm for Tractor Autonomous Driving”, Korean Society for Agricultural Machinery Conference. 26(2) pp. 107, 2021.
- 7) J. H. Choi, Y. E. Lim, J. H. Park, H. S. Jeong, S. J. Byen, U. H. Sagong, J. H. Park, C. H. Kim, J. C. Lee, D. H. Kim and M. J. Hwang, “Implementation of an Autonomous Driving System for the Segye AI Robot Car Race Competition”, Journal of Korea Robotics Society 17(2) pp. 198-208, 2022.
 - 8) Cole D and Sands T, “Effect of kinematic algorithm selection on the conceptual design of orbitally delivered vehicles”, Preprints 2022, (doi : 10.20944/preprints202202.0360.v1), 2022.
 - 9) Gregory G and Slabaugh, “Computing Euler angles from a rotation matrix”, Retrieved on August, 1999.
 - 10) C. H. Kim, D. P. Lee and K. S. Yi, “Vehicle Steering System Analysis for Enhanced Path Tracking of Autonomous Vehicles”, Journal of Auto-vehicle Safety Association 12(2), pp. 27-32, 2020.
 - 11) Azza Elsayed Bayoumi Ibrahim, “Self turning look ahead Distance of Pure pursuit Path following Control for Autonomous Vehicles Using an Automated Curve Information Extraction Method”, International Journal of Intelligent Transportation Systems Research. (doi : 10.1007/s13177-022-00319-z), 2022.