

지능형 농기계 기술 동향 Technological Trends of Intelligent Agricultural Machinery

김환선¹ · 공소윤¹ · 이종용^{2,3,4} · 임종국⁵ · 김완수^{1,6*}

Hwanseon Kim, Soyun Gong, Joongyong Rhee, Jong-Guk Lim and Wan-Soo Kim

Received: 15 Sep. 2023, Accepted: 27 Sep. 2023

Key Words : Intelligent agricultural machinery(지능형 농기계), Autonomous agricultural machinery(자율주행 농기계), Tractor-Implement communication(트랙터-작업기 통신)

Abstract: The purpose of this study is to suggest the direction for the development of intelligent agricultural machinery technology in the Republic of Korea. For this purpose, intelligent technology of agricultural machinery was divided into autonomous agricultural machinery and tractor-implement intelligent communication technology. Then, a survey and analysis of a previous study of the Republic of Korea and foreign countries were conducted. GNSS-based autonomous driving technology is still widely used worldwide, and recently, as research on camera and LiDAR-based autonomous driving is actively progressing, autonomous driving technology is becoming more advanced. ISOBUS-based technology is being developed worldwide for intelligent control of tractor-attached implements, and major global agricultural machinery manufacturers are actively applying it to their products. However, although some ISOBUS technologies are being researched in the Republic of Korea, there are no cases of application on agricultural machinery yet. Therefore, to be globally competitive in the agricultural machinery manufacturing industry, there is an urgent need to advance autonomous driving technology and commercialize agricultural machinery using ISOBUS technology.

1. 서 론

UN의 전망에 따르면 전 세계 인구는 2030년 약 85억명에서 2050년 약 97억명으로 증가할 것으로

예측된다.¹⁾ 세계적으로 급증하는 인구수는 식량 공급에 대한 문제 및 식량 안보의 위험성을 높인다.²⁻⁴⁾ 이러한 문제를 해결하기 위하여 식량 생산 효율 증대가 필요하며 이를 위해서는 고효율·고편의 지능형 농기계 기술 개발이 요구된다.⁴⁻⁵⁾

전 세계적으로 고효율·고편의 농작업을 위하여 많은 연구자들에 의하여 자율주행 농기계⁶⁾, 다 기종 농기계 간 통신 및 제어 기술⁷⁾ 등 다양한 지능형 농기계 기술들이 개발되고 있다.⁸⁾

기존 농기계는 운용 시 작업자의 높은 숙련도를 요구하며, 장시간 작업 시 높은 피로도를 야기하는 문제가 있다.⁹⁾ 농기계 자율주행 기술은 농업인의 작업 피로도와 노동력 투입을 저감하면서 최적 작업 경로 주행을 통하여 작업시간 단축 및 연료소비량 감소, 단위 작업면적당 높은 생산량 도출 등의 여러 이점이 있다. 농기계 자율주행 기술은 직진 및 선회 등 정해진 경로를 추종할 수 있는 농기계 자동조향 기술¹⁰⁾, 다수의 트랙터의 연동 제어가 가능한 군집제

* Corresponding author: wansoo.kim@knu.ac.kr

1 Major in Bio-Industrial Machinery Engineering, Kyungpook National University, Daegu 41566, Korea

2 Department of Biosystems Engineering, Seoul National University, Seoul 08826, Korea

3 Global Smart Farm Convergence Major, Seoul National University, Seoul 08826, Korea

4 Research Institute of Agriculture and Life Sciences, Seoul National University, Seoul 08826, Korea

5 High-tech Agro-materials Promotion Team, Rural Development Administration, Jeonju 54875, Korea

6 Upland Field Machinery Research Center, Kyungpook National University, Daegu 41566, 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.

어 기술¹¹⁾, 농작물, 사람 등 농작업 환경인식¹²⁾, 장애물 감지 및 회피 기술¹³⁾ 등으로 분류할 수 있으며, 최근에는 농업용 로봇에 이러한 자율주행 기술이 활발히 적용되고 있는 추세이다.¹⁴⁾ Kise et al. (2001)은 Real Time Kinematic (RTK)-Global Positioning System (GPS) 및 Fiber Optical Gyroscope (FOG) 기반 자율주행 트랙터 시스템을 제안하였다.¹⁵⁾ 그 결과, 로터리 작업 시 자율주행 트랙터의 오차는 6 cm 이내로 나타났다고 보고하였다.¹⁵⁾ Parsons et al. (2022)은 자율주행 트랙터의 장애물 회피를 위한 최적 경로 생성에 관한 연구를 수행하였으며, 그 결과 3초 미만의 시간 동안 연산을 통해 최적의 경로를 제시할 수 있다고 보고하였다.¹⁶⁾ Seo et al. (2021)은 영상 인식 기반 트랙터 자율주행 방법론을 제안하였다. 직진구간 자동조향 제어 실험 결과 최대 ±9.51 cm 이내 오차로 자율주행 기능 구현이 가능하다고 보고하였다.¹⁷⁾ Lim et al. (2023)은 트랙터 자율주행을 위하여 스테레오 카메라 기반 경작지 경계 인식 알고리즘을 제안하였다.¹⁸⁾ 전반적으로 해외에서는 모든 작업 조건에서 농기계 자율주행 구현을 위하여 최근 장애물 감지 및 회피에 관한 연구가 많이 수행되고 있는 것으로 나타났다. 국내에서는 최근 직진 및 선회 자동조향 기능을 넘어 경작지 경계 등을 구분하기 위한 영상 이미지 기반의 연구도 수행되고는 있으나 아직까지 추가 기술 개발이 필요한 실정이다.

농업기계는 주행이 아니라 작업이 목적인 차량으로써, 부착 작업기의 정밀 제어가 중요하다. 특히, 트랙터와 부착 작업기간 데이터 송수신과 이를 기반으로 한 각종 제어 기능이 제공되어야 고효율·고정밀 자율작업을 구현할 수 있다. ISO-11783 (ISOBUS)은 Plug and play 방식으로 트랙터-작업기간의 지능형 통신을 가능하게 하는 통신 프로토콜이다. ISOBUS를 지원하는 기계의 경우 농기계 제조사에 관계없이 트랙터와 작업기 사이의 데이터를 송수신할 수 있다는 큰 이점이 있어, 전 세계적으로 많은 글로벌 선진사에서는 ISOBUS를 적용한 농기계를 출시하고 있다. Sharipov et al. (2023)는 ISOBUS를 기반으로 원심식 스프레더의 가변 시비(Variable rate, VR)를 구현하였으며, 그에 따른 필드 적용성 평가를 수행하였다.¹⁹⁾ 또한, 그들은 제조 및 분무작업에 적용 가능한 ISOBUS 기반의 미들웨어를 개발하였으며, 이를 통해 작업 성능을 향상시켰다고 보고하였다.²⁰⁾ Kim et al. (2021)은 농업기계 자율주행 및 정밀농업 구현을 위하여 GPS 데이터 처리용 ISOBUS 기반 임베디드 시

스템을 개발하였다.⁷⁾ 그 결과, Virtual Terminal (VT)와 GPS ECU간의 성공적인 통신 및 Plug and play 기능 구현을 확인하였다고 보고하였다. 하지만, 아직까지 국내에서는 대부분 트랙터 부착 작업기의 제어를 위하여 개별 제어기 및 Human-Machine Interface (HMI)를 설치하고 있으며, 일부 ISOBUS 적용 기술을 개발 중이나, 아직까지 해외 선진사 대비 다소 부족한 실정이다.²¹⁾

위와 같은 선행연구를 통해, 지능형 농기계 기술의 전 분야에서 해외 선진사 대비 국내의 기술 수준이 다소 부족한 것을 확인할 수 있었다. 따라서, 해외 선진 국가들과 국내와의 기술 격차를 해소하기 위해서는 국내 지능형 농기계 기술 개발이 시급하다.

본 연구는 지능형 농기계를 자율주행 농기계 및 트랙터-작업기 지능형 통신기술로 분류하고 관련된 국내외 최신 기술들을 조사 및 분석하고, 그 결과를 제시함으로써 국내 지능형 농기계 기술 개발의 방향성을 제시하고자 수행되었다.

2. 자율주행 농기계

농기계 자율주행 시스템은 기본적으로 GPS, Inertial Measurement Unit (IMU), 조향각 센서 등으로 구성되며, 기술 수준에 따라 Light Detection And Ranging (LiDAR), Radio Detection and Ranging (Rader), 스테레오 카메라 등을 사용한다. 이러한 센서들을 이용하여 수집한 정보를 기반으로 자율주행의 경로를 생성한다.

Table 1은 자율주행 농기계의 시스템에 따른 특징을 나타낸다. 자율주행 기술은 Global Navigation Satellite System (GNSS)기반의 위치 추정 기법과 Camera, LiDAR 등을 이용한 영상 처리 기법으로 구분된다.²²⁾ 이때까지 대부분의 자율주행 농기계 기술은 GNSS 기반으로 사전에 경로를 생성하고 이를 추종하기 위하여 조향 제어를 수행하는 방식이다.¹⁷⁾ 하지만, 이러한 GNSS 기반의 자율주행 기술은 GPS 성능에 크게 영향을 받기 때문에 높은 성능의 자율주행 구현을 위해서는 고가의 고정밀 GPS가 요구되며, 농작업 환경에 따라 위성 신호를 수신할 수 있는지 등에 따른 불확실성으로 인한 한계점을 보이고 있다. GNSS 방식을 대체하기 위한 다른 방식의 접근은 카메라를 이용한 기계 시각(Machine Vision) 기반 환경 인식 및 경로 추종이다.¹⁷⁾ 하지만, 카메라 비전 기반의 경우 직사광선이나 그림자 등 빛과 관련한 환경

에서 자율주행 기능 구현에 큰 영향을 받기 때문에 실외 노지 환경에서의 적용이 어려운 경우가 많다.²³⁾ 반면에, LiDAR를 이용한 영상 처리 기법은 특정 각도에서 레이저를 주사하여 사물로부터 되돌아오는 신호를 계산하여 거리, 방향 등을 감지하기 때문에 실외 환경에서도 안정적으로 대상체를 탐색할 수 있으나 고가의 LiDAR를 구입해야하는 한계가 있다.²³⁻²⁴⁾ 위와 같이 다양한 센서별로 장단점이 있기 때문에 자율주행 기능 구현을 위한 작업환경 및 조건을 고려하여 다양한 센서를 적용하여 자율주행 기술을 구현하는 것이 필요하다.

서로 다른 국가 및 연구자들에 의해 개발된 자율주행 기술을 정확하게 비교하기 위하여 기술 수준별 레벨에 대한 기준 정의가 필요하다. 자동차 분야의 경우 SAE International에서 자율주행 Level (SAE J 3016)을 제정²⁵⁾함에 따라, 전 세계가 공통된 자율주행 레벨을 사용하고 있다. 하지만, 아직까지 국제적으로 농기계 자율주행에 대한 표준은 전무한 실정이다. 국내에서는 이러한 자율주행 기술과 관련하여 농업기계 농작업 자동화 수준에 대한 국가표준 (KS B 7951)을 Fig. 1과 같이 제정하였으며, 이 표준에서는 농기계 농작업 자동화 수준을 기술 수준별로 차등하여 Level 0~5로 총 6단계로 분류하고 있다.²⁶⁻²⁷⁾

- 1) Level 0(수동 작업): 사람에 의한 수동 작업
- 2) Level 1(작업자 보조): 직진 및 선회 주행을 자율주행시스템이 보조해주는 단계

Table 1 Characteristics of each system of autonomous agricultural machinery

Items	Characteristics
GNSS	<ul style="list-style-type: none"> · Provides accurate position and travel speed in open-field · Accuracy varies depending on GNSS signal reception environment (orchard, etc.) · Unable to recognize surroundings
Camera	<ul style="list-style-type: none"> · Capable of intuitively recognizing the surrounding environment · Cheaper sensor price compared to LiDAR · Decreased accuracy by illumination, etc.
LiDAR	<ul style="list-style-type: none"> · Provides surrounding status information · Less affected on illumination · High-precision LiDAR is expensive

3) Level 2(부분 자동화): 직진 및 선회 자율주행뿐만 아니라 작업기 제어가 가능한 단계

4) Level 3(조건부 자동화): 작업자가 설정한 경로를 직진 및 선회 자율주행이 가능하며, 작업 환경 감지 및 농작업 모니터링이 가능한 단계

5) Level 4(고도화된 자동화): 사람, 장애물, 작물, 이랑 등을 인식하고 농작업 오류 대응이 가능한 단계

6) Level 5(완전 자동화): 자동 농작업 계획 수립이 가능하며 작업자가 필요하지 않은 완전 자율작업 단계

Table 2는 작업 및 환경에 따라 주요 농기계 기종별 자율주행 시스템 구성 및 성능 분석 결과이다. 농기계는 트랙터, 콤팩트, 이앙기, 로봇 플랫폼으로 구분하였으며, 기종별로 작업 종류와 센서시스템 그리고 작업 환경 및 그에 따른 성능에 대한 분석을 수행하였으며, 그 결과를 제시하였다. 전반적으로 자율주행 기술은 대표적인 농기계 기종인 트랙터를 대상으로 많은 연구가 수행된 것을 알 수 있다. 트랙터 작업은 주행, 플라우 경운 및 로터리 경운 등을 대상으로 하고 있으며, 주로 RTK-GPS 기반으로 자율주행 기능이 구현된 것을 알 수 있다. 특히, 노지 작업 환경에서는 RTK-GPS 기반 자율주행 기술이 많이 연구된 것으로 나타났다. Kise et al. (2001)는 RTK-GPS와 광섬유 자이로스코프를 이용하여 농업용 자율 트랙터 개발에 대한 연구를 수행하였다.¹⁵⁾ 트랙터의 자율주행을 위하여 센서 융합 알고리즘을 적용하였으며, 그 결과 6 cm 미만의 오차로 자율주행이 가능하다고 보고하였다.¹⁵⁾ 국내에서는 RTK-GNSS와 Motion Sensor를 융합하여 계산된 위치 정보를 기반으로 자율주행 무인 농기계의 기반 기술 확보에 관한 연구를 수행하였다.²⁸⁾ 성능 평가 결과, 자율주행 오차는

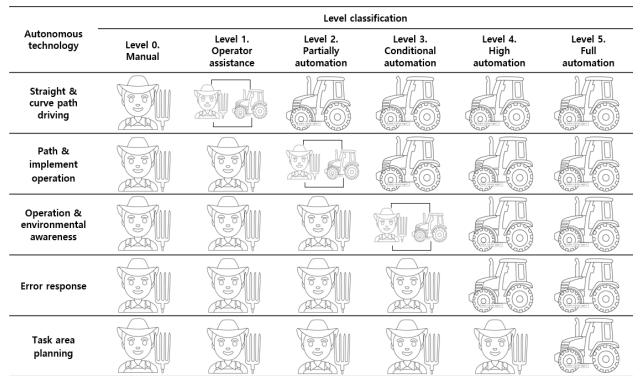


Fig. 1 Autonomous agricultural machinery Level (Reproduced by previous study²⁶⁻²⁷⁾)

0.10 m로 안정적인 자율주행을 운용할 수 있다고 보고하였다. Nagasaka et al. (2004)은 RTK-GPS와 FOG를 이용하여 자율주행 이양기를 개발하였다.²⁹⁾ 그들은 센서 데이터를 활용하여 드리프트를 보정하고, 각도 오프셋을 조절하여 원하는 직선 경로로부터의 최대 편차를 12 cm에서 0.7 cm로 개선하였다.²⁹⁾ Barawid Jr et al. (2011)은 RTK-GPS와 IMU 센서를 사용하여 기존의 조향시스템을 자동 조향 시스템으로 개선하였다.³⁰⁾ 자율주행 성능 평가 결과 측면 및 방향 오차는 각각 0.08 m와 1.2°로 측정되어 로봇 차량을 정확하게 제어할 수 있다고 보고하였다. Takai et al. (2013)는 GNSS 수신기와 IMU를 내비게이션 센서를 사용하여 자율적으로 내비게이션할 수 있는 로봇 트랙터에 대한 연구를 진행하였다.³¹⁾ 그 결과 로봇은 5 cm 미만의 측면오차, 1°미만의 방위각 오차로 주행이 가능하다고 보고하였다.³¹⁾

많은 연구자들에 의해 농기계 자율주행 구현을 위하여 다양한 종류의 농작업 환경 인식에 관한 연구가 수행되었다. 환경 인식은 농경지, 작물, 장애물 등으로 구분할 수 있으며, 선행연구에 대한 요약은 다음 Table 3과 같다. Kim et al. (2021)은 Convolutional neural network (CNN) 기반 모델을 사용하여 경작되지 않은 토양을 분할하여 자율 트랙터에 경작 경로 안내를 제공하기 위한 연구를 수행하였다. 실험 결

과, 토양 분할 정확도는 평균 92%로 측정되어 경작된 토양과 경작되지 않은 토양 간의 효과적인 영역 분류 방법을 제시하였다.³²⁾ Zhang et al. (2012)은 LiDAR를 사용하여 작물의 높이를 실시간으로 측정하는 연구를 수행하였다. 작물 높이 측정 오차의 평균은 동적모드에서 3.8%, 정적모드에서 5.08%로 나타났다으며 측정 정확도를 향상시키는 기울기 보정 알고리즘을 제시하였다.³³⁾ Mousazadeh (2013)는 machine vision system과 photoelectric sensor를 이용하여 상추 수확용 로봇을 개발하였다. 실험 결과 수확 성공률은 94.12%로 측정되었다.³⁴⁾ Kim et al. (2020)은 patch 기반 CNN을 활용하여 과수원에서 자율주행 경로를 탐색하는 연구를 진행하였다. 과수원에서 경로 분할을 위해, patch 기반 분류를 수행하고 나무 사이의 자율 이동을 위해 목표 경로를 감지하였다.⁶⁾ 이를 통해, 생성된 경로의 중첩영역과 결합영역의 비율인 Intersection Over Union (IoU)의 최댓값이 0.81, 평균 측면 및 각도 오류는 각각 0.051, 7.8°라고 보고하였다.⁶⁾ Stefas et al. (2019)는 stereo vision을 사용하여 장애물 회피를 위한 장애물 지도를 생성하였다.³⁵⁾ Kang et al. (2020)은 사과 수확을 위한 딥러닝 기반 과일 검출기의 구현에 대한 연구를 수행하였다.³⁶⁾ 그 결과, 85.3%의 정확도를 보여 과수원에서 실시간 사과 감지의 가능성을 제시하였다.³⁶⁾ Hizatate et al. (2023)는

Table 2 Study on autonomous agricultural machinery by operation and environment

Machinery	Operations	Sensors	Performance	Ref.
Tractor	Seeding, Spraying, Harvesting	· RTK-GPS, IMU	· Driving error of 5 cm ↓	14
	Rotary tillage	· RTK-GPS, Fiber Optical Gyroscope (FOG)	· Heading error of 1.3° · Lateral error of 6 cm	15
	Plow tillage	· RTK-GPS	· Increase of 5.5% in field traersal efficiency	16
	Driving	· RTK-GPS, Motion Sensor (Accelerometers, Gyroscopes, Magnetometers) · RTK-GPS, IMU, Laser scanner, Proximity sensor, Tape switch	· Tracking error of 0.34 m · Less than 5 cm of lateral error · Less than 1° of heading error	28 31
Combine harvester	Harvesting	· RTK-GPS, IMU	· Lateral error of 7.1 cm	14
Rice transplanter	Transplanting	· RTK-GPS, IMU	· Max. deviation of 12 cm · Root mean square deviation of 5.5 cm	29
Robot platform	Driving	· RTK-GPS, IMU · Potentiometer, Vehicle ECU	· Lateral error of 0.08 m · Heading error of 1.2°	30

Table 3 Study on environmental awareness for autonomous agricultural machinery

Items	Performance	Ref.
Open-field	· F1 score of 0.9885	18
	· Soil segmentation accuracy of 92%	32
	· Crop height measurement errors of 3.8% (dynamic mode) and 5.08% (static mode)	33
	· Harvest success rate of 94.12%	34
Orchard	· Max. intersection over union of 0.81 · Average angular error of 7.8°	6
	· Apple detection accuracy of 85.3%	36
Crops	· The lateral position standard deviation of 2.5 cm ↓	38
	· Tomato maturity classification probability of 91%	39
	· Wheat disease diagnostic accuracy growth rate of 3.94%	40
Weed	· Weed classification accuracy of 97%	41
Obstacle	· Work-crossing efficiency increase of 5.5% while avoiding obstacles	16

과수원에서 자율 분무 전기 로봇을 위한 최적의 작업 스케줄링 알고리즘인 Multi-Layered Genetic Algorithm (LGA)을 개발하였다.³⁷⁾ LGA를 통해 주어진 근무 일정에 대한 총 근무 시간을 목적 함수로 평가하였고, 차선의 근무 일정을 생성하였다.³⁷⁾ 그 결과, 전체 작업 시간을 최소화하기 위한 평가 기능을 설계하였고, 경사지 작업 일정의 최적화가 가능하다고 보고하였다.³⁷⁾ O'connor et al. (1996)은 Carrier Phase Differential GPS (CDGPS) 기반 CDGPS 기반 트랙터의 closed-loop 제어에 관한 연구를 수행하였다.³⁸⁾ 성능 평가 위치 표준 편차는 2.5 cm 이하로 안정적인 조향 제어가 가능하다고 보고하였다.³⁸⁾ Kim et al. (2023)은 모니터링 로봇에 설치된 RGB camera를 사용하여 토마토 이미지를 획득하고 성숙 단계를 분류하는 연구를 수행하였다.³⁹⁾ 그 결과 토마토의 성숙도 분류의 출력 확률 분포는 평균 91%로 나타났다고 보고하였다.³⁹⁾ Lu et al. (2017)는 질병 범주를 식별하고, 현장 밀 이미지에 대한 해당 질병 영역을 동시에 찾는 자동 밀 질병 진단 시스템 개발을 위한 연구를 수행하였다.⁴⁰⁾ 기존의 기술과 비교하여 밀의 질병 진단 평균 정확도는 약 3.94% 증가하였다고 보고하였다.⁴⁰⁾ Garibaldi-Marques et al. (2022)는 실제 옥수수밭 환경

에서 캡처된 다중 식물 이미지에서 개별 식물을 분류하는 분류 비전 시스템에 대한 연구를 수행하였다.⁴¹⁾ 그 결과 97%의 잡초 분류 정확도 결과를 보고하였다.⁴¹⁾ Li et al. (2020)는 GNSS 센서와 GPS compass를 이용하여 네트워크 모델 크기를 압축하여, 주변 환경을 실시간으로 감지 및 식별하는 연구를 수행하였으며⁴²⁾, 네트워크 모델 크기의 압축률 80% 조건과 80% 미만 조건에 대한 성능 평가를 수행하였다. 그 결과 네트워크 모델 압축률이 80% 일 때, 80% 미만 대비 1.33배 더 빠른 장애물 감지 정확도를 얻어내어 로봇 수확기의 장애물 감지 실현 가능성을 보고하였다.⁴²⁾

고효율 농작업을 위하여 Master-Slave 기반 농기계용 군집제어 기술이 개발되었다. 이는, 트랙터-트랙터간 또는 다 기종 농기계 간의 연동 기능을 제공한다. 이러한 군집제어 기능은 특히 미국 및 유럽 등의 대규모 농경지에서 콤팩트 수확기와 함께 트랙터-트레일러가 주행하면서 일정한 거리 간격을 유지하여 실시간으로 수확한 작물을 트레일러에 적재할 수 있도록 한다. Table 4는 다중 농기계간 군집 제어의 특성에 대한 조사 결과를 제시한다. Zhang et al. (2017)은 다수의 로봇 트랙터를 군집 제어하는 시뮬레이션을 수행하였다.¹¹⁾ 이를 통해 4대 트랙터를 동시에 군집 제어시, 단일 트랙터를 이용했을 때보다 352.9%의 효율이 증가하였다고 보고하였다.¹¹⁾ Noguchi (2018)는 RTK-GPS와 IMU를 활용하여 군집 제어에 관한 연구를 수행하였다.¹⁴⁾ 농업 작업에 따라 분류한 4대의 로봇 트랙터를 동시에 활용 함으로써, 단일 로봇 활용에 비해 총 작업시간 감소와 작업 효율성 증가의 이점을 얻을 수 있다고 보고하였다.¹⁴⁾ 4대의 로봇 트랙터의 주행 오차는 ±0.05 m, 평균 측면 및 세로의 오차가 각각 0.03 m와 0.4 m로 농작업에 적합하다고 보고하였다.¹⁴⁾ Parsons et al. (2022)은 GPS를 사용하여, 자율 수확기의 단일 필드에 대한 최적의 서비스 경로를 생성하는 알고리즘을 설계하였다.¹⁶⁾ 각 필드에 대한 최적의 이동 경로 추종을 위한 방향각을 찾고, 인접한 하위 필드와 병합하여 headland의 면적을 최소화하였으며, 그 결과 효율성 94.4%를 달성했다고 보고하였다.¹⁶⁾ Shojaei (2021)는 Proportional Integral Derivative (PID) 컨트롤러를 사용하여 콤팩트 수확기의 방향과 거리를 제어하는 연구를 수행하였다.⁴³⁾ 이를 통해서, 차량 간 연결성을 보장하고, 현장에서 발생 가능한 모든 특이점과 충돌을 방지하였다.⁴³⁾ Shojaei (2022)는 트랙터와 콤팩트 수확기의 방향과

거리를 제어하는 연구를 수행하였으며, 그 결과 자율 트랙터-트레일러와 복합 수확기의 Output-feedback 추적 제어의 가능성을 보고하였다.⁴⁴⁾ Bulgakov et al. (2022)는 트랙터와 콤바인의 연동제어에 관한 시뮬레이션을 수행하였으며, 그 결과 다 수 기계간 연결성을 보장하고 충돌을 방지하는 컨트롤러를 개발하였다.⁴⁵⁾

각 국내외 농기계 제조업체별 상용화된 자율주행 농기계와 개발 진행 단계에 있는 농기계의 센서 시스템 및 자율주행 레벨에 관한 분석을 수행하였으며, 그 결과를 Table 5에 요약하였다. JohnDeere, Kubota, 등 해외 선진사에서는 RTK-GNSS뿐만 아니라, 스테레오 카메라 및 LiDAR 등을 활용하여 트랙터 자율주행 기술을 고도화하여 Level 4 단계 수준의 자율작업 기술을 상용화하거나 상용화 진입 단계 수준이다.

반면에, 국내는 RTK-GNSS 기반 자율주행 농기계를 양산하고 있으나 아직 트랙터 기준 2.5 단계 수준이며, 현재 다양한 센서를 이용하여 Level 4 기술을 개발하기 위한 연구를 추진하고 있다.

Table 4 Study on swarm control technology for autonomous multiple machine

Type	Characteristic	Ref.
Tractor-Tractor	<ul style="list-style-type: none"> Swarm control of 4 robot tractors (RTs) in field operation 4RTs work time of 13.2 minutes (efficiency improvement compared to single RT as 352.9%) The simulations of 3RTs, 5RTs, 7RTs system Simulation lateral error of 0.03 m Simulation longitudinal distance as 0.08-0.14 m 	11
	<ul style="list-style-type: none"> Swarm control of crawler robot tractor, combine harvester, rice transplanter and wheel robot tractor Driving error of ±0.05 m Average lateral error of 0.03 m Average longitudinal error of 0.4 m 	14
Tractor (Trailer)-Combine harvester	Field traversal efficiency of 68~94.4%	16
	<ul style="list-style-type: none"> Maintain inter-vehicle connectivity Prevents possible singularity and collision during the operation 	43
	Output-feedback coordinated tracking control of an autonomous tractor-trailer and a combine harvester	44

Table 5 Summary of autonomous agricultural machinery commercialization

Type	Sensors	Level	Manufactures
Tractor	RTK-GNSS, Stereo cameras	Commer. (Lev.4)	John Deere
	RTK-GNSS, LiDAR, Radar, Camera	Concept (Lev.4)	Case IH
	RTK-GNSS, IMU, Laser Scanner, Ultrasonic sensor	Commer. (Lev.3)	Kubota
	RTK-GNSS	Commer. (Lev.2.5)	Daedong
	RTK-GNSS	Commer. (Lev.2.5)	LSMtron
	RTK-GNSS	Commer. expected (24) (Lev.2)	TYM
Combine harvester	RTK-GNSS, Ultrasonic sensor	Commer. (Lev.4)	John Deere
	RTK-GNSS, Radar	Commer. (Lev.2)	Kubota
	RTK-GNSS	Commer. (Lev.2.5)	Daedong
Trans-planter	RTK-GNSS	Commer. (Lev.2)	Kubota
	RTK-GNSS, FOG	Commer. (Lev.2)	Yanmar
	RTK-GNSS	Commer. (Lev.1)	Daedong
	RTK-GNSS	Commer. (Lev.1)	TYM

3. 트랙터-작업기 지능형 통신기술

일반적으로 농기계는 농작업을 수행하기 위한 기계 시스템으로, 주행보다는 작업에 그 목적이 있다.⁴⁶⁾ 따라서, 자율작업의 기능이 구현되어야 하며, 이를 위해서는 트랙터와 부착 작업기간의 통신 및 제어 기술이 필요하다.

ISOBUS란 국제표준화기구(ISO)에서 지정한 ISO-11783 표준을 ISOBUS로 통칭한다.⁴⁷⁾ ISOBUS는 각각의 제조사에서 제작한 농업기계의 물리적 연결장치와 통신 프로토콜을 규정하여 호환성을 높이고, 농업기계의 자동화 및 제어장치, 사용자의 모바일 및 데스크톱 장치와의 데이터 교환을 위한 표준 규격을 정립하여 농기계 및 장비 간의 효율적이고 표준화된 통신을 제공한다.⁴⁷⁾ 이러한 ISOBUS 통신 규격을 적용

Table 6 ISOBUS certification Label

Label	Description
UT	<ul style="list-style-type: none"> · The capability of using one terminal for operating different implements · The capability of using one terminal for operating different implements
AUX-N	<ul style="list-style-type: none"> · Auxiliary Control · Additional control elements ex) Joystick
TC-BAS	<ul style="list-style-type: none"> · ISO-XML data format is used
TC-GEO	<ul style="list-style-type: none"> · Capability of acquiring location- based data · Location-based actions through applications
TC-SC	<ul style="list-style-type: none"> · Automatic switching sections about GPS location · ex) Sprayer, Seed drill, Fertilizer spreader
TECU	<ul style="list-style-type: none"> · Uni-directional · Provide speed, power take-off RPM
TIM	<ul style="list-style-type: none"> · Bi-directional communication · ex) Forward speed or the remote valves of a tractor
LOG	<ul style="list-style-type: none"> · Logging of device values that can be collected independent of a task · ex) Tractor, Implement, etc
ISB	<ul style="list-style-type: none"> · Deactivates functions on the machine activated via the ISOBUS terminal.

하고 기술을 고도화하기 위해서 국제적으로 많은 연구가 수행되고 있다. ISOBUS의 인증 라벨은 Table 6 과 같이 Universal Terminal (UT), Auxiliary Control New (AUX-N), Task Controller Basic (TC-BAS), Task Controller Geo-based (TC-GEO), Task Controller Section Control (TC-SC), Basic Tractor ECU (TECU), Tractor Implement Management (TIM), Logging of device values independent of the task (LOG), ISOBUS Shortcut Button (ISB) 9가지로 구분된다.⁴⁸⁻⁴⁹⁾ 현재 9개의 인증 라벨 중 TIM, LOG, ISB는 개발 중에 있으며, 그 외 나머지 6개의 라벨에 대해서는 인증을 진행하고 있다.⁴⁸⁻⁴⁹⁾

Table 7은 농기계 간 ISOBUS 통신을 적용한 연구에 관한 분석 결과이다. 농기계-제초기, 트랙터-스프레이어, 트랙터-파종기, 트랙터-제초기로 구분하였으며, 센서시스템, 제어항목, 성능 및 ISOBUS 인증 라벨에 대한 자료 조사 및 분석을 수행하였으며, 그 결과를 제시하였다. Sharipov et al. (2023)는 제초 로봇에 ISOBUS 표준 기술을 적용하였으며, 그 결과 현장 제초 작업에서 제초 성능이 94 ~ 100%로 평가되었다.²⁰⁾ Paraforos et al. (2019)는 ISOBUS 프로토콜을 활용하여 경작 및 파종, 식물 보호 및 수확량 모니터링에 대하여 연구를 수행하였다.⁴⁷⁾ 또한, Rite Yield 센서를 사용하여 곡물의 데이터를 얻고, 수확량 모니터링 및 맵핑을 수행하였다.⁴⁷⁾ Sharipov et al. (2021)는

Table 7 Study on agricultural machinery applying ISOBUS

Machinery	Sensors	Control	Performance	Label	Ref.
Agricultural robot-Weeder	<ul style="list-style-type: none"> · RTK-GNSS, ZF Terental sensor, Two stereo camera, Encoder 	<ul style="list-style-type: none"> · Driving path and speed for weeding 	<ul style="list-style-type: none"> · Good quality of weeding in field as 94 ~ 100% 	TIM	20
Tractor-Sprayer	<ul style="list-style-type: none"> · RTK-GNSS, RGB-D cameras 	<ul style="list-style-type: none"> · Spraying volume 	<ul style="list-style-type: none"> · Less than 10% variation in applied rate · Development of recognition devices for spray and mechanical weeding machines 	TECU	50
Agricultural robot-Sprayer	<ul style="list-style-type: none"> · RGB-D imaging sensor 	<ul style="list-style-type: none"> · Spray amount 	<ul style="list-style-type: none"> · Implement of communication between two different agricultural robots 	TECU, TIM	52
Tractor-Seed drill	<ul style="list-style-type: none"> · RTK-GNSS, IMU, Radar 	<ul style="list-style-type: none"> · Working depth · Steering angle of the front wheels · Articulated drawbar angle of the seed drill 	<ul style="list-style-type: none"> · Working depth error of ±10 mm · Implementation of the concept of an integrated guidance system in which tractors and an implement are steered side by side in the field 	TECU	53

ISOBUS 프로토콜을 활용하여 원심 디스크 스프레더의 고정밀 작업 구현을 위한 속도 제어 기능을 구현하였다.¹⁹⁾ Paraforos et al. (2022)는 ISOBUS를 통해 실시간 농작업 환경 인식 기술을 활용하여 농업용 로봇과 스프레이 작업기의 상호 호환성에 관한 연구를 수행하였다.⁵⁰⁾ Iglesias et al. (2014)는 transparent data 압축을 통해 ISOBUS에서 Graphical User Interface (GUI)를 활성화하는 연구를 진행하였다.⁵¹⁾ Suomi et al. (2015)는 작물의 깊이에 따라 파종기 자동 깊이 제어 장치를 개발하였다.⁵²⁾ ISOBUS 표준을 따르는 전자 제어 시스템은 다중 센서를 활용하여 씨앗 드릴의 작업 깊이를 주행속도 10 km/h에서 ± 10 mm의 오차 내에서 제어 가능하다고 보고하였다.⁵²⁾ Backman et al. (2013)은 농기계용 분산형 통합 안내 시스템에서의 ISOBUS의 적용 가능성에 대하여 연구를 수행하였다.⁵³⁾ 다양한 자유도 처리 알고리즘인 Nonlinear Model Predictive Control (NMPC)을 제안하였으며,⁵³⁾ ISOBUS 표준 메시지를 사용하여 트랙터-컨트롤러 간에 전송할 수 있는 정보와 그렇지 못한 정보에 대하여 분류를 수행하였다.⁵³⁾ AI-Mallahi et al. (2023)는 ISOBUS를 통한 농기계-스프레이의 지능형 연동 기술에 관한 연구를 진행하였다.⁵⁴⁾ Polonen et al. (2021)은 ISOBUS 기반 원형 베일을 추적하고 모니터링하는 자동 시스템을 개발하였다.⁵⁵⁾ 이 시스템은 베일에 부착된 RFID 태그와 센서, 스위치, GPS 장치를 활용하여 데이터를 수집하고 클라우드로 전송하며,⁵⁵⁾ 이를 통해 작업자는 모바일 앱을 통해 실시간 베일을 추적하고, 관리 및 작업을 수행 가능하다고 보고하였다.⁵⁵⁾

국내에서도 트랙터 및 부착작업기에 ISOBUS의 적용을 위한 연구가 일부 수행되었다. Kim et al. (2021)은 자율주행 농업기계의 GPS 데이터 처리를 위한 ISOBUS 프로토콜 기반 임베디드 시스템을 개발하였다.⁷⁾ 이를 통해 가상터미널인 VT와 GPS ECU 간의 통신을 구현하였다. Lee et al. (2017)는 ISOBUS 기반 자율주행 트랙터를 위한 가상터미널 시스템 설계에 관한 연구를 수행하였다.⁵⁶⁾ Lee et al. (2017)은 ISOBUS 표준을 따르는 Front-End-Loader (FEL) 피드백 제어 시스템을 통해 실시간으로 버킷 각도를 측정하였다.⁵⁷⁾ 이를 통해, 버킷 각도 유지 능력이 개선되었으며, FEL 제어 시 운전자의 안전과 운전 편의성을 향상시킬 수 있다고 보고하였다.⁵⁷⁾

해외 농기계 선진국에서는 ISOBUS 기술의 효율성을 인지하고 과거부터 많은 연구들이 수행되어왔다.

반면에, 국내는 해외 대비 ISOBUS를 활용한 지능형 농작업기 제어에 관한 연구가 미비한 실정이다. 전 세계 농기계 시장에서 경쟁력을 확보하기 위해서는 국내 농기계의 ISOBUS 적용에 대한 기술 개발이 지속적으로 필요할 것으로 판단된다.

4. 요약 및 결론

본 논문은 국내 지능형 농기계 기술 개발을 위한 방향성을 제시하기 위하여 수행되었으며, 이를 위하여 지능형 농기계 기술을 1) 자율주행 농기계, 2) 트랙터-작업기 지능형 통신 기술로 구분하고 국내외 선행연구자료 조사 및 분석을 수행하였다. 주요 결과는 다음과 같다.

1) 해외에서는 GNSS 기반 자율주행 기술을 넘어 Stereo camera와 LiDAR 등 머신 비전 기반의 자율주행 기술에 관한 연구가 많이 수행되고 있으며, 이를 이용하여 트랙터, 콤팩트 자율주행 Level 3-4 단계 수준의 기술을 상용화하였다. 이에 반해, 국내는 아직까지 직진-선회 자율주행 및 작업기 제어 수준의 Level 2.5 수준에 머물러 있는 것을 알 수 있다. 국내 농경지는 미국, 유럽 등 대규모 농경지를 갖는 국가들과는 달리 소규모 경작지의 특성을 갖고 있기 때문에 국내 고정밀 자율주행 기술이 개발된다면 국내와 유사한 국가의 자율주행에 적용이 가능할 것으로 예상되며, 이는 향후 국내 농기계 수출 산업에도 큰 영향을 미칠 수 있을 것으로 기대된다.

2) 전 세계적으로 트랙터 부착 작업기의 지능형 제어를 위하여 ISOBUS 기반 기술이 개발되고 있으며, 주요 글로벌 농기계 제조사들은 자사의 제품에 이를 활발히 적용하고 있다. 하지만, 국내에서는 ISOBUS에 대한 일부 기술이 연구되고 있으나, 아직까지 완성차에 적용한 사례는 전무한 실정이다. 최근 국내 농기계 제조사들도 이러한 ISOBUS에 대한 필요성은 인지하여 기술을 개발하고 있으나, 글로벌 선진사와의 기술 격차를 해소하고 지속적인 농기계 수출 활성화를 위해서는 아직 부족한 실정이다. 따라서, 국내뿐만 아니라, 해외 시장에서 요구하는 지능형 트랙터-작업기 통신에 해당하는 기술 개발 및 적용이 시급하다.

3) 본 연구에서는 자율주행 기술과 트랙터-부착작업기 지능형 제어 기술에 대하여 국내외 연구자료를 분석하였으며, 그 결과를 제시하였다. 본 연구의 결과는 향후 국내 지능형 농기계 기술 개발을 위한 기

초자료로 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 성과물은 농촌진흥청 연구사업(세부과제번호: PJ017140022023)의 지원에 의해 이루어진 것임

이해관계(CONFLICT OF INTEREST)

저자는 이 논문과 관련하여 이해관계 충돌의 여지가 없음을 명시합니다.

References

- 1) UN, “World Population Prospects 2022 Regional Summary of Results”, 54, 2022.
- 2) S. H. Cho, C. Y. Lee, H. J. Jeong, S. W. Kang and D. H. Lee, “Estimation of two-dimensional position of soybean crop for developing weeding robot”, *Journal of Drive and Control*, Vol.20, No.2, 15-23, 2023.
- 3) J. K. Woo, I. S. Choi, Y. K. Kim, Y. Choi, D. K. Choi, H. S. Lee, J. T. Kim, Y. J. Park and D. J. Kim, “Design and Performance Evaluation of a Variable Control Type Fresh Corn Harvester”, *Journal of Drive and Control*, Vol.20, No.2, 40-46, 2023.
- 4) Y. T. Kim, Y. H. Kim, S. M. Baek, Y. J. Kim, “Technology Trend on Autonomous Agricultural Machinery”, *Journal of Drive and Control* Vol.19 No.1, 2022.
- 5) W. S. Kim, W. S. Lee and Y. J. Kim, “A review of the applications of the internet of things (IoT) for agricultural automation”, *Journal of Biosystems Engineering*, Vol.45, 385-400. 2020.
- 6) W. S. Kim, D. H. Lee, Y. J. Kim, T. Kim, R. Y. Hwang, “Path detection for autonomous traveling in orchards using patch-based CNN”, *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol.175, 105620. 2020.
- 7) J. Y. Kim, F. P. Vista IV, D. Y. Lim, and K. T. Chong, “Design and Development of a GPS Working Set based on ISOBUS Protocol for Agricultural Machinery in South Korea”, *IEIE Transactions on Smart Processing & Computing*, Vol.10 No.4, 330-339. 2021.
- 8) S. Y. Baek, S. M. Baek, H. H. Jeon, J. H. Lee, W. S. Kim and Y. J. Kim, “Design Verification of an E-driving System of a 44 kW-class Electric Tractor using Agricultural Workload Data”, *Journal of Drive and Control*, Vol.19, No.4, 36-45, 2022.
- 9) S. M. Baek, W. S. Kim, S. Y. Baek, H. H. Jeon, D. H. Lee, H. K. Kim and Y. J. Kim, “Analysis of Engine Load Factor for a 78 kW Class Agricultural Tractor According to Agricultural Operations”, *Journal of Drive and Control*, Vol.19, No.1, 16-25, 2022.
- 10) J. Wang, Y. Zhu, Z. Chen, L. Yang and C. Wu, “Auto-steering based precise coordination method for in-field multi-operation of farm machinery”, *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, Vol.11, No.5, 174-181. 2018.
- 11) C. Zhang and N. Noguchi, “Development of a multi-robot tractor system for agriculture field work”, *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol.142, 79-90. 2017.
- 12) Y. Morio, Y. Hanada, Y. Sawada and K. Murakami, “Field scene recognition for self-localization of autonomous agricultural vehicle”, *Engineering in Agriculture, Environment and Food*, Vol.12, No.3, 325-340. 2019.
- 13) Z. Liu, Z. Lü, W. Zheng, W. Zhang and X. Cheng, “Design of obstacle avoidance controller for agricultural tractor based on ROS”, *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, Vol.12, No.6, 58-65. 2019.
- 14) N. Noguchi, “Agricultural vehicle robot”, *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol.30 No.2, 165-172. 2018.
- 15) M. Kise, N. Noguchi, K. Ishii and H. Terao, “Development of the Agricultural Autonomous Tractor with an RTK-GPS and a Fog”, *IFAC Proceedings Volumes*, Vol.34, No.19, 99-104. 2001.
- 16) T. Parsons, F. Hanafi Sheikhha, O. Ahmadi Khiyavi, J. Seo, W. Kim and S. Lee, “Optimal Path Generation with Obstacle Avoidance and Subfield Connection for an Autonomous Tractor”, *Agriculture*, Vol.13, No.1, 56. 2022.
- 17) D. Seo, J. H. Won, C. Yang, G. Kim, K. D.

- Kwon, K. C. Kim, Y. Hong and H. S. Ryu, "Development of Boundary Detection Methods Based on Images for Path Following of Autonomous Tractor", *Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences*, Vol.46, No.11, 2078-2087. 2021.
- 18) S. Lim, M. Kim, D. Lee and M. Won, "Vision-based Farmland Boundary Detection Algorithm for Automation of an Agricultural Tractor", *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, Vol.29, No.3, 208-216. 2023.
- 19) G. M. Sharipov, A. Heiß, S. L. Eshkabilov, H. W. Griepentrog and D. S. Paraforos, "Variable rate application accuracy of a centrifugal disc spreader using ISO 11783 communication data and granule motion modeling", *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol.182, 106006. 2021.
- 20) G. M. Sharipov, A. Heiß, T. Bresilla, A. T. Nieuwenhuizen, J. Hemming, F. K. van Evert S. Baron, A. Benrais, I. Avgoustakis, N. Mylonas, S. Fountas, P. Vasilarios, P. Karagiannis, J. Vidal and D. S. Paraforos, "Smart implements by leveraging ISOBUS: Development and evaluation of field applications", *Smart Agricultural Technology*, Vol.6, 100341. 2023.
- 21) C. Lee, C. W. Jeon, X. Han, J. H. Kim and H. J. Kim, "Application of electrohydraulic proportional valve for steering improvement of an autonomous tractor", *Journal of Biosystems Engineering*, Vol.47, No.2, 167-180. 2022.
- 22) J. H. Won, J. Jeon, Y. Hong, C. Yang, K. C. Kim, K. D. Kwon and G. Kim, "Study on Traveling Characteristics of Straight Automatic Steering Devices for Drivable Agricultural Machinery", *Journal of Drive and Control*, Vol.19, No.4, 19-28, 2022.
- 23) P. M. Blok, H. K. Suh, K. V. Boheemen, H. J. Kim and G. H. Kim, "Autonomous In-Row Navigation of an Orchard Robot with a 2D LIDAR Scanner and Particle Filter with a Laser-Beam Model", *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, Vol.24, No.8, 726-735, 2018.
- 24) J. Kim, K. K. Kwon and S. I. Lee, "Trends and applications on LiDAR sensor technology". *Electronics and Telecommunications Trends*, Vol.27, No.6, 134-143. 2012.
- 25) SAE International, SAE-J3016, "Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles". Technical Report, 2021.
- 26) Korea Standard Association (KSA), KS B 7951, "Levels of field operating automation of agricultural machinery", Korean Industrial Standards (KS). 2022.
- 27) K. C. Nam, Y. J. Kim, H. J. Kim, C. W. Jeon and W. S. Kim, "A study on autonomy level classification for self-propelled agricultural machines", *Korean Journal of Agricultural Science*, Vol.48, No.3, 617-627. 2021.
- 28) J. H. Han, C. H. Park, Y. Y. Jang, J. D. Gu and C. Y. Kim, "Performance Evaluation of an Autonomously Driven Agricultural Vehicle in an Orchard Environment", *Sensors*, Vol.22, No.1, 114. 2022.
- 29) Y. Nagasaka, N. Umeda, Y. Kanetai, K. Taniwaki and Y. Sasaki, "Autonomous guidance for rice transplanting using global positioning and gyroscopes", *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol.43, No.3, 223-234. 2004.
- 30) O. C. Barawid Jr and N. Noguchi, "Automatic Steering System for Electronic Robot Vehicle", *IFAC Proceedings Volumes*, Vol.44, No.1, 2901-2906. 2011.
- 31) R. Takai, L. Yang and N. Noguchi, "Development of Crawler-Type Robot Tractor Based on GNSS and IMU", *IFAC Proceedings Volumes*, Vol.46, No.4, 95-98. 2013.
- 32) W. S. Kim, D. H. Lee, T. Kim, G. Kim, H. Kim, T. Sim and Y. J. Kim, "One-shot classification-based tilled soil region segmentation for boundary guidance in autonomous tillage", *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol.189, 106371. 2021.
- 33) L. Zhang and T. E. Grift "A LIDAR-based crop height measurement system for *Miscanthus giganteus*", *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol.85, 70-76. 2012.
- 34) H. Mousazadeh, "A technical review on navigation

- systems of agricultural autonomous off-road vehicles“, *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol.50, 211-232. 2013.
- 35) N. Stefas, H. Bayram and V. Isler, “Vision-based monitoring of orchards with UAVs.”, *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol.163, 104814. 2019.
- 36) H. Kang and C. Chen, “Fast implementation of real-time fruit detection in apple orchards using deep learning”, *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol.168, 105108. 2020.
- 37) T. Hizatate and N. Noguchi, “Work schedule optimization for electric agricultural robots in orchards”. *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol.210, 107889. 2023.
- 38) M. O’Connor, T. Bell, G. Elkaim and Dr. B. Parkinson, “Automatic Steering of Farm Vehicles Using GPS”, *Proceedings of the Third International Conference on Precision Agriculture*, 767-777. 1996.
- 39) T. Kim, D. H. Lee, K. C. Kim, T. Choi and J. M. Yu, “Tomato Maturity Estimation Using Deep Neural Network”, *Applied Science*, Vol.13, No.1, 412. 2023.
- 40) J. Lu, J. Hu, G. Zhao, F. Mei and C. Zhang, “An in-field automatic wheat disease diagnosis system”, *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol.142, Part.A, 369-379. 2017.
- 41) F. Garibaldi-Marques, G. Flores, D. A. Mercado-Ravell, A. Ramirez-Pedraza and L. M. Valentin-Coronado, “Weed Classification from Natural Corn Field-Multi-Plant Images Based on Shallow and Deep Learning”, *Sensors*, Vol.22, No.8. 2022.
- 42) Y. Li, M. Iida, T. Suyama, M. Suguri and R. Masuda, “Implementation of deep-learning algorithm for obstacle detection and collision avoidance for robotic harvester”, *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol.174, 105499. 2020.
- 43) K. Shojaei, “Intelligent coordinated control of an autonomous tractor-trailer and a combine harvester”, *European Journal of Control*, Vol.59, 82-98. 2022.
- 44) K. Shojaei, “Coordinated Saturated Output-Feedback Control of an Autonomous Tractor-Trailer and a Combine Harvester in Crop-Harvesting Operation”, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol.71, No.2, 1224-1236, 2022.
- 45) V. Bulgakov, A. Aboltins, S. Ivanovs, H. Beloev, V. Nadykto, Y. Ilnatiev and J. Olt, “Theory of Movement of Machine-Tractor Unit with Trailer Haulm Harvester Machine”, *Applied Sciences*, Vol.12, No.8, 3901. 2022.
- 46) International Organization for Standardization (ISO), “Tractors, Machinery for Agriculture and Forestry – Serial Control and Communications Data Network”, Parts 1 to 12. 2019.
- 47) D. S. Paraforos, G. M. Sharipov and H. W. Griepentrog, “ISO 11783-compatible industrial sensor and control systems and related research: A review”, *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol.163, 104863. 2017.
- 48) AEF, “The AEF – Ag Industry’s initiative in electronic standards implementation”, 8. 2022.
- 49) AEF, “Hand Fan ISOBUS in Functionalities“, 23. 2015.
- 50) D. S. Paraforos, C. Aube, L. Athanasakos, I. Avgoustakis, S. Baron, T. Bresilla, S. Fountas, J. Hemming, P. Karagiannis, N. Mylonas, A. T. Nieuwenhuizen, F. R. Garcia, T. Pavlenko, A. Scovill, G. M. Sharipov, J. Vidal and F. K. van Evert, “Connecting agricultural robots and smart implements by using ISO 11783 communication”, *IFAC-PapersOnLine*, Vol.55, No.32, 200-205. 2022.
- 51) N. Iglesias, P. Bulacio and E. Tapia, “Enabling powerful GUIs in ISOBUS networks by transparent data compression”, *Computer Standards & Interfaces*, Vol.36, No.5, 801-807. 2014.
- 52) P. Suomi and T. Oksanen, “Automatic working depth control for seed drill using ISO 11783 remote control messages”, *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol.116, 30-35. 2015.
- 53) J. Backman, T. Oksanen and A. Visala, “Applicability of the ISO 11783 network in a distributed combined guidance system for agricultural machines”, *Biosystems Engineering*, Vol.114, No.3, 306-317. 2013.
- 54) A. Al-Mallahi, M. Natarajan and A. Shirzadifar, “Development of robust communication algorithm between machine vision and boom sprayer for spot

- application via ISO 11783”, Smart Agricultural Technology, Vol.4, 100212. 2023.
- 55) I. Polonen, A. Suokannas and A. Juntunen, “Cloud-Based Approach for Tracking and Monitoring of Hay Bales in Smart Agriculture“, Technology Innovation Management Review, Vol.11, No.2, 17-23. 2021.
- 56) C. J. Lee, C. Jeon, H. J. Kim, J. W. Ha and J. H. Kim, “Virtual Terminal Implementation for an ISO11783-based Auto-guided Tractor”, Proceedings of the 2017 Fall Korean Society for Agricultural Machinery Conference, Gwangju, Korea, 111. 2017.
- 57) C. J. Lee, H. J. Kim, J. W. Ha, B. J. Cho and D. S. Choi, “An ISOBUS-Networked Electronic Self-Leveling Controller for the Front-End Loader of an Agricultural Tractor”, Applied Engineering in Agriculture, Vol.33, 757 - 767. 2017.