

고도 측정 데이터를 이용한 레이저 자율 균평 시스템

Laser Autonomous Levelling System Using Altitude Measurement Data

최헌수¹·강민수¹·장선호¹·홍형길¹·윤해룡¹·박관형¹·권태희¹·김화남²·조용준[†]
Heonsoo Choi¹, Minsu Kang¹, Sunho Jang¹, Hyunggil Hong¹, Haeyong Yun¹,
Kwanhyung Park¹, Taehee Kwon¹, Hwanam Kim², Yongjun Cho[†]

Abstract: In agriculture, levelling work is carried out before planting, and it prevents seed flooding and affects crop yields. Unlike in the past, when levelling work was performed by manpower, in modern times, a leveller using laser is used. The efficiency has increased by automatically controlling the leveller according to the laser signal. However, the autonomous laser leveller developed so far does not provide altitude information for each location of a large workplace. In the absence of altitude information for each location, the work flow is inefficient because it is necessary to visually check the levelling work process, and it is difficult to determine additional required work points. In this study, by controlling the laser receiver using a BLDC motor, altitude information for each location is measured and provided to the user as a separate display. The user checks the altitude information and performs equalization work, thereby increasing the efficiency of the levelling work by enabling the determination of the starting point, determination of the work path, and identification of the point where additional work is required.

Keywords: Laser Leveller, Altitude Measurement, Autonomous Control, Autonomous Levelling

1. 서론

현대 농업에선 생산성 향상 및 효율성을 높이기 위해 다양한 기술이 도입되고 있다. 그 중, 지면을 평평하게 만드는 작업인 균평 작업은 중차 침수 문제를 방지하고 관개효율 증가, 제초 작업, 비료 사용량 감소, 잡초 양 감소 그리고 작물 수확량 증가에

직결되는 효과를 가져온다¹⁻³⁾.

전통적으로 균평 작업은 인력으로 진행되었으나, 노동력 소모가 크고 시간 및 비용이 많이 소비되는 단점이 존재하였다. 이러한 단점을 보완하고 균평의 효과를 높이기 위해 트랙터에 장착이 가능한 균평기가 개발되었고, 단순히 트랙터에 장착되어 균평기를 끌고다니는 형태에서 나아가 레이저 신호를 이용한 레이저 자율 균평기가 개발되었다. 레이저 자율 균평기의 경우, 레이저를 발진하는 레이저 송신기를 통해 균평 목표 기준이 정해지고, 기준이 되는 레이저 신호에 따라 균평기에 부착되어 있는 레이저 수신기의 중앙을 맞추고자 유압 밸브로 상, 하 제어가 이루어진다⁴⁻⁷⁾. 레이저 신호에 따른 상, 하 제어뿐만 아니라 지면의 상태 또는 주행 방식에 따라 변화되는 roll 각도를 센서로 측정하여 보완함으로써 균평 효율을 높이고 하는 연구가 진행되었다^{4,8)}. 개발된 레이저 자율 균평기를 통해 전통적인 방법에 비해 작업 시간을 단축시키고, 인력 및 자원을 절감하여 농업 생산성을 향상시킬 수 있었다.

균평 작업에 앞서 작업 동선을 계획하기 위해 작업지의 전체적인 고도 정보가 필요하다. 하지만 현재까지 개발된 레이저 자

Received : Jul. 22. 2024; Revised : Aug. 16. 2024; Accepted : Aug. 26. 2024

※ This work was supported by Korea Institute of Planning and Evaluation for Technology in Food, Agriculture and Forestry (IPET) through Open Field Smart Agriculture Technology Short-term Advancement Program, Agri-Food Export Enhancement Technology Development Program, Technology Commercialization Support Program and Field Farming Mechanization Promotion Technology Development Project, funded by Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs (MAFRA) and the Korea government (MSIT) (No. 322041-02, 00233150, 122053-03, RS-2023-00235957).

1. Researcher, Korea Institute of Robotics & Technology Convergence (KIRO), Andong, Korea (hschoi9817, mskang, jang1229, honghg, hyyun, pjhkh9191, kth0252@kro.re.kr)

2. Director, G-geumgang CO., LTD., Gwangju, Korea (aerocar@naver.com)

† Principal Researcher, Corresponding author: Korea Institute of Robotics & Technology Convergence (KIRO), Andong, Korea (cyj@kro.re.kr)

을 균평 시스템의 경우, 작업지에 대한 전체적인 고도 정보를 사용자에게 제공하지 못하거나 비효율적인 문제가 존재한다. 균평 작업의 평가를 위해 GNSS (Global Navigation Satellite System) 안테나를 사용하여 위치별 고도를 측정하거나, 자세 제어 센서를 통해 고도를 파악하는 방법이 존재하지만 사용자에게 정보를 제공해 주지 못한다^{4,5)}. 줄자와 측정봉을 이용하여 고도를 측정하는 방식은 일정한 간격을 직접 이동하며 지점을 모두 측량해야 하므로 정밀하게 측정하기 위해선 많은 시간과 노동력이 요구되며^{4,7,9)}, 드론과 같은 무인 항공기와 LiDAR를 통해 고도를 측정하는 방법이 존재하지만, 별도의 시스템이 요구된다는 단점이 있다¹⁰⁾. 작업지의 위치별 고도 정보가 없는 경우 균평 작업 시작점에서의 균평 기준 높이 설정에 있어 육안으로 확인하여 지정해야 하고, 설정된 균평 기준에 따라 균평 난이도 또는 효율에 영향을 끼친다. 또한 균평 작업 시, 지면을 실시간 육안으로 확인하며 운행해야 하므로 작업 동선이 비효율적이며, 추가 필요 작업 지점에 대한 판단이 어렵다.

본 연구에서는 BLDC 모터를 사용하여 레이저 수신기를 상, 하로 제어함으로써 고도를 측정하고, 측정된 고도와 GPS (Global Positioning System) 정보를 이용하여 작업지의 위치별 고도 정보를 수집하고자 하고, 수집된 위치별 고도 정보는 별도의 디스플레이를 통해 사용자에게 제공하여 균평 작업의 효율성을 높이고자 한다. 이를 바탕으로 레이저 자율 균평 시스템에 대한 구성과 작동 메커니즘 그리고 실험적 검증 등을 통하여 제시하는 효과를 평가하고자 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서 제안하는 레이저 자율 균평 시스템의 구성을 설명하며, 위치별 고도 측정 방법 및 메커니즘과 이를 바탕으로 진행되는 레이저 자율 균평 작업의 방법 및 제어 방법을 나타낸다. 3장에서는 단계별 사용되는 센서 및 출력부의 작동 신호 실험을 진행하고, 이어서 작업지에서 제시하는 레이저 자율 균평 시스템과 기존 균평 시스템의 균평 효과를 비교하여 평가한다.

2. 레이저 자율 균평 시스템 구성

본 연구에서 제안하는 레이저 자율 균평 시스템은 기존 균평 작업 과정과 달리, Step 1과 Step 2로 나뉘어 작업을 진행한다. Step 1은 작업지의 고도를 측정하는 단계로써, 레이저 신호를 수신하는 레이저 수신기를 장착하고 트랙터를 운행하여 고도 정보를 수집한다. Step 1 과정이 끝난 후, 취득한 고도 정보를 기반으로 균평 작업 단계인 Step 2를 진행한다. Step 2의 경우, 레이저 수신기에 수신되는 레이저 신호를 통해 균평날을 상승 또는 하강시키고, 지면과 균평날이 항상 수평을 유지할 수 있도록 제어됨으로써 균평 작업을 진행하게 된다.

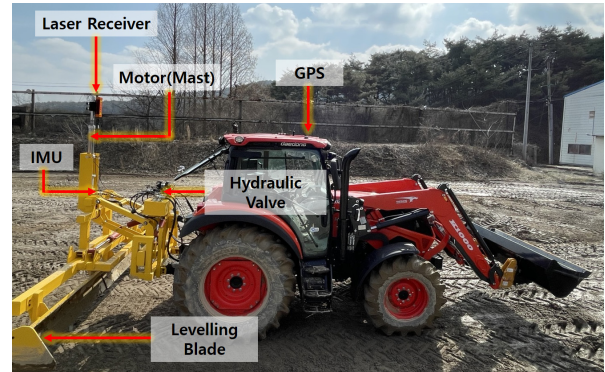
2.1 작동 환경

Step 1 과정을 위해 레이저 송/수신기, BLDC 모터 그리고 GPS를 이용하며, 측정이 완료된 데이터를 기반으로 자율 Step 2 과정을 진행하기 위해 레이저 송/수신기, IMU (Inertial Measurement Unit), 유압 밸브, 균평날이 사용된다. 고도 측정 및 균평의 기준이 되는 레이저 송신기는 작업지의 외부에 설치되어 방사하는 방식이다. 이는 [Fig. 1]과 [Fig. 2]에서 나타난다.

레이저 자율 균평기는 컨트롤러로 모드 선택, 수동 조작 등이 가능하며, 컨트롤러와 센서부는 모두 CAN 통신으로 작동된다. 균평날을 상, 하, 좌, 우로 움직이기 위해서 유압 밸브를 이용하며, 유압 밸브의 경우 PWM (Pulse Width Modulation)을 통해 목표치까지 작동하는 방식으로 제어된다. 모터는 RPM 제어를 위해 PID를 사용하였으며, 엔코더를 통해 회전수에 따라 마스트 높이 변화를 mm 단위로 환산한다.

2.2 Step 1 - 위치별 고도 측정

균평 작업의 효율성을 높이기 위해 위치에 따른 고도를 측정하며 이를 Step 1이라 한다. Step 1을 진행하기 위해 레이저 송/



[Fig. 1] The placement of parts attached to the tractor



[Fig. 2] Installation location of the laser transmitter

수신기와 BLDC 모터 그리고 GPS를 사용한다.

기준으로 하고자 하는 높이에 레이저 송신기를 설치 및 높이 조절을 한다. 레이저 송신기는 지면과 수평인 방향으로 360°로 회전하며 레이저를 발진한다. 레이저 신호의 높이에 맞추기 위해 균평기는 지면으로부터 띄어진 상태에서 설정을 진행한다.

기준이 되는 레이저 신호를 레이저 수신기의 중앙에 맞추고자 모터를 통해 높이를 맞춘다. 레이저 수신기는 레이저 신호에 따라 0 mm ~ 200 mm를 5 mm 간격으로 측정할 수 있으며, 레이저 수신기의 중앙에 레이저 신호를 수신하게 되면 100 mm로 측정이 된다. 이 때, 트랙터 엔진의 진동으로 인해 신호가 불안정하게 수신될 가능성이 존재하여 zero-boundary를 95 mm ~ 105 mm로 설정하였다. 또한 트랙터가 이동하는 도중, 0 mm ~ 200 mm 범위 내에 레이저 신호가 들어오지 않는 경우, 신호를 놓친 경우이므로 초기에 재설정이 요구될 수 있다.

시작점에서 Step 1을 위한 준비를 마친 이후, 트랙터를 운행하며 Step 1이 시작된다. Step 1의 작동 과정은 [Fig. 3]과 같은 모습으로 진행되며, [Fig. 4]의 알고리즘에 의해 진행된다. P_L 은 레이저 수신기가 레이저 신호에 따라 출력되는 측정값으로 0 mm ~ 200 mm의 범위 내에서 값을 출력한다. 트랙터가 운행되는 동안 고도의 변화가 나타난다. 고도의 변화로 인해 레이저 수신기는 하단 또는 상단에 레이저 신호를 수신하게 되며, 측정되는 값에 따라 마스트(모터)가 상승 또는 하강하게 된다. 고도가 낮아지는 경우, 레이저 신호는 레이저 수신기의 상단에 송신되어 $105\text{ mm} < P_L \leq 200\text{ mm}$ 범위 내의 값을 출력한다. 모터는 레이저 수신기의 중앙을 맞추고자 회전하여 마스트를 상승

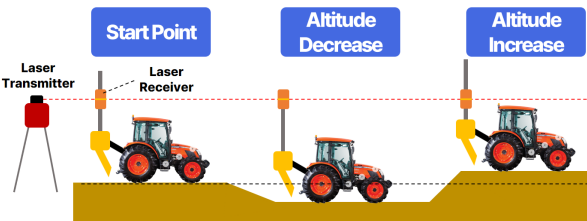
시킨다. 고도가 상승한 경우는 레이저 신호가 레이저 수신기의 하단에 송신되어 $0\text{ mm} \leq P_L < 95\text{ mm}$ 범위 내의 값을 출력하며, 모터가 레이저 수신기의 중앙을 맞추고자 회전하여 마스트를 하강시킨다. 모터와 마스트로 인해 레이저 수신기가 상승 또는 하강하여 $95\text{ mm} \leq P_L < 105\text{ mm}$ 범위 내의 값이 출력되면, 모터가 회전한 회전수를 마스트 이동 거리로 환산하여 변화된 고도값을 얻을 수 있다.

측정된 고도의 정보는 메인 컨트롤러에 전달되고, 주행함과 동시에 GPS로부터 측정된 위치 정보를 읽어 사용자에게 위치별 고도 정보를 별도의 모니터로 제공한다. 위치별 고도 정보를 통해 사용자는 어느 위치에서 균평 작업을 시작해야 하고, 작업량이 추가로 필요한 부분에 대한 판단이 가능하여 작업 동선 계획을 수립할 수 있다.

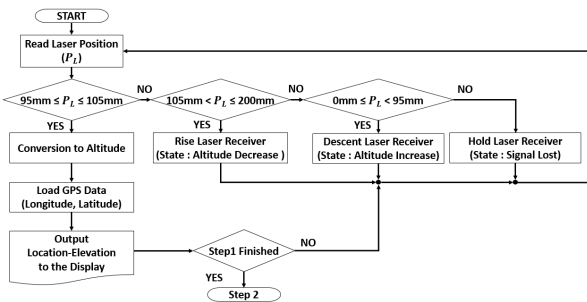
2.3 Step 2 - 레이저 자율 균평 작업

균평 작업 환경에 대한 측정을 마친 후, 작업의 시작점 및 작업 경로를 정하였다면 자율 균평 작업인 Step 2를 진행하게 된다. Step 2는 레이저 송/수신기, IMU, 유압밸브 그리고 균평날을 이용하여 진행하게 된다.

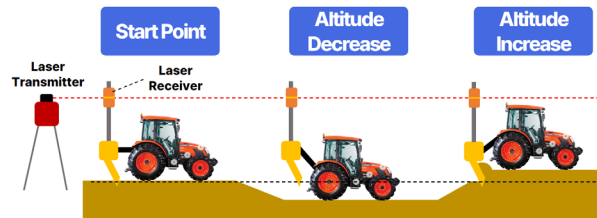
Step 2의 시작점은 보통 전체 작업지에서 중간 고도인 지점으로 지정한다. 레이저 송신기의 레이저 신호를 기준이 균평 작업의 목표 고도가 되며, 시작점에서 레이저 수신기가 중앙에 오도록 균평날의 높이를 조절한다. 이 때, 기준의 변화가 생기는



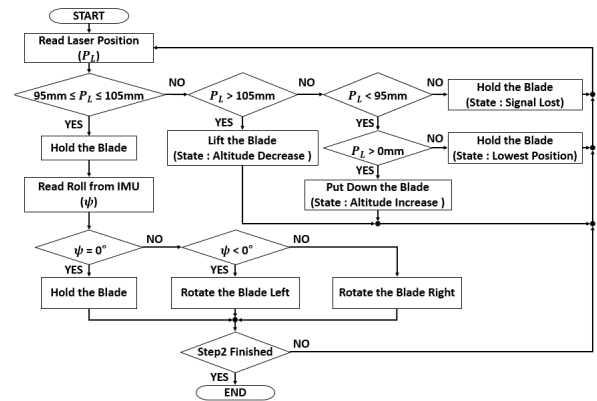
[Fig. 3] Altitude measurement process of laser autonomous levelling system



[Fig. 4] Altitude measurement process algorithm of Step 1



[Fig. 5] Autonomous levelling process of laser autonomous levelling system



[Fig. 6] Autonomous levelling process algorithm of Step 2

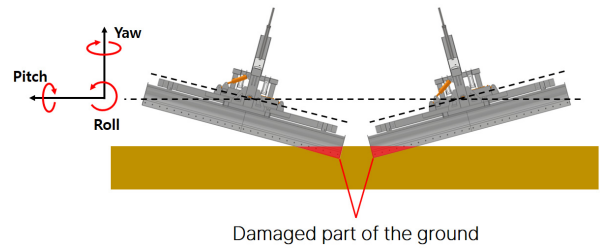
경우, 균평이 일정하게 되지 않으므로, 마스트를 움직이지 않고 고정해 둔다.

Step 2를 위한 준비가 완료된 후, 트랙터 운행을 시작하면 자동으로 Step 2가 진행된다. Step 2의 작동 과정은 [Fig. 5]와 같은 과정을 통해 진행되며, [Fig. 6]의 알고리즘에 의해 진행된다. P_L 은 레이저 수신기가 레이저 신호에 따라 출력하는 측정값이며, ψ 는 IMU를 통해 측정된 roll 각도이다. 기준보다 고도가 낮아진 경우, 흙을 채워 고도를 높여야하므로 흙을 모으기 위해 균평날을 상승시키게 된다. 이는 고도가 낮아진 경우에 레이저 신호가 레이저 수신기의 상단인 $P_L > 105 \text{ mm}$ 이 출력되는 상황에서 레이저 신호를 레이저 수신기 중앙에서 수신하기 위해 균평날을 상승시키는 방식으로 구현하였다. 고도가 기준보다 높은 경우는 흙을 모아 고도가 낮은 지점에 채워야하기 때문에 균평날을 내려 흙을 모으게 된다. 이 또한 고도가 높아진 경우에 레이저 신호가 레이저 수신기의 하단에 수신하는 상태인 $P_L < 95 \text{ mm}$ 이 출력되는 상황에서, 레이저 신호를 수신기의 중앙에 맞추기 위해 균평날을 하강시키는 방식으로 구현한다. 이 때, P_L 의 최하단인 0 mm 가 출력되는 경우가 있다. 최하단에 수신되는 경우, 균평날을 고정시키도록 하였다. 균평날이 지면에 지나치게 깊게 박히는 경우, 트랙터의 엔진 토크가 부족할 수 있으며, 균평날의 손상 위험도가 높아지기 때문이다. 고도가 매우 높아 한 번에 흙을 모아 이동할 수 없는 경우, 반복하여 작업을 진행해야 한다.

균평 작업이 진행되는 동안 레이저 신호를 잃어버리는 경우가 존재한다. 이는 레이저 수신기의 측정 가능한 범위보다 큰 고도 변화가 있는 경우이다. 상단에서 신호를 잃은 경우, 균평날을 올려야 하는 과정에서 잃은 경우이므로 정지를 시켜도 지면에 닿지 않아 균평날의 위치를 유지시킨다. 하단에서 신호를 잃은 경우, 균평날을 하강시키는 과정에서 잃은 상황이다. 하단에서 신호를 잃어 균평날을 계속 하강시키도록 하면 균평날이 깊게 박히게 되어 문제가 발생할 수 있으므로 균평날의 위치를 유지시킨다.

균평날 상, 하 제어는 유압 밸브를 통해 구현하였다. 유압 펌프는 트랙터의 엔진을 통해 작동되며, 균평날을 상승 및 하강시키는 유압 밸브를 레이저 신호에 맞춰 PWM을 통해 균평날을 제어한다.

레이저 자율 균평 시스템엔 균평날의 상승, 하강을 제어하는 유압 밸브뿐만 아니라 좌, 우회전을 위한 유압 밸브 또한 존재한다. 선회 운동과 같이 트랙터의 주행 방법 또는 지면의 상태에 따라 roll 각도가 변화되어 정확하지 못한 균평 작업이 이뤄질 수 있는 가능성이 존재한다. 이러한 문제를 해결하여 균평 작업의 효과 및 효율을 높이기 위해 좌, 우회전이 가능한 유압 밸브를 사용한다.



[Fig. 7] Damage to the ground caused by a change in roll angle

[Fig. 7]은 균평날의 roll 각도가 변화함에 따라 지면 훼손이 발생하는 모습을 나타낸다. [Fig. 7]의 경우, 균평 작업이 완료된 상태임에도 불구하고 주행 방법에 따라 훼손될 가능성을 보여준다. 또한 지면과 수평 방향으로 발진되는 레이저 신호가 레이저 수신기에 정확하지 않은 지점에 수신될 수 있다. 이를 방지하기 위해 IMU를 사용하여 roll 각도인 ψ 를 실시간으로 측정한다. ψ 가 0° 를 유지하는 것이 목표이며, $\psi < 0^\circ$ 인 각도가 측정되면 균평날을 좌측으로 회전시키며, $\psi > 0^\circ$ 인 각도가 측정되면 균평날을 우측으로 회전시킴으로써 균평날과 지면이 항상 수평을 유지하도록 한다.

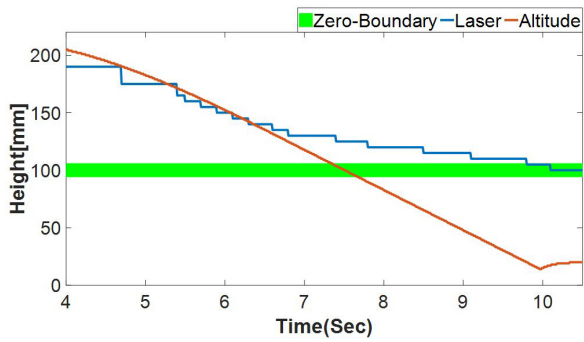
3. 균평 시스템 실험

3.1 단계별 작동 신호 실험

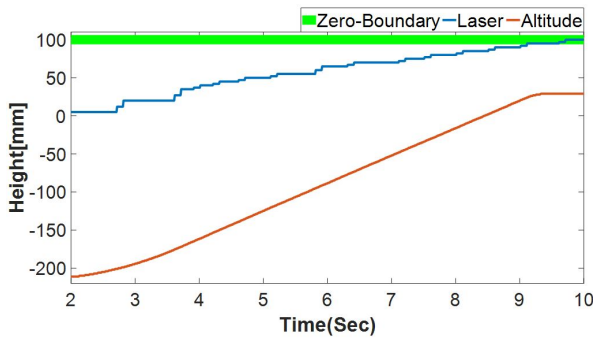
제안하는 레이저 자율 균평 시스템은 작업지의 위치별 고도를 측정하는 Step 1 과정을 거쳐 레이저 신호와 IMU를 이용한 자율 균평 작업 과정인 Step 2를 진행한다.

균평기에 제안하는 시스템을 적용하기 전, 정상 작동 여부를 확인하기 위해 단계별 작동 신호를 측정하는 실험을 진행한다. 레이저 송신기는 고정해 둔 상태에서 레이저 수신기 및 IMU를 수동으로 조작하여 센서부에 따른 작동 신호가 올바르게 출력되는지 확인한다.

[Fig. 8]은 Step 1 과정의 작동 신호를 나타낸다. 고도 변화에 따라 레이저 신호가 측정되고, 레이저 수신 위치에 따라 모터가 작동하여 고도를 측정하는 그래프를 나타낸다. 레이저 수신기의 zero-boundary에 도달하기까지 모터가 작동되고, 모터의 RPM을 이동 거리로 환산하여 고도를 측정한다. [Fig. 8(a)]는 고도가 낮아진 경우 레이저 수신기의 측정값과 그에 따른 고도 측정 결과를 나타낸다. 레이저 수신기의 최상단에서 시작되어 zero-boundary에 도달하기까지 모터가 작동되어 고도가 낮아지도록 측정됨을 알 수 있다. Zero-boundary의 최상단인 $P_L = 105 \text{ mm}$ 가 측정되면 모터가 정지하여 고도가 유지되는 모습을 볼 수 있다. [Fig. 8(b)]는 고도가 상승한 경우의 그래프를 나타낸다. 레이저 수신기의 최하단인 $P_L = 0 \text{ mm}$ 가 수신되었다고



(a) In case of altitude decreased

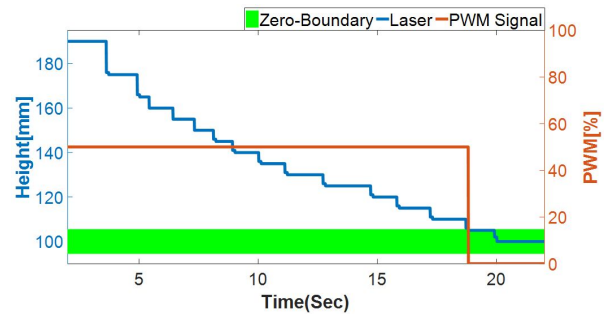


(b) In case of altitude increased

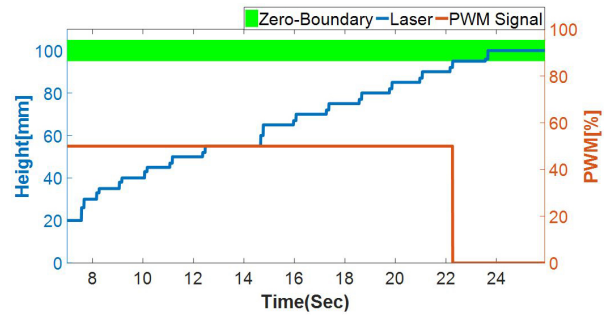
[Fig. 8] Measured altitude and laser signal graph according to altitude change

가정하여 측정을 진행하였다. 모터가 작동함에 따라 고도 또한 상승하는 방향으로 측정됨을 알 수 있다. Zero-boundary의 최하단인 $P_L = 95 \text{ mm}$ 가 측정되는 경우, 모터는 작동을 멈추어 고도 측정값이 유지되는 것을 알 수 있다.

[Fig. 9]는 고도 변화로 인해 변화하는 레이저 신호에 따라 균평날을 제어하기 위한 상승 및 하강 밸브의 PWM 신호 그래프를 나타내며 Step 2 과정에 해당한다. [Fig. 9(a)]는 고도가 하강되었을 경우를 나타낸다. 고도가 낮아진 경우, 레이저 수신기의 상단에 레이저 신호를 수신하기 때문에 zero-boundary인 95 mm ~ 105 mm 범위보다 높은 값이 측정된다. 이와 같이 측정되는 경우 상승 밸브를 duty cycle 50%의 비로 작동시켜 zero-boundary 내에 레이저 신호가 수신되도록 균평날을 상승시킨다. Zero-boundary에 도달하는 순간 밸브의 신호가 duty cycle 0%가 되어 균평날의 상승이 중지되는 모습을 보인다. [Fig. 9(b)]는 고도가 상승되었을 경우를 나타낸다. 고도가 상승된 경우는 하강된 경우와 반대로 레이저 수신기의 하단에 레이저 신호를 수신하여 zero-boundary 범위보다 낮은 값이 측정된다. 낮은 값이 측정되면, 레이저 수신기가 zero-boundary 범위 내에서 레이저 신호를 측정할 수 있도록 하강 밸브를 duty cycle 50%의 비로 작동시킴으로써 균평날을 하강시킨다. Zero-boundary에 도달하면 밸브의 작동이 중지됨으로써 균평날 또한 하강이 중지됨을 알 수 있다.



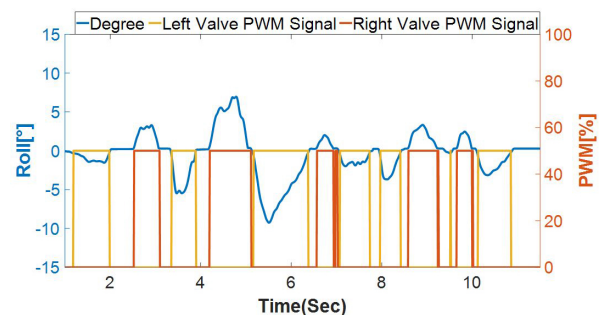
(a) PWM signal graph of the rising valve when the altitude has decreased



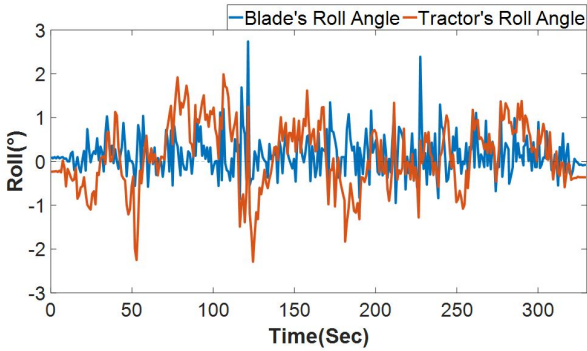
(b) PWM signal graph of the descending valve when the altitude has increased

[Fig. 9] Laser and PWM signal graph according to altitude change

Step 2에선 균평의 효율을 향상시키기 위해 균평날을 상시 지면과 평행을 유지하도록 좌, 우 밸브와 IMU를 사용한다. [Fig. 10]은 균평날이 좌측 또는 우측으로 기울어짐으로써 발생한 roll 각도의 변화에 따라 균평날을 지면과 수평인 상태를 유지시키기 위해 좌, 우 유압 밸브를 작동시키는 그래프를 나타낸다. 균평날이 C.W로 회전할 경우, 왼쪽 밸브가 작동되며, 균평날이 C.C.W로 회전할 경우, 오른쪽 밸브가 작동된다. 이 또한 PWM 신호로 제어되며, 균평날의 각도가 지면과 수평을 이루는 지점인 0°가 되었을 때, 작동을 멈추는 모습이 나타난다. 이와 같이 작동할 경우, 트랙터가 지형에 따라 roll 각도의 변화가 나타날 때, 균평날은 독립적으로 0°를 유지하고자 하며 이는



[Fig. 10] Actuating signal of left and right valves according to roll angle



[Fig. 11] Graph of the blade roll angle compared to the tractor roll angle

[Fig. 11]에서 나타난다. 트랙터에 별도의 IMU를 장착하고 주행을 진행하며 측정을 하였다. 이 때, 균평날의 경우 roll 각도에 따라 좌, 우 밸브를 자율로 제어하여 지면과 수평을 이루도록 하였다. RMSE (Root Mean Square Error)를 사용하여 오차를 계산하였으며, 이는 식 (1)에서 나타난다^[8].

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\psi_i - target)^2} \quad (1)$$

n 은 측정된 샘플링의 개수를 나타내며, ψ_i 는 IMU를 통해 측정된 i 번째 roll 각도이다. $target$ 은 목표 roll 각도이므로, 균평날과 지면이 평행한 상태인 0° 로 설정하였다. 트랙터의 경우 약 0.5669° 의 오차를 보이는 반면 균평날의 경우 약 0.2210° 의 오차를 보인다.

3.2 작업지 균평 작업 비교 실험 및 분석

본 연구에서 제안하는 레이저 자울 균평 시스템의 균평 작업의 효과를 확인하기 위해 수동 균평 작업과 제안하는 균평 시스템으로 진행한 작업을 비교하였다. 균평 작업 전에 Step 1을 진행하고, Step 2인 균평 작업을 수행한 뒤, 다시 Step 1을 통해 작업 전, 후의 고도를 비교하는 방식으로 실험을 진행한다.

수동 균평 및 자율 균평 테스트 모두 Step 2 이전에 트랙터를 운행하며 Step 1을 진행함으로써 작업지의 위치별 고도 측정을 진행하였다. 레이저 신호에 따라 마스트 모터가 레이저 수신기를 상, 하 제어함으로써 고도를 측정하고, GPS를 통해 위도, 경도에 고도를 매치하여 저장해둔다. 환경 측정 과정은 2.2절에서 나타난다.

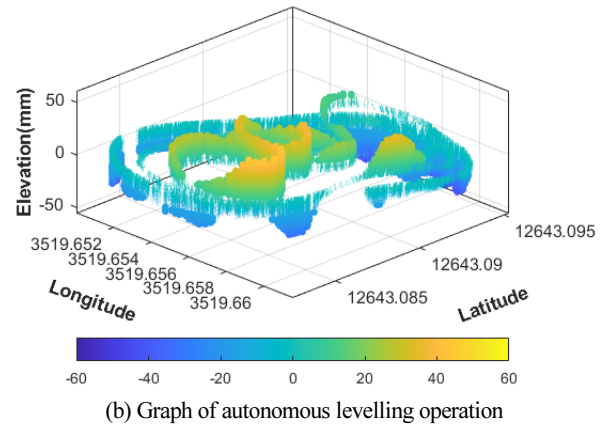
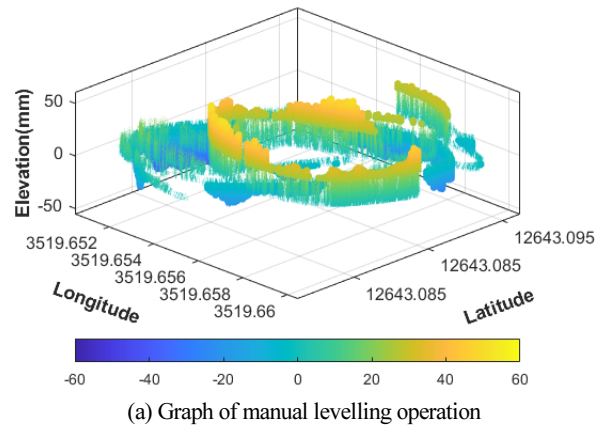
고도 측정이 완료된 이후, 수동 및 자율 균평 작업을 진행한다. Step 1 과정이 완료된 데이터를 확인하여 작업지의 중간 고도에서 기준을 잡아 시작점으로 지정하였다. 시작점에선 레이저 송신기에서 발진하는 레이저 신호를 레이저 수신기의 중앙

에 오도록 마스트를 조절한다. 이 때, 레이저 수신기에서 측정되는 P_L 은 0 mm이며, 실험 결과 RMSE의 기준값이 된다. 수동 작업은 사용자가 후방을 바라보며 균평날을 상, 하로 조종한다. 이 때, 좌, 우 밸브는 제어하지 못한다. 자율 작업은 사용자가 트랙터만 운행하고, 균평날은 레이저 신호 및 IMU를 통해 자율로 제어된다. 균평 작업은 3회 반복하여 진행하고, 다시 고도 측정을 진행하여 균평 작업 이후에 변화된 고도값을 측정한다. Step 2 이전의 Step 1 그리고 Step 2 이후의 Step 1은 식 (2)를 통해 RMSE를 계산한다^[4,11].

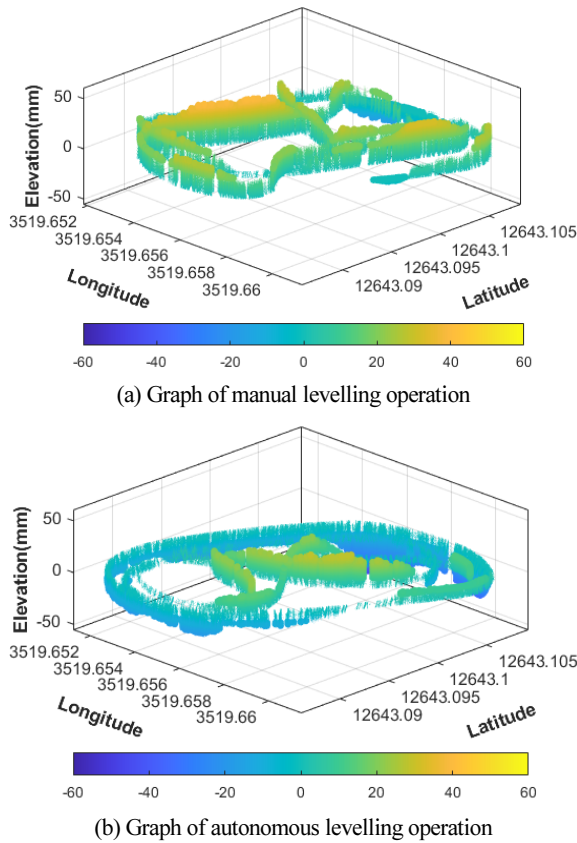
$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_{Li} - target)^2} \quad (2)$$

P_{Li} 는 레이저 수신기로부터 측정된 i 번째의 측정값을 나타내며, n 은 측정된 샘플링의 개수를 나타낸다. 이 때, $target$ 은 레이저 수신기의 중앙에서 측정되는 0 mm로 설정한다. 실험은 크기 55 m × 18 m의 테스트 베드에서 진행하며 이는 [Fig. 2]에 나타난다.

[Fig. 12]는 균평 작업 전 위치별 고도 정보를 그래프로 나타낸다. [Fig. 12(a)]는 수동 작업 전, Step 1을 진행한 그래프를 나



[Fig. 12] Location-elevation information prior to levelling operation



[Fig. 13] Location-elevation information after levelling operation

타내며, RMSE는 약 23.59 mm이다. [Fig. 12(b)]는 자율 작업 전, Step 1을 진행한 그래프를 나타내며, RMSE는 약 24.46 mm로, 균평 작업을 수동 및 자율 균평 작업지의 환경이 유사하다는 것을 알 수 있다.

[Fig. 13]은 Step 2 이후의 위치별 고도 정보를 그래프로 나타낸다. [Fig. 13(a)]와 [Fig. 13(b)]는 각각 수동 및 자율로 균평 작업을 진행한 후, Step 1을 통해 제공된 위치별 고도 그래프이다. 균평 작업을 수동으로 진행한 경우의 RMSE는 약 19.53 mm였으며, 자율로 균평을 진행한 경우의 RMSE는 약 16.23 mm로 측정되었다. 수동으로 작업을 진행한 경우, 작업 전과 4.06 mm의 고도 차이를 나타냈으며, 자율로 작업을 진행한 경우는 작업 전과 8.23 mm의 고도 차이를 나타내었다. 실험 결과를 보아, 제안하는 레이저 자율 균평 시스템의 균평 작업이 비교적 효과적이라는 것을 알 수 있다. 수동 및 자율 균평 작업의 결과를 정리하면 [Table 1]과 같다.

제안하는 레이저 자율 균평 시스템은 고도 정보를 사용자에게 제공함으로써 작업 동선의 계획이 가능하며, IMU를 통해 실시간으로 수평을 유지하고자 한다. 기존의 레이저 송/수신기만을 이용하여 진행한 레이저 균평기와 비교하여 균평도를 비교하고자 하였다. 균평도를 나타내기 위한 지표는 식 (2)와 식 (3)를 이용하였다^[11].

[Table 1] Compare the result of manual and autonomous levelling operations

	Before levelling (RMSE, mm)	After levelling (RMSE, mm)	Before-after value difference (mm)
Manual mode	23.59	19.53	4.06
Autonomous mode	24.46	16.23	8.23

[Table 2] Compare the result of proposed levelling system and existing levelling system

	After levelling (RMSE, mm)	$P(x_i - target \leq 30)$ (%)
Existing levelling system ^[11]	24.2	84.06
Proposed levelling system	16.23	92.49

$$P(|P_{Li} - target| \leq 30) = \frac{m}{n} \times 100\% \quad (3)$$

식 (3)에서 P_{Li} 는 레이저 수신기로부터 측정된 i 번째의 측정값을 나타내며, $target$ 은 작업하고자 하는 목표 고도값이다. 전체 측정 샘플링 개수 n 에 대해 $target$ 을 기준으로 차이가 30 mm 이하의 P_{Li} 인 샘플링 개수 m 을 백분율로 나타낸다.

[Table 2]에서 기존의 레이저 신호로만 작동되는 균평 시스템과 제안하는 균평 시스템의 균평도를 비교한다. 기존 균평 시스템으로 작업을 진행한 이후 측정된 고도값의 RMSE는 24.2 mm이며 목표치로부터 30 mm 이하로 균평이 된 지점은 전체 작업지의 84.06%이다. 이에 반해 제안하는 균평 시스템의 경우, 작업이 진행한 이후에 측정된 고도값 RMSE는 16.23 mm로 목표 고도값에 더 근접하며, 목표치로부터 30 mm 이하로 균평이 된 지점은 전체 작업지의 92.49%로 제안하는 레이저 자율 균평 시스템으로 인해 균평 효과가 증가한 것을 알 수 있다.

4. 결론

기존 수동으로 진행되는 균평 과정은 전체적인 작업지의 고도 파악이 불가능하여 작업의 시작점 또는 작업 동선의 파악이 어렵다. 또한 균평 작업을 진행할 때, 트랙터를 운행하는 동시에 후방에 있는 균평기를 보며 작업을 진행하기 때문에 작업의 효과 및 효율이 떨어진다. 제안하는 레이저 자율 균평 시스템의 경우, 레이저 송/수신기와 모터를 통해 Step 1 단계를 진행함으로써 작업지의 위치별 고도 파악이 가능하고, 이를 기준으로 작업의 시작점 및 동선을 파악할 수 있다. 이에 더해 균평 작업인 Step 2 단계가 완료된 이후, Step 1 과정으로 작업이 추가로 요

구되는 지점이 있는지 또한 파악이 가능하다. 레이저 자율 균평 시스템은 레이저 신호와 IMU 그리고 상, 하, 좌, 우 제어 유압 밸브를 사용함으로써 균평날이 항상 지면과 수평을 이루고자 하는 동시에 고도에 따라 균평날이 자율로 작동하므로 균평 작업 시, 전방만 주시한 상태로 작업이 가능해진다. 이는 균평 작업에 안정성과 효율성을 증대시킬 수 있다. 실험을 진행하였을 때, 수동으로 진행한 균평 작업보다 자율로 진행한 경우가 균평 작업 효과가 더 높다는 것을 알 수 있었으며, 레이저 신호만을 이용한 레이저 균평 시스템보다 제안하는 레이저 자율 균평 시스템의 균평 효과가 더 높다는 것을 알 수 있었다.

하지만 지면의 기울기가 가파른 경우, 트랙터 및 균평기의 pitch 각도가 변화되는 현상이 발생한다. 트랙터와 균평기는 pitch 각도를 조절하는 기능이 없기에 pitch 각도가 변하였을 때, 레이저 신호가 본래 들어와야 하는 위치보다 낮게 수신되는 현상이 발생하며, 이는 pitch가 약 $\pm 2.86^\circ$ 이상 변화하였을 때 문제가 발생한다. 위의 현상은 균평기가 하강하여 흙을 모아야 하는 상황에서 충분히 하강하지 못하여 정밀함이 요구되는 균평 작업에 문제로 이어진다. 향후, 레이저 수신기가 본래 레이저 신호를 수신해야 하는 위치로 데이터 처리가 이루어지도록 IMU를 이용하여 해결하고자 한다. 더 나아가, 작업 환경에 대한 위치별 고도 정보를 취득할 수 있으므로, 자율적으로 작업 경로를 생성하여 무인으로 트랙터가 주행함과 동시에 균평 작업 또한 자율적으로 진행하는 무인 균평 시스템으로 발전시킬 예정이다.

References

- [1] I. Abdullaev, M. Ul Hassan, and K. Jumaboev, "Water saving and economic impacts of land leveling: the case study of cotton production in Tajikistan," *Irrigation and Drainage Systems*, vol. 21, no. 3, pp. 251-263, Oct., 2007, DOI: 10.1007/s10795-007-9034-2.
- [2] J. P. Aryal, M. B. Mehrotra, M. L. Jat, and H. S. Sidhu, "Impacts of laser land leveling in rice-wheat systems of the north-western indo-gangetic plains of India," *Food Security*, vol. 7, no. 3, pp. 725-738, May, 2015, DOI: 10.1007/s12571-015-0460-y.
- [3] M. L. Jat, M. K. Gathala, J. K. Ladha, Y. S. Saharawat, A. S. Jat, V. Kumar, S. K. Sharma, V. Kumar, R. Gupta, "Evaluation of precision land leveling and double zero-till systems in the rice-wheat rotation: Water use, productivity, profitability and soil physical properties," *Soil and Tillage Research*, vol. 105, no. 1, pp. 112-121, Sept., 2009, DOI: 10.1016/j.still.2009.06.003.
- [4] H. Zhou, L. Hu, X. Luo, L. Tang, P. Du, T. Mao, R. Zhao, and J. He, "Design and test of laser-controlled paddy field leveling-beater," *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, vol. 13, no. 1, pp. 57-65, 2020, DOI: 10.25165/ijabe.20201301.4989.
- [5] L. Tang, L. Hu, Y. Zang, X. Luo, H. Zhou, R. Zhao, and J. He, "Method and experiment for height measurement of scraper with water surface as benchmark in paddy field," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 152, pp. 198-205, Sept., 2018, DOI: 10.1016/j.compag.2018.07.020.
- [6] C. K. Saxena, S. K. Ambast, and S. K. Gupta, "Laser land leveling for higher water productivity in rice-wheat system," *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, vol. 9, no. 8, pp. 374-379, Jun., 2020, DOI: 10.35940/ijitee.H6482.069820.
- [7] B. Suthakar, K. Kathirvel, R. Manian, and D. M. Jesudas, "Laser guided land leveler: Precession leveler with laser technology for land preparation," *Ama, Agricultural Mechanization in Asia, Africa & Latin America*, vol. 39, no. 4, pp. 30-36, Sept., 2008, [Online], https://www.shin-norin.co.jp/english/pdf/VOL_39_NO_4_AUTUMN_2008.pdf#page=27.
- [8] L. Hu, W. Yang, J. He, H. Zhou, Z. Zhang, X. Luo, R. Zhao, L. Tang, and P. Du, "Roll angle estimation using low cost MEMS sensors for paddy field machine," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 158, pp. 183-188, Mar., 2019, DOI: 10.1016/j.compag.2019.01.010.
- [9] M. A. Hoque and M. A. Hannan, "Performance evaluation of laser guided leveler," *International Journal of Agricultural Research, Innovation and Technology (IJARIT)*, vol. 4, no. 2, pp. 82-86, Dec., 2014, DOI: 10.22004/ag.econ.305374.
- [10] M. Du, H. Li, and A. Roshanianfard, "Design and experimental study on an innovative UAV-LiDAR topographic mapping system for precision land levelling," *Drones*, vol. 6, no. 12, Dec., 2022, DOI: 10.3390/drones6120403.
- [11] Y. Zang, S. Meng, L. Hu, X. Luo, R. Zhao, P. Du, J. Jiao, H. Huang, and G. Chen, "Optimization design and experimental testing of a laser receiver for use in a laser levelling control system," *Electronics*, vol. 9, no. 3, Mar., 2020, DOI: 10.3390/electronics9030536.



최 현 수

2023 상명대학교 휴먼지능로봇공학과(학사)
2023~현재 한국로봇융합연구원 연구원

관심분야: 지능형로봇, 로봇제어



박 관 형

2020 한동대학교 기계제어공학과(학사)
2020~2024 한국로봇융합연구원 연구원
2024~현재 한국로봇융합연구원 주임연구원

관심분야: 웨어러블 로봇, 자동화 로봇, 기계 설계



강 민 수

2018 안동대학교 기계설계공학과(학사)
2020 안동대학교 기계설계공학과(석사)
2020~현재 한국로봇융합연구원 주임연구원
2022~현재 안동대학교 기계설계공학과
(박사과정)

관심분야: 로봇 설계, 로봇 해석, 농업용 로봇



권 태 희

2019 계명대학교 컴퓨터공학과(학사)
2023~현재 한국로봇융합연구원 연구원

관심분야: 농업용 로봇, 지능 제어



장 선 호

2020 강원대학교 제어계측공학과(학사)
2022 고려대학교 전기전자공학과(석사)
2022~현재 한국로봇융합연구원 주임연구원
2023~현재 고려대학교 전기전자공학과
(박사과정)

관심분야: 강화학습, 자율주행 시스템



김 화 남

1990 조선대학교 우주항공공학과(학사)
2000 전남대학교 기계공학과(석사)
2002~2004 중소기업진흥공단 CAD 센터장
2008 전남대학교 기계공학과(공학박사)
2009~2012 전남대학교 기계시스템사업단
(박사후 연구원)
2012~2015 지금강(주) 책임연구원
2016~현재 지금강(주) 연구소장

관심분야: 자동차, 농업용 로봇, 비전 검사



홍 형 길

2012 동국대학교 전기전자공학과(학사)
2014 동국대학교 전기전자공학과(석사)
2018 동국대학교 전기전자공학과(공학박사)
2017~2024 한국로봇융합연구원 선임연구원
2024~현재 한국로봇융합연구원 책임연구원

관심분야: 농업용 로봇, 영상 처리, 자동 제어, 딥러닝



조 용 준

2007 안동대학교 전자공학교육학과(학사)
2009 안동대학교 바이오전자공학과(석사)
2019 세종공업(주) 전장연구소 선임연구원
2019~2022 한국로봇융합연구원 선임연구원
2024 안동대학교 바이오ICT융합공학과
(공학박사)
2022~현재 한국로봇융합연구원 농업로봇자
동화연구센터 센터장

관심분야: 센서, 회로설계, 로봇제어, 농업용 로봇



윤 해 룡

2010 안동대학교 기계공학과(학사)
2012 안동대학교 기계공학과(석사)
2017 안동대학교 기계공학과(공학박사)
2017~2019 경북테크노파크 선임연구원
2019~2024 한국로봇융합연구원 선임연구원
2024~현재 한국로봇융합연구원 책임연구원

관심분야: 농업용 로봇, 기계 설계, 센서