

군집 자율주행 트랙터를 위한 가중치 보로노이 기반 작업 영역 분할 최적화: 시뮬레이션 연구

Optimization of Weighted Voronoi-based Workspace Partitioning for Fleet of Autonomous Tractors: A Simulation Study

김창조*¹, 손형일*²
(ChangJo Kim^{1,2} and Hyoung Il Son^{1,2,3*})

¹Department of Convergence Biosystems Engineering, Chonnam National University
²Interdisciplinary Program in IT-Bio Convergence System, Chonnam National University
³Research Center for Biological Cybernetics, Chonnam National University

Abstract: The automation of agricultural systems is essential for improving productivity and ensuring sustainable food production, and the introduction of autonomous tractors represents a significant advancement in agricultural automation. In this paper, we propose a method for optimizing workspace partitioning based on a weighted Voronoi diagram for fleet of autonomous tractors. The proposed method (1) acquires an image through UAV (Unmanned Aerial Vehicle) for the entire workspace and generates a node map for partitioning the workspace. (2) To calculate the center point of the workspace to be partitioned on the generated node map, the center point is calculated using the k -means clustering algorithm. (3) The workspace is differentially partitioned through the voronoi diagram algorithm and the performance-based weights for each tractor. (4) In order to minimize the deviation of task time, the workspace partitioning is optimized by adjusting the weights to reflect their relative importance. The proposed approach was validated through simulation. A comparison of the results before and after the optimization reveals a reduction in task time deviation. The results of the study indicate that optimized partitioning of the workspace can significantly enhance the operational efficiency of fleet of autonomous tractors, thereby improving agricultural productivity.

Keywords: agricultural robot, weighted voronoi diagram, optimization, workspace partitioning

I. 서론

농업 시스템의 자동화는 생산성을 향상시키고 지속 가능한 식량 생산을 보장하는데 필수적이며, 자율주행 트랙터의 도입은 농업 자동화를 한 단계 발전시키는 중요한 기술이다. 자율주행 트랙터 기술은 정밀한 작업 수행을 통해 농작업의 효율성을 극대화하고, 인력 부족 문제를 완화함으로써 농업 생산성을 증가시키는 결정적인 역할을 한다[1-3]. 특히 여러 대의 자율주행 트랙터들이 협업하는 군집 자율주행 트랙터 기술은 트랙터들 간의 협업을 통한 작업 영역 분담으로 농가의 생산성과 수확량을 증가시키는데 더 효율적인 농업 자동화 기술이다. 이러한 작업 협력을 위해 농업용 로봇 연구가 활발하게 수행되고 있다[4-6]. 또한 군집 제어를 위한 작업 할당, 경로 계획 및 협조 제어 등의 기술 등을 필요로 한다 [7,8]. 그 중 작업 할당 기술은 군집 트랙터 기술에서 가장 우선적이고 필요한 기술이다. 전체 작업에 대해서 서브 작업으로 나눠 군집 트랙터가 각각 작업을 할당 받아 작업 효율을 높일 수 있다.

그러나 군집 트랙터를 사용한 작업은 트랙터 간 성능 차이가 발생하며 이러한 성능 차이는 작업 효율성에 제한을 초래

한다. 예를 들어, 다른 상용화 제품을 구매하거나 동일 회사의 모델의 차이로 인해 각 트랙터의 성능의 차이가 발생하게 된다. 또한 모든 트랙터가 작업이 끝날 때까지 나머지 트랙터가 무의미한 대기 시간으로 인한 비효율적인 농작업을 수행한다. 이러한 문제를 해결하기 위해 각 트랙터에 적합한 작업 영역을 할당하는 차등 분할 연구가 필요하다.

이와 관련된 다중 로봇 작업 할당 연구들이 수행되고 있다. 보로노이 다이어그램(Voronoi diagram)은 어느 무작위 점이 중심점에 가장 가까운지에 따라 영역을 나눈다. 보로노이 다이어그램은 다중 로봇 경로 또는 작업 공간을 할당하는 데 일반적으로 사용되며, 이 주제에 대해 다양한 연구가 수행되었다[9-11]. 커버할 표면의 대략적인 근사치에 대한 제한된 중심 보로노이 테셀레이션(Voronoi tessellation)이 제안되었다 [12]. 이 접근 방식은 전역적으로 최적의 해와 거리가 먼 지역 최적에 간헐 확률을 크게 줄인다. 동시에 알고리즘이 수렴하는 데 필요한 측정과 계산의 반복 횟수도 더 낮다. 이러한 이점은 제한된 에너지를 가진 무인 항공기(unmanned aerial vehicle, UAV)가 사용되는 복잡한 환경에서 미션을 성공하는 데 중요할 수 있다. 표면 메쉬(mesh)에서 이산 보로노이 커버리지

* Corresponding Author

Manuscript received August 9, 2024; revised September 3, 2024; accepted September 19, 2024

김창조: 전남대학교 융합바이오시스템기계공학부 대학원생(ckdwh12@jnu.ac.kr, ORCID[®] 0009-0009-9325-1135)

손형일: 전남대학교 융합바이오시스템기계공학부 교수(hison@jnu.ac.kr, ORCID[®] 0000-0002-7249-907X)

※ 본 과제는 2024년도 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 지자체-대학 협력기반 지역혁신 사업(2021IRIS-002)과 정부(과학기술 정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. NRF-2023R1A2C1003701).

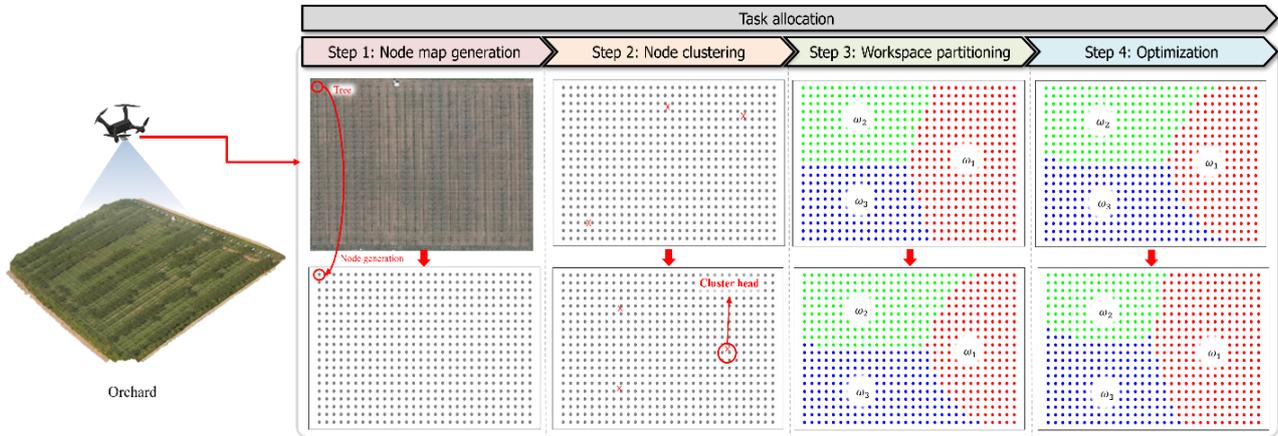


그림 1. 가중치 보로노이 기반 작업 영역 분할 최적화 흐름도.

Fig. 1. Flow chart of weighted voronoi based workspace partitioning optimization.

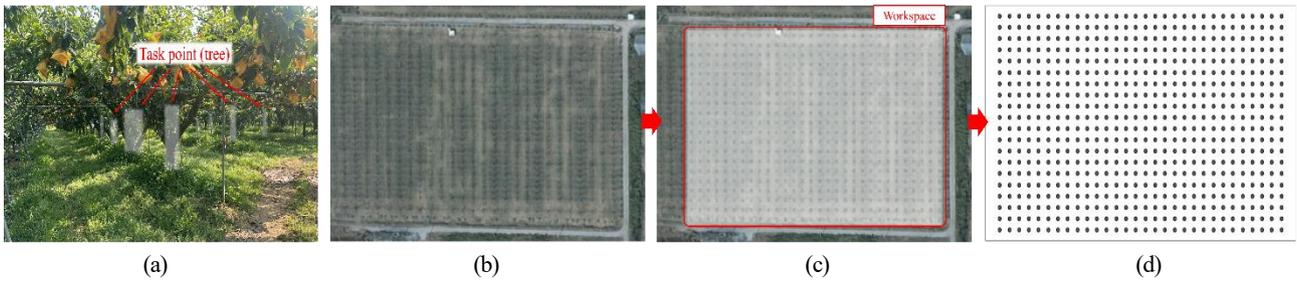


그림 2. 노드 맵 생성. (a) 과수원 환경. (b) 항공 이미지 획득. (c) 전체 작업 영역. (d) 노드 맵.

Fig. 2. Node map generation. (a) orchard environment. (b) acquiring an aerial image. (c) entire workspace. (d) node map.

(voronoi coverage)를 달성하는 네트워크 로봇 그룹에 대한 커버리지 제어 알고리즘이 제시되었다[13]. 이 알고리즘은 전체 보로노이 구성의 비용을 최소화하기 위해 메쉬 셀(mesh cell)로 보로노이 영역을 근사화하고 셀을 인접 영역에 로컬로 재할당한다. 실험 결과는 수렴 속도, 차선의 로컬 최소값, 최종 구성 비용 및 초기 구성과 같은 척도를 나타내었다. 보로노이 기반 방법을 사용하여 알려지지 않은 환경에서 통신 제한이 있는 다중 로봇 정보 경로 계획(multi-robot informative path planning, MIPP) 문제를 해결하는 접근 방식이 제안되었다[14]. 이 접근 방식은 더 나은 균형 하중을 위해 로봇 간의 영역을 분리하고 불필요한 정보 획득을 최소화하는 것을 목표로 한다. 로봇 세트가 서로의 통신 범위에 도달할 때마다 더 나은 균형 하중을 위해 보로노이 영역을 다시 분할한다.

이러한 보로노이 다이어그램을 이용한 작업 영역 할당 연구가 수행되었지만 다양한 성능 및 상태의 로봇에 대한 최적의 작업 영역 할당 연구는 수행되지 않았다. 이전 연구에서도 동질적이고 이질적인 농업용 다중 로봇 시스템(multi-robot system, MRS)을 위한 작업 할당에 대한 다중 로봇 작업 할당(multi-robot task allocation, MRTA) 시스템을 설계했다[15,16]. 그러나 여전히 다중 로봇의 영역 분할이 최적화되거나 균형을 이루지 못한다는 한계가 있다.

본 논문에서는 군집 자율주행 트랙터를 위한 가중치 보로노이 기반 작업 영역 분할 최적화를 제안한다. 제안된 방법은 각 로봇의 성능 및 상태가 작업 시간에 미치는 영향을 고려하여 작업 영역 분할을 최적화한다. 이러한 작업 영역 분할 최적화는 각 로봇 작업 시간의 편차를 최소화하여 전반적인

작업 효율성을 극대화한다. 제안된 알고리즘의 성능은 과수원 환경 기반으로 시뮬레이션을 통해 평가된다.

II. 가중치 보로노이 기반 작업 영역 분할 최적화

다음은 본 논문에서 제안하는 군집 자율주행 트랙터를 위한 가중치 보로노이 기반 작업 영역 분할 최적화의 구체적인 절차를 설명한다. 해당 절차의 흐름도는 그림 1에 나타내었으며, 크게 4단계로 구성된다. 각 단계의 세부 내용은 다음과 같다.

1. 노드 맵 생성

노드 맵 생성 단계는 다중 로봇에 작업 영역을 할당하기 위해 중요한 사전 단계이다. 이 단계는 농업 환경의 작업 영역 분할 최적화를 위한 중요한 데이터 구조를 가능하게 한다. 그림 2(a)에 제시된 과수원 환경을 바탕으로, 작업 지점을 개별 노드로 정의하고 생성한다. 이 노드들은 과수원 내에서 작업할 지점, 과수 나무를 나타낸다. 그림 2(b), (c), (d)는 노드 맵 생성 절차를 나타내었다. 노드를 생성하기 위해 UAV를 사용하여 농업 환경의 항공 이미지를 얻는다. 항공 이미지를 얻은 후 작업할 전체 작업 영역 R 을 설정하고 각 작업 지점을 노드로 생성하여 노드 맵을 생성한다.

2. 노드 클러스터링

작업 영역 분할을 위한 두 번째 단계는 노드 클러스터링 단계이다. 보로노이 다이어그램을 사용하여 영역 분할하기 위해서 노드의 중심점이 필요하다. 이 단계에서는 전체 작업 영역에 대해서 k 개의 로봇에 할당하기 위한 영역의 중심을

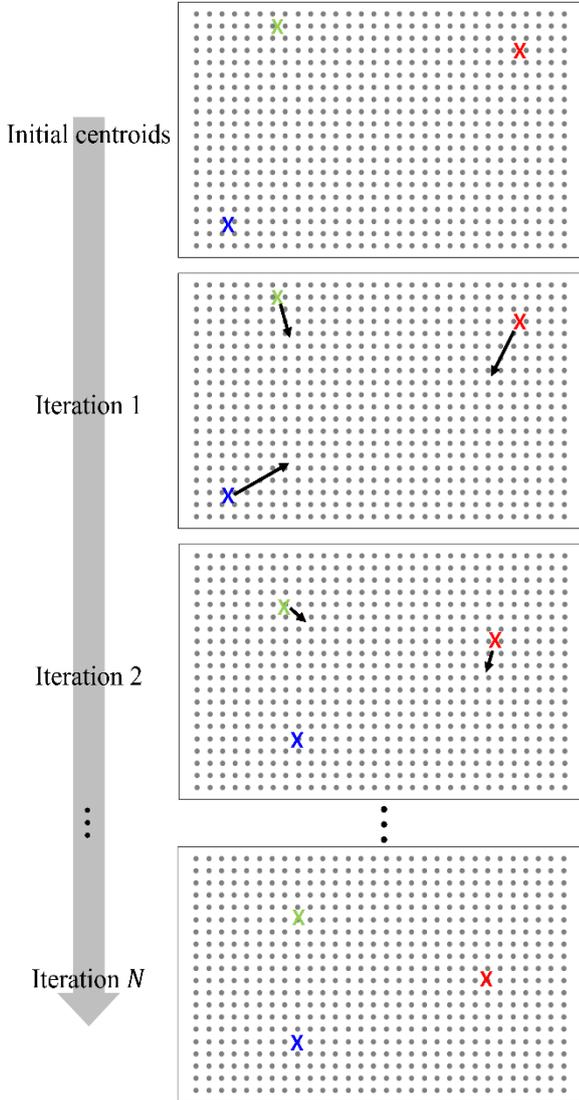


그림 3. k -means 알고리즘 이용한 노드 클러스터링.
Fig. 3. Node clustering using k -means algorithm.

산한다. k -means 클러스터링 알고리즘은 단순성 때문에 최근 수십년 동안 연구되어 온 잘 알려진 클러스터링 방법이다 [17]. $R = \{x_i\}, (i = 1, 2, \dots, n)$ 점들의 집합에서 $C = \{c_j\}, (j = 1, 2, \dots, k)$ 인 군집의 집합으로 분할한다. 여기서 μ_j 는 군집 c_j 의 중심점이다. k -means 알고리즘의 목적은 모든 k 개의 군집에 대한 오차 제곱의 합을 최소화하는 것이다. x_i 와 μ_j 내부의 점들 사이의 오차 제곱은 식 (1)을 사용하여 결정한다. k -means 클러스터링 접근 방식은 수집된 데이터를 k 개의 데이터 그룹으로 분할하는 것을 포함한다.

$$SE(C) = \sum_{j=1}^k \sum_{x_i \in c_j} \|x_i - \mu_j\|^2 \quad (1)$$

여기서 k 는 농업 작업에 필요한 다중 로봇의 수로 정의된다. k -means 클러스터링 알고리즘은 4개의 상태로 구성된 일련의 과정이며, 그림 3에서 나타내었다. 첫째, 무작위의 초기 중심점 μ_j^1 , 즉 클러스터 헤드(cluster head)를 결정한다. 둘째, 모든 노드는 가장 가까운 클러스터 헤드에 할당한다. 셋째, 각 클러스터 헤드에 할당된 노드들의 무게중심 값으로 새로

운 클러스터 헤드의 위치를 계산한다. 마지막으로, 어느 클러스터 헤드에도 변화가 없을 때까지 식 (2)와 같이 N 번 반복한다.

$$\mu_j^{(N+1)} = \frac{1}{|c_j^{(N)}|} \sum_{x_i \in c_j^{(N)}} x_i \quad (2)$$

이러한 k -means 클러스터링 접근 방식은 수집된 데이터를 k 개의 데이터 그룹으로 분할하는 것을 포함한다. 생성된 노드들을 대상으로 k -means 클러스터링 알고리즘을 적용하여 전체 작업 영역 R 에서 k 개의 클러스터 헤드를 결정한다. 이러한 클러스터 헤드들은 분할할 영역의 중심으로 활용한다.

3. 작업 영역 분할

결정된 클러스터 헤드를 기반으로 보로노이 다이어그램 알고리즘을 사용하여 전체 영역을 k 개의 작업 영역으로 분할한다. 보로노이는 그림 4(a)처럼 R 공간의 각 점을 가장 가까운 지점, 클러스터 헤드와 연관시킬 때 근접성 규칙을 가정한 기하학적 구조이다[18]. 보로노이 다이어그램은 평면 공간의 각 지점 속에 속하는 점에 따라 공간을 분할하는 알고리즘이다. 작업 공간 R 의 작업 지점 g_i 를 $X_i = (x_i, y_i)$ 로 표시한다고 가정한다. 또한, p 를 $X = (x, y)$ 로 표기한 평면상 임의의 위치라고 가정한다. $G = (g_1, g_2, \dots, g_k)$ 를 평면상의 겹치지 않는 영역의 집합으로 정의하고, $d(p, g)$ 를 식 (3)으로 정의한 바와 같이 점 p 와 g_i 사이의 유클리드 거리로 정의한다.

$$d(p, g_i) = \|X - X_i\| \quad (3)$$

여기서, 점 p 는 g_i 영역 안에 존재하는 점이고, 보로노이 다이어그램 영역 $V(g_i)$ 은 다음과 같이 식 (4)로 정의한다.

$$V(g_i) = \{d(p, g_i) \leq d(p, g_j), \forall j \neq i\} \quad (4)$$

그리고 로봇의 성능 및 상태를 반영하여 작업 영역을 분할하기 위해 각 로봇에 대한 가중치 ω_i 를 점 사이의 거리에 양의 가중치를 나누어 계산한다. 로봇 r_i 의 가중치 ω_i 는 식 (5)로 정의한다.

$$\omega_i = \sigma \omega_i^d + \varphi \omega_i^{mv} + \zeta \omega_i^c \quad (5)$$

여기서, 가중치는 트랙터의 3가지 성능인, 작업 시작 지점까지의 거리 ω_i^d , 트랙터의 이동 속도 ω_i^{mv} , 트랙터의 배터리 용량 ω_i^c 을 고려하여 계산한다. 3가지 성능 및 상태는 다음과 같은 식 (6), (7), 그리고 (8)로 정의한다.

$$\omega_i^d = 1 - \left(\frac{d_i}{\sum_{i=1}^k d_i} \right), \quad (6)$$

$$\omega_i^{mv} = \frac{mv_i}{\sum_{i=1}^k mv_i}, \quad (7)$$

$$\omega_i^c = \frac{c_i}{\sum_{i=1}^k c_i} \quad (8)$$

여기서, d_i 는 로봇의 초기 위치에서 작업 시작 지점까지의 거리를 나타낸다. mv_i 는 로봇의 최대 속도를 나타내며, c_i 는 로봇의 연료 또는 배터리의 용량을 나타낸다. 이러한 가중치를 적용하여 계산하기 위한 가중 거리는 다음과 같이 식 (9)로 정의한다.

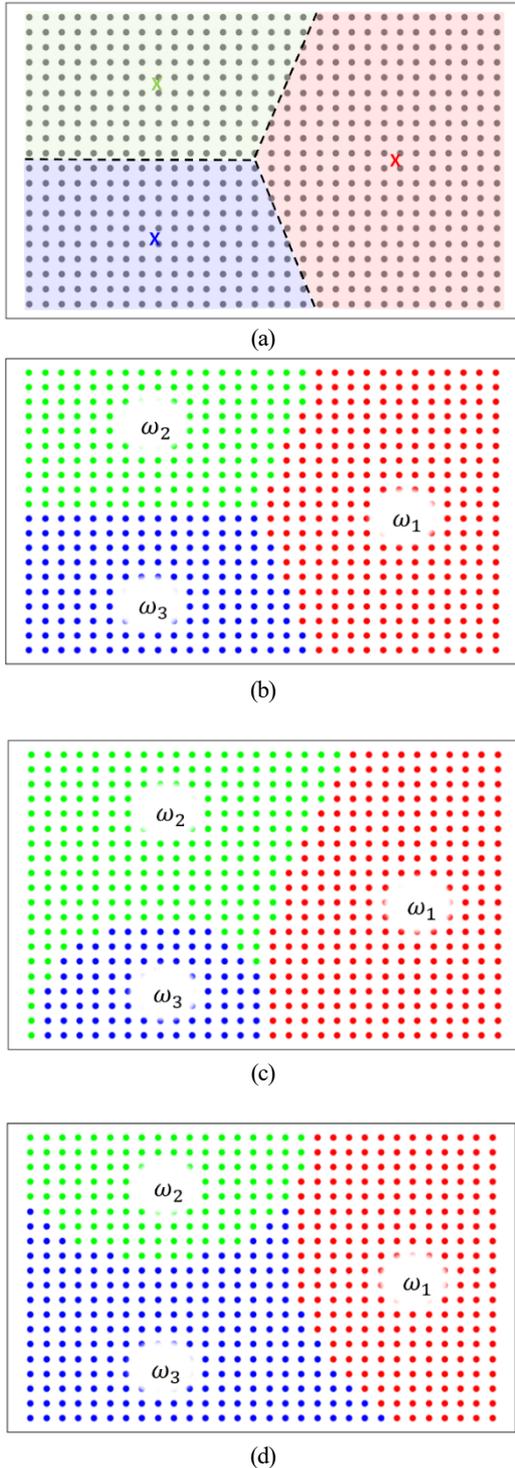


그림 4. 가중치 보로노이 기반 작업 영역 분할. (a) 보로노이 기반 영역 분할. (b) $\omega_1 : \omega_2 : \omega_3 = 1 : 1 : 1$. (c) $\omega_1 : \omega_2 : \omega_3 = 1.25 : 1.6 : 0.85$. (d) $\omega_1 : \omega_2 : \omega_3 = 1 : 1 : 1.6$.

Fig. 4. Weighted voronoi-based workspace partitioning. (a) voronoi-based area partitioning. (b) $\omega_1 : \omega_2 : \omega_3 = 1 : 1 : 1$. (c) $\omega_1 : \omega_2 : \omega_3 = 1.25 : 1.6 : 0.85$. (d) $\omega_1 : \omega_2 : \omega_3 = 1 : 1 : 1.6$.

$$d_W(p, g_i) = \frac{1}{\omega_i} \|X - X_i\|, \omega_i > 0 \quad (9)$$

따라서, 가중치 보로노이 다이어그램 $V_W(g_i)$ 은 다음과 같이 식 (10)으로 정의한다.

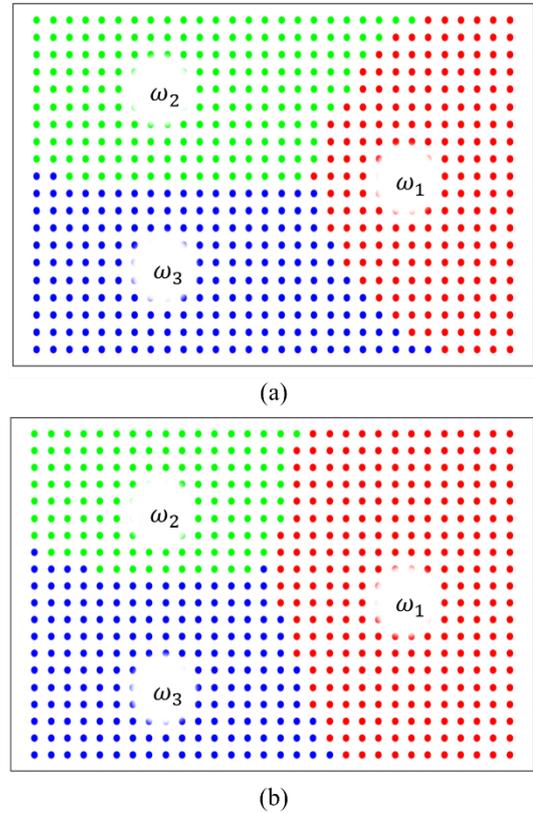


그림 5. 작업 영역 분할 최적화. (a) 최적화되지 않은 작업 영역. (b) 최적화된 작업 영역.

Fig. 5. Workspace partitioning optimization. (a) non-optimized workspace. (b) optimized workspace.

$$V_W(g_i) = \{d_W(p, g_i) \leq d_W(p, g_j), \forall j \neq i\} \quad (10)$$

그림 4(b)에서 동일한 로봇, 즉 가중치가 동일할 때 작업 영역 분할을 나타낸다. 또한, 그림 4(c), (d)는 가중치가 각각 다른 이중 로봇에 대한 작업 영역 분할을 나타낸다. 이러한 분할을 통해 성능 및 상태가 다른 이중 로봇에 대한 효율적인 작업을 수행할 수 있다.

4. 최적화

해당 단계에서 적합한 작업 영역 분할을 위한 최적화된 이득 계수를 찾는 단계이다. 이전 단계에서의 트랙터의 성능들은 농업 작업에 동일한 영향을 주었을 때, 즉 이득 계수가 동일할 때 작업 영역 분할을 수행한다. 하지만 트랙터의 성능은 작업 시간에 동일한 영향을 주지 않는다. 효율적인 작업 영역 할당을 위해 트랙터의 성능에 대한 중요도를 반영하여 작업 시간을 동일시한다. 이 단계에서는 세 가지 주요 성능의 중요도를 조절하는 이득 계수 (σ, φ, ζ)의 최적 값을 도출한다.

작업 시간 T_i 를 동일시키기 위해서 작업 시간의 편차 s_d 를 최소화해야 하며, T_i 를 기반으로 한 목적 함수는 식 (11)로 다음과 같이 정의한다.

$$s_d = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k (T_i - \bar{T})^2}{k}} \quad (11)$$

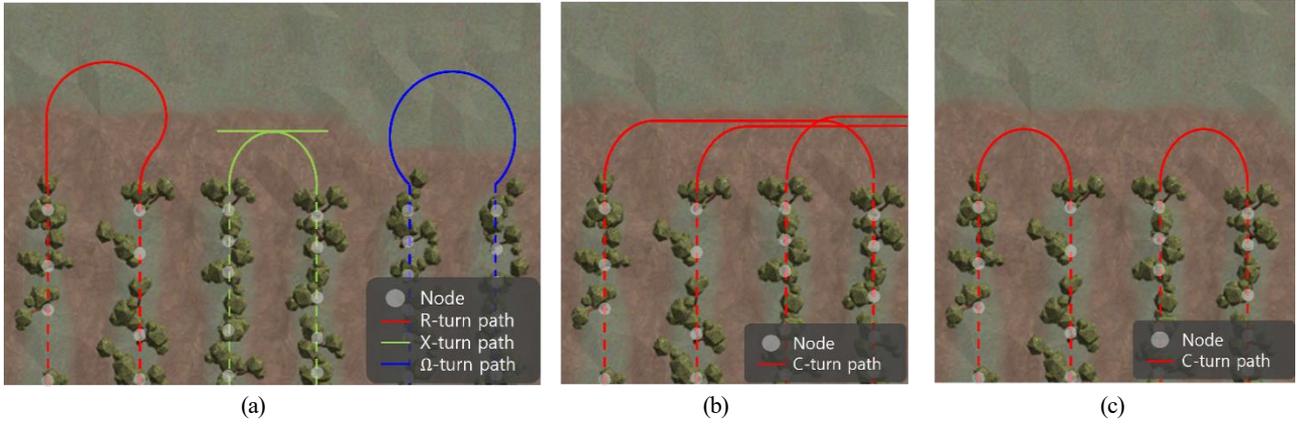


그림 6. 트랙터의 헤드랜드 패턴. (a) 원웨이 (R, X, 그리고 Ω -type). (b) 게더링 (C-type). (c) Ω 타입에서 단순화된 C 타입.
Fig. 6. The headland patterns of tractors. (a) one-way (R, X, and Ω). (b) gathering (C). (c) C-type simplified from Ω -type.

여기서, \bar{T} 는 모든 로봇의 작업 시간 평균을 나타내며, 식 (12)로 정의한다.

$$\bar{T} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k T_i \quad (12)$$

s_d 를 최소화하는 최적의 이득 계수 g_c 는 식 (13)를 통해 계산한다.

$$g_c = \operatorname{argmin} s_d \quad (13)$$

여기서 T_i 는 i 번째 로봇의 작업 시간을 나타내며, T_i 는 다음과 같이 식 (14)로 정의한다.

$$T_i = T_{w_i} + \left(\frac{1}{e_i \times \zeta \omega_i^f} \right) T_c + (\sigma \omega_i^d \times \varphi \omega_i^{mv}) \quad (14)$$

여기서 T_{w_i} 는 노드에 대한 로봇의 작업 시간을 나타내며, e_i 는 로봇의 연료 또는 배터리 소모율을 나타내고, T_c 는 로봇의 연료 또는 배터리 충전 시간을 나타낸다.

최적화되지 않은 작업 영역과 최적화된 작업 영역은 그림 5(a), (b)에 나타내었다. 최적화된 작업 영역은 작업 시간을 최소화하기 위해 성능이 좋은 로봇에게 많은 작업 영역을, 성능이 안 좋은 로봇에게 적은 작업 영역 할당을 나타낸다. 이러한 최적화 작업 영역 분할을 통해 효율적인 농작업을 수행할 수 있다.

III. 경로 계획

제안한 알고리즘에 대한 평가를 하기 위해 각 로봇이 실제 트랙터가 작업하는 경로를 통해 농업 작업을 수행하는 시나리오를 계획한다. 로봇에게 하위 영역이 할당된 후 할당된 영역 내에서 농업 작업에 대한 경로 계획이 적용된다. 경로를 계획하기 위해 로봇이 노드를 따르도록 미리 결정된 노드 위치를 통해 경로가 계산된다. 일반적인 트랙터의 경로는 2가지 다른 헤드랜드(headland) 패턴 즉, 원웨이(one-way), 게더링(gathering) 패턴이 있으며, 그림 6(a), (b)에 나타내었다[19]. 트랙터가 다른 작업 라인으로 이동하기 위한 회전 패턴이다. 내부 필드 경계의 한 경계에서 순차적으로 일련의 평행 트랙을 따라 모든 평행 트랙을 회전하는 원웨이 방식에는 기계운동학적 제한에 따라 R, X, Ω 타입의 회전 패턴이 있다. 트랙

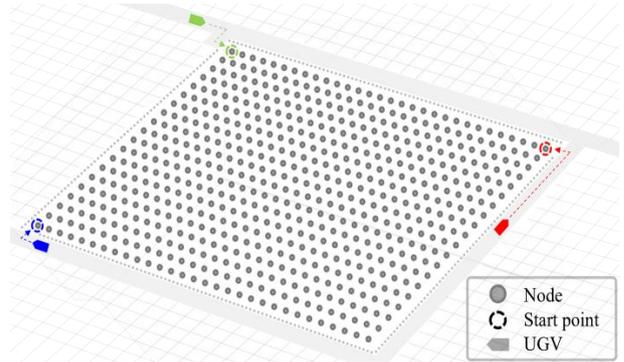


그림 7. 시뮬레이션 환경

Fig. 7. Simulation environment.

터가 필드 폭의 약 절반에서 서로 평행하게 위치한 트랙을 재귀적으로 회전하는 게더링 방식에는 C 타입 회전 패턴이 있다. 환경과 상황에 맞춰 적합한 패턴을 적용하여 트랙터의 농업 작업을 수행한다.

본 연구에서는 작업 시간 최소화를 고려하여 그림 6(c)에서 나타낸 단순한 경로를 이용하는 원웨이 방식의 Ω 타입을 단순화하여 C 타입의 회전 패턴을 적용하여 경로 계획하고 주행을 수행한다.

IV. 시뮬레이션 및 결과

1. 시뮬레이션 환경

제안된 알고리즘이 최적화된 작업 영역에 대해서 실제 작업 시간에 대한 성능 검증은 필수적이다. 이러한 검증은 실제 야외 환경에서 실제 트랙터 주행을 통해 검증되어야 한다. 그러나 제안한 알고리즘의 안정성을 검증한 후, 이를 실제 환경 및 트랙터에 적용할 필요가 있다. 실제 환경에서 적용하여 평가하기 어렵기 때문에 시뮬레이션 기반의 검증을 수행한다.

시뮬레이션 환경은 그림 7에서 나타내었다. 시뮬레이션은 그림 8과 같이 전남대 학교 나주 봉황농장의 과수원 이미지를 기반으로 제안한 알고리즘을 적용하고 경로 계획하여 수행한다. 서로 다른 성능을 가진 3대의 로봇 (r_1, r_2, r_3)은 작업 시작 지점에서 일정 거리 떨어진 위치에 대기한 후 시뮬

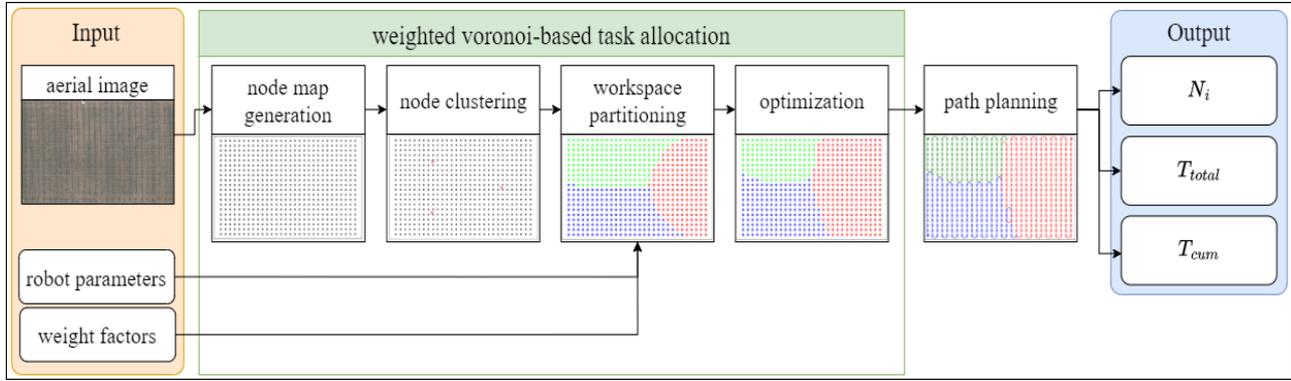


그림 8. 시뮬레이션 흐름도.

Fig. 8. Flow chart of simulation.

표 1. 최적화에 사용된 파라미터.

Table 1. Parameters used for optimization.

Robot	ω_i^d	ω_i^{mv}	ω_i^c	T_{w_i}	e_i	T_c
r_1	0.30	0.45	0.14	8	0.09	60
r_2	0.76	0.22	0.52	12	0.12	
r_3	0.96	0.33	0.34	10	0.10	

표 2. 최적 이득 계수 및 가중치.

Table 2. The optimal gain coefficients and weights.

	σ	φ	ζ	ω_1	ω_2	ω_3
Non-optimized	0.33	0.33	0.33	0.30	0.50	0.53
Optimized	0.19	0.78	0.03	0.41	0.33	0.44

표 3. 시뮬레이션 결과.

Table 3. Simulation result.

	Non-optimized		Optimized	
	N_i	T_i (s)	N_i	T_i (s)
r_1	200	2,003.21	274	2,733.92
r_2	195	4,045.27	136	2,843.56
r_3	205	2,957.84	190	2,727.84

레이션을 수행한다. 알고리즘 최적화에 사용된 파라미터는 표 1에서 보는 바와 같이 설정하여 수행한다.

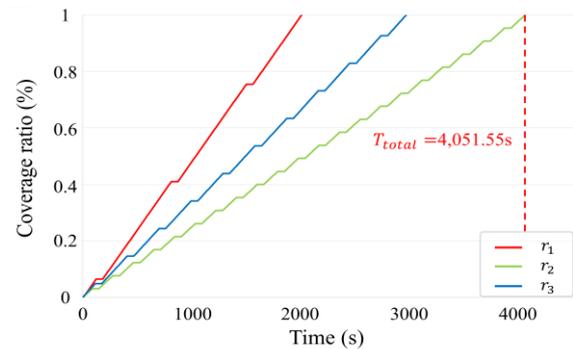
2. 평가 지표

제안된 시스템을 평가하기 위해 i 번째 로봇에 할당된 노드 수 N_i , 전체 작업 시간 T_{total} , 누적 작업 시간 T_{cum} 을 이용해 평가한다. N_i 를 통해 각 로봇의 성능에 맞게 작업이 분배됨을 확인한다. T_{total} 은 전체 작업 영역에 모든 작업이 완료됨을 확인한다. 이는 다음과 같은 식 (15)로 정의한다.

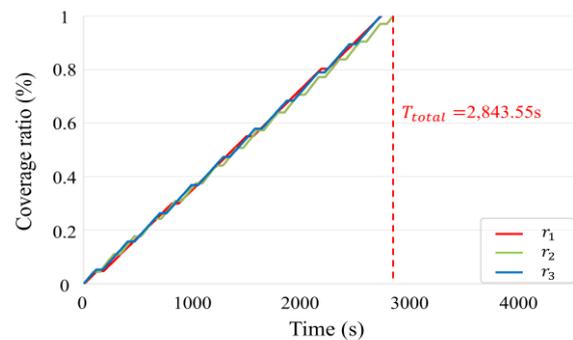
$$T_{total} = \max\{T_1, T_2, \dots, T_i\} \quad (15)$$

또한, T_{cum} 은 모든 T_i 의 합을 통해 T_i 및 s_d 를 비교하여 작업 영역이 잘 분배됨을 확인한다. 이는 다음과 같이 식 (16)로 정의한다.

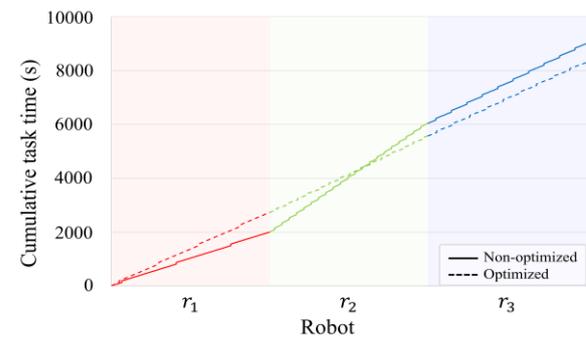
$$T_{cum} = \sum_{i=1}^k T_i \quad (16)$$



(a)



(b)



(c)

그림 9. 시뮬레이션 결과. (a) 최적화되지 않은 전체 작업 시간. (b) 최적화된 전체 작업 시간. (c) 누적 작업 시간.

Fig. 9. Simulation result. (a) non-optimized total task time. (b) optimized total task time. (c) cumulative task time.

3. 시뮬레이션 결과 및 고찰

표 1을 통한 최적화 결과는 표 2에 나타내었다. 최적화된 이득 계수를 통해 연료 및 배터리의 중요도가 가장 낮았다. 이는 해당 성능이 작업 시간에 많은 영향을 주지 않았음을 의미하며, 가장 높은 ϕ 값을 통해 로봇의 속도가 T_i 에 가장 많은 영향을 주고 있음을 의미한다. 이를 통한 시뮬레이션 결과는 다음과 같다.

표 3에서 나타나 있듯이 동일한 환경에서 다른 성능 및 상태에 따른 작업 영역 분할 최적화되지 않은 경우와 최적화된 경우의 s_d 는 각각 836.87과 53.18로, 최적화된 경우의 s_d 가 크게 감소하였음을 나타내었다. r_1 은 가장 높은 성능을 가지고 있으며, 가장 많은 노드를 할당 받았다. 반대로 r_2 는 가장 낮은 성능을 가지고 있으며 그에 따라 가장 적은 노드를 할당 받았다. 시뮬레이션의 T_{total} , T_{cum} 은 그림 9에 나타내었다. 그림 9(a), (b)에서 최적화되지 않은 경우와 최적화된 경우의 T_{total} 는 각각 4,045.27s, 2,843.56s로 최적화되었을 때 T_{total} 이 크게 감소하였음을 나타내었다. 그림 9(c)에서 최적화되지 않았을 때와 최적화되었을 때의 T_{cum} 는 9,006.32s, 8,305.32s로, 최적화된 경우 전체적인 작업 시간이 감소하였음을 나타내었다. 또한, 최적화된 경우, T_{cum} 그래프의 기울기는 최적화되지 않은 경우보다 일정함을 보여주었다. 이는 s_d 가 감소하고 각 로봇에 적합한 작업 영역이 할당되었음을 의미한다.

해당 결과는 할당된 노드 수의 차이는 증가하였지만 작업 시간의 차이는 많이 감소하였음을 나타내었다. 할당된 노드 수 차이에 비해 작업 시간의 차이는 크지 않기 때문에 제안된 방법의 효율성을 확인하였다. 작업 영역을 차등 분할하였음에도 최적화되지 않았을 때, 로봇들의 작업이 전부 끝날 때까지 무의미하게 긴 시간을 대기하여 다음 작업을 수행하는 비효율적인 농작업을 수행하였음을 나타내었다. 제안된 방법을 통해 최적화된 경우 s_d 가 감소함에 따라 무의미한 대기 시간을 줄여 빠르게 다음 작업을 수행할 수 있음을 나타내었다.

하지만 본 실험에서 수행한 경로 계획은 실제 과수원 환경에서 적용하는 데 어려움이 있다. 이는 과수원 환경의 특성을 고려하지 않았으며, 농업 작업(수확, 방제, 운송 등)에 따라 경로가 달라질 수 있기 때문이다. 추후 로봇 시뮬레이터와 현장 평가에서는 실제 환경에 적용 가능하고 농업 작업을 고려한 경로 계획이 필요하다.

V. 결론

본 연구에서는 군집 자율주행 트랙터를 위한 가중치 보로노이 기반 작업 영역 분할의 최적화 방법을 제안하였다. 제안된 방법은 로봇의 성능 및 상태에 대한 중요도를 반영, 최적의 가중치를 도출함으로써 각 로봇의 작업 영역을 효율적으로 할당한다. 제안된 방법은 시뮬레이션 기반의 모의 실험 연구를 통해 적용 확장성과 작업 효율성이 검증되었다.

제안된 방법의 성능은 과수원 기반의 시뮬레이션 환경에서 성능 평가되었다. 이를 위해 3대의 로봇 성능 및 상태 파라미터를 설정하였다. 성능 평가는 할당된 노드 수, 전체 작업 시간, 그리고 누적 작업 시간을 기준으로 이루어졌으며,

최적화되지 않은 경우와 최적화된 경우를 비교하여 제안된 방법의 성능을 평가하였다.

본 연구 결과를 통해 작업 시간을 동일시하여 무의미한 대기 시간을 줄이고 더 많은 작업을 수행하는 더욱 효과적인 농작업을 수행할 수 있음을 확인하였다. 또한, 성능 및 상태에 따른 적합한 작업 영역 분할을 통해 보다 효율적인 작업 수행이 가능하며, 제한된 시간 내에 최대한 많은 작업을 수행할 수 있음을 확인하였다. 이러한 결과는 향후 다양한 모델로 구성된 로봇 및 트랙터 기반 군집 작업에 쉽게 적용 가능하며, 효율적인 작업 수행이 가능할 것으로 기대한다.

REFERENCES

- [1] S. Xu and R. Rai, "Vision-based autonomous navigation stack for tractors operating in peach orchards," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 217, pp. 108558, 2024. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.108558>
- [2] J. Lowenberg-DeBoer, K. Franklin, K. Behrendt, and R. Godwin, "Economics of autonomous equipment for arable farms," *Precision agriculture*, vol.22, pp. 1992-2006, 2021. doi: <https://doi.org/10.1007/s11119-021-09822-x>
- [3] S. Park, C. W. Jeon, and H. J. Kim, "Development of variable look-ahead distance tuning algorithm for autonomous tractor using a reinforcement learning approach," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 28, no. 11, pp. 964-972, 2022. doi: <https://doi.org/10.5302/J.ICROS.2022.22.0155>
- [4] S. Baek, B. Kim, J. Lee, and H. Moon, "Real-time path planning algorithm based on ridge detection for solid-state LiDAR-based autonomous agricultural robot," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 28, no. 2, pp. 146-152, 2022. doi: <https://doi.org/10.5302/J.ICROS.2022.21.0207>
- [5] C. Ju and H. I. Son, "Multiple UAV systems for agricultural applications: control, implementation, and evaluation," *Electronics*, vol. 7, no. 9, pp. 619, 2018. doi: <https://doi.org/10.3390/electronics7090162>
- [6] C. Ju, J. Kim, J. Seol, and H. I. Son, "A review on multirobot systems in agriculture," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 202, pp. 107336, 2022. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107336>
- [7] C. Ju and H. I. Son, "Modeling and control of heterogeneous agricultural field robots based on ramadge-wonham theory," *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 5, no. 1, pp. 48-55, 2020. doi: <https://doi.org/10.1109/LRA.2019.2941178>
- [8] O. Valero, J. Antich, A. Tauler-Rosselló, J. Guerrero, J. J. Miñana, and A. Ortiz, "Multi-robot task allocation methods: A fuzzy optimization approach," *Information Sciences*, vol. 648, pp. 119508, 2023. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ins.2023.119508>
- [9] J. Cortes, S. Martinez, T. Karatas, and F. Bullo, "Coverage control for mobile sensing networks," *IEEE Trans. Robot. Autom.*, vol. 20, no. 2, pp. 243-255, 2004. doi: <https://doi.org/10.1109/TRA.2004.824698>
- [10] J. G. M. Fu, T. Bandyopadhyay, and M. H. Ang, "Local Voronoi decomposition for multi-agent task allocation," *Proc. IEEE Int.*

Conf. Robot. Autom., pp. 1935-1940, 2009.

doi: <https://doi.org/10.1109/ROBOT.2009.5152829>

- [11] P. Dasgupta, A. Muñoz-Meléndez, and K. Guruprasad, "Multi-robot terrain coverage and task allocation for autonomous detection of landmines," *Proc. SPIE*, vol. 8359, 2012.
doi: <https://doi.org/10.1117/12.919461>
- [12] A. Renzaglia, J. Dibangoye, V. L. Doze, and O. Simon, "Multi-UAV visual coverage of partially known 3D surfaces: Voronoi-based initialization to improve local optimizers," arXiv: 1901.10272, 2019.
doi: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1901.10272>
- [13] A. Breitenmoser, J.-C. Metzger, R. Siegwart, and D. Rus, "Distributed coverage control on surfaces in 3D space," *Proc. IEEE/RSSJ Int. Conf. Intell. Robots Syst.*, pp. 5569-5576, 2010.
doi: <https://doi.org/10.1109/IROS.2010.5652851>
- [13] A. Dutta, A. Bhattacharya, O. P. Kreidl, A. Ghosh, and P. Dasgupta, "Multi-robot informative path planning in unknown environments through continuous region partitioning," *Proc. 32nd Int. Flairs Conf.*, pp. 1-4, 2019.
doi: <https://doi.org/10.1177/1729881420970461>
- [15] J. Kim and H. I. Son, "A voronoi diagram-based workspace partition for weak cooperation of multi-robot system in orchard," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 20676-20686, 2020.
doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2969449>
- [16] J. Kim, C. Ju, and H. I. Son, "A multiplicatively weighted voronoi-based workspace partition for heterogeneous seeding robots," *Electronics*, vol. 9, no. 11, pp. 1813, 2020.
doi: <https://doi.org/10.3390/electronics9111813>
- [17] K. Wagstaff, C. Cardie, S. Rogers, and S. Schrödl, "Constrained k-means clustering with background knowledge," *In Icm1*, vol. 1, pp. 577-584, 2019.
- [18] F. Aurenhammer, "Voronoi diagrams—a survey of a fundamental geometric data structure," *ACM Computing Surveys (CSUR)*, vol. 23, no. 3, pp. 345-405, 1991.
doi: <https://doi.org/10.1145/116873.116880>
- [19] C. W. Jeon, H. J. Kim, C. Yun, X. Han, and J. H. Kim, "Design and validation testing of a complete paddy field-coverage path planner for a fully autonomous tillage tractor," *Biosystems Engineering*, vol. 208, pp. 79-97, 2021.
doi: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2021.05.008>



김창조

2024년 전남대학교 지역·바이오시스템 공학과 (공학사). 2024~현재 전남대학교 융합바이오시스템기계공학과 석사과정 재학 중. 관심분야는 agricultural robot, field robotics, multi-robot systems, harvesting robot.



손형일

1998년 부산대학교 생산기계공학과(공학사). 2000년 부산대학교 지능기계공학과(공학석사). 2010년 KAIST 기계공학과(공학박사). 2003~2005년 LG전자 생산기술원 선임연구원. 2005~2009년 삼성전자 ITD센터 책임연구원. 2010년 일본 동경대학교 생산기술연구소 박사후 연구원. 2010~2012년 독일 막스플랑크연구소 박사후 연구원. 2012~2015년 삼성중공업 중앙연구소 수석연구원. 2015~현재 전남대학교 융합바이오시스템기계공학과 교수. 관심분야는 field robotics, hybrid systems, systems and synthetic biology.