

http://dx.doi.org/10.17703/JCCT.2021.7.2.345

JCCT 2021-5-41

다중 이동 로봇을 이용한 센서 네트워크의 충전

Charging of Sensor Network using Multiple Mobile Robots

문찬우*

Chanwoo Moon*

요약 넓은 지역에 설치되는 센서 네트워크 시스템은 유지 관리가 문제가 되어 왔으며, 이를 해결하기 위해 로봇을 사용하여 센서 네트워크에 에너지를 공급하려는 연구가 여러 연구자에 의해 수행되었다. 이 연구에서는 전력을 공급하는 노드들과 그 주변의 센서 노드들로 이루어진 센서 네트워크에 여러 대의 로봇을 사용하여 에너지를 공급하는 문제에서, 로봇이 최소 거리를 이동하도록 수정된 k-means 알고리즘을 사용하여 각 로봇이 작업할 영역을 분할하는 방법을 제안한다. 로봇의 에너지 전달률을 변수로 한 시뮬레이션 실험을 통해 분할된 각 영역의 센서 노드들이 동작을 유지할 수 있음을 보임으로써 제안한 수정 k-means 알고리즘의 타당성을 검증한다.

주요어 : 센서 네트워크, 유지 관리, 로봇 충전, 유지 조건, 수정 k-means 알고리즘

Abstract The maintenance of sensor networks, installed in a wide area has been an issue for a long time. In order to solve this problem, studies to supply energy to a sensor network using a robot has been carried out by several researchers. In this study, for a sensor network consisting of power nodes supplied with energy by multiple robots and sensor nodes around them, we propose a method of allocating a work area using a modified k-means algorithm so that the robots move the minimum distance. Through the simulation study using the energy transfer rate of the robot as a variable, it is shown that nodes of each allocated area can maintain survival, and the validity of the proposed modified k-means algorithm is verified.

Key words : Sensor network, Maintenance, Robot charge, Survival condition, Modified k-means algorithm

1. 서론

로봇 기술과 인공지능의 발달에 따라 산업 및 서비스 현장에서 인력을 대체하여 로봇이 투입되는 일이 많아지고 있다. 사용되는 로봇 대수 면에서는 로봇팔(Robot Arm) 형태의 제조업용 산업 로봇이 가장 큰 비중을 차지하지만, 물류, 경비, 건설, 농업 등 서비스 영역에 사용되는 비제조업용 로봇의 활용도 점진적으로

늘고 있다. 공장이나 건설현장과 같이 넓은 지역에 분산된 시설물의 유지 관리 업무도 로봇을 활용하기 적합한 분야이다. 철교의 유지보수를 위해 영상으로 이상 유무를 점검하는 로봇을 제안한 연구가 있었으며 [1], 건물의 유지보수[2], 건설현장의 관리[3] 등 다양한 분야에서 로봇을 적용한 사례가 발표되고 있다. 넓은 지역에 분산 설치되어있는 센서 네트워크의 유지 관리도 로봇과 자동화 시스템을 적용할 수 있는 분야이다. 무

*정회원, 국민대학교 전자공학부 교수 (교신저자)
접수일: 2021년 3월 14일, 수정완료일: 2021년 4월 15일
게재확정일: 2021년 4월 28일

Received: March 14, 2021 / Revised: April 15, 2021
Accepted: April 28, 2021
**Corresponding Author: mcwnt@kookmin.ac.kr
Dept. of Electrical Engineering, Kookmin Univ, Korea

선 센서 네트워크는 다수의 센서를 무선 네트워크로 연결한 것을 의미하며 산림 감시나 도심에서의 정보 수집, 산사태 감시, 제방 관리 등 영역 모니터링이 무선 센서 네트워크의 중요한 응용 분야이며, 침입 감시, 병사나 장비의 실시간 상태 파악과 같은 군사 분야에서도 활용되고 있다. 무선 센서는 동작을 유지하려면 에너지를 공급해 주어야 하는데 외부 전원이 공급되는 장소에 설치되거나 태양전지를 통해 에너지를 획득하는 센서 노드들도 있으나 많은 센서 노드는 내장된 배터리에 의해 동작한다. 절전설계로 배터리 소모를 최소화하더라도 일단 배터리가 고갈되었을 때는 배터리를 교환하여야 하는데, 넓은 지역에 분산된 센서 노드에 대해서 인력으로는 실행하기 어렵다. 또한, 배터리 교체를 로봇을 사용하여 자동화하기에는 메커니즘적으로 복잡해지는 문제점이 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해, 에너지 송신 코일을 장착한 이동 로봇이 경로를 따라 이동하면서 무선 전력전송을 통해 주변의 센서 노드에 에너지를 공급하는 방법이 연구되었다[4]. 그러나 많은 센서 네트워크에서 각 센서 노드의 위치가 정확히 파악되지 않는 경우가 많고 쉽게 접근하기 어려운 곳에 설치되는 경우가 있는데, 이의 해결방안으로 에너지를 전달하는 지향성 파워 베이스 스테이션을 사용하여 주변의 다수의 센서 노드에 에너지를 전달하는 형태의 센서 네트워크도 제시되었다[5]. 이 형태에서도 파워 베이스 스테이션이 외부 전원으로부터 에너지를 공급받지 못하는 경우 주기적으로 배터리를 교환해 주거나 외부에서 공급해 주어야 하지만 파워 베이스 스테이션의 위치를 제어할 수 있다는 장점이 있어 로봇을 이용한 충전 자동화에 유리하다. 선행논문[6]에서는 Powercast라는 상용제품을 파워 베이스 스테이션으로 사용하여 상대적으로 근거리에서 주변의 센서 노드들에 무선으로 전력을 전달하는 센서 네트워크를 대상으로, 로봇을 사용하여 널리 분포되어있는 여러 파워 베이스 스테이션에 전력을 공급하는 시스템의 동작 유지 조건을 규명하였다.

최근에는 여러 대의 로봇을 사용하여 물류, 탐색, 중량물의 이송 등의 작업을 수행하는 다중 로봇에 관한 연구가 활발한데, 로봇을 여러 대 사용하면 한 대의 로봇으로는 수행하기 어려운 복잡한 일을 수행할 수 있고 많은 일을 더 효율적으로 수행할 수 있다. 본 연구에서는 성능이 다른 여러 대의 로봇을 사용하여 파워 베이스 스테이션에 전력을 공급하는 문제에서 각 노드들이

동작을 유지할 수 있도록 로봇이 충전해야 할 영역을 할당하는 방법을 제안한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 충전 시스템의 구성과 센서 네트워크 유지 조건에 관해 기술하고 3장에서는 영역 할당 알고리즘, 그리고 4장에서는 수치 검증과 결과이며 마지막 5장은 결론이다.

II. 센서 네트워크 충전 시스템

1. 충전 시스템의 구성

그림 1은 지향성 파워 베이스 스테이션 (Power base station)과 이로부터 무선으로 에너지를 공급받는 주변의 센서 노드를 나타낸 것이다.

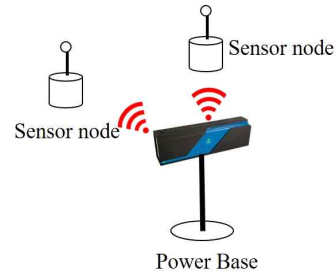


그림 1. 파워 베이스 스테이션과 센서 노드로 구성된 에너지 공급 시스템
Figure 1. Energy supply system consisting of power base station and sensor nodes

전체 센서 네트워크는 그림 2와 같이 여러 개의 파워 베이스 스테이션으로 이루어지고 각 파워 베이스 스테이션은 주변의 센서 노드에 에너지를 공급한다. 각 로봇에 담당 영역을 할당하면 로봇 베이스 (Robot base)에서 시작하여 할당된 지역에 위치하는 파워 베이스 스테이션들을 돌며 에너지를 공급한다. 이때 파워 베이스 스테이션을 최단 경로를 통해 방문한다고 가정한다. 충전을 마치고 로봇 베이스에 돌아온 로봇은 자신의 에너지를 충전하고 정비하게 된다.

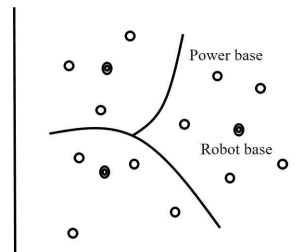


그림 2. 전체 네트워크 및 충전 지역 할당
Figure 2. Whole sensor network and Partitioning for charging

2. 센서 네트워크의 유지 조건

선행 연구[6]에서는 한 대의 로봇을 사용하여 파워 베이스 스테이션에 에너지를 공급하는 경우 센서 네트워크를 구성하는 파워 베이스가 에너지가 고갈되는 경우가 없이 동작을 유지할 수 있는 조건을 규명하였다. 여기서 기구적인 복잡성을 줄이기 위해 로봇은 무선 전력전송을 사용하여 에너지를 전송한다 [7]. 충전해야 하는 영역이 할당되고 로봇은 자기 영역에 속한 파워 베이스 스테이션만 충전한다고 하면 이 생존조건은 다중 로봇인 경우에도 적용된다. 이 논문에서 사용하는 표기는 표 1과 같다.

표 1. 모델링에 사용한 기호
 Table 1. Notations for the system modeling

Symbol	설명
ϵ_i	Power base i의 에너지 전송율, W
μ	로봇의 무선 에너지 전송율, W
η	에너지 전달 효율
ϵ	Power base들의 총 에너지 전송율, W
N	Power base의 수
τ_i	Power base i의 충전 시간
τ	Power base들의 총 충전 시간
d	로봇의 총 이동 거리
r	로봇의 이동 속도
T_{dock}	Power base의 인식 및 도킹 시간
T_{wait}	Robot base에서의 대기 시간
E_i	Power base i의 에너지 저장 용량

로봇이 자기 영역에 속하는 파워 베이스 스테이션을 충전하고 로봇 베이스에 돌아와 대기하는 한 주기는 다음과 같다[6].

$$T_{period} = \frac{d}{r} + NT_{dock} + \tau + T_{wait} \quad (1)$$

한 주기 동안 i 번째 파워 베이스 스테이션에서의 에너지 소모는 $\epsilon_i T_{period}$ 이고 전체 에너지 소모는 ϵT_{period} 이므로 로봇에 i 번째 파워 베이스 스테이션에 충전해 주어야 하는 에너지는 $\epsilon_i T_{period} / \eta$ 이며 전체로는 $\epsilon T_{period} / \eta$ 이다. 여기서 η 는 에너지 전달 효율로서, 무선 충전 효율과 배터리 효율의 곱으로 이루어진다[8]. 무선 충전을 하는 경우 단위 시간당 일정한 전력을 전달하는 모델[9]을 사용하면 각 베이스와 전체 베이스의 충전 시간은 다음과 같다.

$$\tau_i = \frac{\epsilon_i T_{period}}{\eta \mu} \quad (2)$$

$$\tau = \frac{\epsilon T_{period}}{\eta \mu} \quad (3)$$

(1)식과 (3)식에서 T_{period} 는 (4)식과 같이 구할 수 있다.

$$T_{period} = \frac{d/r + NT_{dock} + T_{wait}}{1 - \frac{\epsilon}{\eta \mu}} \quad (4)$$

각 파워 베이스 스테이션이 센서 노드에 에너지를 전송하고 다시 로봇에 의해 충전되는 한 주기 동안 에너지 소모와 충전된 에너지가 균형을 이루면 센서 네트워크가 생존을 유지하게 된다. 그런데 T_{period} 가 실현 가능한 값이어야 하므로 (5)식을 만족해야 한다.

$$T_{period} \geq \frac{d}{r} + NT_{dock} + T_{wait} \quad (5)$$

그리고 T_{period} 동안 방사할 에너지가 각 파워 베이스 스테이션의 배터리에 저장될 수 있어야 한다.

$$E_i \geq \epsilon_i T_{period} \quad (6)$$

따라서 (5)와 (6)식을 동시에 만족하면 센서 네트워크가 유지된다.

III. 충전 작업 영역 할당

여러 대의 로봇을 사용하여 파워 베이스 스테이션을 충전하는 경우 로봇의 이동 거리를 최소화하기 위해서는 작업 영역을 나누어 작업해야 한다. 이 논문에서는 수정된 k-means 알고리즘 (modified k-means algorithm)을 사용하여 영역을 분할한다. k-means 알고리즘은 데이터를 k개의 클러스터로 분류하는 데 사용되는 알고리즘이다 [10]. 로봇의 대수를 k이라고 하면 k개의 그룹으로 파워 베이스 스테이션을 나누되, 각 영역은 로봇에 의해 공급받는 에너지로 네트워크가 유지되어야 하므로 제한 조건이 있는 k-means 알고리즘으로 수정하여 사용한다. 영역 할당에 사용하는 기호는 다음과 같다. 파워 베이스 스테이션의 위치 $x = (x_1, x_2, \dots, x_N)$, 클러스터의 중심 m_j , 파워 베이스 스테이션 클러스터 c_j , 단, 여기서 $1 \leq j \leq k$ 이다. 파워 베이스 스테이션은 평면상에 위치하기 때문에 일반적인 k-mean 알고리즘과 달리 초기 중심 m_j 를 임의의 위치가 아닌 적절히 배분된 위치로 직접 선정한다. 그

러면 p 번째 스텝에서 각 클러스터는 다음과 같이 구한다.

$$c_j^{(p)} = \left\{ x_q : \left\| x_q - m_j^{(p)} \right\|^2 \leq \left\| x_q - m_i^{(p)} \right\|^2, \right. \\ \left. c_j^{(p)} \text{ satisfies (5) and (6)} \right\} \quad (7)$$

$$m_j^{(p+1)} = \frac{1}{|c_j^{(p)}|} \sum_{x_q \in c_j^{(p)}} x_q \quad (8)$$

m_j 에 변화가 없을 때까지 (7), (8) 반복

IV. 수치 검증 및 결과

1. 작업 영역 할당 및 생존 조건 검증

수치 검증에서는 30개의 노드를 3대의 로봇을 사용하여, 제안된 할당 방법으로 영역을 나누어 충전하는 상황을 가정하고 로봇의 충전 능력인 로봇의 무선 에너지 전송률 μ 를 변수로 하여 각 영역의 노드들이 동작을 유지할 수 있는지 확인한다. 수치 검증에는 표 2와 같이 두 세트의 로봇을 사용하고 기타 로봇 파라미터는 표 3과 같이 설정한다.

표 2. 로봇 세트별 에너지 전송률

Table 2. Energy transmission rate for each robot set

	Robot 1	Robot 2	Robot 3
Set 1: μ	15 W/sec	20 W/sec	25 W/sec
Set 2: μ	5 W/sec	20 W/sec	25 W/sec

표 3. 로봇 파라미터

Table 3. Robot parameters

PARM.	Value	PARM.	Value
η	0.6	r	2 m/s
T_{wait}	30 min	T_{dock}	30 sec
E_i	30 Kjoule		

파워 베이스 스테이션의 위치는 그림 3과 같다. 표 2의 로봇 세트 1을 대상으로 제안된 수정된 k-means 알고리즘을 사용하여 영역을 나눈 경우 (Case 1) 각 로봇이 담당할 영역은 그림 4와 같다.

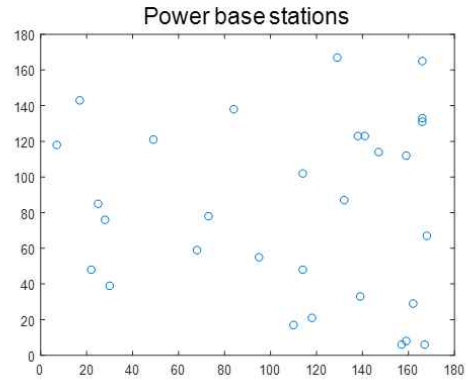


그림 3. 파워 베이스 스테이션의 위치

Figure 3. Positions of the power base stations

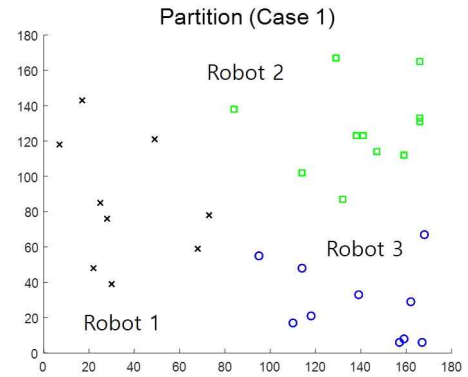


그림 4. 영역 할당 결과 (Case 1)

Figure 4. Area allocation result (Case 1)

다음은 시뮬레이션 검증으로, 그림 5는 담당 영역의 파워 베이스 스테이션을 로봇이 최단 거리로 이동하며 충전할 때, 각 충전 사이클이 반복되는 동안 동작을 유지하는 파워 베이스 스테이션의 수를 그래프로 나타낸 것이다. Partition 1,2,3 은 각각 로봇 1,2,3 ($\mu = 15, 20, 25$)이 담당하는 영역을 의미하며, 각 영역에서 노드들이 동작을 유지하는 것을 알 수 있다. 같은 영역 할당 상황에서 전송능력이 낮은 로봇 세트 2의 로봇 1 ($\mu = 5$)을 투입한 경우 로봇의 충전 능력이 낮아서 Partition 1의 노드 중 동작을 유지하지 못하는 노드가 발생한다. 그림 6은 로봇 세트 2를 대상으로 다시 영역을 분할한 것이다. Partition 1의 노드 수가 줄어들고 이 노드들이 로봇 2의 담당 영역인 Partition 2에 포함되게 되었다.

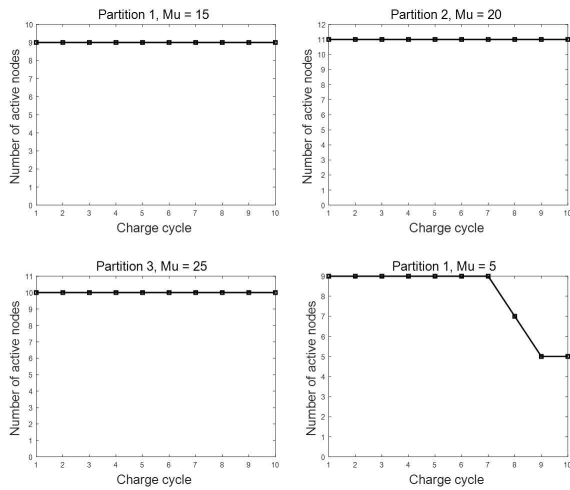


그림 5. 시뮬레이션 결과 (Case 1)
 Figure 5. Simulation result (Case 1)

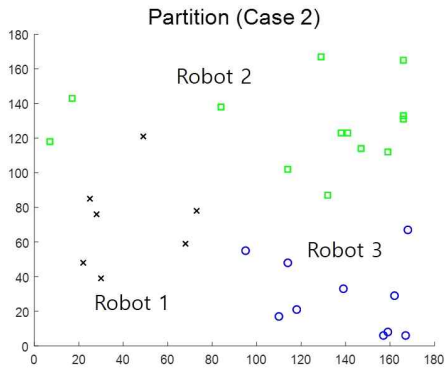


그림 6. 영역 할당 결과 (Case 2)
 Figure 6. Area allocation result (Case 2)

그림 7은 새로 할당된 영역에서 로봇 세트 2에 의해 노드들이 유지가 되는지 시뮬레이션 한 결과이다. Partition 1, Partition 2의 영역에서 모두 노드들이 동작을 유지한다.

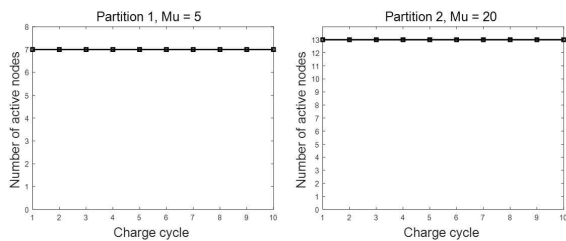


그림 7. 시뮬레이션 결과 (Case 2)
 Figure 7. Simulation result (Case 2)

2. 로봇의 센서 네트워크 충전 실행 가능성 실험
 로봇을 사용한 충전 실험은 하나의 파워 베이스 스테이션을 대상으로 실시하였다.

여러 대의 로봇을 사용한 경우에도 작업 영역을 할당한 후에는 독립적으로 동작하므로 다중 로봇을 사용한 센서 네트워크의 유지 작업의 실행 가능성 (feasibility)을 확인할 수 있다. 로봇은 로봇 베이스를 출발하여 파워 베이스 스테이션 근처로 이동 후 영상 정보를 이용하여 파워 베이스 스테이션을 인식하고, 충전 코일과의 정확한 정렬을 위해 인공 마커 이미지로부터 로봇의 상대 위치와 방향을 계산한 후 충전 패드에 도킹하여 충전을 개시한다 [6]. 그림 8은 충전 패드에 안착한 장면이며 좌측 삼각대에 장착된 것이 파워 스테이션이다. 로봇은 ROS (Robot Operating System)를 사용하여 프로그램하였고, 로봇에 장착된 충전 모듈은 최대 15W를 전송할 수 있는 상용 Qi 모듈을 사용하였다.



그림 8. 충전 패드와의 도킹 장면
 Figure 8. Docking on the charge pad

V. 결 론

넓은 지역에 설치되는 센서 네트워크는 배터리 교환 등 유지 관리 문제가 발생한다. 로봇과 무선 전력전송 방법을 이용하여 센서 노드에 직접 에너지를 공급하는 방법도 연구되었으나 센서 노드의 위치를 정확히 파악하기 어려워서 로봇 경로가 복잡해지고 에너지 전달 효율이 낮아지는 단점이 있다. 이에 대한 대안으로 무선으로 주변 노드에 에너지를 공급하는 다수의 파워 베이스 스테이션들로 이루어진 센서 네트워크도 제시되었다. 이 논문에서는 파워 베이스 스테이션과 주변의 센서 노드로 이루어진 센서 네트워크를 대상으로 다중 로

봇을 투입하여 에너지를 공급하는 문제에서, 로봇이 작업을 수행할 영역을 분할하기 위해 수정된 k-means 알고리즘을 제시하였다. 제안된 알고리즘에서는 일반적인 k-means 알고리즘과 같이 영역을 가까운 노드들끼리 클러스터로 나누되 각 클러스터는 (5)식과 (6)식의 유지 조건을 만족하도록 하였다. 30개의 노드와 서로 다른 초당 에너지 전송률(μ)을 가진 세 대의 로봇으로 수행한 시뮬레이션에서 분할된 각 영역은 로봇에 의해 공급 받는 에너지로 유지할 수 있음을 입증하였다.

현재 상용화되어 있는 에너지 전송시스템은 전송전력이 15W 정도이기 때문에 소규모 네트워크에만 적용이 가능할 것으로 판단되며 대규모 센서 네트워크에 적용하려면 고전력 고효율 전송 기술연구가 선행되어야 한다.

References

- [1] DK Liu and et. al. "A robotic system for steel bridge maintenance: Research challenges and system design", Proceedings of the 2008 Australasian Conference on Robotics and Automation, ACRA 2008, 2008
<http://hdl.handle.net/10453/10964>
- [2] Seunghun Lee and et. al. "Motion Planning of Building Maintenance Robot System for Reducing Jerk Effect", Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol 4, No. 30, pp. 368-374
<https://doi.org/10.7736/KSPE.2013.30.4.368>
- [3] S. Yeon, "A Study on the Technique of Construction Site Management based on UAV and USN," JCCT, Vol. 5, No. 1, pp. 457 - 467, 2019. <https://doi.org/10.17703/JCCT.2019.5.1.457>
- [4] Liguang Xie and et. al. "Wireless Power Transfer And Applications to Sensor Networks", IEEE Wireless Communications pp140-145, 2013.
DOI: 10.1109/MWC.2013.6590061
- [5] Z. Wang, L. Duan and R. Zhang, "Adaptively Directional Wireless Power Transfer for Large-Scale Sensor Networks", in IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 34, no. 5, pp. 1785-1800, 2016, doi: 10.1109/JSAC.2016.2551619.
- [6] Jaehyun Kim and Chanwoo Moon. "Sensor Network Charging Using a Mobile Robot", JCCT, Vol. 6, No. 4, pp.747-752, 2020.
<http://dx.doi.org/10.17703/JCCT.2020.6.4.747>
- [7] J.-O. Kim, K.-J. Lee, H.-S. Ahn, and C.-W. Moon, "A Study on Mobile Robot Auto Recharging System Based on Wireless Power Transmission and Visual Information," JIIBC, vol. 11, no. 5, pp. 35 - 40, 2011.
doi:10.7236/JIWIT.2011.11.5.035.
- [8] Rahn CD and Wang C-Y. Battery Systems Engineering, Wiley, 2013.
- [9] Kim, J. and Moon, C. "A Robot System Maintained with Small Scale Distributed Energy Sources". Energies 12, 3851, 2019.
<https://doi.org/10.3390/en12203851>
- [10] Richard O. Duda, Peter E. Hart, David G. Stork. Pattern Classification. Wiley-interscience, 2001