

태양에너지 수집형 LoRaWAN IoT 환경에서 RF 무선 전력 전송을 위한 드론의 최적 이동 경로 설계

공유진*, 강민재*, 김영현**, 윤익준***, 노동건°

Path Optimization of Drones for RF Wireless Power Transmission in Solar-Powered LoRaWAN IoT

Yujin Gong*, Minjae Kang*, Younghyun Kim**, Ikjune Yoon***, Dong Kun Noh°

요약

배터리 기반 IoT 노드들은 에너지량의 제약으로 인한 제한적인 수명을 갖게 된다. LoRaWAN과 같은 저전력 통신 프로토콜을 사용한다고 할지라도 이 문제를 근본적으로 해결할 수는 없다. 이를 해결하기 위하여 최근에는 환경 에너지 수집형 IoT 노드에 대한 연구가 진행되고 있다. 특히 태양에너지는 주기성, 높은 예측 가능성, 에너지 고밀도 등의 특징으로 인하여 IoT 노드들의 에너지 제약 문제를 상당 부분 해결하여 연속성을 부여해줄 것으로 기대받고 있다. 그러나 태양에너지 수집형 IoT 노드들에서도 다양한 환경적 요인들로 인하여 수집에너지의 양이 노드가 정상적인 동작을 할 수 없을 만큼 부족하게 될 가능성도 존재한다. 대부분의 IoT 응용에서는 노드들의 연속성뿐 아니라 데이터의 안정적인 수집도 매우 중요한 요구사항이기 때문에, 우리는 드론을 이용한 RF 무선 전력 전송을 통해 태양에너지 수집형 IoT의 안정성 문제를 보완하려고 한다. 본 논문에서는 태양에너지 수집형 LoRaWAN IoT 환경에서 노드의 안정적인 운용을 위한 드론의 RF 무선 전력 전송 최적 충전 경로 설정 기법을 제안한다. 제안하는 기법에서는 태양에너지 수집이 부족한 노드들을 선정하고, 이 노드들에게 드론의 제한된 에너지를 가장 균형적이고 효율적으로 전달할 수 있는 최적 경로(호버링 위치, 호버링 시간, 이동 경로)를 결정할 수 있다. 실험 결과 이러한 경로로 드론이 이동하면서 노드를 충전해줌으로써, 제한된 드론의 에너지를 최적으로 사용하여 태양에너지 수집형 IoT 노드들의 안정성을 향상시킬 수 있음을 확인하였다.

Key Words : Internet of things, LoraWAN, Solar-powered, Wireless power transmission, Simulation

ABSTRACT

Battery-based Internet of things (IoT) nodes have a limited life due to limited amount of energy. This problem cannot be solved fundamentally even if a low-power communication protocol such as LoRaWAN is used. To solve this problem, environmental energy-harvesting IoT nodes are being researched recently. In particular, solar energy is expected to solve the limited energy problem of IoT nodes and impart permanence

※ 본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 대학ICT연구센터 지원사업의 연구결과로 수행되었음(IITP-2021-2020-0-01 602)

• First Author : Soongsil University, Department of of Intelligent System, 1102177006@soongsil.ac.kr, 학생회원

° Corresponding Author : Soongsil University, School of AI Convergence, dnoh@ssu.ac.kr, 종신회원

* Soongsil University, Foundation of Univ.-Industry Coop., minjaekang@ssu.ac.kr, 정회원

** University of Wisconsin-Madison, Department of Elec. and Comp. Engineering, younghyun.kim@wisc.edu

*** Kyonggi University, School of AI Computer Engineering, ijyoon@kyonggi.ac.kr, 정회원

논문번호 : 202107-154-B-RN, Received July 2, 2021; Revised August 30, 2021; Accepted August 30, 2021

owing to such characteristics of periodicity, high predictability, and high energy density. However, there is also a possibility that the amount of harvested energy will not be enough for the normal operation even for solar-powered IoT nodes due to various environmental factors. In most IoT applications, the stable collection of data is also a critical requirement as well as the permanency of nodes. Hence, we try to improve the stability problem of solar-powered IoT through RF wireless power transmission using drones. This study proposes an optimal charging path setting technique of drone for RF wireless power transmission to stably operate nodes in a solar-powered LoRaWAN IoT environment. The proposed scheme can select nodes that have insufficient solar energy harvesting and determine the optimal path (hovering position, hovering time, and moving path) that can transmit the drone's energy to these nodes in most balanced and efficient ways.

I. Introduction

LoRaWAN은 저전력 장거리 네트워크 (Low-Power Wide-Area Network, LPWAN)의 한 종류로, 장거리, 저전력, 저비용의 특징을 가지고 있다. 최대 10 km 거리에 있는 LPWAN 송수신기와 데이터 통신이 가능하고, 작고 저렴해서 초소용, 저비용, 저전력의 많은 센서 노드로 구성되어있는 IoT 환경에 적합하다^[1].

일반적으로 IoT 노드는 배터리 기반으로 동작하기 때문에 노드의 수명이 제한되고 따라서 배터리의 유지보수가 필요하지만, 위험지역이나 산악지역 등 접근성이 떨어지는 곳에 위치한 노드는 폐기될 수밖에 없다. 이를 해결하고자, 즉 IoT 노드의 영속적인 동작을 위해 최근에는 환경 에너지를 이용한 에너지 수집형 IoT 노드를 사용하는 연구가 진행되고 있다^[2]. 바람, 열, 중력, 압력, 태양 등으로 환경 에너지를 수집하는데, 그중 태양에너지는 높은 에너지 밀도와 주기적 충전, 그리고 수집 에너지양의 높은 예측 가능성으로 인해 IoT 노드의 영속적 동작을 위한 최적의 환경에너지원으로 생각되고 있다.

태양에너지 수집형 노드가 배터리 기반 노드의 근본적인 에너지양 제한 문제를 해결하여 에너지 측면에서 영속성을 제공할 수 있기는 하지만, 노드의 안정성을 보장하지는 못한다. 예를 들어, 흐린 날이 지속되거나 그림자가 지는 등의 외부적인 요인 또는 소프트웨어의 비효율적인 동작 등과 같은 내부적인 요인으로 인하여, 노드가 수집한 태양에너지양이 사용하는 에너지양에 비해 낮아질 가능성도 존재한다. 이런 경우, 시간이 지나면서 내·외부적 요인이 바뀌어 노드들이 다시 동작하기에 충분한 에너지양이 저절로 확보되기도 하지만, 만약 그렇지 않다면 노드들은 에너지가 다시 충분해질 때까지 당분간 정상적인 동작을 못 할 수도 있다. 이런 노드들은 듀티사이클(수면시간 대비 동작시간의 비율), 센싱 주기, 데이터 통신 거리를 줄이는 등의 방법으로 부족한 수집에너지의 양에 대응해야 한다. 그럼에도 불구하고, 수집에너지가 계속해서 부족하다면 결국 정전상태(수면상태)에 들어가게 되고, 정상적인 동작을 수행하지 못하게 된다. 대부분의 IoT 응용에서는 노드들의 영속적인 동작뿐 아니라 안정적인 동작도 필요로 하기 때문에 노드가 정전되는 시간을 최소화하는 연구가 반드시 필요하다.

본 연구에서는 이를 해결하기 위해 드론을 사용하여 Radio Frequency(RF) 전력을 무선으로 전송하는 WPT(Wireless Power Transfer)^[3-4] 기술을 이용한다. 이때 중요한 고려사항은 드론의 에너지가 제한적이기 때문에 최대한 효율적으로 이동 경로와 충전 위치 및 충전 스케줄을 결정해야 한다는 것이다. 본 논문에서는 LoRaWAN 기반의 태양에너지 수집형 IoT 환경을 가정하고 있다. 드론은 태양에너지 수집형 IoT 노드 중에서 에너지가 부족하여 정전이 예상되는 노드들을 최적의 충전 경로로 이동하면서 에너지를 전달하게 된다. 결과적으로 전체 IoT 노드들의 잔여 에너지양이 균형적으로 되어 안정적인 동작을 보장할 수 있게 된다. 본 연구의 차별적인 특징을 요약하면 아래와 같다.

본 연구에서는 이를 해결하기 위해 드론을 사용하여 Radio Frequency(RF) 전력을 무선으로 전송하는 WPT(Wireless Power Transfer)^[3-4] 기술을 이용한다. 이때 중요한 고려사항은 드론의 에너지가 제한적이기 때문에 최대한 효율적으로 이동 경로와 충전 위치 및 충전 스케줄을 결정해야 한다는 것이다. 본 논문에서는 LoRaWAN 기반의 태양에너지 수집형 IoT 환경을 가정하고 있다. 드론은 태양에너지 수집형 IoT 노드 중에서 에너지가 부족하여 정전이 예상되는 노드들을 최적의 충전 경로로 이동하면서 에너지를 전달하게 된다. 결과적으로 전체 IoT 노드들의 잔여 에너지양이 균형적으로 되어 안정적인 동작을 보장할 수 있게 된다. 본 연구의 차별적인 특징을 요약하면 아래와 같다.

- 태양에너지 수집형 노드의 에너지 모델 고려: 제안 기법에서는 기존 연구를 기반으로 태양에너지 수집형 노드들에서 에너지가 부족한 노드, 에너지가 충분한 노드를 결정할 수 있는 문턱값을 정한다. 그리고 그중 에너지가 부족한(잔여 에너지가 일정 문턱값 이하인) 노드들에게만 에너지를 전달한다. 잔여 에너지가 문턱값 이상인, 에너지가 충분한 노드들은 현재 수집되는 태양에너지로 노드가 정상적인 동작을 하는데 아무런 문제가 없다는 의미이므로 드론의 WPT가 필요 없다.
- 드론의 에너지 제약 문제 고려: 에너지가 부족한 노드들에게만 드론이 에너지를 전달한다고 할지라도, 드론의 제한된 에너지로 인해 에너지가 부족한 노드

들 모두를 방문할 수 없다.

- RF WPT의 특성 고려: 또한 RF WPT 기법은 한 장소에서 주변에 위치한 여러 노드를 동시에 충전할 수 있으므로 충전할 모든 노드를 일일이 방문하여 에너지를 전달하는 기법은 비효율일 수밖에 없다.

위의 사항들을 고려했을 때, 드론이 에너지가 부족한 노드들에게 에너지를 전달하기 위하여 세 가지 요소들, 즉 ①충전을 위해 호버링할 위치와 ②호버링 시간(충전 시간), 그리고 ③호버링 위치 방문 경로를 최적화 할 수 있다면, 제한된 드론의 에너지를 가장 효율적으로 사용할 수 있을 것으로 생각된다. 이 최적화 문제에서 최적화 여부를 결정하는 값은 에너지가 부족한 노드(드론이 충전하는 노드)들이 충전되고 난 후 잔여 에너지양들을 비교했을 때 가장 작은 잔여 에너지의 양이고, 목적함수는 이 가장 작은 에너지의 양을 최대화하는 것이다. 목적함수를 이렇게 정함으로써 드론의 에너지를 에너지가 부족한 노드들에게 가장 균형적으로 나누어 줄 수 있게 되고, 태양에너지 기반 IoT 환경에 안정성을 보완할 수 있게 된다. 요컨대 수많은 세 가지 요소들의 조합들 중에서 목적함수를 최대화하는 조합을 찾는 것이 본 연구의 핵심이다. 앞으로 이 최적화 기법을 Max-min Residual Energy 기법이라 부른다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 제안 기법을 위한 에너지 모델을 설명하고, III장에서는 제안하는 Max-min Residual Energy 기법에 대하여 기술한다. IV장에서는 실험을 통하여 제안 기법을 검증하고, 마지막으로 V장에서 결론으로 마무리한다.

II. Energy Model

2.1 태양에너지 기반 IoT 노드의 에너지 모델

본 절에서는 에너지 수집형 IoT 노드들이 에너지가 충분한지 아니면 에너지가 부족하여 드론으로부터 에너지 공급을 받아야 하는지 구분하기 위한 에너지 문턱값에 대해 설명한다. 에너지 문턱값은 해당 노드의 에너지 소비율과 태양에너지 수집률, 배터리 잔량과 관련이 있다. 에너지 수집률은 태양 전지판의 종류, 위치, 날씨, 계절 등의 영향을 받고, 노드의 에너지 소비율은 데이터 센싱률과 전송률 그리고 듀티사이클의 영향을 받는다. 그러나 이러한 요소들은 정확한 예측이 쉽지 않다. 본 논문에서는 이러한 각 요소의 정확한 예측이 필요 없는 간단하고 효율적인 에너지 모델

을 사용하고 있다^[5]. 태양에너지 기반 노드 n_i 의 평균 에너지 수집률을 $P_{solar}(i)$, 평균 에너지 소비율을 $P_{sys}(i)$ 라고 한다면, $P_{sys}(i)$ 값은 노드가 동작하는 동안의 에너지 소비량을 지속적으로 프로파일링함으로써 구할 수 있고, $P_{solar}(i)$ 는 수집되는 에너지양의 프로파일링을 통해 도출할 수 있다. 노드 n_i 에서 현재 사용 가능한 배터리 잔량을 $E_{residual}(i)$ 라고 할 때, 그 노드에서 배터리가 완전히 충전될 때까지 기대되는 시간($T_{full}()$)은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$T_{full}(E_{residual}(i)) = \frac{C(i) - E_{residual}(i)}{P_{solar}(i) - P_{sys}(i)} \quad (1)$$

위 식에서 $C(i)$ 는 노드의 전체 배터리 용량을 나타낸다. 중요한 것은, $P_{solar}(i) > P_{sys}(i)$ 을 만족해야 배터리가 충전된다는 것이다. 이때, $P_{solar}(i)$ 는 값 조절이 불가능하지만 $P_{sys}(i)$ 는 노드 n_i 의 듀티사이클을 적당히 조절함으로써 원하는 값으로의 변경이 가능하므로, $P_{sys}(i)$ 의 조절을 통하여 $P_{solar}(i) > P_{sys}(i)$ 를 만족시킬 수 있다.

한편, 태양에너지는 날씨와 시간 등에 따라 충전량이 계속 변하여 정확한 수집 에너지양을 예측하기 어렵지만, 배터리 내의 남아있는 에너지의 양이 다음과 같은 식 (2)의 조건을 만족한다면 현재 시각부터 배터리가 가득 채워지는 시각까지 정전시간은 존재하지 않게 된다.

$$E_{residual}(i) \geq P_{sys}(i) \cdot T_{full}(E_{residual}(i)) \quad (2)$$

즉, 식 (2)를 만족하는 노드는 최악의 상황에서도 다음 배터리가 완충되는 시간까지 정전시간 없이 동작하게 된다. 식 (1)과 (2)를 통해 $E_{residual}(i) \geq$

$\frac{P_{sys}(i)}{P_{solar}(i)} \cdot C(i)$ 를 도출할 수 있다. 이는 배터리가

최소한 $\frac{P_{sys}(i)}{P_{solar}(i)} \cdot C(i)$ 이상의 에너지를 가지고 있

다면, 그 시스템은 날씨 변화나 에너지 소비의 변화 등 어떠한 예상치 못한 상황이 발생하더라도 정상적으로 동작한다는 것을 의미한다. 본 논문에서는 이를 에너지 문턱값 $E_{threshold}(i)$ 라고 정의하며, 다음과 같은 식으로 나타낸다.

$$E_{\text{threshold}}(i) = \frac{P_{\text{syst}}(i)}{P_{\text{solar}}(i)} \cdot C(i) \quad (3)$$

요컨대, 만약 $E_{\text{residual}}(i) < E_{\text{threshold}}(i)$ 이 되면, 네트워크 정전시간의 가능성이 존재한다는 것이다. 그러므로 노드는 드론을 통해 추가 에너지를 공급받아야만 안정적인 동작을 유지할 수 있다.

2.2 RF 무선 전력 전송 에너지 모델

RF 무선 전력 전송 에너지 모델⁶⁾을 설명하기 위해서 각 노드 n_i , $i \in I$ 는 지상의 $n_i = (x_i, y_i, 0)$ 좌표에 고정되어 있고, 드론은 모든 시간 $t \in T$ 에서 고정된 고도인 H 에서 호버링하고 이동한다고 가정한다. 이때 I 는 전체 노드의 집합이고, T 는 전체 충전 시간이다. 또한 드론이 시간에 따라 변하는 위치는 $(x(t), y(t), H)$ 로 표시한다.

본 논문에서는 드론의 각 노드에 대한 에너지 충전 모델로써 자유 공간에서의 경로 손실 모델을 사용하였는데, 드론과 각 노드 사이의 무선 채널이 거의 대부분 Los(line-of-sight)라고 가정하기 때문이다. 이 모델에서는, 시간 t 에서 드론과 각 노드 n_i 간의 채널 전력 이득 $h_i(t)$ 가 $\beta_0 d_i^{-2}(t)$ 로 표현될 수 있다. 여기서 β_0 는 기준 거리 1 m에서의 채널 전력 이득을 나타내고, $d_i(t)$ 는 시간 t 에서 노드 n_i 와 드론 사이의 거리인 $\sqrt{(x(t) - x_i)^2 + (y(t) - y_i)^2 + H^2}$ 를 나타낸다. 이 때, 드론이 일정한 송신 전력 P_T 을 가진다고 가정하면, 시간 t 에서 노드 n_i 에 수신된 RF 전력을 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$Q_i(x(t), y(t), H) = h_i(t) P_T = \frac{\beta_0 P_T}{(x(t) - x_i)^2 + (y(t) - y_i)^2 + H^2} \quad (4)$$

식 (4)를 이용해서 전체 충전 시간인 T 동안 노드 n_i 가 받는 총 에너지를 구하면 다음과 같다.

$$\int_0^T Q_i(x(t), y(t), H) dt. \quad (5)$$

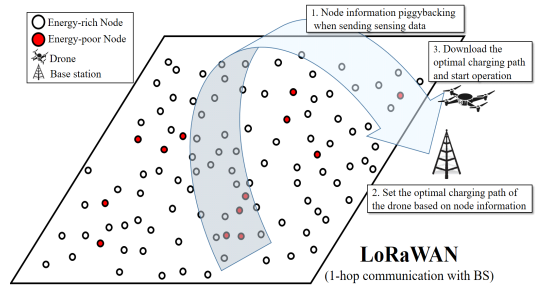
마지막으로 전체 충전 시간 T 가 지난 후 노드 n_i 의 잔여 에너지 양은 아래와 같이 표현된다.

$$E_i(\{x(t), y(t), H\}) = \int_0^T Q_i(x(t), y(t), H) dt + E_{\text{residual}}(i) \quad (6)$$

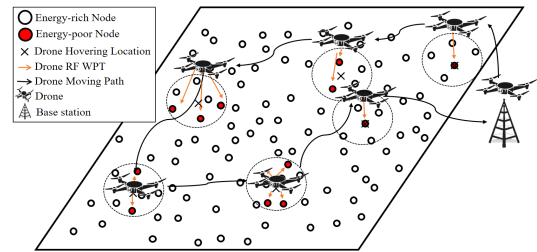
III. The Proposed Scheme

본 장에서는 제안하는 기법인 Max-min Residual Energy 기법, 즉 에너지가 부족한 노드들을 대상으로, 드론의 방문(충전) 후 각 노드의 에너지양 예측값 중 최소 잔여 에너지양을 최대화하는 드론의 최적 경로 결정하는 기법을 설명한다.

그림 1은 제안하는 기법의 개요를 보여주고 있다. 우선 그림 1(a)와 같이 베이스스테이션에서는 각 노드로부터 각 노드의 위치와 에너지 부족 여부, 잔여 에너지양을 주기적으로 수집한다. LoRaWAN 환경을 가정하고 있기 때문에 10 km 반경의 모든 노드로부터 센싱 데이터를 전달받고 있을 것이다. 이때 센싱 데이터뿐만 아니라 위치, 에너지 부족 여부 및 잔여 에너지양 정보 데이터도 함께 받는다. 정보 데이터의 크기가 매우 작기 때문에 오버헤드가 거의 없다고 해도 무방하다. 이후, 베이스스테이션에서 Max-min Residual



(a). 제안 기법의 동작 순서
(a). Operation sequence of the proposed method



(b). 제안 기법의 동작 예시
(b). Example operation of the proposed method

그림 1. Max-min Residual Energy 기법의 동작 개요
Fig. 1. Operation overview of the Max-min Residual Energy method

Energy 기법을 사용하여 ①충전을 위해 호버링할 위치와 ②호버링 시간(충전 시간)를 결정하고, 최단 경로 알고리즘을 사용하여 ③드론의 호버링 위치 방문 경로를 결정한다. 이후 그림 1(b)와 같이 드론이 이를 기반으로 각 호버링 위치로 이동하여 노드들을 충전하게 된다. 이러한 작업을 주기적으로 수행하여 각 노드의 정전 노드의 시간을 최소화하고, 안정적인 노드의 동작을 지원한다.

3.1 문제 정의

앞서 서론에서 설명한 바와 같이 드론의 에너지량 제한 문제로 인해 드론이 가진 에너지를 가장 효율적으로 사용하여 에너지 충전이 필요한 노드들에게 전달해야 한다. 본 장에서는 가장 효율적으로 사용한다는 의미를 정의하고자 한다.

이 최적화 문제에서 우리는 세 가지 요소들, 즉 ①충전을 위해 호버링할 위치와 ②호버링 시간(충전 시간), 그리고 ③호버링 위치 방문 경로를 결정할 것이다. 문제를 단순화하기 위해 ③의 경우 ①이 결정된 후 최단 경로 알고리즘을 사용하여 결정하는 것으로 하고, ①과 ②를 최적화하는 것에 집중한다. ①과 ②를 결정하기 위해 관심 있게 살펴볼 값은 후보 방문 경로로 드론이 이동하면서 에너지를 충전하였을 때 충전된 노드들의 (충전 후) 잔여 에너지 양들 중 가장 작은 값이다. 그리고 목적함수는 이 가장 작은 에너지의 양을 최대화하는 것이다. 목적함수를 이렇게 정함으로써 드론의 에너지를 에너지가 부족한 노드들에게 가장 균형적으로 나누어 줄 수 있게 되고, 태양에너지 기반 IoT 환경에 안정성을 보완할 수 있게 된다. 이 목적함수를 수식으로 표현하면 아래와 같다.

$$\begin{aligned} & \max_{\{x(t), y(t)\}} \min_{k \in INK} E_k(\{x(t), y(t), H\}) \\ & s.t. K = \{i \mid E_{\text{residual}}(i) < E_{\text{threshold}}(i), i \in I\} \end{aligned} \quad (7)$$

요컨대, 본 연구가 풀어야 할 문제는, 수많은 호버링 위치 및 호버링 시간들의 조합들 중에서 위 목적함수를 최대화하는 조합을 찾는 것으로 정의할 수 있고, 우리는 이 문제는 III.2절에서 설명할 Max-min Residual Energy 기법을 통해 접근한다.

3.2 Max-min Residual Energy 기법

제안 기법은 IoT 노드들의 안정적인 운용을 위하여 목적함수인 수식(7)을 만족하는 세 가지 파라미터(호버링 위치, 호버링 시간(충전 시간), 호버링 위치 방문 경로)를 찾고자 하는 것이다. 그런데, 앞서 설명한 바

와 같이 호버링 위치 방문 경로는 호버링 위치들이 결정된 후 최단 경로 알고리즘을 사용하여 결정할 수 있으므로, 본 장에서 설명하는 Max-min Residual Energy 기법은 호버링 위치들과 각 위치에서 호버링하는 시간을 결정하는 것을 목표로 한다.

이를 위해 우선 각 노드는 자신의 위치정보, 현재 에너지양, 에너지 부족 여부(자신의 현재 에너지양이 문턱값보다 작은지 여부)를 포함한 자신의 정보데이터를 베이스스테이션에게 주기적으로 전달한다. 우리는 LoRaWAN 환경을 가정하고 있기 때문에 베이스스테이션은 10 km 반경의 모든 노드들로부터 각 노드들에 대한 위의 정보데이터를 1-hop으로 받을 수 있고, 아울러 정보데이터의 크기가 매우 작기 때문에 오버헤드가 거의 없다고 해도 무방하다.

이후 베이스스테이션은 에너지가 부족하다는 메시지를 보낸 노드들을 드론의 에너지 충전이 필요한 노드라 판단하고, 이를 충전 대상 노드 집합인 K 에 추가한다. 제안하는 Max-min Residual Energy 기법은 노드 $n_k, k \in K$ 를 대상으로 목적함수인 수식(6)을 만족하는 충전 경로를 찾는다. 앞서 설명한 바와 같이 충전 경로란 호버링 위치와 호버링 시간(충전 시간)을 포함한다.

3.2.1 Lagrange dual method

목적함수인 수식(7)을 보조 변수 E 를 도입해 아래 식으로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} & \max_{\{x(t), y(t)\}} E \\ & s.t. E_k(\{x(t), y(t), H\}) \geq E, \forall k \in K \end{aligned} \quad (8)$$

수식(8)은 non-convex 최적화 문제에 속하지만, time-sharing 조건을 만족⁷⁾하기 때문에, 자신의 Lagrange dual problem과 동일한 문제라 할 수 있고, 그 결과 수식(8)의 문제는 Lagrange dual method를 사용하여 접근할 수 있다. λ_k 를 노드 n_k 에 대한 dual 변수라 하면, 수식(8)의 제약 조건과 관련한 Lagrangian은 다음과 같이 주어진다⁸⁾.

$$\begin{aligned} & L(\{x(t), y(t)\}, E, \{\lambda_k\}) \\ & = (1 - \sum_{k \in K} \lambda_k) E + \int_0^T \sum_{k \in K} \lambda_k Q_k(x(t), y(t)) dt. \end{aligned} \quad (9)$$

따라서, 수식(8) 최적화 문제의 dual function은 다음과 같다.

$$f(\{\lambda_k\}) = \max_{x(t), y(t), E} L(\{x(t), y(t)\}, E, \{\lambda_k\}) \quad (10)$$

이때 수식(10)이 상한선을 유지하려면, 즉 $f(\{\lambda_k\}) < \infty$ 이 되려면 $\sum_{k \in K} \lambda_k = 1$ 을 유지해야 한다. 이를 조건을 포함하면 수식(10)은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\min_{\{\lambda_k\}} f(\{\lambda_k\}) \quad (11)$$

$$s.t. \sum_{k \in K} \lambda_k = 1, \lambda_k \geq 0, \forall k \in K$$

즉, 우리는 수식(8)의 dual function인 수식(11)을 해결함으로써 최적화 문제를 풀 수 있게 된다. 수식(11)의 제약 조건을 만족하는 $\{\lambda_k\}$ 의 실현 가능한 집합을 X라고 한다. 다음으로, 주어진 실현 가능한 dual 변수 $\{\lambda_k\} \in X$ 에서 $f(\{\lambda_k\})$ 를 얻기 위해 수식(10)를 계산한 후, 다시 수식(11)에서 $f(\{\lambda_k\})$ 를 최소화하기 위한 최적의 dual 솔루션을 찾는다. 이를 $\{\lambda_k^*\}$ 로 나타낸다. 마지막으로 $\{\lambda_k^*\}$ 를 기반으로 원래 문제인 수식(8)의 primal 솔루션을 찾아야 하는데, 최적 dual 솔루션인 $\{\lambda_k^*\}$ 에 해당하는 primal 솔루션은 $\{x^*(t)\}, \{y^*(t)\}, E^*$ 로 표현한다.

3.2.2 호버링 위치 최적화

최적 dual 솔루션 $\{\lambda_k^*\}$ 에 대한 primal 솔루션 중 호버링 위치인 $\{x^*(t)\}, \{y^*(t)\}$ 는 $(x_1^*, y_1^*), \dots, (x_I^*, y_I^*)$ 로 표현될 수 있는데, 여기서 I 는 드론이 호버링하는 위치의 개수를 의미한다. 이때 최적 솔루션 $\{\lambda_k^*\}$ 에 대한 $(x_1^*, y_1^*), \dots, (x_I^*, y_I^*)$ 들은 IoT 노드의 배치영역에 대하여 2D exhaustive search를 통하여 찾을 수 있고, 이를 위한 많은 기법들이 존재한다.

3.2.3 각 호버링 위치에서 충전 시간 최적화

호버링 위치들이 정해졌다면 이제 각 호버링 위치에서 드론이 얼마나 오랜 시간 호버링 하며 충전을 해야 하는지 결정해야 한다. 드론이 충전을 위해 출발하여 돌아올 때까지의 전체 시간을 T 라고 하고, 각 호버링 위치 $(x_\gamma^*, y_\gamma^*, H)$ 에서의 최적 호버링 시간을 τ_γ^* 라고 하자. 이때 γ 는 정수값으로 $\gamma \in [1, I]$ 을 만족한다. 그렇다면 각 γ 에 대한 τ_γ^* 들은 아래의 식을

만족시켜야 한다.

$$\max E$$

$$s.t. \sum_{\gamma=1}^I \tau_\gamma Q_k(x_\gamma^*, y_\gamma^*, H) + E_{residual}(k) \geq E, \forall k \in K \quad (12)$$

$$\sum_{\gamma=1}^I \tau_\gamma = T$$

여기서 E 는 수식(8)의 E 를 의미하는데, 결국 충전 후 잔여 에너지 양들의 최소값을 의미한다. 그리고 $Q_k(x_\gamma^*, y_\gamma^*, H)$ 는 수식(4)에 표현되어 있다. 이 수식(12)를 통해 얻어진 잔여 에너지 최소값들의 최대값이 E^* 이 된다. 이 문제는 선형 프로그래밍(LP)이므로 일반적인 convex 최적화 기술^[8]들을 사용해서 풀 수 있다.

3.2.4 호버링 위치 방문 경로 최적화

호버링 위치들과 $(x_\gamma^*, y_\gamma^*, H)$, 각 호버링 위치들에서의 호버링 시간(충전 시간) τ_γ^* 가 정해지면 마지막으로 드론이 이 위치들을 방문하는 순서를 결정해야 한다. III.2.3절에서 드론이 충전을 위해 출발하여 돌아올 때까지의 전체 시간(즉, 모든 τ_γ^* 들의 합) T 문제를 풀고 있는데, 이 T 값은 드론이 보유한 에너지의 양에 따라 설정되어야 한다. 예를 들어 드론이 보유한 에너지양이 많다면 노드에게 전달할 수 있는 에너지가 많기 때문에 보다 큰 T 값을 유지해도 된다.

중요한 것은 드론이 보유한 에너지가 노드에게 전달되는 데만 사용되는 것은 아니라는 점이다. 노드에게 전달하는 에너지양 외에 드론의 비행에 위한 에너지는 추가적으로 필요하다. 따라서 이 비행시간을 줄일 수 있다면 노드에게 전달할 수 있는 에너지 양을 증가시킬 수 있게 되어 보다 효율적인 충전이 가능하다. 이를 위해 제안 기법에서는 드론의 시작 지점과 끝 지점, 그리고 각 호버링 위치들을 기준으로 최단 경로 알고리즘을 통해 노드의 비행 시간을 줄임으로써, 비행에 사용되는 에너지를 최소화하고 있다.

IV. Experiments

제안 기법의 성능검증을 위해 시뮬레이션 실험을 수행하였다. 비교할 성능은 태양에너지 IoT 노드들의 정전시간 총합이며, 이 값이 작을수록 안정적인 동작을 수행함을 의미한다. 성능을 비교할 대상 기법은 ① 드론을 사용하여 에너지 전송을 하지 않는 경우(Naive 기법)와 ②랜덤한 위치를 방문하여 랜덤한 시간동안

에너지를 전송하는 기법(Random 기법), 그리고 ③에 에너지가 부족한 모든 노드들을 일일이 방문하되 방문한 노드의 배터리가 완충될 때까지 충전해주는 기법(Greedy 기법), 마지막으로 ④에 에너지가 부족한 모든 노드들을 일일이 방문하여 균등한 시간 동안 에너지 전송을 하는 기법(Fair 기법)과 우리의 기법을 비교하였다.

실험 환경은 IoT 노드 필드 영역을 1 Km× 1 Km 로 고정하고 1000개의 노드를 랜덤하게 배치하여 100 일 동안 진행하였으며 드론의 충전 주기는 하루이다. 주요 실험 환경 설정값은 표 1과 같다.

표 2는 위에서 기술한 비교기법들 별로 시뮬레이션 시간 동안 정전된 노드들의 정전시간 총합을 나타내고 있다. 표 2에서 보듯이 제안하는 기법이 다른 모든 기법들 보다 정전시간의 총합이 유의미하게 작다는 것을 알 수 있다. 이는 제안 기법이, 한 곳에서 드론이 호버링하며 RF WPT를 수행할 때 주변의 다른 노드들도 에너지가 동시에 충전될 수 있다는 점과 드론의 제한적인 에너지 사용을 극대화하여 에너지가 부족한 태양에너지 기반 노드들에게 에너지를 균형적으로 분배할 수 있다는 것을 보여주는 결과라 할 수 있다.

표 1. 주요 실험 환경 파라미터
Table 1. Major experimental environment parameters

Parameter	Value
Simulation time	100 days
Period of drone's charging	1 day
Field size	1 Km×1 Km
Number of nodes	1000
Sensor node battery capacity	150 mAh
Sensing Data Transferring rate	1 KB/min
Transmission range	2 km
Amount of harvested energy (Avg.)	20 J/day
Battery capacity of drone	2000 mAh

표 2. 각 노드들의 정전시간 총합(분)
Table 2. Total outage time of each node (min)

Navie	Random	Greedy	Fair	Ours
443,401	193,407	91,534	75,371	49,520

V. Conclusions

본 논문에서는 태양에너지 기반의 LoRaWAN IoT

환경에서 응용의 안정성을 확보하기 위해 드론을 사용할 때, 보다 효율적인 에너지 충전을 위한 드론의 충전 경로 설정 기법을 제안하고 있다. 태양에너지 수집만으로 충분한 노드들은 충전 대상에서 제외하고, 한 곳에서 여러 노드를 충전할 수 있는 RF WPT 기술 특성을 이용하여, 드론의 제한적인 에너지를 최대한 활용할 수 있는 드론의 충전 경로 설정 기법을 제안하였다.

태양에너지로 IoT 노드에 (에너지 측면에서의) 영속성을 부여했다면, 본 기법을 활용함으로써 태양에너지 기반 IoT 노드에게 부족할 수 있는 응용의 안정성을 확보하게 함으로써, 환경 에너지 기반 IoT 기기들의 활용도를 높이고 시장을 확대하는데 기여할 수 있을 것으로 기대한다.

References

- [1] H. Eigner, "Interference analysis of LoRaWAN systems," Ph.D. Dissertation, Wien, 2021.
- [2] D. K. Sah and T. Amgoth, "Renewable energy harvesting schemes in wireless sensor networks: a survey," *Info. Fusion*, vol. 63, pp. 223-247, 2020.
- [3] D. M. Vilathgamuwa and J. P. K. Sampath, "Wireless power transfer (WPT) for electric vehicles (EVS)—Present and future trends," *Plug in electric vehicles in smart grids*, Springer, Singapore, pp. 33-60, 2015.
- [4] J. Huang, Y. Zhou, Z. Ning, and H. Gharavi, "Wireless power transfer and energy harvesting: Current status and future prospects," *IEEE Wirel. Commun.*, vol. 26, no. 4, pp. 163-169, 2019.
- [5] S. H. Cheong, M. Kang, Y. Kim, M. Park, J. Park, and D. K. Noh, "Solar-CTP: An enhanced CTP for solar-powered wireless sensor networks," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 127142-127155, 2020.
- [6] J. Xu, Y. Zeng, and R. Zhang, "UAV-enabled wireless power transfer: Trajectory design and energy optimization," *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 17, no. 8, pp. 5092-5106, 2018.
- [7] W. Yu and R. Lui, "Dual methods for nonconvex spectrum optimization of multicarrier systems," *IEEE Trans. Commun.*,

vol. 54, no. 7, pp. 1310-1322, 2006.

- [8] E. M. Bednarczuk and M. Syga, "Lagrangian duality for nonconvex optimization problems with abstract convex functions," arXiv preprint arXiv:2011.09194, 2020.

공 유 진 (Yujin Gong)



2021년 2월 : 숭실대학교 스마트 시스템소프트웨어학과 졸업
2021년 3월~현재 : 숭실대학교 지능시스템학과 석사 과정
<관심분야> Cyber-Physical System, Internet of Things, Embedded System Software

강 민 재 (Minjae Kang)



2011년 2월 : 배재대학교 컴퓨터 공학과 졸업
2019년 2월 : 숭실대학교 전자공학과 박사
2019년 3월~현재 : 숭실대학교 융합특성화자유전공학부 외래교수

<관심분야> Cyber-Physical System, Mobile Network, Ubiquitous Sensor Network
[ORCID:0000-0002-1183-8752]

김 영 현 (Younghyun Kim)



2007년 2월 : 서울대학교 컴퓨터 공학부 졸업
2013년 2월 : 서울대학교 전기컴퓨터공학부 박사
2013년~2016년 : Purdue 박사 후 연구 조교수
2016년~현재 : University of Wisconsin-Madison 교수

<관심분야> Energy-Efficient Computing, Cyber-Physical Systems Security, Internet of Things
[ORCID:0000-0002-5287-9235]

윤 익 준 (Ikjune Yoon)



2006년 2월 : 전북대학교 컴퓨터 공학과 졸업
2015년 2월 : 서울대학교 전기컴퓨터공학부 박사
2015년~2021년 : 숭실대학교 스마트시스템소프트웨어학과 연구교수

2021년~현재 : 경기대학교 AI컴퓨터공학부 조교수
<관심분야> Cyber-Physical System, Mobile Computing, Internet of Things
[ORCID:0000-0002-5699-162X]

노 동 건 (Dong Kun Noh)



2000년 2월 : 서울대학교 컴퓨터 공학과 졸업
2002년 2월 : 서울대학교 전기컴퓨터공학부 석사
2007년 2월 : 서울대학교 전기컴퓨터공학부 박사
2007년~2010년 : Illinois at Urbana-Champaign 박사 후 연구원

2018년~2019년 : University of Wisconsin at Madison 방문연구원
2012년~현재 : 숭실대학교 지능시스템학과 교수
<관심분야> Cyber-Physical System, Mobile Computing, Internet of Things
[ORCID: 0000-0003-2068-633X]