

Data Collection Management for Wireless Sensor Networks Using Drones with Wireless Power Transfer

Ikjune Yoon*, Dong Kun Noh**

*Assistant Professor, Division of AI Computer Science and Engineering, Kyonggi University, Suwon-si, Korea
**Professor, School of AI Convergence, Soongsil University, Seoul, Korea

[Abstract]

To increase the lifetime of the network in wireless sensor networks, energy harvesting from the surrounding environment or wireless power transfer is being used. In addition, to reduce the energy imbalance and increase the amount of data gathered, a method using mobile sink nodes that visit sensor nodes to gather data has been used. In this paper, we propose a technique to reduce the load on the relay node and collect a lot of data evenly in this environment. In the proposed scheme, sensor nodes construct Minimum Depth Trees (MDTs) considering the network environment and energy, and allocate the data collection amount. Simulation results show that the proposed technique effectively suppresses energy depletion and collects more data compared to existing techniques.

▶ **Key words:** Wireless sensor network, wireless power transfer, drone, energy harvesting, data collection

[요약]

무선 센서 네트워크에서 네트워크의 수명을 증가시키기 위해 주변 환경으로부터 에너지를 수집하거나, 무선 전력 전송으로 직접 에너지를 전달하는 방법이 사용되고 있다. 또한 에너지의 불균형을 줄이고 데이터의 수집량을 증가시키기 위해 직접 센서 노드를 방문해서 자료를 수집하는 모바일 싱크 노드를 활용한 방법이 사용되고 있다. 본 논문에서는 이러한 환경에서 각 센서 노드가 네트워크 환경과 에너지를 고려하여 Minimum Depth Tree (MDT)를 구성하고 자식 노드에 자료수집량을 할당해줌으로써 중계 노드의 부하를 줄이고 전체적으로 많은 데이터를 고르게 수집하는 기법을 제안한다. 시뮬레이션 결과, 본 기법은 기존의 다른 기법에 비해 에너지 고갈을 효과적으로 억제하고 더 많은 자료를 수집하는 것을 보여준다.

▶ **주제어:** 무선 센서 네트워크, 무선 전력 전송, 드론, 에너지 수집, 자료수집

• First Author: Ikjune Yoon, Corresponding Author: Dong Kun Noh
*Ikjune Yoon (ijyoon@kyonggi.ac.kr), Division of AI Computer Science and Engineering, Kyonggi University
**Dong Kun Noh (dnoh@ssu.ac.kr), School of AI Convergence, Soongsil University
• Received: 2023. 08. 10, Revised: 2023. 08. 28, Accepted: 2023. 08. 30.

I. Introduction

무선 센서 네트워크는 무선 통신이 가능한 센서 노드들이 자율적으로 네트워크를 형성하고, 센서가 수집한 정보를 무선으로 수집하는 기술을 말한다. 여기서는 다수의 작은 무선 센서 노드가 사용되는데, 배터리를 사용하기 때문에 수명이 제한되어 있다[1][2]. 이를 극복하는 방법으로 주변 환경에서 에너지를 수집하는 방법이 이용되고 있다. 하지만, 대량의 데이터를 전송하는 응용에서는 높은 전송률과 많은 에너지가 필요하므로 필요한 에너지양을 환경으로부터 충당하는 것은 어렵다. 이를 해결하도록 이동형 충전기가 직접 센서 노드를 방문하여 충전하는 무선 전력 전송 방법이 연구되고 있다[3].

무선 센서 네트워크에서의 무선 전력 전송은 주로 기지국에서 RF(Radio frequency)를 이용하여 광범위하게 에너지를 전송하는 방법[4][5]과, 이동 가능한 무선 충전기가 센서 노드를 방문하여 충전하는 방법[6][7]이 사용된다. 기지국을 사용한 방법은 한 번에 많은 센서 노드를 충전할 수 있지만, 에너지 전송 효율이 높지 않고, 거리가 멀어질수록 효율이 급격히 감소한다. 이동형 무선 충전기를 사용한 방식은 대량의 에너지를 효율적으로 센서 노드에 전송할 수 있지만, 모든 센서 노드를 방문하는 것은 굉장히 어려운 일이므로 일부 센서 노드만 충전할 수 있다는 단점이 있다.

무선 센서 네트워크의 또 다른 문제점은 데이터가 특정 노드에 집중되는 핫스팟 문제가 발생하는 것이다[8]. 핫스팟 문제는 에너지 불균형 문제를 일으키고, 그 결과 특정 지역에서만 데이터가 덜 수집되는 데이터 불균형 문제를 일으킬 수 있다. 이를 해결하는 방법으로 모바일 싱크 노드를 사용하는 방법이 있다. 이는 모바일 싱크 노드가 여러 노드에 직접 방문하여 데이터를 수거함으로써 센서 노드 간의 데이터 전송량을 획기적으로 줄이고 데이터를 분산시킬 방법으로, 모바일 싱크를 이용한 다양한 연구가 진행되고 있다[9].

모바일 싱크 중에서 드론을 활용한 방식은 차량이나 사람이 접근하기 어려운 지형에서 유용하다. 반면 실내용 울창한 숲 같은 비행이 어려운 지형에서는 사용하기 어려울 수 있다. 이 드론에 무선 충전기를 장착하면 비행을 위한 에너지가 많이 소모되지만, 클러스터 헤드 노드와 같이 에너지 소모가 큰 노드만 방문해서 집중적으로 충전할 수 있으므로 기지국에서 RF로 에너지를 전송하는 방식에 비해 원하는 노드에 효율적으로 에너지를 전달할 수 있다.

본 논문에서는 주변환경과 무선 전력 전송으로 에너지를 얻을 수 있는 센서 노드를 사용하는 무선 센서 네트워

크에서 에너지 불균형 문제를 감소시켜 네트워크의 수명을 증가시키고, 수집되는 에너지양을 증가시키기 위한 자료수집량 결정 기법을 제안한다. 본 기법에서는 무선 충전기를 탑재한 드론을 모바일 싱크 노드로 사용하여 주기적으로 일정한 경로를 순회하고, 이 경로에서 몇몇 센서 노드를 Minimum Depth Tree(MDT)의 루트 노드로 선정하여 이들이 MDT를 구성하게 한다[10]. 센서 노드는 자신의 감지 데이터를 이들 루트 노드에 모으고, 드론이 이들을 방문하여, 모여있는 자료를 수집하는 동시에 루트 노드를 무선 전력 전송으로 충전시켜 준다. 이때, 루트 노드는 자신의 자손 노드의 수와 전송 가능 데이터양을 수집하여 MDT에 속한 노드의 자료수집량을 할당해주어 각 노드의 부모 노드의 가용 에너지를 초과하지 않는 양의 데이터를 전송하게 한다. 이를 받은 노드는 자신의 수집 주기를 결정하여 할당된 데이터양만큼 데이터를 전송할 수 있게 한다. 이전에 우리가 제안한 기법[11]은 위의 구조를 결정할 때 실제 노드의 데이터를 이용하지 않고 노드의 수와 배치를 바탕으로 예측된 데이터를 사용했지만, 본 기법에서는 각 노드로부터 수집된 정확한 데이터를 바탕으로 계산하기 때문에 MDT 구조와 수집되는 데이터양을 더욱 정확히 결정할 수 있다.

본 논문은 다음과 같은 측면에서 기존의 기법을 개선하였다.

- 모든 센서 노드의 정보를 이용한 정확한 MDT 결정
- 더 정확한 자료수집량 결정

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 제안 기법과 관련된 기존에 존재하는 연구를 소개하고, 3장에서는 제안 기법에 대해서 자세히 설명한다. 4장에서는 제안 기법과 기존 기법의 성능평가 결과를 보여주고 마무리한다.

II. Related Work

무선 전력 전송은 원거리에서 에너지를 전송하는 기법으로 여러 휴대용 기기들이나 차량, 드론 등 여러 분야에서 활용되고 있다. 최근에는 무선 센서 네트워크에서도 이를 활용하는 연구가 수행되고 있다.

Xu 외 2인[12]은 드론으로 자료를 수집하는 동시에 RF 방식으로 센서 노드에 에너지를 전달하는 환경에서, 드론의 제한된 에너지 내에서 센서 노드의 소비 에너지와 수집되는 에너지를 고려하여 자료수집량을 최대화하고 센서 노드의 에너지가 최대화되도록 최적의 드론 이동 경로와

제자리 비행 시간을 결정하는 기법을 제안했다. Chen 외 2인[13]은 이와 달리, 드론의 에너지 문제로 일부 네트워크만 순회할 수 있을 때, 드론을 중간에 충전할 수 있도록 충전기를 네트워크 내에 설치하는 방법과 에너지 효율을 높이기 위한 충전기의 위치와 수를 결정하는 기법을 제안하였다. Wang 외 5명[14]은 에너지 수집형 센서 노드와 배터리 기반 센서 노드로 구성된 네트워크에서 무선 충전과 에너지 수집을 함께 사용하는 3계층 토폴로지 운영 기법을 제시했다. 이 기법에서는 루트 노드의 높은 에너지 요구량을 전력 전송으로 충전할 수 없을 때를 대비하여 안정적인 네트워크 운영을 위해 태양 에너지를 수집하여 사용했다. Zhang과 Cai[15]는 하나 이상의 충전 싱크를 사용하여 센서 노드의 에너지를 보충하는 동시에, 감지 자료를 수집하는 SOM(Self-Organizing Map) 비지도 학습 기반의 무선 충전 및 자료수집 방법을 제안했다. 이들은 싱크 이동성과 에너지 보충을 함께 고려했다. Son 외 4명[16]은 드론을 이용하여 자료수집 할 때, 효율적인 경로 선택을 위해 센서 노드와 드론의 에너지를 고려한 클러스터링 기법을 제안했다. 이들 기존 연구들과는 달리 제안된 기법은 무선 충전과 에너지 수집을 이용한 환경에서 자료 수집량을 조절하여 에너지 고갈을 막고 네트워크 가용성을 증가시켜 자료수집량을 증가시키는 방법을 제시한다.

III. Proposed Scheme

1. System Process

본 기법에서 모든 센서 노드는 처음 네트워크에 추가될 때 자신의 위치, 에너지, 주변 노드 목록 등의 정보를 시스템 서버에 추가하고, 이를 주기적으로 갱신함으로써 시스템 서버가 모든 센서 노드의 정보를 알 수 있게 하고 이를 활용하여 효율적인 자료수집을 위한 토폴로지를 구성한다. 네트워크의 모든 센서 노드는 드론이 방문하는 노드를 루트 노드로 하는 MDT를 구성하여 루트 노드에 데이터를 모은 후, 이들 루트 노드를 드론이 방문하여 자료를 수집한다. 따라서 데이터 전송 효율을 높이기 위한 최적의 MDT를 구성하기 위해 시스템 서버는 센서 노드의 정보를 바탕으로 루트 노드의 수를 결정하고, 드론은 이를 센서 노드에 전달하여 MDT를 구성하게 한다.

본 기법은 일정 주기의 라운드마다 MDT를 구성하여 노드의 토폴로지를 재배치하고 자료를 수집한다. 한 라운드 동안의 전체 시스템 진행 과정은 다음과 같다. 1) 라운드가 시작되면 시스템 서버는 MDT 수와 MDT의 루트 노드를

결정한다. 2) 드론은 이전 라운드의 자료를 수집하기 위해 네트워크를 순회하는 동시에 다음 라운드의 MDT 수와 루트 노드를 해당 노드에 전달한다. 3) 루트 노드들은 자신의 MDT를 구성하고, MDT에 속한 센서 노드들은 자신의 자료수집량과 주기를 결정한다. 4) 센서 노드는 주기적으로 자료를 수집하여 루트 노드에 모으고, 드론은 주기적으로 루트 노드를 순회하며 모여진 데이터를 수거하여 시스템 서버에게 전달한다. 이때, MDT의 수와 루트 노드를 결정하기 위해 라운드 종료 시 모든 노드는 센서 데이터뿐만 아니라 자신의 상태 정보도 시스템 서버에게 전달한다. 이렇게 한 라운드가 종료되고 시스템 서버는 다음 라운드를 위해 MDT의 수와 루트 노드를 결정하는 과정을 반복한다. 그림 1은 제안된 기법의 대략적인 모습을 보여준다.

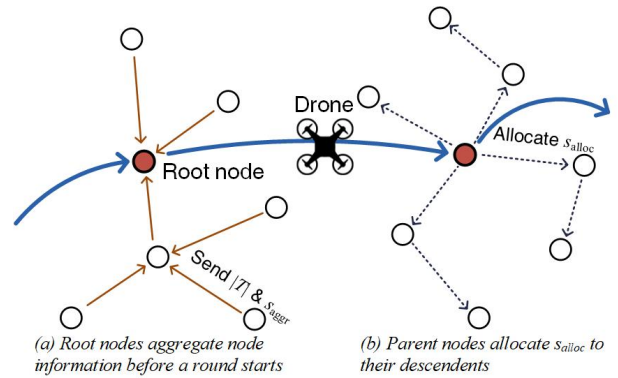


Fig. 1. Overview of the proposed scheme

2. Energy model of the sensor nodes

본 기법의 센서 노드는 태양 에너지를 수집하는 노드로, 수집되는 태양 에너지를 ProEnergy[17]와 같은 기법으로 시간별 수집량을 예측하고, 에너지 할당 기법[18]을 이용하여 시간별로 사용할 수 있는 에너지를 결정한다. 우리는 라운드마다 가용 에너지를 할당하고, 센서 노드가 그 에너지 내에서 동작함으로써 에너지 고갈을 막는 동시에 시간과 관계없이 일정하게 에너지를 사용하게 한다.

한 라운드의 가용 에너지가 e_{avail} 일 때,

$$e_{avail} \geq e_{Tx} + e_{Rx} + e_{idle} \quad (1)$$

를 만족시켜야 한다. 여기서 e_{Tx} 는 전송에 소모되는 에너지, e_{Rx} 는 수신에 소모되는 에너지, e_{idle} 는 그 외에 소모되는 에너지이다. e_{Rx} 과 e_{idle} 는 시간과 관계없이 일정하고, e_{Tx} 는 데이터 전송량에 따라 달라질 수 있다. 센서 노드가 한 라운드에 s_{aggr} 만큼의 데이터를 전송하면 e_{Tx} 는

$$e_{Tx} = \left(\lceil \frac{s_{aggr}}{s_{max}} \rceil s_{head} + s_{aggr} \right) \beta r^\alpha \quad (2)$$

로 나타낼 수 있다[11]. 여기서 s_{max} 는 패킷의 최대 페이로드 크기, s_{head} 는 패킷의 헤더 크기, α 는 경로 손실 ($2 \leq \alpha \leq -5$), β 는 거리에 따른 비트당 전송 소모 에너지 (J/bit/m α), r 는 전송 거리를 나타낸다. 각 노드는 수식 (1)과 (2)를 이용하여 자신의 s_{aggr} 를

$$s_{aggr} \leq \frac{(e_{avail} - e_{Rx} - e_{idle}) / (\beta r^\alpha) - s_{head}}{s_{head} / s_{max} + 1} \quad (3)$$

로 결정할 수 있다[11].

3. Energy model of the drones

제안된 기법에서 드론은 미리 정해진 경로를 순회하며, 루트 노드들을 방문하여 자료를 수집하는 동시에, 무선 전력 전송을 이용하여 이 노드들에 에너지를 전달한다. 이 드론은 비행과 데이터 수신에 에너지를 소모하고, 남은 에너지는 무선 전력 전송에 사용할 수 있다.

만약 드론이 m 개의 루트 노드를 방문하여 자료를 수집하고 에너지를 전달한다면, 드론의 에너지가 고갈되지 않고 무사히 네트워크를 순회할 때, 무선 전력 전송에 사용할 수 있는 에너지 e_{charge} 는

$$e_{charge} \leq e_{full} - e_{move} - m(e_{land} + e_{com}) - e_{idle} \quad (4)$$

가 된다[19]. 여기서 e_{full} 는 드론의 배터리 용량, e_{move} 는 이동에 소모되는 에너지, e_{land} 는 이착륙 에너지, e_{com} 는 데이터 송수신 에너지, 그리고 e_{idle} 는 그 외의 에너지이다. 위의 수식 (4)에서 e_{full} , e_{idle} 과 e_{com} 는 드론의 사양에 따라 달라지고, e_{move} 과 e_{land} 는 네트워크의 환경에 의해 결정된다. 따라서, 우리의 환경에서는 m 에 의해 e_{charge} 가 결정된다.

4. Determining the number of MDTs and their root nodes

본 기법에서 시스템 서버는 데이터 전송 효율을 높이기 위한 MDT 수를 결정해야 한다. 이를 위해 본 기법에서는 이전 논문[11]에서와 같이 드론의 에너지와 센서들이 한 라운드 동안 수집할 수 있는 데이터양을 고려하여 MDT 수를 결정한다.

첫 번째로, MDT의 루트 노드 수는 드론이 방문할 수 있는 범위 내에서 결정되어야 한다. 따라서, 루트 노드의 수 m 는

$$1 \leq m \leq \left\lfloor \frac{e_{full} - e_{move} - e_{idle}}{e_{land} + e_{com}} \right\rfloor \quad (5)$$

의 범위 내에서 결정되어야 한다[20].

두 번째로, 전체 센서 노드의 자료수집량을 최대화하는 m 를 구해야 한다. 이를 위해 우리는 네트워크에서 병목현상이 발생하는 루트 노드와 레벨 1의 노드가 최대한 많은 데이터를 전송할 수 있는 루트 노드 수를 m 로 결정한다. 자료수집량 불균형을 방지하기 위해 모든 노드가 균일한 자료를 수집한다고 할 때, l 레벨에 있는 노드 i 가 수집할 수 있는 예상 데이터양 \hat{s}_{sense_i} 는

$$\hat{s}_{sense_i} \leq \frac{(e_{avail_i} - e_{Rx} - e_{idle}) / (\beta r^\alpha) - s_{head}}{(s_{head} / s_{max} + 1) |T_i|} \quad (6)$$

이다[11]. 여기서 T_i 는 노드 i 의 자식 노드의 집합이고, $|T_i|$ 는 이들 노드의 수를 나타낸다.

시스템 서버는 모든 센서 노드에서 수집된 정보를 바탕으로 수식 (5)을 이용하여 모든 노드의 \hat{s}_{sense_i} 를 계산하고, 수식 (4)의 범위에서 모든 노드의 \hat{s}_{sense_i} 의 합을 최대화하는 m 를 이번 라운드의 MDT의 수로 결정하고, 그때의 루트 노드들을 이번 라운드의 루트 노드로 결정한다.

5. Determining the Amount of Data Sensed

루트 노드가 결정되면, 각 루트 노드는 MDT를 구성하고, 노드들은 가용 에너지를 고려하여 부모의 에너지를 고갈시키지 않는 범위 내에서 자식의 자료수집량을 계산하고, 이를 각 노드에 할당해야 한다. 본 기법에서는 부모 노드의 에너지를 고갈시키지 않는 범위 내에서 최대한 많은 자료를 수집하도록, 루트 노드부터 말단 노드까지 차례로 자료수집량을 계산해서 전달하는 방법을 사용한다.

노드들이 정확한 전송 데이터양을 계산할 수 있도록, 센서 노드 i 는 수식 (3)를 이용하여 자신의 s_{aggr_i} 를 계산하고, s_{aggr_i} 를 자신의 $|T_i|$ 과 함께 자신의 부모 노드에 전달하여 부모 노드가 자손 노드들 각각이 얼마나 데이터 전송을 할 수 있는지를 알게 한다. $|T_i|$ 는 자식 센서 노드 j 에서 받은 데이터를 기반으로 계산할 수 있다.

모든 노드가 자신의 정보를 전송하면 루트 노드는 자신의 MDT에 속한 모든 노드의 정보를 알고, 이를 바탕으로 자식 노드에 자료수집량을 할당해주고, 이를 받은 센서 노드는 부모 노드에서 받은 자료수집량을 바탕으로 자식 노드의 자료수집량을 할당해준다. 이를 말단 노드까지 반복함으로써 전체 센서 노드의 자료수집량을 할당한다. 이를 위해 우리의 이전 논문[11]에서 제안한 알고리즘을 이용하여 각 노드가 수집해야 하는 데이터양 s_{sense_i} 를 결정한다. 또한 해당 라운드의 s_{sense_i} 를 이용하여

$$p_{\text{sense}_i} = p_{\text{round}} \frac{s_{\text{unit}}}{s_{\text{sense}_i}} \quad (7)$$

로 자신의 수집 주기 p_{sense_i} 를 결정한다. 여기서 s_{unit} 는 한 번 감지로 얻는 데이터 크기이다.

이처럼 제안된 기법에서는 모든 센서 노드와 드론의 예상 가용 에너지와 소모 에너지를 고려하여 효율적인 MDT의 수와 루트 노드를 결정하고, 이를 이용하여 MDT를 구성하고 수집해야 하는 데이터양을 루트 노드부터 말단 노드로 할당함으로써 부모 노드의 에너지를 고갈시키지 않는 범위 내에서 최대의 데이터를 전송한다. 그림 2는 제안된 기법으로 데이터를 할당하는 예를 보여준다.

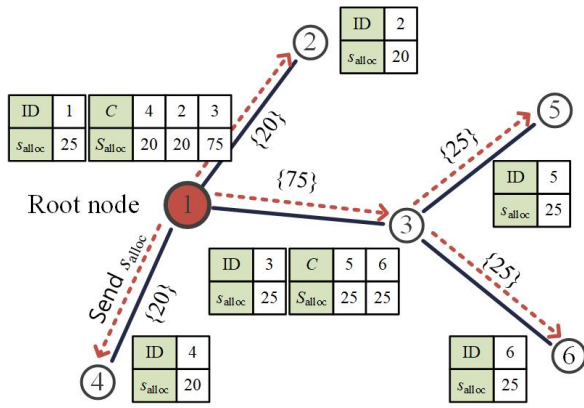


Fig. 2. Example of Data Allocation.

IV. Performance Evaluation

우리는 SolarCastalia[21]를 이용한 시뮬레이션을 통해 제안 기법의 성능 분석을 분석했다. 제안된 기법은 전통적인 에너지 수집 무선 센서 네트워크 기법[22](Fixed), 이 기법에서 루트 노드를 임의로 선택하는 기법(Random), 클러스터 구성 기법[19](Clustering), 그리고 우리의 이전 기법[11](Previous)과 비교되었다.

모든 기법에서 드론은 미리 정해진 경로로 이동하고, 각 MDT의 루트 노드들은 이 경로 내에서 선택된다. 드론은 루트 노드에 도착하면 무선 전력 전송으로 에너지를 충전시키고 루트 노드에 모여있는 데이터를 전달받는다. Fixed 기법은 일정 간격으로 배치된 미리 정해진 MDT 수만큼의 루트 노드를 그대로 사용하고, Random 기법은 라운드마다 정해진 MDT 수만큼 루트 노드의 시작 위치를 무작위로 결정하고 그 위치부터 일정 간격으로 배치하는 기법이다. Clustering 기법은 Random 기법과 유사하지만, 드론과 센서 노드의 에너지 상태와 수집되는 에너지양을 고려

하여 MDT의 수를 조절한다. 우리의 이전 기법은 본 기법과 마찬가지로 에너지를 고려하여 MDT의 수를 정하고 각 노드에 자료수집량을 할당해주는 기법이다[11]. 드론은 DJI사의 팬텀 3을 사용하였다고 가정하였다. 각 시뮬레이션은 시뮬레이션 환경 내의 시간으로 10일 동안 진행했고, 50번 반복한 실험의 평균값을 사용하였다. 표 1은 시뮬레이션에 사용된 주요 파라미터를 보여준다.

Table 1. Simulation Parameters

Parameters	Values
Number of nodes	1,000
Node density	0.04
Duration of a round	1 hour
Transmission period	1 min
Transmission range	10 m
Transmission rate	250 kbps
Sensor Battery capacity	110 mAh
Drone battery capacity	4,480 mAh
Drone battery voltage	15 V
Drone flying time	20 mins
Drone speed	16 m/s

1. Performance evaluation according to the number of MDTs

그림 3과 4는 각각 MDT의 수 변화에 따른 누적 정전 노드 수와 드론이 수집한 데이터양을 보여준다. Fixed 기법과 Random 기법은 정해진 수의 MDT를 구성하므로 MDT 수의 변화에 따라 정전 노드 수와 수집된 데이터양에 차이가 있다. 반면, 그 외의 기법들은 적응적으로 MDT 수를 선택하므로, 미리 설정된 MDT 수의 변화에 무관하게 일정한 성능을 보여준다.

그림 4에서 Fixed 기법과 Random 기법은 MDT의 수가 증가함에 따라 수집되는 데이터양이 많이 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 MDT의 수가 증가할수록 데이터 전송 횟수가 줄어서 중계 노드의 전송 부담이 줄기 때문이다. 그에 비해 그림 3에서 전체 정전 노드 수는 MDT 수가 30개 이상 증가하면 변화가 거의 없는데, 이는 중계 노드가 정전됨에 따라 다른 노드가 데이터를 전송할 수 없으므로 전송을 하지 않아 에너지가 남기 때문이다. Clustering, Previous 기법과 제안된 기법은 MDT 수를 적응적으로 조절하므로 미리 설정된 MDT의 수의 변화에 영향을 받지 않는다. 특히 제안된 기법은 이전의 다른 기법들에 비해 자료수집량이 더 높은 것을 볼 수 있다. 이는 Previous 기법이 대략적인 데이터만을 이용하여 MDT 수를 결정하는데 비해 제안된 기법은 더 정확한 정보를 바탕으로 MDT를 결정하여 더 많은 데이터를 효율적으로 수집하는 것을 볼 수 있다.

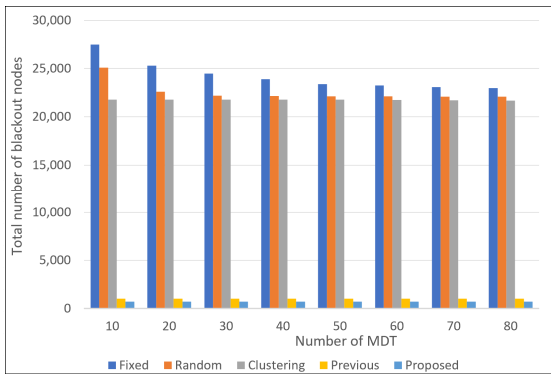


Fig. 3. Comparison of the Total Number of Blackout Nodes According to the Number of MDTs

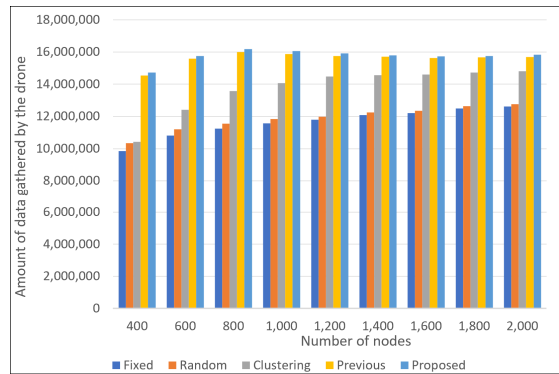


Fig. 4. Comparison of the Amount of Data Gathered by the Drone According to the Number of Nodes

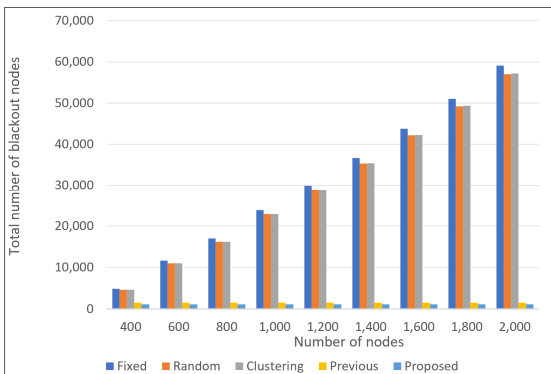


Fig. 5. Comparison of the Total Number of Blackout Nodes According to the Number of Nodes

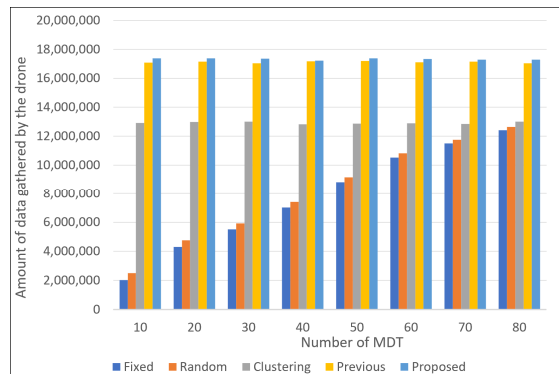


Fig. 6. Comparison of the Amount of Data Gathered by the Drone According to the Number of MDTs

또한 Previous 기법과 비교해, 센서 노드의 정보를 한 라운드당 1가지 더 수집하는 아주 적은 오버헤드가 추가되지만, 더 많은 자료를 수집한 것으로 보아, Previous 기법에 비해 더 우수한 것을 알 수 있었다.

2. Performance evaluation according to the number of nodes

그림 5과 6는 각각 전체 센서 노드 수의 변화에 따른 누적 정전 노드 수와 드론이 수집한 데이터양을 보여준다. 전체적으로 노드 수가 증가하면 정전 노드가 증가하고 자료수집량도 약간 증가하는 것을 볼 수 있다.

그림 5에서 Fixed, Random, 그리고 Clustering 기법은 전체 노드 수가 증가함에 따라 정전 노드 수도 급격히 증가하는 것을 볼 수 있는데, 이는 노드 수가 증가하면 전송 횟수가 증가하므로 중계 노드의 전송 부담이 커지기 때문이다. 반면, Previous 기법과 제안 기법은 전체 노드 수와 관계없이 적은 수의 정전 노드가 발생했다. 이는 이 두 기법이 드론과 센서 노드의 에너지 상태를 고려하여 적극적으로 동작했기 때문으로, 두 기법 모두 센서 노드 수의 변화에 잘 적응한 것으로 보인다. 그림 6에서 Fixed,

Random, 그리고 Clustering 기법의 수집된 데이터 수는 노드 수가 많아짐에 따라 조금씩 증가하지만, 노드 수에 비례하지 않는 것을 볼 수 있다. 이는 중계 노드의 정전으로 인해 많은 노드의 데이터가 드론에 도달하지 못했기 때문이다. 다른 두 기법의 자료수집량은 정전 노드가 거의 발생하지 않음에도 불구하고 전체 노드 수가 800개 일 때까지 점차 증가하다가 1,000개 이상일 때는 비슷한 수준으로 유지되는 것을 볼 수 있다. 이는 각 노드가 에너지를 고려하여 자료수집량을 할당했기 때문이다. 그 중, 제안 기법은 더 정확한 정보로 자료수집량을 할당하여 Previous 기법보다 더 많은 자료를 수집한 것을 볼 수 있다.

위와 같이, 우리는 제안된 기법의 성능을 측정하기 위해 MDT의 수와 전체 센서 노드 수의 변화에 따른 정전 노드 수와 자료수집량을 비교했다. 성능 측정 결과 제안된 기법은 정전 노드를 거의 발생시키지 않으면서 더 많은 자료를 수집할 수 있었다. 그 이유는 제안 기법이 전체 센서 노드의 정보를 각 라운드 시작 전에 수집하여, 더 정확하게 효율적인 MDT를 구성하고 자료수집량을 할당했기 때문이다. 특히 우리의 이전 기법보다 향상된 MDT 구성으로 더욱 많은 자료를 수집할 수 있었다.

V. Conclusions

제안된 기법에서 각 센서 노드는 드론과 센서 노드의 에너지 상황을 고려하여 MDT를 구성하고, 자식 노드에 자료수집량을 할당함으로써 핫스팟에 있는 센서 노드의 에너지 고갈을 억제하였고, 그 결과 모든 노드가 고르게 자료를 수집하고, 전체적으로 자료수집량이 증가했다. 시뮬레이션 결과, 제안 기법에서는 정전 노드가 거의 발생하지 않았고, 다른 기법에 비해 더 많은 자료를 수집하는 것을 확인할 수 있었다. 특히, 무분별한 감지를 억제함으로써 센서 노드의 에너지 소모와 중계 노드의 중계 부하를 줄임으로써 정전 발생을 효과적으로 억제했다. 향후, 말단 노드의 남은 에너지를 활용한 데이터 중복 전송으로 어려움을 낮춰서 데이터를 더 효과적으로 전송하는 방법을 연구할 것이다.

ACKNOWLEDGEMENT

This work was supported by the National Research Foundation of Korea(NRF) grant funded by the Korea government(MSIT) (NRF-2021R1F1A1060864).

REFERENCES

- [1] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, "Wireless sensor networks: a survey," *Computer networks*, vol. 38, no. 4, pp. 393-422, Mar. 2002, [https://doi.org/10.1016/S1389-1286\(01\)00302-4](https://doi.org/10.1016/S1389-1286(01)00302-4).
- [2] N. Temene, C. Sergiou, C. Georgiou, and V. Vassiliou, "A survey on mobility in wireless sensor networks," *Ad Hoc Networks*, vol. 125, p. 102726, Feb. 2022, <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2021.102726>.
- [3] X. Lu, P. Wang, D. Niyato, D. I. Kim, and Z. Han, "Wireless networks with rf energy harvesting: A contemporary survey," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 17, no. 2, pp. 757-789, Nov. 2014, <https://doi.org/10.1109/COMST.2014.2368999>.
- [4] J. Eidaks, R. Kusnins, D. Kolosovs, R. Babajans, D. Cirjulina, P. Krukovskis, and A. Litvinenko, "Multi-hop rf wireless power transfer for autonomous wireless sensor network," *Proceedings of 2022 Workshop on Microwave Theory and Techniques in Wireless Communications*, pp. 51-56, Riga, Latvia, Oct. 2022, <https://doi.org/10.1109/MTTW56973.2022.9942525>.
- [5] Y. Yu and Q. Cheng, "Charging strategy and scheduling algorithm for directional wireless power transfer in wsrns," *Alexandria Engineering Journal*, vol. 61, no. 10, pp. 8315-8324, Oct. 2022, <https://doi.org/10.1016/j.aej.2022.01.060>.
- [6] T. D. P. Perera, S. Panic, D. N. K. Jayakody, P. Muthuchidambaramanathan, and J. Li, "A wpt-enabled uav-assisted condition monitoring scheme for wireless sensor networks," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 22, no. 8, pp. 5112-5126, Sep. 2020, <https://doi.org/10.1109/TITS.2020.3018493>.
- [7] F. Sangare, Y. Xiao, D. Niyato, and Z. Han, "Mobile charging in wireless powered sensor networks: Optimal scheduling and experimental implementation," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 66, no. 8, pp. 7400-7410, Feb. 2017, <https://doi.org/10.1109/TVT.2017.2668990>.
- [8] T. Olivares, P. Tirado, L. Orozco-Barbosa, V. López, and P. Pedrón, "Simulation of power-aware wireless sensor network architectures," *Proceedings of the ACM international workshop on Performance monitoring, measurement, and evaluation of heterogeneous wireless and wired networks*, pp. 32-39, Terromolinos, Spain, Oct. 2006, <https://doi.org/10.1145/1163653.1163661>.
- [9] V. Agarwal, S. Tapaswi, and P. Chanak, "A survey on path planning techniques for mobile sink in IoT-enabled wireless sensor networks," *Wireless Personal Communications*, vol. 119, pp. 211-238, Mar. 2021, <https://doi.org/10.1007/s11277-021-08204-w>.
- [10] H. Kim, Y. Seok, N. Choi, Y. Choi, and T. Kwon, "Optimal multi-sink positioning and energy-efficient routing in wireless sensor networks," *International conference on information networking*, pp. 264-274, 2005, https://doi.org/10.1007/978-3-540-30582-8_28.
- [11] I. Yoon, "Data Acquisition Control for UAV-Enabled Wireless Rechargeable Sensor Networks," *Sensors*, Vol. 23, No. 7, Mar. 2023, <https://doi.org/10.3390/s23073582>.
- [12] J. Xu, Y. Zeng, and R. Zhang, "Uav-enabled wireless power transfer: Trajectory design and energy optimization," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 17, no. 8, pp. 5092-5106, May 2018, <https://doi.org/10.1109/TWC.2018.2838134>.
- [13] J. Chen, C. W. Yu, and W. Ouyang, "Efficient wireless charging pad deployment in wireless rechargeable sensor networks," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 39 056-39 077, Feb. 2020, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2975635>.
- [14] Y. Wang, M. Hua, Z. Liu, D. Zhang, B. Ji, and H. Dai, "Uav-based mobile wireless power transfer systems with joint optimization of user scheduling and trajectory," *Mobile Networks and Applications*, pp. 1-15, Nov. 2019, <https://doi.org/10.1007/s11036-019-01398-1>.
- [15] M. Zhang and W. Cai, "Data Collecting and Energy Charging Oriented Mobile Path Design for Rechargeable Wireless Sensor

Networks," *Journal of Sensors*, vol. 2022, <https://doi.org/10.1155/2022/5004507>.

- [16] Y. Son, M. Kang, Y. Kim, I. Yoon, and D. K. Noh, "Energy-efficient cluster management using a mobile charger for solar-powered wireless sensor networks". *Sensors*, vol. 20, no. 13, pp. 3668, 2020, <https://doi.org/10.3390/s20133668>.
- [17] A. Cammarano, C. Petrioli and D. Spenza, "Pro-Energy: A novel energy prediction model for solar and wind energy-harvesting wireless sensor networks," *Proceedings of the 9th International Conference on Mobile Ad-Hoc and Sensor Systems, USA*, pp. 75-83, Las Vegas, NV, 2012, doi: 10.1109/MASS.2012.6502504.
- [18] D. K. Noh, and K. Kyungtae, "Balanced energy allocation scheme for a solar-powered sensor system and its effects on network-wide performance," *Journal of Computer and System Sciences*, Vol. 77, No. 5, 917-932, Sep. 2011, <https://doi.org/10.1016/j.jcss.2010.08.008>.
- [19] J. M. Yi and I. Yoon, "Efficient energy supply using mobile charger for solar-powered wireless sensor networks," *Sensors*, vol. 19, no. 12, p. 2679, Jun. 2019, <https://doi.org/10.3390/s19122679>.
- [20] I. Yoon, D. K. Noh, "Adaptive Data Collection Using UAV With Wireless Power Transfer for Wireless Rechargeable Sensor Networks," *Access*, Vol. 10, pp. 972-9743, Jan, 2022, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3144846>.
- [21] J. M. Yi, M. J. Kang, and D. K. Noh, "Solarcastalia: solar energy harvesting wireless sensor network simulator," *International Journal of Distributed Sensor Networks*, vol. 11, no. 2, pp. 1-10, Jan. 2015, <https://doi.org/10.1155/2015/415174>.
- [22] K. N. Park, I. Yoon, "An Efficient Energy Charging Scheme for Wireless Sensor Networks Using a Mobile Sink Capable of Wireless Power Transmission," *Journal of The Korea Society of Computer and Information*, vol. 24, no. 5, pp. 1-9, May 2019, <https://doi.org/10.9708/jksoci.2019.24.05.001>.

Authors



Ikjune Yoon received the B.S. degree in Computer engineering from Jeonbuk National University, Korea, in 2005, and Ph.D. degree in Computer Science and Engineering from Seoul National University, Korea, in 2015.

He is currently an assistant professor in Division of AI Computer Science and Engineering at Kyonggi University. His research interests include cyber-physical systems and internet of things.



Dong Kun Noh received the B.S., M.S. and Ph.D. degrees in Computer Science and Engineering from Seoul National University, Korea, in 2000, 2002, and 2007, respectively. He is currently a professor in School of AI

Convergence, Soongsil University. His primary research interests include cyber-physical system, mobile computing, and internet of things.