

## 드론 기반 무선 센서 네트워크에서의 커버리지와 에너지를 고려한 드론 배치

김태림\*, 송종규, 임현재, 김범수  
LIG 넥스원

### Drone Deployment Using Coverage-and-Energy-Oriented Technique in Drone-Based Wireless Sensor Network

Tae-Rim Kim\*, Jong-Gyu Song, Hyun-Jae Im, Bum-Su Kim  
LIG Nex1

**요약** 무선 센서 네트워크는 적은 비용이 들고 낮은 전력으로 구동할 수 있는 센서들이 넓은 범위에 분포한 네트워크이다. 이때 센서들이 주변의 환경을 감시하고 계속한 정보들을 인근의 센서들에게 멀티홉 방식으로 전송하여 최종적으로 모든 데이터들이 베이스 스테이션으로 보내지는 네트워크가 무선 센서 네트워크이다. 여기서 무선 센서 네트워크에 대한 대부분의 연구는 한 위치에 고정되어 주변을 감시하는 정적 센서가 주가 되어왔다. 하지만 정적 센서만으로 이루어진 네트워크와 달리, 드론을 이용하여 네트워크를 구성하게 된다면 네트워크의 전체 커버리지와 에너지 소모를 보다 효율적으로 관리할 수 있다. 본 논문에서는 네트워크를 이루는 드론들에 대한 환경을 모델링하기 위해 전송 전력 모델과 비디오 인코딩 모델을 수식화하여 소개한다. 또한 드론의 효율적인 배치를 위하여 우선순위 지도를 설계하고, 이를 기반으로 커버리지와 에너지를 고려하여 드론들을 배치하는 방식을 보여준다. 다양한 시뮬레이션을 통하여 정적 센서 기반의 네트워크보다 드론 기반의 무선 센서 네트워크에서 더 적은 수의 센서로 커버리지를 증가시키고 소모되는 에너지는 줄여준다는 것을 보여준다. 구체적으로는 정적 센서와 드론의 수가 동일한 가운데 커버리지는 최대 30 퍼센트의 향상이 있고, 에너지 측면에서는 평균 25 퍼센트의 전체 네트워크의 에너지 소모를 줄이면서도 정적 센서 네트워크와 드론 기반 네트워크의 커버리지가 동일하게 유지됨을 보여준다.

**Abstract** Awireless sensor network utilizes small sensors with a low cost and low power being deployed over a wide area. They monitor the surrounding environment and gather the associated information to transmit it to a base station via multi-hop transmission. Most of the research has mainly focused on static sensors that are located in a fixed position. Unlike a wireless sensor network based on static sensors, we can exploit drone-based technologies for more efficient wireless networks in terms of coverage and energy. In this paper, we introduce a transmission power model and a video encoding power model to design the network environment. We also explain a priority mapping scheme, and deploy drones oriented for network coverage and energy consumption. Through our simulations, this research shows coverage and energy improvements in adrone-based wireless sensor network with fewer sensors, compared to astatic sensor-based wireless sensor network. Concretely, coverage increases by 30% for thedrone-based wireless sensor network with the same number of sensors. Moreover, we save an average of 25% with respect to the total energy consumption of the network while maintaining the coverage required.

**Keywords** : Drone Deployment, Unmanned Aerial Vehicle, Wireless Sensor Network, System Modeling, Network Coverage, Network Energy, Priority Mapping

\*Corresponding Author : Tae-Rim Kim(LIG Nex1)

email: taerim.kim@lignex1.com

Received May 20, 2019

Accepted August 2, 2019

Revised June 12, 2019

Published August 31, 2019

## 1. 서론

최근 수십 년 동안 비행체 소재의 경량화, 비행제어 알고리즘의 발전, 이미지 센서 및 MEMS 센서 등의 계측 기술의 약진, 집적 회로의 소형화 및 고집적화, 무선 데이터링크를 통한 비행체 제어의 안정화, 무인 환경에서의 자율비행기술 성장 등으로 소형 무인 비행체인 드론의 활용도는 점점 증가하고 있다. 드론은 무인으로 지상에서 원격조종 하거나 자율비행을 통해 주위의 환경을 인식하여 감시하고, 계측된 데이터들을 지상의 베이스 스테이션과 통신하는 무인 비행기(UAV: Unmanned Aerial Vehicle)이다. 하나의 드론을 이용하여 좁고 제한적인 범위를 관측할 수도 있지만, 수십 대의 드론들이 무선 센서 네트워크를 구성하여 넓은 범위에서 발생하는 다양한 이벤트를 동적으로 신속하게 관측하는 방법도 있다. 기존의 정적인 센서를 통한 주변 환경 계측에는 커버리지에 제한이 있지만 드론을 이용하게 되면 정적 센서를 구축하기 힘든 환경에서의 커버리지를 극대화하게 된다. 이를 통해 혹독한 환경에서 운용되어야 하는 국방 분야, 신속한 구축을 통해 주변 환경을 모니터링 해야 되는 조기 경보 시스템 등에서 드론을 실용적으로 적용할 수 있다 [1][2][3].

드론을 이용한 무선 센서 네트워크에서 최소한의 수로 감시 구역의 커버리지를 최대화하여 이벤트 감지 확률을 향상시켜주는 등의 드론에 대한 최적의 배치를 찾는 여러 기법들이 연구되어왔다. 세 가지 계층의 센서로 구성되어 계층적으로 주변 환경을 계측하는 네트워크 구조가 제안되었다[4]. 지상 또는 지하에 다수로 고정되어 한정적인 자원을 소모하며 주변을 감시하는 1단계 센서, 충분한 에너지를 보유하여 고속으로 데이터를 처리하는 소수의 2단계 센서, 추가적인 커버리지를 확보하고 하위단계의 정보를 이용하여 감지된 이벤트를 추적하는 3단계 센서로 이루어진다. 드론은 3단계 센서의 역할을 하며 1, 2 단계에서 획득한 정보를 이용하여 특정 구역 내에서 발생한 이벤트를 지속적으로 추적하는 방식을 소개하였다. 지향성 안테나를 장착한 드론에서 네트워크의 수명을 길게 가져가는 동시에 커버리지도 최대화하기 위해서 다운링크의 커버리지 확률을 계산하였다[5]. 이를 기반으로 드론의 최적의 위치를 결정하였으며, 이는 드론의 수와 안테나 이득 및 빔폭에 영향을 받는 것을 보여주었다. 또한 다수의 드론이 사용되는 무선 네트워크 환경에서 지상 사용자와 드론 사이의 스케줄링 및 연관성, 드론의 비행궤적, 데이터 전송 전력이 동시에 고려된 연구가 발표

되었다[6]. 이때 사용자 사이에서 처리될 수 있는 최소의 데이터양을 최대화하는 알고리즘을 제시하였다. 이를 통해 기존의 정적 센서만 사용된 네트워크에 비해서 드론의 동적 이동이 통신 채널을 보다 효과적으로 사용하게 만들며 센서 간 전파 방해를 완화시켜주는 유동성을 제공해주게 되어 전체적으로 무선 네트워크의 효율성이 증가되는 것을 확인할 수 있었다.

무선 센서 네트워크에서 드론을 적용한 여러 논문들이 발표되었지만 대부분의 제안에서는 드론이 부가적인 용도로 사용되었다. 본 연구에서는 드론으로만 구성된 무선 센서 네트워크에서 커버리지와 에너지를 고려하여 배치하는 방법에 대해서 알아본다. 2장에서는 무선 센서 네트워크에서의 문제를 정의하고 3장에서는 네트워크 환경에서의 여러 전력 모델들을 설명한다. 4장에서는 이를 활용하여 드론을 배치하는 방법에 대해 소개하고 5장에서는 4장의 알고리즘을 통해 도출된 결과를 검증하고 분석한다. 마지막으로 6장에서는 본 연구의 결론으로 끝을 마무리한다.

## 2. 문제 정의

특정 구역 내에서 우리가 관심을 가지고 있는 이벤트들이 빈번하게 발생하고 있다고 가정을 해보자. 전장(battlefield)과 같이 안정적인 전원을 공급하기 어렵고 고정된 감시 시스템을 설치할 수 없는 지역에서는 드론을 이용하여 주변을 감시하는 방법이 하나의 대안이 된다. 주변의 이벤트를 감시하며 데이터를 계측하는 동시에 이렇게 계측된 데이터를 지상 멀리에 떨어져있는 베이스 스테이션으로 전송한다. 하지만 이럴 경우 관심 대상을 계측하며 소모하는 에너지양과 계측된 데이터를 전송하며 소모하는 에너지양이 매우 많기 때문에, 배터리로 구동되어야 하는 드론 기반 무선 센서 네트워크의 수명은 짧아진다. 특히나 우리가 관심을 가지고 있는 대상의 정보를 비디오 데이터로 가공할 경우는 더욱 심각하다. 따라서 드론의 역할을 두 가지로 구분하여 설계할 필요가 있다. 하나는 주변 환경에 대한 계측 역할이 주목적인 계측 드론(measurement drone,  $D_M$ )이며, 다른 하나는 여러 계측 드론으로부터 데이터를 모두 받아들이는 수집 드론(acquisition drone,  $D_A$ )으로 베이스 스테이션으로 데이터를 전송한다. Fig. 1에서 보는 것처럼 계측 드론은 다수로 존재하여 주변에서 발생하는 이벤트를 감지해 계측하고, 생성된 데이터를 가까운 거리에 있는 수집

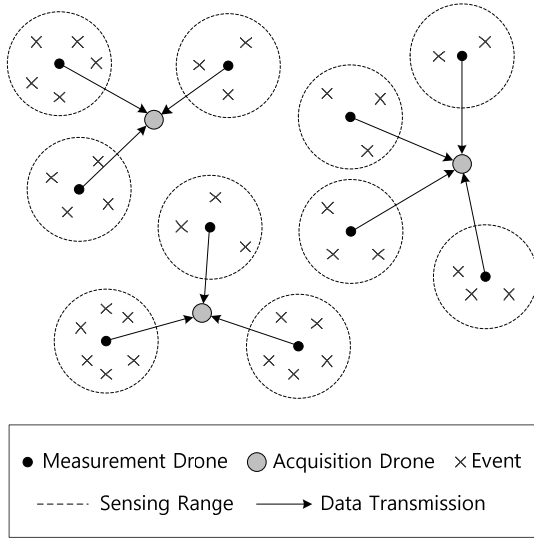


Fig. 1. Drone-based wireless sensor network

드론으로 전송한다. 수집 드론은 소수로 존재하여 계측 드론으로부터 수집된 데이터를 먼 거리에 있는 베이스 스테이션으로 전송한다.

여기서 이벤트의 발생 지점이 고정적이지 않고 시간에 따라 변화하기 때문에, 무선 네트워크를 효율적으로 구축하기 위해 계측 드론과 수집 드론을 어떻게 배치해야 하는가에 대한 문제가 발생한다. 계측 드론의 경우 적은 수의 드론으로 감시를 해야 하는 지역을 가능한 넓게 해주어야 하는 커버리지 문제가 있다. 그리고 수집 드론의 경우 계측 드론이 계측한 데이터를 가능한 최소의 에너지로 수집 드론으로 전송할 수 있는 곳에 위치할 수 있도록 하는 에너지의 문제가 있다. 본 설계에서는 계층적 구조를 가진 드론 기반의 무선 네트워크에서 커버리지와 에너지를 고려하여 계측 드론과 수집 드론을 배치하는 방식에 대해서 알아본다.

### 3. 네트워크 환경 모델링

#### 3.1 전송 전력 모델

송신기와 수신기 간 데이터를 주고받는데 있어서 두 사이 채널에서의 전송은 LOS(Line-Of-Sight) 링크와 NLOS(Non-Line-Of-Sight) 링크를 통해 이루어진다. 드론을 이용한 무선 센서 네트워크 환경에서는 공중에 위치한 드론 간의 통신이기 때문에 대부분의 링크는 LOS 링크로 이루어진다. 하지만 다량의 드론이 활용되

거나 드론이 저고도에서 비행(LAP: Low Altitude Platform)하는 경우 주변 지형, 지물의 영향으로 전파의 반사나 회절이 발생하여 NLOS 링크도 이루어진다. 이러한 링크를 통해  $D_M$ 과  $D_A$  사이에 경로 손실이 발생하며 이는 다음과 같이 정의한다[7].

$$L(D_M, D_A) = \begin{cases} |d(D_M, D_A)|^\alpha, & \text{LOS link} \\ \eta |d(D_M, D_A)|^\alpha, & \text{NLOS link} \end{cases} \quad (1)$$

여기서  $L$ 은 경로 손실(path loss),  $|d(D_M, D_A)|$ 는  $D_M$ 과  $D_A$  사이의 거리,  $\alpha$ 는 채널 링크에서의 경로 손실 지수(path loss exponent),  $\eta$ 는 NLOS 링크에 의한 추가적인 감쇄 인수(attenuation factor)이다. 그리고  $d(D_M, D_A)$ 는 다음과 같이 정의한다.

$$\begin{aligned} d(D_M, D_A) \\ = \sqrt{(x_{D_M} - x_{D_A})^2 + (y_{D_M} - y_{D_A})^2 + (h_{D_M} - h_{D_A})^2} \end{aligned} \quad (2)$$

$x_{D_M}, y_{D_M}, h_{D_M}$ 과  $x_{D_A}, y_{D_A}, h_{D_A}$ 는 각각  $D_M$ 과  $D_A$ 에 대한 데카르트 좌표(Cartesian coordinate)이다. LOS 링크와 NLOS 링크는 주변 환경,  $D_M$ 과  $D_A$  사이의 위치, 고도각(elevation angle)에 따라 변화한다. LOS 링크와 NLOS 링크가 발생할 확률  $P_{LOS}$ ,  $P_{NLOS}$ 는 각각 다음과 같다[8].

$$P_{LOS} = \frac{1}{1 + A \exp(-B(\theta - A))} \quad (3)$$

$$P_{NLOS} = 1 - P_{LOS} \quad (4)$$

$$\theta = \frac{180}{\pi} \times \arcsin\left(\frac{|h_{D_M} - h_{D_A}|}{d(D_M, D_A)}\right) \quad (5)$$

여기서  $A$ 와  $B$ 는 주변환경(suburban, urban, dense urban, high-rise urban)에 따라 변하는 상수들이며  $\theta$ 는 고도각을 의미한다.  $D_M$ 과  $D_A$ 가 같은 고도각에 위치하고 있더라도 주변 환경에 따라  $P_{LOS}$ 와  $P_{NLOS}$ 는 변하게 되고, 같은 환경에 있는 상황이라고 해도 고도각에 따라 마찬가지로 큰 차이를 보여준다. 예를 들어 높은 건물이 없는 교외 지역(suburban)의 경우 고도각이  $20^\circ$ 만 되어도  $P_{LOS}$ 가 거의 1에 근접하지만 도심 지역(urban)은 고도각이  $50^\circ$ 는 되어야 한다. 이렇게 정의된 여러 수식들로부터 평균적인 경로 손실(average path loss)인  $\bar{L}(D_M, D_A)$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \bar{L}(D_M, D_A) & \quad (6) \\ & = P_{LOS} |d(D_M, D_A)|^\alpha + \eta P_{NLOS} |d(D_M, D_A)|^\alpha \end{aligned}$$

마지막으로  $D_M$ 에서  $D_A$ 로 데이터를 전송하기 위해 필요한 송신 전력(transmission power)  $P_t(D_M, D_A)$ 는 다음과 같다[9].

$$P_t(D_M, D_A) = (2^{\beta/W} - 1) N_0 \bar{L}(D_M, D_A) \quad (7)$$

$W$ 는  $D_M$ 의 송신 주파수(transmission bandwidth),  $\beta$ 는  $D_A$ 의 필요 수신 속도(rate requirement),  $N_0$ 는 잡음 전력(noise power)이다. 즉  $D_A$ 에서  $\beta$ 의 데이터 수신 속도를 만족하기 위해  $D_M$ 에서는  $W$ 의 대역폭을 가지고 전송해야하며 이때  $P_t(D_M, D_A)$  만큼의 전력이 필요하다. 이때 전력은  $\bar{L}(D_M, D_A)$ 의 영향을 받는다. 즉  $D_M$ 과  $D_A$ 의 위치가 중요하게 되며 거리가 멀수록 경로 손실이 증가하기 때문에 더 많은 전력을 소모해야만 한다.

### 3.2 비디오 인코딩 전력 모델

본 논문에서는 계측 드론이 이미지 센서를 이용하여 주변을 감시하는 시스템을 설계한다. 발생한 이벤트를 감지하고 이를 지속적으로 인코딩을 하여 수집 드론으로 인코딩된 데이터를 전송한다. 이때 데이터를 전송하는데 소모되는 전력과 더불어 감지한 이벤트를 인코딩하면서 소모하는 전력도 상당하다. 하나의 프레임을 인코딩하기 위해 소모되는 평균적인 에너지  $E_{ef}$ 는 다음과 같다[10].

$$E_{ef} = \frac{IC \times CPI \times E_{ec}}{N_f} \quad (8)$$

$IC$ 는 하나의 시퀀스를 인코딩하면서 수행되는 전체 명령어(instruction) 개수,  $CPI$ 는 하나의 명령어를 처리하기 위해 필요한 CPU의 평균 클럭 사이클 수,  $E_{ec}$ 는 한 클럭 사이클에 소모되는 에너지,  $N_f$ 는 인코딩하는 비디오의 프레임 개수를 의미한다.  $IC$ 의 경우 인코더의 파라미터 설정에 따라 변하게 되며, 이러한 파라미터들은 엔트로피 코딩, QP(Quantization Parameter), GOP(Group of Pictures) 사이즈, SR(Search Range) 등이 있다. 또한  $CPI$ 는 이용하는 인코더 프로세서의 아키텍처에 따라서 달라진다. 결론적으로 계측 드론에서 소모되는 비디오 인코딩 전력(encoding power)  $P_{enc}$ 는 다음과 같이 정의된다.

Table 1. Priority mapping scheme

1:	set the size of monitoring area by $X \times Y$
2:	set the sensing range by $R_X \times R_Y$
3:	get Cartesian coordinates $x_{Q(k)}, y_{Q(k)}$ for $Q$
4:	$PL(x_p, y_p) = 0$ for all $x_p, y_p$
5:	<b>for all</b> $k = 1$ to $K$ <b>do</b>
6:	<b>for all</b> $x_p = 1$ to $X, y_p = 1$ to $Y$ <b>do</b>
7:	<b>if</b> $ x_{Q(k)} - x_p  \leq R_X$ & $ y_{Q(k)} - y_p  \leq R_Y$ <b>then</b>
8:	$PL(x_p, y_p) = PL(x_p, y_p) + 1$
9:	<b>end if</b>
10:	<b>end for</b>
11:	<b>end for</b>

$$P_{enc} = E_{ef} \times FPS \quad (9)$$

$FPS$ 는 비디오의 프레임 레이트(frame rate)이다. 비디오 인코딩 전력은 하나의 프레임당 평균 소모 에너지  $E_{ef}$ 와 인코더의  $FPS$ 의 영향을 받는다.

## 4. 드론 배치 기법

### 4.1 우선순위 지도 설계

우리가 관심을 가지는 공간에  $I$ 개의 계측 드론 집합  $\{D_M(1), \dots, D_M(i), \dots, D_M(I)\}$ ,  $J$ 개의 수집 드론 집합  $\{D_A(1), \dots, D_A(j), \dots, D_A(J)\}$ ,  $K$ 개의 이벤트 집합  $\{Q(1), \dots, Q(k), \dots, Q(K)\}$ 이 있다고 가정해보자. 각각의  $D_M$ 은 동일한 계측 범위를 가지고 있으며 이 범위 안에 들어오는  $Q$ 의 개수가 많아질수록 커버리지가 증가한다. 따라서 발생한  $Q$ 에 대하여 계측 범위를 고려하면 우선순위 레벨인  $PL$ 을 결정할 수 있다. 이를 이용하여 우선순위 지도를 설계하고, 이 값들을 기준으로  $D_M$ 을 배치하여 커버리지를 증가시킨다. Table. 1은 우선순위 지도를 작성하는 알고리즘을 보여준다. 그리고 Fig. 2는  $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$  공간에 50개의 이벤트가 발생한 경우, 계측 범위를 고려하여 완성된 우선순위 지도를 보여준다. 색깔이 더 진할수록 계측 드론의 배치에 대한 우선순위가 높아지는 것을 의미한다.

### 4.2 커버리지와 에너지를 고려한 드론의 배치

작성된 우선순위 지도를 통해 드론을 배치하는 방식에

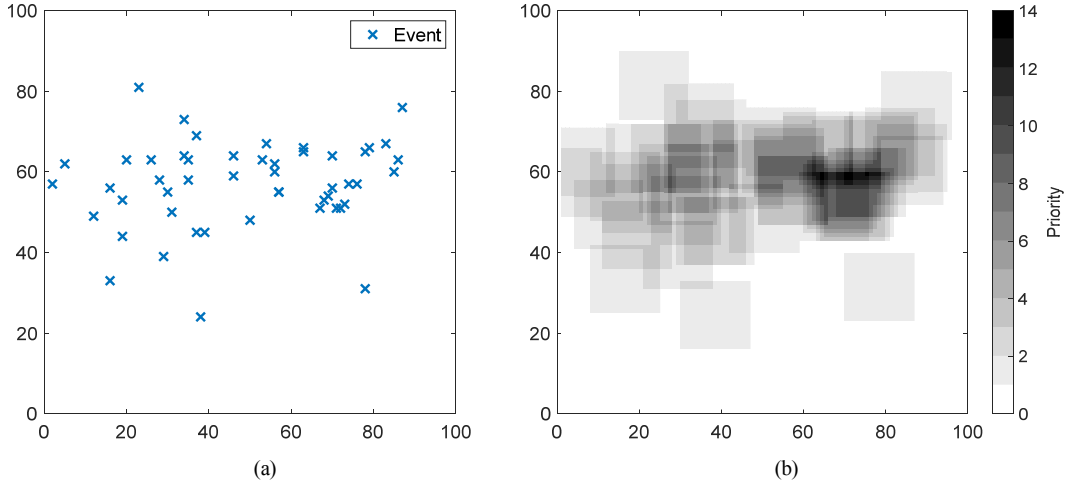


Fig. 2. (a) Events generated on 100 m × 100 m area (b) Priority map for drone deployment

대해서 소개한다. 먼저  $PL$ 이 가장 높은 곳을 선택하여 하나의 계측 드론을 배치한다. 이때 동일한  $PL$ 을 가진 복수의 위치가 존재하게 된다면 배치 후에 계측 범위 밖의  $Q$ 에 대한 분산을 계산하여 분산이 가장 작아지는 곳에 배치한다. 이는  $Q$ 가 밀집해있어 적은 수의 드론을 통해서 커버리지를 향상시킬 수 있기 때문이다. 이를 바탕으로 드론 기반 네트워크에서 소모되는 드론들의 총 에너지  $E_{net}(i, j, k)$ 을 고려하면서 동시에 무선 네트워크에서 필요로 하는 최소의 커버리지인  $c_{min}$ 을 만족하기 위한 알고리즘을 수식화하면 다음과 같다.

$$\text{minimize } E_{net}(i, j, k) \quad (10)$$

$$\text{subject to } \frac{\sum_{k=1}^K c(k)}{K} \geq c_{min} \quad (11)$$

여기서  $E_{net}(i, j, k)$ 와 관련 수식은 다음과 같이 정의된다.

$$E_{net}(i, j, k) = \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I E_{enc}(i, k) c(i, k) + \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I E_t(i, j) l(i, j) \quad (12)$$

$$E_{enc}(i, k) = P_{enc}(D_M(i), Q(k)) T_{enc}(D_M(i)) \quad (13)$$

$$E_t(i, j) = P_t(D_M(i), D_A(j)) T_t(D_M(i)) \quad (14)$$

$$c(i, k) = \begin{cases} 0: Q(k) \text{ is not covered by } D_M(i) \\ 1: Q(k) \text{ is covered by } D_M(i) \end{cases} \quad (15)$$

$$c(k) = \begin{cases} 0: Q(k) \text{ is not covered by drones} \\ 1: Q(k) \text{ is covered by drones} \end{cases} \quad (16)$$

$$l(i, j) = \begin{cases} 0: D_M(i) \text{ is not linked to } D_A(j) \\ 1: D_M(i) \text{ is linked to } D_A(j) \end{cases} \quad (17)$$

$E_{enc}(i, k)$ 는  $D_M(i)$ 가  $Q(k)$ 를 인코딩하면서 소모하는 에너지이고  $E_t(i, j)$ 는  $D_M(i)$ 가  $D_A(j)$ 로 전송하는데 소모하는 에너지이다. 또한  $c(i, k)$ 와  $c(k)$ 는 커버리지와 관련된 부울 변수(boolean variable)이고  $l(i, j)$ 는  $D_M(i)$ 와  $D_A(j)$ 의 통신 연결과 관련된 부울 변수이다.  $T_{enc}$ 와  $T_t$ 는 각각 전송 및 인코딩하는데 소모된 시간이다.

## 5. 시뮬레이션 및 분석

100개의 이벤트가 100 m × 100 m 공간에서 발생하며, 이때 발생하는 이벤트는 2차원 가우시안 분포(Gaussian distribution)를 따른다. 계측 드론은 지상 10 m 이하의 고도에 배치되며, 수집 드론은 지상 100 m 높이까지 이동이 가능하다. 계측 드론의 경우 주변 10 m × 10 m 공간의 이벤트를 감지하여 계측한다. 주변환경(dense urban)에 따른 경로 손실 관련 상수  $\alpha$ 는 2,  $\eta$ 는 100이며  $A$ 는 11.9,  $B$ 는 0.13으로 설정한다[9]. 또한 통신 속도와 관련하여  $\beta$ 는 1 Mbps,  $W$ 는 50 MHz로 한다. 비디오 인코딩에서  $IC$ 는  $19 \times 10^9$ 개의 명령어로 이때 인코더의 설정은 QP는 34, GOP 사이즈는 2, SR은 2이다. 또한  $CPI$ 는 인텔의 XScale 프로세서로부터 얻

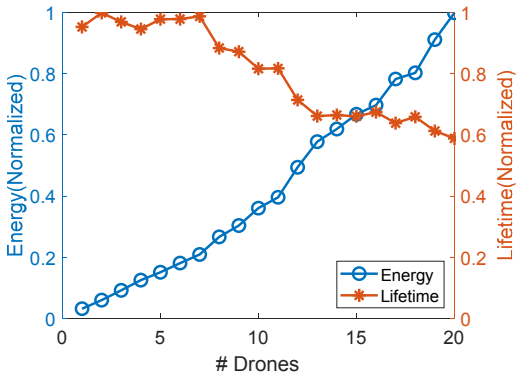


Fig. 3. Energy consumed and lifetime with the number of drones( $D_M$ )

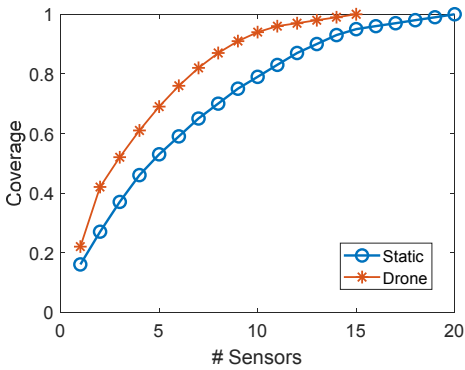


Fig. 4. Coverage versus the number of static sensors and drone sensors

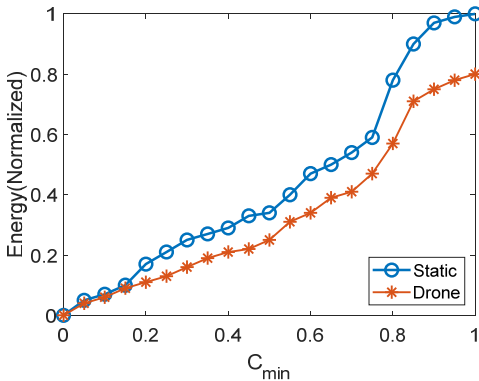


Fig. 5. Energy consumed versus minimum network coverage ( $c_{min}$ ) for static sensors and drone sensors

어진 값인 1.78,  $E_{ec}$ 는 1.215 nJ, FPS는 50 MHz로 설정한다[10].

Fig. 3는 계측 드론  $D_M$ 의 개수에 따른 소모되는 총

에너지와 네트워크의 수명을 보여주고 있다. 이때 보여주는 수치들은 정규화된 값들이다. 계측 드론의 개수가 많아질수록 주변을 감지하며 인코딩 해야 되는 이벤트의 수가 증가하고, 이를 수집 드론으로 전송해야 하는 데이터의 양도 많아진다. 따라서 소모되는 에너지의 양도 지속적으로 증가한다. 반대로 네트워크 수명의 경우 계측 드론의 개수가 적을 때는 1에 가까운 수치를 보여주지만, 개수가 증가함에 따라 점점 감소하다가 20개가 되었을 때는 0.6까지 된다. 이는 비디오 인코딩으로 소모되는 에너지보다 수집 드론으로 데이터를 전송하는데 소모되는 에너지가 많은데, 계측 드론이 많아질수록 네트워크의 커버리지가 증가하며 전송 에너지가 비디오 인코딩 에너지보다 네트워크 수명에 더 큰 영향을 주기 때문이다. 그래프에서 볼 수 있듯이 네트워크의 수명은 계측 드론의 개수가 많아질수록 감소하는 경향을 보이지만 13개 이후에는 큰 차이를 보이지 않는다. 따라서 어떠한 시스템에서 요구되는 커버리지가 높지 않다면 드론의 개수를 조절함으로써 네트워크의 수명을 증가시킬 수 있다. Fig. 4는 드론 기반의 네트워크와 정적 센서 기반의 네트워크에서의 센서 수에 따른 커버리지의 변화를 보여준다. 정적 센서 네트워크에서는 감시하고자 하는 공간에 동일한 간격으로 센서들이 배치된다. 그림에서 볼 수 있듯이 드론 기반 네트워크의 경우 15개의 드론으로 모든 이벤트를 감지하게 되며, 정적 센서 기반 네트워크의 경우 20개의 센서가 필요하다. 즉 드론을 이용한 네트워크에서는 기존의 네트워크보다 더 적은 수로 동일한 범위를 효율적으로 감지한다. 개수가 6~8개일 때는 드론 기반 네트워크에서의 커버리지가 정적 센서 네트워크에서 보다 최대 0.17이 커 약 30%의 향상을 보여준다. Fig. 5는 네트워크에서 요구하는 최소의 커버리지인  $c_{min}$ 에 따른 드론 기반의 네트워크와 정적 센서 네트워크에서 소모되는 에너지를 보여준다.  $c_{min}$ 이 작은 경우에는 큰 차이를 보이지 않으나  $c_{min}$ 이 증가함에 따라 차이도 점점 증가하여 평균적으로 25%의 차이를 보여준다. 이는 2차원 가우시안 분포를 가지는 이벤트의 발생 특성상  $c_{min}$ 이 작으면 드론과 정적 센서의 수가 차이가 나지 않아 소모되는 에너지도 차이가 없기 때문이다. 하지만  $c_{min}$ 이 증가하면서 드론이 정적 센서보다 효율적 배치를 이루며 네트워크를 형성하여 에너지 소모도 감소한 것을 의미한다.

## 6. 결론

본 논문에서는 드론 기반의 무선 네트워크 환경에서 커버리지와 에너지를 고려하여 드론을 효율적으로 배치하는 방식에 대해서 알아보았다. 여기서 드론 네트워크의 환경을 모델링하기 위하여 전송 전력 모델과 비디오 인코딩 모델을 소개하였다. 또한 드론을 효율적으로 배치하기 위하여 우선순위 지도를 설계하였으며 이를 통해 커버리지와 에너지를 고려하는 방식도 알아보았다. 마지막으로 시뮬레이션을 통해서 기존의 정적 센서 네트워크보다 커버리지와 에너지 측면에서 향상된 결과를 확인하였다.

이번 연구에서는 주어진 정적 이벤트에 대하여 드론을 배치해 보는 방식에 대해서 알아보았다. 하지만 이를 현실에 적용하기 위해서 극복해야 할 여러 문제점들이 있다. 첫 번째, 정적 이벤트 보다는 시간에 따라 변화하는 동적 이벤트에 대해 런타임 상황에서 배치하는 방식을 연구해 보는 것이 실용적이다. 두 번째, 제안한 방식을 적용하여 드론을 운용하기 위해서는 자율주행의 높은 신뢰성이 필요하다. 하지만 드론이 군집을 이루어 네트워크를 형성할 때, 각 드론이 이상적이고 독립적으로 동작하며 주변에 영향을 미치지 않는다고 기대하기 어렵다. 세 번째, 드론의 경우 기존의 정적 센서에 비해 고비용이기 때문에 군사적인 측면에서는 적용할 수 있으나 현실적으로 실생활에 사용하기는 어렵다. 따라서 이러한 문제점들을 해결하기 위한 방법들이 추후 연구되어야 할 과제가 될 것이다.

## References

- [1] Y. Gu, F. Ren, Y. Ji, J. Li, "The Evolution of Sink Mobility Management in Wireless Sensor Networks: A Survey", *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, Vol.18, No.1, pp.507-524, First Quarter 2016. DOI: <https://doi.org/10.1109/COMST.2015.2388779>
- [2] E. P. De Freitas, T. Heimfarth, A. Vinel, F. R. Wagner, C. E. Pereira, T. Larsson, "Cooperation among Wirelessly Connected Static and Mobile Sensor Nodes for Surveillance Applications", *Sensors*, Vol.13, No.10, pp.12903-12928, Oct. 2013. DOI: <https://doi.org/10.3390/s131012903>
- [3] D. Orfanus, E. P. De Freitas, F. Eliassen, "Self-Organization as a Supporting Paradigm for Military UAV Relay Networks", *IEEE Communications Letters*, Vol.20, No.4, pp.804-807, Apr. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1109/LCOMM.2016.2524405>
- [4] Z. Sun, P. Wang, M. C. Vuran, M. A. Al-Rodhaan, A. M. Al-Dhelaan, I. F. Akyildiz, "BorderSense: Border patrol through advanced wireless sensor networks", *Ad Hoc Networks*, Vol.9, No.3, pp.468-477, May 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2010.09.008>
- [5] M. Mozaffari, W. Saad, M. Bennis, M. Debbah, "Efficient Deployment of Multiple Unmanned Aerial Vehicles for Optimal Wireless Coverage", *IEEE Communications Letters*, Vol.20, No.8, pp.1647-1650, Aug. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1109/LCOMM.2016.2578312>
- [6] Q. Wu, Y. Zeng, R. Zhang, "Joint Trajectory and Communication Design for Multi-UAV Enabled Wireless Networks", *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Vol.17, No.3, pp.2109-2121, Mar. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1109/TWC.2017.2789293>
- [7] A. Al-Hourani, S. Kandeepan, A. Jamalipour, "Modeling Air-to-Ground Path Loss for Low Altitude Platforms in Urban Environments", *IEEE Global Communications Conference*, IEEE, Austin, TX, USA, pp.2898-2904, Dec. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1109/GLOCOM.2014.7037248>
- [8] A. Al-Hourani, S. Kandeepan, S. Lardner, "Optimal LAP Altitude for Maximum Coverage", *IEEE Wireless Communications Letters*, Vol.3, No.6, pp.569-572, Dec. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1109/LWC.2014.2342736>
- [9] M. Mozaffari, W. Saad, M. Bennis, M. Debbah, "Optimal Transport Theory for Power-Efficient Deployment of Unmanned Aerial Vehicles", *IEEE International Conference on Communications*, IEEE, Kuala Lumpur, Malaysia, pp.1-6, May 2016. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICC.2016.7510870>
- [10] B. A. B. Sarif, M. T. Pourazad, P. Nasiopoulos, V. C. M. Leung, "Encoding and communication energy consumption trade-off in H.264/AVC based video sensor network", *IEEE 14th International Symposium on "A World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks" (WoWMoM)*, IEEE, Madrid, Spain, pp.1-6, Jun. 2013. DOI: <https://doi.org/10.1109/WoWMoM.2013.6583407>

김 태 림(Tae-Rim Kim)

[정회원]



- 2009년 2월 : 서강대학교 전자공학 (공학사)
- 2011년 2월 : 한국과학기술원 전기및전자공학과 (공학석사)
- 2011년 1월 ~ 현재 : LIG 빅스원 선임연구원

<관심분야>

임베디드 시스템, 시스템 엔지니어링

송 종 규(Jong-Gyu Song)

[정회원]



- 2011년 2월 : 한양대학교 전자통신공학과 (공학사)
- 2013년 7월 ~ 현재 : LIG 넥스원 선임연구원

<관심분야>

디지털 회로 설계, VHDL, 임베디드 SW

---

임 현 재(Hyun-Jae Im)

[정회원]



- 2013년 8월 : 인하대학교 정보통신공학과 (공학사)
- 2013년 7월 ~ 현재 : LIG 넥스원 선임연구원

<관심분야>

실시간 시스템, 임베디드 SW, 운영체제

---

김 범 수(Bum-Su Kim)

[정회원]



- 2005년 2월 : 광운대학교 전자재료공학과 (공학사)
- 2007년 8월 ~ 현재 : LIG 넥스원 수석연구원

<관심분야>

임베디드 시스템, 시스템 엔지니어링