

정소이, 김송, 김태윤, 김중헌\*, 김재현‡  
아주대학교 전자공학과, \* 고려대학교 전기전자공학부

sogloomy@ajou.ac.kr, ks5109@ajou.ac.kr, xodbsxogjs@ajou.ac.kr, joongheon@korea.ac.kr, jkim@ajou.ac.kr

## Two-Stage Energy-Efficient Optimal Drone Scheduling

Soyi Jung, Song Kim, Tae-Yoon Kim, Joongheon Kim\*, and Jae-Hyun Kim‡

Department of Electrical and Computer Engineering, Ajou University,

\*School of Electrical Engineering, Korea University

### 요약

본 논문에서는 고정된 지점을 호버링하는 감시드론과 주어진 궤도를 이동하는 정찰드론, 그리고 무선전력전송이 가능한 충전타워가 존재하는 네트워크 환경에서 드론 간 감시영역의 중첩면적을 판단하는 알고리즘을 제시한다. 이를 통해 에너지 효율 관점에서 활성화 드론을 결정하기 위한 최대 가중치 독립 집합 문제를 설계하고, 이를 신뢰전파 알고리즘으로 해결한다. 또한, 비활성화 드론과 무선충전타워 간 충전 스케줄링 및 충전 에너지 최대화를 위한 문제를 최적화 수식으로 설계한다.

선택하고 충전량을 결정하는 스케줄링을 수행한다. 본 연구에서는 모든 충전타워와 드론을 조정할 수 있고, 제안하는 알고리즘을 연산할 수 있는 중앙관제시스템이 있다고 가정한다.

### I. 서론

최근 5G와 차세대 5G를 위한 네트워크 구조에 대하여 다양한 논의가 진행되고 있다. 그 중, 드론이나 자율주행 시스템은 네트워크 확장이 용이하고 유연성 있는 운영을 가능하게 하여 다양한 분야에서 주목 받고 있다. 그러나 이러한 시스템들은 안정적이고 지속적인 전원을 공급하기 어렵기 때문에 전적으로 배터리에 의존하여 설계되는 등 한계가 존재한다. 최근 상용화되어 나오는 드론 플랫폼은 모터와 프로펠러의 힘으로 움직이게 되어 전력 소모가 크기 때문에 비행시간은 20~30분 남짓으로 매우 짧다. 반면에, 에너지 충전시간은 비행시간 대비 최대 2배 이상으로 더 많은 시간이 필요하기 때문에 장시간 비행이 필요한 경우에는 사용상 제약이 많다. 드론이 주어진 임무를 효과적으로 수행하고자 드론의 비행 시간 향상 및 효율적인 에너지 운영 측면에서 데이터 수집 최적화, 드론 위치 최적화, 드론 비행 경로 최적화 등 다양한 알고리즘이 구체적으로 제시되고 있다 [1]. 이러한 알고리즘들은 드론 내부적으로 에너지의 소모를 최적화하거나 네트워크를 수행할 때 효율적인 동작을 하게 하는 방법 (방법1: 내부적 해결)이 있는 반면, 개별드론을 충전시킬 수 있는 네트워크 구조를 설계하고 이를 기반으로 효율적인 충전을 수행하게 하는 방법 (방법2: 외부적 해결)도 존재한다 [1].

본 논문에서는 위의 두 가지 관점에 근거하여, 내부적 방법으로는 드론이 감시(surveillance) 목적으로 사용될 때에 중첩영역을 감시하고 있으면 하나의 드론만을 활성화 시켜 다른 드론들의 에너지를 절약하는 방법을 제안함과 동시에 외부적 방법으로는 드론 기반 시스템을 지속 가능하게 운영하기 위한 무선충전타워를 기반으로 한 네트워크 구조에서 충전 스케줄링을 최적화한다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어있다. 2장에서는 제안하는 알고리즘의 구체적인 동작방식에 대해서 서술한다. 3장에서는 해당 알고리즘의 성능평가를 다각도로 수행한다. 마지막으로 4장에서는 본 논문을 결론짓는다.

### II. 제안하는 알고리즘

본 논문에서 제안하는 드론 스케줄링 알고리즘은 2단계로 구성된다. 1단계에서는 드론 간 생성되는 감시영역에서 중첩되는 면적과 배터리 잔량을 고려하여 어떤 드론을 선택할지에 대한 드론 활성화 스케줄링을 수행한다. 2단계에서는 1단계에서 비활성화된 드론들의 무선충전을 위해 전체 충전량을 최대로 하기 위한 충전타워를

### II.I. 드론 활성화 스케줄링 알고리즘

감시드론은 비행고도와 카메라의 시야각에 따라 원형의 개별 감시구역이 생성된다. 고정드론과 궤도를 이동하는 정찰드론이 혼재되어 있는 네트워크 환경에서 다수의 감시구역이 동시에 생성될 경우 중첩영역이 발생할 수 있다. 감시구역의 중첩영역 면적은 드론의 이동에 따라 변화하며, 중첩영역 면적이 증가함에 할수록 동일한 구역의 중복 촬영으로 인해 에너지의 낭비가 발생한다. 본 연구에서는 중첩구역이 발생한 감시드론 간의 양립 가능성을 판단하고자 한다. 이를 위해 먼저 무방향 그래프  $G = (V, E)$ 를 생성한다. 모든 감시드론은 vertices로 표현하고, 감시드론의 감시 구역에서 기준 이상의 중첩영역이 발생하는 경우, vertices를 연결하는 edge를 생성한다. 감시드론의 현재 배터리 잔량은 weight로 부여한다. 최종적으로 그래프의 정점 집합 중 두 정점을 연결하는 간선이 존재하지 않는 가중치의 합이 최대가 되는 부분집합을 선택하는 문제 (MWIS: maximum weight independent set)로 변환한다 [2].

일반적으로 MWIS 문제는 NP-hard이며, 본 논문에서는 이를 해결하기 위해 간선 사이의 지역적인 메시지를 반복적으로 주고 받아 최대 사후확률을 도출하는 신뢰전파 (belief-propagation) 알고리즘 기법을 사용하였다. 메시지를 주고 받는 iteration에서 각 정점은 간선으로 연결된 이웃 노드마다 확률변수의 분포함수에 대한 정보를 담은 메시지를 전송한다. 이 메시지는 메시지를 받은 노드를 제외한 나머지 이웃 노드로부터 이전 iteration에서 받은 메시지를 기반으로 계산된다. 메시지가 모두 교환되면 각 노드에서는 해당 확률변수에 대해 belief라는 사후분포를 계산하게 된다. 메시지가 iteration을 거듭하여 그래프 전체로 정보가 전달되는 마지막 iteration에서의 안정화된 belief와 노드가 가지고 있는 weight 크기를 비교한다. 이때, weight가 belief 보다 크다면 해당 드론은 활성화 드론이 되고, belief가 weight보다 크다면 해당 드론은 비활성화 드론으로 간주한다.

### II.II. 비활성화 드론의 무선충전타워 스케줄링 알고리즘

본 논문에서는 일정한 거리에 있는 드론에게 무선전력전송이 가능한 무선충전타워가 배치되어 있다고 가정한다. 지정된 단위시간마다 1단계에서 도출된 결과로서 활성화 드론은 본래의 감시임무를 수행하게 되고, 나머지 비활성화 드론은 카메라를 끄고 배터리 충전을 위해 하나의 무선충전타워를 선택하고 충전량을 결정해야 하며, 이는 다음 최적화 수식 (1)-(7)로 표현된다.

‡ 교신저자

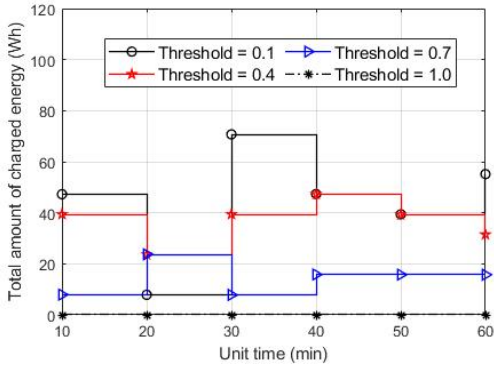


Figure 1: 비활성화 드론들이 단위시간당 충전타워로부터 공급받는 충전 에너지량

$$\begin{aligned}
 \max : & \sum_{c_i \in C} \sum_{d_j \in D} e_{(i,j)}[t] \cdot x_{(i,j)}[t] \\
 \text{s.t.} & \sum_{d_j \in D} e_{(i,j)}[t] \cdot x_{(i,j)}[t] \leq C_i^{\max}[t], \forall c_i \in C \\
 & \sum_{d_j \in D} x_{(i,j)}[t] \leq n_i, \forall c_i \in C \\
 & \sum_{c_i \in C} x_{(i,j)}[t] \leq 1, \forall d_j \in D \\
 & e_{(i,j)}[t] \leq \max\{\delta_j - E_j^{tr}[\Delta t_{tr}], 0\}, \forall c_i \in C, \forall d_j \in D \\
 & e_{(i,j)}[t] \geq 0, \forall c_i \in C, \forall d_j \in D \\
 & x_{(i,j)}[t] \in \{0, 1\}, \forall c_i \in C, \forall d_j \in D.
 \end{aligned}
 \tag{1-7}$$

수식 (7)에서  $x_{(i,j)}$ 는 충전타워  $c_i$ 와 비활성화 드론  $d_j$  간 연결 유무를 결정하는 스케줄링 벡터이다. 수식 (6)에서  $e_{(i,j)}$ 는 드론  $d_j$ 가 충전타워  $c_i$ 로부터 전달 받는 충전 에너지를 의미하고, 이는 수식(5)에서 단위시간동안 충전가능한 최대에너지  $\delta_j$ 에서 충전타워까지 왕복 비행하는데 필요한 에너지  $E_j^{tr}$ 를 제외한 값보다 같거나 작다. 여기서  $\Delta t_{tr}$ 는 충전타워까지의 거리를 고려하여 계산한 왕복비행시간을 의미하고, 드론의 추진에너지를 고려하여 비행에너지를 계산한다 [3]. 수식 (4)는 모든 드론이 하나의 충전타워로만 연결이 가능함을 나타내며, 수식 (3)은 각각의 충전타워에 동시에 수용할 수 있는 드론의 수는 최대  $n_i$ 임을 의미한다. 수식 (2)에서 충전타워  $c_i$ 는 최대  $C_i^{\max}$ 만큼의 에너지까지만 충전 가능함을 나타낸다. 최종적으로 수식 (1)은 비활성화 드론과 충전타워간의 가능한 모든 연결 조합 중에서 충전 받을 수 있는 에너지의 최대값을 의미한다. 최적화 수식 (1)–(7)을 통해 최종적으로 충전타워와 드론간 충전 스케줄링과 충전량을 결정한다. 1단계와 2단계를 포함한 전체 알고리즘은 매 단위시간마다 동작한다.

### III. 성능분석

성능분석을 위해  $1299 \times 750$  m 크기의  $3 \times 3$  맨하튼 도심 지도를 가정하고, 지도 위에 25 m 간격으로 격자형태의 기준점을 생성한다. 기준점은 드론 중첩영역의 면적을 판단하는 기준으로 사용한다. 지도의 동서남북 방향으로 4대의 충전타워가 설치되어 있고 각각의 충전타워는 2개의 충전패널을 가지고 있다고 가정한다. 정중앙에는 비행 중인 드론을 통제하는 지상관제시스템이 있으며, 지상관제시스템에서는 모든 드론을 동시에 충전할 수 있는 충분한 수의 충전패널이 있다고 가정한다. 드론의 비행고도는 150 m이며 카메라 시야각은  $84^\circ$ 로 가정한다. 고정된 지점을 호버링하는 고정 드론은 10개, 단위 시간마다 포인트를 이동하는 정찰드론은 5대로 가정한다. 드론의 배터리 에너지는 89.2 Wh를 가정한다.

그림 1과 그림 2에서 Threshold는 제안하는 알고리즘의 1단계에서 간선을 생성하기 위해 중첩을 판단하기 위한 기준으로, 드론의 평균 감시구역 크기 대비 중첩영역 비율을 의미한다. Threshold가

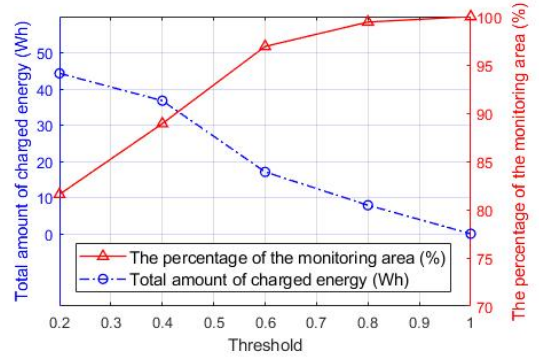


Figure 2: 제안하는 알고리즘에서 비활성화 드론이 생성됨에 따라 기존 대비 축소되는 평균 감시구역의 비율과 평균 에너지 충전량

작을수록 노드 간 간선이 많아지고, 전체 그래프에서 선택할 수 있는 정점의 수가 줄어든다. 이는 전체 드론에서 활성화된 드론의 수가 적어지는 현상을 초래하여, 상대적으로 충전타워로 스케줄링이 필요한 비활성화된 드론 수를 증가시킨다. 반대로 최대값인 1의 경우, 모든 드론이 활성드론으로 간주되어 알고리즘을 적용하지 않은 기존 방식과 동일하다. Threshold가 0.1, 0.4, 0.7일 때, 15대 드론 중 평균 비활성화 드론 수는 5.7, 4.7, 1.8 대이다.

그림 1은 단위시간 10 분마다 비활성화 드론들이 충전타워를 결정하여 해당 충전타워로부터 충전 받은 에너지 양이다. 기존방식은 모든 단위시간에서 충전량이 0인 반면, 제안방식은 Threshold와 시간에 따라 충전 에너지 양이 달라진다. 그림 2에서 좌측은 기존 방식 대비 모니터링 가능한 구역의 평균 면적을 나타내고, 우측은 비활성화 드론이 단위시간마다 충전타워로부터 받은 평균량을 나타낸다. 비활성화 드론이 많을수록 충전량은 증가하여 에너지 효율측면에서 우수하지만, 반대로 모니터링 면적은 감소하는 절충관계가 도출된다. 제안하는 알고리즘은 기존 대비 최소 80 %이상의 감시구역은 보장하면서 최대 약 45 Wh 충전이 가능하다.

### IV. 결론

본 연구에서는 무선충전타워가 구축된 감시드론 시스템에서 에너지 효율 측면에서 감시영역의 중첩을 줄이면서 배터리 잔량을 고려한 드론 활성 스케줄링을 설계하였으며, 그 결과를 이용하여 비활성화 드론의 충전타워와 충전량을 최대로 하는 최적화 문제를 해결하였다. 비활성화 드론이 많아질수록 전체 감시구역의 면적은 줄어들지만, 드론의 비행에너지를 절약할 뿐만 아니라 무선충전타워로부터의 에너지를 받아오기 때문에 장시간 촬영이 필요한 환경에 특히 용이하다.

### 사사문구

본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 대학ICT 연구센터지원사업의 연구결과로 수행되었음(IITP-2020-2017-0-01637).

### 참고문헌

- [1] M. Shin, J. Kim, and M. Levorato, "Auction-based charging scheduling with deep learning framework for multi-drone networks," *IEEE Trans. Vehicular Technology*, vol. 68, pp. 4235–4248, May 2019.
- [2] J. Kim, G. Caire, and A. F. Molisch, "Quality-aware streaming and scheduling for device-to-device video delivery," *IEEE/ACM Trans. Networking*, vol. 24, pp. 2319–2331, August 2016.
- [3] Y. Zeng and R. Zhang, "Energy minimization for wireless communication with rotary-wing UAV," *IEEE Trans. Wireless Communi.*, vol. 18, pp. 2329–2345, April 2019.