

IoT 노드 데이터 지원을 위한 UAV 운용 최적화 기법 분석

박민승, 주민수, 김명보, 정중문*

연세대학교 전기전자공학과, 연세대학교 전기전자공학과, 연세대학교 전기전자공학과, *연세대학교 전기전자공학과

alex35@yonsei.ac.kr, jooms91@yonsei.ac.kr, kmb0168@yonsei.ac.kr, *jmc@yonsei.ac.kr

Optimizing UAV Operation for IoT nodes in Downlink Networks

Minseung Park, Minsoo Joo, Myoungbo Kim, Jong-Moon Chung*

Yonsei Univ Electrical and Electronic Engineering, Yonsei Univ Electrical and Electronic Engineering, Yonsei Univ Electrical and Electronic Engineering, *Yonsei Univ Electrical and Electronic Engineering

요약

최근 급격히 늘어난 Internet of Things(IoT) 기기의 효율적인 통신을 지원하기 위해 다양한 방법이 제안되고 있다. 그 중 Unmanned Aerial Vehicle(UAV)을 이용한 통신은 높은 기동성과 유연성으로 인하여 관심이 커지고 있다. 본 논문에서는 UAV를 이용하여 다수의 IoT 노드를 효율적으로 지원 가능한 최적의 위치, 빔폭 및 높이, 경로를 계산한다. K-means 기법과 최적화 문제, traveling salesman problem (TSP) 기법을 이용하여 UAV 운용 최적화를 연구하였다.

I. 서론

5G와 6G에서 다수의 IoT 기기들을 지원하기 위한 massive Machine Type Communication(mMTC)은 최근 주목받고 있다. 이러한 mMTC는 전송속도 혹은 지연시간보다 저전력의 다수의 기기를 효과적으로 지원할 수 있는 기술이 필수적이다. 높은 유연성을 지닌 Unmanned Aerial Vehicle(UAV)을 이용한 통신은 mMTC에 효과적이다. UAV를 이용한 Internet of Things(IoT) 기기 지원을 활용하기 위해선 UAV의 경로, 빔폭 등 운용 변수를 최적화하는 과정이 필수적이다. 이에 본 논문에서는 클러스터링과 최적화 문제 해결을 이용해 UAV의 궤도, 높이, 빔폭 등을 최적화하는 최적 UAV 운용 알고리즘을 소개한다.

II. 본론

1. 시스템 모델

본 논문에서는 다수의 IoT 기기에 필요한 데이터를 UAV가 최적의 경로를 통해 지원하는 환경을 고려한다. 1대의 UAV를 고려하여 계산된 위치와 높이에서 호버링하며 데이터를 전송한다. 다수의 IoT 노드는 각각의 요구 데이터양이 정해져 있다. 모든 IoT 노드에게 데이터를 전송한 후 초기 위치로 돌아오는 데에 소요되는 시간을 최소화하는 것이 목표이다.

UAV와 j 번째 IoT 기기의 line-of-sight(LoS)와 non line-of-sight(NLoS) 확률은 식 (1), (2)와 같다 [1].

$$\begin{aligned} Prob_{LoS}(q_{UAV}, q_{IoT,j}) &= \frac{1}{1 + a \exp(-b(\theta(q_{UAV}, q_{IoT,j}) - a))} \quad (1) \\ Prob_{NLoS}(q_{UAV}, q_{IoT,j}) &= 1 - Prob_{LoS}(q_{UAV}, q_{IoT,j}) \quad (2) \end{aligned}$$

a 와 b 는 환경에 따른 매개 변수이며, $\theta(q_{UAV}, q_{IoT,j})$ 는 UAV와 j 번째 IoT 노드의 각도, q_{UAV} 와 $q_{IoT,j}$ 는 각각 UAV와 IoT 기기의 위치이다. UAV와 IoT 노드의 각도는 식(3)과 같이 UAV와 IoT 기기의 거리 $d(q_{UAV}, q_{IoT,j})$ 를 이용해 계산한다.

$$\theta(q_{UAV}, q_{IoT,j}) = \frac{180}{\pi} \times \tan^{-1} \frac{H_{UAV}}{d(q_{UAV}, q_{IoT,j})} \quad (3)$$

LoS 확률과 무선 링크 손실을 고려한 경로 손실은 식(4)와 같다.

$$\begin{aligned} PL_{\xi}(q_{UAV}, q_{IoT,j}) [dB] \\ = 20 \log \left(\frac{4\pi f d(q_{UAV}, q_{IoT,j})}{c} \right) + \eta_{\xi}, \forall \xi \in \{LoS, NLoS\} \quad (4) \end{aligned}$$

경로 손실을 이용한 IoT 노드의 수신 주파수 효율은 식 (5)이다 [2].

$$C_j(q_{UAV}, q_{IoT,j}, \theta) = \log_2 \left(1 + \frac{P_T G(\theta) 10^{\frac{PL(q_{UAV}, q_{IoT,j})}{10}}}{\sigma_n^2} \right) \quad (5)$$

안테나 gain $G(\theta)$ 는 식(6)과 같다 [2].

$$G(\theta) = \begin{cases} \frac{G_0}{\theta^2}, & \text{if } \frac{\pi}{2} - \theta \leq \theta \leq \frac{\pi}{2} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

식 (5)를 이용해 i 번째 위치와 안테나 각도에서 데이터 전송에 필요한 시간 τ_i^h 는 호버링 위치 i 에서 지원 가능한 M 개의 노드들의 데이터 전송 시간 $f(q_i, q_{IoT,j}, \theta_i)$ 을 고려한 식(7)을 이용해 나타낸다.

$$\tau_i^h = \max_{j:z_j=q_i} f(q_i, q_{IoT,j}, \theta_i) = \max_{j:z_j=q_i} \left(\frac{R_j^e}{B \cdot C_j(q_i, q_{IoT,j}, \theta_i)} \right), \quad (j = 1, \dots, M, i = 1, \dots, N) \quad (7)$$

Algorithm 1: Proposed Algorithm for UAV operation

```

1: Initialize: set  $H_0 = H_{max}$ ,  $\theta_0 = \theta_{max}$ , number of IoT nodes  $M, N = 0$ .
2: repeat
3:   Update  $N = N + 1$ , set  $s = 0, r = 0$ .
4:   Set  $N$  initial point by K-means and Ball cut.
5:   repeat
6:     Update  $r = r + 1$ .
7:     With fixed allocation of nodes, solve problem(P2) and obtain optimal coordinate of UAV.
8:   until  $r = N$ 
9:   Break and go to 3 when some nodes are outside all coverage.
10:  With fixed coordinates of nodes, solve problem (P3) and obtain optimal  $H$  and  $\theta$  of UAV.
11:  Obtain hovering time  $T_{tot}^{h,N}$  for all cluster.
12:  Obtain moving time  $T_{tot}^{f,N}$  using TSP based on coordinate of UAV.
13:  Obtain operation time  $T_{tot}^N = T_{tot}^{h,N} + T_{tot}^{f,N}$ .
14: until  $N = M$ 
15: Obtain  $T_{tot} = \max(T_{tot}^N)$ .

```

그림 1. UAV 운용 알고리즘

R_j^e 는 j 번째 노드의 요구 데이터 양이며, B 는 채널에 할당된 대역폭이다.

2. 최적화

식(7)을 이용하여 본 논문에서 최적화하고자 하는 식 (P1)은 다음과 같이 나타낸다.

$$\underset{q_i, \theta_i, N}{\text{minimize}} T_{tot}^h + T_{tot}^f \quad (P1)$$

$$s. t. N \in \mathbb{N} \quad (8a)$$

$$H_{min} \leq H_i \leq H_{max}, \forall i \in \{1, \dots, N\} \quad (8b)$$

$$\theta_{min} \leq \theta_i \leq \theta_{max}, \forall i \in \{1, \dots, N\} \quad (8c)$$

$$q_0 = q_{N+1} \quad (8d)$$

T_{tot}^h 는 호버링에 소요되는 시간으로 식(7)을 이용하여 계산할 수 있고, T_{tot}^f 는 UAV의 이동 시간으로 호버링 위치를 거치는 최적 경로를 통해 계산한다.

문제의 단순화를 위해 호버링 위치 최적화, UAV 빔폭 및 높이 최적화, UAV 이동 경로 최적화로 분리하여 Block coordinate descent 기법을 이용하여 해결하였다.

3. Block coordinate descent

무선 링크 경로 손실은 거리에 비례하여 증가하기 때문에 호버링 위치 최적화를 위해 거리를 고려한 K-means 클러스터링 기법을 이용해 해결한다. 각 IoT 노드를 K-means 클러스터링으로 묶은 뒤 (P2)를 해결하여 각 cluster에서 최소의 호버링 시간을 가지는 위치를 계산한다.

$$\underset{x_i, y_i}{\text{minimize}} \sum_{i=1}^N \tau_i^h \quad (P2)$$

$$s. t. x_i \geq 0 \quad (9a)$$

$$y_i \geq 0 \quad (9b)$$

또한 안정적인 클러스터링을 위해 일정 거리 이상의 시작 노드를 선택하는 ball-cut 기법 [3]을 사용하였다.

최적의 빔폭과 높이를 계산하기 위해 식(7)에서의 노드들의 데이터 전송 시간 $f(q_i, q_{IoT,j}, \theta_i)$ 을 이용한 (P3)를 해결한다.

$$\underset{\theta_i}{\text{minimize}} \max_j f_i \left(\frac{r_{max}}{\tan \theta_i}, \theta_i \right) \quad (P3)$$

$$s. t. H_{min} \leq H_i \leq H_{max}, \forall i \in \{1, \dots, N\} \quad (10a)$$

$$\theta_{min} \leq \theta_i \leq \theta_{max}, \forall i \in \{1, \dots, N\} \quad (10b)$$

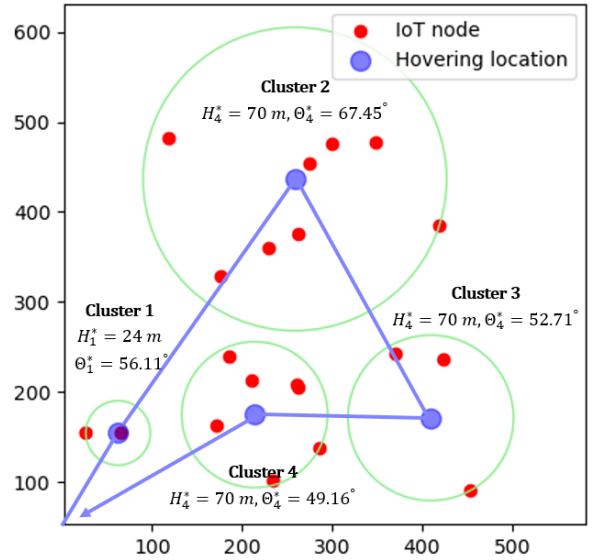


그림 2. 제안 알고리즘 실험 결과

마지막으로 각 호버링 위치를 거친 최적의 경로를 계산하기 위해 traveling salesman problem(TSP) 기법을 사용한다. 전체 알고리즘은 그림 1과 같다.

4. 실험 결과

그림 2는 알고리즘의 성능을 확인한 모의실험 결과이다. 본 실험에서 $600m \times 600m$ 의 환경에서 Uniform 분포를 따르게 배치된 IoT 노드의 수는 20개, $P = 30 \text{ dBm}$, $\sigma_n^2 = -82 \text{ dBm}$, $f = 2 \text{ GHz}$ 의 환경변수를 사용하였다.

실험 결과 UAV의 높이와 빔폭 제한 내에서 최적의 호버링 위치와 경로를 찾은 것을 확인하였다. 높이와 빔폭을 최적화하여 클러스터 내부의 모든 노드를 지원하며 최고의 데이터 전송 속도를 구현하였다. 총 운용 시간은 456.8 초로 클러스터의 수가 5개일 때 525 초, 10개일 때 912 초, 15개일 때 1286 초인 것과 비교하여 가장 짧은 운용시간을 소모한 것을 확인하였다.

III. 결론

본 논문에서는 다수의 IoT 기기의 무선 통신 지원을 위해 UAV를 운용하는 시스템에서 최적의 UAV 위치, 빔폭, 높이, 경로를 최적화하는 알고리즘을 소개하고 있다.

참고 문헌

- [1] M. Alzenad, A. El-Keyi, F. Lagum, and H. Yanikomeroglu, "3-D Placement of an Unmanned Aerial Vehicle Base Station (UAV-BS) for Energy-Efficient Maximal Coverage," *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 6, no. 4, pp. 434-437, Aug. 2017.
- [2] Z. Yang *et al.*, "Joint Altitude, Beamwidth, Location, and Bandwidth Optimization for UAV-Enabled Communications," *IEEE Communications Letters*, vol. 22, no. 8, pp. 1716-1719, Aug. 2018.
- [3] H. Kim, H. K. Kim, and S. Cho, "Improving spherical k-means for document clustering: Fast initialization, sparse centroid projection, and efficient cluster labeling," *Expert Systems with Applications*, vol. 150, Jul. 2020.