

UAV 기반 센서 네트워크에서의 데이터 하베스팅을 위한 최적 속도 제어 기법

문혜진, 빈경민, 김수민, 김준수*

한국공학대학교

mhj7121603@tukorea.ac.kr, been1996@tukorea.ac.kr, suminkim@tukorea.ac.kr, *junsukim@tukorea.ac.kr

Optimal Speed Control for Data Harvesting in UAV Based Sensor Network

Hyejin Moon, Gyoungmin Been, Su Min Kim, Junsu Kim*

Tech University Of Korea

요약

본 논문은 에너지 제약이 존재하는 UAV 기반 센서 네트워크 환경에서 데이터 수집 효율을 극대화하기 위한 UAV 비행 속도 제어 기법을 제안한다. UAV는 센서 노드에서 데이터를 수집하고, Access Point (AP)로 전송하는 경로를 따라 비행하며, 이동 구간과 통신 구간을 분리한 Move-and-Communicate 구조를 따른다. 본 연구에서는 UAV의 에너지 소비 모델을 고려하여 비행 속도에 따른 에너지 소모와 데이터 전송 효율을 함께 분석한다. 또한 시뮬레이션을 통해 UAV가 AP 구간에서 센서 구간보다 낮은 속도로 비행할 때, 에너지 효율성과 throughput이 최적이 되는 속도를 확인한다. 이를 통해 2단계 속도 제어 방식은 제한된 에너지 자원 하에서도 데이터 수집 성능을 향상시킬 수 있음을 보여준다.

I. 서론

도심 및 농업 등 다양한 분야에서 Internet of Things (IoT) 디바이스를 활용한 사물인터넷 기술에 대한 많은 연구가 진행되고 있다. 기지국은 IoT 디바이스를 작동하기 위해 하향 링크로 신호를 보내고, IoT 디바이스로부터 센서 정보 등과 같은 데이터를 포함한 상향 링크 신호를 수신한다 [1]. 하지만 IoT 디바이스가 설치된 부지가 넓어지면 기지국과의 직접적인 통신이 불가능하다. 따라서 무인항공기(Unmanned Aerial Vehicles, UAV)를 중계기로 활용한 무선통신 시스템이 제안되었다. UAV는 기지국과의 피더 링크를 통해 데이터를 주고받으며 IoT 디바이스와는 서비스 링크를 통해 데이터를 주고받는다. 하지만 UAV의 수가 제한되기 때문에 Delay-Tolerant Network (DTN)을 기반으로 한 무선 통신 시스템을 구현해야 한다. 기존의 연구에서는 단순히 센서 노드의 수만 고려하여 UAV가 센서 노드의 데이터를 수집한 후 Access Point (AP)에서 비행 속도를 센서 노드의 수만큼 줄이는 방식으로 IoT 디바이스들의 평균 throughput을 증가시키는 방식을 제안하였다[2]. 하지만 단순히 센서 노드의 수만 속도를 조절하는 방식은 UAV의 에너지 소모량을 고려하지 않은 방식이다. 따라서 본 논문에서는 UAV의 에너지 잔량과 각각의 동작으로 인한 에너지 소모량을 적용하여 단순한 환경이 아닌 에너지를 고려한 환경에서의 시뮬레이션을 구현한다. 또한 UAV의 속도와 AP에서의 감속비율에 따른 throughput을 비교하여 최적의 속도를 분석한다.

II. 시스템 모델

본 논문의 사용하는 시스템 모델은 그림 1과 같이 1대의 UAV가 원형 궤도를 따라 센서 구간과 AP 구간을 순환하며 비행한다. UAV가 비행하는 경로에는 3개의 센서 노드와 1개의 AP가 포함된다. UAV는 센서 구간에서 일정 속도 v_{sen} 로 이동하며 센서 노드로부터 데이터를 수집하고, AP 구간에서는 UAV의 속도가 α ($0 < \alpha < 1$)만큼 감소된 v_{AP} 의 속도로 이동하며 UAV가 센서 구간에서 수집한 데이터를 AP로 전송한다.

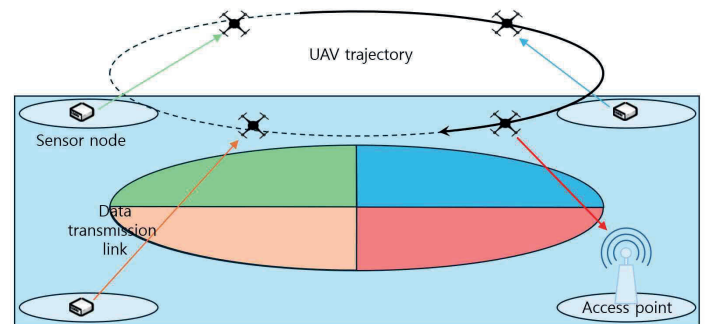


그림 1. 시스템 모델.

III. 제안하는 기법

본 논문에서 제안하는 기법은 그림 2와 같이 Move-and-Communicate 구조를 기반으로 데이터를 수집하고 전송하는 시스템 모델을 고려한다. 통신의 역할을 수행하는 홀수 슬롯에서, UAV는 정지 상태로 호버링하며 데이터를 송수신한다. 이때 센서 구간에서는 센서로부터 데이터를 수집하며 AP구간에서는 AP로 데이터를 전송한다. 짝수 슬롯에서 UAV는 이동 동작을 수행한다.

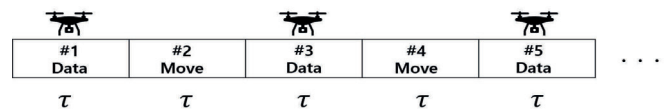


그림 2. Move-and-Communicate 구조.

또한, UAV와 센서 또는 AP간의 채널 모델은 Free Space Path Loss(FSPL)와 Rayleigh fading 채널로 모델링되며, 데이터 전송률은 Shannon capacity 공식을 기반으로 다음과 같다.

$$rate = \lfloor \tau \cdot B \cdot \log_2(1 + SNR) \rfloor, \quad (1)$$

이때 τ 는 time slot이며 B 는 대역폭이다. 센서로부터 전송된 데이터는 UAV 내부의 버퍼(queue)에서 수집한 뒤, AP 구간에서 이를 순차적으로 전송한다.

IV. 성능 평가

시뮬레이션은 위에서 제안한 기법을 사용하며 UAV의 배터리 소모를 반영한 에너지 모델을 포함한다. UAV가 속도 v 로 비행할 때 사용되는 전력 모델은 다음과 같다[3].

$$P(v) = c_1 v^3 + \frac{c_2}{v}, \quad (2)$$

이때 c_1 은 기생 전력 계수, c_2 는 유도 전력으로 이를 속도에 따른 에너지 소모량으로 그리면 그림 3과 같다.

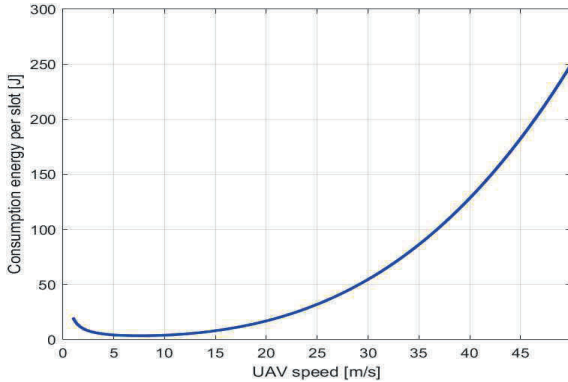


그림 3. 속도에 따른 에너지 소모량.

시뮬레이션에서 사용된 time slot의 길이는 $100ms$, c_1 과 c_2 는 각각 0.02, 200 그리고 네트워크의 전체 크기는 $3000m \times 3000m$ 이며 UAV가 네트워크를 도는 반지름의 길이는 $1000m$ 이다. 센서의 송신 SNR은 $50dB$, UAV의 송신 SNR은 $47dB$ 이다. 데이터 송신 에너지 E_{tx} 는 0.1τ 이며, 데이터 수신 에너지는 $0.15E_{tx}$ 이다. 호버링에 사용되는 에너지는 한 슬롯에 $15J$ 이 사용된다. 시뮬레이션에서 UAV의 속도는 $30m/s$ 이며 AP구간에서 속도를 조절하는 계수인 α 를 조절하여 결과를 확인한다.

시뮬레이션 결과는 그림 4, 5와 같으며 그림 4는 α 에 따른 수집된 데이터양을 나타낸다. 그래프와 같이 α 값이 증가함에 따라 초반 0.25까지는 센서 노드에서 생성된 데이터의 양과 AP에서 수집된 데이터의 양이 동일한 결과를 보이는 것을 확인할 수 있다. 하지만 0.3을 넘어가는 순간 AP에 전송되는 데이터의 양이 점점 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 이는 생성된 데이터를 AP에 전달할 때 UAV의 속도가 센서 구간보다 최소 0.3배 낮아야 한다는 것을 보여준다.

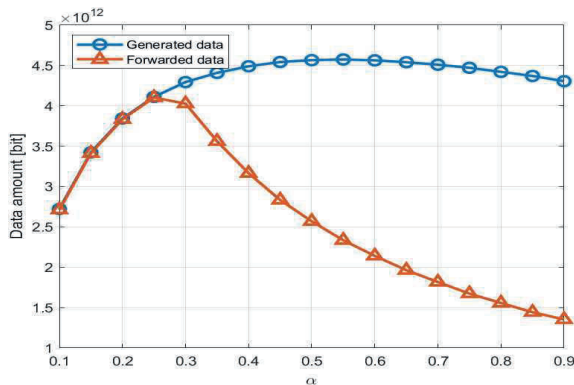


그림 4. α 값에 따른 수집된 데이터양.

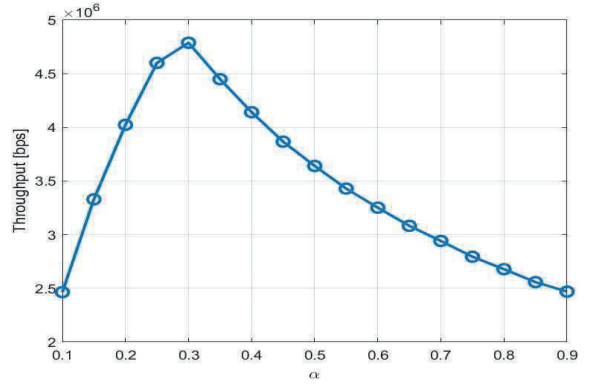


그림 5. α 값에 따른 데이터 throughput.

그림 5는 α 값에 따른 throughput을 보여준다. 그래프에서 throughput은 α 값이 커질수록 증가하다가 0.3 구간을 지날 때 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이는 AP구간에서 낮은 속도로 이동할 때 데이터를 전부 전송하고도 비행 구간이 남아서 오히려 UAV의 버퍼가 빈 상태로 비행하는 시간이 증가해서 낮은 값을 보이다가 0.3을 지나는 순간부터 UAV의 이동속도가 수집된 데이터를 전부 AP로 전달하지 못하기 때문에 발생하는 문제이다. 따라서 이 시뮬레이션의 최적의 α 값은 0.3임을 보여준다.

V. 결론

본 논문에서는 기존 연구의 AP구간에서 센서 노드 수에 따라 단순히 UAV의 속도를 줄이는 제어 방식이 아닌 에너지를 고려한 시뮬레이션을 수행하였으며 이를 기반으로 에너지 제약이 존재하는 환경에서의 속도 제어 방식의 유효함을 확인했다. 제안하는 기법은 UAV의 비행 속도를 데이터 수집 구간에서 v_{sen} , 전송 구간에서 v_{AP} 로 구분하여 2단계 속도 조절 모델을 설계하였으며, 에너지 소비 및 전송 효율 관점에서 최적의 속도 조합을 탐색하였다. 하지만 이러한 관점에서의 결과는 UAV의 버퍼 등의 제약이 없는 환경을 가정하여 수행되었다. 따라서 향후 연구에서는 본 논문에서 활용한 단순화된 에너지 소비 모델을 더욱 정교하게 개선하고, 제한된 버퍼 환경에서 성능을 검증할 계획이다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원 혁신사업(2025-0-00000-00000) 인계양성 지원(IIIIP-2025-RS-2022-00156326, 50)과 2025년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No.2021R1A2C1013150, 50)

참 고 문 헌

- [1] Astute Analytica, "Harvesting Robot Market - Industry Dynamics, Market Size, And Opportunity Forecast To 2031," <https://www.astuteanalytica.com/industry-report/harvesting-robotm-ket>
- [2] Ruiyi Zhong; Takatoshi Sugiyama, "UAV Flight Speed Control to Accommodate Multiple IoT Devices in UAV Multi-Hop Communications" presented at the 2024 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), Oct. 2024.
- [3] Y. Zeng and R. Zhang, "Energy-Efficient UAV Communication With Trajectory Optimization," IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 16, no. 6, pp. 3747 - 3760, Jun. 2017. doi: 10.1109/TWC.2017.2694143