

IoT 센서 네트워크 수율 향상을 위한 UAV 다단계 속도 제어 기법

문혜진, 김수민, 김준수*

한국공학대학교

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

Multi-Level Speed Control of UAV for Improved Throughput in IoT Sensor Network

Hyejin Moon, Su Min Kim, Junsu Kim*

요 약

본 논문은 UAV 기반 센서 네트워크 환경에서 UAV의 비행 구간을 센서 근접 영역, 센서 비근접 영역, AP 영역으로 세분화한 3단계 속도 제어 기법을 제안한다. 제안된 방식은 각 구간의 통신 환경 특성에 따라 UAV 속도를 유연하게 조정하여 수집과 전송 효율을 균형화한다. 이를 통해 기존 2단계 속도 제어 대비 현실적인 에너지 제약 조건에서 더 높은 throughput과 안정적인 데이터 수집 성능을 달성함을 보였다.

I. 서 론

Unmanned Aerial Vehicle(UAV)는 지형과 인프라 제약이 작아 광범위 커버리지 확보할 수 있고, 높은 기동성 덕분에 스마트시티, 재난 관리, 해양 관측, 경계 감시 분야 등에서 상황 대응에 유연하게 최적화되어 다양한 시나리오에 널리 활용되고 있다[1]. 한편 2030년에는 전 세계 센서 수가 100조 개를 초과할 것으로 전망되면서 대규모 Internet of Things (IoT)의 데이터 수집은 저전력, 저지연, 고신뢰라는 상충 요구를 동시에 만족해야 하는 과제를 안고 있다[2]. 고정형 지상 인프라만으로는 이러한 요구를 충족하기 어려운 환경이 존재하며, UAV와 IoT 결합은 센서에 근접한 수집과 Line of Sight(LoS)기반 통신을 통해 수집 지연과 전송 에너지 소모를 줄이며 효율적인 데이터 수집을 가능하게 한다. 기존 연구에서는 UAV가 센서 구간과 AP 구간에서 각각 다른 속도로 비행하는 2단계 속도 제어 방식을 적용하여 안정성을 확인했지만 에너지 가정을 크게 설정하여 실제 운용 조건과의 괴리가 있다[3][4]. 본 논문에서는 보다 현실적인 에너지 조건을 전제로 UAV의 비행 경로를 AP 구간, 센서 근접 구간, 센서 비근접 구간으로 세분화하여 3단계 속도 제어 기법을 제안한다. 이를 통해 각 구간별 통신 환경 특성에 따라 UAV의 속도와 각도를 유연하게 조정할 수 있으며 이에 따른 throughput 변화를 분석하고 조건별 임계 지점을 기준으로 최적 운용 속도를 분석한다.

II. 시스템 모델

본 논문의 사용하는 시스템 모델은 그림 1과 같이 단일 UAV가 원형 궤적을 따라 센서 구간과 AP 구간을 반시계 방향으로 비행한다. UAV가 비행하는 경로에는 3개의 센서 노드와 1개의 AP로 구성된다. 각 센서 구간에 위치한 센서 노드에서 데이터를 수집하고 축적된 데이터를 UAV가 AP 구간에 도착하면 AP로 전송한다. 센서 영역에서는 UAV가 데이터를 효율적으로 수집해서 전송하기 위해 UAV의 비행 속도는 구간별 채널 상태에 따라 3단계로 제어된다. 센서 근접 구간에서는 UAV가 센서 노드와 가장 근접하여 높은 수신 감도를 확보할 수 있는 구간으로 센서로부터의 데이터 수집이 집중적으로 이루어지므로 $v_{sen} = \beta v_0$ 로 제어한다. 이때 β 는 센서 구간 감속 계수로 데이터 수집 효율 극대화가 목적이다. 센서 비근접 구간에서는 UAV가 센서와 일정 거리 이상 떨어져 있는 구간이지만 센싱 및 데이터 수집이 이루어지는 구간이다. 이때 센서로부터

의 SNR이 낮아 전송률이 떨어지지만 전체 경로를 빠르게 커버하기 위해 UAV는 기본 속도 $v = v_0$ 로 비행한다. AP 구간에서는 UAV가 센서로부터 수집한 데이터를 AP로 전송하는 구간으로 안정적인 전송을 위해 UAV의 속도를 감속해 체류시간을 확보한다. 이때 $v_{AP} = \alpha v_0$ 로 설정하고 α 는 AP 구간 감속 계수로 전송 효율 향상이 목적이다. θ 는 UAV가 각 구간에 머무르는 체류 각도를 의미하여 각도의 크기에 따라 데이터 수집 및 전송이 결정된다.

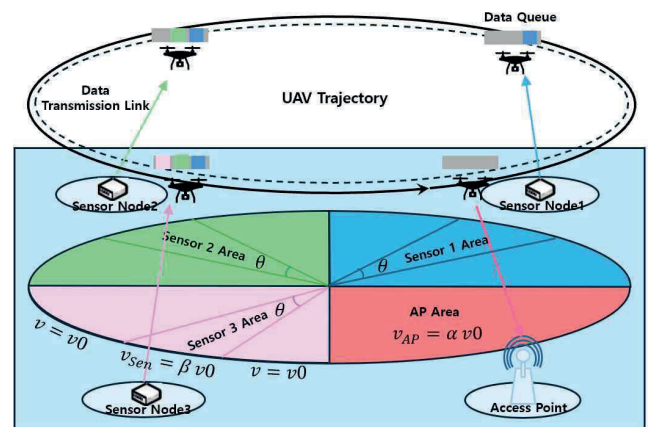


그림 1. 시스템 모델.

III. 제안하는 기법

본 논문에서 제안하는 기법은 그림 2와 같이 UAV 모드 전환 프로토콜 기반으로 데이터를 수집하고 전송하는 시스템 모델을 고려한다. UAV는 τ 슬롯마다 통신과 이동을 번갈아 수행한다. 홀수 슬롯에서는 UAV가 정지 즉 호버링 상태로 통신 역할을 수행하며, 센서 구간에서는 센서로부터 데이터를 수집하고 AP 구간에서는 AP로 데이터를 전송한다. 짝수 슬롯에서는 UAV가 통신 없이 이동 역할을 수행한다.

양방향 큐 기반 스위칭은 UAV 내부 큐 상태에 따라 모드를 전환한다. 큐가 가득 차지 않으면 UAV는 Move-and-Communicate 모드에서 τ 슬롯단위로 통신과 이동을 교차 수행한다. 큐가 포화되면 즉시 Move-only 모드로 전환하여 AP 구간으로 이동하고, 데이터 전송이 완

료되면 Move-and-Communicate 모드로 복귀하여 센서 데이터 수집과 전송을 재개한다[4]. 본 기법에서는 구간별 속도 3단계로 UAV의 이동 속도를 제어하며 체류 각도 θ 를 통해 각 구간에서의 체류 시간을 조정한다. UAV는 비행 중 SNR 변화에 따라 전송률이 달라지므로, 제안된 3단계 속도 제어는 이를 고려하여 throughput을 극대화한다.

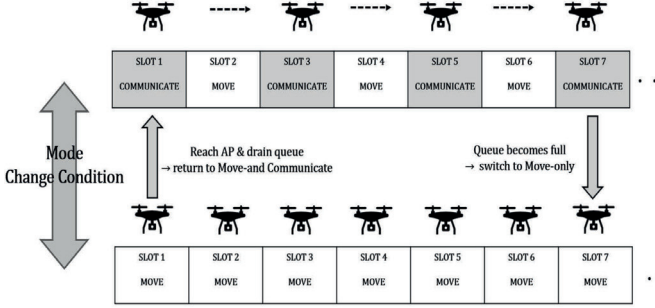


그림 2. UAV 모드 전환 프로토콜.

IV. 성능 평가

본 시뮬레이션 환경은 다음과 같다. τ slot의 길이는 100ms이며 네트워크 영역은 $3000m \times 3000m$ 이다. UAV는 반지름의 길이인 1000m의 원형 경로를 비행한다. 센서의 송신 SNR은 40dB, UAV의 송신 SNR은 45dB이다. UAV의 이동 에너지 모델은 다음과 같다[5].

$$E_{mov}(v) = c_1 \cdot v^3 + \frac{c_2}{v}. \quad (1)$$

이때 $c_1 = 0.02$ 는 기생항력 계수, $c_2 = 200$ 는 유도항력 계수이다. 데이터 송신 에너지는 $E_{tx} = 0.1 \times \tau$ 이며, 데이터 수신 에너지는 $E_{rx} = 0.15 \times E_{tx}$ 이다. 호버링에 사용되는 에너지는 $E_{stop} = 15J$ 설정하였다. UAV의 기본속도는 $30m/s$ 이며, 총에너지인 $E_{total} = 1.8MJ$ 로 설정하여 소모 시점까지 시뮬레이션을 수행했다. 본 시뮬레이션에서는 위에서 제안한 3단계 속도 제어 기법을 적용하여 θ 변화에 따른 β 별 throughput을 측정했다. 그림 3의 β 값에 따른 throughput과 θ 의 관계를 나타내며, 각 곡선의 별 표시는 각 β 에서의 최적 각도 θ 를 의미한다. θ 가 작은 경우 UAV는 AP 구간 체류 시간이 길어 효율이 증가하지만 센서 근접 구간 체류 시간이 짧아 수집 효율이 낮아진다. θ 가 큰 경우, 센서 구간 체류 시간은 증가하지만 AP 전송 시간이 감소하여 throughput이 저하된다. 따라서 수집과 전송의 균형을 결정짓는 임계 θ 값이 존재함을 확인했다. 특히 $\beta \geq 0.7$ 에서는 과속으로 인한 수집 효율 저하로 관찰된다. 결과에 따르면 $\beta = 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9$ 에 대해 각각 $\theta = 18^\circ, 27^\circ, 42^\circ, 33^\circ, 24^\circ$ 로 일정 수준 이후에는 throughput이 정체되거나 감소하는 현상이 나타난다, 이는 수집과 전송 간의 균형적 속도 조절이 필요함을 시사한다. 특히 $\beta = 0.6, \theta = 27^\circ$ 에서 throughput이 극대화되는 지점으로 관찰되었다. 이는 UAV의 속도가 센서 근접 구간과 센서 비근접 구간의 수집 시간과 AP 구간의 전송 시간이 에너지 제약하에서 가장 잘 균형을 이룬 결과이다. 따라서 제안한 3단계 속도 제어는 2단계 속도 제어 대비 실제 환경에서, 보다 안정적이고 효율적인 데이터 수집 및 전송 균형을 관찰했다.

V. 결론

본 논문에서는 기존 연구의 AP 영역에서 각각 상이한 속도로 비행하는 2단계 속도를 제어하는 방식을 확장하여 3단계 속도 제어 기법을 제안했다. 제안된 방법은 UAV의 비행 속도를 단일 일정 속도가 아닌 구간별로

다르게 조절함으로써 이를 기반으로 속도 제어 방식의 유효함을 확인했다. 따라서 향후 연구에서는 본 논문의 속도 제어 기법을 비행 고도 및 경로 최적화와 통합하여 UAV의 3차원 공간적 이동 궤적까지 동적으로 조정함으로써 공간과 시간 복합 최적화를 연구할 예정이며 제안된 알고리즘을 기반으로 HW 실험 플랫폼을 구축하여 UAV 실기체에서 검증함으로써 시뮬레이션과 실제 환경 간 성능 일치도를 분석할 것이다.

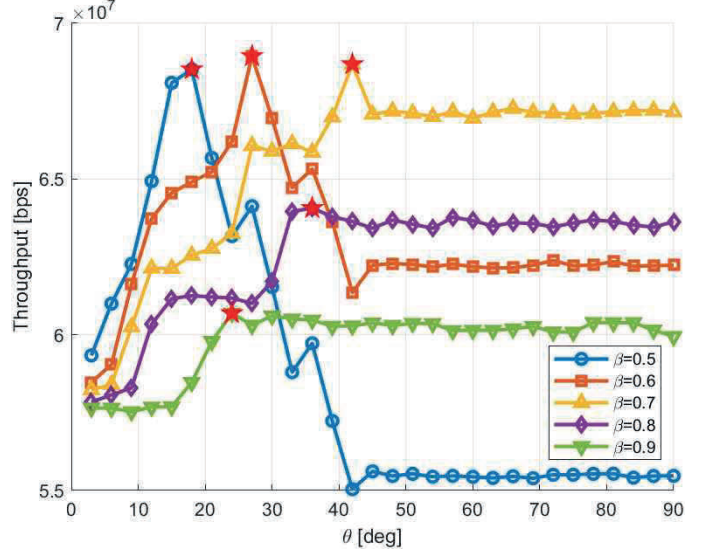


그림 3. θ 에 따른 β 의 throughput.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원 학석사연계ICT핵심 인재양성 지원(IIIP-2025-RS-2022-00156326, 50%)과 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(No. 2021R1A2C1013150, 50%)을 받아 수행된 연구임

참고 문헌

- [1] Z. Wei, M. Zhu, N. Zhang, L. Wang, Y. Zou, Z. Meng, H. Wu, and Z. Feng, "UAV-Assisted Data Collection for Internet of Things: A Survey," IEEE Internet of Things Journal, vol. 9, no. 17, pp. 15460 - 15483, Sep. 2022..
- [2] Ehret and Michael, "The zero marginal cost society: The internet of things, the collaborative commons, and the eclipse of capitalism," The Journal of Sustainable Mobility, vol. 2, no. 2, pp. 67 - 70, 2015.
- [3] R. Zhong and T. Sugiyama, "UAV flight speed control to accommodate multiple IoT devices in UAV multi-hop communications," in Proc. 2024 15th Int. Conf. on Information and Communication Technology Convergence (ICTC), Oct. 2024.
- [4] H. Moon, G. Been, S.M Kim and J. Kim, "Optimal UAV Speed for Data Harvesting in Wireless Sensor Networks with Limited Queue," in Proc. 2025 IEEE VTS Asia Pacific Wireless Communications Symposium (APWCS), 2025.
- [5] 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.