

무인항공기 기반 무선 충전식 센서 네트워크의 연구 동향에 대한 조사

오준석, 이동현, 이충현, 김재민, 송치현, Thanh Phung Truong, 최성진, 이승찬, 조성래

중앙대학교 컴퓨터공학과

{jsoh, dhlee, chlee, jmkim, chsong, tptruong, sjchoi, sclee}@uclab.re.kr, srcho@cau.ac.kr

A Survey on Research Trends of Unmanned Aerial Vehicle-Based Wireless Rechargeable Sensor Networks

Junsuk Oh, Donghyun Lee, Chunghyun Lee, Jaemin Kim, Chihyun Song,

Thanh Phung Truong, Seongjin Choi, Seungchan Lee, and Sungrae Cho

School of Computer Science and Engineering, Chung-Ang University

요약

본 논문은 대규모 센서 네트워크의 에너지 한계를 극복하기 위한 핵심 기술인 무인항공기(Unmanned Aerial Vehicle, UAV) 기반 무선 충전식 센서 네트워크(Wireless Rechargeable Sensor Networks, WRSN)의 연구 동향을 조사하고, 충전 스케줄링, UAV 궤적 최적화, 다중 UAV 협력, 강화학습 기반 제어 기법을 중심으로 이를 분석한다. 또한 에너지 전송과 데이터 수집의 통합 구조를 통해 UAV 기반 WRSN이 자율형 센서 네트워크로 진화하고 있음을 논의한다. 마지막으로 확장성, 에너지 제약, 환경 불확실성 등의 한계를 정리하고 향후 연구 방향을 제시한다.

I. 서론

사물인터넷(Internet of Things, IoT)과 사이버-물리 시스템의 확산에 따라 대규모 센서 네트워크는 스마트 시티, 농업, 환경 모니터링 등 다양한 분야에서 핵심 인프라로 활용되고 있다 [1]. 그러나 대부분의 센서 노드는 배터리 기반으로 동작하기 때문에, 장기간 무인 환경에서 운용하는 경우 에너지 고갈로 인한 네트워크 단절과 유지보수 비용 증가가 불가피하다. 이러한 한계를 극복하기 위해 무선 충전식 센서 네트워크(Wireless Rechargeable Sensor Networks, WRSN)가 제안되었으며, 센서 노드에 이동형 충전기(Mobile Charger, MC)를 이용하여 원격으로 에너지를 공급하는 방식이 활발히 연구되고 있다 [2].

특히 무인항공기(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)는 기동성과 3차원 이동성을 바탕으로 넓은 지역에 분산된 센서를 효율적으로 순회할 수 있어, WRSN에서 가장 유망한 이동형 충전 플랫폼으로 주목받고 있다. UAV는 RF (Radio Frequency) 또는 레이저 기반 무선 에너지 전송을 수행할 뿐만 아니라, 동시에 센서 데이터를 수집하고 백홀링하는 통합 노드로도 활용될 수 있다 [3]. 이러한 UAV 기반 구조는 기존 고정식 충전 인프라가 갖는 공간적 제약을 근본적으로 완화한다. UAV 기반 WRSN의 본질적인 문제는 제한된 이동 시간과 UAV 배터리 하에서 어떤 센서를 언제, 어떤 순서로, 어떤 전력으로 충전할 것인가라는 복합 최적화 문제이다. 이는 UAV의 이동 궤적, 체공 시간, 센서의 잔여 에너지, 데이터 요구량이 상호 연동된 고차원 문제로, 최근 연구들은 충전 스케줄링과 UAV 궤적을 공동으로 최적화하는 시공간 모델을 제시하고 있다 [1, 2].

또한 센서 네트워크의 대규모화에 따라 단일 UAV 기반 방식의 한계가 드러나면서, 다중 UAV 협력 구조가 중요한 연구 방향으로 부상하고 있다 [4, 5]. 여러 UAV가 영역을 분리하거나 요청 기반으로 협력 충전을 수행함으로써, 충전 지연과 에너지 불균형을 완화하는 방식이 제안되고 있다 [6]. 최근에는 이러한 복잡한 동적 환경을 효과적으로 제어하기 위해 강화학습(Reinforcement Learning, RL) 기반 접근법이 적극 도입되고 있다.

UAV는 센서의 에너지 상태와 위치를 관측하면서 장기 보상을 최대화하도록 이동 경로와 충전 대상을 학습할 수 있고, 이를 통해 정적 스케줄링보다 우수한 네트워크 지속성을 달성할 수 있음이 보고되었다 [7]. UAV 기반 WRSN은 시공간 최적화, 다중 UAV 협력, 지능형 제어를 중심으로 빠르게 발전하고 있으며, 차세대 자율형 센서 네트워크의 핵심 기술로 자리매김하고 있다. 본 논문은 이러한 연구 흐름을 체계적으로 정리하고, 향후 나아가야 할 기술적 방향을 분석한다.

II. 본론

1. 연구 동향

초기 WRSN 연구는 센서 노드의 충전 시점만을 고려한 단순 스케줄링에 집중했으나, 최근 연구는 UAV 이동 궤적과 충전 시간의 결합 최적화로 발전하였다. 센서의 에너지 소모, 데이터 생성률, 충전 효율이 시간에 따라 변하기 때문에, UAV는 단순히 가까운 센서부터 방문하는 방식이 아니라, AoI (Age of Information) 및 에너지 임계 상태를 동시에 고려해야 한다. [2]는 센서의 에너지 진화와 UAV 이동을 연속 시간 모델로 결합하여, 충전 시점과 순서를 공동으로 최적화하였다. 이는 UAV 기반 WRSN이 동적 시스템 제어 문제임을 명확히 보여준다. 또한 [1]은 실시간 데이터 수집과 충전을 동시에 수행해야 하는 상황에서, UAV가 체공과 이동을 반복하며 지속적인 네트워크 생존성을 유지하는 궤적 최적화 프레임워크를 제안하였다.

센서 밀도가 증가하고 네트워크 범위가 수 km^2 이상으로 확장되면서, 단일 UAV는 충전 지연, 불균형 에너지 분포, 과도한 비행 에너지 소비 문제를 야기한다. 이에 따라 최근 연구는 다중 UAV 협력 구조로 빠르게 이동하고 있다. [6]은 밀집된 센서 네트워크에서 여러 UAV가 영역을 분할하고, 온디맨드(On-demand) 충전을 수행하는 구조를 제안하였다. 이는 센서 에너지 부족이 발생한 지역에 UAV를 동적으로 재배치하는 방향으로 설계된다. [8]은 다중 UAV가 원거리 RF 에너지 전송을 병렬로 수행하

는 구조를 제안하여, 단일 UAV 대비 네트워크 전체 에너지 효율과 커버리지를 크게 향상시켰다.

UAV 기반 WRSN의 상태공간은 센서 위치, 에너지 잔량, 채널 상태, UAV 배터리, 비행 거리, 충전 효율 등 고차원·비선형 구조를 가지며, 전통적 최적화는 실시간 운용에 한계가 있다. 이에 따라 RL 기반 접근이 핵심 흐름으로 자리잡았다. [7]은 DQN을 사용하여 UAV가 충전 대상과 이동 방향을 스스로 학습하도록 하여, 정적 스케줄링 대비 네트워크 생존 시간과 충전 성공률을 크게 향상시켰다. 농업 IoT 환경을 고려한 [9]는 다중 UAV가 센서 에너지 상태를 관측하고, 장기 누적 수확량을 최대화하도록 RL 기반 정책을 학습한다.

최근 UAV 기반 WRSN은 단순 충전 시스템이 아니라, 에너지 전송과 데이터 수집 및 중계(Backhaul)가 결합된 통합 네트워크로 발전하고 있다. [3]은 UAV가 센서에 에너지를 공급하는 동시에, 수집한 데이터를 고정 기지국으로 중계하는 구조를 제안하였다. 이는 UAV를 이동형 에너지 및 데이터 허브로 재정의한다. [1]에서도 실시간 데이터 지속성을 보장하기 위해, 충전과 데이터 수집이 분리되지 않고 하나의 궤적 최적화 문제로 결합되어 있다.

UAV 기반 WRSN은 단순한 에너지 문제를 넘어 응용 지향적 네트워크 설계로 확장되고 있다. [10]은 UAV가 시각 센서 네트워크의 가장 커버리지를 최대화하도록 배치되면서 동시에 충전을 제공하는 구조를 제시하였다. 이는 스마트 감시·교통 모니터링과 직접 연결된다. 또한 [11]은 UAV를 포함한 여러 MC 사이의 이익 분배와 경쟁을 게임 이론적으로 모델링하여 WRSN이 경제적·전략적 네트워크로 진화하고 있음을 보여준다.

2. 향후 과제

현재 다중 UAV 구조가 제안되었지만, UAV 수가 증가할수록 충돌 회피, 구역 관리, 충전 간섭, 에너지 분배 불균형 문제가 급격히 악화된다. 현존 연구들은 대부분 2-10대 UAV 수준에 머물러 있으며, 수십~수백 대 UAV 기반 WRSN을 위한 확장 가능한 제어 구조는 여전히 미해결이다 [6]. 또한 현재 대부분의 연구는 UAV 에너지를 상수 또는 충분히 큰 값으로 가정한다. 그러나 실제 시스템에서 UAV는 센서를 충전하면서 동시에 자신의 배터리를 소모하기 때문에 UAV의 귀환, 재충전, 교대 운용까지 포함한 계층적 에너지 순환 모델이 필요하다 [1].

대부분의 연구는 RF 또는 레이저 충전 채널을 단순 거리 기반 모델로 가정한다. 그러나 실제 환경에서는 비가시선(Non-Line-of-Sight, NLoS), 바람, 레이저 산란, RF 페이딩이 큰 영향을 미친다. 특히 레이저 기반 충전은 기상 조건에 매우 민감하지만, 현재 모델은 이상적인 링크를 가정한다 [3]. 또한 RL 기반 UAV 제어는 센서 고장, 신규 배치, 트래픽 급변 등 환경 변화에 취약할 수 있다. 현재 연구들은 대부분 시뮬레이션 환경에서 학습과 평가를 동시에 수행하며, 실환경 적응성, 안전성 보장, 수렴성 이론이 부족하다 [7, 9].

현재 연구는 충전 최적화, 데이터 수집, 커버리지를 개별적으로 다루는 경향이 강하다. 그러나 실제 UAV 기반 WRSN은 충전(Physical layer), 스케줄링(Data link layer), 라우팅(Network layer), 커버리지(Application layer)가 결합된 교차 계층(Cross-layer) 문제이고, 이 통합 최적화는 아직 초기 단계에 머물러 있다 [3, 10].

III. 결론

본 논문은 UAV 기반 WRSN의 주요 연구 흐름을 분석하였다. UAV는 이동형 무선 충전기이자 데이터 수집·중계 노드로서, 대규모 센서 네트워

크의 지속성을 보장하는 핵심 인프라로 발전하고 있다. 최근 연구는 시간 기반 충전 및 궤적 최적화, 다중 UAV 협력, 그리고 RL 기반 자율 제어를 중심으로 전개되고 있다. 이를 통해 UAV는 동적 환경에서 센서 에너지 상태와 네트워크 요구를 지능적으로 반영할 수 있게 되었다. 그러나 확장성, UAV 자체 에너지 제약, 환경 불확실성, 학습 안정성 문제는 여전히 해결해야 할 과제로 남아 있다. 향후 연구는 충전, 이동, 통신, 커버리지를 통합적으로 고려하는 교차 계층 설계로 발전할 필요가 있다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원-대학ICT연구센터(ITRC)의 지원을 받아 수행된 연구임 (IITP-2026-RS-2022-00156353, 50% / IITP-2026-RS-2023-00258639, 50%)

참 고 문 헌

- [1] R. Wang, D. Li, Q. Wu, K. Meng, B. Feng, and L. Cong, "Rechargeable UAV trajectory optimization for real-time persistent data collection of large-scale sensor networks," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 73, no. 6, pp. 4137-4152, Jun. 2025.
- [2] Y. Hong, Y. Yang, C. Luo, D. Li, Y. Lu, and Z. Chen, "Spatiotemporal optimization for charging scheduling in wireless rechargeable sensor networks," *IEEE Internet Things J.*, vol. 11, no. 2, pp. 3056-3067, Jan. 2024.
- [3] X. Ma, X. Liu, and N. Ansari, "Green laser-powered UAV far-field wireless charging and data backhauling for a large-scale sensor network," *IEEE Internet Things J.*, vol. 11, no. 19, pp. 31932-31946, Oct. 2024.
- [4] W. J. Yun, S. Park, J. Kim, M. Shin, S. Jung, D. A. Mohaisen, and J.-H. Kim, "Cooperative multiagent deep reinforcement learning for reliable surveillance via autonomous multi-UAV control," *IEEE Trans. Ind. Informat.*, vol. 18, no. 10, pp. 7086-7096, Oct. 2022.
- [5] S. Park, C. Park and J. Kim, "Learning-based cooperative mobility control for autonomous drone-delivery," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 73, no. 4, pp. 4870-4885, Apr. 2024.
- [6] R. Xiong, C. Chen, J. Xu, X. Dong, and J. Pu, "Multi-AAV-assisted on-demand charging in dense wireless rechargeable sensor networks," *IEEE Internet Things J.*, vol. 12, no. 7, pp. 8821-8834, Apr. 2025.
- [7] N. Liu, J. Zhang, C. Luo, J. Cao, Y. Hong, Z. Chen, and T. Chen, "Dynamic charging strategy optimization for UAV-assisted wireless rechargeable sensor networks based on deep Q-network," *IEEE Internet Things J.*, vol. 11, no. 12, pp. 21125-21134, Jun. 2024.
- [8] J. Li, X. Liu, L. Zhang, and N. Ansari, "Efficient far-field wireless charging for green wireless sensor networks using multiple UAVs," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, doi: 10.1109/TVT.2025.3618146.
- [9] J. Chen, X. Li, B. Cai, J. He, Y. Ma, and J. Liu, "A reinforcement-learning-based energy charging strategy for agricultural Internet of things with multi-UAV-assisted WRSN," *IEEE Internet Things J.*, vol. 12, no. 23, pp. 49022-49035, Dec. 2025.
- [10] X. Zhu and M. Zhou, "Maximal weighted coverage deployment of UAV-enabled rechargeable visual sensor networks," *IEEE Trans. Intell. Trans. Syst.*, vol. 24, no. 10, pp. 11293-11307, Oct. 2023.
- [11] H. Guo, R. Wu, B. Qi, Y. He, C. Xu, J. Gao, and Y. Sun, "Adaptive payoff balance among mobile wireless chargers for rechargeable wireless sensor networks," *IEEE Internet Things J.*, vol. 11, no. 4, pp. 7013-7023, Feb. 2024.