

다중 무인기 데이터 수집에서 클러스터링 및 경로 생성 기법의 특성에 대한 연구

김상현¹, 유승호^{2*}

¹국립부경대학교 데이터공학과 학생, ²국립부경대학교 컴퓨터·인공지능공학부 교수

A Study on the Characteristics of Clustering and Route Generation Methods in Multi-UAV Data Collection

Sanghyun Kim¹, Seungho Yoo^{2*}

¹Student, Department of Data Engineering, Pukyong National University

²Professor, Department of Computer and Artificial Intelligence Engineering, Pukyong National University

요약 다수의 무인기로 대규모 센서 네트워크의 데이터를 수집하는 시스템은 일반적으로 노드를 무인기별로 분할하는 클러스터링, 클러스터별 방문 경로를 생성하는 경로 생성 알고리즘, 그리고 주기적 경로 재생성으로 구성된다. 기존 연구들은 개별 기법의 제안에 집중하고 있어, 구성요소의 특성이 데이터 수집 성능에 미치는 영향은 확인하기 어렵다. 본 논문에서는 다중 무인기 기반 데이터 수집 시뮬레이션 환경에서 경로 생성 알고리즘, 클러스터링 기준, 경로 재생성 주기 및 기준에 따른 데이터 수집량, 데이터 신선도, 중복 재방문, 계산 비용의 변화를 분석하였다. 분석 결과, 데이터 신선도는 경로 생성 알고리즘에 의해 결정되며, 중복 재방문 페널티를 반영할 경우 방문 순서 불변성으로 인해 경로 산출 시간을 늘릴수록 신선도가 오히려 저하되는 것을 확인하였다. 또한 클러스터링을 매번 새로 수행할 시 수집량이 4분의 1로 줄어들고, 수요 가중 클러스터링이 중복 재방문을 절반 이하로 줄이는 것을 확인할 수 있었다. 이는 탐욕 기반의 경로 구성과 수요 가중 클러스터링 조합이 효과적임을 보인다.

주제어 : 사물 인터넷, 다중 무인기, 데이터 수집, 차량 경로 문제, 클러스터링, 데이터 신선도

Abstract Systems that collect data from large-scale sensor networks with multiple unmanned aerial vehicles (UAVs) typically consist of clustering that partitions nodes among UAVs, a route generation algorithm that builds per-cluster visiting routes, and periodic route replanning. Existing studies focus on proposing individual techniques, making it difficult to assess how each component affects collection performance. This paper analyzes how collected volume, data freshness, redundant revisits, and computation cost change with the route generation algorithm, the clustering criterion, and the replanning period and trigger in a multi-UAV data collection simulation. The results show that data freshness is determined by the route generation algorithm; when a redundant-revisit penalty is incorporated, its invariance to visiting order causes freshness to degrade with longer route computation time. Re-clustering from scratch at every cycle reduces the collected volume to a quarter, while demand-weighted clustering more than halves redundant revisits. This shows that greedy route construction combined with demand-weighted clustering is effective.

Key Words : Internet of Things, Multi-UAV, Data Collection, Vehicle Routing Problem, Clustering, Data Freshness

1. 서론

센서 데이터를 상시 통신망으로 수집하여 관제·관리하는 시스템은 스마트시티 통합 관제[1]와 IoT 환경 관리[2] 등 여러 분야에서 구축되고 있다. 그러나 재난 감시, 환경 관측과 같이 통신 기반 시설이 없는 광역 환경에서는 이러한 상시 연결을 가정하기 어려워, 저전력 센서 노드의 데이터를 무인기(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)가 근접 방문하여 수집하는 구조가 널리 연구되고 있다[3]. 이러한 시스템은 일반적으로 연산 부담을 줄이기 위하여 클러스터링으로 전체 노드를 무인기별 담당 구역으로 분할하고, 각 구역에서 용량 제약 차량 경로 문제(Capacitated Vehicle Routing Problem, CVRP) 해법으로 방문 경로를 생성하며, 동적 환경에 대응하기 위해 주기적으로 경로를 재생성하는 3단계 구조를 가진다[3, 4]. 각 구성요소에 대해 다양한 대안 기법이 제안되어 왔으나, 기존 연구는 대부분 개별 기법의 제안과 단일 기준 기법과의 비교에 그치고 있으며, 동일한 환경에서 구성요소별 기법 선택이 수집 성능, 특히 데이터 신선도(freshness)에 미치는 영향에 대한 체계적인 비교 분석은 아직 미흡한 실정이다. 관련 서베이[3, 5, 6] 또한 기법을 목적과 구조에 따라 분류하는 데에 그치고 있으며, 세 구성요소를 동일 조건에서 함께 비교한 연구는 확인되지 않았다.

따라서 본 논문에서는 클러스터링 기반 다중 무인기 데이터 수집 시스템을 구현한 시뮬레이션 환경에서, 경로 생성 알고리즘, 클러스터링 기준, 경로 재생성 주기 및 시점 기준(이하 트리거)을 동일한 조건과 지표로 비교하는 구성요소별 특성 분석을 수행하였다. 이를 통하여 데이터 신선도가 경로 최적화 품질이 아니라 경로 생성 알고리즘의 의사결정 구조에 의해 결정되는 메커니즘을 규명하고, 구성요소별 효과의 상대적 크기와 기법 조합에 따른 성능 차이를 정량화하였다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 2장에서는 관련 연구에 관하여 기술한다. 3장에서는 분석 대상 시스템을, 4장에서는 실험 환경의 구성을 설명하며, 5장에서 실험 결과를 서술하고 6장에서 결론을 맺는다.

2. 관련 연구

2.1 UAV 기반 데이터 수집

UAV 기반 데이터 수집 관련 연구들은 주로 센서 클러

스터링, 수집 모드, 경로 계획을 다루며[3, 5], 클러스터링에는 k-means를 흔히 활용한다[5]. UAV를 이동 싱크(mobile sink)나 데이터 물(data mule)로 활용하는 방식에서도 클러스터링과 순회 경로 계획을 결합한 수집 구조가 오랫동안 연구되어 왔으나, 대부분이 개별 기법의 제안으로 한정된다[6]. 데이터가 생성된 시점부터 경과한 시간으로 데이터 신선도를 정량화하는 정보 나이(Age of Information, AoI) 관점의 연구에서는 심층 강화학습과 수리 최적화가 중심을 이루며[7], 최근에는 영역 분할, 클러스터 헤드 선정, 경로 계획을 단일 가중 목적 함수로 통합하여 최적화하는 시도도 이루어졌다[8]. 그러나 이러한 연구들은 제안하는 기법의 초매개변수를 조정하며 성능 변화를 확인하는 데 그치며, 서로 다른 기법을 비교하지는 않았다.

2.2 알고리즘 비교와 재최적화

여러 경로 생성 알고리즘을 품질과 계산 시간 측면에서 직접 비교한 사례는 지상 물류 분야에서 확인할 수 있다. Omar 등[9]은 문제 크기에 따라 OR-Tools와 개미 군집 최적화(Ant Colony Optimization)의 경로 품질 순위가 역전됨을 보였다. 신경망 기반 경로 생성에 대해서는 생성된 경로의 품질이 대규모 인스턴스에서 고전 기법에 미치지 못한다는 보고가 있고[10], 공개된 사전학습 모델이 유클리드 대칭 비용을 전제하여 본 논문에서 다루는 비대칭 비용 구조와 호환되지 않으므로 비교 대상에서 제외하였다. 재최적화에 관해서는 물류 분야의 동적 차량 경로 문제를 중심으로 트리거 전략과 주기적 재최적화 구조가 연구되어 왔으나[11], 해당 연구는 데이터가 지속적으로 생성되는 환경의 신선도 지표를 다루지 않는다.

2.3 국내 연구 동향

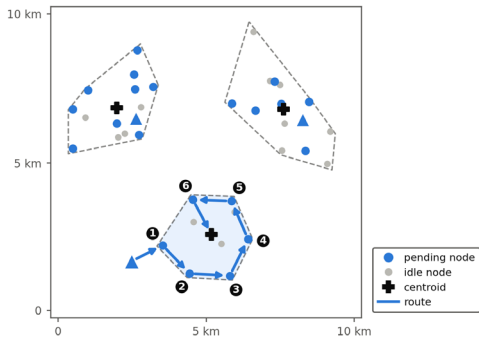
국내에서는 네트워크 흐름 기반 다중 무인기 경로 계획[12], 유전 알고리즘 기반 다수 무인기 임무 계획[13] 등 개별 기법을 개발한 연구가 주를 이루며, 무인기를 활용하여 센서 네트워크의 데이터 수집을 관리하려는 시도[14]도 있었다. 센서 네트워크의 클러스터링에 관해서는 클러스터 헤드 선정과 에너지 균형을 다룬 클러스터 라우팅 기법[15]이 있으나, 이는 노드 간 다중 홉 전송을 전제로 하여 무인기가 각 구역을 방문하는 수집 구조와는 차이가 있다. 클러스터링 기법을 서로 비교한 사례로는 지상 차량 운행 계획 분야의 연구[16]가 있지만, 다중

무인기 데이터 수집 환경에서 세 구성요소를 함께 비교한 특성 분석은 찾아보기 어렵다.

3. 시스템 개요

3.1 대상 시스템과 동작 방식

본 논문은 클러스터링 기반 다중 무인기 데이터 수집 시스템을 대상으로 구성요소별 특성을 분석하며, 시스템의 전체 구조는 Fig. 1과 같다. 그림에서 파란색 점은 수집 대기 데이터를 보유한 노드, 회색 점은 보유하지 않은 노드를 나타내며, 점선은 무인기별 담당 구역의 경계, + 기호는 클러스터 중심, 화살표가 있는 실선은 각 구역에서 생성된 방문 경로이다. 관측 영역에 배치된 센서 노드는 각각 발생률 λ 의 포아송 과정에 따라 데이터 항목을 지속적으로 생성하고, 멀티콥터 무인기는 담당 구역의 노드를 방문하여 일정한 서비스 시간 동안 데이터를 수집한 뒤 기체에 버퍼링한다. 버퍼링된 데이터는 별도의 중계 없이 무인기가 기지국으로 직접 전달한다.

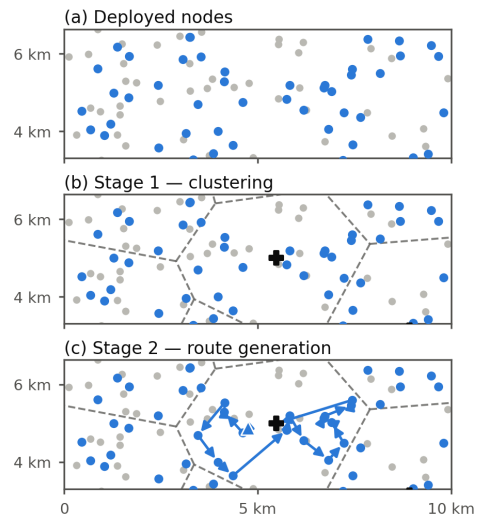


[Fig. 1] Overview of the clustering based multi-UAV data collection system

시스템은 경로 재생성 주기 T_{rp} 마다 두 단계로 경로를 재생성하며, 이 과정은 Fig. 2와 같다. 첫 번째 단계에서는 전체 노드에 대해 warm-start k-means 클러스터링을 수행하며, 이전 주기의 중심을 초기값으로 재사용하여 담당 구역의 정체성을 유지한다. 두 번째 단계에서는 각 클러스터에서 수집 대기 데이터가 있는 활성 노드를 대상으로 CVRP를 풀어 방문 경로를 생성하며, 이때 노드 i 에서 j 로의 이동 비용은 식 (1)과 같이 정의한다.

$$c_{ij} = \frac{d_{ij}}{(1 + \alpha \cdot a_j)} + \rho [t - v_j < \Delta_{cool}] \quad (1)$$

여기서 d_{ij} 는 두 노드 사이의 유클리드 거리, a_j 는 노드 j 가 보유한 가장 오래된 대기 데이터의 나이, v_j 는 노드 j 의 최근 방문 시각, t 는 현재 시각이며, $[\cdot]$ 는 괄호안의 조건이 참이면 1, 거짓이면 0인 지시 함수이다. α 는 나이 할인의 강도, ρ 는 냉각 페널티(재방문 페널티)의 크기, Δ_{cool} 은 냉각 기간을 결정하는 매개변수이다. 첫 항은 오래된 데이터를 보유한 노드일수록 이동 비용이 낮아지도록 거리를 나이로 할인하고, 둘째 항은 Δ_{cool} 이내에 방문한 노드로의 재방문에 냉각 페널티를 부과한다. 경로의 총 소요 시간은 운용 사이클의 잔여 시간을 넘지 않도록 제한하며, 무인기가 비행 중인 경우에는 현재 목표 지점을 새 경로의 첫 방문지로 유지한다.



[Fig. 2] Two-stage replanning: (a) Deployed nodes (b) Stage 1 - clustering, (c) Stage 2 - per-cluster route generation

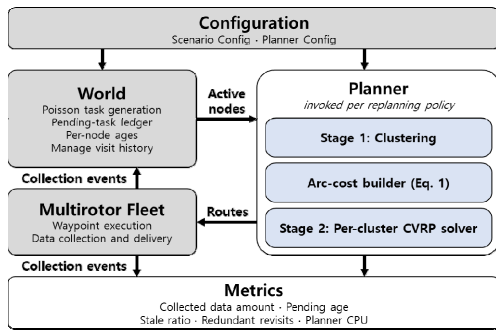
3.2 냉각 페널티의 순서 불변성

활성 노드가 모두 경로에 포함되는 경우 각 노드로 진입하는 간선은 경로 전체에서 하나만 존재해야 한다. 따라서 식 (1)의 냉각 페널티 총합은 방문 순서와 무관한 상수가 되고, 경로의 총비용을 최소화하는 어떠한 최적화 절차도 냉각 항과는 독립적이어서 방문 순서에 대한 정보를 얻을 수 없다. 나이 할인 항 역시 진입 간선의 길이에 대해서만 작용하므로, 총비용 최적화는 오래된 노드를 일찍 방문하는 것이 아니라 가까운 선행 노드에서 진입하는 형태로 경로를 구성한다. 반면 현재 위치에서 비용이 가장 낮은 다음 노드를 순차적으로 선택하는 탐욕 기반의 경로 연장형 구성에서는 매 단계의 선택이 곧

실행 순서이므로, 식 (1)에 담긴 시간적 의도가 실행 순서로 그대로 반영된다. 5장의 실험은 이 성질이 실제 수집 성능을 좌우함을 보여준다.

4. 실험 구성

분석을 위하여 시뮬레이터와 플래너를 Python 및 OR-Tools[17] 기반으로 구현하였으며, 전체 구성은 Fig. 3과 같으며, 시나리오는 다음과 같이 설정하였다. 10 km × 10 km 영역에 1,000개의 센서 노드를 배치하고, 각 노드는 발생률 $\lambda \in \{0.01, 0.0125, 0.015\}$ Hz의 포아송 과정에 따라 50 KB 크기의 데이터 항목을 생성한다. 무인기는 기본 32대이며 10 m/s로 비행하고, 노드당 서비스 시간은 5초, 운용 사이클은 2,400초이다.



[Fig. 3] Architecture of the simulation testbed

식 (1)의 매개변수는 $\alpha = 0.005 \text{ s}^{-1}$, $\rho = 1,000 \text{ m}$, $A_{\text{cool}} = 900 \text{ s}$ 이고, 경로 재생성 주기의 기본값은 $T_{rp} = 60$ 초이다. 시뮬레이션은 1초 단위의 이산 시간으로 진행하였으며, 실험은 4,800초 에피소드를 조건당 10개 시드로 수행하였고 동일 시드의 조건 간 비교는 완전히 동일한 작업 부하 위에서 이루어진다. 600개 활성 노드 기준 경로 생성 시간은 호출당 평균 0.73초로, 기본 재생성 주기 안에서 충분히 처리할 수 있는 수준이다.

지표는 데이터 수집량(GB), 평균 데이터 대기 시간(초), 900초 초과 대기 데이터 비율(stale ratio), 900초 이내 중복 재방문률, 총 경로 산출 소요 시간이다. 평균 대기 나이는 각 시점에 아직 수집되지 않은 데이터의 나이의 평균 값이며, stale ratio는 임계 나이를 넘긴 데이터의 비율로 peak AoI 관점의 보조 지표에 해당한다. 유의성은 시드를 짝지은 Wilcoxon 부호순위검정에 Holm

보정을 적용하여 유의수준 0.05에서 판정하였다.

비교 대상은 경로 생성 8종(탐욕 기반의 경로 연장형 구성 2종: OR-Tools 구성 전용·최근접 이웃 / 기타 구성형 2종: 최소 삽입·savings / 개선형 4종: 로컬서치·유도 로컬서치·2-opt·유전 알고리즘; 모두 식 (1)의 동일 비용을 최적화하며 호출당 경로 산출 시간(wall-clock)을 동일하게 제한), 클러스터링 5종(warm-start·cold-start·수요 가중·수요 균형 k-means, 정적 Voronoi; 균일·핫스팟 배치), 경로 재생성 정책(주기 15~480초 6종, 트리거 4종, 시간 평균을 맞춘 4배 버스트 워크로드), 그리고 클러스터링 4종 × 경로 생성 4종의 전체 조합이며, 무인기 대수를 8대에서 32대까지 변화시킨 합대 규모 분석을 포함하여 총 약 2,000회의 시뮬레이션을 수행하였다.

5. 실험 결과

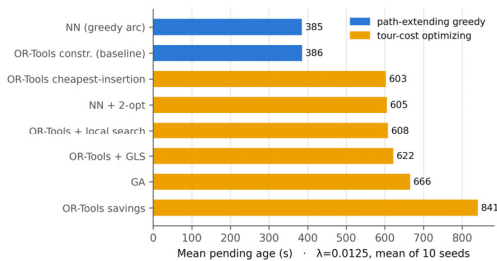
5.1 경로 재생성 주기 및 트리거

평균 대기 나이는 재생성 주기 15~120초 구간에서 사실상 일정하였고(차이 3초 미만), 240초부터 중복 재방문이, 480초에서 대기 나이가 유의미하게 증가하였다. 수집량은 전 구간에서 주기와 무관하게 일정하여($\pm 0.5\%$) 이 운용 영역의 처리량은 계획 빈도가 아니라 서비스 용량이 결정하며, 플래너 계산량은 주기에 반비례하므로 성능이 평탄하게 유지되는 구간의 상단(약 120초)으로 주기를 설정하면 성능 저하 없이 계산량을 8분의 1로 줄일 수 있다. 트리거 비교에서도 수집량 차이는 없었으며, 신규 작업 수 기반 이벤트 트리거는 동일 유효 빈도의 주기형과 통계적으로 구별되지 않았고, 경로 소진 시 재생성하는 내생형은 주기형 60초보다 자주 재생성하면서도 대기 나이가 27초 유의하게 나뉘었다. 즉 경로 재생성의 가치는 빈도가 아니라 수요 변화와의 시점 정렬에서 나온다.

5.2 경로 생성 알고리즘

경로 생성 알고리즘 8종의 비교 결과는 Fig. 4와 같으며, 3.2절의 성질을 실증한다. 탐욕 기반의 경로 연장형 구성 2종만 평균 대기 나이 약 385초를 달성하였고, 경로의 총 비용을 최적화하는 6종은 계열과 무관하게 603~841초로 저하되었다(기준 대비 $p_{\text{Holm}} = 0.045$). 최근접 이웃과 OR-Tools 구성 전용은 전 지표에서 통계적으로 동일하였고 계산량은 최근접 이웃이 5분의 1이었다. savings는 수집량까지 거리 전용 목적 수준으로 저하되어 알고리즘 선택이 목적함수의 의도를 무

효화할 수 있음을 보였고, 유전 알고리즘은 수집량이 14% 낮았다. 또한 유전 알고리즘과 유도 로컬서치 모두 호출당 산출 시간을 30 ms에서 300 ms로 늘릴수록 대기 나이가 유의하게 증가하여, 순서 불변적 비용 구조에서는 산출 시간의 증가가 오히려 성능을 해치는 요인이 된다. 한편 함대 규모를 8대까지 줄여 클러스터당 노드가 약 125개에 이르면 알고리즘 간 신선도 차이가 사라지는 대신 경로 품질이 지배 요인이 되어 유전 알고리즘의 수집량이 크게 저하되었다(0.68 GB). 이는 문제 크기에 따른 알고리즘 순위 역전[9]이 신선도 차원에서도 성립함을 보여준다.



[Fig. 4] Route generation algorithms: mean pending age by solver family

5.3 클러스터링 기준

클러스터링을 매 주기 처음부터 새로 수행하는 cold-start 기법은 Table 1에서 확인할 수 있듯이 담당 구역의 정체성이 상실되어 수집량을 4분의 1로 떨어지며, 클러스터링 결과를 재사용하는 warm-start가 시스템 성능 측면에서 더 적합한 접근법임을 보인다. 노드 배치가 고정된 본 환경에서 warm-start k-means는 정적 Voronoi 분할과 실질적으로 동등하였다. 대기 데이터량을 가중치로 쓰는 수요 가중 k-means는 중복 재방문을 절반 이하로 유의하게 줄였고(균일 4.2% 대 11.2%, 핫스팟 15.3% 대 29.5%), 수요 균형 클러스터링은 무인기 간 부하 변동계수를 절반 이하로 낮추었으나 대기 나이가 38초 증가하여 부하 공정성과 신선도가 상충 관계에 있음을 확인하였다.

<Table 1> Cold-start ablation: collected volume and pending age (each cell: $\lambda=0.0125$ / $\lambda=0.015$)

Deployment	Clustering	Collected (GB)	Age (s)
Uniform	warm k-means	2.58/3.09	385.7/383.0
	cold-start	0.59/0.69	1136.9/1137.2
Hotspot	warm k-means	2.63/3.16	354.2/354.8
	cold-start	0.71/0.85	1121.7/1123.1

5.4 기법 조합에 따른 특성

클러스터링 4종과 경로 생성 4종의 전체 조합에서 두 구성요소의 효과는 대체로 독립적으로 작용하였다. 수요 가중 클러스터링의 재방문 절감은 경로 생성 기법과 무관하게 유지되었고, 클러스터링 선택이 경로 최적화 기법의 신선도를 유의하게 개선하지만 계열 간 격차를 복구하지는 못하여, 경로 최적화 계열의 최선 조합(529초)이 탐욕 계열의 최악 조합(426초)보다 여전히 나빴다. 즉 경로 생성 기법 계열이 성능의 층을 결정하고 클러스터링은 층 안에서의 위치를 조정하며, 최적 조합은 수요 가중 클러스터링과 탐욕 기반의 경로 연장형 구성이었다. 한편 로컬서치는 경로 재생성이 잦아질수록 실행 중 경로의 앞부분이 반복 파괴되어 오히려 성능이 저하되어(주기 15초: 638초 vs 주기 120초: 569초), 재생성 주기의 적정값은 보편 상수가 아니라 경로 생성 기법 계열의 함수임을 확인하였다.

6. 결론

본 논문에서는 다중 무인기 기반 대규모 센서 데이터 수집 시스템을 대상으로 경로 생성 알고리즘, 클러스터링 기준, 경로 재생성 주기 및 트리거에 따른 수집 특성을 동일한 환경에서 분석하였다. 약 2,000회의 시뮬레이션을 수행한 결과, 각 구성요소별 효과는 경로 생성 기법 계열, 클러스터링 기준, 경로 재생성 주기, 트리거 방식 순으로 크며, 클러스터링과 경로 생성 기법은 독립적으로 선택해도 되는 것을 확인하였다. 반면, 최적화 계열의 기법을 활용하여 경로를 생성할 경우에는 경로 재생성 주기를 보다 길게 가지는 것이 더 좋은 성능을 확보할 수 있음을 확인하였다. 데이터 신선도는 냉각 페널티의 방문 순서 불변성으로 인해 경로 최적화 품질이 아니라 다음에 방문할 노드를 결정하는 경로 생성 알고리즘의 의사결정 구조에 의해 결정되며, 같은 이유로 경로 산출 시간을 늘릴수록 신선도는 오히려 저하되었다. 또한 클러스터링을 매 주기 새로 수행하면 수집량이 4분의 1로 줄어 들고, 수요 가중 클러스터링은 중복 재방문을 절반 이하로 줄였다. 이를 통해 신선도 지향 수집 시스템에는 단순한 탐욕 기반의 경로 연장형 구성, 평탄 구간 상단의 긴 재생성 주기, 수요 가중 클러스터링의 조합이 효과적임을 확인하였다. 후속 연구로는 방문 시각의 함수로 비용을 정의하여 총비용 최적화하에서도 순서 정보가 보존하는 기법과 데이터 전달을 전달하는 중계 무인기 계층을 도입한 2계층 구조에 대한 연구를 추진하고자 한다.

REFERENCES

- [1] H.J.Moon, G.S.Ryu and S.I.Park, "Design and Implementation of a GIS-Based Smart City Integrated Control Monitoring System using AI and Sensors," Journal of Internet of Things and Convergence, Vol.12, No.2, pp.157-164, 2026.
- [2] D.W.Hwang, "Structural Design and Scenario-based Analysis of IoT Smart Environment Management System," Journal of Internet of Things and Convergence, Vol.12, No.1, pp.25-30, 2026.
- [3] 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, 2022.
- [4] L.Zhang, C.He, Y.Peng, Z.Liu and X.Zhu, "Multi-UAV Data Collection and Path Planning Method for Large-Scale Terminal Access," Sensors, Vol.23, No.20, 8601, 2023.
- [5] P.Joshi, A.Kalita and MGurusamy, "Reliable and Efficient Data Collection in UAV-Based IoT Networks," IEEE Communications Surveys & Tutorials, Vol.28, pp.2531-2571, 2026.
- [6] V.Agarwal, S.Tapaswi and P.Chanak, "A Survey on Path Planning Techniques for Mobile Sink in IoT-Enabled Wireless Sensor Networks," Wireless Personal Communications, Vol.119, pp.211-238, 2021.
- [7] O.A.Amodu, U.A.Bukar, R.A.R.Mahmood, C.Jarray and M.Othman, "Age of Information Minimization in UAV-Aided Data Collection for WSN and IoT Applications: A Systematic Review," Journal of Network and Computer Applications, Vol.216, 103652, 2023.
- [8] Y.Yu and S.Lee, "Optimized Multi-UAV Data Collection Method for IoT Considering Age of Information and Energy Constraints," Computer Networks, Vol.287, 112538, 2026.
- [9] A.Omar, Y.Omar, M.Solayman and H.Mansour, "Comparative Analysis of Ant Colony Optimization and Google OR-Tools for Solving the Open Capacitated Vehicle Routing Problem in Logistics," in Proceedings of the Intelligent Methods, Systems, and Applications (IMSA), 2025, pp.552-557.
- [10] S.Feng, W.Sun, S.Li, A.Talwalkar and Y.Yang, "FrontierCO: Real-World and Large-Scale Evaluation of Machine Learning Solvers for Combinatorial Optimization," arXiv:2505.16952, 2025.
- [11] T.Andersen, S.Belward, M.Sankupellay, T.Myers and C.Chen, "Reoptimisation Strategies for Dynamic Vehicle Routing Problems with Proximity-Dependent Nodes," Transactions in Operations Research, Vol.32, No.1, pp.1-21, 2024.
- [12] Y.Seo, H.Lee and H.-S.Na, "Automatic Multi-Drone Path Planning Using Network Flow Algorithms," Journal of Institute of Control, Robotics and Systems, Vol.25, No.4, pp.303-311, 2019.
- [13] B.-M.Jeong, D.-S.Jang, N.-E.Hwang, J.-W.Kim and H.-L.Choi, "Genetic Algorithm Based Multi-UAV Mission Planning Method Considering Temporal Constraints," Journal of Aerospace System Engineering, Vol.17, No.2, pp.78-85, 2023.
- [14] I.Yoon and D.K.Noh, "Data Collection Management for Wireless Sensor Networks Using Drones with Wireless Power Transfer," Journal of The Korea Society of Computer and Information, Vol.28, No.9, pp.121-128, 2023.
- [15] D.Li and B.W.Min, "Research on Cluster Routing Technique for Energy Balancing in Wireless Sensor Networks Based on Optimized Pruning Technique," Journal of Internet of Things and Convergence, Vol.10, No.5, pp.53-63, 2024.
- [16] J.W.Kim and K.-S.Shin, "Comparative Analysis for Clustering Based Optimal Vehicle Routes Planning," The Korea Journal of BigData, Vol.5, No.1, pp.155-180, 2020.
- [17] V.Furnon and L.Perron, "OR-Tools Routing Library," Version 9, Google, 2025.

김 상 현(Sanghyun Kim)

[준회원]



- 2021년 3월 : 국립부경대학교 컴퓨터·인공지능공학부(공학사)
- 2025년 3월 ~ 현재 : 국립부경대학교 데이터공학과(석사과정)

<관심분야>

사물인터넷, 무인비행체 (UAV), 강화학습

유 승 호(Seungho Yoo)

[정회원]



- 2012년 2월 : 고려대학교 전기전자전파공학부(공학사)
- 2018년 8월 : 고려대학교 전기전자컴퓨터공학과(공학박사)
- 2018년 7월 ~ 2022년 3월 : KT 융합기술원 선임연구원

- 2022년 9월 ~ 현재 : 국립부경대학교 컴퓨터·인공지능공학부 교수

<관심분야>

사물인터넷, 무선 네트워크, 무인비행체 (UAV)