

Physical Internet 기반 스마트 군수 시스템을 위한 허브 위치 및 경로 최적화 기법

이승민¹, 이재민², 김동성*금오공과대학교 IT융복합공학과^{1,2,*}{tmdals6164¹, ljimpaul², dskim*}@kumoh.ac.kr

A Hub Location and Route Optimization Scheme for a Physical Internet-based Smart Military Logistics System

Seung-Min Lee¹, Jae-Min Lee² and Dong-Seong Kim*Kumoh National Institute of Technology Dept. of IT Convergence Eng.^{1,2,*}

요약

현재 군은 유지비 증가 및 인구 감소로 인한 인력 부족의 문제에 직면하고 있으며, 이는 군수 물류 흐름을 지연시킨다. 이에 피지컬 인터넷(Physical Internet, PI)은 군수 물류 산업의 미래 혁신을 선도할 방안으로 여겨진다. 본 논문은 여러 군부대가 창고와 운송 수단을 효율적으로 공유함으로써 효율적인 운영을 달성하고, 운영 비용을 줄이는 PI 기반의 군수 물류 시스템을 제안한다. π -containers, π -nodes, π -movers, π -protocols와 같은 핵심 PI 구성 요소를 적용하고, 동적 위치 경로 문제를 해결하기 위해 클러스터링 기법과 개미 군집 최적화 알고리즘을 활용한 접근법을 제시한다.

I. 서론

최근 군은 첨단화된 대형 무기의 유지 비용 증가와 인력 부족으로 인한 전투력 감소 문제에 직면하고 있다. 또한, 급격한 출산을 하락과 이에 따른 인구 감소는 군 병력 확보에도 부정적인 영향을 미치고 있다. 이를 극복하기 위해 장비와 시스템 중심의 효율적 군 구조로 전환하는 국방개혁이 활발히 추진되고 있다[1]. 특히 군수 물류에서는 π -containers, π -nodes, π -movers, π -protocols로 구성된 피지컬 인터넷(Physical Internet, PI)이 주목받고 있다. PI를 군수 물류에 적용하면 물자 운송의 효율성을 극대화 및 운영 비용을 절감할 수 있으며, 성공적인 PI 도입을 위해서는 군부대 및 관련 기관 간 물류 자원의 효과적인 공유를 위한 네트워크 구축이 필요하다[2-4]. 또한, 공유 물류 창고 위치와 군부대 간 물자 수송경로가 최적화되지 않으면 물자 운송 지연, 과잉 재고 또는 재고 부족과 같은 문제가 발생하여 전투 준비 상태에 부정적인 영향을 줄 수 있다. 이러한 문제는 Location Allocation Problem(LAP)과 Vehicle Routing Problem(VRP)을 동시에 해결해야 하는 복잡한 Location-Routing Problem(LRP)이며, 민간 물류와 달리 작전 계획 변경, 도로 상황 변화, 적 위협 등 다양한 동적 요소를 고려해야 한다.

본 논문에서는 군수 물류 환경에 PI 개념을 적용하고, 동적 환경을 고려하여 클러스터링 기법과 Ant Colony Optimization(ACO)을 결합한 알고리즘을 제안한다. 제안한 알고리즘은 LAP과 VRP를 효율적으로 해결하여 공유 물류 창고 위치 선정과 최적 운송 경로를 도출할 수 있다.

II. 관련 연구

LRP는 LAP과 VRP를 결합한 NP(Non-deterministic Polynomial)-hard 문제로, 창고 위치 결정과 운송 경로 최적화를 다룬다. [5]는 Dynamic LRP를 해결하기 위해 K-means 클러스터링과 세 가지 immigrant 방식을 통합한 개미 군집 최적화(KACO)를 제안한다. 제안된 KACO는 K-means 클러스터링을 통해 거점 위치를 결정하고, 각 거점의 차량 경로를 ACO와 세 가지 immigrant 방식을 통해 최적화한다. 실험 결과로, KACO가 클러스터링을 사용하지 않은 개미 군집 최적화(US, EAS,

MMAS, ACS, P-ACO)와 Simulated Annealing(SA) 및 GA보다 동적 위치-경로 문제에서 더 나은 성능을 보여준다. 그러나 기존 연구에서 사용하는 K-means 클러스터링은 군집 수 k 의 초기 설정에 민감하며, 부적절한 k 값이 전체 성능에 큰 영향을 미칠 수 있다는 한계가 있다. [6]은 PI 개념을 기반으로 LRP를 해결하기 위해 Genetic Algorithm(GA)과 Lin-Kernighan Heuristic(LKH)을 결합한 최적화 모델을 제안한다. 실제 교통 요소를 반영한 경로를 계산하기 위해 Routes API를 활용함으로써 물류 허브 위치 선택과 운송 경로 최적화를 개선하고, 이를 통해 CO_2 배출을 54% 감소시킨다.

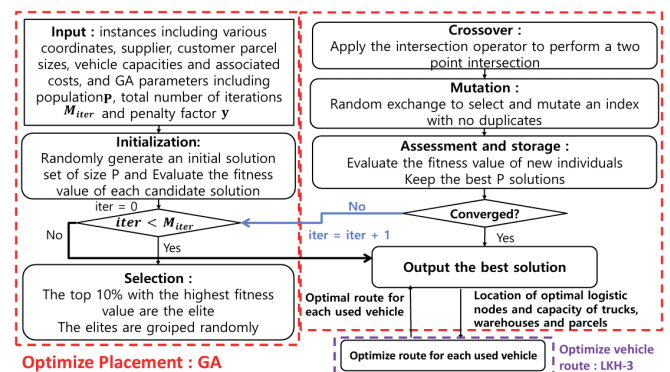


그림 1 GA-LKH model 전체 절차

그림 1은 초기 클러스터 수 결정부터 공급자와 고객 클러스터링, GA를 통한 물류 노드 위치 선정, LKH 기반 경로 생성 및 적합도 평가를 거쳐 최적의 해결책을 도출하는 전체 절차를 보여준다. 그러나 기존 연구는 주로 도로망 최적화와 비용 및 거리 중심의 문제 해결에 초점이 맞춰져 있어 군수 물류와 같이 작전환경 변화, 적 위협 등 동적이고 복합적인 변수들을 충분히 반영하지 못한다.

III. 제안하는 시스템

3.1 X-means 클러스터링을 통한 창고 위치 결정

군수 물류 환경에서는 물류 수요의 시공간적 변동성이 매우 크고, π

-node의 적정 개수를 사전에 정확하게 예측하기 어려운 문제점이 존재한다. 특히, 작전 상황 및 군수 지원 요구의 변화에 따라 물류 수요 지점들의 분포가 동적으로 변동할 수 있으므로, 고정된 창고 위치 및 개수로는 효율적인 물류 운영을 보장하기 어렵다. 이러한 문제를 해결하기 위해 본 논문에서는 그림 2와 같이 물류 수요 지점 데이터를 입력으로 받아, Bayesian Information Criterion(BIC)으로 최적의 π -node 개수와 위치를 자동으로 결정하는 X-means 클러스터링 알고리즘이다. 먼저, 최소 군집 수 k_{\min} 로 K-means를 수행하여 초기 중심 집합 C 을 얻고, 각 중심에서 할당된 데이터만 모아 이중 클러스터링을 한다. 이후 분할 전후 BIC 차이를 계산하여 통계적으로 유의미한 경우에만 해당 중심을 둘로 나누고, 이 과정을 최대 k_{\max} 까지 반복해 자동으로 군집 수를 증가시킨다. BIC 개선이 없거나 최대치 도달 시 반복을 종료하고, 최종 중심 집합 크기를 최적 군집 수 K^* 로 반환한다. 이를 통해 환경 변화와 수요 분포에 유연하게 대응하는 창고 위치 선정이 가능해진다.

Algorithm 1 X-means Clustering for Warehouse Location Determination

Input: Dataset $\mathcal{D} = \{x_1, \dots, x_n\}$, minimum clusters K_{\min} , maximum clusters K_{\max}

Output: Optimal cluster count K^* , set of cluster centers $C = \{c_1, \dots, c_{K^*}\}$

```

1:  $K \leftarrow K_{\min}$ 
2:  $C \leftarrow$  K-means( $\mathcal{D}, K$ )
3: while true do
4:   splitOccurred  $\leftarrow$  false
5:   for all center  $c_j \in C$  do
6:     Extract points assigned to  $c_j$ :  $\mathcal{D}_j = \{x_i \in \mathcal{D} : \arg \min_k \|x_i - c_k\| = j\}$ 
7:     Run 2-means on  $\mathcal{D}_j$  to get two candidates  $c_j^{(1)}, c_j^{(2)}$ 
8:     Compute  $\Delta \text{BIC}_j = \text{BIC}(\{c_j^{(1)}, c_j^{(2)}\}) - \text{BIC}(c_j)$ 
9:     if  $\Delta \text{BIC}_j > 0$  and  $K < K_{\max}$  then
10:      Replace  $c_j$  in  $C$  with  $\{c_j^{(1)}, c_j^{(2)}\}$ 
11:       $K \leftarrow K + 1$ 
12:     splitOccurred  $\leftarrow$  true
13:   end if
14: end for
15: if splitOccurred = false then
16:   break
17: end if
18: end while
19:  $K^* \leftarrow K$ 
20: return ( $K^*, C$ )
  
```

그림 2 창고 위치 결정을 위한 X-means 클러스터링 알고리즘

3.2 메모리 기반 Immigrant ACO를 이용한 경로 최적화

기존의 ACO는 특정 시점 t 에서 개미 k 가 노드 i 에서 노드 j 로 이동할 확률 $p_{ij}^k(t)$ 을 수식(1)과 같이 정의한다.

$$p_{ij}^k(t) = \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha [\eta_{ij}(t)]^\beta}{\sum_{l \in N_i^k} [\tau_{il}(t)]^\alpha [\eta_{il}(t)]^\beta} \dots\dots\dots (1)$$

여기서 $\tau_{ij}(t)$ 는 노드 i 에서 노드 j 로의 기존 페로몬 농도, $\eta_{ij}(t)$ 는 휴리스틱 정보, α, β 는 각각 페로몬 영향력과 휴리스틱 영향력을 조절하는 상수이며, N_i^k 는 개미 k 가 노드 i 에서 이동할 수 있는 후보 집합이다. 제안하는 시스템은 기존 ACO 전이 확률에 과거의 우수 경로 경험을 반영하기 위해 메모리 기반 페로몬 농도 $\tau_{ij}^{mem}(t)$ 을 가중치 λ 로 통합하였다. 이를 통해 동적 환경에서 기존에 검증된 경로 정보를 재활용하도록 수식(2)으로 확장하였다.

$$p_{ij}^k(t) = \frac{[\tau_{ij}(t) + \lambda \tau_{ij}^{mem}(t)]^\alpha [\eta_{ij}(t)]^\beta}{\sum_{l \in N_i^k} [\tau_{il}(t) + \lambda \tau_{il}^{mem}(t)]^\alpha [\eta_{il}(t)]^\beta} \dots\dots\dots (2)$$

여기서 $\tau_{ij}^{mem}(t)$ 는 과거 탐색에서 우수한 경로에 축적된 페로몬 정보를 의미하며, $\lambda \in [0, 1]$ 은 메모리 페로몬의 상대적 중요도를 조절하는 가중치 파라미터이다. 또한, 환경 변화 정도를 반영하여 페로몬 증발 계수 ρ 를 동적으로 조정하였다.

$$\rho(t) = \rho_0 + (\rho_{\max} - \rho_0) \frac{\Delta E(t)}{\Delta E_{\max}} \dots\dots\dots (3)$$

수식(3)은 갑작스러운 도로 폐쇄 및 긴급 요청이 감지될 때, 계산된 증발

속도를 적용함으로써 변화가 크면 기존 페로몬을 빠르게 제거하여 새로운 경로 학습을 촉진하고 변화가 적으면 안정적인 경로 정보 축적을 가능하게 한다. 여기서 $\Delta E(t)$ 는 시점 t 에서 감지된 환경 변화 지표(예: 도로 폐쇄 횟수), ΔE_{\max} 는 관측된 최대 변화량이다.

IV. 결론

본 논문에서는 군수 물류 환경에서 PI 개념을 적용하여 효율적인 창고 위치 결정과 최적 경로 탐색을 위한 XACO 알고리즘을 제안한다. XACO는 X-means 클러스터링을 통해 수요지의 최적 클러스터 수를 자동으로 결정하고, 이를 기반으로 개미 군집 최적화와 메모리 기반 Immigrant 전략을 결합하여 실시간으로 물자 수송경로를 최적화한다. 이를 통해 군수 물류의 효율성을 높이고, 운송 지연, 재고 과잉 및 부족 문제를 해결할 수 있다. 향후 연구는 실제 군수 물류 환경에 적용하여 성능을 평가하고, 다양한 변수에 따른 최적화 성능을 분석할 필요가 있다.

ACKNOWLEDGMENT

본 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원-학·석사연계 ICT핵심인재양성 지원을 받아 수행된 연구(IITP-2025-RS-2022-00156394, 25%)와 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 지역자능화혁신인재양성사업(IITP-2025-RS-2020-II201612, 25%)과 2025년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(2018R1A6A1A03024003, 25%)과 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 대학 ICT연구센터사업의 연구결과로 수행되었음 (IITP-2025-RS-2024-0043840, 25%)

참 고 문 헌

- [1] J. -C. Na and Y. -H. Kim, "Suggestions for the Development of the Military Logistics Support System for Military Revolution," Defense & Technology, pp. 132-141, Dec. 2017.
- [2] H. Tran-Dang, N. Krommenacker, P. Charpentier and D. -S. Kim, "Toward the Internet of Things for Physical Internet: Perspectives and Challenges," IEEE Internet of Things Journal, vol. 7, No. 6, pp. 4711-4736, June. 2020.
- [3] H. Tran-Dang and D. -S. Kim, "Physical Internet for Military Logistics: Perspectives," 2019 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC), Jeju, Korea, pp. 755-757, 2019.
- [4] J. -W. Kim, H. Tran-Dang, J. -M. Lee and D. -S. Kim, "A Study on the Application of the Physical Internet for Future Defense Logistics," KICS Fall Conference 2024, Gyeongju, Korea, pp. 129-132, 2024.
- [5] S. Gao, Y. Wang, J. Cheng, Y. Inazumi and Z. Tang. "Ant colony optimization with clustering for solving the dynamic location routing problem", Applied Mathematics and Computation, vol. 285, pp. 149-173, July. 2016.
- [6] Naganawa. H., Hirata. E., Firdausiyah. N. and Thompson, R.G., "Logistics Hub and Route Optimization in the Physical Internet Paradigm," Logistics 2024, vol. 8, No. 2, pp. 1-18, April. 2024.