

안전한 군 물류 회송을 위한 우선순위 기반 라우팅 모델

양희경¹, 이재민², 김동성*

금오공과대학교 전자공학부^{1,2,*}

{tnseo1945¹, ljmpaul², dskim*}@kumoh.ac.kr

A Priority-Based Routing Model for Survivable Military Logistics Repatriation

Heui-Kyeong Yang¹, Jae-Min Lee², and Dong-Seong Kim*

Kumoh National Institute of Technology

School of Electronic Eng.^{1,2,*}

요 약

본 논문은 자산의 중요도와 임무의 긴급도에 따라 허용 위험도를 산정하고, 이를 기반으로 안전한 회송 경로를 동적으로 탐색하는 위험 회피형 물리적 인터넷(Physical Internet, PI) 기반 군 물류 라우팅 시스템을 제안한다. 기존 회송 시스템은 대부분 최단 거리나 비용 최소화를 중심으로 설계되어 있어, 작전 지역의 위험도나 자산의 전략적 가치를 반영하지 못하는 한계가 있으며, 이는 군 물류 환경에서 작전 실패 또는 자산 손실로 이어질 수 있다. 제안하는 시스템은 자산 중요도(Asset Priority Score, APS)와 임무 긴급도(Mission Urgency Score, MUS)를 기반으로 자산별 허용 위험도를 산정하고, 경로상 허브의 위험 점수(Hub Risk Score)와 비교함으로써 위험 구간을 회피하고 전략적으로 안전한 경로를 실시간으로 제공한다. 이러한 접근을 통해 회송 작전의 안정성과 유연성을 동시에 확보하고, 군 물류에 적합한 전술적 라우팅 체계 기반을 마련하는 데 기여할 것으로 기대된다.

I. 서 론

최근 물류 산업에서 유연하고 확장 가능한 네트워크 구조에 대한 수요가 증가함에 따라, 이를 실현할 수 있는 대안으로 물리적 인터넷(Physical Internet, PI)이 주목받고 있다[1][2]. PI는 물류 시스템을 모듈화하고, 허브 간 자원을 공유함으로써 효율성과 회복 탄력성을 확보할 수 있는 구조로 평가된다[3]. 이러한 특성에 따라 PI를 군 물류에 적용하려는 시도가 이어지고 있다. 군 물류는 작전 상황에 따른 전략적 경로 선택, 자산 보호 우선순위, 지역 위험도에 따른 허브 회피 등 복잡한 조건을 수반하며, 특히 회송 상황에서는 복귀 경로의 안전성과 전략성이 작전 안정성과 직결된다. 그러나 기존 PI 기반 회송 연구는 대부분 거리나 비용을 중심으로 경로를 설정하고 있어, 자산의 특성이나 작전 조건을 반영하지 못하는 한계가 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 본 논문은 자산 등급과 임무 조건을 기반으로 허용 가능한 위험도를 산정하고, 이를 활용해 ‘안전한 회송 경로를 탐색하는 위험 회피형 라우팅 모델’을 제안한다. 제안하는 모델은 PI 네트워크의 유연성을 바탕으로 전술적 판단 요소를 라우팅 알고리즘에 반영함으로써, 군 물류 회송의 현실성과 안전성을 동시에 확보할 수 있다.

II. 기존 PI 기반 회송 시스템에 대한 분석

기존 PI 기반 회송 구조는 군 물류에 필요한 전략적 판단 요소를 충분히 반영하지 못하는 한계를 지닌다. 이러한 맥락에서 선행 연구인 [4]는 회송 중인 빈 트럭이 자원을 효율적으로 회수할 수 있도록 경로를 동적으로 변경하는 구조를 제안하며, 경제적 편익과 경로 재구성에 중점을 둔다. 이는 민간 물류 환경에서는 효과적일 수 있으나, 경로 결정 기준이 여전히 최단 거리 또는 비용 최소화에 국한되어 있어, 자산의 전략적 중요성이나 작전 지역의 전술적 위험도 등 군 물류의 핵심 요소는 반영되지 않는다.

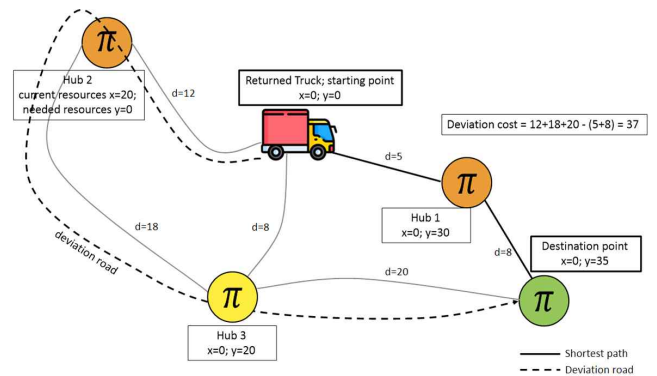


그림 1 기존 PI 기반 회송 경로 선택 구조

“그림 1. 기존 PI 기반 회송 경로 선택 구조”는 회송 중 특정 자산을 회수하며 경로를 조정하는 과정을 보여준다. 그러나 해당 구조는 자산별 우선도나 허브의 군사적 위험도를 고려하지 않고, 오직 비용 편차를 기준으로 경로를 설정하는 방식에 머물러 있다. 이러한 정적인 구조는 작전 환경에서의 유연한 대응에 한계를 드러낸다. [5]는 다수의 π -hub 중 어떤 방향으로 화물을 보낼지 결정하는 Reduced Search Space Breadth-First Search 기반 라우팅 알고리즘을 제안한다. 이 알고리즘은 탐색 각도를 제한하여 계산 비용을 줄이고, 효율적인 방향 설정을 가능하게 한다. 하지만 허브 밀도, 거리 중심성 등 물리적 연결 구조에 집중되어 있으며, 허브의 위험도, 보안 수준, 통제 가능성 등 군 물류에서 요구되는 조건은 반영하지 않는다. 결과적으로, 기존 PI 기반 회송 및 라우팅 모델은 민간 물류에는 적합할 수 있으나, 군 물류의 전략적 특수성을 반영하기에는 구조적 제약이 따른다. 따라서 자산 등급과 임무 조건을 고려한 허용 위험도 산정과, 이에 기반한 탐색 우선순위 조정이 가능한 전략적 구조가 필요하다.

III. 제안하는 군수 회송 라우팅 시스템

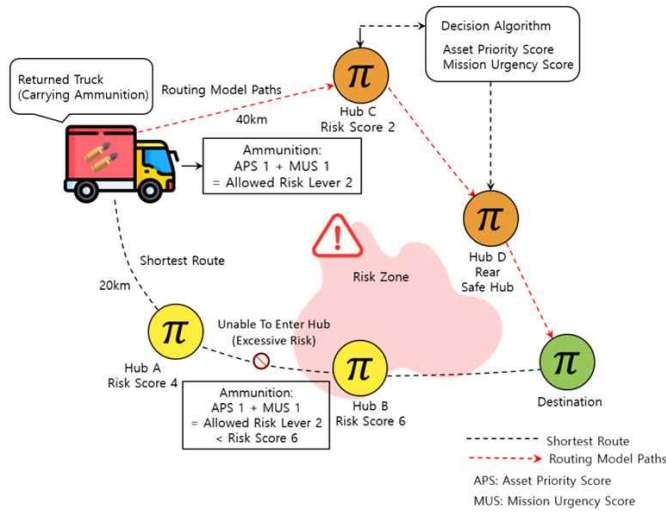


그림 2 자산 허용 위험도 기반 회송 경로 탐색 시나리오

본 장에서는 자산의 우선순위와 임무의 긴급도를 고려하여, 회송 경로 내 허브의 위험도를 평가하고 위험 구간을 회피하거나 우회할 수 있도록 설계된 군수 회송 전용 동적 라우팅 시스템을 제안한다. 제안하는 시스템은 PI 네트워크의 유연한 구조를 바탕으로, 기존 경로 탐색 기준이었던 거리 및 비용 중심의 한계를 극복하고, 실제 작전 상황에서 요구되는 자산 보호와 위험 회피 요건을 라우팅 판단에 반영하는 데 중점을 둔다. 이 시스템은 세 가지 주요 단계로 구성된다. 첫째, 회송 대상 자산에 대해 자산 중요도(Asset Priority Score, APS)와 임무 긴급도(Mission Urgency Score, MUS)를 입력값으로 받아 자산별 허용 위험도를 계산한다. 둘째, PI 네트워크 내 각 허브의 위험 점수(Hub Risk Score)와 비교하여, 통과 가능한 허브와 불가능한 허브를 자동 선별한다. 셋째, 남은 후보 허브를 대상으로 경로상의 편차, 회피 효율성, 작전 조건 등을 종합적으로 고려하여 실시간으로 최적의 경로를 탐색한다. 탐색 알고리즘은 허브별 위험 점수를 반복적으로 비교하고, 복수의 후보 경로가 존재하는 경우 임무 도착 시간과 탐색 비용 등을 기준으로 우선순위를 설정한다.

"그림 2. 자산 허용 위험도 기반 회송 경로 탐색 시나리오"에 제시된 바와 같이, 전방기지에서 복귀한 회송 트럭은 중간 허브에서 탄약(APS 1)을 적재하고, 긴급한 후속 작전을 위해 즉시 회송(MUS 1)이 요구되는 상황이다. 이 경우 허용 위험도는 2로 산정되며, 이는 위험 점수가 2를 초과하는 허브는 통과할 수 없다는 의미이다. 기존 최단 경로 상에 위치한 Hub B는 위험 점수 6으로 탐색 대상에서 자동 제외되고, 위험 점수가 2 이하인 Hub C와 Hub D를 경유하는 우회 경로가 선택된다. 이처럼 본 시스템은 회송 경로를 단순히 거리나 비용이 아닌 전략적 판단 요소를 바탕으로 설정함으로써 작전 안정성과 자산 보호를 동시에 도모할 수 있다. 특히 이 라우팅 시스템의 강점은 동적 환경에의 적응력에 있다. 허브의 위험 점수는 실시간 정보에 따라 갱신되며, 작전 중 허브가 봉쇄되거나 위협 수준이 급변할 경우에도 경로를 즉시 재계산하여 새로운 안전 경로로 전환이 가능하다. 이러한 반복적 판단 구조는 일회성 탐색에 그치지 않고, 지속적인 상황 대응이 요구되는 군수 회송 작전에 매우 효과적이다. 또한 본 시스템은 자산 유형에 따라 경로 탐색 기준을 유연하게 조정할 수 있도록 설계되었다. 예를 들어, 정비 부품은 APS 2, MUS 0으로 상대적으로 위험 허용 범위가 넓은 반면, 의료물자는 APS 0, MUS 2로 민감성과 긴급도가 높아 보다 안전한 경로가 요구된다. 빈 컨테이너처럼 중요도와 긴급도가 모두 낮은 자산은 허용 위험도가 높게 설정되어, 일정 수준의 위험을 감수 하더라도 회송 효율성을 우선할 수 있다. 이러한 자산별 기준은 시스템 내

의사결정 알고리즘과 연동되어, 상황에 따른 차등적 대응을 자동화할 수 있다. 결과적으로, 본 논문에서 제안하는 위험 회피형 라우팅 시스템은 군수 회송 작전의 복잡한 목적과 조건을 반영할 수 있도록 설계된 전략적 구조를 갖추고 있다. 동적 상황 변화에 실시간으로 대응할 수 있으며, 다양한 자산 유형과 회송 조건에 따라 경로 탐색 기준을 탄력적으로 확장할 수 있다. 이를 통해 작전 안정성과 물류 효율성을 동시에 확보할 수 있으며, 물류 분야에서의 실용성과 확장성을 갖춘 차세대 회송 라우팅 시스템으로서의 가능성을 보여준다.

IV. 결론 및 향후 연구

본 논문에서는 군 물류 회송 환경에서 자산 우선순위, 임무 조건, 허브 위험도를 반영한 위험 회피형 동적 라우팅 시스템을 제안하였다. 제안하는 시스템은 자산 중요도와 임무 긴급도를 기반으로 허용 위험도를 산정하고, 실시간으로 안전한 회송 경로를 탐색할 수 있도록 설계되었다. 이러한 구조는 군수 회송의 효율성과 안정성을 동시에 확보할 수 있는 전략적 의사결정을 가능하게 한다. 향후에는 위험 예측 모델과 연계하고, 실시간 시뮬레이션 기반의 효과 검증을 통해 시스템을 고도화할 예정이다.

ACKNOWLEDGMENT

본 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 지역융합혁신인재양성사업(IITP-2025-RS-2020-II201612, 25%)과 2025년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(2018RIA6A1A03024003, 25%)과 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 대학 ICT연구센터사업(IITP-2025-RS-2024-00438430, 25%)과 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원 - 학식사연계 ICT핵심인재양성 지원을 받아 수행된 연구임(IITP-2025-RS-2022-00156394, 25%)

참 고 문 헌

- [1] H. Tran-Dang and D.-S. Kim, "An Information Framework for Internet of Things Services in Physical Internet", IEEE Access, Vol. 6, pp. 43967 - 43978, Aug. 2018.
- [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 - 4726, Jun. 2020.
- [3] H. Tran-Dang, N. Krommenacker, and P. Charpentier, "Containers monitoring through the Physical Internet: a spatial 3D model based on wireless sensor networks," International Journal of Production Research, vol. 55, no. 9, pp. 2650 - 2663, May 2017.
- [4] M. Nakechbandi and J.-Y. Colin, "Studying the Rerouting of Empty Carriers during their Return Trips to Manage Rare Mobile Resources in a Physical Internet", Proceedings of the 5th International Conference on Logistics Operations Management (GOL), IEEE, pp. 1 - 6, 2020.
- [5] S. J. Shaikh, P. Muthukrishnan, Y. Lai and B. Montreuil, "Dynamic Directional Routing of Freight in the Physical Internet", Proceedings of the IISE Annual Conference & Expo, pp. 1 - 8, 2025.