

# 다중 로봇 시스템 제어를 위한 네트워크 및 경로 계획 기술 연구 동향

조예령, 이현수, 백한결, 박수현, 김종헌\*

veryeong099@gmail.com, {hyunsoo, 67back, soohyun828, \*joongheon}@korea.ac.kr

## Survey of Research Trends in Network and Path Planning for Multi-Robot System Control

Ye Ryeong Cho, Hyunsoo Lee, Hankyul Baek, Soohyun Park, Joongheon Kim\*

Korea University

### 요약

다중 로봇 시스템은 여러 대의 자율 이동 로봇으로 구성된 시스템으로 군사 임무, 재난 재해에서의 구조작업, 네트워크 등 다양한 분야에서 활용되고 있다. 기존 단일 로봇의 한계를 극복하여 시간 및 비용 효율을 극대화시킬 것으로 기대되면서 최근 다중 로봇 시스템의 제어 알고리즘이 주목받고 있다. 본 논문에서는 기존 다중 로봇 시스템의 선행 연구를 탐색하고, 5G 네트워크 프로토콜, 강화 학습 등 다양한 알고리즘을 접목시킨 다중 로봇 시스템에 대한 연구 동향을 알아볼 것이다. 또한 최근 연구 동향과 종합하여 다중 로봇 시스템의 미래 연구 동향에 대하여 제시하여 다양한 응용 분야에서 대규모 다중 로봇 시스템에 대한 연구가 진행될 수 있음을 시사한다.

### I. 서론

다중 로봇 시스템(Multi-Robot System)이란, 둘 이상의 자율적인 이동 로봇들의 집합을 칭하는 용어로 로봇 간 네트워크 및 협력적인 제어 시스템을 통하여 기존 단일 로봇 시스템보다 복잡하고 높은 난이도의 작업을 가능하게 하는 시스템이다 [1]. 기존 단일 로봇 시스템이 요구하는 모든 기능을 갖추기 위해서는 높은 비용과 긴 처리 시간을 필요로 하는 반면에 다중 로봇 시스템의 경우 단일 로봇에 비하여 비용 효율적이며 더 복잡한 작업을 수행할 수 있다. 이를 바탕으로 다중 로봇 시스템이 군사 임무 [2], 재난 재해에서의 구조 작업 [3], 네트워크 [4]와 같이 다양한 분야에서 활발히 연구되고 있는 가운데, 최근 동적 환경에서 다중 로봇 시스템을 이용한 네트워크 구성 및 경로 계획 기술이 주목받고 있다. 따라서 본 논문에서는 현재까지 다중 로봇 시스템과 이를 활용한 선행 연구에 대하여 살펴볼 것이며, 다가오는 로봇 상용화 시대에 적극적으로 활용될 다중 로봇 시스템에서의 네트워크 및 경로 계획 기술 연구 동향을 알아보고자 한다.

### II. 다중 로봇 시스템

다중 로봇 시스템이란 둘 이상의 자율 이동 로봇으로 구성된 시스템으로 자율 주행 자동차, 모바일 로봇, 해저 로봇 등 다양한 로봇으로 구성될 수 있다. 이러한 이종 간 다중 로봇 시스템의 효율적인 제어를 위해서는 협력적인 학습[5]이 필수적이며, 로봇 간 통신을 위한 네트워크 구성[6]이 필요하다.

그림 1은 모바일 로봇으로 구성된 다중 로봇 시스템의 제어 방식을 간략하게 나타낸 그림으로, 장애물 회피에 대한 그림이다. 그림 1에서 볼 수 있듯이, 다중 로봇 시스템은 구성 로봇 중 하나의 개체에 의해 장애물이 인지된다면 시스템 내 다른 로봇과의 통신을 통하여 효율적인 제어가 가능하다.

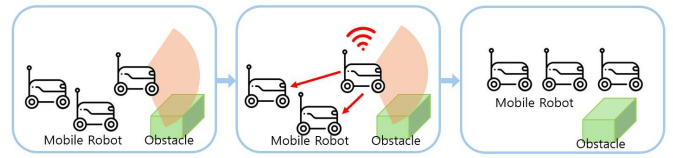


그림 1 다중 로봇 시스템의 장애물 회피 과정

다중 로봇 시스템은 모든 로봇이 각각 탐색해야 하는 단일 로봇 시스템과 다르게 한 대의 로봇이 탐색한 정보를 공유함으로써 시간과 비용 효율적인 운용이 가능해진다. 동시에 다중 로봇 시스템의 효율적인 운용을 위해서 다양한 학습 알고리즘과 스케줄링 시스템이 연구되고 있다.

#### 2.1 다중 로봇 시스템의 선행 연구

다중 로봇 시스템에서 각 로봇을 효율적으로 운용하기 위해 중앙 집중형 아키텍처(Centralized Network Architecture)가 제안되었다. 주어진 환경에서 각 로봇에 주어진 임무를 담당하는 중앙 집중형 아키텍처는, 무작위로 작업을 담당하는 경우 대비 높은 작업 효율과 짧은 처리 시간을 보여준다. 하지만 중앙 집중형 아키텍처의 경우, 더 많은 로봇을 제어하기에는 연산량에 한계가 있으며 시스템의 복잡도와 확장성에 제약이 있다 [7].

이러한 한계를 극복하기 위하여 [8]에서는 다중 로봇 시스템에 분산형 아키텍처(Decentralized Network Architecture)를 제안함으로써 계산 병목 현상으로 인한 과부하를 방지하였다. 또한 심층 강화 학습을 적용하여 로봇 간 상호작용을 통해 제어 전략을 학습할 수 있도록 제안하였다 [9]. 하지만 여전히 다수의 로봇을 동적 환경에서 제어할 때는 많은 연산량으로 인한 환경 제한 문제와 로봇 간 충돌에 의한 사고가 발생하는 등의 한계가 있다.

#### 2.2 다중 로봇 시스템의 네트워크 및 경로 계획

다중 로봇 시스템의 응용 분야가 확장되면서 효율성 및 에너지 소비 최적화, 신뢰성 및 안정성 강화를 위한 네트워크 구성 및 경로 계획 기술이 주목받고 있다. 이렇게 효율적인 네트워크 구성을 바탕으로 하는 경로 계획은 기존의 작은 규모를 벗어나 대규모 다중 로봇 시스템을 구성했을 때

에도 효율성을 극대화할 수 있을 것으로 기대된다 [10].

[11]에서는 기존 연구의 한계인 컴퓨팅 리소스 부족, 느린 학습 속도 및 낮은 정확도를 개선하기 위하여 5G 네트워크 프로토콜과 심층 강화 학습을 사용한 Multi-PPO(Proxy Policy Optimization) 알고리즘을 제안한다. 동적 환경에서의 빠른 정보 공유를 위하여 5G 네트워크 프로토콜을 적용하였으며, 가상 에이전트를 구축하여 로봇 분산 통신 시스템의 부하 균형을 맞추었다. 또한 각각의 로봇이 병렬적으로 학습 후 자율적인 의사 결정을 진행함으로써 효율성을 최대화하였다. 그 결과, 다중 사용자의 동시 요청에도 빠른 학습 속도와 적은 학습 횟수를 유지하며 최대 보상에 도달하며 기존 한계를 개선함을 보여준다. 하지만 다중 로봇 시스템에 대한 대부분의 연구에서 동적인 환경을 가정하지 않았다는 한계가 있으며 [12], 최근 동적 환경에서 중요한 충돌 방지 및 경로 계획 알고리즘의 연구가 활발히 진행되고 있다.

기존의 연구를 발전시켜 동적 환경에 대한 한계를 극복하기 위해, [13]에서는 분산형 아키텍처와 동적인 장애물과의 상호 작용을 고려하여 이동 경로를 예측하는 알고리즘을 제안하였다. 각 로봇은 장애물 및 주변 환경과의 상호 작용을 통하여 이동 경로를 계획하고, 이동 중인 인간이 있는 환경에서 성능을 측정하여 동적 환경에서도 적용 가능함을 보여준다. 동시에, 로봇 간 통신을 하지 않는 상황에서도 중앙 집중형 아키텍처보다 나은 성능을 보여줌으로써 동적 환경에서 분산형 아키텍처의 적용으로 인한 성능 향상을 증명한다. 한편 [13]에서 제안된 알고리즘은 많은 수의 로봇을 제어할 수 없다는 점에서 대규모 멀티 로봇 시스템으로의 확장성은 여전히 제한적이다.

하지만 향후 다양한 알고리즘 연구를 통해 시스템의 과부하를 방지하고 동적 환경에서의 경로 탐색과 충돌 방지 및 자원의 최적화를 이룬다면, 단일 로봇의 처리 속도와 효율을 증가함과 동시에 환경에 구애받지 않고 대규모 로봇을 제어할 수 있는 시스템을 구축할 수 있을 것이다.

### III. 결론

로봇의 상용화가 진행되면서, 다양한 로봇을 동시에 제어하는 다중 로봇 시스템이 급격히 발전하고 있다. 이는 군사 임무, 재난 구조 작업, 네트워크 등 다양한 분야에서 연구되며, 중앙 집중형 아키텍처와 분산형 아키텍처로 구성된다. 또한 환경을 실시간으로 인식하고 로봇 간 정보 공유를 통해 학습하는 알고리즘을 적용함으로써 시간과 비용 효율을 최대화할 수 있다. 본 논문은 다중 로봇 시스템의 선행 연구를 소개하면서, 최근에 연구되고 있는 다중 로봇 시스템의 네트워크 구성 및 경로 탐색 분야의 연구 동향 또한 알아보았다. 이를 통해 효율적인 네트워크 구성과 경로 계획이 다중 로봇 시스템의 성능 향상에 기여할 수 있음을 보여줌과 동시에 다양한 응용 분야에서 대규모 다중 로봇 시스템에 대한 연구가 진행될 수 있음을 시사한다.

### ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (No.2022-0-00907, (2세부) AI Bots 협업 플랫폼 및 자기조직 인공지능 기술개발). 본 논문의 교신 저자는 김중현임.

### 참 고 문 헌

[1] A. Gautam and S. Mohan, "A review of research in multi-robot

systems," in *Proc. International Conference on Industrial and Information Systems (ICIIS)*, Chennai, India, Aug. 2012, pp. 1-5.

[2] S. Swethaa and A. Felix, "An intuitionistic dense fuzzy AHP-TOPSIS method for military robot selection," *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems Preprint*, vol. 44, no. 4, pp. 6749-6774, Jan. 2023.

[3] M.P. Melvin, M. Faied, M. Krishnan and M. Paulik, "Robot Platooning Strategy for Search and Rescue Operations," *Intelligent Service Robotics*, vol. 15, pp. 57-68, Dec. 2022.

[4] H. Shinmiya, T. Motoo, T. Fujihashi, R. Kudo, K. Takahashi, T. Murakami, T. Watanabe and S. Saruwatari, "Robot-Network Co-optimization Using Deep Reinforcement Learning," in *Proc. IEEE Consumer Communications & Networking Conference (CCNC)*, Las Vegas, NV, USA, Jan. 2023, pp. 281-286.

[5] P. Singh, R. Tiwari and M. Bhattacharya, "Navigation in Multi Robot system using cooperative learning: A survey," in *Proc. International Conference on Computational Techniques in Information and Communication Technologies (ICCTICT)*, New Delhi, India, Mar. 2016, pp. 145-150.

[6] Y. Wu, X. Ren, H. Zhou, Y. Wang and X. Yi, "A Survey on Multi-Robot Coordination in Electromagnetic Adversarial Environment: Challenges and Techniques," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 53484-53497, Mar. 2020.

[7] C. Liu and A. Kroll, "A Centralized Multi-Robot Task Allocation for Industrial Plant Inspection by Using A\* and Genetic Algorithms," in *Proc. Artificial Intelligence and Soft Computing (ICAISC)*, Zakopane, Poland, Apr. 2012, pp. 466-474.

[8] L. Zhang, Y. Sun, A. Barth and O. Ma, "Decentralized Control of Multi-Robot System in Cooperative Object Transportation Using Deep Reinforcement Learning," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 184109-184119, Sep. 2020.

[9] R. Luo, W. Ni, H. Tian and J. Cheng, "Federated Deep Reinforcement Learning for RIS-Assisted Indoor Multi-Robot Communication Systems," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 71, no. 11, pp. 12321-12326, Nov. 2022.

[10] N.A. Abujabal, T. Rabie and I. Kamel, "Path Planning Techniques for Multi-robot Systems: A Systematic Review," in *Proc. International Conference on Innovations in Information Technology (IIT)*, Al-Ain, Abu Dhabi, Nov. 2023, pp. 1-6.

[11] Z. Lv, C. Cheng and H. Lv, "Multi-Robot Distributed Communication in Heterogeneous Robotic Systems on 5G Networking," *IEEE Wireless Communications*, vol. 30, no. 2, pp. 98-104, Apr. 2023.

[12] G. Kyprianou, L. Doitsidis and S.A. Chatzichristofis, "Towards the Achievement of Path Planning with Multi-robot Systems in Dynamic Environments," *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, vol. 104, no. 15, Dec. 2021.

[13] H. Zhu, F. M. Claramunt, B. Brito and J. Alonso-Mora, "Learning Interaction-Aware Trajectory Predictions for Decentralized Multi-Robot Motion Planning in Dynamic Environments," *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 6, no. 2, pp. 2256-2263, Apr. 2021.