

# 군집 로봇의 최적화 기반 경로 계획 및 스케줄링 시스템 기술 동향

조예령, 박수현\*, 김중헌

고려대학교, \*숙명여자대학교

{joyena0909, joongheon}@korea.ac.kr, \*soohyun.park@sookmyung.ac.kr

## Research Trends in Optimization-Based Path Planning and Scheduling Systems for Swarm Robotics

Yeryeong Cho, \*Soohyun Park, Joongheon Kim

Korea Univ., \*Sookmyung Women's Univ.

### 요약

본 논문은 군집 로봇을 위한 최적화 기반 스케줄링 시스템의 최신 기술 동향을 분석 및 검토한다. 군집 로봇은 다양한 산업 분야에서 협업을 통해 복잡한 작업을 수행하는 데에 활발히 사용되고 있다. 이러한 로봇 시스템의 효율적인 관리와 작업 할당 문제 개선을 위해 고도화된 경로 설정 및 스케줄링 시스템이 필수적이다. 따라서 본 논문은 개미 군체 최적화, 유전 알고리즘 등과 같은 다양한 기법들이 어떻게 적용되고 있는지에 대해 소개한다. 또한 효율성을 평가하고 기술적 한계 및 확장 가능성에 대해 분석하며, 향후 연구 방향성에 대해 제안한다.

### I. 서론

본 논문은 다양한 산업 분야에서 협업을 통해 복잡한 작업을 수행하는 데에 활발히 사용되고 있는 군집 로봇의 최적화 기반 경로 계획 및 스케줄링 시스템에 관한 최신 기술 동향을 분석한다. 군집 로봇 시스템은 여러 대의 로봇이 협력하여 공통의 목표를 달성하는 시스템으로, 단일 로봇으로는 해결하기 어려운 작업을 효율적으로 수행할 수 있다는 장점이 있다 [1]. 특히, 환경 모니터링, 재난 구조, 복잡한 제조 과정 등 단일 로봇이 해결하기 어려운 작업에 대해 다양한 형태의 군집 로봇 시스템이 활용되고 있다 [2]. 그림 1과 같이 다양한 형태의 로봇이 군집(Swarm)을 이루며, 데이터 전송 및 공유를 통하여 공동의 목표를 협력적으로 이룬다.

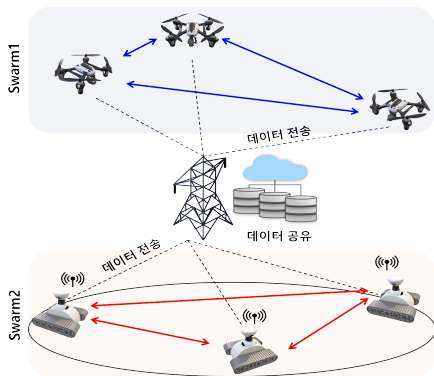


그림 1 군집 로봇 시스템의 구조

하지만 군집 로봇 시스템의 경우, 다양한 외부 요인에 의한 높은 연산 복잡도로 인하여 효율적인 관리 및 작업 할당 문제에 대해 한계를 가진다. 이러한 로봇 시스템의 효율적인 관리와 작업 할당 문제를 해결하기 위해서는 주어진 환경에 최적화된 경로 계획 및 스케줄링 시스템이 필수적이며, 현재까지 이를 위한 많은 연구가 진행되었다. 본 논문에서는 이러한 군집 로봇 시스템의 경로 계획 및 스케줄링과 작업 할당을 최적화하는 데 사용되는 다양한 최적화 방법론에 대하여 분석한다. 대표적으로, 개미 군

체 최적화(Ant Colony Optimization, ACO), 유전 알고리즘(Genetic Algorithm, GA), 입자 군집 최적화(Particle Swarm Optimization, PSO) 등이 포함된다. 이 최적화 기법들은 각각 특징을 가지며, 군집 로봇 시스템의 효율성을 평가하고 기술적 한계 및 확장 가능성을 분석하는 데 중요한 역할을 한다. 또한, 본 논문은 군집 로봇의 최적화된 스케줄링 시스템을 구축하기 위해 적용되는 연구 사례를 분석함과 동시에 한계점에 대해 조명하며 향후 연구 방향에 대해 시사한다.

### II. 군집 로봇 시스템의 최적화 기법

대표적인 최적화 기법으로는 아래와 같이 개미 군체 최적화, 유전 알고리즘, 입자 군집 최적화 등이 있다. 이러한 최적화 기법은 군집 로봇 시스템의 작업 할당, 경로 계획 및 자원 배분에 있어 중요한 역할을 한다.

- 개미 군체 최적화: 1996년 제안된 기법으로 개미가 음식을 찾는 과정에서 만드는 페로몬 경로를 모방한 최적화 기법이다. 개미 군체 최적화 기법은 복잡한 최적화 문제에 적용 가능하며, 특히 경로 탐색과 스케줄링 문제에서 높은 효율을 보인다 [3].
- 유전 알고리즘: 1962년 제안된 알고리즘으로 자연의 진화 과정을 모방하여 개발되었다. 개체군 내에서 각 개체의 유전자를 교차하고, 돌연변이 생성 및 선택을 통해 최적화 문제를 해결하며, 다양한 변수와 제약 조건을 가진 복잡한 문제에서 우수한 성능을 가진다 [4].
- 입자 군집 최적화: 1995년 제안된 알고리즘으로 조류의 군집 행동을 모방한 기법이다. 각 입자는 해결 공간을 탐색하고 경험과 군집의 정보를 분석하여 최적의 해를 찾으며, 매개 변수 조정이 상대적으로 간단하다는 특징을 가진다. 입자 군집 최적화는 연속적인 최적화 문제에 우수한 성능을 가진다 [5].

위와 같은 최적화 기법들은 군집 로봇의 작업 효율성을 극대화하고, 다양한 작업 환경에서 주어진 작업에 효과적으로 대응할 수 있게 함으로써, 군집 로봇 시스템의 전반적인 성능 향상에 기여할 수 있다.

### III. 군집 로봇의 최적화 기법 기반 경로 계획 및 스케줄링 시스템 연구 동향

개미 군체 최적화 기법은 작업 현장의 자재 운반, 청소, 위험한 방사능 현장 모니터링, 군사용 애플리케이션 등과 같은 실제 응용을 위해 활발히 연구되고 있다. 스케줄링 시스템 구성을 위해 에너지 소비 및 서비스 지연 간 최소화가 중요하다는 점에서 벌집 최적화와 개미 군집 최적화 기법을 동시에 사용한 하이브리드 벌집-개미 군체 최적화 기법이 제안되었으며 [6], 시뮬레이션을 통해 대규모 시스템에서도 효율적인 경로 계획 및 스케줄링이 가능함을 입증하였다. 또한 개미 군체 최적화 기법의 경우 스케줄링 이외에도 경로 최적화 문제에 활발히 활용된다. 페로몬의 유무를 페로몬의 농도로 대체하여 개미의 이동 유연성을 향상한 다단계 개미 군집 최적화를 적용하여 최단 경로를 설정하는 알고리즘이 제안되었다 [7].

유전 알고리즘은 초기에 임의의 해를 생성하고, 각 해의 적합도를 평가하여 가장 적합한 해를 선택하는 과정을 거친다. 이 과정에서 교차와 돌연변이 연산자를 사용하여 새로운 해를 생성할 수 있으며, 이는 다양한 로봇 스케줄링 및 경로 계획 문제를 해결하는 데에 적용되었다. 이를 기반으로 수중 환경에서 군집 로봇의 경로 계획을 위해 각 로봇이 정의된 목표물에 도달할 수 있는 최적의 경로를 계획하는 알고리즘이 제안되었다 [8]. 로봇의 경로를 3차원 공간에서의 좌표로 인코딩하고 각 좌표는 유전자로 표현되어 염색체를 구성하였으며, 로봇의 이동 경로는 유전 알고리즘을 통해 반복적으로 최적화되어 최종적으로 충돌 없이 목표까지 도달하는 경로 계획이 가능함을 증명하였다. 또한 유전 알고리즘을 활용하여 복잡한 고밀도 주차장 환경 내 작업 수행을 위한 순서 결정, 로봇 할당, 협동 경로 계획 등의 다중 주차 로봇 스케줄링 알고리즘이 제안되었다 [9].

입자 군집 최적화는 각 입자의 위치와 속도를 초기화한 후 각 입자가 자신의 최적 위치와 군집 내의 최적 위치를 기반으로 위치와 속도를 반복적으로 갱신하는 기법이다. 강화학습을 활용하여 입자의 성능을 학습하고, 로컬 검색을 통해 해의 다양성을 유지하는 접근 방식을 통해 작업 스케줄링 시스템 구성 방법이 제안되었다 [10]. 이를 통해 로봇 간의 협업을 최적화하고 작업 할당 효율성을 높임으로써 군집 로봇의 공동 목표 달성 시간을 최소화함을 증명하였다. 또한 경로 계획 최적화를 위해 가우시안 분포를 적용하여 입자의 다양성을 증가시키고 조기 수렴 문제를 해결한 알고리즘이 제안되었다 [11]. 입자의 위치 정보를 부분적으로 활용하여 전체적인 수렴 속도와 효율성을 향상시킴으로써 군집 로봇의 공동 작업 달성 시간 최소화가 가능함을 증명하였다.

### IV. 결론

군집 로봇의 최적화 기반 경로 계획 및 스케줄링 시스템은 시스템의 설계 및 운영에 있어 중대한 역할을 할 것으로 기대된다. 본 논문은 각 최적화 기법의 선행 연구 및 개념에 대해 소개하면서 다양한 응용 분야에서 연구가 진행될 수 있음을 시사한다. 또한 본 논문은 다양한 환경에서의 응용 사례에 대해 분석함으로써 각 기법의 특징 및 적용 환경에 대해 소개하고 향후 연구 방향에 대해 제시한다.

### ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 2022년 한국연구재단의 지원을 받아 수행됨 (NRF 2022R1A2C2004869). 본 논문의 교신 저자는 김중헌임.

### 참 고 문 헌

- [1] M. Brambilla et al., "Swarm robotics: a review from the swarm engineering perspective", *Swarm Intelligence*, pp.1 - 41, January 2013.
- [2] S. -J. Chung, A. A. Paranjape, P. Dames, S. Shen and V. Kumar, "A Survey on Aerial Swarm Robotics", *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 34, no. 4, pp. 837-855, August 2018.
- [3] M. Dorigo, V. Maniezzo and A. Colomi, "Ant system: optimization by a colony of cooperating agents", *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, vol. 26, no. 1, pp. 29-41, February 1996.
- [4] John H. Holland, "Outline for a Logical Theory of Adaptive Systems", *Journal of the ACM*, vol. 9, no. 3, pp. 297 - 314, July. 1962.
- [5] J. Kennedy and R. Eberhart, "Particle swarm optimization," in *Proc. International Conference on Neural Networks (ICNN)*, pp. 1942-1948, Perth, WA, Australia, November 1995.
- [6] D. Li, L. Wang, J. Cai, K. Ma and T. Tan, "Research on Terminal Distance Index-Based Multi-Step Ant Colony Optimization for Mobile Robot Path Planning," *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, vol. 20, no. 4, pp. 2321-2337, October 2023.
- [7] H. A. Nguyen, D. M. Nguyen, Q. H. Pham, Q. D. Pham and D. C. Hoang, "Energy and Time-Efficient Scheduling of Automated Guided Vehicles System: A Hybrid Artificial Bee Colony Algorithm and Improved Ant Colony Optimization Approach", in *Proc. International Conference on Control, Automation and Information Sciences (ICCAIS)*, Hanoi, Vietnam, pp. 719-724, November 2023.
- [8] M. P. Vicmudo, E. P. Dadios and R. R. P. Vicerra, "Path planning of underwater swarm robots using genetic algorithm", in *Proc. International Conference on Humanoid, Nanotechnology, Information Technology, Communication and Control, Environment and Management (HNICEM)*, Palawan, Philippines, pp. 1-5, November 2014.
- [9] G. Chen et al., "Multiobjective Scheduling Strategy With Genetic Algorithm and Time-Enhanced A\* Planning for Autonomous Parking Robotics in High-Density Unmanned Parking Lots", *IEEE Transactions on Mechatronics*, vol. 26, no. 3, pp. 1547-1557, June 2021.
- [10] X. -F. Liu, Y. Fang, Z. -H. Zhan and J. Zhang, "Strength Learning Particle Swarm Optimization for Multiobjective Multirobot Task Scheduling", *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, vol. 53, no. 7, pp. 4052-4063, July 2023.
- [11] L. Zhang, Y. Zhang and Y. Li, "Mobile Robot Path Planning Based on Improved Localized Particle Swarm Optimization", *IEEE Sensors Journal*, vol. 21, no. 5, pp. 6962-6972, March 2021.