

멀티 에이전트 상태 기반 배치 최적화

김정현 , 신수용

국립금오공과대학교

kjh454311@kumoh.ac.kr, wdragon@kumoh.ac.kr

Multi-agent state-based deployment optimization

Jung Hyun Kim , Soo Young Shin
Kumoh National Institute of Technology

요약

본 논문은 에이전트의 배터리 상태와 로컬 정보를 기반으로 리더 역할을 자율적으로 전환함으로써 에너지 균형과 포메이션 유지를 동시에 달성하는 분산 제어 기법을 제안한다.

I. 서론

멀티에이전트 시스템(Multi-Agent Systems, MAS)은 로봇, 드론, 자율 주행 차량 등 다양한 자율 에이전트들이 협력적으로 작업을 수행하는 구조로, 자율 탐사, 군집 제어, 분산 감시, 물류 자동화 등에서 활발히 활용되고 있다. 이러한 시스템의 핵심은 개별 에이전트의 자율성과 전체 시스템의 협력 구조를 조화롭게 결합하는 데 있으며, 특히 포메이션 제어는 일정한 배열을 유지하며 집단 이동하거나 지역을 커버하는 데 필수적이다. 기존의 포메이션 제어는 주로 리더-팔로워나 중심 기반 구조에 의존하며, 각 에이전트의 역할이 고정되어 있는 경우가 많았다. 그러나 실제 환경에서는 에이전트 간 배터리 상태, 통신 품질, 센서 성능 등의 자원이 상이하고 시시각각 변할 수 있어, 고정된 역할 구조는 에너지 불균형과 단일 실패점의 문제를 야기할 수 있다[1].

이러한 문제를 해결하기 위해, 본 연구에서는 에이전트의 배터리 상태와 로컬 정보를 기반으로 리더 등의 역할을 동적으로 전환할 수 있는 분산 포메이션 제어 구조를 제안한다. 제안된 구조는 로컬 통신만으로 작동하며, 전체 시스템의 연결성과 포메이션 정밀도를 유지하는 동시에 에너지 소비의 불균형을 완화할 수 있다. 본 연구는 개념적 수준에서 구조를 제안하고, 향후 UAV 기반 실시간 포메이션 제어나 배터리 제약이 있는 군집 탐사 환경에 적용될 수 있는 기반을 마련하고자 한다[2].

2. 관련 연구

멀티에이전트 시스템에서의 포메이션 제어와 역할 분산에 대한 연구는 오랜 기간 동안 다양한 접근 방식으로 진행되어 왔다. 기존의 포메이션 제어 연구는 크게 두 가지 방향으로 구분된다. 첫째는 에이전트 간의 상대 위치 정보를 기반으로 하는 거리 기반 제어(distance-based control) 또는 방향 기반 제어(bearing-based control) 방식이며, 둘째는 하나 또는 소수의 리더가 전체 에이전트의 움직임을 주도하는 리더-팔로워 구조이다. 이들 방식은 일정한 형상을 유지하거나 목표 지점을 향해 이동하는 데 유효하지만, 에이전트 간 자원 불균형이나 동적 환경 변화에 대응하는 데에는 한계가 있다.

특히 리더-팔로워 기반 포메이션에서는 리더에 과도한 연산 및 통신 부담이 집중되며, 배터리 소모가 빠르게 진행될 경우 전체 포메이션 성능에 큰 영향을 미치게 된다. 이러한 문제를 해결하고자 일부 연구에서는 다수의 리더를 사용하는 멀티-리더 구조나, 리더를 주기적으로 교체하는 방식을

도입하였다. 그러나 대부분의 기존 연구는 고정된 역할 할당 또는 중앙 집중적 계획 구조에 의존하고 있어, 분산적이고 동적인 역할 전환 구조에 대한 실질적인 구현 연구는 미흡한 실정이다.

에너지 효율성 측면에서는, 각 에이전트의 배터리 상태를 고려하여 경로를 최적화하거나, 특정 작업을 할당하는 연구들이 존재한다. 예를 들어, 에너지 인지적 커버리지 제어(energy-aware coverage control), 충전 주기 예측 기반의 작업 분배, 에너지 최적화 경로 할당 등이 있다. 그러나 이러한 연구들 역시 대부분 개별 에이전트의 동선 최적화에 초점이 맞추어져 있으며, 역할 전환과 포메이션 구조 유지라는 이중 목적을 동시에 만족시키는 사례는 드물다. 특히 Swarm-SLAM, Kimera-Multi 등의 연구에서는 분산 상태 인식과 정보 융합 기술을 활용하여 에이전트 간 역할을 자율적으로 조정하는 가능성을 보여주었다. 하지만 이들 시스템도 주로 SLAM 또는 맵 정합을 중심으로 구성되어 있어, 포메이션 유지 및 에너지 분산 관점에서의 최적화는 상대적으로 미진하다.

따라서 본 연구는 기존의 포메이션 제어 및 자원 기반 제어 연구를 기반으로 하되, 실시간 배터리 상태 반영, 궤적 공유 기반의 역할 전환, 그리고 완전한 분산 구조를 통합한 새로운 프레임워크를 제안함으로써 관련 분야에서의 공백을 메우고자 한다.

3. 시스템 모델

본 절에서는 제안하는 분산 포메이션 제어 구조의 수학적 모델과 시스템 구성 요소를 정의한다. 에이전트는 각각의 상태와 로컬 정보를 기반으로 의사결정을 수행하며, 전체 시스템은 시간에 따라 변화하는 동적 네트워크로 모델링된다.

여기서 는 2차원 공간상의 위치, 는 속도 벡터, 는 정규화된 배터리 상태를 나타낸다. 에이전트는 반경 이내에 위치한 이웃 에이전트와만 통신할 수 있으며, 이에 따라 시간에 따라 변하는 동적 그래프 로 통신 네트워크를 구성한다.

4. 제안 기법

본 연구에서 제안하는 분산 포메이션 제어 기법은 각 에이전트가 실시간으로 자신의 상태를 평가하고, 필요 시 수행 중인 역할을 이웃 에이전트에 자율적으로 이양하는 구조를 갖는다. 이를 통해 전체 시스템은 고정된 역할 구성에서 발생하는 에너지 소모 불균형, 리더 의존성, 단일 실패점 등의 문제를 완화하고, 에이전트의 자율성과 포메이션 유지 성능을 향상

시킬 수 있다.

에이전트는 주기적으로 자신의 배터리 수준, 이동 거리, 통신 부하 등의 내부 상태를 측정하며, 상태 정보는 반경 내의 이웃들과 로컬 통신을 통해 공유된다. 에이전트의 배터리 잔량이 사전에 정의된 임계값 이하로 떨어질 경우, 해당 에이전트는 스스로 리더 또는 중계 역할에서 물러나게 되며, 가장 적합한 대체 후보를 선택하여 역할을 위임한다. 이러한 역할 전환은 완전한 분산 방식으로 이루어지며, 중앙 제어나 전역 정보 없이도 각 에이전트가 자율적으로 판단하고 구조를 재조정할 수 있도록 설계되었다.

역할 전환 판단은 배터리 상태뿐 아니라 이동 누적 거리, 통신 처리량 등 여러 지표의 결합으로 구성된 평가 함수를 통해 이뤄질 수 있으며, 단순한 조건식 또는 가중치 기반 선형 모델로도 구현 가능하다. 이때 후보자 선택은 현재 이웃들 중 가장 안정적이고 자원이 충분한 에이전트를 선정하도록 하며, 예를 들어 다음과 같은 결정 절차를 따른다.

Algorithm 1 Battery-aware Role Reassignment Algorithm

```
1: if is_leader and  $b_i < \theta$  then
2:    $\mathcal{N}_i \leftarrow$  neighbors with  $b_j > b_i$ 
3:   if  $\mathcal{N}_i \neq \emptyset$  then
4:      $j^* \leftarrow \arg \max_{j \in \mathcal{N}_i} \text{Rank}(b_j)$ 
5:     Transfer leadership to  $j^*$ 
6:   end if
7: end if
```

5. 시뮬레이션 및 결과

본 논문은 개념적 수준의 프레임워크를 제안하는 데 중점을 두고 있으며, 실제 시뮬레이션 또는 하드웨어 실험을 통한 정량적 검증은 수행하지 않았다. 그러나 제안된 분산 포메이션 제어 구조의 효과와 가능성은 다양한 시나리오를 상정하여 이론적으로 논의할 수 있다. 본 절에서는 향후 시뮬레이션 구현 시 활용 가능한 설정과 기대되는 결과에 대해 기술한다.

우선 시뮬레이션 환경은 ROS 기반 Gazebo 시뮬레이터를 활용하여, 장애물이 존재하는 2차원 평면 상에서 10~20대의 에이전트가 정해진 포메이션을 유지하며 이동하는 구조로 설계할 수 있다. 초기 배터리 수준은 에이전트마다 무작위로 설정되며, 에이전트 간 통신은 반경 기반으로 제한된다. 포메이션 형상은 정육각형 또는 그리드 기반 정렬로 초기화되며, 에이전트는 주기적으로 자신의 상태를 평가하고 필요시 역할을 교체하는 메커니즘을 수행하게 된다.

평가지표로는 포메이션 유지 오차(RMSE 기준 에이전트 간 거리 편차), 각 에이전트의 배터리 편차(표준편차), 역할 전환 횟수, 그리고 전체 시스템의 평균 임무 지속 시간 등을 활용할 수 있다. 비교 대상은 (1) 고정 리더-팔로워 구조, (2) 랜덤 역할 교체 구조, (3) 제안된 상태 기반 역할 전환 구조로 설정하여, 각 항목에 대한 성능 비교를 통해 본 기법의 장점을 정량적으로 평가할 수 있다[3].

이러한 시뮬레이션을 통해 본 논문에서 제안한 분산 역할 전환 기반 포메이션 제어 구조가 실제 환경에서도 실효성이 있음을 보일 수 있으며, 향후 UAV 또는 지상로봇 기반의 실기 실험으로도 확장 가능하다.

6. 결론 및 향후 연구

본 논문에서는 멀티에이전트 시스템에서 에이전트의 배터리 상태와 로컬 정보를 기반으로 역할을 동적으로 재할당하는 분산 포메이션 제어 프레임워크를 제안하였다. 기존의 고정 리더-팔로워 구조에서는 특정 에이전트에 과도한 부하가 집중되어 에너지 불균형과 단일 실패 지점의

문제를 유발할 수 있었다. 반면, 본 연구는 각 에이전트가 실시간으로 자신의 상태를 판단하고, 필요에 따라 리더 역할을 인접 에이전트에게 자율적으로 이양할 수 있도록 하는 메커니즘을 설계하였다. 이 구조는 통신 기반 그래프의 연결성을 유지하면서도 포메이션 형상의 안정성을 보장할 수 있으며, 에너지 효율성 측면에서도 유리한 구조임을 이론적으로 설명하였다.

비록 본 연구는 시뮬레이션이나 실기 실험을 통한 검증을 포함하지 않았으나, 향후 시뮬레이터 기반의 정량적 분석을 통해 제안된 기법의 효과를 명확히 입증할 수 있을 것이다. 또한, 다양한 에이전트 수, 초기 자원 불균형 조건, 동적 장애물 환경 등의 다양한 조건 하에서 본 알고리즘의 유연성과 확장성을 시험해볼 수 있다.

향후 연구에서는 다음과 같은 방향으로 본 프레임워크를 발전시킬 수 있다. 첫째, 역할 전환 조건에 머신러닝 또는 강화학습 기반의 예측 모델을 통합하여, 단순 임계값 비교를 넘는 지능형 판단 구조로 발전시킬 수 있다. 둘째, 무선 통신의 신뢰성 문제나 실제 센서 노이즈를 반영한 현실성 있는 실험 시나리오를 설계하여 실효성을 검증할 수 있다. 셋째, UAV, UGV, USV 등 다양한 플랫폼 간의 협업이 필요한 이기종 멀티에이전트 시스템(Heterogeneous MAS)에서도 본 구조를 확장하여 적용하는 방안을 모색할 수 있다.

결론적으로, 본 연구는 멀티에이전트 시스템의 자율성과 운용 지속성을 향상시키는 새로운 분산 제어 구조를 제시하였으며, 다양한 실제 응용 분야에서 활용 가능한 이론적 기반을 제공한다.

ACKNOWLEDGMENT

This research was supported by the MSIT(Ministry of Science and ICT), Korea, under the ITRC(Information Technology Research Center) support program(IITP-2025-RS-2024-00437190) supervised by the IITP(Institute for Information & Communications Technology Planning & Evaluation, 50%) This research was supported by the MSIT(Ministry of Science and ICT), Korea, under the ICAN(ICT Challenge and Advanced Network of HRD) program(IITP-2025-RS-2022-00156394) supervised by the IITP(Institute of Information & Communications Technology Planning & Evaluation, 50%)

[1] J. Alonso-Mora, A. Breitenmoser, M. Rufli, P. Beardsley, and R. Siegwart, "Optimal reciprocal collision avoidance for multiple non-holonomic robots," in Distributed Autonomous Robotic Systems, Springer, 2013, pp. 203 - 216.

[2] A. A. Malikopoulos, C. G. Cassandras, and Y. J. Zhang, "A decentralized energy-optimal control framework for connected automated vehicles at signal-free intersections," Automatica, vol. 93, pp. 244 - 256, 2018.

[3] H. Khaluf, C. Reina, and M. Simoens, "Local interaction rules for the emergence of coordinated and adaptive collective behavior," Science Robotics, vol. 4, no. 34, eaau0695, 2019.