

군집지능로봇기술의 국내외 연구 동향

Collective Intelligence Robot Technology

지 상 훈 / 한국생산기술연구원 지능형로봇연구부

1. 서 론

주변이 복잡한 실외 환경에서 로봇 1대가 고장 없이 원활하게 작업을 수행하기 위해서는 인간에 버금가는 높은 지능과 자율성을 로봇이 갖고 있어야 한다. 이러한 자율 능력을 로봇에 부여하기 위해서는 정교한 센서, 정밀한 제어기와 함께 대규모 연산 처리 능력이 요구되고 로봇이 고가일 수밖에 없다. 또한 수행 작업이 넓은 영역에서 수행해야 할 경우에는 로봇의 작업 효율성이 낮을 수밖에 없다.

이러한 약점을 보완하기 위하여 복수의 군집지능 로봇을 활용하는 것이 훨씬 더 효율적이고 안정적이라는 것은 잘 알려져 있다. 특히, 건설로봇, 국방로봇, 보안로봇 분야는 복수의 군집지능 로봇을 활용하여 작업 효율성을 높일 수 있는 대표적인 분야로서 비정형화된 작업 환경을 많이 포함하고 있어 이에 대응하기 위한 군집지능 기술이 탑재가 요구되고 있다.

이에 1980년대와 1990년대에 다중 매니플레이터의 협조 작업을 중심으로 개발되었던 군집 로봇 기술이 2000년대에 들어와 필드 로봇, 특히 군사용 로봇을 대상으로 많이 연구되고 있다. 이제까지 연구된 군집지능 로봇 기술은 다수 로봇들의 군집 행동제어 기술, 변화하는 로봇 환경의 이해를 위한 군집 상황인지 기술, 외부 환경 변화에 따라 동적으로 구성되는 군집 네트워킹 기술,

다중 클러스터형 군집 시스템통합 기술 등 크게 4 부분으로 분류될 수 있다. 본 글에서는 이 4가지 분야의 대표적인 연구개발 프로젝트를 소개하고자 한다.

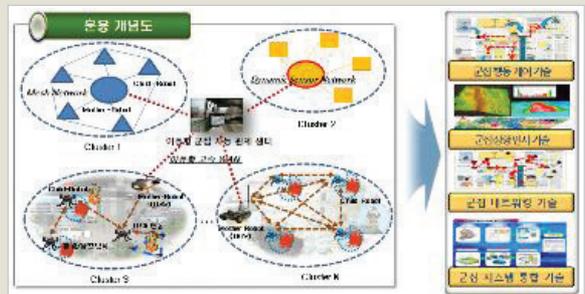


그림 1 군집지능로봇시스템의 개념도 (출처: 산업원천기술과제 2009년도기획보고서)

2. 해외 기술 동향

(1) 군집 행동 제어 기술

군집 행동 제어 기술에서 가장 앞서 있는 미국은 DARPA 및 NASA를 중심으로 연구가 주도적으로 진행되고 있다. 특히 행성에서의 무인 건축 작업, 무인정찰용 군용차량 행렬 통제, 로봇 정찰 소대 제어, 지뢰 대형 자율 구축, 지뢰의 최적탐지 행동, 물체의 연관관계를 이용한 행동인식, 이동형 센서네트워크 구성, 변화하는 환경에서의 목표물 추적 등에 대한 연구가 진행되고

● 기 획 시 리 즈

있다.

미국 MIT의 DRL(Distributed Robotics Lab)을 비롯한 여러 연구팀에서는 군집 제어 및 분산 제어 알고리즘을 개발하였고, 펜실베니아 대학의 SWARMS 프로젝트에서는 차량 그룹의 독립적 행동 관리를 위한 종합적인 제어법과 구조에 관한 연구를 진행 중에 있다.

CMU에서는 인간에 의한 군집 로봇의 효율적 미션 관리 방법으로 Task-allocation problem, Coordination, Multi-robot Architectural Framework 기술을 개발하였다. 이 기술에서는 Autonomy의 효율성과 인간제어의 신뢰성을 결합한 'Sliding Autonomy' 기술을 이용하여 군집지능 로봇의 복잡한 작업 수행이 가능하였으며, 특히 인간 개입이 가능한 Semi-autonomous Operation 기반의 Large-scale Autonomous Assembly 기술은 Space Solar Power Construction이나 NASA에서의 행성탐사를 위한 Multi-robot Coordinate System에 적용 개발 중에 있다.

또한, CMU에서는 극한 환경에서 스스로 피해를 극복할 수 있는 군집로봇의 기본 운영원리로 군체(Colonization)형성을 위한 행위전략, Group Learning 알고리즘, 가용자원 관리 및 보호, Task수준의 Reprogramming, 작업 수행에 적절한 군체 크기의 확장성을 연구하였다. 그리고 CMU에서는 동적 환경에서의 군집 제어를 위해 경제 원리들을 군집로봇 제어 시스템에 접목(Market-based Multi-robot Coordination Techniques)하여 지도제작, 탐사, 정찰 및 감시기능 수행할 수 있도록 하였다.

유럽의 Swarm-bots 과제는 유럽 공동체 주관으로 FET(Future and Emerging Technology) 발굴을 목적으로 진행되었다. 이 프로젝트에서는 자기-조직화, 자기-조합할 수 있는 군집 로봇을 설계 개발하였다. Symbion 프로젝트에서는 스스로 형태를 바꾸고 팀을 이뤄 협동하는 로봇의 개발을 목표로, 로봇의 능동적 도킹과 능동적 네트워크를 구성 및 협업 기능을 개발하고 있다. 이탈리아는 MACP4Log(Mobile, autonomous and cooperating robotic platforms for supervision and monitoring of large logistic surfaces) 프로젝트를 진행하며 군집 로봇의 협동 임무 수행(cooperative task)에 대한 연구를 진행하고 있다.

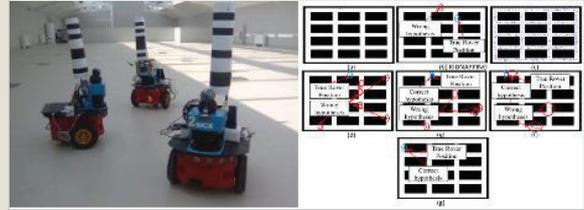


그림 2 MACP4Log

일본 JAIST의 Robotics Lab에서는 미지 환경에서의 군집로봇의 대형제어 (Formation Control)에 대한 연구가 진행되었으며 일부 로봇의 고장 시 새로운 로봇이 대신 임무를 수행하도록 동적인 임무 할당 등의 능력을 가지고 있다.

(2) 군집 환경/상황 인지 기술

1990년대까지 환경 인식 기술은 정형화된 실내 환경에서 거리 센서를 기반으로 한 자기 위치 추정이 주를 이루었으나, 최근에는 동적 장애물이 존재 하는 다양한 환경에서 신뢰성 있게 환경을 인식하고 위치를 추정하는 기술이 연구되고 있다.

Eren 등은 네트워크 위치인식을 위한 이론적 기초를 graph rigidity 이론을 이용하여 제공하였다. 이들은 이 문제가 노드들이 완전한 거리 정보를 알고 있을 때 풀리는 문제이며, 네트워크의 유일한 위치를 결정하는 것과 네트워크의 기초가 되는 그래프가 일반적으로 전역적(globally) rigid하다는 것이 동일한 명제임을 증명하였다. Savvides 등은 네트워크 위치인식을 위한 Cramer-Rao 하한치(Cramer-Rao Lower Bound, CRLB)를 개발하였다. 이것은 이상적인 알고리즘에서 예상되는 에러 특성 값이며, 이 값과 다변량(multilateration)에 기반을 두어 얻은 실제 에러와 비교하였으며, 이 에러가 종단-대-종단(end-to-end) 위치 정확도를 측정하는데 있어서 측정 에러만큼이나 중요한 것을 증명하였다. Moore 등은 비콘이 없는 분산 위치인식 알고리즘을 제시하였다. 이 기법은 주변 사물들을 계측(range)할 수 있는 노드들에 대한 계측 노이즈가 있는 상황에서의 정확한 위치 정보를 계산할 수 있다. 또한 이 알고리즘은 강인한 4변량 방법에 기반을 둔 강인한 노드들 사이의 전역 좌표계를 제공한다. 또한 이 방법은 이동 노드들에도 적용 가능한 특징이 있으며, Detweiler 등은 이 기법을 수동 추적 방

법으로 확장시켰다.

또한 2005년 이후에는 로봇을 활용한 센서 네트워크의 구축과 상황/환경 맵 구축 기술의 개발이 시작되었다. 스위스의 EPFL은 40여개의 미니 로봇을 이용하여 2차원 터빈 환경 내부의 상태를 검사하는 프로젝트를 수행하고 있다. 이 프로젝트에서는 각 로봇에 부착된 거리 센서와 Odometer를 이용하여 로봇의 정확한 이동 경로를 추정하고, 각 로봇이 비전 센서를 통해 촬영한 영상을 로봇의 이동 경로 및 터빈의 CAD 모델과 결합함으로써 터빈의 전체적인 내부 영상을 복원하는 다중 로봇 및 멀티 센서 융합 기술을 개발하였다.

미국의 RPI는 다중 수중로봇을 포함하는 분산 센서 네트워크를 개발하여 허드슨강의 환경을 모니터링하는 RiverNet 프로젝트를 수행하였다. 이 프로젝트에서는 강 바닥 지형 구조, 수질, 수온, 수심, 유속 등을 감지하는 다양한 센서들을 분산 설치하여 활용하였으며, 수중 로봇은 태양열을 이용한 자가 충전을 통해 장기간 모니터링, 보안 감시 임무를 수행할 수 있도록 설계되었다. 또한 캘리포니아 주립 대학의 Swarm-Cast 프로젝트에서는 분산된 센서 노드 네트워크를 이용하여 곤충들의 공격에 대한 빠른 정보 및 보고 시스템을 개발하고 있다.

(3) 군집 통신

군집 통신 기술의 국제적인 선두 연구 그룹은 미국과 유럽이며, 아시아의 중국, 일본, 한국 등에서도 연구가 이루어지고 있으나 아직까지는 대학의 소규모 그룹에서 시도되고 있는 수준이다.

미국의 경우 이동 센서 네트워크 라우팅 기술은 개발 초기에 있으며, 대다수 고정된 토폴로지에 기반하고 있다. 최근 DARPA 시연에서는 이종 로봇으로 구성된 군집 로봇의 환경/상황 인식에 통신 네트워크가 어떻게 이용될 수 있는가가 제시되었다. 여기서, UAV들은 넓은 영역을 탐색하면서 대상을 찾는 일을 담당하였다. 그러나 UAV에 탑재된 센서로 대상의 위치를 정확하게 결정하는 일은 어렵기 때문에, 상세한 위치 결정은 지상의 UGV들이 담당하였다. 여기서, 두 종류의 많은 이종 로봇들 간의 seamless 네트워크를 구축하는 것은 매우 중요한 문제였으며, 특히 이러한 수색 및 위치 결정 문제

에 대한 네트워크 중심의 접근 방식에서 중요한 핵심이 상태 정보에 대한 계산량의 계량화가 가능한(Scalable) 공유된 표현이었다. 또한 군집 로봇으로 구성된 이동 네트워크가 동적 환경에서 대상을 식별하고 위치를 판별하며 추종하려고 할 때, 통신 네트워크는 각 로봇들에게 원격 지역에 대한 정보를 알려줄 수 있고, 외부 자극에 반응하여 움직이거나 로봇이 이동하는 대상을 추종할 수 있도록 한다. 예를 들어, USC의 Tenet 프로젝트에서는 군집 로봇 네트워크를 위한 추상화와 네트워크의 프레임워크 및 관리 도구를 제시하였다.

유럽의 경우 European commission을 통하여 프로젝트가 운영되고 있으며 다수의 대학 및 기업이 파트너로 참여하여 개발이 진행 중에 있다. 대표적인 연구로서, Replicator project에서는 다양한 종류의 센서 네트워크를 구성하여 풍부한 정보 및 통신을 통한 지능적이고 재구축 가능하고 적응적인 네트워킹 기술을 개발하고 있다. 아시아의 경우 중국 절강대학에서는 cognitive 메쉬 네트워크에 대한 연구 및 이를 통한 군집 네트워킹 기술이 개발되고 있다.

(4) 군집지능 시스템 기술

각국에서 여러 형태의 군집로봇에 대한 연구사례가 있으나 군집로봇을 연계하여 하나의 시스템으로 기능을 수행하는 군집로봇 중앙통제 및 통합감시 시스템의 개발은 아직 확대되고 있지 않으며, 군집지능을 모의실험하고 통합 개발하기 위한 SDK 도구나 시뮬레이션 도구를 포함하는 패키지 S/W 기술은 아직 미흡한 상태다.

군집지능 로봇 운용을 위한 Smarter Software 개발인 Software for Distributed Robotics(SDR)는 자원이 제한적인 소형 로봇들에게 지능을 부여하기 위한 로봇 행위 조정 소프트웨어이다. Machine Learning 및 Perception 기반 자율주행용 모바일로봇 소프트웨어인 Mobile Autonomous Robot Software(MARS)는 다양한 역할에서의 인간과 interaction 기술도 제공하고 있다.

또한 군집 로봇이 새로운 협조 행동을 배우거나 다른 로봇들이 공존하는 상황에서 로봇이 경험을 축적해나가도록 하는 군집 학습으로는 Multi-target Observation, Air fleet control, Predator-Prey, Box pushing, Foraging 및 Multirobot Soccer 등이 있다. 이들 대부분은

Reinforcement Learning(강화 학습) 접근 방식에 근거하였다. Asada 등은 이전에 학습되어진 행동을 Q-Learning을 이용하여 조율하는 방법을 개발하여 로봇 축구 게임에 적용하였다. Mataric은 기본 행위들을 Unsupervised 강화 학습과 Heterogeneous 보상 함수, 그리고 Progress Estimator를 이용하여 고-수준 행위들을 조합하는 방법을 제시하였다. Kubo와 Kakazu는 Progress Value를 이용하는 강화 학습 메커니즘을 제시하고, 이것을 음식을 위하여 경쟁하는 개미 군체(Colony)들을 모사하는데 사용하였다.

강화 방법에 의존하지 않는 다른 군집 학습 접근 방법으로 Parker의 L-ALLIANCE 구조가 있다. 작업들을 수행하는 다른 이질의 로봇들의 적합도를 배우기 위하여 통계적 경험 데이터에 의존한 Parameter Tuning 방법을 이용하였다. Plug는 Particle 군집 최적화 기법을 분산 Unsupervised 로봇 학습 문제로서 군집 로봇의 장애물 회피 학습 문제에 적용하였다.

3. 국내 기술 동향

군집 로봇의 행동 제어에 대한 연구는 1990년대부터 대학을 중심으로 대형유지(formation control & self-assembling), 협조행동(coordinated motion), 적응적 군집태스크 할당(adaptive & collective task allocation) 등에 관한 연구가 진행되고 있었으나, 군집로봇 기술이 타 로봇 기술들에 대한 주변 인프라 기술로 인식되었기에 기술적 중요도와 난이도에 비하여 종합적이고 체계적인 연구가 진행되지 않았다.

서울대학교 이범희 교수 연구팀은 2003년 ‘프론티어 연구사업’ 과제를 통해 충돌맵 이론에 근거한 다 개체 무 충돌 주행 계획 방법을 제시하였으며, 최근 이 방법에 근거한 Stealth 추적 기법은 MIT 기술 리뷰에 소개되었다. (주)에스윈은 서울대, 한국생산기술연구원 등과 함께 2006년 “로봇 통제 및 환경기술 개발” 과제를 통하여 복수 로봇통제시스템 구축, 무 충돌 주행 기법 및 사회안전 서비스를 위한 다중 로봇의 위치 추정 기술에 대한 연구를 진행하였다. KAIST 김종환 교수 연구팀은 2000년 ‘다개체 로봇 시스템 기술 개발 사업’ 과제를 통해 축구 로봇을 위한 BIOS(Basic Intelligent Object

System)와 온라인 진화 연산 기법에 입각한 지도 작성 방법을 제시하였으며, KIST 연구팀은 2009년 “네트워크 기반 다목적 견마형 로봇 기술 개발” 과제에서 4대의 이동 로봇에 대하여 Formation Control 알고리즘을 개발하였으며, 간단한 유사 환경에서 모의 주행을 성공하였다.

ETRI의 조영조 박사 연구팀은 한국생산기술연구원, 서울대 등과 함께 실내외의 정형 및 비정형 환경에 모두 적용 가능한 네트워크 기반 군집지능기술에 대한 연구를 2010년 6월부터 시작하여 향후 5년간 연구를 진행하게 된다. 특히 이 연구에서는 이제까지 선진국에서는 활발하게 진행되었으나 아직까지 국내에서 다루어지지 않았던 군집 로봇의 협조 체제나 인간-군집로봇 협조에 의한 임무 계획에 관한 연구가 중점 연구되고 있기 때문에, 향후 기술 개발이 성공될 경우 사회안전, 환경감시 및 공공시설물 관리 분야에서의 서비스 로봇들에 대한 핵심 기술이 확보될 것으로 예상된다.

참고 문헌

- [1] “A General Algorithm for Robot Formations Using Local Sensing and Minimal Communication”, 2002, Jakob Fredslund, Maja J. Mataric
- [2] “ALLIANCE: An Architecture for Fault-Tolerant Multi-Robot Cooperation”, 1998, Parker
- [3] “A Vision-Based Formation Control Framework”, 2002, Aweek K. Das, Rafael Fierro, Vijay Kumar, James P. Ostrowski, John Spletzer, Camillo J. Taylor
- [4] “Behavior-Based Formation Control for Multirobot Teams”, 1998, Tucker Balch, Ronald C. Arkin
- [5] “Behavior-Based Multi-Robot Collaboration for Autonomous Construction Tasks”, 2005, Ashley Stroupe, Terry Huntsberger, Avi Okon, Hrand Aghazarian, Matthew Robinson
- [6] “Communication-Assisted Localization and Navigation for Networked Robots”, 2005, Corke, Peterson and Rus
- [7] “Constrained Coverage for Mobile Sensor Networks”, 2004, Poduri and Sukhatme

- [8] “Cooperative Behavior of Interacting Simple Robots in a Clockface Arranged Foraging Field”, 2002, Sugawara and Sano
- [9] “Cooperative Hunting by Distributed Mobile Robots Based on Local Interaction”, 2006, Cao
- [10] “Coordination of Groups of Mobile Autonomous Agents Using Nearest Neighbor Rules”, 2003, Jadbabaie, Lin, and Morse
- [11] “Coverage Control for Mobile Sensing Networks”, 2004, Cortes
- [12] “Decentralized Adaptive Control for Coverage for Networked Robots”, 2007, Schwager, Slotine, and Rus
- [13] “Decentralized Control of Cooperative Robotic Vehicles: Theory and Application”, 2002, John T. Feddema, Chris Lewis, David A. Schoenwald
- [14] “Distributed Autonomous Robotic System”, 2006, Alami, Chatila, and Asama
- [15] “Formations for Localization of Robot Networks”, 2004, Zhang, Grocholsky, and Kumar
- [16] “Handbook of Robotics”, 2008, Siciliano and Khatib
- [17] “Leader-to-Formation Stability”, 2004, Tanner, Kumar, and Pappas
- [18] “Market-Based Multirobot Coordination for Complex Tasks”, 2006, Zlot and Stentz
- [19] “On the Use of Redundant Manipulator Techniques for Control of Platoons of Cooperating Robotic Vehicles”, 2003, Bradley E. Bishop
- [20] “Path Planning for Permutation-Invariant Multirobot Formations”, 2006, Kloder and Hutchinson
- [21] “Pattern Generation with Multiple Robots”, 2006, Hsieh and Kumar
- [22] “Probabilistic Pursuit-Evasion Games: Theory, Implementation and Experimental Evaluation”, 2002, Vidal
- [23] “Putting the ‘i’ in ‘team’: An Ego-centric Approach to Cooperative Localization”, 2003, Howard, Mataric, and Sukhatme
- [24] “Sold! Auction Methods for Multi-Robot Coordination”, 2002, Gerkey and Mataric
- [25] “Tightly-Coupled Navigation Assistance in Heterogeneous Multi-Robot Teams”, 2004, Parker