



다개체 로봇의 중앙식 제어 및 응용

저자 (Authors)	최정식, 김지민, 이정희, 이범희
출처 (Source)	로봇과 인간 4(4) , 2007.11, 16-26 (11 pages) Korea robotics society review 4(4) , 2007.11, 16-26 (11 pages)
발행처 (Publisher)	한국로봇학회 Korea Robotics Society
URL	http://www.dbpia.co.kr/Article/NODE02147523
APA Style	최정식, 김지민, 이정희, 이범희 (2007). 다개체 로봇의 중앙식 제어 및 응용. 로봇과 인간 , 4(4), 16-26.
이용정보 (Accessed)	서울대학교 147.46.67.*** 2017/01/12 10:15 (KST)

저작권 안내

DBpia에서 제공되는 모든 저작물의 저작권은 원저작자에게 있으며, 누리미디어는 각 저작물의 내용을 보증하거나 책임을 지지 않습니다. 그리고 DBpia에서 제공되는 저작물은 DBpia와 구독계약을 체결한 기관소속 이용자 혹은 해당 저작물의 개별 구매자가 비영리적으로만 이용할 수 있습니다. 그러므로 이에 위반하여 DBpia에서 제공되는 저작물을 복제, 전송 등의 방법으로 무단 이용하는 경우 관련 법령에 따라 민, 형사상의 책임을 질 수 있습니다.

Copyright Information

Copyright of all literary works provided by DBpia belongs to the copyright holder(s) and Nurimedia does not guarantee contents of the literary work or assume responsibility for the same. In addition, the literary works provided by DBpia may only be used by the users affiliated to the institutions which executed a subscription agreement with DBpia or the individual purchasers of the literary work(s) for non-commercial purposes. Therefore, any person who illegally uses the literary works provided by DBpia by means of reproduction or transmission shall assume civil and criminal responsibility according to applicable laws and regulations.

다개체 로봇의 중앙식 제어 및 응용

서울대학교 최정식 · 김지민 · 이정희 · 이범희

1. 서론

다개체 시스템(multi-agent system, MAS)은 목적을 이루기 위해 다수 개체를 사용하는 시스템을 말한다. 이 개념은 컴퓨터 공학에서 제안되었으며 1980년 MIT에서 AI 학자들이 개최한 DAI(distributed artificial intelligence) 워크숍을 시작으로 세계적인 연구분야가 되었다. 일반적으로 로봇 시스템은 1) 한 대의 자율 로봇, 2) 공통 목적을 가진 여러 대의 로봇들, 3) 개별 목적을 가진 여러 대의 로봇들, 이렇게 3가지로 분류된다. 이 중에서 여러 대의 로봇을 대상으로 운영 시스템을 연구하는 것이 바로 다개체 로봇(multi-agents) 분야이다.

1950년 W.G.Walter가 두 대의 이동 로봇의 움직임 연구를 연구한 것이 초기의 다개체 연구였다. 이러한 연구를 시작으로 1980년대에는 다수의 로봇 팔을 효과적으로 동작시키기 위한 목적으로 다개체 연구가 활발히 진행되었다. 1989년 NASA에서는 화성탐사를 위한 Inexpensive Ant-like Reactive Robot Team을 제안하였는데, 이는 고가 단일 로봇(expensive single robot)의 불합리성을 제시하고 이에 대안을 제안한 새로운 개념이었다. 1995년 전후로 소개된 로봇축구대회(RoboCup, MIROSOT)를 통해 다개체 로봇은 대중에게도 널리 소개되었다. 오늘날 로봇 연구에서도 그 비중이 점차 증가함에 따라 기술적인 제어 및 응용에도 관심이 고조되고 있다[표 1].

[표 1] 최근 4년간 다개체 논문 발표 현황

학술대회	2004	2005	2006	2007
IROS	30 (659)	40 (669)	40 (1018)	개최예정
ICRA	30 (854)	35 (771)	18 (686)	57 (808)

자료 : IEEE, () 안의 숫자는 총 발표 논문 수

2. 연구분야와 제어방식의 분류

다개체 로봇은 크게 두 가지 분야에서 사용된다. 첫 번째는 다개체 로봇으로만 수행할 수 있는 분야다. 예를 들어 로봇 축구의 경우 한 대의 로봇이 최전방 공격수와 골키퍼의 임무를 동시에 수행할 수 없기 때문에 각 역할에 특화된 다수 로봇이 반드시 필요하다. Lunar-base construction, toxic waste cleanup, panel construction, surveillance 등이 대표적인 적용 분야다.

둘째는 다개체 로봇을 사용하는 것이 매우 효율적인 분야이다. 대형건물을 로봇으로 청소하는 경우 한 대의 로봇으로도 가능하지만 시간이 매우 많이 소요되므로 비현실적이다. 따라서 실제로는 다개체 로봇을 이용해 담당 임무를 나누고(task allocation) 이를 개별적으로 수행(execution)하여 전체 임무를 완료하게 된다. 두 분야 이외에도 고장이 많이 발생하여 여유성(redundancy)을 확보해야 하는 임무나 다수의 정보통합(information merging)을 통해 정확성을 높여야 하는 임무 등에서도 다

개체가 사용된다.

다개체 로봇에 대한 연구는 주제에 따라서 매우 다양하고 세부적으로 수행되고 있다[표 2]. 다개체 제어는 그 중에서도 가장 기초적이면서 중요한 분야다. 가장 간단한 제어 구조도 임무분할(task decomposition), 임무할당(task allocation), 동작계획(motion planning), 수행(execution)과 같이 여러 단계로 이루어진다. 이 단계들을 본고에서 모두 다루기는 어렵기 때문에 가장 기본이 되는 동작계획(motion planning)을 중심으로 다개체 제어를 소개하고자 한다.

[표 2] 다개체 로봇 관련 주제와 세부 연구 분야들

주 제	세부 연구 분야
Organization	Homogeneous / Heterogeneous team, Mother-daughter team, Optimal team size, Task allocation
Task	Exploration, Coverage, Physical cooperation, Foraging, Rescue, Security service
Intelligence	Team learning, Information exchange, Distributed artificial intelligence (DAI) Swarm intelligence, Socialization
Control	Navigation, Motion planning, Formation, Network communication, Position tracking, Intelligent space, Cooperation, Collaboration

일반적으로 다개체 제어는 중앙식(centralized control)과 분산식(distributed control)으로 분류할 수 있다. 중앙식은 로봇 전체를 하나의 시스템으로 생각하고 하나의 감독 시스템(supervisory system)으로 모든 로봇들을 제어하는 방식이다. 이와는 반대로 분산식은 각 로봇을 독립된 시스템으로 생각하여 개별 로봇들이 스스로 제어하는 방식이다. 또 다른 분류 방식으로는 중앙식과 분리식(decoupled control)이 있다. 이 분류법은 로봇의 제어 권한보다는 제어 절차에 따라 구별된 것이다. 즉, 하나의 감독 시스템이 개별 로봇들을 통제할

때 경로(path)와 속도(velocity) 계획을 동시에 고려하면 중앙식이고 두 가지를 순차적으로 처리하면 분리식이다. 또한 최근에는 경제학적 개념을 이용한 제어방식(economic approach)도 소개되고 있다. 이처럼 제어의 분류는 제어 권한의 분산 정도에 따라 여러 가지로 분류될 수 있다. [표 3]은 현재까지 발표된 다개체 제어의 주요 아키텍처로 대부분 분산식 방법을 채택한 것을 볼 수 있다.

[표 3] 다개체 제어 아키텍처 (architecture)

이름	방식	연도, 국가	특징
GOPHER	분산식 일부 중앙식	1990, 미국	제어를 4단계로 구분하여 단계별 수행
Nerd Herd	분산식	1992, 미국	social interaction 연구 저 사양 로봇사용
MissionLab	분산식	1997, 미국	reactive, behavior-based 방식
ALLIANCE	분산식	1997, 미국	고장, 장애에 강하도록 설계
KAMARA	분산식	1998, 미국	일에 따른 유동적 팀 구성
Teamcore	분산식	2000, 미국	개체 별 독립적 임무와 임무 통합형 구조로 운영
Range-Scout	분산식	2000, 미국	유대류(캥거루)를 다개체 제어에 응용
Pheromone	분산식	2001, 미국	가상 필로몬을 이용한 통신 및 제어
Tightly Coupled	Leader-follower	2001, 미국	우선순위를 적용한 리더가 있는 그룹 구조
MURDOCH	분산식	2001, 미국	resource-centric 의 통신구조

지금까지 소개된 다개체 제어방식들은 각각의 장단점을 갖고 있다. 먼저, 중앙식은 하나의 시스템이 전체를 통제하므로 제어에 있어서 해의 최적성(optimality)과 완전성(completeness)을 얻을 수 있다. 그러나 로봇의 개체 수가 증가함에 따라 복잡성(complexity)과 계산량이 크게 급증하는 문제(curse of dimensionality)가 있다. 따라서 중앙식으로

다개체를 제어하는 것은 이미 하나의 NP-hard 문제로 알려져 있다. 이러한 복잡성 문제를 해결하기 위해서 제안된 방식이 분리식이다. 그러나 분리식은 복잡성이 감소한 대신 최적성에서는 손실이 생기게 된다.

마지막으로 분산식은 각 개체가 스스로를 통제하기 때문에 개체수가 증가해도 복잡성이 증가하지 않는다. 실제 자연계의 군집 생물들도 대부분 분산식에 의해 통제가 되고 있기 때문에 많은 연구들이 분산식을 기반으로 이루어지고 있다. 잘 알려진 behavior based, reactive, potential field, plan integration 방식들이 그 대표적인 예다. 그러나 분산식은 최적화 관점에서 개체간 발생하는 간섭(interference) 문제를 근본적으로 해결할 수 없고 국소해(local minimum)가 발생하는 기술적인 한계들이 있다.

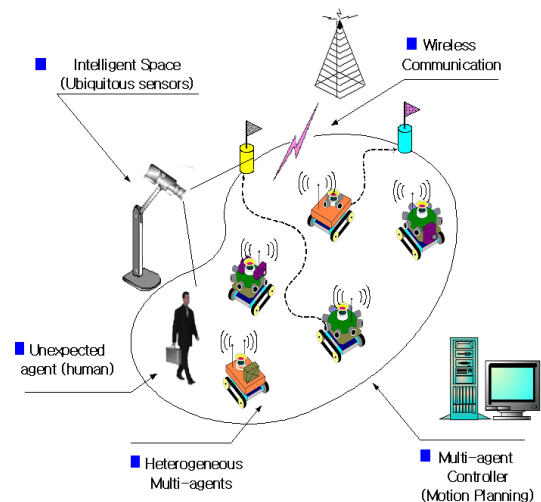
이와 같이 각 제어방법간에서 복잡성과 최적성은 trade-off 관계에 있다. 그러므로 다개체는 사용 목적에 따라 적절한 방식으로 통제된다. 일반적으로 군사나 보안 분야와 같이 일사불란하고 최적의 통제가 필요한 분야는 중앙식이, 정보수집이나 탐색같이 계산량이 많고 높은 자율성을 필요로 하는 분야는 분산식이 사용된다. 본고에서는 이 중 중앙식 제어방법에 대해 자세히 알아보려고 한다.

3. 중앙식 제어방법

로봇은 특정한 일을 하기 위해 개발되는 기계다. 따라서 인간을 대신하여 다개체를 사용하는 경우는 대부분 높은 최적성을 요구한다. 이러한 이유로 최적성을 요구하는 응용분야에서는 중앙식 제어방법이 필수다. 그러나 다음과 같은 두 가지 기술적인 문제로 인해 중앙식은 분산식보다 실질적인 연구가 활발히 이루어지지 못했다.

첫째, 다개체의 최적경로를 산출하고 다개체간 충돌을 해결하기 위해서는 높은 계산부하가 발생

한다. 이러한 계산문제를 효과적으로 해결할 수 있는 실용적인 제어기술을 개발하기 어려웠다. 둘째, 중앙식 제어를 실질적으로 구현하기 위해서는 고도의 시스템 기술이 요구되었다[그림 1]. 전체를 대상으로 최적화된 통제를 하기 위해서는 먼저 개별적인 로봇들의 현재 위치와 상태가 정확하게 중앙통제시스템에 알려져야 한다. 아울러 중앙통제시스템이 각 개체의 동작명령을 실시간으로 전달하기 위해서는 통신 시스템이 이를 뒷받침할 수 있어야 한다. 과거에는 이러한 시스템 구현이 어려웠으나 최근 지능형 공간(intelligent space)과 같은 고도의 기술이 계속 개발되면서 시스템상의 문제점은 해소되고 있다.



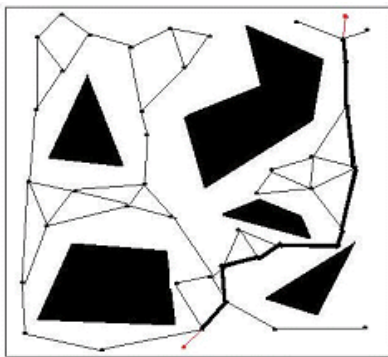
- Heterogeneous multi-agents : 각각의 목적과 경로를 가진 이종 로봇들
- Unexpected agent : 다개체 중에서 통제할 수 없는 개체 (인간)
- Intelligent space : 모든 개체(인간, 로봇)의 위치를 파악할 수 있는 공간
- Multi-agent controller : 다개체를 효율적으로 제어하는 시스템
- Wireless communication : 다개체와 제어 시스템간 무선 통신 시스템

[그림 1] 중앙식 다개체 시스템의 구성요소들

그러나 실용적인 제어기술 분야에서는 아직 미진한 부분이 많다. 과거에는 중앙식 다개체 제어

를 위해서 소수 로봇을 위한 고전적인 potential field나 petri-net 등의 기술을 단순히 확장하여 적용하였다. 하지만 이러한 접근방법에서는 coordination의 부적절, computational load, NP-hard problem, high dimensionality 등의 기술적 문제가 해결되지 못했다. 또한 제어의 일부분인 경로계획(path planning)이 PSPACE-complete 문제로 알려지면서 중앙식 다개체 제어는 난제로 분류되었다.

이를 극복하기 위해 소개된 기술이 스탠포드 대학의 RPP(randomized path planner)이다. 이것은 시간의 제한이 없고 해가 존재하는 경우를 대상으로 확률에 기반한 탐색 방법을 통해 해를 찾는 방식이다. 대부분의 RPP는 C-space에서 임의 로드맵을 작성하는 PRM(probabilistic roadmap method)를 사용한다[그림 2]. 그러나 동일한 경우를 계산해도 그 결과가 일치되지 않고 설정한 시간이 지나면 계산이 종료되는 방식이기 때문에 최적해를 보장할 수 없는 분명한 한계점도 가지고 있다.



[그림 2] PRM에 의한 경로계획

4. 중앙식 제어에 기반한 안전주행 핵심기술

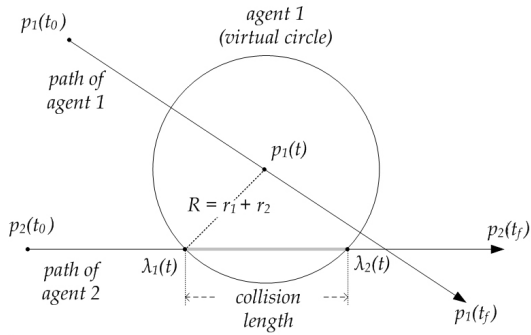
최적성과 계산량을 만족하는 중앙식 다개체 제어기술은 현재까지도 그 구현이 매우 어렵다. 그러나 다개체를 활용한 작업의 수요가 증가함에 따라 그 개발은 반드시 필요하다. 필자의 연구기관은 이러한 기술적 요구를 충족시키기 위해서 중앙

식 제어에 기반한 다양한 연구를 수행해왔는데, 그 중 두 가지의 구체적인 연구결과를 4, 5장에서 간략하게 소개하고자 한다.

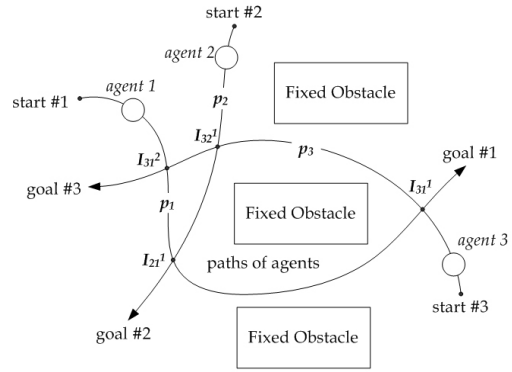
로봇 제어에서 가장 기본이 되는 것은 안정성이고 이를 구현하는 기술이 동작계획(motion planning)의 한 부분인 충돌해결(conflict resolution)이다. 이 기술은 충돌감지(collision detection)와 충돌회피(collision avoidance)의 두 가지 세부 기술로 구성된다. 따라서 중앙식 제어 관점에서 다개체간 충돌문제를 해결을 하기 위해서는 하위 두 가지 기술을 확보하는 것이 필수적이다. 이를 위해서 필자는 충돌맵(collision map) 기술을 개발하였다.

충돌맵 기술은 본래 두 대의 로봇 팔 사이에 충돌을 감지하고 이를 해결하기 위해 1987년에 개발되었다. 두 로봇 팔의 끝부분(end effector)을 원으로 모델링하고 장애물 개념(obstacle scheme)을 적용하면, [그림 3]과 같이 한 로봇(로봇 1)은 가상원(virtual circle)으로 다른 로봇(로봇 2)은 점으로 표시된다. 충돌분석에서 중요한 요소는 상대 거리와 시간이므로 이를 두 로봇의 경로와 전체 동작시간에 대해 분석하면 [그림 4]를 얻을 수 있다. 그림 가운데 음영부분이 두 로봇 사이에 발생할 수 있는 잠재적 충돌(potential collision)을 나타내게 되고 이를 충돌영역(collision region)이라 정의한다. 그래프 상에서 선은 로봇 2의 궤적(trajjectory)을 나타내는데 이것은 로봇 2의 계획된 속도 프로파일에 의해 결정된다. 만일 이 궤적이 충돌영역을 만나거나 통과하게 되면 물리적으로 두 로봇은 충돌하게 된다. 요약하면, 충돌감지(collision detection)는 충돌영역으로 표시되고, 궤적이 충돌영역을 회피하도록 제어하면 충돌문제는 해결된다(conflict resolution).

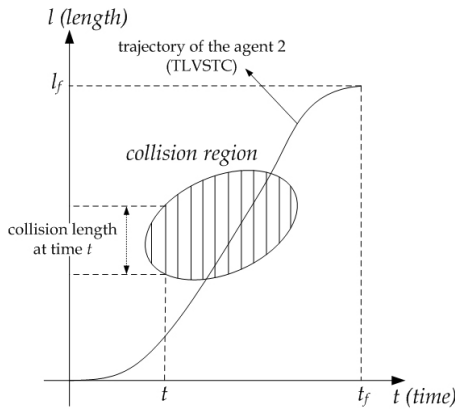
이를 바탕으로 2004년에는 충돌맵 기술을 다개체에 적용한 확장 충돌맵(extended collision map)을 제시하였다. 확장 충돌맵에서는 이전 충돌맵에 비해 1) 개체수의 무한한 확장이 가능하고, 2) 이동 경로가 어떤 형태든지 가능하게 되었다. [그림 5]와 같이 세



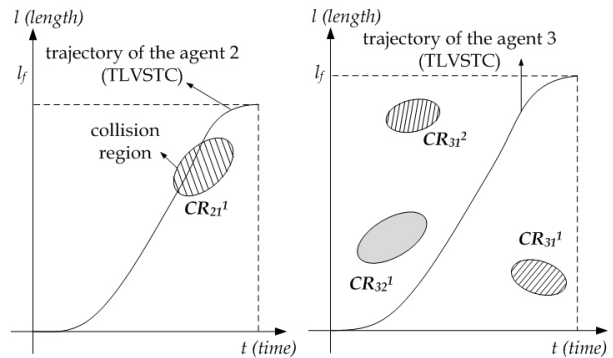
[그림 3] 두 로봇(agent1, 2)의 경로와 충돌 분석



[그림 5] 3대 로봇의 경로와 교차점



[그림 4] 충돌맵 (Collision map)



(a) agent 2의 확장 충돌맵 (b) agent 3의 확장충돌맵

대의 로봇과 각각의 경로 계획을 기반으로 확장 충돌맵 분석을 하게 되면 [그림 6]의 결과를 얻게 된다. [그림 5]에서 공간상 존재하는 로봇간 교차점 ($I_{21}^2, I_{31}^1, I_{31}^2, I_{32}^2$)들은 확장 충돌맵 상의 충돌영역 ($CR_{21}^2, CR_{31}^1, CR_{31}^2, CR_{32}^1$)들로 각각 대응되어 표시된다. 이와 같이 다개체간 충돌감지 문제는 확장 충돌맵의 작성 단계에서 해결된다.

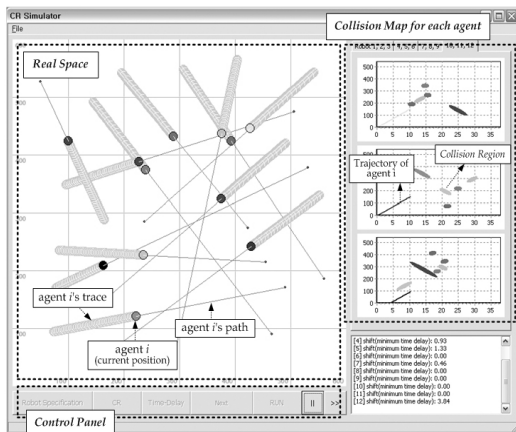
다개체간 충돌회피는 두 로봇의 경우보다는 복잡한 과정을 거치게 되는데 이는 확장 충돌맵의 동적 특성 때문이다. 즉, 충돌회피를 위해 한 로봇의 운동을 수정하면 이전에 작성되었던 확장 충돌맵의 정보도 일부 변하게 된다. 이러한 동적 특성에 의해 높은 복잡성이 발생하므로 이를 해결하기 위해 로봇에게 우선순위를 부여하였다(prioritization). 아울러 시간지연, 최소시간지연, 감속 등의 회피 알고리즘을 사용하여 문제를 순차적으로 해결하였다.

[그림 6] 확장충돌맵 분석

확장 충돌맵에서는 다개체 제어의 핵심 문제인 복잡성 감소에 있어서도 단계별 진전이 있었다. 먼저, 확장 충돌맵의 개발로 복잡성을 크게 줄일 수 있는 우선순위 부여방식이 다개체 제어에 구체적으로 적용되었다. 그러나 충돌해결 과정의 복잡한 계산을 컴퓨터의 계산력에만 의존했기 때문에 그 부하가 크다는 것이 단점이었다. 이 문제를 개선하기 위해 최근에 수학적 분석을 통한 새로운 다개체 충돌해결 방법을 제시하였다. 계산부하가 경로의 임의성(arbitrariness)에 의해 발생하는 점을 고려하여 교차점 부근에 국소 모델링 기법을 적용한 후 이것을 간단한 수식으로 유도하였다. 이 결과로 충돌해결에 소요되는 계산량은 경로와 충돌

형태에 관계없이 바로 산출이 가능하게 되었다.

[그림 7]은 수학적 분석이 적용된 확장 충돌맵의 모의실험의 결과다. 개별 경로를 갖고 있는 12대의 로봇을 좁은 공간에 배치하고, 그들 사이에 23개의 교차점이 존재하도록 설정하였다. 충돌해결을 위한 실제 계산은 그림 오른쪽의 확장 충돌맵을 이용하여 수행되었다. 모의실험의 최종 결과에서 모든 로봇들이 상호간 충돌없이 최단시간에 목적지까지 도착하는 중앙식 제어가 성공적으로 이루어졌다.



[그림 7] 12대 로봇의 중앙식 제어 모의실험

5. 중앙식 제어에 기반한 보안 및 감시 핵심기술

보안 및 감시 분야는 로봇 산업에서 실용화 가능성과 사업성이 가장 높은 분야 중에 하나다. 1975년 Chvatal이 'art gallery problem'을 제기한 이래 많은 연구와 논문이 발표되었다. 초기의 카메라 배치 연구를 시작으로 로봇의 최적 순찰(patrolling)까지 다양한 각도에서 진행되고 있다. 현재까지 분산식에 기반한 연구가 많이 이루어졌으나, 침입자 감지와 추적 임무를 효과적으로 수행하기 위해서는 로봇들의 일사불란한 통제가 절

실히 요구된다. 이러한 측면에서 중앙식 제어기술의 개발은 매우 시급하다고 할 수 있다. 그러나 중앙식 제어는 이미 잘 알려진 순환판매원 문제(travelling salesman problem, NP-hard)이나 해밀토니안 순환(hamiltonian cycle, NP-complete)과 유사하여 난제로 분류된다. 그러나 현재 다양한 각도로 실용적 해법을 찾기 위한 노력이 진행 중이다. 본 연구기관에서도 중앙식 제어기술에 기반한 실용적인 보안 감시기술을 연구하고 있으며, 이를 간략하게 소개하고자 한다.

다개체를 활용한 보안 감시 시스템은 여러 가지 기준에 의해 그 성능을 평가할 수 있다. 가장 많이 사용되는 기준은 순간 노드 공백(instantaneous node idleness), 순간 그래프 공백(instantaneous graph idleness), 탐색시간(exploration time)이다. 이런 기준에 의하면 우수한 보안 감시 시스템이란 짧은 시간동안 모든 지역에 자주 방문하면서 모든 지역의 감시 비율을 높게 유지하는 것이라 할 수 있다. 본 연구기관에서는 이 중 순간 그래프 공백을 연구하였다. 즉, 시스템에 의해서 감시되는 공간을 최대화하기 위해서 다개체를 효과적으로 제어하는 것이 목적이다. 실제 연구에서는 다개체 로봇뿐만 아니라 건물에 설치된 다수의 카메라까지 포함하는 통합적 운영방식을 연구하였다.

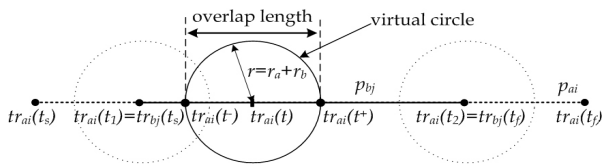
감시공백은 감시되고 있지 않은 영역을 의미한다. 따라서 로봇들과 카메라들이 모두 서로 다른 지역을 감시할 때 감시공백이 최소가 된다. 반대로 모든 로봇들이 카메라와 동일한 공간을 감시할 경우 감시공백은 최대가 된다. 시스템 운영 상에서 로봇은 주행을 하고 카메라는 회전 운동을 하므로 감시공백은 시간에 따라 변화하게 된다. 감시공백이 순간적으로 커지지 않도록 다개체를 제어하기 위해서는 감시공백을 계산할 수 있는 기술이 필요하다.

이를 위해 본 연구기관에서는 한 로봇의 감시영역과 카메라들의 감시영역 사이에 발생하는 중복

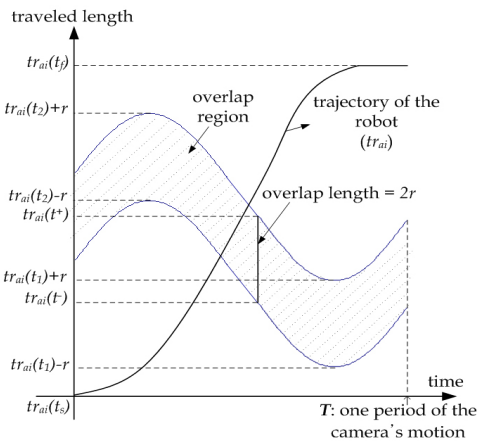
공간을 시간에 따라 계산하고 그 결과를 보여주는 확장 중복맵(extended overlap map, EOM)을 개발하였다. 다개체를 대상으로 이 분석을 실시하면 전체 공간에 대하여 현재 감시되고 있는 영역을 알려주는 시간-감시영역 비율 그래프(time - surveillance coverage ratio graph, TSG)가 그려진다. 감시영역 비율은 다음과 같이 정의한다.

$$\text{감시영역 비율}(\gamma) = (\text{감시 공간} - \text{감시공백}) / \text{감시 공간}$$

[그림 8]은 한 대의 로봇과 한 대의 카메라 사이에 발생하는 감시영역의 중복과 그 분석을 보여준다. 로봇의 경로는 $tr_{ai}(t_s)$ 에서 $tr_{ai}(t_f)$ 까지며 카메라의 감시영역 경로는 $tr_{bj}(t_s)$ 에서 $tr_{bj}(t_f)$ 까지다. 충돌맵과 유사한 분석 과정을 거쳐 중복되는 공간을 계산하면 [그림 9]와 같은 그래프를 얻게 된다. 그래프 내의 음영공간은 로봇과 카메라에 의해 중복 감시되는 예상공간을 나타낸다. 로봇의 궤적이 이 예상공



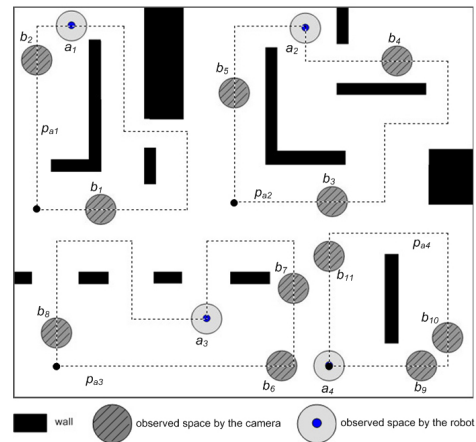
[그림 8] 1대의 로봇과 카메라 사이의 감시영역 중복



[그림 9] 확장 중복맵 (extended overlap map)

간을 통과할 때 생기는 두 교점에 의해서 실제 중복이 발생하는 공간의 시간과 양이 결정된다. 즉, 로봇을 적절히 제어함으로써 실질적으로 중복 감시되는 공간의 시간과 양을 조절할 수 있다.

[그림 10]은 4대의 로봇(a_1, \dots, a_4)과 11대의 카메라(b_1, \dots, b_{11})가 동시에 작동하는 모의실험이다. 로봇과 카메라의 물리적 특성은 [표 4]와 같다. 로봇은 정해진 순찰경로(p_{a1}, \dots, p_{a4})를 순환 중이고 카메라도 고정된 위치에서 회전을 하면서 순찰경로의 일부분을 감시한다. 최소 감시영역과 최대 감시영역 비율을 계산했을 때 각각 0.6과 0.85의 결과를 얻었고 본 실험에서는 최소한의 감시영역 비율을 0.7로 설정하였다. 즉, 언제나 감시공간의 70% 이상이 감시되도록 다개체 로봇을 제어하는 것이 실험의 목적이다.



[그림 10] 중앙식 다개체 보안감시 모의실험

[표 4] 로봇과 카메라의 물리적 특성

Notations and meaning		robot	camera
r_a, r_b	radius of observed area (m)	32.5	37.5
V_o, Tr_0	maximum velocity (m/s)	5	5
	acceleration (m/s ²)	2	2
	rotation velocity (°/s)	90	
S	security space (m ²)	66690	
$\gamma_{desired}$	desired surveillance coverage ratio	0.7 (70%)	

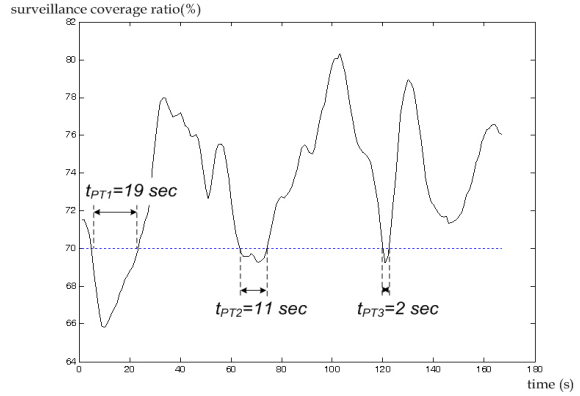
[표 5] 수정 단계별 로봇의 궤적과 방문 빈도 분석

Agent	Tr_{0a}		Tr_{1a}		Tr_{2a}	
	Freq	Part	Freq	Part	Freq	Part
a_1	7.87	$PT_{1,3}$	7.87	PT'_1	7.30	-
a_2	7.19	$PT_{1,2,3}$	7.19	PT'_1	7.19	-
a_3	6.02	$PT_{1,2}$	6.02	PT'_1	6.02	-
a_4	12.05	$PT_{1,2,3}$	11.11	PT'_1	11.11	-

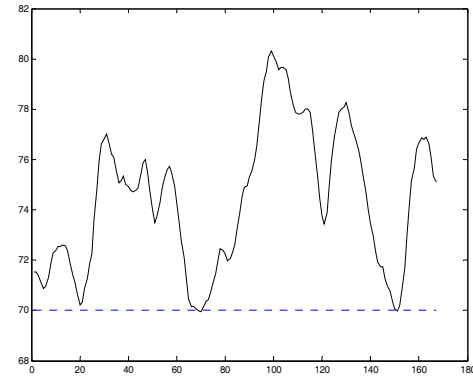
Freq 단위 : 10^{-3} sec

초기 속도와 궤적(V_o , Tr_o)이 적용된 각 로봇의 EOM의 결과들을 종합한 TSG를 나타내면 [그림 11]과 같다. 최초 TSG에서는 기준 70%에 미달된 지점들(PT_b , PT_2 , PT_3)이 발견되었는데, 이 세 지점과 관련된 로봇들을 분석한 결과가 [표 5]에 제시되어 있다. 표에서는 각 로봇 별로 방문빈도(visit frequency, 같은 지역을 다시 순찰하는 빈도)도 같이 제시되었는데, 이는 앞서 다른 또 다른 기준인 순간 노드 공백도 함께 고려하기 위한 것이다.

실험 결과에서 첫 번째 기준미달 지역(PT_1)은 모든 로봇들이 연관되었으나, 방문빈도 분석결과가 가장 좋은 로봇 4의 계획을 수정하여 감시영역 비율 요구 수치인 0.7을 초과하도록 조정하였다. 이와 같은 방식을 반복하여 전 시간대에서 항상 70% 이상의 감시 비율을 갖는 최종해(Tr_{2a})를 구하였고 이를 적용하여 [그림 12]와 같은 최종 결과를 얻었다. 결과에서 주목할 점은 순간 그래프 공백의 요구 조건(0.7)을 만족시키기 위해 로봇의 동작을 수정하면서도 시스템의 방문빈도는 그 수치가 가장 낮은 로봇 3에 의해 6.02×10^{-3} sec로 유지된다는 점이다. 즉, 최초 상태와 마지막 결과 사이에 손실이 없다. 지금까지 보안감시를 위해 단계별 기술을 개발하고 이를 체계적으로 활용한 중앙식 다개체 제어의 성공적인 결과를 보여주었다.



[그림 11] 초기 시간-감시영역비율 그래프



[그림 12] 최종 시간-감시영역비율 그래프

6. 결론

현대 로봇산업의 비약적 발전은 가까운 미래에 다수의 로봇을 효율적으로 통제해야 하는 기술적 요구를 예고하고 있다. 이를 실현하기 위해 그 동안 다개체 로봇분야는 주로 분산식 제어방법을 이용하여 발전해왔다. 그러나 최근에는 높은 복잡성에도 불구하고 해의 최적성을 보장하기 위해 중앙식 제어기술의 개발의 필요성이 크게 대두되었다. 이러한 필요성에 따라 본고에서는 중앙식 제어기술의 장단점, 구성요소, 해외기술 그리고 그 예로 본 연구기관에서 수행한 결과를 소개하였다.

우리는 2002년 월드컵에서 뛰어난 감독 한 사람

의 중요성을 실감하였으며, 금년 국내 프로야구에 서 SK가 단 한 명의 개인타이틀 보유자가 없음에 도 불구하고 정규 시즌과 한국 시리즈에서 우승하 는 것을 보았다. 이는 다수를 제어하고 조직화하는 기술이 얼마나 중요한가를 입증하는 사례라 할 수 있다. 다개체 제어기술 역시 모든 로봇에게 적용되 고 모든 로봇을 통제한다는 측면에서 매우 중요한 분야다. 이것은 컴퓨터의 OS처럼 하나의 뛰어난 시 스템이 모든 로봇에게 독점 적용되는 핵심 중의 핵 심기술이다. 미국은 이미 그 중요성을 인식하고 지 난 30년간 국방과 우주탐사를 통해 기술을 축적하 여 독주체제를 굳히고 있으며, 일본과 유럽은 최근 대형 프로젝트를 통해 미국 따라잡기에 나서고 있 다. 그러나 우리는 아직 그 중요성에 대한 인식이 약하다. 따라서 필자는 이번 특집을 통해 다개체 제어 연구의 중요성이 부각되어 미래 로봇산업의 핵심 기술분야에서 우리가 앞서 나갈 수 있는 계기 가 되기를 바란다.

참고문헌

- [1] G.A.Bekey, *Autonomous Robots*, The MIT Press, 1998.
- [2] R.R.Murphy, *Introduction to AI Robotics*, The MIT Press, 2000.
- [3] J.C.Latombe, *Robot Motion Planning*, Kluwer academic publishers, 1991.
- [4] H.Choset, et al, *Principles of Robot Motion*, The MIT Press, 2005.
- [5] M.B.Dias, and A.Stentz, "A Market Approach to Multi-robot Coordination", Technical report, CMU-RI-TR-01-26, Robotics Institute, Carnegie Mellon Univ. August, 2001.
- [6] R.A.Brooks and A.M.Flynn, "Fast, Cheap, and Out of control: A Robot Invasion of The Solar System," *Journal of British interplanetary society*, Vol. 42, pp. 478-485, 1989.
- [7] G.Dudek, M.M.Jenkin, E.Milios, and D.Wilkens, "A Taxonomy for Multi-Agent Robotics," *Autonomous Robots*, 5-29, 1996.
- [8] Y.UNYCAO, A.S.Fukunaga, A.B.Kahng, "Cooperative Mobile Robotics: Antecedents and Directions," *Autonomous Robots*, 4, 1-23, 1997.
- [9] A.Farinelli, L.Iocchi, and D.Nardi, "Multirobot Systems: A Classification Focused on Coordination," *IEEE Tran. on System, Man, and Cybernetics-Part B*, vol.34, no. 5, October, 2004.
- [10] S.Yuta and S.Premvuti, "Consideration on Cooperation of Multiple Autonomous Mobile Robots-Introduction to Modest Cooperation," *Proc. of IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, vol.1, pp. 545-550, 1991.
- [11] N.Jennings, K.Sycara, and M.Wooldridge, "A Roadmap of Agent Research and Development," *Autonomous Agents and Multi-Agent System*, 1, 275-306, 1998.
- [12] G. Weiss, *Multiagent Systems: A Modern Approach to Distributed Artificial Intelligence*. Cambridge, MA: MIT Press, 1999.
- [13] M.M.Quottrup, T.Bak, and R.I.Zamanabadi, "Multi-robot planning: A Timed Automata Approach", *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, New Orleans, LA, 2004.
- [14] C.W.Warren, "Multiple Robot Path Coordination using Artificial Potential Fields," *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Cincinnati, pp. 500-505, 1990.
- [15] M.B.Dias, and A.Stentz, "A Comparative Study between Centralized, Market-based, and Behavioral Multirobot Coordination Approaches", *Proc. of IEEE Conf. on Intelligent Robots and Systems*, Las Vegas, Nevada, October, 2003.
- [16] R.Alami, S.Fleury, M.Herrb, F.Ingrand, and F.Robert, "Multi-Robot Cooperation in the MARTHA Project," *IEEE Robotics & Automation Magazine*, March, 1998.

- [17] T.Y.Li, H.C.Chou, "Motion Planning for a Crowd of Robots," Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics & Automations, September, 2003.
- [18] J.H.Reif, "Complexity of the Mover's Problem and Generalizations," Proc. of the 20th IEEE symp. on Foundations of Computer Science, pp. 412-427, 1979.
- [19] J.Canny, The Complexity of Robot Motion Planning, The MIT Press, 1988.
- [20] S.Akella and S.Hutchinson, "Coordinating the Motions of Multiple Robots with Specified Trajectories," Proc. of the 2002 IEEE Int. Conf. on Robotics & Automation, Washington DC, May, 2002.
- [21] S.M.Lavalle and S.A.Hutchinson "Optimal Motion Planning for Multiple Robots Having Independent Goals", IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, 1996
- [22] L.Kavraki, P.Svestka, J.Latombe, and M.Overmars, "Probabilistic Roadmap for Fast Path Planning in High-Dimensional Configuration Spaces," IEEE Trans. on Robotics and Automation, vol. 12, pp. 566-580, 1996.
- [23] K.S.Barber, T.H.Liu, and S.Ramaswamy, "Conflict Detection During Plan Integration for Multi-Agent Systems," IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, vol. 31, no. 4, pp. 616-627, August, 2001.
- [24] B.H.Lee, C.S.G.Lee, "Collision-free Motion Planning of Two Robots," IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, vol. 17, no. 1, pp. 21-31, January/February, 1987.
- [25] S.H.Ji, J.S.Choi and B.H.Lee, "A Computational Interactive Approach to Multi-agent Motion Planning," Int. Journal of Control, Automation, and Systems, vol. 5, no. 3, pp. 295-306, June, 2007.
- [26] T.C.Shermer, "Recent Results in Art Galleries," Proc. of IEEE, vol. 80, no. 9, September, 1992.
- [27] A.Machado, J.D.Zucker, and A.Drogoul, "Multi-Agent Patrolling: an Empirical Analysis of Alternative Architectures," Workshop on Multi-Agent Systems and Agent-Based Simulation, pp. 78-88, 2004.
- [28] P.E.Rybsi, S.A.Stoeter, M.D.Erickson, M.Gini, D.F. Hougen, "A Team of Robotic Agents for Surveillance," Proc. of Int. Conf. on Autonomous agents, pp. 9-16, Spain, June, 2000.
- [29] L.E.Parker, "Distributed Algorithms for Multi-robot Observation of Multiple Moving Targets", Autonomous Robots 12, pp. 231-255, 2002.
- [30] S.Carlsson, B.Nilsson, and S.Ntafos, "Optimum Guard Covers and m-Watchmen Routes for Restricted Polygons," Int. Journal of Computational Geometry and Applications, no. 3, vol. 1, pp. 85-103, 1993.



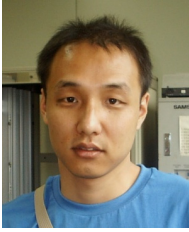
최 정 식

1998 서울대학교 농공학과기계전공 (공학사)
 2004 서울대학교 전기컴퓨터공학부 (공학석사)
 2004~현재 서울대학교 전기컴퓨터공학부 박사과정
 관심분야 : Motion planning, Multi-agent system
 E-mail : jsforce@nate.com



김 지 민

2004 서울대학교 전기공학부(공학사)
 2006 서울대학교 전기컴퓨터공학부(공학석사)
 2007~현재 서울대학교 전기컴퓨터공학부 박사과정
 관심분야 : 다개체 로봇 제어, 보안 로봇, SLAM
 E-mail : torin00@snu.ac.kr



이 정 희

2002 부산대학교 전자공학과 (공학사)
2004 서울대학교 전기컴퓨터공학부 (공학석사)
2004~현재 서울대학교 전기컴퓨터공학부 박사과정
관심분야 : Multi-agent system,
E-mail : meeckee2@snu.ac.kr



이 범 희

1978 서울대 전자공학과 졸
1980 서울대학원 전자공학과 졸
1985 Univ. of Michigan Ph. D
1985~1987 Purdue Univ. 조교수
1987~현재 서울대학교 교수
현재 로봇공학회 부회장, Fellow of IEEE in R&A