

# 다개체 축구로봇 기술과 그 응용 및 연구 방향

KAIST 최성록 · 선재상 · 김종환

## 1. 서론

1995년 전역 비전 시스템과 소형 다개체 로봇을 이용한 로봇축구가 처음 창안되었고, 1997년 세계로봇 축구연맹(FIRA)의 창설과 더불어 매년 국제 규모의 로봇축구 대회인 FIRA Cup ([www.FIRA.net](http://www.FIRA.net))이 열리고 있다. 로봇축구는 최근 사회적으로 부각되어 있는 로봇 스포츠(R-Sports)의 대표적인 예로써 엔터테인먼트의 목적을 넘어 다개체 로봇 시스템의 테스트 베드로써 학술적으로 중요한 역할을 수행하여 왔다.

다개체 로봇 시스템은 [표 1]과 같은 군집 개체들의 본질적인 특징을 가진다. 따라서 이 다개체 시스템은 재난 현장의 인명 구조, 바닷물 온도 및 수질 측정과 같이 넓은 지역을 다루어 하는 경우, 그리고 보안 로봇과 같이 긴 시간 안정적인 동작할 필요가 있는 경우에 효과적이다. 선박과 같이 크기가 큰 물체를 조립하는 경우 복잡한 기능을 하는 단일 로봇보다 단순하지만 각기 다른 역할을 병렬적으로 수행하는 다개체 로봇 시스템이 빠르고 경제적이다.

[표 1] 다개체 로봇 시스템의 특징과 효과

Distribution	넓은 공간에 분포 가능
Redundancy	많은 개체수로 인한 기능적 여유
Diversity	단순한 개체들로 다양성(복잡성) 확보
Parallelism	병렬적인 정보 수집 및 처리

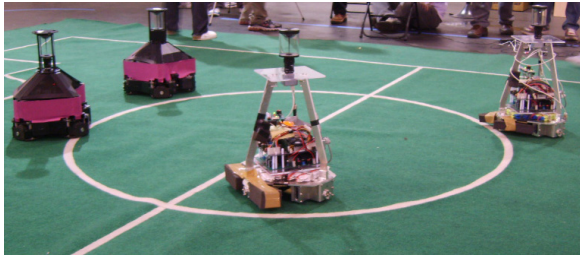


넓은 동작 영역, 신뢰성, 경제성, 빠른 처리 속도

다개체 로봇 시스템은 팀의 운영 방법에 따라 중앙 집중적 구조(*centralized organization*)와 분산 구조(*distributed organization*)로 나누어 볼 수 있다. 중앙의 호스트에 센서 정보와 의사 결정이 집중되는 중앙 집중적 구조와 달리 각 로봇이 의사 결정을 내리는 분산 구조는 팀 구성의 확장이 쉽고 유연하다. 또 분산 구조는 호스트의 결함이 전체 시스템에 심각한 영향을 미치는 중앙 집중적 구조와 달리 각 개체에서 발생한 결함에 강인하고, 분산적인 정보 처리로 인해 각 개체에 필요한 계산 능력도 중앙 집중적 구조의 호스트에 비해 낮다. 이러한 장점 때문에 최근 분산 구조를 이용한 다개체 로봇 시스템에 대한 많은 연구와 응용이 이뤄지고 있다.

FIRA의 로봇축구 종목들은 이러한 분산 구조의 다개체 로봇 시스템을 염두하고 제안되었다. 특히 RoboSot 종목은, 로봇의 서비스 로봇으로의 활용과 같은 실용적인 목적을 고려하여 2006년도에 경기 규칙이 개정되었다. 로봇과 경기장의 크기가 커졌고, RoboSot 종목 자체가 도전적인 연구 과제가 될 수 있도록 경기장의 구조도 바뀌었다. 이 개정된 룰로 2007 FIRA RoboWorld Cup USA에서는 시합이 있었다[그림 1].

본 글에서는 로봇축구 RoboSot 종목에 사용되는 핵심 기술들을 소개하고, 실제 RoboSot과 같은 분산 다개체 로봇 시스템의 응용을 살펴본다. 2장에서는



[그림 1] KAIST OmniBots와 대만 TKU의 경기

협동적인 위치 추정(cooperative localization)에 대하여 살펴보고, 3장에서는 다개체 로봇 시스템의 경로 계획(path planning)에 대해 살펴본다. 그리고 4장에서는 로봇축구에서 사용된 기술이 실제 응용되는 예를 살펴보고, 마지막 5장에서는 앞으로의 연구 방향에 대해 기술한다.

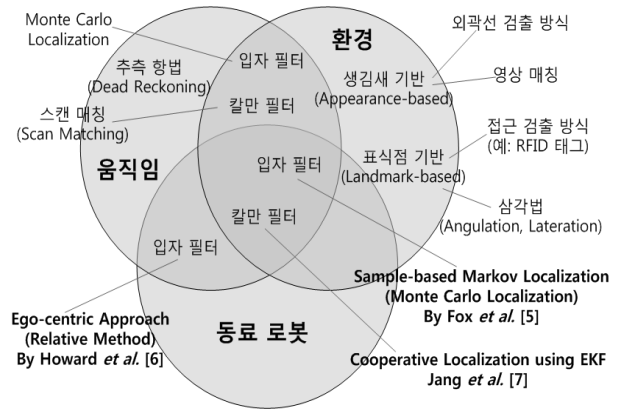
## 2. 협동적 위치 추정

위치 추정은 측정 데이터와 지도 또는 초기 위치와 같은 사전 정보를 통해 공간상에서 로봇의 위치와 방향을 추정하는 작업으로써 로봇축구 뿐만 아니라 청소, 서빙, 안내 등과 같은 복잡한 작업을 수행하는데 필요한 중요한 기본 작업이다.

이동 로봇의 위치 추정은 일반적으로 *국부적인 방법(local method)*과 *전역적인 방법(global method)*으로 나뉜다. 국부적인 방법은 초기 위치에서 로봇이 이동한 상대적 거리를 누적하여 현재 위치를 추정하는 방법인데, 추측 항법(dead reckoning)이라고도 불린다. 그러나 전역적인 방법은 초기 위치에 대한 사전 정보 없이 환경으로부터 측정된 데이터를 통해 로봇의 절대적인 위치 추정이 가능하다. 따라서 이 방법은 누적된 심각한 위치 에러나 kidnapping problem을 극복할 수 있다.

### 2.1 협동적 위치 추정의 특징

로봇이 사용하는 데이터의 원천(source)에 따라 위치 추정 방법을 분류하는 것은 단일 개체를 위한 위



[그림 2] 데이터 원천에 따른 위치 추정 방법

치 추정 방법과 협동적 위치 추정 방법의 특징을 살펴피는데 유용하다. 데이터의 원천은 로봇의 *움직임(motion)*, 로봇을 둘러싸고 있는 *환경(environment)*, 그리고 *동료 로봇(colleague)*, 이렇게 세 가지로 나눌 수 있다 [그림 2].

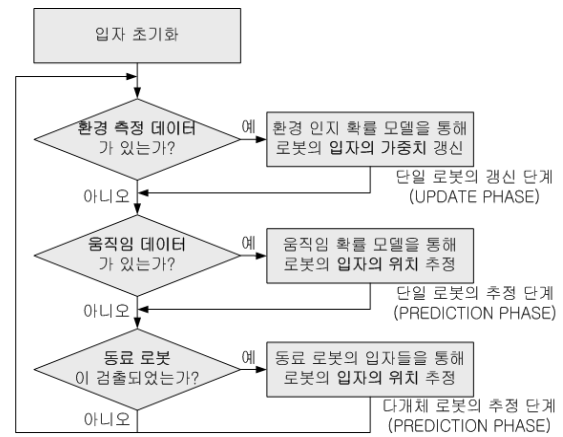
로봇의 움직임 데이터는 엔코더, 관성 센서 등을 통해 측정되고, 이 데이터를 시간이 지남에 따라 누적하여 로봇의 현재 위치를 추정한다. 로봇의 움직임 데이터만을 이용한 방법은 전형적인 국부적 방법이다. 로봇을 둘러싼 환경에 측정하는 데이터는 카메라, 초음파 센서, Laser Range Finder (LRF) 등을 통해 측정되는데, 이러한 데이터는 공간 내의 표식점(예: 색상 패치, 냉장고, 가구와 같은 고정된 물건)이나 공간의 생김새(예: 공간의 외각선)와 같은 로봇 위치에 대한 공간적 단서를 제공한다. 이를 통해 절대적인 위치 추정, 즉 전역적인 방법이 가능하다. 움직임 데이터와 환경에서 측정된 데이터를 모두 이용하는 전역적인 위치 추정 방법이 있는데, 두 가지 다른 원천의 데이터를 융합하는 도구로 칼만 필터(Kalman filter)나 입자 필터(particle filter)를 사용하는 것이 일반적이다. *시공간적(spatial-temporal) 위치 추정*이라고도 불리는데, 한 가지 데이터 원천만을 이용한 앞의 두 방법보다 정확하고, 변화에 강인하여 널리 이용되고 있다.

다개체 로봇 시스템에서는 앞의 두 가지 데이터 원천 외에 동료 로봇으로부터 측정된 데이터나 동료 로봇이 처리한 위치 정보를 이용할 수 있는데, 이를 이용한 방법을 **협동적 위치 추정**이라고 한다. 동료에게 전달받은 데이터를 기존의 측정 데이터와 융합하는 도구로써 시공간적 위치 추정 방법에서 사용한 것과 같은 칼만 필터나 입자 필터를 이용하는 것이 일반적이다. 단일 로봇이 측정하거나 계산하지 못하는 추가적인 정보를 동료 로봇으로부터 얻기 때문에 단일 로봇의 경우 보다 정확하고 강한 추정이 가능하다. 또 협동적 위치 추정은 경제적이라는 장점을 갖는데, 거리 측정 센서를 이용하여 위치 추정을 하는 경우를 예로 들면, 모든 로봇에 비싸고 정밀도가 높은 LRF를 사용하는 것이 아니라, 일부의 로봇은 LRF를 그리고 나머지 로봇은 저가의 초음파 센서를 사용하여도 협동적 위치 추정을 통해 모든 로봇이 LRF를 사용하는 것과 유사한 성능을 발휘할 수 있다.

## 2.2 절대적 협동적 위치 추정 방법

Howard *et al.* [6]은 협동적 위치 추정 방법을 **절대적 위치 추정 방법(absolute method)**과 **상대적 위치 추정 방법(relative method)**로 구분하였다. 절대적 위치 추정은 전역적인 위치 추정과 동일한 의미로 정해진 기준점에 대한 절대 위치를 추정하는 것이다. 반면 상대적 위치 추정은 국부적 위치 추정과 유사하지만 다른 의미를 가진다. 국부적 위치 추정이 로봇의 초기 위치에서의 상대적인 위치를 추정하는 반면, 상대적 위치 추정은 다개체 로봇 간의 상대적인 위치를 이용하여 자신의 위치를 추정한다.

Fox *et al.* [5]은 그들이 제안한 격자(grid) 기반의 Markov localization에 입자 필터를 도입한 Monte Carlo localization(MCL) [8]을 보완하여 협동적 위치 추정을 하였다 [그림 2]. MCL에서 한 로봇이 가지는 입자 필터의 입자(particle, sample)들은 해당 로봇의



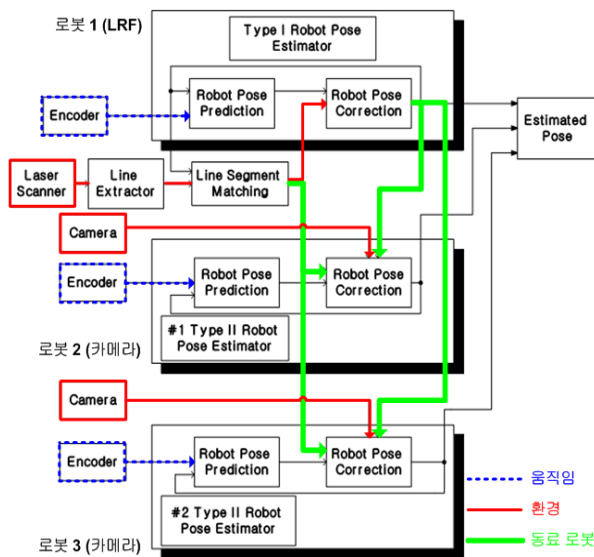
[그림 3] 다개체 로봇 시스템의 협동적 MCL 방법



[그림 4] 동료 로봇 검출 후 입자들의 추정 예 [5]

위치의 확률 분포로 표현하고, 다개체 로봇 시스템의 MCL은 단일 로봇에서의 추정 과정에서 [그림 3]과 같이 동료 로봇이 검출되었을 때의 확률 분포 추정 단계(prediction phase)가 추가된다. [그림 4]는 로봇 Robin이 동료 로봇 Marian을 검출 후 Marian의 입자 분포와 위치를 통해 Robin의 위치를 표현하는 입자들의 위치가 추정된 예이다. Fox *et al.*의 실험은 엔코더를 통해 로봇의 움직임을, LRF를 통해 공간의 외곽선을 측정하였고, LRF와 카메라를 통해 동료 로봇을 검출하였는데, 유사한 정보를 얻을 수 있는 일반적인 경우에도 적용이 가능하다. 그들은 실험적으로 동료 로봇을 고려한 방법이 단일 로봇의 경우 보다 약 2배 이상 정확함을 보였다.

Jang *et al.* [7]은 확장 칼만 필터(EKF)를 이용하여 로봇축구 경기장에서의 절대적 위치 추정 방법을 제안하였다 [그림 2]. Jang *et al.*은 LRF를 가진 한 대의 로봇과 카메라를 가진 두 대의 로봇, 즉 이종(heterogeneous) 다개체 로봇 시스템에 대한 협동적 위치 추정 방법을 구현하였다. LRF를 통해 얻은 공간의 외곽선 데이터와 카메라를 통해 얻은 로봇축구 경기장 바닥의 선과 도형을 이용하여 칼만 필터의 갱신 단계(update phase 또는 correction phase)를 구성하였고, 엔코더를 통해 얻은 움직임 데이터를 통해 추정 단계(prediction phase)를 구성하였다. 그리고 LRF를 가진 로봇에서 추정한 각 로봇의 위치와 공간의 외곽선 데이터가 동료 로봇에게 전해진다 [그림 5]. 앞의 Fox *et al.*과 달리 로봇들이 일대일 관계가 아니라 LRF를 가진 리더 로봇이 중심으로 구성되었다. 실험을 통해 제안된 협동적 위치 추정 방법이 LRF를 가진 단일 로봇의 경우보다 높은 정확도를 나타냄을 보였고, 고가의 LRF 대신 저가의 카메라를 사용한 로봇도 LRF를 가진 동료 로봇을 통해 높은 정확도를 가짐을 보임으로써 협동적 위치 추정이 가지는 경제성이라는 장점을 보였다는 점에 의미가 있다.



[그림 5] 협동적 위치 추정의 데이터 흐름의 예 [7]

## 2.3 상대적 협동적 위치 추정 방법

Howard *et al.* [6]은 표식점, 공간의 외곽선 같은 환경에서 측정할 데이터뿐만 아니라 지도나 로봇들의 초기 위치 같은 사전 지식도 불필요한 상대적 위치 추정 방법을 제안하였다. 이 방법은 각 로봇이 로봇 자신을 중심으로(ego-centric) 동료 로봇들의 위치를 입자 필터를 이용하여 추정하는데, 입자 필터의 갱신은 로봇 자신이 관찰할 동료들의 위치 정보뿐만 아니라 통신을 통해 받은 동료들의 관찰 데이터도 함께 이용한다. 사전 지식과 환경으로부터 관측한 데이터가 불필요한 장점을 가지고 있지만, Fox *et al.* [5]의 접근과는 달리 각 로봇이 전체 로봇의 입자 필터를 가지고 갱신하여야 하기 때문에 계산량이 큰 단점이 있다.

## 3. 다개체 로봇 시스템의 경로 계획

### 3.1 다개체 로봇 시스템의 움직임 계획

움직임 계획(motion planning)은 이동 로봇의 경로 계획(path planning)과 경로 추적(path following, tracking), 장애물 회피(obstacle avoidance), 대형 정렬(formation control), 공간 탐색(exploration 또는 coverage)을 모두 포함하는 말로써, 로봇 팔이나 다리와 같은 매니퓰레이터의 움직임 생성(motion generation)도 움직임 계획의 한 부분이다.

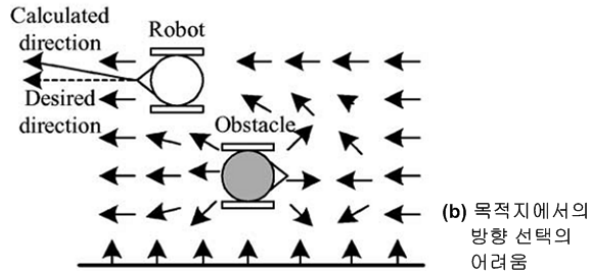
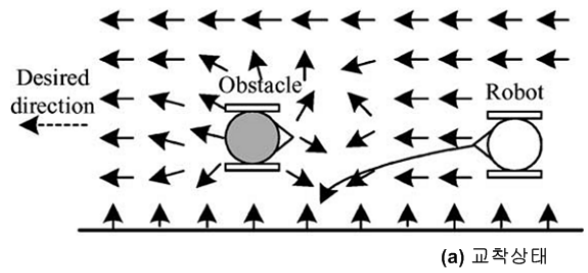
다개체 로봇 시스템의 움직임 계획은 접근 방법에 따라 크게 비결합 방식(decoupled method)과 결합 방식(coupled method 또는 centralized method)으로 나뉘어진다. 비결합 방식은 다개체 로봇 시스템의 각 로봇을 단일 개체로 보고, 단일 개체를 위해 제안된 움직임 계획 방법들을 사용하는 것이다. 비결합 방식의 움직임 계획은 로봇간의 물리적 또는 작업, 공유 자원의 충돌 문제를 동료 로봇을 장애물로 처리하거나 로봇 간에 미리 정해진 우선순위(priority)를 통해 해결한다. 전체 로봇의 상태를 고려하지 않아 수행 시간이 빠르고 구현이 간단하지만, 시스템 전체의 전

역적인 최적 해(optimal solution)를 구하지 못하는 단점이 있다. 다개체 로봇 시스템의 경로 계획, 장애물 회피에 대한 많은 연구는 이러한 소극적인 방법을 중심으로 하였다. 그러나 대형 정렬과 공간 탐색 문제와 같이 다개체 로봇 시스템의 특성과 장점을 잘 살릴 수 있는 문제는 시스템 내 전체 로봇을 고려한 결합 방식에 대한 연구가 많이 이루어졌다.

### 3.2 결정적 경로 계획 방법

이동 로봇의 경로 계획 방법은 그 접근 방법과 적용 환경에 따라 [표 2]와 같이 분류할 수 있다. 로봇축구는 정해진 규격의 경기장에서 이루어지만, 로봇들이 빠른 속도로 움직이기 때문에 매우 동적인 환경으로 볼 수 있다. 따라서 장애물의 위치가 알려진 환경을 가정한 방법은 사용하지 못한다.

로봇축구 시스템에는 목적지의 인력과 장애물의 척력으로 공간상에 발생한 중력장의 방향을 따라 경로를 선택하는 중력장 방법이 많이 사용된다 [그림 6].  $A^*$ ,  $D^*$ , PRM, RRT 등의 방법이 이동 전에 전체 경로를 모두 생성하는 *계획적 방법(deliberative method)* 인데 반해, 중력장 방법은 직후에 움직일 방향과 속력만을 결정하는 *반사적 방법(reactive method)*이다. 일반적으로 중력장 방법을 이용한 경로 계획 방법을 충돌 회피 방법의 일종으로 본다. 중력장 방법은 반사적 특성 때문에 동적인 환경에서 빠르게 반응할 수



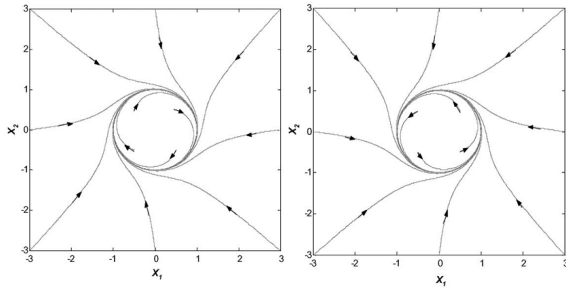
[그림 6] 중력장 방법의 단점 [9]

있지만, [그림 6]과 같이 교착(deadlock), 진동 (oscillation) 현상의 위험이 있고, 로봇을 목적지에 위치할게 할 수는 있지만, 로봇의 방향을 원하는 방향으로 만들지는 못한다. 또한, 일반적인 반사적 방법의 단점과 같이 전역적인 해를 얻을 수 없다.

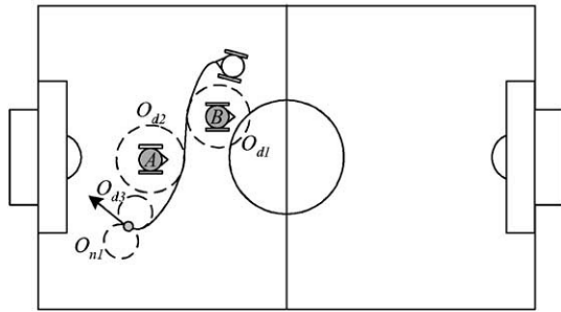
중력장 방법의 이러한 단점을 보완하기 위한 많은 연구가 있었는데, Kim *et al.* [10]은 목적지에서의 방향이 고려된 정규화된 단위 벡터장을 사용하여 목적지에서 방향 선택이 가능하도록 하여 로봇축구의 슛팅 움직임을 구현하였다. Kim과 Kim [9]은 이차 비선형 미분방정식으로 표현되는 limit-cycle [그림 7]을

[표 2] 이동 로봇의 경로 계획 방법과 분류 (특징에 따른 분류: *계획적 방법*, *반사적 방법*)

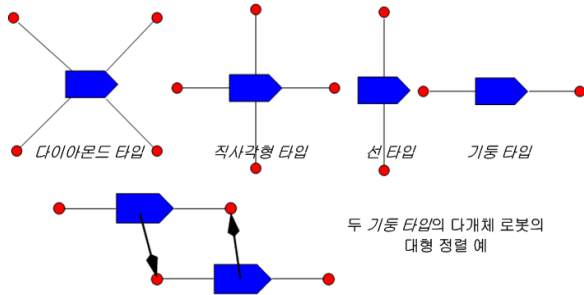
단일 목적지	결정적 접근 (Deterministic Approach)	알려진 환경	등고선법(Brushfire Method), $A^*$ , Road Map Method
		알려지지 않은 환경	중력장 방법(Potential Field Method), Bug Method, $D^*$
	확률적 접근 (Probabilistic Approach)	알려진 환경	PRM(Probabilistic Road Map), RRT(Rapid-exploring Random Tree), SRI(Sensor-based Random Tree)
		알려지지 않은 환경	MDP(Markov Decision Process), POMDP(Partially Observable Markov Decision Process)
복수 목적지 순회	순회 판매원 문제(Traveling Salesman Problem)		



[그림 7] 시계(좌)/반시계(우) 방향의 limit-cycle [9]



[그림 8] Limit-cycle을 이용한 경로 계획 예 [9]



[그림 9] 사회적 중력을 이용한 대형 정렬의 예 [14]

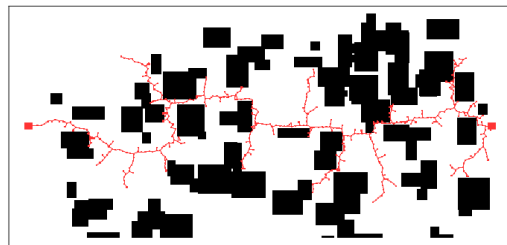
장애물 주위에 두어중력장 방법의 교차, 진동 문제를 해결하였다. 또 [그림 8]과 같이 두 개의 가상의 limit-cycle을 이용하여 목적지에서 원하는 방향 선택이 가능하도록 하였다. Balch와 Hybinette [14]는 중력장 방법과 유사한 사회적 중력(social potential)의 개념을 사용한 다개체 로봇의 대형 정렬 방법을 제안하였다. 사회적 중력의 개념은 분자가 결정을 이룰 때, 분자의 지정된 위치에 다른 분자가 붙는 화학적 현상에서 영감을 얻은 것이다. [그림 9]는 네 가지 형태의 로봇

타입과 이를 이용한 대형 정렬의 예이다.

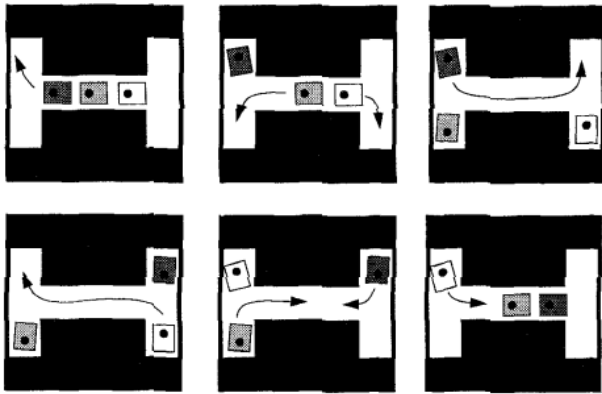
### 3.3 확률적 경로 계획 방법

최근에는 PRM(Probabilistic Road Map)이나 RRT (Rapid-exploring Random Tree)와 같은 확률적 경로 계획 방법이 많이 연구되고 있다. 확률적 경로 계획 방법은  $A^*$ 나  $D^*$ 와 같은 결정적 경로 계획 방법에 비해 결과의 완전성(completeness), 최적성(optimality)은 떨어지지만, 확률적 완전성과 최적성(예:  $p\%$ 로 최적의 결과를 얻는다)을 보장하고, 수행 시간이 짧은 장점이 있다. 또한 이 방법들은 경로 계획뿐만 아니라 매니플레이터의 움직임 생성 등에도 적용될 수 있는 유연성 높은 방법론이다. 이러한 확률적 계획 방법은 주어진 공간이 넓고 복잡하거나 구성 공간(configuration space)의 차원이 높은 경우(예: 높은 자유도의 매니플레이터)와 같이 결정적 계획 방법으로 풀 수 없는 곳에 효과적으로 사용된다 [그림 10].

확률적인 계획 방법의 성능을 향상시키기 위한 연구도 진행되었는데, Bruce *et al.* [12]는 RRT에서 트리의 확장이 확률적으로 목적지에 가까운 방향이 되도록 하는 Extended RRT를 제안하였고, Ferguson *et al.* [13]은 RRT에서 트리의 확장이 불가능해지는 경우 예전의 상태를 복구 할 수 있도록 하는 Dynamic RRT를 제안하였다. 두 접근 모두 확률적인 계획 방법의 해의 수렴 속도를 향상시키려는 연구이다. [그림 11]은 다개체 로봇 시스템에서 로봇들의 배치를 바꾸려는 경로 계획 문제를 나타낸다. 이 경우 앞의 비



[그림 10] 복잡한 공간에서의 Dynamic RRT를 통한 경로 계획 예 [13]

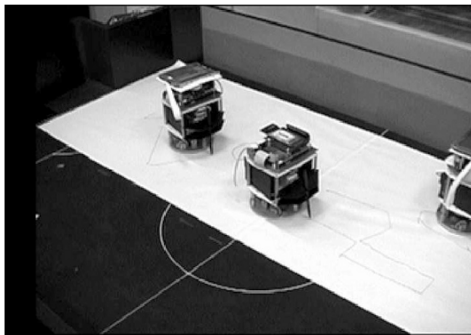


[그림 11] 다개체 로봇 시스템의 경로 계획 예 (왼쪽부터 흰색, 회색, 검은색 로봇이 되는 경로 계획) [11]

결합 방식(decoupled method)의 경로 계획으로는 해결이 쉽지 않다. Svestka와 Overmars [11]은 단일 로봇에 대한 PRM을 다개체 로봇에 대한 PRM으로 확장하여 [그림 11]과 같은 문제를 하였다.

#### 4. 로봇축구 기술의 응용

Lee와 Kim [15]은 다개체 로봇 시스템을 이용한 대형 모바일 프린터 시스템 구현하였다 [그림 12]. 모바일 프린터 시스템 구현을 위해서는 로봇 간의 물리적 충돌 회피(obstacle avoidance)뿐만 아니라 작업 할당(task allocation 또는 scheduling)과 공유 자원의 충돌 문제(resource conflict)를 해결하여야 한다. Lee와 Kim은 분산 구조와 중앙 집중적 구조로 모바일 프린



[그림 12] 다개체 협동 모바일 프린터 시스템 [15]



[그림 13] DARPA HMMWV의 대형 정렬 [16]

터 시스템을 설계, 구현하였다. 분산 구조의 경우 행동 기반(behavior-based)의 subsumption 구조로 로봇을 구현하였고, 로봇은 완료되지 않은 작업 중 가장 가까운 작업을 선택하여 수행하고, 작업의 수행 상황에 대한 정보는 로봇간의 통신을 통해 이루어진다. 분산 구조를 사용한 경우 시스템은 일부 로봇의 고장에도 원하는 프린트 작업을 완료할 수 있고(fault tolerant), 로봇 개체수의 확장에도 유연(flexibility)하다. 중앙 집중적 구조에서는 호스트 컴퓨터가 각 로봇에게 전체 작업을 최단 수행시간(time optimal)이 가능하도록 작업을 할당하여 로봇에게 명령한다. 진화 연산을 통해 각 로봇에 최적의 작업 할당을 하게 되고, 분산 구조보다 빠른 시간에 작업을 마칠 수 있었다.

Balch와 Arkin [16]은 DARPA의 HMMWV(Hybrid high-Mobility, Multipurpose, Wheeled Vehicle) 프로젝트의 UGV(Unmanned Ground Vehicle)의 대형 정렬 문제(formation control)를 다개체 로봇 시스템의 대형 정렬을 통해 해결하였다 [그림 16]. Balch와 Arkin은 사회적 중력장 개념과 모터 스키마 (motor schema) 개념을 이용한 행동 기반의 반사적(reactive) 구조를 사용하였다.

유럽 ESPRIT III 프로젝트의 하나인 MARTHA(Multiple Autonomous Robots for Transport and Handling Applications) [17] 또한 분산 구조의 반사적 구조를



[그림 14] Centibot [19] [그림 15] SDR [20]

통해 항구, 공항 등에서 짐을 나르는 다개체 로봇 시스템을 제안하고, LAAS, Trappes-SNCF, 프랑크푸르트 공항의 시뮬레이션 모델에 이를 적용하였다.

SRI에서 DARPA의 SDR(Software for Distributed Robotics) 프로젝트의 일환으로 도심 관찰 및 감시(urban surveillance)를 목적으로 하는 Centibot 프로젝트를 진행하였다. 이 프로젝트는 2004년 12월까지 100대의 다개체 로봇을 이용하여 지도 작성 및 위치 추정, 동료 로봇 안내와 추적(guidance and tracking)을 24동안 동작시키는 것을 목적으로 하였고 성공적으로 끝마쳤다. Howard *et al.* [20]이 진행한 SDR 프로젝트의 또 다른 팀도 80대의 다개체 로봇으로 600 m<sup>2</sup>의 실내 공간에서 공간 탐색 및 지도 작성, 로봇의 대형 배치 및 물체 검출 실험을 하였다.

우주 탐사를 목적으로 하는 다개체 로봇 프로젝트도 있는데, NASA의 Intelligent Systems Program의 하나로 CMU RI에서 진행하는 FIRE(Federation of Intelligent Robotic Explorers) 프로젝트가 대표적이다 [21]. 이 프로젝트에서는 다개체 로봇 시스템의 작업 분배 및 조정(task allocation and scheduling)에 필요한 운영 아키텍처 연구에 중점을 두고 있고, 시장 기반의 운영 아키텍처(market-based coordination architecture)는 대표적인 연구 성과이다.

2007년 1월에 시작된 EU 프로젝트의 하나인 GUARDIANS (Group of Unmanned Assistant Robots Deployed In Aggregative Navigation supported by Scent detection)는 다개체 로봇을 이용한 소방 로봇을 만든 것을 목적으로 하고 2010년까지 진행될 예정이다.

## 5. 결론 및 앞으로의 연구 방향

본 글에서는 분산 구조의 로봇축구 종목인 RoboSot을 소개하고, 그와 관련된 핵심 기술인 협동적 위치 추정 방법과 경로 계획 방법에 대해 살펴보았다. 그리고 몇 가지 중요한 다개체 로봇 시스템의 응용 예를 살펴보았다.

데이터 종류 관점에서 살펴본 협동적 위치 추정 방법은 동료 로봇에게 받는 추가의 데이터 때문에 더욱 높은 정확도를 가질 수 있었다. 또한, 정확도가 낮은 저렴한 센서를 가진 로봇도 다른 로봇의 도움을 통해 충분히 높은 정확도를 얻을 수 있는데, 다개체 로봇을 통한 이러한 경제적인 효과에 주목할 필요가 있다. 위치 추정의 문제와는 달리 다개체 로봇 시스템의 경로 계획 문제는 지금까지 다개체의 특성을 충분히 살리지 못한 비결합 방식(decoupled method)이 대부분이었다. [그림 11]과 같은 경로 계획 문제는 비결합 방식으로 해결하기 힘든 대표적인 문제인데, 작업 분배, 조정, 동기화와 공유 자원의 할당 및 충돌 해결에 대한 운영 아키텍처에 대한 연구와 함께 결합 방식(coupled method)의 경로 계획에 대한 보다 많은 연구가 필요할 것이다.

다개체 로봇 시스템이 수행하여야 하는 작업이 복잡해지고, 시스템의 확장성과 유연성이 필요하게 됨에 따라 다개체 로봇 시스템은 점차 분산화(distributed), 이종화(heterogeneous)되고 있다. 따라서 다개체 시스템의 실시간성에 대한 연구와 Centibot 프로젝트와 같은 초다수 로봇 시스템(super-scale multi-robot system)에 대한 연구, 그리고 다개체가 가지는 기능적 여유라는 장점을 충분히 활용한 긴 시간동안의 안정적인 시스템 운영(long-term autonomy)에 대한 연구는 앞으로 더욱 진행되어야 할 것이다. 비전 등의 센서를 통한 동료 로봇의 행동을 인식(passive action recognition)하는 연구와 협동적 동시 위치 추정과 지도 생성(CLAM, Cooperative Localization and Map build



ing)에 대한 연구는 흥미로운 주제가 될 것이다.

단순한 물체 이송이나 대형 형성 외에도 [표 1]과 같은 다개체 로봇 시스템의 장점을 충분히 활용한 응용이 필요할 것이다. FIRE 프로젝트와 같이 우주, 해양, 사막 탐사뿐만 아니라 최근에 시작된 GUARDIAN 프로젝트와 같이 산불 예방, 해충 예방, 환경오염 측정 및 경보, 강과 바다 속 청소와 같은 친환경적인 응용도 이루어질 것이다.

## 참고문헌

- [1] 세계로봇축구협회(FIRA), <http://www.fira.net/>
- [2] Farinelli et al., "Multirobot System: A Classification Focused on Coordination," IEEE Transactions on System, Man, and Cybernetics - Part B: Cybernetics, Vol. 34, No. 5, October 2004.
- [3] Arai et al., "Guest Editorial: Advances in Multirobot Systems," IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 18, No. 5, October 2002.
- [4] Myung-Jin Jung, Jun-Su Jang, and Jong-Hwan Kim, "Development of RoboSot Category Robot Soccer Team," In Proceedings of the 32nd International Symposium on Robotics, 2001.
- [5] Fox et al., "A Probabilistic Approach to Collaborative Multi-Robot Localization," Autonomous Robot, Vol. 8, 2000.
- [6] Howard et al., "Putting the 'I' in 'Team': an Ego-Centric Approach to Cooperative Localization," In Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation, September 2003.
- [7] Jun-Su Jang, Myoung-Jin Jung, and Jong-Hwan Kim, "Cooperative Localization in Multi-agent Robotic System," In Proceedings of the 2002 FIRA RoboWorld Congress, 2002.
- [8] Dellaert et al., "Monte Carlo Localization for Mobile Robots," In Proceedings of the 1999 International Conference on Robotics and Automation, 1999.
- [9] Dong-Han Kim and Jong-Hwan Kim, "A Real-time Limit-cycle Navigation Method for Fast Mobile Robots and Its Application to Robot Soccer," Robotics and Autonomous System, Vol. 1020, 2002.
- [10] Yong-Jae Kim, Jong-Hwan Kim, and Dong-Soo Kwon, "Evolutionary Programming-based Univector Field Navigation Method for Fast Mobile Robots," IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part B: Cybernetics, Vol 3, No. 3, June 2001.
- [11] Petr Svestka and Mark H. Overmars, "Coordinated Motion Planning for Multiple Car-like Robots using Probabilistic Roadmap," In Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1995.
- [12] James Bruce and Manuela Veloso, "Real-time Randomized Path Planning for Robot Navigation," In Proceedings of the 2002. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, October 2002.
- [13] Ferguson et al., "Replanning with RRTs," In Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation, May 2006.
- [14] Tucker Balch and Maria Hybinette, "Social Potentials for Scalable Multi-robot Formation," In Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2000.
- [15] Kang-Hee Lee and Jong-Hwan Kim, "Multi-robot Cooperation-based Mobile Printer System," Robotics and Autonomous Systems, Vol. 54, Issue 3, November, 2005.
- [16] Tucker Balch and Ronald C. Arkin, "Behavior-based Formation Control for Multirobot Teams," IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 14, No.6, December 1998.
- [17] Alami et al., "Multi-robot Cooperation in the

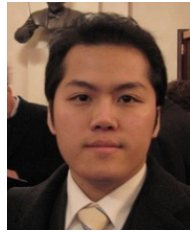
MARTHA Project,” IEEE Robotics and Automation Magazine, March 1998.

- [18] Mutli-Robot System for Fire Fighter, <http://www.whni.uni-paderborn.de/en/sct/projects/guardians/>
- [19] Konolige et al., “CENTIBOTS: Large-scale Robot Teams,” In Proceedings of the NRL Workshop on Multi-robot Systems, 2003.
- [20] Howard et al., “The SDR Experience: Experiments with a Large-scale Heterogeneous Mobile Robot Team,” Experimental Robotics IX, M.H. Ang and O. Khatib (Eds.), STAR 21, 2006.
- [21] Goldberg et al., “A Distributed Layered Architecture for Mobile Robot Coordination: Application to Space Exploration,” In Proceedings of the 3rd International NASA Workshop on Planning and Scheduling for Space, October 2002.
- [22] 김종환 외, 로봇축구공학, KAIST Press, 2002.
- [23] Jong-Hwan Kim et al., Soccer Robotics, Springer, 2004.



**최 성 록**

2005 서울대학교 기계항공공학부 (공학사)  
2006~현재 KAIST 로봇공학 학제전공 석사과정 재학 중  
2007.6 2007 FIRA RoboWorld Cup USA – RoboSot 부분 2위  
관심분야: 위치 추정 및 항법, 컴퓨터 비전, 기계학습, 진화연산, 다개체 로봇 시스템



**선 재 상**

2006 성균관대학교 전자전기공학부 (공학사)  
2007~현재 KAIST 로봇공학 학제전공 석사과정 재학 중  
2007.6 2007 FIRA RoboWorld Cup USA – RoboSot 부분 2위  
관심분야: 로봇 비전 시스템, 임베디드 시스템



**김 종 환**

1987 서울대학교 전자공학과 (공학박사)  
1988 KAIST 전자전산학과 교수  
1995 다개체 로봇 시스템을 응용한 로봇축구대회 창안  
1996 IEEE T. Evolutionary Computation, 부편집인  
1997 세계로봇축구연맹(FIRA) 창설 (現 회장)  
1998 국제로봇올림픽아드위원회(IROC) 창설 (現 회장)  
2003 호주 Griffith University 겸임교수  
2005 필리핀 De La Salle University 명예교수  
2006 IEEE Computational Intelligence Magazine, 부편집인  
관심분야: 유전자 로봇, 유비쿼터스 로봇