행동기반 다개체 로봇 시스템을 이용한 환경감시 알고리즘

Environment Monitoring Algorithm using Behavior-Based Multiple Robot System

권 지 욱* · 홍 석 교** · 좌 동 경†
(Ji-Wook Kwon · Suk-Kyo Hong · Dongkyoung Chwa)

Abstract - This paper proposes an environment monitoring algorithm using a behavior-based multiple robot system. This paper handles an escort and a boundary-tracking especially. Unlike previous research works, the proposed environment monitoring system which is based on the behavior-based multiple robot control allows the system to employ the reusable code and general algorithm. Also, the proposed method can be applied to cheaper process with low performances. In the proposed method, escort and boundary-tracking missions are constructed by weighted sum of predefined basic behaviors after redefining the basic behaviors in previous works and introducing the novel basic behavior. Simulation results of the proposed method are included to demonstrate the practical application of the proposed algorithm.

Key Words : Behavior based multiple robot control, Escort, Boundary tracking, Environment monitoring

1. 서 론

넓은 지역에 걸쳐있는 재난 정보(산불, 적조, 기름유출 등)를 획득하거나 동적인 자연적 또는 인공적 표적(어군, VIP 등)을 추적하는 등의 환경감시 임무에는 많은 인력과 노력이 필요하다는 것은 잘 알려진 사실이다. 이렇게 동적이고 광범위한 인공적이거나 자연적인 환경적 사건을 계속적으로 감시하기 위해 다개체 로봇 시스템(multiple robot system)은 좋은 솔루션을 제공한다[1-11].

따라서 다개체 로봇 시스템을 이용하여 동적인 환경을 감시하는 다양한 연구들이 진행되어 왔다. 먼저, 경계를 가지는 환경적 사건(예를 들어, 산불, 적조, 기름유출, 온도분포 검출 등)들의 경계선을 추적하는 연구들이 진행되었다[1-7]. 또한 동적 개체를 다수의 로봇들이 둘러싸고 계속적으로 추적하거나 보호하는 호위(escort)에 대한 연구들도 꾸준한 결과를 보여주고 있다 [8-11]. 그러나 [1-10]의 결과들을 살펴보면, 특정 환경의 지정된 임무에 국한된 특별한 형태의 알고리즘을 제안하고 있어, 다개체 로봇 시스템을 다른 형태의 임무에 적용하기 위해서는 다른 알고리즘을 개발하고 그것에 적합한 코드를 재 작성하여 로봇에 적용해야 한다. 또한, 알고리즘의 형태가 복잡하여 고성능의 로봇을 필요로 하게 되어 제약된 환경에서 벗어나 실제 환경에 다수의 로봇에 적용하기에는 무리가 따른다.

알고리즘과 코드의 재사용성[12]을 고려하고 저가의 저성능의 로봇에 적용하여 다수의 로봇시스템을 구성하기 위해 행동기반 다개체 시스템 제어 방법이 적용될 수 있다. 행동기반 제어 방법 중 먼저 정의된 기본 행동들을 조합하여 다개체 로봇 시스템이 주어진 다양한 임무에 적용될 수 있도록 하는 방식이 효과적이라 할 수 있다 [11-14]. 그러나 기존의 기본 행동들을 사용하여 효과적인 환경감시 (경계추적, 호위) 임무를 수행하는데 제약이 따른다. 호위 임무에 많은 관심을 가져온 행동기반 연구자들은 주로 표적을 둘러싼 영역에 로봇들을 배치하고 로봇들 간 거리를 조절하는 방식의 연구들을 주로 진행하였으나[11, 14], 이 외의 경계추적이나 표적을 중심으로 한 군집제어(formation control) 등에는 성능의 제약을 보인다. 이에 기존의 알고리즘과 코드의 재사용성을 유지하면서 시스템의 성능을 향상시키고 더 다양한 임무에 로봇시스템을 적용하기 위해 기본행동 재설계하거나 확장하고 실제 임무에 적용 가능성을 확인해야 한다.

따라서 본 논문에서는 환경감시 임무(경계추적, 호위)를 수행하기 위해 기존의 기본 행동을 재 정의하고, 새로운 기본행동을 제안하며, 경계추적 및 호위 임무를 수행할 수 있도록 조합한 후 성능을 확인한다. 본 논문에서 제안된 방법을 통하여, 잘 정의된 기본 행동들을 조합하여 새로운 임무가 주어졌을 때 마다 새로운 알고리즘의 개발 없이 다양한 임무에 미리 개발된 알고리즘과 코드를 재사용하여 로봇 시스템을 투입할 수 있다. 또한, 다개체 로봇 시스템을 유지하고 제어하는 데 필요한 정보를 최소화함으로써 로봇을 구성하는 데 저성능의 프로세서만으로도 가능하도록 하여 시스템을 구성하는 로봇의 부담을 줄이고 실제 환경에 적용할 수 있다. 마지막으로 새로운 기본행동을 추가함으로써 사용자의 간섭을 줄이고 로봇들 자율성을 높여 시스템을 유지하도록 한다.

* 정 회 원 : 아주대학교 전자공학부 박사과정

** 정 회 원 : 아주대학교 전자공학부 교수

† 교신저자, 정회원 : 아주대학교 전자공학부 부교수

E-mail : dkchwa@ajou.ac.kr

접수일자 : 2012년 1월 12일

최종완료 : 2012년 2월 21일

표 1 기본 행동 설명

Table 1 Description of basic behaviors

기본 행동	행동 설명
Homing	하나의 목표지점이나 영역으로 모든 구성 로봇들이 이동.
Safe-wandering	구성로봇들이 장애물 또는 다른 로봇들과 충돌 없이 이동.
Dispersion	구성로봇들이 특정지점에서 떨어져 흩어지거나 로봇들 간의 간격을 벌림.
Aggregation	일정 범위 내에 모든 로봇들이 모임.
Tracking	구성로봇들이 각각 자신의 다른 목표지점(정지 또는 이동)을 가지고 이동.
Tracing	주어진 경로를 따라 이동함.
Goal-seeking	주어진 목표점들 중 하나를 선택함.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 먼저 2장에서 다개체 로봇시스템의 기본 행동을 정의하고, 3장에서 정의된 기본 행동들을 조합하여 환경감시 임무(“escort”와 “boundary-tracking”)를 구성한다. 이렇게 제한된 행동기반 환경 감시 알고리즘은 4장에서 모의실험을 통하여 그 사용성과 효용성을 검증하고, 5장에서 결론을 맺는다.

2. 기본 행동 정의

본 장에서는 본 논문에서 사용하는 다개체 로봇 시스템의 기본 행동들을 정의한다. 본 논문에서 사용하는 기본행동은 [14]에서 소개된 ‘following’, ‘dispersion’, ‘aggregation’, ‘homing’, ‘safe-wandering’의 다섯 가지 기본행동과, [12-13]의 기본행동들을 바탕으로 “tracking”과 “tracing”을 재정의하고, “goal-seeking”을 새로 소개한다. 이들 기본 행동을 추가함으로써 시스템의 성능을 향상시킬 수 있다. 본 논문에서 사용하는 기본행동들은 표 1에 정리되어 있다. 표 1의 기본 행동들은 다음 절에서부터 설명한다. (기존 방법을 그대로 사용하는 ‘homing’, ‘safe-wandering’, ‘dispersion’은 [14]을 참조하기 바람.)

2.1 Tracking

‘tracking’은 ‘homing’과 흡사한 기본 행동이지만 모든 로봇들이 한 지점으로 모이지 않고 주어진 각자의 목표점을 향해 이동한다는 점에서 차이를 가진다. [12-13]에서의 “move-to-goal”과 비슷한 동작을 하는 행동으로 일반적인 로봇제어 연구 분야에서 사용되는 “tracking control”과 비슷한 의미를 지닌다고 할 수 있다. 따라서, 본 논문에서의 기본 행동 ‘tracking’의 설계 기준은 [14]의 ‘homing’ 으로부터 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\forall j, \left(\frac{dp_i}{dt} - \frac{dp_i^g}{dt} \right) (p_j - p_j^g) \leq 0 \quad (1)$$

여기서, j 는 개체 번호이고, p_j 와 p_j^g 는 각각 j 번째 로봇의 위치와 목표점이다. 위와 같은 설계기준으로부터 그림 1과

같이 알고리즘을 구성한다. 이때, 로봇의 속도 입력은

$$v_j = K_v \cdot distance \quad (2)$$

로 하고, 여기서, K_v 는 양의 실수, $distance$ 는 로봇과 표적과의 거리이다.

If the robot is in boundary, B_{track}
Stop.
Otherwise,
Turn toward target.

그림 1 “tracking” 알고리즘.

Fig. 1 “tracking” algorithm.

2.2 Tracing

“tracing”은 [12]에서의 “stay-on-path”와 비슷한 기본행동으로 본 논문에서는 주어진 경로뿐만 아니라 센서를 통해 획득한 선 성분(line: 산불이나 적조의 경계 등) 위에 로봇이 위치할 수 있도록 한다. 기본 행동 ‘tracing’의 설계 기준은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\|p_j - l\| < B_{trace} \quad (3)$$

여기서 l 은 경로의 위치를 나타내며, B_{trace} 는 양의 실수이다. 이와 같은 설계기준으로부터 그림 2와 같은 알고리즘을 구성한다. 로봇의 속도 입력 v_j 는 로봇들이 경계선위에 위치하여 정지할 경우에는 로봇이 경계선으로 이동할 때 상수로 하고 경계선위에 있을 때는 $v_j = 0$ 이다. 반면, 로봇들이 경계선을 따라 계속 이동하도록 하려면 v_j 는 변화 없이 항상 상수로 선택한다.

If the robot is in boundary, B_{trace}
Stop.
Otherwise,
Turn toward path.

그림 2 “tracing” 알고리즘.

Fig. 2 “tracing” algorithm.

2.3 Goal-seeking

“goal-seeking”은 구성 로봇들에 여러 목표점이 주어졌을 때 각 로봇이 사용자(supervisor)로부터 목표점을 일일이 할당받지 않고 로봇간의 최적화 알고리즘 없이 스스로 목표점을 정하고 찾아 가도록 하는 기본 행동이다. “goal-seeking”의 설계 기준은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} f: G^r \rightarrow G \text{ is injective,} \\ G^r = \{g_j | g_j \text{ is goal position of the robot}\} \\ G = \{g_i | g_i \text{ is given goal}\} \end{aligned} \quad (4)$$

1. Find the closest goal in the given goal set G
2. Check the existence of other robots in the goal boundary B_g
3. If : the robot is out of B_g and there are other robots in B_g ,
 Mark taboo list and carry out process 1 except the marked goal in the taboo list
4. Else if : the robot is in and there are other robots in
 If: the robot is the closet robot to the goal,
 then get the goal.
 Else:
 mark taboo list and carry out process 1 except the marked goal in the
 taboo list
5. If: the robot does not reach the goal and all indexes are marked,
 then set the list as zero and carry out process 1 again.

그림 3 “goal-seeking” 알고리즘.

Fig. 3 “goal-seeking” algorithm.

이때, $j < i$ 를 만족해야 한다. 이러한 설계기준으로부터 그림 3과 같은 알고리즘을 구성한다.

2.4 Aggregation

“aggregation”은 [14]에서의 먼저 정의되어 사용되고 있으나 본 논문에서는 [14]의 방법을 바탕으로 하여 좀 더 향상된 성능을 가지도록 재정의한다. “aggregation”의 알고리즘은 최대 범위 내에 로봇들이 모이도록 하기 위해 설계되었으나, 본 논문에서는 이를 표적을 기준으로 할 경우와 로봇들간의 상대적 위치를 기준으로 할 경우의 2가지로 분리하여 다음과 같은 설계 기준에 만족하도록 설계한다.

$$\forall j, \|p_j - p_i\| < B_{\text{aggregate}} \quad (5)$$

여기서 i 는 경우에 따라 다른 로봇들이 되거나 표적이 될 수 있다. 먼저 (5)의 설계 기준에 만족하도록 하는 표적 기준의 알고리즘을 그림 4와 같이 표현가능하다. 또한 로봇들간의 상대적 위치를 기준으로 하여 “aggregation” 알고리즘을 기술하면 그림 5와 같다.

If target is outside $B_{\text{aggregate}}$,
 Turn toward the target.
 Otherwise,
 Get Linear and angular velocities of target.

그림 4 표적 기준의 “aggregation_c” 알고리즘.

Fig. 4 Target based “aggregation_c” algorithm.

If nearest agent is outside
 Turn toward local center
 Otherwise,
 Stop

그림 5 표적 기준의 “aggregation_l” 알고리즘.

Fig. 5 Target based “aggregation_l” algorithm.

3. 환경감시 알고리즘(Escort와 Boundary-Tracking)

본 장에서는 앞서 설명된 기본 행동들을 이용하여 환경감시 행동을 구성한다. 본 논문에서는 기본 행동들을 조합하기 위해 weighted sum 방법을 사용하고, 때때로 장애물이나 각 로봇들 간의 충돌을 방지하기 위해 센서 정보를 바탕으로 기본 행동을 선택하여 사용한다[12-14].

본 논문에서는 환경감시 임무들 중 ‘Escort’와 ‘Boundary-Tracking’ 문제를 주 관심사로 다루도록 한다. ‘Escort’는 이동하는 표적을 로봇들이 둘러싸고 함께 이동하면서 표적을 계속적으로 감시할 수 있는 행동이다. 또한, ‘Boundary-Tracking’은 닫힌 형태의 경계선을 따라 로봇들을 배치시켜 경계선의 전체적 모양을 파악하는 행동으로 산불이나 유출된 기름띠와 같이 시간에 따라 변화하는 경계를 계속적으로 추적할 수 있다. 각 행동은 다음의 절들에 자세히 설명되어 있다.

3.1 Escort (1)

이 절에서는 각 로봇이 표적으로부터 일정 범위 내에서 각 로봇들 간에 특정 거리 이상이 되도록 위치시키면서 표적을 따라 이동할 수 있는 “escort”에 대해 설명한다. 기존의 “escort”[11, 14]와 비슷하나 본 논문에서는 로봇들이 $B_{\text{aggregate}}$ 내에 존재하면서 최대 거리를 유지하지 않는 대신 일정 거리 이상만 유지하도록 한다. 이로 인하여, 로봇들은 무리하여 거리를 벌리지 않고도 충돌을 회피하면서 표적 정보를 획득할 수 있다. 그림 6에 이 절에서 설명하는 “escort”

그림 6 표적을 기준으로 한 “escort (1)”

Fig. 6 ‘Escort (1)’ based on the target.

에 대해 도시되어 있다. 그림 6에 도시된 “escort (1)”을 실행하기 위해서는 정의된 기본 행동들 중 “safe-wandering”, “aggregation_c”, “dispersion”을 조합한다. 이 경우, 모든 로봇들은 표적의 위치로부터 경계 영역을 알아내고 주변에 근접한 로봇들로부터 일정 거리를 유지하면 “escort (1)”을 수행할 수 있다.

3.2 Escort (2)

본 논문에서 제시하고자 하는 “escort”는 먼저 정의된 기본 행동들 중에서 ‘goal-seeking’, ‘tracking’, ‘safe-wandering’을 조합하여 생성할 수 있다. 본 논문에서는 표적을 중심으로 각 로봇들의 목표점을 생성하고 이를 추종하도록 한다. 생성되는 목표점들은 그림 7에 표시되어 있는 것과 같이 표적의 이동방향을 기준으로 표적을 둘러싸도록 설정된다. 그림 7에서 보는 것과 같이 로봇들의 목표점은 일정거리를 유지하면서 표적의 이동방향을 기준으로 하여 균등하게 배치된다. 각 로봇들이 획득한 표적의 위치를 이용하여 독립적으로 이러한 연산을 수행하면 모든 로봇들이 동일한 목표점의 집합을 가질 수 있다. 다음으로 각 로봇들은 목표점의 집합과 주변로봇들의 위치로부터 ‘goal-seeking’을 통하여 하나의 목표점을 선택하고, ‘tracking’과 ‘safe-wandering’을 통해 충돌 없이 표적을 둘러싸고 이동할 수 있다

그림 7 ‘Escort (2)’를 위한 표적의 이동방향을 기준으로 한 로봇들의 목표점.

Fig. 7 Goal positions of robots based on the moving direction of the target for “Escort (2)”.

3.3 Boundary tracking

“boundary-tracking”은 산불이나 적조 등의 환경재해의 경계를 추적할 수 있는 조합된 행동으로 모든 로봇들이 경계선위에 위치하거나 경계선 위에서 이동할 수 있도록 한다. 그림 8에 “boundary-tracking”이 도시되어 있다. 그림 8 (a)와 같이 경계선 위에서 로봇들이 정지해 있을 경우 기본 행동들 중 “tracing”, “safe-wandering”, “dispersion”, “aggregation”을 조합한다. 그림 8(b)와 같이 경계선 위에서 로봇들이 움직여야 하는 경우 기본 행동 “tracing” 알고리즘을 수정하여 로봇이 조건을 만족했을 때 정지하지 않고 상수인 속도를 유지하도록 한다.

그림 8 “boundary-tracking”에 의해 경계선 위에 배치되거나 이동 중인 다개체 시스템.

Fig. 8 Multiple robot system positioning or moving on the boundary by “boundary-tracking”.

4. 모의 실험

이 장에서는 본 논문에서 구성된 “escort”와 “boundary-tracking”의 성능을 확인하기 위한 모의실험을 수행한다. 모의 실험은 앞서 설명한 4가지 알고리즘에 대한 시나리오들(Escort (1), Escort (2), Boundary-tracking (정지), Boundary-tracking (이동))에 대하여 수행한다. 모의실험에 사용된 이동로봇은 5대로 하고, 로봇의 사이즈는 가로, 세로 각각 0.2m로 하며, 초기 위치와 자세 각은 표 2와 같다.

4.1 Escort (1)

첫 번째 모의실험은 5대의 로봇이 표적을 중심으로 한 특정범위 안에 위치하면서 각 로봇들 간의 간격을 벌리고, 또한 충돌을 회피하는 시나리오이다. 모의실험을 위하여 표적은 초기위치 (4m, 1m, 0rad)에서 출발하여 이동속도 $v_r(t) = \sin(t) + 1.5(\text{m/s})$, 각속도 $\omega_r(t) = 0.01(\text{rad})$ 를 가지고 이동하고, 모든 로봇들은 표적으로부터 반경 2m 이내에 위치시키며 이 후에는 표적의 속도를 따라 이동하면서 (“aggregation_c”), 각 로봇들은 최소 1.2m이상의 간격을 가지도록 하였다(“dispersion”). 이때 이동로봇들의 주행 경로는 그림 9와 같이 나타난다. 그림 9에서 볼 수 있듯이, 각 로봇들 간의 충돌을 회피하여 모든 이동 로봇들은 표적으로부터 반경 2m 이내의 영역에 위치하면서 각각 로봇들 간의 간격이 1.2m이상을 유지함을 알 수 있다. 그림 9의 결과에서 볼 수 있듯이 로봇들은 경계선에 위치한 후에도 간격을 벌리기 위해 이동하여 재 배치되어 표적을 따라 이동함을 알 수 있다. 이로부터 본 논문에서 수정된 기본행동들의 조합이 기존의 결과들[11, 14]과 비교하였을 때에도 대등한 결과를 가짐을 알 수 있다.

4.2 Escort (2)

두 번째 모의실험은 표적을 중심으로 로봇들이 위치해야 할 특정 목표점들을 생성하고, 사용자로부터 위치를 할당받거나 로봇들 간의 협의 없이 목표지점으로 이동함으로써 표적을 둘러싸고 이동하는 시나리오이다. 표적의 정보는 앞절과 같고, 모든 로봇들은 표적으로부터 2m 떨어진 곳에 일정한 간격으로 배치되도록 한다. 본 시나리오에서는 5대의 로봇을 사용하므로 로봇들은 자동적으로 표적의 이동방향을 기준으로 0, $2\pi/5$, $4\pi/5$, $6\pi/5$, $8\pi/5$ 에 위치하려 한다. 표적과 이동로봇들의 주행 경로는 그림 10과 같이 나타난다. 그림

그림 9 “escort (1)” 중인 이동로봇들의 이동경로

Fig. 9 Route of the robots in “escort (1)”

그림 10 “escort (2)” 중인 이동로봇들의 이동경로

Fig. 10 Route of the robots in “escort (2)”

10에서 볼 수 있듯이, 표적을 중심으로 한 오각형의 꼭지점들은 로봇들의 목표점이고, 모든 로봇들은 이 목표점들 중 하나를 골라 표적을 따라 다른 로봇들과의 충돌을 회피하면서 이동하게 된다.

4.3 Boundary-tracking (1)

세 번째 모의실험은 5대의 로봇들이 원형의 경계 위에 특정 간격 이상을 가지고 배치되는 시나리오를 보여준다. 로봇들은 경계선을 찾아 움직이게 되고 경계선위에 위치하면 로봇은 움직임을 멈추게 된다. 원형 궤적은 중심이 (7, -1) 이고 반지름이 5m 인 별 모양 궤적 위에 로봇들이 충돌 없이 각각 3m 내에 위치 하도록 한다. 그림 11에서 볼 수 있듯이 각 로봇들은 초기위치에서 출발하여 경계 위에 배치되고, 다른 로봇들과 2.5m 이상의 간격을 가지게 된다. 앞서

설명한 기본행동에 따라 로봇들이 경계선 전체를 둘러싸고 위치하게 된다. 이때 그림 11에서 볼 수 있듯이 경계선 위에 자리를 잡은 로봇들도 “dispersion”에 의하여 다른 로봇들이 접근할 경우 경계선을 따라 이동할 수 있다.(그림 11의 20sec와 25ses)

4.4 Boundary-tracking (2)

마지막 모의실험은 5대의 이동로봇들이 별 모양의 경계선을 따라 이동하면서 앞서 보인 시나리오와 같이 각 로봇들 간의 간격을 3m 이상이 되도록 하며 각 로봇들간의 충돌을 방지 한다. 이 경우 로봇들은 경계선 위에 위치하여도 멈추지 않고 기존의 속도를 유지하게 되어 경계선 위를 따라 이동하게 되고 “dispersion”과 “safe-wandering”에 의해 서로 간격을 벌리면서 로봇간의 충돌을 피하게 된다. 그림 12에

그림 11 “boundary-tracking (1)” 중인 이동로봇들의 이동경로
Fig. 11 Route of the robots in “boundary-tracking (1)”.

그림 12 “boundary-tracking (2)” 중 이동로봇들의 이동경로
Fig. 12 Route of the robots in “boundary-tracking (2)”.

서 볼 수 있는 것과 같이, 모든 로봇들이 초기위치로부터 출발하여 경계를 따라 이동하면서 로봇들 간 3m 이상의 거리를 유지함을 알 수 있다.

5. 결 론

본 논문은 행동기반 다개체 로봇 시스템을 이용하여 경계선 추적과 호위임무에 적용한다. 기존의 기본 행동들 (“aggregation”, “tracking”, “tracing”)을 재정의하고 새로운 기본행동 (“goal-seeking”)을 소개하였다. 정의된 기본 행동들을 조합하여 표적을 일정 범위 내에서 추적하거나, 표적을 기준으로 목표점을 설정하여 로봇들이 그 목표점에 위치하여 표적을 추적하는 두 가지 방식의 호위(escort) 임무를 구성하였고, 또한 로봇들이 경계선위에 위치하거나, 경계선을 따라 이동하는 경계추적(boundary-tracking) 알고리즘을 두 가지 방식으로 구성하였다. 이렇게 환경감시 알고리즘을 기본 행동을 정의하고 조합하는 방식을 사용하여 구성함으로

써 설계 알고리즘과 코드의 재사용성을 증가시키고 저가의 로봇에 적용 가능성을 향상시켜 제안한 알고리즘의 실제 구현 가능성을 증대시킬 수 있다. 또한, 기존의 연구결과들을 바탕으로 더 많은 임무에 로봇시스템을 적용시키고 성능을 향상시킬 수 있음을 보였다. 더 나아가 새로운 “goal-seeking”을 추가하여 사용자의 간섭 없이 시스템을 유지할 수 있음을 보였다. 본 논문에서는 제안된 행동기반 환경감시 알고리즘의 효용성을 확인하기 위하여 4가지 시나리오를 가지고 모의실험을 수행하였다. 앞으로 본 논문에서 제안된 알고리즘의 실제 환경에서의 구현 가능성을 확인하기 위한 실험적 검증이 계속 연구되어야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임. (2009-0069742)

참 고 문 헌

- [1] A. Joshi, T. Ashiey, Y. R. Huang, and A. L. Bertozzi, "Experimental validation of cooperative environmental boundary tracking with on-board sensors," *American Control Conference*, MO, USA, Jun. 1999.
- [2] C. H. Hsiesh, Z. Jin, D. Marthaler, B. Q. Nguyen, D. J. Tung, A. L. Bertozzi, and R. M. Murray, "Experimental validation of an algorithm for cooperative boundary tracking," *American Control Conference*, OR, USA, Jun. 2005.
- [3] J. Clark and R. Fierro, "Mobile robotic sensors for perimeter detection and tracking," *ISA Transactions*, Vol. 46, No. 1, pp. 3-13, 2007.
- [4] S. Susca, F. Bullo, and S. Martinez, "Monitoring environmental boundaries with a robotic sensor network," *IEEE Transactions on Control System Technology*, Vol. 16, No. 2, pp. 288-296, Mar. 2008.
- [5] D. Kingston, R. W. Beard, and Ryan. S. Holt, "Decentralized perimeter surveillance using a team of UAVs," *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 24, No. 6, pp. 1394-1404, Dec. 2008.
- [6] R. W. Beard, T. W. McLain, D. B. Nelson, D. Kingston, and D. Johanson, "Decentralized cooperative aerial surveillance using fixed-wing miniature UAVs," *Proceedings of the IEEE*, Vol. 94, No. 7, pp. 1306-1324, Jul. 2006.
- [7] Y. Cao and R. Fierro, "Dynamic boundary tracking using dynamic sensor nets," *Proceedings of Conference on Decision and Control*, CA, USA, 2006.
- [8] J. Spletzer, A. K. Das, R. Fierro, C. J. Taylor, V. Kumar, J. P. Ostrowski, "Cooperative localization and control for multi-robot manipulation," *Proceedings of International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Hawaii USA, Oct. 2001.
- [9] H. Yamaguchi, "A cooperative hunting behavior by mobile robot troops," *Proceedings of International Conference on Robotics and Automation*, Leuven Belgium, May 1998.
- [10] I. Mas, S. Li, J. Acain, and C. Kitts, "Entrapment/escorting and patrolling missions in multi-robot cluster space control," *International Conference on Intelligent and Robots and Systems 2009*, MO, USA, 2009.
- [11] G. Antonelli, F. Arrichiello, and S. Chiaverini, "The entrapment /escorting mission," *IEEE Robotics and Automation Magazine*, Vol. 15, No. 1, pp. 22-29, Mar. 2008.
- [12] B. G. Woolley and G. L. Peterson, "Unified behavior framework for reactive robot control," *Journal of Intelligent and robotics systems*, Vol. 55, No. 2-3, pp. 155-176, 2009.
- [13] T. Balch and R. C. Arkin, "Behavior-based formation control for multirobot teams," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 14, No. 6, Dec. 1998.
- [14] M. J. Mataric, *Interaction and intelligent behaviors*, MIT EECS PhD Thesis, May 1994.

저 자 소 개

권 지 욱 (權志昱)

2005년 아주대학교 전자공학부 졸업
2009년 동 대학원 박사과정 수료

홍 석 교 (洪錫敎)

1971년 서울대학교 전기공학과 졸업
1981년 동 대학원 박사
1976~현재 아주대학교 전자공학부 교수

좌 동 경 (左東京)

1995년 서울대학교 제어계측공학과 졸업
2001년 동 대학원 박사
2005~현재 아주대학교 전자공학부 부교수