

진화적 상호작용을 이용한 군집로봇의 환경적응

Environment Adaptation using Evolutional Interactivity in a Swarm of Robots

문우성*, 장진원, 백광렬
(Woo-sung Moon, Jin Won Jang, and Kwang Ryul Baek)

Abstract: In this paper we consider the multi-robot system that collects target objects spread in an unexplored environment. The robots cooperate each other to improve the capability and the efficiency. The robots attract or intimidate each other, as behaviors of bacterial swarms or particles with electrical moments. The interactions would increase the working efficiency in some environments, but it would decrease the efficiency in some other environments. Therefore, the system needs to adapt to the working environment by adjusting the strengths of the interactions. The strengths of the interactions are expressed as sets of gene codes that mean the weights of each kind of attracting or intimidating vectors. The proposed system adjusts the gene codes using evolutionary strategy. The proposed approach has been validated by computer simulation. The results of this paper show that our inter-swarm interacting strategy and optimizing algorithm improves the working efficiency, adaptively to the characteristics of environments.

Keywords: multi-robot, swarm robot, genetic algorithm, environment adaptation

1. 서론

군집로봇 시스템이란 다수의 로봇의 협동제어를 통해 단일 로봇 이상의 성능을 내는 것을 목표로 하는 시스템이다. 군집로봇 시스템은 동시에 여러 장소에서 정보를 획득하여 작업을 진행할 수 있어 알려지지 않은 환경(unexplored environment)에서의 임무수행에 유리하다[1-3]. 또한 로봇 간 상호작용을 이용한 집단지성의 창발성(emergence)의 효과로 더욱 지능적인 시스템을 만들 수 있다[4,5].

본 논문에서는 작업환경 상에 분포된 목표물을 수집하는 군집로봇 시스템의 상호작용 알고리즘 및 그 최적화 알고리즘을 제안한다. 제안한 군집로봇 시스템은 박테리아의 집단 행동 방식[6-8]을 모방하여 그림 1과 같이 동작한다. 각각의 로봇은 자신과 주변 로봇의 목표물 발견 여부에 따라 자신의 상태를 결정하고, 주변 로봇들과 통신하여 상태 정보를 공유한다. 공유된 주변 로봇들의 상태 정보와, 해당 로봇과의 상대좌표를 이용하여 여러 가지 조건에 따른 벡터의 영향을 결정한다. 이렇게 상호작용하여 얻어진 여러 종류의 벡터들을 합산한 방향으로 각 로봇이 움직이므로써 군집로봇의 동작이 결정된다.

각각의 로봇은 자신이 획득한 정보와 같은 집단 내의 다른 로봇이 획득한 정보를 조합하여 자신의 행동을 선택하고, 각 로봇의 행동은 다시 다른 로봇의 행동에 영향을 끼친다. 이때 각 로봇이 다른 로봇에게서 받은 정보에 대한 반응의 정도에 따라 군집의 상호작용이 동작의 행동 효율을 향상시킬 수도 있지만 지나친 상호작용은 오히려 효율을 저해할 수도 있다. 목표물을 수집하는 로봇 시스템의 경우, 그림 2의 좌측의 예의 경우 군집로봇 중 한대의 로봇(a)이 목표물(t)을 발견

하여 그 신호를 받은 로봇들(b)이 목표물로 모여드는 것이 목표물을 수집하는데 도움이 된다. 하지만 우측의 예의 경우, 목표물이 공간 상에 여러 곳으로 흩어져 있어 아직 목표물을 발견하지 못한 로봇은 목표물을 발견한 로봇의 신호를 쫓아가는 것보다 그 외의 다른 영역을 탐색하는 편이 합리적이다. 따라서 각각의 로봇이 행동을 선택할 때 로봇 간 상호작용의 정도는 환경에 따라 그 적합한 정도가 다르다.

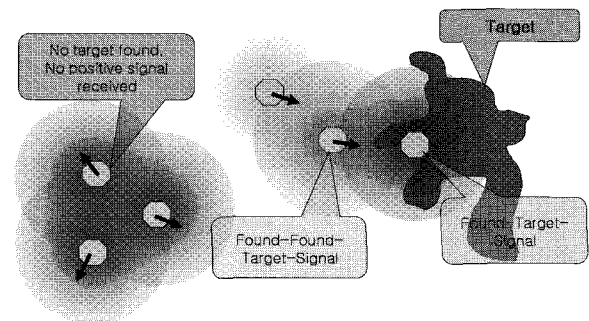
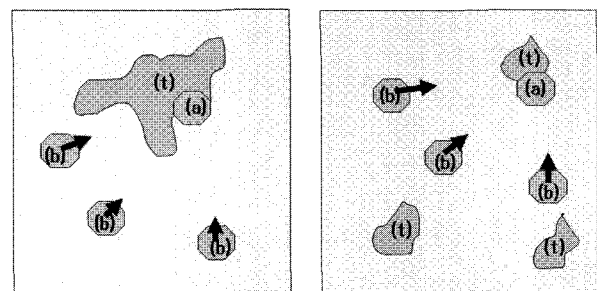


그림 1. 로봇 간 상호작용의 개념.
Fig. 1. Concept of interactivity in a swarm of robots.



(a) Interaction increases the efficiency. (b) Interaction decreases the efficiency.

그림 2. 상호작용의 환경적응 필요성.
Fig. 2. Necessity of adaptation of interactivity.

* 책임저자(Corresponding Author)
논문접수: 2009. 11. 13., 수정: 2009. 12. 15., 채택확정: 2009. 12. 30.
문우성, 장진원, 백광렬: 부산대학교 전자전기공학과
(crenmoon@pusan.ac.kr/epicentre@pusan.ac.kr/krbaek@pusan.ac.kr)
※ 본 연구는 부산대학교 교수국의장기과연지원비에 의하여 연구되었음.

본 논문에서는 각각의 로봇이 얻은 여러 종류의 벡터들에 대한 가중치를 조절하는 방법으로 각 로봇이 여러 종류의 정보들에 대하여 받는 영향의 강도를 조절한다. 또한 진화연산을 이용하여 군집로봇이 작업환경에 최적화된 상호작용의 강도를 찾아낸다. 군집로봇에 유전자 알고리즘을 적용하는 방식은 과거 여러 차례 논의된 바 있다[9,10].

II 장에서는 군집로봇 시스템의 상호작용 방법에 대하여 논하고, III 장에서는 그 최적화를 위한 진화연산의 구조에 대해서 논한다. IV 장에서는 본 논문에서 제안한 알고리즘을 검증하기 위하여, 우선 제안한 상호작용 시스템의 성능을 검증하고, 그 뒤 진화적 상호작용을 통한 환경적응 성능을 검증한다. V 장에서는 논문의 결론과 활용방안에 대하여 논한다. 제안한 알고리즘은 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 검증되었다. 실험 결과는 제안한 군집로봇 시스템의 상호작용 방식이 상호작용을 하지 않는 다수의 단일로봇 시스템에 비하여 향상된 성능을 가짐을 보여준다. 또한 제안한 최적화 알고리즘에 의하여 다양한 환경에 가장 적합한 상호작용의 정도를 스스로 찾아내 적응함을 보여준다.

II. 군집로봇 시스템 행동 전략

1. 군집로봇 행동 전략

제안한 군집로봇 시스템에서 각각의 로봇은 서로 정보를 교환하여 주변 로봇의 상태에 따라 해당 좌표로 다가가거나, 혹은 멀어지는 방향으로 움직이는 벡터들을 계산한다. 각각의 로봇은 계산된 벡터들의 총합의 방향으로 이동하도록 동작한다.

$$\vec{v}_{total}^{(i,n)} = \left[\begin{array}{l} \vec{v}_M^{(i,n)} W_M^{(i,ST_i)} + \vec{v}_R^{(i,n)} W_R^{(i,ST_i)} + \vec{v}_C^{(i,n)} \\ + \vec{v}_O^{(i,n)} W_O^{(i,ST_i)} + \vec{v}_S^{(i,n)} W_S^{(i,ST_i)} \\ + \sum_{ST_j=1}^{N_{ST}} \vec{v}_{ST_j}^{(i,n)} W_{ST}^{(i,ST_i,ST_j)} \end{array} \right] \quad (1)$$

이 때 계산되는 벡터들은 시간 n에서의 i번째 로봇의 스스로 발생시키는 무작위 벡터 $\vec{v}_R^{(i,n)}$, 관성 벡터 $\vec{v}_M^{(i,n)}$, 충돌회피 벡터 $\vec{v}_C^{(i,n)}$ 등을 포함하는 개별운동 벡터와, 로봇 간 상호작용 벡터 $\vec{v}_{ST_k}^{(i,n)}$, 진형 형성 벡터 $\vec{v}_O^{(i,n)}$, 무리 운동 벡터 $\vec{v}_S^{(i,n)}$ 등을 포함하는 군집운동 벡터로 나눌 수 있다. ST_i 는 i번째 로봇의 현재 상태를 말한다.

2. 개별운동 벡터

군집로봇 내의 각각의 로봇은 스스로 목표물을 찾기 위하여, 개별적으로 동작하는 방향 벡터를 가지고 있다. 이는 각종 응용분야나 로봇의 알고리즘에 따라 달라질 수 있지만, 집단의 관점에서 각각의 로봇의 행동은 무작위로 간주될 수 있다. 이를 고려하기 위한 무작위 벡터 $\vec{v}_R^{(i,n)}$ 는 무작위로 계산된 각도와 일정한 크기를 이용하여, 다음과 같이 표현한다.

$$\vec{v}_R^{(i,n)} = \hat{x} \cos(\theta_n + \theta_R) + \hat{y} \sin(\theta_n + \theta_R) \quad (2)$$

여기서 θ_n 은 로봇의 현재 방향각, θ_R 은 무작위로 발생된 방향각의 변화량이다.

각각의 로봇은 이전에 이동하던 관성 벡터 $\vec{v}_M^{(i,n)}$ 를 갖고

있어, 지나친 방향전환을 피하고 부드러운 행동을 위하여 이전 이동 방향에 대한 정보를 고려한다.

$$\vec{v}_M^{(i,n)} = \vec{v}_{total}^{(i,n-1)} \quad (3)$$

또한 각각의 로봇은 충돌회피를 위하여 특정 거리 이내에 장애물이 발견되었을 때 발생하는 충돌회피 벡터 $\vec{v}_C^{(i,n)}$ 를 갖고 있다. 충돌회피 벡터의 크기가 설정된 정도 이상 클 때에는 다른 벡터는 무시하여 충돌 회피를 우선시 한다.

3. 군집운동 벡터

로봇 간 상호작용을 위하여, 각각의 로봇은 주변의 다른 로봇들의 상태와 거리에 따라 상호작용 벡터를 생성한다.

$$\vec{v}_{ST_k}^{(i,n)} = \sum_{j=1}^N (d_{comm} - |\vec{d}_{(i,j)}|) \delta(ST_j - ST_k) Near(i,j) \quad (4)$$

여기서, $Near(i,j)$ 는 로봇 i와 로봇 j가 서로 상호작용할 수 있는 거리 내에 있는지에 대한 여부를 판단하기 위한 항목이다.

$$Near(i,j) = \begin{cases} 1, & |\vec{d}_{(i,j)}| < d_{comm} \\ 0, & others \end{cases} \quad (5)$$

목표물을 탐지한 로봇은 ST_0 에 해당되는 상태를 가지며, ST_0 의 로봇의 주변에 있는 로봇은 ST_1 을, ST_0 의 로봇은 주변에 없지만 ST_1 인 로봇이 주변에 있는 로봇은 ST_2 를 갖게 된다. 이러한 상태의 전파는 ST_2 까지 전달된다. 목표물을 발견하지 못하고 목표물을 찾은 로봇의 신호도 받지 못한 로봇은 ST_3 를 갖게 된다. 이러한 상태에 대한 조건은 응용대상에 따라 추가하거나 뺄 수 있다. 상태에 의한 상호작용 벡터는 거리에 비례하여 강도가 줄어든다.

진형 형성 벡터(formation organizing vector) $\vec{v}_O^{(i,n)}$ 는 로봇군집의 로봇들이 서로 통신할 수 없을 정도로 지나치게 멀리 떨어지는 것을 방지하기 위한 벡터이다. 각각의 로봇은 자기 자신에게서 가장 가까운 로봇에 대한 인력 벡터 $\vec{d}_{(i,n_1)}$ 와 두 번째로 가까운 로봇에 대한 인력 벡터 $\vec{d}_{(i,n_2)}$ 를 가진다. 진형 형성 벡터는 거리가 멀수록 강도가 강해져서, 로봇 간 거리가 너무 멀어져 로봇이 군집에서 떨어지지 않도록 하는 역할을 한다. 진형 유지 벡터와 충돌회피 벡터의 합으로만 로봇이 동작한다면, 서로 일정한 거리를 유지하게 되어 그림 3과 같이 로봇군집은 벌집형태의 육각 진형(hexagonal formation)을 유지하게 된다.

$$\vec{v}_O^{(i,n)} = \vec{d}_{(i,n_1)} + \vec{d}_{(i,n_2)} \quad (6)$$

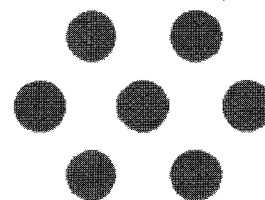


그림 3. 육각 진형의 예.

Fig. 3. Example of hexagonal formation.

무리 운동 벡터(swarming vector) $\vec{v}_s^{(i,n)}$ 는 로봇이 주변의 다른 로봇의 움직이는 방향으로 움직이게 만드는 벡터이다. 이 벡터는 로봇군집이 물고기나 새 떼와 유사한 모습으로 로봇들이 한 방향으로 움직이게 만든다.

$$\vec{v}_s^{(i,n)} = \frac{\sum_{k=1}^N \vec{v}_{total}^{(k,n-1)} Near(i,k)}{\sum_{k=1}^N Near(i,k)} \quad (7)$$

III. 진화적 상호작용

군집로봇 시스템에서는 진화연산을 주관하는 감독(supervisor)을 별도로 두지 않고, 각 로봇이 별개로 재생산의 시기를 결정하고 주변 로봇의 적합도와 유전자를 통신을 통해 전달받아 자신의 재생산하여 갱신하는 분산유전알고리즘 [10]으로 재생산을 수행한다. 또한 실제 군집로봇에서는 물리적으로 사용할 수 있는 로봇의 하드웨어 수가 한정적이어서 진화연산의 개체수가 제한된다. 진화연산에서 개체수가 적으면 지역극소 값에 빠지기 쉬우며, 이를 피하기 위하여 교배 확률을 낮추거나 돌연변이 확률을 높이면 학습 속도가 느려지고 군집 내 로봇들의 동작에 통일성이 없어진다. 본 논문에서는 군집 내 모든 로봇의 유전자 정보를 사용하는 진화연산[11]을 사용하면 비교적 안정적이고 빠른 학습속도를 보여 주어 이를 사용하였다.

II 장에서 제안한 각종 벡터들의 조합 방식을 최적화하기 위하여, 로봇의 이동방향을 결정하는 각 벡터들에 곱해지는 가중치 유전자로 표현하고, 이를 진화연산을 통하여 최적화한다. 각 벡터에 대한 가중치 $w_{ST}^{(ST_i, ST_j)}$, $w_R^{(ST_i)}$, $w_M^{(ST_i)}$, $w_D^{(i, ST_i)}$, $w_S^{(ST_i)}$ 와 무작위 벡터의 무작위 값 θ_R 의 최대값이 유전자로 표현된다. 각 유전자는 0에서 1 사이의 실수 값으로 표현된다. 이렇게 표현된 유전자는 각 가중치에 해당 유전자의 값이 그대로 적용되며 θ_R 의 최대값은 해당 유전자의 값에 10 배로 적용된다. 그림 4는 제안한 유전자 구성 방법과 유전자 변화에 따른 로봇의 행동변화의 예를 나타낸다.

유전자 조합의 최적 값을 찾기 위하여, 서로 다른 유전자를 가진 여러 로봇들이 동작한 결과를 평가한다. 각 로봇은 지수확률분포 형태의 무작위의 시간 간격으로 재생산의 시기를 결정한다. 로봇의 교배는 세대 전체의 유전자를 평균적으로 취하는 방법을 사용하였다. 각 로봇은 재생산 결정시 군집 내 로봇들의 유전자조합과 획득된 점수들을 바탕으로

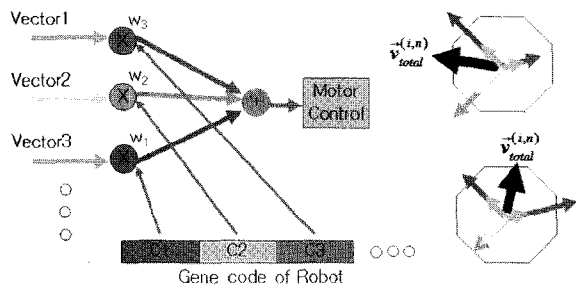


그림 4. 진화적 상호작용의 유전자 구성.
Fig. 4. Gene code structure of the evolutionary interactivity.

교배과정 (8)을 거친다. 각 로봇이 획득한 점수는 로봇이 획득한 목표물의 수와 같다.

$$gene[i][k] = \frac{\sum_{j=1}^N \frac{score[j]}{\sum_{s=1}^N score[s]} gene[j][k]}{\sum_{s=1}^N score[s]} \quad (8)$$

여기서 $gene[i][k]$ 는 i번째 로봇의 k번째 유전자를 말하며, $score[j]$ 는 j번째 로봇이 획득한 점수이다. 이에 따라 각 로봇은 목표물을 많이 획득한 로봇의 행동방식을 모방하는 효과를 가진다. 교배를 거친 유전자는 돌연변이 발생과정 (9)를 거친다.

$$gene[i][k] = gene[i][k] + N(0, \sigma) \quad (9)$$

$N(0, \sigma)$ 은 σ 의 표준편차를 가지는 가우스 확률변수로 발생한 돌연변이 값이다. 교배와 돌연변이가 발생을 거친 후 로봇은 자신의 유전자를 새로운 유전자로 갱신한다.

IV. 시뮬레이션 및 결과

1. 시뮬레이션 모델링

제안한 시스템의 성능을 검증하기 위하여, 컴퓨터 시뮬레이션으로 로봇의 물리적 모델을 구현하고 동작 알고리즘을 적용하여 결과를 검증하였다. 각 로봇은 제안한 알고리즘에 따라 결정된 방향 벡터를 가지며, 이 벡터와 현재 방향의 차이로 로봇의 좌측과 우측의 바퀴 속도를 계산한다. 로봇에 장착된 모터의 속도는 일정한 한계를 가진다.

시뮬레이션 상의 로봇의 좌표는 이렇게 계산된 모터의 속도를 (10)과 같이 다시 로봇의 속도와 각속도로 변환하고, 여기에 시간상수를 곱한 값을 이용하여 로봇의 좌표를 이동시킨다. 로봇과 로봇이 부딪히거나 벽에 부딪혔을 경우에는 좌표를 이동시키지 않는다.

$$v = \frac{v_R + v_L}{2}$$

$$\omega = \frac{v_R - v_L}{2R_{bot}} \quad (10)$$

각 로봇은 원형의 몸체를 가지며, 로봇은 목표물이 몸체에 목표물이 닿아야 목표물을 인식하고 획득할 수 있다. 각 로봇은 자신과 다른 로봇의 절대좌표는 알 수 없으며, 다른 로봇에의 상대거리와 방향만 알 수 있다. 또한 로봇 간 상호작용할 수 있는 거리는 일정한 한계를 가진다.

시뮬레이션은 작업환경 상에 존재하는 목표물의 98%가 획득될 때까지의 작업시간을 측정하여 시스템의 성능을 평가하였다. 여기서 작업시간 단위 1은 로봇의 바퀴가 거리 1.0을 움직일 수 있는 시간을 말한다.

작업환경은 정사각의 형태를 사용하였고, 작업환경의 상하 좌우는 벽으로 막혀있는 것으로 설정했다. 탐색 목표물은 크기 1의 점으로 표현하였다. 시뮬레이션에서는 작업환경 상에 놓여질 목표물 그룹의 수와 각 그룹의 크기, 전체 목표물의 수를 설정할 수 있으며, 이를 이용하여 환경의 다양성을 표현하였다.

그림 5는 제작된 시뮬레이션 프로그램의 인터페이스이다. 인터페이스에서는 로봇의 수, 통신거리, 목표물 그룹의 수와

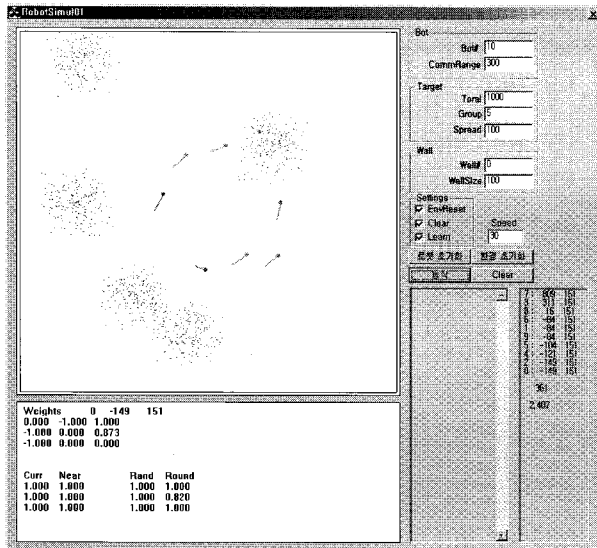


그림 5. 시뮬레이션 프로그램 인터페이스.
Fig. 5. User interface of the simulation program.

크기, 총 목표물의 수, 장애물의 수, 학습여부, 그래픽 표현 간격 등을 조절할 수 있다. 본 논문의 실험에 사용된 작업환경은 1000.0x1000.0의 크기를 가지며, 각 로봇은 지름 10.0의 크기와 300.0의 상호작용 범위를 가지게 하였다.

2. 상호작용 성능 검증

제한한 군집로봇 시스템의 상호작용 전략의 효율성을 검증하기 위하여, 제안한 상호작용을 하는 군집로봇 시스템과 상호작용하지 않고 자가생성 벡터만으로 움직이는 복수의 단일로봇 시스템, 이상적인 시스템의 작업시간을 비교하였다. 상호작용의 효율성을 검증하기 위하여, 진화연산 알고리즘은 동작시키지 않고 모든 유전자 값은 1.0으로 두고 동작하였다.

그림 6은 N대의 로봇이 사각형의 공간을 완전히 탐색하는 이상적인 동작 방법을 표현한 것이다. 목표물의 위치는 알 수 없으므로, 로봇은 모든 공간을 탐색해야 하며 각 로봇은 작업공간의 1/N의 면적을 탐색하게 된다. 식 (11)의 T_{ideal} 은 사각형의 작업환경에서 지름이 R_{bot} 인 N대의 원형의 로봇이 작업환경의 모든 좌표를 지나가는 데 걸리는 시간을 계산한 것이다. 이는 실질적으로 로봇이 동작할 수 있는 물리적 한

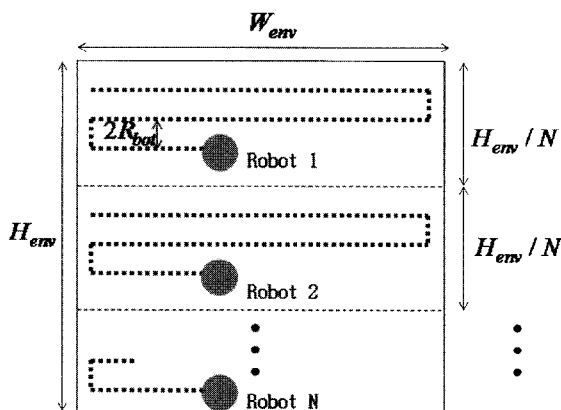


그림 6. N대 로봇의 이상적인 작업시간의 개념.
Fig. 6. Concept of the ideally-controlled working time by N robots.

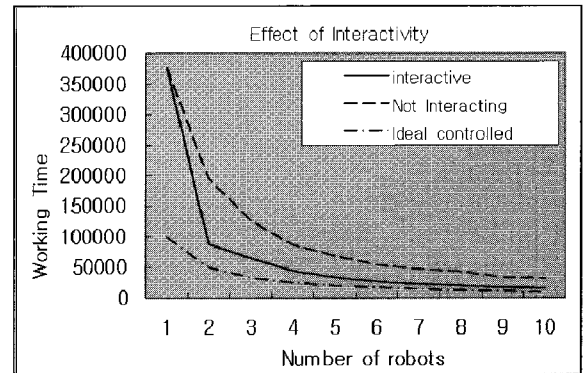


그림 7. 상호작용 검증 실험 결과.
Fig. 7. The effect of the interactivity.

계와 같다. 이상적인 동작을 하기 위해서는 로봇이 자신과 작업공간의 크기와 모양, 자신의 위치에 대한 정보를 정확히 갖고 있어야 한다.

$$T_{ideal} = \frac{W_{env} H_{env}}{2NR_{bot}} \tag{11}$$

목표물 그룹의 수는 5, 목표물 그룹의 크기는 200으로 두었다. 로봇 1대에서 10대까지 수를 늘려가며 각 시스템의 성능을 비교했으며, 결과는 각 설정에서의 성능평가를 100회 반복한 평균이다. 그림 7은 상호작용 성능 실험의 결과를 보여준다.

실험의 결과, 2대 이상의 로봇을 사용하였을 때 제안한 군집로봇 상호작용 시스템은 상호작용하지 않는 복수의 단일로봇 시스템을 이용하는 것보다 평균적으로 51.7% 더 빠르게 작업환경 상의 목표물을 획득하였다. 이는 73.1% 더 이상적인 작업시간에 가까운 결과이다. 이는 제안한 상호작용 방법을 이용한 로봇군집이 상호작용하지 않는 로봇군집에 비하여 효율적인 동작을 함을 보여준다.

3. 환경적응 성능 검증

제한한 군집로봇의 상호작용 최적화 알고리즘을 검증하기 위하여, 서로 다른 환경에서 상호작용하지 않는 로봇군집, 고정된 상호작용 로봇군집, 진화적 상호작용 로봇군집의 성능을 비교하였다. 상호작용하지 않는 로봇군집은 개별운동 벡터만으로 동작하며, 고정된 상호작용 로봇군집은 군집운동 벡터도 포함하지만 모든 유전자 값이 1.0으로 고정된다. 진화적 상호작용 로봇군집은 유전자의 초기값은 상호작용하지 않는 로봇군집과 같다. 로봇의 수는 10대로 두었다.

실험은 종류의 환경에서의 작업시간을 측정하여 환경에 대한 적응력을 평가하였다. 환경1은 1개의 목표물 그룹과 1000.0의 목표물 그룹 크기를 가진다. 환경2는 5개의 목표물 그룹과 200.0의 목표물 그룹 크기를 가진다. 환경3은 10개의 목표물 그룹과 100.0의 목표물 크기를 가진다. 사용된 환경들의 예는 그림 8-10과 같다.

실험의 결과는 30개의 작업환경에 대하여 연속적으로 군집로봇이 목표물 수집 임무를 수행하는 데 걸린 작업시간을 100번의 실험에 대한 앙상블평균으로 표현하였다. 그림 11-13은 각각 환경1, 환경2, 환경3에서의 군집로봇의 작업시간이다.

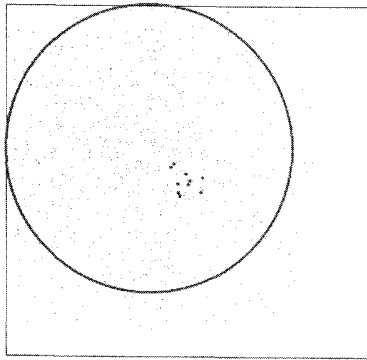


그림 8. 환경1의 예.
Fig. 8. Samples of environment 1.

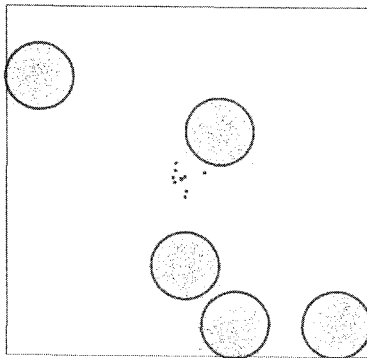


그림 9. 환경2의 예.
Fig. 9. Samples of environment 2.

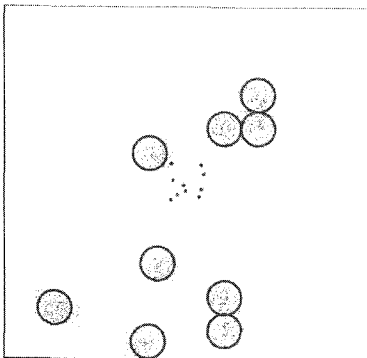


그림 10. 환경3의 예.
Fig. 10. Samples of environment 3.

실험 결과, 상호작용 하지 않는 로봇군집은 모든 환경에서 다른 두 로봇군집보다 성능이 크게 떨어졌고, 진화적 상호작용을 하는 로봇군집의 성능은 대략 3회 이상의 환경에 대한 동작을 통하면 안정되었다. 성능이 안정된 3회에서 30회까지의 동작 성능의 평균을 비교해보면, 진화적 상호작용을 하는 로봇군집은 고정된 상호작용을 하는 로봇군집에 비하여 환경1에서 94.5%, 환경2에서 111.9%, 환경3에서 145.7%의 동작 효율을 보였다. 환경1의 경우는 고정된 상호작용을 하는 로봇군집이 좋은 성능을 보이지만 환경2와 환경3의 경우 지나친 상호작용이 군집로봇 시스템의 성능을 저해하고 있다. 하지만 진화적 상호작용을 하는 로봇군집은 환경에 적응된 적당한 상호작용을 하여 최적화된 성능을 보인다. 이는 제안한

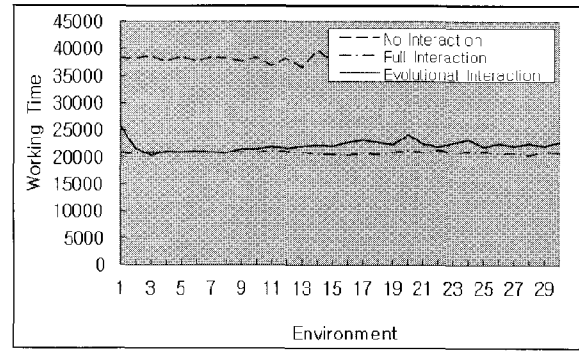


그림 11. 환경1 환경적응 실험 결과.
Fig. 11. Result of environment adaptation in environment 1.

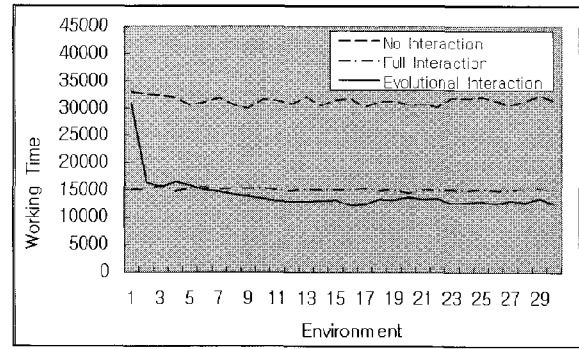


그림 12. 환경2 환경적응 실험 결과.
Fig. 12. Result of environment adaptation in environment 2.

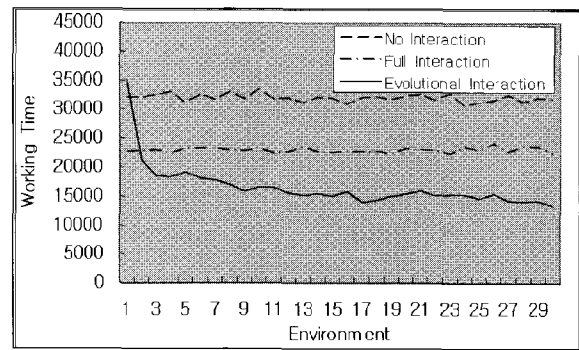


그림 13. 환경3 환경적응 실험 결과.
Fig. 13. Result of environment adaptation in environment 3.

시스템의 군집로봇이 서로 다른 환경에서 별도의 프로그램 수정 없이 환경에 적응하여 효율적인 동작을 이끌어낼 수 있음을 말한다.

V. 결론

본 논문에서는 군집로봇 시스템에서 로봇과 로봇 사이의 상호작용의 방법을 제시하였고, 이를 진화연산 프로그래밍을 통하여 환경에 최적화시켰다. 이는 생물의 환경적응을 모방한 것으로 군집 내의 로봇들이 얼마나 상호협력적일 것인가, 혹은 개별적일 것인가를 환경에 대해 최적화하는 것이다.

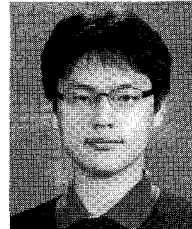
제안한 알고리즘의 성능은 로봇이 서로 다른 패턴으로 작업환경에 흩어진 목표물을 수집하는 응용의 경우를 가정하고 시뮬레이션으로 성능을 검증하였다. 실험결과는 제안한 군집로봇 시스템이 목표물의 분포상태에 따라 환경에 적응

하여 최적화 할 수 있다는 것을 보여준다. 이는 환경에 대한 인식능력이 없는 단일 로봇 여러 대가 상호작용과 진화연산을 통하여 환경에 적응하는 창발성을 가짐을 말한다.

검증 과정에서 가정된 목표물은 응용분야에 따라 청소로봇의 경우 쓰레기나 먼지, 자원탐사 로봇의 경우 자원, 구급 로봇의 경우 재해 후 생존자, 화재진압의 로봇의 경우 화염이나 발화물질, 군사로봇의 경우 지뢰나 적군 병력 등으로 다양하게 적용할 수 있다.

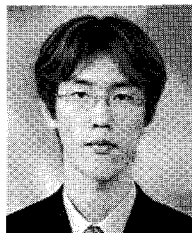
참고문헌

- [1] Y. Rekleitis and G. Dudek, "Multi-robot collaboration for robust exploration," *Proc. of IEEE International Conference in Robotics and Automation*, CA, 2000.
- [2] J. McLurkin and J. Smith, "Distributed algorithms for dispersion in indoor environments using a swarm of autonomous mobile robots," *Proc. of the 7th International Symposium on Distributed Autonomous Robotic Systems*, 2004.
- [3] D. Payton, M. Daily, R. Estowski, M. Howard, and C. Lee, Pheromone Robotics, *Autonomous Robots*, Springer, 2001.
- [4] M. J. Mataric, "Designing Emergent Behaviors: From Local Interactions to Collective Intelligence," *Proc. of 2nd International Conference on Simulation of Adaptive Behavior*, pp. 432-441, 1993.
- [5] C. R. Kube and H. Zhang, "Collective robotic intelligence," *Proc. of 2nd International Conference on Simulation of Adaptive Behavior*, pp. 460-468, 1993.
- [6] H. Bloom, *Global Brain*, Baror International Inc, New York, 2000.
- [7] S. Johnson, *Emergence*, Simon & Schuster Inc, 2001.
- [8] E. P. Greenberg, "Bacterial communication and group behavior," *The Journal of Clinical Investigation*, vol. 112, pp. 1288-1290, 2003.
- [9] R. A. Watson, S. G. Ficici, and J. B. Pollack, "Embodied Evolution: Embodying an Evolutionary Algorithm in a Population of Robots," *Proc. of Conference on Evolutionary Computation*, vol. 1, pp. 342-353, 1999.
- [10] D. W. Lee and K. B. Sim, "Behavior learning and evolution of collective autonomous mobile robots using distributed genetic algorithms," *Proc. of the 2nd Asian Control Conference*, vol. 2, pp. 675-678, 1997.
- [11] Z., Michalewicz, *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs*, 2nd extended edition, Springer-Verlag, 1994.
- [12] S. Levy, *Artificial Life*, Sterling Loard Literistic Inc, New York, 1992.



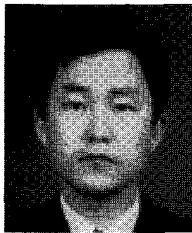
문우성

2007년 부산대학교 전자전기정보컴퓨터공학부(공학사). 2009년 부산대학교 전자전기공학과(공학석사). 2009년~현재 부산대학교 전자전기공학과 박사과정 재학중.



장진원

2005년 부산대학교 전자전기정보컴퓨터공학부(공학사). 2007년 부산대학교 전자전기공학과(공학석사). 2007년~현재 부산대학교 전자전기공학과 박사과정 재학중.



백광렬

1984년 부산대학교 전기기계공학과(공학사). 1986년 KAIST 전기 및 전자공학과(공학석사). 1989년 KAIST 전기 및 전자공학과(공학박사). 1994년~현재 부산대학교 전자공학과 교수.