

## 지역적 통신과 인공면역계에 기반한 군집 로봇의 협조 전략과 군 행동

### Group Behavior and Cooperative Strategies of Swarm Robot Based on Local Communication and Artificial Immune System

심귀보\* · 이동욱\*\*

Kwee-Bo Sim and Dong-Wook Lee

\* 중앙대학교 전자전기공학부

\*\* 한국생산기술연구원 로봇기술본부

#### 요 약

군집 로봇시스템에서 협조 행동을 위기 위해서는 로봇의 센싱과 통신 기능은 필수적이다. 일반적으로 대역적 통신 시스템에서는 로봇의 대수가 증가하면 통신 자원의 제한과 정보의 범람이 발생한다. 따라서 이 경우 지역적 통신방법이 유리하다. 따라서 본 논문에서는 지역적 통신에 의한 정보의 전파 해석을 통하여 최적의 통신 반경을 결정하는 방법을 제안하고, 이를 이용하여 인공면역계에 기반한 군집 로봇시스템의 협조 전략과 군 행동 알고리즘을 제안한다.

#### Abstract

It is essential for robot to have the sensing and communication abilities in the swarm robot system. In general, as the number of robot goes on increasing, the limitation of communication capacity and information overflow occur in global communication system. Therefore a local communication is more effective than global one. In this paper, we propose the novel method for determining the optimal communication radius through the analyzing of the information propagation based on local communication. And we also propose a method of cooperative strategies and group behavior of swarm robot based on artificial immune system.

**Key words** : local communication, artificial immune system, swarm robot, group behavior, cooperative strategy

#### 1. 서 론

여러 대의 자율이동로봇으로 구성된 군집 로봇시스템에서 합목적적인 협조 작업을 수행하려고 하는 경우 로봇간의 통신이 반드시 필요하다[1]-[7]. 만약 통신을 사용하지 않고 고도한 협조행동을 실현하기 위해서는 상대의 행동을 미리 알아차리는 추론기능이 필요하게 될 것이다. 이는 개체의 복잡성을 한층 더 가중시키며 유용한 정보를 다른 로봇에게 전달하지 못하여 작업효율도 떨어뜨린다. 또한 군집 로봇시스템에서 로봇간의 협조 작업 이외에도 학습된 정보를 교환하여 진화하는 방법[5] 및 군 행동 조절을 위한 의견 조정 방법[6], 창발 행동(emergent behavior)의 실현[7] 등을 하기 위하여 로봇이 통신을 이용하는 것은 필수적이다.

한편 지금까지의 자율이동로봇의 통신에 관한 연구는 사용하는 통신수단에 따라 크게 전역적 통신과 지역적 통신으로 나눌 수 있다. 전역적 통신은 주로 광역성이 있는 매체를 이용하여 대상으로 하는 로봇의 수가 적은 경우에 유리하다.

그러나 군집 로봇과 같이 대상으로 하는 로봇의 개수가 증가하면 통신 능력의 제한이나 로봇 상호간의 간섭, 코스트의 증가 등의 문제가 발생하여 모든 로봇이 서로 통신하는 것이 곤란하며 이 경우에는 후자인 지역적 통신이 유리하다[3][4].

군집 로봇시스템에서는 사실상 모든 로봇의 정보를 알 필요가 없으며 주변에 있는 로봇의 정보와 자신이 처한 주변의 상황만 인식하여 행동하면 된다. 따라서 지역적 통신방법을 사용함으로써 불필요한 정보의 범람을 막을 수 있으며 정보의 간섭현상도 생기지 않는다. 지역적 통신을 하는 자율이동로봇이 다수 존재하는 시스템에서는 정보가 순간적으로 광범위하게 전달되지 않는다. 따라서 지역적 통신만이 이용되는 시스템에서 효율적인 협조 행동의 실행은 작업에 필요한 로봇이 한곳에 모이는 시간, 작업에 따라서 정보를 전파하는 범위, 주위 환경에 관한 정보의 전달방법 등이 매우 중요하다. 이를 위해서는 지역적 통신에 의한 정보전달과정에 대한 해석이 필요하다. 또한 대역적 통신에서는 문제가 되지 않았던 상대로봇의 이동에 의한 환경의 동적인 변화도 고려하지 않으면 안 된다.

본 저자들은 자율이동로봇의 협조행동을 위한 지역적 통신시스템을 개발하였으며, 군 전체로 정보를 전파하는 메커니즘을 모델링하여 최적의 통신 파라미터를 찾았다[3]. 본 논문에서는 정보를 군 전체로 전달하는 과정에 대한 모델링뿐만 아니라 서로 다른 여러 개의 작업이 존재하는 시스템에서 각 작업을 발견한 로봇이 주변의 로봇에게 정보를 전달하고 작업을 수행하는 시스템에 대하여 정보 전파 해석을 통하여

접수일자 : 2006년 1월 9일

완료일자 : 2006년 2월 3일

본 연구는 과학기술부의 뇌신경정보학연구사업의 '뇌정보처리에 기반한 감각정보 융합 및 인간행위 모델 개발'의 연구비 지원으로 수행되었습니다. 연구비 지원에 감사드립니다.

최적의 통신반경을 구하기 위한 방법을 제시하고, 동적인 환경에서 군집 로봇의 행동 전략을 결정하기 위하여 군의 의견 조정을 위한 군 면역 알고리즘을 제안하고, 실험을 통하여 그 유효성을 검증한다.

## 2. 지역적 통신의 정보전파 해석

다수의 자율이동로봇으로 구성된 군집 로봇시스템에서 지역적 통신은 적외선 통신에 의해 쉽게 구현 될 수 있다. 적외선 매체를 이용한 통신은 직접 대면하는 로봇과 정보를 교환함으로써 지역적 통신을 실현하며, 정보전달이 용이하고 구현하기가 쉬운 장점을 가지고 있다. 또한 송수신부의 각도를 조절하거나 적외선의 강도를 조절함으로써 통신반경을 조절할 수 있다. 이 방법은 적외선이 직진하는 성질을 이용하기 때문에 모든 방향의 로봇과 통신을 하기 위해서는 최소 8개 이상의 적외선 센서를 전 방향으로 설치하게 된다. 한편, 지역적 통신에서의 통신모델로는 주변의 로봇에게 일방적으로 자신의 정보를 전달하는 사인보드 모델(sign board model)과 특정한 로봇이 협조를 위해 서로 의견을 주고받기 위한 정보전달 모델(message passing model)이 제안되어 있다. 이들 모델은 함께 사용함으로써 정보를 전달하거나 팀을 구성하는 등의 협조행동을 수행한다[3].

본 장에서는 지역적 통신을 하는 군집 로봇시스템에서 최적의 통신 파라미터를 결정하기 위하여 정보를 군 전체로 전파하는 경우와 작업을 발견한 로봇이 주변의 로봇에게 정보를 전파하고 작업을 수행하는 경우에 대하여 정보전파를 모델링한다. 2.1절에서는 획득한 정보를 군 전체로 전파하는 경우의 정보전파 방정식을 소개하며, 2.2절에서는 이 방정식을 토대로 작업을 수행하고 정보를 소실할 경우에 대하여 정보전파를 모델링한다.

### 2.1 정보 전파 방정식

면적  $S[m^2]$ 의 작업공간에 통신반경이  $R_c$ 인  $n$ 대의 로봇이 존재하고  $w$ 개의 사건 또는 작업이 있을 경우, 이 정보를 획득한 로봇의 비율( $r(t)$ )의 변화는 로봇의 이동속도( $v$ ), 정보를 가지고 있지 않은 로봇의 비율( $1-r(t)$ )에 비례한다. 따라서 정보를 획득한 로봇의 비율의 순간 변화량은 (1)식과 같이 나타낼 수 있다[1].

$$\frac{dr(t)}{dt} = av(1-r(t))(E(t)r(t) + I(t)) \quad (1)$$

단,  $a$ 는 비례상수,  $E(t)$ 는 통신범위 내에 정보의 간섭 없이 로봇이 존재할 확률,  $I(t)$ 는 로봇이 작업을 발견할 확률이다. 이때  $E(t)$  및  $I(t)$ 는  $S$ ,  $R_c$ ,  $n$ ,  $w$ 의 함수로서 표현된다([1] 참조).

여기서  $a=avE(t)$ ,  $b=avI(t)$ 라 놓으면 (1)식은 (2)식과 같이 간단히 나타낼 수 있다.

$$\frac{dr(t)}{dt} = (1-r(t))(ar(t) + b) \quad (2)$$

이 식을 지역적 통신의 정보전파 방정식이라 한다.

### 2.2 정보소실을 고려한 정보전파 방정식

지역적 통신방법은 주변의 필요한 로봇에게만 정보를 전달 할 필요가 있을 때 특히 효율적이다. 즉, 시스템 전체에

작업이 골고루 분포하며 작업을 수행하는데 필요한 로봇이 소수 일 때 매우 적합한 통신방법이다. 본 절에서는 이와 같이 작업을 발견한 로봇이 주변의 로봇에게 정보를 전달하고 작업을 수행한 후 정보를 소실하는 시스템을 설정하여 정보전파를 해석한다.

로봇 하나가 하나의 작업을 수행하는 시간의 평균값을  $T$ 라고 할 때  $x$ 대의 로봇이 하나의 작업을 수행하는데 걸리는 시간은  $T/x$ 가 된다. 작업에 대한 정보를 획득한 로봇이 바로 작업을 수행한다고 가정하면, 시각  $t$ 에서 정보를 가진 모든 로봇이 한 개의 작업을 수행하는데 걸리는 시간( $T_1(t)$ )은 (3)식과 같다.

$$T_1(t) = \frac{T}{\text{작업 중인 로봇 수}} = \frac{T}{n \cdot r(t)} \quad (3)$$

역으로,  $t$ 시각에 1초 동안 수행하는 작업량  $Q(t)$ 는 (3)식의 역수로서 (4)식과 같이 표현된다.

$$Q(t) = \frac{n \cdot r(t)}{T} \quad (4)$$

매 시  $Q(t)$ 개의 작업이 끝나고 이에 따라 정보를 소실하는 로봇이 생기는데,  $t$ 시각에 정보를 소실하는 로봇 수( $n_f(t)$ )는 (5)식과 같다.

$$\begin{aligned} n_f(t) &= Q(t) \times (\text{작업 하나 당 일하는 로봇 수}) \\ &= \frac{n \cdot r(t)}{T} \cdot \frac{n \cdot r(t)}{w} = \frac{n^2 r^2(t)}{T \cdot w} \end{aligned} \quad (5)$$

따라서 단위시간동안 정보를 소실하는 로봇의 비율  $r_f(t)$ 는  $n_f(t)$ 를 전체의 로봇 개수로 나눈 값으로서 (6)식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} r_f(t) &= n_f(t) \cdot \frac{1}{n} \\ &= \frac{n^2 r^2(t)}{T \cdot w} \cdot \frac{1}{n} = \frac{n}{T \cdot w} r^2(t) \end{aligned} \quad (6)$$

결국, 정보의 소실을 고려한 정보전파 방정식은 (2)식에  $r_f(t)$ 의 항을 추가한 형태로 (7)식과 같다.

$$\frac{dr(t)}{dt} = (1-r(t))(ar(t) + b) - r_f(t) \quad (7)$$

(6)식을 (7)식에 대입하여 정리하면 (8)식을 얻을 수 있다.

$$\frac{dr(t)}{dt} = -(a+c)r^2(t) + (a-b)r(t) + b \quad (8)$$

단,  $c = \frac{n}{T \cdot w}$  이다.

이상에서 유도한 정보전파 방정식은 정보를 소실하는 로봇을 매시간 확률로서 계산했기 때문에 매시간 연속적으로 정보를 소실하는 로봇이 발생하지만 실제적으로는 한 작업이 끝나면 작업을 하던 로봇이 동시에 정보를 소실한다. 그러나 (8)식은 대략적으로 정보를 가지고 있는 로봇의 비율의 변화를 예측하려고 할 때 유용하며, 로봇과 작업의 수가 많을수록 실제의 값과 거의 같아진다.

### 3. 최적의 통신 반경

본 장에서는 II절에서 구한 정보전파 방정식을 이용해 최적의 통신 파라미터를 구한다. 지역적 통신시스템에서는 정보의 간섭이 발생하기 때문에 ①정보의 간섭을 최소화하고, ②정보전파 효율을 최대로 하며, ③시스템의 변화를 예측할 수 있도록 통신반경을 설정하는 것이 중요하다. 본 논문에서는 이 통신반경을 “최적의 통신반경” 또는 “최적반경”으로 나타낸다.

최적의 통신반경을 구하기 위하여 고정시켜 기준으로 삼아야 하는 양과 이때 최적화시키기 위한 양을 결정해야 한다. 일반적으로 정보전파 시간을 최소화하거나 정보를 획득한 로봇의 비율을 최대화하는데 이때 기준으로 삼는 양에 따라 표 1과 같은 3가지 방법으로 나눌 수 있다.

표 1. 최적의 통신반경을 구하기 위한 방법

Table 1. Method for determining the optimal communication radius

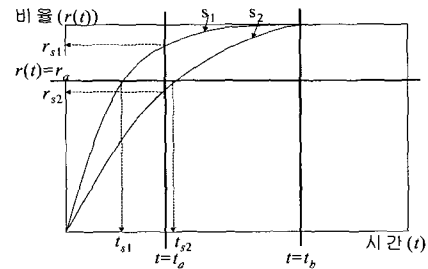
	기준량	측정량	최적화	방법
방법 1	비율	시간	최소화	일정한 비율의 로봇에게 정보를 전달하는 데 걸린 시간을 측정
방법 2	시간	비율	최대화	일정시간 후 정보를 가진 로봇의 비율을 측정
방법 3	작업	시간	최소화	일정량의 작업을 주고 작업수행 시간을 측정

그림 1은 여러 가지 경우에 있어서  $r(t)$ 의 변화 그래프를 나타낸 것이다. 그림 1(a)는 단조증가 하면서 수렴 값이 1이 되는 경우이다. 일반적으로 정보 소실 없이 정보를 전파 할 경우 이와 같은 형태의 그래프가 나타난다. 이때 방법 1과 방법 2에 따라서  $s_1$ 과  $s_2$ 의 성능을 비교해 보자. 방법 1에 의해  $r(t) = r_a$ 를 기준으로 잡으면, 이때까지 걸리는 시간은 각각  $t_{s1}$  및  $t_{s2}$ 로서  $t_{s1} < t_{s2}$ 이므로  $s_1$ 의 성능이 우수함을 알 수 있다. 또한 방법 2에 의해서  $t = t_a$ 를 기준으로 잡으면  $t_a$  시간 동안 정보를 획득한 로봇의 비율은 각각  $r_{s1}, r_{s2}$ 로서  $r_{s1} > r_{s2}$ 이므로 역시  $s_1$ 의 성능이 우수한 것을 알 수 있다. 그러나  $s_2$ 곡선의  $r(t)$ 값이 1이 되는 시간( $t_b$ ) 즉,  $t > t_b$ 인 시간부터는 방법 2를 이용해 성능을 비교할 수 없다. 한편, 그림 1(b)는  $r(t)$ 가 단조증가 하면서 수렴 값이 1보다 작은 경우의 그래프이다. 이와 같은 경우는 정보소실이 발생할 경우에 나타날 수 있는 곡선의 형태이다. 그림 1(a)와 마찬가지로 방법 1과 방법 2에 의해 성능을 비교 할 수 있다. 그러나 방법 1에서  $r(t) > r_{s3}$ 를 기준으로 하면 두 곡선의 성능을 비교할 수 없다. 그림 1(c)는  $r(t)$ 의 수렴 값이 없으며 카오스 행동을 나타낼 때의 그래프이다. 이 경우는 방법 1과 방법 2를 이용해서 비교를 할 수 없다.

이상의 내용을 종합해 보면, 그림 1(a)와 같은 경우는 각 조건에 대하여  $t = t_b$ 인 점을 알 수 없기 때문에 방법 1에 의해 비교를 하는 것이 효과적이다. 또한 그림 1(b)의 경우는  $r(t) = r_{s3}$ 인 점을 알 수 없기 때문에 방법 2를 사용하는 것이 안전하다. 특히 방법 2는 기준시간을 크게 잡으면 작업수행 비율이 안정화된 후의 성능 비교가 가능해진다. 방법 3은 위의 3가지 조건에 모두 적용할 수 있으나 작업을 수행하는

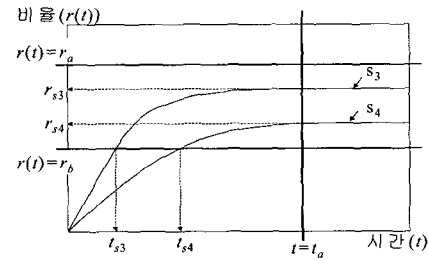
시뮬레이션을 해야 하기 때문에 작업량이 많으면 비교하는 걸리는 시간이 매우 길어진다. 그러나 그림 1(c)와 같이 방 1, 2를 이용할 수 없을 때, 또는 작업 수행능력을 상대적 비교가 아니라 절대적인 값으로 비교하기 위해서는 방법 3 이용하는 것이 좋다.

본 논문에서는 최적의 통신반경을 구하기 위하여 정보 실이 없는 경우에 대하여는 방법 1을 이용하여 일정한 비의 로봇에게 정보를 전파하는 시간을 최소화하는 통신반경 구하고, 정보소실이 있는 경우에는 방법 2와 방법 3을 이용하여 최적의 통신 반경을 구한다.



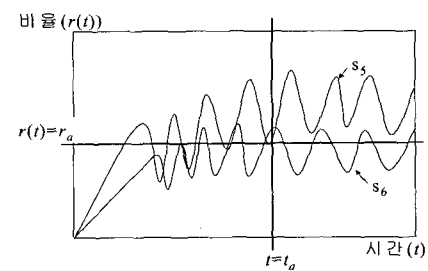
(a) 단조증가,  $\lim_{t \rightarrow \infty} r(t) = 1$

(a) Monotone increasing,  $\lim_{t \rightarrow \infty} r(t) = 1$



(b) 단조증가,  $\lim_{t \rightarrow \infty} r(t) = \text{constant} < 1$

(a) Monotone increasing,  $\lim_{t \rightarrow \infty} r(t) = \text{constant} < 1$



(c) 카오스 행동,  $\lim_{t \rightarrow \infty} r(t)$  : 시변

(c) Chaos behavior,  $\lim_{t \rightarrow \infty} r(t)$  : time varying

그림 1. 여러 가지 패턴의  $r(t)$  곡선

Fig. 1.  $r(t)$  curve of the various pattern

### 4. 인공지능 기반의 군 행동 알고리즘

제한한 방법을 시험하기 위한 시스템을 모든 로봇이 환경 내에 흩어져 있는 작업을 찾아서 수행하는 것으로 하였다

이 작업은 환경의 조건에 따라 해야 할 행동양식이 다르며 비교적 단순하고, 군 행동을 실현할 수 있는 좋은 예제이기 때문이다. 제안한 면역알고리즘에 의하여 우세한 전략이 (strong strategy) 군 전략으로써 선택된다. 즉, 모든 로봇이 우세한 전략을 택하게 되면, 이때 군행동이 나타날 수 있다. 또한 환경이 변화했을 때 모든 로봇은 조정과정을 거쳐 환경에 맞는 적절한 전략으로 바꾸어 나간다. 이 알고리즘은 면역 시스템의 클론 선택과 면역네트워크 가설에 바탕을 둔 것이다.

#### 4.1 항원-항체의 면역 네트워크 모델

면역학자인 Jerne[8]는 항원과 항체(B-세포) 그리고 항체 상호간의 자극 및 억제 관계에 의한 면역 네트워크 가설 (immune network hypothesis)을 제안하였다. 이 모델에서 항체는 항원뿐만 아니라 다른 항체와의 상호작용을 통해 그 농도가 변한다. Farmer[9]는 Jerne의 가설에 대한 동적 방정식을 제안하였다. 본 논문에서는 Farmer가 제안한 동적방정식에서 시스템의 적응 능력을 개선하기 위하여 보조(helper) 및 억제(suppressor) T-세포의 모델이 추가된 면역 네트워크 방정식을 제안한다. 식 (9)~(11)는 면역 시스템의 항원, B-세포(항체), T-세포의 관계를 모델화 한 보안된 면역 네트워크 방정식이다.

$$S_i(t+1) = S_i(t) + \left( \alpha \frac{\sum_{j=1}^N (m_{ij} - m_{ji}) s_j(t)}{N} + \beta g_i(t) - c_i(t) - k_i s_i(t) \right) \quad (9)$$

$$s_i(t) = \frac{1}{1 + \exp(0.5 - S_i(t))} \quad (10)$$

$$c_i(t) = \eta(1 - g_i(t))S_i(t) \quad (11)$$

단,  $i = 0, \dots, N-1$ ;  $N$ 은 항체 종류의 수,  $S_i(t)$ 는 항체  $i$ 의 자극값,  $s_i(t)$ 는 항체  $i$ 의 농도,  $s_j(t)$ 는 항체  $j$ 의 농도,  $c_i(t)$ 는 항체  $i$ 의 농도를 조절하는 보조 및 억제 T-세포의 농도,  $m_{ij}$  및  $m_{ji}$ 는 항체  $i$ 와 항체  $j$ 의 상호 자극 계수(친화성),  $g_i(t)$ 는 항체  $i$ 에 대한 항원의 자극값(친화성),  $\alpha, \beta, \eta$ 는 상수이다.

(11)식에서 T-세포의 농도  $c_i(t)$ 는 항원의 자극값( $g_i(t)$ )이 크고 항체의 자극값( $S_i(t)$ )이 작은 경우 값이 작아지기 때문에 결국 (9)식에서 보조 T-세포(B-세포 자극)의 역할을 하고 반대로 항원의 자극값이 작고 항체의 자극값이 클 경우 값이 커져서 억제 T-세포(B-세포 억제)의 역할을 담당한다. 실제로 면역 시스템에서 T-세포는 항원의 침투 초기에 B-세포를 활성화하는데 도움을 주고(보조 T-세포) 항원이 퇴치되었을 때 더 이상 B-세포가 증식하는 것을 억제(억제 T-세포)해 시스템의 원상복귀를 빠르게 한다. 즉, 항체의 자극 활성화 값(자극값)과 항원의 반응향에 의하여 주 역할을 하는 T-세포가 결정된다.

#### 4.2 항원(antigen)과 항체(antibody)의 정의

항원은 작업의 분포에 따라서 작업의 밀도를 다음의 4단

계로 나눌 수 있다. 각각은 작업의 밀도가 ①높다, ②중간, ③낮다, ④없다 가 된다. 이러한 각각의 환경에 대하여 로봇은 다음과 같은 몇 개의 전략으로 대응할 수 있을 것이다. 군집 로봇시스템에서는 그 전략은 집합(Aggregation), 탐색(Random search), 확산(Dispersion), 귀향(Homing)에 대응될 있다. 따라서 이들 4단계의 각 환경을 항원으로 간주하고 이에 대한 전략은 항체로 간주한다.

반면 본 논문에서는 항체는 위에서 정의한 주변 환경(항원)에 대하여 다음의 4가지 대응 전략(항체)을 사용하였다. 각 전략의 의미는 다음과 같다.

- 집합(Aggregation: Ab0) : 집단의 개체들이 정해진 거리를 유지하면서 모인다.
- 탐색(Random Search: Ab1 - basic strategy) : 임의의 방향으로 움직이며 작업을 찾는다.
- 확산(Dispersion: Ab2) : 집단의 개체들이 정해진 거리를 설정하고 유지하기 위하여 퍼진다.
- 귀향(Homing: Ab3) : 특정한 지역이나 위치를 찾아간다.

#### 4.3 군의 의사결정 알고리즘

로봇은 시스템 내에서 주어진 작업을 수행할 때 주변의 지역적인 정보에 의하여 자신의 행동을 결정해야만 한다. 이때 그 로봇은 시스템 전체의 모든 정보를 알 수 없기 때문에 시스템 단위의 이동이나 정렬 등의 군 행동을 실현하기 어렵다. 본 논문에서는 면역 반응의 아이디어를 군집 로봇시스템의 군 전략의 조정에 적용하는 것이다.

일단 하나의 로봇이 주변 환경의 인식을 통하여 적당한 행동 전략을 결정했다면, 이 전략은 다른 로봇과 만났을 경우 서로간의 관계에 의하여 자극 또는 억제를 받는다. 이 과정은 자율이동로봇의 지역적 통신시스템에 의하여 구현될 수 있다[2]. 한 로봇이 다른 로봇과 마주쳤을 경우, 같거나 유사한 전략은 상호 자극을 받으며 상이한 전략과는 서로 억제를 받는다. 이때 많은 자극을 받은 로봇은 자신의 행동을 시스템에 적당한 것으로 간주하여 다른 로봇을 만났을 때 전략을 전달해 줄 수 있다. 이러한 과정에 의하여 군의 전략이 통일되게 결정된다. 표 2는 면역 시스템의 요소와 군집 로봇시스템의 각 요소들을 대응시킨 표이다.

표 2. 군집 로봇시스템과 면역시스템의 관계  
Table 2. Relationship between swarm robot system and immune system

군집 로봇시스템	면역시스템
로봇의 주변 환경	항원
행동 전략	항체(B-세포)
제어 변수	T-세포
적합	자극
부적합	억제
우수한 로봇	혈장세포(클론)
열등한 로봇	비 활성화된 세포

로봇의 의견을 조정하기 위한 로봇의 알고리즘은 다음과 같다.

#### ■ 군의 의사결정 알고리즘

[단계 1] 모든 행동 전략에 대한 항체의 자극 값 및 농도를 초기화한다.

$$t=1$$

$$S_i(0) = s_i(0) = 0.5$$

단,  $i = 0, \dots, N-1$ ;  $N$ 은 행동 전략의 개수이다.

[단계 2] 다른 항체에 비하여 농도가 높은 항체의 전략을 선택해서 실행한다. 단, 초기에는 기본 전략(Ab1)을 선택한다.

[단계 3] 한 로봇이 다른 로봇을 만났을 때, 그들은 통신을 하여 서로의 행동 전략에 대하여 자극 또는 억제한다. 이때 상대 로봇으로부터 항체의 농도 값을 전달받아 (12)식과 (10), (11)식을 이용하여 자신의 항체의 자극값( $S_i$ ) 및 농도( $s_i$ ), 그리고 T-세포의 농도( $c_i$ )를 계산한다. (9)식의 자극 값의 갱신식은 ( $m_{ij} - m_{ji}$ )를 하나의 항 즉,  $m_{ij}$ 로 바꾸어 표현하면 (12)식과 같이 나타낼 수 있다.

$$S_i(t) = S_i(t-1) + \left( \alpha \frac{\sum_{j=0}^{N-1} m_{ij} s_j(t-1)}{N} + \beta g_i(t-1) - c_i(t-1) - k_i s_i(t-1) \right) \quad (12)$$

단,  $i=0, \dots, N-1$ ;  $s_j$ 는 다른 로봇의 항체의 농도,  $m_{ij}$ 는 항체  $i$ 와  $j$ 의 상호 자극 계수  $\alpha$ ,  $\beta$ 는 다른 로봇과 환경(항원)의 반응을 나타내는 파라미터이다.

[단계 4] 만약 한 로봇의 항체의 가장 높은 농도가 상한치( $\bar{\tau}$ )를 넘으면 이 로봇은 우수한 로봇이 된다.

만약 한 로봇의 모든 항체의 농도가 하한치( $\underline{\tau}$ )보다 작으면 이 로봇은 열등한 로봇이 된다.

$$\bar{\tau}(\text{upper threshold}) = \frac{1}{1 + e^{-0.5}} \quad (13)$$

$$\underline{\tau}(\text{lower threshold}) = \frac{1}{1 + e^{0.5}} \quad (14)$$

[단계 5] 만약 열등한 로봇이 우수한 로봇을 만나면 각 전략의 농도 값을 전달받아 새롭게 갱신한다. 이것은 B-세포의 클론 선택을 모방한 것이다.

[단계 6]  $t$ 를 증가시키고 단계 2로 간다.

위의 군 면역 알고리즘은 면역 시스템의 3가지 부분을 모델링한 것이다. 즉, 이것은 클론 선택(clonal selection), 면역 네트워크(immune network), T-세포(T-cell)의 기능이다.

- (1) B-세포의 클론선택: 우수한 로봇은 자신의 전략을 다른 로봇에게 전달해 준다.
- (2) B-세포의 면역 네트워크: 로봇은 통신을 통하여 다른 로봇의 행동 전략과 비교를 함으로써 자신의 행동 전략에 자극 또는 억제를 받는다.
- (3) 보조 T-세포 및 억제 T-세포: 보조 T-세포는 항원이 침투했을 때(환경 변화) B-세포의 기능을 도와주며 억제 T-세포는 항원이 제거되었을 때 항체의 농도를 초기 상태로 회복시킴으로써 다시 새로운 항원이 침투했을 때 적응속도를 향상시킨다.

그림 2는 본 논문에서 제안한 면역 네트워크의 개념도이다. 이 그림은 항원과 항체, 항원과 T-세포, 항체 상호간의 상호작용을 보여주고 있다. 각 항원은 주변 물체의 밀도에 따라 그 값이 결정되고 각각의 항원은 그 모양을 인식하는 항체(B-세포) 및 T-세포와 반응한다. 또한 항체의 농도는 다른 로봇으로부터 받은 항체의 농도와 면역 네트워크의 관계에 의해 자극 및 억제를 받음으로써 증가하거나 감소한다.

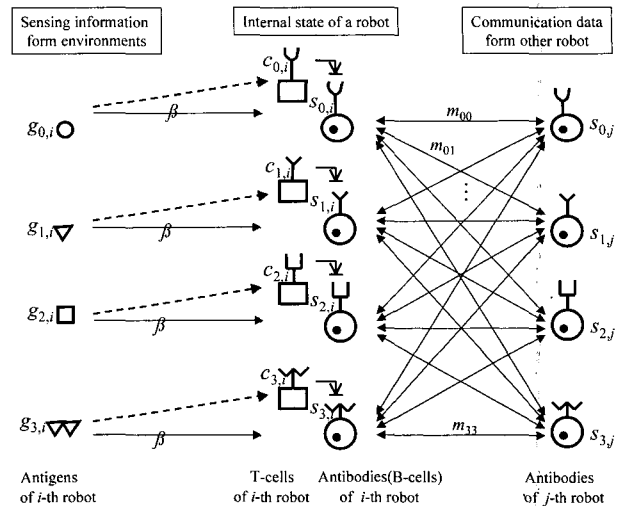


그림 2. T와 B 세포 모델을 포함한 면역 네트워크 모델  
Fig. 2. Proposed immune network model including the T and B cell model

## 5. 실험 결과

본 논문에서 제안한 B-세포, T-세포 및 클론 선택을 모델링 한 군 행동 알고리즘을 평가하기 위하여 ①작업의 공급 없이 주어진 작업을 수행하는 경우와 ②중간에 작업을 제공해 주는 경우를 가정하여 실험을 수행하였다. 각각의 경우에 대해서 B-세포 모델만을 이용하였을 경우(참고문헌 [6])와 B-세포 및 T-세포 모델을 이용하였을 경우에 대하여 비교 실험을 수행하였다. 이때 두 경우 모두 클론 복제 메커니즘을 병행하여 사용하였다. 제안된 알고리즘을 군집 로봇 시스템에 적용하기 위한 실험 조건은 다음과 같다.

10[m]×10[m]의 작업공간에 직경이 80[mm]인 50대의 로봇이 흩어져 있으며, 시스템의 목적은 작업영역에 흩어져 있는 500개의 작업을 찾아 수행하는 것이다. 작업의 밀도를 계산하기 위한 항원의 평가시간( $T_c$ )을 40 time으로 설정하였다. 이때 로봇은 1 time 동안 방향을 바꾸거나 25mm를 이동할 수 있으며 1회의 통신을 할 수 있다. 작업 하나의 수행 시간은 15 time이다. 그리고 로봇이 Ab0를 선택하였다면 이것은 집합 전략을 택한 것이며, Ab1, Ab2, Ab3은 각각 탐색, 확산, 귀향의 행동 전략을 선택한 것이 된다.

그림 3은 B-세포 모델만 이용했을 때의 실험 결과이다. 100에서 200 time 동안 로봇 주변의 작업의 밀도가 높기 때문에 많은 로봇이 집합 전략(Ab0)을 선택했다. 그러나 시간이 지남에 따라 작업 밀도는 점차로 낮아지지만 로봇들은 여전히 집합 전략을 선택하고 있다. 이 경우에 로봇의 전략은 환경변화를 잘 따라가지 못함을 알 수 있다. 이 결과로부터 B-세포 모델만 이용한 경우는 정적인 환경에서는 매우 효과적이나 환경변화에는 잘 대처하지 못함을 알 수 있다. 실제로 생물학적 면역 시스템에서는 항원이 침투했을 때 보조 T-세포가 B-세포의 활성화를 도와주며, 항원이 제거되면 억제 T-세포가 B-세포의 활성화를 억제한다. 따라서 새로운 변화에 대하여 면역 시스템은 빠르게 대처할 수 있게 된다.

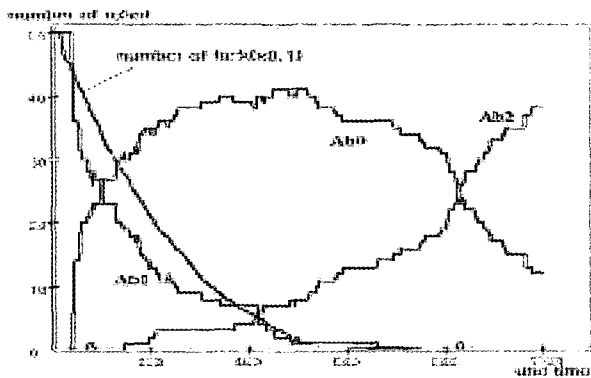


그림 3. 실험결과 1 : B-세포 모델  
Fig. 3. Experimental result 1 : B-cell model.

그림 4는 B-세포와 T-세포 모델을 함께 이용했을 때의 실험 결과이다. 100에서 200 time 동안 첫 번째 경우와 같이 많은 로봇이 집합 전략을 선택한다. 그러나 시간이 지남에 따라 작업의 수는 계속 줄어들고 이에 따라 로봇들의 전략도 탐색(Ab1), 확산(Ab2), 귀향(Ab3)으로 변해 감을 알 수 있다. Time이 대략 700정도일 때 모든 작업이 사라졌고, 로봇의 전략은 대부분 귀향으로 변해가고 있다. 본 실험결과로 T-세포 모델을 첨가함으로써 실제 면역 시스템과 같이 변화하는 환경에서도 적응능력이 뛰어난을 알 수 있다. B-세포 및 T-세포 모델에 기반한 면역 네트워크는 시스템을 통일시켜 주어진 환경에 대한 최적의 군 전략을 선택하도록 하는 역할을 한다. 또한 환경이 변화하면 로봇의 행체의 농도가 초기 상태로 빨리 회복함으로써 환경에 적응하는 시간을 단축시킨다. 따라서 작업의 밀도가 점점 낮아짐에 따라 군 행동은 탐색(Ab1)  $\Rightarrow$  집합(Ab0)  $\Rightarrow$  확산(Ab2)  $\Rightarrow$  귀향(Ab3)의 순서로 나타난다.

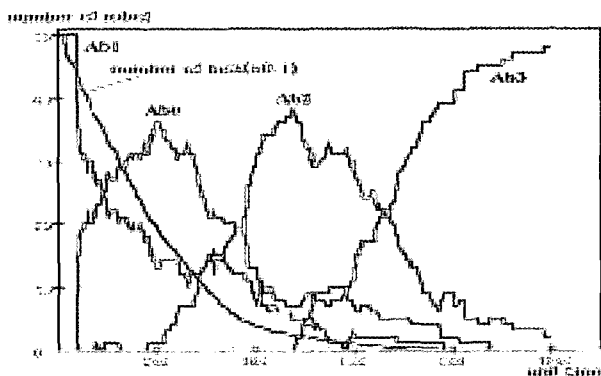


그림 4. 실험결과 2 : B-세포 및 T-세포 모델  
Fig. 4. Experimental result 2 : B-cell and T-cell model

그림 5 및 그림 6은 좀더 환경 변화가 심한 경우의 예로써 일정시간 이후에 작업을 재 공급해주어 작업의 수가 늘어난 경우에 대한 실험결과(실험 3, 4)이다. 그림 5는 B-세포 모델만 사용한 경우로 앞 500 time 동안에는 그림 3의 결과와 같고 작업량이 다시 500으로 늘어났을 경우에는 새로운 환경에 적응하지 못하고 로봇이 행동전략을 거의 바꾸지 못하고 있다. 따라서 물체의 수(밀도)와 상관없이 로봇은 집합 전략만 선택하여 유지하고 있다.

한편 그림 6은 B-세포 모델과 T-세포 모델을 모두 이용

했을 때의 실험결과이다. 작업 밀도에 따라서 로봇들이 선택하는 전략의 순서가 집합(Ab0)  $\Rightarrow$  확산(Ab2)  $\Rightarrow$  집합(Ab0)  $\Rightarrow$  확산(Ab2)의 순서로 바뀌어 감을 알 수 있다.

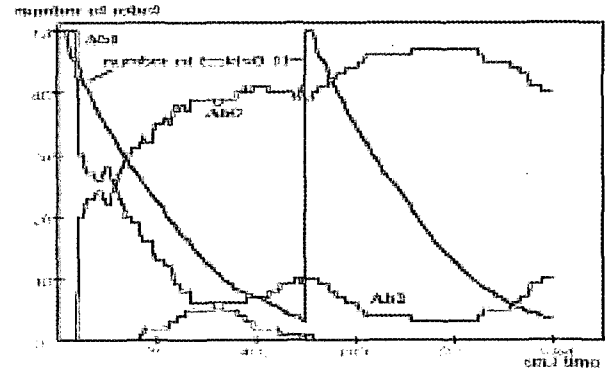


그림 5. 실험결과 3 : B-세포 모델  
Fig. 5. Experimental result 3 : B-cell model

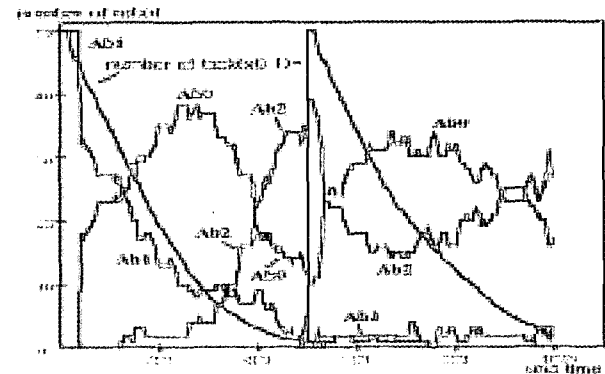


그림 6. 실험결과 4 : B-세포 및 T-세포 모델  
Fig. 6. Experimental result 4 : B-cell and T-cell model

이상의 실험 결과를 통하여 T-세포 모델이 추가된 면역알고리즘이 환경변화에 대한 적응성을 개선해 준다는 것을 알 수 있다. 실제로 시스템의 성능 평가는 수행한 작업의 수로 하는 것이 바람직하지만 본 실험에서 사용한 집합, 탐색, 확산, 귀향의 행동전략은 실제 로봇의 작업 효율에는 큰 기여를 하지 못한다. 그러나 이러한 전략을 채택한 이유는 로봇이 환경의 변화에 따라 행동 전략을 어떻게 바꾸어 나가는지에 대한 판단을 하기 위함이었다. 그러므로 로봇이 수행한 작업의 수는 모든 경우에 있어서 거의 비슷하게 감소하고 있다. 실제의 적용문제에 있어서 로봇의 적응능력이 바로 시스템 성능의 개선으로 나타난다면 제안한 알고리즘은 큰 효과를 거둘 수 있을 것으로 생각된다.

## 6. 결 론

과학기술이 발전함에 따라 로봇의 기술도 점점 발전해 가고 있으며 그 적용분야도 점점 넓어지고 있다. 따라서 앞으로는 다수의 자율로봇을 적용하는 분야가 많이 생겨날 것으로 예상된다. 예를 들면 사람이 접근하기 어려운 넓은 지역(강, 산, 들판, 화산, 해저, 우주, 지하 등)에서 오염물질의 제거, 자원 또는 자료 채취, 지뢰제거 등의 일이 있을 수 있고,

다수의 소형 마이크로 로봇에 의한 오염물질의 정화 등 그 응용분야는 무궁무진하다. 이러한 군집 시스템에서 로봇 집단의 효율적인 의견 조정 및 관리를 위해서는 자율적인 로봇의 판단과 집단 전체의 의견을 조정할 수 있는 알고리즘이 필요하다. 본 논문에서는 이러한 군집 로봇시스템의 목적을 달성하기 위하여 지역적 통신에 의한 정보의 전파 해석을 통하여 최적의 통신 반응을 결정하는 방법과 면역 시스템에 기반한 군 행동 알고리즘을 제안하였다. 제안한 알고리즘은 실험을 통하여 군의 우세한 전략이 시스템의 모든 로봇에 의하여 선택됨으로써 군 행동이 발현될 수 있음을 확인했다.

## 참 고 문 헌

- [1] T. Arai, E. Pagello, and L. E. Parker, "Advances in multirobot systems," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, Vol. 18, No. 5, pp.655 - 661, Oct. 2002.
- [2] F. Mondada, G. C. Pettinaro, A. Guignard, I. W. Kwee, D. Floreano, J. Deneubourg, S. Nolfi, L. M. Gambardella, and M. Dorigo, "Swarm-Bot: A new distributed robotic concept," *Autonomous Robots*, No. 17, pp. 193-221, 2004.
- [3] 이동욱, 심귀보, "자율이동로봇군의 협조행동을 위한 통신시스템의 개발," *대한전자공학회 논문지*, 제34권, S편, 제3호, pp. 33-45, 1997. 3.
- [4] T. R. Balch and R. C. Arkin, "Communication in reactive multiagent robotic systems," *Autonomous Robots*, Vol. 1, No. 1, pp.1 - 25, 1994.
- [5] 이동욱, 심귀보, "강화학습과 분산유전알고리즘을 이용한 자율이동로봇군의 행동학습 및 진화," *대한전자공학회 논문지*, 제34권, S편, 제8호, pp. 56-64, 1997. 8.
- [6] 이동욱, 심귀보, "인공면역계 기반의 자율이동로봇군의 협조행동전략 결정," *대한전자공학회 논문지*, 제35권 S편 제3호, pp. 102-109, 1998. 3.
- [7] H.B. Jun, K.B. Sim, "Emergence of Cooperative Behavior based on Learning and Evolution in Collective Autonomous Mobile Robots," *Journal of Electrical Engineering and Information Science*, vol. 3, 1998.
- [8] N.K. Jerne, "Idiotopic Network and Other Preconceived Ideas," *Immunological Rev.*, vol. 79, pp. 5-24, 1984.
- [9] J.D. Farmer, N.H. Packard, and A.S. Perelson, "The Immune System, Adaptation, and Machine Learning," *Physica 22-D*, pp. 184-204, 1986.

## 저 자 소 개



### 심귀보(Kwee-Bo Sim)

1990년 : The University of Tokyo  
전자공학과 공학박사  
1991년 ~ 현재 : 중앙대학교  
전자전기공학부 교수

[제15권 6호(2005년 12월호) 참조]

2006년 ~ 현재 : 한국퍼지 및 지능시스템학회 회장

E-mail : kbsim@cau.ac.kr



### 이동욱(Dong-Wook Lee)

1996년 : 중앙대학교 제어계측공학과  
공학사  
1998년 : 동 대학원 제어계측공학과  
공학석사  
2000년 : 동 대학원 제어계측공학과  
공학박사

2002년~2004년 : 중앙대학교 정보통신연구원 연구전담교수

2004년~2005년 : The Univ. of Tennessee, Dept. of  
Electrical and Computer Engineering,  
박사 후 연구원

2005년~현재 : 한국생산기술연구원 로봇기술본부 선임연구원

관심분야 : 인공생명, 군지능, 진화연산, 인공면역계, 지능시  
스템, 인공두뇌 등

E-mail : dwlee@kitech.re.kr