論文98-35S-3-12

# 인공면역계 기반의 자율이동로봇군의 협조행동전략 결정

# (Artificial Immune Network-based Cooperative Behavior Strategies in Collective Autonomous Mobile Robots)

李 東 昱 *, 沈 貴 寶 **

(Dong Wook Lee and Kwee Bo Sim)

요 약

본 논문에서는 자율분산로봇시스템에서 면역계 기반의 협조제어 방법을 제안한다. 면역시스템은 생체의 자기 방어 및 유지 시스템이다. 따라서 면역계의 특징을 동적으로 변화하는 환경에서 최적의 군행동 전략을 결정하는데 적용할 수 있다. 면역계를 자율분산로봇시스템에 적용하기 위하여 하나의 로봇은 B세포로, 주변 환경은 항원으로, 로봇의 행동전략은 항체로 각각 간주한다. 제안한 방법의 실행과정은 다음과 같다. 환경의 변화가 감지되었을 때, 로봇은 그에 따라 적절한 행동전략을 취한다. 그리고 이 전략은 다른 로봇과의 통신을 통하여 자극 및 억제를 받는다. 최종적으로 가장 많이 자극을 받은 행동전략이 군의 행동전략으로 채택된다. 이러한 제어방법은 면역계의 클론 선택과 면역네트워크 가설에 바탕을 둔 방법이다. 그리고 이 방법은 최적의 군행동 전략을 결정하는데 적용된다.

**Abstract**

In this paper, we propose a method of cooperative control based on immune system in distributed autonomous robotic system(DARS). Immune system is living body's self-protection and self-maintenance system. Thus these features can be applied to decision making of optimal swarm behavior in dynamically changing environment. For the purpose of applying immune system to DARS, a robot is regarded as a B lymphocyte(B cell), each environmental condition as an antigen, and a behavior strategy as an antibody respectively. The executing process of proposed method is as follows. When the environmental condition changes, a robot selects an appropriate behavior strategy. And its behavior strategy is stimulated and suppressed by other robot using communication. Finally much stimulated strategy is adopted as a swarm behavior strategy. This control scheme is based on clonal selection and idiotopic network hypothesis. And it is used for decision making of optimal swarm strategy.

* 正會員, 中央大學校 制御計測工學科
(Department of Control and Instrumentation Engineering Chung-Ang University)
** 正會員, 中央大學校 電子電氣工學部
(School of Electrical and Electronic Engineering, Chung-Ang University)
※ 이 논문은 1997년도 중앙대학교 학술연구비지원에 의한 것임
接受日字: 1997年10月24日, 수정완료일: 1998年2月23日

## I. 서 론

다수의 로봇이 자율적으로 협조하여 시스템의 목적을 달성하는 시스템을 자율분산로봇시스템이라고 한다[1~3]. 자율분산로봇시스템은 현재까지의 제어 및 인공지능 기술을 종합해 연구되고 있으며 이러한 시스템의 성공적인 달성은 곧, 미래사회의 많은 분야에서 적지 않은 영향을 미치게 될 것이다. 시스템이 다양해지고 복잡해지면서 기존의 방법으로 해결하지 못하는 문

제가 많이 생겨나고 있다. 따라서 최근의 연구는 자연계의 복잡 적응 시스템을 모델화 하여 공학적으로 구현하고자 하는 것이 등장하고 있다. 즉, 우리의 생활 환경과 같이 복잡하고 동적인 환경에서도 안정적으로 적용이 가능한 유연한 시스템이 요구되고 있는 것이다. 1980년대 후반 한 연구자에 의해서 인공생명(Artificial Life)이라는 학문이 제창되었다. 인공생명이란, 자연계의 생명체에 대한 특성의 연구를 기본으로 시스템에 적용하고자 하는 학문으로 실제적으로 이전부터도 연구가 있었지만 Langton에 의해 기틀이 잡히고 부터 많은 연구자의 관심을 불러일으키고 있다.

앞으로는 인공생명 기법에 의하여 개미와 같이 수십 수백 대의 자율이동로봇이 복잡한 일을 협조적으로 처리할 수 있을 것이다. 이와 같은 시스템에서는 다수의 로봇에 의한 장애물 회피나 자재운반 탐색 등의 작업을 수행할 수 있을 것이다. 이와 같은 자율이동로봇군의 특징은 자율분산성, 다양성, 협조성으로 대별되고 시스템의 설계이념으로는 기능분산과 협조의 두 가지 개념으로 집약된다[3].

다수의 자율이동로봇으로 구성되는 분산시스템에서 로봇의 행동을 조정하는 지시자는 존재하지 않고 오직 로봇 스스로의 판단에 따라 작업을 수행한다. 따라서 시스템 전체의 이동이나 배치 또는 협조를 위한 군행동을 실현하기 위한 로봇간의 의사조정 시스템이 필요하다. 본 논문에서는 자율이동로봇군의 군행동 실현을 위한 행동전략의 결정을 위한 알고리즘을 개발하는데 있어서 생체 면역시스템의 네트워크 성질에 주목하였다. 면역계는 외부로부터 침입한 물질에 대한 2차 방어수단으로써, 생물체는 진화의 과정을 통하여 고도로 발달한 생체 방어수단인 면역계를 발달시켜왔다. 면역계는 외적을 인식하는 기능, 정보처리 기능, 학습 및 기억 능력, 자기(self)와 비자기(non-self)의 구별 능력, 분산계로서 전체의 조화를 유지하는 능력 등을 가지고 있다. 이러한 우수한 특징들은 현재 시스템 보완, 로봇의 제어기, 적응 잡음 제거기, 패턴 인식기 등 많은 분야에 적용이 연구되고 있다[4~7].

특히 면역계를 로봇의 제어에 적용한 사례는 Ishiguro[4,5]의 면역 네트워크 가설에 의한 로봇의 행동제어기와 Mitsumoto[6]의 B-세포 클론선택을 이용한 군로봇 시스템의 전략복제 방법에 관한 연구가 있다. Ishiguro는 Farmer의 면역네트워크 동적방정식을 하나의 로봇이 환경에 적응해 나가는데 사용하였고, Mitsumoto의 B-세포의 클론선택에 의한 군로봇 시스템의 전략복제 방법은 우수한 로봇이 다른 로봇에게 전략을 복제해 줌으로해서 군 전체의 전략을 결정하는 방법을 제안하였다. 그러나 이 방법은 전략을 복제해 줄(클론복제) 로봇이 생성되는데 시간이 걸리기 때문에 환경에 대하여 적응의 속도가 매우 느리다는 단점을 가지고 있다.

본 논문에서는 동적인 환경에서 자율이동로봇군의 행동전략을 결정하기 위하여 면역네트워크 가설과 B-세포의 클론선택을 적용한 방법을 제안한다. 이 방법은 작업을 수행하면서 바로 통신을 하여 다른 로봇과 자극 및 억제를 받음으로서 빠른 시간 내에 군의 의견을 결정할 수 있다는 장점이 있다. 이 시스템에서 국소적 정보를 가지고 판단한 각 로봇의 정보는 제안한 알고리즘을 통하여 시스템 전체에서 우세한 전략으로 통일되며 군행동이 발현될 수 있는 조건을 만든다. 시뮬레이션은 저자들이 개발한 센싱 및 통신시스템[3]을 통하여 수행되었다.

## Ⅱ. 면역계의 특징

### 1. 면역계의 구성요소

면역계는 생체로 침투한 외부 물질을 제거하는 방어 시스템이다. 면역계를 구성하는 기본요소는 두 가지 형태의 임파구이다. 이것은 각각 B 세포(B cell)와 T 세포(T cell)로서, B 세포는 항체를 분비하는 체액성 반응을 하며 T 세포는 면역에 관련된 세포를 자극 또는 억제하거나 감염된 세포를 죽이는 세포성 반응을 주로 담당한다. T 세포는 그 역할에 따라 억제 T 세포(suppressor T cell), 보조 T 세포(helper T cell), 세포독성 T 세포(cytotoxic T cell)의 세 가지가 있다. 또한 대식세포(macrophage) 및 보체(complement)도 면역계의 구성원으로 각각 면역 시스템의 활성화 및 침입한 세균의 파괴를 담당한다[8].

대부분의 항원은 다양한 epitope라 불리는 항원 결정기(antigen determinant)를 가지고 있다. 또한 항체는 항원을 잡아두기 위하여 epitope에 대하여 열쇠와 자물쇠와 같이 작용하는 paratope를 가지고 있다. 또한 최근의 연구에서는 항체 자신도 다른 항체에 대하여 항원으로 인식되는 idiotope를 가지고 있다는 것이 확실시되고 있다. 이것은 항체 사이에도 상호간에

항원-항체 반응이 유도되어 시스템이 기능을 발휘하는 것으로 생각된다.

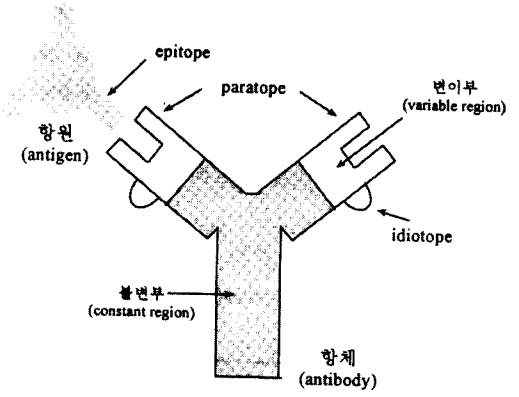


그림 1. 항원 항체 모델
Fig. 1. The model of antigen and antibody.

2. 클론 선택 및 면역 네트워크

생체는 면역계의 여러 구성요소가 외부 침입자에 대해 대항할 준비가 되어있다. 그러나 각 항원에 작용하는 세포의 숫자가 적기 때문에 침입한 특정 항원에 대한 B 세포와 T 세포를 많이 만들어내는 면역반응이 일어난다. 이것은 많은 임파구 중에서 필요한 임파구만을 빠른 속도로 발생시키는 클론 선택(clonal selection)의 과정을 거친다. 클론 선택은 두 가지 방식으로 나타나는데 하나는 항원에 의하여 B 세포가 직접 활성화되는 것이고 또 하나는 면역반응에 관련된 세포들 사이의 정교한 상호조절 작용에 의한다.

하나의 항체는 하나의 항원만을 인식한다. 따라서 자연계에 존재하는 수많은 항원을 인식하기 위하여 면역계는 학습을 한다. 낯선 항원에 대한 학습은 그와 유사한 항체를 생산하는 B 세포의 증식 및 유전자 재배열에 의해 이루어진다. 또한 침입한 항원을 물리치면 그 항원에 대하여는 또다시 인식이 가능한 기억세포가 만들어진다. 현재 뇌(brain)는 넓은 영역에 정보를 저장하는 것으로 알려져 있다. 그러나 장기 기억(long term memory)은 면역계와 같이 패턴 인식 개체(agent)에 기억될 것으로 생각된다. 또한 항체(또는 B 세포)도 항원 특이적인 수용체인 idiotope를 가지고 있는 것으로 밝혀지면서 항체 상호간의 복잡한 작용에 의해 상호 자극 및 억제를 통하여 시스템이 동작된다고 생각된다. 물론 항체 상호간 서로 결합하는 것이 아니라 어느 정도의 임계치를 가지고 자극 억제를 함으로써 세균의 침입시 보다 효율적으로 대처하는 것으로 판단된다. 이러한 사실은 Perelson 등의 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여도 입증되었다. 면역학자인 Jerne는 이와 같은 항체 상호간의 자극 및 억제 관계에 의한 면역네트워크 가설(idiotopic network hypothesis)[9]을 제안하였고 Farmer는 Jerne의 가설에 대한 동적 방정식[10]을 제안하였다. 이 방정식은 항체의 자극, 억제 항, 항원의 응답 항, 세포의 자연소멸항으로 구성된 (1)식 및 (2)식과 같다.

$$A_i(t+1)=A_i(t)+\left(\alpha\frac{\sum_{j=1}^{N}(m_{ij}a_j(t))}{N}-\alpha\frac{\sum_{k=1}^{N}(m_{ki}a_k(t))}{N}+\beta m_i-k_i\right)a_i(t) \quad (1)$$

$$a_i(t+1)=\frac{1}{1+\exp(0.5-A_i(t+1))} \quad (2)$$

단, $a_i(t)$는 항체 $i$의 농도, $m_{ij}$는 항체 $i$와 항체 $j$의 친화성, $m_i$ 는 항체 $i$와 항원의 친화성, $\alpha,\beta$는 각각 다른 항체 및 항원과의 응답율을 나타내는 파라미터, $k$는 자연 소멸 계수, $N$은 항체 종류의 총 수 이다.

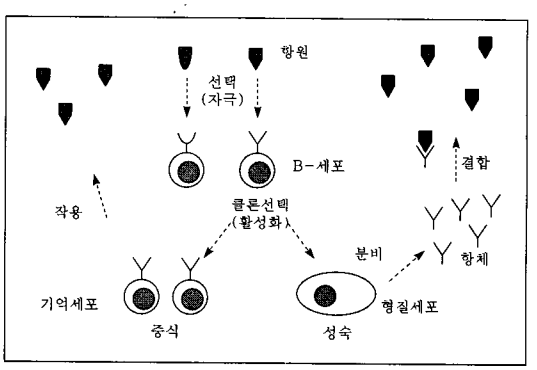


그림 2. B-세포의 클론 선택 과정
Fig. 2. Process of B-cell clonal selection.

## Ⅲ. 면역네트워크에 기반한 군제어 알고리즘

1. 면역 시스템과 자율분산시스템의 유사성

자율분산로봇시스템은 시스템 전체를 통합하는 기능을 가지고 있지 않다. 그러나 시스템을 구성하는 개개의 로봇이 개별적으로 시스템의 목적 및 환경, 다른 로봇의 거동 등을 인식하여 자신의 행동을 자율적으로 결정함으로써 각 요소간의 협조를 도모하여 시스템 전

체로서의 대역적인 질서를 형성 또는 유지하는 시스템이다. 면역계 또한 어떠한 뇌와 같은 관리자의 명령에 따르는 것이 아니라, 구성 요소가 자율적으로 환경에 대응하면서 생체를 방어, 유지하는 병렬분산시스템이다. 이와 같은 관점에서 자율분산로봇시스템과 면역계의 유사성을 도출하여 시스템의 군행동 전략을 결정하는 메커니즘으로 이용할 수 있다. 표 1은 면역계와 자율분산로봇시스템을 비교한 표이다.

표 1. 자율분산시스템과 면역시스템의 관련성

Table 1. Relationship between DARS and immune system.

| 자율분산로봇시스템 | 면역시스템 |
|---|---|
| 로봇의 주변환경 | 항원(Antigen) |
| 행동전략 | 항체(Antibody) |
| 로봇 | B세포(B cell) |
| 적합함 | 자극(Stimulus) |
| 부적합함 | 억제(Suppression) |
| 우수한 로봇 | 형질세포(Plasma cell) |
| 열등한 로봇 | 비활성세포(Inactivated cell) |

2. 군제어 알고리즘

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

일단 한 로봇이 주변환경의 인식을 통하여 적당한 행동전략을 결정했다면, 이 전략은 다른 로봇과 만났을 경우 서로간의 관계에 의하여 자극 또는 억제를 받는다. 이 과정은 자율이동로봇의 지역적 통신시스템에 의하여 구현될 수 있다. 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. 자세한 알고리즘은 다음과 같다.

**시스템의 목적 및 제안한 알고리즘의 개요**

제안한 방법을 시험하기 위한 시스템을 모든 로봇이 환경 내에 흩어져 있는 작업을 찾아서 수행하는 것으로 하였다. 이 작업은 환경의 조건에 따라 해야할 행동양식이 다르며 비교적 단순하고, 군행동을 실현할 수 있는 좋은 예제이기 때문이다. 제안한 면역알고리즘에 의하여 우세한 전략이(strong strategy) 군 전략으로서 선택된다. 즉, 모든 로봇이 우세한 전략을 택하게 되면, 이때 군행동이 나타날 수 있다. 또한 환경이 변하였을 때 모든 로봇은 조정과정을 거쳐 환경에 맞는 적절한 전략으로 바꾸어 나간다. 이 알고리즘은 면역계의 클론 선택과 면역네트워크 가설에 바탕을 둔 것이다.

**항원 및 항체의 정의**

작업의 분포에 따라서 작업의 밀도를 다음의 4단계로 나눌 수 있다. 각각은 작업의 밀도가 ① 높다, ② 중간, ③ 낮다, 및 ④ 없다 가 된다. 이러한 각각의 환경에 대하여 로봇은 다음과 같은 몇 개의 전략으로 대응할 수 있을 것이다. 그 전략은 [1] 집합(Aggregation), [2] 탐색(Random search), [3] 확산(Dispersion), 및 [4] 귀향(Homing) 등이 될 수 있다. 따라서 4단계의 각 환경은 항원으로 간주하고 에에 대한 전략은 항체로 간주한다.

시스템의 목적은 로봇이 작업을 찾아서 수행하는 것이다. 따라서 흩어져 있는 작업을 발견해 수행하기 위해서 위에서 정의한 주변환경(항원)에 대하여 다음의 4가지 대응전략(항체)을 사용하였다. 각 전략의 의미는 다음과 같다.

- 집합(Aggregation : $Ab_0$) : 집단의 개체들이 정해진 거리를 유지하면서 모이는 능력
- 탐색(Random Search : $Ab_1$ - basic strategy) : 임의의 방향으로 움직이며 작업을 찾는 능력
- 확산(Dispersion : $Ab_2$) : 집단의 개체들이 정해진 거리를 설정하고 유지하기 위하여 퍼지는 능력
- 귀향(Homing : $Ab_3$) : 특정한 지역이나 위치를 찾아가는 능력

**군 면역 알고리즘**

본 논문에서 제안한 자율이동로봇군의 의견 조정을 위한 군면역 알고리즘은 다음과 같다.

[단계 1] 로봇의 모든 항체에 대하여 자극값($S_i$)

과 농도값($s_i$)을 0.5로 초기화한다.

$$S_i(0) = 0.5 \text{ for } i = 0,\cdots,N-1$$
$$s_i(0) = 0.5 \text{ for } i = 0,\cdots,N-1$$

단, $N$ 은 항체의 개수이다.

각각의 로봇은 자신이 취할 수 있는 행동전략(항체)에 대한 자극값과 농도값을 가지고 있다. 여기서 항체는 행동전략, 항원은 주변환경을 나타낸다.

[단계 2] 농도값($s_i$)이 큰 항체를 선택한다.

로봇은 선택한 항체에 해당하는 행동전략을 수행한다. 시스템의 시작 시 모든 항체의 농도값이 같을 때는 기본전략($Ab_1$)을 수행한다.

[단계 3] 한 로봇이 다른 로봇을 만났을 경우 그들은 통신을 통하여 자신의 행동전략에 대하여 자극 또는 억제를 받는다.

로봇의 각 항체에 대한 자극값($S_i$)과 농도값($s_i$)은 상대방 로봇의 항체의 농도에 따라 각각 (3)식과 (4)식에 의하여 갱신된다. (3)식은 (1)식의 Farmer의 면역네트워크 동정방정식의 변형된 형태로 우변의 첫 번째 항은 과거의 항체의 자극값을 나타내고, 두 번째 항은 다른 항체에 의한 자극 또는 억제항, 세 번째 항은 항원에 의한 자극항 네 번째 항은 항체의 자연소멸항을 각각 나타낸다. 이때 (1)식의 자극항과 억제항인 두 번째 및 세 번째 항은 $\gamma_{ij}$가 양 또는 음의 값을 가지기 때문에 (3)식에서 하나의 항으로서 합쳐졌다.

$$S_i(t) = S_i(t-1) + \left(\alpha\frac{\sum_{j=0}^{N-1}\gamma_{ij}s_j(t-1)}{N} + \beta g_i - k_i\right)s_i(t) \quad (3)$$

$$s_i(t) = \frac{1}{1+\exp(0.5 - S_i(t))} \quad (4)$$

단, $i$, $j$ = 0,⋯,$N$-1, $s_j$는 항체 $j$의 농도, $\gamma_{ij}$는 항체 $i$와 항체 $j$의 상호 자극계수(표 2), $g_i$는 항원과 항체 $i$의 친화성, $\alpha, \beta$는 각각 다른 로봇 및 환경과의 반응율을 나타내는 파라미터이다.

만약 한 로봇이 상한값($\bar{\tau}$)이상의 자극을 받으면(항체의 농도값 증가), 이 로봇은 우수한 로봇이 된다.

→ 이 로봇은 열등한 로봇을 만났을 경우 전략을 전달해 줄 수 있다.

만약 한 로봇의 모든 전략에 대한 농도값이 하한값($\underline{\tau}$) 이하가 되면, 이 로봇은 열등한 로봇이 된다.

→ 이 로봇은 우수한 로봇을 만났을 경우 전략을 전달받을 수 있다.

$$\bar{\tau}(\text{상한값}) = 0.622\left(= \frac{1}{1+e^{-0.5}}\right) \quad (5)$$

$$\underline{\tau}(\text{하한값}) = 0.378\left(= \frac{1}{1+e^{0.5}}\right) \quad (6)$$

[단계 4] 만약 열등한 로봇이 우수한 로봇을 만났을 경우, 그 로봇으로부터 모든 전략을 전달받고 각 전략의 농도를 갱신한다.

[단계 5] t = t + 1, [Step 2]로 간다.

표 2. 상호 자극계수의 예($\gamma$ij)
Table 2. Example of mutual stimulus coefficient($\gamma$ij).

| 로봇 $j$ / 로봇 $i$ | 집 합 ($Ab_0$) | 탐 색 ($Ab_1$) | 확 산 ($Ab_2$) | 귀 향 ($Ab_3$) |
|---|---|---|---|---|
| 집 합 | 1 | -0.4 | -0.2 | -0.4 |
| 탐 색 | -0.4 | 1 | -0.4 | -0.2 |
| 확 산 | -0.2 | -0.4 | 1 | -0.4 |
| 귀 향 | -0.4 | -0.2 | -0.4 | 1 |

항체에 대한 항원의 자극값(항원과 항체의 친화성)은 과거 일정 시간동안(atime) 작업을 감지한 빈도에 따라 그림 3과 같이 정의된다. 작업의 밀도가 높을 때는 집합($Ab_0$)에 대한 자극값이 높고 낮을 때는 귀향의 자극값이 높다. 그림 3은 각 항체에 대한 항원의 친화성을 나타낸 함수($g_0$~$g_3$)이다. 즉, 각 항체 $i$에 대하여 항원에 대한 함수 $g_i$의 친화성을 갖는다.

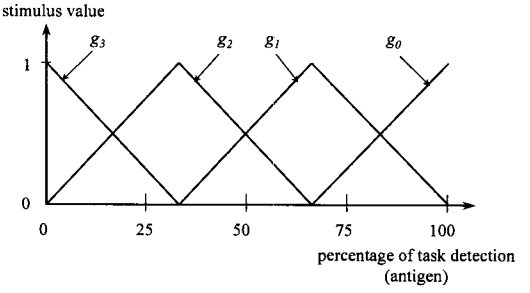


그림 3. 항원의 항체에 대한 친화성(gi)
Fig. 3. Affinity(gi) between antigen and antibody.

## Ⅳ. 시뮬레이션 결과 및 검토

그림 4는 시뮬레이션 환경 및 협조 탐색 문제에서 군 전략 결정 과정을 도식적으로 나타낸 그림이다.

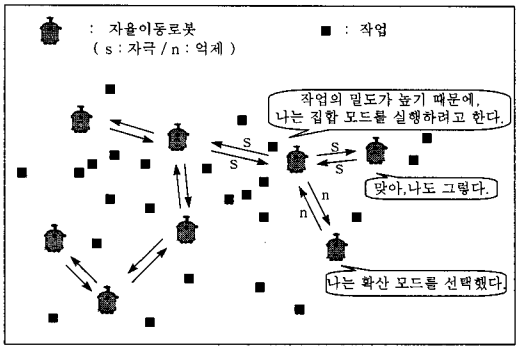


그림 4. 면역계 기반의 자율분산시스템
Fig. 4. Immune system-based DARS.

제안한 군 면역 알고리즘의 유효성을 검증하기 위하여 시뮬레이션 조건을 다음과 같이 설정하였다.

- 로봇의 수 : 50대
- 작업 영역 : 10m×10m
- 로봇의 크기 : 5cm×5cm
- 시스템의 목적 : 작업공간에 퍼져 있는 작업을 찾아 수행하는 것
- 통신 반경 : 75 cm
- 센싱 반경 : 32.5 cm
- 파라미터 값 :
  $\alpha = 0.5,\ \beta = 0.005,\ k = 0.002$
- 항원 결정 시간(atime) : 100 unit time
  (1 단위시간(unit time) 동안, 로봇은 진행 방향을 바꾸거나 2.5 cm 전진할 수 있다.)
- 시스템의 조건
  (case 1) 작업의 수가 500개 일 때
  (case 2) 작업의 수가 200개 일 때
  (case 3) 작업의 수가 100개 일 때
  (case 4) 작업의 수가 10개 일 때

본 시뮬레이션은 환경이 변하였을 때 어떻게 전략이 결정되는가를 보기 위함이었으며, 로봇이 실제로 행동전략에 따라 동작하거나 작업을 수행하지는 않았다. 여기에서 예제로 설정한 4가지의 행동전략을 수행하기 위해서는 별도의 군행동 알고리즘이 개발되어야 하기 때문에 본 시뮬레이션에서는 각 환경에 따른 로봇의 행동전략의 조정정도를 파악하는데 초점을 맞추었다.

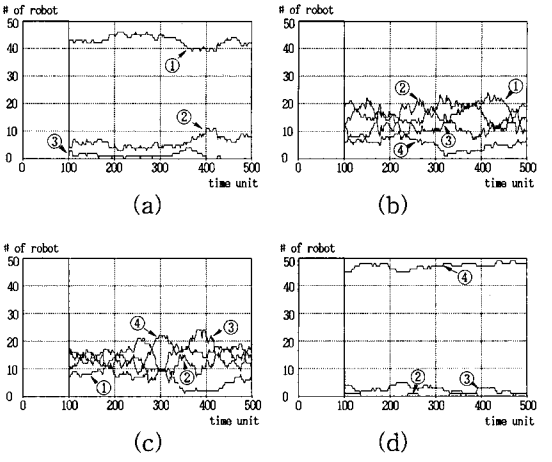


그림 5. 면역알고리즘을 사용하지 않은 결과 (a) 작업의 수가 500개 (b) 작업의 수가 500개 (c) 작업의 수가 100개 (d) 작업의 수가 10개
Fig. 5. Simulation results without immune algorithm (a) # of tasks is 500 (b) # of tasks is 200 (c) # of tasks is 100 (d) # of tasks is 10

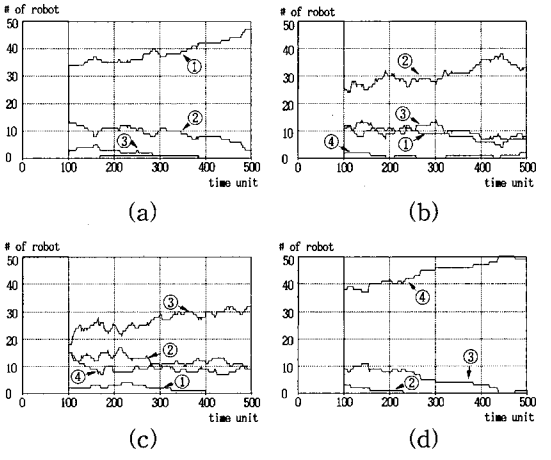


그림 6. 면역알고리즘을 사용한 결과 (a) 작업의 수가 500개 (b) 작업의 수가 200개 (c) 작업의 수가 100개 (d) 작업의 수가 10개
Fig. 6. Simulation results with immune algorithm (a) # of tasks is 500 (b) # of tasks is 200 (c) # of tasks is 100 (d) # of tasks is 10

위의 그래프에서 100 unit time 이후에 그래프의 변화가 나타나는 이유는 최초의 100 unit time은 주변의 환경을 인식하기 위한 항원 결정 시간이기 때문에 모든 로봇이 기본전략인 탐색의 전략을 선택하고 있기 때문이다.

그림 5는 제안한 방법과의 비교를 위하여 군 면역 알고리즘을 사용하지 않고 로봇이 개별적으로 행동을 결정할 때 각 전략에 대한 로봇 수의 변화를 나타낸 그림이다. 이때 각 로봇은 오직 주변의 정보만 이용하여 자신의 행동을 결정한다. 따라서 각 전략을 선택한 로봇의 개수는 시간에 관계없이 비교적 일정하다.

그림 6은 제안된 군 면역 알고리즘을 사용하여 로봇 상호관계에 의하여 행동을 결정할 때 각 전략에 대한 로봇 수의 변화를 나타낸 그림이다. 그림에서 시간이 지남에 따라 우세한 전략이 군 전체로 퍼져 대부분의 로봇이 우세한 전략을 택하게 됨을 알 수 있다. 그림 6-(a)는 전략 1($Ab_0$)이 군 전략으로 채택되었고 나머지의 경우도 군 전략으로서 각각 전략 2($Ab_1$), 3($Ab_2$), 4($Ab_3$)가 선택된 경우이다. 특히, 그림 5와 6의 (b)와 (c)의 상황은 대부분의 전략(항체)이 비슷하게 나타나는 상황임에도 불구하고 그림 6의 경우에 각각 우세한 전략인 전략 2와 전략 3이 채택되어 점점 증가하고 있다. 따라서 제안한 군 면역 알고리즘이 자율이동로봇군의 군 전략을 결정하는데 유용하게 적용됨을 알 수 있다.

본 논문에서 예로든 다수의 로봇이 작업공간에 퍼져있는 작업을 찾아 수행하는 것(협조탐색 문제)은 제안한 알고리즘의 유효성을 판단하기 위한 하나의 예이다. 따라서 실제의 적용문제에서 시스템에 맞도록 항원이나 항체를 설정하여 본 알고리즘을 적용한다면 중앙 관리자가 없는 자율분산시스템에서 군행동을 형성하는 문제를 해결할 수 있을 것이다.

본 논문에서는 면역 시스템을 간단히 하기 위하여 대식세포(macrophage), T 세포(억제 T 세포 : suppressor T cell, 보조 T 세포 : helper T cell, 세포독성 T 세포 : cytotoxic T cell) 등을 고려하지 않았다. 그러나 이러한 구성요소는 실제로 면역시스템에서 중요한 역할을 하고 있다. 따라서 이 요소의 비모델링에 의하여 연속적인 환경의 변화가 발생하는 경우 이전의 전략과 자극값의 영향에 의해 빠른 적응성을 가지지 못하는 단점이 발생할 수가 있다. 현재 대식세포와 T 세포 등을 고려한 적응 모델을 계속 연구중이다.

## Ⅶ. 결 론

본 논문에서는 자율분산로봇시스템의 목적을 달성하기 위하여 면역계를 기반으로 한 군행동 결정 알고리즘을 제안하였다. 주어진 목적달성을 위한 자율분산로봇시스템의 실행은 군의 배치(군행동) → 작업수행 → 환경변화 감지 → 의견조정 → 군행동 … 등의 과정을 거친다. 이 때 군 전체적인 행동을 수행하기 위하여 군 전체의 의견을 조정하는 과정이 필요하다. 본 논문에서는 자율분산로봇시스템과 면역계의 유사점을 찾아 자율분산로봇시스템의 군 전략을 결정하는데 적용하였다. 시뮬레이션 결과를 통하여 주어진 조건하에서 가장 우세한 전략이 군 전체로 퍼져나감을 알 수 있었다. 이와 같이 군의 우세한 전략이 시스템의 모든 로봇 의하여 선택되고 우수한 로봇(면역계의 형질세포에 해당)이 다른 로봇에게 이 전략을 전파함으로써 군행동이 발현될 수 있는 조건을 만족하도록 할 수 있었다. 이 알고리즘은 성공적인 클론이 선택되어 증식하는 클론 선택과 항체 상호관계를 모델링한 면역네트워크 가설을 바탕으로 하였다. 그러나 제안한 면역시스템은 면역계에 대한 충실한 모델을 바탕으로 더욱 더 개선의 여지가 많다고 생각한다.

## 참 고 문 헌

[1] A. Asama et. al. eds, *Distributed Autonomous Robotic Systems I, II*, Springer-Verlag, 1994, 1996.

[2] D.W. Lee, K.B. Sim, "Behavior Learning and Evolution of Collective Autonomous Mobile Robots using Reinforcement Learning and Distributed Genetic Algorithms," *Journal of KITE*, vol. 34S, no. 8, pp. 56-64, 1997. 8.

[3] D.W. Lee, K.B. Sim, "Development of Communication System for Cooperative Behavior in Collective Autonomous Mobile Robots," *Journal of KITE*, vol. 34S, no. 3, pp. 33-45, 1997. 3.

[4] A. Ishiguro, Y. Watanabe, Y. Uchikawa, "An Immunological Approach to Dynamic Behavior Control for Autonomous Mobile Robots," *Proc. of IROS 95*, pp. 495-500, 1995.

[5] A. Ishiguro, Y. Shirai, T. Kendo, Y. Uchikawa, "Immunoid : An Architecture for Behavior Arbitration Based on the Immune Networks," *Proc. of IROS 96*, pp.

1730-1738, 1996.

[6] N. Mitsumoto et al., "Micro Autonomous Robotic System and Biologically Inspired Immune Swarm Strategy as a Multi Agent Robotic System," *Proc. of Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 2187-2192, 1995.

[7] Y. Ishida, N. Adachi, "An Immune Algorithm for Multiagent : Application to Adaptive Noise Neutralization," *Proc. of IROS 96*, pp. 1739- 1746, 1996.

[8] I. Roitt, J. Brostoff, D. Male, *Immunology 4th edition*, Mosby, 1996.

[9] N.K. Jerne, "Idiotopic Network and Other Preconceived Ideas," *Immunological Rev.*, vol. 79, pp. 5-24, 1984.

[10] 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

**李 東 昱(正會員)** 第 34 卷 S編 第 8 號 參照
현재 중앙대학교 대학원 제어계측학과(로보틱스 및 지능정보시스템 전공) 박사과정

**沈 貴 寶(正會員)** 第 34 卷 S編 第 8 號 參照
현재 중앙대학교 전자전기공학부 부교수(로보틱스 및 지능정보시스템연구실)