

인공 면역계 기반 자율분산로봇 시스템의 협조 전략과 군행동

Cooperative Strategies and Swarm Behavior in Distributed Autonomous Robotic Systems Based on Artificial Immune System

심귀보, 이동욱, 선상준
(Kwee-Bo Sim, Dong-Wook Lee, and Sang-Joon Sun)

Abstract : In this paper, we propose a method of cooperative control (T-cell modeling) and selection of group behavior strategy (B-cell modeling) based on immune system in distributed autonomous robotic system (DARS). An immune system is the living body's self-protection and self-maintenance system. These features can be applied to decision making of the optimal swarm behavior in a dynamically changing environment. For applying immune system to DARS, a robot is regarded as a B-cell, each environmental condition as an antigen, a behavior strategy as an antibody, and control parameter as a T-cell, respectively. When the environmental condition (antigen) changes, a robot selects an appropriate behavior strategy (antibody). And its behavior strategy is stimulated and suppressed by other robots using communication (immune network). Finally, much stimulated strategy is adopted as a swarm behavior strategy. This control scheme is based on clonal selection and immune network hypothesis, and it is used for decision making of the optimal swarm strategy. Adaptation ability of the robot is enhanced by adding T-cell model as a control parameter in dynamic environments.

Keywords : distributed autonomous robotic systems, artificial immune system, T-cell, B-cell, clonal selection, immune network

I. 서론

자율분산 시스템의 가장 중요한 특징은 각각의 로봇이 주변의 환경이나 물체, 다른 로봇의 행동 등을 인식하여 자신의 행동을 독립적으로 결정하며, 또한 주어진 작업을 잘 수행하기 위하여 다른 로봇과 협동 할 수 있다는 점이다[1]-[4]. 면역 시스템(면역계)[5]-[7] 또한 생체를 방어 및 유지하는 자율분산 시스템이다. 면역 시스템의 요소들은 뇌의 명령에 따르는 것이 아니라 각 요소가 자율적으로 환경에 대처한다. 면역 시스템은 외부로부터 침입한 물질에 대한 2차 방어수단으로써, 생물체는 진화의 과정을 통하여 고도로 발달한 생체 방어수단인 면역 시스템을 발달시켜왔다. 면역 시스템은 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 능력은 여러 분야에서 공학적으로 모델링 되고 있다[8]-[14]. 본 논문에서는 자율이동로봇군의 군행동 실현을 위한 행동 전략의 결정을 위한 알고리즘을 개발하는데 있어서 생체 면역 시스템의 네트워크 성질에 주목하였다.

면역 시스템을 로봇의 제어에 적용한 사례는 Ishiguro [10]-[11]의 면역 네트워크 가설에 의한 로봇의 행동 제어기와 Mitsumoto[13]의 B-세포 클론선택을 이용한 군로봇 시스템의 전략복제 방법에 관한 연구가 있다. Ishiguro는 Farmer의 면역네트워크 동적 방정식을 하나의 로봇이 환

경에 적용해 나가는데 사용하였고, Mitsumoto의 B-세포의 클론선택에 의한 군로봇 시스템의 전략복제 방법은 우수한 로봇이 다른 로봇에게 전략을 복제해 줌으로써 군 전체의 전략을 결정하는 방법을 제안하였다. 그러나 이 방법은 전략을 복제(클론복제)해 줄 로봇이 생성되는데 시간이 걸리기 때문에 환경에 대한 적응 속도가 매우 느리다는 단점을 가지고 있다. 한편 본 저자는 Mitsumoto의 단점을 개선하기 위하여 클론복제 메커니즘과 B-세포의 면역네트워크를 이용한 군행동 전략 알고리즘을 제안하였다[4]. 그러나 이 알고리즘은 정적인 환경에서의 특성은 우수하나 동적인 환경에서의 적응능력이 떨어지는 단점이 있다.

본 논문에서는 동적인 환경에서 자율이동로봇군의 행동 전략을 결정하기 위하여 B-세포 및 T-세포의 면역네트워크와 B-세포의 클론선택을 적용한 방법을 제안한다. 특히 면역네트워크에서 주된 역할을 담당하는 B-세포와 보조적인 역할을 담당하는 T-세포를 함께 모델링 함으로써 군의 행동 결정과 변화하는 환경에 대한 빠른 적응성을 가질 수 있도록 하였다. 이 방법은 작업을 수행하면서 바로 통신을 통하여 다른 로봇과 자극 및 억제를 받음으로써 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.

2절에서는 본 알고리즘의 기본이 되는 생물학적 면역 시스템에 대하여 살펴본다. 3절에서는 Farmer의 면역 네트워크 모델을 살펴보고, T-세포 모델이 포함된 새로운 면역 네트워크 모델을 제안한다. 4절에서는 군의 의견조정을 위한 군 면역 알고리즘을 제안하고, 5절에서 실험을 통

접수일자 : 1999. 12. 6., 수정완료 : 2000. 7. 13.

심귀보, 이동욱, 선상준 : 중앙대학교 전자전기공학부

※ 본 논문은 과학기술부의 뇌과학 프로젝트(Braintech21)의 지원으로 수행되었음.(과제번호 : 98-J54-01-01-A-07)

하여 그 유효성을 검증한다. 6절에서 앞으로의 응용가능성을 살펴보고 결론을 맺는다.

II. 생물학적 면역 시스템

1. 면역 시스템의 개요[5]-[7]

생체의 방어체제인 면역 시스템은 박테리아, 기생균, 병원균, 독소, 바이러스 등과 같은 항원이라고 통칭하는 매우 다양한 외부 유기체나 단백질에 대하여 생체를 방어할 수 있는 매우 정교하고 복잡한 시스템이다. 면역 시스템은 생물학적인 진화와 비슷한 진화 메커니즘에 의해서 학습을 수행한다. 따라서 면역 시스템은 순수 학문적인 흥미뿐만 아니라 적응 계산에 대한 응용 가능성 때문에 인공지능 연구자들에게는 매우 흥미 있는 분야이다. 면역 시스템은 거의 모든 외부의 세포나 분자들을 인식할 수 있다. 그러기 위해서는 자신의 체내에서 만들어지고 순환하는 세포와 분자들을 외부의 것과 구별해야 한다. 면역 시스템은 10^{16} 정도의 다른 외부 분자들을 인식할 수 있다고 추정되는데 이것은 패턴 인식의 관점에서 매우 놀라운 숫자이다. 특히 인간의 유전자가 약 10^5 종류의 면역 시스템의 구성요소를 암호화할 수 있다는 것과 면역 시스템이 중앙 제어 기관이 없이 온몸에 걸쳐 분산되어 있다는 것(자율분산 시스템)을 고려할 때 이는 매우 놀라운 사실이다. 면역 시스템을 구성하는 기본 요소는 두 가지 형태의 림프구이다. 이는 B-세포(B-림프구)와 T-세포(T-림프구)로써, B-세포는 항체를 분비하는 체액성 반응을 하며, T-세포는 면역에 관련된 세포를 자극 또는 억제하거나 감염된 세포를 죽이는 세포성 반응을 주로 담당한다.

특히 최근의 의학·생리학 연구 결과에 의하면, 면역 시스템은 외계로부터 침입한 이물질을 물리치는 단순한 기능만이 아니라, 시시각각으로 변화하는 환경 속에서 자신을 존속시키는 중요한 기능을 가지고 있다는 것이 밝혀지고 있다. 즉 각종 림프구 세포가 체액 속을 단지 흩어져서 떠다니는 것이 아니라 서로 상호간에 커뮤니케이션을 통하여 고도의 정보 처리를 시스템 레벨에서 실현하고 있는 것이다. 이 기능은 뇌 신경계와는 또 다른 새로운 병렬분산처리 알고리즘을 제공해 줄 것으로 기대된다. 이는 또한 미지의 동적 환경에서 자율적으로 대처하는 이동 로봇의 행동 전략 결정에도 새로운 방법론이 될 것으로 생각된다.

2. 면역 시스템의 동작원리

하나의 항체는 하나의 항원만을 인식한다. 따라서 자연계에 존재하는 수많은 항원을 인식하기 위하여 면역 시스템은 학습을 한다. 낯선 항원에 대한 학습은 그와 유사한 항체를 생산하는 B 세포의 증식 및 유전자 재배열에 의해 이루어진다. 또한 침입한 항원을 물리치면 그 항원에 대해서는 또 다시 인식이 가능한 기억세포가 만들어진다. 현재 뇌(brain)는 넓은 영역에 정보를 저장하는 것으로 알려져 있다. 그러나 면역계의 동작을 살펴볼 때 장기 기억(long term memory)은 기억세포와 같이 패턴 인식 개체(agent)에 기억될 것으로 생각된다. 한편 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. 이것을 면역네트워크 가설이라고 하며 Perelson 등의 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 그 기능상의 존재가 확인되었다.

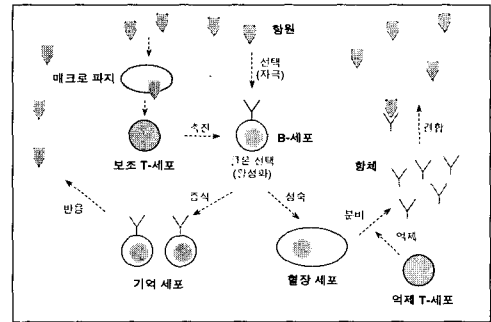


그림 1. 면역 시스템의 동작.
Fig. 1. Operation of immune system.

그림 1은 면역 시스템의 동작을 나타내는 그림이다. 특정한 항원이 침투했을 때, 그것을 인식하는 B-세포가 자극을 받아 활성화된다. 활성화된 B-세포는 클론 복제를 통하여 기억세포를 만들거나 스스로 성숙해 혈장세포로 변한다. 이 과정을 촉진시키는 것이 보조 T-세포인데, 이것은 항원을 삼킨 매크로 파지의 자극에 의해 활동을 개시한다. 혈장세포는 침입한 항원을 인식할 수 있는 항체를 분비하며 항원이 사라지면 억제 T-세포에 의해 분비를 멈추게 된다. 한편 면역네트워크는 그림에 표현되어 있지 않지만 B-세포와 T-세포 상호간에 자극 및 억제 관계를 형성한다. 이 면역네트워크는 평상시에는 평형상태를 유지하다가 항원을 인식한 B-세포가 발생하면 그 세포를 빠르게 증식하도록 하는 역할을 담당한다.

III. 면역 시스템 모델

1. 항원-항체(B-세포)의 면역 네트워크 모델

면역학자인 Jerne[7]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[15]는 Jerne의 가설에 대한 동적 방정식((1),(2))을 제안하였다. 이 방정식에서 한 항체의 자극값의 변화량(ΔS_i)은 다른 항체로부터의 자극 및 억제 항, 항원의 반응 항, 세포의 자연 소멸 항 등으로 구성된다. 또한 항체의 농도는 항체의 자극값에 비례하며 0에서 1사이의 값을 갖는다.

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

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

단, $i = 0, \dots, N-1$; N 은 항체 종류의 수, $S_i(t)$ 는 항체 i 의 자극값, $s_i(t)$ 는 항체의 i 의 농도, m_{ij} 및 m_{ji} 는 항체 i 와 항체 j 의 상호자극 계수(친화성), m_i 는 항체 i 와 침입한 항원의 친화성, α, β 는 다른 항체와 항원의 반응률을 나타내는 파라미터이고, k_i 는 자연소멸 계수이다.

2. B-세포와 T-세포의 면역 네트워크 모델

본 논문에서는 시스템의 적응 능력을 개선하기 위하여 보조(helper) 및 억제(suppressor) T-세포의 모델이 추가된 면역 네트워크 방정식을 제안한다. (3)~(5)는 면역 시스템의 항원, B-세포(항체), T-세포의 관계를 모델화한 보안된 면역 네트워크 방정식이다.

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

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

$$c_i(t) = \eta(1 - g_i(t))S_i(t) \quad (5)$$

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), α, β, η 는 상수이다.

(5)에서 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 (3)에서 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 반응함에 의하여 주 역할을 하는 T-세포가 결정된다. 표 1은 여러 가지 상태에 따른 T-세포의 역할을 나타낸 표이다. T-세포 모델을 추가한 주요한 이유는 한 종류의 항원이 퇴치되었을 때 이전에 증가한 항체의 농도를 빨리 원상태로 회복함으로써 새로운 환경에 빨리 대응할 수 있도록 하기 위함이다. T-세포 모델을 첨가함으로써 실제의 면역 시스템의

표 1. 다양한 상태에서 T-세포의 역할.

Table 1. The role of T-cell in different states.

$g_i(t)$	$S_i(t)$	$c_i(t)$	상태	T-세포의 역할
크다	작다	매우작다	항원침투초기	보조 T-세포
크다	크다	작다	항원 제거중	-
작다	크다	크다	항원 제거됨	억제 T-세포
작다	작다	작다	안정상태	-

동작 원리를 더욱 고려하게 되었다.

IV. 인공 면역 시스템 기반의 군제어 알고리즘

1. 항원, 항체의 정의

1.1 시스템의 목적과 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 전략으로써 선택된다. 즉, 모든 로봇이 우세한 전략을 택하게 되면, 이때 군행동이 나타날 수 있다. 또한 환경이 변하였을 때 모든 로봇은 조정 과정을 거쳐 환경에 맞는 적절한 전략으로 바꾸어 나간다. 이 알고리즘은 면역 시스템의 클론 선택과 면역네트워크 가설에 바탕을 둔 것이다.

1.2 항원

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 이에 대한 전략은 항체로 간주한다.

1.3 항체

본 논문에서는 위에서 정의한 주변환경(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 찾아가 간다.

2. 군의 의사결정 알고리즘

2.1 군 면역 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 군행동을 실현하기 어렵다. 본 논문에서는 면역 반응의 아이디어를 자율분산로봇 시스템의 군 전략의 조정에 적용하는 것이다.

일단 한 로봇이 주변환경의 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 만났

표 2. 자율분산로봇 시스템과 면역 시스템의 관계.
Table 2. Relationship between DARS and immune system.

자율분산로봇 시스템	면역 시스템
로봇의 주변환경	항원
행동 전략	항체(B-세포)
제어 변수	T-세포
적합	자극
부적합	억제
우수한 로봇	혈장세포(클론)
열등한 로봇	비활성화된 세포

을 때 전략을 전달해 줄 수 있다. 이러한 과정에 의하여 군의 전략이 통일되게 결정된다.

표 2는 면역 시스템의 요소와 자율분산 시스템의 각 요소들을 대응시킨 표이다. 로봇의 의견을 조정하기 위한 로봇의 알고리즘은 아래와 같다.

단계 1 : 모든 행동 전략에 대한 항체의 자극값 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(Ab_1)을 선택한다.

단계 3 : 한 로봇이 다른 로봇을 만났을 때, 그들은 통신을 하여 서로의 행동 전략에 대하여 자극 또는 억제를 한다. 이때 상대 로봇으로부터 항체의 농도 값을 전달받아 (6), (4), 및 (5)을 이용하여 자신의 항체의 자극값(S_i) 및 농도(s_i), 그리고 T-세포의 농도(c_i)를 계산한다. (3)의 자극값의 갱신식은 ($m_{ij} - m_{ji}$)를 하나의 항체, m_{ij} 로 바꾸어 표현하면 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$S_i(t) = S_i(t-1) + \left(\alpha \frac{\sum_{j=0}^{N-1} m_{ij} s_j(t-1)}{N} + \beta g_i(t-1) - c_i(t-1) - k_i s_i(t-1) \right) \quad (6)$$

단, $i = 0, \dots, N-1$; s_j 는 다른 로봇의 항체의 농도, m_{ij} 는 항체 i 와 j 의 상호 자극 계수(표 3), α, β 는 다른 로봇과 환경(항원)의 반응률을 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.

$$\bar{\tau}(\text{upper threshold}) = \frac{1}{1 + e^{-0.5}} \quad (7)$$

$$\underline{\tau}(\text{lower threshold}) = \frac{1}{1 + e^{0.5}} \quad (8)$$

단계 5 : 만약 열등한 로봇이 우수한 로봇을 만나면 각 전략의 농도값을 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.

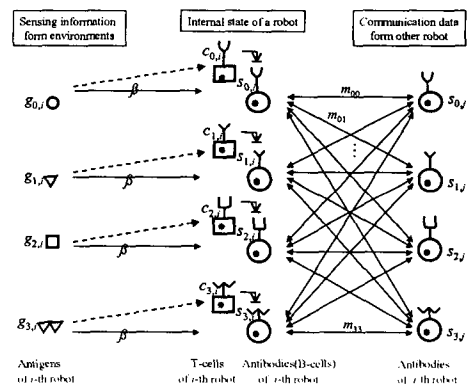


그림 2. T 세포 및 B 세포 모델을 포함한 면역 네트워크 모델.

Fig. 2. Proposed immune network model including the T-cell and the B-cell model.

2.2 파라미터 설정

항체에 대한 항원의 친화성(자극값)은 일정시간동안 (T_c : 항원 평가시간) 감지된 작업의 비율에 따라 그림 2와 같이 정의하였고, (3)에서 나오는 항체들 간의 친화성(상호 자극 계수)은 표 3과 같이 설정하였다. 그림 3은 항원과 항체와의 관계에 따라 시행착오를 거쳐 결정하였으며, 기본적으로 작업의 밀도가 높으면 로봇이 모이고 밀도가 적으면 흩어져서 작업을 찾을 수 있도록 설정하였다. 귀항에 대한 항체 g_3 는 물체가 전혀 감지되지 않을 때 나타나야 하기 때문에 T_c 동안 물체가 감지되지 않을 때 1의 값을

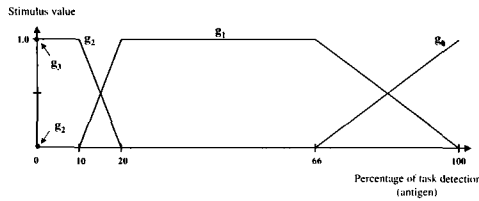


그림 3. 항원과 항체의 자극 함수(g_i).

Fig. 3. Stimulus function of antigen to antibody(g_i).

표 3. 상호 자극 계수(m_{ij}).

Table 3. Mutual stimulus coefficient(m_{ij}).

로봇 i \ 로봇 j	집합 (Ab0)	탐색 (Ab1)	확산 (Ab2)	귀향 (Ab3)
집합	1	-0.4	-0.2	-0.4
탐색	-0.4	1	-0.4	-0.2
확산	-0.2	-0.4	1	-0.4
귀향	-0.4	-0.2	-0.4	1

값도록 설정하였다. 이때 흩어지기 위한 항체 g_2 는 0의 값을 갖는다.

V. 시뮬레이션 결과

B-세포, T-세포 및 클론 선택을 모델링 한 제안한 군면역 알고리즘을 평가하기 위하여 작업의 공급 없이 주어진 작업을 수행하는 경우와 중간에 작업을 재 공급해 주었을 때의 두 가지 조건의 실험을 행하였다. 각 조건에 대하여 B-세포 모델을 이용하였을 경우(참고문헌 [4])와 B-세포 및 T-세포 모델을 이용하였을 경우에 대하여 비교 실험을 수행하였다. 이때 두 경우 모두 클론 복제 메커니즘을 병행하여 사용하였다. 기존의 연구에서 B-세포 모델은 환경이 변하지 않는 경우에 좋은 성능을 나타내었다. 그러나 환경이 변화하는 경우에는 일단 한가지 환경에 적응하면 항체의 자극값($S_i(t)$)이 너무 커지거나 작아져 새로운 환경에 잘 대처하지 못한다는 단점이 있었다.

제안된 알고리즘을 자율분산로봇 시스템에 적용하기 위한 시뮬레이션 조건은 다음과 같다.

10[m]×10[m]의 작업공간에 직경이 50[mm]인 50대의 로봇이 흩어져 있으며, 시스템의 목적은 작업영역에 흩어져 있는 500개의 작업을 찾아 수행하는 것이다. 작업의 밀

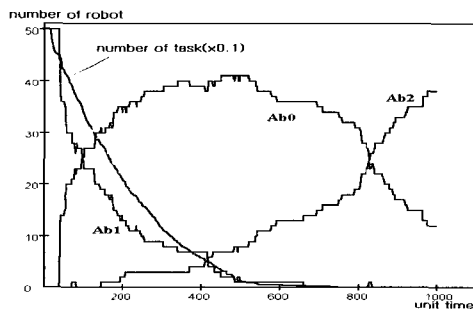


그림 4. 실험결과 1-1 : B-세포 모델.

Fig. 4. Experimental result 1-1 : B-cell model.

도를 계산하기 위한 항원의 평가시간(T_c)을 40 time으로 설정하였다. 이때 로봇은 1 time 동안 방향을 바꾸거나 25mm 를 이동할 수 있으며 1회의 통신을 할 수 있다. 작업 하나의 수행시간은 15 time 이다. 그리고 나머지 파라미터는 $\alpha = 0.3$, $\beta = 0.05$, $k_i = 0.002$ 로 설정하였다. 그리고 로봇이 Ab0를 선택하였다면 이것은 집합 전략을 택한 것이며 Ab1, Ab2, Ab3은 각각 탐색, 확산, 귀향의 행동 전략을 선택한 것이 된다.

그림 4는 B-세포 모델만 이용했을 때의 실험 결과(실험 1-1)이다. 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 효과적이거나 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.

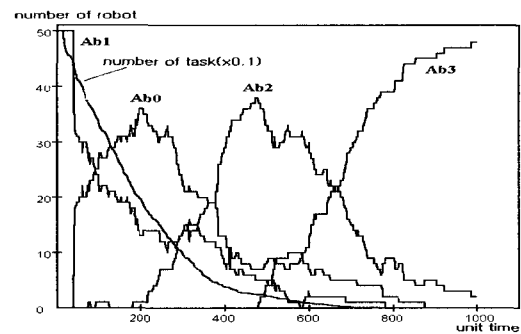


그림 5. 실험결과 1-2 : B-세포 및 T-세포 모델.

Fig. 5. Experimental result 1-2 : B-cell and T-cell model.

그림 5는 B-세포와 T-세포 모델을 함께 이용했을 때의 실험 결과(실험 1-2)이다. 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 뛰어난 것을 알 수 있다. B-세포 및 T-세포 모델에 기반한 면역 네트워크 시스템을 통일시켜 주어진 환경에 대한 최적의 군 전략을 선택하도록 하는 역할을 한다. 또한 환경이 변화하면 로봇의 항체의 농도가 초기 상태로 빨리 회복함으로써 환경에 적응하는 시간을 단축시킨다. 따라서 작업의 밀도가 점점 낮아짐에 따라 군행동은 탐색(Ab1)

→ 집합(Ab0) → 확산(Ab2) → 귀향(Ab3)의 순서로 나타난다.

그림 6 및 그림 7은 좀더 환경 변화가 심한 경우의 예로써 일정시간 이후에 작업을 재 공급해주어 작업의 수가 늘어난 경우에 대한 실험결과(실험 2-1, 2-2)이다. 그림 6은 B-세포 모델만 사용한 경우로 앞 500 time 동안에는 그림 4의 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 7은 B-세포 모델과 T-세포 모델을 모두 이용했을 때의 실험결과이다. 작업 밀도에 따라서 로봇들이 선택하는 전략의 순서가 집합(Ab0) → 확산(Ab2) → 집합(Ab0) → 확산(Ab2)의 순서로 바뀌어 감을 알 수 있다.

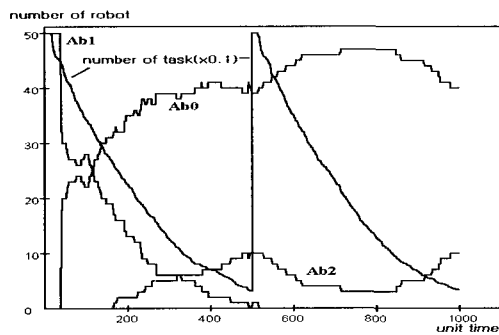


그림 6. 실험결과 2-1 : B-세포 모델.
Fig. 6. Experimental result 2-1 : B-cell model.

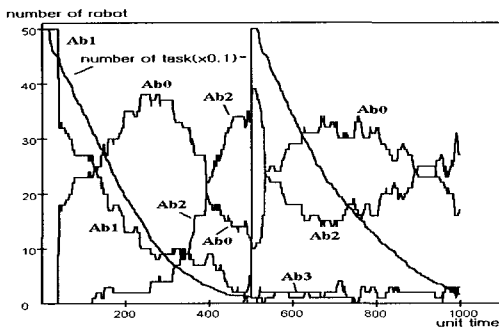


그림 7. 실험결과 2-2 : B-세포 및 T-세포 모델.
Fig. 7. Experimental result 2-2 : B-cell and T-cell model.

이상의 실험 결과를 통하여 T-세포 모델이 추가된 면역 알고리즘이 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 나가는데 대한 판단을 하기 위함이었다. 그러므로 로봇이 수행한 작업의 수는 모든 경우에 있어서 거의 비슷하게 감소하고 있다. 실제의 적용문제에 있어서 로봇

의 적응능력이 바로 시스템 성능의 개선으로 나타난다면 제안한 알고리즘은 큰 효과를 거둘 수 있을 것으로 생각된다.

VI. 결론

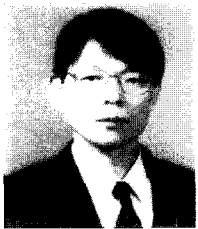
과학기술이 발전함에 따라 로봇의 기술도 점점 발전해 가고 있으며 그 적용분야도 점점 넓어지고 있다. 따라서 앞으로는 다수의 자율로봇을 적용하는 분야가 많이 생겨날 것으로 예상된다. 예를 들면 사람이 접근하기 어려운 넓은 지역(강, 산, 들판, 화산, 해저, 우주, 지하 등)에서 오염물질의 제거, 자원 또는 자료 채취, 지뢰제거 등의 일이 있을 수 있고, 다수의 소형 마이크로 로봇에 의한 오염물질의 정화 등 그 응용분야는 무궁무진하다. 이러한 시스템에서 로봇 집단의 효율적인 의견 조정 및 관리를 위해서는 자율적인 로봇의 판단과 집단 전체의 의견을 조정할 수 있는 알고리즘이 필요하다.

본 논문에서는 이러한 자율분산로봇 시스템의 목적을 달성하기 위하여 면역 시스템에 기반한 군제어 알고리즘을 제안하였다. 자율분산로봇 시스템과 면역 시스템의 유사성을 찾아 이것을 자율분산로봇 시스템에서 군행동 전략을 결정하는데 적용하였다. 제안한 알고리즘을 통하여 군의 우세한 전략이 시스템의 모든 로봇에 의하여 선택됨으로써 군행동이 발현될 수 있는 조건을 만족하도록 할 수 있었다. 이것은 성공적인 클론이 선택되어 증식하는 클론 선택과 항체의 상호작용을 모델한 면역네트워크에 기반을 둔 것이다. 또한 변화하는 환경에서 로봇의 적응 능력을 개선하기 위하여 면역네트워크의 T-세포 모델 방정식을 제안하였고 기존의 방법과 비교함으로써 그 유효성을 입증하였다.

참고문헌

- [1] A. Asama et. al. eds, *Distributed Autonomous Robotic Systems I, II*, Springer-Verlag, 1994, 1996.
- [2] 이동욱, 심귀보, "자율이동로봇군의 협조행동을 위한 통신시스템의 개발," 대한전자공학회 논문지, 제34권, S편, 제3호, pp. 33-45, 1997. 3.
- [3] 이동욱, 심귀보, "강화학습과 분산유전알고리즘을 이용한 자율이동로봇군의 행동학습 및 진화," 대한전자공학회 논문지, 제34권, S편, 제8호, pp. 56-64, 1997. 8.
- [4] 이동욱, 심귀보, "인공면역계 기반의 자율이동로봇군의 협조행동전략 결정," 대한전자공학회 논문지, 제35권 S편 제3호, pp. 102-109, 1998. 3.
- [5] I. Roitt, J. Brostoff, and D. Male, *Immunology, 4th edition*, Mosby, 1996.
- [6] R. A. Wallace, G. P. Sanders, and R. J. Ferl, *BIOLOGY : The Science of Life, 3rd eds.*, HarperCollins Publishers Inc., 1991.
- [7] N. K. Jerne, "Idiotopic network and other preconceived ideas," *Immunological Rev.*, vol. 79, pp. 5-24, 1984.
- [8] Y. Ishida and N. Adachi, "An immune algorithm for

- multiagent : Application to adaptive noise neutralization," *Proc. of IROS 96*, pp. 1739-1746, 1996.
- [9] S. Forrest, B. Javornik, R. E. Smith, and A. S. Perelson, "Using genetic algorithms to explore pattern recognition in the immune system," *Evolutionary Computation*, vol. 1, no. 3, pp. 191-211, 1993.
- [10] A. Ishiguro, Y. Watanabe, and Y. Uchikawa, "An immunological approach to dynamic behavior control for autonomous mobile robots," *Proc. of IROS 95*, pp. 495-500, 1995.
- [11] A. Ishiguro, Y. Shirai, T. Kendo, and Y. Uchikawa, "Immunoid : An architecture for behavior arbitration based on the immune networks," *Proc. of IROS 96*, pp. 1730-1738, 1996.
- [12] H. Bersini and F. J. Varela, "The immune recruitment mechanism: A selective evolutionary strategy," *Proc. of 4th Int. Conf. on Genetic Algorithms*, pp. 520-526, 1991.
- [13] 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.
- [14] P. D'haeseleer, S. Forrest, and P. Helman, "An immunological approach to change detection : Algorithms, analysis and implications," *Proc. of IEEE Symp. on Security and Privacy*, 1996.
- [15] J. D. Farmer, N. H. Packard, and A. S. Perelson, "The immune system, adaptation, and machine learning," *Physica 22-D*, pp. 184-204, 1986.



심 귀 보

1984년 중앙대 전자공학과 졸업. 동대학원 석사(1986), The University of Tokyo 박사(1990). 1991년~현재 중앙대학교 전자전기공학부 교수. 관심분야는 인공지능, 진화연산, 지능로봇시스템, 뉴로-퍼지 및 소프트 컴퓨팅, 자율분산시스템, 로봇 비전, 진화하는 하드웨어, 인공지능시스템 등.



이 동 옥

1996년 중앙대 제어계측공학과 졸업. 동대학원 석사(1998), 동대학 박사과정(현재). 관심분야는 인공지능, 인공두뇌, 인공지능역시스템, 자율분산시스템, 가상현실 등.



신 상 준

2000년 중앙대 제어계측공학과 졸업. 동대학원 석사과정(현재), 관심분야는 인공지능역시스템, 원격제어시스템 등.