

자율이동로봇군의 협조전략과 군행동의 실현을 위한 면역시스템의 모델링

An Immune System Modeling for Realization of Cooperative Strategies and Group Behavior in Collective Autonomous Mobile Robots

이 동 욱*, 심 귀 보

로보틱스 및 지능정보시스템 연구실
중앙대학교 공과대학 제어계측공학과

Tel : 02)820-5319, Fax : 02)817-0553 E-mail : {dwlee, kbsim}@cau.ac.kr

Dong-Wook Lee and Kwee-Bo Sim

Robotics and Intelligent Information System Laboratory
Dept. of Control and Instrumentation Engineering, Chung-Ang University

Tel : +82-2-820-5319, Fax : +82-2-817-0553

E-mail : {dwlee, kbsim}@cau.ac.kr, URL : http://rics.cie.cau.ac.kr

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). 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 cell, each environmental condition as an antigen, a behavior strategy as an antibody and control parameter as a T-cell 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. By T-cell modeling, adaptation ability of robot is enhanced in dynamic environments.

1. 서 론

다수의 로봇이 자율적으로 협조하여 시스템의 목적을 달성하는 시스템을 자율분산로봇시스템이라고 한다^[1~4]. 자율분산로봇시스템은 개개의 로봇의 상호작용에 의해 새로운 시스템의 능력을 발휘할 수 있다. 최근 인공생명 기법에 의하여 개미와 같이 여러 대의 자율이동로봇이 복잡한 일을 협조적으로 처리하는 시스템이 연구중에 있다^[1~8]. 이와 같은 시스템에서는 다수의 로봇에 의한 장애물 회피나 자재운반 탐색 등의 작업을 수행할 수 있을 것이다. 이와 같은 자율이동로봇으로 구성되는 자율분산시스템의 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 시스템

이 필요하다. 본 논문에서는 자율이동로봇군의 군행동 실현을 위한 행동전략의 결정을 위한 알고리즘을 개발하는데 있어서 생체 면역시스템의 네트워크 성질에 주목하였다. 면역계^[9,10]는 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 특징들이 적용된 사례를 살펴보면 다음과 같다.

면역계가 외부의 적을 인식하는 기능을 이용한 적응 잡음 제거기 구성^[11], 외부의 적을 기억하고 학습하는 기능을 이용한 적응 제어 시스템 설계^[12], T세포가 자신의 세포로부터 감염된 세포를 구별해 내는 능력을 이용한 패턴인식^[13], 미지의 동적인 환경에서 자율 분산계로써 전체의 조화를 유지하는 기능을 이용한 자율 분산 로봇 시스템의 행동전략 결정과 창발행동 실현^[14,15], 항체의 친화성을 이용한 최적화 알고리즘^[16], 클론

복제 메커니즘을 이용한 군 로봇의 자기조직화^[17], 면역 네트워크의 자기·비자기의 상호인식 메커니즘을 이용한 센서의 고장진단과 플랜트 시스템의 고장 원인 검출^[18] 등이다.

특히 면역계를 로봇의 제어에 적용한 사례는 Ishiguro^[14,15]의 면역 네트워크 가설에 의한 로봇의 행동제어기와 Mitsumoto^[17]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 줌으로써 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 자율이동로봇 군의 행동전략을 결정하기 위하여 면역네트워크 가설과 B-세포의 클론선택을 적용한 방법을 제안한다. 특히 면역네트워크에서 주된 역할을 담당하는 B-세포와 보조적인 역할을 담당하는 T-세포를 함께 모델링 함으로써 군의 행동 결정과 환경에 대한 빠른 적응성을 가질 수 있도록 하였다. 이 방법은 작업을 수행하면서 바로 통신을 하여 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 제한한 알고리즘을 통하여 시스템 전체에서 우세한 전략으로 통일되며 군행동이 발현될 수 있는 조건을 만든다.

II. 면역시스템의 모델링

2.1 면역시스템

생체의 방어체계인 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. 면역계는 생물학적인 진화와 비슷한 진화 메커니즘에 의해서 학습을 수행한다. 따라서 면역계는 순수 학문적인 흥미뿐만 아니라 적용 계산에 대한 응용 가능성 때문에 인공지능 연구자들에게는 매우 흥미 있는 분야이다. 면역계는 거의 모든 외부의 세포나 분자들을 인식할 수 있다. 그러기 위해서는 자신의 체내에서 만들어지고 순환하는 세포와 분자들을 외부의 것과 구별해야 한다. 면역계는 10^{16} 정도의 다른 외부 분자들을 인식할 수 있다고 추정되는데 이것은 패턴 인식의 관점에서 매우 놀라운 숫자이다. 특히 인간의 유전자가 약 10^5 종류의 면역계의 구성요소를 암호화할 수 있다는 것과 면역계가 중앙의 제어 기관이 없이 온몸에 걸쳐 분산되어 있다는 것(자율분산시스템)을 고려할 때 이는 매우 놀라운 사실이다. 면역계를 구성하는 기본 요소는 두 가지 형태의 림프구이다. 이

는 B 세포(B 림프구)와 T세포(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, 면역계는 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.

2.2 면역시스템 모델링

면역학자인 Jerne^[19]는 이와 같은 항체 상호간의 자극 및 억제 관계에 의한 면역네트워크 가설(idiotopic network hypothesis)을 제안하였고 Farmer^[20]는 Jerne의 가설에 대한 동적 방정식을 제안하였다. 그러나 이 방정식은 항원 및 B-세포(항체)와의 관계만을 모델화 한 식으로서 본 논문에서는 면역계에서 중요한 역할을 하는 보조 T-세포 및 억제 T-세포를 추가로 모델화 한 (1)~(3)식을 제안하였다.

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

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

$$c_i(t) = \eta(1 - g_i(t)) S_i(t) \quad (3)$$

단, $S_i(t)$ 는 항체 i 의 자극값, $s_i(t)$ 는 항체 i 의 농도값, $c_i(t)$ 는 항체 i 에 영향을 주는 T-세포의 농도, γ_{ij} 는 항체 i 와 항체 j 의 상호 자극계수, g_i 는 항원과 항체 i 의 친화성, α, β, η 는 상수값이다.

(3)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 (1)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 면역계에서 T-세포는 항원의 침투 초기에 B-세포를 활성화하는데 도움을 주고(보조 T-세포) 항원이 퇴치되었을 때 더 이상 B-세포의 증식을 억제(억제 T-세포)해 시스템을 원상복귀를 빠르게 한다. T세포의 모델을 첨가한 이유는 한

종류의 항원이 퇴치되었을 때 이전에 증가한 항체의 농도를 빨리 원상태로 회복함으로써 새로운 환경에 빨리 대응할 수 있도록 하기 위함이다. 이 모델화 방법은 실제의 면역시스템의 동작 원리에 더욱 근접하다.

III. 면역적 군제어 알고리즘

본 연구에서는 자율분산로봇시스템의 군행동 제어를 하기 위하여 면역계를 기반으로 한 자율이동로봇군의 의견조정 시스템을 개발하였다. 일반적으로 주어진 목적달성을 위한 자율분산로봇시스템의 실행은 군의 배치(군행동) → 작업수행 → 환경변화 감지 → 의견조정 및 군제어 → 군행동 ... 등의 과정을 거친다. 이 과정을 수행하기 위하여 3.1절에서 주어진 문제를 적용하기 위한 자율이동로봇의 군행동을 모델화 하고 3.2절에서 군행동 제어를 위한 방법을 설명하며 3.3절에서 면역계의 모델링에 의한 군의 의사 결정 알고리즘을 제안한다. (본 알고리즘의 일부는 기존의 연구결과(참고문헌 [4])와 동일하여 공통되는 부분을 생략하였다.)

3.1 자율이동로봇의 군행동 모델화

본 논문에서는 생체의 자율분산시스템인 면역계와 자율분산로봇시스템의 유사점을 찾아 군로봇을 제어하는 방법을 개발한다. 표 1은 면역계 기반의 군행동 제어 알고리즘을 개발하기 위하여 자율분산시스템과 면역계의 대응관계를 나타낸 표이다. 제안한 알고리즘을 적용하기 위하여 주어진 문제에 대하여 면역계의 항원과 항체를 정의함으로써 군행동을 모델화 한다. 항원은 로봇이 처할 수 있는 주변환경으로 항체는 그에 대응되는 전략으로 정의한다(군행동 예는 [4]참조).

표 1. 자율분산로봇시스템과 면역시스템의 대응관계

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

3.2 군행동 제어 방법

생체의 면역계는 클론 선택 과정 및 항체(B-세포)간의 네트워크 관계에 의하여 유지 및 조절된다. 클론 선택 과정은 침입한 항원과 친화성이 높은 항체들이 빨리 증식하여 그 수를 늘이는 과정이다. 이것은 자극을 많이 받은 클론이 분열하여 자신과 같은 개체를 복제함으로써 실행된다. 자율이동로봇군에서는 작업의 수행성적이 좋은 우수한 로봇이 다른 로봇에게 자신의 행동전략을 복제해 줌으로서 구현할 수 있다. 면역 네트

워크는 면역세포간의 정밀한 상호 조정과정에 의하여 침입한 항원에 대하여 적합한 항체를 빠르게 발달시키고 항원을 퇴치한 후에 빨리 원상태로 복구하게 하는 기능을 가지고 있다. 자율이동로봇군에서 각 로봇은 면역세포의 파라미터를 가지고 통신을 통하여 다른 로봇과 상호작용함으로써 네트워크가 구현된다. 이때 각 로봇은 매 순간 네트워크의 다이내믹스를 구해야 한다.

3.3 면역계의 모델링에 의한 군의 의사결정 시스템

본 절에서는 앞절에서 제안한 군행동의 모델화 및 군의 군행동 제어방법을 토대로한 군의 의사결정 알고리즘을 설명한다.

[군면역 알고리즘]

[단계 1] 로봇의 항체(antibody)의 자극값(S_i) 및 농도값(s_i)과 T-세포의 농도값(c_i)을 0.5로 초기화한다.

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

단, N 은 항체의 종류이다.

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 기본전략을 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 (4), (2), (3)식에 의하여 갱신된다. (4)식에서 우변의 첫 번째 항은 과거의 항체의 자극값을 나타내고, 두 번째 항은 다른 항체에 의한 자극 또는 억제 항, 세 번째 항은 T-세포의 자극 및 억제 항, 네 번째 항은 항원에 의한 자극항 다섯 번째 항은 항체의 자연소멸항을 각각 나타낸다. 이때 (1)식의 자극항과 억제항인 두 번째 및 세 번째 항은 γ_{ij} 가 양 또는 음의 값을 가지기 때문에 (4)식에서 하나의 항으로서 합쳐졌다.

$$S_i(t) = S_i(t-1) + \left(\alpha \frac{\sum_{j=0}^{N-1} \gamma_{ij} s_j(t-1)}{N} + \beta g_i - c_i(t-1) - k_i \right) s_i(t) \quad (4)$$

단, γ_{ij} 는 항체 i 와 항체 j 의 상호 자극계수를 나타낸다.

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{x}) 이하가 되면, 이 로봇은 열등한 로봇이 된다.

→ 이 로봇은 우수한 로봇을 만났을 경우 전략을 전달받을 수 있다.

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

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

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

[단계 5] $t = t + 1$, [단계 2]로 간다.

IV. 결론

본 논문에서는 면역계의 B-세포와 T-세포의 네트워크 성질을 모델링 한 면역네트워크 방정식을 제안하고, 이것과 클론 선택방법을 모델링한 자율이동로봇군의 의견 조정 알고리즘을 제안하였다. 본 알고리즘은 각각의 로봇의 환경에 대한 인식결과를 바탕으로 다른 로봇과 통신을 통하여 의견을 주고받음으로써(상호 자극과 억제)를 가한다) 우세한 전략이 군 전체로 퍼져 군의 의견이 통일되는 알고리즘이다. 본 연구의 1차 결과(참고문헌 [4])에서 나타난 문제점인 한 전략이 선택된 후 또 다시 환경이 변화하였을 때 새로운 환경에 대한 적응 속도가 느린 점을 보완하기 위하여 보조 T세포 및 억제 T-세포를 모델링 하였다. 제안한 알고리즘은 작업공간에 퍼져있는 작업을 찾아서 수행하는 문제에서 작업 조건에 따라 빠르게 최적의 군행동으로 전략을 바꾸는 것이 입증되었다. 현재 시뮬레이터의 미완으로 시뮬레이션을 계속 진행 중이며, 차후로 본 연구결과가 실제적인 적용 문제에서 어느 정도의 효율성을 보이는 가에 대하여 검토할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 특정기초 연구비(96-01-02-13-01-3) 지원으로 수행되었으며 지원에 감사를 드립니다.

V. 참고문헌

[1] A. Asama et. al. eds. *Distributed Autonomous Robotic Systems I, II*. Springer-Verlag, 1994, 1996.
 [2] 이동욱, 심귀보. "강화학습과 분산유전알고리즘을 이용한 자율이동로봇군의 행동학습 및 진화." *대한전자공학회 논문지*, 제34호, S권, 제8호, pp. 56-64, 1997. 8.
 [3] 이동욱, 심귀보. "자율이동로봇군의 협조행동을 위한 통신시스템의 개발." *대한전자공학회 논문지*, 제34권, S권, 제3호, pp. 33-45, 1997. 3.

[4] 이동욱, 심귀보. "인공면역계 기반의 자율이동로봇군의 협조행동전략 결정." *대한전자공학회 논문지*, 제35권, S권, 제3호, pp. 102-109, 1998. 3.
 [5] 김장현, 공성근. "클러스터링에 의한 자율이동로봇의 정렬알고리즘 구현." *한국퍼지 및 지능시스템 학회 '97 추계학술대회 논문집*, pp. 79-82, 1997.
 [6] 민석기, 세갈욱, 강훈. "자율이동로봇군의 생명체 행동." *한국퍼지 및 지능시스템 학회 '97 추계학술대회 논문집*, pp. 83-86, 1997.
 [7] B.T. Zhang, Y.J. Hong. "Evolution of Herding Behavior of Multiple Autonomous Mobile robots." *Proc. of the International Symposium on Artificial Life and Robotics III*, vol. 1, pp. 166-169, 1998. 1
 [8] H.B. Jun, K.B. Sim. "Cooperative Behavior and Control of Collective Autonomous Mobile Robots using Reinforcement Genetic Programming." *Proc. of the International Symposium on Artificial Life and Robotics III*, vol. 2, pp. 454-457, 1998. 1.
 [9] I. Roitt, J. Brostoff, D. Male, *Immunology 4th edition*, Mosby, 1996.
 [10] R.A. Wallace, G.P. Sanders, R. J. Ferl, *BIOLOGY : The Science of Life 3rd eds.*, HarperCollins Publishers Inc., 1991.(번역서 : 이광웅 외 7인 공역, 생물학 -생명의 과학, 을유문화사, 1993.)
 [11] Y. Ishida, N. Adachi. "An Immune Algorithm for Multiagent : Application to Adaptive Noise Neutralization," *Proc. of IROS 96*, pp. 1739- 1746, 1996.
 [12] 원경재, 김성현, 진홍태, "면역화된 귀환 신경망을 이용한 로봇 매니플레이터의 제어 시스템 설계," *한국퍼지 및 지능시스템 학회 '97 추계학술대회 논문집*, pp. 263-266, 1997.
 [13] S. Forrest, B Javornik, R.E. Smith, A.S. Perelson. "Using Genetic Algorithms to Explore Pattern Recognition in the Immune System." *Evolutionary Computation*, vol. 1, no. 3, pp. 191-211, 1993.
 [14] 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.
 [15] 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.
 [16] H. Bersini, F.J. Varela. "The Immune Recruitment Mechanism: A Selective Evolutionary Strategy," *Proc. of 4th Int. Conf. on Genetic Algorithms*, pp. 520-526, 1991.
 [17] 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.
 [18] P. D'haeseleer, S. Forrest, P. Helman. "An Immunological Approach to Change Detection : Algorithms, Analysis and Implications." *Proc. of IEEE Symp. on Security and Privacy*, 1996.
 [19] N.K. Jerne. "Idiotopic Network and Other Preconceived Ideas." *Immunological Rev.*, vol. 79, pp. 5-24, 1984.
 [20] J.D. Farmer, N.H. Packard, and A.S.Perelson. "The immune system, adaptation, and machine learning." *Physica 22-D*, pp. 184-204, 1986.