

인공면역네트워크에 의한 자율이동로봇군의 동적 행동 제어

Dynamic Behavior Control of a Collective Autonomous Mobile Robots Using Artificial Immune Networks

이 동 옥, 심 귀 보

중앙대학교 제어계측공학과 로보틱스 및 지능정보시스템 연구실
Tel : 820-5319; Fax : 817-0553; E-mail : dwlee@cau.ac.kr, kbsim@cau.ac.kr

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.

Keyword Distributed Autonomous Robot System, Immune System, B cell, Collective Behavior

1. 서론

다수의 로봇이 자율적으로 협조하여 시스템의 목적을 달성하는 시스템을 자율분산로봇시스템이라고 한다^{[1][2]}. 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 문제가 많이 생겨나고 있다. 따라서 최근의 연구는 자연계의 복잡 적응 시스템을 모델화하여 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 잡히고부터 많은 연구자의 관심을 불러일으키고 있다.

본 논문에서는 자율이동로봇군의 군행동 실현을 위한 행동전략의 결정을 위한 알고리즘을 개발하는데 있어서 생체 면역시스템의 네트워크 성질에 주목하였다. 면역계는 외부로부터 침입한 물질에 대한 2차 방어 수단으로써, 생물체는 진화의 과정을 통하여 고도로 발달한 생체 방어수단인 면역계를 발달시켜왔다. 면역계는 외적용 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^[3-6]. 본 논문에서는 동적인 환경에서 자율이동로봇군의 행동전략을 결정하기 위한 면역계의 적용방법을 제안한다. 국소적 정보를 가지고 판단한 각 로봇의 정보는 제한한 알고리즘을 통하여 시스템 전체에서 우세한 전략으로 통일되며 군행동이 발현될 수 있는 조건을 만든다. 시뮬레이션은 저자들이 개발한 센싱 및 통신시스템을 통하여 실현되었다^[7].

2. 면역계의 특징

2.1 면역계의 구성요소

면역계는 생체로 침투한 외부 물질을 제거하는 방어 시스템이다. 면역계를 구성하는 기본요소는 두 가지 형태의 입과구이다. 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 억제 하거나 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.

2.2 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 입과구 중에서 필요한 입과구만을 빠른 속도로 발생시키는 클론 선택(clonal selection)의 과정을 거친다. 클론 선택은 두 가지 방식으로 나타나는데 하나는 항원에 의하여 B 세포가 직접 활성화 되는 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. 낮은 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 동작한다고 생각된다. 물론 항체 상호간 서로 결합하는 것이 아니라 어느 정도의 임계치를 가지고 자극 억제를 합으로써 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, α, β 는 각각 다른 항체 및 항원과의 응답율을 나타내는 파라미터, k_i 는 자연 소멸 계수, N 은 항체 종류의 총 수이다.

3. 면역네트워크에 기반한 군제어 알고리즘

3.1 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 전체로서의 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)
행동 전략	항체(Antibody)
로봇	B세포(B cell)
적합함	자극(Stimulus)
부적합함	억제(Suppression)
우수한 로봇	형질세포(Plasma cell)
열등한 로봇	비활성세포(Inactivated cell)

3.2 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. 면역 반응의 생각은 자율분산로봇시스템의 군전략의 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

시스템의 목적은 모든 로봇이 환경 내에 흩어져 있는 작업을 찾아서 수행하는 것으로 하였다. 이 작업은 환경의 조건에 따라 해야 할 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 변화했을 때 모든 로봇은 조정과정을 거쳐 환경에 맞는 적절한 전략으로 바꾸어 나간다. 이 알고리즘은 면역계의 클론 선택과 면역네트워크 가설에 바탕을 둔 것이다.

항원의 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 간주되고 그에 대한 전략은 항체로 간주된다.

항체의 정의

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

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

제안한 군면역 알고리즘

(각각의 로봇에 대하여)

[Step 1] 모든 행동전략에 대하여 자극값(S_i)과 항체의 농도값(a_i)을 초기화한다.

$$t = 0$$

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

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

단, N 은 행동전략의 개수이다.

[Step 2] 항체의 농도(s_i)가 큰 실행 전략(항체)을 선택한다.(초기에는 기본전략(Ab_1)을 선택한다.)

[Step 3] 한 로봇이 다른 로봇을 만났을 경우 그들은 통신을 통하여 상호 전략에 대한 자극 또는 억제를 하게 된다. 로봇(B 세포)의 자극값(S_i)과 항체의 농도(s_i)는 각각 (3)식과 (4)식에 의하여 계산된다. γ_{ij} 가 양 또는 음의 값을 가지기 때문에 (3)식에서 자극과 억제항은 방정식의 두 번째 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, $i, j = 0, \dots, N-1$, s_j 는 다른 로봇의 항체의 농도, γ_{ij} 는 항체 i 와 항체 j 의 상호 자극계수(표 2), α, β 는 각각 다른 로봇 및 환경과의 반응을 나타내는 파라메타 이다.

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 전달 받을 수 있다.

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

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

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

[Step 5] $t = t + 1$, [Step 2]로 간다.

표 2. 상호 자극계수의 예(γ_{ij})
Table 2. Example of mutual stimulus coefficient(γ_{ij})

로봇 i \ 로봇 j	집합 (Ab_0)	탐색 (Ab_1)	확산 (Ab_2)	귀향 (Ab_3)
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

항체에 대한 항원의 자극값은 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 자극 함수($g_0 \sim g_3$)를 나타낸 그림이다.

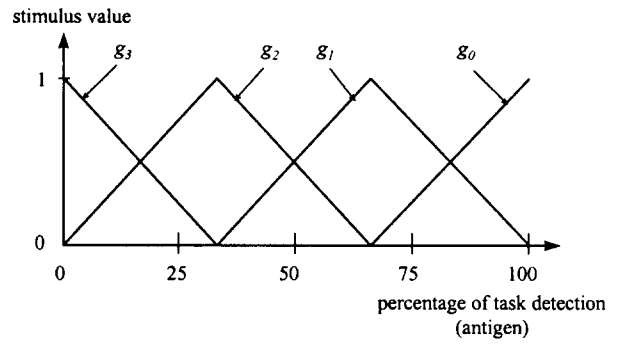


그림 3. 항원의 항체에 대한 자극 함수(g)
Fig. 3 Stimulus function of antigen to antibody(g)

4. 시뮬레이션 결과 및 검토

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

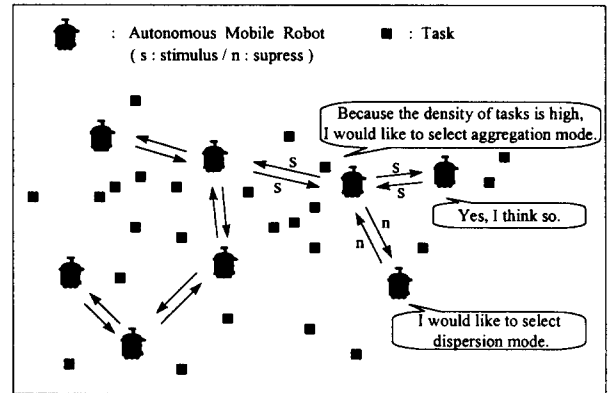
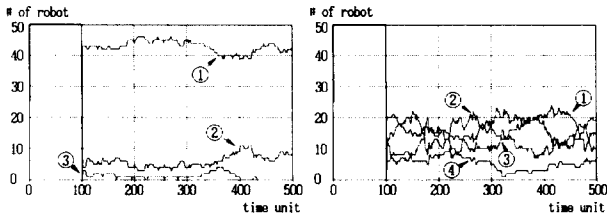


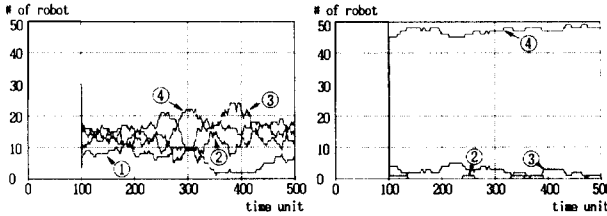
그림 4. 면역계 기반의 자율분산시스템
Fig. 4 DARS based on immune system

제한한 군면역 알고리즘의 유효성을 검증하기 위하여 시뮬레이션 조건을 다음과 같이 설정하였다.

- 로봇의 수 : 50대
- 작업 영역 : 10m×10m
- 로봇의 크기 : 5cm×5cm
- 시스템의 목적 : 널려진 작업을 찾아 수행하는 것.(본 시뮬레이션은 환경이 변하였을 때 어떻게 전략이 결정되는가를 보기 위함이었으며, 로봇이 실제로 작업을 수행하지는 않았다.)
- 통신 반경 : 75 cm
- 센싱 반경 : 32.5 cm
- 파라메타 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

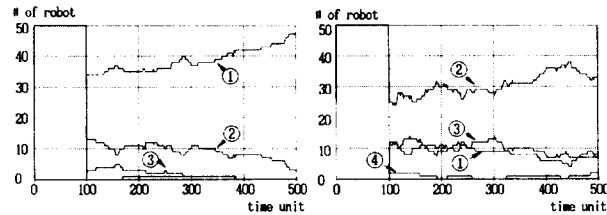


(a) 작업의 수가 500개 (a) # of tasks is 200
(b) 작업의 수가 200개 (b) # of tasks is 200

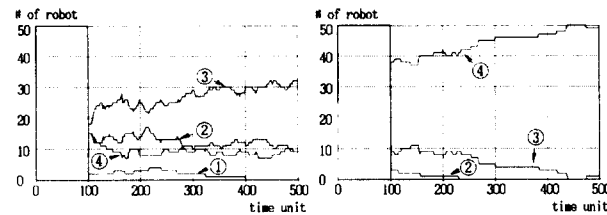


(c) 작업의 수가 100개 (c) # of tasks is 100
(d) 작업의 수가 10개 (d) # of tasks is 10

그림 5. 면역알고리즘을 사용하지 않은 결과
Fig. 5 Simulation results without immune algorithm



(a) 작업의 수가 500개 (a) # of tasks is 500
(b) 작업의 수가 200개 (b) # of tasks is 200



(c) 작업의 수가 100개 (c) # of tasks is 100
(d) 작업의 수가 10개 (d) # of tasks is 10

그림 6. 면역알고리즘을 사용한 결과
Fig. 6 Simulation results with immune algorithm

그림 5는 제한한 군면역 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 알고리즘을 사용하여 로봇 상호관계에 의하여 행동을 결정할 때 각 전략에 대한 로봇 수의 변화를 나타낸 그림이다. 그림에서 시간이 지남에 따라 우수한 전략이 군전체로 퍼져 대부분의 로봇이 우수한 전략을 택하게 됨을 알 수 있다. 그림 6-(a)는 전략 1(Ab_0)이 군전체로 채택되었고 나머지의 경우도 군 전략으로서 각각 전략 2(Ab_1), 3(Ab_2), 4(Ab_3)가 선택된 경우이다. 따라서 제안한 군면역 알고리즘이 자율이동로봇군의 군 전략을 결정하는데 적용되었음을 알 수 있다.

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 고려

하지 않았다. 그러나 이러한 구성요소는 실제로 면역시스템에서 중요한 역할을 하고 있다. 따라서 이 요소의 비모델링에 의하여 갑작스런 환경의 변화가 발생했을 경우 이전의 전략과 자극값의 영향에 의해 빠른 적응성을 가지지 못하는 단점이 발생할 수가 있다. 현재 대식세포와 T 세포 등을 고려한 적응 모델을 계속 연구 중이다.

5. 결론

본 논문에서는 자율분산로봇시스템의 목적을 달성하기 위하여 면역계를 기반으로 한 군행동 결정 알고리즘을 제안하였다. 자율분산로봇시스템과 면역계의 유사점을 찾아 자율분산로봇시스템의 군전략을 결정하는데 적용하였다. 본 알고리즘의 적용에 의하여 우수한 전략이 시스템의 모든 로봇 의하여 선택됨으로서 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 제한한 면역시스템은 면역계에 대한 충실한 모델을 바탕으로 개선의 여지가 많다고 생각한다.

감사의 글

본 논문은 정보통신부 대학기초연구(과제명 : 인공생명의 실현과 정보통신분야의 응용에 관한 연구)의 지원에 의한 결과임

참고문헌

- [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] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] Y. Ishida, N. Adachi, "An Immune Algorithm for Multiagent : Application to Adaptive Noise Neutralization," *Proc. of IROS 96*, pp. 1739-1746, 1996.
- [7] 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.
- [8] I. Roitt, J. Brostoff, D. Male, *Immunology 4th edition*, Mosby, 1996.
- [9] N.K. Jerne, "Idiotypic 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.