

인공면역체계와 기계학습

한국과학기술원 | 하기룡 · 이도현*

1. 서론

오랫동안 과학자들은 자연현상 및 생명현상을 이해하기 위해 부단히 노력해 왔고 이를 설명하는 수많은 이론들을 만들어 왔다. 현상들을 단순히 이해하는 데서 더 나아가 자연현상에 대한 이해로부터 얻어진 지식들을 새로운 분야에 활용하기도 하였다. 이와 같은 자연과학의 기본접근 방식은 전산학의 발전과정에 있어서도 매우 유사하게 나타난다. **전산학은 그 특장상 자연현상을 모델링 하고 시뮬레이션 하는데 중요한 역할을 함으로서 해당 현상이 가지는 원리에 대해서 좀 더 나은 이해를 제공하는데 기여를 하였으며, 이와 동시에 인공신경망, 진화 알고리즘, 세포오토마타(cellular automata)와 같이 자연계, 특히 생물학적인 원리로부터 많은 영감을 얻어 오기도 하였다.**

본문에서 소개하고자 하는 **인공면역시스템(artificial immune system)** 역시 생물학적인 현상인 면역체계의 동작원리를 이해하고 이를 모사한 계산 방식이다. 면역계(immune system)는 외부의 물질로부터 신체를 방어하기 위한 시스템으로서 기본적으로 자기 자신과 외부 물질을 구분하는 능력과 다양한 외부 물질에 효과적으로 대응하기 위한 적응과정을 바탕으로 동작하고 있다. 이러한 면역계로부터 생각해 볼 수 있는 특징은 크게 다음과 같다.

1) 패턴 인식

면역계를 구성하는 세포와 분자들은 각자 나름대로의 인식 체계를 가지고 동작한다. 예를 들어 외부 물질을 인식하기 위해 거기에 적합화된 수용체를 가지고 있기도 하며, 특정한 단백질과 결합하기 위한 세포 내부 기작을 가지고 있기도 하다.

2) 학습 및 기억

면역계의 분자들을 외부 항원에 대항하기 위해 자신의 형태를 구조적으로 해당 항원에 맞게 변형 시킨

다. 이러한 적응 기작은 섬세한 선별의 과정으로부터 이루어지며 이 과정을 통해 가장 적합하다고 여겨지는 개체는 기억 세포를 통해 장기간 동안 보관된다.

3) 유일성

각 개인은 자신만의 독특한 면역체계를 가지고 있다. 즉, 개인별로 인지할 수 있는 병원균의 종류가 다르며 이에 대한 면역력 또한 다르다.

4) 다양성

수많은 종류의 외부 물질에 대해서 대응할 수 있는 다양한 종류의 항원을 보유 하고 있다.

5) 자치성(Autonomy)

면역체계를 조정하는 중앙관리 역할의 요소는 존재하지 않는다. 즉, 면역계가 유지되는데 있어서 외부의 간섭이나 유지 작업이 따로 존재하지 않으며 자율적으로 병원체를 구분해 나고 제거하며 자체적으로 손상이나 이상동작의 세포들을 치유한다.

이러한 특징을 바탕으로 하는 면역체계에 대한 연구 역시 앞서 말한바와 같이 자연현상 그 자체와 상호호보안적인 관계를 유지하며 발전해 왔다. 즉, 면역체계가 가지는 특징과 동작의 원리를 알아내기 위하여 다양한 모델링 방법들이 제안, 이용되어 왔으며[2][4][5], 반대로 면역체계의 특징을 활용한 새로운 프레임워크를 구현하거나[16] 해당 원리를 기존 응용 분야에 적용하기도 하였다[17][18]. 실제로 위와 같은 특징들은 전산학의 여러 분야 요구되는 주요한 성질들이며 따라서 이러한 특징들을 연산 알고리즘을 비롯한 다양한 방법을 통해 이용되기에 매우 매력적이라 할 수 있다. 특히, **패턴인식을 비롯한 학습 및 기억에 관한 면역체계의 특징은 기계학습에 있어서 주요한 역할을 할 수 있을 것이라 예상할 수 있다.** 이에 우리는 면역체계로부터 영감을 얻은 인공면역시스템에 대해 자세히 소개하고 인공면역시스템과 기계학습에 대해 이야기 하고자 한다.

* 정회원

본 논문은 다음과 같은 순서로 구성되어 있다. 먼저 면역계를 이루는 기본적인 구성에서부터 면역계를 주요한 원리에 대한 생물학적인 배경 지식에 대해서 설명하고자 한다. 이후 3장에서는 이러한 생물학적 원리를 바탕으로 한 인공면역시스템 및 인공면역시스템의 주요 연산 알고리즘들에 대해서 소개 한다. 마지막으로 4장에서는 기계학습에서의 인공면역시스템의 이용에 대해서 말하고자 한다.

2. 생물학적 면역 시스템

자연계에 존재하는 면역 시스템은 외부 감염체에 대해서 빠르고 효과적으로 방어하기 위한 시스템이다. 이러한 면역 시스템은 크게 선천 면역계(*innate immune system*)와 후천 면역계(*adaptive immune system*)의 두 단계의 방어체제로 이루어져 있다. 두 면역 시스템은 모두 기본적으로 백혈구에 의해 유지되는데 선천 면역계의 경우 과립성 백혈구(*granulocyte*)와 대식세포(*macrophage*), 후천 면역계의 경우 림프구(*lymphocyte*)가 주요한 역할을 수행하고 있다.

선천 면역계의 경우 모든 균들에 구분 없이 직접적, 즉각적으로 반응하여 히스타민(*histamine*), 키닌(*kinin*)과 같은 화학 물질 및 백혈구의 일종인 식세포와 자연킬러세포를 이용하여 침입한 미생물을 공격한다. 반면에 후천 면역계의 경우에는 처음 침입한 항원에 대해 기억할 수 있고 다시 침입할 때 특이적으로 반응하여 효과적으로 항원을 제거할 수 있는 항체를 만드는 등 선천면역을 보강하는 역할을 한다. 이러한 특징 때문에 후천 면역계는 획득면역계라는 이름으로 불리기도 한다. 흔히 사용되는 면역의 정의는 이 후천면역을 말하며, 후천면역은 림프조직을 중심으로 림프구들의 활약상으로 정리 될 수 있다. 면역반응이 일어나는 위치와 면역 반응에 참가하는 림프구의 종류에 따라 후천성 면역은 B림프구(*B-cell*)가 항원을 인지한 후 분화되어 항체(*antibody*)를 분비하고 이 항체가 감염된 세균을 제거하는 기능을 일컫는 체액성 면역(*humoral immunity*)과 흉선(*thymus*)에서 생성된 T림프구(*T-cell*)가 항원을 인지하여 림포카인(*lymphokine*)을 분비하거나 직접 감염된 세포를 죽이는 과정인 세포성 면역(*cell-mediated immunity*)으로 나누어진다.

2.1 항원 인식 및 활성화 메커니즘

우리의 몸은 항원(*antigen*)에 의해서 끊임없이 공격당하는데 이러한 항원은 외부 병원균 또는 우리 몸의 분자나 세포로 이루어진 자아항원(*self-antigen*)이

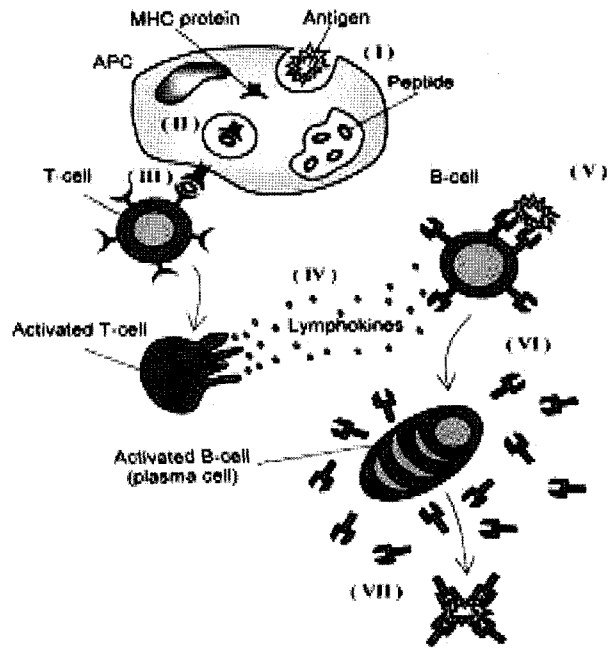


그림 1 항원 인식 및 활성화 과정

다. 아래 그림은 면역계의 항원 인식 과정 및 활성화의 원리를 간단하게 보여준다. 첫 번째 과정은 특화된 APC(*antigen presenting cell*)가 항원을 섭취하는 것을 보여준다. 항원은 펩타이드(*peptide*) 조각들로 이루어져 있고 이러한 펩타이드 조각은 MHC(*major histocompatibility complex*)의 분자와 반응하여 APC의 표면에 MHC/펩타이드 복합체로 나타난다. T림프구는 이러한 복합체를 인식할 수 있는 수용체를 가지고 있고 일단 복합체를 인식하고 나면 T림프구가 활성화되어 림포킨들을 분비함으로써 면역 시스템을 작동시킨다.

이와는 다르게 B림프구는 MHC 분자의 도움 없이도 항원을 인식할 수 있는 수용체를 가지고 있기 때문에 B림프구는 이 수용체를 이용해 특정 항원에 직접 반응한다. 반응이 일어나면 B림프구는 활성화되어 급격히 증식하게 되고 증식된 다량의 개체는 다시 항체를 분비하는 플라즈마 조각들로 나누어진다.

2.2 체액성 면역 / 세포성 면역

림프구는 백혈구의 일종으로 대부분의 시간을 림프계의 기관이나 조직에서 보내며 면역반응을 일으키는 세포다. 다른 혈구세포들과 마찬가지로 림프구 역시 뼈속질의 조혈모세포로부터 유래되었다. 면역계(후천 면역계)의 면역은 이러한 림프구 중 B림프구에 의한 면역반응인 체액성 면역과 T림프구에 의한 면역반응인 세포성 면역으로 나눌 수 있다. 체액성 면역은 우선적으로 체액에 존재하는 바이러스, 박테리아 등에

대한 방어 작용을 한다. 항체는 혈액이나 림프를 통해 감염이 일어나는 곳으로 이동한다. 세포성 면역는 혈액이나 림프를 순환하면서 박테리아나 바이러스에 감염된 세포를 공격한다. T림프구는 다른 백혈구들에 의한 식작용을 간접적으로 활성화 시키며 B림프구의 항체 생산에도 중요한 역할을 한다.

2.3 클로날(Clonal) 선택 원리

면역계는 거의 무제한의 다양한 침입자에 대하여 대항하기 위해, 서로 다른 모양의 항원 수용체를 가지는 다양한 림프구를 가지고 있다. 다양한 종류의 림프구가 존재하기 위해 자연히 동일한 수용체를 가지고 있는 림프의 개체 수는 제한될 수밖에 없고 따라서 특정한 감염에 효과적으로 대응하기 위해서는 해당 항원에 반응한 림프구가 빠른 증식을 거듭하여 세포의 수를 증가시키는 과정이 필요하다. 이러한 과정은 클로날 선택 과정으로 불리며 면역계의 주요한 특징으로 꼽을 수 있다.

클로날 선택 과정은 후천성 면역계가 항원에 반응하는 기본 원리로서 B림프구와 T림프구에 모두 적용된다. 하지만 B림프구는 재생산의 과정 동안 somatic hypermutation을 통한 돌연변이 과정을 겪는 반면, T림프구의 경우에는 아무런 돌연변이 없이 단순 복제된다는 차이점을 가지고 있다.

2.4 자기/비자기의 구분

림프계의 대표적인 세포인 B림프구와 T림프구는 앞서 말한 바와 같이 다양한 형태의 수용체를 가짐으로써 다양한 종류의 항원에 대항한다. 이렇게 다양한 종류의 분자와 반응할 수 있는 능력은 자기 자신을 구성하는 분자와도 쉽게 반응할 가능성도 가진다는 위험을 내포하고 있다. 즉, 면역계가 올바르게 동작하기 위해서는 림프구들이 자기 자신을 이루는 분자(Self)와 외부 물질(Nonself)을 구별할 수 있는 능력이 필수적이며, 이러한 구별이 제대로 이루어 지지 않을 경우 면역 시스템이 자기항체(self-antigen)에 의해서 동작되어 자기 면역 질환을 일으키게 된다. 림프구가 자기와 비자기를 올바르게 구분해 내기 위해서 이들은 생성과정에서 양성선택/음성선택의 과정을 겪게 된다.

① 양성선택(Positive Selection)

림프구의 양성 선택 과정은 쓸모없는 림프구가 축적되는 것을 막는데 그 기본목적을 가진다. 우선 T림프구의 경우를 생각해 보면 T림프구는 앞서 항원 인식과정에서 살펴본 바와 같이 자기 MHC와 펩타이드로 이루어진 복합체를 인식하여 면역 기작이 동작한

다. 그렇기 때문에 T림프구는 기본적으로 자기 MHC를 인식할 수 있어야 하고 이러한 능력을 배양하기 위해 양성선택과정을 이용된다. 즉, T림프구를 생성하는 과정에서 다수의 미완기의 T림프구중 중 MHC를 인식하는 것들만을 계속해서 성장시키고 그렇지 못한 나머지 미성숙한 T림프구들을 없애 버리는 방식으로 MHC를 인식하지 못하는, 즉 쓸모없는 T림프구를 제거하는 것이다. B림프구에서의 양성 선택 역시 이와 유사하게 반응하는 세포만을 살리는 방식으로 이루어진다. B림프구의 경우에는 항원을 인식하면서 그 수가 급격히 증가되는 과정을 겪고 이 과정에서 새롭게 복제된 B림프구들은 경우 somatic hypermutation 과정을 겪게 된다. 이렇게 돌연 변이된 B림프구 중 양성선택을 통해서 항원과 효과적으로 반응하는 세포만을 살려두게 된다.

② 음성선택(Negative Selection)

양성 선택이 조건에 반응하는 개체를 선택하는 과정이었다면 음성선택의 경우 반응하지 않는 개체를 선택하는 과정이다. 즉, 음성선택과정은 T림프구가 자기 자신을 구성하는 물질과 반응하는 것을 피하기 위한 과정으로서 T림프구의 음성선택 과정은 주로 흉선에서 일어난다. 흉선 혈액 장벽(blood thymic barrier)을 통해서 외부 물질과는 단절되어 오직 자기를 구성하는 요소들만 존재하는 공간에서 자기 요소들과 반응하지 않는 세포만을 선택하여 면역 반응을 수행할 수 있는 면역 담당 세포로 성장시킨다.

3. 인공 면역 시스템

면역계의 구성과 동작 기본 원리를 통해 면역계가 어떻게 이루어져 있고 어떠한 과정을 통해서 외부 물질에 효과적으로 반응하는지 살펴보았다. 이러한 원리를 이용하고자 하는데 목적을 두는 인공 면역 시스템에는 크게 자신과 자신이 아닌 것을 구분하기 위한 과정인 양성 선택과정, 음성선택과정을 이용한 양성/음성선택 알고리즘과 B림프구가 항체를 제거하기 더 효과적인 항원을 만들어 내는 과정인 클로날 선택과정을 이용한 클로날 선택 알고리즘이 널리 알려져 있다.

3.1 음성 선택 알고리즘(Negative selection algorithm)

음성 선택 알고리즘은 T림프구의 생성과정을 모사한 연산 방법으로 흉선에서 T림프구가 만들어 질 때 자기 자신과 반응하는 T림프구들이 제거되는 과정을 알고리즘으로 모사했다. 즉, 그림 2-1에서와 같이 랜덤 하게 생성된 예비 항원(string)들을 기준에 정의된

자기 자신과 모두 반응시켜보고 이중 하나와도 비슷하다면 이 예비 항원은 제거되고, 모든 자기 자신 요소와 다른 경우에만 항원으로서 올바른 역할을 할 수 있다고 판단된다. 이러한 과정을 반복적으로 수행하여 다수의 항원을 생성한 이후 임의의 입력 값이나 자기 자신의 변화가 발생할 때 마다 정의된 항원들과의 유사성을 계산함으로써 이 값이 자기(self)인지 비자기(non-self)인지 구별 한다.

음성 선택 알고리즘은 항원의 형태를 정의 하는 방법과 거리를 측정 방법에 따라 다양한 방법들이 존재한다. 일반적으로 이진 값을 이용한 문자열을 항원의 형태로 가장 많이 사용하고 사용 하고 이에 따른 거리 측정방법들을 이용하지만 다양한 어플리케이션에 활용되기 위해 실수 값을 이용하기도 한다.

음성 선택 알고리즘의 기본적인 진행과정은 다음과 같다[1].

- ① 주어진 자기자신의 데이터를 이용하여 자기 집합(S)을 정의하고 임의로 생성된 값들을 자기집합의 요소들과 비교함으로써 자기 집합과 유사하지 않은 비자기 집합(D)을 정의한다(그림 2-1).
- ② 생성된 비자기 집합(D)을 이용하여 새로 들어오는 데이터를 모니터링 하고 이 데이터가 비자기 집합과 유사하다고 판단 될 경우 주어진 데이터는 비정상적인 경우인 것으로 간주한다(그림 2-2).

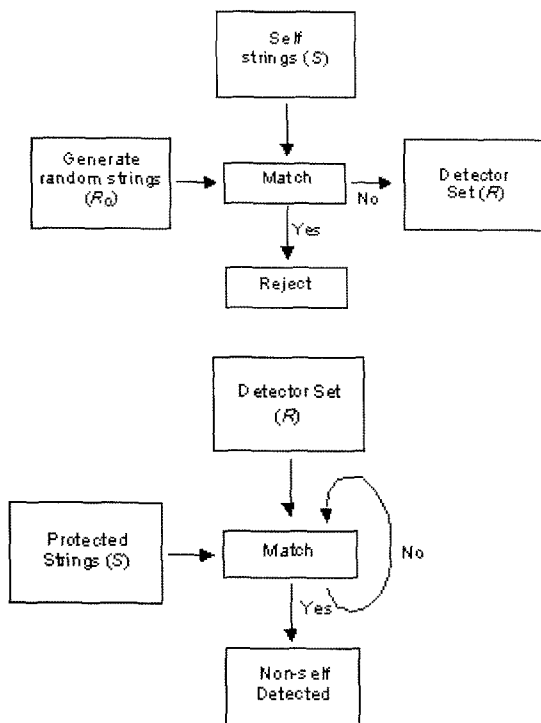


그림 2 음성 선택 알고리즘 원리
1) 비자기 집합의 생성 과정 2) 모니터링 과정

3.2 클로날 선택 알고리즘(Clonal Selection Algorithm)

클로날 선택 알고리즘은 면역시스템에서 새로운 항원에 적합한 항체를 생성하는 과정인 클로날 선택 원리에서 영감을 얻은 알고리즘으로 최적화 문제나 검색 문제에 많이 이용된다. 클로날 선택 알고리즘은 주어진 항원에 대해 높은 친화도를 가지는 개체를 증가시키면서 이들의 변형을 만들어 내는 방법을 통해서 제한된 범위 내에서 그리디 하게 검색함으로써 점차 성숙된 개체들을 만들어 내고, 동시에 완전히 새로운 개체들을 개체군에 생성하는 방법을 이용하여 넓은 범위에 대해서도 탐색한다. 이 클로날 선택 알고리즘은 진화 알고리즘의 한 종류로서 기억 메커니즘과 다양성 메커니즘을 특징으로 가진다[14].

① 기억 메커니즘

인체 면역시스템에서는 항원의 침입에 대하여 클로날 선택 과정이 일어나고 이렇게 생성되었던 항체를 기억 세포에 저장해 둬으로써 2차 감염에 빠르게 대응할 수 있는 수단을 마련하고 있다. 이와 마찬가지로 클로날 선택 알고리즘에서도 매번 모든 과정을 처음부터 시작하는 것이 아니라 이전에 기억된 정보를 최대한 활용하여 보다 빠른 반응 시간과 정확성을 얻고자 한다. 이러한 체계는 강화 학습전략(Reinforcement learning strategy, Sutton & Barto, 1998)의 본질적인 특징으로서 시간에 따라 전체 시스템이 성숙되는 효과를 가져다준다.

② 다양성 메커니즘

항원에 의해 활성화 되는 B림프구는 크게 초 돌연변이(hypermutation)와 수용체 교체라는 두 가지 작용에 의해서 다양화 된다[6]. 초 돌연변이가 작용은 돌연변이 비율을 항체가 가지는 친화도에 따라 변화하는 방법으로 친화도가 작은 항체에 대해서 돌연변이 비율을 높이고 친화도가 큰 항체에 대해서 돌연변이 비율을 줄임으로써 제한된 범위에서 그리디 탐색을 수행하고 이를 통해 지역 최적점(local optima)을 찾는데 뛰어난 성능을 보여준다. 동시에 수용체 교체는 친화도가 매우 낮은 항체들을 완전히 삭제하고 새로운 항체로 교체함으로써 지역 최적점을 벗어날 수 있게 해 준다. 즉, 기존의 위치에서 많이 벗어난 지역으로 이동함으로써 기존의 친화도 보다는 작을지도 모르나 새로운 지역에서 최적해를 만날 가능성을 제공해 준다.

이러한 클로날 선택 알고리즘은 주어진 클로날 선택 원리의 메타포로부터 Clonalg 알고리즘[3], opt-AINET [11], B-Cell 알고리즘[15]과 같이 여러 형태의 알고리

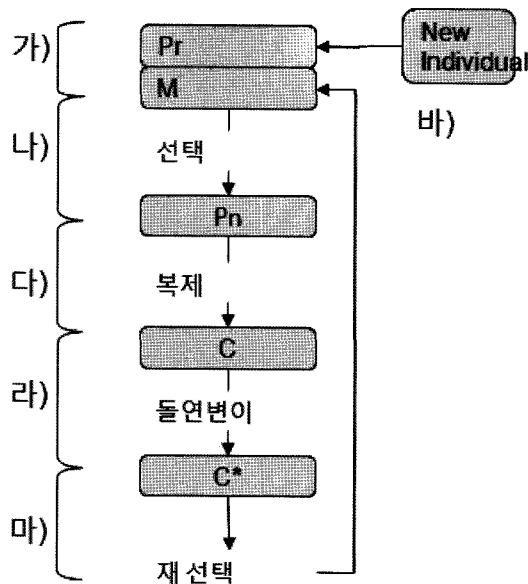


그림 3 Clonalg 알고리즘의 흐름도

즘이 존재한다. 우리는 이 중 가장 많이 알려진 알고리즘 중 하나인 Clonalg 알고리즘에 대해 자세히 알아보려 한다. 이 알고리즘의 세부적인 동작은 다음과 같은 흐름을 따른다(그림 3).

- 가. 기억세포와 임의로 생성된 임의 개체군 집합(Pr)을 이용하여 후보 집합(P)을 만든다.
- 나. 이 초기 후보 집합(P)으로부터 각 개체의 친화도를 계산하고 이를 바탕으로 가장 뛰어난 개체 n개를 뽑아 새로운 개체군(Pn)을 만든다.
- 다. 이 개체군(Pn)을 복제하여 임시의 개체군 C를 만든다. 각각 개체가 복제되는 양은 항원과 항체 사이의 친화도에 비례한다.
- 라. 생성된 C에 대해서 초돌연변이 과정을 수행하여 성숙된 항체군(C*)을 만든다. 즉 복제된 개별 항체의 돌연변이 비율을 친화도에 따라 결정한다.
- 마. C*에 있는 항체 중 친화도가 높은 개체 m개를 다시 선택하여 기억세포군 M을 구성한다. 즉 기존 초기 후보 집합(P)의 개체가 C*에 있는 성숙된 것으로 교체된다.
- 바. 후보 집합(P)에 있는 몇몇의 항체들을 완전히 새로운 것으로 교체해 준다(다양성 메커니즘). 이 때 친화도가 작은 후보 항체일수록 교체될 확률이 크다.

4. 기계 학습과 면역체계

기계 학습은 이전에 경험의 결과에서부터 행동방식이 변화하고, 새로운 판단을 위해서 지식을 기억하는 것과 같은 경험으로부터 학습이 가능한 시스템을

만들어 내는데 초점을 맞추고 있다. 이러한 학습의 원리는 면역계에서도 동일하게 나타나고 있으면 실제로 면역체계를 유지하는데 아주 중요한 위치를 차지하고 있다. 면역계의 학습 원리를 이용하는 가장 가까운 예는 백신을 생각해 볼 수 있다. 우리는 백신을 통해서 인공적으로 약화된 병원균을 신체에 주입하고 신체가 이 병원균에 대해 항체를 생성하게 유도함으로써 이후 진짜 감염에 대비할 수 있도록 면역 시스템을 미리 학습시키는 것이다. 이러한 학습의 과정은 면역시스템이 가지는 특징인 패턴인식 및 기억에서부터 가능한 것으로서 이를 바탕으로 한 인공 면역 시스템은 실제로 다양한 응용 분야에서 이용되고 있다. 주요한 응용분야는 크게 예외 상황 감지(Anomaly detection), 분류기술(Clustering/Classification), 최적화(Optimization)로 나누어 생각할 수 있다.

4.1 예외 상황 감지(Anomaly Detection)

예외 상황 감지 분야는 인공면역시스템이 가장 활발하게 응용되고 있는 분야이다. 예외 상황, 또는 비정상적인 상황을 감지는 하는 것은 주어진 표본이 정상적인 범주에 들어가는지 그렇지 못하느냐를 결정하는 과정으로 일반적으로 한 가지 종류의 집합만이 존재한다. 인공면역시스템에서는 이 집합에 속하는 표본들을 이용하여 탐지집합(detector set)을 구축해 줌으로써 기존 데이터들의 변형이나 새로운 건본이 주어졌을 때 예외 상황임을 판단한다. Forrest et al[1]는 면역계의 음성 선택을 모사한 예외 상황 감지 시스템을 처음으로 제안하였고[7], 이는 J Kim et al[8]에 의해서 클로날 선택 과정과 결합되어 개선되었다.

4.2 분류 기술(Clustering/Classification)

면역 시스템을 이용한 분류기술은 Neal과 Timmis[9] 제안한 것과 같이 개별특이형망 모델(idiotypic network model)에 바탕을 둔 AIRS[10], aiNET[11] 등이 대표적이라 할 수 있다. 하지만 이러한 모델은 정적인 데이터에 대한 분류 알고리즘으로서 Watkins가 면역계의 특징인 분산성을 살려 AIRS를 병렬처리 형태로 개선한 연구[9] 이외에는 기존의 다른 분류 기술 알고리즘들이 보여주는 성능을 압도하거나 특별히 뛰어난 응용분야를 제공하지 못하는 것이 사실이다. 실제 인공 면역 시스템은 정적 데이터 보다는 동적 데이터의 분류에 있어서 더 유망하다고 할 있다. 특히 요즘과 같이 엄청난 양의 데이터가 매일매일 쏟아져 나오는 상황에서 이러한 동적 데이터의 분류 분야는 그 중요성이 더해지고 있으며, 인공 면역 시스템 알고리

즘은 기존의 분류 알고리즘들이 집중하지 못했던 학습에 있어서의 균형, 즉 현재 직면한 문제를 해결하기 위해 저장하여야 할 정보의 양과 미래에 부딪힐 문제를 위한 현재 정보 양 사이에서의 균형을 유지하는데 있어 장점을 가진다[6]. 실제로 이러한 특징을 바탕으로 한 Neals 알고리즘[12]은 이론적으로 데이터에 연속적으로 적용가능하며 Kim and Bentley[13]도 침입 탐지에 동적인 분류 알고리즘을 이용하였다.

4.3 최적화(Optimization)

최적화와 관련된 대부분의 응용들은 클로날 선택의 원리를 바탕으로 이루어지고 있다. 이 중 Clonal 알고리즘[3], opt-AINET[11], B-cell 알고리즘[15]이 가장 많이 알려져 있다. 이러한 알고리즘들은 기본적으로 복제, 돌연변이, 선택과정의 반복으로부터 이루어진 진화 알고리즘의 형태를 띠고 있으며, 하나의 항원은 해결하여야 될 문제로, 클로날 선택과정은 이 항원에 적합한 해답을 찾아가는 과정으로, 최종적으로 생성된 항체는 주어진 항원에 대한 정답으로 간주한다.

참고문헌

- [1] S Forrest, A Perelson, L Allen, and R Cherukuri. Self-Nonself Discrimination in a Computer. In Proc. of the IEEE Symposium on Research in Security and Privacy, pp. 202-212, 1994.
- [2] Dokyun Na, Doheon Lee. Mathematical Modeling of Immune Suppression. ICARIS2005, pp. 182-192. August, 2005.
- [3] L. De Castro and F.J. Von Zuben. The clonal selection algorithm with engineering applications. In GECCO 2002 - Workshop Proceedings, pp. 37-37, 2000.
- [4] Dokyun Na, Inho Park, Doheon Lee, and Kwang H. Lee. Integration of immune models using Petri nets. ICARIS2004, pp. 205-216. August, 2004.
- [5] Inho Park, Dokyun Na, Kwang H. Lee, Doheon Lee. Fuzzy Continuous Petri Net-Based Approach for Modeling Helper T Cell Differentiation. ICARIS2005, pp. 331-338. September, 2004.
- [6] George, A. J. T. & Gray, D.(1999), "Receptor Editing during Affinity Maturation", Imm. Today, 20(4) : 196.
- [7] S Forrest, S Hofmeyr, and A Somayaji. Computer Immunology. Communications of the ACM, 40(10) : 88-96, 1997.
- [8] J Kim and P Bentley. Immune Memory in the Dynamic Clonal Selection Algorithm. In J Timmis and P Bentley, editors, Proceedings of the First International Conference on Artificial Immune Systems ICARIS, pp. 59-67, 2002.
- [9] M. Neal. Meta-stable memory in an artificial immune network. In Artificial Immune Systems: Proceedings of ICARIS 2003, pp. 168-181. Springer, 2003.
- [10] A.Watkins and J. Timmis. Exploiting the parallelism inherent in aircs, and artificial immune classifier. In Artificial Immune Systems: Proceedings of ICARIS 2004, pp. 427-438. Springer, 2004.
- [11] L.N. De Castro and F.J. Von Zuben. Ainet: An artificial immune network for data analysis. In H.A. Abbass, R.A. Sarker, and C.S. Newton, editors, Data Mining: A Heuristic Approach. Idea Group Publishing, USA, 2001.
- [12] M. Neal. Meta-stable memory in an artificial immune network. In Artificial Immune Systems: Proceedings of ICARIS 2003, pp. 168-181. Springer, 2003.
- [13] J Kelsey, J Timmis, and A Hone. Chasing chaos. In Congress on Evolutionary Computation, pp. 89-98, Canberra, Australia., December 2003. IEEE.
- [14] E HART, J TIMMIS. Application areas of AIS: The past, the present and the future - Lecture notes in computer science.
- [15] J. Timmis, C.Edmonds, and J. Kelsey. Assessing the performance of two immune inspired algorithms and a hybrid genetic algorithm for optimisation. In Proceedings of Genetic and Evolutionary Computation Conference, GECCO 2004, pp. 308-317. Springer, 2004.
- [16] Doheon Lee, Jungja Kim, Mina Jung, Yonggwon Won, Seon Hee Park, and Kwang Hyung Lee. Immune-Based Framework for

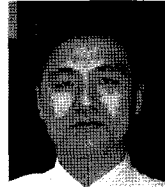
Exploratory Bio-Information Retrieval from the Semantic Web. ICARIS2003, pp. 128-135. September, 2003.

- [17] Hyi ThaeK Ceong, Young-il Kim, Doheon Lee, and Kwang-Hyung Lee. Complementary Dual Detectors for Effective Classification. ICARIS2003, pp. 242-248. September, 2003.
- [18] Vincenzo Cutello, Doheon Lee, Giuseppe Nicosia, Mario Pavone, Igor Prizzi. Aligning Multiple Protein Sequences by Hybrid Clonal Selection Algorithm with Insert-Remove-Gaps and BlockShuffling Operators. ICARIS 2006, pp. 321-334. September, 2006.



하기룡

2005 KAIST 전기및전자공학과 학사
2007 KAIST 바이오시스템학과 석사
2007~현재 한국전자통신연구원 차세대PC플랫폼연구팀
관심분야 : 생체모방지능, 생체신호처리 시스템
E-mail : lyonha@etri.re.kr



이도현

1995 KAIST 전산학(박사)
1996~2002 전남대학교 전산학과 및 의학과 조교수
2002~현재 KAIST 바이오시스템학과 부교수
관심분야 : 바이오정보학, 신경-기계 인터페이스
E-mail : dhlee@kaist.ac.kr

제17회 통신정보 임동익술대회(JCCI 2007)

- 일 자 : 2007년 5월 2일~4일
- 장 소 : 휘닉스파크
- 내 용 : 학술발표 등
- 주 최 : 정보통신연구회
- 상세안내 : <http://mobile.ajou.ac.kr/jcci2007>