

## 인공생명을 갖는 지능 로봇시스템의 실현

沈 貴 寶

中央大學校 電氣 電子 制御工學部

### I. 서론

우리가 어려운 문제에 부딪혔을 때 그 해결책을 자연계의 생물로부터 찾는 경우가 종종 있다. 이러한 시도로부터 종래에 개별적으로 이루어지고 있던 자연계 생물에 대한 연구결과를 통합하고, 나아가 연구를 보다 활성화하면서 어떤 새로운 연구방법을 모색해보자는 취지로 인공생명(Artificial Life, ALife, AL)이라는 하나의 연구분야가 1987년 C.G. Langton에 의하여 탄생하게 되었다<sup>[1]</sup>. 이렇게 탄생한 인공생명의 개념은 「우리가 알고 있는 생명(life as we know it)」에 대한 연구 및 응용이라는 커다란 관점으로부터 「있을 수 있는 것으로서의 생명(life as it could be)」으로 그 의미를 확장함으로써 생명의 본질을 보다 깊이 이해할 수 있고, 또한 생명의 위상을 재정립하여 기존의 생물학에도 크게 공헌할 수 있다고 보는 것이다.

인공생명의 기본적인 목적은 생물의 행동의 본질을 이해하는 것이다. 이것은 인공생명의 「생명」에 상당하는 부분이다. 반면 「인공」의 의미는 생명과 같은 시스템을 인공적인 매체위에 구축하는 것이다. 인공생명이 대상으로 하는 부분은 인공적인 매체에 따라서 컴퓨터상에서의 실현(software), 실리콘이나 로봇 등에서의 실현(hardware), 화학분자에서의 실현(wetware)로 크게 나눌 수 있다. 이와 같은 인공생명을 공학적인 입장에서 생각해 보면 생명 또는 생명체가 가지는 자율성(autonomous), 적응과 학습(adaptation and learning), 진화(evolution), 자기증식(self proliferation), 자기수복(self restoration), 자기복제(self reproduction) 등의 우수한 특징을 인공시스템으로서 실현하는 것을 목적으로 한다.

이러한 인공생명의 구체적인 연구방법으로, 자연계의 본질을 여러 가지 이론적인 모델을 세워 밝히고 모의실험하는 「약한 인공생명(weak ALife)」과 생명체라 불릴 수 있는 것(인공생명체)을 직접 구현하려는 「강한 인공생명(strong ALife)」으로 나누어 볼 수 있다. 생물체의 성질이나 메커니즘을 밝히려는 이론적인 연구나 컴퓨터

상에서 이루어지는 모의실험 등 현재까지의 많은 연구 결과들이 약한 인공생명의 범주에 속하며, 강한 인공생명에 대한 뚜렷한 연구성과는 아직까지는 없었다. 그러나 이것이 이루어진다면 그것은 시험관에서 창조된 유기물 생명체나 컴퓨터상에서 창조된 생명체(프로그램) 또는 하드웨어로 구성된 생명체(로봇)가 될 것이다.

1980년 NASA에서는 달에 자기 재생산하는 공장을 세우려는 프로젝트를 시도한 바가 있다. 이 계획은 von Neumann의 자기 재생산 오토마타(automata)에서 연유한 것으로 자기 재생산할 수 있는 로봇을 만들어 달로 보내고, 그 이후는 이들이 스스로 자기 재생산 및 환경에 적응함으로써 지구에서의 도움 없이 달을 개발해 보자는 취지에서 제안된 생각이었다. 그러나 이에 대한 SF적 요소와 실현성의 의문으로 인해 프로젝트는 결국 수행되지 못했다. 이와 같이 로봇에 대하여 생물체의 가장 큰 특징인 자기복제와 같은 기능의 실현으로 인공생물체가 나올 가능성은 있으나 현재의 기술로 로봇이 스스로 복제하는 것을 실현하기는 어려우며 또한 윤리, 종교, 철학적으로 복잡한 면을 포함하고 있기 때문에 이것은 먼 장래에나 이루어질 것으로 생각하고 있다. 따라서 실제의 강한 인공생명은 인공생명의 방법들을 공학적으로 어떻게 응용하여 생물과 같이 유연하게 환경에 적응해 나가는 시스템을 개발하느냐 하는 것이다.

로봇이라는 말은 1921년 체코의 희곡작가 Karel Kapek 이 쓴 “룻섬의 유니버설 로봇(RUR : Rossum's Universal Robots)”이라는 소설에서 등장하였고, 1961년에 세계 최초의 산업용 로봇이 탄생하였다. 그 이후 1970년대 후반의 양적인 팽창기를 거쳐 1980년대의 기술적 안정화를 이루게 되었다. 현재는 산업현장에서 절단, 용접, 도장, 조립 등 다양한 일을 맡아서 하고 있으며 건설, 토목, 농림업, 해양이나 우주개발까지 많은 분야에 응용되고 있다.

현재까지의 로봇은 특정한 장소에서 특정한 장소에서 힘들거나 단순 반복되는 일, 고속 또는 고정밀도를 요하는 일 등에서 사람의 일을 대신해 왔다. 따라서 다양한 환경에서 능력을 발휘할 수

있는 유연한 로봇보다는 생산성에 치중한 로봇이 주로 개발되어 왔다. 그러나 점점 산업현장에서도 다품종 소량생산의 시대가 다가오면서 특정한 작업밖에 하지 못하는 로봇보다는 여러 가지 일에 대하여 유연하게 대처할 수 있는 로봇이 필요하게 되었으며, 로봇의 기술향상과 기능의 복잡화로 로봇 지능화의 필요성이 대두되었다. 기존의 인공지능 및 수확모델에 기초한 제어는 아직 이러한 지능화의 문제를 완벽히 해결하지 못하고 있다. 주어진 문제를 해결할 수 있는 작은 부문제로 나누는 분석적인 방법(top down approach)에 의해 지능을 구현하려한 기존의 인공지능 연구방법은 한계가 드러나게 되었으며 사람의 일상적인 일에서와 같이 ‘예’ 혹은 ‘아니오’의 두 가지 답을 요구하는 것이 아니라 ‘아마도...’와 같은 불확실성이 수반되는 일을 하는 데에도 실패하였다.

생물체의 성질이나 메커니즘의 해명으로부터 출발하고 있는 인공생명의 연구성과는 로봇에 적용되어 이와 같은 문제를 해결하는데 커다란 역할을 할 것으로 기대된다. 예를 들면, 하나로서는 단순한 생물체가 집단을 이루면서 복잡한 기능을 해내듯이 시스템 전체의 효율적인 기능을 위해 하나의 로봇을 고도로 지능화시키는 것이 아닌 복수의 로봇을 협조적인 시스템으로 통일할 수 있을 것이다. 또한 아래에서 위로(bottom up)의 합성적인 방법에 의한 시스템의 자율적인 적응, 새로운 기능의 발현, 학습, 자기조직화 등의 성질을 가질 수 있다면 유연하고 강력한 생물체와 같은 지적 로봇시스템의 구축이 가능할 것이다.

인공생명의 관점에서 로봇공학은 생물사회의 우수한 성질 및 메커니즘의 해명 및 모의실험하는 약한 인공생명의 결과들을 로봇에 실제로 적용하여 공학적으로 응용하는 것이다. 따라서 인공생명 로봇은 실제의 하드웨어와 함께 컴퓨터 환경내에서 모의실험되는 로봇을 모두 합쳐서 말한다. 이것이 의미하는 바는 로봇은 실제적인 하드웨어로 구현되는 것이 목표이지만 이와 같이 구현하기 위한 하나의 방법론으로 모의실험되는 과정도 로봇공학의 범위에 함께 포함시키는 것이다.

본 해설에서는 지능로봇과 인공생명의 관계를

알아보고, 생물시스템에 대한 연구가 로봇시스템에 어떻게 적용될 수 있는지를 알아본다. 마지막으로 인공지능을 이용한 로봇은 현재 어떻게 연구되고 있으며 어떻게 적용될 수 있는지를 필자가 연구하고 있는 자율분산로봇시스템과 마이크로로봇시스템의 연구사례 등을 통해 점검하고, 앞으로의 발전과 이들의 연구방향을 전망해 본다.

## II. 지능로봇과 인공지능

20년전 인공지능 연구자들은 가까운 미래에 지능을 갖춘 로봇이 출현하여 공장이나 인간의 생활에 커다란 영향을 미칠 것으로 예상하였다. 이들이 생각했던 지능로봇(intelligent robot)이란 다음과 같은 성질을 가진 로봇이었다.

- 1) 추론능력이 있다(ability of reasoning).
- 2) 자신의 상태를 점검할 수 있다(introspection).
- 3) 어떤 문제에 대한 일반적인 지식과 특수한 지식을 가지고 있다(general knowledge and specific knowledge).
- 4) 판단을 내리기 위한 규칙이나 기준이 있다(rule or rational way to decide).
- 5) 문제에 대하여 분석능력이 있다(ability to analysis task).
- 6) 여러 가지 선택사항을 임의로 선택할 수 있다(ability to make choice).
- 7) 인간과 같이 실세계에서 실시간으로 일을 수행한다(real time and real world).
- 8) 목적달성에 유용한 행동과 그렇지 않은 행동을 이해한다.

그러나 아직까지 이러한 특징을 모두 갖춘 지능로봇은 출현하지 않았다. 최근 등장한 인공지능은 이러한 문제에 대하여 하나의 해결책을 제시해줄 것으로 기대되고 있다. 이것 또한 인공지능과 같은 한계에 부딪칠지는 모르지만, 인공지능은 자연계의 생물을 모델링하고 있다는 점에서 기존의 인공지능의 한계를 보완할 수 있는 방법론으로 인정받

고 있다.

인공생명에서 추구하는 로봇은 지능로봇에 더하여 일반적으로 다음과 같은 특징을 갖는다.

- 1) 문제의 수행에 있어서 사전에 짜여진 완벽한 계획보다는 예측하지 못한 문제가 발생하였을 경우 즉각적인 대처와 참여에 의해 적응 및 학습을 해나가는 능력이 있다.

따라서 행동계획은 보다 자연스럽게 유동적이게 하여 환경조건으로부터 발현될 수 있도록 한다. 이를 위하여 로봇 설계자는 완벽한 사전계획 보다는 로봇 스스로가 문제를 해결할 수 있는 구조를 만들어 주는 것이 필요하다.

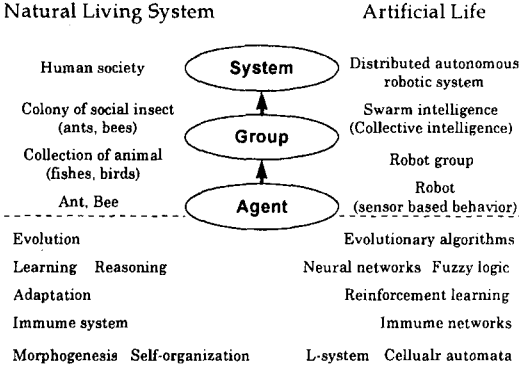
- 2) 개체간 또는 환경과의 상호작용에 의해 창발적인 행동(emergent behavior)이 나타난다.

여기서 창발적 행동이란 단순한 규칙 또는 상호작용으로부터 전개된 복잡하고 예기치 못한 현상을 일컫는 말로써 “전체가 부분의 합보다 크다”라는 말로도 표현된다. 창발(emergence)은 생명현상의 본질을 명확히 표현하고 있는 말로서 인공지능의 중요한 개념이다. 인공지능의 분석적인 방법에 대신해 부분요소들의 합성적인 방법에 의해 복잡하고 유용한 기능이 발현할 수 있다.<sup>[1~4]</sup>

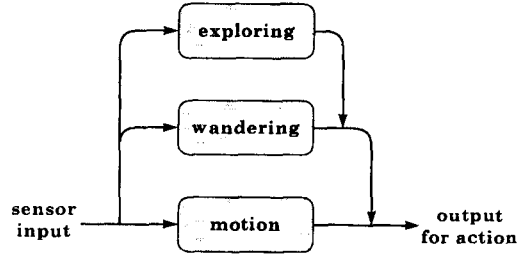
앞으로 로봇은 하드웨어 성능의 발전과 더불어 지능화의 측면에서는 개미나 벌 등의 낮은 수준의 지능에서부터 점차로 높은 수준으로 발전하는 “인공생명의 과정에 의한 인공지능의 실현”이 되리라 생각된다<sup>[3]</sup>.

## III. 생물 시스템과 로봇 시스템

앞절에서 지능로봇을 구현하기 위하여 인공지능의 방법에 의해 인공지능이 실현될 수 있을 것이라고 했다. 따라서 인공지능의 방법을 개발하여 로봇 또는 인공 시스템에 공학적으로 적용하여야 하는데 이를 위해서는 자연생물계의 성질 및 메커니즘을 이해하는 것이 중요하다. 현재 자연생물계를 모방한 여러 가지의 모델이 개발되었으며 현재 계속 연구되고 있다. 그림 1「5」은 자연 생물계와 여



(그림 1) 자연생물계와 인공생명



(그림 2) 포섭구조의 예

2. 로봇군의 군행동(Group Behavior) 과 군지능(SI : Swarm Intelligence)

복수의 로봇을 제어하는 것은 인공생명에서 흥미로운 대상이 된다. 자연계의 생물체들에게서 집단을 이루고 사는 것들이 있으며 이것들은 여러 대의 로봇을 제어하는데 훌륭한 모델이 될 수 있기 때문이다. 지금까지 여러 대의 로봇을 제어하는 것은 하나의 로봇을 제어하는 것의 연장으로써 모든 로봇을 하나의 중앙관리자가 담당하여 계획된 대로 행동하였다. 그러나 이러한 방법은 몇 대의 로봇의 고장에도 시스템이 강건하지 못하며, 예측하지 못한 상황에 대처할 수 있는 유연성도 떨어진다. 따라서 집단을 이루는 개미나 다른 동물에서와 같이 각각의 로봇에게 자율성을 부여하여 이러한 행동의 결합에 의해 목적을 달성하는 방식을 생각해볼 수 있다. 이 방식을 자율분산로봇시스템(Distributed Autonomous Robotic System)<sup>[7~9]</sup>이라 부른다. 그러나 여러 대의 로봇에 의해 나타날 수 있는 행동의 범위는 너무 넓고 비선형적이기 때문에 로봇에게 어떻게 자율성을 부여해 시스템 목적을 달성하는가는 어려운 문제이다. 따라서 인공생명의 방법에서는 합성적인 방법론을 사용한다. 이것은 개체의 행동을 결정해주고 전체적으로 원하는 행동이 나타나도록 유도하는 방법으로 아래에서 위로의 접근방식(bottom up approach)이라 할 수 있다.

Reynold는 간단한 규칙에 의해 새들이 무리짓는 모습을 모의실험<sup>[1]</sup> 하였으며 Mataric도 로봇에게 기본 규칙을 정해주고 로봇들의 상호작용에 의해 복잡한 행동이 발현되도록 하는 방법을 사용하였다. 이것에 의해 무리짓기(flocking), 물체 끌어

기에서 개발된 인공생명을 비교한 그림이다. 앞으로는 이렇게 개발된 이론을 더욱 발전시키고 통합화하는 것이 필요할 것이다.

IV. 로봇에 대한 인공생명 방법의 적용사례

1. 행동형 로봇(Behavior-based Robot)

로봇을 제어하기 위한 기존의 인공지능 방법은 환경의 인식, 지식을 이용한 행동 계획, 실행이라는 일련의 과정을 위한 막대한 계산량이 필요하며 변화하는 환경에서 빠르게 대응하지 못한다. Brooks는 이에 대한 새로운 방법으로 포섭구조(Subsumption Architecture)<sup>[6]</sup>를 사용하여 동물과 같이 움직이는 로봇을 구현하였다. 이 방법은 로봇이 단순한 규칙에 의해 복잡한 행동이 창발될 수 있도록 구체적인 행동지시가 아닌 기본적인 동작과 추상적인 형태의 목표를 부여하여 제어하는 것으로 낮은 수준에서는 기본적인 동작을 담당하고 높은 수준에서는 전체적인 목적이나 개념 등을 담당시켜 서로 다른 수준이 상호영향을 주며 행동을 제어하는 방식이다. 그림 2는 포섭구조의 예를 나타낸다. 이와 같은 제어의 기본 생각은 동물의 행동을 살펴볼 때 나타나는 “복잡한 행동은 복잡한 환경의 투영이지 복잡한 제어의 결과가 아니다.”라는 것에서 비롯되었다.

모으기(foraging), 흩어지기(dispersion) 등 군행동을 실제로 구현하였다<sup>[10]</sup>. 또한 진화, 신경망, 셀룰라 오토마타, 퍼지 이론을 사용한 로봇의 협조에 관한 연구 및 불규칙한 로봇의 행동을 예측하기 위하여 카오스 이론의 적용에 관한 연구<sup>[11]</sup>도 진행 중에 있으며, 집단을 이루는 곤충이나 동물의 행동에서 어떻게 복잡한 집단행동이 나타나는지를 규명하기 위한 군지능(SI)<sup>[12~14]</sup>의 연구도 진행되고 있다.

### 3. 마이크로로봇(Microrobot)

하드웨어 제작기술이 발전하면서 로봇 크기의 소형화에도 큰 발전이 이루어지고 있다. 현재 약 5 mm<sup>3</sup>크기로 세계에서 가장 작은 로봇이 최근 일본에서 개발되었고(그림 3), 독일에서는 말벌만한 크기의 날아다닐 수 있는 헬리콥터 로봇을 만들었다. 독일 마인츠의 마이크로 기술연구소(IMM)가 만든 이 로봇은 두 개의 회전 날개를 갖고 있고, 13 cm의 높이로 날며 무게는 0.5 g에 불과하다. 그러나 지금까지 개발한 로봇은 대부분이 수mm의 모터나 기어 등을 사용한 미니로봇 수준이다. 하지만 앞으로 초미세 가공 기술의 발전으로 21세기에는 1천분의1mm 크기의 부품을 사용하는 마이크로 로봇이 등장할 전망이다.

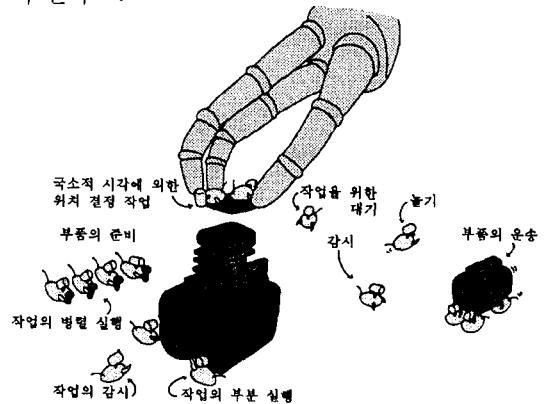


〈그림 3〉 소형 마이크로로봇

이와 같은 마이크로로봇이 개발된다면 그것은 다양한 분야에서 활용이 기대된다. 사람의 몸속에 들어가 환부의 수술을 할 수 있으며 핵발전소, 화

학공장의 파이프를 돌아다니며 시설의 유지보수를 할 수 있고, 우주나 극한지역 등 사람이 작업할 수 없는 환경에서 활용될 수 있을 것이다. 이와 같이 예상되는 활용분야는 의료, 유전공학, 농업, 공업, 건축, 토목, 우주개발 등으로 매우 넓다.

그러나 마이크로로봇 하나의 기능은 미약하기 때문에 최소한의 입력과 최소한의 연산가지고 원하는 작업을 수행하여야 한다. 따라서 곤충의 행동 양식을 모방한 방식에 의한 제어를 하게 될 가능성이 높다. 또한 커다란 작업을 수행하기 위해서는 수백 수천 대의 로봇이 함께 제어의 대상이 된다. 이때 모든 로봇을 각각 제어하기는 거의 불가능하며 각각의 로봇이 자율적으로 행동하며 시스템의 목적을 이루도록 하는 자율분산제어가 유리하다. 또한 자율분산제어와 비슷한 개념으로 군지능 알고리즘도 마이크로로봇군의 제어에서 연구의 대상이 된다<sup>[15]</sup>.



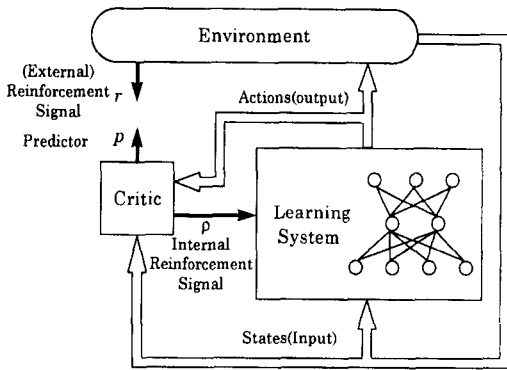
〈그림 4〉 마이크로로봇의 자율분산제어에 의한 협조

그림 4는 마이크로로봇이 매크로로봇과 협조작업을 하는 예이다. 각각의 로봇은 자율적으로 자신이 해야 할 일과 시스템의 목적을 판단하여 일을 수행함으로써 전체적인 협조를 달성할 수 있다.

### 4. 강화학습(Reinforcement Learning)

자연계의 생물의 신경계를 모방한 적응 학습 시스템으로 신경회로망이 있다. 이것은 주로 학습에 의한 패턴인식이나 비선형 매핑, 로봇의 제어 등에 사용되어왔다. 이것을 로봇에게 적용할 경우 교사 신호를 주기가 어렵기 때문에 강화학습의 개념이

도입되었다. 강화학습은 미지의 환경에 대한 경험에 의하여 적절한 행동을 획득하는 기계학습법으로써 이동로봇이나 로봇 매니플레이터에 모의가 아닌 실제상으로 적용 가능한 모델이다. 취한 행동에 따른 보상(reward) 또는 벌칙(penalty)에 따라 원하는 행동을 강화시킴으로써 학습한다. 대부분의 신경망의 학습 알고리즘이 올바른 해에 대한 결과를 교사신호로 주어 학습하는데 반해 강화학습은 정확한 교사신호 보다는 결과에 대한 대략적인 판단(올바른 행동인지 아닌지)만 가능하면 학습이 가능하다. 강화학습의 기본적인 구조는 그림 5와 같다.



〈그림 5〉 Critic을 사용한 강화학습법

현재 Sutton의 TD<sup>[16]</sup>법 및 이것의 발전된 형태인 Watkins의 Q-learning<sup>[17]</sup>이 제안되어 있으며 이와 같은 기본형에 약간의 변형을 가한 여러 가지 방법이 개발되어있다.

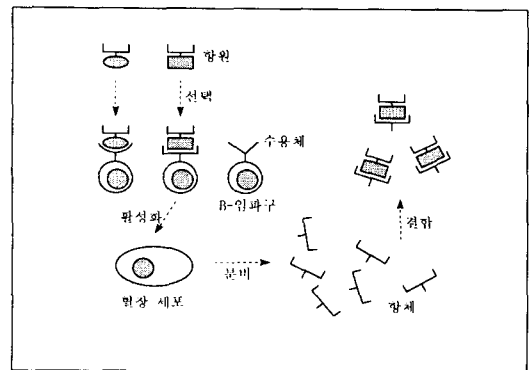
TD법은 현재 행동의 결과 및 미래에의 영향을 예측하여 강화신호를 생성하고 이것을 신경망에 가해 학습시키는 방법이고 Q-learning은 문제의 상태 및 행동공간을 Q-table로 만들고 그 상태에 대한 행동의 적합도를 Q-value로 가지며 행동에 따른 결과로 이 값을 갱신함으로써 학습을 하는 방법이다.

Ackely는 로봇(agent)의 제어를 행동망(action network)과 평가망(evaluation network)으로 나누어 신경망으로 구성하여 평가망은 유전 알고리즘에 의한 진화를 시키고 행동망은 평가망

의 강화신호에 의해 학습을 하게되는 구조의 ERL(Evolutionary Reinforcement Learning) 알고리즘<sup>[2]</sup>을 제안하였다.

### 5. 면역 네트워크(Immune Networks)

체외로부터 세균이 생물체의 체내로 침입하였을 때 이런 세균을 막아내기 위한 항원이나 항체가 생겨나서 생체를 방어하게 되는데 이러한 메커니즘을 면역계라고 한다. 면역계의 기능은 외적(체외에서 온 세균)을 인식하는 기능, 외적의 정보를 기억하는 기능, 분산계로서 전체의 조화를 유지하는 기능이 있다. 그림 6은 면역계의 기본 처리과정의 그림이다. 임파구의 일종인 B-임파구는 오직 한 종류의 항체를 만들어 내도록 프로그램되며 항체를 세포 밖으로 내보내 수용체로서 활동하도록 한다. 그리고 항원은 가장 적합한 수용체를 가진 항체와 결합하게 된다. 수용체를 가진 임파구는 유인 신호에 따라 항원과 결합하고 항체형성 혈장 세포로 발전해 나간다. 이때 임파구는 오직 하나의 항체를 만들도록 프로그램되어 있기 때문에 혈장세포는 원래의 기능을 하는 똑같은 항체를 만들어 분비한다. 이와 같은 방식으로 항원은 그것을 인식하는 항체를 유력하게 선택한다.



〈그림 6〉 면역계의 기본적인 동작

Jerne는 이러한 면역 네트워크 가설을 기본으로 하여 B-임파구를 중심으로 하는 적응 모델을 제안했다. 또한 Farmer의 면역 네트워크 모델은 항원, 항체, B-임파구의 상호작용을 모델화하여 다

양한 환경에 적응 가능한 시스템의 조직화방법을 제안했으며, Bersini는 항체의 친화성을 이용한 최적화 알고리즘을 제안하였다<sup>[18]</sup>. 이러한 면역 네트워크를 로봇에 적용하여 환경에 적응이 가능한 로봇을 구성할 수 있다. 최근에는 소형로봇의 제어기로 면역 네트워크를 사용하는 연구<sup>[19]</sup>가 많이 등장하고 있다.

#### 6. 자기조직화 로봇(Self-Organizing Robot)

생물의 발생과 진화라는 원리에 따라 자기조직화 및 진화는 인공생명의 중요한 개념이다. 생물체는 세포, 조직, 기관 등이 모여 구성되어 있는 자기조직의 결과물이다. 이와 같이 로봇도 개체를 모아 군이나 사회를 형성하여 고도의 기능을 발생시킬 수 있다는 연구가 자기조직형 로봇시스템이다. Fukuda는 하나의 로봇을 하나의 세포로 간주하여 독립된 여러 가지의 특징을 갖도록 하고, 이것들의 복수개의 합체를 통해 새로운 기능을 가질 수 있는 세포 로보틱스(Cellular Robotics)<sup>[20, 21]</sup>를 제안하였다. 이 방법은 목적에 따라 세포(cell, 하나의 로봇이 됨)들을 준비하는 것으로 다양한 분야에 적용될 수 있다. 예를 들면, 입구가 작은 탱크에 여러 가지 세포를 투입하여 탱크 안에서 합체함으로써 내부의 검사작업을 수행하거나 소형의 마이크로로봇을 인체에 투입하여 이것이 몸속에서 합

체하여 수술 등의 기능을 수행할 수도 있으며(그림 7), 공장에서 생산라인을 자기조직화하여 다품종 소량생산에 적용시킬 수 있다. 또한 작은 형태의 로봇을 지구로부터 운반하여 우주에서 합체함으로써 우주개발을 수행할 수도 있다.

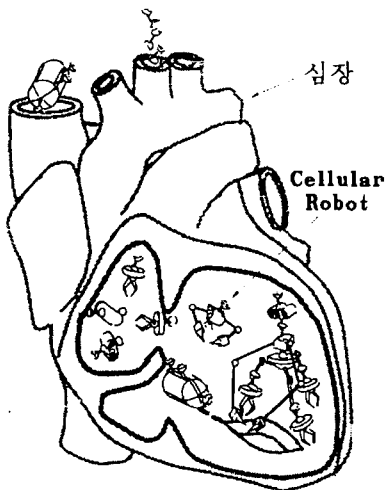
한편, 일본의 기계기술 연구소에서는 동일한 기능과 형태의 유닛을 복수개 모아서 복잡한 기능을 발현시키는 분산기계시스템의 연구<sup>[7~9]</sup>를 진행하고 있다. 이 시스템은 형태를 자유롭게 변화시키는 것이 가능하며, 또한 어떤 유닛이 고장났을 때 남은 유닛의 집단이 스스로 기능을 회복시키는 것도 가능하다.

#### 7. 진화 알고리즘(EA)에 의한 로봇의 진화

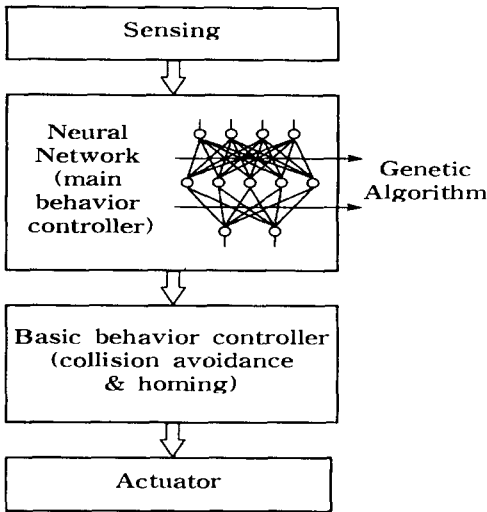
진화 알고리즘(Evolutionary Algorithms)<sup>[22, 23]</sup>은 적응에 의한 진화라는 방법을 사용하여 로봇의 행동을 환경에 적응시키는 데 이용될 수 있다. 그러나 이 알고리즘은 군 기반 탐색방법의 일종으로써 하드웨어로 진화를 실현하기에는 시간과 비용에 많은 부담이 따른다. 따라서 현재에는 주로 소프트웨어에서의 모의진화 후 하드웨어에 적용이라는 방법으로 연구가 진행되고 있다. 그러나 한편에서는 소프트웨어가 아닌 하드웨어로 진화를 시도하려는 방법도 제안되어 있다.

우선, 소프트웨어에 의한 모의진화의 방법으로 Koza는 Brooks의 포섭구조에 의해 나타난 결과를 얻어내기 위하여 벽을 따라가는 로봇의 행동을 유전 프로그래밍(Genetic Programming)에 의하여 수행하였다<sup>[24]</sup>. 또 여러 대의 로봇에게 유전 프로그래밍을 적용하여 협조작업을 수행시키려는 시도도 있다<sup>[25]</sup>.

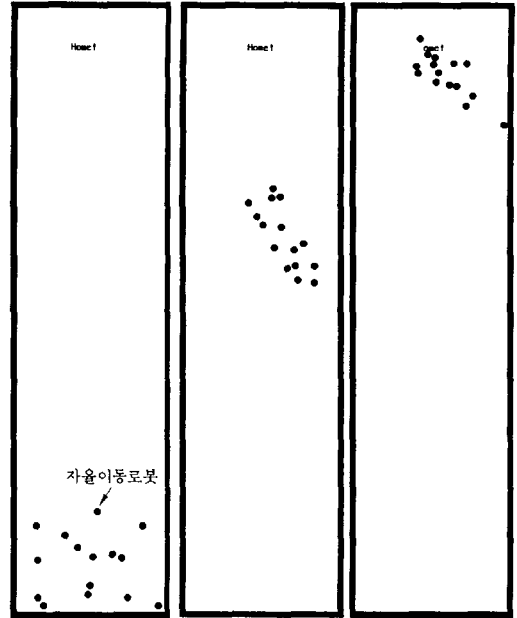
또 다른 방법으로 신경망의 학습기능과 적응도 기반의 전역적 탐색 방법인 유전 알고리즘을 융합하여 로봇에 적용시킨 연구도 있다. 물론 강화학습에서 진화를 사용한 ERL 알고리즘도 소개하였으나 이와는 약간 다른 방법으로, 로봇의 행동제어를 일반적인 다층 신경망으로 구성한 후 각 신경노드간의 연결강도를 염색체로 구성하여 진화를 시켰다(그림 8). 이때 연결강도는 여기성 결합(1), 무결합(0), 억제성 결합(-1)의 세 가지로 표현되



(그림 7) 인체내(심장)에서 작업을 하는 세포형 로봇



〈그림 8〉 NN+GA 제어기



〈그림 9〉 신경망과 유전알고리즘에 의한 자율이동로봇의 창발행동(무리짓기) 구현

있고 이와 같이 구성된 제어기를 많은 수의 로봇에 적용하여 무리짓기의 군행동을 보여주고 있다(그림 9)<sup>[26]</sup>. 인공생명의 연구라는 문맥에서 진화, 발생, 학습을 통한 이론의 구축이 필요하게 되는데 신경망과 진화 알고리즘의 융합은 이와 같은 인공생명의 기반적 아키텍처라는 측면에서 주목을 받고 있다. 이와 같은 융합에 의한 방법으로 신경망의 학습은 물론 신경망의 구조까지 진화시키기도 한다.

진화에 의한 방법은 로봇의 설계를 환경에 의한 적용도에 따라 생성되도록 하며 이것을 로봇을 설계하는 과정은 모의실험상이며 진화가 완료된 로봇을 실제에 적용하는 방법을 사용한다. 따라서 진화에 의해 로봇의 행동을 환경에 적응을 시키기는 했으나 진화의 과정은 컴퓨터 상에서 수행되었기 때문에 실제로 로봇이 외란이 존재하는 실제세계에서도 완벽하게 대처할 수 있는가가 문제점으로 될 수 있다. 그러므로 이와 같은 문제점을 극복하기 위해서는 실제상으로 일어나는 결과를 진화의 과정에 지속적으로 반영함으로써 개선해 나가야한다.

실제 하드웨어를 진화하는 연구로 프로그램 가능한 논리소자를 유전 알고리즘에 의해 진화하여 로봇의 제어기로 사용한 사례<sup>[23]</sup>가 있으며 이것은

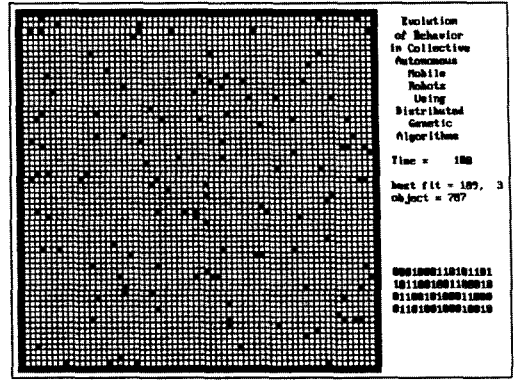
실제로 로봇의 내부 구조가 진화하는 경우이고 또 다른 방법으로 실제의 로봇으로 구성된 시스템 내에서 로봇들이 자신의 행동 규칙을 바꾸면서 진화해 나가는 경우가 있다<sup>[27]</sup>.

유전 알고리즘은 기본적으로 군 기반 탐색방법이다. 따라서 여러 대의 로봇으로 구성된 시스템에서 하나하나의 로봇을 유전 알고리즘의 개체로 보고 선택, 교배 및 돌연변이 연산을 취해 진화해 나갈 수 있다. 이때 로봇은 자신의 행동 결과를 가지고 스스로 적응도를 판단하며, 시스템 내에서 통신에 의해 다른 로봇을 선택하여 유전자를 교환한다. 이 방법을 분산유전알고리즘이라 하며 연속세대모델이다. 여러 대의 로봇 또는 마이크로로봇으로 구성되는 자율분산시스템에서 실제 또는 모의로 진화가 가능한 알고리즘이다. 그림 12는 로봇이 물체를 획득하는 목적에 대하여 컴퓨터 상에서 모의 진화를 한 결과를 나타낸다. 로봇은 센서의 입력값에 기초해 행동규칙을 작성하고 이를 염색체로 표현하여 갖게된다. 그림 10은 초기상태의 물체 및 로봇의 상태를 나타내며 그림 11은 1096시간(실



제 시간과 다르다)이 경과했을 때의 상태이다. 계속적인 동일한 조건의 부여를 위해 50시간마다 없어진 물체를 보충해 주었으며 1050시간에서 1096시간까지 로봇이 획득한 물체는 195개이다. 그림 12는 그 때까지의 최상의 개체로 다시 시스템을 구축하여 100시간이 경과한 후의 결과로 대부분의 물체를 획득하였다(812개 중 787개의 물체 획득).

로봇의 군에 있어서 군의 제어를 위한 합성적인 접근방식은 진화의 원리에 의해 효과적으로 달성될 수 있다. 즉 로봇의 행동방법을 만들고 이것이 적용된 여러 대의 로봇으로 시스템을 구성하여 나타나는 결과에 의한 평가를 함으로써 올바른 목표를 수행할 수 있는 행동방법이 선택되도록 한다. 물론 모의로 진화 해야만 하는 한계가 생기더라도 실제로 적용할 수 있는 규칙을 어느 정도 모의실



(그림 12) best개체로 구성된 시스템의 100시간 후 결과

험에 의해 구성된 후 실제적인 적용을 통한 개선을 한다면 모의 실험과 실제 구현은 상호 보완적인 관계를 가질 수 있다.

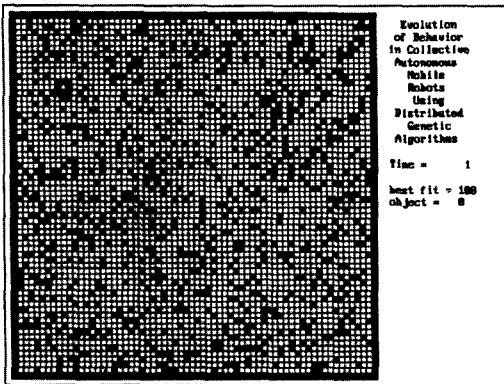
### 8. 퍼지(Fuzzy)에 의한 로봇의 제어

퍼지는 인간의 추론기능을 모방한 모델이다. 특히 문제의 애매함이나 불확실성을 잘 모델링 할 수 있다. 따라서 비선형적인 문제나 환경 또는 시스템의 정확한 모델링이 힘든 문제에 많이 적용되고 있다. 여러 대의 로봇이 그룹을 이루고 군행동을 구현하는 연구에 퍼지이론을 적용한 사례<sup>[28]</sup>도 있으며 앞으로는 이론적인 발전과 함께 퍼지론을 사람이 미리 만들어 주지 않고 자동으로 룰을 개선시켜나가는 방법 등 앞에서 소개한 방법들과의 융합 또는 통합에 의해 계속적인 발전이 기대된다.

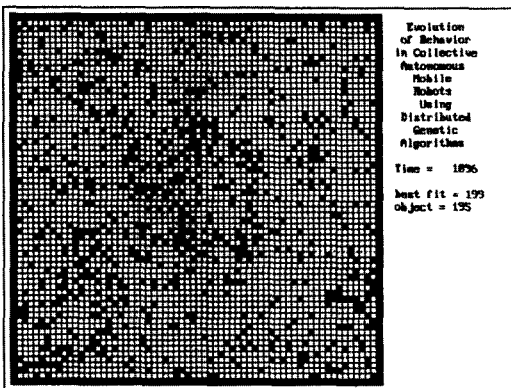
### 9. 기타

생물체와 같이 적응 학습을 하고 지능을 가진 로봇을 개발하기 위하여 하드웨어의 기술 발전이 뒤받침되어야 한다. 이러한 기술은 정밀한 측정을 위한 센서기술 및 시각기술, 인간과의 대화를 위한 음성인식기술, 정밀한 작업을 위한 로봇의 제작기술, 정보교환이나 인터페이스를 위한 통신기술 등이다.

특히 여러 대의 로봇이 협조적인 일을 달성하기 위한 통신기술의 개발은 필수적이다. 소수의 로봇



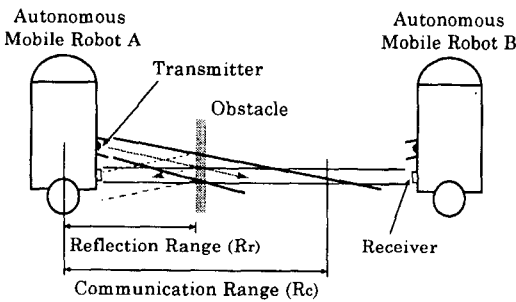
(그림 10) 초기의 물체와 로봇의 상태



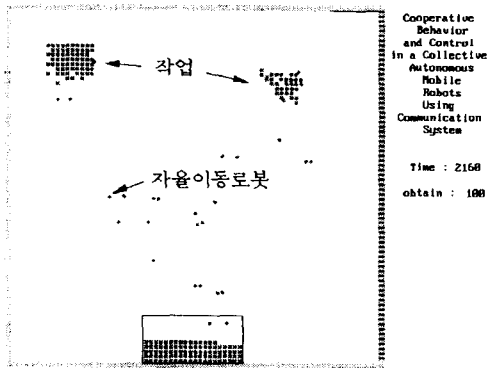
(그림 11) 1096시간 후의 물체와 로봇의 상태

과 통신을 하기 위해서는 무선 등의 광역성이 있는 통신 방법을 사용할 수 있으나 로봇의 대수가 증가하면 통신능력의 제한이나 상호간의 간섭, 코스트의 증가 등의 문제가 발생한다. 따라서 적외선 통신 등의 방법을 이용한 지역적 통신 방법이 유리하게 된다.

그림 13은 적외선 센서를 사용한 이동로봇의 지역적 통신 시스템이며, 그림 14는 이와 같은 모델의 로봇을 사용해 사인보드의와 메시지 전달의 방법으로 두 대의 로봇이 팀을 이루어 물체를 운반하는 모의실험의 그림이다<sup>[29]</sup>.



<그림 13> 적외선센서를 이용한 지역적 통신 시스템



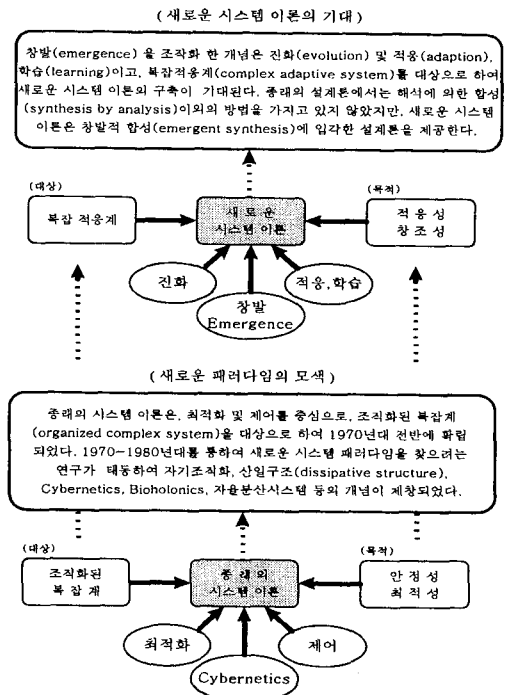
<그림 14> 통신을 사용한 물체의 협조 운반

## V. 결 론

인공생명이라는 말은 최근에 등장하여 벌써 연구의 한 분야로 정착되었다. 그러나 사실 인공생명

이라는 말이 등장하기 이전에도 생물계를 모방한 여러 가지 이론이 있었다. 신경망, 유전 알고리즘, 퍼지 등의 이론은 이미 1900년대 중반에 등장하였고 강화학습, 면역계, 자기조직화 등의 연구는 1980년대 이후에 본격적으로 이루어졌으며 군지능, 자율분산시스템 등의 이론은 아직 완전히 이론적으로 정립되어 있지는 않지만 계속 연구되고 있는 단계이다. 아직까지 생명체에 대하여 밝혀지지 않은 사실들이 더 많지만 현재까지의 이러한 개별적인 연구 결과들은 인공생명이라는 이론으로 정리되고 통합되는 단계에 들어왔다고 생각된다. 현재 많은 연구자들이 신경망, 퍼지, 유전 알고리즘을 융합하는 시도를 많이 하고 있으며 아래에서 위로의 접근에 의한 창발의 실현을 위해 이러한 융합의 방법은 더욱 더 발전될 것으로 보인다.

또한 그림 15<sup>[30]</sup>와 같이 기존의 분석적인 연구방법인 최적화, 제어, 인공두뇌학(cybernetics)의 시스템 이론에서 진화, 적응, 학습, 창발이라는 생물계의 특징을 가진 새로운 시스템 이론의 필요성이 최근 강조되고 있다.



<그림 15> 새로운 패러다임의 기대

본론에서 제시한 여러 가지의 인공생명 방법들이 로봇에 적용되어 우리 자연계의 생물체와 비슷한 지능로봇이 출현된다면 그 지능로봇은 우리 인간과 관련된 모든 분야에서 우리에게 영향을 주어 우리 일상 생활에서 더 이상 로봇이 아닌 우리의 구성원으로서 존재하게 될 것이다. 하지만 아무리 우수한 지능과 인공생명을 갖는 지능로봇이 출현된다 할지라도 인공물임에는 틀림이 없다. 따라서 만물의 영장인 우리 인간에게 어떠한 해를 입히는 그러한 인공물이 되어서는 안될 것이다. 이는 1942년 미국의 공상과학 작가인 Isaac Asimov 가 로봇공학을 뜻하는 로보틱스(robotics)라는 단어를 사용하면서 제시한 로봇의 3가지 규범 즉

첫째, 로봇은 인간을 다치거나 위협에 빠지도록 해서는 안된다.

둘째, 로봇은 첫째 규범에 저촉되지 않는 한 인간이 내린 명령에 복종해야 한다.

셋째, 로봇은 상기의 첫째와 둘째 규범에 저촉되지 않는 한 자신의 존재를 보호해야 한다.

는 내용을 준수할 수 있어야 할 것이다.

끝으로 인공생명이라는 것도 결국 모든 일에 만능이 될 수는 없다. 하지만 앞으로의 더욱 더 발전된 연구를 통해서 우리 인간에 유익한 인공 생명체 즉 고도의 지능로봇시스템이 만들어 질 것으로 기대된다.

#### 참 고 문 헌

- [1] C.G Langton ed., *Artificial Life*, Addison-Wesley, 1990.
- [2] C.G Langton ed., *Artificial Life II*, Addison-Wesley, 1992.
- [3] C.G Langton ed., *Artificial Life III*, Addison-Wesley, 1993.
- [4] Brooks and Maes ed., *Artificial Life IV*, MIT Press, 1994.
- [5] 紫田 崇徳, “로봇에서 인공생명체로,” *시스템/제어/정보*, Vol. 40, No. 8, pp. 31-36, 1996.

- [6] R.A. Brooks, “Intelligence without representation,” *Artificial Intelligence*, vol. 47, pp. 139-159, 1991.
- [7] *Proc. of International Symposium on Distributed Autonomous Robotic Systems*, 1992. 9.
- [8] H. Asama et al., *Distributed Autonomous Robotic Systems*, Springer-Verlag, 1994.
- [9] H. Asama et al., *Distributed Autonomous Robotic Systems 2*, Springer-Verlag, 1996.
- [10] M. J. Mataric, “Designing Emergent Behaviors : From Local Interactions to Collective Intelligence,” *Proc. of 2nd International Conference on Simulation of Adaptive Behavior*, pp. 432-441, 1993.
- [11] 심귀보, 공성근, 강훈, 장병탁, “인공생명 기법을 이용한 자율이동로봇군의 협조행동 구현”, 한국과학재단 특정연구과제 연구계획서, 1996. 4.
- [12] C. R. Kube and H. Zhang, “Collective Robotic Intelligence,” *Proc. of 2nd International Conference on Simulation of Adaptive Behavior*, pp. 460-468, 1993.
- [13] Gerardo Beni, “自律分散ロボットシステムと群知能,” *日本ロボット學會誌*, Vol. 10, No. 4, pp. 457-463, 1992.
- [14] 淺間一, “群ロボットシステムにおける創発の實現,” *計測と制御*, Vol. 35, No. 7, pp. 545-549, 1996.
- [15] 심귀보, “마이크로 로봇의 지능제어,” *생산공학연구소 학술발표 논문집*, 중앙대학교, pp. 54-69. 1995. 11.
- [16] R.S. Sutton, “Learning to Predict by the Methods of Temporal Differences, *Machine*

- Learning," *Machine Learning*, vol. 3, pp. 9-44, 1988.
- [17] C.J.C.H Watkins, P. Dayan, : Technical Note "Q-Learning," *Machine Learning*, Vol. 8, pp. 3-4, 55-68, 1992.
- [18] 上田完次, 人工生命の方法, 工業調査會, 1995.
- [19] N. Mitsumoto et al., "Micro Autonomou Robotic System and Biologically Inspired Immune Swarm Strategy as a Multi Agent Robotic System," *Proc. of International Conference on Robotics and Automation*, pp. 2187-2192, 1995.
- [20] T. Fukuda, T. Ueyama, *Cellular Robotics and Micro Robotic Systems*, World Scientific, 1994.
- [21] K. Sekiyama, T. Fukuda, "Modeling and Controlling of Group Behavior Based on Self-Organizing Principle," *Proc. of International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1407-1412, 1996.
- [22] D.E. Goldberg, *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*, Addison Wesley, 1989.
- [23] 北野宏明 外, 遺傳的アルゴリズム, 産業圖書, 1993.
- [24] J.R. Koza, *Genetic Programming : On the Programming of Computers by Means of Natural Selection*, MIT Press, 1992.
- [25] 이동욱, 심귀보, "유전 프로그래밍에 의한 자율이동로봇군의 협조행동 및 제어," 제 11회 한국자동제어학술회의 논문집, pp. 1177-1180, 1996. 10
- [26] 이동욱, 심귀보, "신경회로망과 유전 알고리즘을 이용한 자율이동로봇군의 창발 행동 실현," 제5회 인공지능, 신경망 및 퍼지 시스템 종합학술대회(JCEANF '96) 논문집, pp. 34-37, 1996. 10
- [27] 이동욱, 심귀보, "분산유전알고리즘을 이용한 자율이동로봇군의 행동진화," 제5회 인공지능, 신경망 및 퍼지시스템 종합학술대회(JCEANF '96) 논문집, pp. 127-130, 1996. 10
- [28] 강훈, "분산된 퍼지 모빌 로봇," 한국퍼지 및 지능시스템학회 춘계학술대회 학술 발표논문집, pp. 66-71, 1995
- [29] 이동욱, 심귀보, "자율이동로봇군의 협조 행동을 위한 통신시스템의 개발," 대한전자 공학회 논문지, 제 34권, S편, 제3호, 1997. 3
- [30] 小林重信, "自律分散システムからの新たな飛翔," 計測と制御, Vol. 32, No. 10, pp. 858-861, 1993.

## 저자 소개



沈 貴 寶

1956年 9月 20日生

1984年 중앙대학교 전자공학과 졸업(공학사)

1986年 중앙대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사)

1990年 The University of Tokyo, 전기전자공학과 졸업(공학박사)

1990年 동경대학교 생산기술연구소(연구원)

1991年~1994年 중앙대학교 제어계측공학과 조교수

1992年~현재 대한전자공학회, 인공지능·신경망 및 퍼지시스템 연구회 협동전문위원

1995年~현재 대한전자공학회 논문지 편집위원

1995年~현재 중앙대학교 전기전자제어공학부 부교수

주관심 분야 : 로보틱스 전반, 지능제어시스템, 퍼지, 신경망, 진화연산, 마이크로로봇 시스템, 센서융합, 카오스제어, 인공생명기법, 자율분산시스템 등