

인공생명 로봇

중앙대학교 심귀보*·이동욱**

1. 서 론

사람처럼 행동하고 사고하고 말하는 기계를 만들 수 있을까? 오래 전부터 소설이나 영화 속에서는 사람을 닮은 로봇이 등장한다. 로봇이라는 용어는 1921년 체코의 희곡작가 카펠 차펙(Karel Capet)이 쓴 로봇의 만능로봇(RUR:rossum's universal robot)에서 유래한다. 여기서 로봇은 혹사당하는 노예를 지칭하는 말이었지만 점차로 일반적인 용어로 인간과 유사하게 생긴 자동기계를 지칭하는 말이 되었다. 언제나 인간의 상상력은 그 당시의 기술을 뛰어넘게 마련이다. 로봇의 연구는 2차 세계대전 이후 전자식 컴퓨터가 개발됨에 따라 컴퓨터로 제어되는 로봇을 개발하기 시작하면서 본격화되었다. 이후로 로봇의 역사는 소설과 영화 속의 허구적인 로봇을 따라잡으려고 끊임없는 노력하면서 발전하였다. 단순한 작업만을 할 수 있었던 초기의 산업용 로봇에서부터 사람처럼 말을 하고 사람처럼 걸어 다니는 최근의 로봇까지 로봇의 기술은 컴퓨터의 발달과 함께 점점 고도화 지능화 되어가고 있다. 그러나 아직 사람처럼 생각하고 자유롭게 행동할 수 있는 지능로봇의 실현은 불가능해 보인다.

로봇을 지능화 하려는 시도는 인공지능(artificial intelligence) 분야에서부터 시작되었다. 인공지능이란 인공적으로 지능을 실현하기 위한, 또는 지능적 시스템을 만들기 위한 방법론으로서 주로 기호나 논리에 의하여 지능

을 기술해 나가는 방법을 사용한다. 그러나 인공지능 방법은 처음의 기대와는 달리 한정된 곳에서의 지능화만을 실현할 수 있을 뿐 실제로 학습하며 변화한 환경에 적응하는 진정한 의미의 지능화에는 아직 도달하고 있지 못한 것이 사실이다. 이것은 논리 및 기호의 표현에 의존하는 인공지능 기술은 조건이 완벽하고 정보가 완전하게 주어지는 상황하에서의 지능적인 시스템을 개발하는 것은 가능하나 애매함과 불확실성이 존재하는 환경에 대한 처리는 완전하지 못하는 이유에 기인한다.

로봇은 점차로 공장을 벗어나 여러 산업현장을 비롯해 우리의 생활의 전반에까지 침투하고 있다. 이렇게 로봇의 활동영역이 광범위해지면서 이제 로봇의 환경은 비선형적이며 복잡 다양해져 정확한 환경모델을 구축하기 힘들게 되었다. 따라서 종래의 인공지능 기법 및 수학적 모델에 기반한 제어만 가지고는 로봇의 제어가 불가능하게 되었다. 한편 자연계는 매우 복잡하고 동적인 환경을 제공한다. 생물체들은 여기에 적응한 것들만이 살아남는다. 이렇게 진화하고 있는 생물에게서 유용한 원리를 찾아 로봇에게 적용한다면 인공지능 기술의 한계를 넘어설 수 있지 않을까? 최근에 생물체의 행동 방식이나 구조적 특성들에 바탕을 두고 있는 인공생명이라는 학문이 이러한 문제들의 해결에 실마리를 제공해줄 것으로 기대되고 있다.

인공생명(artificial life)은 우리가 자연계의 생물로부터 얻는 여러 가지 힌트와 영감에 대하여 체계를 세우고 연구를 활성화하기 위하여 탄생한 학문이다[1~9]. 특히 컴퓨터나 인공매체에 생명의 기본법칙을 적용해 생물학적 현상

*정회원

**학생회원

을 제구축 해보며 생물의 성질이나 메커니즘을 해명함으로써 기존의 생물학과도 보완 관계를 가지고 있다. 그러나 인공생명은 생명 그 자체를 가지는 인공물의 창조(life as we know it)에 초점을 맞추고 있는 것은 아니라 오히려 생명의 특징을 가지는 인공물의 창조(life as it could be)에 초점을 맞추고 있다. 즉, 생명체의 특징을 이해하고 이것을 인공적인 매체(software, hardware, wetware)에 생명체와 유사한 기능을 갖는 시스템을 구축해 생명체가 가지는 우수한 특징(자율성 적응, 진화, 자기증식, 자기복제 등)을 실현하고자 하는 것이다. 본 논문에서는 인공생명의 기본 원리와 이것이 지능 로봇 시스템을 구축하는데 어떻게 적용될 수 있는지 저자의 연구내용 등을 통해서 최근의 연구 동향과 앞으로의 발전을 전망해 본다.

2. 인공생명과 로봇시스템

오래 전부터 인간들은 주어진 문제를 해결하고자 할 때 자연에서부터 그 해결책을 찾은 사례가 많다. 새가 나는 모습을 보고 비행기를 개발하였으며, 박쥐의 음파탐지 기능을 모방해 레이더를 개발하였다. 또한 배나 잠수함은 물고기의 모양을 보고 유선형으로 설계하였다. 이러한 것들은 생물의 외부적인 특징을 모방하여 공학적으로 응용한 경우이다. 인공생명에서는 이와 같은 외형적인 모양이나 특징뿐만 아니라 생물체의 동작 원리, 알고리즘, 내재적 규칙, 행동 원리, 방법론 등을 포함하여 연구의 대상으로 삼는다. 즉 생물체가 유용한 성질을 얻게된 원리와 과정도 중요한 연구 과제로 삼는 것이다.

인공생명에서 추구하는 로봇[10]은 생물체의 유용한 특징을 갖는 로봇이다. 이러한 로봇은 다음과 같은 특징을 갖는다. 첫째로 인공생명 로봇은 주어진 문제의 수행에 있어서 사전에 짜여진 완벽한 계획보다는 예측하지 못한 문제가 발생하였을 경우 즉각적인 대처와 참여에 의해 적응 및 학습해 나가는 능력이 있다. 따라서 행동계획은 보다 자연스럽게 유연하게 하여 환경조건으로부터 발현될 수 있도록 한다. 이를 위하여 로봇 설계자는 완벽한 사전제

획보다는 로봇 스스로가 문제를 해결할 수 있는 구조를 만들어 주는 것이 필요하다. 둘째로 개체간 또는 환경과의 상호작용에 의해 창발적인 행동이 나타난다. 창발적 행동이란 여러 개의 단순한 행동을 하는 개체가 주위환경과 상호작용을 함으로써 각각의 개체에서는 존재하지 않는 새롭고 복잡한 행동을 보이는 것을 지칭한다. 기존의 분석적인 방법에 의해서 설계가 어려운 매우 복잡한 시스템에서는 창발적 행동이 유일한 해결방법이다. 창발적 행동은 바람직하지 않은 방향으로 진행될 수도 있으나 적자생존 법칙이 존재하는 한 우수한 창발적 행동만이 다음 세대에 전해질 수 있다.

그림 1은 자연계와 인공생명 모델을 비교한 것이다. 인공생명 로봇은 여러 가지 인공생명 모델을 이용하여 개체 수준에서는 행동기반 로봇, 집단 수준에서는 로봇군의 군지능 발현, 사회적인 수준에서는 자율분산 로봇시스템을 목표로 하고 있다.

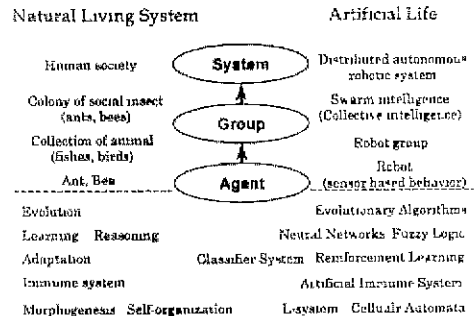


그림 1 자연계와 인공생명 모델

3. 인공생명을 갖는 지능로봇시스템

3.1 물리기반 포섭구조

MIT 인공지능 연구실의 브룩스(Brooks)는 인공지능방법과 판이한 방법으로 로봇공학에 충격을 주었다. 인공지능이 일반 물리세계로부터 입력을 받으면 물리세계와는 연관을 끊고 내부적으로 연산을 처리한 다음 출력을 내보내는 것에 비하여 브룩스가 제안한 방법은 포섭구조(subsumption architecture)[11]라는 형식으로서 낮은 레벨에서는 물리세계와 직접 반

응하여 출력을 내보내며 높은 레벨에서는 좀 더 복잡한 일을 담당하는 구조로 되어있다. 이 방식은, 곤충이 행동하는 양식은 의식이 없는 상태에서 자발적으로 나타난다는 것에 바탕을 두고 있다. 포섭구조는 로봇의 행동규칙이 병렬적으로 모듈화 되어있어서 정보의 병목현상이 발생하지 않는다. 그림 2와 그림 3은 기존의 인공지능 방법과 브룩스의 포섭구조를 나타낸 그림이다.

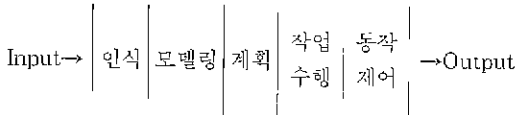


그림 2 기존의 인공지능 방법

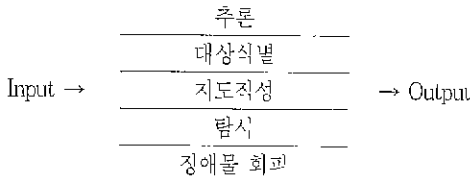


그림 3 포섭 구조

3.2 진화, 학습하는 로봇

컴퓨터의 발전에 힘입어 몇 백 만년의 진화를 컴퓨터 상에서 불과 몇 시간 내로 단축할 수 있게 되었다. 진화 알고리즘은 인공생명 연구에 있어서 견인차 역할을 하는 도구 중의 하나이다. 그러면 어떻게 로봇을 진화시킬 수 있을까? 현재로서는 로봇의 하드웨어 구조를 진화시킬 수 있는 방법은 드물고(일부 초보적인 연구가 진행되고 있지만), 로봇의 지능만을 진화시킬 수 있다. 로봇의 지능을 진화시키는 방법은 크게 off-line 진화와 on-line 진화로 나누어진다. off-line 진화는 컴퓨터 속에 실제와 유사한 가상의 환경을 만들어 놓고 여기에서 진화를 수행한 후 가장 우수한 것을 실제의 로봇에게 이식시키는 방법이다. 이것은 가상의 환경에서의 진화라는 큰 약점을 가지고 있는 방법이지만 시간이 짧게 걸리기 때문에 로봇의 행동방식이나 알고리즘 등 고수준의 지능을 진화시키는데는 효율적이다. 한편, on-line 진화는 실제로 로봇의 로봇으로 개체를

실제로 평가받으면서 진화를 시키는 방식이다. 이것은 개체군을 가지고 진화를 수행하는 진화 알고리즘에서 개체 하나 하나의 평가시간이 매우 오래 걸리는 단점을 가지고 있다. 그러나 실제의 상황을 고려했다는 점에서 진정한 로봇의 진화라고 할 수 있다. 실제의 로봇의 개발에 있어서는 환경과 밀접한 수준의 지능은 on-line 진화를 수행하고 환경에 덜 민감한 수준의 지능은 off-line으로 하는 등의 방법이 사용된다.

코자(Koza)는 브룩스의 포섭구조에 의해서 나타난 결과를 얻어내기 위하여 로봇의 행동을 유전자 프로그래밍(genetic programming) [12]을 사용하여 진화시켰다. 또한 여러 대의 로봇이 협조하여 타자를 운반하기 위하여 유전자 프로그래밍이 사용되었다[13]. 이외에 일반적으로 진화 알고리즘은 다른 알고리즘의 최적해를 찾기 위하여 함께 사용되는 경우가 많이 있다.

진화와 다른 방식으로 로봇의 지능을 향상시킬 수 있는 방법은 학습을 이용하는 방법이다. 학습이란 원하는 목표를 향해 자기자신을 조금씩 개선해 나가는 것을 말하는데 on-line으로 로봇의 행동을 개선시킬 수 있는 방법이기 때문에 매우 매력적인 방법이다. 학습은 원하는 정답이 주어지는가의 여부에 따라 교사 학습과 비 교사 학습으로 나누어진다. 로봇의 행동은 원하는 목표를 달성하는 제어기의 최종결과를 미리 알 수 없는 경우가 대부분이기 때문에 비 교사 학습의 일종인 강화학습(reinforcement learning)이 많이 이용된다. 강화학습은 행동의 옳고 그름만을 판단할 수 있으면 시행착오에 의해 학습을 수행한다. 로봇이 강화학습을 한다고 했을 때 주어진 환경에서 최적의 결과를 얻겠다고 하는 측면과 학습하는 과정에서도 좋은 효율을 얻겠다고 하는 두 가지 측면이 존재한다. 이것을 각각 전자는 환경동정형(exploration oriented) 강화학습이라고 하고 Q-learning[14]과 TD method[15] 등의 학습법이 이용되며, 후자는 경험강화형(exploitation oriented)이라는 학습법으로 분류자 시스템(classifier systems)[16]의 버킷 릴레이(bucket brigade) 등이 사용된다.

최근에 진화 알고리즘에서 그 중요성이 점점 부각되고 있는 공진화 알고리즘과 진화적 방법을 이용해 강화학습을 하는 분류자 시스템에 대하여 간단히 살펴보고 진화와 학습이 동시에 이용되는 로봇시스템의 예를 살펴보자.

실제로 자연계의 생물들은 다른 요소들과 서로 영향을 주고받으며 공진화 한다. 공진화 알고리즘[17~19]은 두 개 이상의 개체군이 상호작용을 하면서 진화하는 알고리즘이다. 피식자(preys)와 포식자(predator)의 관계와 같이 서로 다른 개체군간의 경쟁에 의하여 진화하는 경쟁적 공진화[17]와 두 개체군이 서로 보완하며 협조해 나가는 협조적 공진화[18, 19]가 있다. 그림 4는 로봇의 제어기로서 신경망과 학습패턴 간의 경쟁적 관계를 설정해 공진화하는 방법을 나타낸 그림이다. 신경망은 모든 학습패턴을 해결할 수 있어야 하고 학습패턴은 신경망이 해결하기 어려운 쪽으로 진화한다. 실험결과 훌륭한 학습패턴과 신경망을 얻었다[17]. 또 퍼지시스템에서 멤버쉽 함수(membership function)와 규칙(rule)과 같이 서로 의존적 관계에 있는 것을 개체군으로 구성해 협조적인 공진화 방법으로 우수한 멤버쉽 함수와 규칙을 찾고 있다[18]. 또 숙주와 기생충의 관계를 모델링 한 스키마 공진화법도 제안되어 있다[19]. 공진화 방법은 서로 영향을 주고받는 두 개 이상의 개체군이 함께 진화하기 때문에 매우 강건하고 우수한 시스템의 진화를 실현 할 수 있는 장점이 있어 앞으로의 연구가 더욱 기대되는 분야이다.

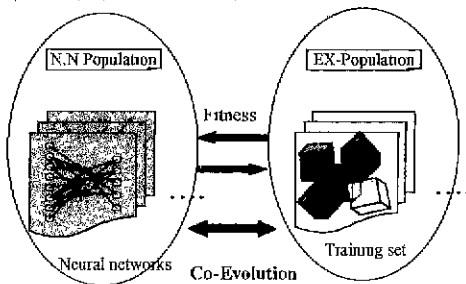


그림 4 신경망과 학습패턴의 공진화

기계학습에서는 복잡한 시스템을 대상으로 하여 그 대상시스템을 학습시킬 뿐만 아니라 시스템에 대한 적절한 출력을 만들어 내는 두

가지의 목적을 가진다. 기계학습에서 유전자 알고리즘(genetic algorithms)의 기법을 이용한 것을 GA기계학습 또는 GBML(genetic based machine learning)[16, 20]이라고 한다. 기계학습이 최적화 문제와 근본적으로 다른 점은 규칙의 조를 구하지 않으면 안 되는 점이다. 최적화 문제에서는 최적해에 가까운 우수한 해를 구하는 것이 목적이기 때문에 최후의 한 종류만이 개체에 수렴하면 되지만 기계학습에서는 가장 좋은 규칙 하나만 구하는 것이 아니라 서로 협조하는 규칙의 집합을 구하는 것이 필요하다. GBML의 대표적인 방법이 분류자 시스템[16, 21]이다. 분류자 시스템의 입력부분에 가까이 있는 메시지 목록을 이용하여 시스템 내에서 생성되는 분류자 목록의 요소인 분류자(classifier)를 정비해 간다. 이 방법에서는 규칙의 한 조를 가지고 온라인으로 정비하기 때문에 실제의 문제에 대해서 실시간 처리와 온라인 학습이 가능하다. 최근에는 퍼지 제어기 및 분류기를 설계하기 위한 퍼지 분류자 시스템(fuzzy classifier systems)도 활발히 연구되고 있다. 그림 5는 분류자 시스템의 개념도이다.

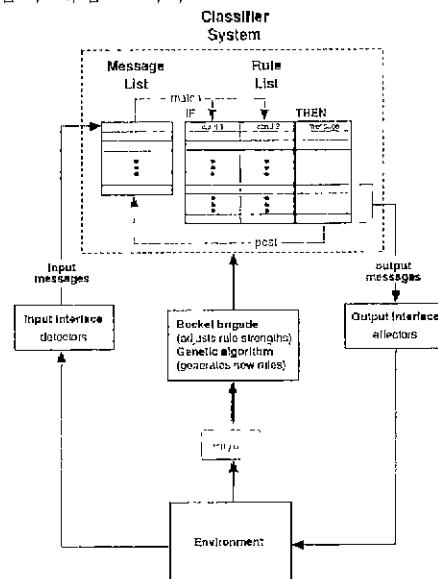


그림 5 분류자 시스템의 개념도

자연계의 진화에서 획득한 형질을 후대에 물려준다는 라마르크의 가설은 인정되지 않는다.

그러나 인공생명에서는 굳이 이 법칙을 따를 필요는 없다. 효율성이 보장된다면 학습한 결과를 물려주는 것도 가능하다. 그림 6은 저자들이 연구하고 있는 자율이동 로봇 군에서의 진화와 학습의 모식도[22]이다. 여러 대의 로봇으로 시스템을 구성하는 경우 진화 알고리즘에서의 필요한 개체군의 요건이 갖추어지므로 개체간의 on-line 진화를 수행할 수 있다. 각각의 로봇은 개별적으로 환경에 대하여 강화학습을 수행하며 통신을 통하여 학습한 결과를 주고받음으로서 진화를 한다. 진화는 학습이 한 쪽으로만 진행되는 것을 방지하며 적응의 효율성을 더 높여준다. 진화적 강화학습법은 변화하는 환경에 대하여 즉각적으로 대처할 수 있는 중요한 개념이지만 구체적으로 실현하기 위한 방법에는 더욱더 연구가 필요하다.

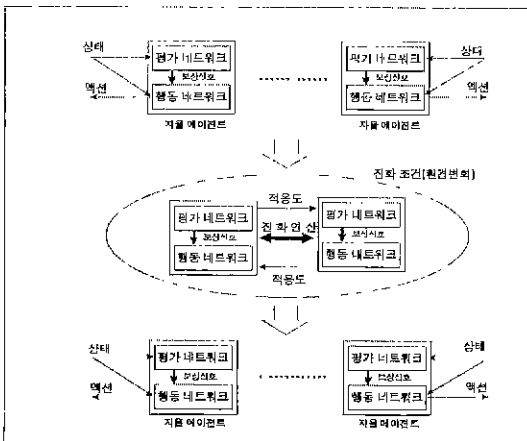


그림 6 자율이동 로봇군의 진화와 학습의 개념도(진화가 이루어지기 위해서는 로봇간에 시간적 공간적 조건이 충족되어야 한다)

3.3 생체의 메커니즘을 이용한 지능로봇 시스템

생물체의 행동을 결정하는 정보 처리 메커니즘은 크게 유전계(genetic system), 뇌 신경계 (brain-nervous system), 면역계(immune system), 내분비계(endocrine system)의 네 가지로 분류할 수 있다. 이 중 유전계는 생물

의 진화 및 발생에 관계된 메커니즘으로서 공학적으로 유전자 알고리즘으로 모델화되어 인공생명 연구의 훌륭한 도구로 실현되어 있고, 뇌 신경계는 적응과 학습과 관련하여 인공 신경망으로 모델화되어 다양한 분야에서 많은 성공을 거두고 있다. 반면 면역계와 내분비계에 관해서는 고도의 정보처리메커니즘을 가지고 있음에도 불구하고 공학적으로 응용된 예는 그리 많지 않다. 하지만 최근에 그 연구가 점점 늘어나고 있다.

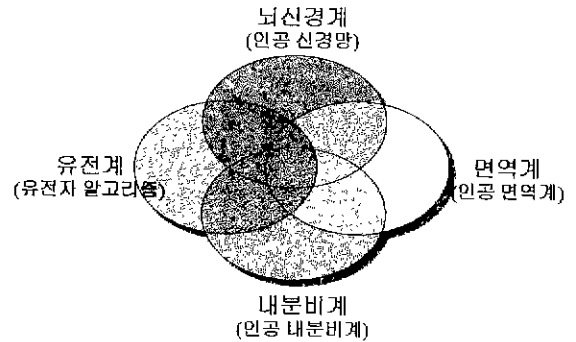


그림 7 생체의 정보처리 기구와 인공생명 모델

생체의 방어체제인 면역시스템은 매우 정교하고 복잡한 시스템이다. 최근 연구결과에 의하면 면역계는 외계로부터 침입한 이물질을 물리치는 단순기능만이 아니라 시시각각 변화하는 환경 속에서 자신을 존속시키는 중요한 기능을 가지고 있다고 한다. 림프구가 체액 속을 단지 흩어져서 떠다니는 것이 아니라 상호간에 커뮤니케이션을 통해 고도의 정보 처리를 시스템 레벨에서 실현하고 있다. 이 기능은 뇌 신경계와는 또 다른 병렬 분산처리 알고리즘을 제공해 줄 것이고 미지의 동적 환경에서 자율적으로 대처하는 이동 로봇의 행동전략 결정 등에도 새로운 방법론이 될 것이다.

주어진 환경에서 최적의 전략을 찾아내는데 면역네트워크를 사용한 예가 있다[23]. 환경을 항원 로봇의 행동전략을 항체로 모델화 하여 항원을 잘 인식하는 항체가 면역네트워크에서 가장 많이 활성화되는 메커니즘을 응용한 것이다. 또한 면역계는 자율분산로봇시스템에서 개개의 로봇의 의견을 조정하여 최적의 군 행동 전략을 선택하는데 적용한 연구도 수행되

고 있다[24, 25]. 이것은 개개의 로봇이 통신을 통하여 자신의 정보를 교환하고 여러 가지 파라미터 값에 따라 서로 자극과 억제를 받음으로서 군 전체의 의견을 통일하는 방법이다.

한편 항상성이란 동물의 내적 환경을 비교적 일정 수준으로 유지하는 생체의 메커니즘이다. 생물체내에서 이러한 항상성을 유지하는 기관이 바로 내분비계이다. 내분비계는 혈액이나 체액 등에 있는 산소나 영양분의 농도, 온도, 다른 호르몬의 농도 등에 반응하여 특수한 화학물질인 호르몬을 생성해서 표적조직으로 이동시키는 시스템이다. 이때 호르몬은 표적조직의 수용체 단백질과 열쇠와 자물쇠의 관계와 같이 특이적으로 결합한다. 이러한 작용을 바탕으로 내분비계가 항상성을 유지하는 원리는 기본적으로 자동 온도 조절기의 부 귀환 시스템(negative feedback system)과 같다. 내분비계는 이러한 기본원리를 바탕으로 뇌 신경계와 상호작용 및 협동에 의하여 생체를 통제하고 조절한다.

내분비계의 주요 기능은 호르몬을 수용하여 정보를 인식하는 기능, 정보 전달기능, 응답기능 등으로 요약된다. 대표적인 연구자는 GIT의 알킨(Arkin)이다. 그는 이러한 특징을 인공적으로 모델화하여 구조화되지 않은 환경에 대하여 즉각적으로 반응하는 반응제어 메커니즘을 연구하고 있다[26]. 또한 로봇 자신의 내부 자원을 관리하며 목적을 수행하는 항상성 제어에 적용하였다. 이러한 제어 알고리즘은 군 로봇의 군집 시스템에 효율적으로 적용될 수 있다. 이것은 행패기물, 환경복원, 화재진압, 지뢰제거, 군대의 전쟁 및 병참 지원, 자원탐색 및 개발, 행성탐험 등 앞으로의 응용분야가 기대된다.

3.4 국소적 상호작용을 이용한 군 로봇 시스템

로봇공학에서 여러 대의 로봇을 제어하는 것은 매우 흥미로운 일이다. 그러나 주어진 목적을 달성하기 위하여 여러 대의 로봇을 효율적으로 동작하도록 하는 것은 그렇게 쉽지 않다. 인공생명 연구자들은 자연계의 벌이나 곤충 또는 무리를 지어 다니는 새나 물고기 등에서 힌

트를 얻어 집단을 효과적으로 제어하는 방식을 연구하고 있다. 이러한 자연계의 생물들은 각 개체가 모두 스스로의 판단대로 움직이지만 그 결과는 군 전체의 행동이 나타나기 때문이다. 이와 같은 각 개체의 단순한 상호작용에 의해 군 전체의 행동이 나타나는 것을 창발행동이라 부른다. 매트릭(Mataric)은 국부적 상호작용으로부터 군지능(collective intelligence)를 구현하려는 노력을 기울이고 있고[27], 캐나다의 알버타 대학에서는 사회적인 행동양식을 보여주는 곤충의 행동을 모델링 함으로써 여러 대의 소형 이동로봇의 집합적인 행동을 보여주도록 제어하는 연구를 수행하고 있다[28]. 레이놀드(Reynolds)는 몇 가지 규칙을 이용해 새들의 무리짓기를 구현하였다[29]. 최근에는 퍼지 시스템[30]과 신경회로망[31]을 이용하여 군행동을 제어하는 연구가 행해지고 있다.

자율이동로봇군의 창발행동은 군 전체를 원하는 곳으로 이동시키거나 배치할 때 유용하게 적용할 수 있는 행동으로서 다음과 같은 것들이 있다. 군 전체의 중심으로 모이기, 일정한 간격으로 흩어지기, 무리짓기 및 편대형성, 목적지로 향하기, 물체 탐색 및 수집 등의 군 행동이 있다. 이 행동들은 개개의 로봇이 자신의 행동과 바로 주변의 로봇을 참조하여 행동하는 것으로서 하나의 로봇은 시스템 전체의 움직임을 파악하지 못하지만 시스템 전체적으로 질서적인 행동이 나타난다.

3.5 자율분산 로봇 시스템

자율분산로봇시스템은 시스템 전체를 통합하는 기능을 가지고 있지 않고 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[32].

자율분산로봇시스템에 대한 연구가 가장 활발한 곳은 일본이다. 나고야 대학의 후쿠다(Fukuda)는 세포 로봇학(cellular robotics)[33]라는 새로운 분야를 만들었다. 이것은 로봇을 세포와 같이 단순한 기능을 담당하는 여

러 부분으로 나누어져 있으며 이것들의 자율적으로 결합하고 협동하여 시스템의 목적을 달성한다. 이것은 목적에 따라 다양한 세포(하나의 로봇이 됨)를 준비하는 것으로 여러 분야에 적용할 수 있다. 예를 들면 입구가 작은 탱크에 여러 가지 세포를 투입하여 탱크 안에서 합체함으로써 내부의 검사작업을 수행하거나 소형의 마이크로 로봇[34]을 인체에 투입하여 이것이 몸 속에서 합체하여 수술 등의 기능을 수행할 수도 있으며 공장에서 생산라인을 자기조직화 하여 다품종 소량생산에 적용시킬 수 있다. 또한 일본의 기계기술 연구소에서는 동일한 기능과 형태의 유니트를 여러 개 모아서 복잡한 기능을 발현시키는 분산기계시스템[35]의 연구를 진행하고 있다. 이 시스템은 형태를 자유롭게 변화시키는 것이 가능하며 또한 어떤 유니트가 고장났을 때 남은 유니트의 집단이 스스로 기능을 회복하는 것도 가능하다.

한편 여러 대의 자율이동로봇으로 구성된 자율분산 시스템에서 합목적적인 협조작업을 수행하려고 하는 경우 로봇간의 통신이 반드시 필요하다. 만약 통신을 사용하지 않고 고도한 협조행동을 실현하기 위해서는 상대의 행동을 미리 알아차리는 추론기능이 필요하게 될 것이다. 이는 개체의 복잡성을 한층 더 가중시키며 유용한 정보를 다른 로봇에게 전달하지 못하여 작업효율도 떨어뜨린다. 현재까지 많이 쓰인 통신방식은 중앙관리자를 통한 통신이나 광역성이 있는 매체를 통한 통신을 하였다. 그러나 이 방법은 로봇의 수가 많아짐에 따라 그 복잡성이 증가하여 통신이 쉽지 않다. 자율분산로봇시스템에서는 사실상 모든 로봇의 정보를 알 필요가 없으며 주변에 있는 로봇의 정보와 자신이 처한 주변의 상황만 인식하여 행동하면 된다. 따라서 지역적 통신방법[36]을 사용함으로써 불필요한 정보의 범람을 막을 수 있으며 정보의 간섭현상도 생기지 않는다.

4. 인공생명 로봇의 두뇌

3절에서는 로봇에 인공생명 기법의 적용방법과 사례 등을 알아보았다. 인공생명 기법은 주로 로봇의 지능을 설계하기 위한 방법론에 해

당된다. 현재의 기술로는 로봇의 하드웨어를 스스로 변경하거나 진화하는 등의 조치를 취할 수 없기 때문이다. 그러나 이러한 것들은 로봇의 두뇌라기보다는 제어기나 알고리즘 쪽에 더 가깝다. 최근에는 이러한 알고리즘을 통합하여 다기능이고 진화와 학습 기능을 갖는 로봇의 두뇌를 개발하는 연구가 등장하고 있다. 로봇의 두뇌 개발은 인공생명 모델을 얼마나 잘 융합하여 적용하는가에 주요 관심사가 된다. 본절에서는 여러 가지 인공생명 기법을 이용해 로봇의 두뇌를 설계하고자 하는 연구에 대하여 간략하게 소개한다.

4.1 발생과 진화에 기반한 로봇의 두뇌 개발

최근, 인공생명, 신경망, 로보틱스와 관련된 국제 학회에서 인공두뇌(artificial brain)를 개발하기 위한 초보적인 논문이 많이 발표되고 있다. 이러한 연구들 중에는 생물학적 두뇌 모델을 연구하여 이를 공학적으로 구현하기 위한 방법이 많다. 특히 기존의 신경망의 파라미터나 구조를 진화하던 단계에서 더 나아가 신경망의 합성규칙을 진화시키는 방법이 연구되고 있다. 이것은 생물체의 발생과 진화 메커니즘에서부터 힌트를 얻은 것으로서, 신경망의 크기가 커지더라도 진화의 복잡성이 증가하지 않는 장점이 있다. 따라서, 궁극적으로 인공 뇌와 같이 고도로 복잡한 시스템을 구축하는데 유용한 방법론이 될 수 있다.

일반적으로 유전자 알고리즘에서 유전자의 배열은 곧 표현형의 구조를 직접 나타낸다. 이 경우 표현형이 매우 복잡한 구조를 가진다면 유전형의 길이도 매우 길어지는 단점을 가지게 된다. 따라서 이러한 문제점을 개선하기 위한 방법으로 유전형과 표현형의 변환 과정에 발생 모델을 이용하는 것이 이용된다. 이로써 적은 길이의 유전자형을 가지고 복잡한 표현형을 나타낼 수 있다. 생물학적 발생을 모델링 한 도구로서 L-시스템, 셀룰라 오토마타 및 세포의 분열을 모델링 한 방법 등이 있다. 보어(Boers)[37], 그라우(Gruau)[38] 등은 L-시스템 기반의 신경망의 설계방법을 제안하였고, 드가리스(de Garis)[39] 등은 셀룰라 오토마

타 기반의 CAM-Brain이라는 인공 뇌를 개발하고 있다. 본 저자들도 인간 두뇌의 정보처리 메커니즘을 모사하여 자기조직화하는 진화 신경망을 구성하고, 이를 자율분산 시스템에 적용함으로써 개체간의 국부적 상호작용을 통하여 군지능을 창발하여, 변화하는 환경에 적응하고 협조행동을 가지는 자율분산 군지능 시스템을 구현하는 것을 목표로 셀룰라 오토마타와 진화 알고리즘을 기반으로 한 새로운 형태의 신경망 구성방법을 연구하고 있다[40, 41].

현재 신경망을 생성하는 방법으로서 발생/발달 모델과 진화모델을 연구하며 신경망과 퍼지 시스템을 융합한 학습알고리즘을 개발하고 있다. 기존의 전방향 신경망은 동적인 행동의 학습에는 부적당하며 문제에 적당한 신경망의 구조를 결정하기도 어렵다. 이에 본 연구에서는 주어진 문제에 적합한 신경망을 생성하기 위하여 진화적인 방식을 이용한다. 그러나 궁극적으로 인간의 뇌와 같이 큰 구조로 확장이 가능한 신경망을 진화시키기란 쉽지 않다. 따라서 본 연구에서는 생물체의 발생/발달 모델로 신경망을 설계하고 DNA의 유전적 진화방식을 적용한 신경망의 진화적 발생모델을 연구한다. 이 방법에서 유전자는 발생 규칙을 코드화 하게 되고 따라서 큰 규모의 신경망도 염색체가 나타내는 규칙에 따라 발생시킴으로 신경망의 크기와 무관하게 진화의 복잡도가 증가하지 않는다. 또한 신경망의 성능을 보완하기 위한 뉴로-퍼지 시스템의 학습알고리즘을 개발한다. 그림 8은 진화, 발생 및 학습과정을 갖는 궁극적인 인공두뇌를 가진 시스템의 모식도 이다.

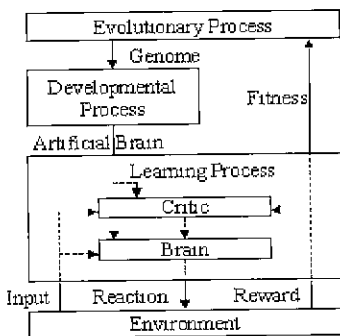


그림 8 진화·발생·학습의 기능을 갖는 인공두뇌의 모식도

인공생명은 기본적인 구성요소 및 법칙을 가지고 생물학적 현상을 합성하는 상향식 접근방식을 취한다. 반면 기존의 생물학은 생물의 특성을 분석하여 그 원리를 밝혀 내는 하향식 접근방법을 이용한다. 본 논문에서 제안한 신경망은 인공생명의 상향식 접근방법에 의하여 설계되었다. 즉 신경망의 구성요소의 특징을 설정하고 이것을 발생 및 진화를 통하여 이 구성요소의 상호작용에 의한 전체적인 유용한 특성이 나타나도록 하였다. 앞으로는 이와 같이 설계된 신경망을 분석하여(하향식 방법) 더 발전된 구조를 설계하는데 이용할 예정이다. 본 신경망은 재구성 가능한 반도체 소자(FPGA)로 구성하기에 매우 적합한 구조를 가지고 있으며 현재 제안한 신경망을 하드웨어로 구현하는 문제도 연구하고 있다.

최근 국내에서 저자 등이 포함된 「Braintec 21」이라는 국책 뇌과학 프로젝트가 작년부턴 시작되었다. 뇌 과학자, 뇌 공학자 등이 힘을 합쳐 차세대 기술인 인공두뇌에 대한 응용기술을 확보하는 것이 목적이다. 앞으로 국내에서도 뇌과학 및 공학의 연구에 기대를 걸어도 좋을 것이다.

4.2 진화하는 하드웨어

재구성 가능한 하드웨어(reconfigurable hardware)는 사용자가 소프트웨어적으로 구조를 변경할 수 있는 반도체 집적회로로서 반도체 제조공정을 거치지 않고 다양한 구조의 반도체를 구현할 수 있기 때문에 많은 분야에서 응용되고 있다. 또한 이것은 환경의 변화에 적응하고 결함에도 견고한 하드웨어 시스템을 구축할 수 있는 길을 열어주고 있다. 재구성 가능한 하드웨어의 대표적인 예는 FPGA (field programmable gate array)(그림 9)로서 이는 하드웨어 내부의 구성을 결정하는 비트스트림을 다운로드 받음으로서 임의의 하드웨어 기능을 구현할 수 있다. 최근 이러한 하드웨어의 구조를 적응적으로 변경하고자 하는 연구가 새롭게 주목을 받고 있다.

하드웨어의 재구성을 적응적으로 수행하기 위해서 현재 가장 많은 사람들의 주목을 받고 있는 기술 중의 한 가지는 진화 알고리즘(evo-

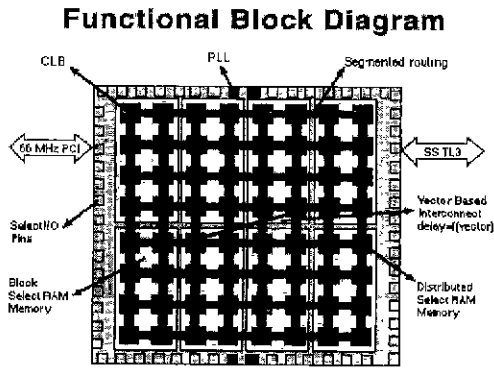


그림 9 FPGA의 내부 구조(입력 신호에 따라 내부구조가 자동 변경된다)

lutionary algorithms)을 이용하는 것이다. 진화 알고리즘에 의해 그 구조가 자동적으로 변하는 하드웨어를 진화 하드웨어(evolvable hardware)라고 한다. 하드웨어의 구조를 나타내는 비트스트링을 진화 알고리즘의 염색체로 표현하여 적응도(적합도) 기반으로 하드웨어의 구조를 진화하고자 하는 것이다. 즉, FPGA에서는 하드웨어 구조를 결정하는 비트스트링이 있고, 이것을 바꾸어 씌므로 해서 여러 가지의 논리회로를 실현할 수 있는데 이것은 유전자 알고리즘에서 해의 후보를 이진 비트스트링으로서 나타내고, 이것을 탐색하여 최적의 해를 발견하는 방식을 적용할 수 있게 한다. 적응적 설계 방법은 FPGA의 비트스트링을 유전자 알고리즘에 있어서 염색체로 생각하고 환경에 가장 적합한 비트스트링을 찾는 방법이다.

진화 방식에 의한 하드웨어의 설계는 기존의 회로 설계방법으로는 설계하기 힘들거나 설계할 수 없는 시스템을 설계할 수 있는 가능성을 제시하고 있다. 진화 방식에 의한 하드웨어 설계가 기존의 회로 설계를 대치하는 수단으로 사용되었을 때, 사람에 의한 기존의 설계 방식에 비해 다음과 같은 많은 장점을 지닌다.

- (1) 진화적 설계는 사람이 설계할 때 보다 더욱 많은 가능성을 고려하고 탐색할 수 있다. 특히 원하는 하드웨어 구조를 표현하기 어려울 때도 적용할 수 있다.
- (2) 진화적 설계는 문제 영역에 특수한 기반 지식이 없어도 적용 가능하다. 특히 배경

지식을 획득하는데 경비가 많이 들 경우 아주 유용하며 전문가에 의존하지 않아도 된다.

- (3) 진화적 설계 기법은 다양한 형태의 제약 조건과 특수한 요구사항을 고려하는 것이 비교적 용이하며 이것은 보통 염색체의 표현이나 적합도 함수를 통해서 이루어진다.

진화 하드웨어는 일본과 스위스의 연구자에 의해서 처음으로 연구되기 시작해서 이어 미국과 영국의 연구자들에 의해서 활발하게 연구되고 있다. 쉬퍼(Sipper)[42]는 셀룰라 오토마타의 발생모형을 통해서 재생산(reproduction), 성장(growth), 복구(repair)의 기능까지는 FPGA를 구현하기 위해 연구중이며 또한 모든 진화과정이 하나의 칩에서 구현 할 수 있는 방법을 연구중이다. 일본의 히구찌(Higuchi)[43]는 functional level에서의 하드웨어 진화를 연구하면서 영상압축, 신경망, ATM 제어, 진화 로봇 등의 분야에 응용하고 있으며 function level 칩을 개발하고 있다. 코자[44]는 유전자 프로그래밍을 사용하여 고수준 언어 레벨에서 진화를 시켜 OP-Amp설계를 수행하였고 XC6216을 사용하여 sorting networks를 구현하였다. 드가리스[45]는 진화 하드웨어를 외부적(extrinsic) 진화와 내부적(intrinsic) 진화로 분류하였다. 그는 진정한 진화 하드웨어는 내부적 진화가 되어야 한다고 이야기하면서 인공두뇌를 구현하기 위해서 노력하고 있다. 그는 XC6264를 사용하여 3차원 CA(cellular automata)를 구현하고 있다. 스토이카(Stoica)는 우주선(spacecraft)에서 적응 센서와 영상처리를 위한 진화 하드웨어 기술을 연구하고 있다. 톰슨(Thompson)[46]은 처음으로 on-line(intrinsic)모델의 하드웨어를 실현하였다. 그는 현재 저 수준 언어 레벨에서 음성인식회로의 진화를 연구하고 있다. 또한 그는 결합 허용(fault-tolerant)시스템에 진화 하드웨어의 응용을 연구하고 있다.

인공생명에 관심이 높아지면서 진화 하드웨어는 인공생명기법을 하드웨어적으로 표현할 수 있다는 측면에서 새로운 분야로서 여겨지고 있다. 또한 앞으로의 인공두뇌는 그 규모나 속도 등의 면에서 소프트웨어로 구현되는 것보다

하드웨어로 구현되는 것이 바람직하다. 인공두뇌가 하드웨어로 구현되면 보다 생물체에 가깝게 스스로 환경에 적응하는 행동형 적응 시스템을 구축할 수 있을 것이다. 아직 국내에서는 이 분야에 대한 연구가 초보적인 상태이지만 뇌과학 분야의 연구와 더불어 몇몇 연구자들이 연구를 시작하고 있다.

5. 결 론

수 백대의 로봇이 강이나 바다에 투입되어 오염물질을 제거하고 화재현장에서 화재를 진압한다. 핵발전소에서 고장을 감시하고 수리한다. 공장에서는 한가지 품목의 생산을 마치면 로봇이 새롭게 조직화하여 새로운 품목을 만들어낸다. 사람과 친근한 로봇이 우리의 곁에서 일을 도와주며, 여러 대의 소형 마이크로 로봇이 몸 속으로 침투하여 협조적으로 수술을 완료한다. 우주나 지하 해저 등에서 자원을 탐사하고 지뢰가 광범위하게 묻혀있는 지역에서 지뢰를 탐사하고 제거한다.

이러한 일들은 전혀 공상과학 소설에서나 등장하는 이야기가 아니라, 현재 진행되고 있는 일도 있고 가까운 미래에 실현이 가능한 일이다. 과학기술의 발달로 작업하기 어렵고 힘든 일을 지능형 로봇으로 대처하고 인간은 좀더 편리하고 창조적인 작업에 종사할 수 있기를 바라고 있다. 또한 장애인, 노인, 환자들의 복지증진을 위한 관심도 점점 증가하고 있다. 앞으로의 로봇은 인간의 생활환경과 같이 환경변화가 심하고, 명확한 판단을 내리기 어려우며 (애매함), 미래 상태에 대한 예측이 불가능한 경우(불확실성)에 대처할 능력이 필요하다. 따라서 기존의 미리 입력된 작업을 하는 시스템이 아닌 자율적으로 행동하고 능동적으로 적응할 수 있는 시스템의 개발이 필요하다.

생물체와 같이 환경에 능동적으로 적응하는 시스템을 구축하기 위한 방법으로 인공생명이 크게 부각되고 있다. 그러나 인공생명이라는 것도 결국 모든 일에 만능이 될 수 없다. 아래에서 위로의 창발적 행동을 중시하는 인공생명의 방법론이 기존의 인공지능과 생물학의 방법론과는 상반된 방식을 가졌기 때문에 기존의

방법에 문제점을 느끼는 사람들이 새롭게 인공생명으로 뛰어들고 있다. 그러나 사실 기존의 인공지능 기술 및 생물학 방법과 인공생명은 서로 보완적인 관계를 가지고 있다고 볼 수 있다. 결국 홀로 독립적으로 적용하기보다는 서로 융합하고 보완하여 적용하는 것이 진정한 인공생명을 갖는 지능 로봇을 개발하는데 한 걸음 더 빨리 다가설 수 있을 것이다.

감사의 글

본 글의 내용 중 일부는 뇌연구 개발사업 (Braintec 21)의 연구비 지원에 의해서 수행된 연구내용으로 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- [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 eds., *Artificial Life IV*, MIT Press, 1994.
- [5] C.G. Langton and K. Shimohara eds., *Artificial Life V*, MIT Press, 1997
- [6] C. Adami, R.K. Belew, H. Kitano, and C.E. Taylor eds., *Artificial Life VI*, MIT Press, 1998
- [7] F.J. Varela and Paul Bourguine eds., *Toward a Practice of Autonomous System, Proceedings of the First European Conference on Artificial Life*. MIT Press, 1992.
- [8] F. Moran, A. Moreno, J.J. Merelo, and P. Chacon eds., *Advances in Artificial Life, Proceedings of Third European Conference on Artificial Life*. Springer, 1995.
- [9] P. Husbands and I. Harvey ed., *Fourth European Conference on Artificial Life*, MIT Press, 1997
- [10] 심귀보, "인공생명을 갖는 지능로봇시스

- 템의 실현,” *대한전자공학회 학회지*, 제 24권, 제3호, pp. 70-82, 1997. 3.
- [11] R.A. Brooks, “Intelligence without representation,” *Artificial Intelligence*, vol. 47, pp. 139-159, 1991.
- [12] J.R. Koza, *Genetic Programming : On the Programming of Computers by Means of Natural Selection*, MIT Press, 1992.
- [13] D.Y. Cho, B.T. Zhang, “Genetic Programming-Based Alife Techniques for Evolving Collective Robotic Intelligence,” *Proceedings of The 4th International Symposium on Artificial Life and Robotics*, vol. 1, pp. 236-239, 1999.
- [14] C.J.C.H Watkins, P. Dayan, : Technical Note “Q-Learning,” *Machine Learning*, vol. 8, pp. 3-4, 55-68, 1992.
- [15] R.S. Sutton, “Learning to Predict by the Methods of Temporal Differences, Machine Learning,” *Machine Learning*, vol. 3, pp. 9-44, 1988.
- [16] J.H. Holland, *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. MIT Press, 1992.
- [17] 정치선, 이동욱, 전효병, 심귀보. “경쟁적 공진화법에 의한 신경망의 구조와 학습패턴의 진화,” *대한전자공학회 논문지*, 제 36권 S편, 제1호, pp. 29-37, 1999. 1.
- [18] H.B. Jun. C.S. Joung, and K.B. Sim, “Co-Evolution of Fuzzy Rules and Membership Functions,” *Proceedings of Asian Fuzzy System Symposium*, pp. 601-603, 1998. 6.
- [19] 전효병, 김대준, 심귀보, “공진화를 이용한 신경회로망의 구조 최적화,” *대한전자공학회 논문지*, 제35권, S편, 제4호, pp. 67-75, 1998. 4.
- [20] D.E. Goldberg, *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*, Addison Wesley, 1989.
- [21] 정치선, 심귀보, “분류자 시스템을 이용한 인공지능의 적응행동의 학습,” *한국 퍼지 및 지능시스템 학회 추계학술대회 논문집*. pp. 361-367, 1998. 11.
- [22] H.B. Jun, K.B. Sim. “Emergence of Cooperative Behavior based on Learning and Evolution in Collective Autonomous Mobile Robots,” *Journal of Electrical Engineering and Information Science*, vol. 3, 1998. 12.
- [23] A. Ishiguro, Y. Shirai, T. Kendo, Y. Uchikawa, “Immunoid : An Architecture for Behavior Arbitration Based on the Immune Networks,” *Proceedings of IROS 96*, pp. 1730-1738, 1996.
- [24] 이동욱, 심귀보, “인공면역계 기반의 자율이동로봇군의 협조행동전략 결정,” *대한전자공학회 논문지*, 제35권, S편, 제3호. pp. 102-109, 1998. 3.
- [25] D.W. Lee, H.B. Jun, K.B. Sim, “Artificial Immune System for Realization of Cooperative Strategies and Group Behavior in Collective Autonomous Mobile Robots,” *Proceedings of The 4th International Symposium on Artificial Life and Robotics*, vol. 1, pp. 232-235, 1999.
- [26] R.C. Arkin, “Survivable Robotic Systems: Reactive and Homeostatic Control,” *Robotics and Remote Systems for Hazardous Environments*, M. Jamshidi and P. Eicker eds., Prentice-Hall, pp. 135-154.
- [27] M. J. Mataric, “Designing Emergent Behaviors : From Local Interactions to Collective Intelligence,” *Proceedings of 2nd International Conference on Simulation of Adaptive Behavior*, pp. 432-441, 1993.
- [28] C. R. Kube and H. Zhang, “Collective Robotic Intelligence,” *Proceedings of 2nd International Conference on*

- Simulation of Adaptive Behavior*, pp. 460-468, 1993.
- [29] C.W. Reynolds "An Evolved, Vision-Based Behavioral Model of Coordinated Group Motion," *From Animals to Animats 2: Proceedings of the Second International Conference on Simulation of Adaptive Behavior (SAB'92)*, 1992.
- [30] S.G. Kong, "Learning Fuzzy Rules for Group Intelligence of Autonomous Mobile Robots," *Proceedings of IIZUKA*, pp. 523-526. 1998.
- [31] S.K. Min, H. Kang, "A Neural Network Based Artificial Life Model for Navigation of Multiple Autonomous Mobile Robots in the Dynamic Environment," *Proceedings of The 4th International Symposium on Artificial Life and Robotics*, vol. 1, pp. 216-219, 1999.
- [32] H. Asama et al., *Distributed Autonomous Robotic Systems 2*, Springer, 1996.
- [33] T. Fukuda, T. Ueyama, *Cellular Robotics and Micro Robotic Systems*, *World Scientific*, 1994.
- [34] 심귀보, "마이크로 지능 로봇의 제어와 휴먼 인터페이스," *대한전기학회 '93 로보틱스 및 자동화연구회 WORKSHOP 논문집*, pp. 25-29, 1993. 4.
- [35] K. Tomita, S. Murata, E. Yoshida, H. Kurokawa, S. Kokaja, "Reconfiguration Method for a Distributed Mechanical System," *Distributed Autonomous Robotic Systems 2*, Springer, pp. 17-25, 1996.
- [36] 이동욱, 심귀보, "자율이동로봇군의 협조 행동을 위한 통신시스템의 개발," *대한전자공학회 논문집*, 제34권, S편, 제3호, pp. 33-45, 1997. 3.
- [37] E.J.W. Boers, H. Kuiper, B.L.M. Happel, and S. Kuyper, "Designing Modular Artificial Neural Networks," *Proceedings of Computer Science in the Netherlands*, pp. 87-96, 1993.
- [38] F. Gruau, D. Whitley, "Adding Learning to the Cellular Development of Neural Networks: Evolution and the Baldwin Effect," *Evolutionary Computation*, vol. 1-3, pp. 213-233, 1993
- [39] H. de Garis, "CAM-BRAIN : The Genetic Programming of an Artificial Brain Which Grows/Evolves at Electronic Speeds in a Cellular Automata Machine," *Proceedings of The First International Conference on Evolutionary Computation*, vol. 1, pp. 337-339b, 1994.
- [40] 이동욱, 심귀보, "셀룰라 오토마타 기법을 이용한 신경망의 자동설계에 관한 연구," *대한전자공학회 논문지*, 제35권 S편, 제11호, pp. 88-95, 1998. 11.
- [41] D.W. Lee, K.B. Sim, "Evolving Cellular Automata Neural Systems 2," *Proceedings of The 4th International Symposium on Artificial Life and Robotics*, vol. 1, pp. 224-227, 1999.
- [42] M. Sipper, E. Sanchez, D. Mange, M. Tommassini, A. Perez-Urbe, and A. Stauffer. "A Phylogenetic, Ontogenetic, and Epigenetic View of Bio-Inspired Hardware Systems," *IEEE Transaction on Evolutionary Computation*, vol. 1, no.1, pp 83-97, April 1997.
- [43] W. Liu, M. Murakawa, T. Higuchi, "ATM Cell Scheduling by Function Level Evolvable Hardware," in *Lecture Notes in Computer Science*, No. 1259, *Evolvable System: From Biology to Hardware*, Springer, 1997
- [44] F.H. Bennett III, J.R. Koza, D. Andre, M.A. Keane, "Evolution of a 60 Decibel Op Amp Using Genetic Programming," in *Lecture Note in Computer*

Science, No. 1259, *Evolvable Systems: From Biology to Hardware*, Springer, 1997.

[45] H. de Garis, "CAM-BRAIN : The Evolutionary Engineering of a Billion Neuron Artificial Brain by 2001 which Grows/Evolves at Electronic Speeds inside a Cellular Automata Machine(CAM)," in Lecture Notes in Computer Science, No. 1062, *Towards Evolvable Hardware: The Evolutionary Engineering Approach*, Springer, pp. 76-98, 1996.

[46] A. Thompson, "An Evolved Circuit, Intrinsic in Silicon, Entwined with Physics," in Lecture Notes in Computer Science, No. 1259, *Evolvable Systems: From Biology to Hardware*, Springer, 1997.

심 귀 보



1984 중앙대학교 전자공학과(공학사)
 1986 중앙대학교 전자공학과(공학석사)
 1990 The University of Tokyo 전기전자공학과(공학박사), 동경대학 생산기술연구소(연구원)
 1991~현재 중앙대학교 전자전기공학부 부교수
 1996~현재 대한전자공학회 논문지 편집위원

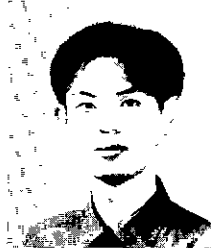
1998~현재 한국 퍼지 및 지능시스템 학회 이사 및 논문지 편집위원

1999~현재 한국 뇌학회 학술위원

관심분야 : 인공생명, 진화연산, 지능로봇시스템, 뉴로-퍼지 소프트웨어, 자율분산시스템, 로봇 비전, 진화하는 하드웨어 등

E-mail:kbsim@cau.ac.kr

이 등 욱



1996 중앙대학교 제어계측공학과(공학사)

1998 중앙대학교 제어계측공학과(공학석사)

현재 동 대학원 박사과정

관심분야 : 인공생명, 인공두뇌, 인공민역계, 자율분산시스템, 가상현실 등

E-mail : dwlee@ms.cau.ac.kr

● 제12회 정보문화의 달 기념 초청강연회 ●

- 일 자 : 1999년 6월 3일(목)
- 장 소 : 전북대학교 삼성문화회관
- 주 최 : 한국정보과학회
- 문 의 처 : 한국정보과학회 사무국

Tel. 02-588-9246, Fax. 02-521-1352

E-mail : kiss@kiss.or.kr