

## 인공생명의 개요

趙 誠 培  
延世大學校 컴퓨터科學科

요약문: 최근에 진화와 창발을 기본으로 하는 인공생명이라는 새로운 정보처리 방식이 미국과 일본을 중심으로 활발히 연구되고 있다. 이것은 이제까지 개별적으로 제안된 두뇌의 가소성이나 개체의 발생, 적응과 진화 등 생물의 특성으로부터 파생된 모형들을 총동원함으로써 정보처리의 새로운 가능성을 모색하고자 하는 것이다. 본 논문에서는 인공생명의 연구가 어떻게 시작되었으며, 현재의 기술수준이 어느 정도인지에 대하여 소개하고자 한다. 아울러, 인공생명에 기반한 정보처리의 사고방식 및 그와 같은 발상으로부터 가능한 새로운 형태의 정보처리 기능창출의 연구동향을 살펴보고 앞으로의 방향을 전망해 본다.

주요어: 인공생명, 진화연산, 에이전트, 인공지능

### I. 서 론

자신의 명령에 복종하는 인공물의 개발은 인간이 오랫동안 꿈꾸어 왔던 것이다. 이와 관련된 극단적인 이야기가 소설이나 영화의 형태로 소개되어 왔는데, 그중 널리 알려진 것으로는 프랑켄슈타인이나 터미네이터 등을 들 수 있다. 최근에는 жу라기 공룡이라는 소설에서 수천 만년 동안 보존된 공룡의 유전자 코드로부터 재생된 공룡을 다룸으로써 한동안 커다란 화제를 모으기도 하였다. 한편, 공학적 접근방법에 의한 컴퓨터과학의 급속한 발전이 다소 둔화되고 있는 현 시점에서 자동계산기라는 컴퓨터의 발상초기로 되돌아가 보자는 연구의 움직임이 일고 있다. 다시 말해서, 고등생물인 인간을 포함한 생물을 모형화한 인공사고 기계의 발상으로 회귀하는 현상이 거세지고 있다.

이의 예로는 인공지능 분야의 “인공 신경망”이나 최적제어 분야의 “유전자 알고리즘” 등이 크게 유행이 되고 있는 것 등을 들 수 있을 것이다. 역사적으로 보면 컴퓨터가 개발된 시점에서부터 시작된 인공지능 분야의 커다란 연구테마가 로젠블렛의 “퍼셉트론”이고, 그로부터 파생된 것이 현재

의 “신경망 정보처리”라고 할 수 있다. 또한, 홀랜드에 의해 개발된 진화적 정보모형인 “유전자 알고리즘”도 최근에 주로 최적화를 위한 기법의 일종으로 사용되고 있다. 한편, 생체가 보유한 정보를 해석하고자 하는 “인간 개념해석 프로젝트”도 생체정보의 중심적인 과제인 유전자 정보 전역을 해명하고자 하고 있다.

이와 같은 배경을 갖고 1980년대 후반부터 인공생명의 연구가 대두되고 있다. 인공생명의 궁극적인 목표는 한 마디로 말해서 “생명이란 무엇인가?”에 대한 답을 찾는 것이라 할 수 있다. 생물학에서 생명을 연구하는 기존의 분석적인 접근방식에서 탈피하여 생명이라고 불릴 수 있는 어떤 것을 구축하는 합성적인 접근방식을 취하는 것이 가장 커다란 차이점이다. 하지만, 이 논문에서는 인공생명의 이러한 목적에 대한 철학적인 의미는 차치하고 새로운 과학기술로서 어디까지 진전되어 있으며 어떤 방향으로 나아가고 있는지 소개하고자 한다.

이를 위해서 우선 동물의 행동을 흉내내는 시스템을 구축하고자 했던 초기의 작업을 소개하기로 한다. 이러한 작업은 오토마톤(automaton)이라는 개념을 시작으로 오늘날의 컴퓨터 기술을 가능하도록 한 밑바탕이 되었다. 이렇게 가능하게 된 컴퓨터는 인공생명 모델을 가능하도록 하였는데, 이 과정은 다시 새로운 계산모델을 만들고 이것이 또 다시 새로운 인공생명 모델을 창출하는데 사용될 것이다. 따라서 인공생명의 연구는 컴퓨터 기술의 발전과 연관이 있으며, 미래의 인공물 생성에 커다란 역할을 할 것이다. 결국 공학적인 입장에서 인공생명의 목적은 “인공물의 자동설계 및 생성에 사용될 진화적 과정의 메카니즘을 찾는 것”이라고 할 수 있다.

## II. 초기의 인공생명

생명의 물리적인 구현에 대해서는 과학사의 여러 곳에서 찾아볼 수 있다(Chapuis & Droz). 가장

자주 언급되는 예는 장자크 드 보캉송(Jacques de Vaucanson : 1709~1782)이 만든 기계오리라 할 수 있는데, 이것은 금도금된 구리로 만들어진 인공오리로서 살아있는 오리처럼 음식을 먹거나 뽀뽀거리기도 하고 심지어는 먹은 음식을 소화시켜 배설하기도 하였다고 한다(Arbib 1966). 이러한 기계적인 구성으로부터 범용 컴퓨터의 아이디어를 얻을 수 있었다. 컴퓨터의 개발에서 주목하여야 하는 점은 생명의 메카니즘에서 생명의 논리로 시점이 바뀌었다는 것이다. 생명체의 기계적인 메카니즘에 몰두하던 것에서 벗어나 그 논리에 관한 연구로 현재의 컴퓨터 기술이 가능하게 되었으며 생명체의 지능을 논리적인 오퍼레이션으로 이해하고자 노력하게 되었다.

반면에 생명의 메카니즘에 대한 계속된 연구는 사이버네틱스(cybernetics)라는 분야를 개척하였다. 이 분야는 최근에 논리만으로는 자연계에서 관찰되는 모든 행동을 설명할 수 없다는 것이 확실해짐에 따라서 재부흥기를 맞고 있다. 특히, 시스템의 비선형적이거나 카오스적인 행동이 크게 주목을 받고 있다.

오늘날의 범용 컴퓨터는 그것을 만드는 동기를 유발시킨 생명의 메카니즘에 대한 현상을 탐구하기 위한 강력한 도구가 되고 있다. 이러한 메카니즘의 연구로 새로운 유형의 계산기술을 만들고, 더 나아가서는 자연계의 조직체와 그 적응적 행동을 흉내내는 인공물을 만들어 낼 수 있을 것이다.

## III. 최근의 인공생명

요즘 널리 사용하고 있는 인공생명이라는 용어는 1987년 가을 미국의 로스알라모스에서 개최된 제1회 인공생명 워크샵에서 시작되었다(Langton 1989a). 이 학회는 크리스토퍼 랭톤(Christopher Langton)이 주관하여 시작된 것으로 제2회는 1990년 봄에 산타페(Santa Fe)에서 개최되었고, 제3회는 같은 장소에서 1992년 여름에 개최되었다. 제4회는 장소를 보스톤의 MIT로 옮겨 1994년

여름에 열렸고 제5회는 1996년 여름 일본의 나라에서 개최되었다. 인공생명의 창시자라고 불리는 랭튼은 인공생명을 다음과 같이 정의한다.

인공생명은 자연계의 살아있는 시스템이 나타내는 거동을 하는 인공 시스템에 대하여 연구하는 분야이다. 이것은 컴퓨터나 기타 인공 매체내에서 생명체의 거동을 합성하고자 함으로써 생물의 분석에 중점을 둔 전통적인 생물학을 보완한다. 지구 상에서 진화해 온 탄소 화합물의 생명체에 기반한 경험적 사실을 뛰어넘어서, 보다 광범위한 생명체라 할 수 있는 생명(life-as-it-could-be)내에서 이미 알고있는 생명(life-as-we-know-it)의 위치를 자리매김함으로써 이론 생물학에 공헌할 수 있을 것이다(Langton 1989a).

따라서, 인공생명은 생물학적인 생명을 포함하면서, 탄소 화합물에 기반한 화학적 형태이외의 메카니즘을 포함하도록 확장시킨 것이다. 이러한 애매한 개념은 이제까지 우리가 생물학적 개념에 국한되어 왔기 때문에 생명을 이해하는데 혼동스러울 수 있다. 따라서 인공생명의 개념에 대하여 논의하기 전에 우선 생명의 정의에 대하여 정확히 이해할 필요가 있다. 그런데 생명을 일반적으로 정의하기는 매우 어렵기 때문에, 여기에서는 파머(Farmer)가 열거한 생명의 특성을 소개하기로 한다(Farmer 1992).

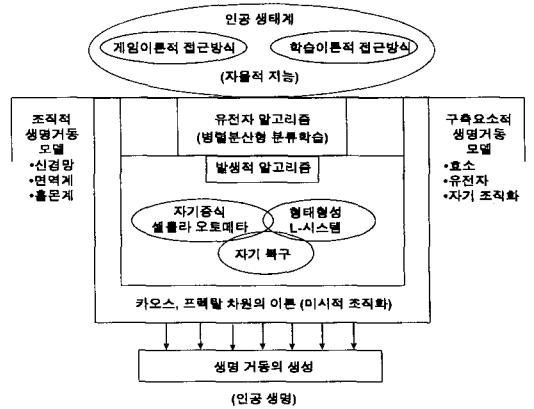
- 생명은 특정한 형태를 갖는 개체라기 보다는 시공간 상의 한 패턴이다.
- 개체 자체의 형태는 아니더라도 적어도 이와 관련된 조직체의 형태로 자기복제한다.
- 자기를 표현하는 정보의 저장소이다. 예를 들어서, 자연계의 조직체는 자신에 대한 정보를 DNA의 형태로 저장하는데, 이것은 단백질/RNA 기계에 의하여 해석된다.
- 환경으로부터의 물질과 에너지를 조직체의 패턴과 활동으로 변환시키는 물질대사를 한다. 물론 바이러스와 같이 일부 조직체는 스스로는 물질대사를 하지 않지만 다른 조직체의 물질대사를 이용하는 것도 있다.
- 환경과 기능적으로 상호작용한다. 살아있는 조직체는 환경에 반응하고 그 변화를 예측할

수 있다. 조직체는 그 자신의 환경을 생성하고 제어한다.

- 기관들은 상호 의존한다. 살아있는 시스템의 구성요소는 그 조직체의 전체를 유지하기 위하여 서로 의존한다.
- 교란에 대하여 안정적이어서 작은 변화에 민감하지 않다. 이러한 특성으로 조직체는 그 형태를 유지하고 잡음이 있는 환경에서 제 기능을 발휘한다.
- 진화하는 능력이 있다. 이것은 개별적인 조직의 특성은 아니고 개체의 연속이 갖는 특성이다.

하지만 인공생명은 위에서 열거한 모든 특성을 만족할 필요는 없으며 적어도 몇 개의 특성을 만족하는 인공 시스템에 대하여 연구하는 것이다. 이러한 인공생명과 인공지능은 모두 명확하게 정의되지 않은 것이라는 점과, 모두 다양한 연구분야를 포함한다는 점에서 유사하다. 그림 1은 이러한 인공생명의 연구분야를 개괄적으로 보여주고 있다. 이러한 분야를 가장 잘 보여주는 것이 앞에서 소개한 인공생명 워크샵에서 논의되는 주제들이라 볼 수 있는데 다음과 같다.

- 생명의 기원(발생과정)에 대한 시뮬레이션
- 카오스 시스템에 의한 질서생성의 계산모델
- 생체 특유의 비선형 시스템에 대한 엔트로피 해석
- 자기조직화 기구의 계산모델



(그림 1) 인공생명의 연구 분야

### ● 진화의 원리 및 그 시스템의 계산모델

이러한 테마중에서 중심적인 소재는 “복잡계를 위한 셀룰라 오토마타”, “생물개체가 진화하는 집단의 다이나믹스 계산모델”, “RNA나 DNA 등의 인공화학 계산모델” 등이다. 정리해 보면, 인공생명은 실재하는 생물의 정보처리 시스템(생체 정보처리 시스템)으로부터 많은 힌트나 개념을 제공받아 컴퓨터 등의 인공매체에 그것을 생성 구축하는 것이라 볼 수 있다. 일련의 연구과정에 의해서 실재의 생물로부터 생명의 개념을 추출하고 일반화하여 확장시킴으로써 “실재 생물을 관찰하고 분석하는 생물학(분자생물학)”을 보완하는 기능을 갖는다. 더 나아가 일반화시킨 생체 정보처리 기구를 다른 분야(컴퓨터과학, 정밀기계공학, 제어공학등)에 적용시키는 것을 목적으로 하고 있는 것이 인공생명이다. 다음에서는 인공생명의 가장 중요한 개념인 창발(emergence)과 환경과의 동적작용에 대하여 소개한다.

## IV. 창발

인공생명의 기본 개념중의 하나가 창발이라는 것이다(Forrest 1991). 창발은 그 메카니즘에 따라서 크게 네가지 부분으로 나눌 수 있다. 첫번째로 대규모의 분자들이 전역적 제어없이 지역적으로 상호작용하여 조직체가 형성되는 창발, 즉 morphogenesis(개체의 발생)가 있다. 두번째는 조직체가 환경과의 상호작용에 의해 그 행동을 변경시키는 ontogenesis(조직체의 개별적 학습)이다. 세번째는 진화의 과정에 의하여 가능한 행동의 수가 늘어나는 창발인 phylogenesis(종족의 발생)이다. 마지막으로 사회 시스템의 집단에서 일반적인 커뮤니케이션 방법(예, 문화)이 세대를 거쳐서 창발되는 것을 들 수 있다. 이를 종합하면 창발의 원리는 상향식의 접근방식을 취하는 것을 알 수 있는데, 랭톤은 다음과 같이 정의한다.

인공생명은 하나의 조직체를 단순한 기계의 거대한 집단으로 간주하면서 밑에서부터 시작하여

위쪽으로 합성하여 나가는 방식을 취한다. 즉, 서로 비선형적으로 작용하는 단순한 규칙기반 개체를 생명의 원리와 같은 전역적 다이나믹스의 지원을 받아 대규모로 규합하는 것이다(Langton 1989b).

### 1. 창발 연산

이러한 상향식 접근방식을 연산분야에 적용하면 창발 연산(emergent computation)이라는 새로운 연구분야를 생각할 수 있는데, 이는 다음과 같이 정의된다.

다음 접근방식은 효율성과 융통성을 높이기 위하여 동시적인 계산 사이의 상호작용을 이용한다. 다양한 분야의 연구자들이 전체 시스템의 행동이 단순한 부분의 합이 되지 않는 계산 모델을 연구하기 시작하였다. 이러한 시스템에서는 흥미로운 전역적 행동이 많은 지역적 상호작용으로부터 창발된다. 그러한 창발적인 행동이 계산의 형태인 경우, 그러한 시스템을 창발 연산이라고 부른다(Forrest 1991).

여기에서 핵심은 계산과정의 결과를 유도하는데 전역적인 제어방식을 피하는 것이다. 창발은 가능한한 결과에 대한 명시적인 정의를 회피하는 과정이다. 단지 하나의 모델을 설정하는 대신에 독립적인 모델의 집단을 생성하고 전역적인 제어를 “선택”이라는 메카니즘으로 대신한다.

### 2. 창조성 : 선택과 제거

창발의 핵심은 창조성에 있다. 이러한 창발의 과정은 새로운 형태를 생성할 수 있어야 함을 의미하는데, 보통 다윈의 자연선택은 생산을 위한 최고의 개체를 선택하는 것으로 이해된다. 이 접근방식에서 개체의 선택은 그 적합도에 의존하는데, 이것은 해당 모델의 설계자에 의해서 명시적으로 정의된다. 이러한 방법이 유전자 알고리즘이라고 하여 최근 몇가지 최적화 문제에 성공적으로 적용되고 있다(Davis 1991).

이 접근방식은 목적을 명확하게 사전에 결정하여야 하는데 자연에서는 보통 불가능하다. 따라서 일부에서는 좋은 성능을 내는 것을 선택하기 보다

는 좋지 않은 개체를 제거하는 방식을 사용하기도 한다. 선택에 의존하는 방식에서는 원하는 것을 명시적으로 정의하지 않으면 안되어서, 진화의 가능성을 제한하게 되는 결과를 초래한다. 반면에 제거에 기반한 방법은 명확하게 원하지 않는 것만 정의하기 때문에, 해당 모델로부터 일종의 창조성을 기대할 수 있을 것이다.

### V. 환경과의 동적 상호작용

자연에서 각 시스템의 행동은 동적이어서 환경과 시스템 사이에는 끊임없는 상호작용을 한다. 환경의 모든 변화는 시스템 행동의 변화를 유발하고, 또 시스템의 행동은 환경의 변화를 초래한다. 이러한 동적인 과정이 인공생명에서 중요한 개념으로 모델링된다. 전통적인 계산에서 초점은 최종결과에 있지만, 인공생명에서는 지속적인 동적 행동에 있다. 생물 시스템에서 행동은 보다 작은 행동의 집합으로서 하나의 동적인 행동이 발생한다. 이와 같은 동적인 행동이 인공 시스템에서도 언어될 수 있다.

「...」, 인공생명은 살아있는 시스템의 구성요소에 대한 행동적 기본을 포착하여 이와 유사한 행동들을 인공적인 구성요소의 집합으로 구현함으로써 자연의 생명을 연구한다. 제대로만 조직된다면 인공적 요소들의 결합으로 자연계와 같은 동적인 행동을 나타낼 수 있을 것이다(Langton 1989b).

이러한 동적인 모델들은 인공지능에 대해서도 새로운 지평을 열어줄 것이다. 인공생명의 개념은 인공지능을 적용행동으로 생성하는데 사용될 수 있다.

#### 1. 인공지능과 인공생명

전통적인 인공지능에서는 지능을 명시적으로 정의할 수 있는 것으로 이해한다. 이것은 AI 시스템이 지능적인 행동보다는 지능적 해답에 초점을 맞춘다는 것을 암시한다. AI는 또한 자연의 지능에서 시작하는데 문제는 아직 자연의 지능에 대해서

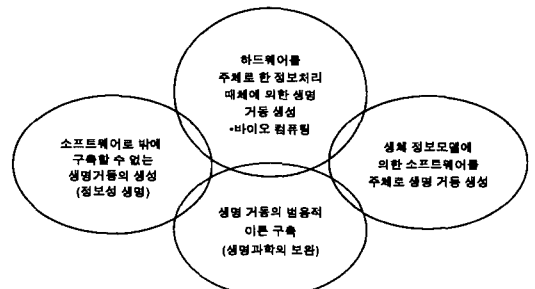
잘 알지 못하기 때문에 인공적인 방향으로 개발되고 있다는 점이다. 즉, 현재의 AI는 지식을 다루는 기법을 사용하여 지식을 기호로 표현하고자 하고, 이러한 것을 지식이 필요하다고 생각되는 문제를 해결하는데 적용한다. 이러한 접근방식은 항상 구축한 AI가 어떻게 문제를 해결하였는지 이해하게 되면 더이상 지능적이라 할 수 없다는 문제에 봉착한다.

하지만 일반적으로 지능을 이해하는 것은 생명을 이해하는 것이라 이야기할 수 있다. 이에 대해서는 V. Braitenberg (Braitenberg 1984)의 “마인드-게임”에서 잘 설명된다. 인공생명에서 추구하는 것은 그러한 심리학적 실험을 컴퓨터상에서 생성하는 것이다. 인공생명에서 종종 사용하는 기본 요소는 신경망식 계산구조와 일련의 센서 및 구동기이다. 이 모든 것들은 진화과정을 거쳐 그 복잡도가 증가하게 되며, 이로부터 가능한 행동의 가지수가 점진적으로 증가한다.

### VI. 구 현

이제까지는 인공생명의 핵심적인 개념과 특성에 대해서 알아 보았다. 이제 좀더 실용적인 문제로 넘어가서 실제로 인공생명의 분야에서 연구되고 있는 기법 및 응용에 대해서 알아보기로 한다. 이 분야에서 취하고 있는 연구전략은 크게 네가지로 요약될 수 있다(그림 2 참조).

- 컴퓨터 등의 하드웨어에 의한 생명체의 생성



(그림 2) 인공생명의 연구전략

- 컴퓨터에 의한 생명체의 시뮬레이션(생명체로부터 얻어진 특징을 모델시스템으로 구현)
- 컴퓨터 시뮬레이션으로만 생성될 수 있는 생명체의 창조(기초이론「카오스 시스템, L-시스템, 셀룰라 오토마타 등」의 조합으로 생성된 생명적 거동정보의 창조)
- 컴퓨터 시뮬레이션의 결과를 기초로 하는 이론 구축(모델 또는 비모델의 생명거동 시뮬레이션에 의해 얻어진 데이터나 지식을 기반으로 이론화)

인공생명은 인공지능과 마찬가지로 학제적인 연구분야로 구성되어 있는데, 대표적으로는 생명의 웨트웨어(wetware) 합성, 소프트웨어 합성, 하드웨어 합성, 그리고 철학적인 측면으로 나눌 수 있다. 이 장에서는 각각에 대하여 몇가지 예를 들어 소개하고자 한다.

1. 웨트웨어 합성

여기에서는 기본 단위로 실제 화학적 합성물을 사용한다. 넓은 의미에서는 모든 종류의 유전공학과 생명체의 구성요소를 변경시킬 수 있는 모든 방법을 포함한다. 하지만, 좁은 의미에서는 새로운 분자를 인공적으로 진화시키는 분자 생물학의 범주로 제한시킬 수 있다. 몇가지 가능성있는 결과들이 발표되고 있는데, 그 중에서 대표적인 것으로는 G. Joyce (Beaudry & Joyce 1992; Joyce 1992)의 연구를 들 수 있다.

2. 소프트웨어 합성

이 분야에서는 생명의 현상, 특히 개발과 진화과정을 설명하고자 하는 소프트웨어 모델을 이해하고자 한다. 소프트웨어 모델에 기반한 인공생명의 구현은 랭톤에 의해서 다음과 같이 정리되어 있다.

최종 결과만이 아니라 과정의 동적인 행동에 중점을 둔 새로운 계산 접근방식이 필요하다. 컴퓨터에 기반한 인공생명 모델들의 핵심적인 특징은 다음과 같다(Langton 1989b).

- 단순한 프로그램이나 명세서의 집단으로 구성되어 있다.
- 다음 모든 프로그램들을 제어하는 하나의 프

로그램은 존재하지 않는다.

- 각 프로그램은 환경내의 지역적인 상황에 대처하도록 명시되어 있다
- 전역적인 행동을 제어하는 규칙은 시스템내에 없다.
- 따라서 개체 프로그램보다 더 높은 레벨의 행동은 창발적으로 발생한다.

(1) 개발과정의 모델을 위한 기법

생물의 개발과정은 하나의 세포에서 시작하여 반복적인 세포 분열과 이동 및 분화를 거쳐서 점차적으로 성숙한 개체가 형성되는데 그 자세한 메카니즘은 아직까지 제대로 밝혀지지 않고 있다. 이러한 과정은 morphogenesis에 대응되며 여러 가지 기법을 이용하여 이를 컴퓨터로 모델화하려는 시도가 있는데, 여기에서는 셀룰라 오토마타와 런덴마이어 시스템에 대하여 소개한다.

셀룰라 오토마타

자기복제하는 기계를 만드는 것은 인간의 오래된 숙원이다. 이를 처음으로 계산적 접근방식으로 가능하도록 한 사람은 J. von Neumann이었다.

... 「J. von Neuman」은 유전자나 생화학적 수준에서 자연계의 자기복제 기능을 구현하려 하지 않았다. 그는 자연의 자기복제 문제를 논리적인 형태로 추상화하고자 한 것이다(Langton 1989b).

셀룰라 오토마타(CA)에 대한 von Neumann의 아이디어는 S. Ulman의 제안에 기초를 두고 있는데, 기본적으로 세포의 상태를 변화시키는 국소적 규칙의 집합으로 구성되고 그 변화는 자신의 상태와 그 이웃 세포의 상태에 의존한다. Wolfram (Wolfram 1986)에 의하면 CA는 다음과 같이 정리된다.

- 공간상에서의 이산성 : 이산 격자구조의 공간적 세포로 구성된다.
- 시간상에서의 이산성 : 각 세포의 값은 이산적인 시간의 연속으로 변경된다.
- 이산 상태 : 각 세포는 유한개의 가능한 상태를 갖는다.
- 동질성 : 모든 세포는 동일한 상태전이 규칙을 따르며 규칙적인 배열로 정렬된다.
- 동기적 변경 : 모든 세포의 상태는 동기적으

로 변경되는데, 각각은 자신과 이웃세포의 상태에 의존한다.

- 결정적 규칙: 각 세포의 상태는 고정된 결정적 규칙에 따라서 변경된다.
- 공간적인 국소규칙: 각 세포에서 규칙은 지역적인 이웃 세포의 상태에만 의존한다.
- 시간적인 국소규칙: 각 세포에서 규칙은 고정된 수의 이전 단계를 위한 상태에만 의존한다.

랭톤은 이러한 셀룰라 오토마타를 이용하여 자복제하는 모델을 발표하였다. 이것은 “아담의 루프”라고 불리고 있는데 하나의 고리가 반복해서 자신과 동일한 모양의 고리를 복제하는 모습을 간단한 셀룰라 오토마타의 규칙으로 구현하였다. 이것은 또한 실제로 산호가 성장하는 모습과도 일치하는 모델이다 (Farmer 1992). 그는 또한 이를 기반으로 “카오스의 선상에 있는 생명” (Langton et al. 1992)이라는 이론을 제안하기도 하였는데, 이것은 생명을 주기적인 시스템과 카오스 시스템 사이의 행동을 하는 복잡계로 정의한 것이다. 이와 동일한 기법이 신경망의 연결구조가 성장하는 모델이나 하드웨어의 진화에도 적용될 수 있는데, 그 예로 de Garis (Garis)의 연구가 있다.

#### 린덴마이어 시스템

린덴마이어 시스템(L-system)은 von Koch에 의해서 1905년 제안된 snowflake curve와 같은 rewriting 시스템으로 간주될 수 있다. 린덴마이어는 이를 다음과 같이 설명하고 있다 (Prusinkiewicz & Lindenmayer 1990):

Rewriting은 일련의 rewriting 규칙이나 production을 이용하여 간단한 초기 객체로부터 연속적으로 부분을 교체시킴으로써 복잡한 객체를 정의하는 기법이다.

이러한 rewriting 시스템은 문자열에 대하여 최초로 작동한다. 형식문법에 대한 Chomsky의 연구는 1950년대 후반에 스트링 rewriting에 커다란 관심을 불러일으켰으며, 현재 컴퓨터과학 분야에 폭넓게 응용되고 있다. 1968년에 생물학자인 A. Lindenmayer는 린덴마이어 시스템이라고 불리는 새로운 유형의 스트링 rewriting 메카니즘을 소개

하였다. Chomsky의 문법과 L-system의 차이는 다음과 같이 정리할 수 있다 (Prusinkiewicz & Lindenmayer 1990):

Chomsky 문법과 L-system의 핵심적인 차이는 production을 적용하는 방법에 있다. Chomsky 문법에서는 production이 순차적으로 적용되는데 반해서 L-system에서는 병렬적으로 적용되어 주어진 단어내의 모든 해당문자가 동시에 교체된다. 이 차이는 L-system의 생물학적 동기에 근거한다. production은 다세포 조직체내의 세포 분열에서 착안된 것으로 많은 분열이 동시에 일어날 수 있다.

L-system은 주로 컴퓨터 그래픽에서 식물등을 모델화하는데 사용되고 있다 (Prusinkiewicz & Lindenmayer 1990). 하지만 기본 아이디어는 광범위하게 적용될 수 있으며, 최근에는 생물학적인 반복행동을 모델화하는데도 적용되고 있다. L-system의 기본요소는 (초기) 단어와 production 규칙이다. 단어는 모델(데이터)을 나타내고 production 규칙은 모델의 변경규칙(명령어)을 나타낸다. 여기에서 단어(기호 스트링)는 문자의 1차원 배열이며, 각 유도과정에서 단어의 모든 문자가 production 규칙에 의해서 변경(rewriting)된다.

#### (2) 진화의 모델을 위한 기법

진화과정의 시뮬레이션은 이제까지 인공생명이 가장 성공적인 결과를 낸 분야중의 하나이다. 여기에서는 그 중에서 몇가지를 소개하고자 한다.

#### Morphology

자연은 구조발생에 있어서 대단한 다양성을 생성하는데, 예를 들면 얼굴만 다른 수많은 종류의 박쥐를 볼 수 있다. 서로 다른 구조를 생성하는 컴퓨터의 능력을 탐구하기 위하여 R. Dawkins는 Biomorph라는 프로그램을 개발하였다(Dawkins 1989). 이것은 유전자형의 작은 변화가 표현형에 얼마나 큰 변화를 가져올 수 있는지 보여주는 간단한 시스템이다.

#### 디지털 조직체: Tierra

T. Ray의 Tierra (Ray 1992)는 디지털 조직체가 매우 단순한 규칙에 기반하여 어떻게 생성되고

진화될 수 있는지 보여주는 좋은 예이다. 이 시스템에서 컴퓨터는 에너지원으로 간주되고 메모리는 생활 공간으로 생각될 수 있는데, 단순한 자기-변경 어셈블러 프로그램들이 가용한 메모리 공간을 놓고 경쟁하도록 하였다. 이 프로그램들은 스스로를 가용한 메모리 영역에 계속해서 복제하는데, 빈 공간을 만들기 위해서 오래되거나 좋지 않은 성능을 내는 프로그램들은 삭제되도록 하였다. 이 프로그램들은 수행이 진행되면서 새로운 행동패턴들을 보여주기 시작하는데, 각각은 자신의 길이를 변경시키거나, 다른 프로그램의 코드를 실행하기도 하였으며, 결국에는 기생충 등과 같은 생물 시스템에서 관찰되는 행동을 보이기도 하였다.

#### 유전자 프로그래밍

J. Koza (Koza 1992)는 유전자 알고리즘과 유사한 기법을 LISP 프로그래밍에 적용하였다. 기본적인 아이디어는 LISP 프로그램의 서브트리들을 교차시켜서 가장 좋은 성능을 내는 것을 다음세대로 복제함으로써 원하는 프로그램을 생성할 수 있다는 것이다. 이 방식은 또한 로봇이 특정한 작업을 수행하도록 진화시키는데도 사용되었다.

#### 진화적 예술

인공생명의 개념은 또한 예술의 분야에서도 사용될 수 있다 (Sims 1991; Todd & Latham 1992). 어쩌면 진화적 접근방식의 가장 성공적인 분야가 예술이라고 할 수 있을 것이다. 기본적인 아이디어는 일련의 영상을 약간씩 변화시키면서 생성하고, 예술가는 그 중 일부를 다음세대를 위한 영상으로 선택하여, 세대가 거듭됨에 따라 영상들이 예술가의 판단에 의해 점차 흥미로운 것이 된다는 것이다.

### 3. 하드웨어 합성

이것은 실제 환경에서의 행동을 보다 강조하는 분야로서, 대부분 자치 시스템의 연구분야라고 볼 수 있다. 이 접근방식은 진화과정에 의해 하드웨어의 기능이 점진적으로 증가하는 것에 초점을 맞추는데, 대표적으로는 FPGA의 진화와 함께 포섭 아키텍처(Subsumption Architecture)가 있다. 이것은 “동물과 같이 행동하는 로봇”을 구축하기

위해서 R. Brooks가 사용한 방법으로, 서로다른 행동수준이 전체행동을 제어하는데 사용된다 (Brooks & Viola 1990; Brooks 1991).

### 4. 철학적 문제

철학적인 측면에서 인공생명은 여러가지 문제를 야기시킨다. 물론 가장 중요한 문제는 생명이 무엇이며, 만일 그것이 생성되었을 때 어떻게 인식할 수 있는지 등이다. 이제까지 생명이 물리적인 현상의 창발에 의해서 설명될 수 있는지에 대해 많은 논의가 있어왔는데, 핵심은 자기 변경가능한 시스템이 어떻게 생명의 패턴을 생성할 수 있을까 이다 (Kampis 1991; Rosen 1991). 결론적으로는 유전 정보와 환경을 해석함으로써 스스로 변경가능한 자기-변경 시스템이 필요하다. 아직까지는 이러한 사실을 이론으로나 구현으로써 입증할 단계는 아니지만, 가능성이 있는 이론으로는 Maturana와 Varela의 autopoiesis가 있다 (Maturana & Varela 1980; Zeleny 1981).

생명에 대한 철학적 논의로 유명한 또다른 것은 R. Dawkins의 저서 “이기적인 유전자”이다 (Dawkins 1976). 그의 아이디어는 유전자들이 생존확률을 높이기 위해서 그 주위에 기계(조직체)를 구축한다는 것이다. 이것은 간단한 원리로 생명의 탄생과 진화를 명확하게 설명한 것으로 유명하다. 또한 H. Moravec은 생존기계라는 측면에서 컴퓨터가 인간의 유전자를 능가하게 될 것이라는 주장을 하기도 하였다 (Moravec 1989). 이러한 철학적 논의들은 현재의 인공생명에 비추어 볼 때 시기상조인 감도 없지 않지만 앞으로 생명체의 여러 가지 좋은 특성을 갖는 인공 시스템이 고도로 발달하는 경우를 대비하면 그 나름대로 의미가 있다고 하겠다.

## VII. 결 론

이 논문에서는 인공생명의 가장 핵심적인 개념인 창발과정과 환경과의 동적 상호작용에 대해서



소개하고, 현재까지 개발된 여러 기법과 응용 예등을 간략히 기술하였다. 아직까지는 많은 연구의 여지가 있지만 그 자체로 공학분야에도 폭넓게 적용될 수 있을 것이다. 왜냐하면 인공생명은 공학의 가장 근본적인 문제, 즉 복잡성의 자동진화, 웨트/소프트/하드웨어의 자기조직화, 그리고 명시적인 설계가 필요없는 지능의 창발 등에 대하여 다루고 있기 때문이다. 만일 이러한 문제들을 성공적으로 해결하게 된다면 인공생명이 공학분야의 새로운 혁명을 가져오게 될 것이라 기대된다.

#### 참 고 문 헌

- [1] M.A. Arbib, "Simple self-reproducing universal automata," *Information and Control*, 9, 177-189, 1966.
- [2] A.A. Beaudry and G.F. Joyce, "Directed evolution of an RNA enzyme," *Science*, 257, 635--641, July 1992.
- [3] V. Braitenberg, *Vehicles-Experiments in Synthetic Psychology*, The MIT Press, 1984.
- [4] R.A. Brooks and P.A. Viola, "Network based autonomous robot motor control: From hormones to learning," *In R. Eckmiller, ed., Advanced Neural Computers*, Ch. 6, 341--348, Elsevier Science Publisher B.V., 1990.
- [5] R.A. Brooks, "Intelligence without representation," *Artificial Intelligence*, 47, 139-159, 1991.
- [6] A. Chapuis and E. Droz, *Automata: A Historical and Technological Study*, B.A. Batsford Ltd.
- [7] L. Davis, *Handbook of Genetic Algorithms*, Van Nostrand Reinhold, 1991.
- [8] R. Dawkins, *The Selfish Gene*, Oxford University Press, 1976.
- [9] R. Dawkins, "The evolution of evolvability," *In Langton* 「18」, 201--220.
- [10] H. de Garis, *Genetic Programming--GenNets, Artificial Nervous Systems, Artificial Embryos*, Wiley manuscript.
- [11] G.M. Edelman, *Bright Air, Brilliant Fire, On the Matter of the Mind*, Basic Books, New York, 1992.
- [12] J.D. Farmer and A.A. Belin, "Artificial life: The coming evolution," *In Langton et al.*, 815--840.
- [13] S. Forrest, ed., *Emergent Computation*, The MIT Press, 1991.
- [14] E. Haeckel, *Art Forms of Nature*, Dover Publications, Inc., 1974.
- [15] G. Joyce, "Directed molecular evolution," *Scientific American*, 90--97, December 1992.
- [16] G. Kampis, *Self-modifying Systems in Biology and Cognitive Science*, Pergamon Press, 1991.
- [17] J.R. Koza, *Genetic Programming: On the Programming of Computers by means of Natural Selection*, The MIT Press, 1992.
- [18] C.G. Langton, ed., *Artificial Life*, Addison-Wesley Publishing Co., 1989.
- [19] C.G. Langton, "Artificial life," *In Langton* 「18」, 1-48, 1989.
- [20] C.G. Langton, *C. Taylor, J.D. Farmer and S. Rasmussen, ed., Artificial Life II*, Addison-Wesley Publishing Co., 1992.
- [21] H.R. Maturana and F.J. Varela, *Autopoiesis and Cognition: The Realization of the Living*, Reidel, 1980.
- [22] H. Moravec, "Human culture: A genetic takeover underway," *In Langton* 「18」, 167-200, 1989.
- [23] P. Prusinkiewicz and A. Lindenmayer,

- The Algorithmic Beauty of Plants*, Springer-Verlag, 1990.
- [24] T.S. Ray, "An approach to the synthesis of life," *In Langton et al.* 「20」, 371--408, 1992.
- [25] R. Rosen, *Life Itself--A Comprehensive Inquire into the Nature, Origin, and Fabrication of Life*, Columbia University Press, New York, 1991.
- [26] K. Sims, "Artificial evolution for computer graphics," *Computer Graphics*, 25(4), 319--328, 1991.
- [27] S. Todd and W. Latham, *Evolutionary Art and Computers*, Academic Press, 1992.
- [28] S. Wolfram, ed., *Theory and Application of Cellular Automata*, World Scientific, Singapore, 1986.
- [29] M. Zeleny, ed., *Autopoiesis: A Theory of Living Organization*, North Holland, 1981.

---

## 저자 소개



趙 誠 培

1965年 7月 17日生  
 1988年 2月 연세대학교 전산과학 학사  
 1990年 2月 한국과학기술원 전산학 석사  
 1993年 8月 한국과학기술원 전산학 박사

1991年 3月~1993年 10月 인공지능 연구센터 연구원  
 1993年 10月~1995年 4月 일본 ATR 인간정보처리 연구소 Postdoc Fellow  
 1995年 4月~1995年 8月 소프트웨어 응용연구소 객원 연구원  
 1995年 9月~현재 연세대학교 컴퓨터 과학과 조교수

주관심 분야 : 인공생명, 신경망, Fuzzy 이론, 패턴인식 분야