

논문 2016-53-3-8

인공개체 진화에서 행위기억회로의 적응적 진화

(Adaptive Evolution of Behavioral Memory Circuits in Evolution of Artificial Individuals)

정 보 선*, 정 성 훈**

(Bo-Sun Jung and Sung Hoon Jung[Ⓢ])

요 약

본 논문에서는 인공개체의 진화를 셀 수준에서 모사하는 프레임워크 상에서 인공개체가 자신의 행위를 기억하는 회로가 있는 경우 환경에 어떻게 적응적으로 진화하는지를 연구하였다. 이는 기존에 제안한 인공개체가 단순히 현재 상황 입력에 대한 대응행위를 결정하고 행동하는 것에서 나아가 자신의 이전의 행위를 기억할 경우 어떤 진보된 대응행위로 진화할 수 있는지 그리고 이전 행위를 기억하지 못하는 인공개체에 비하여 어떤 장점을 갖는지를 분석할 수 있다. 이러한 분석을 위하여 특정 먹이패턴에서 다양한 실험을 수행하고 그 결과를 살펴보았다. 먼저 이전 행동을 4단계까지 기억하는 개체와 기억회로가 없는 개체부터 3단계까지 기억하는 개체별로 경쟁력 실험을 해보았다. 그 결과 대부분 4단계까지 기억하는 개체가 우수하였다. 그러나 2단계까지 기억하는 개체가 4단계까지 기억하는 개체보다 더 우수했는데, 이는 실험한 먹이패턴 하에서는 2단계까지 기억하는 개체가 더 빨리 좋은 행위를 갖는 개체로 진화되기 때문으로 분석되었다. 두 번째로 모든 개체를 같이 진화시킨 실험에서도 T2 가 가장 우수한 결과를 보였다. 이를 통하여 행위기억회로를 갖는 개체가 더 우수하며 먹이패턴 복잡도에 적합한 단계까지 기억하는 개체가 가장 좋은 결과를 보임을 확인하였다.

Abstract

This paper investigates how artificial individuals with behavioral memory circuits adaptively evolve with respect to given environments on a cell-level simulation framework simulating artificial individuals. This makes it possible for us to analyse the advantages of artificial individuals with behavioral memory circuits against the simple artificial individuals that can do only simple reactions with respect to the environments and to know which advanced reactions are possible. In order to do this analysis, we experimented various tests on a specific prey pattern and examined the results. As a first experiment, we tested that artificial individuals with four memory steps competed against from those without memory step to those with three memory steps. Experimental results showed that the artificial individuals with four memory steps were superior to most others. However, artificial individuals with two memory steps were better than those with four memory steps. This was caused that the artificial individuals with two memory steps could evolve faster than those of four memory steps. In a second experiment that all types of artificial individuals are simultaneously evolved, the artificial individuals with two memory steps also showed the best result in the experiment. We could conclude that the artificial individuals with memory was better than those without memory and the best memory steps of artificial individuals were depended on the complexity of prey patterns.

Keywords : Artificial individuals, adaptive evolution, behavioral memory circuits, cell-level simulation framework

I. 서 론

지구상에 존재하는 다양한 생물은 초기 지구의 열악한 환경으로부터 발생해서 환경에 적합하도록 진화해왔다^[1,3-4]. 이러한 진화과정을 모사하여 그 원리를 파악하고 생물학적으로 공학적으로 응용하기 위하여 우리는 셀 우주(CC : Cellular Cosmos)라는 시뮬레이션 프레임워크를 제안하였다^[5-7]. 우리가 제안한 시뮬레이션 프

*학생회원, 한성대학교 (Hansung University)

**정회원, 한성대학교 (Hansung University)

Ⓢ Corresponding Author(E-mail:shjung@hansung.ac.kr)

※ 본 연구의 초기결과는 전자공학회 2014년도 학술심포지움에서 발표하였음.

※ 본 연구는 한성대학교 연구년 지원과제임.

Received ; October 23, 2015 Revised ; February 17, 2016

Accepted ; February 26, 2016

레이워크는 셀 수준의 2차원 3차원 공간상에서 인공개체가 환경에 적응하여 진화하는 구조로서 인공개체의 내부로직을 다양하게 구성하여 진화를 모사해볼 수 있다^[6]. 우리는 첫 번째 응용으로 인공개체의 내부로직을 부울 논리(Boolean Logic)를 기반으로 구성하였으며 이러한 기반 하에서 인공개체-먹이 환경을 대상으로 실험하였다. 실험결과 비교적 빠른 시간 안에 인공개체가 먹이를 잘 먹는 내부로직으로 진화함을 볼 수 있었다^[5,7]. 그러나 이러한 연구에서 인공개체에 주어진 내부로직 프레임이 오로지 현재 인공개체가 위치한 곳을 중심으로 진행방향의 5개의 이웃 셀만을 관찰하고 행위를 결정하는 것이어서 먹이패턴에 대한 다양한 행동을 발생시킬 수 없었다.

본 논문에서 우리는 이러한 문제점을 해결하고자 내부로직 프레임에 인공개체의 과거행위를 되먹임 하여 이러한 과거행위도 같이 고려해서 행위를 결정하도록 확장하였다^[6]. 이러한 이전 행위 기억회로는 인공개체의 행동을 보다 더 다양하고 환경에 적합하게 진화할 수 있는 가능성을 줄 수 있다. 과학적으로 명백하게 밝혀지지 않았으나 실제 생물체의 진화에서도 기억회로의 진화는 생물체의 진화에 크게 작용한 것으로 알려져 있다^[3~4].

우리는 본 논문에서 제안한 기억회로를 포함하는 새로운 내부로직 프레임이 기존의 기억회로가 없는 내부로직 프레임에 비하여 얼마나 경쟁력이 있는지를 먼저 실험하였다. 이를 위하여 기억회로가 없는 개체와 기억회로가 있는 개체를 같은 수로 초기 개체로 생성하고 특정한 먹이환경에서 진화시켜서 한 종류의 개체가 멸종될 때까지 진화시켰다. 기억 단계에 따라서 기억회로가 없는 개체를 T0, 한 단계만을 기억하는 개체를 T1, 두 단계까지 기억하는 개체를 T2, 세 단계까지 기억하는 개체를 T3, 네 단계까지 기억하는 개체를 T4로 이름 붙였다. 실제로 기억단계가 큰 개체가 유리한지를 알아보기 위하여 첫 번째 실험은 T4 와 나머지 각 개체를 경쟁하는 실험을 하였다.

실험은 각 실험별로 50번 반복하였는데 끝까지 살아남은 개체를 승리한 개체로 결정하여 실험데이터를 얻었다. 실험결과 T4가 대부분의 실험에서 더 많이 살아남았으나 T2와의 경쟁에서는 T2가 더 우월한 것으로 나타났다. 이는 기억단계가 많을수록 먹이를 더 잘 찾아갈 수 있으나 필요한 탐색공간이 커져서 진화하는데 더 오랜 시간이 필요하기 때문인 것으로 분석되었다. 즉 먹이패턴이 복잡할수록 더 많은 기억단계를 갖는 것

이 유리하나 그럴수록 탐색공간이 커져서 상대적으로 좋은 개체로 진화하는데 불리하다는 것이다. 두 번째 실험으로는 모두 개체를 동시에 같이 진화시켜보았다. 이 실험에서도 결국 최종적으로 T2 개체가 살아남았다. 그러나 이러한 결과는 통계적 경향성으로 먹이패턴의 복잡도에 따라서 그리고 실험파라미터에 따라서 다른 결과를 가져올 수 있다.

본 논문은 다음과 같은 구성으로 되어있다. 먼저 2절에서 기존연구를 살펴보고 3절에서 본 논문에서 제안하는 기억회로가 있는 내부로직 프레임을 갖는 인공개체에 대하여 설명한다. 4절에서는 다양한 실험과 그 결과 및 의미를 설명한다. 5절의 결론으로 끝을 맺는다.

II. 기존 연구

우리는 컴퓨터상에서 인공개체의 진화를 모사하기 위한 방법으로 셀 우주라고 불리는 시뮬레이션 프레임워크를 제안하였다^[5~7]. 셀 우주는 폰노이만이 제안한 세포 자동자(CA: Cellular Automata)와 유사하게 2차원 및 3차원 셀 공간으로 공간이 구성된다^[2]. 그러나 세포 자동자에서는 각 공간이 유한한 상태공간에서 하나의 상태를 갖는 것에 비하여 셀 우주에서는 하나의 인공개체가 존재하게 된다. 인공개체는 변이를 통하여 진화하게 되는데 이는 유전자 알고리즘에서의 변이와 비슷하다^[8]. 그러나 유전자 알고리즘에서 사용하는 교차는 사용하지 않았다. 그 이유는 지구상의 생물진화에서 초기 생물은 주로 단성생식으로 변이를 통해서 일어났기 때문이다. 유전자 알고리즘은 진화를 통하여 문제를 해결하려는 것인데 비하여 셀 우주는 인공개체를 통하여 진화의 메커니즘을 파악하고 이를 생물학적 공학적으로 이용하려는 것이다. 그렇기에 유전자 알고리즘은 문제에 대한 후보 해를 진화시켜 최적화된 해를 찾지만, 셀 우주는 생명체의 진화 과정을 모방할 수 있는 프레임워크를 통해 인공개체를 진화시켜 그 과정을 관찰한다. 보다 직접적으로 환경에 대하여 적응적으로 동작하는 인공생명체에 대한 연구가 있다^[9]. 이 연구에서 인공생명체는 구 형태의 세포조합으로 구성되어 센싱 뉴런을 통하여 들어온 정보를 기반으로 행동을 하면서 환경에 적응하는 개체로 진화하게 된다. 그러나 이 연구의 목적은 환경에 적응적으로 진화하는 인공생명체를 통하여 창발적인 행동을 하는 인공생명체를 구현하는 것으로 셀 우주와 같은 진화 메커니즘을 분석하기에는 적합하지 않다.

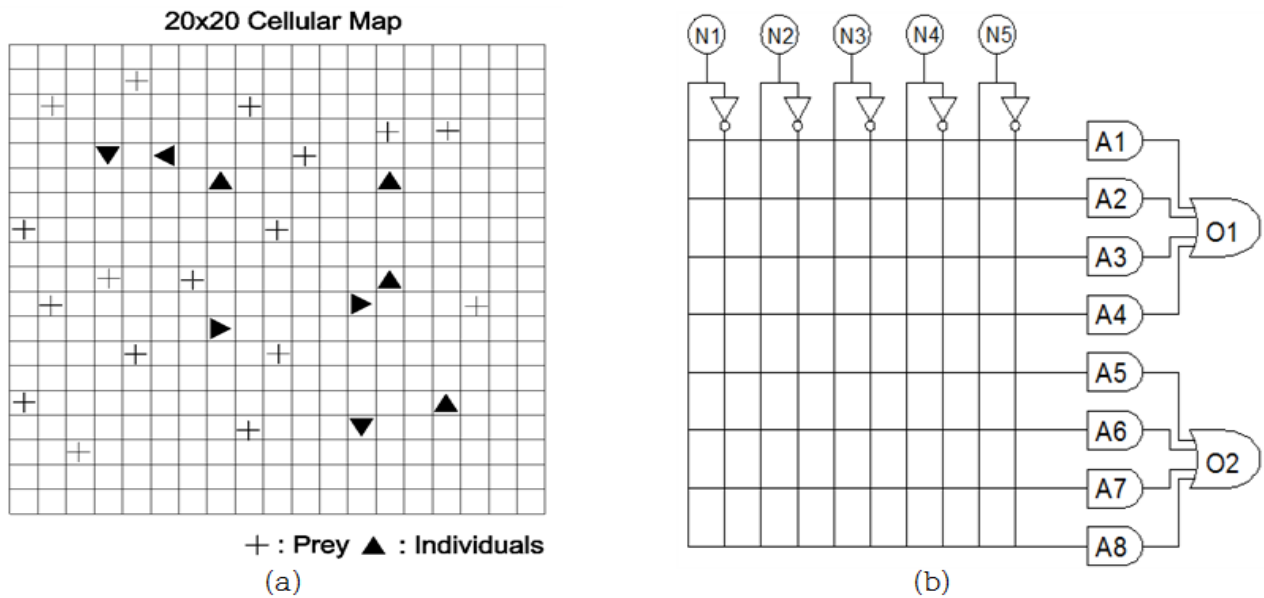


그림 1. 셀 우주 시뮬레이션 프레임워크 (a) 셀 공간에서 인공개체와 먹이 (b) 인공개체 내부 로직 프레임 (출처 논문^[7])
Fig. 1. Simulation framework of cellular cosmos (a) artificial individuals and prey of cell space (b) logic frame of artificial individuals (origin^[7])

셀 공간상에 존재하는 인공개체는 셀 공간상에 주어지는 외부 환경을 제한적으로 인식하여 자신의 행위를 결정하고 행동한다^[5,7]. 이러한 행위를 결정하는 로직은 다양한 방법으로 주어질 수 있는데 우리는 기존 연구에서 부울 논리로 내부로직을 결정하는 것으로 하였다. 즉 인공개체는 인공개체가 진행하는 방향으로 5개의 셀을 관찰할 수 있으며 이렇게 관찰된 결과를 입력으로 부울 논리를 진화적으로 생성하여 행위를 결정하고 행동을 하게 된다.

그림 1은 셀 우주 시뮬레이션 프레임워크의 공간과 인공개체의 내부로직 프레임을 보여준다. 그림 1(a)처럼 인공개체와 먹이는 셀 공간상에 한 셀을 차지한다. 인공개체는 화살표 진행방향으로 동, 서, 남, 북 4방향으로 이동이 가능하며 먹이는 특정 위치에 고정되어 있다. 인공개체는 진행방향에 대하여 전방으로 5개의 위치를 인식할 수 있는데 위치 정보는 N1~N5 로 입력된다. 해당 위치에 먹이가 있을 경우 1로 그렇지 않을 경우 0으로 입력이 들어온다. 인공개체는 인식된 먹이 위치를 기반으로 부울 논리 기반에 내부로직을 통하여 결과를 생성하고 그 결과에 따라서 행동하게 된다. 그림 1(b)는 기존 연구에서 사용한 인공개체의 내부로직 프레임이다. 진행방향에 대하여 5개의 위치에 대한 먹이 상황이 입력되면 내부로직 프레임의 AND와 OR 부울 논리에 따라서 출력 O1 과 O2 가 발생하며 이 값에 따라서 행위가 결정되어 행동하게 된다. O1 과 O2 가 00

이면 멈춤, 01 이면 왼쪽으로 방향전환, 10이면 오른쪽으로 방향전환, 그리고 11 이면 직진으로 행동한다.

인공개체가 먹이 위치로 이동하면 해당 먹이를 먹은 것으로 간주하며 일정기간 동안 먹이를 먹지 못하면 굶어죽게 된다. 또한 인공개체는 특정세대가 지나면 자식을 생성할 수 있다. 내부로직 프레임의 초기 부울 논리는 무작위로 생성되어 초기에는 인공개체가 먹이에 대하여 제대로 행동하지 못한다. 그러나 살아남은 개체가 자식을 생성하면서 부모 개체로부터 내부로직을 상속받게 되고 내부로직의 일정부분이 돌연변이를 일으켜 상속되므로 점점 먹이에 대하여 잘 대응하는 개체로 진화가 일어나게 된다^[7]. 특정 시간이 지나면 한 세대가 지난 것으로 간주하는데 인공개체의 사멸은 세대가 증가할 때 조건에 따라서 결정된다. 보다 자세한 것은 논문^[7]을 참조하기 바란다.

그림 1(b)에서 보듯이 기존의 연구에서는 내부로직 프레임이 단순히 현재 진행방향으로 5개의 위치에서의 먹이 상태만을 입력으로 받는다. 그러므로 입력된 상황에 따라서 단순한 결정만을 내릴 수 있다. 이는 먹이가 많거나 먹이분포 패턴이 현재 상황만을 관찰하여도 충분한 경우에는 문제가 되지 않으나 그렇지 않은 경우에는 경쟁력이 떨어질 수 있다. 그래서 본 논문에서는 인공개체가 자신이 결정하여 수행한 행동을 기억하게 하는 메모리 회로를 추가한 경우에 대하여 인공개체를 실험하고 분석하였다.

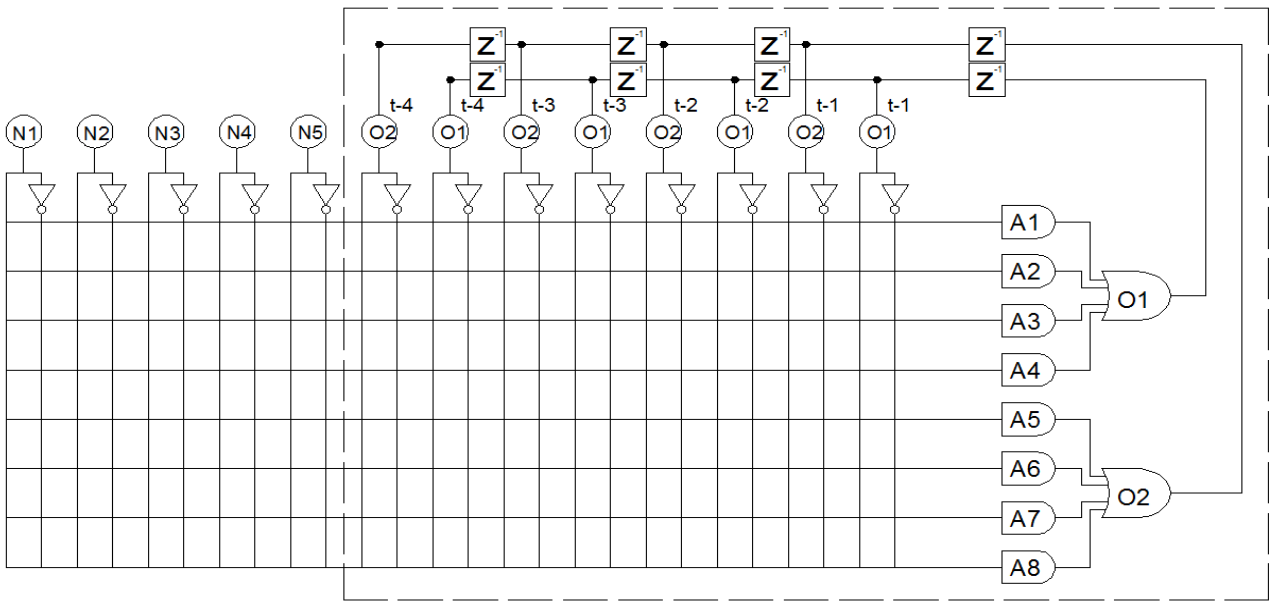


그림 2. 기억회로를 갖는 내부로직 프레임
 Fig. 2. Logic frame of artificial individuals with memory circuits.

III. 기억회로를 갖는 인공개체의 진화

그림 2는 기억회로를 갖는 내부로직 프레임을 보여 준다. 그림에서 보듯이 행위를 결정하는 출력 O1 과 O2 가 되먹임 되어 다시 입력으로 들어간다. 이러한 입력은 현재 입력과 합쳐져서 다음 행동을 결정하는 로직에 작용하여 다음 행동을 결정한다. 그러므로 기억회로가 있는 내부로직 프레임을 갖는 인공개체는 이전의 자신의 행동까지를 감안하여 행위를 결정할 수 있다. 이러한 새로운 구조의 내부로직 프레임은 기존의 기억회로가 없는 내부로직 프레임을 갖는 인공개체에 비하여 더 다양한 환경에 다양한 방법으로 적응할 수 있다.

즉, 기억회로가 없는 경우 인공개체는 현재의 먹이 위치만을 입력받기 때문에 먹이패턴이 동일하면 항상 동일한 행동을 취하게 된다. 예를 들어 앞에 먹이가 존재할 경우 직진을 한 개체는 이후에도 똑같은 동일한 조건에서 똑같은 행동을 한다. 하지만 기억회로를 갖는 인공개체는 자신의 과거의 행동을 입력으로 받기 때문에 똑같은 먹이조건에 대하여 자신의 과거행동에 따라 다른 결정을 내릴 수 있다. 이를 통하여 기억회로를 갖는 인공개체가 그렇지 않은 인공개체에 비하여 어떤 장점을 갖는지 어떤 행동을 보일 수 있는지를 분석할 수 있다.

기억회로가 없는 개체와 기억회로가 있는 개체사이의 장단점을 확실히 확인하기 위해서는 먹이의 패턴 또

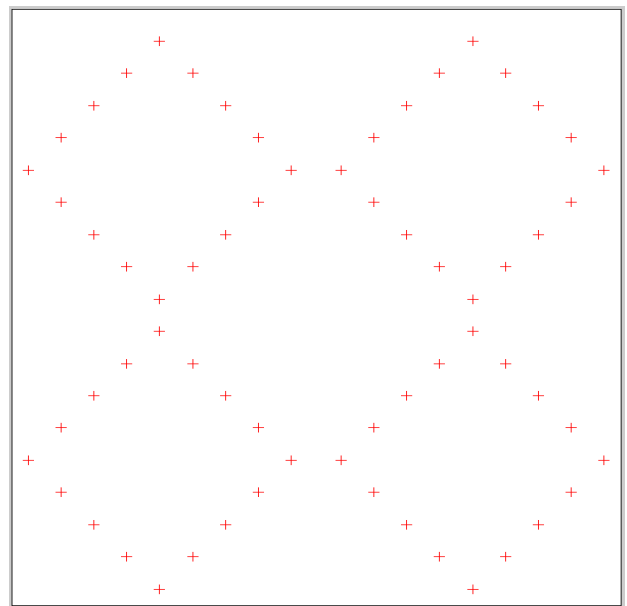


그림 3. 마름모형 먹이패턴
 Fig. 3. Prey pattern of diamond type.

한 중요하다. 즉 기억회로가 없는 개체도 쉽게 먹이를 먹는 패턴에서는 기억회로가 있는 개체의 장점이 드러나기 어렵다. 우리는 이를 위하여 그림 3에서 보이는 마름모형 먹이패턴을 선택하여 실험하였다. 마름모형 먹이패턴에서 먹이가 한 칸씩 떨어져 있기 때문에 먹이를 먹고 난 직후 개체는 주변에 아무런 먹이도 없는 상황이 된다. 이 경우에 기억회로가 없는 인공개체는 오로지 주변 먹이상황만을 보고 행동을 결정하기 때문에

표 1. 실험 파라미터

Table 1. Experimental parameters.

실험 파라미터	
최대세대	한 개체의 멸종
셀 공간크기	228 x 228
최소 개체수	100
최대 개체수	300
먹이로직 초기 점점 결정 확률	3/80
기억로직 초기 점점 결정 확률	3/128
변이 확률	1/총 점점수
먹이재생성 시간	10 time unit
time unit : generation	35 : 1

주변에 먹이가 없는 상황에서 행동하는 단순한 결정만 가능하다. 반면에 기억회로가 있는 인공개체의 경우 개체가 갖는 먹이조건은 동일하지만 자신의 과거행동을 입력받기 때문에 먹이를 하나 먹고 난 후 과거 행동에 따라서 다양한 행동을 결정할 수 있다. 특히 마름모형 먹이패턴에 최적화된 형태로 진화한 인공개체의 경우 과거행동과 현재의 상황을 통하여 어떤 행동을 해야 먹이가 있는 곳으로 갈 수 있는지를 판단할 수 있다.

인공개체가 몇 단계까지 자신의 과거행동을 기억해야 최적인지는 먹이패턴에 따라 다르다. 일반적으로 복잡한 먹이패턴을 위해서는 많은 단계의 과거행동까지 기억하는 것이 좋다. 다만, 과거행동을 기억하기 위한 새로운 입력이 주어지기 때문에 행위기억회로의 최적화 입장에서는 탐색공간이 늘어나는 단점이 발생한다. 그러므로 과거행동을 기억하는 단계가 많을수록 무조건 좋은 것이 아니며, 먹이패턴의 복잡도와 행위결정로직의 탐색공간 크기에 따라서 가장 적절한 단계가 결정된다. 우리는 이러한 것을 실험으로 입증하기 위하여 4단계까지 과거 입력을 받는 인공개체를 이용하여 실험하였다. 첫 번째 실험은 최대 4단계까지 기억하는 인공개체와 그렇지 않은 인공개체들 중 각 단계별로 선택하여 실험해 보았다. 즉, T0 와 T4, T1 과 T4, T2 와 T4, T3 와 T4 인공개체 실험을 각각 50번씩 하였다. 각 실험은 두 개체의 중 중 하나의 개체의 종이 멸종될 때까지 실험을 하여 마지막까지 살아남은 개체가 우수한 개체인 것으로 판단하였다. 두 번째 실험은 다섯 개의 인공개체 타입을 동시에 실험하였다. 두 번째 실험도 첫 번째 실험과 마찬가지로 50번씩 반복 실험하여 마지막까지 살아남은 개체가 가장 좋은 개체로 판단하였다.

IV. 실험 결과

기억회로가 있는 인공개체와 기억회로가 없는 인공개체 중 누가 더 우월하게 진화하는지를 알아보기 위하여 마름모형 먹이패턴에서 실험해 보았다. 모든 실험에 사용된 파라미터는 표 1과 같다. 개체가 살아가는 셀 공간은 228x228로 설정하였다. 최소 개체수는 초기에 생성하는 모든 타입의 전체 개체 수를 말하는 것으로 실험대상 개체타입에 따라서 각 타입의 초기 개체수가 결정된다. 예를 들어, T0 와 T4개체로 실험하는 경우 각각 50개씩 생성하여 100개의 초기개체가 생성된다. 최대 개체수는 인공개체의 종류에 상관없이 한 실험에서 최대 존재할 수 있는 개체수를 말한다. 각 인공개체는 세대가 지나면서 자식을 낳는데 초기 세대에는 최대 개체수를 넘지 않기 때문에 대부분의 인공개체의 개체수가 증가한다. 그러나 전체 인공개체수가 최대 개체수를 넘으면 각 개체가 먹은 먹이수가 높은 개체 순으로 정렬하여 최대 개체수 이하의 개체는 죽어서 최대 개체수를 유지한다. 초기 행위결정 로직프레임의 점점은 무작위로 결정되는데 점점이 생성될 확률은 3/80으로 주었다. 행동을 기억하는 부분의 초기 점점 확률은 3/128로 주었다. 자식을 생성할 때는 부모 개체의 행위결정 로직에서 변이를 주어 상속하는데 그 변이 확률은 1/총 점점수로 주었다. 부모 개체로부터 변이된 행위결정로직을 상속받은 자식개체의 행동이 먹이를 잘 먹을 경우 살아남아 또 다른 자식을 생성하나 그렇지 않은 경우 자식을 생성하지 못하고 굶어죽게 된다. 그렇기 때문에 세대가 지나면서 각 타입의 개체가 진화한다.

셀 공간에 주어진 먹이는 개체가 먹이를 먹으면서 점점 먹이가 사라지게 되고 먹이가 너무 없으면 좋은 행위로직을 갖는 개체마저 굶어죽게 된다. 이를 방지하기 위하여 먹이는 주기적으로 재생되도록 만들었는데 그 주기는 10 time unit 이며 한세대는 35time unit 이다. 인공개체가 자식을 생성하거나 굶어죽는 것은 세대별로 이루어진다.

실험은 이전 절에서 설명한 것과 같이 다음의 두 가지 실험을 하였다. 첫 번째 실험은 두 종류의 개체를 동일한 수만큼 생성하여 어떤 종류의 개체가 살아남고 어떤 종류의 개체가 멸종하는지 지켜보았다. 살아남은 인공개체는 그 실험환경에서 멸종한 인공개체보다 우월하게 진화되었다고 볼 수 있다. 그러나 인공개체의 진화가 확률적으로 이루어지기 때문에 실험별로 특정한 인공개체가 무조건 다른 인공개체보다 더 빨리 진화할 수

표 2. 두 개체별 실험 결과

Table 2. Experimental results of two types of artificial individuals.

Ta vs Tb	Ta 승	Tb 승	우월
T0 vs T4	15	35	T4
T1 vs T4	20	30	T4
T2 vs T4	27	23	T2
T3 vs T4	18	32	T4

는 없다. 그러므로 우리는 통계적으로 어떤 인공개체가 더 우월한지를 알아보기 위하여 총 50번의 실험을 하였으며 각 실험별로 어떤 개체가 우월한지 기록하였다.

표 2는 실험결과를 보여준다. 표 2를 보면 대부분의 결과에서 T4가 우월함을 볼 수 있다. 하지만 T2와 T4의 실험에서는 약간의 차이로 T2가 더 우월하였다. 이는 이전 절에서 간단히 언급한 것처럼 주어진 먹이패턴에서는 2단계의 기억단계를 갖는 인공개체가 먹이를 잘 찾아갈 수 있으면서 행위결정로직의 탐색공간도 크지 않아서 빨리 진화하는 것으로 볼 수 있다.

두 번째 실험은 다섯 타입의 개체를 동일한 수만큼 생성하여 어떤 개체가 최종적으로 살아남는지 살펴보았다. 그림4는 첫 번째 실험결과와 두 번째 실험결과로서 세대별로 각 타입의 개체수가 몇 개인지를 표시한 것이다. 대표적인 결과로서 그림 4(a)는 T0와 T4의 실험결과이며 4(b)는 T2와 T4의 실험결과이다. 그림 4(a)를 보면 초반에는 T0와 T4 각각 50개에서 증가하다가 15세대 즈음에 각 타입 별로 150개의 개체수가 된다. 이는 최대 개체수를 300개로 유지해주기 때문이다. T0 개체는 이후 87세대까지 T4 개체보다 개체수가 많으나 그 이후에 T4 개체에 역전 당한다. 이는 T4 개체가 다수의 세대동안 진화하면서 T0 보다 우월한 행동을 찾은 개체가 등장하기 때문으로 판단된다. 이후에는 이 우월한 T4 개체가 자식을 많이 번성하여 T0 개체를 멸종시킨다. T2와 T4의 실험결과인 그림 4(b)에서 보면 초기에는 T2의 개수가 많다가 50세대 근방에서 T4의 성장률이 높아졌으나 결국 T2 보다 우월한 로직을 찾지 못하여 멸종하는 것을 볼 수 있다. T0 와 T4의 경우에서는 T0가 과거행동을 기억하지 못하기 때문에 장기간에 걸쳐 진화를 하더라도 좋은 행동을 찾아내기 쉽지 않다. 그러므로 장기간에 걸쳐 진화된 T4가 T0을 이기는 개체로 진화될 가능성이 높다. 그러나 T2와 T4에서는 T2도 과거행동을 기억하기 때문에 지속적으로 더 좋은 행동을 찾아나갈 수 있고 이는 비록 T4가 좋은

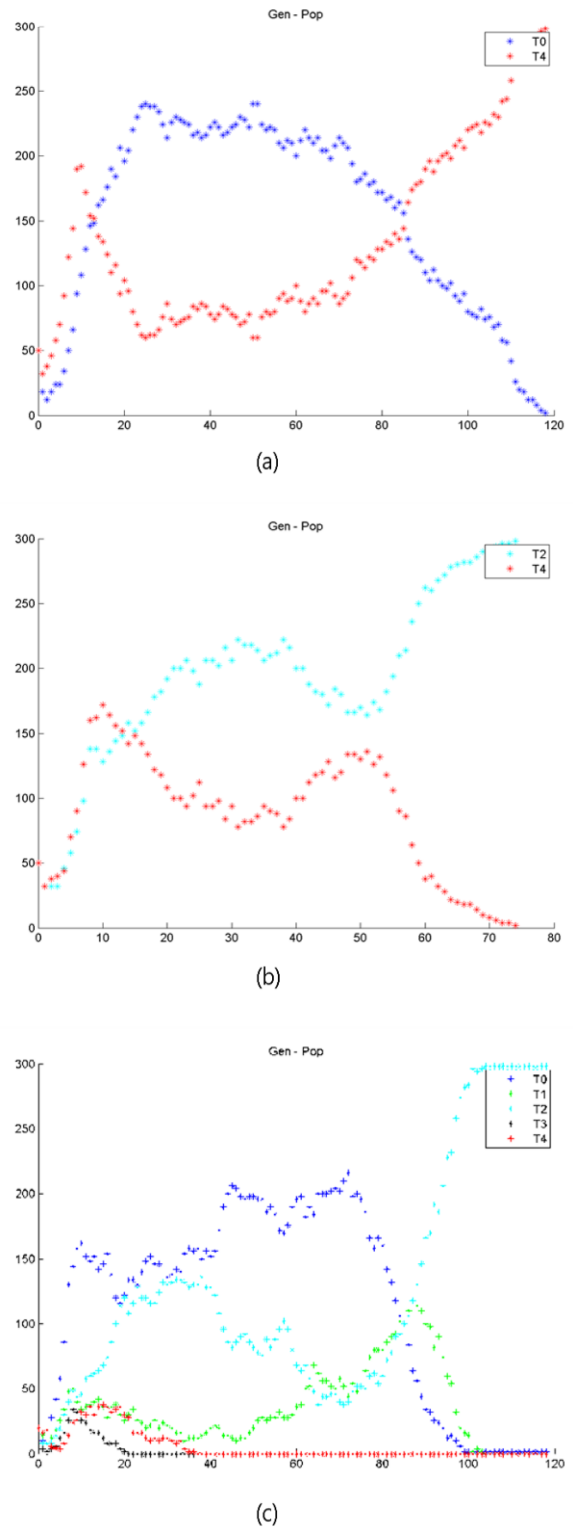


그림 4. (a) T0 vs T4 (b) T2 vs T4 (c) 모든 개체 동시 실험

Fig. 4. (a) T0 vs T4 (b) T2 vs T4 (c) all

types 행동을 찾아서 추적해 나가도 이보다 더 우월한 행동을 찾을 수 있다. 특히 T2는 두 단계의 과거행위만 기억하기 때문에 행위결정로직에서의 탐색공간이 작아

표 3. 모든 개체 동시 실험 결과
Table 3. Experimental results of all types.

개체종류	승리횟수
T0	3
T1	11
T2	18
T3	9
T4	9

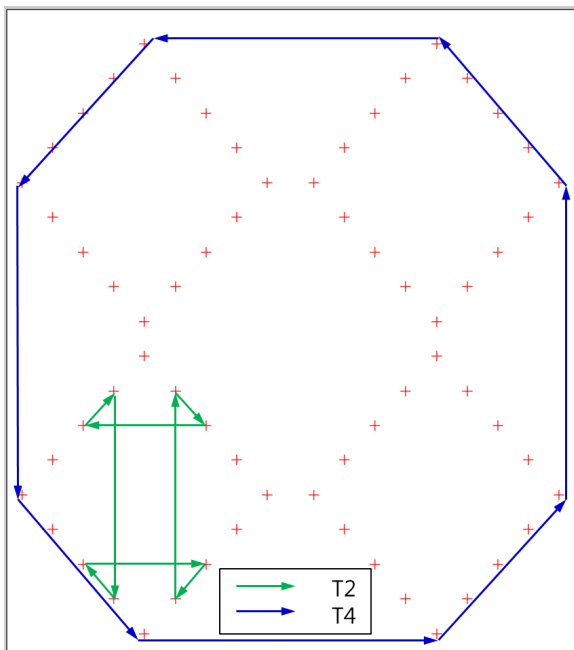


그림 5. T0 와 T4 진화 후 행동
Fig. 5. Behaviors of T0 and T4 after evolution.

서 더 유리하다. 그러나 이는 먹이패턴에 따른 것으로 만약 먹이 패턴이 더 복잡하여 더 많은 단계의 과거 행동을 기억하는 것이 유리한 경우라고 하면 T0 와 T4 실험에서처럼 후반세대에서 T4가 T2보다 더 진화된 개체를 생성하여 T2를 멸종시킬 수도 있다.

두 번째 실험결과는 그림 4(c)에 있다. 그림 4(c)에서 보면 세대 전반부와 중반부에서 모두 T0 가 우위에 있다. 이는 무작위로 생성한 T0의 행위결정로직이 탐색공간이 작아 비교적 단순한 행동을 결정하기 때문에 초기에는 오히려 과거행동을 기억하는 개체보다 더 먹이를 잘 먹을 수 있기 때문이다. 또한 탐색공간이 작아서 비교적 빠르게 진화할 수 있기 때문이다. 반면 기억회로를 갖는 다른 개체들은 과거행동이 되먹임 되기 때문에 복잡한 행동패턴을 보이거나 먹이패턴과는 상관없는 복잡한 행동을 수행함으로써 오히려 먹이를 제대로 먹지 못하게 된다. 첫 번째 실험에서는 두 개체의 실험이므로 기

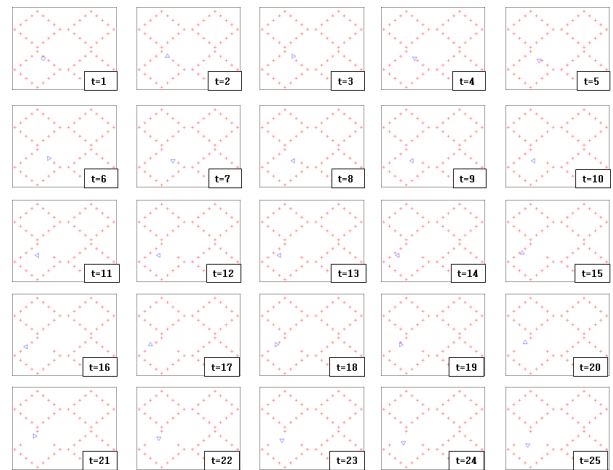


그림 6. T2의 진화 행동
Fig. 6. Evolved Behaviors of T2.



그림 7. T4의 진화 행동
Fig. 7. Evolved Behaviors of T4.

억회로를 갖는 개체도 충분히 많은 개체가 존재해서 진화를 비교적 많이 할 수 있었지만 두 번째 실험에서는 모든 타입의 개체로 실험하였기 때문에 각각의 개체타입의 개체수가 작아서 진화가 충분히 일어나지 못한다. 그러므로 진화가 많이 필요한 기억회로를 갖는 개체가 불리하다. 다만 T1 이나 T2의 개체는 기억회로를 갖지 않는 회로에 비하여 탐색공간이 많이 크지는 않으면서도 충분한 시간을 진화할 수 있기 때문에 중반부나 후반부로 가면서 경쟁력 있는 개체로 진화할 수 있다. 표 3은 두 번째 실험결과를 보여준 것이다. 표 3을 보면 첫 번째 실험결과와 동일하게 T2 개체가 50번 중 18번으로 가장 많이 살아남았다. 두 번째로 많이 살아남은 것은 50번 중 11번 살아남은 T1이다. T4는 총 50번 중 9번으로서 T1보다 살아남은 횟수가 작았다. 이는 첫 번째 실험에서 T4가 T1보다 우월한 것으로 나타난 것

는 다른 결과인데, 이것은 총 실험횟수가 50회로 통계적으로 충분하지 않은 것에서 기인한 것으로 판단된다.

본 실험에는 최대 개체수를 300개로 하였고 때문에 탐색공간이 작으면서도 먹이패턴에 적절한 행동을 할 수 있는 T2가 가장 우월한 것으로 나타났다. 그러나 최대 개체수가 매우 커서 T4도 지속적으로 진화할 수 있다면 T4가 더 우수하게 결과가 나올 수 있다. 특히 50번의 실험 중 T4가 우수한 것으로 나온 경우의 인공개체의 행동과 T2가 우수한 것으로 나온 경우의 인공개체의 행동을 비교해 보면 T4가 더욱 먹이를 잘 찾는 것으로 진화된 것을 확인할 수 있다. 그림 5에서 보여주듯이 T2의 행동은 마름모 먹이패턴 내부에서 루프를 형성하여 먹이를 찾아 먹도록 진화하였으나 T4의 행동은 외곽을 따라서 먹이를 먹도록 진화하였다. 이는 T2의 경우에는 직진하다가 먹이를 만나면 하나의 사선으로 먹이가 존재한다는 것을 찾은 것으로 보인 반면 T4의 경우에는 5개의 사선의 먹이를 모두 찾을 수 있도록 진화한 것으로 보인다. 이 예에서 보듯이 T2의 경우는 단순한 먹이패턴을 빨리 찾도록 진화할 수 있으나 T4의 경우에는 더 복잡한 먹이패턴을 찾을 수 있다는 것을 알려준다. 그러므로 단순한 먹이패턴만 찾더라도 충분히 먹이를 먹을 수 있는 경우에는 T2가 더 유리할 수 있다. T2와 T4의 일부 행동은 그림 6과 그림 7에서 볼 수 있다. 그림 6에서는 T2가 하나의 사선을 인식하기 시작한 시간인 $t=1$ 에서 시작하여 $t=25$ 까지의 행동을 보여주고 있다. 그림 7에서는 T4가 5개 사선을 찾기 시작한 시간인 $t=1$ 에서 시작하여 5개를 다 먹기까지 걸린 시간 $t=15$ 까지를 보여주고 다음 사선을 찾은 시간인 $t=36$ 부터 $t=45$ 까지의 행동을 보여주고 있다. 인공개체가 먹이를 먹는 세부적인 행동은 다음 두 동영상을 통하여 확인할 수 있다.

- T2의 진화 후 행동

☞ http://itsys.hansung.ac.kr/dn/T2_Evolution.wmv

- T4의 진화 후 행동

☞ http://itsys.hansung.ac.kr/dn/T4_Evolution.wmv

V. 결 론

본 논문에서는 기억회로가 있는 개체와 없는 개체를 특정한 먹이패턴에서 진화 시켰을 때 어떤 개체가 우월한지를 분석하고 진화된 행동을 관찰하였다. 그 결과 기억단계가 많은 개체가 대부분 우월하였음을 관찰하였다. 그러나 기억단계가 작은 T2가 기억단계가 많은 T4

보다 더 우월한 실험결과를 볼 수 있었다. 이는 같은 개체수로 동시에 진화를 시도하는 실험에서는 행위결정로직의 탐색공간이 작은 T2가 더 빨리 진화할 수 있어서 유리하기 때문인 것으로 분석되었다. 모든 타입의 개체를 동시에 진화시킨 실험에서도 T2가 가장 우월한 결과를 보였다. 이는 먹이패턴의 복잡도가 T2 정도의 기억단계를 갖는 개체에 가장 적합하기 때문인 것으로 판단된다. 그러나 이러한 경향은 실험환경과 실험 파라미터에 따라서 어느 정도 경향성이 변화할 수 있다.

REFERENCES

- [1] Charles Darwin, "On the Origin of Species by Means of Natural Selection, or the Preservation of Favoured Races in the Struggle for Life," John Murray, 1859.
- [2] Von Neumann, J. and A. W. Burks, "Theory of self-reproducing automata," Urbana, University of Illinois Press, 1966.
- [3] Paul Davies, Mun-Ju Go translator, "The fifth miracle: origin of life," Bookshill, 2000.
- [4] Gerhard Staguhn, Hye-Kyung Jang translator, "Find the blueprint of life-genetics and evolution of life by miracle and coincidence facets," HaeNaMoo, 2004.
- [5] Bo-Sun Jung and Sung Hoon Jung, "Cellular Cosmos: Cell-level Evolution Modeling and Simulation Framework," Proceedings of 2014 IEEK Fall Conference, pp. 749-751, Nov. 2014.
- [6] Bo-Sun Jung and Sung Hoon Jung, "Adaptive Evolution of Memory Circuits of Artificial Individuals According to Prey Patterns in Cellular Cosmos," Proceedings of 2014 IEEK Fall Symposium, pp. 42-43, Dec. 2014.
- [7] Bo-Sun Jung and Sung Hoon Jung, "Evolution of Behavioral Logic of Artificial Individuals Using Cell-level Evolution Framework," Journal of Korean Institute of Intelligent Systems, vol. 25, no. 1, pp. 22-28, Feb. 2015.
- [8] Byoung-Tak Zhang, "Artificial Life and Evolutionary Algorithms," The Magazine of the IEIE, vol. 24, no. 3, 309-318, 1997
- [9] Ye Eun Yang, "Implement of Artificial Life by Biological Concepts," Journal of Korean Society of Media and Arts, vol. 10, no. 1, 37-51, 2

— 저 자 소 개 —



정 보 선(학생회원)
2012년 가천대학교 전자공학과
공학사
2013년~현재 코아리버 연구원
2014년~현재 한성대학교 일반
대학원 정보통신공학과
재학

<주관심분야: 지능시스템, 융합공학>



정 성 훈(정회원)
1988년 한양대학교 전자공학과
(공학사)
1991년 KAIST 전기및전자공학
과 (공학석사)
1995년 KAIST 전기및전자공학
과 (공학박사)

1996년~현재 한성대학교 정보통신공학과 교수
<주관심분야: 지능시스템, 시스템생물학, 융합공학>