

Simulation of Sustainable Co-evolving Predator-Prey System Controlled by Neural Network

Taewoo Lee*, Sookyun Kim**, Yoonsik Shim***

*Student, Program in Visual Information Processing, Korea University, Seoul, Korea

**Professor, Dept. Computer Engineering, Jeju National University, Jeju, Korea

***Professor, Dept. of Game Engineering, Pai Chai University, Daejeon, Korea

[Abstract]

Artificial life is used in various fields of applied science by evaluating natural life-related systems, their processes, and evolution. Research has been actively conducted to evolve physical body design and behavioral control strategies for the dynamic activities of these artificial life forms. However, since co-evolution of shapes and neural networks is difficult, artificial life with optimized movements has only one movement in one form and most do not consider the environmental conditions around it. In this paper, artificial life that co-evolve bodies and neural networks using predator-prey models have environmental adaptive movements. The predator-prey hierarchy is then extended to the top-level predator, medium predator, prey three stages to determine the stability of the simulation according to initial population density and correlate between body evolution and population dynamics.

▶ **Key word:** Artificial Life, Predator-Prey, Artificial Neural Network, Simulation, Genetic Algorithm

[요 약]

인공생명체 연구는 자연 생명과 관련된 시스템이나 그 과정들, 진화 등을 평가해 다양한 응용 과학 분야에 활용된다. 이러한 인공생명체의 원활한 활동을 위해 물리적 신체 설계와 행동 제어 전략을 진화시키는 연구가 활발히 진행되었다. 그러나 형태와 신경망을 공진화시키는 것은 어렵기에 최적화된 움직임을 가진 인공생명체는 한 가지 형태에 한 가지 움직임만을 가지며 주변 환경 상황은 고려하지 않는 것이 대부분이다. 본 논문에서는 포식자-피식자 모델을 이용하여 형태와 신경망을 공진화하는 인공생명체가 환경적응형 움직임을 갖게 한다. 그런 다음 포식자-피식자 계층 구조를 최상위 포식자-중간 포식자-최하위 피식자 3단계로 확장하여 초기 개체군 밀도에 따라 시뮬레이션의 안정성을 판별하며 형태 진화와 개체군 역학 간의 상관관계를 분석한다.

▶ **주제어:** 인공생명체, 포식자-피식자, 인공신경망, 시뮬레이션, 유전알고리즘

-
- First Author: Taewoo Lee, Corresponding Author: Yoonsik Shim
 - *Taewoo Lee (twoo0220@korea.ac.kr), Program in Visual Information Processing, Korea University
 - **Sookyun Kim (kimsk@jejunu.ac.kr), Dept. Computer Engineering, Jeju National University
 - ***Yoonsik Shim (ysshim@pcu.ac.kr), Dept. of Game Engineering, Pai Chai University
 - Received: 2021. 08. 04, Revised: 2021. 08. 30, Accepted: 2021. 08. 30.

I. Introduction

Karl Sims의 논문[1]을 시작으로 진화하는 인공생명체 연구 분야가 발전되었다. 주로 인공생명체들의 원활한 활동을 위한 물리적 신체 설계나 신경망 제어 전략을 최적화할 수 있는 시뮬레이션 연구가 진행되었다[2]. 인공생명체들은 컴퓨터 그래픽스와 애니메이션을 넘어서 로봇공학에서 신경망-신체 시스템의 공동 최적화를 위한 시험공간(testbed) 역할을 한다. 그러나 최적화 과정 동안 물리적 형태를 끊임없이 수정해야 하며, 수정된 형태에 따라 신경망 역시 조정해야 하는 어려움이 따른다[3][4][5]. 최근에는 유연한 몸체(Soft-bodied)를 가진 인공생명체 최적화가 주를 이루고 있으며[6][7], 형태와 신경망 공진화를 통해 날개 생명체를 생성하거나[8], 수중 환경에서 최적화된 움직임을 갖도록 진화하는 연구도 진행되고 있다[9]. 대부분의 인공생명체는 앞으로 움직이는 한 가지 목적에 최적화된 신경망을 갖도록 진화한다. 이런 형태의 최적화는 주변 환경을 고려하지 않는다. 그러나 생명체는 주변 상황에 따라 다른 움직임을 가진다. 대표적인 예시가 포식자-피식자 모델이다. 상위 포식자와 피식자 사이에 존재하는 중간 포식자는 피식자를 잘 포식하는 움직임과 상위 포식자로부터 도망치는 움직임이 필요하다[10]. 즉, 생존이라는 목적을 가진 인공생명체는 주변 상황에 따라 진화 방향이 달라진다.

II. Preliminaries

1. Related works

1.1 Predator-prey simulation with artificial life

포식자-피식자 모델은 개체가 서로에게 미치는 영향을 기반으로 생태계의 먹이사슬 구조를 이해하기 위한 연구로 대표적이다. 생태계는 다양한 환경과 여러 생물 종들이 상호작용을 통해 안정성을 유지한다. 그러나 모든 환경과 조건을 설정하여 생태계를 재현하기는 불가능에 가까우므로 제한적인 상황에서 포식자-피식자 경쟁 관계를 살펴보는 것이 일반적이다. 이러한 경쟁 관계 파악을 위해 인공생명체를 이용하여 시뮬레이션한 연구가 진행되었다[11][12][13][14][15].

포식자-피식자 시뮬레이션의 타당성 판단 기준으로 주로 로트카-볼테라(Lotka-Volterra) 수리 모델이 사용된다[16]. 이 수리 모델은 포식자-피식자 개체군 수가 증감을 반복하는 그래프 형태를 보여주는데, 생태계 관련 변수가 추가될수록 재현하기 힘들어진다. 예를 들어 개체군들이

공진화를 하면 로트카-볼테라 수리 모델이 역전되는 현상이 나타날 수도 있다[17]. 최근 중요하게 여겨지는 관련 변수로 빠른 진화(Rapid Evolution)가 있다. 생명체의 진화는 환경의 영향을 많이 받으나, 개체 수의 역학관계에 영향을 주기에는 비교적 긴 세월에 걸쳐서 일어난다는 것이 일반적인 통념이다. 그러므로 대부분의 생태학적 모델들은 개체 수 역학과 진화 역학 사이의 시간 척도를 분리하려고 계산하고 같은 개체군이나 다른 종 간의 진화적 변화를 무시하는 게 보통이다. 그러나 진화 역학이 이른 시간 내에 이루어졌을 때 개체군 역학에 미치는 영향을 분석한 여러 연구가 다수 등장하였다[18][19][20]. 이렇듯 진화 역학과 개체군 역학관계에서 조건과 변수들의 역할 및 영향이 확실하지 않은 부분이 무수히 많지만, 가정과 조건에 따라 나올 수 있는 모든 결과를 도출해낼 수 있다[21]. 인공생명체는 형태 변이를 통해 빠른 진화라는 변수를 적용하기에 적합하므로 이를 이용한 포식자-피식자 시뮬레이션은 빠른 진화 역학과 개체군 역학 사이의 관계에 의미 있는 통찰력을 얻을 수 있을 거라 믿고 있다.

1.2 Prior work predator-prey simulation

본 연구에서는 기존 포식자-피식자 시뮬레이션 모델을 확장하여 인공신경망을 이용한 포식자-피식자 공진화 시뮬레이션에서 초기 개체군의 수가 어떠한 영향을 주는지에 중점을 두었다. 먼저 Takashi Ito는 방어수단을 갖춘 피식자의 몸집 크기 변화가 개체 수에 미치는 영향을 분석하였다[22]. 시뮬레이션 과정에서 피식자는 포식되지 않으면 몸집이 점점 커지지만, 몸집 유지 비용이 증가하고 포식자에게 사냥당할 확률을 증가시켰다. 진화 알고리즘을 이용하여 개체들이 빠른 진화를 하더라도 로트카-볼테라 수리 모델을 만족할 수 있음을 보여주었다. 그러나 개체 수를 최소 5마리, 최대 50마리로 설정하여 아무리 포식 행위나 번식이 이루어지더라도 멸종하거나, 무한히 번식하지 않게 하였다. 또한, 피식자는 세대의 진행에 따라 몸집이 진화하지만, 포식자는 진화하지 않고 고정되어 있다. 본 논문에서는 개체 수의 최소, 최댓값에 제한을 두지 않고 개체군들의 형태와 신경망이 공진화하였을 때 생태계가 멸종하는지 혹은 일정한 개체군 비율을 유지하는지 확인하고자 하였다.

Nesrine Ouannes는 포식자, 피식자 두 개체 모두 진화 알고리즘을 적용하여 시뮬레이션을 진행하였다[14]. 비록 포식 행위에 따른 개체의 소멸과 번식은 없지만, 포식자는 피식자를 쫓아가고 피식자는 포식자로부터 도망치는 움직임을 구현하였다. 개체 수는 양쪽 다 100으로 고정되어 있으며 초기 위치는 일직선으로 정렬되어 있다. 따라서

포식자들이 피식자를 탐색하여 쫓지만 사실상 앞으로만 움직이는 형태를 보이게 된다. 본 연구에서는 포식자와 피식자의 움직임을 진화시키는 점은 같지만, 개체들을 시뮬레이션 공간상에 무작위 배치하였다. 바로 앞에 있는 피식자를 쫓아가는 것이 아니라 포식자가 활동하면서 가장 가까이 있는 피식자를 탐색하여 포식하도록 하였다.

로트카-볼테라 수리 모델에서 빠른 진화라는 변수 이외에도 특정 변수를 추가하였을 때의 시스템 안정성(Stability) 혹은 진동(Oscillation)의 민감성을 분석하는 연구가 다수 있었다[23][24]. Yerkezhan Seitbekova는 Pygame을 이용하여 포만감 지수(Hungry rate)가 포식자-피식자 개체 수에 미치는 영향을 확인하였다[25]. 포식자-피식자의 기본적인 개체 수는 로트카-볼테라 수리 모델을 이용하였지만, 포만감 지수라는 변수가 하나 더 추가되면서 시뮬레이션 결과에 큰 영향을 미치는 것을 보여주었다. 그렇기에 포식자와 피식자의 번식 비율을 각각 0.6, 0.3으로 설정하여 시뮬레이션의 안정성을 높였다. Cho Jung-Hee 연구에서는 초기 개체군 밀도 비율에 따라서 먹이사슬 구조를 가진 생태계 안정성에 미치는 영향을 확인하였다[26]. 포식자-피식자의 번식 비율을 0.2로 하였고 포만감 지수를 5로 설정하여 한번 움직일 때마다 1씩 감소하게 하였다. 두 연구 모두 포만감 지수가 0이 되면 개체가 죽게 되어 시뮬레이션 상에서 사라지게 구현하였다. 일정 시간 동안 포식하지 못하면 굶어 죽는 생물학적 특성을 반영한 것이다. 본 논문에서도 포만감 지수를 사용하여 개체들이 일정 세대 동안 포식하지 못하면 소멸하게 하였다. 또한, 사전 연구를 통해 시뮬레이션 안정성을 높이기 위하여 개체 수에 따라 탄생 비율을 조정하였다. 개체 수가 20보다 작으면 탄생 비율을 0.6으로 높이고 40 이상이면 0.2로 낮추어 일정한 개체 수를 유지하도록 하였다. 이 밖에도 최상위 포식자가 최하위 피식자에게 미치는 영향 등을 참고하여 기존 포식자-피식자 시뮬레이션 모델을 확장하였다[24][27].

III. Simulation Model

1. Artificial life design

포식자-피식자 시뮬레이션에서는 2개의 개체군만을 이용하여 실험하는 것이 일반적이다. 그러나 생명체의 대다수는 포식자인 동시에 피식자이기 때문에 중간 포식자를 두어 Fig.1처럼 3단계 구조의 포식자-피식자 모델을 구성하였다. 이는 육식동물-초식동물-식물이라는 생태계 먹이

사슬을 모방한 것이다. 중간 포식자는 상위 포식자로부터 도망치면서 피식자를 포식하는 움직임을 갖도록 하였다.

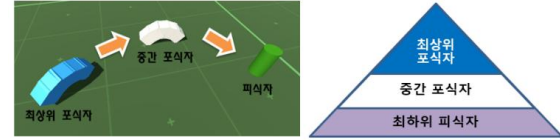


Fig. 1. Predator-Prey Hierarchy

단일 개체의 움직임을 최적화된 형태 진화가 목적이 아니므로 기존 인공생명체의 형태를 모방하여 모델을 설계하였다. 기존 인공생명체의 진화 형태를 보면 큐브 형태가 일직선으로 연결되어있거나(Fig.2:a)[15], 초기 정육면체 형태에서 가운데 부분이 없어지면서 가장자리 부분이 다리 구실을 하게끔 진화한다(Fig.2:b,c)[7][28]. 시뮬레이션에 사용된 포식자들은 이런 형태를 흉내 내서 모두 정육면체가 여러 개 연결된 형태를 가지게 하였다. 포식자들은 꿈틀거리며 움직이는 형태를 취하게 된다. 포식하면 몸집 크기가 커지지만, 형태 진화가 움직임에 영향을 주지 않게 몸통 연결의 충돌처리를 없애주었다.

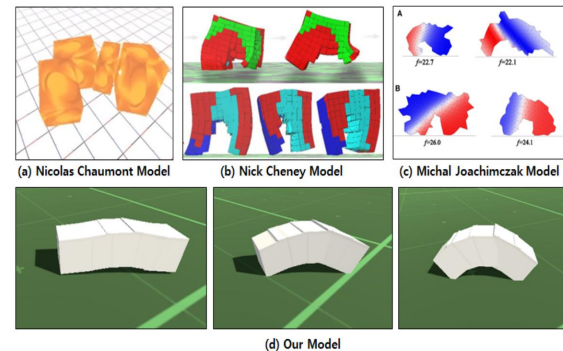


Fig. 2. Comparison of artificial life models

파란색과 하얀색으로 최상위 포식자와 중간 포식자를 구별하였다. 피식자인 식물은 원기둥 형태와 녹색으로 표현하였다. 움직이는 형태는 직진만 가능하며 목표와의 각도에 따라 진행 방향을 수정할 수 있다. 포식자들은 일정한 체력을 가지고 있으며 피식자를 포착했다면 돌진하는 기능을 추가하였다. 이는 포식자가 피식자를 사냥할 때 단숨에 달려가는 현상을 표현한 것이다. 게다가 포식자와 피식자가 같은 시각 센서를 가지고 움직이기 때문에 영원히 추격하는 현상이 발생할 수도 있다. 이를 방지하고자 포식할 때에는 순간적으로 달려가는 움직임을 추가하였다.

2. Simulation progress

개체들은 (1000, 1000) 크기의 공간에 설정한 숫자만큼 무작위로 배치된다. 이후 포식자들은 피식자를 사냥하러 움직이게 된다. 최하위 피식자 식물은 초기 위치에 생성되고 고정된다.

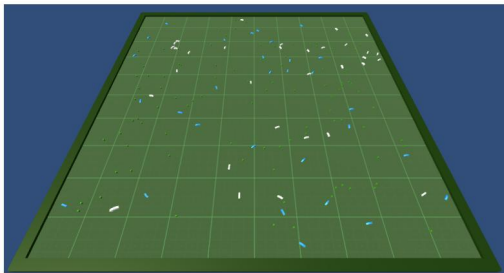


Fig. 3. Simulation Overview

중간 포식자와 최상위 포식자는 포식하는 대상만 다를 뿐, 움직이는 공식은 동일하게 적용하였다. 포식하는 행위는 포식자와 피식자가 충돌하는 순간으로 정의하였다. 포식자 몸의 일부가 피식자의 몸에 닿는 순간 포식했다고 간주하고 일정 확률에 따라 번식을 한다. 포식자의 몸에 닿은 피식자는 즉시 소멸하게 된다. 게다가 25초 동안(약 2.5세대) 포식하지 못했다면 포만감 지수가 줄어들게 되고 포만감 지수가 0인 포식자들은 소멸한다. 그러나 포식을 한다면 포만감 지수가 온전히 회복된다. 따라서 모든 포식자는 소멸하지 않기 위해서 끊임없이 포식하게 된다. 최하위 피식자인 식물의 경우 1.5초당 1개씩 번식을 하게끔 설정하였다.

기본적으로 시뮬레이션 공간은 사각형 모형을 띄고 있지만, 주기적 경계 조건(periodic boundary condition)을 사용하였다. 이는 제한된 크기의 공간에서 발생하는 경계효과를 최소화시키기 위함이다. 또한, 개체가 움직이다가 시뮬레이션 공간의 끝에 도달하여 벽에 부딪혔을 때, 움직임이 멈추는 것을 방지하고자 한다. 시뮬레이션 알고리즘 모식도는 Fig.4와 같다.

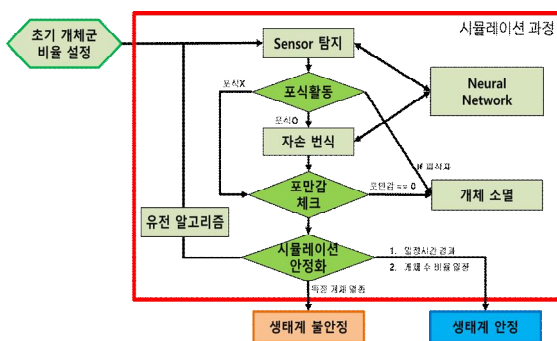


Fig. 4. Simulation Schematic Diagram

3. Genetic algorithm setting

초기 번식률은 0.2로 설정하였다. 포식자들은 포식하는 순간 0.2 확률로 자손을 낳는다. 시뮬레이션이 시작하면서 유전알고리즘이 충분히 적용할 수 있는 시간을 확보하고, 사전 연구에서 가장 안정성 비율이 높았던 수치이다. 이 수치는 시뮬레이션 공간 크기나 알고리즘 변경에 따라 조정이 가능하다. 그러나 초기 개체군의 수가 너무 많으면 순식간에 생태계가 멸종하는 모습을 보였다. 따라서 개체군의 수가 일정 이상이면 번식률은 낮추고, 개체군의 수가 너무 낮으면 번식률을 높게 설정하였다[25].

개체의 움직임은 유전알고리즘에 따라 변화된다. 적응도 (Fitness) 값은 포식할 때마다 Score를 1점씩 얻는데, Score가 1보다 크다면 해당 점수(Score)를 반환하고 1보다 작다면, 최소 움직인 거리를 나누어 계산한다. 포식자들은 더 많이 포식 활동을 하도록 유도하였고 포식을 못 하고 도망만 다니는 것을 가장 안 좋은 방향으로 설계하였다.

$$fitness = \begin{cases} Score & \text{if } Score \geq 1.0 \\ \frac{1}{MinDistance} & \text{if } Score < 1.0 \end{cases}$$

돌연변이(Mutate) 파라미터 변화율은 초깃값은 0.15로 설정하였고 교차(Crossover)에 사용하는 파라미터로는 Unity의 무작위 함수 Random.Next(int maxValue)를 이용하였다. 여기서 maxValue는 어머니 가중치 벡터의 최대 개수이다. 두 부모의 가중치 벡터를 받은 후, 함수로 나온 값 n = Random.Next(maxValue)을 기준으로 잡고 0번째 벡터부터 기준점 전까지는 어머니 가중치 벡터를 아버지 가중치 벡터로 교체하였다. 기준점보다 큰 i 번째부터는 아버지 가중치 벡터를 어머니 가중치 벡터로 교체하였다. 이렇게 교차시킨 가중치 리스트를 기존 가중치 벡터에 대입하였다.

4. Neuron Network and Vision Sensor

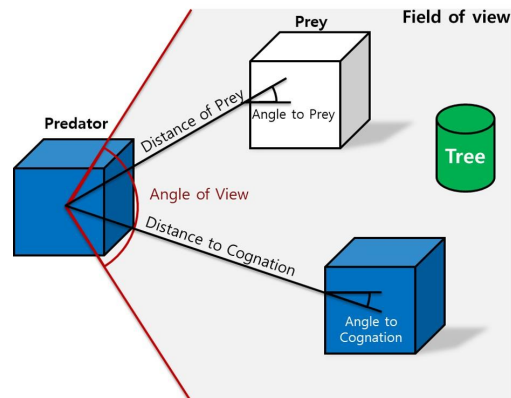


Fig. 5. Top-predator Vision Sensor

최상위 포식자의 시각 센서(Vision Sensor)는 Fig.5 처럼 적용된다. 시야각은 120°이며 탐지 범위 내에 가장 가까운 중간 포식자와 동족을 찾으며 동족한테서 멀어지고 중간 포식자가 있는 방향으로 이동한다. 이는 최상위 포식자의 활동 영역을 균일하게 분포하기 위함이다. 최상위 포식자들은 동족들이 없는 곳에서 중간 포식자를 사냥하러 움직이게 된다. 시야 범위에 들어오는 정보들은 신경망 알고리즘에 입력 데이터로 사용된다.

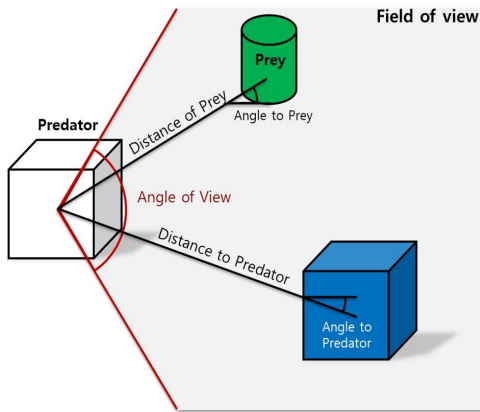


Fig. 6. Medium-predator Vision Sensor

중간 포식자의 시각 센서도 똑같이 적용된다. 다만 최상위 포식자가 동족을 찾았다면, 중간 포식자는 최상위 포식자를 탐지한다. 동족과 거리를 두는 것이 아닌 상위 포식자한테서 도망치는 것처럼 보이게 하였다. 따라서 신경망에 들어가는 입력 데이터에서 동족과의 거리와 각도가 상위 포식자와의 거리와 각도로 바뀌게 된다. 적용하는 대상은 달라지지만, 출력은 같다. 즉, 신경망 입력 데이터로 들어가는 변수들로는 개체와 가장 가까이 있는 피식자와의 거리, 개체와 가장 가까이 있는 피식자와의 각도, 개체와 가장 가까이 있는 포식자와의 거리 혹은 가장 가까이 있는 동족과의 거리, 개체와 가장 가까이 있는 포식자와의 각도, 현재 개체의 체력, 현재 개체의 속도, 현재 개체의 각도로 총 7가지이다. 여기에 활성화 함수와 가중치를 이용하여 출력 데이터를 계산한다. 출력 데이터로는 돌진 여부, 개체의 속도, 개체의 각도이다. 신경망 입출력 데이터의 모식도는 Fig.7과 같다.

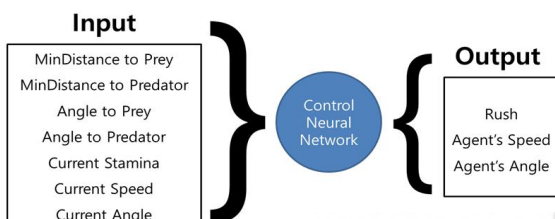


Fig. 7. Data of Artificial Neural Network

IV. Simulation result

본 논문은 표1의 환경에서 포식자-피식자 시뮬레이션 실험을 진행하였다. Unity 물리 엔진을 이용하여 지형, 충돌처리를 설정하였고, 진화 시뮬레이션에는 C# 스크립트를 활용하였다.

Table 1. Simulation Environment

CPU	Intel(R) Core(TM) i7-6700 @ 3.40GHz
RAM	32GB
VGA	NVIDIA Geforce GTX 1080
Physics Engine	Unity 2020.1.2f1

1. Simulation feasibility analysis

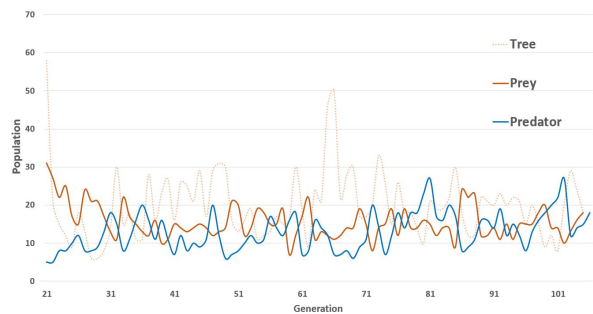


Fig. 8. Predator-Prey Population by Generation

최상위 포식자와 중간 포식자, 피식자의 개체 수가 서로 증감을 반복하면서 로트카-볼테라 수리 모델 그래프 개형을 유지하는 것을 확인할 수 있다. 그러나 개체군이 포식자, 피식자만 있는 2단계 계층구조와는 다르게 그래프 개형의 변동 폭이 일정하지 않은 것을 볼 수 있었다. 인공지능망이 진화하는 과정에서 반드시 피식자를 잘 먹는 방향으로 진화한다는 보장을 할 수 없기 때문이다. 대부분의 개체는 적응도 점수가 높은 쪽으로 진화하려는 경향을 보이기에 포식을 많이 하는 방향으로 진화한다. 그러나 일부 개체는 포식자들로부터 도망치는 방향으로 진화하고 이 과정에서 시야 밖에 있는 피식자와 충돌하여 포식하는 상황도 발생하였다. 따라서 도망치는 방향으로 진화했음에도 불구하고 적응도 점수가 높게 나오는 것이다. 이런 현상이 나타남에도 불구하고 Fig.8처럼 포식자와 피식자 개체 수는 서로 증감을 반복하는 모습을 보였다.

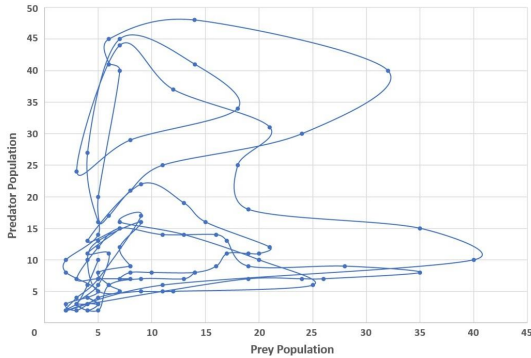


Fig. 9. Variation of Predator-Prey Population

Fig.9의 포식자-피식자 개체 수 경로 그래프를 보면 개체의 최대, 최소 숫자가 정해져 있지 않았기 때문에 반듯한 모양은 아니지만 로트카-볼테라 개체 수 경로 그래프와 비슷한 개형을 갖추는 모습을 확인할 수 있었다.

2. Stabilization ratio based on initial population

초기 개체군 수에 따른 생태계 안정성 판단은 Cho의 연구에서 사용한 방법을 이용하였다[26]. 시뮬레이션을 독립적으로 100번 진행하였을 때, 개체들이 증감을 반복하면서 특정 시간까지 시뮬레이션이 진행되는 것을 정량적으로 나타내었다(Fig.10). 수치상으로 이전 연구보다 생태계가 안정화되는 비율이 더 낮았으며 초기 개체군 수가 작을수록 안정화가 더욱 잘 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

포식자가 피식자를 탐색하는 신경망이 아직 활발하게 활성화되지 않았다면 포식자는 제자리에서 맴도는 현상을 보여주었다. 이후 세대가 지날수록 신경망이 활성화되고 피식자를 잘 사냥할 수 있게 된다. 개체의 움직임은 최고 속도가 정해져 있으므로 시뮬레이션 공간에 개체 수의 비율이 일정하게 유지되면서 생태계가 안정화되는 것을 확인할 수 있었다.

Predator Prey	10	20	30	40	50	60	70	80	90
10	54	58	68	56	66	55	49	0	0
20	62	65	78	67	32	31	1	0	0
30	76	77	89	78	55	8	9	8	9
40	92	94	93	79	35	34	24	9	12
50	100	100	100	94	64	38	10	7	8
60	100	100	100	100	76	65	19	0	0
70	100	100	100	100	85	82	52	0	0
80	100	100	100	100	86	76	49	4	0
90	100	100	100	100	58	47	8	0	0

Fig. 10. Stabilization Ratio by Initial Predator-Prey Population

그러나 포식자의 비율이 지나치게 높아지면 생태계는 순식간에 멸종하는 것을 볼 수 있었다. 시뮬레이션 공간에 포식자의 비율이 높다는 것은 피식자들이 포식자들한테서 도망칠 공간이 부족하다는 의미이다. 따라서 포식자들은 마치 무리 사냥을 하는 것과 같은 모습을 보였으며 피식자들은 급감하게 되었다. 피식자들이 번식하기도 전에 멸종하게 되어 포식자도 연쇄적으로 같이 멸종하는 모습을 보여주었다.

최상위 포식자가 멸종한 후 중간 포식자와 피식자들로만 생태계가 안정화 상태를 보여주는 경우도 간혹 있었다. 설명 안정화가 유지된다고 하면 최하위 피식자의 번식 속도가 상위 포식자보다 빠른 경우에만 가능하다. 최상위 포식자가 없으므로 결국 중간 포식자의 수는 금방 늘어나게 되고 시뮬레이션을 계속해서 진행하다 보면 결국 멸종할 것으로 보인다. 번식 비율에 따라서 시뮬레이션의 결과가 크게 달라질 수 있었다. 시뮬레이션 공간에 맞게 개체들의 최대 움직임을 설정해 주어야 하며 번식 비율도 공간 크기에 따라 달라져야 한다고 판단된다.

3. Correlation between population dynamics and evolutionary dynamics

최상위 포식자의 경우 개체 수가 증가하면 몸집 크기가 줄어드는 것을 확인할 수 있었다. 개체 수가 늘어난다는 것은 포식을 잘한다는 뜻이고 이는 번식을 활발히 한다는 의미이다. 개체 수가 많아지니 개체군의 평균 몸집 크기가 감소하게 된다. 그러나 포식 대상이 적어지면 포만감을 회복하지 못해서 소멸하는 개체가 많아지고 포식 활동을 잘하는 개체만 살아남게 된다.

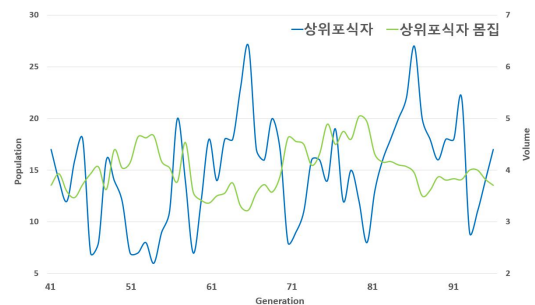


Fig. 11. Predator Population and Volume Size

포식 활동을 잘하는 개체는 소수이고 포식 활동 수에 따라 몸집 크기가 커지므로 개체군의 평균 몸집 크기는 증가하게 된다. 최상위 포식자의 경우 이 과정을 반복하게 된다.

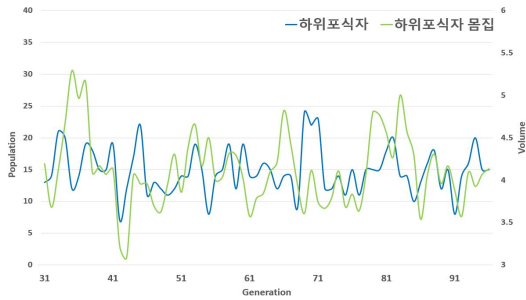


Fig. 12. Medium-Predator Population and Volume Size

중간(하위) 포식자의 경우 이런 경향이 뚜렷하게 나타나질 않는다. 우선 그래프 개형은 전반적으로 최상위 포식자와 유사하게 나타난다. 그러나 최하위 피식자를 포식하여 번식을 많이 하더라도 최상위 포식자에게 잡아 먹힌다면 개체군의 평균 몸집 크기는 줄어들지 않는다. 반대로 개체군의 수가 줄어들어서 평균적인 몸집 크기가 증가하는 추세여도 특정 세대에서는 몸집 크기가 가장 큰 개체가 포식당할 수 있게 된다. 이 경우 개체군의 평균 몸집 크기가 작게 나타나게 된다.

최하위 피식자와 중간(하위) 포식자의 관계에서는 최상위 포식자와 같은 결과가 나왔다. 새의 몸집과 부리 크기가 작아졌더니 먹이인 씨앗의 수가 늘어났다는 이전 연구 결과와 어느 정도 일치하는 것을 볼 수 있었다[29]. 최하위 피식자 개체 수가 줄어들면 중간 포식자의 평균 몸집 크기가 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

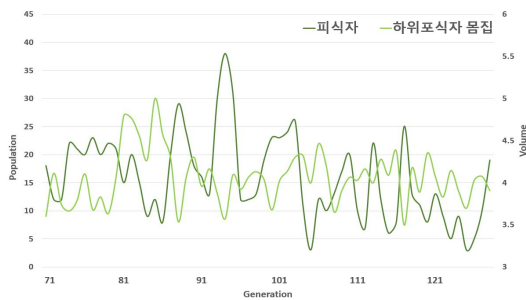


Fig. 13. Prey Population and Medium-Predator Volume Size

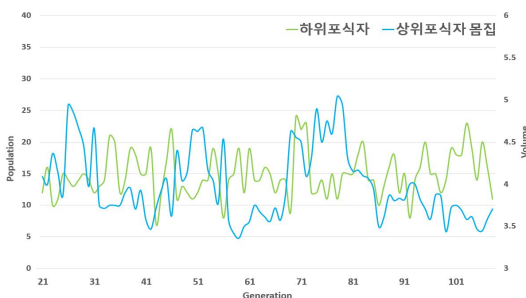


Fig. 14. Medium-Predator Population and Top-Predator Volume Size

중간 포식자 개체 수와 최상위 포식자 평균 몸집 크기의 관계에서도 비슷한 양상을 보였다. 중간 포식자 개체 수가 줄어들면 최상위 포식자의 몸집 크기가 커지고, 개체 수가 증가하면 최상위 포식자의 몸집 크기가 작아지는 모습을 보였다. 다만 중간 포식자의 경우 최상위 포식자에게 포식당하는 경우가 빈번히 발생하기 때문에 피식자와의 관계보다는 비규칙적인 모습을 보였다. 예시로 Fig.14의 71세대쯤을 보면 중간 포식자의 개체 수가 증가함에도 최상위 포식자 몸집 크기가 같이 증가할 때도 있었다.

4. Two movements of the medium predator

포식자들은 신경망 진화에 따라 이전과 다른 움직임을 보인다. 대표적으로 Fig.15:a를 보면 기존 포식자-피식자 시뮬레이션의 경우, 피식자들은 단순히 포식자들한테서 도망치는 움직임만을 가진다. 마찬가지로 포식자들은 피식자들은 추적하는 움직임만을 갖게 된다. 그러나 신경망에 동족 혹은 상위 포식자를 입력 변수로 고려하게 되면 회피하는 움직임까지 갖게 된다. Fig.15:b에서는 중간 포식자가 오른쪽 위의 피식자를 포식하려 가는 도중에 상위 포식자를 발견하는 모습이다. 이후 중간 포식자는 경로상에 있는 피식자의 포식을 포기하고 진행 방향을 틀어 상위 포식자한테서 멀어지는 움직임을 보여준다. 포식자들은 포식과 회피라는 2가지 움직임 중에서 생존에 유리한 방향으로 자율 선택하게 된다.

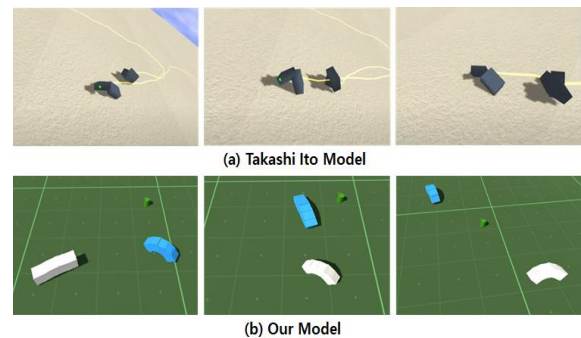


Fig. 15. Comparison of movements (pursue and evasion)

V. Conclusions

본 연구에서는 진화 알고리즘을 이용하여 3단계 포식자-피식자 시뮬레이션에서 개체들이 주변 상황에 따라 다른 움직임을 가지도록 구현하였다. 이를 통해 초기 개체군의 비율에 따른 생태계 안정화 여부를 확인해보았다. 주변 환

경에 따라 진화 알고리즘의 연산이 계속해서 변화하므로 특정 개체군의 비율이 달라질 수 있었다. 따라서 개체 수의 최대, 최소를 갖지 않고 실험하는 것이 중요하였다.

시뮬레이션 결과로 중간 포식자의 비율이 0.5 이상이고 상위 포식자 비율이 0.4 이하일 때 대부분 공존하는 모습을 보였다. 반대로 중간 포식자 비율이 0.4 이하, 상위 포식자 비율이 0.5 이상일 때 대부분 멸종하는 모습을 보여주었다. 포식자와 피식자의 비율이 무너지는 순간 한쪽 개체군의 비율이 급격하게 높아지게 되고 결국 연쇄적으로 멸종하게 되는 형태가 나타났다. 또한, 포만감 수치를 이용하여 일정 시간 동안 포식하지 못한다면 사망하게 하였더니 피식자가 부족해지면 포식자가 대거 사망하는 상황이 종종 발생하였다.

시뮬레이션을 통해 포식자-피식자 모델에서 개체들의 움직임보다는 번식 비율과 초기 개체군의 수가 안정화에 더욱 중요하게 작용한다는 점을 확인할 수 있었다. 그러나 생태계를 표현하면서 주변 상황을 고려하였지만, 개체의 움직임과 신경망을 단순화한 측면이 있다. 포식자와 피식자 모두 같은 시각 센서와 진화 알고리즘을 사용하였기 때문에 비슷한 움직임을 갖게 되었다. 이 진화 알고리즘은 개체들의 움직임에 집중되어 있는데, 후속 연구에서는 개체들의 몸집이나 기능들에도 적용해 함께 변화하는 모습을 관찰하고자 한다. 또한, 포식자와 피식자의 신경망을 다르게 적용하거나 피식자가 포식자의 포식 행위로부터 대처할 수 있는 기능을 추가하고, 포식자는 물이 사냥과 같이 서로 다른 움직임을 갖은 채 실험을 하고자 한다.

ACKNOWLEDGEMENT

This work was supported by the PaiChai University research grant in 2020.

REFERENCES

- [1] K. Sims, "Evolving virtual creatures," In Proceedings of the 21st Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, SIGGRAPH '94, page 15-22, New York, NY, USA, 1994. DOI: 10.1145/192161.192167
- [2] K. Sims, "Evolving 3d morphology and behavior by competition," *Artificial Life*, 1(4):353-372, July 1994. DOI: 10.1162/artl.1994.1.4.353
- [3] H. H. Lund, J. Hallam, and Wei-Po Lee, "Evolving robot morphology," In Proceedings of 1997 IEEE International Conference on Evolutionary Computation (ICEC '97), pages 197-202, 1997. DOI: 10.1109/ICEC.1997.592295
- [4] H. Lipson, V. Sunspirai, J. Bongard, and N. Cheney, "On the difficulty of co-optimizing morphology and control involved virtual creatures," *Artificial Life Conference Proceedings*, -(28): 226-233, 2016. DOI:10.1162/978-0-262-33936-0-ch042
- [5] F. Veenstra and K. Glette, "How different encodings affect performance and diversification when evolving the morphology and control of 2D virtual creatures," *Artificial Life Conference Proceedings*, -(32):592-601, 2020. DOI: 10.1162/isal_a_00295
- [6] M. Joachimczak and B. Wrobel, "Co-evolution of morphology and control of soft-bodied multicellular animats," In Proceedings of the 14th Annual Conference on Genetic and Evolutionary Computation, GECCO '12, page 561-568, New York, NY, USA, 2012. DOI: 10.1145/2330163.2330243
- [7] M. Joachimczak, R. Suzuki, and T. Arita, "Artificial metamorphosis: Evolutionary design of transforming, soft-bodied robots," *Artificial Life*, 22(3):271-298, 2016. DOI: 10.1162/ARTL_a_00207
- [8] Y.S. Shim and C.H. Kim, "Generating Flying Creatures using Body-Brain Co-Evolution," *Symposium on Computer Animation. The Eurographics Association*, 2003. DOI: 10.2312/SCA03/276-285
- [9] X. Tu and D. Terzopoulos, "Artificial fishes: Physics, locomotion, perception, behavior," In Proceedings of the 21st Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, SIGGRAPH '94, page 43-50, New York, USA, 1994. DOI: 10.1145/192161.192170
- [10] P. Maes, M. J. Mataric, J. A. Meyer, J. Pollack, and S. W. Wilson. "Co-evolution of Pursuit and Evasion II: Simulation Methods and Results," pages 506-515. MIT Press, 1996. DOI: 10.7551/mitpress/3118.001.0001
- [11] T. Ito, M. L. Pilat, R. Suzuki, and T. Arita, "Emergence of defensive strategies based on predator-prey co-evolution in 3D physical simulation," In The 6th International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems, and The 13th International Symposium on Advanced Intelligence Systems, pages 890-895, 2012. DOI: 10.1109/SCIS-ISIS.2012.6505258
- [12] T. Ito, M. L. Pilat, R. Suzuki, and T. Arita, "Alife approach for body-behavior predator-prey coevolution: Body first or behavior first?," *Artif. Life Robot.*, 18(1-2):36-40, December 2013. DOI: 10.1007/s10015-013-0096-y
- [13] N. Ouannes, N. Djedi, Y. Duthen, and H. Luga, "Toward the construction of a virtual ecosystem by evolving virtual creature's behaviours," In 2012 International Conference on Multimedia Computing and Systems, pages 350-355, 2012. DOI: 10.1109/ICMCS.2012.6320173
- [14] N. Ouannes, N. Djedi, Y. Duthen, and H. Luga, "Predator-prey coevolution in a physically simulated environment," In 2015 3rd International Conference on Control, Engineering Information Technology (CEIT), pages 1-6, 2015. DOI: 10.1109/CEIT.20

- 15.7233149
- [15] N. Chaumont and C. Adami, "Evolution of sustained foraging in three-dimensional environments with physics," *Genetic Programming and Evolvable Machines*, 17(4):359-390, December 2016. DOI: 10.1007/s10710-016-9270-z
- [16] A. J. Lotka, "Undamped oscillations derived from the law of mass action," *Journal of the American Chemical Society*, 42(8):1595-1599, 1920. DOI: 10.1021/ja01453a010
- [17] M. H. Cortez and Joshua S. Weitz, "Coevolution can reverse predator-prey cycles," *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(20):7486-7491, 2014. DOI: 10.1073/pnas.1317693111
- [18] G. F. FUSSMANN, M. LOREAU, and P. A. ABRAMS, "Ecoevolutionary dynamics of communities and ecosystems," *Functional Ecology*, 21(3):465-477, 2007. DOI: 10.1111/j.1365-2435.2007.01275.x
- [19] F. Pelletier, D. Garant, and A.P. Hendry, "Eco-evolutionary dynamics," *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364(1523):1483-1489, 2009. DOI: 10.1098/rstb.2009.0027
- [20] T. Yoshida, L. Jones, S. Ellner, G. Fussmann, and N. Hairston, "Rapid evolution drives ecological dynamics in a predator-prey system," *Nature*, 424:303-6, 2003. DOI: 10.1038/nature01767
- [21] H. Koch, J. Fricke, M. Valiadi, and L. Becks, "Why rapid, adaptive evolution matters for community dynamics," *Frontiers in Ecology and Evolution*, 2:17, 2014. DOI: 10.3389/fevo.2014.00017
- [22] T. Ito, M. L. Pilat, R. Suzuki, and T. Arita, "Population and evolutionary dynamics based on predator-prey relationships in a 3D physical simulation," *Artif. Life*, 22(2):226-240, 2016. DOI: 10.1162/ARTL_a_00201
- [23] A. Mougi and Y. Iwasa, "Evolution towards oscillation or stability in a predator-prey system," *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 277(1697):3163-3171, 2010. DOI: 10.1098/rspb.2010.0691
- [24] J. Maynard Smith and M. Slatkin, "The stability of predator-prey systems," *Ecology*, 54(2):384-391, 1973. DOI: 10.2307/1934346
- [25] Y. Seitbekova and T. Bakibayev, "Predator-prey interaction multi-agent modelling," In *2018 IEEE 12th International Conference on Application of Information and Communication Technologies (AICT)*, pages 1-5, 2018. DOI: 10.1109/ICAICT.2018.8747087
- [26] J.-H. Cho and S.-H. Lee, "Exploring the stability of predator-prey ecosystem in response to initial population density", vol. 22, no. 3, pp. 1-6, Sep. 2013. DOI: 10.9709/JKSS.2013.22.3.001
- [27] O. J. Schmitz, P. A. Hamback, and A. P. Beckerman, "Trophic cascades in terrestrial systems: A review of the effects of carnivore removals on plants," *The American Naturalist*, 155(2): 141-153, 2000. DOI: 10.1086/303311
- [28] N. Cheney, R. MacCurdy, J. Clune, and H. Lipson, "Unshackling evolution: Evolving soft robots with multiple materials and a powerful generative encoding," In *Proceedings of the 15th Annual Conference on Genetic and Evolutionary Computation, GECCO '13*, page 167-174, New York, USA, 2013. DOI: 10.1145/2661735.2661737
- [29] T. W. Schoener, "The newest synthesis: Understanding the interplay of evolutionary and ecological dynamics," *Science*, 331(6016):426-429, 2011. DOI: 10.1126/science.1193954

Authors



Taewoo Lee received the B.S. in Mechanical Engineering from Kyonggi University in 2017 and M.S. in Visual Information Processing from Korea University, Korea. In 2021.

His research interests include bio-inspired adaptive robotics, evolutionary robotics, computer graphics.



Sookyun Kim received Ph.D. in Computer Science & Engineering Department of Korea University, Seoul, Korea, in 2006. He joined the Telecommunication R&D center at Samsung Electronics Co., Ltd., from 2006

and 2008. and He worked as a professor at the Department of Game Engineering at Paichai University until 2020. He is now a professor at the Department of Computer Engineering at Jeju National University, Korea. His research interests include multimedia, pattern recognition, image processing, mobile graphics, geometric modeling, and interactive computer graphics. He is a member of ACM, IEEE, IEEE CS, KACE, KMMS, KKITS, and KIIT.



Yoonsik Shim received the B.S. in Mechanical Engineering and M.S. in Computer Science from Korea University, Korea. He received the Ph.D. degree in Informatics from University of Sussex, UK.

In 2018, he worked as a Research Professor in Institute of Computer, Information and Communication, Korea University. Currently he is an assistant professor at the Game Engineering Department in Pai Chai University, Daejeon, Korea. His research interests are focused on bio-inspired adaptive robotics, computational neuroscience, chaotic neurodynamics, self-organisation, and evolutionary robotics.