

NIPD게임의 진화적 전략학습에서 플레이어 수와 협동의 관계

Relationship of Cooperation and Number of Players in Evolutionary Strategy Learning in NIPD Game

서 연규, 조 성배
연세대학교 컴퓨터과학과
서울시 서대문구 신촌동 134

Yeon-Gyu Seo and Sung-Bae Cho
Department of Computer Science, Yonsei University
134 Shinchon-dong, Sudaemun-ku, Seoul, Korea

요약

진화이론은 생명체들간의 투쟁과 적자생존의 원칙에 근거를 두고 있다. 그 중 협동으로의 진화는 공생이나 기생관계에 있는 생물들에서 발견되어 사회학, 생물학, 경제학 등의 분야에서 지속적인 관심의 대상이 되어 왔다. 특히 생명체들간에 존재하는 끊임없는 경쟁과 협동의 관계를 시뮬레이션하는 죄수의 딜레마 게임은 지금까지 많은 연구가 진행 되어왔다. 죄수의 딜레마 게임이 시작된 근거는 협동으로의 진화에 관한 연구에서 시작되었다고 볼 수 있다. 대부분의 연구가 2명이 하는 죄수의 딜레마 반복게임인 2IPD에 집중되어 있는데 2IPD는 실제 세계에 적용시키는데 한계가 있기 때문에 보다 실제세계에 가까운 형태를 모델링하는 N명 죄수의 딜레마 반복 게임(NIPD)에 관한 연구가 진행되고 있다. 이 논문에서는 진화 알고리즘을 이용하여 NIPD게임에서 게임자의 수와 협동으로의 진화의 관계, 즉 죄수의 수가 증가함에 따라 협동의 정도는 어떻게 나타나는 가에 대해 고찰한다. 여러 차례의 반복 시뮬레이션 결과 게임자의 수가 적을 때는 대부분이 협동으로 진화하나 게임자의 수가 증가할수록 협동으로의 진화가 어렵다는 사실을 확인할 수 있었다.

1. 서론

끊임없는 혼란과 자기 중심적인 사회속에서도 협동은 곳곳에 존재하여 그 나름대로의 의미를 지니고 있는데 여기에는 반드시 자기희생적이라고 단정지을 수는 없는 공익적 가치가 존재한다. 수 십년 전부터 협동을 다루는 게임으로서 죄수의 딜레마 게임이 사용되어왔다. 죄수의 딜레마 게임은 경제, 사회현상, 그리고 생물학 분야에서 상호간의 협동을 요하는 문제에서 사용되는 게임으로서 '비제로합 게임' 혹은 '비협동적인 게임' 이라 불린다[1]. '비제로합 게임'이란 자신의 이익이 반드시 상대방의 손해에 기인하는 것은 아님을 뜻하며 비협동적 게임이란 서로 사전에 상대방을 만나서 협의할 수 없도록 되어 있음을 의미한다.

죄수의 딜레마 게임에서 게임자는 두가지의 행동(협동, 배반)중 하나를 반드시 선택해야한다. 이에 관한 이득표(Payoff Matrix)는 표 1과 같다. 배반한 경우는 T,

협동한 경우는 S, 둘 다 배반하면 P, 그리고 둘 다 협동하면 R의 이득을 받는데, 이들간의 관계는 $T > R > P > S$, $R > 2(T + S)$ 와 같다.

	협동	배반
협동	R	S
배반	T	P

표 1. 2IPD의 이득표 $T > R > P > S$, $R > 2(T + S)$.

게임은 반복해서 수행되며 상대방이 무엇을 선택할지 알 수 없고 다만 상대방의 이전 행동들만을 알 수 있을 뿐이다. 이 게임에서 중요한 조건은 모두 협동하면 모두 배반인 것에 비해 이득이 높다는 것이다. 즉, 각 게임자는 자기 이익에 관심이 있어서 상대방 보다 높은 점수를 받기 위해서는 서로 상대방에 대하여 배반하는 것

이 합리적인 전략이 된다. 마찬가지로 상대방도 같은 방식으로 배반이 최선의 선택이 된다. 그러므로 게임자들은 계속적인 배반을 하게 되고 결국 집단의 모든 개체들이 배반을 하게 되어 모두 P의 이득을 받게 될 것이다. 이것은 모두 협동했을 때 받는 점수와 비교하면 매우 낮은 이득이 된다. 따라서 반드시 배반이 합리적인 선택이라고 할 수는 없다. 이러한 점이 게임상에서 죄수가 직면하는 딜레마로 볼 수 있다.

죄수 딜레마 게임의 고전적인 연구들 대부분이 일반적인 진화 알고리즘을 사용하지만 이 연구에서는 공진화 집단을 이용하고자 한다. 이는 매 세대마다 같은 환경에서 평가됨으로써 발생하는 탐색공간의 한계를 극복하고 다양한 환경에서 적용하는 개체들의 실험을 통해 더욱 일반적인 결과를 제공해 주기 때문이다. 이에 관한 실험결과를 제시하는 다른 연구는 있으나[7], 공진화 집단에서의 게임자 수와 협동으로의 진화간의 관계에 대한 결과만을 제시하였을 뿐 결과에 대한 분석은 미흡하였다.

이 논문에서는 실험을 통해 NIPD 게임에서의 게임자의 수와 협동진화와의 관계에 대해 조사하고 그 결과를 분석하고자 한다. 또한 협동으로 진화하는 상황을 알아봄으로써 협동이 일어날 수 있는 상황에 대하여 연구하고자 한다.

2절에서 NIPD에 대해서 언급하고 3절에서는 죄수 딜레마 게임의 유전자형 표현에 대해 다룬다. 또한 4절에서는 실험한 결과를 보이고 마지막 절에서는 실험한 결과를 통해 결론을 제시하고자 한다.

2. NIPD 게임

2IPD에 관한 연구는 지난 30여년 동안 광범위하게 이루어져 왔다. 그러나 많은 경우에 2IPD로는 모델링할 수 없는 실세계의 문제들이 많으므로 2IPD보다 더 실제적이고 일반적인 차원의 문제를 다루는 NIPD(N=person Iterated Prisoner's Dilemma)에 관한 연구의 필요성이 대두되었다[5]. 이는 개체들 각각에 대해서는 잘 적용하다가도 다른 그룹의 개체들에 대해서는 잘 적용하지 못하는 전략들을 만드는 2IPD와는 질적으로 다르다[5].

NIPD는 죄수의 딜레마 게임의 기본적인 속성을 유지하면서 다음과 같은 속성을 갖는다.

- 각 게임자는 협동(C)이나 배반(D)중 하나를 택할 수 있다.
- 'D'가 각 상대방의 'C'에 대해서 우세하다. 즉 협동한 수에 관계없이 'D'가 더 나은 점수를 받게 된다.
- 모두 'C'를 선택한 것이 모두 'D'를 선택한 것보다 더 나은 점수를 얻는다.

이러한 속성에따라 표 2는 NIPD의 이득표를 보여준다.

이때 $C_N = 2N - 2$, $D_N = 2N + 1$ 일 때 협동한 개체수를 N_c 로 하면 이득의 평균은

$$a = 1 + \frac{Nc}{N}(2n - 3) \quad (1)$$

와 같이 구할 수 있다. 여기서 Nc/N 은 협동의 정도를 나타내게 된다. 이러한 간단한 수식을 이용하면 어느 정도 협동으로 진화하고 있는가를 알 수 있다.

협동의 수	0	1	...	N
협동	C_0	C_1	...	C_N
배반	D_0	D_1	...	D_N

표 2. NIPD에서의 이득표 예. $C_N > 2(D_N + C_{N-1}), D_i > C_i$.

3. 전략의 유전자형 표현

전략의 유전자형 표현을 위해 NIPD에서는 참조표(lookup Table)를 이용한다. 죄수의 딜레마 게임에서 각 게임자가 다음 행동을 결정하는데 참조할 수 있는 정보는 바로 이전 단계의 상대방과 자신의 행동들이기 때문에 자신의 전략을 결정하는데 중요한 역할을 한다. 여기서는 Axelrod[2]와 Yao[7]의 방법에 대해 알아보고 결과를 분석하고자 한다.

3.1 Axelrod의 방법

Axelrod[2]는 전략을 표현함에 있어 상대방의 이전 행동들에 대한 히스토리를 모두 저장하는 방법을 사용한다.

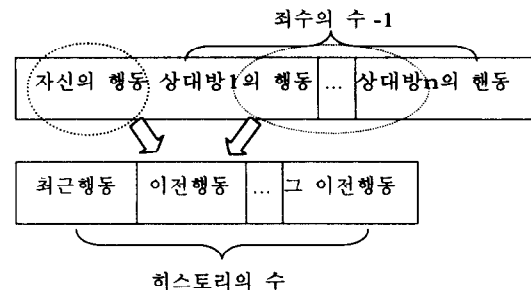


그림 1. Axelrod의 유전자형 표현

상대방의 행위나 자신의 이전 행위로부터 정보를 얻어 내므로 이들의 모든 가능한 조합이 필요하며 또한 게임의 초기화를 위해 상대방의 행동과 자신의 행동에 대한 디폴트 설정값이 필요하다. 따라서 전체 유전자형의 길이는 다음과 같다.

$$2^{2 \times \text{죄수의 수}} + 2 \times \text{죄수의 수}$$

그러나 이러한 전략표현 방법의 단점은 죄수의 수가 증가함에 따라 적용하기가 힘들어 진다는 것과 수가 증가함으로써 불필요한 정보를 포함하고 있어 전체적으로 진화의 효율성을 저하시키는 요인으로 작용할 수 있다는 점이다

3.2 Yao의 방법

Yao는 Axelrod의 표현 방법에서 각 상대방의 히스토리에 대해 협동의 수와 배반의 수만을 유지함으로써 필요한 비트 수를 줄였다[7]. 이때 상대방의 협동한 수는 자신을 제외한 수가 되는데 협동의 수나 배반의 수를 표현하기 위해서는 $\log_2(\text{최수의 수} - 1)$ 의 비트수가 필요하다. 여기서 1은 자신의 제외를 의미한다.

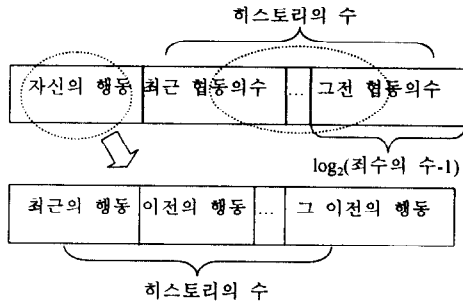


그림 2. Yao의 유전자형의 표현

만약 예를 들어 최수의 수가 4이고, 히스토리의 수가 3일 때 유전자형이 011 01 10 11 이라고 하면 처음 3비트(011)는 자신의 행위를 나타내는 히스토리가 되고 나머지 각 2비트들은 이전 게임에서 협동한 수 내지는 배반한 수를 나타낸다. 여기서 자신의 행동은 제외되고 최근의 행위들은 상위비트(표에서는 좌측)에 위치한다. 이때 참조표를 위한 비트의 수는

$$h = (1 + \log_2(\text{최수의 수})) \times \text{히스토리의 수}$$

가 되고 이를 유전자형으로 나타내기 위해서 필요한 전체 비트의 수는 $2^h + h$ 가 된다.

4. 실험결과 및 고찰

우선 Axelrod의 전략표현방법과 Yao의 표현방법에 따른 협동으로의 진화를 살펴보고자 한다. 그리고 나서 최수의 수와 협동으로의 진화와의 관계에 대해 알아본다. 실험을 위해 집단 크기를 100으로 하고 돌연변이율을 0.001, 교차율을 0.6으로 하였다. 또한 2점 교차, 순위선택을 사용하고 엘리트 보존전략을 병행하여 실험하였다.

4.1 Axelrod방법에 의한 결과

Axelrod의 실험에서는 최수의 수를 2, 3, 4, 5, 6으로 하고 집단이 협동으로 진화하는가를 살펴보았다.

1) 최수의 수가 2일 때

게임자가 2일 때는 그림 3과 같이 빠르게 협동으로 진화하여 안정되는 것을 볼 수 있다. 여기에서 보면 약 15 내지 20세대 사이에서 협동으로 진화하는 것을 볼

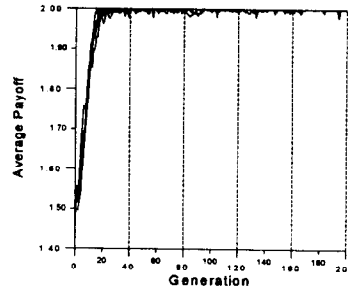


그림 3. 최수의 수 = 2, 히스토리의 수 = 2.

수 있다.

2) 최수의 수가 4와 6 일 때

그림 4는 게임자가 4명으로 늘어나도 계속적으로 협동으로 진화하여 안정되는 것을 보여준다. 게임자 수가

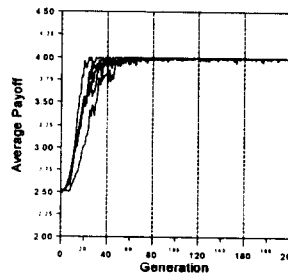


그림 4. 최수의 수 = 4
히스토리의 수 = 2.

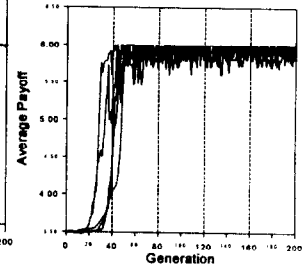


그림 5. 최수의 수 = 6
히스토리의 수 = 2.

4일 때 평균 적합도가 4로 안정되며 그림 5에서는 게임자가 6명으로 늘어나자 배반과 협동이 반반인 채로 안정되어 버리는, 즉 협동이 약 50%정도 나타나는 집단으로 진화된 것을 볼 수 있다. 그리고 게임자의 수가 늘어남에 따라 안정되는데 시간의 소요가 증가했음을 알 수 있다. 그림 3, 4, 5처럼 Axelrod의 방법에 따라 실험한 결과 평균 적합도는 게임자의 수와 비례하는 결과를 보여주고 있다. 이것을 앞서 2장 (1)식의 협동에 관한 수식에 대입해보면 게임자 수가 커질수록 협동의 비율이 감소된다는 것을 알 수 있다.

4.2 Yao의 방법에 의한 결과

최수의 수를 2, 4, 8, 16으로 하여 실험하였다. 처음에는 배반하는 개체들로 인해 전체의 평균 이득이 급격하게 떨어지지만 점차 협동으로 진화하게 됨을 볼 수 있었다.

1) 최수의 수가 2와 4일 때

그림 6과 7을 보면 20세대 이후 빠르게 협동으로 안정되는 것을 보여주고 있다. 그림 7을 보면 게임자의 수가 4인 경우 게임자의 수가 2인 경우에 비해 불안정한 상태를 보이며 안정되는데 더 많은 시간이 소요됨을 알 수 있다.

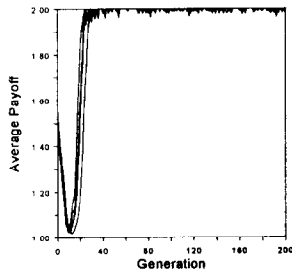


그림 6. 죄수의 수 = 2
히스토리의 수 = 2.

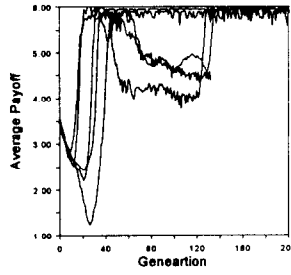


그림 7. 죄수의 수 = 4
히스토리의 수 = 2.

2) 죄수의 수가 8과 16일 때

그림 8에서 게임자의 수가 8명으로 늘어나자 불안정한 상태가 계속 나타나는 것을 볼 수 있다. 그림 9에서

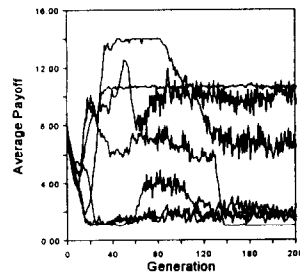


그림 8. 죄수의 수 = 8
히스토리의 수 = 2.

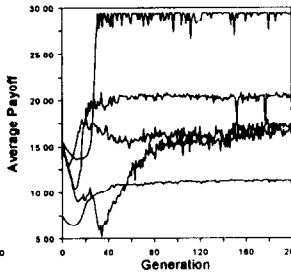


그림 9. 죄수의 수 = 16
히스토리의 수 = 2.

는 배반과 협동이 반씩 공존하는 형태로 안정되고 있음을 알 수 있다.

4.3 게임자 수와 협동의 관계

위의 실험 결과를 보면 게임자의 수가 적을 때는 협동으로 진화하여 안정되는 경우가 대부분이었으며 게임자의 수가 증가함에 따라 협동하는 수가 점차 줄어들면서 불안정한 상태로 되기도 하며 또한 안정되는데 걸리는 시간 소요가 증가됨을 알 수 있다. 여기서 게임자가 유지하는 히스토리에 따라서도 협동의 진화가 영향을 받게 된다. 진화 집단에서 개체들이 협동으로 진화하는데는 배반적인 전략종을 물리칠 수 있는 조건적 협력 전략이 일정 수가 유지된 후에 협동으로 나타나는 경우

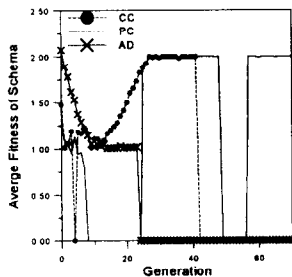


그림 10. 2IPD에서
전략 적합도.

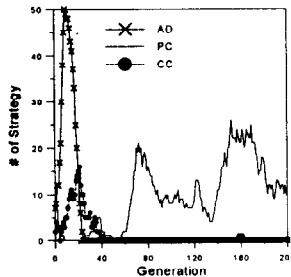


그림 11. 전략의 수적 증감.

가 많다. 그림 10은 2IPD에서 순수협력종(PD)과 조건적 협력종(CC) 그리고 배반종(AD)의 평균적합도를 보여주

고 있고 그림 11은 그에 따른 전략들의 수적 증감을 보여준다. 처음에는 순수협력종이 적었으나 조건적 협력종으로 인해 배반적인 전략종이 죽자 수적 증가를 보이고 있다. 조건적 협력종들이 일정 수만큼 유지되는 동안에는 배반하는 개체는 사라지게 되지만 순수 협력종과 조건적 협력종 사이에 전략 우열의 판가름이 어려워 집단은 그림 11과 같이 순수 협력종만 살아남을 수도 있는데 이러한 전략들은 배반을 나타내는 개체들에 의해 쉽게 파괴될 수 있기 때문에 만약 다음에 돌연변이나 교차에 의해 배반을 나타내는 개체가 나타나게 되면 이러한 순수 협력종들은 쉽게 죽게 될 것이며 집단은 다시 진동하게 된다.

5. 결론

죄수 딜레마 게임에서 집단의 협동으로의 진화에 미치는 요인은 많다. 게임자의 수 이외에도 이득의 변화, 유전자형의 표현방법, 그리고 상호작용 확률 등[3] 여러 가지가 있을 수 있지만 게임자의 수가 집단의 진화에 미치는 영향은 상당하다.

실험을 통해 확인한 결과는 게임자의 수가 작았을 때는 협동하던 개체들이 게임자의 수가 증가함에 따라 협동이 계속하여 줄어드는 것을 볼 수 있었다. 이러한 결과는 개체들간의 상호작용에 의한 결과로 볼 수 있다. 개체들간의 상호작용이 어떠한 형태로 일어나는가 하는 것은 이 논문의 범위를 넘는 것이다. 그러나 게임자가 적을수록 협동이 잘 나타날 수 있는 이유는 배반한 상대방에 대해 대값음이 쉽게 상대방에게 영향을 줄 수 있기 때문이다. 이를 확장해보면 게임자의 수가 증가하면 배반한 상대방에 대한 대값음이 배반하지 않은 다른 게임자들에게 영향을 미치게 되므로 협동이 나타나기 어렵게 되는 것으로 볼 수 있다.

참고문헌

- [1] Axelrod, R., *The Evolution of Cooperation*, Basic Books, New York, 1984.
- [2] Axelrod, R., "The Evolution of Strategies in the Iterated Prisoners Dilemma," *Genetic Algorithms and Simulated Annealing*, pp. 32-41, 1987.
- [3] Axelrod, R. and Dion, "The Further Evolution of Cooperation," *Science*, 242:1385-1389, 1998.
- [4] Axelrod, R. and Hamilton, W.D., "The Evolution of Cooperation," *Science*, 211:1390-1396, 1981.
- [5] Glance, N.S., and Huberman, B.A., "The Dynamics of Social Dilemmas," *Scientific American*, pp. 58-63, 1994.
- [6] Smith, J.M., *Evolution and Theory of Games*, Cambridge University Press, 1982.
- [7] Yao, X. and Darwen, P., "The Experimental Study of N-person Iterated Prisoner's Dilemma," *Informatica*, 18:435-450, 1994.