

# 진화게임이론

## 게임이론과 진화의 만남

허준석→이동한→조남운

`mailto:experiment.namun+2016f@gmail.com`

2016년 11월 9일

# 목차

- 1 다윈주의와 진화
- 2 진화게임이론
- 3 협력으로 가는 길

# Image of Evolution

- The survival of fittest?
- Darwin이 했던 말은 아니다! 다윈은 사실 진화라는 말도 쓰기를 꺼려 함.
- 영국의 계관시인 테니슨(A. Tennyson): 자연은 “피칠갑을 한 이빨과 발톱을 지니고 있다.”
- 허버트 스펜서가 적자생존이라는 말을 만들어 냄



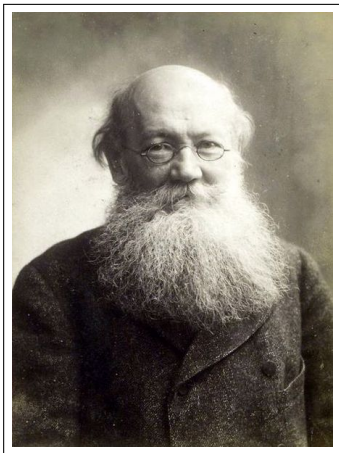
# Social Darwinism

- 진화는 적자생존의 역사
- 이에 따라서 사회는 진보한다.
- 따라서 이에 대한 개입은 역사의 진보를 막는 것.
- Hitler 등 나치와 파시즘에 기반을 제공
- 현재까지 암묵적인 영향을 끼치고 있음



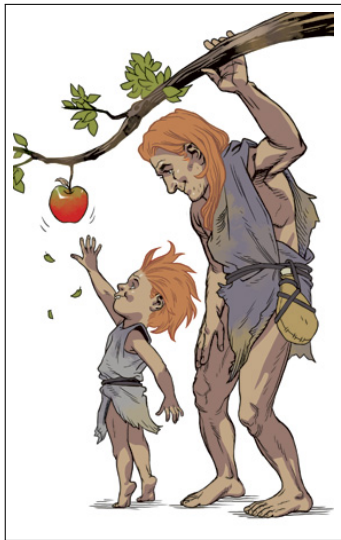
# Social Darwinism

- 무정부주의자 표트르 크로포트킨의 [상호부조론]
- “Sociability is as much a law of nature as mutual struggle.”
- “we at once see that those animals which acquire habits of mutual aid are undoubtedly the fittest. ”



# Nature's Best Achievement

- 자연이 이룬 가장 놀라운 성과는 무엇일까?
- 생명, 생명의 군집
- 이것은 모두 적자생존의 결과인가? 아니면 또 다른 어떤 결과인가?
- 투쟁이 생명의 중요한 현상인 것은 분명하지만 뭔가 잊고 있는 것은 없을까?



# Human

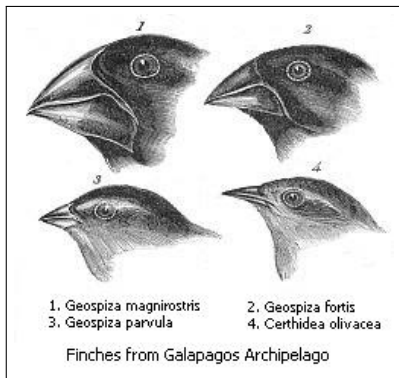
- 인간 개체를 생각해보자.
- 인간이라는 하나의 생명 개체는 여러 기관, 세포, 유전자 사이의 절묘한 협업에 의존
- 만일 간 세포가 자신의 이익만을 이기적으로 추구한다면?
- 결국 인간 자신이 적자생존에 반하는 존재



# Three Principles of Evolution I: Selection

- Selection

점진적이며 비무작위적인 과정으로, 그 성향(유전자)을 지니고 있는 존재들의 차별적인 재생산능력의 결과로서 이러한 생물학적 성향을 가진 개체가 집단에서 더 많아지거나 흔해지게 된다.

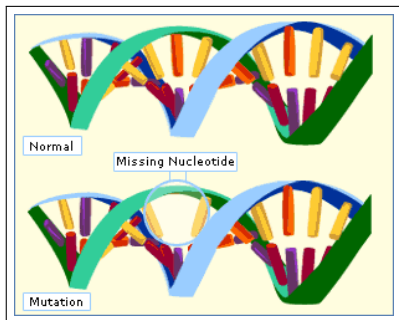




# Three Principles of Evolution II: Mutation

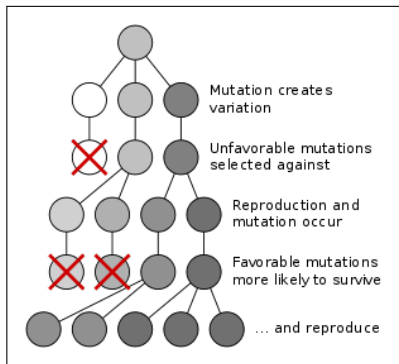
- Mutation

유전학적으로, 유기체, 바이러스 혹은  
염색체의 유전 요소가 지닌 계통의 뉴  
클레오타이드 계열의 (임의적) 변화



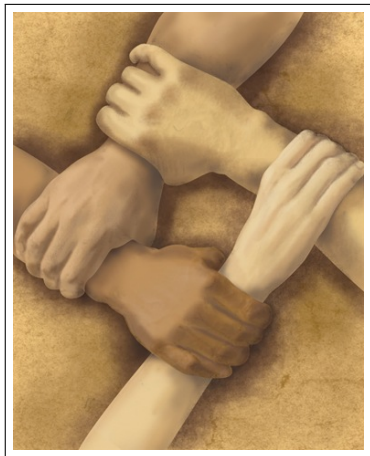
# Three Principles of Evolution III: 종합

- (자연) 선택은 더 적합한 쪽으로의 움직임을 만들고
- 변이는 일정한 상태의 안정성에 변화를 만든다.



# The Third Principle of Evolution

- 협력은 선별의 결과이고, 협력에 반하는 변이에 안정성을 지녀야 한다.
- 선별이 더 많은 자손을 남기는 것이라고 할 때
- 어떤 상황에서 왜 (자신의 이익에 반할 때에도) 협력하는가?
- 게임이론이 도움을 준다!



# 최재천 선생 강의 동영상

- 다윈에 대한 개괄적인 이해를 위해서  
LINK

# Evolution Meets Game Theory I

- 지금까지 표준적인 게임이론에서 경지자들이 균형전략에 따라 행동하기 위한 전제는?
- 진화적 게임이론에서는 어떠한 합리성도 부여하지 않은 채 논의가 전개됨
- “프로그램화 되어 있는” 전략에 따라 경기자들이 행동
- 동일한 전략을 갖고 태어난 경기자들 사이에서도 어떤 전략으로 프로그램되어 있는 경기자를 만나는가에 따라 다른 보수를 얻게 됨
- 전략이 확산되는 과정은 경기자들이 얻게 될 보수의 크기에 의존
- 구체적인 과정은 i 유전적 전수과정 ii 문화적 전수과정

# Evolution Meets Game Theory II

- 게임이론은 원래 합리적 행위자의 이익추구에 동원되는 사고법
- 이것이 어떻게 맹목의 과정인 진화와 어울리게 되었을까?
- 결국 선별이란 주어진 집단 (population)에서 어떤 개체가 더 나은 결과를 얻는지의 문제



# Elements of Evolutionary Game Theory

- 플레이어의 합리적 판단은 제거 혹은 제한
- 게임은 집단에 기반하여 진행. 게임의 결과는 이 집단의 구성으로 반영된다.
- 이러한 과정의 무한 반복은 어떤 결과를 낳을까?



- $n$  명으로 구성된 인구집단이 있다고 하자.  
(일단  $n$  은 필요한 만큼 크다고 가정)
- 유형, 전략은 두 개만 있다고 가정
- 플레이어들은 일정한 시간별로 함께 게임을 벌인다.  
예를 들어 5분 간격으로 한번씩 짝을 지워 게임을 한다.
- 일정한 횟수의 상호작용이 있고 난 후 인구 집단에 속한 다른 플레이어들 혹은 다른 유형의 플레이어들의 보수를 관찰
  - ① 만일 상대의 보수가 나보다 크다면, 그의 전략을 복제!
  - ② 만일 상대의 보수가 나보다 작다면, 현재 전략을 고수!



# Payoff

$$\begin{array}{cc} & \begin{matrix} A & B \end{matrix} \\ \begin{matrix} A \\ B \end{matrix} & \left( \begin{array}{cc} a & b \\ c & d \end{array} \right) \end{array}$$

- 선수1과 선수2가 만난다.
- 만일 선수1의 유형이 A이고 선수2가 B라면?
- 둘의 게임은 대칭적이기 때문에
- 보수행렬은 아래와 같이 쓸 수 있다!

# Replicator Dynamics

$$\underbrace{\dot{x}_i}_{1)} = x_i \underbrace{(\pi_i - \bar{\pi})}_{2)}$$

- ①  $i$  라는 특정한 전략이 얼마나 변화하는지를 나타낸다.
- ②  $i$  라는 전략이 누리는 보수가 평균에 비해서 얼마나 큰지를 나타낸다.

진화의 과정을 나타내는 방정식.  $i$  라는 전략/유형이 평균보다 큰 보수를 누릴 수록, 그들의 숫자가 많을수록 그 증가폭도 커지게 된다.

# How to Get Payoff I

- 두 유형 밖에 없으므로  $A$  유형의 비율을  $x$  라고 하면  $B$  유형의 비율은  $1 - x$
- 그리고 두 유형이 한 번의 게임을 통해서 얻을 수 있는 평균 보수는

$$\pi_A = ax + b(1 - x)$$

$$\pi_B = cx + d(1 - x)$$

- 전체의 평균보수  $\pi$ 는 어떻게 구할까?

$$x \pi_A + (1 - x) \pi_B$$

# How to Get Payoff II

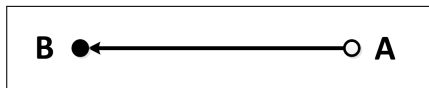
- 따라서,

$$\dot{x} = x(1-x) \underbrace{[(a-b-c+d)x + b-d]}_{(*)}$$

- 만일  $0 < x < 1$  이라면,  $x(1-x)$ 는 양수이므로, 이 게임에서 특정한 유형이 증감 여부는  $(*)$ 가 결정!
- $(*)$ 의 움직임에 따라서 게임을 몇 가지로 구분할 수 있다. 일단

$$x^* = \frac{d-b}{a-b-c+d}$$

# Dominance



- 앞서 배웠던 우월전략을 떠올려보자.

- 즉,  $a < c$  그리고  $b < d$  (B가 우월전략)  $\rightarrow$

$$\{(a - b - c + d)x + b - d\} < 0 \rightarrow \dot{x} < 0 \rightarrow A \downarrow$$

- 그렇다면,  $x = 1$ 과  $x = 0$  중에 '안정적'인 것은?

	A(C)	B(D)
A(C)	3, 3	1, 4
B(D)	4, 1	2, 2

$$\begin{matrix} & A & B \\ \begin{matrix} A \\ B \end{matrix} & \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} \end{matrix}$$

# Bistability

- 만일  $a > c$  그리고  $d > b$  라면... 앞서 배운 어떤 게임과 비슷한가??

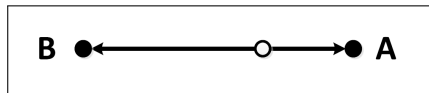
- MSNE?

$$1 \cdot x + 0 \cdot (1 - x) = 0 \cdot x + 2 \cdot (1 - x)$$

$$\rightarrow x = \frac{2}{3}$$

- $\{(a - b - c + d)x + b - d\} > 0$  (즉,  $\dot{x} > 0$ ) 가 되려면,  $x > \frac{2}{3}$
- $x = 1$  과  $x = 0$  중에 '안정적' 인 것은?
- $x^*$  의 역할은?
- 앞서 배웠던 내시 균형과는 어떻게

다른가?



	A(L)	B(R)
A(L)	1, 1	0, 0
B(R)	0, 0	2, 2

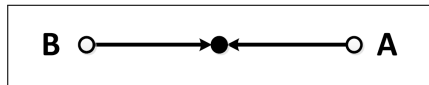
# Co-existence

- 만일  $a < c$  그리고  $d < b$  라면?
- 앞서 배운 어떤 게임과 비슷한가?

- MSNE?

$$\frac{1}{2} \cdot x + 0 \cdot (1 - x) = 1 \cdot x - \frac{1}{2} \cdot (1 - x)$$

$$\rightarrow x = \frac{1}{2}$$



- $\{(a - b - c + d)x + b - d\} > 0$  (즉,  $\dot{x} > 0$ ) 가 되려면,  $x < \frac{1}{2}$
- $\dot{x} > 0$  if  $x < \frac{1}{2}$ ,  $\dot{x} < 0$  if  $x > \frac{1}{2}$
- $x = 1$ 과  $x = 0$  중에 '안정적' 인 것은?
- $x^*$  의 역할은?

	A(H)	B(D)
A(H)	$-\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}$	1, 0
B(D)	0, 1	$\frac{1}{2}, \frac{1}{2}$

# Neutrality

- 만일  $a = c$  그리고  $d = b$  라면?
- 앞서 배운 어떤 게임과 비슷한가?
- $x = 1$  과  $x = 0$  중에 '안정적' 인 것은?
- $x^*$  의 역할은?
- 앞서 배웠던 내시 균형과는 어떻게 다른가?



	A	B
A	1, 1	3, 1
B	1, 3	3, 3



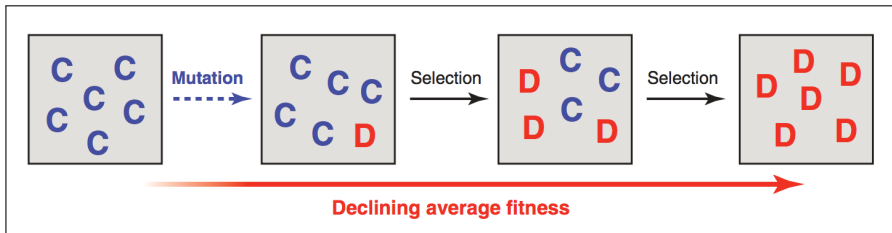
# What Stability?

- 우리는 암묵적으로 “안정성” 이라는 개념을 썼다.
- 이 개념은 앞서 배운 진화의 두 개념과 연결해서 생각해보자.
- 선택은 어느 쪽으로 나아갈지를 결정한다.
- 변이는 그 나아감이 멈추었을 때 그 멈춤이 지속될 것인지를 결정
- Evolutionarily stable strategy  
진화적으로 안정적인 전략



# 그러나 진화적인 관점만으로는!

- 죄수의 딜레마는 해결할 수 없다!  
(대단히 표준적인 가정 아래 있다면...)

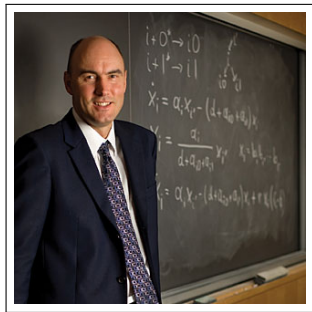


# Solving PD Game

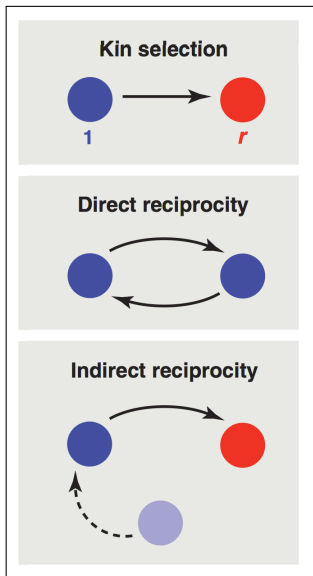
- 대표적으로 쓰이는 보수행렬
- 두 명이 대칭적이므로 한 명의 보수만 쓰자.
- $b$ : 이득 (benefit),  $c$ : 비용 (cost)
- 딜레마가 되려면?  $b > c$

$$\begin{array}{cc} & \begin{array}{cc} C & D \end{array} \\ \begin{array}{c} C \\ D \end{array} & \left( \begin{array}{cc} b - c & -c \\ b & 0 \end{array} \right) \end{array}$$

- 협력의 진화를 터준 5가지 경로 혹은 변형  
(물론, 유일하거나 절대적인 것은 아니야!)
- 게임이론을 통한 통일적 접근
- 협력에 관한 최신의 (쉽고?) 수학적  
지도의 완성

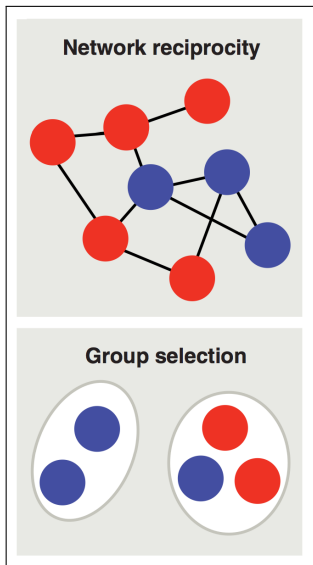


# 한 눈에 보는 5가지 길



- “네 이익이 나의 이익과 같다면” (Kin Selection)
- “네가 나를 돕는다면” (Direct Reciprocity)
- “그이가 저이를 도왔기에” (Indirect Reciprocity)

## 한 눈에 보는 5가지 길 (2)

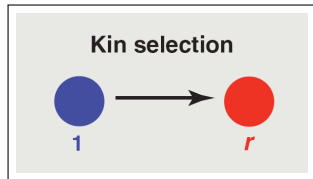


- “그들이 나와 같다면” (Network Reciprocity)
- “우리가 그들을 물리칠 수 있다면” (Group Selection)

		Payoff matrix		Cooperation is...			
		<i>C</i>	<i>D</i>	ESS	RD	AD	
Kin selection	<i>C</i>	$(b-c)(1+r)$	$br-c$	$\frac{b}{c} > \frac{1}{r}$	$\frac{b}{c} > \frac{1}{r}$	$\frac{b}{c} > \frac{1}{r}$	$r$ ...genetic relatedness
	<i>D</i>	$b-rc$	0				
Direct reciprocity	<i>C</i>	$(b-c)/(1-w)$	$-c$	$\frac{b}{c} > \frac{1}{w}$	$\frac{b}{c} > \frac{2-w}{w}$	$\frac{b}{c} > \frac{3-2w}{w}$	$w$ ...probability of next round
	<i>D</i>	$b$	0				
Indirect reciprocity	<i>C</i>	$b-c$	$-c(1-q)$	$\frac{b}{c} > \frac{1}{q}$	$\frac{b}{c} > \frac{2-q}{q}$	$\frac{b}{c} > \frac{3-2q}{q}$	$q$ ...social acquaintanceship
	<i>D</i>	$b(1-q)$	0				
Network reciprocity	<i>C</i>	$b-c$	$H-c$	$\frac{b}{c} > k$	$\frac{b}{c} > k$	$\frac{b}{c} > k$	$k$ ...number of neighbors
	<i>D</i>	$b-H$	0				
Group selection	<i>C</i>	$(b-c)(m+n)$	$(b-c)m-cn$	$\frac{b}{c} > 1 + \frac{n}{m}$	$\frac{b}{c} > 1 + \frac{n}{m}$	$\frac{b}{c} > 1 + \frac{n}{m}$	$n$ ...group size $m$ ...number of groups
	<i>D</i>	$bn$	0				

# Evolution of Cooperation I: Kin Selection

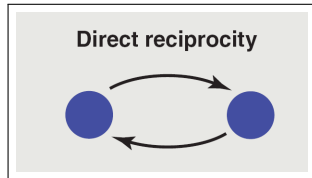
- 형제 혹은 자매와 협력하는 이유: 친족이 같은 유전자를 지니고 있을 가능성이 높기 때문
- 리처드 도킨스의 "이기적 유전자"
- 매트 리들리의 "이타적 유전자"
- 두 가지 방식으로 진행
  - ① 자손의 번식을 통해서
  - ② 동일한 유전자를 지니고 있는 친척의 번식을 높임으로써





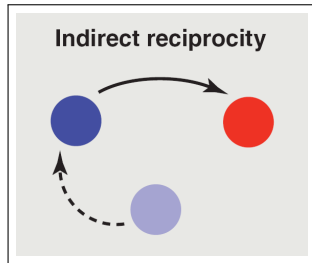
# Evolution of Cooperation II: Direct Reciprocity

- 오밀조밀한 공동체
- 다른이에 대한 나의 경험에 기반
- 반복게임을 통해서



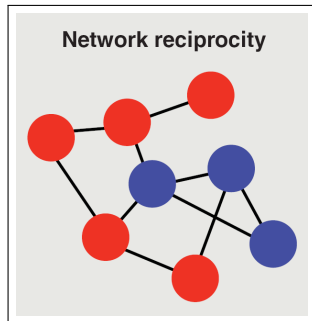
# Evolution of Cooperation III: Indirect Reciprocity

- 대규모 사회 (이 거대한 사회가 굴러가는 방식) → 사회적 분업
- 다른이에 대한 다른 사람의 경험 또한 고려
- 언젠가 만날 수 있겠지?
- "뇌"의 진화와 평판을 매개로
- 도덕체계의 진화 (그리스 철학, 불교, 기독교, 힌두교, 도교 등)



# Evolution of Cooperation IV: Network Reciprocity

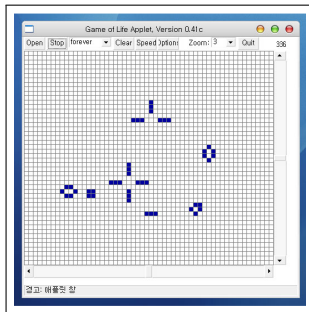
- 집단의 구조가 죄수의 딜레마를 푸는 또 다른 방법을 제시할 수 있지 않을까?
- 현실의 모든 상태에는 일정한 구조가 있다. 이것이 차이를 낳을까?
- 어떻게 얼룩말의 세포들이 얼룩말의 무늬를 만들어 내는 가?
- 협력자가 배신자 보다 더 나은 성과를 거두게 하는 그런 집단 구조가 있을까?



# Network Reciprocity

- Conway's The Game of Life: 두 가지 규칙

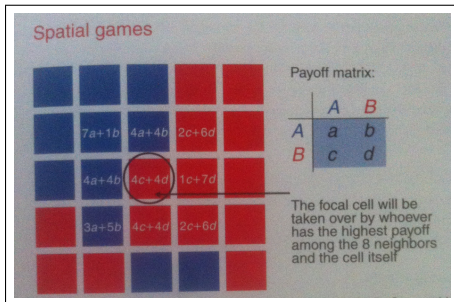
- 1 중앙 셀의 주변에 2개 미만 혹은 3개 초과  
의 셀들이 살아 있으면 중앙 셀이  
죽도록 한다.
- 2 중앙 셀의 주변에 정확히 3개의 셀들이  
살아 있으면 중앙 셀이 다시 살아나도록  
한다.



# Network Reciprocity (2)

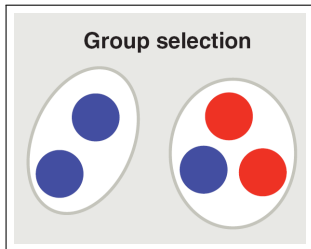
- Spatial Games

- 1 그림의 각 셀들이 주변에 있는 8개의 이웃 셀들과 게임을 벌인다.
- 2 각 선수(셀)들의 보수가 계산되고 각 선수들은 이웃 셀 중에서 가장 보수가 높은 셀을 모방한다.
- 3 초기의 상태에 따라서 결과는 달라진다.



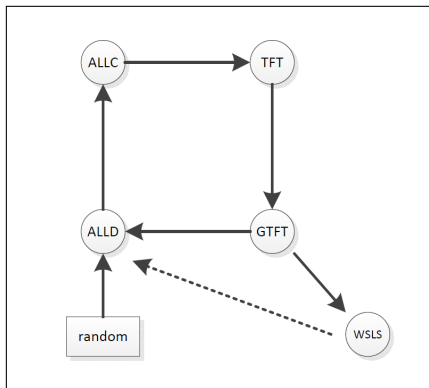
# Evolution of Cooperation V: Group Selection

- 집단... 지하철 선로에 떨어진 어린 아이를 구한 학생에게 상장과 존경을 제공한다.
- 바람직한 사회규범을 가진 집단은 그렇지 않은 집단들과의 경쟁에서 승리할 것이다.
- 간접 상호성은 집단 선택과 협력하여 인간다움을 형성할 수 있다.



# Direct Reciprocity: Oscillations of Cooperation and Defection

- 진화에서 협력의 역할을 이해하는 중요한 게임은 PDG
- PDG에서 협력은 없어지고 배신은 증가
- Repeated PDG는 직접적 상호성 (Direct Reciprocity)을 이해하는 주요한 분석틀 → 협력이 진화하는 메커니즘을 보여준다.



# Cyclic Pattern

