



복잡성 해설

#ComplexityExplained

목차

1	상호작용	4
2	창발	6
3	동역학	8
4	자기조직화	10
5	적응	12
6	학제간 통합성	14
7	방법론	16

복잡성 해설

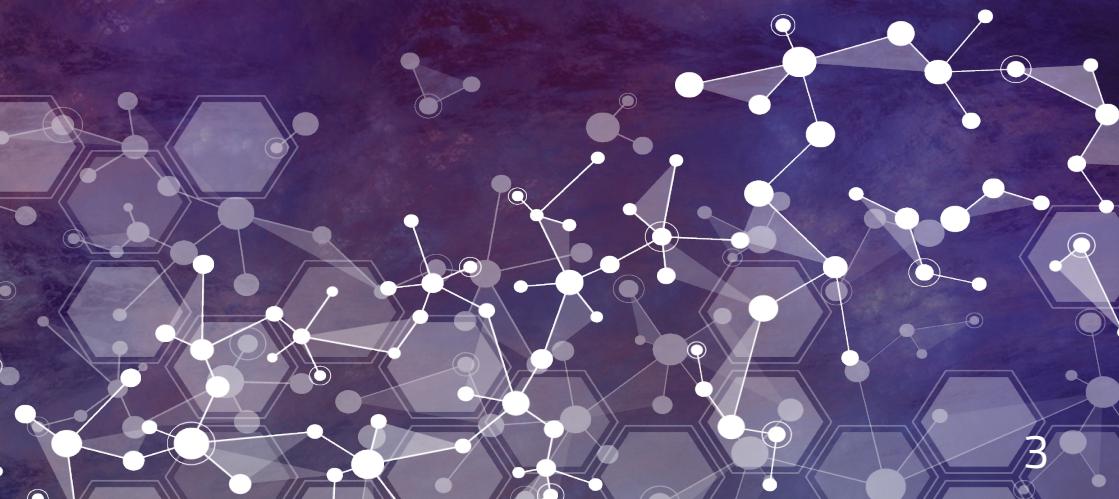


“탄소 원자에는 사랑이 없고, 물 분자 안에는 허리 케인이 없고, 지폐 안에 금융위기도 없다.” (Peter Dodds)

복잡성 과학 또는 복잡계 과학이라고도 부르는 학문은 많은 구성 요소들을 가진 집합체를 연구한다. 수많은 구성 요소들은 작은 규모에서는 국소적으로 상호 작용하는 동시에, 큰 규모에서는 전체 구성 요소들이 특정한 거시적 구조를 형성하며 독특한 특성을 발현한다. 이러한 양상은 종종 외부 개입이나 중앙 통제 없이 스스로 자기 조직화하여 발현된다.

이러한 집합체의 특성을 개별 구성 요소들에 대한 지식만으로 이해하거나 예상하기는 어렵다. 이러한 집합체는 복잡계라고 부르며 이를 연구하는 데는 새로운 수학적, 과학적 방법이 동원되어야 한다.

이에 복잡계에 관해 알아야 할 몇 가지를 여기에 정리하였다.





상호작용

복잡계는 다양한 방법으로 주변 환경 및 서로 간에 상호작용하는 수많은 요소들도 구성되어 있다.

“생물학이 다루는 모든 대상은 시스템들로 구성된 시스템이다.”

(Francois Jacob)

복잡계는 구성요소들끼리, 잠재적으로는 주변 환경과도, 다양한 방법으로 상호작용하는 하는 특징이 있다. 이러한 구성요소들은 상호작용의 연결망을 형성하고, 때로는 소수의 구성 요소가 굉장히 많은 상호작용을 하는 경우도 존재한다. 상호작용으로 인해, 구성요소들을 개별적으로 이해하거나 완전히 예측하기 어렵게 만드는 새로운 정보가 만들어지기도 한다. 게다가 그 구성요소들은 ‘시스템으로 구성된 시스템’이 라는 또 다른 새로운 계를 형성하기도 한다.

복잡성 과학의 주요 도전 과제는 부분을 이해하거나 연결 관계를 살피는 것이 뿐만이 아니라 연결성으로 인해 전체 계가 형성되는 과정도 이해하는 것이다.

예:

- 두뇌 속의 수십억의 뉴런들
- 인터넷 상에서 커뮤니케이션하는 컴퓨터들
- 다양한 관계를 맺고 사는 사람들

연관된 개념:

계 (시스템), 요소, 상호작용, 연결망, 구조, 이질성, 서로 관계된, 서로 연결된, 상호의존성, 하부조직, 경계, 환경, 닫힌계, 열린계, 시스템들의 시스템.

참고문헌:

Mitchell, Melanie.
Complexity: A Guided Tour.
Oxford University Press, 2009.

Capra, Fritjof and Luisi, Pier Luigi.
The Systems View of Life: A Unifying Vision.
Cambridge University Press, 2016.



상호작용 1





창발

복잡계의 전체 계로서의 특성은 개별 구성 요소들의 특성과 매우 다르고 예측하기 어렵다.

“무언가를 더 얻기 위해 또 다른 무언가가 반드시 필요한 것은 아니다. 이게 창발이 의미하는 것이다.”

(Murray Gell-Mann)

단순계에서는 부분을 더하거나 통합하는 것으로 전체의 특성을 이해하거나 예측할 수 있다. 다른 말로, 단순한 계의 거시적인 특성은 그 구성 요소들의 미시적 특성의 합으로 추론할 수 있다.

그러나 복잡계에서는 종종 전체 특성을 부분의 합으로 이해하거나 예측할 수 없는데, 이는 "창발"이라 부르는 현상 때문이다. 창발은 구성 요소들이 다양한 상호작용으로 완전히 새로운 정보를 창출하는 것을 의미하며, 전체적인 큰 척도로 볼 때 매우 특이한 집단적 구조와 거동을 드러낸다.

이러한 특성은 "전체는 부분의 합보다 크다"는 말로 종종 표현된다.

예:

- 막대한 공기와 수증기 분자들이 형성하는 토네이도
- 다양한 세포가 형성하는 생체 기관
- 두뇌 속의 수십억 뉴런이 만들어 내는 의식과 지능

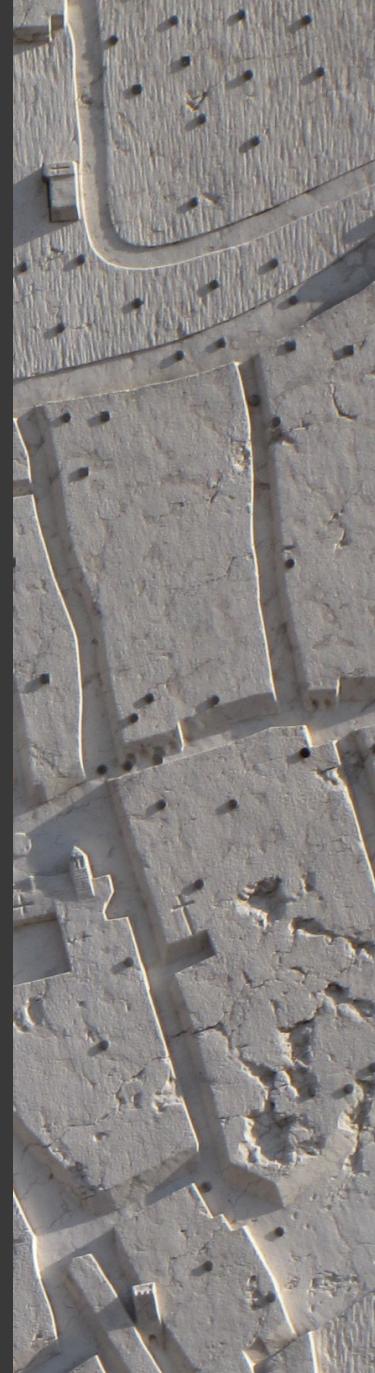
연관된 개념:

항발, 척도, 비선형성, 상향작, 표현, 의외성,
간접 효과, 반직관성, 상전히, 비환원성,
전통적 선형성/통계적 관념의 해체,
“전체는 부분의 합보다 크다.”

참고문헌:

Bar-Yam, Yaneer.
Dynamics of Complex Systems.
Addison-Wesley, 1997.

Ball, Philip.
Critical Mass: How One Thing Leads to Another.
Macmillan, 2004.



창발 2



동역학

복잡계는 상태를 역동적으로 바꾸는 경향이 있고, 장기적으로는 종종 예측할 수 없는 거동 형태를 보인다.

‘혼돈: 현재가 미래를 결정한다 해도 근사 된 현재로는 미래를 근사적으로 결정하지 못한다.’

(Edward Lorenz)

계(시스템)를 시간에 대한 상태 변화의 관점으로 분석할 수 있다. 상태는 그 계를 가장 잘 표현하는 다양한 변수들의 집합으로 표현할 수 있다.

계의 상태가 한 상태에서 다른 상태로 변할 때, 그 변수들도 역시 변하며 주변 환경을 반영한다.

이러한 변화는, 변화량이 시간 변화에 비례해서 나타날 경우 선형 변화라고 부르고, 반대로 시간에 비례하지 않을 경우 비선형 변화라고 한다.

복잡계는 전형적으로 비선형이고 상태와 환경에 따라 변화율도 달라진다.

복잡계는 또한 그 상태가 변하지 않고 일정하게 유지되는 안정 상태(평형상태)에 들어설 수 있는데, 이때에는 심지어 외부 충격에도 안정되게 상태를 유지할 수도 있다. 반대로 매우 작은 충격에도 상태가 달라지는 불안정 상태를 취할 수도 있다.

분기, 상변화, "티핑포인트"라고 알려진 몇몇 사례에서는 작은 환경 변화가 전체 계의 거동을 완전히 바꾸기도 한다.

어떤 계는 "훈돈" 적이다—작은 변화에 극도로 예민하고 장기적으로 예측할 수 없으며, 소위 "나비효과"라고 불리는 현상을 나타낸다.

복잡계는 또한 경로 의존적인데, 즉, 미래 상태는 단지 현재 상태로만 결정되는 것이 아니라 과거에 지나온 경로와도 연관되어 결정된다.

예:

- 지속적으로 예측불가능하게 변하는 날씨
- 주식 시장의 변동성

연관 개념:

동역학, 거동, 비선형성, 훈돈, 비형형, 민감성, 나비효과, 분기, 장기 예측불가성, 불확실성, 경로/맥락 의존성, 비에르고드성

참고문헌:

Strogatz, Steven H.
Nonlinear Dynamics and Chaos.
CRC Press, 1994.

Gleick, James.
Chaos: Making a New Science.
Open Road Media, 2011.



자기조직화

복잡계는 청사진 없이도 특이적인 패턴을 스스로 조직할 수 있다.

“서로 반응하고 조직을 통해 확산되는 화학 물질로 이루어진 모르포겐이라 부르는 계가 형태 형성의 주요 현상을 설명하는데 충분하다는 것이 제안되었다.”

(Alan Turing)

복잡계를 구성하는 요소들 사이의 상호작용이 거시적인 패턴이나 거동을 만들어 낼 수도 있다. 이러한 과정이 중앙 통제나 외부 개입이 없이 일어나기 때문에 종종 자기조직화라고 부른다.

오히려, 자기조직화의 "통제"는 구성요소들에 분산되어 있으며 상호작용 과정 자체에 통합되어 있다고 할 수 있다. 자기조직화는 물질의 결정 조직이나 생체 기관의 형태 같은 물리적/기능적 구조를 만들어내거나, 물고기의 군집 형성 또는 동물 균육의 전기 신호 전달 같은 동적, 정보 거동 형태를 재현해 내기도 한다.

시간이 흐르면서 계가 스스로 자기조직화하여 갈수록, 새로운 상호작용 패턴이 창발적으로 생겨날 수 있으며, 잠재적으로 한층 높은 복잡성을 만들어 내기도 한다.

몇몇 경우, 복잡계가 자기조직화 되어 변화할 때, 무작위성과 규칙성이 공존하는 "임계 상태"로 향해서 변화해 가는 경우도 있다.

자기조직화된 임계 상태에서 형성되는 패턴은, 보통 그 패턴이 자기 유사성을 갖거나 멱함수 분포를 따르는 등 다양한 특이한 특성을 보인다.

예:

- 하나의 수정란이 분화하여 최종적으로 복잡한 형태의 기관으로 형성되어 가는 자기조직화 과정
- 사람과 자연을 더 많이 끌어모으며 성장하는 도시들
- 복잡한 패턴의 비행떼를 형성하는 수 많은 찌르레기들

연관 개념:

자기조직화, 집단 행동, 떼, 패턴, 공간과 시간, 무질서의 질서, 임계성, 자기유사성, 폭발적 발생, 지기조직임계성, 멱함수, 긴꼬리 분포, 형태 형성, 탈중앙화/분산 통제, 유도된 자기조직화

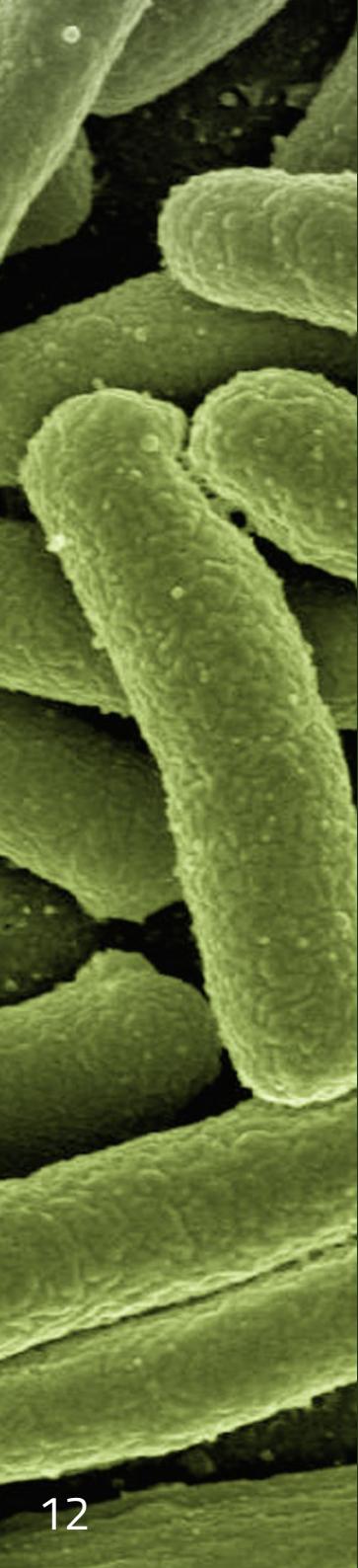
참고문헌:

Ball, Philip.
The Self-Made Tapestry: Pattern Formation in Nature.
Oxford University Press, 1999.

Camazine, Scott, et al.
Self-Organization in Biological Systems.
Princeton University Press, 2003.



자기조직화 4



적응

복잡계는 적응하고 진화하기도 한다.

‘진화의 관점에서 보지 않는다면
생물학의 어떤 것도 말이 되지 않는다.’

(Theodosius Dobzhansky)

복잡계는 단순히 평형 상태를 향해 나아간다기보다는 환경에 대해 더 적극적이고 반응적이다. 단지 언덕 아래를 향해 굴러가는 공과 비행하는 동안 풍향에 적응하여 날아가는 새의 차이를 떠올려 보자. 적응이란 다양한 척도에서 나타날 수 있다. 학습과 정신적 발달을 통해 인지적으로, 정보 공유와 관계 연결을 통해 사회적으로, 유전 변이와 자연 선택을 통해 진화적으로도 나타날 수 있다.

구성 요소가 피해를 받거나 제거되었을 경우 복잡계는 종종 이전의 기능을 다시 회복하고는 하는데, 가끔은 심지어 전보다 더 나아지기도 한다. 이는 외부 섭동에 견디는 능력인 강건성, 큰 섭동이 후에 원래 상태로 되돌아가는 회복성, 계 자체를 변화 시켜 기능을 유지하고 생존하게 하는 적응성으로 달성된다. 이러한 특성을 가진 복잡계는 적응성 복잡계라 부른다.

예:

- 병원균에 대해 지속적으로 학습하는 면역 체계
- 흙더미에 생긴 균열을 지속적으로 보수하는 흰개미 군락
- 수십억년에 걸친 역사 동안 위기와 재난에도 살아남은 지구 생명체

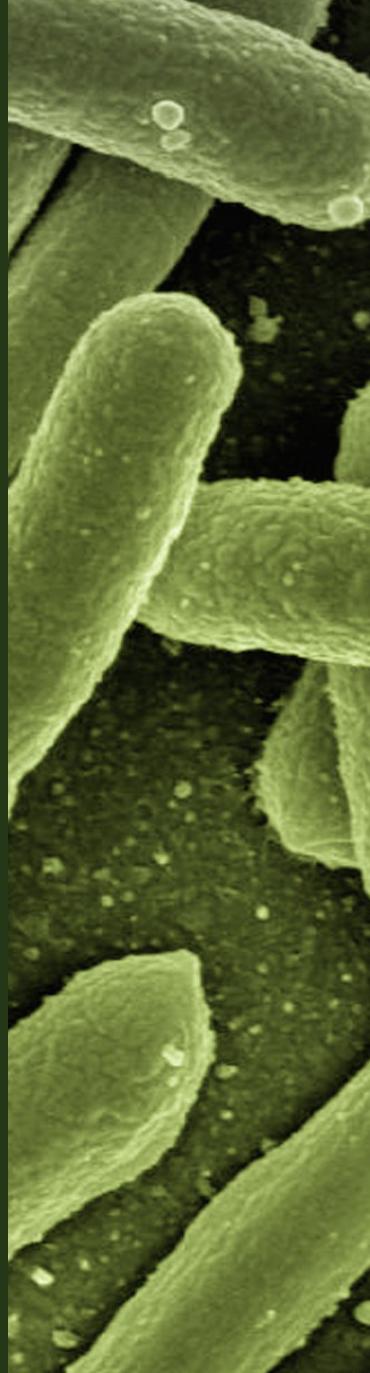
연관 개념:

학습, 적응, 진화, 적합, 풍경, 강건성, 회복성, 다양성, 적응성 복잡계, 유전알고리즘, 인공 생명, 인공 지능, 집단 지성, 창의성, 오픈엔드성

참고문헌:

Holland, John Henry.
Adaptation in Natural and Artificial Systems.
MIT press, 1992.

Solé, Ricard, and Elena, Santiago F.
Viruses as Complex Adaptive Systems.
Princeton University Press, 2018.



적응 5



학제간 통합성

복잡계 과학은 서로 다른 다양한 분야의 계를 이해하고 관리하는데 사용될 수 있다.

“서로 다른 복잡계들 사이에 공통 특성을 찾으려는 것은 완전 헛된 일일 수 있다...

피드백과 정보에 대한 생각들은 넓은 범위의 상황들을 바라보는 데 지침이 되어 준다.”

(Herbert Simon)

복잡계는 물리학, 생물학, 경영학, 정치학, 심리학, 인류학, 약학, 공학, 정보 기술 등 모든 과학적이고 전문적인 분야에 존재한다.

사회관계망과 모바일 통신 기술부터 자율운전과 블록체인에 이르는 다양한 최신 기술이 사회적 웰빙을 이해하고 예측하는 데 결정적인 역할을 하는 창발적 현상이 나타나는 복잡계를 만들어낸다.

복잡성 과학의 핵심 개념은 보편성이다. 서로 다른 분야에 존재하는 계들이 같은 특성을 기저에 갖고 있고, 동일한 과학적 모델로 설명이 가능 하다는 것이다. 이런 개념은 새로운 수학적이고 컴퓨팅을 활용한 학제 간 연구 체계를 불러 일으킨다.

복잡성 과학은 총체적으로 여러 학문 분야를 걸쳐 분석하는 접근을 가능케 한다. 이것이 각 분야 내의 특정 주제에 집중하는 전통적인 과학적 접근 방법을 보완하게 된다.

예:

- 다양한 정보처리 시스템에서 나타나는 공통 특성 (신경계, 인터넷, 의사소통 사회 기반시설)
- 다양한 전파 과정에서 발견되는 공통 패턴 (질병 전파, 유행, 화재)

연관 개념:

보편성, 응용 다양성, 융복합적, 다학제간, 통합적, 경제학, 사회계, 생태계, 지속가능성, 현실문제해결, 문화계, 일상 생활 의사 결정.

참고문헌:

Thurner, Stefan, Hanel, Rudolf and Klimek, Peter.

Introduction to the Theory of Complex Systems.

Oxford University Press, 2018.

Page, Scott E.
The Model Thinker.
Hachette UK, 2018.





방법론

수학적이고 컴퓨터를 활용한 방법들은 복잡계를 연구하는 강력한 도구다.

‘모든 모델이 다 틀렸지만 몇 가지는 유용하다.’

(George Box)

복잡계는 간단히 종이와 펜으로 계산하거나 직관으로 정할 수 없는 많은 변수와 설정을 수반한다. 종이와 펜 대신 이러한 계가 어떻게 조직되고 변화하는지 보는데 고급 수학과 컴퓨터 모델링, 분석과 시뮬레이션들이 항상 필요하다.

가설로 세운 규칙이 자연에서 관찰된 상태를 재현하는지 컴퓨터의 도움으로 확인할 수 있고, 이러한 규칙에 대한 우리의 지식에 기반하여 다양한 "만약에" 각본을 써볼 수 있다. 컴퓨터는 또한 복잡계에서 쓸어지는 엄청난 데이터를 분석하여, 사람의 눈에는 보이지 않는 숨겨진 패턴을 드러내고 시각화하는 데 사용된다.

이러한 컴퓨터에 기반한 방법들은 자연에 대한 이해의 수준을 더 깊게 이끌어준다.

예:

- 새 군집 비행에 대한 객체중심 모델링
- 두뇌에 대한 수학적, 컴퓨터적 모델링
- 기후 예측 컴퓨터 모델
- 보행자 동역학 컴퓨터 모델

연관 개념:

모델링, 시뮬레이션, 데이터 분석, 객체중심 모델링, 네트워크 분석, 게임이론, 시각화, 규칙, 이해.

참고문헌:

Pagels, Heinz R.
The Dreams of Reason: The Computer and
the Rise of the Sciences of Complexity.
Bantam Books, 1989.

Sayama, Hiroki.
Introduction to the Modeling and Analysis of
Complex Systems.
Open SUNY Textbooks, 2015.





‘나는 다음 (21)세기는 복잡성의 세기
일 것이라고 생각한다.

(Stephen Hawking)

CONTRIBUTORS

Manlio De Domenico*, Dirk Brockmann, Chico Camargo,
Carlos Gershenson, Daniel Goldsmith, Sabine Jeschonnek,
Lorren Kay, Stefano Nicelle, José R. Nicolás, Thomas Schmickl,
Massimo Stella, Josh Brandoff, Ángel José Martínez Salinas,
Hiroki Sayama*

(* Corresponding authors)

mdedomenico[at]fbk.eu

sayama[at]binghamton.edu

CREDITS

Designed and edited by: *Serafina Agnello*

✉ serafina.agnello@gmail.com

in [Serafina Agnello](#)

<https://complexityexplained.github.io/>

Special thanks to the following who provided inputs and feedback:

Hayford Adjavor, Alex Arenas, Yaneer Bar-Yam, Rogelio Basurto Flores, Michele Battle-Fisher, Anton Bernatskiy, Jacob D. Biamonte, Victor Bonilla, Dirk Brockmann, Victor Buendia, Seth Bullock, Simon Carrignon, Xubin Chai, Jon Darkow, Luca Dellanna, David Rushing Dewhurst, Peter Dodds, Alan Dorin, Peter Eerens, Christos Ellinad, Diego Espinosa, Ernesto Estrada, Nelson Fernández, Len Fisher, Erin Gallagher, Riccardo Gallotti, Pier Luigi Gentilli, Lasse Gerrits, Nigel Goldenfeld, Sergio Gómez, Héctor Gómez-Escobar, Alfredo González-Espinoza, Marcus Guest, J. W. Helkenberg, Stephan Herminghaus, Enrique Hernández-Zavaleta, Marco A. Javarone, Hang-Hyun Jo, Pedro Jordano, Abbas Karimi, J. Kasmire, Erin Kenzie, Tamer Khraisha, Heetae Kim, Bob Klapetzyk, Brennan Klein, Karen Kommerce, Roman Koziol, Roland Kupers, Erika Legara, Carl Lipo, Oliver Lopez-Corona, Yeu Wen Mak, Vivien Marmelat, Steve McCormack, Dan Mønster, Alfredo Morales, Yamir Moreno, Ronald Nicholson, Enzo Nicosia, Sibout Nooteboom, Dragan Okanovic, Charles R Paez, Julia Poncela C., Francisco Rodrigues, Jorge P. Rodríguez, Iza Romanowska, Pier Luigi Sacco, Joaquín Sanz, Samuel Scarpino, Alice Schwarze, Nasser Sharareh, Keith Malcolm Smith, Ricard Sole, Keith Sonnanburg, Cédric Sueur, Ali Sumner, Michael Szell, Ali Tareq, Adam Timlett, Ignacio Toledo, Leo Torres, Paul van der Cingel, Ben van Lier, Jeffrey Ventrella, Alessandro Vespignani, Joe Wasserman, Kristen Weiss, Daehan Won, Phil Wood, Nicky Zachariou, Mengsen Zhang, Arshi, Brewingsense, Complexity Space Consulting, Raoul, Systems Innovation, The NoDE Lab.



Serafina Agnello

Version 1.0 (13rd of May 2019)