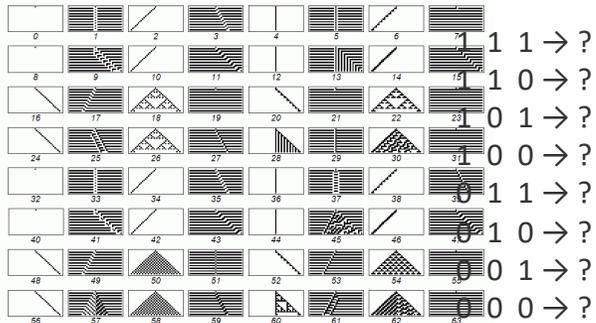


導入

初等オートマトン Elementary Cellular Automata

時間とともに規則に従ってセルが変化していく計算モデル

左 中 右 → 次の状態



<https://www.stephenwolfram.com/publications/biomedical-implications-a-new-kind-of-science/>

複雑性の指標 Complexity Measures

Lempel-Ziv Complexity

JPEGの圧縮などに使われる技術でもある

Compression Complexity

Zlib(Zli)とかでどのくらい効率的に圧縮可能であるか

Lyapunov Exponent

(カオス力学系では言わずと知れた) リアプノフ指数

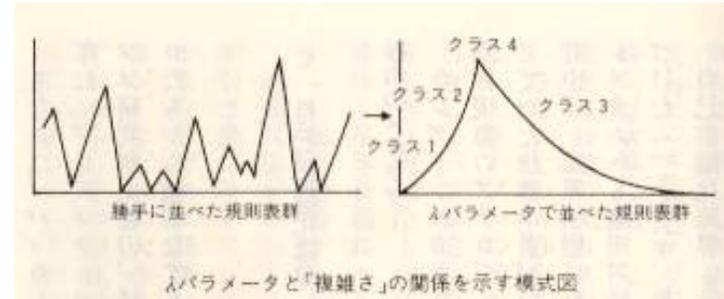
Krylov Complexity

量子状態の複雑性の指標

他にはコルモゴロフ複雑性などがあります

カオスの縁 The Edge of Chaos

秩序とカオスの境界に位置する領域



<https://www2s.biglobe.ne.jp/~kitanok/Complex/edge.html>

大規模言語モデル Large Language Models

割愛 ☺

書誌情報

ArXiv: <https://arxiv.org/abs/2410.02536>

OpenReview @ ICLR 2025 (スコア 6,6,6,6 2024/11/21 時点):

<https://openreview.net/forum?id=leRcpsdY7P>

まとめ記事 :

<https://masasikatano.wordpress.com/2024/10/15/intelligence-at-the-edge-of-chaos/>

図3 「カオスの縁」の模式図
神経活動は、非カオスでは規則的(左)、カオスでは不規則(右)な状態となる。カオスの縁は、非カオスとカオスの境界にあり、両者を行き来することができる状態である。



図4 「雪崩現象」の模式図
神経ネットワークにおいて、1カ所の神経細胞(赤矢印)の活動をきっかけに、規模の小さな連鎖活動(左)と大きな連鎖活動(右)が連続的に起る状態が雪崩現象である。閾値TLは、コーシー分布の神経ネットワークモデルのシミュレーションと理論解析を行い、カオスの縁において雪崩現象が起きることを明らかにした。

[脳の想像力とカオスの縁](#)

提案法：カオスの縁の知性

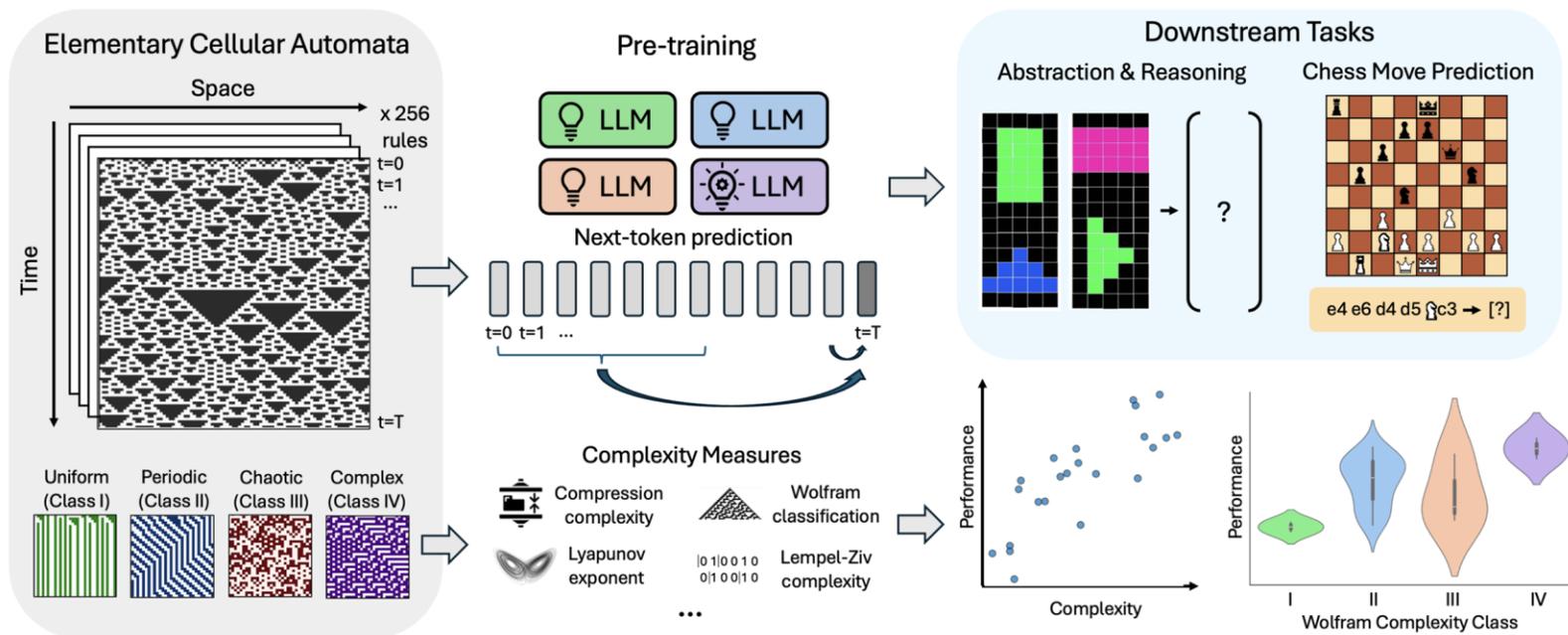
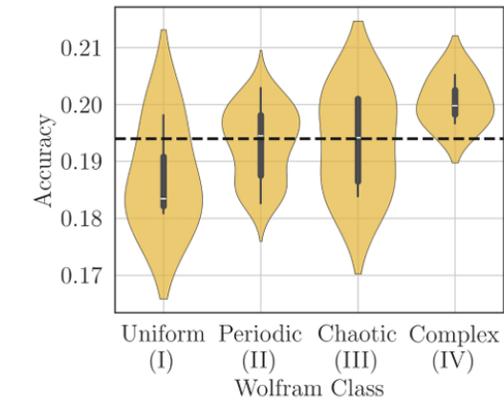
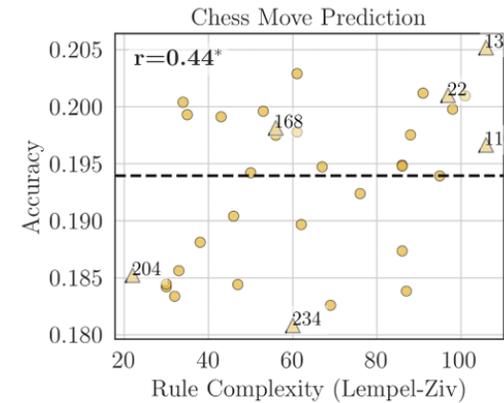
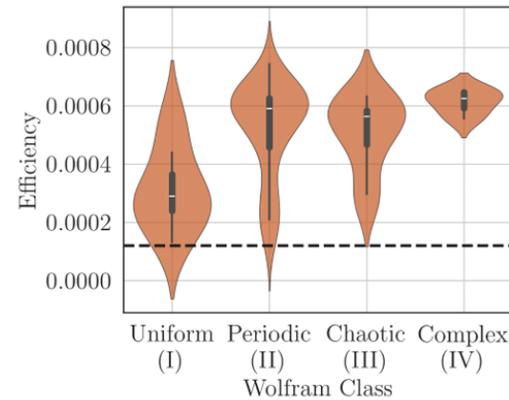
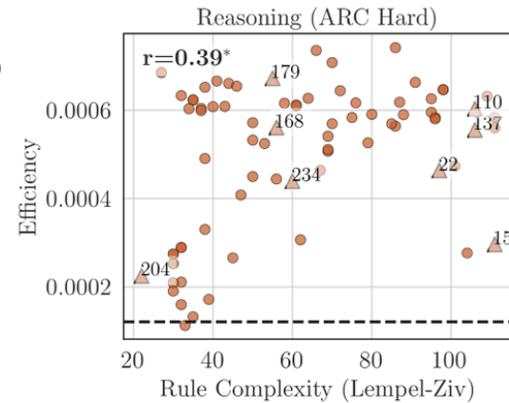
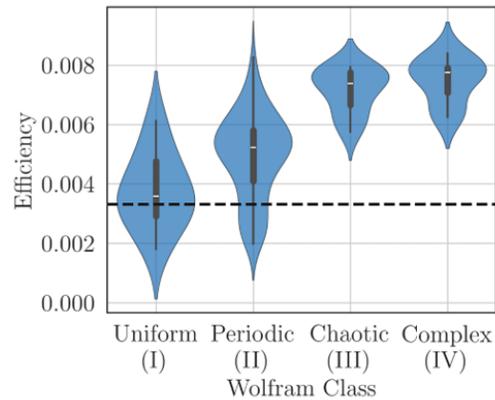
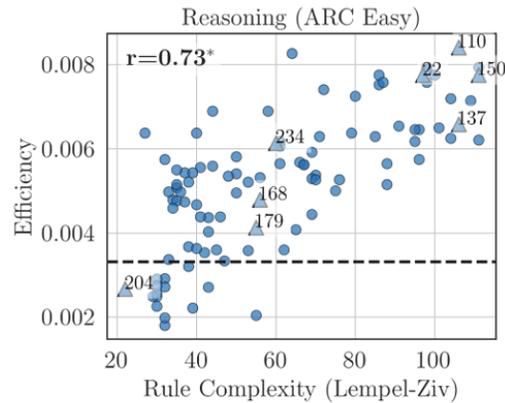
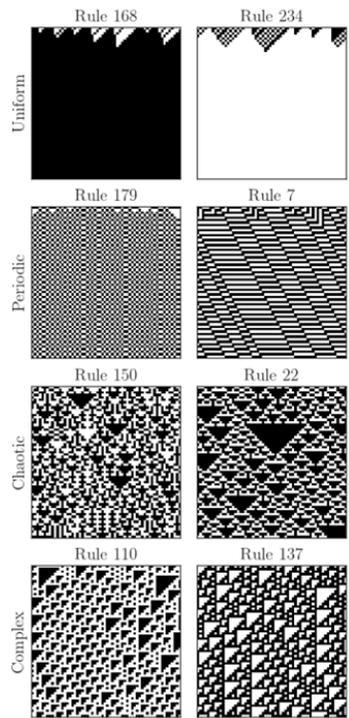


Figure 1: Our framework for investigating the link between complexity and intelligence. We pretrain Large Language Models (LLMs) on Elementary Cellular Automata (ECAs) from different complexity classes using next-token prediction, then evaluate them on downstream reasoning and chess move prediction tasks. We use various measures to analyze the complexity of ECA rules, and quantify the relationship between complexity and downstream performance.

- 学習器に“万能”をもたらす学習データって自然言語じゃなくてもいい
- (*注1) 複雑性を持った環境予測能力の向上に淘汰圧が働く
- LLMはGPT-2

“単純な”（初等）セル・オートマトンだけで学習したLLMが、複雑な下流タスクを解く！
“知性が産まれるには、複雑さに触れる以外のことは必要ないかもしれない”（*注1）

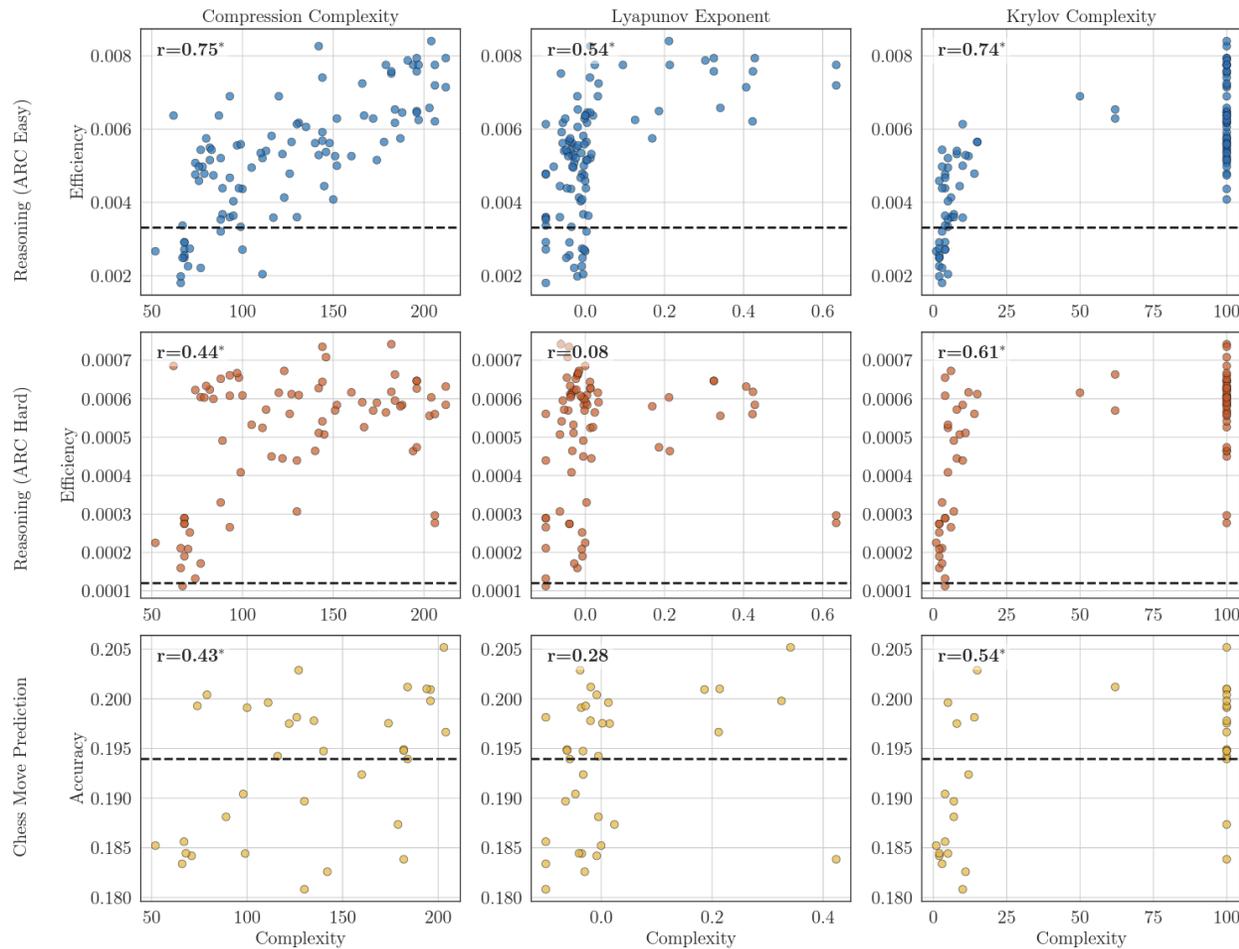
実験結果 ①



- より複雑なECAルールで訓練されたモデルは、Reasoningやチェスの手の予測といったタスクで大幅に優れた性能を示した
- 複雑性は知性を育む
- 「カオスの縁」という最適なバランスが存在する

“Sweet spot”がある = カオスの縁

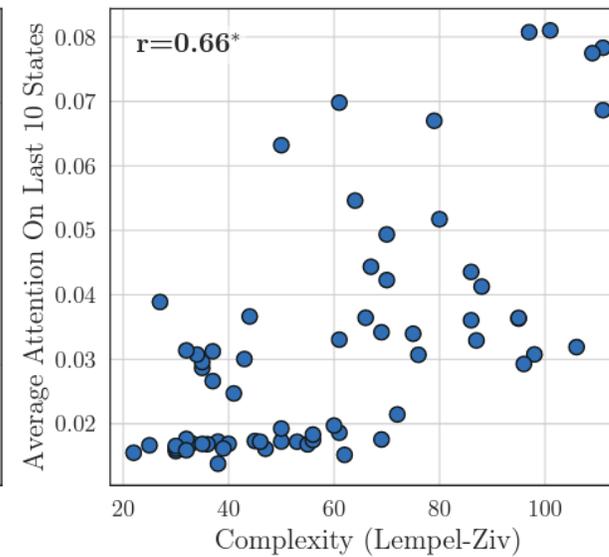
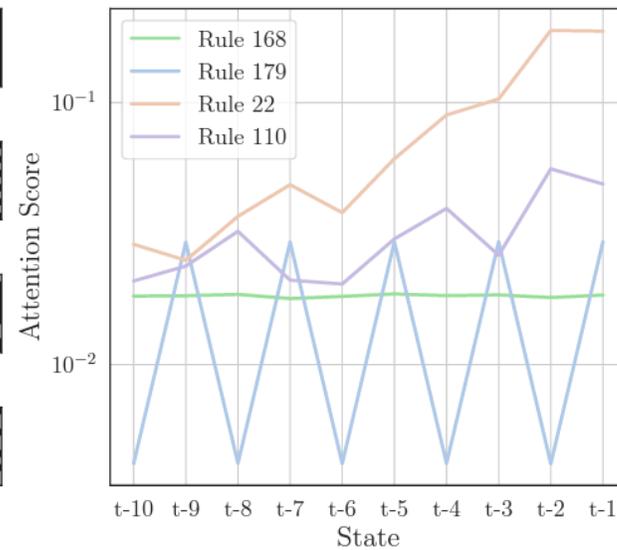
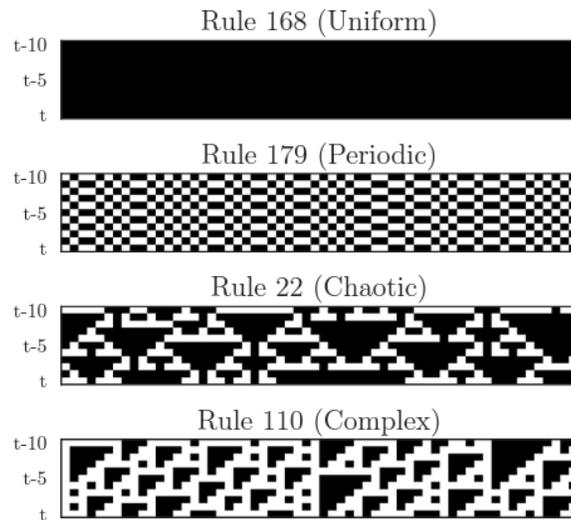
実験結果 ②



- カオスすぎる or 単純すぎる場合には知能が低下
- 複雑さがちょうど良いバランスに達したときにモデルは知的な振る舞いを示す
- 知性が発現するためには適度な複雑さが重要

複雑性が知性を産む

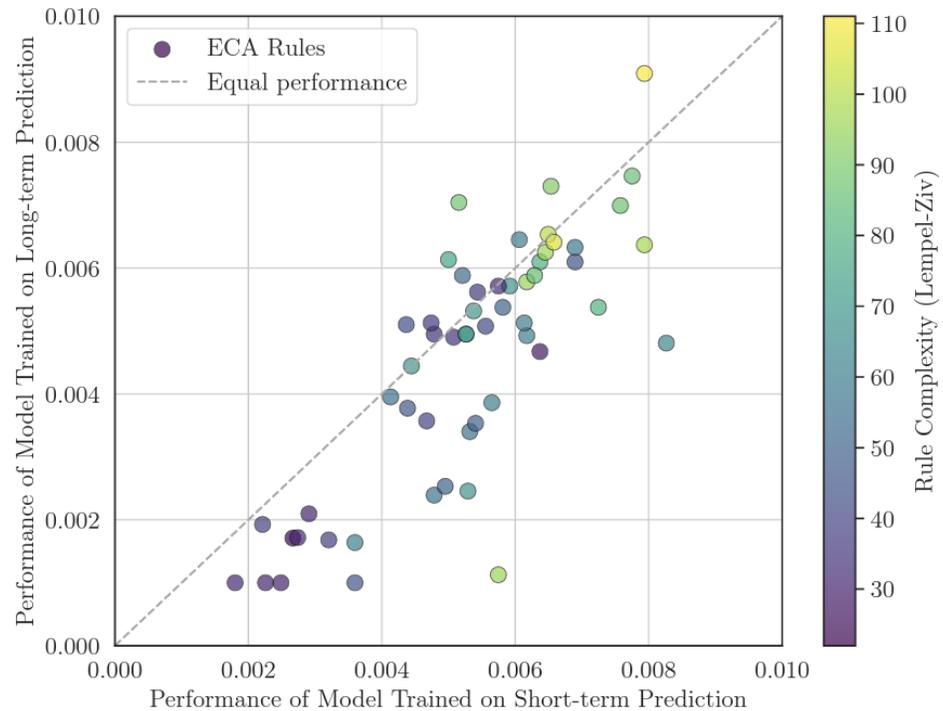
実験結果 ③



- 驚くべきことに！ECAは瞬時的=instantaneousなものであり、次の状態は現在の状態にのみ依存しているにもかかわらず、モデルは過去の状態からの遍歴の情報を取り込んでいた！
- これは、複雑性がより深い学習と推論を促すことを示唆している

モデルはメモリーを持たないのに過去の状態から

実験結果 ④



- 次の状態（1ステップ先）を予測するモデルが、さらに先（5ステップ先）を予測するモデルよりも優れていることも分かった！
- これは、システム自体が複雑である場合にわずかな直近のデータでも複雑な汎化を導けることを示している

単純なルールから複雑な汎化が導けることを示唆

みんなのコメント



市川航平 | KK Generation 共同代表パートナー

@koheiichi

ニューラルネットワークのダイナミクスがEdge of Chaosであることが情報処理において重要、という方向性の研究は多いものの「学習対象系列がEdge of Chaos性を持つことがAIの学習に重要」というのは初めて見たので面白い。

LLMが賢いのは事前学習対象の言語が良い性質を持っているから、という類推も成り立ちそう。



Hiroki Kurashige

@hir_kurashige

Transformerのアーキテクチャと自己回帰言語モデルという学習方略に加え、学習に使う自然言語データが有する特質から生じると考えられる

その目線で見るとき、でも学習器に“万能“をもたらす学習データって別に自然言語じゃなくてもいいはず

あるクラス(以上)の学習系でそういうデータ源が利用でき、

[Translate post](#)

11:51 am · 11 Jan 2024 · 1,571 Views

...

...

田中久美子

Kumiko Tanaka-Ishii

言語

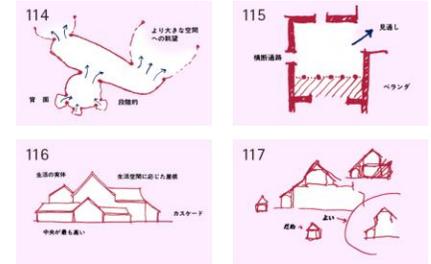
と STATISTICAL 使用の
UNIVERSALS 集積の
OF 中にある
フラクタル 偶然と
LANGUAGE 必然

これほど複雑・多様かつ変化する人間のこばにあって、
どんな時代の、どんな言語の、どんなジャンルでも成り立つという「統計的言語普遍」。
その不思議を検証し、その意味を考えることから、人間の記号使用の深奥に迫ってゆく。

UNIVERSITY OF TOKYO PRESS 70th ANNIVERSARY
東京大学出版会 70周年記念出版

『壊れたフラクタル』?

・ 「パターンランゲージ」



・ さらに上述の「自然言語データの持つ構造が“創発”に重要」という話と「進化的束縛」の話が悪魔合体させてみると、LLMの現有能力は自然言語進化に起源を持つことが見えるここから「自然言語の進化的意味の理解」や「LLMをもっと強くする人工自然言語の最適化による探索」にも繋がる

『自然言語には、Zipf則として知られる大域的な---マクロな---性質が複数あり、それらは押し並べて冪乗則の形態をとる。自然言語のマクロな性質は、複雑系科学の系譜において主に論じられてきた。』

まとめと展望

まとめ

高い複雑性を表す（初等）オートマトンで訓練された大規模言語モデルは下流タスクで優れた性能を示し，カオスの縁での学習が知能を創発することを示唆する実験的結果

展望

- 多次元のセルオートマトンへの拡張
- より複雑なタスクではどうか？
- 自己組織化臨界現象（Self-organized Criticality）

（若干宣伝...）群れ x IIT カオスの縁とかSoCの話です!!
<https://www.biorxiv.org/content/10.1101/2024.02.18.578833v1>
SciRep Accepted!

