

資源消費に基づく成長を導入した Lenia における生物と環境との相互作用

朝倉 健太 鈴木 麗璽 有田 隆也

名古屋大学 大学院情報学研究科 複雑系科学専攻

1. はじめに

Lenia[1]はライフゲームを空間・時間・状態・遷移規則に関して連続化したモデルであり、微生物にも似た複雑な形態の自律的な運動パターンからなる多様な生物が創発する人工生命モデルである。Lenia は生物の行動や進化を考える枠組みとして発展しており、生物を形成する物質の保存則を導入した Flow Lenia[2]では、食物物質の摂取による成長や、物質に状態遷移パラメータを内包させた複数種の共生や進化が実現している。

本研究では、環境と生物との相互作用に注目した Lenia 生物の生態的・進化的特徴の理解を目的として、環境全体に分布する資源の消費に基づく成長を明示的に導入した拡張モデルを構築し、実験解析を行った。その結果、各セルの資源量上限値が生物と環境との相互作用で創発する生物の形態や行動に大きく影響することがわかった。

2. Lenia と状態更新

Lenia における生物とは状態値の 2 次元セル集合 $A^t \in [0, 1]^2$ がステップ毎に状態更新した際に見られる局所的、自律的な動作パターンを指す。Lenia の状態更新は Fig. 1 の規則に則っており、ステップ毎に A^t に対して生物種ごとに決められたカーネルと呼ばれる畳み込み関数 K を適用して各セルのエネルギー値 U を算出し、 U から成長関数 G を用いて状態値の変化量である成長度を決定する。

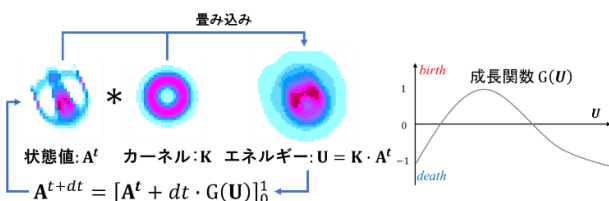


Fig. 1 : Lenia の状態更新規則

3. 資源消費に基づく成長を導入した Lenia

本研究では 2 節で述べた基本モデルにおいてカーネル数と状態値の種類数 (チャンネル数) を増やしたマルチカーネル・チャンネル版に対し、各セルの資源量を表す 2 次元セル集合である資源チャンネル r^t を定義し、これが各状態値の変化に影響を与えるものとした (Fig. 2)。

本モデルでは、各ステップにおいて各資源量 $r^t \in [0, r_{max}]$ が式(1)によって更新される。資源は各セルの全

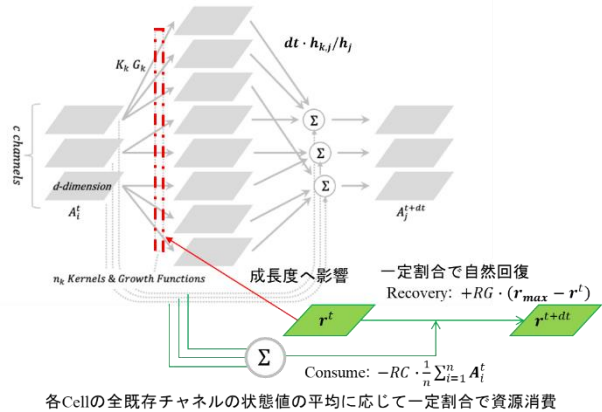


Fig. 2 : 資源消費に基づく成長を導入した Lenia

チャンネルの状態値の平均に資源消費係数 RC を乗じた量だけ減少するとともに、資源量上限値 r_{max} と各セル資源量の差分に資源回復係数 RG を乗じた量だけ回復する。これは、存在する生物の物質量が大きいほどその場の資源を消費するが、同時に最大値に漸近するように自然に回復することを表す。

各チャンネル j の状態値 A_j^t は式(2)で更新され、現在の資源量 r^t がエネルギー値 U に乗じられることで生物の成長度に影響を与える。これは、資源量が 1 の場合は従来の Lenia と同等であり、1 より小さい (大きい) 場合は資源不足 (過剰) により、従来と比べてエネルギーが小さく (大きく) なることを表す。(式 1 と 2 を交換してください)

$$r^t = RG \cdot (r_{max} - r^t) - RC \cdot \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n A_i^t \quad (1)$$

$$A_j^{t+dt} = \left[A_j^t + dt \sum_{i,k} \frac{h_{i,k}}{h} G_{i,k} (K_{i,k} * A_i^t * r^t) \right]_0^1 \quad (2)$$

4. 実験と考察

本実験では、既存のチャンネル数 3 の生物種である Emitter と Aquarium (Fig. 3) を用いた。初期個体数=25、ステップ数=1000、 $RC=0.005$ 、 $RG=0.001$ 、 $r^0=1$ 、セル集合サイズ=1024 × 1024 の条件下で r_{max} を 0.5~4.0 の範

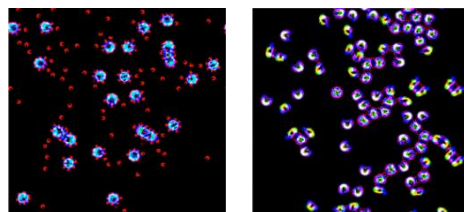


Fig. 3 : オリジナルの Emitter (左) と Aquarium (右)

Interactions between organisms and their environment in a Lenia with growth based on resource consumption
Kenta Asakura, Reiji Suzuki, Takaya Arita,
Graduate School of Informatics, Nagoya University

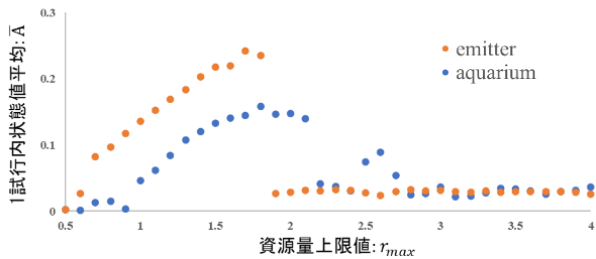


Fig. 4: 資源量上限 r_{max} が生物の状態量に与える影響

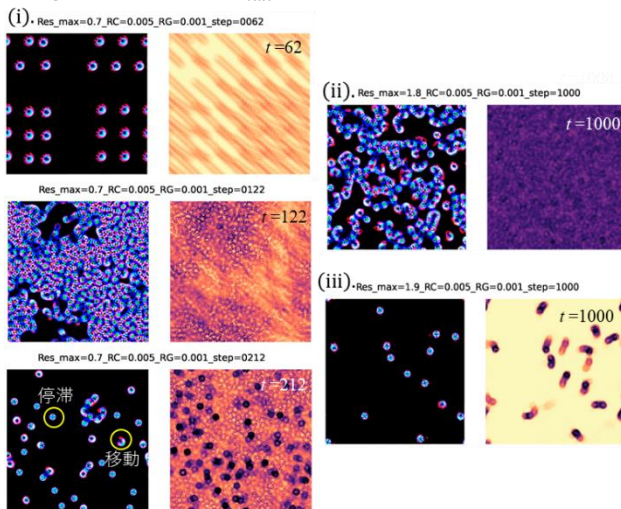


Fig. 5: Emitter の振る舞い ($r_{max}=(i)0.7, (ii)1.8, (iii)1.9$, 左: 状態値 (RGB で 3 チャンネルの状態を表現), 右: 資源値) 動画 URL:

<https://doi.org/10.6084/m9.figshare.21878988>

囲を 0.1 刻みで設定し実験した。

Fig. 4 に資源量上限値 r_{max} と 1 試行での全チャンネルの状態値平均 \bar{A} の関係を示す。同図から、両生物について r_{max} が大きくなるにつれて状態量が高まり 1.7、1.8 程度でピークを迎えることがわかる。その後、Emitter は $r_{max}=1.9$ 以降で急激に 0.02 程度の極めて小さい値をとる一方、Aquarium の場合は一部例外を除き $r_{max}=2.8$ 程度に向けて次第に減少する傾向があった。実際の生物の挙動を調べると \bar{A} が小さい場合は生物は小さめで不安定で、 \bar{A} がピークに至るに従い動的・活発な挙動が観察された。それを超えると生物は停滞する傾向があった。以降、各生物の特徴的振る舞いについて述べる。

Fig. 3 (左) のように Emitter は小さなグライダー (赤色) を放出しながら複雑に動く生物であり、同時に個体間の衝突をきっかけにセル全体に爆発的に広がり固定化する特徴を持つ。Fig. 5(i)の資源量上限が比較的小さい $r_{max}=0.7$ 付近では、グライダーを放出しない Emitter 個体がまず出現 ($t=62$) し、オリジナルと同様に衝突をきっかけに爆発する ($t=122$) が、資源量低下の影響で個体数が減って新奇な状態構成の生物が創発 ($t=212$) した。この生物は資源の多寡に応じて形態と動きが変わり、資源に偏りがあると不規則に動き、資源が少ない場所では停滞し消滅に至った。また、個体間の衝突で爆発が再発したのち個体数が減少する挙動が繰り返し見られ、集団レベルの環境と生物の相互作用といえる。

r_{max} の値が大きくなるにつれ、資源が豊富になるこ

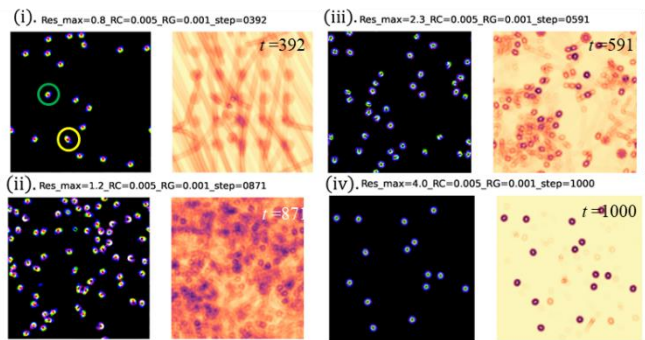


Fig. 6: Aquarium の振る舞い ($r_{max}=(i)0.8, (ii)1.2, (iii)2.3, (iv)4.0$)

とで爆発する頻度が大きくなるため、 $r_{max}=1.8$ の条件では Fig. 5 (ii) のような複数の個体がつながったような集団が全域で生成と消滅を繰り返した。一方、Fig. 5 (iii) のように値が大きく $r_{max}=1.9$ 以上の場合では、資源量が過剰でその場で成長できず、生物がその領域に侵入できなくなるため、微細な移動を繰り返すかその場で停滞する生物が生き残った。

Aquarium はペア、回転、複数種のグライダーなど、単一の種でも個体間の接触で様々な形態と挙動が生じる (Fig. 3 (右)) が、本モデルでは資源量の多寡をきっかけに異なるパターンや行動傾向に変化する様子が見られた。 r_{max} が小さい Fig. 6 (i) ($r_{max}=0.8$) では、回転 (黄) とグライダー (緑) が生じ、ある個体が通過してできた小さい資源量の軌跡を別の個体が避けるような挙動が特徴的であった。 r_{max} が中程度の ($r_{max}=1.2$) の場合ではオリジナルと類似した多様な生物が共存し、衝突や資源量の違いをきっかけに様々な変化したが、総じて素早く動く傾向があった。これはこの条件では停滞する個体は資源不足で消滅したためであると考えられ、環境条件に対する適応といえる。Fig. 6 (iii) ($r_{max}=2.3$) のようにさらに値が大きくなると、個体数は減少するものの自らの資源量変更の影響を受けて複雑な形態と動きの変化を見せる生物が出現した。 r_{max} がさらに大きくなると (Fig. 6 (iv)) Emitter と同様に生物が停滞する様子が見られた。環境変化に基づく複雑な個体レベルの行動や個体間相互作用が観察できた。

5. おわりに

本稿では、資源消費に基づく成長を導入した Lenia を構築し、2 つの生物種を対象にして生物と環境との相互作用を分析した。その結果、集団・個体レベルそれぞれに関して相互作用が観察でき、新奇な生物の創発における環境の役割の重要性が示唆された。

謝辞

本モデルの JAX を用いた高速化への協力に対し Bert Chan 氏に謝意を表す。

参考文献

- [1] Chan, B. W. C., Lenia: Biology of Artificial Life, *Complex Systems*, 28(3): 251-286 (2019).
- [2] Plantec, E., Hamon, G., Etcheverry, M., Oudeyer, P-Y., Moulin-Frier, C. and Chan, B. W. C., Flow Lenia: Mass conservation for the study of virtual creatures in continuous cellular automata, [arXiv:2212.07906v1](https://arxiv.org/abs/2212.07906v1) [cs.NE] (2022).