

三次元物理シミュレーションでの被食者と捕食者の共進化に基づく 防衛戦略の創発

Emergence of defensive strategies based on predator-prey co-evolution in 3D physical simulation

伊藤孝 Marcin L. Pilat 鈴木麗壘 有田隆也
ITO Takashi SUZUKI Reiji ARITA Takaya

名古屋大学大学院情報科学研究科

Graduate School of Information Science, Nagoya University

We present the results of prey's defensive strategies by predator-prey co-evolutionary model in 3D physical simulation. Morph and moving of virtual creatures are evolved using a genetic algorithm in a physical environment. Through incremental evolution, we found some prey have defensive strategies not to be caught by predator. Some one have a good strategy look just like natural species' one.

1. はじめに

自然界にいる多くの動物は自らの天敵に対してその種固有の多彩な防衛行動を持っている。M. Edmunds は動物の防衛行動を捕食者の有無にかかわらず発動し捕食者に出会う可能性を減らす一次防衛（間接防衛）と、捕食者に襲われた時発動する二次防衛（直接防衛）、同種及び別種の集団で行う集団防衛に分けてまとめ、その中で戦略を幾つか細分化した [1]。

このような多様な防衛戦略を取るために、被食者は防衛戦略に適した体の形態をし、その防衛戦略に則した行動を取る必要がある。例を挙げるならば、各種の擬態を行い捕食者の目を欺く被食者はその形態は別の物にそっくりになっている。また、退却戦略を取る被食者は固い殻や甲羅を持ちその中に身を隠す。反撃を行う物は武器を持っている。また、協調的な集団防衛戦略をとる被食者も、その集団がとる行動は彼らの形態に依存している [1][2]。これらの被食者の防衛戦略は捕食者との共進化によって得られ、生物の形態と行動とによって構成される。このため防衛戦略は捕食者と被食者の共進化の中で起こる形態と行動の共進化という二重の共進化によって発展したものととらえて考えることができる。

我々の目的はこの二重の共進化からどのように多彩な防衛戦略が生まれるのか、そのプロセスや、共進化ダイナミクスを明らかにすることである。しかし、現在の生物を調査するだけでは、この共進化について十分な知見を得ることは難しい。

そこで本研究では三次元物理空間上で仮想生命体を動かし、その形態と行動両方を進化させることができるモデル [3] を用いる。従来捕食者と被食者の関係での進化的検討は数理生物学で主に個体数の変動を解析してきた。しかし、このモデルでは生命体の体の形態がその行動に大きな影響を及ぼすため、戦略における形態と行動の関係を容易に調べ [6]、その進化的成り立ちを追求することが出来る。またモデルそのものが現実の自然に近いので、仮想生命体を自然界の生物と合理的に比較できる。今回、捕食者が被食者を追うという関係を構築し、形態と行動及び捕食者と被食者のシンプルな共進化シミュレーションを行うことで、仮想生命体が進化によってその形態や行動を変化させる様子を観察した。捕食者と被食者、形態と行動の共進化に注目して観察することで、それらがどのように創発し、

多様な防衛戦略にどのように影響を及ぼすかを調べた。さらにシミュレーション内で創発した防衛戦略を実際の自然界の動物がとる防衛戦略と比較することで、その特徴について共通するものがあるかどうかを調べた。

2. モデル

実験はオープンソースなソフトウェアである Morphid Academy [4] で行った。Sims による従来のモデル [3] ではニューラルネットワークに多数の種類ノードを使用して非常に複雑になっていたが、Morphid Academy では基本的な構造はそのまま使用するノードを大幅に減らしたことで、計算力を抑えることが可能になり、三次元物理空間での進化シミュレーションが簡単に行えるようになっている。

2.1 フィールド

シミュレーションを行うフィールドは三次元物理空間上のフラットな平面であり、重力加速度は実際と地上と同様の $9.8m/s^2$ である。この上を多関節の三次元剛体で表現された複数の仮想生命体が行動する。

2.2 エージェント

仮想生命体であるエージェントはいくつかの直方体の部品で構成され、それらは一方向に曲がるヒンジ状の関節で接続されている。その形態は部品に対応したノードと関節に対応したリンクによって構成される、再帰的な構造が可能な有向グラフ（図 1）によって決定される。グラフには遺伝型と表現型があり、遺伝型（図 1a）で進化計算を行い、実際のシミュレーションで用いるエージェントの形態（図 1d）は遺伝型から枝刈り、ノード複製といった過程を経て変換される表現型のグラフ（図 1b）を用いて表現する。各形態のグラフの中にはエージェントの行動を決定するニューラルネットワークのノードとリンクが組み込まれており（図 1c）、これも形態のグラフと共に遺伝型から表現型に変換され、エージェントの行動を表現する。なお今回のモデルでは、形態を決定する表現型の有向グラフ上で始点となっているノード（図 1a, b の三角形のノード）で表されているパーツを特別にメインパーツと定義する。形態を表すグラフのノードが持つ情報は対応する部品の形状であり、リンクが持つ情報は対応する関節の接続位置、角度、接続部品のサイズ、稼働の方向である。行動を決定するニューラルネットワークのノードには入力、計算、出力の三種類のノードがある。エージェントは入力を行うセンサーノードによって自

連絡先: 伊藤孝, 名古屋大学大学院情報科学研究科複雑系科学専攻, 〒464-8601 愛知県名古屋市千種区不老町, takashi@alife.cs.is.nagoya-u.ac.jp

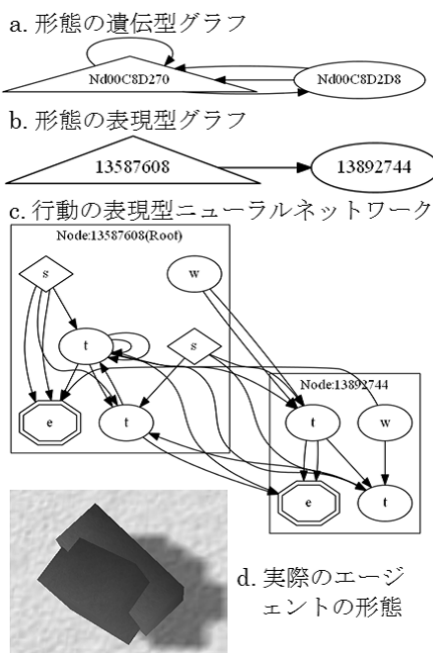


図 1: エージェントを表現する有向グラフ

身の関節の状態や、環境の情報から捕食者の位置情報や自身の体の状態を知ることができ、各パーツが持つエフェクターノードの出力に従って、接続された関節を駆動させることで行動することができる。体の各部品は地面と接触するが、部品同士に接触判定はなく部品同士をめり込ませて動かすことができる。

相手の位置を知るためのセンサーは指定された距離 r 内の最も自分に近い物体を検知する。ただし、すでに捕獲したエージェントや、自分自身の部品は検知しない。センサーノードには検知した物体の距離と角度に基づいて、距離を大きさで左右を正負で表現した 1 値を入力する [5]。

2.3 進化

捕食者、被食者それぞれのエージェントに個体数 i の個体プールを用意し、サイズ 3 のトーナメント選択を行って次世代を生成する。その際捕食者、被食者からそれぞれ 1 体ずつランダムに選択した個体ペアを用いて対戦を行い、その結果からそれぞれの適応度を決定する。この対戦を異なる個体ペアで 3 回行い、捕食者被食者それぞれで適応度を計算した 3 体のうち適応度の上位 2 個体を親として子個体を生成する。

その際、親エージェントの遺伝型有向グラフのグラフのノード、リンク及び内部パラメータに対して、二個体の遺伝子を入れ替える交叉、二個体の遺伝子を結合する接合、一個体の遺伝子を変化させる突然変異、の三種の操作を行う。特に突然変異に関しては、1. ノードの内部パラメータの値の突然変異、2. 新しいランダムノードの追加、3. リンクのパラメータが突然変異、4. ランダムなリンクの追加と削除、5. リンクのないノードの除去、の順で行う。生成された子個体は、親個体として選ばれなかった適応度が最も低い個体と置き換える。これを 3 度行ったものを 1 トーナメントとしこれを g 回行う。

3. タスク

フィールドに捕食者、被食者それぞれ 1 体ずつエージェントを用意し、これらに対戦させるタスクを行った。

3.1 設定

座標の中央の上空に被食者を配置し、その地点から距離 r_0 離れた円周上のランダムな点の上空に捕食者を配置 (図 2) する。試行開始後各エージェントは重力にしたがって自由落下し、

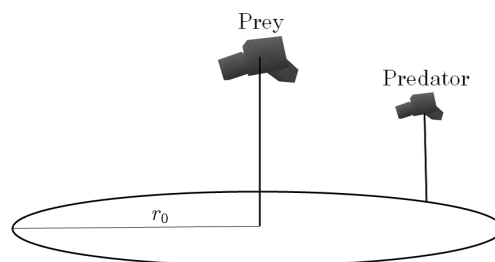


図 2: 初期配置

その後一定ステップ経過後に S ステップの間自由にフィールドを動き回る。最終ステップまでに、捕食者のいずれかのパーツが被食者のメインパーツに接触したとき、被食者は捕食者に捕獲されたと定義する。なお、捕獲されたエージェントは行動を停止し、それ以降他のエージェントの視覚センサーに捕えられなくなる。最終ステップ終了後に各エージェントは与えられた適応度関数に従って、適応度を算出する。

3.2 適応度関数

捕食者の適応度は被食者を時間内に捕獲できるかどうかで計算する。被食者を捕獲できた場合は適応度として 10000 を与え、捕獲できなかった場合は、開始ステップの被食者との距離 r_0 と終了ステップの被食者との距離 r_n を比較し、近づいた場合は、その距離に応じて以下のような適応度関数に従って適応度を与える。終了ステップ時に開始ステップ時の距離より離れていた場合は適応度は 0 である。

$$Fitness = \begin{cases} 0 & (r_0 > r_n) \\ 10000 \times \frac{r_0 - r_n}{r_0} & (r_0 \leq r_n) \end{cases} \quad (1)$$

一方被食者の適応度関数には、捕獲に関するものと、それ以外の生存に必要なことの 2 つの要素を取り入れた。捕食されないということは生存上重要である。しかし、生物が生存するためには捕食されない以外に、食事や排泄、生殖などを行わないといけな。今回は、それらの生存するために必要な行為を、指定された距離 l を移動することに置換して、定義した。適応度は、開始ステップ時にエージェントが位置した座標と、終了ステップ時に位置していた座標との距離 l_n として、以下のような適応度関数に従って与える。

$$Fitness = \begin{cases} 5000 \times \frac{l_n}{l} & (l_n < l) \\ 5000 & (l_n \geq l) \end{cases} \quad (2)$$

また、終了ステップ時までに捕食者に捕獲されなかった場合は、5000 の適応度を追加で与える。つまり、指定された距離 l 以上動き、さらに捕獲されなかった被食者は適応度として、10000 を得る。

4. 結果

今回用いたモデルでは捕食者、被食者共に進化するが、被食者が進化するためには捕食者が被食者を捕獲できる状況になる必要がある。しかし、初期個体がランダムの場合、捕食者がう

まく進化せず結果として被食者も進化しない場合がある．それを防ぐため、あらかじめ被食者をランダムで固定し捕食者のみを進化させる実験を行った．その結果 2 本の腕を持ち、うまく移動して被食者を捕獲することが可能な個体が創発したため、それを捕食者の初期個体として用いた．

4.1 パラメータ

遺伝子プールの被食者捕食者それぞれの個体数 $i = 30$ ，ステップ数 $S = 100000$ ，開始時のエージェント間距離 $r = 1000$ で世代数 $g = 10000$ までの実験を行った．進化計算では変異は 0.8 の確率で起こり、それぞれの確率を交叉 0.3，接合 0.3，突然変異 0.4 とした．変異しない場合は親個体をそのままコピーする．また、エージェントの視界は捕食者が 5000，被食者を 700 と設定したため、被食者は捕食者が一定の距離に近づかないと捕食者を認識できない．

4.2 防衛戦略の創発

$l = 0$ ， $l = 100$ ， $l = 1000$ と値を変えて実験を行い適応度推移を調べたところ、被食者の適応度が上昇し、捕食者の適応度が下がる傾向が多く見られた (図 3)．これは、被食者が進化によって何らかの防衛戦略を得て、それによって捕食者から逃られるようになったことを示している．被食者の挙動のパターンを調べたところ、基本的な 2 種類の防衛戦略とその戦略を持ちたいいくつかのタイプの被食者が創発したことがわかった．一つ目の戦略は「逃走」戦略である．これは捕食

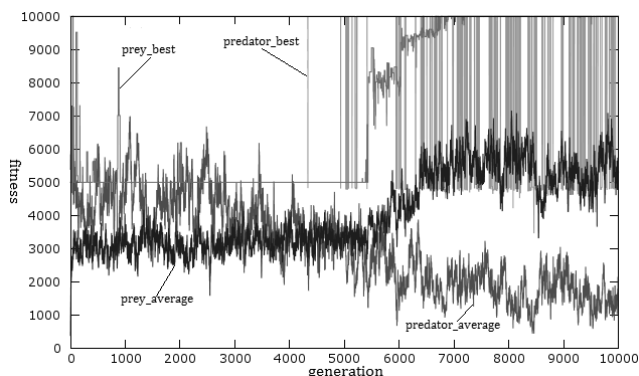


図 3: 適応度の推移

者から逃げる戦略であり主に行動によって戦略が成り立っている．素早く移動することが出来る形態と行動をもったものや、センサーによって捕食者を認識していて、捕食者が遠い位置にいるときには何もしないが、近寄ってくると反対の方向に逃げる個体などが創発した．その際直線的に逃げるのではなく、複雑な経路を取りながら逃げる個体 (図 4) も生まれた．これら個体は、移動することで高い適応度を得ることが出来る $l = 100$ や $l = 1000$ で多くみられた．

二つ目の戦略は「防御」戦略であり、形態の違いによって Turtle, Clam, Tower の 3 つのタイプ (図 5) がある．この戦略をとる被食者は、メインパーツを捕食者に触れられた場合に捕獲されるため、それを防ぐためにメインパーツを他のパーツで防御し、捕食者に触れられないような形態をとっている．Turtle 型は、メインパーツの周囲に他のパーツを付けており、捕食者は周囲のパーツに妨害されて中心のメインパーツに触れることができない．Clam 型は 2 つの大きなパーツで小さなメインパーツを挟みこんでおりメインパーツは外部にほとんど露

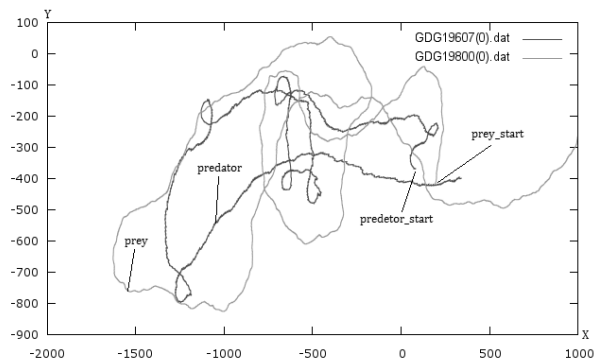
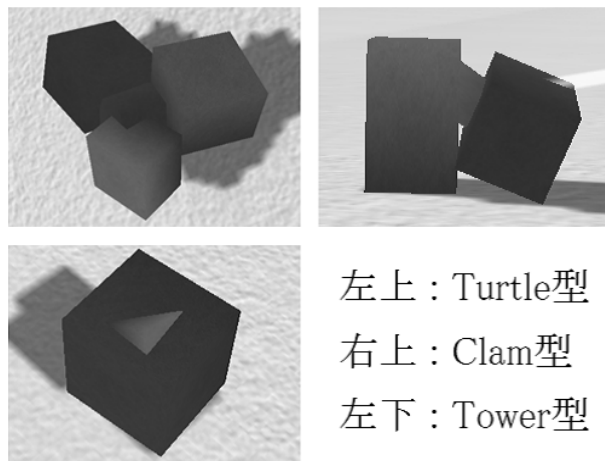


図 4: エージェントの移動の軌跡

出してないため、Turtle タイプと同様にメインパーツに捕食者が触れることができない．Tower 型は大きなパーツの上部に小さなメインパーツが乗っており、捕食者はメインパーツに届かず、土台のパーツも倒すことができないため、捕獲されなくなっている．特に Tower 型は初期配置の高さを固定した場合のみ創発したタイプであり、まったく動かない代わりに、試行開始の落下後に必ず直立するようなパーツ配置になっている．これらの「防御」戦略を持つ各タイプの個体は、個体自身



左上: Turtle型
右上: Clam型
左下: Tower型

図 5: 防御戦略をとる被食者

が持つ形態のみで戦略が成り立っており、行動を必要とせず捕食者から逃れることが出来る．そのため移動しなくても高い適応度を得ることが出来る $l = 0$ でよく見られた．

一方、 $l = 1000$ といった適応度を得るために移動が必要となる場合は、これら「防御」戦略を持ち、メインパーツを防御しつつうまく移動して、より高い適応度を得る個体が創発した．移動可能で捕獲されないという点では、「逃走」戦略によく似ているが、「逃走」戦略は捕食者と接触した場合、捕獲される可能性がある形態であるのに対して、これらの個体はたとえ捕食者と接触しても捕獲される可能性が非常に低い形態をしている．そのため、「逃走」戦略を持つ個体が捕食者の位置を気にしそちらへ向かわないように移動しているのに対し、これらの個体は捕食者を気にせず、捕食者に向かって自由に移動していた．

これらの捕獲を防ぐ形態を持ちながら、移動によってより

高い適応度を得る個体がどのように創発したか、典型的に見られた適応度の推移 (図 3) から被食者の進化の過程を追って観察した。各世代で最も適応度の高い個体を観察すると、まず 4000 世代では移動しない Turtle 型の個体が生まれ、5000 世代で Clam 型となった。捕獲されない形態を持っているために 5000 の適応度を得ることができているが、移動できないため残り 5000 の適応度を得ることはできていない。その後、5500 世代以降で移動が出来るようになり、それに従って適応度は 10000 まで上昇した。このように、まず形態が進化し、捕食者に捕まらない形態を手に入れた後、それを維持した状態で進化することによって、うまく移動でき、かつ捕獲されないような行動を手に入れたことが分かった。ただ、先に移動出来るようになり、その後捕食者に捕まらない形態を手に入れる個体はほとんどなかった。これは移動が可能になった時点で、「逃走」戦略に近い行動がとれるようになるため、それだけで捕獲されなくなればわざわざその後には防御戦略に適した形態を取る必要性が無いためであると考えられる。

一方捕食者は、世代が進むにつれて形態は少々変化したが基本的な初期の捕獲方法を維持したままだった。今回は捕食者と被食者の共進化モデルを用いて実験したが、被食者は明確に進化し戦略を、被食者の進化に対して、捕食者がその防御戦略に対して有効な進化が生じ、互いに適応度を上昇させるといった現象は見られなかった。試行世代数が短いこともあるが、一度強力な防御戦略が生まれてしまうと、捕食者がそれに対抗する有力な手段を見つけられずに、適応度が低下した状態のまま試行が終了してしまう現象が多くみられた。また、同じ世代の被食者捕食者の間で対戦を行うため、過去の個体と対戦させた場合、容易に捕獲されてしまう場合もあった。

4.3 自然界の生物との比較

今回創発した戦略は自然界でもよく見られる防御戦略である。

「逃走」戦略は自然界の多くの被食者が行う二次防御の戦略であると考えられる。ジグザグな複雑な経路で逃げる被食者やまっすぐに逃げる被食者が生まれたが、どちらも自然界の生物にはよく見られる逃走方法である。

また、「防御」戦略は二次防御の退却に相当すると考えられる。自然界で例を挙げると各種の貝やアルマジロといった生物が取る行動である。退却を行う生物は、柔らかい部位を自身の硬い部位で守り捕食者に捕獲されないようになっている。今回のシミュレーションで生まれた被食者も、自分のパーツを殻のようにメインパーツに被せることで、捕食者がメインパーツに触れるのを妨害して、自身を守っている。

今回のモデルでは、開始位置の関係で捕食者は必ず被食者を発見できるようになっているため、捕食者に発見されない一次防御は絶対に創発しない。しかし、自然界で一次防御の隠遁を行う生物の中には巣穴を構築し、その中に引きこもる者もいる。彼らは捕食者の目に触れず、巣穴の中に捕食者が到達できないため一次防御となっているが、巣穴があることで、捕食者に存在は示していると考えられる。ところで、今回創発した Tower 型戦略は環境 (開始ステップ時の高さ) を利用し絶対に捕食者が到達できない場所にメインパーツを置くことで身をも守っている。これは一次防御の隠遁によく似た防御行動と考えることができる。

5. おわりに

本研究では防御戦略における被食者の行動と形態に焦点を当て、進化によってどのような防御戦略が創発するかについて調べた。3次元物理空間上で仮想生命体を進化させるために、

Morphid Academy を用い、捕食者と被食者の共進化モデルを構築し、進化の過程を観察した。

捕食者と被食者ののが対戦する共進化の中で、被食者は自身の形態と行動を進化させ、捕食者から移動して逃げる「逃走」戦略と、自分の身を自分のパーツで守る「防御」戦略という2つの基本的な防御戦略が生まれた。これらの基本的な戦略の中で、さらに特徴的なくつものタイプが存在し、多様な防御戦略が創発したといえる。さらに移動可能な「防御」戦略が進化の中でどのような過程をたどって創発したかを観察することが出来た。このことから今回観察された防御戦略は実際の自然界に存在する生物によく似たものであり、自然界の生物がとる各種の防御戦略が捕食者との共進化において、その形態と行動を共進化させることによって発達した可能性を示している。

また、Tower タイプの個体は特定の環境下でしか存在しない個体だった。そのため、各種の防御戦略はその環境に応じた、最適な戦略を取るよう進化し、特に複数の防御戦略が生存可能な環境下ではそれらの中間に属する防御戦略が創発し、さらなる多様性が生まれる場合がある可能性がある。

今後の研究の課題としては、捕食者被食者の共進化系がどのように推移するか、互いに進化し続けるような系がどのような条件下で生じるかについて、形態と行動が進化するモデルを用いて調べることを考えている。また、生物の形態と行動どちらの変異をきっかけにして有用な防御戦略が生まれ、それがどのような進化をたどっていくのかについて理解を得たい。

発展的な課題としては現在のエージェントと捕食者が一対一である環境を拡張した、多対多の環境でのシミュレーションが挙げられる。そうすることで自然界に見られるような協調的な群れ行動と何らかの関連性のある防御戦略が創発し、その進化の過程や特徴が解明できる可能性がある。

参考文献

- [1] M. Edmunds. Deffence in Animals Behaviour. Longman Group Limited (1974).
- [2] A. Manning. An Introduction to Animal. Cambridge University Press (1972).
- [3] K. Sims. Evolving Virtual Creatures. 21st Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH 94), New York, NY, USA, pp. 15-22. (1994).
- [4] Pilat, M. L. and Jacob, C.. Creature Academy: A System for Virtual Creature Evolution. In Proceedings of the IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC 2008), pp. 3289-3297. IEEE (2008).
- [5] Pilat, M. L. and Jacob, C.. Evolution of Vision Capabilities in Embodied Virtual Creatures. In Proceedings of the 12th annual Conference on Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO 2010), pp. 95-102. (2010).
- [6] Chaumont, N., Egli, R., and Adami, C.. Evolving virtual creatures and catapults. Artificial Life, 13, pp139-157. (2007).