

捕食者・被食者間相互作用に基づく カラーパターン進化の解析

小鹿 明德[†] 有田 隆也^{††} 横井 茂樹^{††}

自然界に存在する生物の体表の模様は、蝶の羽に典型的に見られるように非常に多様である。これらの模様は偶然性のみによって作られたものではなく、その生物の生息する環境や生存競争により、自分にとって有利な模様へと進化した結果と解釈することができる。本研究では、このような進化を引き起こす要因として捕食者と被食者間の相互作用に着目し、その共進化メカニズムを抽象化し、カラーパターンを生成、進化させるモデルを設計し、人工生命的手法を用いた創発システムを計算機上に実現した。それに基づき、カラーパターン生成における共進化のダイナミクスを解析する。

Analysis of Color Pattern Evolution Based on the Interactions between Predators and Prey

AKINORI OJIKI,[†] TAKAYA ARITA^{††} and SHIGEKI YOKOI^{††}

Surface patterns of Organisms that exist in nature are various, — for example those of butterflies. These patterns have been created not only by random processes but also by evolutionary processes based on the interactions between predators and prey. This paper reports our efforts to abstract the evolutionary mechanism of color pattern generation and color pattern recognition, and to construct a model in which coevolutionary dynamics automatically generates such various color patterns as is observed in nature one after another.

1. ま え が き

人工生命研究はまだ新しい研究領域であるが、早い時期から、簡単なルールで規定された要素間の相互作用から創発する複雑なパターンは興味の対象であった。たとえば、セルオートマトンを用いて、Langton, C.¹⁾ は自己組織的な振舞いの創発を観察し、また、Packerd, N.²⁾ は雪の結晶の成長によく似たパターンを導いている。また、受精卵が細胞分裂を繰り返し個体を生成する過程をモデル化した Lindenmayer, A.³⁾ の L システムは主に植物をコンピュータグラフィックスで表現する場合に多く利用されている。河口⁴⁾ は単純な図形を再帰的に自己増殖させることにより巻き貝の螺旋やそれが絡み合った複雑な図形、メタボールを利用し蠢きながら複雑に増殖する物体の映像を作り出している。適応進化の力を利用したカラーパターンやコンピュー

タグラフィックスの生成に関する研究は、進化の方向性を決める要因によって主に次の2種類に分けることができる。

第1は、要素間、あるいは環境との相互作用に基づいた自然選択によるものである。たとえば、畝見⁵⁾ は自己増殖により成長する複数の仮想生物個体を2次元ユークリッド空間に配置し、互いに衝突しないように成長させるシステムを生成し、個体ごとに彩色することで、複雑なカラーパターンを発生させている。また、Sims, K.⁶⁾ はコンピュータ上の3次元世界にセンサと神経回路網によって複数のブロックを組み合わせた形状を動かすことのできる仮想生物を生成し、1つのリソース(キューブ)の奪い合いをさせることで、仮想生物の形や動きの生成、移動しやすい形を持った個体への進化を行った。

第2は進化の方向性を人間が決める(人為選択)ものである。たとえば、Dawkins, R. のバイオモルフス⁷⁾ はいくつかの線で表された図形から気に入った図形を操作する人が選択することを繰り返すことにより様々な図形を作り出すものである。また、Sims, K. は気に入った画像を複数選択し、選択された画像を生成する

[†] 名古屋大学大学院人間情報学研究所
Graduate School of Human Informatics, Nagoya University

^{††} 名古屋大学情報文化学部
School of Informatics and Sciences, Nagoya University

ための LISP プログラムに対して交叉や突然変化を行うことで、Primordial Dance⁸⁾とよばれる CG アニメーションを制作した。このアプローチは、操作者の主観によって選択が行われるため、コンピュータアートの作品を作る手段に用いられることが多い。

我々は、第 1 の方向性をさらに発展させるために、進化において駆動的な力となってきたと考えられている捕食者被食者間の共進化のダイナミクスを抽象化定式化⁹⁾、それをカラーパターンの生成に応用することを考えた。捕食者被食者間の相互作用による特質や行動の進化を研究するための生態系モデル¹⁰⁾を基にして、位置や移動といった空間的概念を省略する一方、より詳細な視覚による他個体の発見、認識を行う。これにより、捕食者被食者間の共進化のダイナミクスをカラーパターンの進化に利用でき、様々なカラーパターンの自動生成を行う。

本研究では、自然界の捕食者被食者の共進化による体表パターンの進化をモデル化した創発システムにより、カラーパターンを次々に自動生成することが可能であることを示すと同時に、その過程で働くダイナミクスを解析することを目的とする。共進化の結果がカラーパターンとして視覚的に表されるので、共進化メカニズムや創発現象の解明が容易になることが期待できる。

本論文では、このようなシステムを設計し、実験およびその結果の解析を行う。

2. システム設計

2.1 原理

自然界に存在する生物の体表の模様は、偶然性のみによって作られたものではなく、その生物の生息する環境や生存競争により、自分にとって有利な模様へと進化した結果と解釈することができる。本研究で設計・実現する創発システムではカラーパターンの発生進化のメカニズムとして、自然界で進化を引き起こす 1 つの要因とされる捕食者・被食者の相互作用を利用する。

捕食行動は、遭遇、検出、識別、接近、征服、消費の 6 行程に分けることができる¹¹⁾。被食者は、この 6 行程をなるべく早い段階で防御しようとする。一方捕食者は、被食生物の防御をかわし、なるべく早くこの行程を終了させようとする。

本研究では、検出、識別の 2 行程に着目した。これらの行程での被食者の捕食防御行動やそれに対する捕食者の防御回避行動には、背景との同化や他生物種への擬態などがある。たとえば、虎の縞模様は林の中で目立たなくするためのものであり、また、蛾の羽など

にみられる丸い模様は大きな鳥の眼を連想させ襲われないためのものである。

本研究で示すシステムでは、種間の捕食被食関係が任意に設定された複数の種のいずれかに属する仮想生物が、それぞれ、自分の体表パターンだけでなく、認識、識別のためのカラーパターンも持っており、認識の正確さおよび体表パターンの検知されにくさに基づいた遺伝的操作によって世代交代を行っていく。これにより、仮想生物が、被食者としては、他種の仮想生物に認識されない（同種の仮想生物に認識される）ように、また、捕食者としては、他種、同種の仮想生物を正しく認識するように、体表カラーパターン、および、認識、識別用のカラーパターンを進化させていく。

2.2 システム概要

設計したモデルの概要を図 1 に示す。

個体は、発生機構と認識機構を持っている。発生機構では、各個体が持っている 5 つのパターン発生規則を基に 5 つのカラーパターンを生成する。1 つは自らの体表パターンとして使われ、残りは相手認識用のパターンとして認識機構に送られる。認識機構は遭遇した相手の体表パターンと自分の相手認識用パターン 4 種とを比較し、相手が捕食者、被食者、同種、背景（生物なし）のいずれであるかを判断する。この認識操作をすべての生物個体どうしの組合せ、およびすべての生物と背景の組合せで行う。

認識操作が生物どうしの場合、この 2 体が互いに認識を行い、互いの認識結果から得失点が与えられる。生物-背景の場合は、自分の認識結果のみで得失点を行う。

相手認識を基に得られた得点は進化機構へと送られ、次世代個体の生成に用いられる。全認識操作が終了後、各種ごとに次世代を生成する。まず、総得点の最も多い個体 1 体はそのまま次世代に残す。残りの個体は総得点を基にルーレット選択を行い決定する。ルーレット選択によって選ばれた個体のパターン生成規則に対して、突然変異操作を施し、それらを次世代個体とする。

以下に各操作の詳細を述べる。

2.3 パターン発生

パターン発生規則に用いられるパターン生成文法は $G = \{\Sigma, C, P, L, \omega, d\}$ で表される。 Σ はパターン発生時の状態を表す記号の集合、 C はパターンに採色される色の集合を表す。

$$\Sigma = \{s_1, s_2, \dots, s_m\}$$

$$C = \{color_1, color_2, \dots, color_m\}$$

P は状態書換え規則の集合、 L は Σ から C への

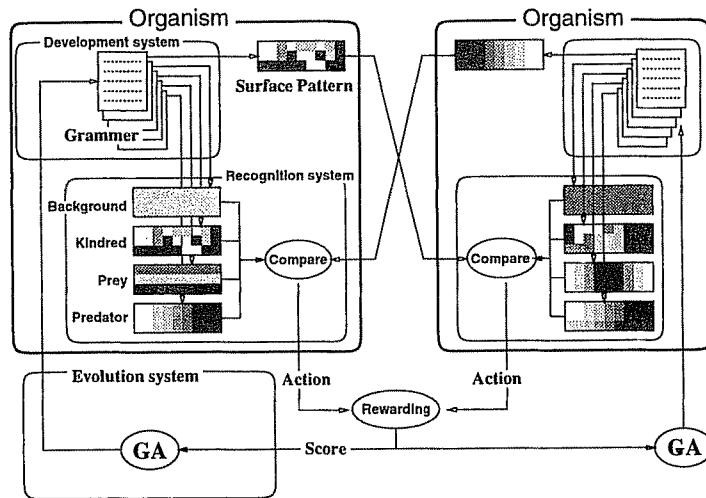


図1 カラーパターン進化モデル概要

Fig. 1 Evolutionary model for color pattern generation.

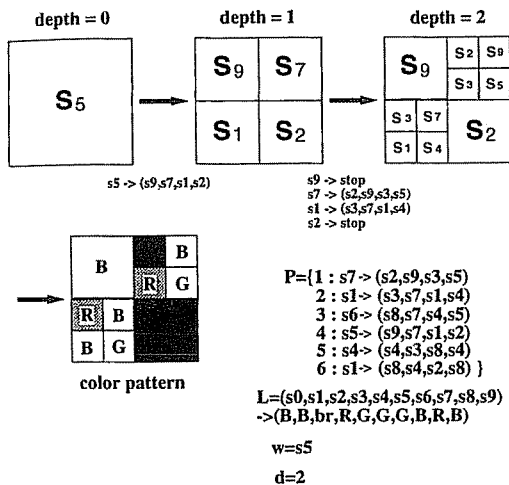


図2 パターン発生例

Fig. 2 Example of pattern development.

関数で最終的に採色される色の割当てを決定する。 ω は初期状態, d は生成されるパターンの深さを表す。

$$P = \{ 1 : a_1 \Rightarrow (b_{11}, b_{12}, b_{13}, b_{14})$$

$$2 : a_2 \Rightarrow (b_{21}, b_{22}, b_{23}, b_{24})$$

$$\vdots$$

$$k : a_k \Rightarrow (b_{k1}, b_{k2}, b_{k3}, b_{k4}) \}$$

$$L = (s_1, s_2, \dots, s_n) \rightarrow (c_1, c_2, \dots, c_n)$$

$$a_i, b_{ij}, \omega \in \Sigma \quad (i = 1, \dots, k) \quad (j = 1, \dots, 4)$$

$$c_i \in C \quad (i = 1, \dots, n)$$

パターンの発生の様子を図2に示す。

同図では、まず、始めに四角の領域を初期状態 (ω)

の s_5 で指定する。このときの深さを0とする。

次に状態書換え規則 P から、左辺が s_5 となる規則を探す。この時4番目の規則が見つかるので、四角の領域を 2×2 の小領域に分割し、それらに規則の右辺である s_9, s_7, s_1, s_2 を割り当てる。このときの深さを1とする。次に、それらの小領域に同様の操作を行う。 s_7 の領域は s_2, s_9, s_3, s_5 の小領域に分割される。左辺に s_9, s_2 を持つ規則が P には存在しないので、この領域はそれ以上分割は行わない。左辺が s_1 となる規則は2つ存在するが、このような場合は通し番号の小さい $s_1 \rightarrow (s_3, s_7, s_1, s_4)$ が採用される。以下これを繰り返し深さが最大深さ d になると、状態書換え規則 L を用いて採色し、カラーパターンを生成する。

本パターン生成アルゴリズムは、受精卵が細胞分裂を繰り返し個体を生成する様子から着想したLシステム³⁾を矩形領域が彩色可能となるようにしたものであり、遺伝子のわずかな変化でパターンが大きく変化する、遺伝子からパターンの予測が困難といった特徴を持つ。

2.4 認識アルゴリズム

自分の持つ相手認識用のパターン(捕食者, 被食者, 同種, 背景用の4種)と, 相手の体表パターンとを比較し, 最も似ているものを選択し, それを相手の種と認識する。

本研究では, 解析の簡単化のために, 色が一致するドットの数に相似の度合と考え, それが最も多いものを相手の種と認識する。

図3の例では, 相手を餌生物であると認識する。

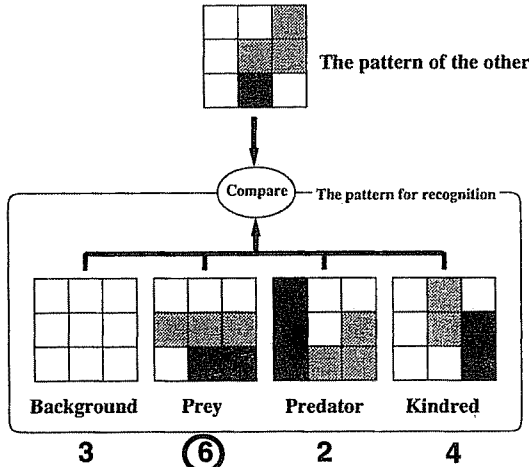


図3 相手認識例

Fig. 3 Example of pattern recognition.

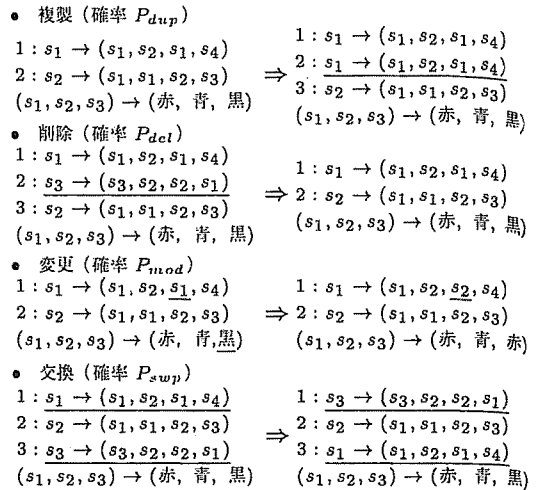


図4 突然変異の例

Fig. 4 Example of mutation.

2.5 得失点

認識結果に応じた得失点は次のような傾向を考慮して決定する。

1章で述べた捕食行動のうち、検出、識別、接近の行程で、生物がとる行動は、被食者側は「周りの景色に同化」「他生物の真似」「捕食者より先に相手を発見、逃避」といったものが考えられる。捕食者側の行動は「わずかな違いも発見できる認識機能の獲得」「被食者による発見を避ける同化や疑態」などがあげられる。このことから、生物は次のような傾向を持つと考えられる。ここで、X、Y、Zという3種があり、ZはXを捕食し、XはYを捕食すると仮定し、また、個体x、x1 (x ≠ x1) がXに、個体yがYに、個体zがZにそれぞれ属するとすると、

- xはzに正しく認識させない (目立たなくする)
- xはzを正しく認識する (逃避する)
- xはyに正しく認識させない (目立たなくする)
- xはyを正しく認識する (接近して捕食する)
- xはx1に正しく認識させる (目立つようにする)
- xはx1を正しく認識する (接近して繁殖する)

したがって、得失点ルールを決める基本的な方針は以下のように設定する。

- 同種および他種を正しく認識した場合は得点
- 同種から正しく認識された場合は得点
- 他種が自分の認識を誤った場合は得点
- 上記以外は失点

2.6 突然変異操作

次世代個体生成時にパターン発生規則に対し以下のような突然変異操作を行う。

複製 確率 P_{dup} で状態書換え規則を複製する。

削除 確率 P_{del} で状態書換え規則を削除する。

変更 確率 P_{mod} で状態書換え規則の要素、初期状態、状態色変換規則をそれが取り得る値に変更する。

交換 確率 P_{swp} で他の状態書換え規則と通し番号を交換する。

上記4つの突然変異操作の例を図4に示す。

3. 実験と解析

上記のモデルを計算機上を実現し実験を行った。システム内の生物種は捕食者・被食者の関係を持った2種、個体数は各25体とする。Σ、Cおよびdはシステムで共通とし、それぞれ $\Sigma = \{s_0, s_1, s_2, \dots, s_9\}$, $C = \{\text{赤, 青, 緑, 黒}\}$, $d = 6$ とする。突然変異確率は4種類一律で0.01とする。背景は、解析の簡単化のために、本論文では黒1色とする。

得失点は表1を採用する。同表は、認識を行う個体と認識される個体の種により4つの場合に分けられている((a)被食生物による捕食生物の認識、(b)捕食生物による被食生物の認識、(c)同種間での認識、(d)生物個体による背景の認識)。たとえば、認識を行う個体が被食生物であり認識される個体が捕食生物の場合は表1(a)を用いて得失点を行う。仮に認識を行う個体(被食生物)が、相手個体(この場合は捕食生物)を餌生物であると認識し、相手個体が自分を同種であると認識した場合には被食生物は-2という得点が得られる。同様に相手個体である捕食生物には表1(b)を用いて0の得点が与えられる。認識する相手が背景の場合は自分の種にかかわらず、自分の認識結果のみで得失点が決定する。同表は、2.5節で述べた方針に

るために、フェロモンを分泌するエージェントであるエリートが得たユニークな巡回路の数と、そのうちランダム選択による枝を含む巡回路の数を反復回数1,000までについて調べた。

AS_{rank} だけの場合 (図3) は、選ばれる巡回路が1つに収束してしまい、新しい枝が選ばれることがなく、集中化が強く働きすぎていることが分かる。

ランダム選択率を0.01とした場合 (図4) は、 AS_{rank} だけの場合と同様に、選ばれる巡回路が1つに収束してしまいが、ランダム選択によってその時点における最良解が選択される場合があるということが観察された。しかし、最良解の更新をすることがあっても、エリートによる巡回路の数が増えていかないということから、フェロモンの状態の多様性を十分に高めるまでには至っていないと考えられる。

ランダム選択率を0.1とした場合 (図5) は、エリー

トによる巡回路はほとんどがランダム選択を含むようになった。この状態では、明らかに優良な解の一部となりえない枝にもフェロモンが分泌され、フェロモンの多様性がフィードバックを崩しすぎていると考えられる。

非常に良い結果を出したランダム選択率0.05の場合 (図6) では、ユニークな巡回路数が5付近で、フェロモンの多様性が保たれていることが分かる。しかもランダム選択率0.1のときのようにランダム選択を含む巡回路ばかりでなく、ランダム選択を含まない巡回路が存在している。ランダム選択による枝を含む巡回路の出現頻度は細かく振動しながらも、ある程度の割合で存在しつづけている。

4.4 最良解探索のメカニズム

ランダム選択が良解を生成するメカニズムとして次の2つが考えられる。

- ランダム選択による枝が含まれた巡回路が良い解となる。
- ランダム選択による枝にフェロモンが分泌され、後の世代において、そのフェロモンが蓄積している枝を含む巡回路が良い解となる。

この2つのメカニズムについて議論し、特に最良解の更新時にこのメカニズムが有効に働いているかを解析するために、最良解更新時のランダム選択の役割について、最も良い結果を得たランダム選択率が0.05の場合の10試行について調べた。

まず、最良解更新時にランダム選択が使われているかという点について、最良解更新時に、その巡回路を構成する枝にランダム選択による枝が含まれているか

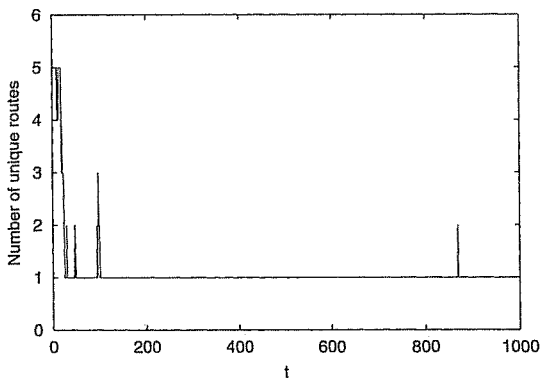
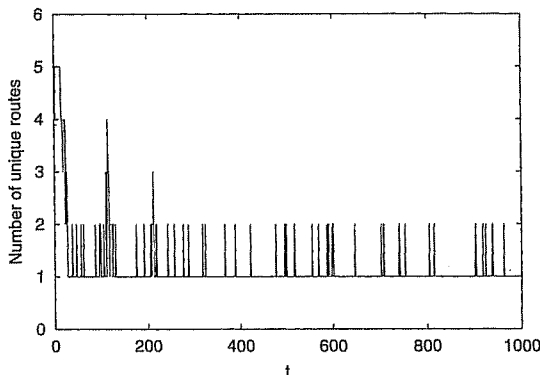
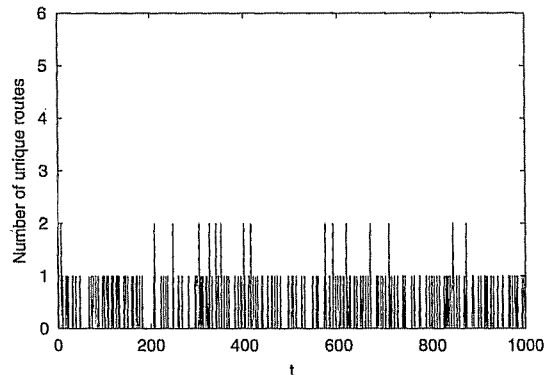


図3 エリートによるユニークな巡回路数 (AS_{rank})

Fig. 3 The number of unique tours generated by elite agents.



(a) Total



(b) Random Selection

図4 エリートによるユニークな巡回路数とランダム選択に基づく巡回路数 (ランダム選択率0.01)

Fig. 4 The number of unique tours generated by elite agents and the number of tours including branches selected by random selection generated by elite agents (random selection rate $r = 0.01$).

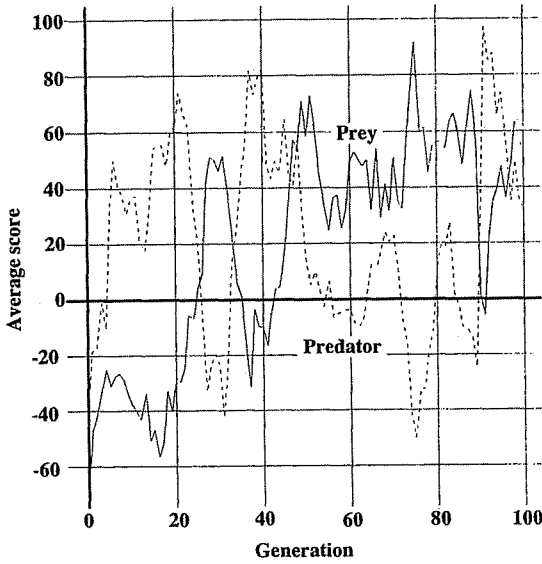


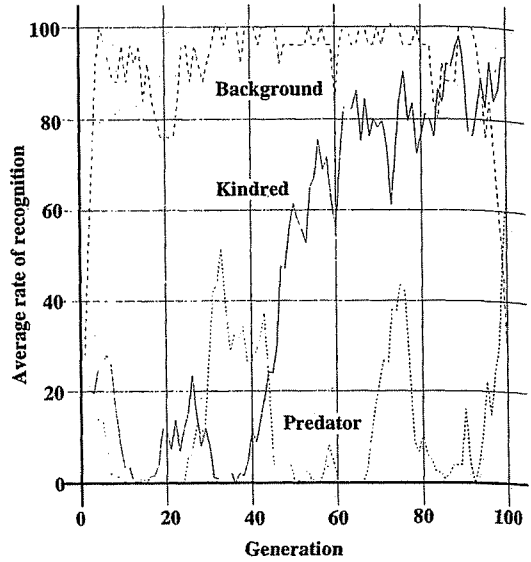
図7 平均得点の変化
Fig. 7 Score of both organisms.

は40世代頃にも見られる。また80世代頃には捕食者が背景(生物なし)と判断するパターンに、被食者がその体表パターンを変化させ(図6矢印(5)),捕食者から発見されないようにしている。一方、捕食生物は20世代頃に体表パターンを緑色系パターンから赤色系パターンに変化させている。同時期、被食生物は赤色系パターンを同種であると認識している(図6矢印(1))。これにより被食生物が捕食生物と同種の判別が不可能となり、捕食生物にとって捕食に有利になると考えることができる。また70世代頃には被食生物が餌生物と間違っして認識するパターンに体表パターンを変化させ、その結果得点を得ている(図6矢印(4))。

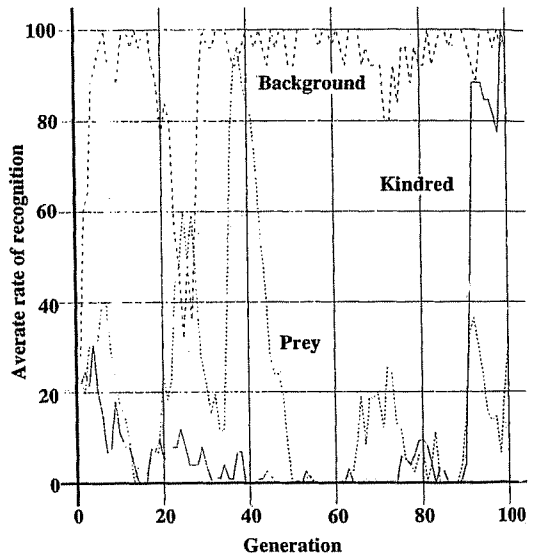
図7に総得点の変化を示す。横軸は世代、縦軸は平均総得点を表している。同図から捕食生物と被食生物は逆の変化をしていることが分かる。つまり、ある種が自分に有利になるように進化すれば、相手種にとっては不利になる、すなわち、相手にとって不利になるように進化を行っていると考えられる。

図8に認識率の変化を示す。横軸は世代、縦軸は平均認識率を表している。同図より、両種とも背景の認識率は高いことが分かる。これは、背景が黒1色という単純なパターンで時間によって変化しないためであると考えられる。また、捕食生物の被食者認識率および被食生物の捕食者認識率が図7で示した得点の変化と同じような変化を行っているところから、これが得点に最も影響を与えていると考えられる。

図9に状態書換え規則の数の変化を示す。横軸は世



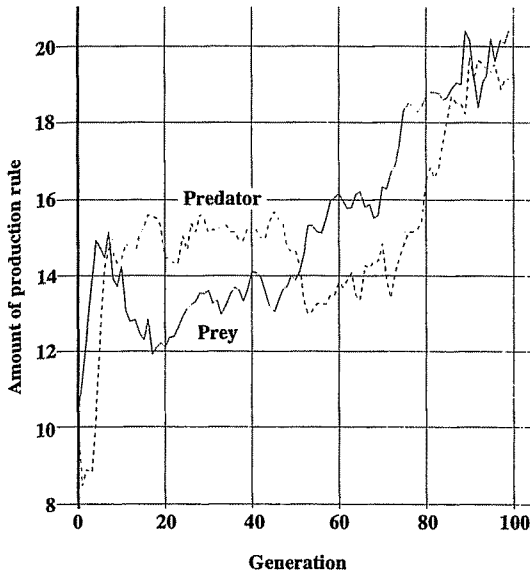
(a) 被食生物
(a) Prey



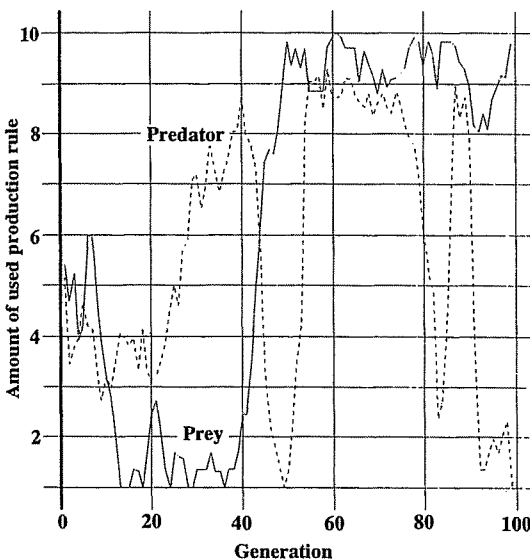
(b) 捕食生物
(b) Predator

図8 平均認識率の変化
Fig. 8 Recognition rate of both organisms.

代、縦軸は各種の体表パターンを生成するために用いた状態書換え規則の数(平均)を表している。図9(より、状態書換え規則の総数は両種とも増加していることが分かる。図9(b)には、パターン生成時に使われている状態書換え規則の数の変化を表す。同図より、使用された状態書換え規則の数が増加の傾向にすることが分かる。使われた状態書換え規則の数は、



(a) 全規則
(a) All rules.



(b) 使用された規則
(b) Used rules.

図9 状態書換え規則の数の変化
Fig.9 Number of production rules.

れによって生成されるパターンの複雑さに影響していることから、複雑なパターンが進化してきたことの表れと考えることができる。

4. む す び

生物の捕食/対捕食行動における共進化の力を利用してカラーパターンの自動生成を行う進化システムを

設計した。実験の結果、他生物への擬態や背景との同化などの相手にとって不利となるように体表パターンを次々と変化させる現象が観測され、共進化に基づいたカラーパターンの遷移が確認された。

本論文では、原理を提示することを目的としたため、生物種を2種類とし捕食者被食者として固定し、背景パターンを黒1色のものとし、パターン発生や相手認識のアルゴリズムもきわめて簡単なものを用いたが、種を増やし食物網を複雑にしたり、背景に自然の風景を使う、アルゴリズムをより生物に近い手法を採用するなどの変更を加えることにより、より複雑でダイナミックな現象が観察でき、より興味深いパターンが生じることが期待される。これについては現在検討中である。また、実在の生物の進化をどこまで説明できるかという検証に関しては検討課題であるが、たとえば、本システムの仮想生物が持つパターン生成には用いられなかったパターン発生規則が、将来における相手パターンの急激な変化に追随するための速度の維持や、多様性の保持に関して役立っているという可能性を検討することは興味深いと思われる。

得失点の規則も実際の捕食行動に基づいて設定したが、その設定を変更することによりパターンの動的変化が大きく変わることが予想される。得失点規則とその結果の関係を解析することにより、生成されるパターンの傾向を制御できるようになると考えられる。そこで、人間が直接記述するのが困難なパターンを指定する手法を確立することにより、デザインやアミューズメント等の分野への応用も可能であると思われる。

参 考 文 献

- 1) Langton, C.: *Artificial Life, Artificial Life*, Langton, C.G. (Ed.), pp.1-47, Addison-Wesley (1986).
- 2) Packard, N.: *Lattice Models for Solidification and Aggregation, Proc. 1st International Symposium for Science on Form*, pp.95-101 (1985).
- 3) Lindenmayer, A.: *Developmental Systems without Cellular Interactions, Their Languages and Grammars, J. Theor. Bio.*, 30, pp.455-484 (1971).
- 4) 河口洋一郎: 人工生命芸術のはじまり, 人工生命—情報と生命とCGの交差点, 人工生命研究会(編), pp.109-126, 共立出版(1994).
- 5) 畝見達夫: 遺伝的アルゴリズムとコンピュータグラフィックスアート, 人工知能学会誌, Vol.9, No.4, pp.42-47 (1994).
- 6) Sims, K.: *Evolving 3D Morphology and Be-*

- havior by Competition, *Artificial Life IV*, Brooks, R. and Maes, R. (Eds.), pp.28-39, MIT Press (1994).
- 7) Dawkins, R.: *The Blind Watchmaker*, Longman, Essex (1986).
- 8) Sims, K.: Artificial Evolution for Computer Graphics, *Computer Graphics*, Vol.25, No.4, pp.319-328 (1991).
- 9) Arita, T. and Ojika, A.: Generation of Color Patterns Based on the Interactions between Predators and Prey, *IEEE International Conference on Evolutionary Computation*, pp.291-294 (1996-5).
- 10) 有田隆也, 小鹿明德: 捕食関係の定められた生物種の仮想生物の進化に関する検討, 第6回自律分散システム・シンポジウム, pp.181-186 (1995-1).
- 11) Endler, I.A.: Defence against Predators, *Predator-prey Relationships*, Feder, M.E. and Lauder, G.V. (Eds.), pp.109-134, University of Chicago Press (1986).

(平成9年1月8日受付)

(平成9年6月3日採録)



小鹿 明德

1971年生. 1994年名古屋工業大学工学部電気情報工学科卒業. 1997年名古屋大学大学院人間情報学研究科博士課程前期課程修了. 現在, 同研究科博士課程後期課程在学中. 人

工生命の研究に従事.



有田 隆也 (正会員)

1960年生. 1983年東京大学工学部計数工学科卒業. 1988年同大学大学院工学系博士課程修了. 工学博士. 同年名古屋工業大学工学部電気情報工学科助手. 1993年講師. 1994年名古屋大学情報文化学部社会システム情報学科助教授, 現在に至る. 1995~1996年米国UCLA客員研究員. 並列計算機の研究に従事. 複雑適応系, 特に人工生命手法に基づく知能や言語の進化モデルに興味を持つ. IEEE, 電子情報通信学会, 日本認知科学会などの会員.



横井 茂樹 (正会員)

1977年名古屋大学大学院工学研究科博士課程修了. 同年同大学工学部情報工学科助手. 三重大学工学部電子工学科助教授, 名古屋大学工学部情報工学科助教授を経て, 1993年名古屋大学情報文化学部自然情報学科教授, 現在に至る. コンピュータグラフィックス, パーチャルリアリティ, マルチメディアなど, 映像を中心とした情報メディア技術とその社会的影響に関して研究を行っている. 主な褒賞: 市村学術賞貢献賞, 日本ME学会論文賞.