

捕食者-被食者生態系における魚の群れのシミュレーション

日大生産工（学部） ○佐藤大輔 日大生産工 吉田典正

1 まえがき

映画やゲームなどの作成において、魚や鳥などの群れの動きを自動的に生成する手法は不可欠なものとなっている。そのような手法としてCraig ReynoldsによるBoidアルゴリズム¹⁾が有名である。従来の研究²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾は主として群れの動作に関するものが多く、二つの種類の群れが互いに影響を及ぼし合いながら、個体数を時間と共に変動させるようなシミュレーションを行う研究は行われていない。本研究では、捕食者と被食者の二種の魚（生物）が、Boidアルゴリズムに基づいて群れを作りながら行動し、捕食行為と出産・成長・死亡のサイクルを繰り返しながら、数理生態学⁷⁾におけるロトカ・ヴォルテラの式に基づいて個体数を変化させる手法を提案する。また、シミュレーション中に使用者が個体数の変化を行えるようにすることで、人とソフトとの対話性を考慮したアプリケーションの作成を行う。

本研究では、現実の状況に近いということを目的とするのではなく、映画やゲームなどで有用になるように、制御可能な形で時間と共に個体数を変化させることを目的とする。

2 Boid アルゴリズム

Boidアルゴリズム¹⁾とはCraig Reynoldsによって1986年に提案されたもので、群れを成す個体すべてに次に示す共通の簡単な3つのルールを与え、この3つのルールが各個体間に相互作用することで群れを形成させるアルゴリズムである。

① 結合 (Cohesion)

仲間の群れの中心に向かう処理。

② 引き離し (Separation)

一定距離以上仲間に近づかせない処理。

③ 整列 (Alignment)

仲間の群れと進む方向およびスピードを合わせる処理。

本研究では、魚が泳ぐためのフィールド（本研究の実装では2次元としたが容易に3次元に拡張が可能である）を作成し、その上で捕

食者と被食者の個体群（魚群）がBoidアルゴリズムに基づいて群れを形成しながら移動する。各個体に視野範囲のパラメータを持たせ、周辺環境を認識できる範囲を限定することで、多数の群れや、群れの分裂などを表現する。また、フィールド端に個体が突入するとフィールドの逆端から現れるものとした。

3 ロトカ・ヴォルテラの式

ロトカ・ヴォルテラの式は、互いに競争関係にある群れについての式と、捕食者-被食者関係にある群れについての式がある。前者の式を利用した研究⁶⁾はすでに発表しているので本研究では後者の式を利用する。

捕食者-被食者関係のロトカ・ヴォルテラの式は、捕食者-被食者の関係にある二つの種の群れを考え、ある時刻でのそれぞれの群れの個体数の変移を微分方程式によって表した式である。捕食者-被食者関係のロトカ・ヴォルテラの式を次式に示す。

$$\frac{dN_1}{dt} = (\epsilon_1 - \lambda_1 N_1 - k_1 N_2) N_1 \quad (3.1)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = (-\epsilon_2 - \lambda_2 N_2 + k_2 N_1) N_2 \quad (3.2)$$

t は時刻、 N_i は種 i ($i=1$ or 2)の個体数で、 N_1 が被食者の個体数、 N_2 が捕食者の個体数である。 ϵ_i は内的自然増殖率、 λ_i は種内競走係数、 k_i は種間競走係数である。

式(3.1)または式(3.2)の左辺が0になるとき、その種は他種の個体数が変化しなければ dt 時間先の自種の個体数も変化しない状態となり、その状態を自種的安全安定状態であるという。式(3.1)の左辺を0と置くと、被食者の群れは次式を満たすときに自種的安全安定状態となる。

$$\lambda_1 N_1 + k_1 N_2 = \epsilon_1 \quad (3.3)$$

式(3.2)の左辺を0と置くと、捕食者の群れは次式を満たすときに自種的安全安定状態となる。

$$-\lambda_2 N_2 + k_2 N_1 = \epsilon_2 \quad (3.4)$$

横軸を被食者の個体数 N_1 、縦軸を捕食者の個

体数 N_2 として式 (3.3) を線①, 式 (3.4) を線②で表し, 各グラフにおいて点 A (両種とも 200 の個体数) を初期状態として繰り返しロトカ・ヴォルテラの式を使用して dt 時間先の両種の個体数を求めてプロットするシミュレーションを行うと, 図 1 の (a) から (d) のグラフに分類できる. グラフの左に表示した数値が各グラフのパラメータ値である. また, 線①と線②の傾きは次のようになる.

$$\text{線①の傾き} = -\frac{\lambda_1}{k_1} \quad \text{線②の傾き} = \frac{\lambda_2}{k_2}$$

図 1 の (a) および (b) のグラフより, 捕食者, 被食者ともに個体数を変動させながら線①と線②の交点 (図 1 (a) では点 B, 図 1 (b) では点 C) に収束する. 収束する点, すなわち最終的な両種の個体数は, 両種の ε_i と k_i の値によって容易に制御可能である. また, 線①や線②の傾きによって収束するまでの変動の仕方を制御することができる. グラフ (c) のように, 無限に変動させることや, グラフ (d) のように共存できずに捕食者が絶滅してしまうグラフも容易に作ることができる.

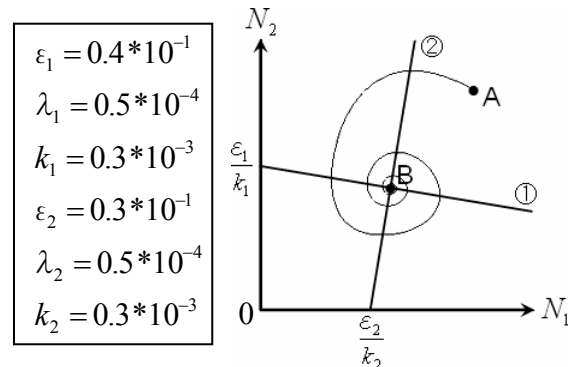
4 捕食行為

各捕食者に空腹値を持たせ, 時間と共に空腹値を減少させる. 空腹値が 0 になると捕食行為が可能となり, 捕食者は被食者を見つけると, 群れから抜け出して被食者を追いかける. 捕食が成功すると被食者のサイズにみあった値を捕食者の空腹値にプラスする.

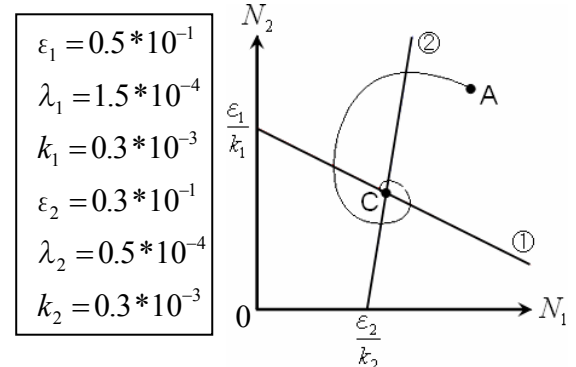
各捕食者および各被食者に体力値を持たせ, 通常の状態では時間と共に体力値を増加させるが, 捕食者は被食者を追いかけるときに, 被食者は捕食者と反対方向へ逃げるときに, 体力値を時間と共に減少させる. 体力値が 0 になると一定時間スピードを遅くさせることで, 捕食の成功と失敗を表現する.

5 出産・成長・死亡による個体数の調整

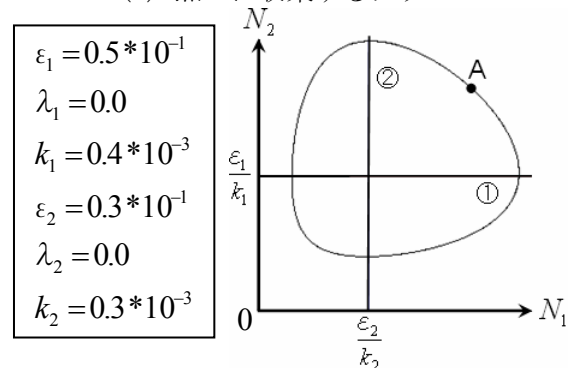
個体は親から産み落とされることによってフィールド上に小さいサイズで出現し, 時間と共にサイズを大きくする事によって成長を表現する. ある程度成長すると, 出産期を経てしばらくして死亡する. 本研究は, ロトカ・ヴォルテラの式によって求めた dt 時間先の個体数に従って現在の個体数を調整しなければならない. 捕食行為によってある程度個体数はロトカ・ヴォルテラで求めた dt 時間先の個体数に調整される. しかし, より正確な調整が必要であるので, 個体に出産・成長・死



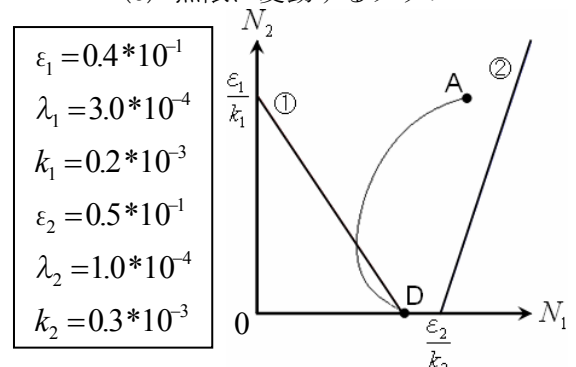
(a) 点 B に収束するグラフ



(b) 点 C に収束するグラフ



(c) 無限に変動するグラフ



(d) 共存できないグラフ

図 1 点 A からのシミュレーショングラフ

亡のサイクルを繰り返させていることを利用し, 個体からの出産数を調整することによって群れの個体数の調整をはかる.

出産数の決定は出産期になった個体がロト

カ・ヴォルテラの式によって求めた dt 時間先の個体数と現在の個体数とを比較して出産数を0から2の範囲内で決定する．すなわち，現在の個体数を x ，ロトカ・ヴォルテラの式を使って求めた dt 時間先の個体数を y としたときに，次の処理を行う．

(1) $x < y$ の場合

群れの出産数を2として個体数増加を促す．

(2) $y < x$ の場合

群れの出産数を0として個体数減少を促す．

(3) $x = y$ の場合

群れの出産数を1として個体数一定を保つ．

個体ごとに生まれる子供の数を変化させたり，産まれる子供の数が3匹以上にしたりすることも可能である．上記のような設定を用いた理由は，個体数の増加，減少，維持をもっとも単純な方法で行うことができる手法だからである．

6 対話的アプリケーションの作成

本研究の目的はゲームや映画などで有用になるようなシミュレーションの作成の他に，教育の場などで群れの個体数の変化を学ぶことを目的としたシミュレーションソフトの作成も検討している．そこで，人とシミュレーションソフトとの対話性を考慮し，本研究では金魚すくいをイメージしてフィールド上から魚を網ですくい上げ，その魚をフィールド上から消すことができるようする．すなわち使用者がある種の群れの個体数を大幅に減少させることができ，その後の両種の個体数変化を学ぶことができる．

7 実行結果

プログラムは VisualC++6.0 を用いて作成した．実行画面を図2に示す．図2の(a)がフィールドの全体像である．フィールドの上に平面を表示し，アルファブレンディングを利用して簡易的に水面を生成した．水面の表示と非表示を簡単に切り替えることができる．(b)は被食者が，(c)は捕食者が群れをなしている様子である．被食者は近くで捕食者を見つけると(d)のように捕食者と反対方向へ逃げ，常に捕食者と一定距離以上を保とうとする．(e)は捕食者が被食者の一匹に狙いを定めて追いかけている様子である．また，(f)のように海面に網を表示して，使用者が好きな位置でクリックすることで網が海面上まで浮上し，(g)のように魚を捕まえることができる．

使用者は捕まえた魚をフィールド上から消し去ることができ，その後の個体数の変化を学ぶことができる．また，魚の尾ひれの動きをGPU(Graphics Processing Unit)で行わせることでシミュレーションの高速化をはかった．

8 まとめ

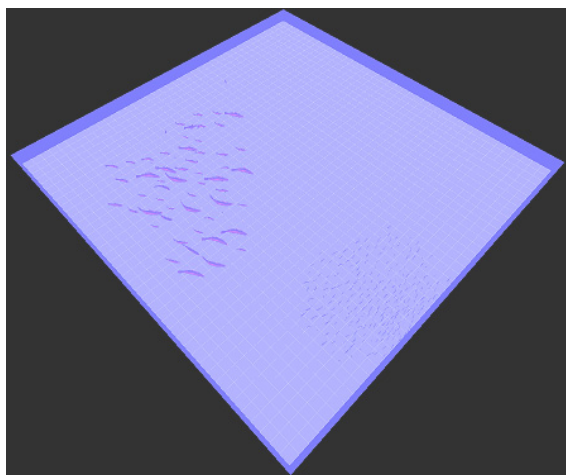
本研究では，捕食者-被食者関係にある二つの群れを想定し，捕食行為と出産・成長・死亡のサイクルによって群れの個体数を時間と共に変化させる手法を提案した．各群れの個体数の制御はロトカ・ヴォルテラの式によって求めた Δt 時間先の個体数に合うように，群れの出産数を制御することによって行った．また，ロトカ・ヴォルテラの式のパラメータを設定することによって，収束する二つの種の個体数や収束までの変動数などを簡単に制御することが可能である．

また，金魚すくいをイメージして，使用者がシミュレーション中に対話的に群れの個体数を変化させることができ，その後の個体数変化を学ぶことができるようにした．

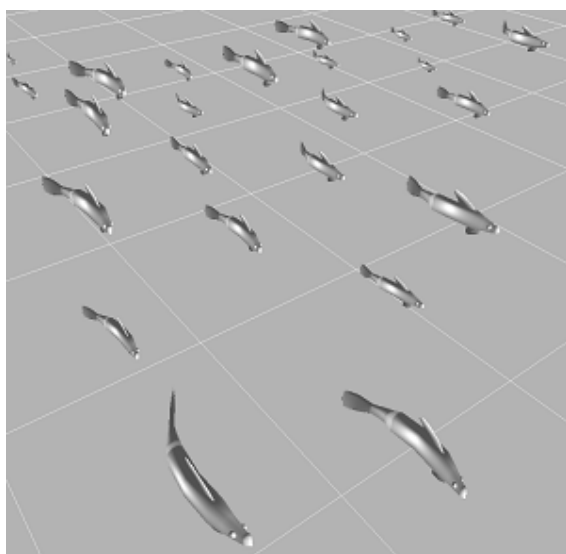
今後の研究としては，増殖の確率過程や年齢構成などの数理生態学の理論を本研究に応用することがあげられる．

参考文献

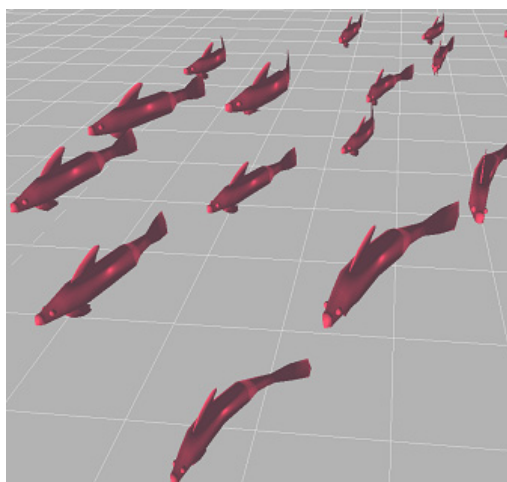
- 1) Craig W. Reynolds, "Flocks, Herds, and Schools: A Distributed Behavioral Model", Computer Graphics (Proc. SIGGRAPH), 21(4), Jul. (1987), pp. 25-34.
- 2) Steven Woodcock, "群れの生成：グループの行動をシミュレーションするシンプルなテクニック", Game Programming Gems, ボーンデジタル, (2001), pp. 295-307.
- 3) D. Terzopoulos, X. Tu, and R. Grzeszczuk, "Artificial fishes: Physics, locomotion, perception, behavior", Computer Graphics (Proc. SIGGRAPH), pp. 43-50, (1994).
- 4) 鶴沼，安生，武内： "群集行動のモデリングー仮想都市空間における人の群れと環境とのインタラクション"，電気学会論文C, Vol. 115, No. 2, pp. 212-221, (1995).
- 5) 松延，水森，蔡， "自己組織化理論を用いた群れのアニメーション作成"，情報処理学会グラフィクスとCAD研究会, 112, (2003), pp. 59-64.
- 6) 佐藤，吉田， "互いに競争関係にある二種の群れのシミュレーション"，情報処理学会グラフィクスとCAD研究会, 115, (2004), pp. 35-40.
- 7) 寺元英著， "数理生態学"，朝倉書店, (2000).



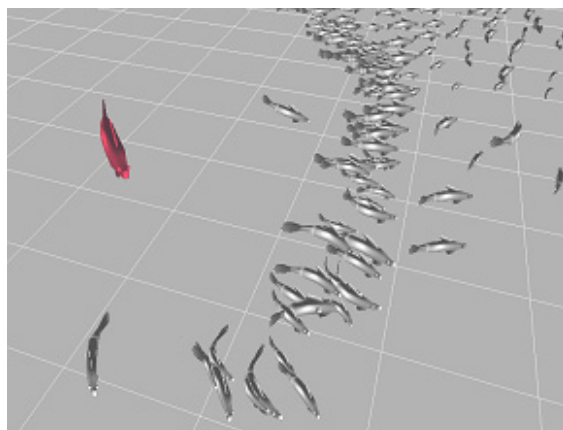
(a) フィールド全体像



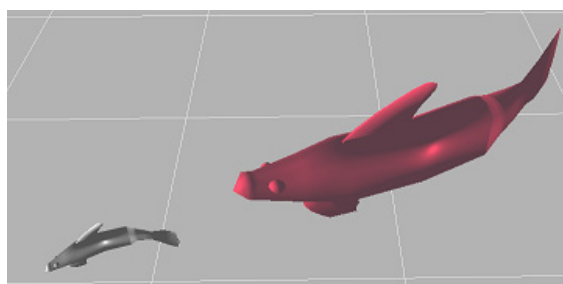
(b) 被食者の群れ



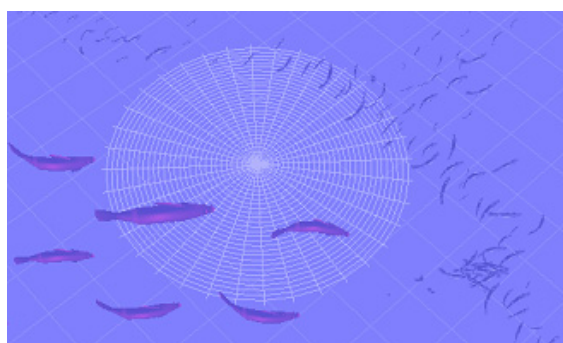
(c) 捕食者の群れ



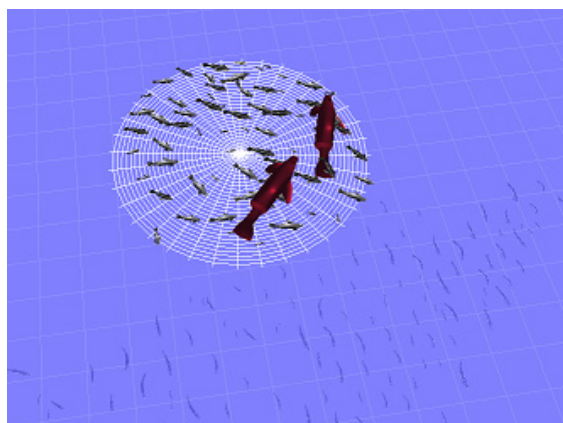
(d) 捕食者から逃げる被食者



(e) 被食者を追いかける捕食者



(f) 海面を移動する網



(g) 網で魚をすくった様子

図2 実行画面