

魚群のリアルな遊泳シミュレーション

筑波大学大学院システム情報工学研究科 200430163 大上 望
指導教官 James B. Cole

近年、コンピュータの発展が目覚しく、それに伴ったコンピュータ・グラフィックスの進歩も目覚しい。その一例がバーチャル水族館である。

しかし、いくら映像表現が美しいといっても、その動きを作り出すのは、人がその経路の設定をしてやり、その中での振る舞いをいちいち指定しなければならない等、人の手に頼らなくてはならない部分も多いのが現実である。一般的に生体の群れの動きをシミュレーションするアルゴリズムに（そのような水族館を実現するアプローチには）レイノルズにより提案された BOID がある。

本研究では群れの中のそれぞれの魚に対しての加速、減速、方向転換の動きに注目する。本研究での手法としては以下のとおりである。

1. 泳動数を用い、魚の遊泳能力に見合った個々の魚の体の動きの振動周波数を得る。
2. 逆運動学を魚に適応させる。

Simple and Realistic fish motion using a fish swimming theory

Nozomu Oue, DongSheng Cai University of Tsukuba

In recent years, the advancements in computer and computational techniques have made significant improvement in computer graphics. One of their applications is the virtual aquarium. Although an image expression is beautiful there are many works which must be done by creators' hand. Creator have to set up the courses and making the motions. The general approach for making CG of a schooling fish is Boid (Bird-oid) algorithm proposed by Reynolds. This research focus on the generation of swimming motion such as acceleration, deceleration, turns of each fish in their school. The method proposed in this work is outlined as follows:

1. We obtain the migration value that indicates the swimming ability of a fish based on a simple swimming theory.
2. Inverse kinematics is applied to the fish motion.

1. はじめに

近年、コンピュータの進歩に伴い、コンピュータグラフィックス (CG) も格段に進歩してきている。

しかし、CG アニメーションにおける個体の動作・振る舞いの決定に関しては一つ一つに人が経路設定をすることで行うため、まだまだ人の手に頼らなければならない部分が多い。特に、鳥や魚、昆虫といった生体の群れの動きは個体数が多い上に複雑な動きをする。そのため、それぞれが互いに衝突していないか、不自然な動きになっていないかチェックしながら個

体一つ一つに動作を設定することは困難である。

鳥や魚、陸上生物の群れの集合的な動きは、自然界においてしばしば見ることができ、とても美しいものである。群れ全体が一つの生き物のように美しく、滑らかに動く。群れの動作シミュレーションアルゴリズムとして Craig Reynolds の Boid (bird-oid の略) アルゴリズムがある。

群れの研究は生物学者達にとっても研究興味を駆り立てられるテーマで、魚群などは 1920 年代よりそのダイナミクスを解明しようとする研究が行われている。

しかし、この Boid アルゴリズムは基本的に、群れが形成されるまでの過程を表現しようとするものであり、生物が群れを形成した後の振る舞いについてはあまり考えられていない。各個体の相互作用のみに依存するので、各個体が最適ポジションに落ち着いてしまうとそれ以降は、あまり動きの変化がない面白みのないものになってしまう。

本研究室においてはこれまで、Boid アルゴリズム [1] や生物学者たちのモデルを参考にした群れの動作生成が行われてきており、多くの魚群において共通に見られる特徴を内包した魚群の振る舞いの生成や、自己組織化臨界現象の代表的モデルである砂山モデルを用いた生物学的なランダムさの表現 [5] などがされてきた。

本研究ではこれまでの研究で得られる魚群の個体一つ一つの遊泳経路に加え、その遊泳経路上で時間軸に対応した個体自身の動きの変化についてのシミュレーションを行った。

2. Boid アルゴリズム

2.1. Boid アルゴリズム

コンピューターグラフィックスのアニメーションとして群れを表現する時には人間の手によって大量の各個体について独立した経路の記述が行われる。大量の経路の記述は大変面倒であるだけでなく、個体同士が衝突をしないなどの保証がない。また群れの中の一匹の経路だけを変更したいときでも全ての個体の経路を見直さなければならないなどと編集も困難である。

そこで、各個体の相互作用により群れをシミュレートする Boid アルゴリズムが 1989 年に Craig Reynolds によって考え出された [1]。

2.2. Boid のルール

Boid は基本的に以下の 3 つのルールから成り立ち、そのルールを個々の物体に与えることで群れをなす様子をシミュレーションできる。

1. 衝突回避 (近くとの Boid との衝突を避ける)
2. 速度調和 (近くとの Boid との速度ベクトルを合わせようとする)
3. 群れの集中化 (群れの中心に向かおうとする)

この 3 つのルールはそれぞれ優先順位づけされ、それぞれ強度パラメータと持ち、加速度ベクトルとして計算される。下図は Reynolds によるシミュレーションである。

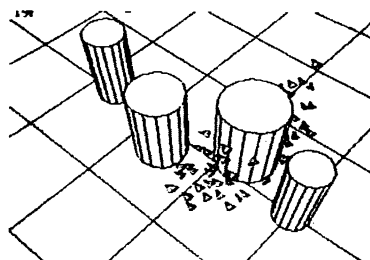


図 1: Reynolds によるシミュレーション

2.3. 運動方程式

本研究において各魚 (Boid) の加速ベクトルを計算するために用いた運動方程式について説明する。

Boid アルゴリズムにおいては、各 Boid 運動を表現するために毎ステップごとに加速度を計算することで、群れのシミュレーションを行う。その加速度計算は設定された運動方程式によって支配されており本研究においても、魚群の研究を通して提案されてきた各魚の間に働く相互作用力をもとにした運動方程式を設定した。運動方程式は以下のとおり

$$m_i \ddot{x}_i = -\gamma \dot{x}_i + \alpha n_i + \beta d_i + a_1 f_{ij} + \sum_{j \neq i} a_2 f_{ij} + g_i \quad (1)$$

ここで各変数について m_i は質量、 $\ddot{x}_i$ は加速度、 $\dot{x}_i$

は魚群の進行方向、 d_i は頭軸ベクトル、 f_{ij} は二体

間相互作用力、 $\alpha, \beta, \gamma, a_1, a_2$ はそれぞれの強度パ

ラメータである。ここで右辺の第一項は粘性抵抗、第二項は魚群の進行方向に働く推進力を表してる。第三項は最適頭軸方向への調節を担う項であり、第四項は最適二体間距離を保とうとする項である。第五項は、魚群における群れをなそうとして集中する性質、成群性を表現した項であり、第六項は、群れの中心力を表現した力である。

2.4. 実行結果

運動方程式 (1) を用いて群れの振る舞いをシミュレーションした結果を以下のように示す。それぞれの魚の位置を三角錐で描写している。

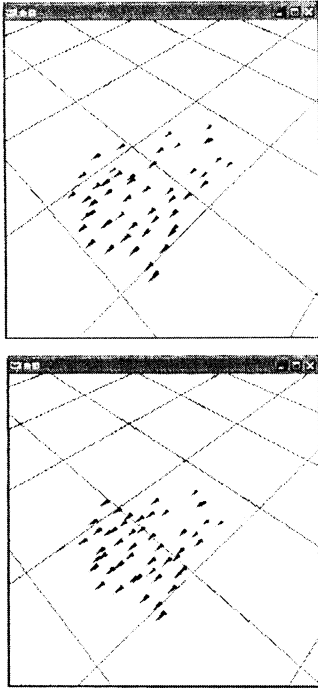


図2: 運動方程式 (1) に基づく魚群のシミュレーション

3. 魚のモデリング

3.1. 魚の分類

最も代表的な魚の泳法の分類として、米国の動物学者 Breder は 1926 年に魚の遊泳運動を、尾びれの長さや運動の程度でウナギ形 (Anguilliform) 推進、アジ形 (Carangiform) 推進、ハコブグ形 (Ostracelliform) 推進の 3 種類に大別した [3].

1. ウナギ形 (Anguilliform) 推進・・・細長い体全体をくねらせて泳ぐ推進方法.
2. アジ形 (Carangiform) 推進・・・尾びれと体の後半部を使用して泳ぐ推進方法.
3. ハコブグ形 (Ostracelliform) 推進・・・体をほとんど使わずに尾びれだけを動かして泳ぐ推進方法.

マグロ、カツオ、アジなどの一般に高速魚と言われている魚や、コイ、フナ、ウグイなどのよく泳ぐ淡水魚。また、それらを含み、一般的に群れをなす魚のほとんどはアジ型だと考えられる。よって本研究ではアジ型の魚を基にモデリングを行う。

3.2. 泳動数

Bainbridge は、回転水槽を用いてウグイ、マス、フナなどの泳運動を詳細に観察し、体長、尾びれの振動振幅、振動周波数と遊泳速度の関係を調べている。彼らが高速で泳ぐときの速度は体長と尾びれの両者にはほぼ比例する、尾びれの振動振幅は種および周波数にもよらず体長の 20% 程度で一定である [2].

また M. Nagai らも小型の回流水槽を用いて独自にコイやフナ、ティンビラなどの淡水魚の遊泳能力を詳細に観察した。その結果、これらの魚の遊泳速度はその体長と尾びれの振動周波数の両方に正比例することを発見した [3]. 比例係数は種によって異なる。比例係数が水棲生物の遊泳能力を表すのであれば、物理的に意味のある数字として把握すべきであろうと考えた M. Nagai はこれを泳動数と定義した。泳動数 Sw は式のように定義される。

$$Sw = \frac{U}{fl} \quad (2)$$

速度 (m/s) を周波数 (1/s) と体長 (m) で割るので Sw は無次元量であり、物理的には「尾びれの運動の 1 周期ごとの対体長比速度」と説明される。

3.3. 2 点ヒンジモデル

振動翼理論に基づいており、ロボットフィッシュの推力発生機構でもある。

下図に M. Nagai らによる 2 点ヒンジ推進力機構を示す。



図3: 2点ヒンジモデル

第 1 ヒンジと第 2 ヒンジはアーム (振動板) で連結されており、振動板は第 1 ヒンジを中心に一定振幅で回転振動運動を行う。翼は第 2 ヒンジによってアームに回転自在に取り付けられており、アームの運動に追従しながら相対角度 β の回転振動運動を行う。この機構は推力発生機構としては第 2 ヒンジ部にねじりまきバネなど適当な弾性体を挿入することによって実現する。バネは相対角度 β を常に 0 度に戻すように作用する。

アームには第 1 ヒンジを中心に正弦波運動を行わせることができるので、アームの触れ角 α は式

$$\alpha = A \sin(\omega t)$$

で与えることができる。しかし、相対角度 β に関しては水中での粘性抵抗などが考慮されるため単純な正弦波関数にはならず、通常は経験的に得

られている値を使用する。

本研究では, Bainbridge, M. Nagai らの知見より, 先端部から $1/4$ の部分を第1ヒンジ, 尾びれの付け根の部分を第2ヒンジとし, この2点を支点とする回転振動運動を考えた。

3.4. 逆運動学

運動学とは, リンク構造を持つ系の関節や先端の位置と関節の回転角との関係を明らかにするものである。[4]。本研究では Fig2 のように制御点を設ける。制御点は魚を輪切りにするような形で配置する。なるべく等間隔になるように制御点を配置し, 魚の前方より制御点群0, 制御点群1, ..., 制御点群8とする。動きが顕著は尾びれは制御点群の間隔を狭くとった。この制御点群を以下の節で説明する関数に基づき移動させることによって魚の体のしなりを表現する。

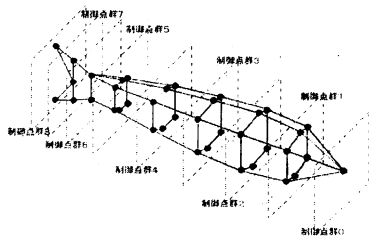


図4: 制御点の配置

魚の体を走る進行波を実現するために, 曲線を表す以下の正弦波関数を用いる。

$$\theta_i = A \sin(\omega t - d_i)$$

式中の制御点群0から各制御点群ごとの位相のずれを示す d_i により進行波が魚の頭から尾びれに伝わるようすが表現できる。また, 制御点群 i の Y 軸に関する回転角を θ_i , ひねりの大きさを制御するパラメータを A , ひねりの速さを制御するパラメータを ω 時間を t とする。

4. 実行結果

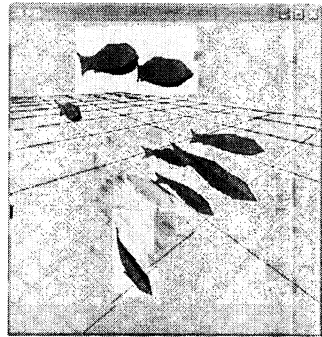
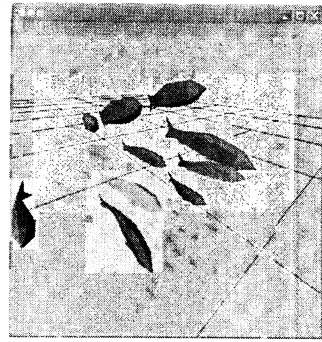


図5: 実行結果

5. 考察

Boid アルゴリズムから計算された速度や、加速度の数値に泳動数を関連付けることによって、それぞれの魚の遊泳経路上での動きの変化が表現できた。

体長をランダムにした例では、小さな魚が一定時間に大きな魚と同じ距離だけ進むために、盛んに尾びれを振動させている様子が表現できた。

士論文,2003.

¥

6. おわりに

これまで本研究室において研究されてきた、魚群の動作生成の経路設計に加え、その時間軸に対応した個体自身の遊泳動作の描写についてのシミュレーションを行った。

”泳動数”と単純な Boid アルゴリズムから得られる遊泳速度から魚の体の振動周波数を得、逆運動学を用いることによってリアルな魚の群れを描写した。

また、今後の展望としましては、魚には単に前進するのみの動きだけでなく、加速や方向転換などといった動きや、捕食者に襲われた際の逃避行動の動き、など多くのパターンがあると思われるのでそれらについてもシミュレーションを行うことを考えている。

また、完成度の高いCGにするために魚にテクスチャを張ることを考えている。

また、魚の種ごとの実際の群れとの比較を行い、パラメータを変化させることで現実世界でのいろいろな群れを表現したり、一つの群れの中でも、いくつかのグループに分けてそれぞれ少し違った動きをさせ、動きのバリエーションを増やすことなどを考えている。

参考文献

1. Craig W. Reynolds, "Flock, Herds and Schools A Distributed Behavioral Model", Computer Graphics, 21(4), July 1987, pp. 25-34.
2. R. Bainbridge. The speed of Swimming of Fish as related to Size and to the Frequency and Amplitude of Tail Beat, J. Exp. Bio., vol.35, (1958), pp.109-133
3. Minoru Nagai. Hydrodynamics studied to a dolphin. Orm Company, 1999.
4. Takahiro Kawamura, Hiroshi Dihi, Mitsuru Isizuka. "Realtime CG Animation of Realistic Fishes using NURBS, Inverse Kinematics and a Co-operative Motion Model", Television Society magazine, Vol.49, No.10, pp. 1296--1304, 1995.
5. 水森龍太. 魚群の振る舞い生成に関する研究. 筑波大学大学院 博士課程 コンピューターサイエンス専攻 修