

魚群のリアルな遊泳シミュレーション

大上望、蔡東生
筑波大学システム情報工学研究科

1. 概要

近年コンピュータ・グラフィックスなどの映像技術の進歩が目覚しいが、動物の群れの動きの表現技法の研究においてはあまり行われて来なかった。

本研究室においてはこれまでに、Boid という生物の群れを生成するアルゴリズムを参考に、(外敵に襲われた際の群れの逃避行動、複雑形状からの飛び立ち) などといった群れの動作生成が行われてきた。

しかし、それらの問題点としては、個体一つ一つの遊泳経路に関してはうまく設計がなされるが、その時間軸に対応した(加速、減速、方向転換に対応する)個体自身の動きの変化については表現されていないため、実際の魚群の動画を比較するとリアルさに欠けるということが挙げられる。そこで本研究では群れの個体ごとに、水棲生物の遊泳能力を表す値である泳動数をもとに尾びれの振動周波数を求め、逆運動学を用い、リアルな魚の動作をシミュレーションする。

Simple and Realistic fish motion using a fish swimming theory

Nozomu Oue, DongSheng Cai
Department of Computer science, University of Tsukuba

In recent years, the advancements in computer and computational techniques have made significant improvements in computer graphics. One of their applications is the virtual aquarium. Although an image expression is beautiful there are many works which must be performed by creators' hand. Creator have to set up the courses and making the motions. The general approach for making CG of schooling fish is Boid (Bird-oid) algorithm proposed by Reynolds [1]. This research focus on the generation of simple and realistic swimming motions such as acceleration, deceleration turns of each fish in their school. The method proposed in this work can be outlined as follows:

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

2. Boid アルゴリズム

2.1. Boid

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ことが多い。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、群れの各個体の動きをシミュレーションし、それらが相互作用する Boid という群れのアルゴリズムが 1989 年に Craig Reynolds によって考え出された[1]。

Boid とは bird-oid (鳥もどき) の略である。この Boid のアルゴリズムは、一見複雑に見える群れの動きも、個々の動きは単純なルールに従い、それらの相互作用により全体として複雑な動きをする群れに見えるというものである。

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もち、加速度ベクトルとして計算される

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

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

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、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。本研究では以上のような運動方程式を Boid アルゴリズムに付加した。

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。

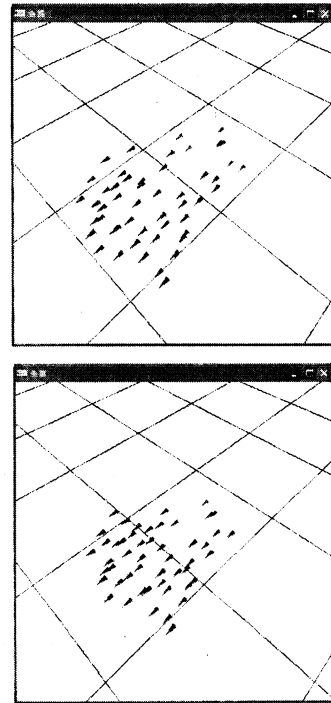


Fig1: 運動方程式(1)に基づく魚群のシミュレーション

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、尾ひれの長さや運動の程度でウナギ形(Anguilliform)推進、アジ形(Carangiform)推進、ハコフグ形(Ostraciform)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・・・尾ひれと体の後半部を使用して泳ぐ推進方法。
3. ハコフグ形(Ostraciform)推進・・・体をほとんど使わずに尾ひれだけを動かして泳ぐ推進方法。

ウグイやフナ、コイ、カツオ、マグロなどの高速魚、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ので本研究ではアジ型の魚を基にモデリングする。

4. 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% 程度で一定であるなど、きわめて貴重な知見を次々と発表している。

また M.Nagai からも小型の回流水槽を用いて独自にコイやフナ、ティンピ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。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。

本研究ではこの泳動数をもとに、Boid アルゴリズムから得られた速度ベクトル U 、それぞれの体長 l に見合った個々の魚の体の動きの振動周波数を得る。

5. 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 9 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。

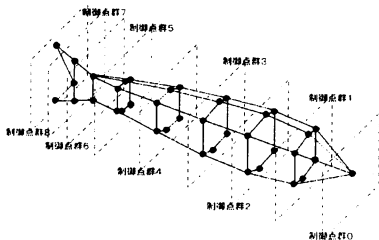


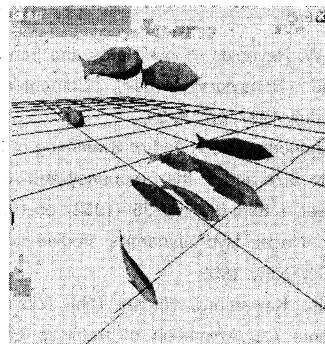
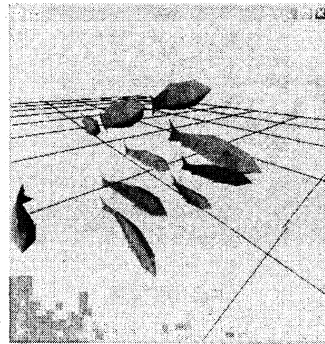
Fig2: 制御点の配置

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 により進行派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。

実行結果



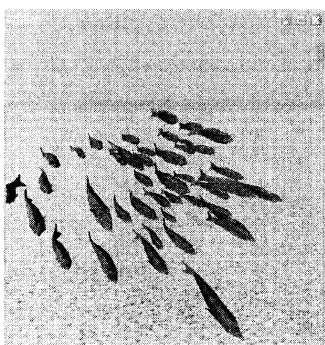
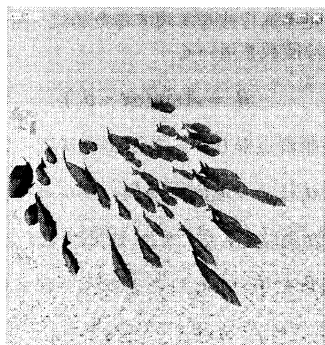


Fig3. 実行結果

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.