

# 動きの突発性と多様性に基づく 熱帯魚の生命的アニメーションシステム

里井 大輝<sup>1,a)</sup> 中臺 久和巨<sup>1,b)</sup> 星野 准一<sup>1,c)</sup>

受付日 2014年12月2日, 採録日 2015年8月12日

**概要:** 本稿では, 実際の生物に見られる動きの突発性と多様性に着目した熱帯魚の生命的アニメーションシステムを提案する. 魚類の生態生理学やビデオ分析を参考に, 加速・自然減速・減速・巡航からなる4つの基本動作を組み合わせ, 2段階の確率的制御によってモーションを生成する仮想フィッシュモデルを構築する. 動作選択過程で突発的なモーションを生成し, モーション生成過程におけるパラメータの制御により動きの多様性を作り出す. 質問紙を用いた評価実験により, 突発性と多様性の2属性を組み合わせることで生命感が向上することを検証した.

**キーワード:** プロシージャル CG アニメーション, 人工生命, 熱帯魚, アニマシー知覚

## Life-like Animation System of Tropical Fishes Based on Burstiness and Diversity of the Motion

DAIKI SATOI<sup>1,a)</sup> HISANAO NAKADAI<sup>1,b)</sup> JUNICHI HOSHINO<sup>1,c)</sup>

Received: December 2, 2014, Accepted: August 12, 2015

**Abstract:** In this paper we propose a life-like animation system that focuses on burstiness and diversity of movement seen in actual tropical fishes. By analyzing fish videos and considering fish physiology we develop a virtual fish motion model by combining four basic operation (acceleration, coasting deceleration, intentional deceleration and cruise) and using two-step stochastic control. We generate burstiness in the motion selection step and diversity of motion by controlling the parameters in the motion generation step. By experimenting and evaluating using a questionnaire we verified that combining the two attributes of burstiness and diversity of motion improves the life-likeness of motion.

**Keywords:** procedural CG animation, artificial life, tropical fishes, animacy perception

### 1. はじめに

CGにおける魚の生命的なモーション表現は, アニメーション作品 [1] やゲーム作品 [2], 壁面投影によるバーチャルアクアリウム [3], [4] などの幅広いコンテンツで必要とされている. しかし, そのようなモーション表現の制作は, 優れたアニメーターの経験や感性によるところが大きく, さまざまなスキルやノウハウの習得が必要とされている.

また, ゲームやメディアアートなどのインタラクティブなコンテンツについては, ユーザからの働きかけによって状況が変化したり反応したりすることを考慮するために, 計算モデルを用いてリアルタイムにモーションを生成することが必要となる.

魚のモーション表現を自動生成する手法としては, 知覚を持ち物理シミュレーションによりリアルな魚の動きを生成することができる Artificial Fish [5] や, 流体シミュレーションを用いてさまざまな水生動物の遊泳モーションを生成する Articulated Swimming Creatures [6] が提案されている. また, 多くの魚種で観察される群集行動についても, 知覚と簡単な行動ルールによる Boids モデル [7] や, 動力

<sup>1</sup> 筑波大学  
University of Tsukuba, Tsukuba, Ibaraki 305-8577, Japan  
a) satoi.daiki@entcomp.esys.tsukuba.ac.jp  
b) nakadai.hisanao@entcomp.esys.tsukuba.ac.jp  
c) jhoshino@esys.tsukuba.ac.jp

学に基づく Viscek モデル [8] をはじめとする多くのシミュレーションモデルが提案されている。ところが、これらの手法では、物理シミュレーションなどによる連続的な動きが扱われることが多く、実際の生物の動きに見られるような、突発的に動いたり止まったりする突発性のある動きや、個体ごとに複雑に振る舞うような動きの多様性の要素があまり考慮に入られていない。

そこで本稿では、動きの突発性と多様性に着目し、熱帯魚の生命的な遊泳モーションを動的に生成する手法を提案する。本稿では以下の理由から、魚類の中でも熱帯魚に注目し、モデル化の対象に選定した。

- (1) 熱帯魚は、行動パターンや身体形状が比較的単純でありながら動きの表現が多様であり、身体のかねりや細かいひれの動きではなく身体全体の動きによって生命感を確認しやすいため。
- (2) 生体構造や生息環境などの基礎研究 [9], [10], [11], [12] が充実しているため。
- (3) 水族館や家庭用アクアリウムに加え、アニメーション作品 [1] やゲーム作品 [2] といったデジタルコンテンツにおいても広く身近に親しまれている対象であるため。

本稿の構成は次のとおりである。2章では、熱帯魚のビデオ分析および魚類の生態生理学の知見から、熱帯魚が突発的な動きと緩やかな動きの双方を使い分けるとともに、さまざまな方向へ複雑に移動していることを示す。3章では、2章で得られた知見や認知心理学におけるアニメーション知覚の知見に基づき、熱帯魚の動きの突発性と多様性を実現する手法を提案する。熱帯魚の動きの基本要素を4つに分類し、動作選択過程とモーション生成過程で2段階の確率的制御を行う。視覚機能と壁の回避機能を加えることにより、仮想水槽内で自律的に遊泳する仮想フィッシュモデルを構築する。4章では、仮想フィッシュモデルのシミュレーション結果を示す。5章では、質問紙を用いた評価実験により、動きの突発性と多様性の2属性を組み合わせることで生命感が向上することを検証する。

## 2. 熱帯魚におけるモーション要素の分析

これまで提案されてきた動きの生成手法では、連続的で滑らかなモーション要素が扱われることが多い。しかし、実際の熱帯魚の動きでは、急に動き出したり、止まったりする動きを繰り返すなど、突発的なモーション要素が多く観察される。また、個体間の動き方の違いだけでなく、同一個体内で見ても活発に泳ぎまわるものもいれば、流れに身を任せているような、多様な種類の動きを観察することができる。本章では、ビデオ分析と魚類の生態生理学の知見に基づき、熱帯魚の動きの基本要素について考察する。

### 2.1 熱帯魚の動きのビデオ分析

実際に水槽内で遊泳する熱帯魚の様子をビデオカメラ

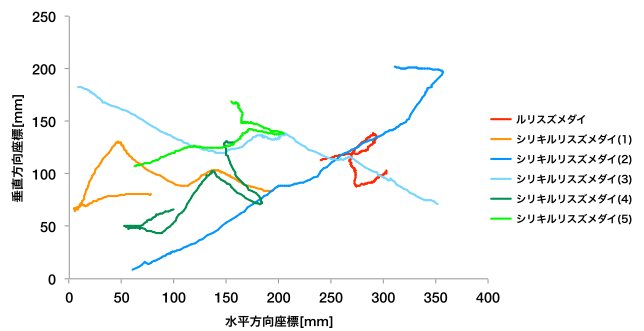


図 1 熱帯魚の移動軌跡

Fig. 1 Tracks of tropical fishes.

により撮影して、目視で観察するとともに、統計的に分析した。

撮影した熱帯魚の魚種は、観賞用として広く親しまれているルリスズメダイおよびシリキルリスズメダイである。水槽の大きさは、幅が約 5m、高さが約 1m、奥行きが約 50cm であった。水槽のガラス面から 37cm 離れた距離に、水槽の接地面に対して水平にビデオカメラを設置し、解像度 1,280×720 ピクセル、フレームレート 24 fps で撮影した。

次に、移動軌跡のサンプリングと分析を行った。サンプリングにあたっては、次の 2 点に注意した。

- (1) コンテンツにおける利用シーンでは側面方向からの動きを見ることが多いため、側面方向から見た水平方向と垂直方向の動きについてサンプリングを行った。ただし、誤差を小さくするため、奥行き方向の移動がほぼ見られない区間のみを選んだ。
- (2) 他の個体や地形に影響されている動き（たとえば、他の個体を追いかけたり追いかけられたりする動きや、水流に流される動き、群れる動き、岩場のえさをしばむような動き）は除外した。

これらの条件を満たすように、ルリスズメダイについて 1 つ、シリキルリスズメダイについて 5 つ、合計 6 つの移動軌跡をサンプリングした。各サンプルの移動軌跡を図 1 に示す。

サンプリング時間はいずれも 6.83 秒である。撮影した熱帯魚はいずれも 0.3 秒～1 秒程度の間隔で加速や方向転換といった動き方の切替えを行っていたため、本稿での動き方の分析にはこの長さで十分であると考えられる。

また、各サンプルについて移動軌跡から各フレームにおける加速度を算出し、ヒストグラムの平均と標準誤差を求めたグラフを図 2 に示す。多少のばらつきはあるものの、弱い減速をピークに加速側と減速側の双方へ分布が広がっている。したがって、熱帯魚は、緩やかな加減速と突発的な加減速の双方を行っていることが読み取れる。

### 2.2 魚類の生態生理学に基づく考察

多くの魚は、尾びれを振動させることで前進方向への推進力を得て移動しているが、胸びれを鳥の羽ばたきのよう

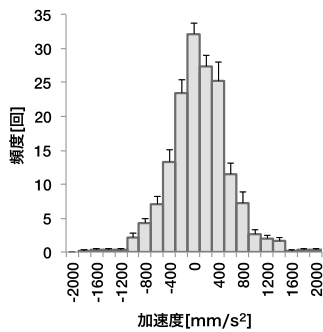


図 2 各熱帯魚の移動軌跡に関する加速度ヒストグラムの平均値と標準誤差

Fig. 2 Average and standard error of acceleration histogram about each track of tropical fish.

に動かすことで推力を獲得して移動する場合もある。本稿で取り上げる熱帯魚の多くは胸びれを主に用いており、胸びれを複雑に回転させることによって、複雑な方向転換や減速行動などの動きを実現している [13], [14]。また、アユは直線的な動きと屈折をランダムに選択しながら遊泳していることが解析的に示されている [15]。

それに加えて、魚は運動するとき、大きく分けて赤色筋と白色筋からなる 2 種類の筋肉を使い分けている [9]。赤色筋は遅筋の働きをし、運動は緩慢ではあるが持久力があり長続きする。一方で、白色筋は速筋の働きをし、運動は強力で瞬発力は強いが疲労が速く持続性がない。推進器官やブレーキとして頻繁に使われ動くことが多い胸びれでは赤色筋が発達する [10]。

以上の知見から、魚類は突発的な動きと緩やかな動きの双方を用いているとともに、複雑で多様な動き方ができる身体構造を備えていることが分かる。

### 3. 仮想フィッシュモデル

2 章では実際の熱帯魚の動きについてビデオ分析と魚類の生態生理学の知見から考察し、動きの突発性と多様性が重要な生命的要素であると考えた。

本章では、熱帯魚の動きの突発性と多様性をともなったモーションを生成する仮想フィッシュモデルを提案する。

#### 3.1 設計方針

熱帯魚が登場する従来のコンテンツでは、連続的な身体の移動アニメーションと手付けのアニメーションパターンが用いられていることが多い。魚のモーション表現を自動生成する手法として、Artificial Fish [5] や, Articulated Swimming Creatures [6] などの手法が提案されているが、実際の生物に見られる突発的な加減速や、個体ごとの動きの多様性があまり考慮に入られていないため、熱帯魚における生命感の表現には不十分であると考えられる。

認知科学の分野では、人々が対象物に“生き物らしさ”を感じることをアニメーションといい、「生きているように感

表 1 仮想フィッシュモデルのモーションユニット (MU)

Table 1 Motion Unit(MU)s of virtual fish model.

(1) 加速	突発的に直線方向に加速したり、加速しながら方向転換したりする動作要素
(2) 自然減速	意図的には何もしず水の流れによって自然に減速する動作要素
(3) 巡航	まっすぐ等速で前進を続けようとする動作要素
(4) 減速	意図的に減速したり急停止したりする動作要素

じる」「意図のある動きをしている」と対象物に関して感じる現象はアニメーション知覚と呼ばれ、多くの研究が行われている [16]。アニメーションは単純な幾何学図形の動きでも知覚できることが知られている。2 つの図形の衝突のタイミングを変えることにより、「一緒に移動している」「突き飛ばしている」などの関係性の解釈を誘発すること [17] や、アニメーションする複数の図形に捕食者と捕食対象関係を知覚し、各図形を擬人化して「追う」「追われる」の社会的関係や意図性の知覚が生じること [18] が報告されている。また、Tremoulet と Feldman は、点が二次元上を等速直線運動し、任意の場所で移動方向と速度を変化させる実験を行っている。このとき速度変化、角度変化の大きさが大きいほどアニメーションを大きく感じたことから、視覚的なアニメーション知覚には形状よりも運動が及ぼす影響が大きいことを示した [19]。

この Tremoulet と Feldman の実験モデルにランダム性を導入する形でホタルの動き方をモデル化し、ホタルのように光りながら動くオブジェクト (仮想ホタル) に適用可能な生き物らしいモーションを生成する手法が提案されている [20]。仮想ホタルのモデルでは、「加速」と「減速」のいずれかの動作要素を確率的に選択する過程、動作要素の選択後にモーションのパラメータを確率的に選択する過程からなる 2 段階の確率過程を用いて、生き物らしい動きを実現している。

しかし、2.1 節で述べたビデオ分析の結果や目視による熱帯魚の観察結果、および 2.2 節で述べた魚類の生態生理学の知見から、熱帯魚の運動は (1) 加速や (2) 意図的な急減速だけではなく、(3) 水の抵抗による緩やかな自然減速や、(4) まっすぐ泳ぎ続けようとする巡航動作を含んでおり、仮想ホタルのモーション生成モデルでは熱帯魚に見られる動きの突発性や多様性を十分に表現できないと考えられる。

そこで本稿では、仮想ホタルのモーション生成モデルを拡張し、表 1 に示す 4 つの基本的な動作要素 (モーションユニット: 以下 MU と呼ぶ) をモーション生成の基本単位として扱う。

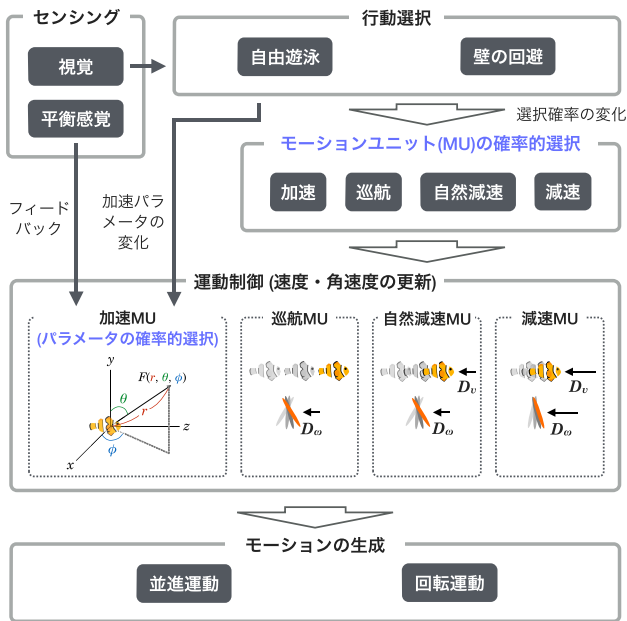


図 3 仮想フィッシュモデルの概要

Fig. 3 Overview of the virtual fish model.

### 3.2 モデルの概要

本稿で提案する仮想フィッシュモデルの概要を図 3 に示す。

仮想フィッシュモデルは以下の 5 部から構成される。

- (1) モーションユニット選択部：加速・巡航・自然減速・減速からなる 4 種類の MU を確率的に 1 つ選択する。これにより動きの突発性を再現する。
- (2) 運動制御部：力を加えることによって仮想フィッシュモデルの持つ速度・角速度を更新する。力は選択された MU によって異なっており、加速 MU では力ベクトル  $\mathbf{F}$  を、その他の MU では水による抗力  $\mathbf{D}$  を加える。加速の大きさや角度を確率的に選択することにより、動きの多様性を再現する。
- (3) モーション生成部：速度・角速度を用いて身体の並進運動と回転運動を行い、モーションを生成する。
- (4) センシング部：視覚では自身の近くに壁があるかどうかをチェックする。平衡感覚では、自身のピッチ角を取得し、加速 MU にフィードバックする。
- (5) 行動選択部：自由遊泳に加えて、仮想水槽内で自律的に泳げるようにするために壁の回避行動を考慮する。基本的にはつねに自由遊泳であり、壁に接近した場合にのみ壁の回避行動をとる。

実際の熱帯魚はごく短時間のうちに動き方を何度も切り替える場合があるため、各部での処理は微小時間ごとに繰り返し行うものとする。

次節からは、各部で行われる処理の詳細について述べる。

### 3.3 モーションユニット選択部

MU の選択過程は、各 MU を状態と見なして、離散時間

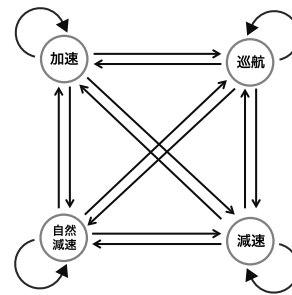


図 4 モーションユニットの選択過程

Fig. 4 Selection stage of motion units.

における状態遷移としてモデル化する。これは図 4 および次式の単純マルコフ連鎖で表される。

$$p(x_0, x_1, \dots, x_r) = p(x_0)p(x_1|x_0)p(x_2|x_1) \dots p(x_r|x_{r-1}) \quad (1)$$

$$\text{状態空間} : \Omega = S_1, S_2, S_3, S_4$$

ただし、 $S_1$  は加速、 $S_2$  は自然減速、 $S_3$  は巡航、 $S_4$  は減速の MU を示す。すなわち、ある離散的な時点  $n$  において MU が選ばれる確率は、時点  $n-1$  において選択されている MU の種類だけに依存する。

本手法では、 $p_{11}$ 、すなわち加速 MU から加速 MU への遷移確率が仮想フィッシュモデルの動き方の特徴付けに大きく影響するため、時点  $n-1$  の状態を考慮する単純マルコフ連鎖モデルを利用した。多くの熱帯魚のような細かく動き回る魚を再現する場合は、 $p_{11}$  を下げるとともに、加速 MU において発生させる力ベクトルの大きさ  $r$  の選択範囲  $r_{min}$  および  $r_{max}$  を引き上げることで、間欠的な急加速が起こるようにできる。一方で、緩やかに泳ぐ魚については、 $p_{11}$  や巡航 MU への遷移確率を上げるとともに、 $r_{min}$  および  $r_{max}$  を引き下げることで再現できる。

16 個の遷移確率をパラメータとして設定する必要があるが、時点  $n-1$  の状態によって遷移確率を変えることが出力に大きく影響するのは、前述した「加速 MU から加速 MU への遷移」の場合のみであるため、実質的には以下の 5 パラメータにまとめて扱うことができる。

- (1)  $P_a = p_{11}$  (加速 MU から加速 MU への遷移確率)
- (2)  $P_b = p_{21} = p_{31} = p_{41}$  (加速以外の MU から加速 MU への遷移確率)
- (3)  $P_c = p_{12} = p_{22} = p_{32} = p_{42}$  (任意の MU から自然減速 MU への遷移確率)
- (4)  $P_d = p_{13} = p_{23} = p_{33} = p_{43}$  (任意の MU から巡航 MU への遷移確率)
- (5)  $P_e = p_{14} = p_{24} = p_{34} = p_{44}$  (任意の MU から減速 MU への遷移確率)

$P_a$  や  $P_b$  が高すぎると、速度が発散してアニメーションが破綻してしまうが、 $P_a$  や  $P_b$  を十分に低くしておけば、各パラメータを変更することで魚の動き方を調整できる。

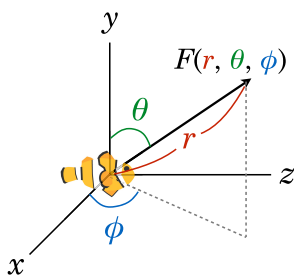


図 5 座標系と力ベクトル  $F$   
 Fig. 5 Coordinates and force vector  $F$ .

### 3.4 運動制御部

運動制御部では、力を加えることによって仮想フィッシュモデルの持つ速度・角速度を更新する。加速 MU において生成される力ベクトル  $F$  のパラメータを確率的に制御することで、多様性のある動きを生成する。

#### 3.4.1 加速 MU

加速 MU では、仮想フィッシュモデルの身体を 1 つの剛体と考え、ランダム性を含んだ力  $F$  を発生させて、並進運動の加速度と回転運動の角加速度を加える。

力  $F$  は、図 5 に示すように仮想フィッシュモデルの回転中心を原点としたローカル球座標系上のベクトルとして生成する。ワールド座標系は左手系の直交座標系とし、仮想フィッシュモデルの身体は  $z$  軸の正方向を向いた姿勢を基準とする。 $F$  の大きさ  $r$ 、偏角  $\theta$  および  $\phi$  は次式によって求める。

$$r = R(r_{min}, r_{max}) \quad (2)$$

$$\theta = 90 + R(-\theta_{range}, \theta_{range}) + \text{Asgn}(\theta_{fish}) \frac{1}{1 + e^{-k|\theta_{fish}|}} \quad [\text{deg}] \quad (3)$$

$$\phi = 90 + R(-\phi_{range}, \phi_{range}) \quad [\text{deg}] \quad (4)$$

ただし  $R(min, max)$  は、 $min$  から  $max$  までの範囲で疑似乱数を返す関数である。また  $\text{sgn}(x)$  は、実数  $x$  の符号に応じて 1, 0 もしくは  $-1$  のいずれかを返す符号関数である。 $\theta = \phi = 90$  のとき、仮想フィッシュモデルはまったく回転せずに直進する。 $r_{min}$ ,  $r_{max}$ ,  $\theta_{range}$  および  $\phi_{range}$  はパラメータとして正の定数を与える。 $\theta_{range}$  の値が大きいほどピッチ角が平均的に大きくなり、 $\phi_{range}$  の値が大きいほどヨー角が平均的に大きくなる。

熱帯魚を含む魚類は通常、斜め方向を向くことはあっても、真上や真下を向くことはない。そこで、仮想フィッシュモデルのピッチ角が大きくなりすぎないように姿勢制御を行う必要がある。式 (3) の第 3 項はシグモイド関数を用いた姿勢制御項である。 $\theta_{fish}$  は現在の仮想フィッシュモデルのピッチ角を示しており、図 5 のようなまっすぐな姿勢のときは  $\theta_{fish} = 0$  である。ゲイン  $A$  および  $k$  はパラメータとして定数を与える。これにより、加速するとき緩やかにまっすぐの姿勢になろうとするように振る舞う。

次に、次式を用いて  $F$  をローカル球座標系からローカル

直交座標系（左手系）へ変換する。

$$x = r \sin \theta \cos \phi \quad (5)$$

$$y = r \cos \theta \quad (6)$$

$$z = r \sin \theta \sin \phi \quad (7)$$

次に、次式を用いて加速度  $a$  および角加速度  $\alpha$  を求める。

$$a = \frac{1}{m} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ z \end{pmatrix} \quad (8)$$

$$\alpha = \frac{1}{I} \begin{pmatrix} -y \\ x \\ 0 \end{pmatrix} = \frac{1}{mr^2} \begin{pmatrix} -y \\ x \\ 0 \end{pmatrix} \quad (9)$$

質量  $m$ 、半径  $r$  はパラメータとして定数を与える。 $I$  は慣性モーメントである。

最後に、 $a$  および  $\alpha$  を積分して速度  $v$  および角速度  $\omega$  に加算する。簡単のため、積分計算には時点  $n$  から時点  $n + 1$  までの微小な時間間隔  $\Delta t$  との積を用いた。

$$v_{n+1} = v_n + a \Delta t \quad (10)$$

$$\omega_{n+1} = \omega_n + \alpha \Delta t \quad (11)$$

#### 3.4.2 自然減速 MU

自然減速 MU では、自発的な行動は行わないため、速度  $v$  および角速度  $\omega$  に関して、水の抗力による減速が発生する。

流体中を移動する物体にはたらく、流れの速度に平行で同じ向きに分力を抗力という。本稿においては、水中を動く仮想フィッシュモデルに対して水の抗力がはたらき、自然に減速するようにモデル化する。抗力  $D$  は一般に、次式のように流体（水）と物体の相対的な速さ  $u$  の 2 乗に比例して増加する。

$$D = \frac{1}{2} \rho u^2 S C_D \quad (12)$$

$C_D$  は抗力係数、 $\rho$  は水の密度、 $S$  は物体の代表面積である。

並進運動方向の抗力  $D_v$  と回転運動方向の抗力  $D_\omega$  は、並進方向の代表面積  $S_v$  と回転方向の代表面積  $S_\omega$  をそれぞれ用いて次式のように計算する。

$$D_v = \frac{1}{2} \rho \begin{pmatrix} v_x^2 \\ v_y^2 \\ v_z^2 \end{pmatrix} S_v C_D \quad (13)$$

$$D_\omega = \frac{1}{2} \rho \begin{pmatrix} \omega_x^2 \\ \omega_y^2 \\ \omega_z^2 \end{pmatrix} S_\omega C_D \quad (14)$$

$\rho$ ,  $S_v$ ,  $S_\omega$  および  $C_D$  は、パラメータとして定数を与

える。

最後に、抗力を仮想フィッシュモデルへ加える。簡単のため、抗力は  $\mathbf{v}$  および  $\boldsymbol{\omega}$  と逆向きにかかるものとし、 $\Delta t$  との積を用いて  $\mathbf{v}$  および  $\boldsymbol{\omega}$  から直接減算する。

$$\mathbf{v}_{n+1} = \mathbf{v}_n - \mathbf{D}_v \Delta t \quad (15)$$

$$\boldsymbol{\omega}_{n+1} = \boldsymbol{\omega}_n - \mathbf{D}_\omega \Delta t \quad (16)$$

### 3.4.3 巡航 MU

巡航 MU では、並進運動を維持しようとする。したがって、速度  $\mathbf{v}$  に関しては抗力  $\mathbf{D}_v = 0$  として何もせず、角速度  $\boldsymbol{\omega}$  に関しては自然減速 MU と同様に抗力  $\mathbf{D}_\omega$  を加える。

### 3.4.4 減速 MU

減速 MU では、自然減速よりも強い減速を行う。熱帯魚は胸びれを動かすことによって減速を行うことが多いが、これを簡単のため、代表面積  $S_v$  および  $S_\omega$  が増加したものと扱う。増加した面積をそれぞれ  $\Delta S_v$ 、 $\Delta S_\omega$  とすると、抗力  $\mathbf{D}_v$  および  $\mathbf{D}_\omega$  は次式で計算される。

$$\mathbf{D}_v = \frac{1}{2} \rho \begin{pmatrix} v_x^2 \\ v_y^2 \\ v_z^2 \end{pmatrix} (S_v + \Delta S_v) C_D \quad (17)$$

$$\mathbf{D}_\omega = \frac{1}{2} \rho \begin{pmatrix} \omega_x^2 \\ \omega_y^2 \\ \omega_z^2 \end{pmatrix} (S_\omega + \Delta S_\omega) C_D \quad (18)$$

面積の増加分  $\Delta S_v$ 、 $\Delta S_\omega$  はパラメータとして正の定数を与える。

### 3.5 モーション生成部

モーション生成部では、運動制御部で計算された速度  $\mathbf{v}$  と角速度  $\boldsymbol{\omega}$  を用いて、次式のように仮想フィッシュモデルの身体 (CG モデル) 全体の座標  $\mathbf{p}$  と姿勢 (方向ベクトル  $\mathbf{q}$ ) を更新する。

$$\mathbf{p}_{n+1} = \mathbf{p}_n + \mathbf{v} \Delta t \quad (19)$$

$$\mathbf{q}_t = \mathbf{q}_n + \boldsymbol{\omega} \Delta t \quad (20)$$

$$\mathbf{q}_{n+1} = \frac{1}{|\mathbf{q}_t|} \mathbf{q}_t \quad (21)$$

### 3.6 センシング部

センシング部では、仮想的な視覚機能と平衡感覚機能を扱う。

視覚機能では、自身から一定距離以内に仮想水槽の壁があるかどうかをつねにチェックし、壁があった場合は行動選択部へ伝達する。平衡感覚機能では、自身のピッチ角を取得して加速 MU へ逐一フィードバックし、式 (3) におけるピッチ角の姿勢制御で利用する。

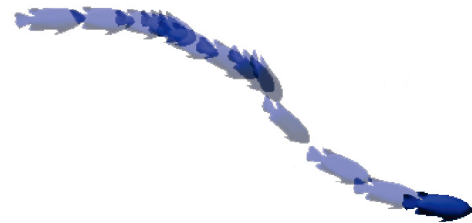
### 3.7 行動選択部

仮想フィッシュモデルが仮想的な水槽の中で自律的に遊泳を行うためには、これまで述べてきた自由遊泳に加えて、少なくとも壁を回避する行動を考慮する必要がある。そこで、基本的にはつねに自由遊泳を行うが、壁を見つけてから一定時間の間にのみ、壁の回避行動をとることにする。

壁の回避行動をとっている間は、加速 MU において、自由遊泳と同じように力ベクトル  $\mathbf{F}$  を加えつつ、徐々に壁の反対側へ向くよう回転させる処理を加える。ただし、それだけでは加速の頻度が少なすぎて回避しきれない場合があるため、モーションユニット選択部における遷移確率を変更して加速 MU へ遷移しやすくする代わりに、加速 MU の式 (2) における力ベクトル  $\mathbf{F}$  の大きさ  $r$  の選択範囲  $r_{min}$  および  $r_{max}$  をともに小さくすることで、小刻みに方向転換するように調整を行う。

## 4. シミュレーション結果

前章で述べた仮想フィッシュモデルを、ルリスズメグイを模した形状をした単色の CG モデルに適用し、遊泳モーションを生成するようにした。実装には 3D ゲームエンジンの Unity を使用し、仮想フィッシュモデルがフレームレート 60 fps で動作するよう設定した。生成されたモーションの例を図 6 に示す。この図では、生成されたアニメーションを 0.5 秒ごとに記録し、仮想フィッシュモデルを重ねて表示している。突発的な加減速や複雑な方向転換



(a) 加減速しながら斜め下へ移動する動き



(b) 少し揺らぎながらまっすぐ進み、減速した後にターンする動き



(c) 複雑に加減速と方向転換を繰り返す動き

図 6 シミュレーション結果の例 (0.5 秒刻み)

Fig. 6 Examples of result of simulation in units of half a second.

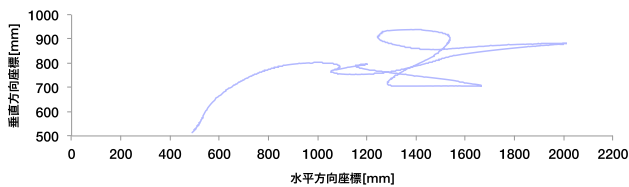


図 7 シミュレーション結果の移動軌跡  
Fig. 7 Track of result of simulation.

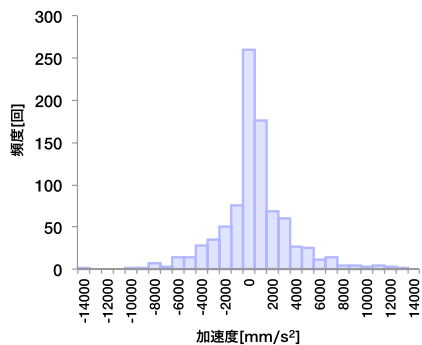


図 8 シミュレーション結果の加速度ヒストグラム  
Fig. 8 Acceleration histogram of result of simulation.

などが組み合わされた熱帯魚らしい動きを再現することができた。

また、シミュレーション結果を 30 秒間記録したときの、水平方向と垂直方向の移動軌跡を図 7 に、水平方向と垂直方向の移動軌跡から算出した加速度のヒストグラムを図 8 に示す。2.1 節で示した熱帯魚の撮影映像から求めた加速度分布 (図 2) と図 8 を比較すると、いずれの分布も 0 付近をピークに、やや正側へ偏って広がった分布となっており、シミュレーション結果も撮影映像と同様に緩やかな加減速と強い加減速の双方が含まれているといえる。

## 5. 評価実験

本章では、動きの突発性と多様性が生き物らしさの知覚に与える影響を調べるために、アニメーション分野で一般的に用いられる [16] 質問紙法による評価実験を行った。形状による影響も考慮するため、図 9 に示した単純形状と魚形状の 2 種類の CG モデルについて別々に実験を行った。魚形状の CG モデルは、図 6 で用いたものと同一である。単純形状の CG モデルは、魚形状と同程度のサイズにした楕円体である。被験者は、18 歳から 35 歳の男女 11 名 (単純形状) および 20 歳から 23 歳の男女 13 名 (魚形状) の計 24 名である。

### 5.1 実験環境

#### 5.1.1 実験装置

実験では、机の上に置かれたディスプレイ上にアニメーション動画を表示した。アプリケーションへ組み込んだ際の利用環境を想定し、蛍光灯下の室内を利用した。ただし、ディスプレイへの光の映り込みは起こらないようにした。

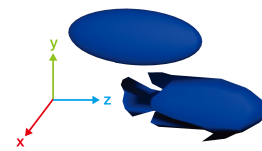


図 9 評価実験で利用した CG モデル  
(上:単純形状, 下:魚形状)

Fig. 9 CG models that we used in the evaluation experiment.

		多様性 (複雑な方向転換) D: Diversity	
		なし	あり
突発性 (急な加減速) B: Burstiness	なし	NB-ND	NB-D
	あり	B-ND	B-D

図 10 各アニメーションの動きの比較

Fig. 10 Comparison of each movement pattern in animation.

用いたディスプレイは 21 インチの液晶ディスプレイで、解像度は 1,920×1,080 ドットであった。

急な移動速度の変化を含む動作要素を突発性 (B: Burstiness)、複雑な方向転換を含む動作要素を多様性 (D: Diversity) とし、3 章で述べた仮想フィッシュモデル内のパラメータを調整することにより、突発性がある場合 (B) とない場合 (NB)、多様性がある場合 (D) とない場合 (ND) を組み合わせ、(1) NB-ND パターン、(2) NB-D パターン、(3) B-ND パターン、(4) B-D パターンからなる 4 種類のアニメーション動画 (図 10) を生成した。

突発性と多様性の有無による動き方とパラメータの違いは下記のとおりである。

- 突発性がない場合 (NB) は、突発性がある場合 (B) と比較して、小刻みかつ滑らかに加速する。処理の違いとしては、モーションユニット選択部において加速 MU へ遷移する確率を大きくする代わりに、加速 MU の式 (2) における力ベクトル  $F$  の大きさ  $r$  の選択範囲  $r_{min}$  および  $r_{max}$  をともに小さくする。
- 多様性がない場合 (ND) は、多様性がある場合 (D) と比較して、自由遊泳における加速時の方向転換を行わず、壁の回避行動を行うときにのみ方向転換する。処理の違いとしては、加速 MU の式 (3) および式 (4) の第 2 項をつねに 0 とする。

CG モデルは透明な壁に囲まれた仮想水槽内にランダムな初期位置で 10 個生成した。各パターンの動画は 4 章と同様に、あらかじめ設定したパラメータを用いて、3D ゲームエンジンの Unity 上でリアルタイムに生成した。動画の提示操作は我々がすべて行った。

#### 5.1.2 質問紙

質問紙では、以下の 3 項目について、1 点から 5 点まで (1. まったくそう思わない 2. あまりそう思わない 3. どちらでもない 4. 少しそう思う 5. 非常にそう思う)、0.5

点刻み（9段階）の評定尺度で採点してもらった。

- (1) 対象の動きは生き物らしかったですか？
- (2) 対象の動きに突発性を感じましたか？
- (3) 対象の動きに多様性を感じましたか？

さらに自由記述の欄を用意し、対象を見てどのような種類の動きが含まれていると感じたか、および対象の動きを見て感じたことがあれば、自由記述で回答してもらった。

### 5.2 実験手順

被験者には1人ずつ、動画を表示するディスプレイの前に着席してもらった。4パターンの動画を1つずつランダムな順番で、被験者が再生終了を希望するまで提示し、提示中の任意のタイミングで質問紙に回答を記入してもらった。このとき、被験者には動画の動きが熱帯魚を模していることや、各アニメーションパターンの差異について事前の説明は行わなかった。すべての動画について評定を終えた時点で実験は終了とした。

### 5.3 実験結果

#### 5.3.1 評定尺度（単純形状）

単純形状のCGモデルを用いた実験における、各パターンについての評定尺度のスコアの平均点と標準偏差の一覧を図11に示す。

棒グラフの長さは平均値を、エラーバーの長さは標準偏差を示す。さらに、パターンの違いにおける印象への影響を分析するために分散分析を行った結果、「生き物らしさ」「突発性」「多様性」の全項目で有意差が見られた。

「生き物らしさ」では  $F(3, 30) = 13.051$ ,  $p < .01$  で有意な主効果があり、また Tukey の HSD 法による多重比較を行った結果、NB-ND と B-D の群間において大きな有意差 ( $p < .01$ ) が見られ、NB-D と B-D の群間においても有意差が見られた ( $p < .05$ )。

「突発性」では  $F(3, 30) = 39.716$ ,  $p < .01$  で有意な主効果があり、また Tukey の HSD 法による多重比較を行った結果、NB-ND と B-D、および NB-D と B-D の各群間において大きな有意差 ( $p < .01$ ) が見られた。

「多様性」では  $F(3, 30) = 22.863$ ,  $p < .01$  で有意な主効果があり、また Tukey の HSD 法による多重比較を行った結果、NB-ND と B-D、NB-D と B-D、および B-ND と B-D の各群間において大きな有意差 ( $p < .01$ ) が見られた。

#### 5.3.2 自由記述（単純形状）

自由記述では、NB-ND は「等速のノロノロとした動き」「単調」「物体が動かされているという印象が強い」「自律性が感じられない」など、動きが規則的・機械的に見えるとする回答が多く見られた。

NB-D は「ジグザグに動く」「一定速度」「向きを変えながらの移動」など、向きを変える動きが多くあげられたが、印象としては「単調で飽きる」「人工物のような感じ、飛行

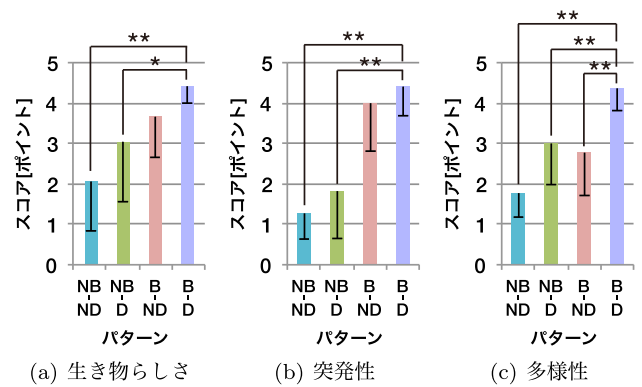


図 11 単純形状についての評価結果の平均点と標準偏差 (\*は  $p < .05$  を, \*\*は  $p < .01$  を示す)

Fig. 11 Average scores and standard deviations of evaluation results about the simple shape model.

船に似ているように感じた」など、機械的な動きにとらえている回答が多かった。

B-ND は「直線運動」「ほとんど1方向のみに突発的な動き」など、動きが直線的であることを指摘する回答が多く見られたほか、「速度変化の頻度が高いと生物っぽい」「直線の動きのときは生物っぽくない」など、動きによっては生き物らしく見えるとする回答が見られた。

B-D は「すごい速いものがあつたり個性がある」「方向を変えるモーションが入ることで動作が単調に感じなくなった」など、動きの複雑さをあげる回答が多かったほか、「魚っぽい。家で金魚を飼っているがその動きにそっくり」「メダカが泳ぐ様子に似てました」など具体的な魚種の動きに近かったとする回答や、「近く別の個体にいる方向に向かう動き」「物体どうしの衝突を避ける」など、モデル化の範囲に含まれていない、複数の物体が連携した動きをあげる回答が見られた。

#### 5.3.3 評定尺度（魚形状）

魚形状のCGモデルを用いた実験における、各パターンについての評定尺度のスコアの平均点と標準偏差の一覧を図12に示す。

棒グラフの長さは平均値を、エラーバーの長さは標準偏差を示す。さらに、パターンの違いにおける印象への影響を分析するために分散分析を行った結果、「生き物らしさ」「突発性」「多様性」の全項目で有意差が見られた。

「生き物らしさ」では  $F(3, 36) = 12.929$ ,  $p < .01$  で有意な主効果があり、また Tukey の HSD 法による多重比較を行った結果、NB-ND と B-D、および B-ND と B-D の群間において大きな有意差 ( $p < .01$ ) が見られ、NB-D と B-D の群間においても有意差が見られた ( $p < .05$ )。

「突発性」では  $F(3, 30) = 20.498$ ,  $p < .01$  で有意な主効果があり、また Tukey の HSD 法による多重比較を行った結果、NB-ND と B-D、および NB-D と B-D の各群間において大きな有意差 ( $p < .01$ ) が見られた。



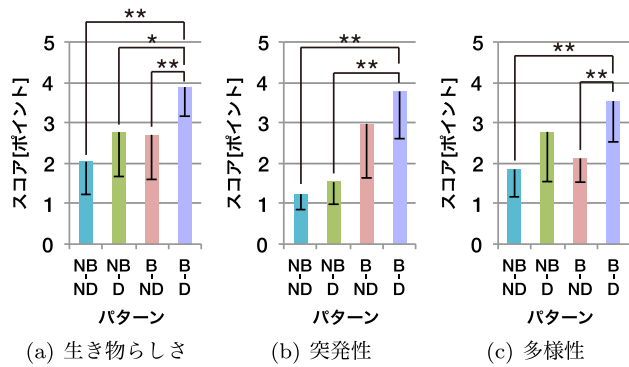


図 12 魚形状についての評価結果の平均点と標準偏差 (\*は  $p < .05$  を, \*\*は  $p < .01$  を示す)

Fig. 12 Average scores and standard deviations of evaluation results about the fish shape model.

「多様性」では  $F(3, 30) = 11.349$ ,  $p < .01$  で有意な主効果があり, また Tukey の HSD 法による多重比較を行った結果, NB-ND と B-D, および B-ND と B-D の各群間において大きな有意差 ( $p < .01$ ) が見られた。

### 5.3.4 自由記述 (魚形状)

自由記述では, NB-ND は「水流に流されている感じ」「速度の変化が微量なので, 生き物らしさを感じない」「個体ごとの動きにほとんど差がない」など, 魚が受動的に動いている印象や, 動きの単調さが多くあげられた。

NB-D は「一定方向での前進」「同じ動きしかせず, 単調な動きしかしないので見てて退屈」など, 動きの種類が多くなっても単調な印象を受けた回答が多かった。

B-ND は「ほぼ方向転換せず, まっすぐ動くので生き物らしさを感じなかった」「進路を走る自動車のように思えた」など, 動く方向に対する単調さや機械的な印象が多くあげられた。

B-D は「上下へ昇ったり降りたりする動き」「直線的ではなく, 円弧を描くような動き」など, あげられた動きのパターンが他の 3 パターンよりも多様な傾向にあり, 「動きが立体的 (遠近感もやや感じる)」など動く方向の複雑さをあげる回答が多く見られた。

## 5.4 考察

評価実験の結果, 動きの突発性と多様性の 2 要素をともに含む動作パターン (B-D) は, 突発性と多様性の両方あるいは片方が欠けているその他 3 つの動作パターンと比べて生き物らしさの評価値が有意に高く, 平均値の比較でも顕著な差が見られた。したがって, 動きの突発性と多様性が, 熱帯魚の遊泳モーションにおける生命感を向上させることを確認できた。

## 6. おわりに

本稿では, 動きの突発性と多様性に着目した熱帯魚の生命的アニメーションシステムを提案した。魚類の生態生理

学やビデオ分析を参考に, 加速・自然減速・減速・巡航からなる 4 つの基本動作を組み合わせ, 2 段階の確率的制御によってモーションを生成する仮想フィッシュモデルを構築した。動作選択過程で突発的なモーションを生成し, モーション生成過程におけるパラメータの制御により動きの多様性を作り出す。質問紙を用いた評価実験により, 突発性と多様性の 2 属性の組み合わせることで生命感が向上することを確認した。

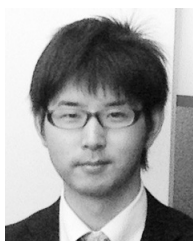
本手法は動きと形状情報を分離して扱うためにどのような CG モデルの形状にも適用でき, 計算量も小さいため, アニメーションやゲームなどのコンテンツへ組み込みやすいという特長がある。一方で, 本手法では身体全体の動きのみに注目したため, 仮想フィッシュモデルの視覚的な構成要素は最小限に抑えており, 仮想水槽もごく単純な環境としていた。今後の課題として, 身体のしなりや胸びれといった部位ごとの動き, および縄張りや捕食といった社会的な行動も考慮したかたちに拡張することによって, 生き物らしさの向上や, マグロやアジといった熱帯魚より大型の魚種への適用が期待できると考えられる。

## 参考文献

- [1] Disney: Finding Nemo [motion picture], United States (2003).
- [2] ソニー・コンピュータエンタテインメント: AQUANAUT'S HOLIDAY 隠された記録 [PlayStation 3], Japan (2008).
- [3] チームラボ: Sketch Aquarium, Japan (2013).
- [4] 鴨川シーワールド: サンゴ礁の願い Coral Message, Japan (2014).
- [5] Tu, X. and Terzopoulos, D.: Artificial Fishes: Physics, Locomotion, Perception, Behavior, *Computer Graphics (Proc. ACM SIGGRAPH '94)*, pp.43-50 (1994).
- [6] Tan, J., Gu, Y., Turk, G. and Liu, G.K.: Articulated Swimming Creatures, *ACM Trans. Graphics*, Vol.30, No.4, Article No.58 (2011).
- [7] Reynolds, C.W.: Flocks, Herds, and Schools: A Distributed Behavioral Model, *Computer Graphics (Proc. ACM SIGGRAPH '87)*, Vol.21, No.4, pp.25-34 (1987).
- [8] Vicsek, T., Czirok, A., Ben-Jacob, E., Cohen, I. and Shochet, O.: Novel Type of Phase Transition in a System of Self-Driven Particles, *Physical Review Letters*, Vol.75, No.6, pp.1226-1229 (1995).
- [9] 岩井 保: 魚学入門, 恒星社厚生閣 (2005).
- [10] 会田勝美: 魚類生理学の基礎, 恒星社厚生閣 (2002).
- [11] 塚本勝巳: 魚類生態学の基礎, 恒星社厚生閣 (2010).
- [12] Helfman, G., Collette, B.B., Facey, D.E. and Bowen, B.W.: *The Diversity of Fishes: Biology, Evolution, and Ecology, 2nd Edition*, Wiley-Blackwell (2009).
- [13] 加藤直三, 鈴木博善: 魚の胸ひれ運動と水中ロボットへの応用, 日本流体力学会数値流体力学部門 Web 会誌, Vol.12, No.3, pp.143-153 (2005).
- [14] 東 昭, 伊藤慎一郎: エアロ・アクアバイオメカニクス, エアロ・アクアバイオメカニクス研究会, 森北出版 (2010).
- [15] 鬼束幸樹, 秋山壽一郎, 山本晃義, 脇健 樹: 静止流体中を単独で遊泳するアユの遊泳特性, 水工学論文集, Vol.52, pp.1195-1200 (2008).
- [16] Scholl, B.J. and Gao, T.: Perceiving animacy and

intentionality: Visual processing or higher-level judgment?, *Social perception: Detection and interpretation of animacy, agency, and intention*, Rutherford, M.D., Kuhlmeier, V.A. (Eds.), MIT press (2013).

- [17] Michotte, A.: *The perception of causality*, Basic Books (1946 / English Transl. 1963).
- [18] Heider, F. and Simmel, M.: An Experimental Study of Apparent Behavior, *The American Journal of Psychology*, Vol.57, No.2, pp.243–259 (1944).
- [19] Tremoulet, P.D. and Feldman, J.: Perception of animacy from the motion of a single object, *Perception*, Vol.29, No.8, pp.943–951 (2000).
- [20] 里井大輝, 中基久和巨, 星野准一: アニマシー知覚に基づく仮想ホタルの生命的アニメーションシステム, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.18, No.3, pp.337–343 (2013).



里井 大輝 (学生会員)

1990年生。2013年筑波大学情報学群情報メディア創成学類卒業。2014年同大学大学院システム情報工学研究科博士前期課程修了, 同年より同研究科博士後期課程に在学中。キャラクターアニメーション, エンタテインメントコ

ンピューティングの研究に従事。修士(工学)。



中基 久和巨

1988年生。2012年東京工科大学大学院バイオ・情報メディア研究科博士前期課程修了, 同年より筑波大学大学院システム情報工学研究科博士後期課程に在学中。ヒューマンロボットインタラクション, アニマトロニクスの研究

に従事。修士(工学)。



星野 准一 (正会員)

1967年生。筑波大学システム情報系准教授。エンタテインメントコンピューティングの研究に従事。博士(情報科学), 博士(デザイン学)。