

# 動きの突発性と多様性に基づく 生命的アニメーションシステム

里井大輝<sup>†1</sup> 中台久和巨<sup>†2</sup> 星野准一<sup>†3</sup>

本稿では、熱帯魚を対象に、動きの突発性と多様性に着目した生命的アニメーションシステムを提案する。本システムでは、魚類の生態生理学を参考に、遊泳速度と尾鰭の振動数の関係など、実際の魚の特性や生体構造を取り入れ、2段階の確率的制御を行う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。評価実験では、突発性と多様性の2属性の組み合わせにより生命感が向上することを確認した。

## Life-like Animation System Based on Intermittency and Diversity of Motion

DAIKI SATOI<sup>†1</sup> HISANAO NAKADAI<sup>†2</sup>  
JUN'ICHI HOSHINO<sup>†3</sup>

In this paper, Intended for tropical fish, we propose a life-like animation system that focuses on intermittency and diversity of motion. In this system, with reference to the physiological ecology of fish, we have constructed a fish virtual model to incorporate such relationship frequency of the caudal and swimming speed, the structure and biological characteristics of the fish in fact, to control stochastic two-stage. Generate a sudden motion in the selection process works, creating a diversity of movement by controlling the parameters of the motion generation process. In the evaluation experiment, we confirmed that the sense of life is enhanced by the combination of two attributes of intermittency and diversity.

### 1. はじめに

生きているように感じられるキャラクタをつくることは、映画、アニメーション、ゲームなどのコンテンツで重要であるが、制作では優れたアニメーターの経験や感性に依るところが大きく、様々なスキルやノウハウの習得が必要とされている。時間をかけて場面を作り込むことができるアニメーション作品であれば、様々な工夫が可能であるが、ゲームアプリケーション、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が必要となるため、ソフトウェアの実行時に計算モデルで振る舞いを生成できることが必要となる。

生命を持っているように見える対象物を構築する試みは、コンピュータグラフィクス、人工生命、人工知能、認知科学などの様々な観点から研究が行われてきた。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ことをアニメーション知覚と呼ばれて

いる。

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。Michotte は単純化された2つの物体の衝突のタイミングを変えることにより、一緒に移動したり、突き飛ばしたりしている解釈を誘発するとしている[1]。また Heider & Simmel は、複数の単純な図形が運動するアニメーションから、それぞれの図形に捕食者と捕食対象関係や図形を擬人化して“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を報告している[2]。視覚的なアニメーション知覚には形よりも運動が及ぼす影響が大きいとして、Tremoulet & Feldman は点が二次元上を等速直線運動し、その後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。このとき速度差、角度の大きさが大きいほどアニメーションを感じるとしている[3]。運動に対しては、角度と方向角度の変化よりも方向転換する頻度が重要である[4]といったものや、直進的な動きは意図を感じるとされているが、自己推進性は意図性には弱い印象を与える[5][6]とされている。このように、アニメーション知覚は、基礎的な知覚から高度な推論まで様々なレベルの認知機能が関わっていると言われており、研究も多岐にわたっている。

コンピュータグラフィクスの分野では、Tu & Terzerpolous が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 を提案している[7]。また、複数対象物のシミュレーションにつ

<sup>†1</sup> 筑波大学情報学群

School of Informatics, University of Tsukuba

<sup>†2</sup> 筑波大学大学院システム情報工学研究科

Graduate School of Systems and Information Engineering, University of Tsukuba

<sup>†3</sup> 筑波大学システム情報系

Faculty of Engineering, Information and System, University of Tsukuba

いては *boid* など 知覚と簡単な行動ルールにより群衆的な行動が見られることが知られている[8]. 人工生命の研究として *Sims* の仮想生物の進化が挙げられ[9], センサとアクチュエータユニットを用いて形態と制御器を *GA* に基づいて進化させ, さまざまな形態や移動方法の進化を実現している. エージェントの研究分野では, *Travers* が自立性, 反応性, 目的性などの要素を持つことで生命的な振る舞いをするソフトウェアオブジェクトを作成できるとして, *LiveWorld* と呼ばれるプロトタイプベースのプログラミング環境を構築している[10]. ところが, これらのシステムでは, 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に, 突発的に動いたり止まったりする俊敏性のある動きや, 動きの個体差や種別差などの多様性があまり考慮に入られていない.

本稿では, 動きの突発性と多様性に着目した生命的アニメーションシステムを提案する. 実装対象として本システムでは熱帯魚を選定した. 熱帯魚は行動パターンが比較的単純でありながら動きの表現が多様であり, 生体構造や, 生息環境などの基礎研究が充実している[11][12]ことに加えて, コンテンツとしても楽しむことができるからである. 本システムでは, 魚類の生態生理学を参考に遊泳速度と尾鰭の振動数の関係などの実際の魚の特性を取り入れるとともに, 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仮想フィッシュモデルを構築して突発的なモーションを生成した. また, モーション生成過程におけるパラメータの制御により個体内のモーションの多様性を作り出す. 評価実験では, 突発性と多様性の2属性の組み合わせにより生命感が向上することを確認した.

## 2. 生命的モーション要素の分析

従来法での動きの生成手段としては, 物理シミュレーションなどの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が, 実際の生物の動きでは, 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より生命感を創出する動きの基本要素について考察する.

### 2.1 生命的要素を抽出するための予備実験

生命的な振る舞いの基本要素を抽出する方法として, 実際に水槽内で遊泳する熱帯魚 (ルリスズメダイ) の様子をビデオカメラにより撮影して, 目視で観察するとともに, 統計的な分析を行った. 図1は水平方向と垂直方向の魚の移動軌跡を取得して表示したところであり, 図2は移動軌跡のスペクトル分析を行ったところである. 熱帯魚の動きは3次元的であるが, 本章では大まかな傾向を掴むことが

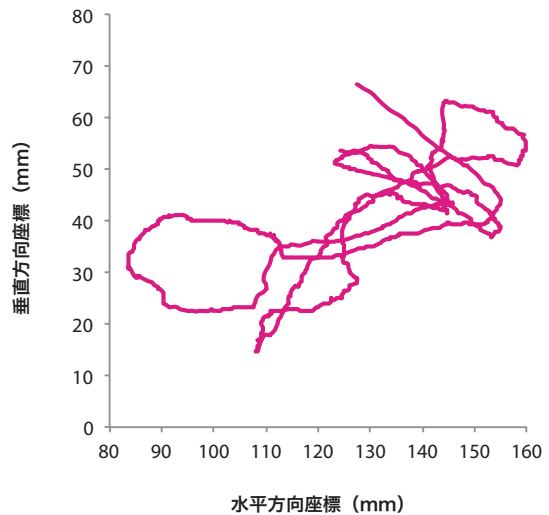


図1 ルリスズメダイの移動軌跡

Figure 1 Movement trace of the Sapphire devil.

できれば良いため, 奥行き方向への移動が少ないサンプルを選定して, 水平・垂直方向の見かけ上の動きのみを利用した. その結果, パワースペクトルが周波数に反比例する関係が示された. これはピンクノイズ ( $1/f$  ゆらぎ) と呼ばれるもので, 神経活動や呼吸のリズム, 鼓動波形パターンなど自然界に多くみられる[13][14]. また図3に加速度の変化分布を示す. 魚は常に泳ぎ続けているのではなく, 頻繁に加速と減速を行っていることが分かる. ピークは弱い加速にあるが, 分布全体の歪度は $-0.05475$ となっており, 減速側の分布も広がっており, 水の抵抗による自然減速のみでなく意図的に止まっていることが読み取れる. 分布の歪度は次式で求められる.

$$\frac{n}{(n-1)(n-2)} \sum_{i=1}^n \left( \frac{x_i - \bar{x}}{s} \right)^3 \quad (1)$$

### 2.2 魚類の生態生理学に基づく考察

多くの魚は尾鰭を振動させて前進方向への推進力を得て移動を可能にしている. また胸鰭を鳥の羽ばたきのように動かし推力を獲得し移動を行う場合もある. 本稿で取り上げる熱帯魚の多くは胸鰭を主に使い移動している. 胸鰭を複雑に回転させることにより, 方向転換や減速行動などを可能にしており, 魚の複雑な動きを可能にしている[15][16]. また魚の遊泳速度 (体長倍速度) は尾鰭の振動数に比例し, 以下の式で表される.

$$U = k \times F \times L \quad (2)$$

$k$ は遊泳係数 (尾鰭の1往復で前進する距離),  $F$ は尾鰭振動数 (回/秒, Hz),  $L$ は魚体長をそれぞれ表している. 今回は, 実装するモデルに魚の形状を与えているので, 形状と動作の不一致からくる不自然さをなくすため, 速度と尾鰭振動数の関係を導入する.

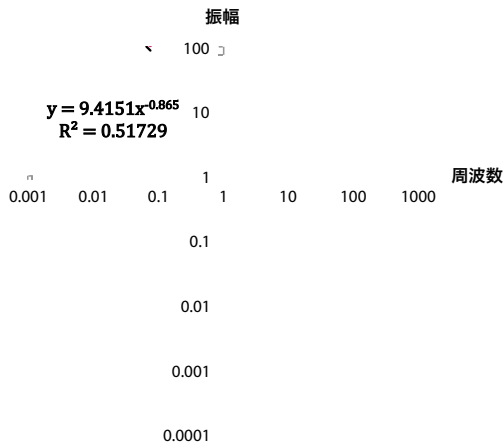


図2 ルリスズメダイの移動軌跡のスペクトル分析結果  
 Figure 2 Spectrum analysis of the movement trace of the Sapphire devil.

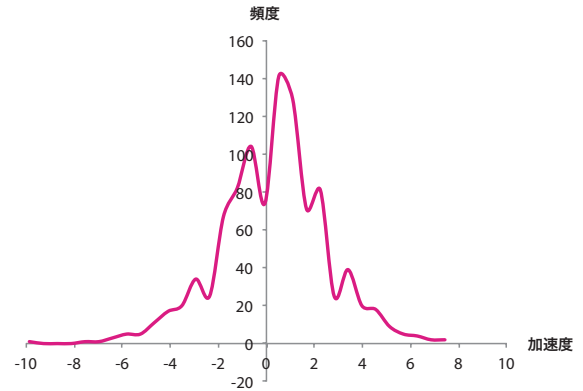


図3 ルリスズメダイの加速度分布  
 Figure 3 Acceleration distribution of the Sapphire devil.

### 3. 突発性と多様性の生成法

本研究では2章でふれた突発性と多様性を含む運動が重要な生命的要素であると考え、突発性と多様性を兼ね備えたモーション生成手法を提案する。本手法では、加速や減速などの動作要素を確率的に選択する過程と、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の、2段階の確率モデル(図4)から構成される。これにより、比較的単純な動きの構成要素でありながら、多様性を感じることでできる動作の生成を可能にした。

#### 3.1 モーションモジュールと2段階確率モデル

本手法では、魚の加速・減速を取り入れたモーション生成を行うために、表1に示す4つの動作要素を組み合わせる。これは2.1節の予備実験により得られた図3の加速度分布と魚の目視を参考に、魚の運動に含まれる基本要素を抽出することで得られたものである。

本稿では、これら4つの動作要素をモーションモジュールと呼び、モーション生成の基本単位として扱う。微小時間ごとにモーションモジュールの動作選択を行い、各モーションモジュールで定義された処理に基づいて動作生成を行う。

表1 モーションモジュール一覧  
 Table 1 List of Motion Modules.

(1) <b>加速</b>	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) <b>自然減速</b>	意図的には何もせず水の抗力によって自然に減速する動作要素
(3) <b>巡航</b>	水の抗力分の力を加えて等速度で前進を続ける動作要素
(4) <b>減速</b>	意図的に減速したり急停止したりする動作要素

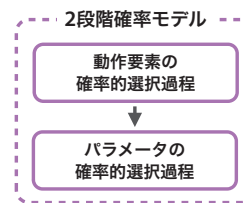


図4 モーション生成における2段階確率モデル  
 Figure 4 Two-stage stochastic model at generating motions.

#### 3.2 動作選択過程

モーションモジュールの選択過程は、各モーションモジュールを状態とみなして、離散時間における状態遷移としてモデル化する。本稿では図5Aおよび次式の単純マルコフ連鎖を利用した。

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

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

(ただし、 $S_1$ は加速、 $S_2$ は自然減速、 $S_3$ は巡航、 $S_4$ は減速のモーションモジュールを示す)

すなわち、ある離散的な時点  $n$  においてモーションモジュールが選ばれる確率は、時刻  $n-1$  において選択されているモーションモジュールの種類に依存する。

#### 3.3 モーション生成過程

選択された各モーションモジュールの速度、加速度などの制御パラメータを確率的に制御することで、動きの多様性を生成する。

##### 3.3.1 加速モジュール

加速モジュールでは、魚の身体を1点の質点を持った剛体と考え、ランダム性を含んだ力を発生させて、並進運動の加速度と回転運動の角速度を加える。

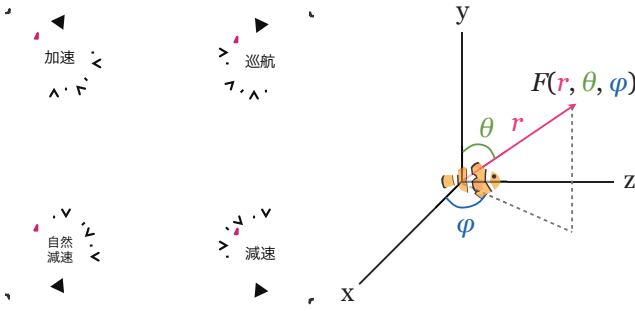


図 5A モーションモジュールの選択過程

Figure 5A Motion Modules selection model.

図 5B 座標系と力ベクトル

Fig.5B Coordinates and Force Vector.

まず、発生させる力  $F$  を、図 5B に示すように魚の質点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、魚の身体は  $z$  軸の正方向を向いた姿勢を基準とする。 $F$  の大きさ  $r$  はパラメータとして定数を与える。偏角  $\theta$ 、 $\varphi$  は次式によって求める。

$$\theta = 90 + R(a_\theta) \quad (3)$$

$$\varphi = 90 + R(a_\varphi) \quad (4)$$

ただし  $R(a)$  は、 $-a$  から  $a$  までの範囲で疑似乱数を返す関数である。 $R(a_\theta), R(a_\varphi) = 0$  のとき、魚は全く回転せずに直進する。 $a_\theta$  および  $a_\varphi$  はパラメータとして定数を与える。 $a_\theta$  の値が大きいほどピッチ角が平均的に大きくなり、 $a_\varphi$  の値が大きいほどロール角が平均的に大きくなる。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。

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

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

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

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

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

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

なお、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、 $\mathbf{a}$  および  $\boldsymbol{\alpha}$  を積分して速度  $\mathbf{v}$  および角速度  $\boldsymbol{\omega}$  に計算する。簡単のため、積分計算は微小時間  $\Delta t$  との積を用いた。

$$\mathbf{v}(t + \Delta t) = \mathbf{v}(t) + \mathbf{a} \cdot \Delta t \quad (10)$$

$$\boldsymbol{\omega}(t + \Delta t) = \boldsymbol{\omega}(t) + \boldsymbol{\alpha} \cdot \Delta t \quad (11)$$

### 3.3.2 自然減速モジュール

自然減速モジュールでは、自発的な行動は行わないため、速度  $\mathbf{v}$  および角速度  $\boldsymbol{\omega}$  に関して、水の抗力による減速が発生する。水の抗力  $D$  は速度の 2 乗に比例しており、次式で計

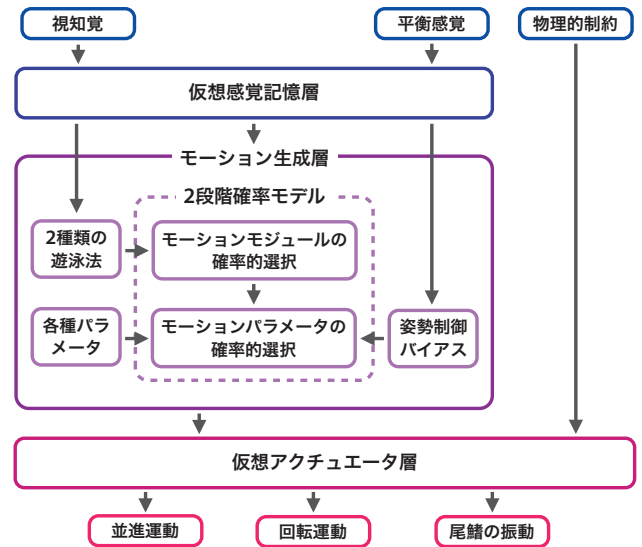


図 6 仮想フィッシュモデル

Figure 6 Virtual Fish Model.

算される。

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

$C_D$  は抗力係数、 $\rho$  は水の密度、 $u$  は魚の速さ、 $S$  は魚の代表表面積である。 $u$  以外の値は、パラメータとして定数を与える。抗力は、並進運動方向の抗力  $D_v$  と並進運動方向の抗力  $D_\omega$  の 2 つを個別に計算する。最後に  $\mathbf{v}$  および  $\boldsymbol{\omega}$  を以下のように更新する。

$$\mathbf{v}(t + \Delta t) = \mathbf{v}(t) - \mathbf{v}(t) \cdot D_v \Delta t \quad (D_v \leq 1) \quad (13)$$

$$\boldsymbol{\omega}(t + \Delta t) = \boldsymbol{\omega}(t) - \boldsymbol{\omega}(t) \cdot D_\omega \Delta t \quad (D_\omega \leq 1) \quad (14)$$

### 3.3.3 巡航モジュール

巡航モジュールでは、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  $D_v = 0$  とし、角速度  $\boldsymbol{\omega}$  に関しては抗力  $D_\omega$  を計算する。最後に自然減速モジュールと同様に  $\mathbf{v}$  および  $\boldsymbol{\omega}$  を更新する。

### 3.3.4 減速モジュール

減速モジュールでは、意図的な自然減速よりも強い減速を行う。抗力  $D_v$ 、 $D_\omega$  は次式で計算される。

$$D_v = B_v \cdot C_D \frac{\rho u^2}{2} S \quad (15)$$

$$D_\omega = B_\omega \cdot C_D \frac{\rho u^2}{2} S \quad (16)$$

なお、減速の倍率  $B_v$ 、 $B_\omega$  はパラメータとして定数を与える。

## 4. 仮想フィッシュモデルの構成

3 章で述べたモーション生成法を利用して自律的に動く熱帯魚をつくるためには、仮想水槽内で壁を知覚して避けるなどの基本機能が必要となる。図 6 に仮想フィッシュモデルの基本構成を示す。本システムは、入力層から中間の 3

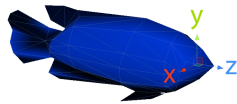


図7 ルリスズメダイのCGモデル

Figure 7 The CG model of Sapphire devil.

層を経て出力層へと続く、計5つの層で構成されている。

### (1) 入力層

入力層は、周囲の環境を知覚し、行動制御に必要な情報を収集して中間層に入力する機能を持つ。視知覚部では視界を通じて他オブジェクトの知覚を行い、平衡感覚部では本体部のワールド座標系に対する傾きを検出する。物理的制約部は水の抗力や、最大速度・最大角速度といった物理的な制約条件を入力する。

### (2) 仮想感覚記憶層

仮想感覚記憶層は、入力情報を一時的に保存する機能を持つ。視知覚において、特定のオブジェクト（本稿では仮想水槽の壁と餌を指す）を知覚した場合に、そのオブジェクトの情報をターゲットとして一定時間だけ記憶しておく。

### (3) モーション生成層

モーション生成層では、前章で述べたように、2段階の確率モデルを用いてモーションモジュールの選択と制御を行う。ここでは、自由遊泳とターゲット指向遊泳という2つの仮想的な遊泳法を定義している。ターゲット指向遊泳とは、壁を避けたり、餌に向かって泳いだりするものである。仮想感覚記憶層においてターゲットが記憶されていればターゲット指向遊泳が、そうでなければ自由遊泳が選択され、モーションモジュールの確率的選択過程における遷移確率が遊泳法によって変化する。カベクトル $F$ や水の抗力 $D$ の生成においては複数のパラメータが定義されており、ユーザはこれらパラメータの値を増減するだけで、熱帯魚の動き方の傾向を任意に調整できる。

熱帯魚の場合、適度に魚の姿勢を水平に保たせる、すなわちピッチ角を0付近に留めておく必要がある。そのため、加速モジュールにおける偏角 $\theta$ の算出では、平衡感覚の情報に基づいてバイアス（姿勢制御バイアス）が働く。

### (4) 仮想アクチュエータ層

仮想アクチュエータ層では、魚に働く運動学的な処理を行う。剛体力学の法則に基づいて、並進運動における加速度や速度、回転運動における角加速度や角速度を更新する。

### (5) 出力層

出力層では、魚のCGモデルの制御を行う。仮想アクチュエータ層で計算された速度と角速度に基づいて、並進運動と回転運動を行う。また、尾鰭では、身体の速さ $v$ に比例した速さで振動運動を行う。

本稿では、図7に示すルリスズメダイを模したCGモデル

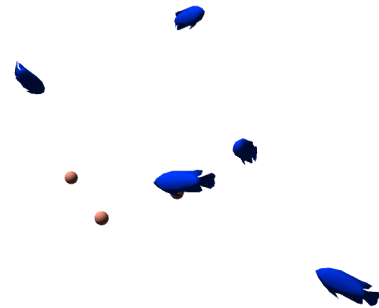


図8 餌に向かって泳ぐルリスズメダイ

Figure 8 Sapphire devils swim toward baits.

を使用した。尾鰭の部分は左右に動くようになっている。尾鰭の位相 $\alpha_F$ と振動角 $\theta_F$ は次式で計算される。

$$\alpha_F(t + \Delta t) = \alpha_F(t) + K_F \cdot v \Delta t \quad (17)$$

$$\theta_F = \theta_{Fmax} \sin \alpha_F \quad (18)$$

ただし、 $\theta_{Fmax}$ は尾鰭の最大振動角、 $K_F$ は振動速度の係数である。

CGシミュレーションの動作例として、球状の餌に向かって魚が泳いでいる様子を図8に示す。

## 5. 評価実験

本実験では各動作要素どうしの影響を調べるため、複雑な方向転換を含む要素を多様性、急加速、減速な移動速度の変化を含む要素を突発性とし、4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、相互の要素が影響しないアニメーションを生成する。動作パターンは表2の通りである。すべてのアニメーションの表示時間は60秒に設定した。

また今回は評価実験に加え、各パターンで生成されたアニメーションの魚の移動軌跡のスペクトル分析を行う。

### 5.1 実験装置

実験はこちらで指定した机の上に置かれたPCディスプレイ上にアニメーション動画を表示する。動画を生成するプログラムは3DゲームエンジンのUnityで作成した。動画は全部で4パターンあり、各パターンの動画はあらかじめ設定したパラメータを基に、Unity上でリアルタイムに生成される。動画の提示操作は我々がすべて行う。各動画の差異は表2の通りである。

質問用紙の内容は、提案手法である動きの突発性と多様性を感じるかを確認するものと、アニメーション知覚の先行研究を基に生物性の生起を調査するものを含めた計14問の質問（表3）、知覚できる動きのパターンの種類を調べる自由記述、動画を見てどのような印象を持ったかという印象を自由記述で回答する欄を用意した。被験者は自由記述以外の質問に対し、5段階（1. 全くそう思わない 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。



表 2 各生成アニメーションの性質

Table 2 Property of each generated animation.

パターン 1	急な加速や減速を行わず、複雑な方向転換も行わない。仮想水槽の壁との衝突を避けるために行うターン以外では方向を変えず、仮想水槽内を往復する。
パターン 2	急な加速や減速は行わないが、複雑な方向転換が含まれ、壁回避以外でも頻繁に方向を変える。
パターン 3	急な加速や減速を行うが、複雑な方向転換は行わない。
パターン 4	急な加速や減速を行い、複雑な方向転換も行う。

表 3 質問文の一覧

Table 3 List of question sentences.

1. 対象の動きは生き物らしいと感じましたか？ 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？ 4. 対象の動きに緩急があると感じましたか？ 5. 対象の動きに個性があると感じましたか？ 6. 対象の動きは複雑だと感じましたか？ 7. 対象の動きは単純だと感じましたか？ 8. 対象の動きは自然だと感じましたか？ 9. 対象の動きは規則的だと感じましたか？ 10. 対象の動きは予測できないと感じましたか？ 11. 対象の動きは意図があるように感じましたか？ 12. 対象の動きは自ら判断していると感じましたか？ 13. 対象の動きは受動的だと感じましたか？ 14. 対象の動きは能動的だと感じましたか？
---

5. 非常にそう思う)の評定尺度(尺度間の内分も含む)で評価することを求められる。

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い実験を行った。被験者は、筑波大学の学生10名である。はじめに、4種類の動画を見てもらう事を説明し、動画ごとにこちらで用意した質問用紙に記入し、評価をしてもらうことを説明する。その後、こちらの操作で各動画をディスプレイに表示する。このとき、被験者には表2の各動画の性質を告げずに行う。各動画は60秒で終了するが、希望があれば何度でも再生する。4種類の動画それぞれの評定を終えた時点で実験は終了とする。

5.3 実験結果

質問用紙による調査結果から各パターンにおける質問1(対象の動きは生き物らしいと感じましたか?)の評定尺度の平均点と標準偏差を算出したグラフを図10に、P4と他の3パターンに関するt検定の結果を表4に示す。P1とP4については有意水準1%で有意差があり、P2とP4、およびP3とP4については有意水準5%で有意差があった。し

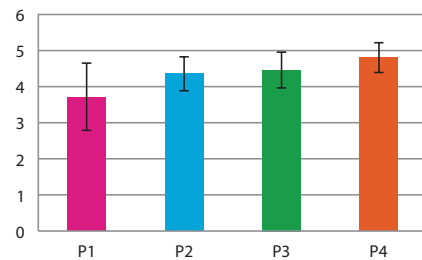


図9 生き物らしさに関する評定尺度の平均点と標準偏差  
 Figure 9 Average score and standard deviation rating scale on creature-ness.

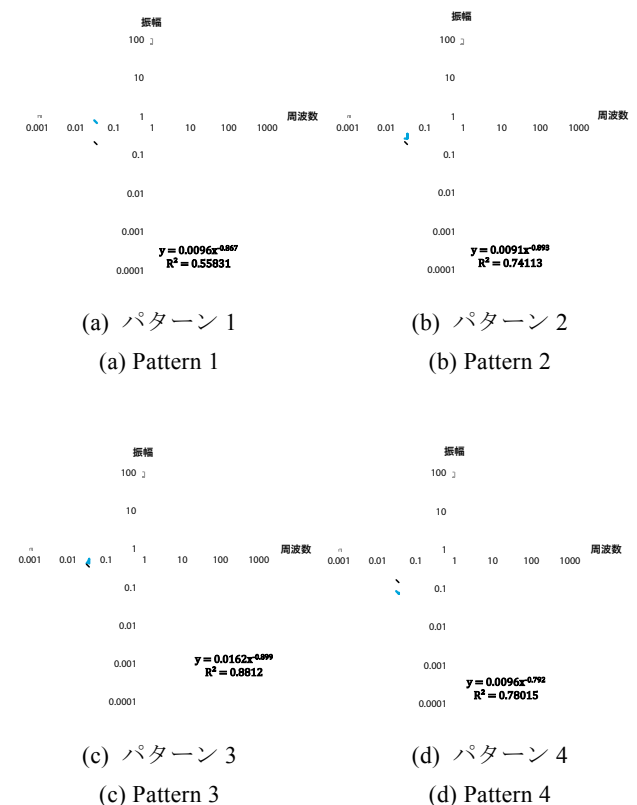


図10 CGシミュレーションにおける移動軌跡のスペクトル分析結果  
 Figure 10 Spectrum analysis of the movement trace in CG simulation.

表4 質問1の評定結果に関するt検定の結果

Table 4 Results of t-test about question 1.

	パターン 1 対 パターン 4	パターン 2 対 パターン 4	パターン 3 対 パターン 4
t	4.125	2.861994	2.333333
P(T≤t) 両側	0.002579	0.018719	0.044504
t 境界値 両側	2.262157	2.262157	2.262157

たがって、突発性と多様性の要素があることで生き物らしさをより感じるようになったことを確認できた。なお、他の項目を含む全ての平均点と標準偏差は付録1に、各パターンとアンケート項目における相関は付録2に示す。

図10に、各パターンで取得した移動軌跡のスペクトル分析の結果を示す。生き物らしさの評価とピンクノイズ成分の関係が予想されたが、今回分析した全てのパターンにピンクノイズ成分が見られる結果となった。

## 6. おわりに

評価実験の結果、突発性と多様性の2つの要素を含む動作パターンが生物性を向上させることを確認した。これは、1章で述べた物体の運動速度変化と角度変化が大きいほどアニメシーを感じる[3]こととも一致している。目標志向性を伴うアニメシーは直線的な動きを行うことで得られるとされているが、今回の実験により、パターン4のように複雑な方向転換を含む動作でも、向きの変化の中に速度変化を含ませることで、目的志向性と生物性がともに高い評価を得られることが分かった。

実験結果を細かく見ると、突発性のみでは意思を感じることはあるが、動きが規則的になってしまい、単純な印象を与えているようである。また多様性のみでも、複雑な動きの印象はあるものの、個性を感じないという結果となった。一方、自由記述では突発性と多様性の両方がある場合に、実際には設定していない、「他の魚を追いかける、逃げる」といった魚同士の相互作用や、「餌を見つけて泳いでいる」というような、目標志向性を生起させる結果が得られた。さらに“動きの予測ができない”、“自ら判断している”、“動きが複雑”などの評価が向上した。これら3つの項目は、生き物らしさの評価との間に強い相関があり、“動きの予測ができない”は有意水準1%で有意 ( $t = 12.68817, p < 0.006154$ )、 “自ら判断している”も有意水準1%で有意であり ( $t = 10.22391, p < 0.009432$ )、 “動きが複雑”は有意水準5%で有意となった ( $t = 6.111638, p < 0.025743$ )。

また、4つの動作パターン全てのスペクトルにピンクノイズの成分が見られたことから、ピンクノイズと生物性の間に直接の関係はないことが示唆された。しかし、各パターンのアニメーションを見て“自然な動きを感じる”という評価項目に関しては動作パターンの違いによる影響が少ないため、ピンクノイズは生き物を表現する上では必要な要素であると考えられる。

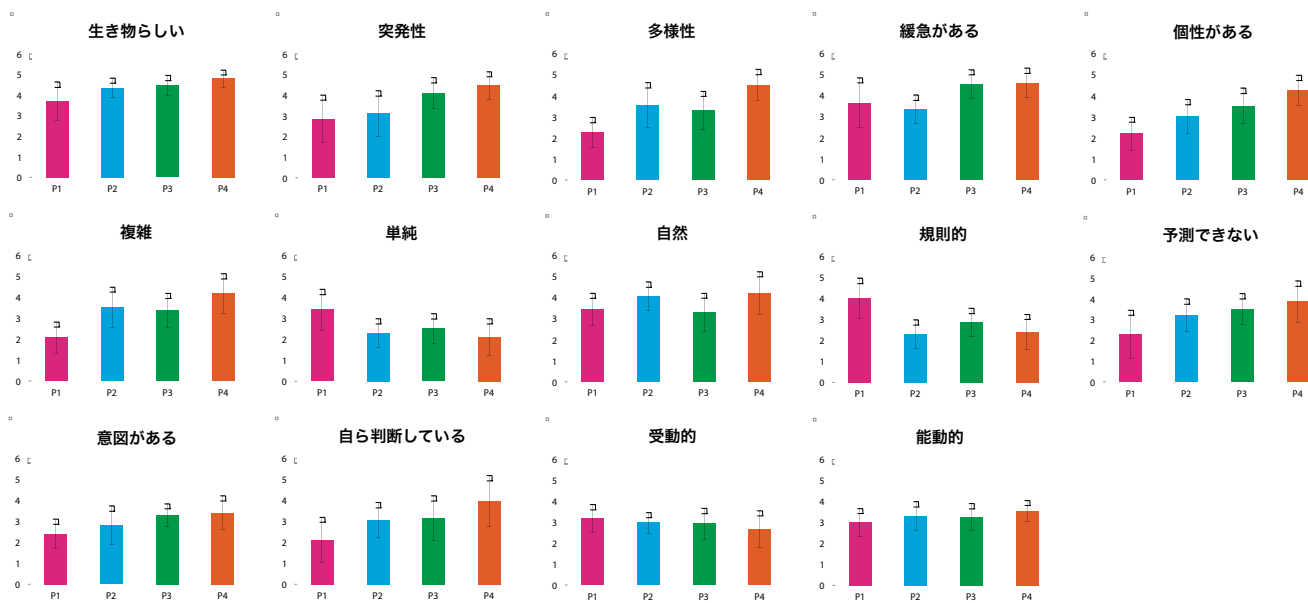
今後の課題としては、この「自然な動き」というものが何を表し、どこから生起されるのかを調査していく必要がある。また将来的には、本稿の仮想フィッシュモデルを身体のしなりや胸鰭の動き、環境への適合なども考慮した形に発展させていきたいと考えている。

## 参考文献

- 1) Michotte, A.: The Perception of Causality, Basic Books (1946/English transl. 1963)
- 2) Heider and Simmel.: An experimental study of apparent behavior, Am.J.Psychology, vol.57, no.2, pp.67-70(1944).
- 3) J.Feldman and P.D.Tremoulet.: Perception of animacy from the motion of a single object, Perception, vol.29, pp.943-951(2000)
- 4) 中村浩, 鷺見成正.: 単一の物体運動における生物性・非生物性知覚に寄与する運動情報の研究, 電子情報通信学会技術報告, vol.101, pp.95-100(2002)
- 5) 竹内涼輔: 金魚の振舞いに対する予測可能性が生物性と意図性の知覚に与える影響, 研究報告 ヒューマンコンピュータインタラクション (HCI), vol.2012-HCI-148, no.10, pp.1-8, (2012)
- 6) Opfer, J.: Identifying living and sentient kinds from dynamic information: the case of goal-directed versus aimless autonomous movement in conceptual change, Cognition, vol.86, pp.97-122(2002)
- 7) X. Tu and D. Terzopoulos.: "Artificial Fishes: Physics, Locomotion, Perception, Behavior", Computer Graphics, SIGGRAPH 94 Conference Proceedings, pp. 43-50, July(1994)
- 8) Craig W. Reynolds.: Flocks, Herds, and Schools: A Distributed Behavioral Model, Published in Computer Graphics, 21(4), (ACM SIGGRAPH '87 Conference Proceedings, Anaheim, California, July 1987.), pp. 25-34 July (1987)
- 9) Karl Sims.: Evolving virtual creatures, Computer Graphics, Annual Conference Series, (SIGGRAPH '94 Proceedings), pp.15-22. July (1994)
- 10) Michael David Travers.: Programming with agents: new metaphors for thinking about computation, Massachusetts Institute of Technology, Program in Media Arts & Sciences, 1996. Includes bibliographical references (p. [197]-206).
- 11) 会田勝美: 魚類生理学の基礎, 恒星社厚生閣 (2011).
- 12) 塚本勝巳: 魚類生態学の基礎, 恒星社厚生閣 (2010).
- 13) 河原剛一: 生体におけるリズム現象の制御とゆらぎに関する研究, 電子科学研究, 4, pp.33-39(1997)
- 14) Wataru Matsunaga, Eiji Watanabe.: Visual motion with pink noise induces predation behavior, Scientific Reports, (2012)
- 15) 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, 日本流体力学学会周知流体力学部門 Web 会誌, 第12巻, 第3号, (2005)
- 16) 東昭, 伊藤慎一郎: エアロ・アクアバイオメカニクス, エアロ・バイオメカニクス研究会, 森北出版 (2010).

## 付録

付録1 全質問項目に関する平均点と標準偏差の一覧



付録2 全質問項目に関する評定結果の相関値の一覧

	生き物らしい	突発性	多様性	緩急がある	個性がある	複雑	単純	自然	規則的	予測できない	意図がある	自ら判断している	受動的	能動的
生き物らしい	1													
突発性	0.868803058	1												
多様性	0.967638141	0.782181739	1											
緩急がある	0.637984472	0.935146628	0.518284304	1										
個性がある	0.974257059	0.948007533	0.939344162	0.775911824	1									
複雑	0.987125266	0.780946669	0.982416196	0.509200796	0.933701866	1								
単純	-0.958481688	-0.695317329	-0.945636579	-0.400439801	-0.870750761	-0.986483779	1							
自然	0.579496642	0.227682816	0.75920897	-0.080500057	0.505971594	0.682134127	-0.671001809	1						
規則的	-0.881487868	-0.540347832	-0.878922592	-0.216674819	-0.753703139	-0.935644783	0.979455905	-0.690156603	1					
予測できない	0.993845703	0.896576535	0.934091817	0.688743349	0.973723971	0.96715242	-0.939808633	0.48614183	-0.856629497	1				
意図がある	0.933657861	0.970379042	0.830271645	0.848764679	0.960824144	0.865522574	-0.816003605	0.268093401	-0.696283675	0.963350799	1			
自ら判断している	0.99056835	0.871184415	0.986166043	0.643434902	0.982106948	0.979935147	-0.934641942	0.642659558	-0.84654523	0.973949955	0.910365217	1		
受動的	-0.96635308	-0.896316921	-0.97288447	-0.696228177	-0.98652031	-0.945400285	0.879331802	-0.633174096	0.770881094	-0.947738221	-0.902760284	-0.990853362	1	
能動的	0.965953161	0.795973127	0.999312709	0.540153468	0.945944727	0.976806692	-0.934124014	0.753302941	-0.860839979	0.932662905	0.835361584	0.987937121	-0.979520572	1