

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 23 日現在

機関番号：12102

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K12178

研究課題名(和文) 海洋環境コンテンツの制作を支援する仮想アクアリウム基盤の構築

研究課題名(英文) Construction of Virtual Aquarium Platform for Supporting Ocean Environment Contents

研究代表者

星野 准一 (Hoshino, Junichi)

筑波大学・システム情報系・准教授

研究者番号：40313556

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円

研究成果の概要(和文)：海洋環境における魚類の種数は3万近くにもものぼり、身体の構造や泳ぎ方、縄張りや群集などの多様な振る舞いを伴うため手作業でのアニメーション制作は容易ではない。本研究期間では、魚類の骨格の違いによる泳ぎ方のバリエーションを統一的に再現する認知的モーションプランナーを実現した。Manta ray やTuna、Boxfish など、サイズやスケルトンの構成が全く異なる12種類のCGモデルや数千匹規模の魚群をリアルに泳がせる様子を示した。本手法は既存のグラフィックスパイプラインに組み込みやすく、トルネードや旋回といった魚群全体の表現をトップダウンに指定できる特長がある。

研究成果の概要(英文)：We propose a unified motion planner that reproduces variations in swimming styles based on the differences in the fish skeletal structures or the variations in the swimming styles based on changes in environmental conditions. We considered the common decision-making mechanism in fish that allows them to instantly decide "where and how to swim." The unified motion planner comprises two stages. In the first stage, where to swim to is decided. Using a probability distribution generated by integrating the perceptual information, the short-term target position and target speed are decided. In the second stage, how to swim is decided. A style of swimming that matches the information for transitioning from the current speed to the target speed is selected. Using the proposed method, we demonstrate 12 types of CG models with completely different sizes and skeletal structures, such as manta ray, tuna, and boxfish, as well as a scene where a school of a few thousand fish swim realistically.

研究分野：エンタテインメントコンピューティング

キーワード：コンピュータグラフィックス 仮想海洋環境 ゲーム アニメーション

## 1. 研究開始当初の背景

水族館の水槽やダイビングの映像を観察すると、ゆったりと身体を動かして泳ぐジンベエザメやマダラトビエイ、数千匹単位の群れを形成しながら泳ぎながら俊敏な回避行動を行うマイワシ、背びれや尾びれなどを器用に使い分けながら小回りを利かせて泳ぐハリセンボンなど、多数・多様な魚たちの動きを見ることができている。水中シーンにおけるこのような魚の動きをコンピュータグラフィックスによってリアルに表現することは、CGアニメーションやゲームをはじめとした多くのコンテンツにおいて必要とされている。

しかし、このような海の場面を実現することは容易ではない。魚類は全体で 28,000 種を超え、脊椎動物の半数以上を占めるほどの多様性を有している。ごく限られた海域に限定したとしても、日本の若狭湾で 83 種、ハワイのハナレイ湾で 150 種もの魚種の生息が確認されている。魚類は浅瀬から深海まで多様な環境に生息しているため、身体構造や泳ぎ方は多岐にわたる。例えば身体構造に注目すると、尾びれ付近の躯体を振動させて泳ぐマグロのように比較的単純なタイプから、リボン状の長く柔らかいひれを動かすアマア・カルヴァやナギナタナマズ、体盤と呼ばれる巨大な胸びれを持つエイのように幅広いバリエーションがある。

さらに魚類は、常にひとつの泳ぎ方を使い続ける訳ではなく、周囲の状況や自己の状態によって様々な泳ぎ方を使い分けている。例えば、敵から急激に逃げるときには C-start と呼ばれる泳ぎ方が行われる。また、魚類生理学の分野では、ベラやハコフグが遊泳速度に応じてひれの使い方を変えていることが知られている。このように、リアルな水中シーンを描くためには、魚の種類による骨格構造の違いや、魚を取り巻く状況の変化によって生じる泳ぎ方のバリエーションを再現することが重要となる。また、海中ではマイワシのように数千匹から数万匹単位で魚が群れる様子も多く見られるため、アルゴリズムが軽量であることも重要である。

さらに、アニメーション制作に利用するためには、個々のカットでの演出意図に合わせて、ゆったり泳ぐか、小刻みに素早く泳ぐか、自由に泳ぐか、同じところを旋回するかなどの泳ぎ方の特徴を、クリエイターが容易に指定できることも重要となる。

## 2. 研究の目的

本研究では、多様かつ多種の魚類が泳ぐリアルな水中シーンの表現を実現するために、魚種の違いによる泳ぎ方のバリエーションと、状況変化によって生じる泳ぎ方のバリエ

ーションの両方を実現する統一的なモーション生成法を構築することを目的とする。

近年は生物学の分野において魚が泳ぐ際の意思決定能力についての研究が進んでいる。テッポウオや Machaca と呼ばれる魚種は、虫や落ちてくる果物を食べる際に、獲物の動きを見てから自分がいつどこへ移動するのか瞬時に意思決定して、どれくらい力を出して泳ぎ始めるかを定めることが明らかにされている。また魚類生理学の分野では、ベラやハコフグなどの魚種が、遊泳速度によって身体やひれの使い方や泳ぎ方を変えていることが知られている。

このような魚類生理学や生物学の知見から、本手法では(1) 行き先や速度を決定する、(2) 泳ぎ方を決定するという 2 ステージの意思決定を繰り返しながら泳いでいく点を共通の仕組みとして考える。第 1 のステージでは、知覚情報を統合して生成した確率分布を用いて、短期的な目標位置と目標速度を決める。第 2 のステージでは、現在の速度帯から目標とする速度帯への遷移情報に応じて泳法を選択する。

本手法を用いることによって、泳法ごとの骨格制御ルールを変えることで、魚種や状況変化による泳ぎ方のバリエーションを簡単に作ることができる。例えば、ジンベエザメ、マグロ、オニイトマキエイ、ハコフグのように全く異なるサイズや骨格を持つ魚が同時に泳いでいる様子を描くことができる。

また以下に示す特長が挙げられる：

- ・ 計算コストが低いため、実際の海中で見られるような数千匹以上もの大規模な魚群を描くことができる。
- ・ チューブ型の領域に対する経路追従である Tube-Following を導入することで、トルネードや旋回といった魚群全体の形状や広がり具合も容易に表現できる。
- ・ 既存のグラフィックスパイプラインにそのまま組み込むことができる。リギング済みの一般的な魚の CG モデルを用意すればリアルに動かすことができる。

## 3. 研究の方法

本研究では魚類生物学に基づいて次のような知見を活用した。

### (1) 魚類のモーションプランニング能力

本手法では、魚類が瞬間的に行き先や速度、泳ぎ方のモーションプランニングを行う。例えば、魚類では静止しているときに敵に襲われたりすると、身体を C の字に瞬間的に大きく曲げて逃げる。このとき、左右のどちら側から刺激が来たかによって、身体の左右いず

れかの筋肉を反射的に収縮させることで敵からの確に逃げることができる。このような逃避行動はC-startと呼ばれているが、神経科学分野においても多くの研究が行われており、魚類の後脳の中にあるマウスナー細胞と呼ばれる大きな1対の細胞が主要な役割を担っていることが知られている。

C-startのような突発的な遊泳は、受動的な逃避行動だけでなく、社会的インタラクションや捕食のための攻撃といった能動的な行動でも見られる。Schusterらは、テッポウウオと呼ばれる狩りをする魚種の脳機能について詳しく調べている。Schusterらによると、テッポウウオは獲物の動きを見てから自分がいつどこへ移動するのか瞬時に意思決定し、どの方向へどれくらい力を出して泳ぎ始めるかを定めることができる。同様の振る舞いとしては、川の上から落ちてくる果物を食べる習性のあるMachacaと呼ばれる南米の淡水魚についても、水流の影響を考慮して確実に果物へ辿り着けるように力の出し具合を意思決定できることが知られている。本手法ではこのようなモーションプランニングを中心的な機能として実現することで多様な遊泳モーションを実現する。

## (2) Swimming modes

魚類生理学の分野では、Lindseyがさまざまな魚類の泳ぎ方を12種類に分類したものが広く知られている。ここでの12種類の泳ぎ方はSwimming modesと呼ばれている。Swimming modesは、躯幹から尾びれにかけての部位を動かすBCF (Body-Caudal Fin) と呼ばれるグループと、中央あるいは左右の対となっているひれを動かすMPF (Median-Paired Fin) と呼ばれるグループに大別される。BCFには、以下に示す5つのSwimming modesが含まれる。

①ウナギ型 (Anguilliform) : 躯幹から尾びれにかけての大部分を波動させる。ウナギだけでなく、大半のサメはウナギ型に分類される。

②準アジ型 (Subcarangiform) : アジ型とともに、ウナギ型とマグロ型の中間的な性質を持つ。ややウナギ型に近い。マスやタラなどに見られる。

③アジ型 (Carangiform) : 準アジ型とともに、ウナギ型とマグロ型の中間的な性質を持つ。ややマグロ型に近い。カッポレやニシンなどに見られる。

④マグロ型 (Thunniform) : 尾びれ付近だけを波動させる。マグロやカジキなどに見られる。

⑤ハコフグ型 (Ostraciiform) : 尾びれ付近だけを振動させる。ハコフグやシビレエイな

どに見られる。

一方で、MPFには、以下に示す7つのSwimming modesが含まれる。

⑥アミア型 (Amiiform) : 長い帯状の背びれを波動させる。アミア・カルヴァなどに見られる。

⑦ナギナタナマズ型 (Gymnotiform) : 長い帯状の尻びれを波動させる。ナイフフィッシュなどに見られる。

⑧カワハギ型 (Balistiform) : 背びれと尻びれを波動させる。モンガラカワハギなどに見られる。

⑨フグ型 (Tetraodontiform) : 背びれと尻びれを振動させる。マンボウなどに見られる。

⑩エイ型 (Rajiform) : 体盤と呼ばれる、頭部と一体化した巨大な胸びれを波動させる。エイやマンタなどに見られる。

⑪ハリセンボン型 (Diodontiform) : やや大きな胸びれを波動させる。ハリセンボンなどに見られる。

⑫ベラ型 (Labriform) : やや小さな胸びれを振動させる。ベラやウミタナゴなどに見られる。

## (3) Swimming forms

本手法ではその場その場で変化する泳ぎ方をSwimming formsと呼んでいる。12種類のSwimming modesの中でも、ベラ型とハコフグ型の魚は特にSwimming formを大きく変えるタイプである。

ベラ型の魚の例としては、ベラの一種である*Notothenia neglecta*がある。この魚種は、低速で泳ぐときは胸びれを振動させて前進するという、基本的なベラ型の遊泳を行う。敵から逃げるときなどに高速で泳ぐ必要が出た場合には、躯幹から尾びれにかけての部位を波打たせることで前進するなど、準アジ型と同じ泳ぎ方に変化する。

ハコフグ型の魚の例としては、ハコフグの一種である*Ostracion meleagris*がある。この魚種は、体長倍速度 (BL/s) が1以下のときは、ほとんど胸びれと尻びれだけを使って泳ぐ。BL/sが1から5までの間では、背びれも同時に動かすようになり、速度の増加に伴ってひれの振動数を上げていく。BL/sが5を超えると、姿勢を安定させるために、尾びれも間欠的に動かすようになる。

提案手法では、Swimming modesは魚種ごとに固有の属性として扱い、Swimming formsは時間によって変化する状態として扱う。例えば、Swimming modesがベラ型として設定

されている仮想魚は、Basic-Labriform、Subcarangiform、C-start の 3 種類の Swimming form のいずれかを常に変更することになる。本手法での仮想魚は、周囲の状況変化や自己の状態を参照して Swimming form を切り替えることで多様な遊泳モーションを実現する。

#### (4) 定性的速度と筋肉の使い分け

魚類の多くは、赤色筋と白色筋からなる 2 種類の筋肉を、運動の強度に応じて使い分けて泳いでいる。一般に、赤色筋は体積が小さく持続的な運動に向いている。白色筋は体積が大きく瞬発的な運動に向いている。赤色筋は遊泳速度が速くても遅くても常に活動していたが、白色筋は中速域と高速域でのみ活動していた。また、ある程度高速になると、赤色筋の出力が減少に転じ、白色筋が運動の主体に切り替わった。このとき、白色筋が活動し始める速度は IPW (Ignition Point of White muscle)、赤色筋の活動が飽和して白色筋が運動の主体になる速度は SPR (Saturation Point of Red muscle) と呼ばれている。さらに、魚の遊泳速度域は、運動生理学的に重要な臨界点である IPW と SPR の 2 点を境界として、3 つの遊泳相 (Swimming phase) に分類されている。本手法ではこれらを参考に定性的速度を決定する。

#### (5) 仮想魚の制御アーキテクチャの構築

以上の特性を統合化する機構として仮想魚が「どこに泳ぐか」「どのように泳ぐか」の 2 段階の過程を繰り返して泳ぐ遊泳モデルを構築した。仮想魚が仮想空間内で自律的に運動するための制御アーキテクチャとして、仮想環境内でのセンサを担当するモジュールや、移動制御や骨格制御を担当するモジュールなどを組み合わせることで実現した。

まず、「どこに泳ぐか」を決めるために、確率的制約に基づくターゲット位置の決定手法を実現した。仮想魚はまず、未来における自分自身の到達位置を予測し、確率分布の初期定義域を計算する。次に、速度特性、行動ルーチン、筋肉疲労、経路追従、群集行動によって確率分布に制約を加え、最後に残った確率分布からターゲット座標を選択する。

また移動制御のアルゴリズムにおいては、速度遷移に基づく骨格制御ルールを選択過程を実現した。12 種類の遊泳モーションを効率的に生成するために、魚の骨格を 4 つの部分骨格の組み合わせとしてモデル化した部分骨格モデルを作成した。部分骨格モデルにおける骨格の制御ルール (Swimming form) は、魚種ごとに複数定義されており、定性的な速度帯の遷移情報を用いることで決定される。これらの部分骨格モデルにおいて、骨格制御のアルゴリズムを適用することで基

本泳法のモーションを生成した。

#### (6) 群集制御手法

本システムでは群集制御によく利用されている boid アルゴリズムに、本手法のアーキテクチャを統合化することで、群れとしてまとまりながら敵を認識して逃げるなどの複雑なアニメーションを生成することができる。

Boid においては近傍探索が必要となるため、kd-tree を使用することで最近傍探索の計算時間を軽減している。ただし、水中シーンでよく見られるように、群集行動を行う魚種と行わない魚種が混在する状況における群集行動や回避行動を効率良く処理するために、次のように場合分けしている。

①群集行動を行う魚が、同種の個体に対して行う最近傍探索については、群集行動を行う魚種のみを扱う kd-tree を使用する。

②群集行動を行っていない魚が、群集行動を行う魚を回避するための行動については、シーン中の全個体を扱う kd-tree を使用する。

③群集行動をしている魚が、捕食者や障害物などを検知する場合は、探索対象である捕食者や障害物の数が少ないため、検出漏れの回避を優先するために kd-tree を使用せずに全オブジェクトに対して距離を計算する。

#### 4. 研究成果

本研究では提案手法を 3D ゲームエンジンの Unity と C# によるスクリプトを用いて実装した。スクリプトはシングルスレッドで動作する。次のような映像制作事例により有用性を示した。

(1) 水族館の大水槽のような 1 つの場面で 12 種類の Swimming modes をシミュレーションできることを確認した。

(2) チューブ形状のガイドを設定することでトーラス状やチューブ状などの魚群の形状のバリエーションを容易に作成できることを確認した。

(3) 捕食者の攻撃行動による魚群のダイナミックな形状変化の例を示した。この例では、捕食者役のマグロが、マイワシの群れの中央に突入する。マグロに近づいたマイワシはそれぞれ逃避行動を行い、魚群は一斉に散開するが、マグロが去っていくと、徐々に群れを形成しながら元々泳いでいた群集形状に戻ることができる。

(4) 水流を模した外力に対するモーション制御のロバスト性を示した。本手法では対して垂直な外力をすべての仮想魚に対して一律に加えている。仮想魚は外力の影響を受け

ながらもチューブに沿って移動しようとする。外力が大きくなりすぎると、仮想魚はターゲットに近づくことすら困難になり、チューブの外側へ流されてしまう。このような外力に対する振る舞いについても、現実の魚の振る舞いをリアルに再現できていることを確認した。

(5) テクスチャを付けた CG モデルを用いて、12,000 匹のマイワシの魚群を含む 12 種類の魚種を同時にシミュレーションした結果を示した。

(6) インタラクティブアプリケーションの簡単な例として、Intel RealSense 3D カメラを使用してユーザの手の位置をセンシングし、スクリーンに投影された魚群の tube course の位置に反映させる。これにより、ユーザは手を動かさずことで魚群を操るような体験ができる。

本研究の改善点としては、次のようなものが考えられる。

まず、本手法では、魚のどの部位がどのように動かすかは CG モデルのスケルトンやスキニングに依存する。例えば、本稿における Carangiform や Thunniform の魚が持つ胸びれや背びれは、実際には遊泳に連動してわずかに動いたり開閉したりすることもあるが、今回は見た目への影響が小さいと判断して動かさないことにした。それらを加味して最終的なアニメーションをよりリアルにすることを試みるには、胸びれや背びれにもリギングを行い、Partial SkeletonModel や Swimming form の定義をカスタマイズする必要がある。一方で、提案手法が持つこの特性には有用な面もある。カメラの距離によって Swimming form の定義を切り替えることで、魚が近くにいるときは細かいひれを動かして、遠くにいるときは躯体しか動かさないというようなアニメーションの LOD (Level of Detail) 制御が可能となる。

また、仮想魚は周囲の水中環境への物理的な出力を行わない。そのため、魚が泳ぐことによって近くの水草や他の魚のひれがゆらめくようなシーンを再現することは難しい。我々の手法と連動して、このような細やかな動きを再現するには、仮想魚が仮想的な力を出力するようしたり、部分的にキーフレームアニメーションと組み合わせたりする改良が必要となる。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 2 件)

① Daiki Sato, Mikihiro Hagiwara, Akira Uemoto, Hisanao Nakadai, Junichi Hoshino: Unified Motion Planner for Fishes with Various Swimming Styles, ACM Transactions

on Graphics (Proceedings of SIGGRAPH 2016), Vol. 35, No. 4, 2016 DOI(10.1145/2897824.2925977) (査読有)

② 里井大輝, 中基久和巨, 星野准一: 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, 情報処理学会論文誌, Vol. 56, No. 11, pp. 2131-2140, 2015 (査読有)

[学会発表] (計 1 件)

① 里井大輝, 萩原幹大, 上元晃, 中基久和巨, 星野准一: 魚類の多様な泳法を再現する統一的モーションプランナー, Visual Computing / グラフィクスと CAD 合同シンポジウム 2016, 早稲田大学国際会議場 (東京都新宿区), June 18-19 2016. (査読有)

[その他]

ホームページ等

<http://www.entcomp.esys.tsukuba.ac.jp>

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

星野 准一 (HOSHINO, Junichi)

筑波大学・システム情報系・准教授

研究者番号: 40313556