

魚類の多様な遊泳モーションの統一的生成法

2017年 3月

里井 大輝

魚類の多様な遊泳モーションの統一的生成法

里井 大輝

システム情報工学研究科

筑波大学

2017年3月

概要

たくさんの魚が水中をリアルに泳ぐような水中シーンの表現は、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。魚類は全体でおよそ 28,000 種と非常に高い多様性を有しており、身体構造による泳ぎ方のバリエーションは多岐にわたる。さらに魚類は、敵から逃げるときに C-start と呼ばれる泳ぎ方を行うなど、状況によって泳ぎ方を変えることもある。したがって、リアルな水中シーンを描くためには、魚の種類や、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的確に再現することが重要な問題となる。水中シーンに現れる多数の魚に対して、このような泳ぎ方のバリエーションを手作業で作成するのは非常に難しい。そこで本研究では、実際の魚が遊泳するために行うモーションプランニングの仕組みに着目し、魚類の骨格の違いによる泳ぎ方のバリエーションや状況変化による泳ぎ方のバリエーションを統一的に再現する手法を提案する。本手法では、生物学的知見を参考に、「どこへ泳ぐか」「どのように泳ぐか」を瞬間的に決定する意思決定機構（統一的モーションプランナー）があることを魚類の遊泳に共通の仕組みであると考えた。統一的モーションプランナーは 2 つのステージから構成されている。第 1 のステージでは、どこに泳ぐかを定める。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、どのように泳ぐかを選択する。現在の速度帯から目標とする速度帯への遷移情報にマッチした泳法を選択する。本論文では、提案手法を用いることで、ジンベエザメやマグロ、ハコフグなど、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泳がせる様子を示すことにより、リアルな水中シーンを容易に実現可能であることを確認した。また、既存のグラフィックスパイプラインに組み込みやすく、ユーザがパラメータを調整することで動きの特徴を容易に変えることができ、さらにトルネードや旋回といった魚群全体の形状表現をユーザがトップダウンに指定できる特長がある。本研究の成果によって、高クオリティな水中シーンが低コストで実現可能となり、アニメーションやゲームなどのコンテンツ制作に貢献することが期待できる。

目次

概要	i
図目次	v
第 1 章 序論	1
1.1 背景	1
1.2 関連研究	3
1.2.1 CG キャラクタの遊泳モーション生成	3
1.2.2 キャラクタ制御手法	4
1.2.3 モーションプランナー	5
1.3 本研究の目的	5
1.4 本論文の構成	6
第 2 章 魚類の遊泳メカニズム	8
2.1 魚類のモーションプランニング能力	8
2.2 Swimming modes	9
2.3 Swimming forms	11
2.4 定性的速度と筋肉の使い分け	12
第 3 章 仮想魚の制御アーキテクチャ	15
3.1 遊泳モデル	15
3.2 アーキテクチャ概要	15
第 4 章 確率的制約に基づくターゲット座標の選択	19
4.1 ターゲット座標選択の概要	19
4.2 未来位置の予測	19

4.3	状態遷移と行動ルーチン	20
4.4	確率的ターゲット座標選択	21
4.4.1	確率分布の初期定義域の生成	21
4.4.2	速度特性による制約	24
4.4.3	行動ルーチンによる制約	24
4.4.4	筋肉疲労による制約	25
4.4.5	Tube-Following	25
4.4.6	群集行動による制約	27
4.4.7	自然減速	28
4.5	移動制御	28
第 5 章	速度遷移に基づく骨格制御ルールを選択	30
5.1	部分骨格モデル	30
5.2	定性的速度遷移を用いた Swimming form の選択	33
5.3	骨格制御	34
第 6 章	提案手法を用いた映像生成	35
6.1	実装の詳細	35
6.1.1	最近傍探索の高速化	35
6.1.2	CG モデル	35
6.2	映像生成の結果	37
6.2.1	12 種類の Swimming modes	37
6.2.2	Swimming form の切り替え	42
6.2.3	パラメータ変化による動きのバリエーション生成	42
6.2.4	Tube-Following	43
6.2.5	魚群の散開	45
6.2.6	外力に対するロバスト性	45
6.2.7	多数多種の魚が混在する水中シーン	46
6.3	性能評価	51
6.4	インタラクティブアプリケーションへの応用	51
第 7 章	結論と今後の展望	54
7.1	結論	54

7.2	今後の展望	55
	研究業績	56
	付録 A Swimming Form の定義の一覧	59
	付録 B Swimming Form の選択ルールの一覧	61
	謝辞	62
	参考文献	63

目次

1.1	多数かつ多種の魚が同時に泳ぐ大水槽（京都水族館, 2015）	2
1.2	水族館の水槽で泳ぐさまざまな魚	2
2.1	Archerfish の C-start を上から見た様子。[65] の図 2 の一部を改変した。	9
2.2	12 種類の Swimming modes。オレンジ色の範囲は遊泳時に動かす主要動作部位を示し、縦軸を主要動作部位の種類、横軸を主要動作部位の広さを意味する。線画は [46] から引用した。	10
2.3	Swimming modes と Swimming forms の関係。すべての Swimming Forms の定義の一覧については付録 A を参照。	11
2.4	ブリの断面図。線画は [77] の図 1 から引用した。	13
2.5	魚の速さ u と定性的速度 U_Q の対応関係	13
3.1	魚類の遊泳モデル。 T_{MU} の時間が経つごとに、仮想魚はターゲットと Swimming form を更新する。	16
3.2	仮想魚の制御アーキテクチャ概要	17
4.1	ターゲット座標選択に使用するローカル球座標系。球座標系では、動径 r 、極角 θ および方位角 ϕ の 3 要素で位置やベクトルを表現する。なお本稿では、直交座標系は左手座標系を採用する。	20

4.2	ターゲット座標の確率分布の定義域を生成する過程の例。(a) 仮想魚の現在位置を原点としたローカル座標系を +y 軸方向から見た図。(b) 仮想魚の筋肉特性パラメータに応じて、確率分布の初期定義域を生成する。(c) 速度特性による制約を加える。 R_{max} 、 R_{SPR} 、 R_{min} を使用して定義域をクリッピングする。(d) 行動ルーチンおよび筋肉疲労による制約を加える。(e) チューブコースに追従するための方向ベクトル d_{Tube} による制約を加える。(f) 群集行動による制約を加える。最終的に残った定義域を用いて確率分布を生成し、次の MU でのターゲット座標 p'_{t+1} を確率的に決定する。	22
4.3	チューブコースの構成例。青い球体がノードエリア、各ノードエリア間を結ぶオレンジ色の領域がリンクエリア、リンクエリアの中央を通る赤い線がリンク軸ベクトルを示す。	26
4.4	制限の基準となる方向ベクトル d_{Tube} の計算方法。左から右へ向かうチューブコースを +y 軸方向から見た様子を示す。	27
5.1	12 種類の各 Swimming mode について本稿で使用した部分骨格モデルの定義	31
5.2	ベラ型およびハコフグ型における Swimming Forms の定義。T は並進運動に対応した動作、R は回転運動に対応した動作を示し、それぞれ速度と角速度に比例してパラメータが変化する。その他の Swimming modes における定義は付録 B を参照。	32
6.1	本稿で用いた CG モデル。12 種類の Swimming modes それぞれに対応する。	36
6.2	ウナギ型の魚が自由遊泳する様子	38
6.3	準アジ型の魚が自由遊泳する様子	38
6.4	アジ型の魚が自由遊泳する様子	38
6.5	マグロ型の魚が自由遊泳する様子	39
6.6	ハコフグ型の魚が自由遊泳する様子	39
6.7	アミア型の魚が自由遊泳する様子	39
6.8	ナギナタナマズ型の魚が自由遊泳する様子	40
6.9	カワハギ型の魚が自由遊泳する様子	40
6.10	フグ型の魚が自由遊泳する様子	40

6.11	エイ型の魚が自由遊泳する様子	41
6.12	ハリセンボン型の魚が自由遊泳する様子	41
6.13	ベラ型の魚が自由遊泳する様子	41
6.14	ベラ型の仮想魚が <i>Swimming form</i> を切り替えながら泳ぐ例	43
6.15	ハコフグ型の仮想魚が <i>Swimming form</i> を切り替えながら泳ぐ例	43
6.16	同一のアジ型の仮想魚に対して、いくつかのパラメータを変えることで動きのバリエーションを作った例。稚魚のようにかなりせせこましく泳ぐ場合、幼魚のように少し小刻みに泳ぐ場合、成魚のようにゆったりと泳ぐ場合の 3 パターンを示す。	44
6.17	トーラス型に設定したチューブコースに沿って泳ぐ 4,000 匹のマイワシの魚群	45
6.18	トルネード型に設定したチューブコースに沿って泳ぐ 8,000 匹のマイワシの魚群	46
6.19	トーラス型に泳ぐ 4,000 匹の魚群におけるパラメータの比較。追従のための制限ベクトル d_{Tube} による角度の制限範囲 $W_{\theta_{Tube}}$ および $W_{\phi_{Tube}}$ を変えている。左は 0° 、中央は 90° 、右は 180° である。	46
6.20	トーラス型に泳ぐ 4,000 匹のマイワシの魚群に捕食者のマグロが突っ込む。マイワシは逃避行動を行い、魚群は一旦散り散りになるが、マグロが去っていくと元のチューブコースに再結集する。	47
6.21	水流のような外力に対するロバスト性の比較。赤い矢印は外力のベクトルを示している。外力が大きくなるにつれて、仮想魚はターゲットへ辿り着けなくなり、チューブコースの外へ流されてしまう。	48
6.22	12 種類の魚種や 8,000 匹の魚群を同時にシミュレーションした水中シーン	49
6.23	テクスチャを付けた CG モデルを用いて、12 種類の魚種や 12,000 匹の魚群を同時にシミュレーションした水中シーン	50
6.24	インタラクティブアプリケーションの事例。3D カメラに対してジェスチャ操作をすることで、魚群をリアルタイムにコントロールできる。	53

第 1 章 序論

1.1 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、時には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、多種、かつ生き物らしい魚たちの動きを見ることができる（図 1.1, 1.2）。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 [69][70] やゲーム [53][89] 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。

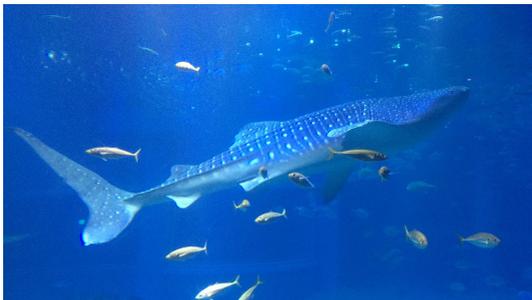
魚類は全体で 28,000 種を超え、脊椎動物の半数以上を占めるほどの非常に高い多様性を有している [54]。ごく限られた海域に限定しても、例えば、日本の若狭湾で 83 種 [51]、ハワイのハナレイ湾で 150 種 [18] もの魚種の生息が確認されている。魚類は浅瀬から深海、湖沼や河川、さらに熱帯から極海まで多様な環境に生息しているため、身体構造や泳ぎ方は多岐にわたる [46]。例えばサイズに注目すると、7.9mm の成魚が発見されている *Paedocypris progenetica* と呼ばれる魚種から、10m を超えるジンベエザメまでのバリエーションがある。身体構造に注目すると、尾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ミア・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、サイズだけでなくひれの種類にも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とは限らない。敵から逃げるときに C-start と呼ばれる泳ぎ方を行う [16] など、状況によって泳ぎ方を変えることがある。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 [4][30]。

したがって、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的確に再現することが重要な



図 1.1: 多数かつ多種の魚が同時に泳ぐ大水槽 (京都水族館, 2015)



(a) ジンベエザメ (海遊館, 2015)



(b) マダラトビエイ (海遊館, 2015)



(c) マイワシ (京都水族館, 2015)



(d) ハリセンボン (マリンワールド海の中道, 2015)

図 1.2: 水族館の水槽で泳ぐさまざまな魚

問題となる。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、ゆったり泳ぐか小刻みに素早く泳ぐか、どこまでも自由に泳ぐか同じところを旋回するかといった泳ぎ方の特徴を、クリエイターが容易に指定できることも必要となる。

1.2 関連研究

1.2.1 CG キャラクタの遊泳モーション生成

CG キャラクタに自然な遊泳アニメーションをさせるための手法は数多く提案されている。

歩行や遊泳のような基本的な運動に見られる繰り返しの動作パターンは、脊髄内にある中枢パターン発生器 (Central Pattern Generator, CPG) により生成されている [29]。CPG のモデルはいくつか提案されており [71][72]、ロボティクス分野において応用が進んでいる [2][3][17][33]。CG 分野においては、生体力学的モデルと組み合わせてリアルな人間の歩行アニメーション [26] や遊泳アニメーション [67] を再現する手法が提案されている。

魚型のキャラクタを扱っている代表的な手法としては、Terzopoulos らが提案した Artificial Fishes[23][75][78] と、Tan らが提案した Articulated Swimming Creatures[73] が知られている。Artificial Fishes はセンサやモータ、学習機能、制御機能を備えた魚型の自律エージェントである。魚と水中環境の双方の物理特性や、群集、逃避、捕食などの行動をモデル化することで、本物に近い魚の動きを再現することに成功している。さらに Terzopoulos らは、高度な認知的行動をユーザが容易にモデリングできるようにする汎用的な手法も提案している [20]。Articulated Swimming Creatures は、Solid-fluid coupling に基づいて流体環境中で多関節キャラクタを制御する手法 [42][44] を発展させ、モーションパラメータの最適化を行うことにより、魚やカメなどの多様な形状を持った水棲生物を統一的に遊泳させることに成功している。進化計算による動作生成のアプローチとしては、遺伝的アルゴリズムを用いて目的に適した身体構造や遊泳を含む運動を行うためのコントローラを人工生命に獲得させることに成功した Evolving Virtual Creatures[68] が挙げられる。

群集行動のシミュレーション手法としては、分離 (Separation)、整列 (Alignment)、結合 (Cohesion) からなる単純な 3 つのルールを用いて鳥の創発的な群集行動を実現した Boids アルゴリズム [60] が有名である。Boids は魚の群集シミュレーションに対してもよく利用されている。また物理学や生物学の分野でも、Boids の 3 ルールを適用する近傍範囲を変えることで群れの振る舞いのバリエーションを再現した手法 [14]、速度の平均化とランダム性の付加による手法 [79]、群れが散開して捕食者から逃げる行動のモデル [56]、魅力や敵対を考慮したモデル [24]、障害物回避モデル [55] など、群集行動に関するモデルが数多く提案されている。

1.2.2 キャラクタ制御手法

人をはじめとする動物型キャラクタに自然な動きをさせるためのキャラクタ制御手法は数多く提案されている [22]。これらのモデルは、大まかには、例示ベースのモデルとシミュレーションベースのモデル、またはそれらを組み合わせた手法に分けられる。

例示ベースの手法としては、モーションキャプチャデータをもとに動力学的な制御を行う手法 [47][48]、モーションキャプチャデータをもとにタスクの目的に沿った歩行動作の生成を行う手法 [1]、ユーザによるアノテーションから連続的な動きを合成する手法 [5]、モーションデータベースから類似動作を抽出する手法 [39]、統計的学習に基づいて人型キャラクタのモーションを合成する手法 [12][43][52] が挙げられる。動物型キャラクタに関しては、モーションデータベースから生成モデルを構築することで任意の二足歩行・四足歩行型キャラクタのモーションを生成する手法 [82] や、スパースなモーションキャプチャデータを用いて鳥の羽ばたく動作を制御する手法 [34] などがある。また、モーションの変換に着目した例としては、モーションデータを異なる骨格構造を持つ別の CG モデルへリターゲットングする手法 [27] や、ユーザのジェスチャ入力をロバストに推定してキャラクタアニメーションへリターゲットングする手法 [61]、歩く・走る・ジャンプするといったキャラクタ特有のアクションに対するスタイルの変換手法 [88][90] が挙げられる。時系列上でモーションを合成するこれらのアプローチに対して、最近では深層学習に基づいてモーション合成やスタイル変換を行う手法も提案されている [28]。

シミュレーションベースの手法としては、鳥 [87] や犬 [13] をはじめ、実在しない骨格の動物を含め [41][81]、さまざまな動物型キャラクタについて物理モデルが提案されている。多くの手法では各関節にかかる力を直接計算しているが、近年ではよりリアルな動作を得るために、筋肉の働きを考慮したモーション生成手法が提案されてきている [15]。筋肉ベースのモーション制御手法は、人型キャラクタのような剛体の骨格を持つキャラクタだけでなく、骨格を持たない柔軟物体にも適用が可能であり、3種類の筋繊維モデルを導入して任意形状の変形可能なキャラクタを生き物らしく動かす手法が提案されている [74]。パラメータの学習手法に着目した研究としては、強化学習を用いて平坦ではない地形での四足歩行動物の運動制御を実現する手法 [57][58]、ユーザによる直観的な指示をもとに複雑な動作の最適化を行う手法 [25] などが知られている。

このように、例示ベースの手法においてもシミュレーションベースの手法においても、物理シミュレーションを基礎にして、モーションパラメータを何らかの形で最適化するアプロー

チや、生体力学的モデルを利用してリアルな運動制御や変形等を取り入れるアプローチの手法が多い。

1.2.3 モーションプランナー

CG の分野では、キャラクタの姿勢制御 [83] や大域的なパスプランニング [35] のためのモーションプランニング手法が数多く提案されている。また、ゲームで必要とされるような複雑な地形やシチュエーションにおけるモーションプランニング手法として、静的・動的なナビゲーションメッシュやグリッド空間、時空間上のプランニングを組み合わせる手法 [37] や、柵からピンを取り出して机の上のコップに注ぐというような複雑な日常動作の生成手法 [6][31] が提案されている [36]。2次元の群集シミュレーションにおいては、エージェントの未来位置を確率的に予測することで滑らかに衝突を回避させる手法 [86] が提案されている。

ロボティクスの分野でもモーションプランナーは長く研究されており、ニューラルネットワーク、遺伝的アルゴリズム、粒子群最適化 (Particle Swarm Optimization, PSO) などのアプローチに基づくモーションプランニング手法がある [50]。

これらのモーションプランナーの多くは、キャラクタの姿勢制御や大域的なパスプランニングを目的としており、魚類の遊泳における俊敏な動きの変化や泳ぎ方の変化には適用が難しい。

1.3 本研究の目的

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、生物学の分野において、魚が泳ぐ際の意味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、どれくらい力を出して泳ぎ始めるかを決められることが近年明らかにされている [40][65]。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、すなわち泳ぎ方を大胆に変えていることが知られている [4][30][80]。

このような魚類生理学や生物学の知見から、(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 ステージの瞬間的な意思決定を繰り返しながら泳いでいく点がさまざまな魚の遊泳に共通の仕組みであると考えられる。そこで本研究では、この共通の仕組みをモデル

化した、魚類における統一的モーションプランナーを提案する。第1のステージでは、どこに泳ぐかを決める。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、どのように泳ぐかを選択する。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、本手法には以下に示す特長がある：

- 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。
- 本手法は、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。リング済みの一般的な魚のCGモデルさえ用意すれば、パラメータを設定するだけでCGモデルをリアルに動かすことができる。

1.4 本論文の構成

本論文は、本章を含めて全7章から構成される。

第2章では、現実の魚類が遊泳する仕組みのうち、本研究で利用する概念をまとめる。まず、C-Startと呼ばれる突発的な泳ぎ方を例にして、魚類のモーションプランニング能力について述べる。次に、魚類生理学における12種類の泳ぎ方の分類 (Swimming modes) を説明した後に、時間によって変化する泳ぎ方の最小単位 (Swimming form) を新たに定義する。最後に、魚は遊泳速度によって2種類の筋肉を使い分けており、筋肉の使い方によって速度帯が3つの遊泳相に分類されることを述べる。

第3章では、本研究で提案する仮想魚の制御アーキテクチャの概要を述べる。はじめに、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示す。次に、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を提案する。「どこに泳ぐか」「どのように泳ぐか」を決定する統一的モーションプランナーと、センサを担当するモジュール、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。

第4章では、「どこに泳ぐか」を決める、すなわち確率的制約に基づくターゲット座標の選

択過程の詳細を述べる。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の詳細についても述べる。

第5章では、「どのように泳ぐか」を決める、すなわち速度遷移に基づく骨格制御ルールを選択過程の詳細を述べる。まず、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示す。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。また、骨格制御のアルゴリズムの詳細についても述べる。

第6章では、前章までに述べてきた手法の実装について詳しく述べ、実行性能を評価する。また、提案手法を用いることで生成された、水族館の大水槽のように多数の魚種が大量に泳ぐシーンや、捕食者によって魚群が散開するシーン、外力によって魚群が流されるシーンなどを示し、提案手法の有効性を示す。さらに、リアルタイム実行が可能である提案手法の特性を活かした、インタラクティブに操作できるアプリケーションへの応用例を示す。

最後に、第7章において、本研究の結論と今後の展望について議論する。

第 2 章 魚類の遊泳メカニズム

本章では、提案手法の説明に先立ち、実際の魚類のモーションプランニング能力や泳ぎ方の種類、泳ぎ方の使い分けについて明らかになっている知見を整理する。また、提案手法において重要となるいくつかの概念について述べる。

2.1 魚類のモーションプランニング能力

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っている端的な事例として、ここでは C-start と呼ばれる遊泳パターンに注目する。

魚類や両生類では、静止しているときに敵に襲われたりすると、図 2.1 のように、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的確に逃げるができる。このような逃避行動は C-start と呼ばれている [16]。C-start は神経科学分野で多くの研究が行われており [38]、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広く知られている。

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 [16][63]。特に、Schuster らは、テッポ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 [64][65]。Schuster らによると、テッポ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 [62][85]。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 [40]。

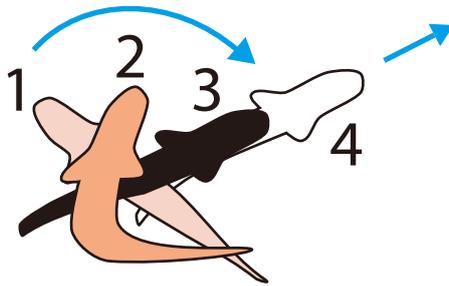


図 2.1: Archerfish の C-start を上から見た様子。[65] の図 2 の一部を改変した。

2.2 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 [46]。ここでの 12 種類の泳ぎ方は **Swimming modes** と呼ばれている。**Swimming modes** の分類図を図 2.2 に示す。この図では、縦軸を遊泳時に動かす主な動作部位の種類、横軸を遊泳時に動かす主な動作部位の広さとして、さまざまな魚の遊泳運動の特徴の違いを分かりやすく表している。

ひれや躯幹の動かし方には、振動と波動の 2 種類がある。図 2.2 にあるように、動作部位が大きくなるほど波動を用いる傾向が強まり、動作部位が小さくなるほど振動を用いる傾向が強まる。

また、**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 [8][66]。

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間隔的な性質を持つ。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間隔的な性質を持つ。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

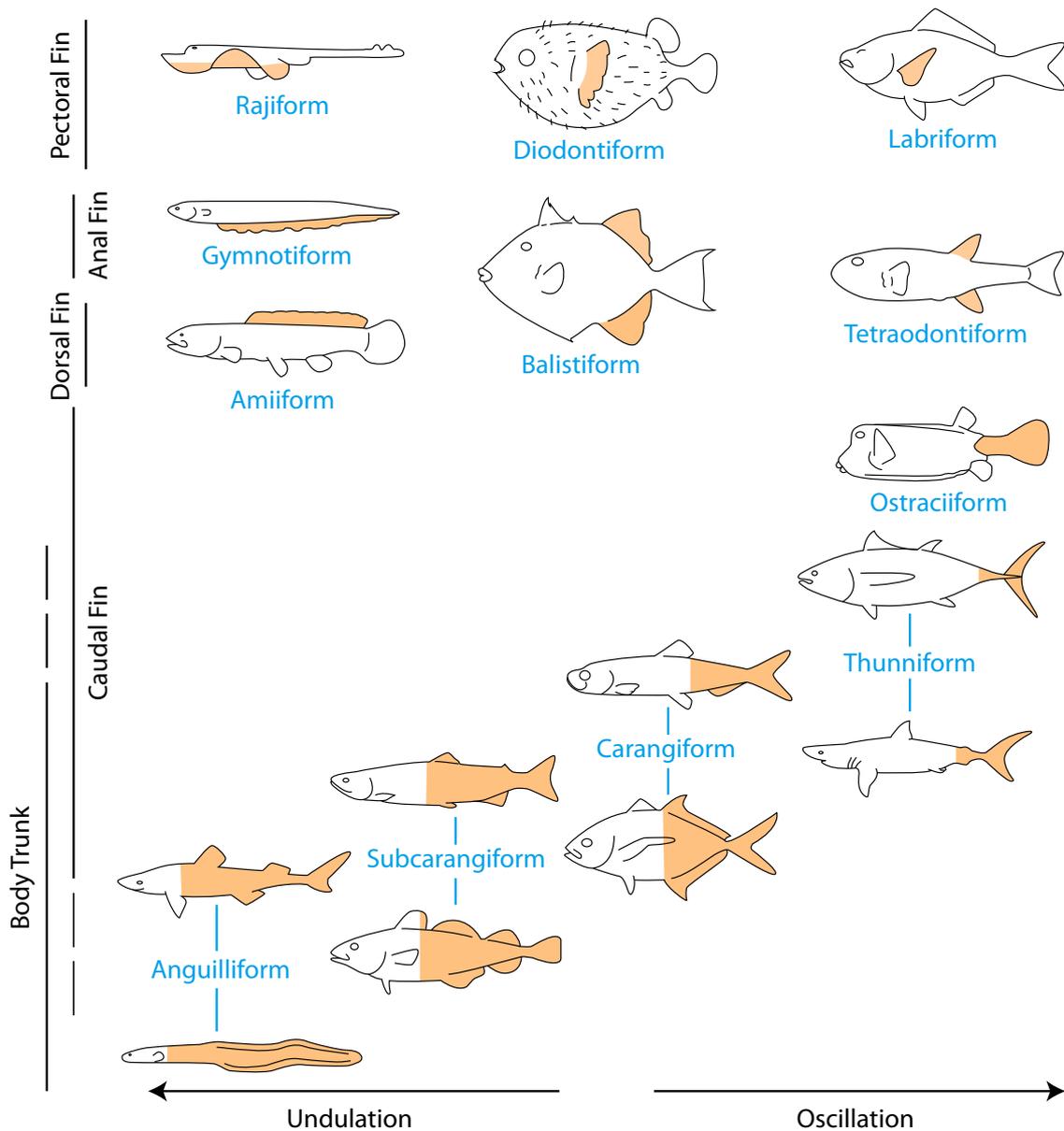


図 2.2: 12 種類の Swimming modes。オレンジ色の範囲は遊泳時に動かす主要動作部位を示し、縦軸を主要動作部位の種類、横軸を主要動作部位の広さを意味する。線画は [46] から引用した。

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

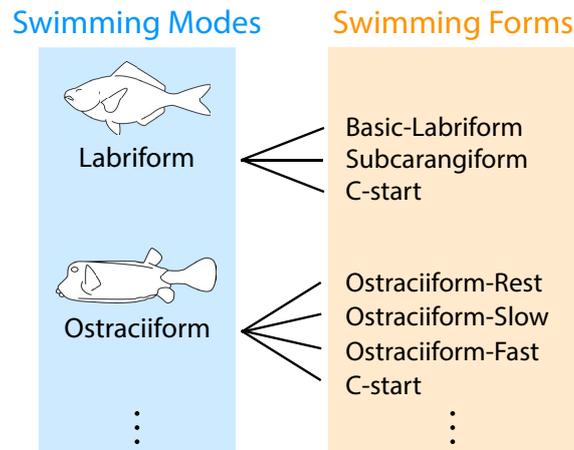


図 2.3: Swimming modes と Swimming forms の関係。すべての Swimming Forms の定義の一覧については付録 A を参照。

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。

2.3 Swimming forms

これまで、魚が状況や速さによって泳ぎ方を変える場合があることを述べてきた。このような、その場その場で変化する泳ぎ方を、本稿では Swimming forms と呼ぶ。図 2.3 に示すように、それぞれの Swimming modes の中にいくつかの Swimming forms が包含される構成になっている。

図 2.3 にもあるように、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、ベラ的一种である *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。すなわち準アジ型と同じ泳ぎ方に変化する [4]。

ハコフグ型の魚の例としては、ハコフグの一种である *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 [30]。

提案手法では、Swimming modes は魚種ごとに固有の属性として扱い、また 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-Labriiform、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、時間経過とともに Swimming form を切り替えて、または切り替えずに泳いでいく。

2.4 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 [10][32][59][77]。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。ブリと呼ばれる魚種での例を図 2.4 に示す。

Tsukamoto は、ウォータートンネルの中で遊泳するブリについて、赤色筋と白色筋の筋出力や酸素消費量などの生理的パラメータを測定した [76]。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 [76]。

- 持続相：赤色筋が運動の主体になっている。長時間泳いでも疲労しない。
- 移行相：持続相と瞬発相の間。白色筋が使用され始めるが、依然として赤色筋が主に

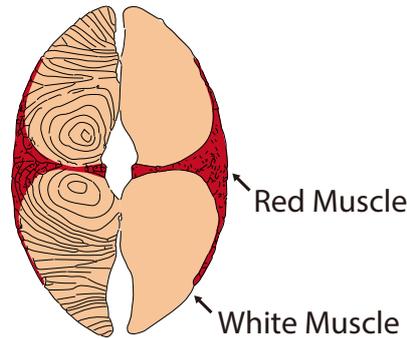


図 2.4: ブリの断面図。線画は [77] の図 1 から引用した。

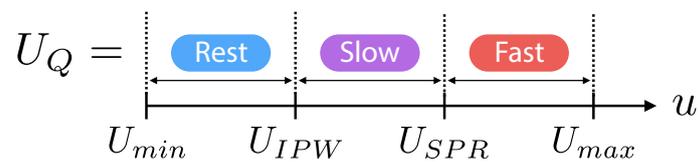


図 2.5: 魚の速さ u と定性的速度 U_Q の対応関係

使用される。

- 瞬発相：白色筋が運動の主体になっている。速いほど疲労の蓄積も早く、長時間この遊泳相を維持することはできない。よほどの状況でなければ瞬発相までは加速しない。

遊泳相の構成は、種の生理・生態を反映している。例えば、マアジやマサバのような回遊魚は SPR が高い。すなわち持続相と移行相の割合が高く、赤色筋による長時間の遊泳を得意としている。一方で、コイのように、普段は静止しておりときどき急発進するような魚は、 IPW と SPR の値がほぼ等しい。すなわち移行相を持たず、白色筋による短時間の遊泳を得意としている。

本稿では、上記を参考に、魚の定性的速度 U_Q を次のように定義する。(図 2.5)

$$U_Q = \begin{cases} [\text{Rest}] & \text{if } U_{min} \leq u < U_{IPW} \\ [\text{Slow}] & \text{if } U_{IPW} \leq u < U_{SPR} \\ [\text{Fast}] & \text{if } U_{SPR} \leq u \leq U_{max} \end{cases} \quad (2.1)$$

ここで、 U_{min} 、 U_{IPW} 、 U_{SPR} 、 U_{max} はそれぞれ、以下の意味を持った魚種固有のパラメータである：

- U_{min} は呼吸や揚力発生のために必要な最小速度を示す。 U_{min} は魚種や体長によって大きく異なる [49]。多くの魚種では $U_{min} = 0$ だが、カツオ、サワラなど一部の魚種では

$U_{min} > 0$ である。彼らは鰾が退化しており、常に一定速度以上で遊泳して揚力を発生させる必要があるためである。

- U_{IPW} は白色筋が活動し始める速度を意味する。
- U_{SPR} は前述した SPR と同一である。赤色筋が運動の主体であり、長時間泳ぐことができる最大の速度を意味する。このことから、 U_{SPR} は魚の遊泳能力を表す指標になる。
- U_{max} はその魚種が出しうる最大速度を示す。1秒間から数秒間だけ持続する速度と定義されており、多くの魚種では $10[BL/s]$ と言われている [9]。

U_Q は後述する *Swimming form* の選択過程で利用する。 U_{min} 、 U_{IPW} 、 U_{SPR} 、 U_{max} は、 u を U_Q へ変換するときの境界標であり、魚の運動特性を決めるパラメータとしての意味を持っている。

第 3 章 仮想魚の制御アーキテクチャ

3.1 遊泳モデル

本節ではまず、「行き先や速度、泳ぎ方を瞬時に次々と意思決定しながら動いていく」という考え方に基づいた、さまざまな魚に共通の遊泳モデルを示す (図 3.1)。

この遊泳モデルでは、魚は MU (Motion Unit) と呼ぶ一連の動作を繰り返し実行することで遊泳する。ここで、MU を 1 回実行するのに必要な時間を T_{MU} と表記する。 T_{MU} は定数であり動的に変わることはない。MU には次の処理が含まれる。

1. MU の開始時に、ターゲット座標とターゲット速度を決める。ターゲット座標は、今から T_{MU} が経過した時点で到達したい座標を意味する。ターゲット速度は、今から T_{MU} が経過した時点での定性的な予想到達速度を意味する。
2. 現在の定性的速度 U_Q^t からターゲット速度 U_Q^{t+1} への遷移情報を用いて Swimming form を決める。
3. T_{MU} が経過するまで、決められた Swimming form による遊泳を行い、ターゲット座標に向かって移動する。

なお、MU の時間長 T_{MU} は、魚類の遊泳特徴を表すパラメータの 1 つでもある。例えば、ゆっくりとしか動きを変えないジンベエザメは T_{MU} が長く、細かく動きまわるカクレクマノミは T_{MU} が短い。

3.2 アーキテクチャ概要

この遊泳モデルを実現する仮想魚の制御アーキテクチャ概要を図 3.2 に示す。

まず、仮想魚には、Swimming modes の種類や速度特性 (U_{min} , U_{IPW} , U_{SPR} , U_{max})、 T_{MU} などのパラメータをあらかじめセットしておく。Sense Association Module は、以下の 4 つを行う。

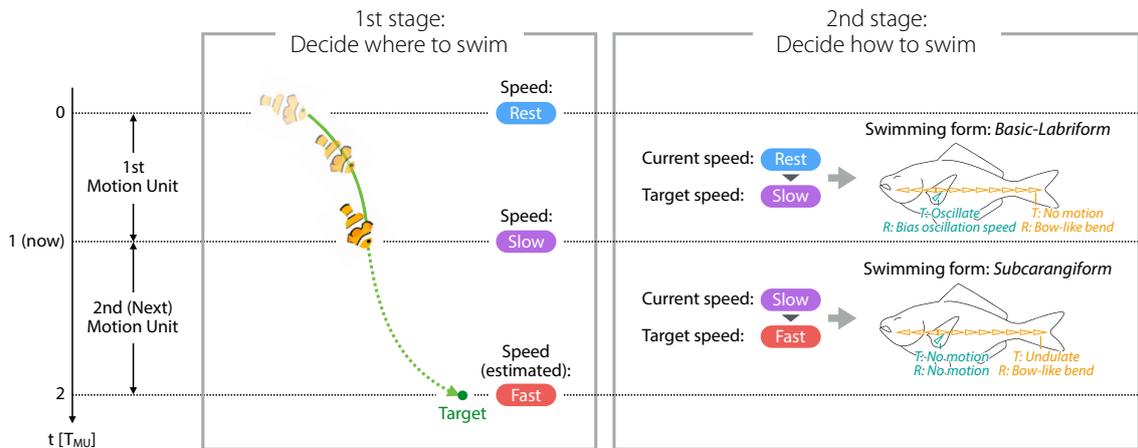


図 3.1: 魚類の遊泳モデル。 T_{MU} の時間が経つごとに、仮想魚はターゲットと Swimming form を更新する。

1. 近傍にいる他の魚や障害物、およびユーザが指定した遊泳領域や移動経路をセンシングして入力する。
2. Locomotion Controller からフィードバックされた体性感覚情報（姿勢や筋肉疲労）を受け取る。
3. Locomotion Controller からフィードバックされた速度情報をもとに、時間が T_{MU} だけ経過した後の自分自身の未来の位置を予測する。
4. 上記の情報を、次に述べる Position and Velocity Control Module へ送る。

この制御アーキテクチャのコアである統一的モーションプランナーは、Position and Velocity Control Module と、Swimming Form Selection Module の2つから構成される。

1. Position and Velocity Control Module では、まず、仮想魚の運動状態が *active* であるか *inactive* であるかをランダムに選択する。運動状態が *active* であれば、入力された情報を用いて、群れる、逃げる、あるいは疲労したので減速するなどの判断を行う。それらの判断情報と未来の予測到達位置を用いてターゲット座標の選択確率分布を生成し、ターゲット座標を決定する。 *inactive* であれば、流されて自然減速するような動きとなるようにターゲット座標を決定する。
2. Swimming Form Selection Module では、ターゲット座標と T_{MU} を用いてターゲット速度を求める。次に、現在の U_Q^t からターゲット速度 U_Q^{t+1} への遷移情報を用いて Swimming form を決める。

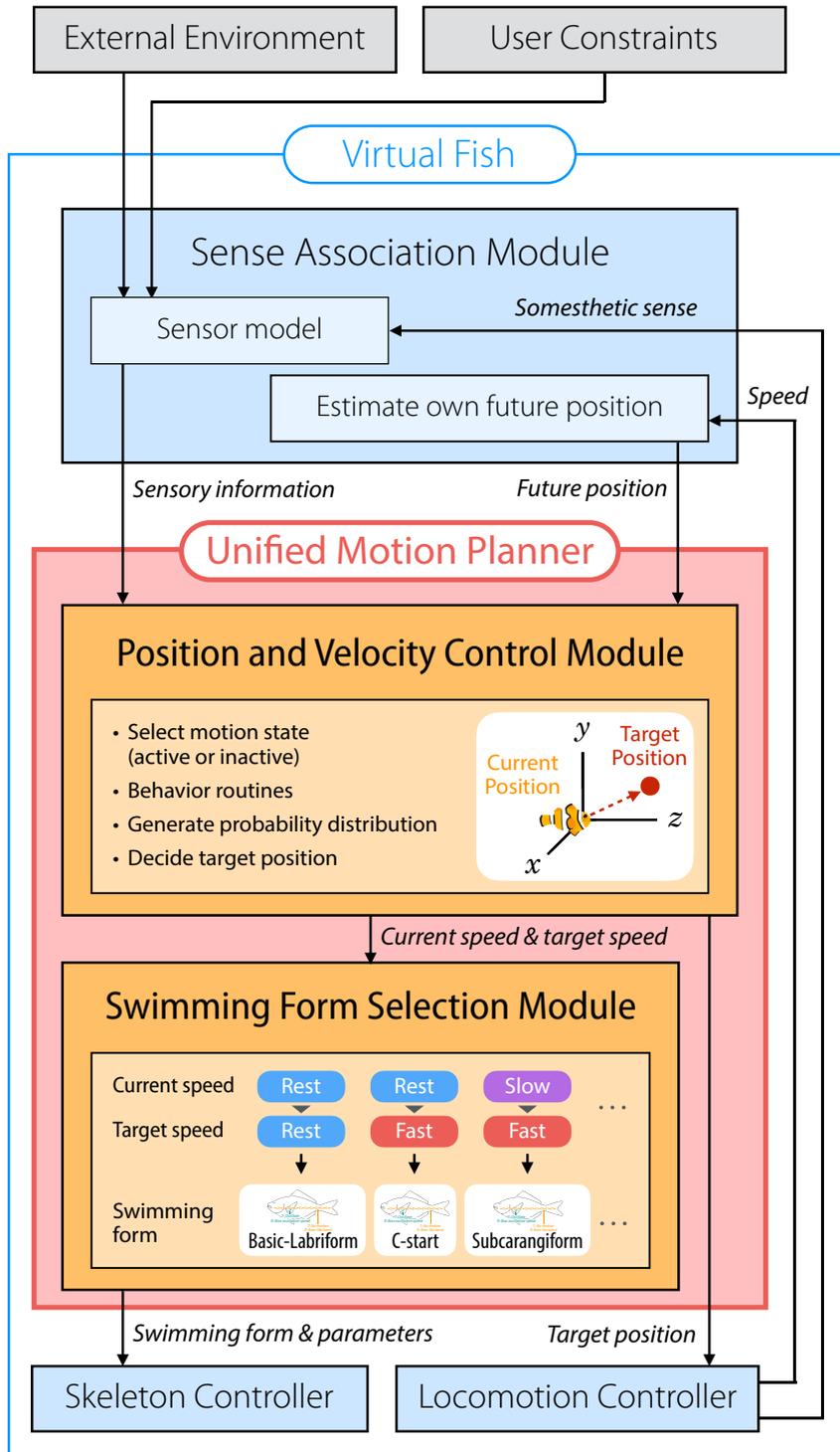


図 3.2: 仮想魚の制御アーキテクチャ概要

最後に、Skeleton Controller と Locomotion Controller を用いてモーションを生成する。

- Skeleton Controller では、仮想魚の各部のジョイントを振動、あるいは波動させる。制御のルールは選ばれた Swimming form によって異なる。
- Locomotion Controller では、仮想魚全体の位置や姿勢を制御する。現在の MU が終わるとともにターゲットに到達するために、仮想魚の加速度や角加速度を制御する。

Position and Velocity Control Module および Locomotion Controller の詳細は第 5 章で述べる。Swimming Form Selection Module および Skeleton Controller の詳細は第 6 章で述べる。

第4章 確率的制約に基づくターゲット座標の選択

本章では主に、仮想魚がどこへ泳ぐかを定める方法について述べる。仮想魚はターゲット座標を確率的に選択することでどこへ泳ぐかを決めている。最後に Locomotion Control の詳細についても述べる。

4.1 ターゲット座標選択の概要

ターゲット座標選択は各 MU の最初に必ず実行される。ターゲット座標選択の大まかな流れは以下の通りである。

1. 仮想魚の現在位置 \mathbf{p}_t を原点としたローカル球座標系 (図 4.1) を定義する。
2. $T_{MU}[s]$ が経過した後の予想到達位置 \mathbf{p}_{t+1} を求める。
3. *active* もしくは *inactive* のいずれかの運動状態を選択する。
 - *active* の場合は、 \mathbf{p}_{t+1} と運動特性のパラメータを用いて、ターゲット座標 \mathbf{p}'_{t+1} を選択するための2つの確率分布の初期定義域を計算する。センシングした情報と行動ルーチンを用いて定義域をクリッピングする。最終的な定義域を用いて3次元確率分布を生成し、その中からランダムにターゲット座標 \mathbf{p}'_{t+1} を決定する。
 - *inactive* の場合は、水の抗力による自然減速を擬似的に行う。現在位置 \mathbf{p}_t と現在速度 \mathbf{u} から、 $T_{MU}[s]$ だけ自然減速し続けた場合の予想到達位置をターゲット座標 \mathbf{p}'_{t+1} とする。

4.2 未来位置の予測

予想到達位置 \mathbf{p}_{t+1} は、次の MU が終わるまでの $T_{MU}[s]$ の間、現在の速度をそのまま維持した場合に到達する位置とする。

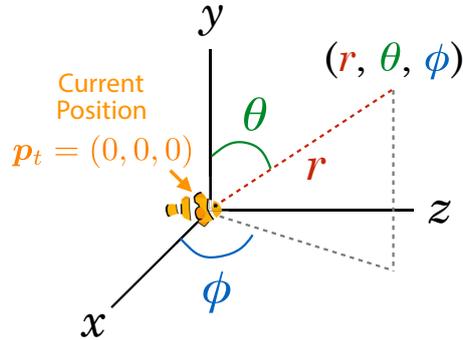


図 4.1: ターゲット座標選択に使用するローカル球座標系。球座標系では、動径 r 、極角 θ および方位角 ϕ の 3 要素で位置やベクトルを表現する。なお本稿では、直交座標系は左手座標系を採用する。

現在の位置を p_t 、現在の姿勢を q_t 、現在の速度を u とすると、 p_{t+1} は次式で求められる。

$$p_{t+1} = p_t + q_t \cdot |u| \cdot T_{MU} \quad (4.1)$$

4.3 状態遷移と行動ルーチン

仮想魚は、アクティブに運動するかどうかに関して取りうる状態変数 S_M と、回避行動などの振る舞いに関して取りうる状態変数 S_B を持つ。 S_M は運動状態、 S_B は行動状態と呼ぶ。いずれの状態も、MU の切り替わりと同じタイミングで更新される。

S_M は *active* もしくは *inactive* いずれかの状態を取る。すなわち、運動状態の状態空間は $\Omega_M = \{active, inactive\}$ である。 S_M はランダムに選択する。*active* が選択される確率を $P_a = \Pr(S_M = active)$ とすると、*inactive* が選択される確率は $P_{ia} = 1 - P_a$ である。このとき、 P_a をアクティブ率と呼び、仮想魚がどれくらい活発に動くかを定めるパラメータを意味する。

S_B は、*escape*、*avoid*、*free* いずれかの状態を取る。すなわち、行動状態の状態空間は $\Omega_B = \{escape, avoid, free\}$ である。*escape* は捕食者から逃げている状態、*avoid* は障害物を避けようとしている状態、*free* はそのどちらも行わずに自由に遊泳している状態を示している。

S_B は以下のルールに従って選択する。

- 捕食者から一定以内の範囲に仮想魚が入り込んでいる間は $S_B = escape$ である。
- 仮想魚から正面方向の一定範囲内に、捕食者でも同種の個体でもない障害物が入り込んでおり、かつ $S_B = escape$ でなければ $S_B = avoid$ である。
- 上記のいずれにも当てはまらなければ $S_B = free$ である。

4.4 確率的ターゲット座標選択

$S_M = active$ の場合は、前節で求めた \mathbf{p}_{t+1} をもとに、ターゲット座標の選択に用いる確率分布の定義域を以下の手順によって動的に生成する。生成過程の例を図 4.2 に示す。

4.4.1 確率分布の初期定義域の生成

最初に、 \mathbf{p}_t を原点にしたローカル球座標系を考える。図 4.2(a) は、ローカル球座標系を真上、すなわち直交座標系での y 軸方向から見た様子を示している。青い線の三角形は仮想魚の現在位置 \mathbf{p}_t 、シアン色の線の三角形は $T_{MU}[s]$ 後の予想到達位置 \mathbf{p}_{t+1} を示す。

次に、筋肉特性を用いて、ターゲットの確率分布の初期定義域を求める (図 4.2(b))。確率分布は、ローカル球座標系の動径 r 、極角 θ および方位角 ϕ の 3 つをいずれも独立した連続確率変数とした 3 次元ガウス分布である。定義域を \mathbf{D} とすると、確率密度関数は次のように表される。

$$\Pr(r, \theta, \phi \in \mathbf{D}) = \int_{\mathbf{D}} f_{r, \theta, \phi}(r, \theta, \phi) dr d\theta d\phi \quad (4.2)$$

通常の高ス分布では、確率変数の定義域は $\mathbf{R} = (-\infty, \infty)$ であるが、本稿で扱うターゲット座標の確率分布では、分布は $\pm 3\sigma$ の範囲内に限定し、それよりも外側については分布が広がっていないものとする。(1) まず最初に、後述するクリッピング処理によって確率変数 r 、 θ および ϕ の定義域と分布の平均 $\boldsymbol{\mu}$ を決め、(2) 次に定義域が有限となっている擬似的な 3 次元ガウス分布を生成し、(3) 生成された確率分布を用いてターゲット座標をランダムに決定する。

なお確率分布の初期定義域は、赤色筋を主体とした動きを行う場合に $T_{MU}[s]$ で移動できる範囲を示す RMG (Red-Muscle Gaussian) と、白色筋を主体とした動きを行う場合に $T_{MU}[s]$ で移動できる範囲を示す WMG (White-Muscle Gaussian) の 2 つを生成する。

次に、RMG の平均 $\boldsymbol{\mu}^R$ および WMG の平均 $\boldsymbol{\mu}^W$ を決める。前の MU で行っていた運動が赤色筋を主体とした運動であれば、予想到達位置 \mathbf{p}_{t+1} を $\boldsymbol{\mu}^R$ とし、そこから一定距離 D_{gap} だけ $+r$ 方向へずらした座標を $\boldsymbol{\mu}^W$ とする。

$$\boldsymbol{\mu}^R = \mathbf{p}_{t+1} = (r_{t+1} \quad \theta_{t+1} \quad \phi_{t+1})^T \quad (4.3)$$

$$\boldsymbol{\mu}^W = (r_{t+1} + D_{gap} \quad \theta_{t+1} \quad \phi_{t+1})^T \quad (4.4)$$

逆に、前の MU で行っていた運動が白色筋を主体とした運動であれば、予想到達位置 \mathbf{p}_{t+1}

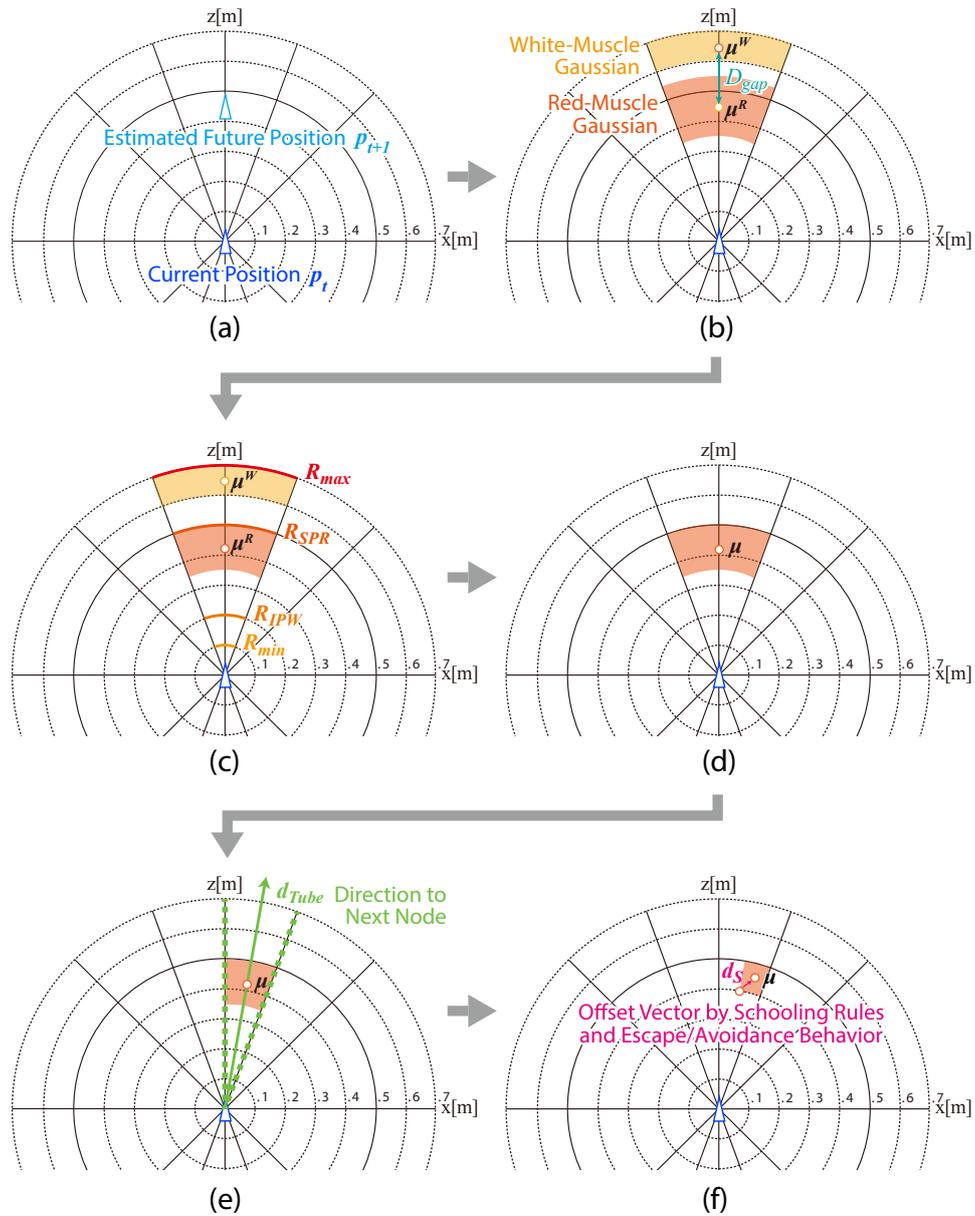


図 4.2: ターゲット座標の確率分布の定義域を生成する過程の例。(a) 仮想魚の現在位置を原点としたローカル座標系を +y 軸方向から見た図。(b) 仮想魚の筋肉特性パラメータに応じて、確率分布の初期定義域を生成する。(c) 速度特性による制約を加える。 R_{max} 、 R_{SPR} 、 R_{min} を使用して定義域をクリッピングする。(d) 行動ルーチンおよび筋肉疲労による制約を加える。(e) チューブコースに追従するための方向ベクトル d_{Tube} による制約を加える。(f) 群集行動による制約を加える。最終的に残った定義域を用いて確率分布を生成し、次の MU でのターゲット座標 p'_{t+1} を確率的に決定する。

を μ^W とし、そこから一定距離 D_{gap} だけ $-r$ 方向へずらした座標を μ^R とする。

$$\mu^R = (r_{t+1} - D_{gap} \quad \theta_{t+1} \quad \phi_{t+1})^T \quad (4.5)$$

$$\mu^W = p_{t+1} = (r_{t+1} \quad \theta_{t+1} \quad \phi_{t+1})^T \quad (4.6)$$

最後に2つの確率分布の範囲、すなわち各分布についての確率変数の定義域 \mathbf{D}^R および \mathbf{D}^W を決める。

RMGにおける r に関する分布の幅を W_r^R 、WMGにおける r に関する分布の幅を W_r^W 、 θ に関する分布の幅を W_θ 、 ϕ に関する分布の幅を W_ϕ とすると、

$$W_r^R = 2\ddot{j}_{max}^R \cdot T_{MU}^2 \quad (4.7)$$

$$W_r^W = 2\ddot{j}_{max}^W \cdot T_{MU}^2 \quad (4.8)$$

$$W_\theta = 2\ddot{\theta}_{max} \cdot T_{MU}^2 \cdot \frac{r_{t+1}}{R_{max} - R_{min}} \quad (4.9)$$

$$W_\phi = 2\ddot{\phi}_{max} \cdot T_{MU}^2 \cdot \frac{r_{t+1}}{R_{max} - R_{min}} \quad (4.10)$$

ここで、 $\ddot{\theta}_{max}$ は θ 方向の最大角加速度を、 $\ddot{\phi}_{max}$ は ϕ 方向の最大角加速度を、 \ddot{j}_{max}^R は赤色筋の最大加速度を、 \ddot{j}_{max}^W は白色筋の最大加速度をそれぞれ示す。これらは仮想魚の筋肉特性を意味するパラメータである。また、 $R_{max} = U_{max} \cdot T_{MU}$ および $R_{min} = U_{min} \cdot T_{MU}$ である。 R_{max} および R_{min} は、次のMUの中で仮想魚が移動できる r の最大値と最小値をそれぞれ示す。確率分布の θ および ϕ に関する幅が、予想到達位置の r 成分である r_{t+1} に比例して広がるようにすることで、小さく前進するときに大きく旋回しすぎるのを防ぐ。

確率変数は r^R 、 r^W 、 θ 、 ϕ の4つを用いる。これらの確率変数の定義域 \mathbf{D}_r^R 、 \mathbf{D}_r^W 、 \mathbf{D}_θ 、 \mathbf{D}_ϕ は次式で求める。

$$\mathbf{D}_r^R = \left\{ r^R \mid \mu_r^R - \frac{W_r^R}{2} \leq \mu_r^R \leq \mu_r^R + \frac{W_r^R}{2} \right\} \quad (4.11)$$

$$\mathbf{D}_r^W = \left\{ r^W \mid \mu_r^W - \frac{W_r^W}{2} \leq \mu_r^W \leq \mu_r^W + \frac{W_r^W}{2} \right\} \quad (4.12)$$

$$\mathbf{D}_\theta = \left\{ \theta \mid -\frac{W_\theta}{2} \leq 0 \leq \frac{W_\theta}{2} \right\} \quad (4.13)$$

$$\mathbf{D}_\phi = \left\{ \phi \mid -\frac{W_\phi}{2} \leq 0 \leq \frac{W_\phi}{2} \right\} \quad (4.14)$$

ここで、 μ_r^R は μ^R の r 成分、 μ_r^W は μ^W の r 成分を示す。

これらを用いて、RMGの定義域 \mathbf{D}^R とWMGの定義域 \mathbf{D}^W はそれぞれ次式で定義される。

$$\mathbf{D}^R = \mathbf{D}_r^R \times \mathbf{D}_\theta \times \mathbf{D}_\phi \quad (4.15)$$

$$\mathbf{D}^W = \mathbf{D}_r^W \times \mathbf{D}_\theta \times \mathbf{D}_\phi \quad (4.16)$$

4.4.2 速度特性による制約

次に、定義域 \mathbf{D}^R および \mathbf{D}^W に対して、速度特性パラメータに基づく次の3つの制約を加える (図 4.2(c))。

1. 赤色筋を主体とした運動を行っているときには U_{SPR} より速く泳ぐことはできない。
2. 白色筋を主体とした運動を行っていれば U_{SPR} より速く泳ぐことができるが、それでも U_{max} より速く泳ぐことはできない。
3. U_{min} より遅く泳ぐことはできない。

そこで、 U_{max} 、 U_{SPR} および U_{min} を以下のように距離単位に変換する。

$$R_{max} = U_{max} \cdot T_{MU} \quad (4.17)$$

$$R_{SPR} = U_{SPR} \cdot T_{MU} \quad (4.18)$$

$$R_{min} = U_{min} \cdot T_{MU} \quad (4.19)$$

これらを端点とした閉区間と確率分布の定義域 \mathbf{D}_r^R および \mathbf{D}_r^W との共通部分を以下のように計算することで、定義域をクリッピングする。

$$\mathbf{D}_r^R \leftarrow \mathbf{D}_r^R \cap [R_{min}, R_{SPR}] \quad (4.20)$$

$$\mathbf{D}_r^W \leftarrow \mathbf{D}_r^W \cap [R_{min}, R_{max}] \quad (4.21)$$

定義域をクリッピングした際には、確率分布の平均 μ についても、定義域を示す閉区間の端点の平均を代入することで更新する。これ以降のクリッピング処理についても同様に計算する。

4.4.3 行動ルーチンによる制約

次に、仮想魚の行動状態 S_B による制約を加える (図 4.2(d))。

$S_B = escape$ ならば、白色筋を主体とする運動を行い、さらに加速しようとする。したがって、 \mathbf{D}_r^W の最大値を $\max(r^W)$ としたとき、次式を用いて \mathbf{D}_r^W をクリッピングする。

$$\mathbf{D}_r^W \leftarrow \mathbf{D}_r^W \cap [\mu_r^W, \max(r^W)] \quad (4.22)$$

また、赤色筋は使用しないため、RMG は使用しないことにする。

$S_B = avoid$ または $S_B = free$ ならば、赤色筋を主体とする運動を行う。白色筋は使用しないため、WMG は使用しないことにする。

この時点で、WMG か RMG のいずれか片方の確率分布を使用することが決まる。そのため、これ以降は、確率分布の定義域を単に \mathbf{D} と表記し、確率変数 r の定義域は単に \mathbf{D}_r と表記する。

4.4.4 筋肉疲労による制約

次に、筋肉の疲労による制約を加える。

仮想魚の速度 u が U_{SPR} を上回ると、超過した速度の 2 乗に比例した速さで筋肉の酸素債 $O_D (0 \leq O_D \leq \max(O_D))$ [21] が蓄積する。ここでは、フレーム間の経過時間 Δt を用いて簡易的に積分計算する。

$$O_D \leftarrow O_D + (u - U_{SPR})^2 \cdot \Delta t \quad (4.23)$$

O_D が限界値 $\max(O_D)$ に達すると、その速度での遊泳維持が不可能となり、 O_D を減少させるために強制的に減速させる制約が加わる。したがって、 \mathbf{D}_r の最小値を $\min(r)$ としたとき、次式を用いて \mathbf{D}_r をクリッピングする。

$$\mathbf{D}_r \leftarrow \mathbf{D}_r \cap [\min(r), \mu_r] \quad (4.24)$$

O_D が U_{SPR} を下回ると、 O_D は一定のスピードで減少する。 O_D が 0 になるとこの制約は外れる。

4.4.5 Tube-Following

次に、ユーザの経路指定による制約を加える (図 4.2(e))。

移動経路の指定方法としては Path-Following (パス追従) が一般的だが、本項ではボリュームを持った魚群の動きをユーザが容易に指定できるようにするために、仮想魚の移動経路をチューブ型の経路 (チューブコース) として指定する Tube-Following を導入する。

チューブコースは、任意の個数の球状領域 (ノードエリア) を作り、それぞれのノードエリアに順序を付け、隣り合った順序のノードエリア間を直線的に結ぶことで得られる。このとき、ノードエリア間に作られた円錐台の領域をリンクエリア、リンクエリアの軸となるベクトルをリンク軸ベクトルと呼ぶ。例として、3つのノードエリアからなるチューブコースを図 4.3 に示す。

Tube-Following をする仮想魚は常に、特定のノードエリアと、そこへつながるリンクエリアを追従対象とする。そのノードエリアの内側に辿り着いた瞬間に、次のノードエリアとリンクエリアへ追従対象を切り替える。

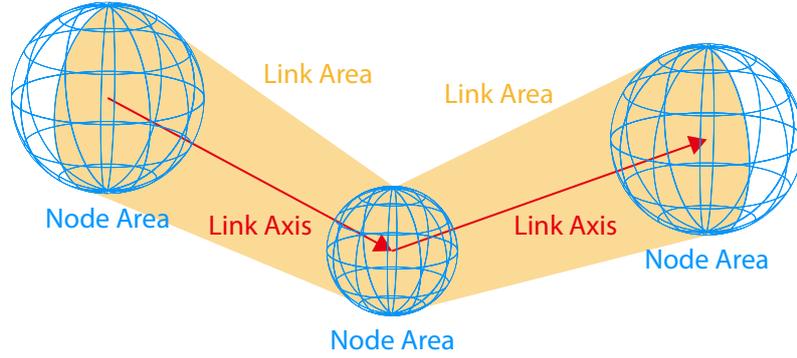


図 4.3: チューブコースの構成例。青い球体がノードエリア、各ノードエリア間を結ぶオレンジ色の領域がリンクエリア、リンクエリアの中央を通る赤い線がリンク軸ベクトルを示す。

また、チューブコースに沿って泳ぐようにするために、確率分布における θ の定義域 \mathbf{D}_θ および ϕ の定義域 \mathbf{D}_ϕ を、制限ベクトル \mathbf{d}_{Tube} の周囲の一定角度内になるようクリッピングする。

$$\mathbf{D}_\theta \leftarrow \mathbf{D}_\theta \cap \left[\theta_{Tube} - \frac{W_{\theta_{Tube}}}{2}, \theta_{Tube} + \frac{W_{\theta_{Tube}}}{2} \right] \quad (4.25)$$

$$\mathbf{D}_\phi \leftarrow \mathbf{D}_\phi \cap \left[\phi_{Tube} - \frac{W_{\phi_{Tube}}}{2}, \phi_{Tube} + \frac{W_{\phi_{Tube}}}{2} \right] \quad (4.26)$$

ここで、 θ_{Tube} や ϕ_{Tube} は、それぞれ \mathbf{d}_{Tube} を仮想魚のローカル球座標系での θ や ϕ に変換した角度を示す。また、 $W_{\theta_{Tube}}$ と $W_{\phi_{Tube}}$ は制限する角度の大きさを示すパラメータであり、チューブコースに対して指定する。この値が大きければ制約が緩くなるため魚群の動きにばらつきが生じ、小さければまとまって整列した動きになる。

\mathbf{d}_{Tube} の算出方法は、仮想魚の現在位置 \mathbf{p}_t がリンクエリアの内側にあるか外側にあるかによって、次の2通りのいずれかを選択する。

- \mathbf{p}_t がリンクエリアの内側にある場合は、現在追従しているリンク軸ベクトルをそのまま \mathbf{d}_{Tube} とする。(図 4.4(a))
- \mathbf{p}_t がリンクエリアの外側にある場合は、現在追従しているノードエリアへ向かうベクトルを \mathbf{d}_{Tube} とする。(図 4.4(b))

なお、チューブコースは循環した配置にすることもできる。また、ノードエリアの大きさを 0 にすることで、リンク軸ベクトルにのみ追従するようになるため、Path-Following としても利用できる。さらに、1つだけノードエリアを持ち、リンクエリアを持たないチューブコースは、水槽のように一定範囲に仮想魚を留まらせる使い方ができる。

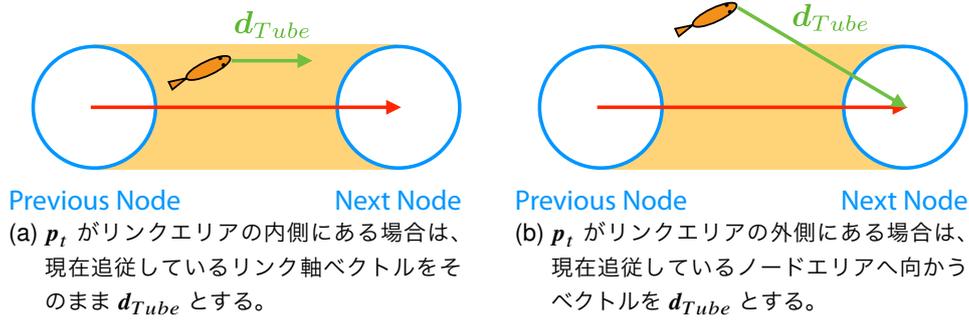


図 4.4: 制限の基準となる方向ベクトル d_{Tube} の計算方法。左から右へ向かうチューブコースを $+y$ 軸方向から見た様子を示す。

4.4.6 群集行動による制約

最後に、仮想魚が群集行動を行う場合に限り、群集行動による制約を加える (図 4.2(f))。さらに、 $S_B = escape$ もしくは $S_B = avoid$ の場合は、捕食者などの回避対象と逆方向に向かうための制約を同時に加える。

群集行動には、広く知られている群集シミュレーション手法の Boids[60] アルゴリズムを用いる。Boids の 3 つのルール (Cohesion ルール、Alignment ルール、Separation ルール) を用いて、各個体の動きを補正しようとするための加速度ベクトル \mathbf{a}_B を算出する。

回避対象と逆方向に向かうための加速度 \mathbf{a}_E は次式で計算する。

$$\mathbf{a}_E = \begin{cases} \frac{\mathbf{d}_o}{\|\mathbf{d}_o\|} K_E (1 - \frac{\|\mathbf{d}_o\|}{D_{safety}}) & \text{if } \|\mathbf{d}_o\| < D_{safety} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4.27)$$

ここで、 \mathbf{d}_o は回避対象から仮想魚へ向かうベクトル、 K_E は回避の強さを表すパラメータ、 D_{safety} は回避を行う閾値となる距離を示す。仮想魚と回避対象との距離が D_{safety} を下回ると、距離に反比例した大きさの加速度 \mathbf{a}_E を発生させる。

\mathbf{a}_B と \mathbf{a}_E を用いて、確率分布の定義域のクリッピングに用いるための補正ベクトル \mathbf{d}_S を次式で求める。

$$\mathbf{d}_B = \mathbf{a}_B \cdot T_{MU}^2 \quad (4.28)$$

$$\mathbf{d}_E = \mathbf{a}_E \cdot T_{MU}^2 \quad (4.29)$$

$$\mathbf{d}_S = L_S \mathbf{d}_B + (1 - L_S) \mathbf{d}_E \quad (4.30)$$

ここで、 L_S は、回避行動に対して群集行動をどれほど優先するかを決めるパラメータである ($0 \leq L_S \leq 1$)。

$\boldsymbol{\mu} \leftarrow \boldsymbol{\mu} + \mathbf{d}_S$ を用いて $\boldsymbol{\mu}$ を補正し、補正された後の $\boldsymbol{\mu}$ が定義域 \mathbf{D} の中心になるように、 \mathbf{D} をクリッピングする。

以上の手順によって、与えられたすべての制約を充足する定義域 \mathbf{D} および平均 $\boldsymbol{\mu}$ が得られる。これらを用いて3次元ガウス分布を生成し、Box-Muller法 [11] により、ターゲット座標 $\mathbf{p}'_{t+1} = (r'_{t+1} \ \theta'_{t+1} \ \phi'_{t+1})^T$ の各成分を確率的に決定する。 $r'_{t+1} > r_{t+1}$ ならば仮想魚は次のMUで加速することになり、逆に $r'_{t+1} < r_{t+1}$ ならば減速することになる。

4.4.7 自然減速

$S_M = inactive$ の場合は、擬似的に水の抗力による自然減速を行う。現在の速度 \mathbf{u} から、 $T_{MU}[s]$ だけ自然減速し続けた場合の予想到達位置をターゲット座標 \mathbf{p}'_{t+1} とする。

$$\mathbf{a}_D = -\frac{1}{2m}\rho \begin{pmatrix} u_x^2 \\ u_y^2 \\ u_z^2 \end{pmatrix} SC_D \quad (4.31)$$

$$\mathbf{p}'_{t+1} = (\mathbf{a}_D \cdot T_{MU} + \mathbf{u}) \cdot T_{MU} \quad (4.32)$$

ここで、 \mathbf{a}_D は水の抗力による加速度を示す。また、 m は仮想魚の質量、 ρ は水の密度、 S は仮想魚の代表面積、 C_D は抗力係数を示しており、いずれも定数のパラメータである。

4.5 移動制御

Locomotion Controller では、 $T_{MU}[s]$ の時間をかけてターゲット座標へちょうど到達するように身体全体の運動制御を行う。

並進運動については、MUが終わるまで等加速度運動を行ったときにちょうど \mathbf{p}'_{t+1} に辿り着くような z 軸方向の加速度 a'_z を毎フレームで求め、速度 \mathbf{u} を更新する。

$$a'_z = 2 \left(\frac{d_z}{t_r^2} - \frac{u_z}{t_r} \right) \quad (4.33)$$

$$u_z \leftarrow u_z + a'_z \cdot \Delta t \quad (4.34)$$

ここで、 d_z は仮想魚のローカル座標系における現在位置 \mathbf{p}_t からターゲット座標 \mathbf{p}'_{t+1} への z 軸方向の距離を示す。また、 t_r はMUの残り時間を、 Δt はフレーム間の経過時間を示す。

回転運動については、 \mathbf{p}_t から \mathbf{p}'_{t+1} へ向かう単位ベクトル \mathbf{q}_{target} を目標姿勢とし、PID制御を用いて仮想魚の姿勢を目標姿勢へ近づけるための角加速度 $\boldsymbol{\alpha}'$ を求め、角速度 $\boldsymbol{\omega}$ を更新す

る処理を毎フレームで実行する。

$$\Sigma q_e \leftarrow \Sigma q_e + q_e \quad (4.35)$$

$$\alpha' = K_p q_e + K_i \Sigma q_e + K_d \frac{q_e - q_{ep}}{\Delta t} \quad (4.36)$$

$$\omega \leftarrow \omega + \alpha' \cdot \Delta t \quad (4.37)$$

ここで、 q_e は現在のフレームにおける仮想魚の姿勢と q_{target} の相対角度を、 Σq_e は q_e の積分値を、 q_{pe} は1つ前のフレームにおける q_e を示す。定数 K_p 、 K_i 、 K_d は、それぞれPゲイン、Iゲイン、Dゲインを示す。

第5章 速度遷移に基づく骨格制御ルー ルの選択

本章では、Swimming form の定義、Swimming form の選択方法、およびスケルトンの制御方法について詳しく述べる。

5.1 部分骨格モデル

魚類には、躯幹をはじめとして、胸びれ、尾びれ、背びれ、尻びれなど多くの可動部位が備わっているが、遊泳する際に大きく動かす部位は限られている。また、動かし方や構造が似通っているものも多い。そこで、遊泳する際に動かす主要な身体の部位を、骨格の構造とその動かし方の観点から、4種類の「PSU (Partial Skeleton Unit)」に分類する。

1. Body Trunk - Caudal Fin Unit (Body-PSU) : 躯幹から尾びれにかけての部位に対応する。脊椎のように一列に連なった骨格構造をしている。
2. Plate-like Fin Unit (Plate-PSU) : 小さな胸びれのような一枚板状のひれ。
3. Ribbon-like Fin Unit (Ribbon-PSU) : アミア型の背びれやナギナタナマズ型の尻びれなどに見られる、長いリボン状のひれ。平行に連なった鰭条を連動させる。
4. Disk-type Pectoral Fin Unit (Disk-PSU) : エイ型に特徴的な、体盤と呼ばれる頭部と一体化した巨大な胸びれ。胸びれ以外では見られない。

本手法では、12種類のSwimming modesに対応した各魚種のスケルトンを、複数のPSUを組み合わせた部分骨格モデルとして定義する(図5.1)。

図5.1では、オレンジ色のジョイントはBody-PSUに、青緑色のジョイントはPlate-PSUに、マゼンタのジョイントはRibbon-PSUに、黄緑色のジョイントはDisk-PSUにそれぞれ対応する。各PSUの動きは独立して制御するため、ハリセンボン型の胸びれのように、1つの部位に複数のPSUを割り当てることもできる。

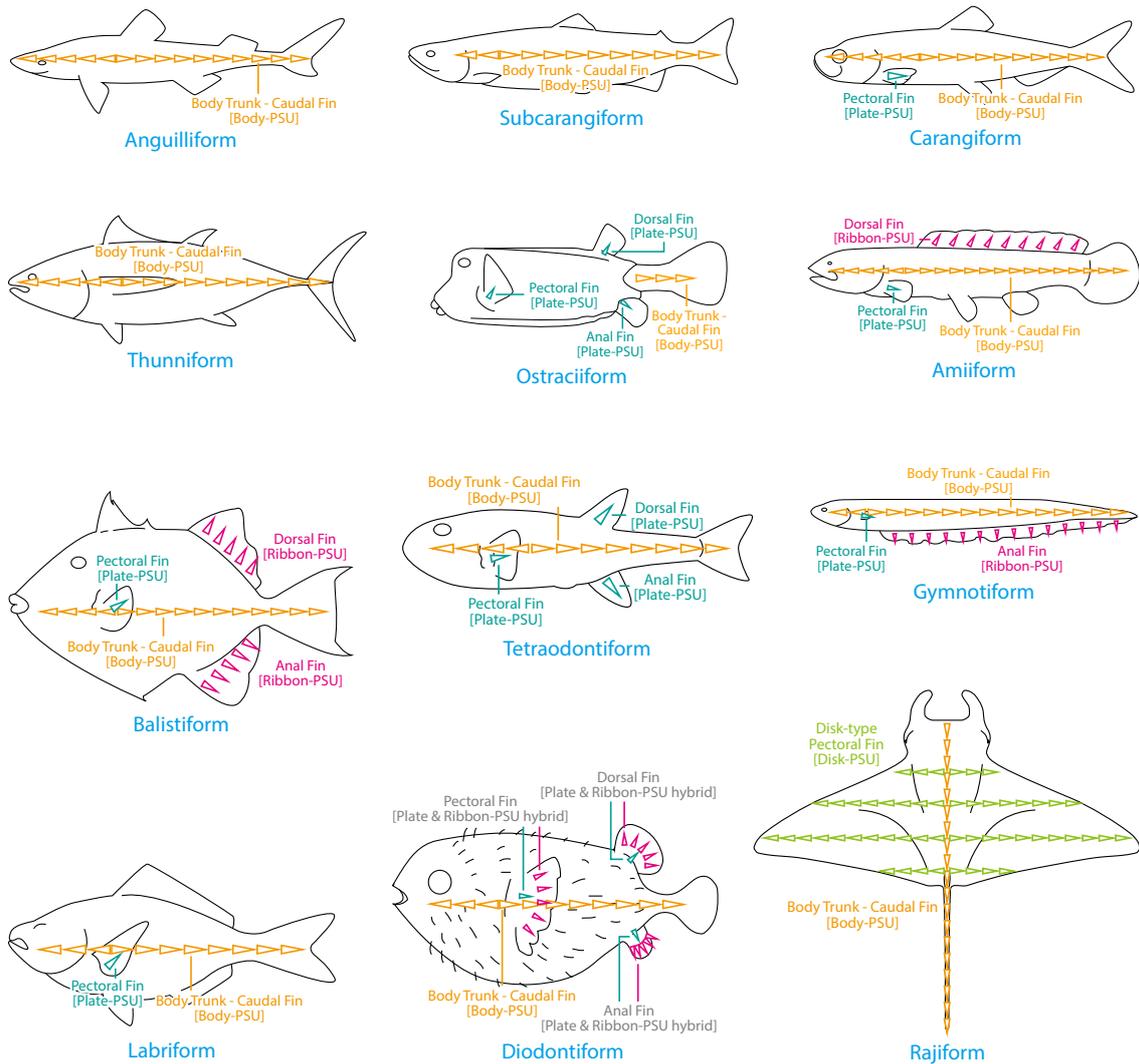


図 5.1: 12 種類の各 Swimming mode について本稿で使用した部分骨格モデルの定義

また、Swimming form は、部分骨格モデルを構成するすべての PSU に対して、並進運動と回転運動それぞれについて「振動させる (Oscillate)」「波動させる (Undulate)」「弓なりに曲げる (Bow-like bend)」「動かさない (No motion)」の 4 種類の基本的な動き方をマッピングすることでモデリングする。例として、ベラ型およびハコフグ型における Swimming form の定義を図 5.2 に示す。

ベラ型の仮想骨格モデルは、Body-PSU および胸びれに対応する 1 対の Plate-PSU から構成される。Swimming form が Basic-Labriform の場合は、胸びれの Plate-PSU を振動させることによって前方へ推進するとともに、Body-PSU を弓なりに曲げて方向転換を行う。また、舟

Swimming Mode (Partial Skeleton Model)	Swimming Form			
<p>Labriform</p>	<p>Basic-Labriform</p>	<p>Subcarangiform</p>	<p>C-start</p>	
<p>Ostraciiform</p>	<p>Ostraciiform-Rest</p>	<p>Ostraciiform-Slow</p>	<p>C-start</p>	

図 5.2: ベラ型およびハコフグ型における Swimming Forms の定義。T は並進運動に対応した動作、R は回転運動に対応した動作を示し、それぞれ速度と角速度に比例してパラメータが変化する。その他の Swimming modes における定義は付録 B を参照。

のオールのように、胸びれの動かす速さを左右で偏らせることで自然に旋回する。Swimming form が Subcarangiform の場合は、Plate-PSU を動かさなくなる代わりに、並進運動に対応して Body-PSU を波動させる。どの Swimming modes においても、C-start については、Body-PSU を瞬間的に大きく屈曲させて旋回する形でモデリングする。

ハコフグは身体の構造上、身体をほとんど曲げられないため、ハコフグ型の Body-PSU は極端に短くしている。また胸びれ、背びれ、尻びれに対しては Plate-PSU を割り当てる。Swimming form が Ostraciiform-Rest のときは背びれと尾びれは振動させず、回転運動するときに曲げるだけであるが、Swimming form が変化するにしたがって背びれや尾びれも胸びれと同様に振動するようになる。

表 5.1: ベラ型における Swimming form の選択ルール

U_Q^t	U_Q^{t+1}	Swimming form
Rest	Rest	Basic-Labriiform
Rest	Slow	Basic-Labriiform
Rest	Fast	C-start
Slow	Rest	Basic-Labriiform
Slow	Slow	Basic-Labriiform
Slow	Fast	Subcarangiform
Fast	Rest	Basic-Labriiform
Fast	Slow	Basic-Labriiform
Fast	Fast	Subcarangiform

表 5.2: ハコフグ型における Swimming form の選択ルール

U_Q^t	U_Q^{t+1}	Swimming form
Rest	Rest	Ostraciiform-Rest
Rest	Slow	Ostraciiform-Slow
Rest	Fast	C-start
Slow	Rest	Ostraciiform-Rest
Slow	Slow	Ostraciiform-Slow
Slow	Fast	Ostraciiform-Fast
Fast	Rest	Ostraciiform-Rest
Fast	Slow	Ostraciiform-Slow
Fast	Fast	Ostraciiform-Fast

5.2 定性的速度遷移を用いた Swimming form の選択

魚がある加速度で加速するとき、ほぼ停止している状態からゆっくり泳いでいる状態に移行する場合と、ゆっくり泳いでいる状態から速く泳いでいる状態に移行する場合とでは、同じ加速度であっても泳ぎ方が全く異なる場合がある。そこで本手法では、ターゲット速度、すなわち次の MU における定性的速度 U_Q^{t+1} を求め、現在の MU での定性的速度 U_Q^t から U_Q^{t+1} への遷移情報と Swimming form を対応付ける。これにより、仮想魚の状況の変化に応じた Swimming form の突発的な変化を実現する。

ターゲット速度 $U_{Q_{t+1}}$ は、ターゲット座標 p'_{t+1} の r 成分 r'_{t+1} を用いて次式で求める。ただし $R_{IPW} = U_{IPW} \cdot T_{MU}$ である。

$$U_{Q_{t+1}} = \begin{cases} [\text{Rest}] & \text{if } R_{min} \leq r'_{t+1} < R_{IPW} \\ [\text{Slow}] & \text{if } R_{IPW} \leq r'_{t+1} < R_{SPR} \\ [\text{Fast}] & \text{if } R_{SPR} \leq r'_{t+1} \leq R_{max} \end{cases} \quad (5.1)$$

U_Q^t については、前回の MU 更新時に計算した U_Q^{t+1} をそのまま用いる。ただし、最初の MU においては、初期値として $U_Q^t = [\text{Rest}]$ を用いる。

具体例として、ベラ型およびハコフグ型における Swimming form の選択ルールを表 5.1 および表 5.2 に示す。その他の Swimming modes における Swimming form の選択ルールについては付録 B を参照。

どの Swimming modes においても、Rest から Fast へ遷移し、かつ逃避行動を行う場合は

C-start を選択する。ベラ型では、Slow から Fast へ遷移する場合と Fast から Fast へ遷移する場合に Subcarangiform を選択し、それ以外の場合は Basic Labriform を選択する。ハコフグ型でも同様に、C-start を除けば、 $U_Q^{t+1} = [\text{Rest}]$ の場合は Ostraciiform-Rest を、 $U_Q^{t+1} = [\text{Slow}]$ の場合は Ostraciiform-Slow を、 $U_Q^{t+1} = [\text{Fast}]$ の場合は Ostraciiform-Fast を選択する。

5.3 骨格制御

PSU の動きは、基本的には振動と波動、弓なりな屈曲の 3 種類を組み合わせる。

振動と波動の再現には、Lighthill によるウナギの波動のモデル [45] を魚ロボットに応用した Willy らの数式 [84] を用いる。

$$y = Ae^{\alpha(s-1)} \sin k(s - Vt) \quad (5.2)$$

y は波動によって生じる変位、 A は振幅パラメータ、 α は片側からもう片側にかけての波の広がり具合、 k は現れる波の数、 V は波の伝搬速度を示している。この式によって得られた波形を近似するように各ジョイントの角度を曲げる。 k が大きいと波動のように、 k が小さいとのように見える。

魚は推進する際に、加速するための力に加えて、水の抗力を打ち消すための力を出すために身体を動かす必要がある。そこで、 V の計算には、これら 2 つの力の合力を用いる。これにより、計算を大幅に簡略化しながら、見かけ上は水の中を泳いでいるような動きを実現する。

屈曲については、角速度の移動平均 ω_m を指数関数的に減衰させた量を目標角度として PID 制御を行う。すなわち、ジョイントのルートからの距離を d 、目標角度の初期値を $\theta_0 = \omega_m$ 、崩壊定数を $\lambda (\lambda \geq 0)$ とすると、ジョイントの目標角度 θ は次式で表される。

$$\theta(d) = \theta_0 e^{-\lambda d} \quad (5.3)$$

Plate-PSU の基本的な動き方は、Body-PSU においてジョイントが 1 つだけの場合に相当する。ただし、Plate-PSU は胸びれでよく用いるため、実際の魚が胸びれを動かす速さを舟のオールのように左右で偏らせて旋回することが多いことを考慮する必要がある。そこで、角速度 ω に応じて左右の Plate-PSU での V にオフセットを加えることにより、自然な旋回時の動きを実現する。

Disk-PSU については、波動する Body-PSU を平行に複数並べ、位相を一定量ずらすことで動きを近似する。

第 6 章 提案手法を用いた映像生成

6.1 実装の詳細

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。

6.1.1 最近傍探索の高速化

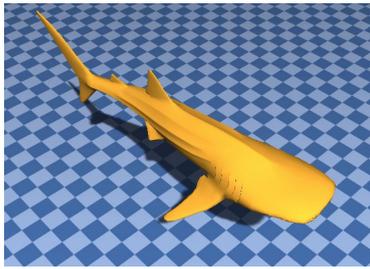
シミュレータで特に計算コストが高いのは、群集シミュレーションにおける最近傍探索である。そこで、*k-d tree*[7] を使用し、最近傍探索の計算時間を軽減した。ただし、水中シーンでよく見られる、群集行動を行う魚種と行わない魚種が混在する状況における群集行動や回避行動を効率良く処理するために、次の 3 つに場合分けして近傍探索を行う。

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。これに対しては、群集行動を行う魚種のみを扱う *k-d 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に行う最近傍探索。これに対しては、シーン中の全個体を扱う *k-d 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ために行う最近傍探索。この場合の探索対象である捕食者や障害物は数が少ないので、検出漏れの回避を優先するために、*k-d 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。

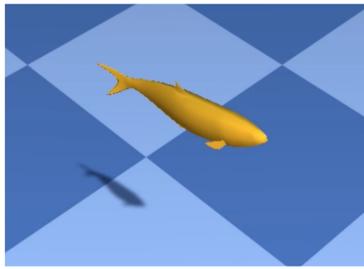
6.1.2 CG モデル

提案手法を使用するにはリギング済みの CG モデルが必要である。本章で用いた魚形状の CG モデルを図 6.1 に示す。CG モデルは 12 種類あり、形状やスケルトンの構成は、それぞれ 12 種類の *Swimming modes* に対応している。

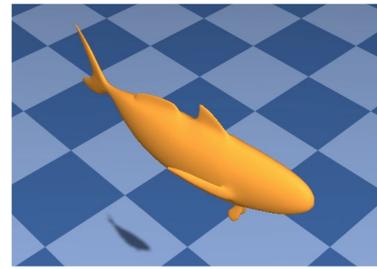
また、各 CG モデルのポリゴン数と DoF (Degree of Freedom) を表 6.1 に示す。回転に関する DoF は PSU によって差異があり、Body-PSU に限っては、*x* 軸方向への波動だけでなく、



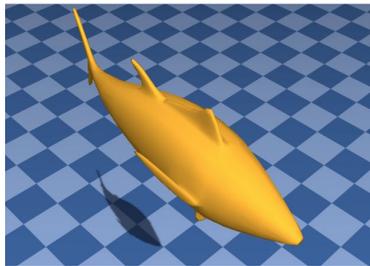
Anguilliform



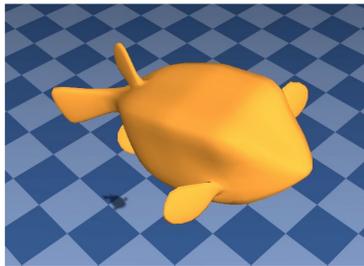
Subcarangiform



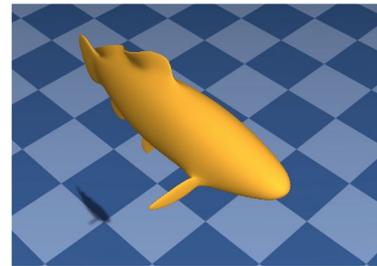
Carangiform



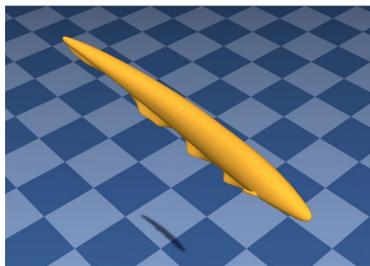
Thunniform



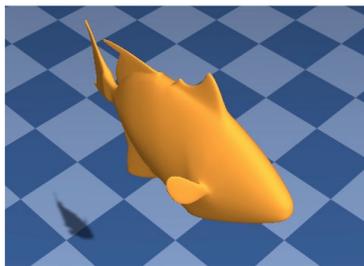
Ostraciiform



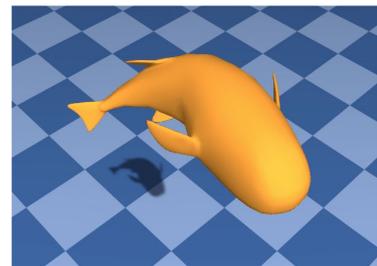
Amiiform



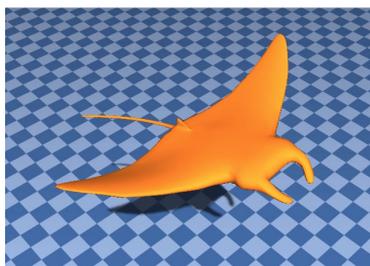
Gymnotiform



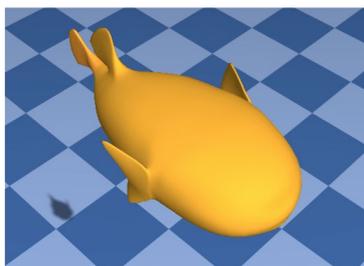
Balistiform



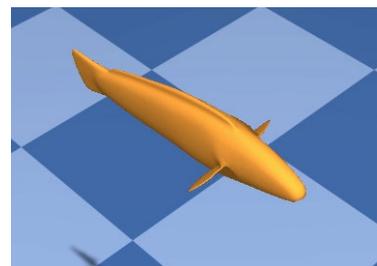
Tetraodontiform



Rajiform



Diodontiform



Labriform

図 6.1: 本稿で用いた CG モデル。12 種類の Swimming modes それぞれに対応する。

表 6.1: 魚形状 CG モデルの三角形ポリゴン数と DoF の合計

Swimming mode	三角形ポリゴン数	スケルトン全体における DoF の合計
ウナギ型	6092	30
準アジ型	582	24
アジ型	7984	32
マグロ型	2024	30
ハコフグ型	11200	14
アミア型	19776	51
ナギナタナマズ型	10496	48
カワハギ型	16000	42
フグ型	13952	28
エイ型	2696	90
ハリセンボン型	6592	51
ベラ型	2752	24

y 軸方向への波動も行う。すなわち、Body-PSU はジョイントごとに 2DoF、その他の PSU はジョイントごとに 1DoF を持つ。

6.2 映像生成の結果

6.2.1 12 種類の Swimming modes

図 6.2–6.13 に、12 種類の Swimming modes をそれぞれ 1 匹ずつ自由に遊泳させた結果を示す。

ウナギ型の魚はジンベエザメを模しており、躯体の大部分を非常にゆっくりと動かして遊泳する。一方で、マグロ型の魚は躯体のうち尾びれ付近のみを速く振動させて高速に遊泳し、方向転換する際には躯体を屈曲させる。アジ型と準アジ型の魚はこれらの中間的な泳ぎ方を採用する。

アミア型とナギナタナマズ型は、長いリボン状のひれが見た目の点でも泳ぎ方の点でも特徴的である。図 6.7 および図 6.8 では、前進や停止と連動したひれの滑らかな波動が実現できている。

ハコフグ型、フグ型、ハリセンボン型、カワハギ型は、いずれも小回りがきく魚種であり、胸びれや尾びれだけでなく、背びれや尻びれも活用しながらその場で器用に方向転換する泳ぎ方ができる。このうち、カワハギ型とハリセンボン型は、一部のひれが全体的に動かせる上

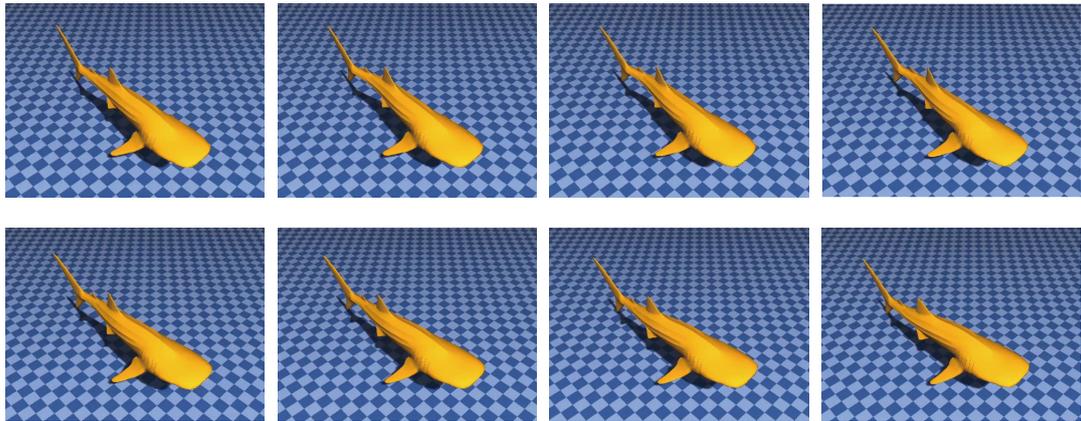


図 6.2: ウナギ型の魚が自由遊泳する様子

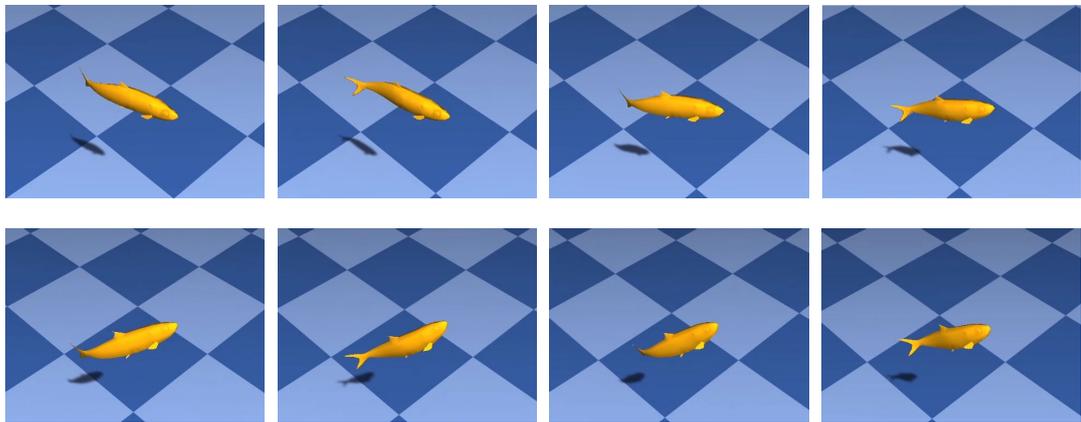


図 6.3: 準アジ型の魚が自由遊泳する様子

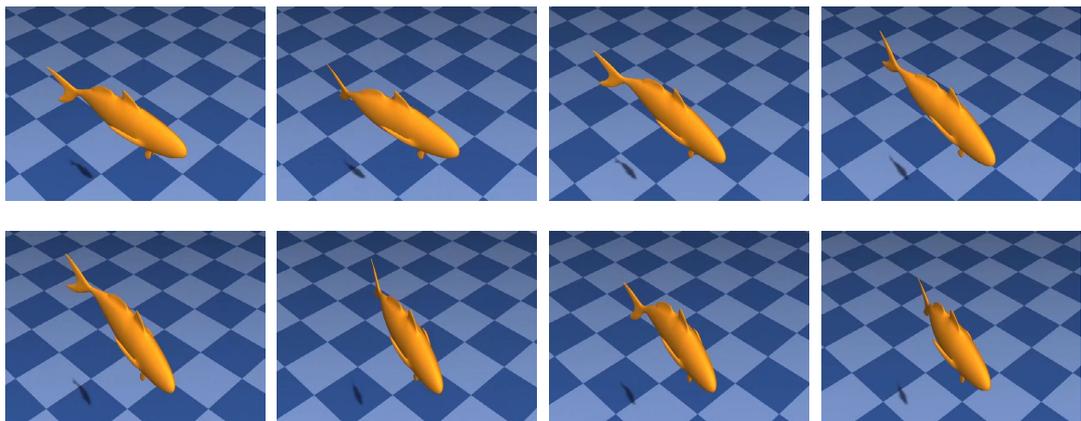


図 6.4: アジ型の魚が自由遊泳する様子

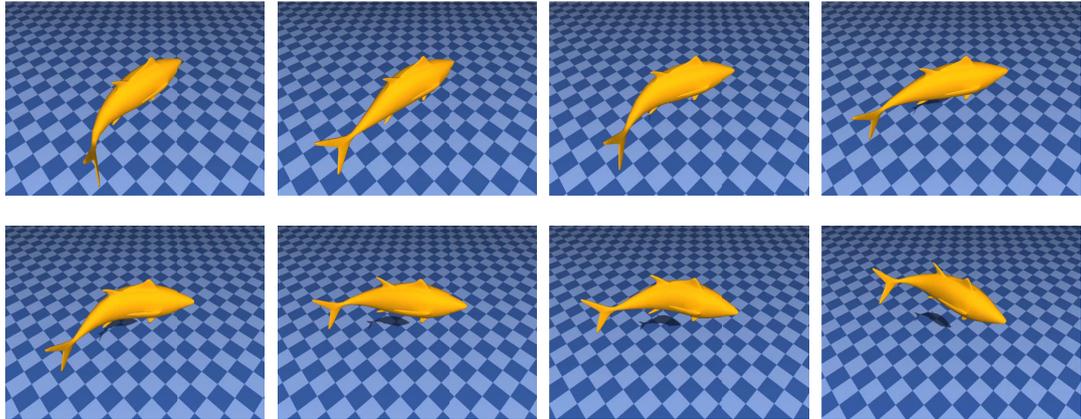


図 6.5: マグロ型の魚が自由遊泳する様子

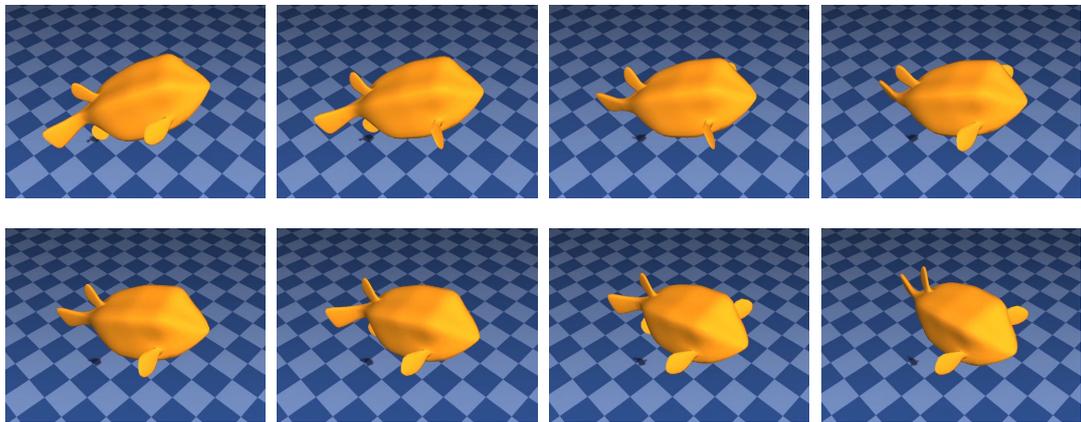


図 6.6: ハコフグ型の魚が自由遊泳する様子

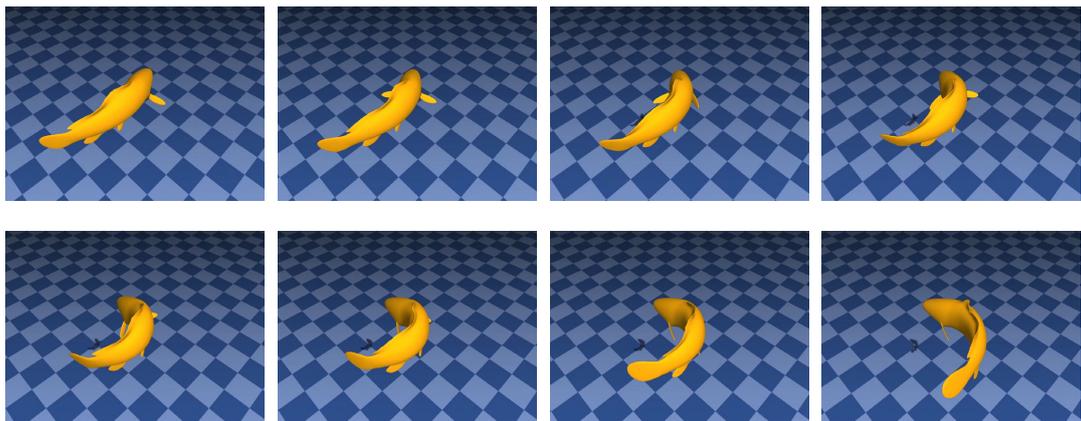


図 6.7: アミア型の魚が自由遊泳する様子

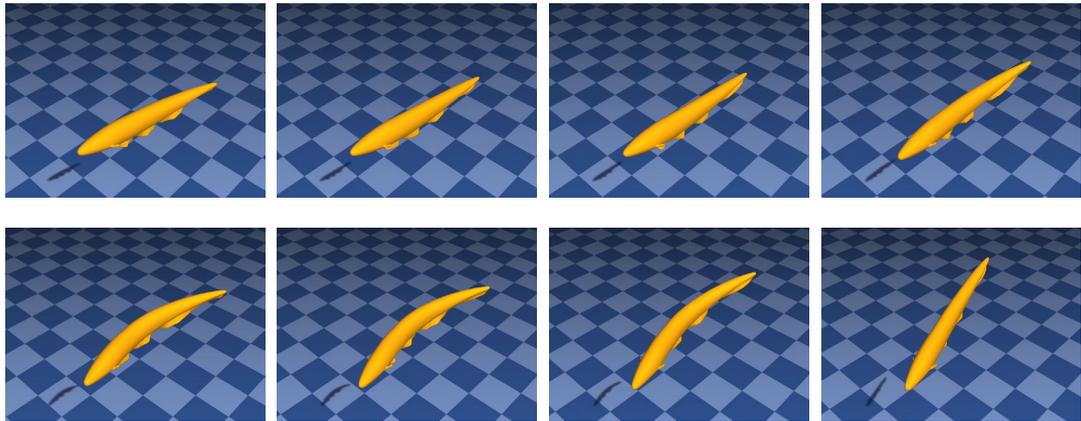


図 6.8: ナギナタナマズ型の魚が自由遊泳する様子

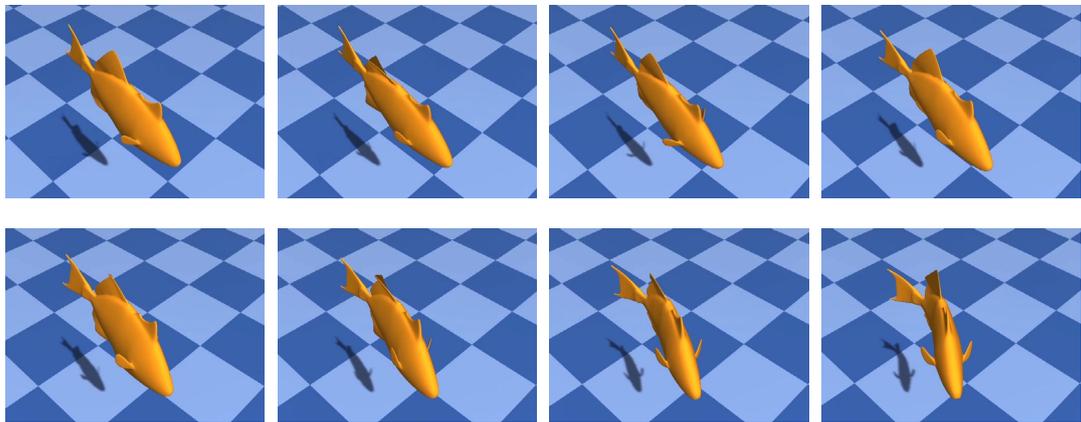


図 6.9: カワハギ型の魚が自由遊泳する様子

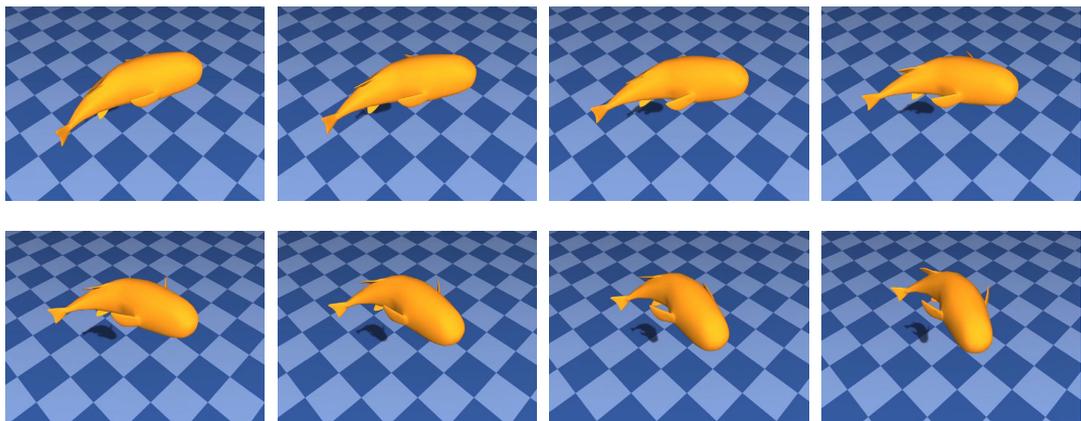


図 6.10: フグ型の魚が自由遊泳する様子

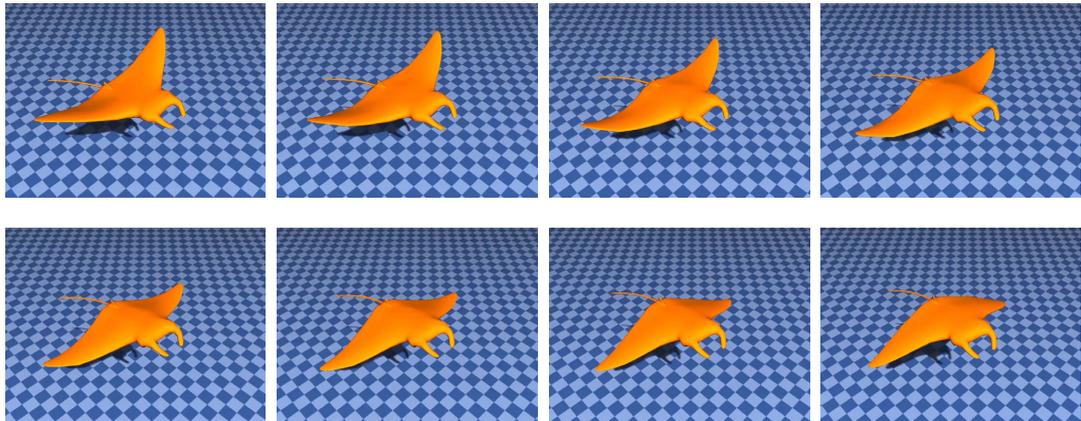


図 6.11: エイ型の魚が自由遊泳する様子

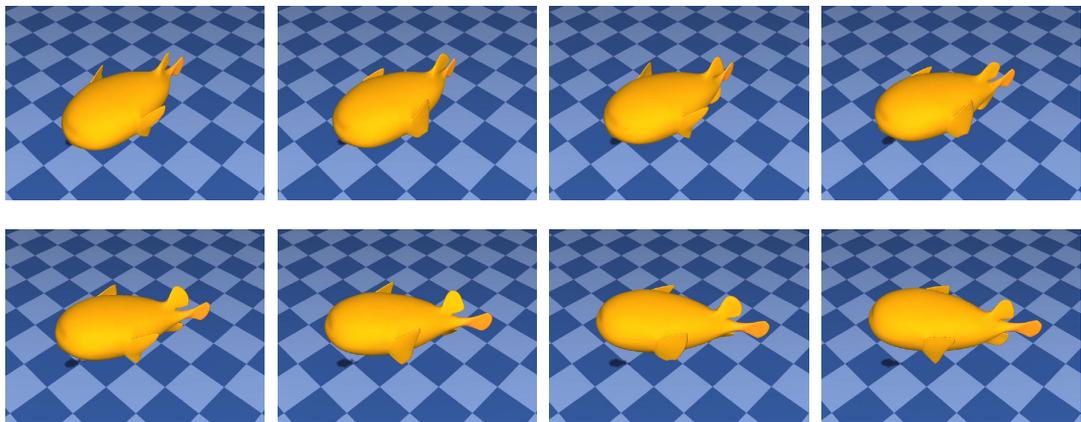


図 6.12: ハリセンボン型の魚が自由遊泳する様子

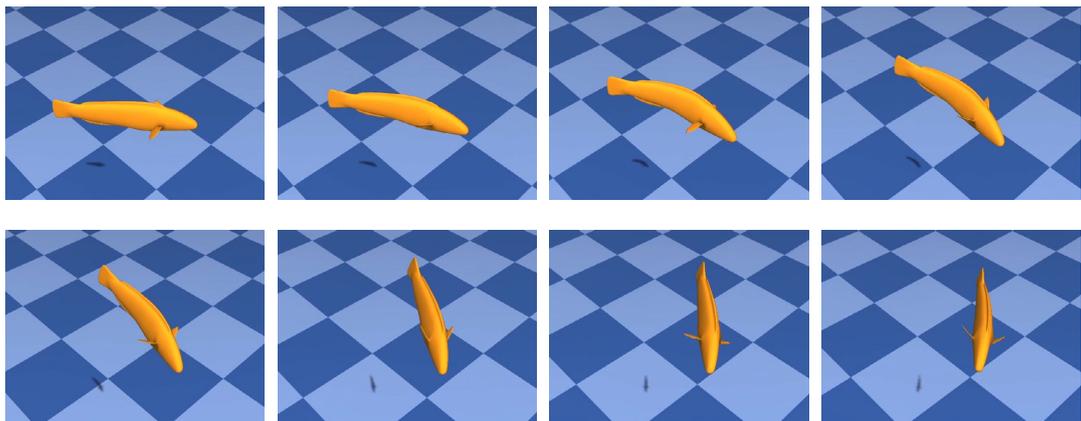


図 6.13: ベラ型の魚が自由遊泳する様子

に細かく波動する特徴がある。このような、複合的な動きを組み合わせた泳ぎ方も実現できている。

エイ型については、体盤と呼ばれる巨大な胸びれを羽ばたかせるようにゆっくり動かして泳ぐ特殊な泳ぎ方を実現できている。ベラ型は、サイズや骨格構造は準アジ型などに近いものの、平常時には躯体や尾びれではなく胸びれを用いて前進するという泳ぎ方の違いを再現できている。

このように、本手法はサイズや骨格が全く異なる多様な魚種に適用できる。

6.2.2 Swimming form の切り替え

図 6.14 では、ベラ型の魚が Swimming form を切り替えながら泳ぐ様子を示す。最初は Basic-Labrifform を用いてゆっくり泳ぐ。捕食者が接近してくると、魚は一瞬だけ C-start を使い、身体を大きく屈曲させて捕食者から離れる。C-start が終わった後も、しばらくは Subcarangiform を用いて素早く逃げ続ける。図 6.15 に示すハコフグ型の魚も同様に、ゆっくり泳ぐ場合と速く泳ぐ場合、捕食者から逃げる場合とで Swimming form を使い分けて泳ぐことができている。

6.2.3 パラメータ変化による動きのバリエーション生成

提案手法では、いくつかのパラメータを変えるだけで、同一の CG モデルに対する動きのバリエーションを作ることができる。図 6.16 に、同一のアジ型の魚に対して、いくつかのパラメータを変えたことによる 3 パターンの動きの比較を示す。また、変更したパラメータとその設定値を表 6.2 に示す。

魚類は成長によってサイズや運動能力が大幅に変化するという特長がある。稚魚はかなり小刻みに動くことができる一方で移動能力は低い。幼魚、成魚と成長するにつれて、ゆったりとした泳ぎ方になる代わりに移動能力が高くなる。図 6.16 では、このような同一魚種間でのサイズや運動能力のバリエーションにも提案手法が対応できることを示した。また、提案手法のモーション生成アルゴリズムは CG モデルのメッシュ形状に影響されないため、実際に稚魚や幼魚を視覚的に表現したい場合は、CG モデルを置き換えたり縮小したりすることで容易に対応が可能である。

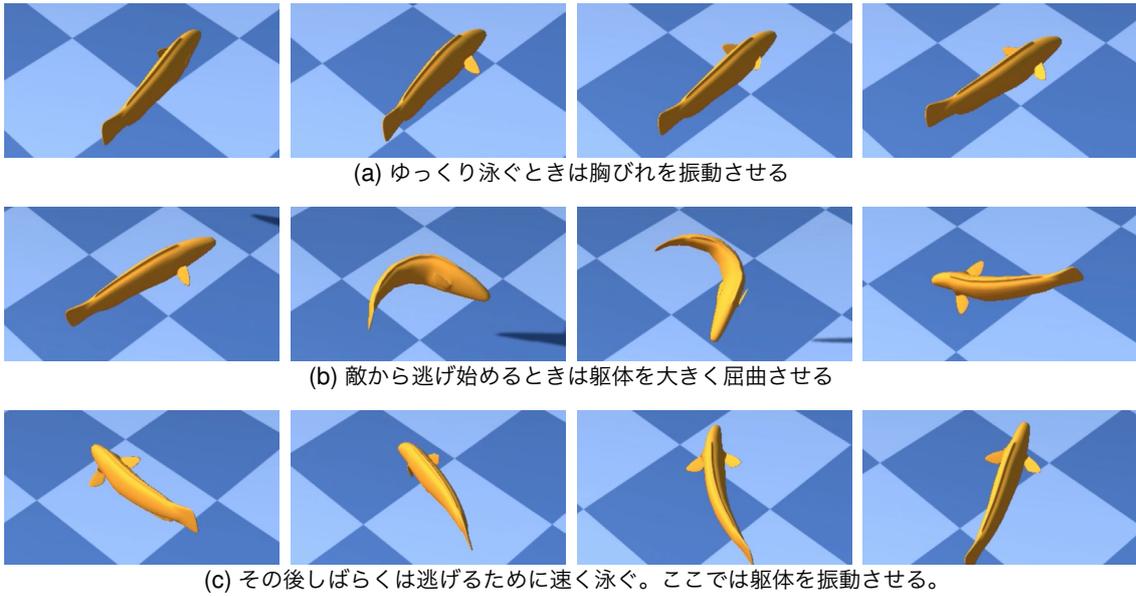


図 6.14: ペラ型の仮想魚が Swimming form を切り替えながら泳ぐ例

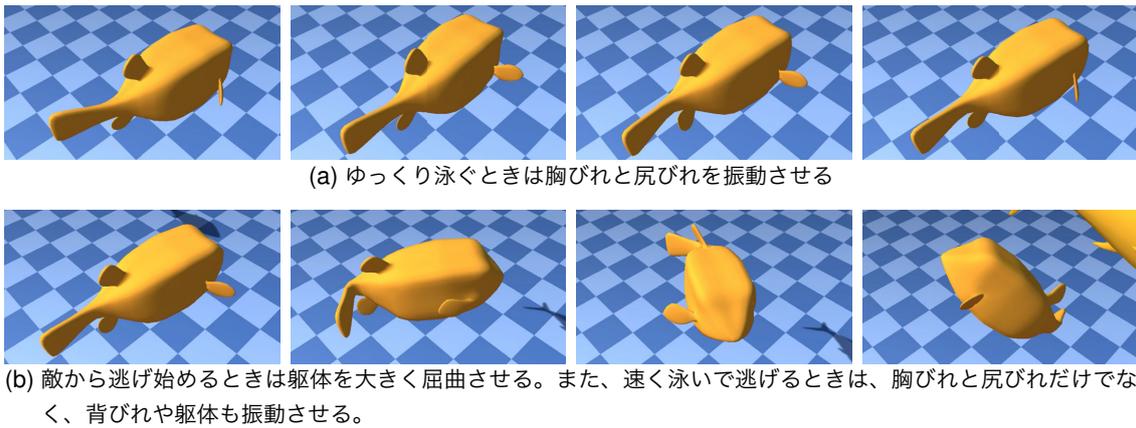


図 6.15: ハコフグ型の仮想魚が Swimming form を切り替えながら泳ぐ例

6.2.4 Tube-Following

提案手法では、チューブコースを設定することで魚群の形状のバリエーションを容易に作成できる。図 6.17 および図 6.18 に、同一のマイワシによる 2 種類の異なる魚群のシミュレーション結果を示す。マイワシの Swimming mode は準アジ型である。チューブコースの配置とマイワシの個体数だけを変えることで、実際の魚群でよく見られるトーラス型の形状やト

表 6.2: 設定したパラメータの一覧。 $\max(\omega)$ および $\max(\alpha)$ については、 x, y, z 軸それぞれに関する値を (x, y, z) として表示する。

Parameter	Adult Fish	Young Fish	Fry
U_{max}	6	4	1
U_{SPR}	4	1.5	0.3
U_{IPW}	2	0.8	0.2
U_{min}	1	0.1	0.01
P_a	0.1	0.3	1
T_{MU}	0.2	0.1	0.05
$\max(\omega)$	(200, 180, 200)	(400, 400, 200)	(600, 700, 200)
$\max(\alpha)$	(60, 60, 20)	(80, 100, 20)	(120, 120, 20)

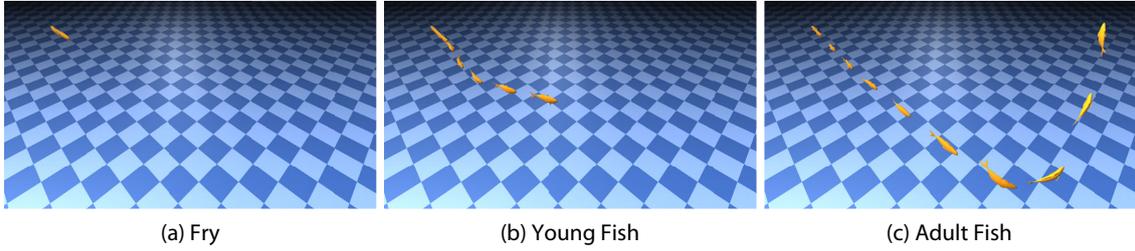
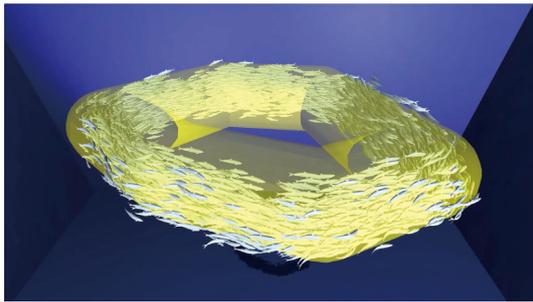


図 6.16: 同一のアジ型の仮想魚に対して、いくつかのパラメータを変えることで動きのバリエーションを作った例。稚魚のようにかなりせせこましく泳ぐ場合、幼魚のように少し小刻みに泳ぐ場合、成魚のようにゆったりと泳ぐ場合の 3 パターンを示す。

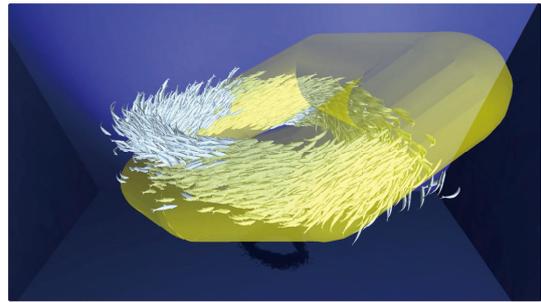
ルネード型の形状を再現することができる。

また、図 6.17 に示すように、チューブコースはリアルタイムに移動や回転を行うことができる。追従する魚が追いつけないほど高速にチューブコースが移動や回転を行うと、魚がチューブコースの外に飛び出してしまうことがあるが、魚がチューブコースを追従し続ける限りはすぐにチューブコース内部へ戻ることができる。その結果として、図 6.17(d) のような魚群形状の動的な変化も実現できる。

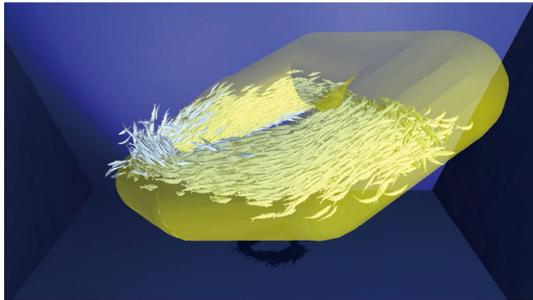
続いて、図 6.19 では、追従のための制限ベクトル d_{Tube} による角度の制限範囲 $W_{\theta_{Tube}}$ および $W_{\phi_{Tube}}$ の違いによる魚群の形状を比較する。 $W_{\theta_{Tube}} = W_{\phi_{Tube}} = 0^\circ$ のときは、チューブコースへの拘束が強く、魚群の形状は直線的になる。 $W_{\theta_{Tube}} = W_{\phi_{Tube}} = 90^\circ$ になると、魚群に程よいバラつきが生じる。しかし、 $W_{\theta_{Tube}} = W_{\phi_{Tube}} = 180^\circ$ まで制限を緩めると、チューブコースから出たまま戻れない個体が増えることで、魚群のまとまりが失われてしまう。このように、提案手法では魚群のまとまり具合を容易に調整できる。



(a) ほぼすべての個体がチューブコース内部を泳いでいる



(b) チューブコースを回転させた直後の様子。魚群の一部がチューブコース外にはみ出る。



(c) チューブコースの回転に追従して魚群の形状が変化する



(d) チューブコースを非表示にした状態。

図 6.17: トーラス型に設定したチューブコースに沿って泳ぐ 4,000 匹のマイワシの魚群

6.2.5 魚群の散開

図 6.20 では、捕食者の攻撃行動によってもたらされる魚群のダイナミックな形状変化の例を示す。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チューブコースへ戻っていく。

6.2.6 外力に対するロバスト性

図 6.21 では、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す。ここでは、チューブコースに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コース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、チューブコースの外側へ流されてしまう。外力に対する振る舞いについても、自然界の魚で見られる振る舞いを再現できていると言える。

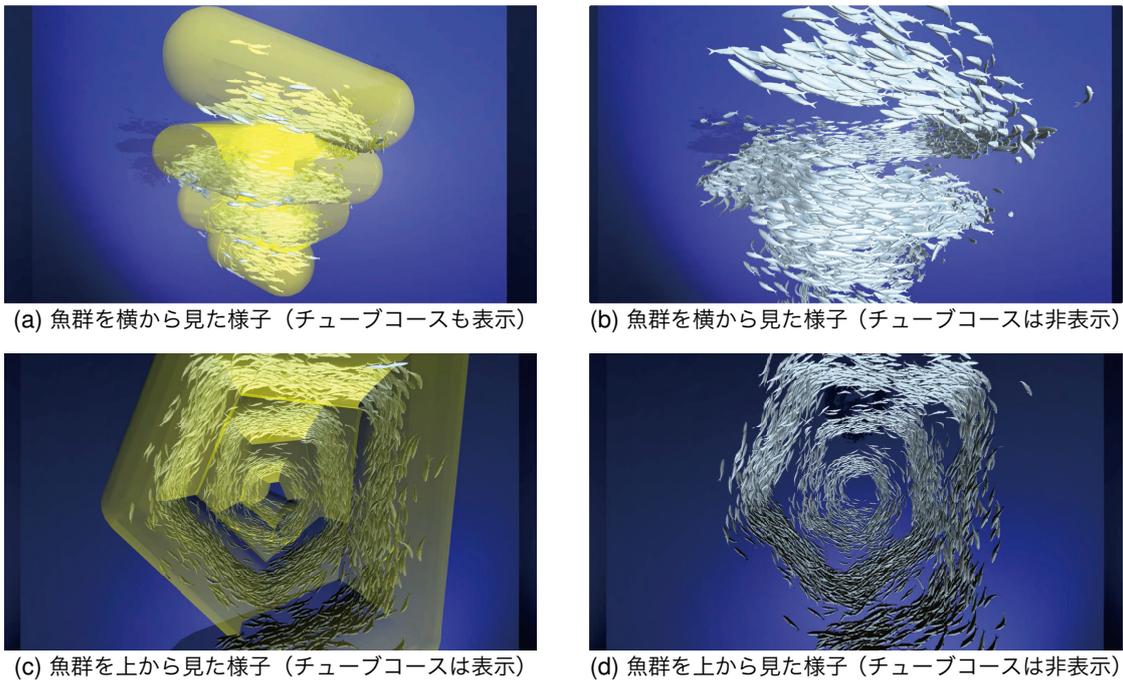


図 6.18: トルネード型に設定したチューブコースに沿って泳ぐ 8,000 匹のマイワシの魚群

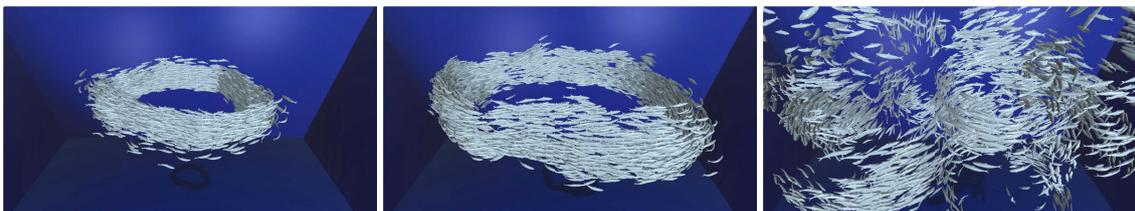


図 6.19: トーラス型に泳ぐ 4,000 匹の魚群におけるパラメータの比較。追従のための制限ベクトル d_{Tube} による角度の制限範囲 $W_{\theta_{Tube}}$ および $W_{\phi_{Tube}}$ を変えている。左は 0° 、中央は 90° 、右は 180° である。

6.2.7 多数多種の魚が混在する水中シーン

最後に、8,000 匹のマイワシの魚群を含む 12 種類の Swimming modes すべてを混在させた水中シーンを図 6.23 に示す。また、CG モデルにテクスチャを適用し、マイワシの個体数を 12,000 匹に、ジンベエザメとエイの個体数をそれぞれ 2 匹と 5 匹に増やし、さらにフォグやコースティクス効果を付加することで視覚要素をよりリアルにした水中シーンを図 6.23 に示す。これまでの結果と同様に、実際の水中シーンに近い条件においても、提案手法を用いるこ

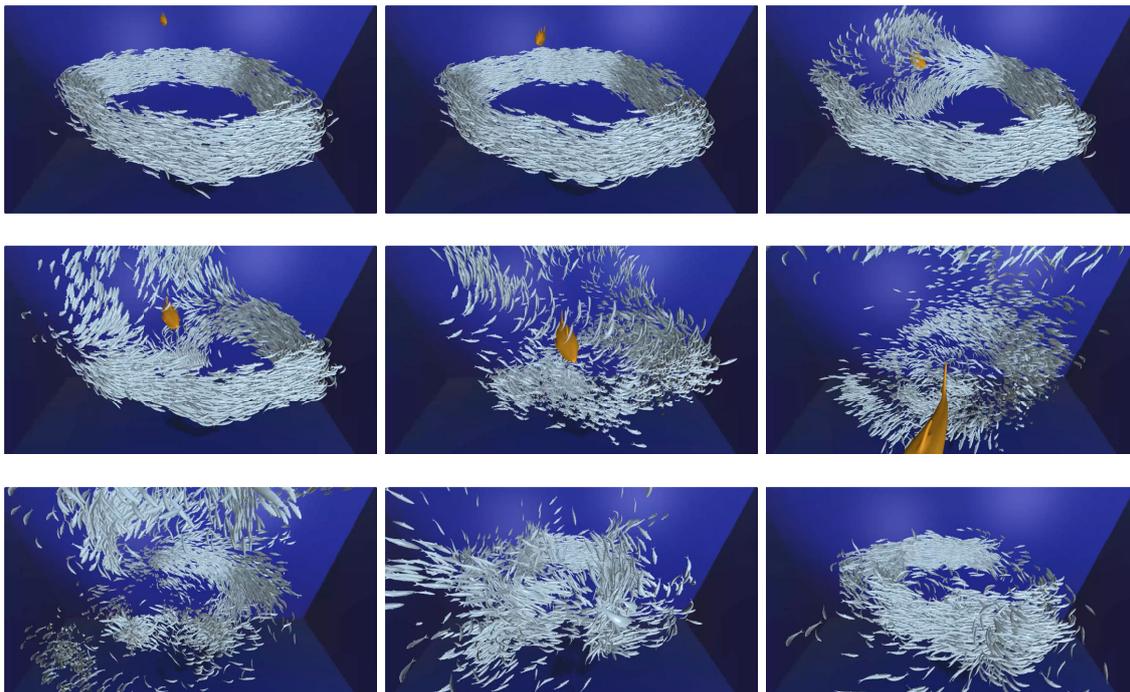
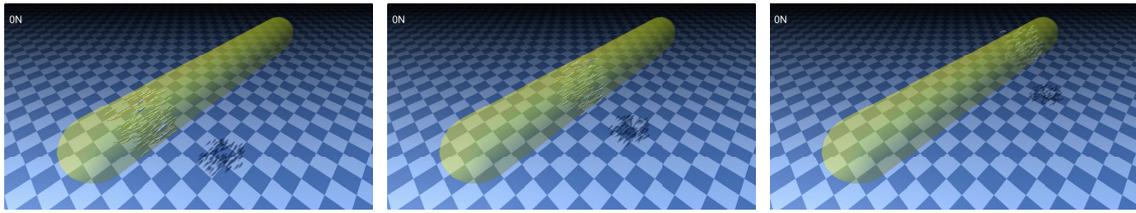
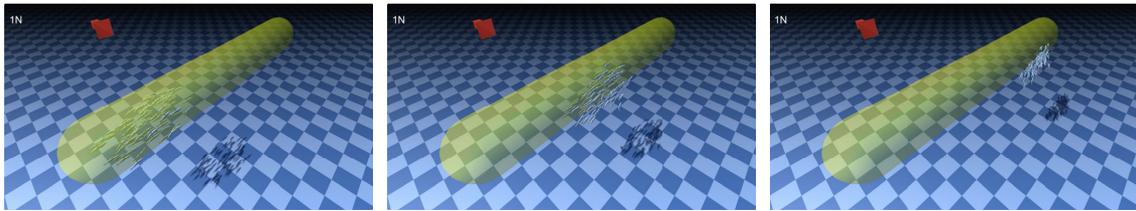


図 6.20: トーラス型に泳ぐ 4,000 匹のマイワシの魚群に捕食者のマグロが突っ込む。マイワシは逃避行動を行い、魚群は一旦散り散りになるが、マグロが去っていくと元のチューブコースに再結集する。

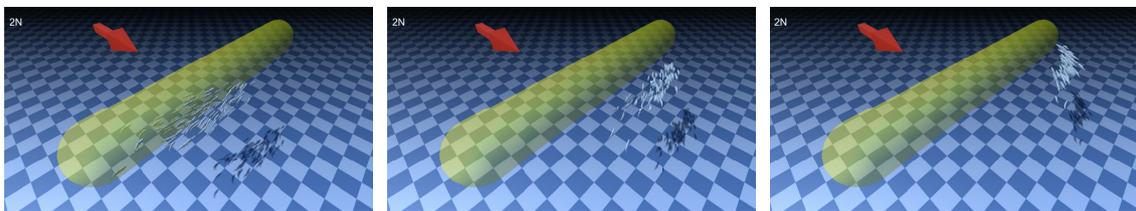
とによってリアルな CG アニメーションを生成できる。



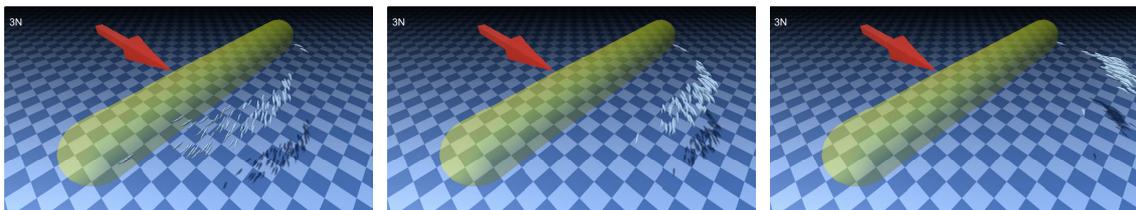
(a) 外力が 0N の場合



(b) 外力が 1N の場合



(c) 外力が 2N の場合



(d) 外力が 3N の場合

図 6.21: 水流のような外力に対するロバスト性の比較。赤い矢印は外力のベクトルを示している。外力が大きくなるにつれて、仮想魚はターゲットへ辿り着けなくなり、チューブコースの外へ流されてしまう。

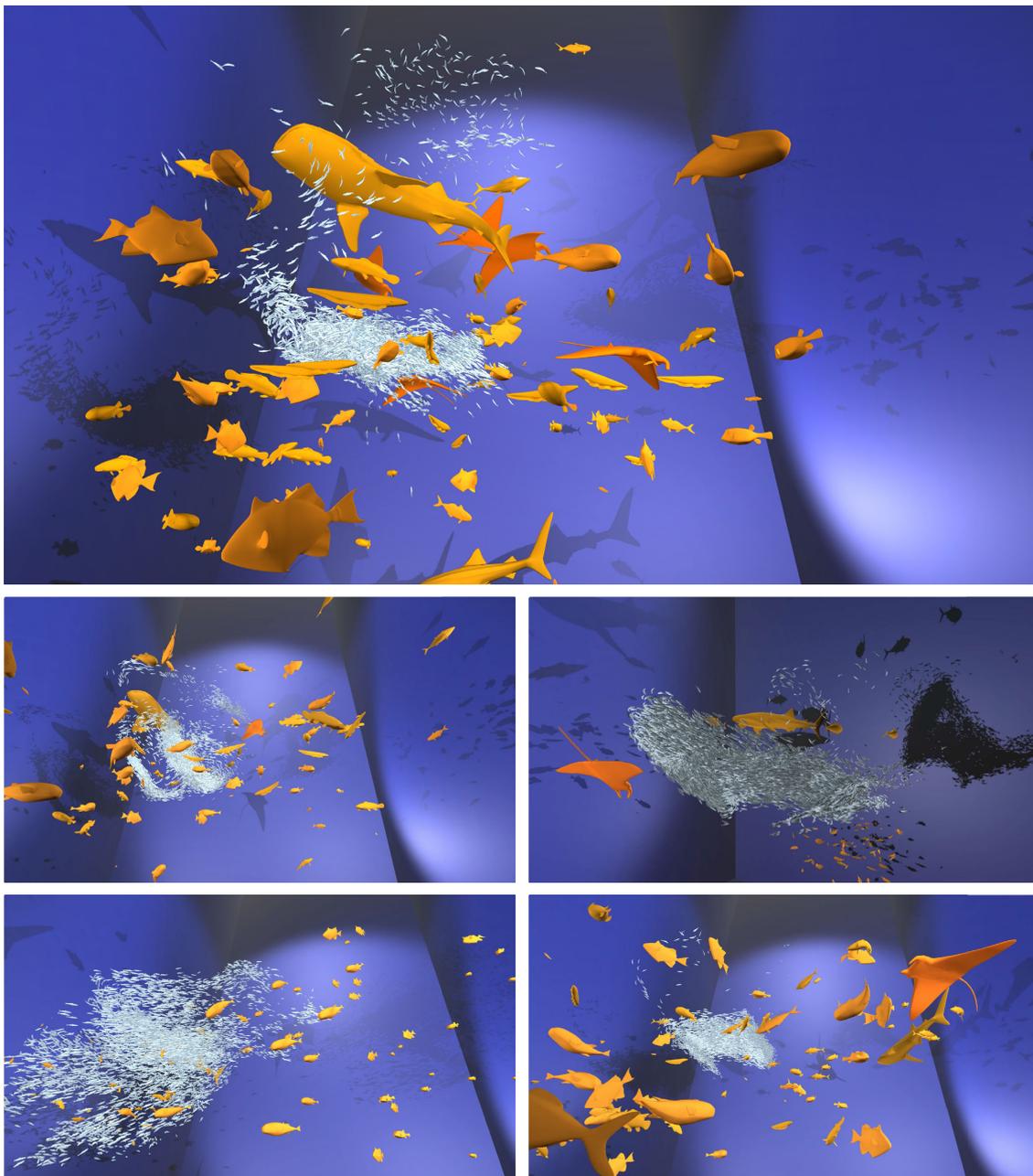


図 6.22: 12 種類の魚種や 8,000 匹の魚群を同時にシミュレーションした水中シーン

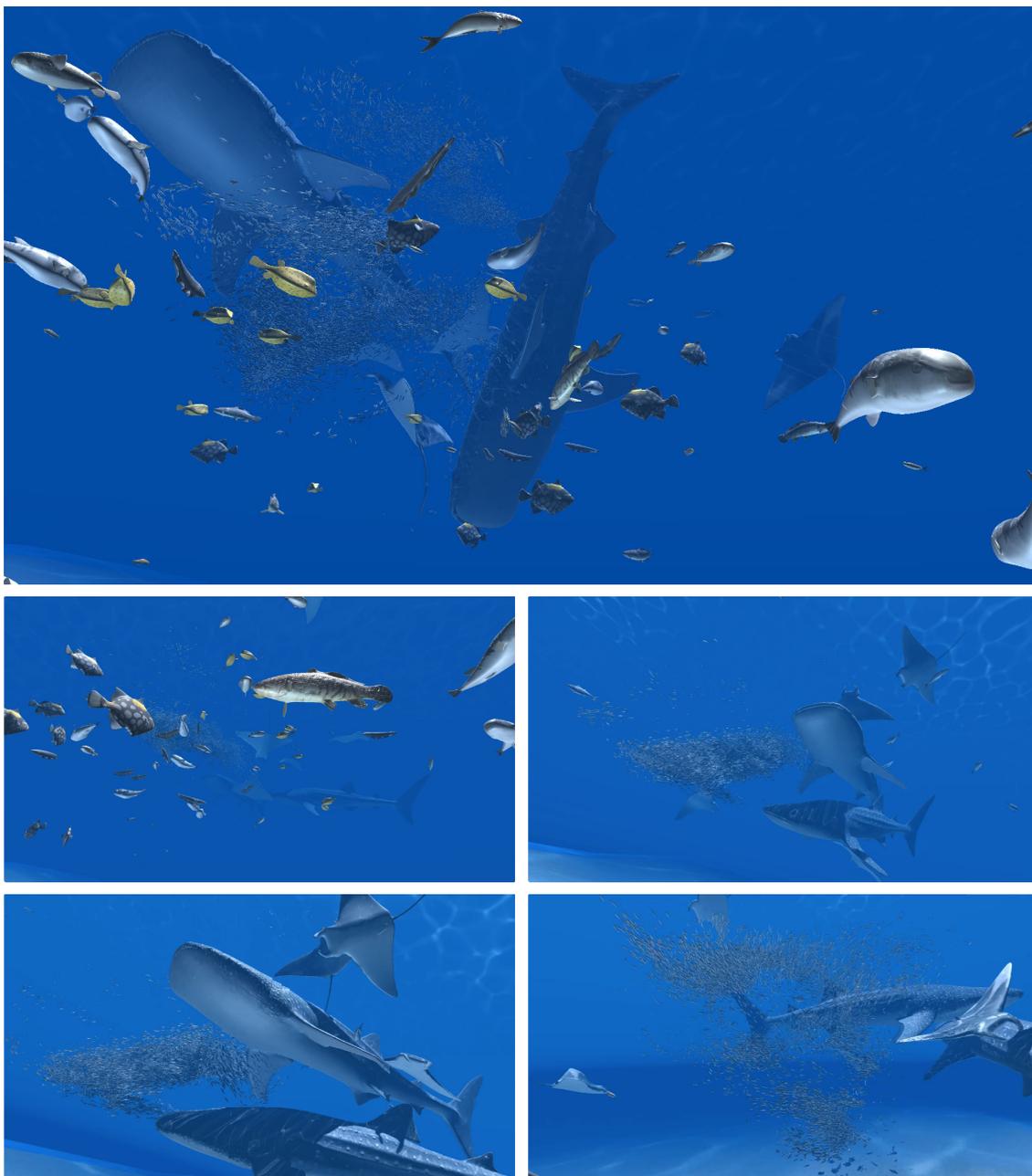


図 6.23: テクスチャを付けた CG モデルを用いて、12 種類の魚種や 12,000 匹の魚群を同時にシミュレーションした水中シーン

表 6.3: 準アジ型の魚群をトーラス状に泳がせたシーンにおける提案手法の 1 フレームの実行時間

魚群の個体数	実行時間 [ms] (割合)		
	群集シミュレーション	モーションプランニング、運動制御	骨格制御
100	10.37 (85.3%)	0.68 (5.6%)	1.11 (9.1%)
200	26.54 (89.2%)	1.14 (3.8%)	2.09 (7.0%)
300	39.73 (88.9%)	1.83 (4.1%)	3.13 (7.0%)
400	52.78 (89.1%)	2.33 (3.9%)	4.10 (6.9%)
500	84.87 (91.3%)	2.84 (3.1%)	5.21 (5.6%)
1,000	237.34 (93.8%)	4.89 (1.9%)	10.84 (4.3%)
5,000	1250.43 (93.6%)	30.45 (2.3%)	54.47 (4.1%)
10,000	2852.71 (94.4%)	61.09 (2.0%)	108.28 (3.6%)

6.3 性能評価

準アジ型（マイワシ）の魚群を図 6.17 と同じくトーラス型に泳がせたときに、提案手法の仮想魚が MU を更新するフレームにおける実行時間を処理の内容ごとに計測した結果を表 6.3 に示す。実行には 3.40GHz で動作する CPU を搭載したデスクトップ PC を使用した。

このように、提案手法においては群集シミュレーションが計算コストの大半を占めており、個体数の増加に伴ってその割合はさらに増加する。モーションプランニング（MU の更新）や運動制御、骨格制御は個体ごとに独立した処理であるため $O(n)$ であるが、群集シミュレーションには $k-d$ tree を使用した最近傍探索が含まれるため、全個体で最近傍探索を行う処理の計算量は $O(n \log n)$ となる [19] ためである。

MU を更新しないフレームにおいては、群集シミュレーションの処理が入らないため実行時間は著しく減少する。これにより、提案手法は 500 匹程度までであればリアルタイムに動作するが、200~300 匹以上の環境ではフレームレートの低下が目立ってくる。非リアルタイムであれば、これまで示してきた結果の通り、10,000 匹以上の規模の魚群をシミュレーションできる。リアルタイム動作が可能な個体数の上限を増やすには、群集シミュレーションの更新処理を個体ごとに非同期にする改良が必要であると考えられる。

6.4 インタラクティブアプリケーションへの応用

提案手法はリアルタイムで動作するため、ゲームのようなインタラクティブなアプリケーションにも組み込むことができる。本節では、インタラクティブアプリケーションの簡単な

例として、図 6.24 に示す「Magic Aquarium」を開発した。このアプリケーションでは、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する。スクリーンに投影された魚群は不可視のチューブコースに追従しており、ユーザの手の位置をチューブコースのスクリーン上の位置へ常に反映させる。これにより、ユーザは手を動かすことで魚群を操るような体験ができる。



図 6.24: インタラクティブアプリケーションの事例。3D カメラに対してジェスチャ操作をすることで、魚群をリアルタイムにコントロールできる。

第7章 結論と今後の展望

7.1 結論

本稿では、魚類における泳ぎ方の多様なバリエーションを統一的に生成する手法を提案した。提案手法では、どこへどのように泳ぐかを瞬時に意思決定する仕組みが、さまざまな魚類の遊泳行動に共通の仕組みであると考え。この共通の仕組みをモデル化した統一的モーションプランナーを用いることで、実際の水中シーンでよく見られる、骨格の違いによる泳法のバリエーションや状況変化による泳法のバリエーションを再現することに成功した。提案手法は、既存のグラフィックスパイプラインに組み込みやすく、パラメータを調整することで動きの特徴を容易に変えることができ、さらに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ことを示した。

魚の遊泳モーション生成に関する従来手法 [20][73][78] では、キャラクタと水中環境の物理的なインタラクション（低レベルな制御）や抽象的な認知機能（高レベルな制御）にフォーカスしたモデル化を行うことでリアルな遊泳アニメーションを実現している。一方で本研究では、魚類における「泳ぐ」という単一のタスクに対して、骨格の動かし方に多様なバリエーションが存在する点に着目した、中間的なレベルの制御手法を提案している。まず行き先を決め、次に泳ぎ方を決めるというモーションプランニングの手順を共通のモデルにすることで、移動や骨格の制御については非常にシンプルな手法を用いているにもかかわらず、多種の魚型キャラクタをリアルにアニメーションさせることができた。

また本研究では、魚類においては、遊泳という単一の行動に対して、群集行動や逃避行動などの高レベルな行動と筋肉などの生理的特性が同時に影響を与えていると考える。そこで提案手法では、遊泳へのさまざまな影響を、短期的な移動目標を選択する確率分布への操作として扱う。これにより、例えば「群れを維持しつつできる限り速く逃げ、しかし非現実的な加速は行わない」というような、ダイナミックに変化する複数の制約条件を同時に満たした遊泳アニメーションを実現できた。仮想魚は制約条件を満たす範囲内ではランダムに動くため、多くの仮想魚が同時に泳いでいるシーンにおいて、動きの自然なばらつきを表現できる。

7.2 今後の展望

しかしながら、提案手法にはいくつかの限界も存在する。提案手法では、魚のどの部位がどのように動くかはCGモデルのスケルトンやスキニングに依存する。例えば、アジ型やマグロ型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、部分骨格モデルや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、提案手法の仮想魚は、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。提案手法と連動して、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。

本稿ではLindseyによる12種類のSwimming modes[46]をもとにシミュレーションする魚種を選んだが、魚類の姿形、特にひれの構成にはまだまだ驚くほど多くのバリエーションがある。例えば、エンゼルフィッシュや金魚、ベタ(闘魚)、コンゴテトラといった魚はとて大きなひれを持っており、遊泳に伴って布のように美しくゆらめいて見える。現在は、このような複雑なひれをアニメーションさせるのは難しいが、ひれに対するリギングやスキニングが自動的に行われる手法を加えることで、これらの魚種を容易かつリアルタイムに本物らしく動かすことができると考えられる。

また本手法では、群集行動、回避行動および逃避行動の3つを行動ルーチンに組み込んでいく。しかし、実際の魚は海洋環境とのインタラクションを行い、なわばりに基づく個体間の攻撃行動や捕食行動などを行っている。このような行動は行動ルーチンを拡張することで実現できると考えられる。さらに、魚の行動に影響を与える海洋環境の要素、例えば地形や海流、水温の変化などをモデリングし、提案手法と組み合わせることで、サンゴ礁のような特定の海域を自律的にシミュレーションできると考えられる。

研究業績

査読付雑誌論文

1. Daiki Satoi, 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).
2. 里井大輝, 中墓久和巨, 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).
3. 里井大輝, 中墓久和巨, 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).

査読付国際会議論文

1. Junichi Hoshino, Takeru Umemura, Sachi Urano, Daiki Satoi: SONAR: Communication System for Supporting Information Gathering and Social Interaction in a Niche Market, 13th International Conference on Entertainment Computing (ICEC 2014), Springer LNCS 8770, pp.181-188, Sydney, Australia, October 1–3 (2014).
2. Daiki Satoi, Hisanao Nakadai, Matteo Bernacchia, Junichi Hoshino: Life-Like Animation System of Virtual Firefly Based on Animacy Perception, 12th International Conference on Entertainment Computing (ICEC 2013), Springer LNCS 8215, pp.138-144, São Paulo, Brazil, October 16–18 (2013).
3. Tetsuya Saito, Sachi Urano, Daiki Satoi, Junichi Hoshino: The Entertainment Display Providing Healing and Enjoyment for People in the Public Space, NICOGRAPH International

2012, Indonesia, July 2–3 (2012).

4. Tetsuya Saito, Sachi Urano, Daiki Satoi, Junichi Hoshino: Development of an Shadowgraph System for Activating Public Spaces, NICOGRAPH International 2012, Indonesia, July 2–3 (2012).

報告

1. 萩原幹大, 里井大輝, 星野准一: 形状に適した魚類の遊泳モーション生成のための仮想骨格モデル, 第 13 回情報科学技術フォーラム (FIT2014), I-002, 筑波大学, September 3–5 (2014).
2. 里井大輝, 中基久和巨, 星野准一: 形状と泳法の対応関係に基づく多様な魚類の遊泳モーション生成法, 映像表現・芸術科学フォーラム 2014, Article No.14, 早稲田国際会議場, March 17 (2014).
3. 牟田将史, 石川優, 里井大輝, 星野准一: i 文鎮: 書くことを楽しくする文鎮, 情報処理学会 第 31 回 EC 研究会, Vol.2014-GN-91, No.60, 明治大学中野キャンパス, March 13–15 (2014).
4. 林勇希, 里井大輝, 今澄亮太, 星野准一: 上肢の動きを認識するゲームコントローラによる動作解析, 電子情報通信学会 第 72 回福祉情報工学研究会, 筑波技術大学春日キャンパス, March 7–8 (2014).
5. 里井大輝, 中基久和巨, 星野准一: 2 段階確率モデルに基づく仮想ホタルの生命的モーション生成法, 映像情報メディア学会 2013 年冬季大会, 1-3, 芝浦工業大学豊洲キャンパス, December 18–19 (2013).
6. 里井大輝, 中基久和巨, 星野准一: 2 段階確率モデルに基づく生命的ゲームキャラクタの動作生成, CESA デベロッパーズカンファレンス 2013 (CEDEC 2013), インタラクティブセッション, パシフィコ横浜, August 21–23 (2013).
7. 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生命的アニメーションシステム, 情報処理学会 第 150 回グラフィクスと CAD 研究会, Vol.2013-GCAD-150, No.1, 東京大学柏キャンパス, February 18–19 (2013).

8. 里井大輝, 星野准一: わっとボトル: 運動と音声加工フィードバックによりストレスを解消するペットボトル型デバイス, 情報処理学会 第 24 回エンタテインメントコンピューティング研究会, Vol.2012-EC-24, No.1, 東京工業大学すずかけ台キャンパス, May 14–15 (2012).

招待講演

1. 里井大輝, 萩原幹大, 上元晃, 中臺久和巨, 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, June 18–19 (2016).

付録 A Swimming Form の定義の一覧

表 A.1 に、本稿で用いた Swimming form の定義の一覧を示す。ここでは、「Translate」の列で並進運動に対応した PSU の動作を、「Rotate」の列で回転運動に対応した PSU の動作を示す。最下行の C-start はすべての Swimming modes で共通の定義となっている。

定義の作成にあたっては、Lindsey[46] による Swimming modes の分類をベースに、著者らの目視による観察に基づき、より実際の魚の動きに近づけるための改良を行った。また、ハコフグ型の定義については [30] を、Labriform の定義については [4] をそれぞれ参考にした。

表 A.1: Swimming form の定義の一覧

Swimming Mode	Swimming Form	Translate	Rotate
ウナギ型	Basic-Anguilliform	Undulate Body-PSU	Bow-like bend Body-PSU
準アジ型	Basic-Subcarangiform	Undulate Body-PSU	Bow-like bend Body-PSU
アジ型	Basic-Carangiform	Undulate Body-PSU	Bow-like bend Body-PSU
マグロ型	Basic-Thunniform	Undulate Body-PSU	Bow-like bend Body-PSU
ハコフグ型	Ostraciiform-Rest	Oscillate Plate-PSU (Pectoral Fin) Oscillate Plate-PSU (Anal Fin)	Bias oscillate speed of Plate-PSU (Pectoral Fin) Bow-like bend Body-PSU Bend Plate-PSU (Anal Fin) Bend Plate-PSU (Dorsal Fin)
	Ostraciiform-Slow	Oscillate Plate-PSU (Pectoral Fin) Oscillate Plate-PSU (Anal Fin) Oscillate Plate-PSU (Dorsal Fin)	Bias oscillate speed of Plate-PSU (Pectoral Fin) Bow-like bend Body-PSU Bend Plate-PSU (Anal Fin) Bend Plate-PSU (Dorsal Fin)
	Ostraciiform-Fast	Oscillate Plate-PSU (Pectoral Fin) Oscillate Plate-PSU (Anal Fin) Oscillate Plate-PSU (Dorsal Fin) Oscillate Body-PSU	Bias oscillate speed of Plate-PSU (Pectoral Fin) Bow-like bend Body-PSU Bend Plate-PSU (Anal Fin) Bend Plate-PSU (Dorsal Fin)
アマア型	Basic-Amiiform	Oscillate Body-PSU Oscillate Plate-PSU (Pectoral Fin) Undulate Ribbon-PSU (Dorsal Fin)	Bias oscillate speed of Plate-PSU (Pectoral Fin) Bow-like bend Body-PSU
ナギナタナマズ型	Basic-Gymnotiform	Oscillate Plate-PSU (Pectoral Fin) Undulate Ribbon-PSU (Anal Fin)	Bias oscillate speed of Plate-PSU (Pectoral Fin) Bow-like bend Body-PSU
カワハギ型	Basic-Balistiform	Oscillate Plate-PSU (Pectoral Fin) Undulate Ribbon-PSU (Dorsal Fin) Undulate Ribbon-PSU (Anal Fin)	Bias oscillate speed of Plate-PSU (Pectoral Fin) Bow-like bend Body-PSU
フグ型	Basic-Tetraodontiform	Oscillate Plate-PSU (Pectoral Fin) Oscillate Plate-PSU (Anal Fin) Oscillate Plate-PSU (Dorsal Fin) Oscillate Body-PSU	Bias oscillate speed of Plate-PSU (Pectoral Fin) Bow-like bend Body-PSU Bend Plate-PSU (Anal Fin) Bend Plate-PSU (Dorsal Fin)
エイ型	Basic-Rajiform	Oscillate Disk-PSU	Bow-like bend Body-PSU Tilt Body-PSU
	Glide	No motion	No motion
ハリセンボン型	Basic-Diodontiform	Oscillate Plate-PSU (Pectoral Fin) Undulate Ribbon-PSU (Pectoral Fin) Oscillate Plate-PSU (Anal Fin) Undulate Ribbon-PSU (Anal Fin) Oscillate Plate-PSU (Dorsal Fin) Undulate Ribbon-PSU (Dorsal Fin) Oscillate Body-PSU Undulate Ribbon-PSU (Caudal Fin)	Bias oscillate speed of Plate-PSU (Pectoral Fin) Bow-like bend Body-PSU Bend Plate-PSU (Anal Fin) Bend Plate-PSU (Dorsal Fin)
ベラ型	Basic-Labriiform	Oscillate Plate-PSU (Pectoral Fin)	Bias oscillate speed of Plate-PSU (Pectoral Fin) Bow-like bend Body-PSU
	Subcarangiform	Undulate Body-PSU	Bow-like bend Body-PSU
(共通)	C-start	Undulate Body-PSU slightly	Bow-like bend Body-PSU strongly

付録 B Swimming Form の選択ルールの一覧

表 B.1 に、本稿で用いた Swimming form の選択ルールの一覧を示す。ここで、B-Angf. は Basic-Anguilliform を、Ostf. は Ostraciiform を、B-Rajf. は Basic-Rajiform を、B-Labf. は Basic-Labridform を、Subcf. は Subcarangiform をそれぞれ示す。表 B.1 に記載していない 8 つの Swimming modes については、ウナギ型と同様のルールで、基本となる Swimming form と C-start の 2 つを使い分ける。

$U_Q^t = [\text{Rest}]$ かつ $U_Q^{t+1} = [\text{Fast}]$ で、さらに仮想魚が逃避行動を行っている場合は、その仮想魚がどの Swimming mode であっても C-start を選択する。逃避行動を行っていない場合は、下段に記載した Swimming form を選択する。

表 B.1: Swimming form の選択ルールの一覧

U_Q^t ↓ U_Q^{t+1}	Rest ↓ Rest	Rest ↓ Slow	Rest ↓ Fast	Slow ↓ Rest	Slow ↓ Slow	Slow ↓ Fast	Fast ↓ Rest	Fast ↓ Slow	Fast ↓ Fast
ウナギ型	B-Angf.	B-Angf.	C-start /B-Angf.	B-Angf.	B-Angf.	B-Angf.	B-Angf.	B-Angf.	B-Angf.
ハコフグ型	Ostf.-Rest	Ostf.-Slow	C-start /Ostf.-Fast	Ostf.-Rest	Ostf.-Slow	Ostf.-Fast	Ostf.-Rest	Ostf.-Slow	Ostf.-Fast
エイ型	B-Rajf. /Glide	B-Rajf. /Glide	C-start /B-Rajf.	B-Rajf. /Glide	B-Rajf. /Glide	B-Rajf.	B-Rajf. /Glide	B-Rajf. /Glide	B-Rajf.
ベラ型	B-Labf.	B-Labf.	C-start /Subcf.	B-Labf.	B-Labf.	Subcf.	B-Labf.	B-Labf.	Subcf.

謝辞

本論文は、筆者が筑波大学大学院システム情報工学研究科知能機能システム専攻博士後期課程に在籍中の研究成果をまとめたものです。筑波大学システム情報系の星野准一准教授には、博士後期課程を含む5年間以上の期間に渡り、指導教員として多大なご指導とご支援を賜りました。ここに心から感謝の意を表します。

筑波大学エンタテインメントコンピューティング研究室の皆様や友人の皆様には、大学院生活と私生活の両面に渡り大変お世話になりました。特に、萩原幹大氏、上元晃氏、中臺久和巨氏には、本研究を遂行するにあたり、共同研究者として多大なご尽力をいただきました。深く感謝いたします。

本研究の提案手法を開発するにあたり、平林匡人氏、株式会社 STUDIO4°C の秋本賢一郎氏、天田直也氏には、アニメーション制作者・開発者としての貴重なご意見やご助言を数多くいただきました。インテル株式会社の中村正澄氏、秋庭正之氏、久保寺陽子氏、都築えりか氏、太田仁彦氏には、インタラクティブアプリケーションの実装やデモ展示に関して多大なご協力をいただきました。筑波大学下田臨海実験センターの稲葉一男教授には、魚類の生態や動きに関して、大変示唆に富んだご意見を頂戴いたしました。心から御礼申し上げます。

本学の宇津呂武仁教授、三谷純教授、延原肇准教授、大澤義隆助教には、本論文の審査をしていただき、多くの貴重なご指摘やアドバイスをいただきました。深く感謝いたします。

研究活動費については、公益財団法人 中山隼雄科学技術文化財団の研究助成事業（課題番号 H26-A1-98）および JSPS 科研費（課題番号 15K12178）のご支援をいただきました。

最後になりますが、博士課程への進学に理解を示してくださり、大学院生活への温かい支援と激励をいただいた家族に心から感謝いたします。

参考文献

- [1] Agrawal, S. and van de Panne, M.: Task-based Locomotion, *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 35, No. 4 (2016).
- [2] Aoi, S. and Tsuchiya, K.: Locomotion Control of a Biped Robot Using Nonlinear Oscillators, *Autonomous Robots*, Vol. 19, No. 3, pp. 219–232 (2005).
- [3] Aoi, S. and Tsuchiya, K.: Stability Analysis of a Simple Walking Model Driven by an Oscillator with a Phase Reset Using Sensory Feedback, *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 22, No. 2, pp. 391–397 (2006).
- [4] Archer, S. and Johnston, I.: Kinematics of Labriform and Subcarangiform Swimming in the Antarctic Fish, *Journal of Experimental Biology*, Vol. 210, No. 143, pp. 195–210 (1989).
- [5] Arikian, O., Forsyth, D. A. and O’Brien, J. F.: Motion Synthesis from Annotations, *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 22, No. 3 (2003).
- [6] Bai, Y., Siu, K. and Liu, C. K.: Synthesis of Concurrent Object Manipulation Tasks, *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 31, No. 6 (2012).
- [7] Bentley, J. L.: Multidimensional Binary Search Trees Used for Associative Searching, *Communications of the ACM*, Vol. 18, No. 9, pp. 509–517 (1975).
- [8] Blake, R. W.: Fish Functional Design and Swimming Performance, *Journal of Fish Biology*, Vol. 65, No. 5, pp. 1193–1222 (2004).
- [9] Blaxter, J.: Swimming Speeds of Fish, *Proceedings of the Conference on Fish Behaviour in Relation to Fishing Techniques and Tactics*, pp. 69–100 (1967).
- [10] Bone, Q., Kiceniuk, J. and Jones, D.: On the Role of the Different Fibre Types in Fish Myotomes at Intermediate Swimming Speeds, *Fishery Bulletin*, Vol. 76, pp. 691–699 (1978).
- [11] Box, G. E. P. and Muller, M. E.: A Note on the Generation of Random Normal Deviates, *The Annals of Mathematical Statistics*, Vol. 29, No. 2, pp. 610–611 (1958).
- [12] Chai, J. and Hodgins, J. K.: Constraint-based Motion Optimization Using a Statistical

- Dynamic Model, *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 26, No. 3 (2007).
- [13] Coros, S., Karpathy, A., Jones, B., Reveret, L. and van de Panne, M.: Locomotion Skills for Simulated Quadrupeds, *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 30, No. 4 (2011).
- [14] Couzin, I. D., Krause, J., James, R., Ruxton, G. D. and Franks, N. R.: Collective Memory and Spatial Sorting in Animal Groups., *Journal of Theoretical Biology*, Vol. 218, No. 1, pp. 1–11 (2002).
- [15] Cruz Ruiz, A. L., Pontonnier, C., Pronost, N. and Dumont, G.: Muscle-Based Control for Character Animation, *Computer Graphics Forum* (2016).
- [16] Domenici, P. and Blake, R. W.: The Kinematics and Performance of Fish Fast-start Swimming, *Journal of Experimental Biology*, Vol. 200, pp. 1165–1178 (1997).
- [17] Endo, G., Nakanishi, J., Morimoto, J. and Cheng, G.: Experimental Study of a Neural Oscillator for Biped Locomotion using QRIO, *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation '05*, pp. 598–604 (2005).
- [18] Friedlander, A. M. and Parrish, J. D.: Temporal Dynamics of Fish Communities on an Exposed Shoreline in Hawaii, *Environmental Biology of Fishes*, Vol. 53, No. 1, pp. 1–18 (1997).
- [19] Friedman, J. H., Bentley, J. L. and Finkel, R. A.: An Algorithm for Finding Best Matches in Logarithmic Expected Time, *ACM Transactions on Mathematical Software*, Vol. 3, No. 3, pp. 209–226 (1977).
- [20] Funge, J., Tu, X. and Terzopoulos, D.: Cognitive Modeling: Knowledge, Reasoning and Planning for Intelligent Characters, *Proceedings of the 26th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH '99)*, pp. 29–38 (1999).
- [21] Gaesser, G. A. and Brooks, G. A.: Metabolic Bases of Excess Post-exercise Oxygen Consumption: A Review, *Medicine and Science in Sports and Exercise*, Vol. 16, No. 1, pp. 29–43 (1984).
- [22] Geijtenbeek, T. and Pronost, N.: Interactive Character Animation Using Simulated Physics: A State-of-the-art Review, *Computer Graphics Forum*, Vol. 31, No. 8, pp. 2492–2515 (2012).
- [23] Grzeszczuk, R. and Terzopoulos, D.: Automated Learning of Muscle-actuated Locomotion Through Control Abstraction, *Proceedings of the 22nd Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH '95)*, pp. 63–70 (1995).
- [24] Gunji, Y. P., Kusunoki, Y., Kitabayashi, N., Mochizuki, T., Ishikawa, M. and Watanabe, T.:

- Dual Interaction Producing Both Territorial and Schooling Behavior in Fish, *BioSystems*, Vol. 50, No. 1, pp. 27–47 (1999).
- [25] Ha, S. and Liu, C. K.: Iterative Training of Dynamic Skills Inspired by Human Coaching Techniques, *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 34, No. 1 (2014).
- [26] Hase, K., Miyashita, K., Ok, S. and Arakawa, Y.: Human Gait Simulation with a Neuromusculoskeletal Model and Evolutionary Computation, *Journal of Visualization and Computer Animation*, Vol. 14, No. 2, pp. 73–92 (2003).
- [27] Hecker, C., Raabe, B., Enslow, R. W., DeWeese, J., Maynard, J. and van Prooijen, K.: Real-time Motion Retargeting to Highly Varied User-created Morphologies, *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 27, No. 3 (2008).
- [28] Holden, D., Saito, J. and Komura, T.: A Deep Learning Framework for Character Motion Synthesis and Editing, *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 35, No. 4 (2016).
- [29] Hooper, S. L.: Central Pattern Generators, *Encyclopedia of Life Sciences*, Wiley (2001).
- [30] Hove, J. R., O’Bryan, L. M., Gordon, M. S., Webb, P. W. and Weihs, D.: Boxfishes (Teleostei: Ostraciidae) as a Model System for Fishes Swimming with Many Fins: Kinematics, *Journal of Experimental Biology*, Vol. 204, pp. 1459–1471 (2001).
- [31] Huang, Y., Mahmudi, M. and Kallmann, M.: Planning Humanlike Actions in Blending Spaces, *Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 2653–2659 (2011).
- [32] Hudson, R. C.: On the Function of the White Muscles in Teleosts at Intermediate Swimming Speeds, *Journal of Experimental Biology*, Vol. 58, pp. 509–522 (1973).
- [33] Ijspeert, A. J.: Central Pattern Generators for Locomotion Control in Animals and Robots: A Review, *Neural Networks*, Vol. 21, No. 4, pp. 642–653 (2008).
- [34] Ju, E., Won, J., Lee, J., Choi, B., Noh, J. and Choi, M. G.: Data-driven Control of Flapping Flight, *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 32, No. 212 (2013).
- [35] Kallmann, M. and Kapadia, M.: Navigation Meshes and Real-time Dynamic Planning for Virtual Worlds, *ACM SIGGRAPH 2014 Courses* (2014).
- [36] Kallmann, M. and Kapadia, M.: *Geometric and Discrete Path Planning for Interactive Virtual Worlds*, Morgan & Claypool Publishers (2016).
- [37] Kapadia, M., Beacco, A., Garcia, F., Reddy, V., Pelechano, N. and Badler, N. I.: Multi-domain Real-time Planning in Dynamic Environments, *Proceedings of the 12th ACM SIG-*

- GRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation (SCA '13)*, pp. 115–124 (2013).
- [38] Korn, H. and Faber, D. S.: The Mauthner Cell Half a Century Later: A Neurobiological Model for Decision-making?, *Neuron*, Vol. 47, No. 1, pp. 13–28 (2005).
- [39] Kovar, L. and Gleicher, M.: Automated Extraction and Parameterization of Motions in Large Data Sets, *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 23, No. 3 (2004).
- [40] Krupczynski, P. and Schuster, S.: Report Fruit-catching Fish Tune Their Fast Starts to Compensate for Drift, *Current Biology*, Vol. 18, No. 24, pp. 1961–1965 (2008).
- [41] Kry, P. G., Reveret, L., Faure, F. and Cani, M. P.: Modal Locomotion: Animating Virtual Characters with Natural Vibrations, *Computer Graphics Forum*, Vol. 28, No. 2, pp. 289–298 (2009).
- [42] Kwatra, N., Wojtan, C., Carlson, M., Essa, I. a., Mucha, P. J. and Turk, G.: Fluid Simulation with Articulated Bodies, *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 16, No. 1, pp. 70–80 (2010).
- [43] Lau, M., Bar-Joseph, Z. and Kuffner, J.: Modeling Spatial and Temporal Variation in Motion Data, *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 28, No. 5 (2009).
- [44] Lentine, M., Grétarsson, J. T., Schroeder, C., Robinson-Mosher, A. and Fedkiw, R.: Creature Control in a Fluid Environment, *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 17, No. 5, pp. 682–693 (2011).
- [45] Lighthill, M.: Large-amplitude Elongated-body Theory of Fish Locomotion, *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, Vol. 179, No. 1055, pp. 125–138 (1971).
- [46] Lindsey, C.: Form, Function, and Locomotory Habits in Fish, *Fish Physiology* (Hoar, W. and Randall, D., eds.), Academic Press, New York, NY, United States, chapter 1, pp. 1–100 (1978).
- [47] Liu, L., van de Panne, M. and Yin, K.: Guided Learning of Control Graphs for Physics-Based Characters, *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 35, No. 3 (2016).
- [48] Lv, X., Chai, J. and Xia, S.: Data-driven Inverse Dynamics for Human Motion, *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 35, No. 6 (2016).
- [49] Magnuson, J. J.: Locomotion by Scombrid Fishes, *Fish Physiology* (Hoar, W. and Randall, D., eds.), Academic Press, New York, NY, United States, chapter 4, pp. 239–314 (1978).
- [50] Masehian, E. and Sedighzadeh, D.: Classic and Heuristic Approaches in Robot Motion Planning – A Chronological Review, *World Academy of Science, Engineering and Technol-*

- ogy, Vol. 1, No. 5, pp. 101–106 (2007).
- [51] Masuda, R.: Seasonal and Interannual Variation of Subtidal Fish Assemblages in Wakasa Bay with Reference to the Warming Trend in the Sea of Japan, *Environmental Biology of Fishes*, Vol. 82, No. 4, pp. 387–399 (2008).
- [52] Min, J. and Chai, J.: Motion Graphs++: a Compact Generative Model for Semantic Motion Analysis and Synthesis, *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 31, No. 6 (2012).
- [53] Nava, M.: ABZÛ [PlayStation 4, Xbox One, Microsoft Windows], *Italy: 505 Games* (2016).
- [54] Nelson, J. S.: *Fishes of the World*, Wiley, Hoboken, NJ, United States, 4th edition (2006).
- [55] Nguyen, L. T. H., Tážá, V. T. and Yagi, A.: Obstacle Avoiding Patterns and Cohesiveness of Fish School, *Journal of Theoretical Biology*, Vol. 406, pp. 116–123 (2016).
- [56] Oboshi, T., Kato, S., Mutoh, A. and Itoh, H.: Collective or Scattering: Evolving Schooling Behaviors to Escape from Predator, *Artificial Life VIII*, pp. 386–389 (2002).
- [57] Peng, X. B., Berseth, G. and van de Panne, M.: Dynamic Terrain Traversal Skills Using Reinforcement Learning, *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 34, No. 4 (2015).
- [58] Peng, X. B., Berseth, G. and van de Panne, M.: Terrain-Adaptive Locomotion Skills Using Deep Reinforcement Learning, *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 35, No. 4 (2016).
- [59] Rayner, M. and Keenan, M.: Role of Red and White Muscles in the Swimming of the Skipjack Tuna, *Nature*, Vol. 214, pp. 392–393 (1967).
- [60] Reynolds, C. W.: Flocks, Herds and Schools: A Distributed Behavioral Model, *Computer Graphics*, Vol. 21, No. 4, pp. 25–34 (1987).
- [61] Rhodin, H., Tompkin, J., Kim, K. I., Aguiar, E. D., Pfister, H., Seidel, H.-p. and Theobalt, C.: Generalizing Wave Gestures from Sparse Examples for Real-time Character Control, *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 34, No. 6 (2015).
- [62] Schlegel, T. and Schuster, S.: Small Circuits for Large Tasks: High-speed Decision-making in Archerfish, *Science*, Vol. 319, pp. 104–106 (2008).
- [63] Schriefer, J. E. and Hale, M. E.: Strikes and Startles of Northern Pike (*Esox lucius*): A Comparison of Muscle Activity and Kinematics Between S-start Behaviors, *Journal of Experimental Biology*, Vol. 207, No. 3, pp. 535–544 (2004).
- [64] Schuster, S.: Big Decisions by Small Networks., *BioEssays*, Vol. 32, No. 8, pp. 727–735 (2010).
- [65] Schuster, S.: Fast-starts in Hunting Fish: Decision-making in Small Networks of Identified

- Neurons, *Current Opinion in Neurobiology*, Vol. 22, No. 2, pp. 279–284 (2012).
- [66] Sfakiotakis, M., Lane, D. M. and Davies, J. B. C.: Review of Fish Swimming Modes for Aquatic Locomotion, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, Vol. 24, No. 2, pp. 237–252 (1999).
- [67] Si, W., Lee, S.-h. and Terzopoulos, D.: Realistic Biomechanical Simulation and Control of Human Swimming, *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 34, No. 1 (2014).
- [68] Sims, K.: Evolving Virtual Creatures, *Proceedings of the 21st Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH '94)*, pp. 15–22 (1994).
- [69] Stanton, A. and MacLane, A.: Finding Dory [motion picture], *United States: Walt Disney Pictures* (2016).
- [70] Stanton, A. and Unkrich, L.: Finding Nemo [motion picture], *United States: Walt Disney Pictures* (2003).
- [71] Taga, G., Yamaguchi, Y. and Shimizu, H.: Self-organized Control of Bipedal Locomotion by Neural Oscillators in Unpredictable Environment, *Biological Cybernetics*, Vol. 65, No. 3, pp. 147–159 (1991).
- [72] Taga, G.: A Model of the Neuro-musculo-skeletal System for Anticipatory Adjustment of Human Locomotion During Obstacle Avoidance, *Biological Cybernetics*, Vol. 78, No. 1, pp. 9–17 (1998).
- [73] Tan, J., Gu, Y., Turk, G. and Liu, C. K.: Articulated Swimming Creatures, *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 30, No. 4 (2011).
- [74] Tan, J., Turk, G. and Liu, C. K.: Soft Body Locomotion, *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 31, No. 4 (2012).
- [75] Terzopoulos, D., Tu, X. and Grzeszczuk, R.: Artificial Fishes: Autonomous Locomotion, Perception, Behavior, and Learning in a Simulated Physical World, *Artificial Life*, Vol. 1, No. 4, pp. 327–351 (1994).
- [76] Tsukamoto, K.: Contribution of the Red and White Muscles to the Power Output Required for Swimming by the Yellowtail, *Bulletin of the Japanese Society of Scientific Fisheries*, Vol. 50, No. 12, pp. 2031–2042 (1984).
- [77] Tsukamoto, K.: The Role of the Red and White Muscles During Swimming of the Yellowtail, *Bulletin of the Japanese Society of Scientific Fisheries*, Vol. 50, No. 12, pp. 2025–2030 (1984).

- [78] Tu, X. and Terzopoulos, D.: Artificial Fishes: Physics, Locomotion, Perception, Behavior, *Proceedings of the 21st Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH '94)*, New York, NY, United States, ACM, pp. 43–50 (1994).
- [79] Vicsek, T., Czirók, 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).
- [80] Walker, J. A.: Does a Rigid Body Limit Maneuverability?, *Journal of Experimental Biology*, Vol. 203, No. 22, pp. 3391–3396 (2000).
- [81] Wampler, K. and Popović, Z.: Optimal Gait and Form for Animal Locomotion, *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 28, No. 3 (2009).
- [82] Wampler, K., Popović, Z. and Popović, J.: Generalizing Locomotion Style to New Animals with Inverse Optimal Regression, *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 33, No. 4 (2014).
- [83] Wang, H., Ho, E. S. L. and Komura, T.: An Energy-driven Motion Planning Method for Two Distant Postures, *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 21, No. 1, pp. 18–30 (2015).
- [84] Willy, A. and Low, K.: Development and Initial Experiment of Modular Undulating Fin for Untethered Biorobotic AUVs, *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, pp. 45–50 (2005).
- [85] Wohl, S. and Schuster, S.: The Predictive Start of Hunting Archer Fish: A Flexible and Precise Motor Pattern Performed with the Kinematics of an Escape C-start, *Journal of Experimental Biology*, Vol. 210, No. 2, pp. 311–324 (2007).
- [86] Wolinski, D., Lin, M. C. and Pettré, J.: WarpDriver: Context-Aware Probabilistic Motion Prediction for Crowd Simulation, *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 35, No. 6 (2016).
- [87] Wu, J.-c. and Popović, Z.: Realistic Modeling of Bird Flight Animations, *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 22, No. 3 (2003).
- [88] Xia, S., Wang, C., Chai, J. and Hodgins, J.: Realtime Style Transfer for Unlabeled Heterogeneous Human Motion, *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 34, No. 4 (2015).
- [89] Yamaguchi, Y.: Aquanaut’s Holiday: Hidden Memories [PlayStation 3], *Japan: Sony Computer Entertainment* (2008).
- [90] Yumer, M. E. and Mitra, N. J.: Spectral Style Transfer for Human Motion between Independent Actions, *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 35, No. 4 (2016).