



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	生物の回転運動解析のための頑健な画像パターン計測法に関する研究
Author(s)	松田, 朝陽
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(情報科学)
Dissertation Number	甲第14143号
Issue Date	2020-03-25
DOI	https://doi.org/10.14943/doctoral.k14143
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/78477
Type	doctoral thesis
File Information	Asahi_Matsuda.pdf



SSI-DT79175030

博士論文

生物の回転運動解析のための頑健な画像パターン計測法に関する研究

松田 朝陽

2020 年 3 月

北海道大学 大学院情報科学研究科
システム情報科学専攻

本論文は北海道大学大学院情報科学研究科に
博士 (情報科学) 授与の要件として提出した博士論文である。

松田 朝陽

審査委員： 主査 金子 俊一 教授
副査 田中 孝之 准教授
小野里 雅彦 教授

生物の回転運動解析のための頑健な画像パターン計測法に関する研究*

松田 朝陽

概要

生物の振る舞いや運動の原理を把握することは生物学，行動生態学の分野において大きな意味合いを有す．これらの解析に向けて，動画像データに基づく計測手法は一般的に広く用いられている．最もベーシックなものとして専門家による目視計測があり，また，計測のためのアプリケーションが用いられるケースもある．しかし，これらの計測方法はそれぞれ幾つかの課題を孕んでいる．目視計測では，計測者の計測ミスや各計測者によるバイアス，そして時間コストが課題となり，アプリケーションによる計測では金銭的なコストがかかる点が課題となる．ある生物を対象とした研究に従事することを考えた場合，計測ツールは限られた資金内で確保する必要があり，その生物に特化したデバイスやソフトウェア等を揃えることは難しい．すなわち，我々が一般的に入手可能でかつ必要十分な精度を備えた計測デバイスを用いて生物の挙動を計測することを想定したときに，十分な計測精度を満たすための計測手法を見出す必要がある．以上を踏まえ，本研究は生物の行動を記録した動画像データに対し，生物の行動を自動的かつ低コストで計測するための手法構築を目指したものである．

動画像におけるパターン計測を考えたとき，撮影環境および対象の挙動により生じる不良条件に対応する必要がある．不良条件には照明変動に起因する輝度変動や対象に生じる姿勢変化（回転）等が考えられるが，特に姿勢の変化は各時刻で生じ，かつ不規則性を持つ場合もあるため極めて重要な課題であると言える．本研究では，第一としてこの回転に対し頑健性を持たせることを考える．今回は回転運動を発現する生物としてメダカ *Oryzias latipes* とアギトアリ属に属すアギトアリ *O. monticola* およびオキナワアギトアリ *O. kuroiwae* を研究対象と設定し，それぞれの行動および付属肢の運動計測を行うための画像パターン計測法について議論を展開する．

キーワード: 動画像計測, パターン照合, 回転運動, メダカ, アギトアリ

*北海道大学 大学院情報科学研究科 システム情報科学専攻 博士論文, SSI-DT79175030, 2020 年 3 月 31 日.

Study on a Method of Robust Pattern Measurement for Rotational Behavior Analysis of Creature[†]

Asahi Matsuda

Abstract

Understanding the principles of the behavior and movement has a great significance in the fields of biology and behavioral ecology. For the purpose of analyzing these, image-based measurement is generally widely used. The most basic is visual measurement by specialists, and there are also cases where an application for measurement is used. However, each of these measurement methods has some problems; human error, measurer bias, time cost, and financial costs. When considering conducting research on a certain organism, it is necessary to secure measurement tools with limited funds, and it is difficult to provide devices and software specialized for that organism. In other words, it is necessary to find a measurement method that satisfies sufficient measurement accuracy when we assume that the behavior of living organisms is measured using a measurement device that is generally available and has sufficient accuracy. Based on the above, this study aims at constructing a method for automatically and inexpensively measuring the behavior of living organisms from moving image data that records the behavior of living organisms.

When considering pattern measurement in moving images, it is necessary to cope with poor conditions caused by the experimental environment and the behavior of the target. In particular, the posture change is the most important task because it occurs at each time and has irregularities. We first consider constructing a method that is robust against this rotation. In this study, we treat some creatures as organisms that express rotational movement: *Oryzias latipes*, and *Odontomachus* genus. We discuss image pattern measurement method to measure each action and movement of appendages.

Keywords: image-based measurement, pattern matching, rotational behavior, medaka, trap-jaw ants

[†]Doctoral Thesis, Division of Systems Science and Informatics, Graduate School of Information Science and Technology, Hokkaido University, SSI-DT79175030, March 31, 2020.

目次

第1章	序論	1
1.1	導入	1
1.2	本研究の目的	2
1.3	論文構成	2
第2章	メダカの遊泳軌跡生成手法	5
2.1	概要	5
2.1.1	研究対象	5
2.1.2	モデル生物としてのメダカ	5
2.1.3	本章における研究の目的	5
2.2	実験のセットアップ	6
2.3	パターン照合法の適用	6
2.3.1	解決すべき課題	6
2.3.2	処理手順	6
2.3.3	前処理	9
2.4	生物候補位置の決定	14
2.4.1	方向符号法の適用	14
2.4.2	テンプレートの作成	16
2.4.3	方向符号照合法	16
2.4.4	テンプレートの回転	18
2.4.5	中心差分方向符号	21
2.4.6	複数枚のテンプレートを用いた中心差分方向符号照合法	22
2.5	粒子フィルタによる生物位置の推定	26
2.5.1	粒子フィルタの概要	26
2.5.2	ランダムウォーク・モデルに基づく粒子遷移	27
2.5.3	二重尤度関数	28
2.5.4	リサンプリング	32
2.6	生物の行動軌跡の生成	33
第3章	メダカの行動追跡実験	35
3.1	撮像条件	35
3.2	複数個体の行動追跡	35
3.3	バーストスイミング時の行動追跡	37
3.4	遊泳軌跡に基づく行動評価値の算出	38
3.4.1	速度・加速度の算出	38

3.4.2	速度・加速度の算出	39
3.4.3	残差絶対値の条件改良による効果	41
3.4.4	テンプレート回転角導出法改善による効果	42
3.4.5	各対象の遊泳軌跡の抽出及び行動評価値の算出	42
第 4 章	高速運動計測	53
4.1	概要	53
4.2	高速運動解析の有用性	53
4.3	高速度撮影と生じる課題	53
4.4	アギトアリ属の大顎の運動計測	54
4.4.1	研究対象	54
4.4.2	Trap-jaw	54
4.4.3	アプローチ	55
4.5	運動モデルに基づく構造解析	55
4.5.1	新規仮説の導入	55
4.5.2	運動モデルの構築	59
4.6	外骨格の変形量計測法	59
4.7	三点法に基づく大顎の回転角度推定法	61
4.8	M-ICP に基づく大顎の回転角度推定法	62
4.8.1	ゴースト除去手法	62
4.8.2	M-ICP に基づく大顎の照合	67
第 5 章	アギトアリの顎の駆動に係る部位の計測	69
5.1	アギトアリ属の外骨格の変形量計測	69
5.2	アギトアリ属の顎の運動計測	69
5.2.1	実験セットアップ	69
5.2.2	パラメタ推定	72
5.2.3	M-ICP による回転角度計測	72
第 6 章	結論	79
	参考文献	81

目 次

2.2.1	Experimental setup	7
2.3.1	Flowchart of proposed method	10
2.3.2	Lighting noise	11
2.3.3	Input image	13
2.3.4	Threshold processing image	13
2.3.5	Background image	13
2.3.6	Background subtraction	13
2.3.7	Median filter	13
2.4.1	Luminance gradient direction	15
2.4.2	Orientation code	15
2.4.3	Calculate oc image	15
2.4.4	Robustness against illumination change	16
2.4.5	Make template	17
2.4.6	Template matching	17
2.4.7	OCM	18
2.4.8	Posture change of medaka	18
2.4.9	Radar chart	19
2.4.10	Rotate template	20
2.4.11	Calculation of central difference orientation code	20
2.4.12	Renewal template	21
2.4.13	OCM using multiple templates	22
2.4.14	Central difference orientation code	23
2.4.15	Occurrence probability	23
2.4.16	Radar chart of $P_{pq}(s)$	25
2.4.17	Convert to direction data	25
2.4.18	Center difference OCM by using multiple templates	26
2.5.1	Particle filter	27
2.5.2	Particle transition	29
2.5.3	Setting the particle transition range	29
2.5.4	Calculate $L_D^{(l)}$	31
2.5.5	Resampling	33
2.6.1	Trajectory of medaka	34
3.2.1	Trajectories	36
3.3.1	Result($k=245$)	37

3.3.2	Result($k=599$)	37
3.3.3	Trajectories	38
3.4.1	Distance between each individuals	39
3.4.2	Distance between one and others	40
3.4.3	Distance in genus	40
3.4.4	Histogram of speed	40
3.4.5	Histogram of distance	40
3.4.6	Original image	41
3.4.7	OC image	41
3.4.8	Evaluation value	42
3.4.9	Experiment result($k=100-135$)	43
3.4.10	Experiment result($k=140-175$)	44
3.4.11	Experiment result($k=100-135$)	45
3.4.12	Experiment result	46
3.4.13	Original image	47
3.4.14	Results by using previous method	48
3.4.15	Experiment result(Results by using proposed method	49
3.4.16	Experimental result	50
3.4.17	Trajectories of each target	50
3.4.18	Histogram of distance(medaka)	51
3.4.19	Histogram of distance(neon-tetra)	51
3.4.20	Histogram of distance(all)	52
4.4.1	<i>O. monticola</i>	55
4.4.2	<i>O. kuroiwae</i>	55
4.4.3	Motion cycle of trap-jaw	56
4.4.4	Segmentation data by using Amira	57
4.5.1	Kinetic model	58
4.5.2	Dynamic	60
4.7.1	Estimate the rotational center	63
4.8.1	Transition of rotational center	64
4.8.2	High-speed image	64
4.8.3	Some noises	65
4.8.4	Ghost	65
4.8.5	Remove ghost	66
4.8.6	Extract mandible	66
4.8.7	Remove some noises	66
5.1.1	The shape at open-phase	70
5.1.2	The shape at load-phase	70
5.1.3	Amount of deformation between open and load	70
5.2.1	Setup	71

5.2.2	Setting an ant	72
5.2.3	High speed image	73
5.2.4	Angle	73
5.2.5	Angular velocity	74
5.2.6	Acceleration	74
5.2.7	High-quality image	75
5.2.8	Reference image	75
5.2.9	Low-quality image	76
5.2.10	Result1	77
5.2.11	Result2	77
5.2.12	Result3	77

表 目 次

5.1 Each individual data	74
------------------------------------	----

第1章 序論

1.1 導入

画像をベースとする手法の提案は、これまでにコンピュータビジョン，マシンビジョン，ロボットビジョン等，多岐にわたる分野においてなされてきた [1-3]．いずれの分野においても 2 次元ないし 3 次元画像を入力することで特定の情報またはロボットの行動を得る．また近年では，パタン認識や機械学習に関する技術の発展により，特にコンピュータビジョンにおける技術開発は飛躍的に進展した [4-6]．一般的に画像照合といえば，製品の生産工程における外観検査や欠陥検出，ロボットハンドによるピッキング，歩行者の検出・追跡等への利用が先に想起できるが [7]，今日ではスマートフォンを主とするカメラモジュールを内蔵した電子デバイスの急速な普及により，顔や文字の検出・識別が我々にとってより身近な活用例であると言える．

ところで，画像照合の技術は上述したような産業分野のみならず研究の分野においても大変有用である [8-10]．生物学や行動生態学の分野では生物の行動原理や身体構造および機構の解明に向け，画像計測に基づくデータ分析・解析が実施される．従来この方法は，生物やその付属肢の挙動を撮影した連続画像において各フレームごとに専門家の目視によりデータ抽出が行われてきた．しかし，従来の手法は次に示すような問題を孕んでいる．

- (1) 時間的コスト
- (2) 計測者への身体的負担およびそれに起因するヒューマンエラー
- (3) 計測者ごとの人為バイアス

以上の問題は生物のデータを高精度に抽出する上で大きな障害となる．故に，動画像データに基づく生物の動体計測のために画像計測手法の確立が求められ，自動かつ定量的に対象のデータを抽出することが求められる．

次に，画像計測手法を構築する上で，先に考慮すべき幾つかの事項を以下に挙げる．

- (1) 対象の特性（形状，色，および行動の規則性等）の理解
- (2) 撮影環境（屋内外，照明条件）
- (3) 撮像デバイスの特性（シャッタースピード，撮像方式およびそれに起因するノイズ）

姿勢や照明条件の変化，遮蔽や付加ノイズ等，実環境における不良条件にロバストな照合法を開発することは対象を高精度に計測する上でとても重要である．特に生物を対象とする場合，対象の不規則な行動や姿勢の変化（回転）を伴う場合が多々あり，これらに対し頑健性を有す必要がある．

1.2 本研究の目的

本研究の主目的は、生物の行動を記録した動画データにおいて、生物の行動解析のための動画計測法を確立することである。本研究では2種の生物を対象とし、それぞれが発現する回転運動の解析に向け、前節にて述べた外乱に対し頑健な手法を構築した。

一つは、プール内を遊泳する複数匹のメダカ (*Oryzias latipes*) を対象と定め、各個体に対し時系列で検出・追跡を実施し、さらには遊泳軌跡の生成を行った。メダカはゲノムにおける塩基配列がほぼ解明されており、ヒトゲノムの塩基配列と共通する部分が数多く存在することから、モデル生物として広く取り扱われる [11][12]。メダカの行動を解析する上で、(1) 照明による外乱、(2) 遊泳行動に伴う姿勢変化、および (3) バーストスイミング [13][14] と呼ばれる急速な運動が解決すべき課題として挙げられる。これらに対し、輝度変動に頑健な方向符号特徴をベースとする方向符号照合法 [15][16] と物体の不規則運動の推定に長けた粒子フィルタ [17][18] を組み合わせることで対応した。方向符号照合法ではテンプレートと照合する画像をそれぞれ回転させ [19-21]、中心差分方向符号を新たに算出し照合に用いることで、対象の姿勢の変化に対応した。また、粒子フィルタでは、2つの尤度を掛け合わせた二重尤度関数を設計すること、そして、粒子の遷移範囲をメダカの最大遊泳力に則り設定すること [22][23] によりバーストスイミングを伴う遊泳にも対応した。実際に8匹のメダカが遊泳する1分間の動画データにおいて誤検出なく追跡および遊泳軌跡の生成を可能とした [24-26]。

一つは、生物が発現する超高速運動を計測するためにアギトアリ属 (*Odontomachus*) のアギトアリ (*O. monticola*) とオキナワアギトアリ (*O. kuroiwae*) の2種を対象とした [27]。近年のイメージセンサ技術の進歩に伴い、昨今では従来計測できなかった高速な運動が高速カメラを用いることで計測可能となった。上述したアリは Trap-jaw と呼ばれる大顎を有し、動物界最速のスピードで閉じることができる [28]。しかし、10mm 前後の小さな体躯でどのようにして超高速運動を発現するのが明らかになっておらず、この運動機構を解明することは生物学において必要なテーマである。運動機構の解明に向け、高速カメラにて撮影した動画を主として実施するが、他にも多角的な計測を実施した。高速カメラで撮影された動画はノイズを多く含み、CMOS センサの特性により生じるゴーストにも対応する必要がある [29]。本研究では、同システムにより撮像した2種類の品質の画像を用い照合を行うアプローチを採用した [30][31]。また、フレーム間の明度値の関係からゴーストを除去し、大顎部を抽出した。そして、二値化画像における黒画素を点群とみなし、M-ICP [32-34] に基づく照合を行うことで高速に運動する大顎の回転角度の算出を可能とした。

1.3 論文構成

本論文の構成は次の通りである。

第1章では、本研究の位置付けおよび目的について述べた。

第2章では、メダカ属を対象とし、遊泳行動における各個体の軌跡を生成する手法について述べる。

第3章では、第2章にて提案する手法の有効性を示すために実施した実験の結果につい

て示す.

第4章では, アギトアリ属を対象とし, アリが持つ Trap-jaw と呼ばれる大顎の超高速運動の解析に向けた多角的な計測手法について述べる.

第5章では, 第4章にて述べた手法を実際に用いた実験結果について示す.

第6章では, 本研究のまとめを行い, 実験結果に対する考察および今後の展望について述べる.

第2章 メダカの遊泳軌跡生成手法

2.1 概要

2.1.1 研究対象

一般的にメダカとは、ダツ目メダカ科メダカ属 (*Oryzias*) に分類されるものを指す。*Oryzias* に属す種はいずれも東アジアから東南アジアにかけて生息しており、日本では *Oryzias latipes* が古来より国産のメダカとして認識されてきた。しかし、2011 年に青森県から兵庫県における日本海側に生息する北日本集団が発見され、新たに発見されたものをキタノメダカ (*O. sakaizumii*)、古来の *O. latipes* をミナミメダカと種別して扱うこととなった [35]。本章では、*O. latipes* を主対象と定め、これを従来 of 名称であるメダカと称し議論を展開することとする。

2.1.2 モデル生物としてのメダカ

近年の遺伝子研究において、メダカは以下の理由により実験生物として幅広く利用されている [36-38]。

- (1) ゲノムにおける塩基配列がほぼ解明されている。
- (2) ヒトゲノムの塩基配列と共通する部分が数多く存在する [11]。
- (3) 飼育が容易であり、短期間で成長・繁殖する。
- (4) 交配等の遺伝学的実験法が確立されている。

特に (1), (2) に関しては、メダカを対象とするにあたり最も重要なファクターであり、環境要因がメダカの行動や身体へ及ぼす影響を調査することで [39-41]、将来的にヒトへのフィードバックが期待できる。

2.1.3 本章における研究の目的

前節にて述べた背景を踏まえ、本研究の目的を以下の通り設定する。

- (1) 遊泳するメダカの各個体における遊泳軌跡の生成
- (2) 抽出した遊泳軌跡に基づく対象の行動評価値の算出

本研究では、以上を動画像計測により達成することを考える。これまでに、映像データから生物の挙動を検出・追跡する研究はなされてきたが、今回のケースでは後述するいくつ

かの課題により手法の適用が困難である。

2.2 実験のセットアップ

本章ではメダカの行動を観察するためのセットアップについて説明する [42]。今回、直径 460mm の白いタライの中央に直径 240mm の茶碗を逆さに配置し、水深が約 40mm となるよう水を注入後、8 匹のメダカ（オスとメスの割合は同等）を放出した。対象としたメダカはいずれも生後 6 ヶ月の成魚であり、体長はおよそ 30mm である。また、水槽の形状をドーナツ状とした目的はメダカの群れ行動をより顕著に発現させるためである。そして、メダカが遊泳する様子を水面から約 1400mm（水面からレンズまでの距離を指す）離れた上部位置に設置したビデオカメラ（SONY: HDR-HC9）にて撮影した（Fig. 2.2.1）。撮影の際、対象の行動が鮮明に観察できるようにカメラと同等の位置に白色の LED（サイズ: 107mm × 225mm）を 2 つ設置し、十分な光量を確認した。このとき、レンズには水面における照明光の鏡面反射の影響を極力軽減するため偏光板（SONY: VF-37CPKS）を装着し、カメラの撮影モードはデフォルトの設定を使用した。ここで、取得画像のサイズは 720 × 480 ピクセルである。

2.3 パタン照合法の適用

2.3.1 解決すべき課題

手法の説明に入る前に、前章にて示した撮影環境にて取得した画像に対しパタン照合法を適用する上で解決すべき課題をまとめる。課題は以下の 3 点である。

- (1) 水面に生じる照明光の表面反射
- (2) メダカの方向転換時における姿勢の変化
- (3) バーストスイミング

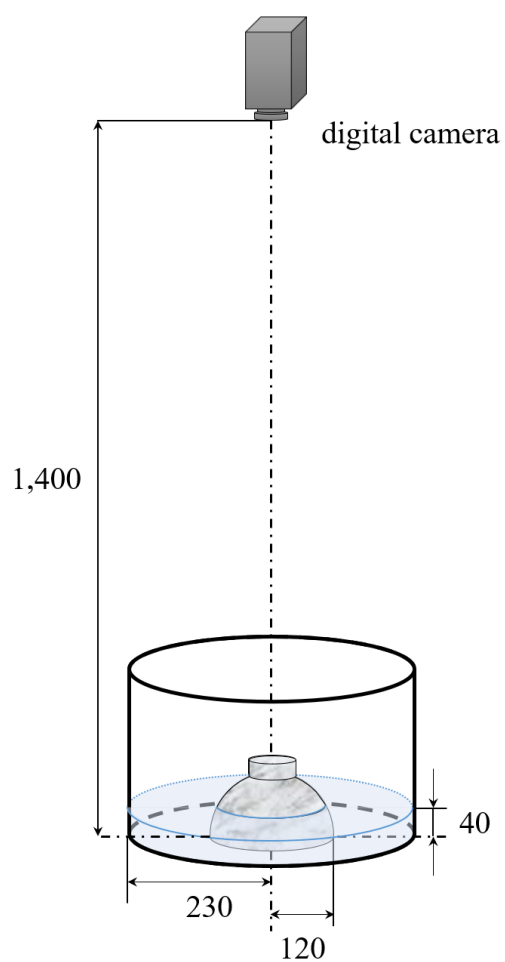
各個体を誤検出なく高精度に検出するためには上記に対応する必要がある。ここで (3) のバーストスイミングとは急激に速度および方向の変化を伴うメダカの遊泳行動を指し、メダカの行動観測を行う上で頻繁にみられる挙動である。

2.3.2 処理手順

本節では、第 2 章にて提案する手法の処理手順について提示する。先に Fig. 2.3.1 に全体の処理フローを示す。各処理についての詳しい説明は後の節に譲り、ここでは全体の流れについて簡潔に要点をまとめるにとどめる。処理の途中、初期フレームのみに適用する処理があるため、それらに関してはプライム（'）を用いて表記する。

【1】 画像入力

まず最初の処理として、画像の入力を行う。ここでは撮影した 30fps の動画像



system. Observation Dimension and object position.

Fig. 2.2.1 Experimental setup

を連続画像に変換したものを1フレーム毎に順番に入力していく。使用する画像は24bitのビットマップフォーマット(.bmp)を用いる。

【2】前処理

のちの手法を適用するための前準備として、5つの前処理を実施する。はじめ、入力した24bitカラー画像を8bitグレースケール画像に変換し、次に照明ノイズを除去するための閾値処理を施す。そして、対象とするメダカを抽出するために背景差分法を適用し、さらにメディアンフィルタにより細かなノイズを取り除く。最後に本手法のベースとなる特徴量である方向符号特徴の算出を行う。

【2'-1】対象の初期位置設定

初期フレームにおいて対象の位置をユーザが設定する。位置は画像座標（左上を原点とする2次元座標系）を用い、対象が複数いる場合はそれぞれに対し初期位置の情報を付与する。

【2'-2】テンプレートの作成

提案手法はテンプレートによる照合を主体としており、時刻 t において、 $t-1$ 以前の情報に基づき作成したテンプレートを用いて照合を実施する。しかしながら、初期フレームではそれ以前の情報がないため、ユーザ側でテンプレートを作成する必要がある。ここでは、対象の初期位置を中心とする任意サイズ($M \times N$ [pixels])の矩形領域を設定し、これをテンプレートとして用いる。

【2'-3】粒子フィルタ

粒子フィルタを用い、時刻 t における生物の推定位置を算出する。粒子フィルタは、①粒子遷移、②尤度計算、③リサンプリングの3処理により成る。まず、対象の時刻 $t-1$ における位置を中心とした粒子遷移範囲を設け、その範囲内においてランダムに粒子を散布する。そして、各粒子において尤度計算を実施し、尤度が最も高くなる粒子の位置を時刻 t における生物の推定位置とする。さいごに、次時刻における処理のためにリサンプリングを実施する。

【4】中心差分方向符号照合法

前処理を施した画像の各画素において、一様な輝度変動に頑健な方向符号を算出する。この特徴量に基づき、のちの照合を実施する。時刻 t における処理フレームが初期フレーム以降に相当するとき、前時刻($t-1$)以前の生物位置を

中心とする $M \times N$ [pixels] の任意の領域をテンプレート（参照画像 f ）と定義し、時刻 t の画像（対象画像 g ）との照合を実施する。その際、メダカの姿勢変化に対応するために参照画像および対象画像（実際は対象画像内に設けた探索領域の内部を捜査する矩形領域）をそれぞれ回転するアプローチをとる。さらに、各画像において回転後の方向符号値を回転に対応させるために、新たに中心差分方向符号への更新を実施する。参照画像と対象画像間の対応する各画素の中心差分方向符号値の残差を評価値とし、これの平均をとったものが最小となる領域の中心を対象の候補位置とし、任意数算出する。

【5】対象位置の決定

粒子フィルタにより算出した一点の推定位置と中心差分方向符号照合法により算出した任意数の候補位置を用いて時刻 t における対象の位置を算出する。推定位置と各候補位置間の距離を評価値として用い、これが最小となる候補位置を対象位置として決定する。

【6】テンプレートの更新

【5】で決定した対象位置を中心とする $M \times N$ [pixels] の領域を時刻 t におけるテンプレートとして、時刻 $t+1$ 以降の処理に用いる

2.3.3 前処理

前節における【2】に相当する前処理について述べる。前処理は以降の処理を適用するために入力画像に対し処理を行うが、明確な目的は以下の2点である。

- (1) 課題 (1): 水面に生じる照明光の表面反射 (Fig. 2.3.2) を除去するため。
- (2) 一様な照明変動へ対応するため。

以降、前処理について具体的に述べるが、上記2点を考慮し、説明を行うこととする。先に前処理の全体的な処理手順について記し、各処理について順に述べる。

- 【Step 1】 グレースケール変換
- 【Step 2】 閾値処理
- 【Step 3】 背景差分
- 【Step 4】 ノイズ除去
- 【Step 5】 方向符号特徴の算出

入力画像として用いる画像は、24 bit カラーの時系列画像群である (Fig. 2.3.3)。基本的に画像を1枚ずつ読み込み、それぞれに各処理を施す。最初の処理として、グレース

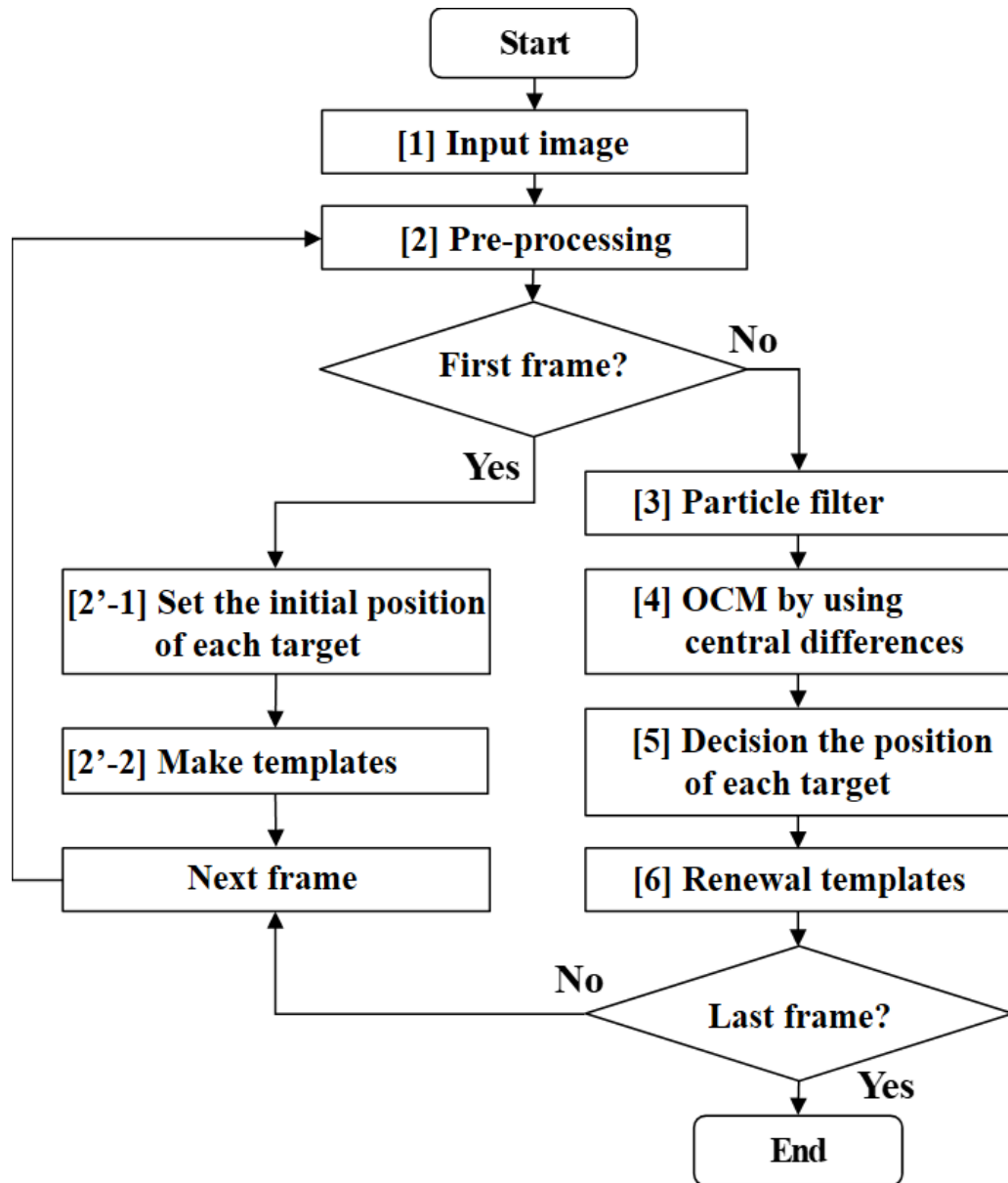


Fig. 2.3.1 Flowchart of proposed method.

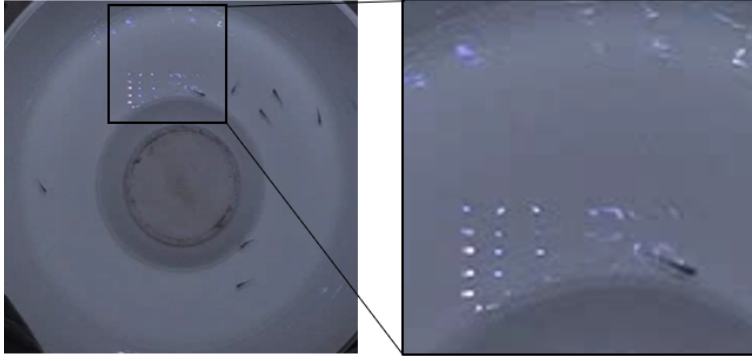


Fig. 2.3.2 Lighting noise.

ケール変換を行う。この処理の目的は、のちの処理で方向符号特徴を算出するためであり、24bit カラー画像を8ビットのグレースケール画像に変換する。この変換はコンポーネント映像信号の規格である ITU-R BT.601[43] に含まれる次式 2.1 を用いた。

$$E'_Y = 0.299E'_R + 0.587E'_G + 0.114E'_B \quad (2.1)$$

ここで、 E'_Y は変換後の輝度値を示し、 E'_R , E'_G , E'_B は 24bit カラー画像における各画素が持つ R, G, B それぞれのチャンネルの輝度値を意味する。

前述の通り、一つ目の課題として水面に生じる照明光の表面反射があった。これは水槽表面における鏡面反射に起因するものであり、次の処理で背景差分法により前景（対象）を抽出する際に深刻な外乱となる。第 2.2 節で述べた通り、カメラのレンズには水面上の鏡面反射の影響を極力軽減するために偏向板を装着しているが、偏光板のみでは完全に除去できないため、Step 2 の処理として閾値処理を導入した。十分な光量を確保するために LED パネルは必要な機材であるため、環境設定から画像上の輝度値を制御することは困難であると考えられる。先に、グレースケール変換を施された画像群に含まれる照明の輝度値は 100 以上となることを実験的に得たため、次式 2.2 の条件を設定した。

$$I^k_{(i,j)} = \begin{cases} 100 & \text{if } I^k_{(i,j)} \geq 100 \\ I^k_{(i,j)} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2.2)$$

同式において、 k は入力画像群のフレーム番号であり ($k=1, 2, \dots, K$; K : 総フレーム数), i, j はそれぞれ画像座標の値を意味する。この処理により輝度外乱を除去した画像（閾値処理画像）が生成される (Fig. 2.3.4)。閾値の妥当性についてであるが、閾値を 100 より大きく設定した場合、照明によるノイズが処理後の画像に残り、逆に閾値を 100 より小さく設定した場合は、対象とするメダカの輝度情報の欠損が実験により確認されたため、この閾値は妥当な数値であると考えられる。

次に Step 3 の処理として背景差分処理を行う。これは対象とするメダカを前景として抽出するためである。まず、背景差分を実施するために閾値処理後の画像群を用いて背景画像を作成する (Fig. 2.3.5)。背景画像は入力画像 I^k の各画素 $I^k_{(i,j)}$ における輝度値の最頻値を用いて作成する。そして、閾値処理後の各画像と背景画像間で背景差分処理を実施し、背景差分画像を出力する (Fig. 2.3.6)。同図より対象とするメダカが前景として抽出されているのが見てとれる。ただし、背景差分画像には閾値処理で除去しきれないメダカの糞や塵といったノイズが存在する場合がある。そのため、Step 4 の処理として、メディアンフィルタによるノイズ除去を行う (Fig. 2.3.7)。メディアンフィルタは画像のノイズを除去する手法として一般的に使用されており、対象とする画素を周辺画素の輝度値の中央値に変換するというものである。

最後に、輝度外乱やノイズ除去を済ませた画像に対して、5 番目の処理である方向符号の算出を行う。方向符号特徴については手法の関連性を考慮し、次節冒頭にて説明を行う。



Fig. 2.3.3 Input image.



Fig. 2.3.4 Threshold processing image.



Fig. 2.3.5 Background image.



Fig. 2.3.6 Background subtraction.

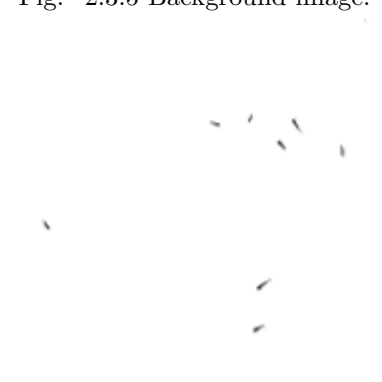


Fig. 2.3.7 Median filter

2.4 中心差分方向符号照合法による生物候補位置の決定

2.4.1 方向符号法の適用

本節では、前処理中における Step 5 で行う方向符号特徴 (Orientation Code; OC) の算出方法について述べる。この特徴は、のちの照合法を適用する際にベースとなる特徴量であるため、説明を本節冒頭に位置づけた。さて、蛍光灯等の照明下にて撮影される動画像には照明光の影響に起因する輝度変動が含まれることは周知の事実である。したがって、画像の輝度値に依存したテンプレート照合は困難を伴う。以上を考慮し、本手法では輝度変動に頑健な方向符号を特徴量として用い、テンプレート照合に適用する。

まず、方向符号特徴の算出方法について述べる。メディアンフィルタ処理後の画像 (Fig. 2.3.7) に対し、計算を実施する。画素位置 (i, j) における輝度値を $I_{(i, j)}$ とし、水平・垂直方向の輝度勾配 $\nabla I_i, \nabla I_j$ を次式 2.3 により求める。

$$\nabla I_i = \frac{\partial I}{\partial i}, \nabla I_j = \frac{\partial I}{\partial j} \quad (2.3)$$

輝度勾配を算出するための演算子は複数あるが、本手法では文献に従い Sobel 演算子を用いている。次式 2.4 に Sobel フィルタにおける水平方向および垂直方向それぞれのエッジ抽出に使用するカーネル K_i, K_j を示す。

$$K_i = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}, K_j = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

次に式 2.3 および式 2.4 にて算出した水平方向勾配 ∇I_i 、垂直方向輝度勾配 ∇I_j を用いて輝度勾配方向 θ_{ij} を次式 2.5 より算出する。また、算出方法の概念図を Fig. 2.4.1 に示す。

$$\theta_{ij} = \tan^{-1} \left(\frac{\nabla I_j}{\nabla I_i} \right) \quad (2.5)$$

そして、式 2.5 にて算出した輝度勾配方向 θ_{ij} を量子化幅 Δ に基づき量子化した値を方向符号 c_{ij} と定め、次式 2.6 に従い求める。

$$c_{ij} = \begin{cases} \left\lceil \frac{\theta_{ij}}{\Delta_\theta} \right\rceil & \text{if } |\nabla I_i| + |\nabla I_j| > \Gamma \\ N = \frac{2\pi}{\Delta_\theta} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2.6)$$

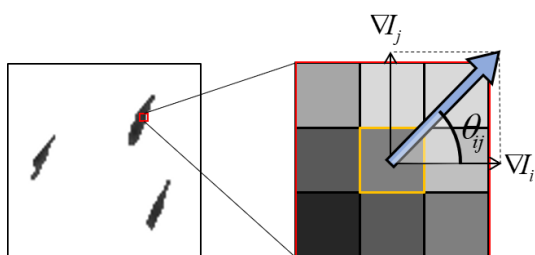


Fig. 2.4.1 Luminance gradient direction.

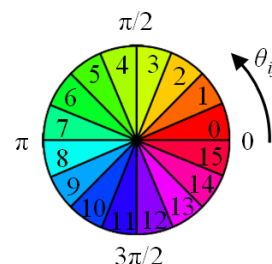
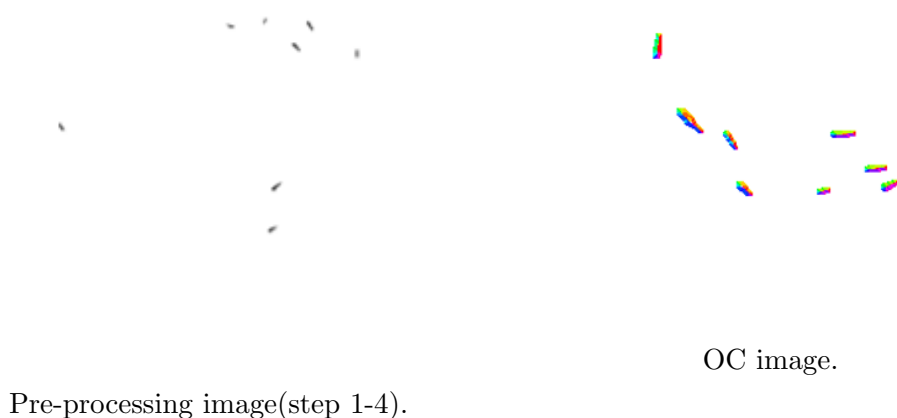


Fig. 2.4.2 Orientation code.

同式において、 Γ は輝度勾配が微小な画素を除外するために定めた閾値である。この閾値は情報量の観点から、より小さい方が望ましいがその分ノイズを含みやすく、撮影環境や照明条件により適した値を算出する必要がある。方向符号概念では、この閾値 Γ より大きい方向符号 c_{ij} を有効符号と定義し、閾値未満の方向符号を無効符号 N として定義する。本論文では量子化幅 $\Delta\theta$ を $\pi/8$ [rad] に設定しているため、有効符号は0~15の値を取り、無効符号は16となる。量子化幅については値を小さくすれば方向符号の分解能は向上するが、それに伴い計算コストも増加する。 $\pi/8$ [rad] に設定した場合、8ビットグレースケール画像の半分の情報量を有効符号で表現することができるため、計算コストとの兼ね合いを考慮しても妥当な値であると言える。また、方向符号を画像として扱う際、視覚的に判別しやすいように上図 Fig. 2.4.2 に従い、各方向符号値に色情報を付与している。

次図 Fig. 2.4.3 は、実際にメディアンフィルタ処理後の画像を用いて方向符号を算出したものである。ここでは、方向符号への変換が視覚的に理解しやすいように、第2.3.3節で用いた画像とは別のものを使用している（撮影条件は同等）。同図 (b) は同図 (a) の画像から求めた方向符号値を図 2.4.2 に従い配色したものである。さいごに、方向符号の



Pre-processing image(step 1-4).

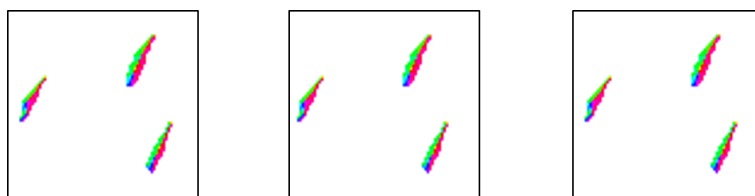
OC image.

Fig. 2.4.3 Calculate oc image.

一様な輝度変動に対する頑健性を例を用いて示す．Fig. 2.4.4(a) はそれぞれ全体の輝度値が異なる 3 枚の 24bit カラー画像を示し、左から右にかけて全体の輝度値が大きくなっている．そして Fig. 2.4.4(b) はそれぞれの画像を方向符号画像に変換したものである ($\Gamma=5$)．同図 (b) より、方向符号の出現分布は画像全体の輝度変化に依らず、いずれも同様の画像が取得できているのが見てとれる．この結果から、方向符号は画像全体の一様な輝度変動に頑健であることを示唆した．



(A) Original image.



(B) OC image.

Fig. 2.4.4 Robustness against illumination change.

2.4.2 テンプレートの作成

前節までに方向符号画像を作成する手順（【2】前処理）までを示した．本節では【2'-2】テンプレートの作成について説明する．一般的にテンプレート照合を実施する場合、あらかじめ参照するためのテンプレート f ($M \times M$ [pixels]) を用意する必要があり、これを用いて対象画像 g ($X \times Y$ [pixels]) 内を走査し（ただし、 $X > M$, $Y > M$ とする）、最も相関が高くなる領域を抽出する．

2.4.3 方向符号照合法

本節では、方向符号照合法（Orientation Code Matching; OCM）について述べる．OCM は OC 特徴をベースとしたテンプレート照合法であり、計算コストが低くかつ輝度外乱に頑健であることから、さまざまな環境下において研究目的に適した手法拡張が行われてきた [44-52]．前節にて作成したテンプレート f を用いて対象画像 g に対して照合を行う．テンプレート画像を対象画像上で走査する際、全走査をすると処理コストの増加が懸念される．そこで、本手法では対象の時刻 $t-1$ における位置を中心に $2R \times 2R$ [pixels] の探索領域を設け、その中でテンプレートと同サイズの矩形領域を用いて走査を実施する (Fig.

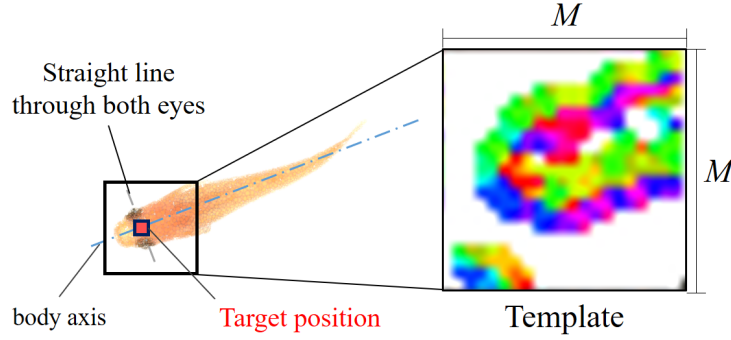


Fig. 2.4.5 Make template.

2.4.6). このときの矩形領域を走査画像 g' として新たに定義する. すなわち, 本手法ではテンプレート画像 f と走査画像 g' 間で方向符号値をベースとした照合を行う.

以下にて, 方向符号照合法について説明する. まず, テンプレート画像 f と走査画像 g' の対応する画素の方向符号をそれぞれ $c_{f(x,y)}$, $c_{g'(x,y)}$ と定義する. 次に, 次式と式に従って, 各画像間の対応する全画素において方向符号の残差絶対値を求め, 画素毎に算出した残差絶対値の総和をテンプレート画像が持つ画素の総数で割った平均残差絶対値 d_k に基づいて二つの画像の類似性を評価する. また, Fig. 2.4.7 に示すように方向符号は循環

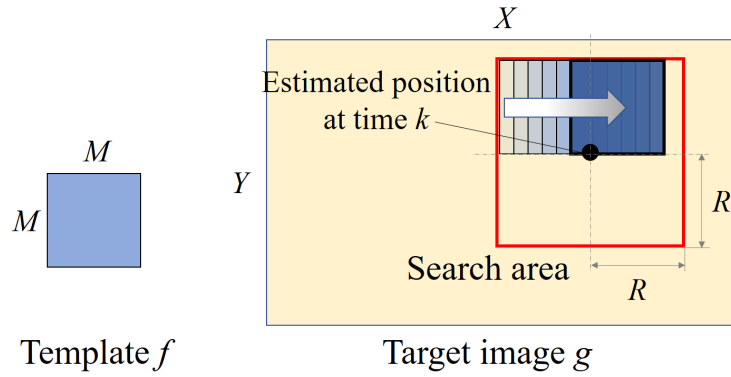


Fig. 2.4.6 Template matching.

性を持っているため, 上式の場合分けに従ってその画素の残差絶対値を求める. この平均残差絶対値 d_k が最小の値を取る領域を対象の生物が存在する領域として検出する.

$$d_k = \frac{1}{M^2} \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{M-1} d(c_{f(i,j)}, c_{g'(i,j)}) \quad (2.7)$$

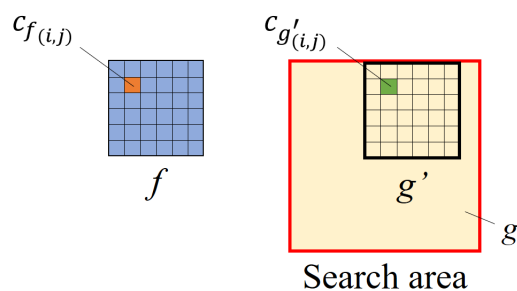


Fig. 2.4.7 OCM.

$$d(a, b) = \begin{cases} \min\{|a - b|, N - |a - b|\} & \text{if } a \neq N, b \neq N \\ \frac{N}{4} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2.8)$$

2.4.4 テンプレートの回転

第 3.1 節にて 2 つめの課題として挙げたように、一般に用いられるテンプレート照合法ではメダカの方角転換時における姿勢の変化 (Fig. 2.4.8) により照合精度が低下する場合がある。そのため、本手法ではテンプレート画像 f と走査画像 g' を各々回転させた後に照合し、方向転換時の精度低下に対処する。

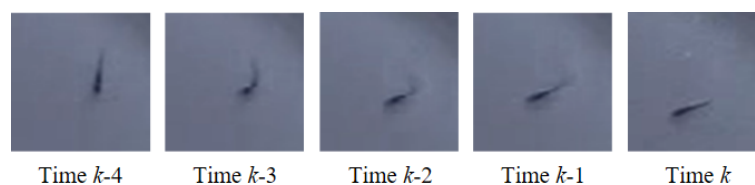


Fig. 2.4.8 Posture change of medaka.

テンプレート画像 f と走査画像 g' それぞれに含まれる方向符号を用いてヒストグラムを各々算出し、さらにヒストグラムに基づきレーダーチャートを作成する。このとき、作成したレーダーチャートのプロットエリアに従い慣性主軸の角度を算出する。いま、レーダーチャートのプロットエリアとその他の画素からなる二値画像を座標 (x, y) とするとき、ヒストグラム領域における x の分散 $Var(x)$ と y の分散 $Var(y)$ 、座標値 x と y の共分散 $Cov(x, y)$ は次の式 2.9 から式 2.11 に従い求められる。

$$Var(x) = \frac{1}{H} \sum_{m=1}^{M^2} (x_m - \bar{x})^2 \quad (2.9)$$

$$Var(y) = \frac{1}{H} \sum_{m=1}^{M^2} (y_m - \bar{y})^2 \quad (2.10)$$

$$Cov(x, y) = \frac{1}{H} \sum_{m=1}^{M^2} (x_m - \bar{x})(y_m - \bar{y}) \quad (2.11)$$

ここで、 H はヒストグラム領域の要素数を示し、 m はヒストグラム領域である画素の要素番号を表す。すなわち、ヒストグラム領域の慣性主軸角度は次式で算出可能である。

$$\varphi = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{2Cov(x, y)}{Var(x) - Var(y)} \right) \quad (2.12)$$

方向符号は輝度勾配の方向を評価した値であり、メダカは体軸を中心に身体の左右で方向符号値の出現度合が異なる傾向にある。特に、体軸に対し直行する向きの方方向符号値が多く出現し、慣性主軸角度は体軸の方向に対して概ね $\pi/2$ の角度差を持つ。すなわち、テンプレート画像 f と走査画像 g' の慣性主軸角度を各々 φ_f と $\varphi_{g'}$ とおくと、導出した慣性主軸角度に基づき各画像を $\varphi_f - \pi/2$ および $\varphi_{g'} - \pi/2$ 回転させることで、両慣性主軸が一致し、かつメダカの方方向転換に対応した照合が可能となる。ここでは、メダカの吻端と背にある模様先端の2点間を結ぶ線分を体軸と定義している。Fig. 2.4.9 にてテンプレート画像を用いて作成したレーダーチャートを示す。さらに、Fig. 2.4.10 にレーダーチャートより算出した慣性主軸角度 φ と f に従いテンプレート画像を回転させた図を示す。

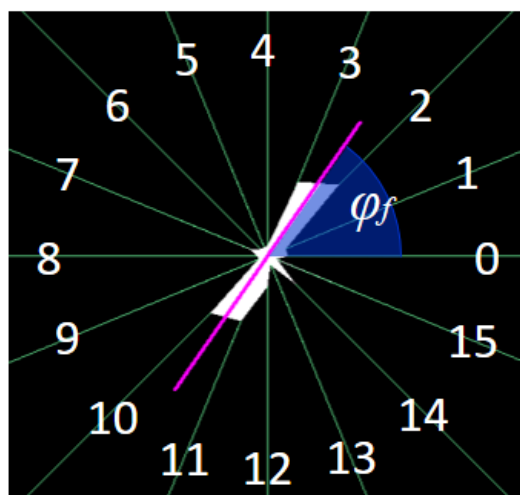


Fig. 2.4.9 Radar chart.

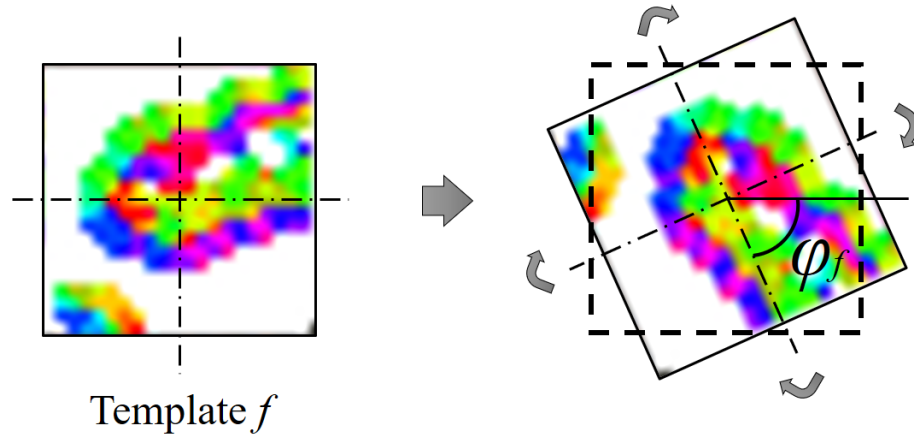


Fig. 2.4.10 Rotate template.

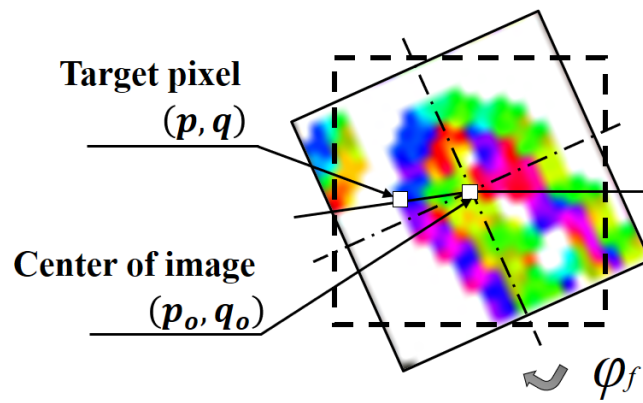


Fig. 2.4.11 Calculation of central difference orientation code.

2.4.5 中心差分方向符号

方向符号の特徴である循環性により、画像回転の前後で方向符号の値に変動が生じる。このため、回転に不変な特徴量である中心差分方向符号を活用し、画像照合を行うことは、回転量の異なるテンプレート画像と対象画像の画像特徴の相違を防ぐことに有益である。回転後の画像における画素位置 (p, q) の方向符号を c_{pq} とし、画像中心 (p_o, q_o) から画素位置 (p, q) に向かう方向 ψ を次式 2.13 により算出し、これを対象画素角度と定義する。

$$\psi = \tan^{-1} \left(\frac{p - p_o}{q - q_o} \right) \quad (2.13)$$

そして、算出した対象画素角度を方向符号と同じ量子化幅 $\Delta \theta$ 用いて量子化した値を c_ψ とおく。これら2種類の方向符号 c_{pq} と c_ψ より、次式に従い中心差分方向符号 o_{pq} が求まる。このとき o_{ij} は0から N までの値を持ち、方向符号 c_ψ から c_{pq} まで反時計周りに数えることに相当する。ただし、方向符号 c_{ij} が無効符号 N の場合は $o_{ij}=N$ とおく。ここでは、両方向符号の差分を取ることで回転不変の特徴量を抽出する。

$$o_{pq} = \begin{cases} c_{pq} - c_\psi & \text{if } c_\psi \leq c_{pq} < N \\ c_{pq} - c_\psi + N & \text{if } c_{pq} < c_\psi < N \\ N & \text{if } c_{pq} = N \end{cases} \quad (2.14)$$

通常、回転後の画像には回転の影響により画像情報に欠損が生じる。そのため、画像サイズ $M \times M$ に内接する円を設け、円内部の中心差分方向符号を用いて照合を行う。ここで、中心差分方向符号算出後のテンプレート画像を f' とし、同様の処理を施した回転後の走査画像を g'' とおく。

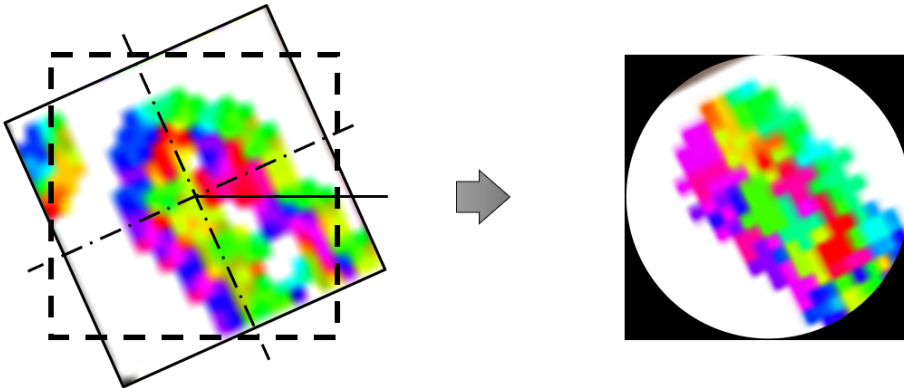


Fig. 2.4.12 Renewal template.

2.4.6 複数枚のテンプレートを用いた中心差分方向符号照合法

本節では前節で定義した回転後のテンプレート画像 f' と走査画像 g'' による照合法を示す。対象に急激な速度変動や方向転換が生じた場合、フレーム間でテンプレート画像と対照画像の相関が著しく低下し、誤検出の原因となる。その要因を避けるため、本論文では、重み付けを行った複数枚のテンプレート画像を用いてこれに対応する。フレーム間における生物の方向符号値に大きな変化は生じないと仮定し、時刻 $k-1$ 以前のテンプレートを任意数用いて走査画像との平均残差絶対値をそれぞれ算出し、その平均値を照合の評価として対象の候補位置を決定する。先に、重みを付加しない単純平均による複数枚のテンプレート照合法について示し、後に重み付けした複数枚のテンプレート照合法について説明を行う。

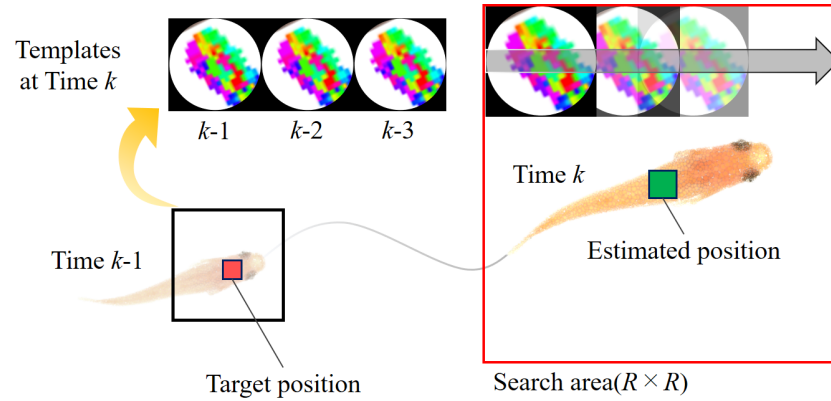


Fig. 2.4.13 OCM using multiple templates.

$$d_K = \frac{1}{M^2} \sum_{M \times M} d(o_{f'_K(p,q)}, c_{g''(p,q)}) \quad (2.15)$$

$$\bar{d}_K = \frac{1}{n} \sum_{K=k-n}^{k-1} d_K \quad (2.16)$$

Fig. 2.4.13 に複数枚のテンプレートを用いた中心差分方向符号照合法の概略図を示す。まず、時刻 $k-1$ から時刻 $k-n$ にて検出された対象のメダカの領域を含む $M \times M$ の画像を n 枚のテンプレート画像とする。そして、時刻 k を対象画像として n 枚のテンプレート画像による方向符号照合を実施する。具体的には、2.1.3 節での 1 枚のテンプレート画像照合同様で、各テンプレート画像と対象画像からそれぞれの平均残差絶対値を式 2.15 に基づいて算出する。そして、 n 枚のテンプレート画像から得られた平均残差絶対値の平均値

を式 2.16 より求め、この評価値に基づいて対象の生物を検出する。このとき各テンプレートの $k-1$ から $k-n$ までの回転角を算出し、差分を取ることで、複数枚テンプレートに対応した中心差分方向符号 を算出する。先に、重み値の算出方法を紹介する。まず n 枚のテ

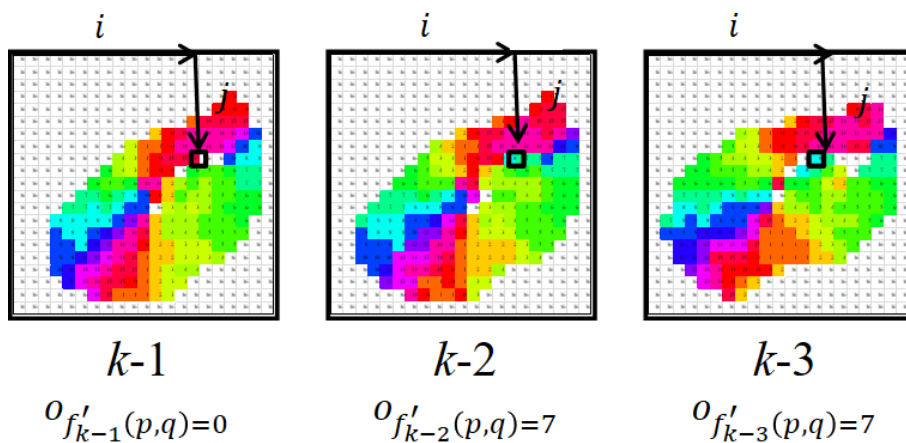


Fig. 2.4.14 Central difference orientation code.

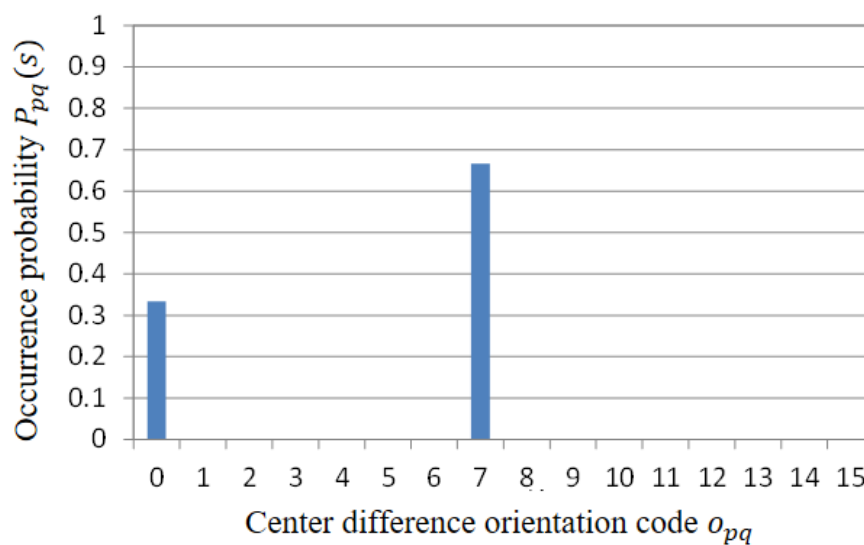


Fig. 2.4.15 Occurrence probability.

ンプレートにおける同一画素毎に各有効符号 s の生起確率 $P_{pq}(s)$ を次の式より求める。

$$P_{pq}(s) = \frac{1}{n} \sum_{K=k-1}^{k-n} \delta(s, o_{f'_K(p,q)}), s = (0, 1, \dots, N) \quad (2.17)$$

$$\delta(s, of'_K(p, q)) = \begin{cases} 1 & \text{if } s = of'_K(p, q), of'_K(p, q) \neq N \\ 0 & \text{if } s \neq of'_K(p, q), of'_K(p, q) \neq N \\ \frac{1}{N} & \text{if } of'_K(p, q) = N \end{cases} \quad (2.18)$$

このとき、無効符号が出現した場合は全ての有効符号が一様に出現していると仮定し、全有効符号に $1/N$ の生起確率を付与する。

いま、算出した有効符号の生起確率 $P_{pq}(s)$ を長さとした方向データ $s \Delta_\theta$ へ変換する [53]。この値を次式 2.19, 2.20 に従い $\sin$ 成分の x_{pq} , $\cos$ 成分の y_{pq} に分解し、次式 2.21 に示す合成ベクトル長 V_{pq} を求める。

$$\overline{x_{pq}} = \sum_{s=0}^{N-1} \{P_{pq}(s) \cdot \cos(s \cdot \Delta_\theta)\} \quad (2.19)$$

$$\overline{y_{pq}} = \sum_{s=0}^{N-1} \{P_{pq}(s) \cdot \sin(s \cdot \Delta_\theta)\} \quad (2.20)$$

$$V_{pq} = \sqrt{\overline{x_{pq}}^2 + \overline{y_{pq}}^2} \quad (2.21)$$

ここで、合成ベクトル V_{pq} は複数枚テンプレートの同一画素間における方向符号の値が全て一致している場合は 1 となり、反対に有効符号の生起確率が一様分布に近づくほど 0 に近い値を取る。合成ベクトル長 V_{pq} を回転後のテンプレート画像中の画素 (p, q) における重み値として照合に用いる。

次に、重み付き複数枚テンプレートを用いた中心差分方向符号照合法により各対象の候補位置を算出する過程を紹介する。まず、各テンプレート画像と対象画像間で対応する画素 (p, q) において中心差分方向符号の残差絶対値 $d(of'_K(p, q), c_{g''(p, q)})$ を算出し、テンプレート枚数 n を用いて平均化を行う。そして、次式 2.24 から平均残差絶対値 D_{pq} を導く。

$$D_{pq} = \frac{1}{n} \sum_{K=k-n}^{k-1} \left(\frac{d(of'_K(p, q), c_{g''(p, q)}) - 4}{4} \right) \quad (2.22)$$

さらに、重み付き評価に向けて平均残差絶対値を -1 から 1 の範囲で標準化する。残差絶対値 $d(of'_K(p, q), c_{g''(p, q)})$ を算出するときに無効符号が出現した場合、有効符号が出現す

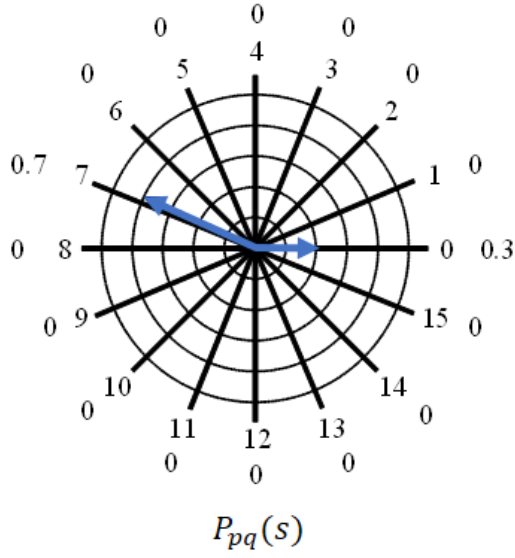
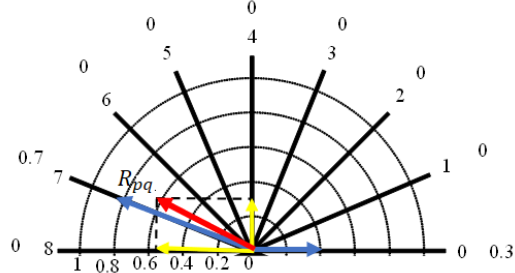
Fig. 2.4.16 Radar chart of $P_{pq}(s)$.

Fig. 2.4.17 Convert to direction data.

るときより評価値が高くなることを防ぐため、次式 2.23 の条件に沿う形に残差絶対値を設定する。

$$d(p, q) = \begin{cases} \min \{ |o_{f'}(p, q) - o_{g''}(p, q)|, N - |o_{f'}(p, q) - o_{g''}(p, q)| \} & \text{if } o_{f'}(p, q) \neq N, o_{g''}(p, q) \neq N \\ \frac{N}{2} & \text{if } o_{f'}(p, q) = N, o_{g''}(p, q) = N \\ \frac{N}{4} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2.23)$$

このとき、現時刻 k において画像位置 (i, j) を中心とするサイズ $M \times M$ の対象画像 g との重み付き照合評価値 E_{wij} を次式に従い定める。

$$E_{wij} = \left(\sum_{p=1}^M \sum_{q=1}^M D_{pq} \cdot V_{pq} \right) / \sum_{p=1}^M \sum_{q=1}^M V_{pq} \quad (2.24)$$

実際には、探索領域を設定し、その領域内において平均残差絶対値 E_{wij} が小さい対象領域から順に候補領域として任意数を検出し、のちで示す遊泳軌跡生成手法に用いて評価する。本章にて述べたテンプレートのサイズや照合に使用する枚数および探索領域のサイズは追跡対象や実験環境に依存する値であり、実験的に導き設定する必要がある。

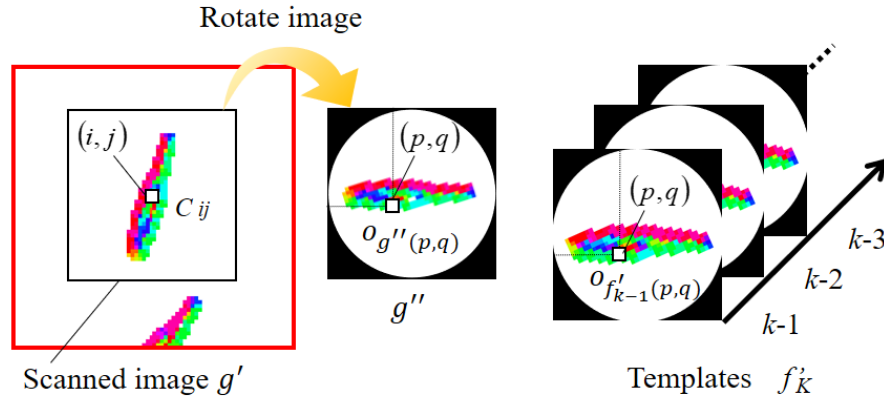


Fig. 2.4.18 Center difference OCM by using multiple templates.

2.5 二重尤度をもつ粒子フィルタによる生物位置の推定

2.5.1 粒子フィルタの概要

本節では、メダカの位置推定のために用いる粒子フィルタの概要について述べる。従来ではモーションベクトルや拡張カルマンフィルタを用いることで、対象である生物の位置推定を実施していた。しかし、メダカの急激な方向転換や速度変化を伴う不規則運動により推定精度が低下し、メダカの動態計測が困難な場合がある。粒子フィルタは非線形モデルの推定に適した時系列フィルタであり、ある状態量をもった無数の粒子を対象の周辺に散布し、対象の運動を粒子により表現し、設計した尤度関数を用いて選択することにより対象のメダカの位置や速度といった状態推定を実施する。画像処理分野においては生物の追跡や対象の姿勢推定等、幅広く利用されている。この粒子フィルタはベイズ推定に基づいて対象の状態推定を実施している。ベイズ推定はベイズの定理を用いた事前分布、尤度をもとに事後確率を推定する手法である。時刻 k での対象の状態を x_k 、画像から得られる観測量を y_k とすると、時刻 k における確率変数とする事後確率 $p(x_k|y_k)$ はベイズの式より次式 2.25 のように求めることができる。

$$p(x_k|y_k) = \frac{p(y_k|x_k) \cdot p(x_k|y_{k-1})}{p(y_k|y_{k-1})} \quad (2.25)$$

式 2.25 の $p(x_k|y_k)$ は時刻 $k-1$ における観測結果をもとに、時刻 k での状態量 x_k が得られる事前確率を表し、 $p(y_k|x_k)$ は状態量 x_k が得られた場合に観測量 y_k が生じる確率を表している。これを尤度とし定義する。式 2.25 の $p(x_k|y_k)$ 中の事後確率は尤度と事前確率の積より推定することができ、ベイズ推定ではこの事後確率を求めることで対象の状態推定および追跡を実施する。

次に、対象であるメダカの位置推定に向けた粒子フィルタの状態推定アルゴリズムについて述べる。まず、対象である生物の予測を実施する。ここで生物の予測とは粒子の遷移であり、前時刻 $k-1$ から現時刻 k へと状態遷移モデルに基づいて各粒子を遷移させる。次

に、遷移させた各粒子において尤度計算を実施する．このとき，対象である生物周辺に分布した粒子の尤度が高くなるよう尤度関数を設計することが重要である．この尤度が最大となる粒子位置を対象の生物の推定位置とする．そして，次時刻への推定精度を向上させるために尤度が低い粒子を消滅させ，尤度が高い粒子の周辺へ復元させる粒子のリサンプリングを行う．この粒子の遷移，尤度計算，リサンプリングを時系列で繰り返し行うことによって対象である生物の位置推定を実施する．Fig. 2.5.1 に粒子フィルタによる状態推定アルゴリズムの概念図を示す．次節からそれらの詳細について述べる．

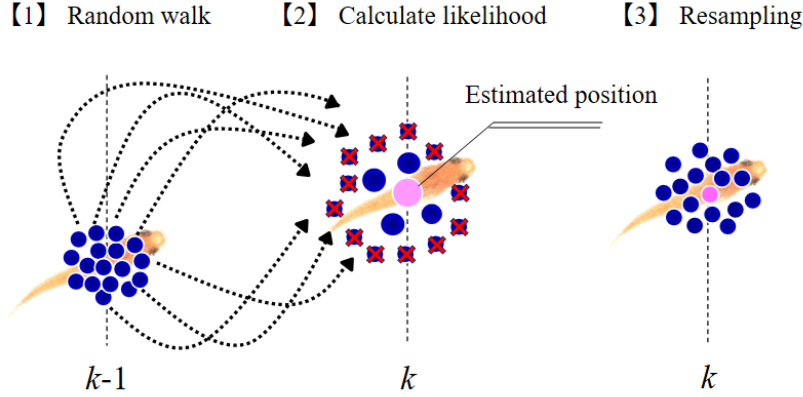


Fig. 2.5.1 Particle filter.

2.5.2 ランダムウォーク・モデルに基づく粒子遷移

本節では，対象の位置予測に向けた粒子の遷移方法について述べる．本研究では，対象の不規則運動やバーストスイミングに対応する為にランダムウォーク・モデルによる状態遷移モデルに基づき前時刻 $k-1$ から現時刻 k へと粒子遷移を実施する．まず，生物の位置や不規則運動を多数の粒子の状態量として表すために，次式 2.26 に時刻 k の粒子が持つ状態量 $x_k^{(l)}$ を定義する．

$$x_k^{(l)} = [i_k^{(l)}, j_k^{(l)}, u_k^{(l)}, v_k^{(l)}] \quad (2.26)$$

ここで， $i_k^{(l)}$, $j_k^{(l)}$ は画像上の粒子位置 $u_k^{(l)}$, $v_k^{(l)}$ は粒子の速度を表しており，この状態量 $x_k^{(l)}$ は各粒子がそれぞれ持っている．次式 2.27 及び 2.28 にランダムウォーク・モデルを示す．

$$x_k^{(l)} = F \cdot x_{k-1}^{(l)} + w_k^{(l)} \quad (2.27)$$

$$F = \begin{bmatrix} I_{2 \times 2} & O_{2 \times 2} \\ O_{2 \times 2} & I_{2 \times 2} \end{bmatrix}, w_k^{(l)} = \begin{bmatrix} r_x \\ r_y \\ r_u \\ r_v \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

式 2.27, 2.28 において, 行列 F 中における $I_{2 \times 2}$ は 2 行 2 列の単位行列, $O_{2 \times 2}$ は 2 行 2 列の零行列を表している. また, $w_k^{(l)}$ はランダムノイズであり, r_x, r_y は位置のランダムノイズ, r_u, r_v は速度のランダムノイズを表している. 行列 F は状態遷移行列であり, 単位行列を指定することで, ランダムウォーク・モデルに基づく粒子遷移を行う. ランダムウォーク・モデルに基づく粒子遷移では, ランダムノイズ $w_k^{(l)}$ によって粒子の遷移を行うため, このランダムノイズをどのように与えるかが重要である. 次式 2.29 には粒子の範囲 A を示す.

$$-A \leq r_x \leq A, -A \leq r_y \leq A \quad (2.29)$$

式 2.29 にて示した粒子遷移範囲は位置推定を行う対象及び撮影環境に合わせて設定する必要がある. 本研究では, メダカの最大遊泳力に基づき粒子遷移範囲 A を決定している. また, ここでは粒子遷移を円形の範囲内で実施しており, したがって, 粒子遷移範囲は次式 2.30 のように示される.

$$r_x^2 + r_y^2 \leq A^2 \quad (2.30)$$

式 2.37 にて算出した粒子遷移範囲内にてランダムノイズを付加することにより, 粒子の効率的なランダム遷移を実施する. 実際の粒子遷移の様子を Fig. 2.5.2 に示す. 緑色で表示されている部分が粒子を表しており, その中の黄色で示した点が推定位置を表している. 本手法では, Fig. 2.5.3 に示すように前時刻 $k-1$ における対象のメダカの検出位置を中心に粒子の遷移範囲を設定する.

2.5.3 二重尤度関数

粒子遷移後, 粒子毎に尤度計算を行い最大尤度となる粒子位置をメダカの推定位置とする. ここでは, 二つの尤度関数を設計し, 組み合わせて評価することにより高精度な位置推定を実施する.

先に, サンプリング時刻 ΔT におけるメダカの遊泳は等速直線運動に従うと仮定し, 第一尤度として等速直線運動予測による尤度関数を定義する. まず, 時刻 $k-1$ と $k-2$ のメダカの位置情報から時刻 k の推定速度を求め, そこから等速直線運動方程式に従い, 運動予測位置を導出する. 推定速度 $\hat{u}_k, \hat{v}_k$ は次式 2.31 より算出される.



Fig. 2.5.2 Particle transition.

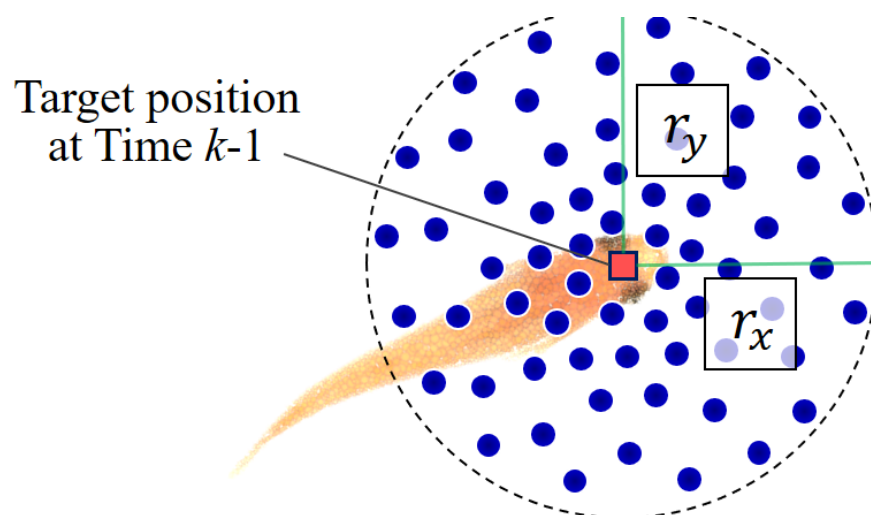


Fig. 2.5.3 Setting the particle transition range.

$$\hat{u}_k = (i_{k-1} - i_{k-2}) / \Delta T, \hat{v}_k = (j_{k-1} - j_{k-2}) / \Delta T \quad (2.31)$$

同式において ΔT は微小時間である．また，時刻 $k-1$ における検出位置を (i_{k-1}, j_{k-1}) ，時刻 $k-2$ における検出位置を (i_{k-2}, j_{k-2}) とする．次に，次式 2.32-2.35 に基づき，求めた対象の推定速度を用いて時刻 k における生物の予測位置 (i'_k, j'_k) を推定する．

$$i'_k = i_{k-1} + \hat{u}_k \cdot \Delta T \quad (2.32)$$

$$j'_k = j_{k-1} + \hat{v}_k \cdot \Delta T \quad (2.33)$$

$$i'_k = 2i_{k-1} - i_{k-2} \quad (2.34)$$

$$j'_k = 2j_{k-1} - j_{k-2} \quad (2.35)$$

式 2.34, 2.35 は，式 2.32, 2.33 に式 2.31 を代入することで導出することができる．得られたメダカの運動予測位置 (i_k, j_k) と各粒子位置 $(i_p^{(l)}, j_p^{(l)})$ との距離 D_l を評価し，分散値 σ_D を用いて運動予測尤度 $L_m^{(l)}$ として次式 2.37 のように定義する．

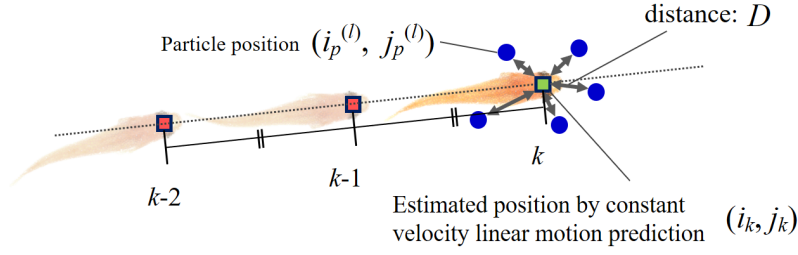
$$L_m^{(l)} = \exp\left(-\frac{2 \sigma_D^2}{D_l^2}\right) \quad (2.36)$$

$$D_l = \sqrt{(i'_k - i_p^{(l)})^2 + (j'_k - j_p^{(l)})^2} \quad (2.37)$$

ここで， l は粒子番号を表し， σ_D は対象の予測位置と各粒子のユークリッド距離 D_l および対象の予測位置から全粒子に対するユークリッド距離の平均値 $\bar{D}$ から算出した標準偏差を表す． σ_D の算出方法を次式 2.38 にて示す．

$$\sigma_D = \sqrt{\sum_{l=1}^p (D_l - \bar{D})^2 / p} \quad (2.38)$$

次図 Fig. 2.5.4 には，等速直線運動予測に基づく尤度関数 $L_D^{(l)}$ の概念を示す．同図中の時刻 k では式 (3.3) に基づき対象の予測位置 (i'_k, j'_k) と各粒子位置 $(i_p^{(l)}, j_p^{(l)})$ のユークリッド距離 D_l を算出している．

Fig. 2.5.4 Calculate $L_D^{(l)}$.

この運動予測尤度では，対象の運動予測に近い粒子に高い尤度を与えることで別個体との識別を図る．

次に，第二尤度として前節にて示した複数枚テンプレート中心差分方向符号照合法に基づく尤度関数 $L_c^{(l)}$ を次式 2.39 にて定義する．

$$L_c^{(l)} = \exp \left(-\frac{2 \sigma_{E_w}^2}{E_{w_l}^2} \right) \quad (2.39)$$

$$E_{w_l} = 4E_{wij} + 4 \quad (2.40)$$

ここでは，重み付き照合評価値 E_{wij} を正規化した E_{w_l} を用い，分散値 σ_{E_w} を用いて尤度計算を行う．これより，テンプレート画像との類似性を評価し，メダカが検出された粒子位置に高い尤度を与えることが可能となる．

さらに，次式 2.41 に第一尤度と第二尤度を組み合わせた二重尤度関数を定義する．これら二つの尤度を総合的に評価することにより，運動予測位置に近く，かつメダカが検出される粒子位置から高い尤度を与えることが可能となる．

$$L_l = L_m^{(l)} \times L_c^{(l)} \quad (2.41)$$

ここで，この二重尤度関数 L_l が最大となる粒子位置を対象のメダカの推定位置 (i_e, j_e) とする．この二重尤度関数 L_l は各粒子の重み付き複数枚テンプレート照合による類似性に差異がない場合，等速度直線運動予測による推定を行う．また等速度直線運動予測による対象である生物の予測位置と各粒子との距離に差異がない場合，重み付き複数枚テンプレ

ト照合による類似性を評価した推定を行うことが可能である．さらに，予測位置周辺の尤度が高くなってしまっている場合においても，重み付き複数枚テンプレート照合による類似性を評価することで対象のメダカでの尤度を高く持つことができる．逆に，重み付き複数枚テンプレート照合のみの場合は，他のメダカでも尤度が高く出てしまう．その為，二つを組み合わせることにより対象のメダカの位置を推定することができる．

2.5.4 リサンプリング

本節では，粒子のリサンプリングについて述べる．粒子のリサンプリングとは，前節にて述べた尤度計算を全粒子に対して行った後，尤度が低い粒子を消滅し尤度が高い粒子の状態量を持って復元させることであり，現時刻 k から次時刻 $k+1$ への粒子を遷移させる際の位置推定精度を向上させる．この粒子のリサンプリングを設計した二つの尤度関数のマハラノビス距離に従い実行する．マハラノビス距離とは，統計学で用いられる一種の距離であり，ユークリッド空間で定義される通常のユークリッド距離とは異なり，多変数間の相関に基づき考慮されたものである．つまり，あるデータ群における分布が正規分布に従うと仮定し，データの平均値との偏差の絶対値をそのデータにおける標準偏差で割ることで，データ分布の散らばり具合を加味した距離であるマハラノビス距離を得ることができる．このマハラノビス距離が大きいほど，正規分布の中心付近から離れているということであり確率的に低いということを意味する．そしてマハラノビス距離が小さいほど，確率的に高く正規分布の中心付近にデータが存在していることを意味する．本研究では，あるデータ群の正規分布におけるマハラノビス距離を全粒子における尤度分布へ利用し考えることにより，粒子のリサンプリングを実行する．つまり，ある各粒子に対して二つの尤度関数における尤度分布の散らばり具合を加味した各々の尤度関数のマハラノビス距離について考慮することが可能である．先に，第一の尤度関数について考える．ある粒子の尤度 D_l を σ_D を用いて標準化することで，尤度関数での尤度分布におけるその粒子のマハラノビス距離 D_l / σ_D を算出する．次に，第二の尤度関数についても同様に，尤度 d_{wl} を σ_{dw} で標準化し，尤度関数での尤度分布におけるその粒子のマハラノビス距離 d_{wl} / σ_{dw} を求める．そして，次式 2.42 のように算出した二つのマハラノビス距離の積を取ることで，各粒子のマハラノビス距離 MD_l を定義する．

$$MD_l = \left(\frac{\sigma_D}{D_l} \right) \times \left(\frac{\sigma_{dw}}{d_{wl}} \right) \quad (2.42)$$

尤度の大小関係をこのマハラノビス距離を用いて表すことにより粒子のリサンプリングを実行する．そして，各粒子は次式 2.43 に該当するものがリサンプリングされるものとして消滅させる．

$$MD_l \geq \frac{p}{1} \sum_{l=0}^p MD_l \quad (2.43)$$

これは、マハラノビス距離 MD_l が全粒子のマハラノビス距離の平均値よりも大きくなる粒子を尤度が低いものとして消滅させることを表す。そして、消滅させた粒子を尤度が高い粒子の状態量を持って復元させる。このとき、対象である生物付近に分布する粒子の尤度が高く、生物から離れる、つまり距離が遠い粒子ほど尤度が低いと考えられる。そのため、消滅した粒子を前節の尤度計算により算出された対象である生物の推定位置 (i_p, j_p) を中心に尤度関数 $L_D^{(l)}$ の粒子の分散値 σ_D の範囲の画素位置に消滅させた粒子を復元させることで粒子をリサンプリングする。これは、前節の対象であるメダカの最大遊泳力とランダムウォーク・モデルに基づく粒子の遷移に対して分散値 σ_D を与えておくことにより、メダカの加速による移動量の急激な変化に対しても周辺に粒子を遷移させる。ここで、次図にマハラノビス距離に基づく粒子のリサンプリングの概念図を示す。同図のように MD_l が式 2.43 に該当する粒子を消滅させる。この粒子のリサンプリングにより、現時刻 k から次時刻 $k+1$ で移動した対象である生物の周辺に全粒子を有効的に遷移させる。以上が、粒子フィルタによる対象である生物の位置推定である。この粒子の遷移、尤度計算、リサンプリングを時系列で繰り返すことにより対象である生物の位置推定を実施する。

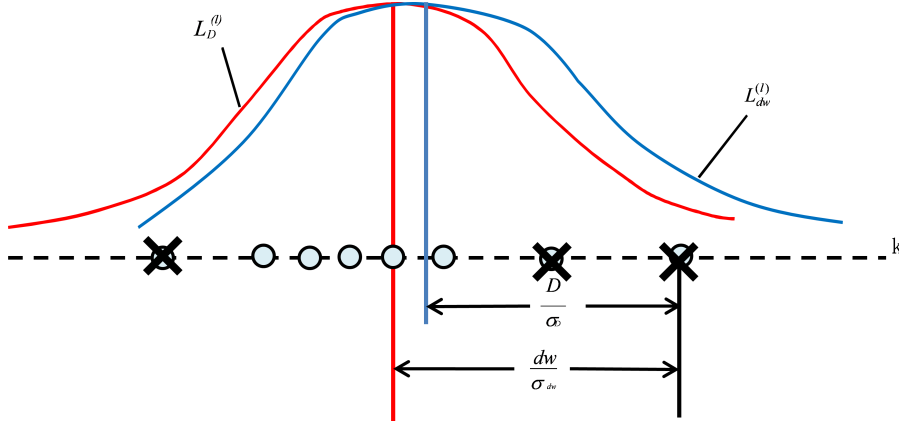


Fig. 2.5.5 Resampling.

2.6 生物の行動軌跡の生成

本節では、複数枚テンプレートを用いた中心差分方向符号照合法と粒子フィルタによるメダカの位置推定法を統合評価したメダカの遊泳軌跡生成手法を紹介する。まず、メダカの推定位置 (i_e, j_e) を中心とする探索領域を設定する [54]。そして、その探索領域内にて複数枚テンプレートを用いた中心差分照合法を適用し、平均残差絶対値 E_{wij} が小さい対象領域から順に候補領域として任意数を抽出し、候補番号を s で表す。この抽出した候補領域の中心位置と推定位置との距離に基づき距離評価値 λ_s を算出する [54]。次に、候補位置における重み付き照合評価値 E_{wij} と距離評価値 λ_s を統合した評価式を次式 2.44 に定義する。

$$E_s = \alpha \cdot \frac{2}{D_{wijs} + 1} + (1 - \alpha) \cdot \lambda_s \quad (2.44)$$

ここで、式 2.44 において照合評価値 E_{wijs} を 0 から 1 に正規化する．重み値 α を 0 から 1 の範囲で定めることで、照合評価 D_{wks} と距離評価 λ_{ks} に重みを与えた評価が可能となる．また、 α は追跡対象の種類等に応じて適宜設定し、高精度な対象の位置決定を可能とする．式 2.44 により得られた評価値 E_s が最小となる候補位置をメダカの存在する位置として定め、時系列で繰り返し対象のメダカの位置決定を行い、メダカの遊泳軌跡の生成を行う．

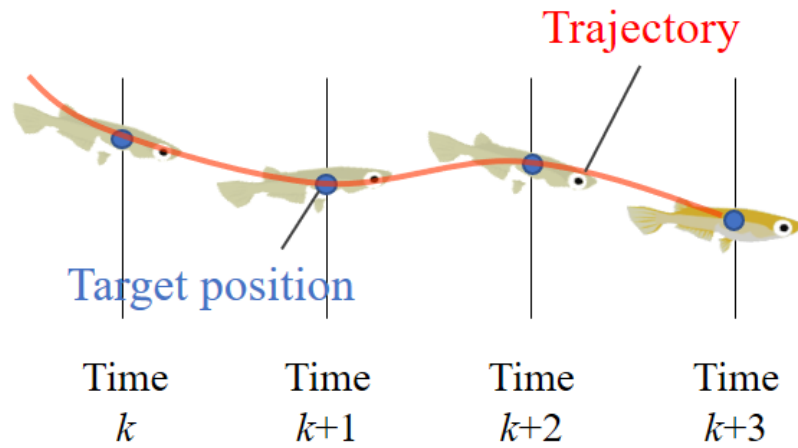


Fig. 2.6.1 Trajectory of medaka.

第3章 メダカの行動追跡実験

3.1 撮像条件

本節ではメダカ (*Oryzias latipes*) の群れ行動を観察するための実験のセットアップを記す．今回、直径 460mm の白いタライの中央に直径 240mm の茶碗を逆さに配置し、水深が約 40mm となるよう水を注入後、8 匹のメダカ（オスとメスの割合は同等）を放出した．対象としたメダカはいずれも生後 6 ヶ月の成魚であり、体長はおよそ 30mm である．また、水槽の形状をドーナツ状とした目的はメダカの群れ行動をより顕著に発現させるためである．そして、メダカが遊泳する様子を水面から約 1400mm（水面からレンズまでの距離を指す）離れた上部位置に設置したビデオカメラ（SONY : HDR-HC9）にて撮影した．撮影の際、対象の行動が鮮明に観察できるようにカメラと同等の位置に白色の LED（サイズ : 107mm × 225mm）を 2 つ設置し、十分な光量を確保した．このとき、レンズには水面における照明光の鏡面反射の影響を極力軽減するため偏光板（SONY : VF-37CPKS）を装着し、カメラの撮影モードはデフォルトの設定を使用した．ここで、取得画像のサイズは 720 × 480 ピクセルである．

3.2 複数個体の行動追跡

提案手法による複数匹のメダカの同時行動計測を検証するため、ドーナツ状の水槽にメダカ 8 匹を放ち、これらに対し追跡および遊泳軌跡の抽出を実施した．使用した機器や撮影環境、対象としたメダカについては前述の通りである．実験条件を以下に示す．画像枚数 1800 枚、方向符号閾値 $\Gamma = 2$ 、テンプレート枚数 $n=5$ 枚、テンプレートサイズ 9×9 ピクセル、 $A=8$ ピクセル、重み値 $\alpha=0.84$ とする．これらのパラメータは追跡する対象（個体毎の意ではなく、対象とする生物やその種類を指す）により事前実験を通して導く必要がある．方向符号の閾値は対象の持つテクスチャ特徴や画像中に存在する対象外の物体の数（量）を考慮して設定する．この値が低いほど、より細かな輝度勾配を特徴として扱えるが、対象外のノイズを増幅させる場合があるため環境や対象に合わせて設定することが重要である．次に、照合に使用するテンプレートの枚数であるが、これは対象の行動および処理時間を考える必要がある．アクティブに動く生物を対象とする場合には、テンプレート枚数を増やす必要があるが、その処理コストがかかる．メダカの場合には、方向転換に 5 フレーム分程度の時間を有す場合があるため、それらを考慮し、テンプレート枚数を 5 枚とすることが適当であると判断した．テンプレートのサイズは、後述するメダカの真値位置を中心とし、メダカの頭部全体が収まるサイズの矩形領域を設定した際のサイズをテンプレートのサイズとした．探索領域は、テンプレート照合の際の処理コスト削減のために設定する．実験を通し、テンプレートサイズの 2 倍以上の領域を探索領域とし

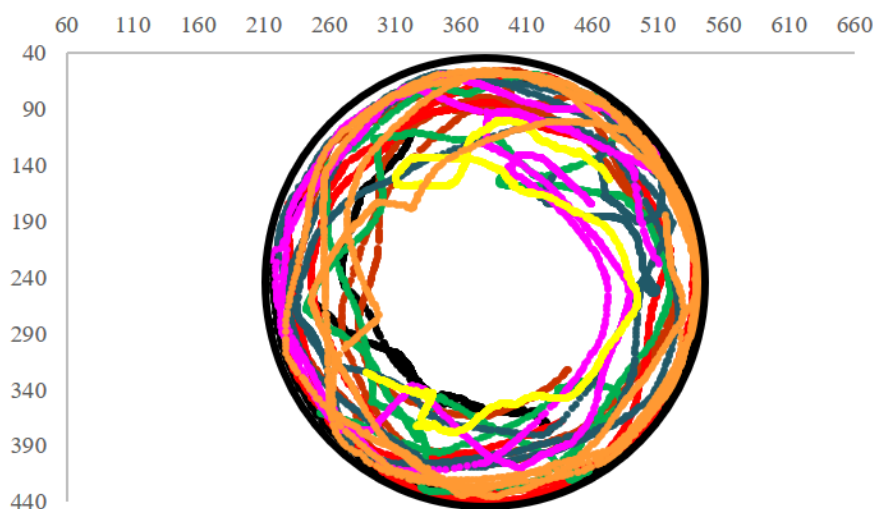


Fig. 3.2.1 Trajectories.

て設定すれば、精度を低下させることなく、処理コストを抑えた照合が可能であるという結果を得たため、上記サイズを用いている。粒子数は最大移動量 A に依存する値であり、画像中での対象のサイズと最大遊泳力を考慮し設定する必要がある。本実験に使用した動画像は前節で述べたセットアップで撮影した全 1800 フレームである。次図に全フレームを通して生成した 8 匹のメダカの遊泳軌跡を個体毎に色分けし表記する。実験の結果、全てのフレームにおいて各個体を誤識別なく検出できた。また、各時刻における検出位置を連続的に見ることで、提案手法により 8 匹のメダカの遊泳軌跡の生成が可能となることがわかる。次に、生成した遊泳軌跡のデータに従い、次図 Fig. 3.4.5 に各個体間の個体間距離ヒストグラム、Fig. 3.4.4 に各個体間の速度ヒストグラムを示す。同図において、横軸は 50 ピクセル毎における個体間距離を示し、縦軸は横軸に対応した頻度を意味する。今回の環境の場合、直径 460mm のタライが画像上では 400 ピクセルで表される。すなわち、個体間距離の取り得る最大の値は 400 ピクセルということになる。

本データを算出した目的は、“魚の群れ”を定量的な値を用いて定義するための一助とするためである。Fig. 3.4.5 において、最長の距離 400 ピクセルに対し距離 350 ピクセルが最も多く出現したことは、メダカ 8 匹の集団は群れを成して遊泳していない可能性が高いことが示唆される。さらに、次図では、横軸を 50 ピクセル・ s^{-1} 毎の遊泳速度で刻み、縦軸は速度に対応した頻度を表す。速度ヒストグラムからはこの集団が通常 0~100 ピクセル・ s^{-1} の速度で遊泳しており、個体間での相互作用等により速度が変化した際に 150 ないし 200 ピクセル・ s^{-1} の速度と成ることが考えられる。集団内でのメダカの個体間距離や遊泳速度はメダカの行動を定量的に評価し、解析するために貴重なデータであり、行動パターンの数値化が期待できる。すなわち、提案している遊泳軌跡生成法は、メダカの行動メカニズムや個体間相互作用を読み解く上で有意義なデータを導出するためのツールとして非常に有効であると言える。

3.3 バーストスイミング時の行動追跡

本節では、第2章で述べたセットアップとは別の環境にて撮影した動画像に対する提案手法の有効性を検証した。さらに、ここで対象のメダカは稚魚であり、シャーレ内をバーストスイミングする遊泳動画像を用いる。バーストスイミングとは、急激な速度変化および方向転換を含む遊泳のことを意味する。実験条件を以下に示す。30 fps で撮影した 599 枚の時系列画像を入力し、画像サイズ 320×320 ピクセル、方向符号閾値 $\Gamma = 20$ 、テンプレート枚数 5 枚、テンプレートサイズ 21×21 ピクセル、探索領域サイズ 45×45 ピクセル、粒子数 300、最大移動量 $A = 47$ ピクセル、重み値 $\alpha = 0.84$ と設定した。ここで、前節で示した実験条件と一部パラメータの値を変更している意図は、各種パラメータは撮影環境に依存し、その値により検出精度に大きく影響するためである。

Fig. 3.3.1 に提案手法により得られた遊泳軌跡の結果を示している。同図 からバーストスイミングを伴う急激な方向転換及び速度変化が生じたときのメダカ稚魚の遊泳軌跡が描写されていることがわかる。さらに、1 フレーム間の移動平均量が 25 ピクセル程度であることが解析できる。さらに、Fig. 3.3.2 に全フレーム通して得られる遊泳軌跡を示す。次に、同図の提案手法の遊泳軌跡と真値を比較した結果を Fig. 3.3.3 に示す。今回、真値は目視にて設定し、背側から対象を見た際の両眼を結んだ直線と先に定義した体軸の交わる点を対象の位置として定義した。さらに、比較誤差は真値と遊泳軌跡から導出したメダカ稚魚の位置のユークリッド距離差を意味する。ここで、Fig. 3.3.3 中の縦軸、横軸は各々画像座標の i 軸、 j 軸である。このとき、生成した遊泳軌跡は真値と同等の軌跡を表していることがわかる。さらに、平均誤差は 4 ピクセルである。誤差実寸は、1 ピクセルが約 0.14mm のため、約 0.56mm となる。以上より、高速移動であるバーストスイミングを伴い、速度及び移動方向が急激に変動するメダカに対しても提案手法は高精度に軌跡生成が可能であり、生成された遊泳軌跡からメダカの行動分析が可能であることを明示した。

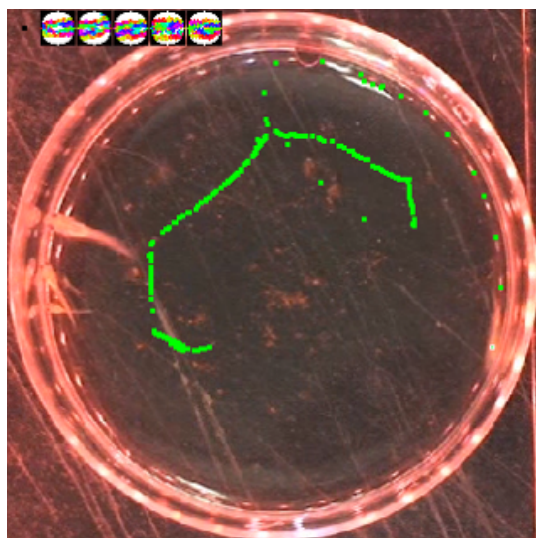


Fig. 3.3.1 Result($k=245$).

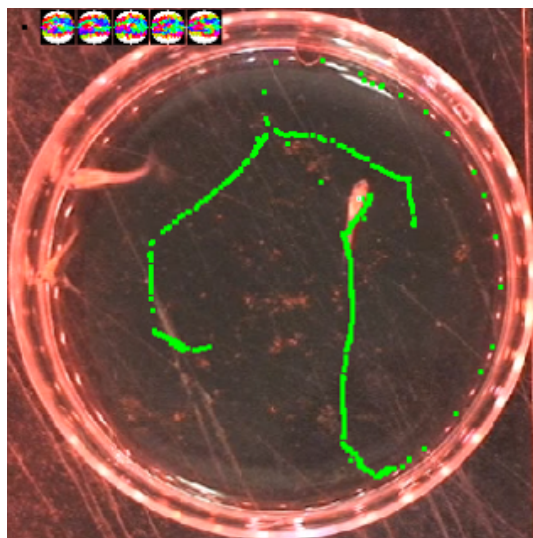


Fig. 3.3.2 Result($k=599$).

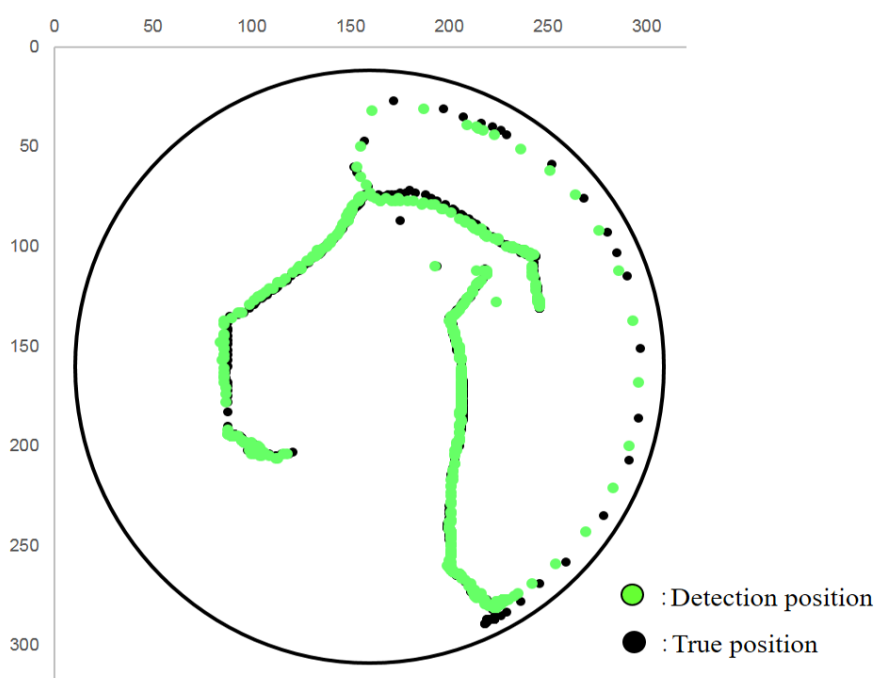


Fig. 3.3.3 Trajectories.

3.4 遊泳軌跡に基づく行動評価値の算出

3.4.1 速度・加速度の算出

本節では、毎時刻における各個体 N の速度・加速度の算出方法について述べる。時刻 k における個体 N の検出位置を (i_k^N, j_k^N) とし、時刻 $k-1$ における個体 N の検出位置を $(i_{(k-1)N}, j_{(k-1)N})$ とする。対象のフレーム間における移動速度 d_{kN} はこれらを用いて次式 3.1 にて算出する。

$$d_{kN} = \sqrt{(i_k^N - i_{(k-1)N})^2 + (j_k^N - j_{(k-1)N})^2} \quad (3.1)$$

次に、移動距離 d_k^N をサンプリング時刻 ΔT で割ることで時刻 k における対象の速度 v_k^N を 3.2 にて定義する。

$$v_{kN} = d_{kN} / \Delta T \quad (3.2)$$

更に、対象の速度 v_{kN} をサンプリング時刻 ΔT で割ることで時刻 k における対象の加速度 a_{kN} を 3.3 にて定義する。

$$a_{kN} = v_{kN} / \Delta T \quad (3.3)$$

これらの式を用いることで各時刻における対象の移動距離及び速度・加速度の算出を可能とする。

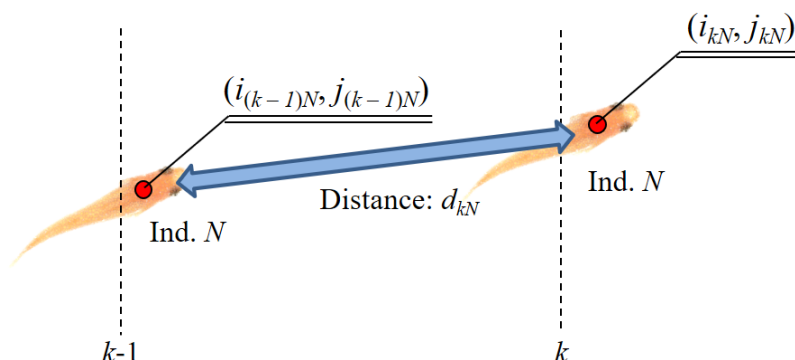


Fig. 3.4.1 Distance between each individuals.

3.4.2 速度・加速度の算出

本節では、毎時刻における対象と各個体との個体間距離の算出法について述べる。メダカ系統の群れ行動における個体間距離の算出は、群れ行動解析を行うにあたり重要となる。ここで、時刻 k における対象の位置を (i_k, j_k) とし、他の個体 N の位置を (i_{kN}, j_{kN}) とする。そして、二匹間の距離 d_{kN} を次式 3.4 に従い導くことで対象と各個体の個体間距離を算出する。

$$d_{kN} = \sqrt{(i_k - i_{kN})^2 + (j_k - j_{kN})^2} \quad (3.4)$$

次図 Fig.5.2 には式 3.4 に基づき各個体の個体間距離を算出している様子を示す。ここでは、対象 1 匹に対し他の全ての個体までの距離を算出している。これを重複がないよう全ての個体に対し行う。

Fig. 3.4.2 では、メダカ、ネオンネオンテトラの区別はせず全体に対し個体間距離の算出を行っている。下図 Fig. 3.4.3 には種族毎での個体間距離の算出概念を示す。検出・追跡を開始する前に対象の初期座標を与える際に、メダカとネオンテトラの区別をつけて初期座標値を与えることにより、各時刻での種族毎の個体間距離の導出も可能となる。これにより、全体としての群れと種族毎での群れを別々に考えることができる。同図において青色で示した矢印はメダカ同士の個体間距離、黄色で示した矢印はネオンテトラ同士の個体間距離を表している。

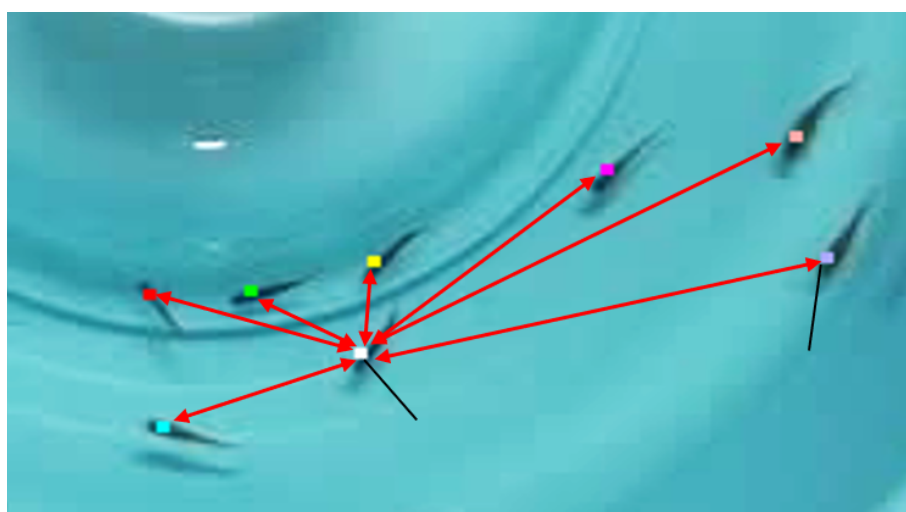


Fig. 3.4.2 Distance between one and others.

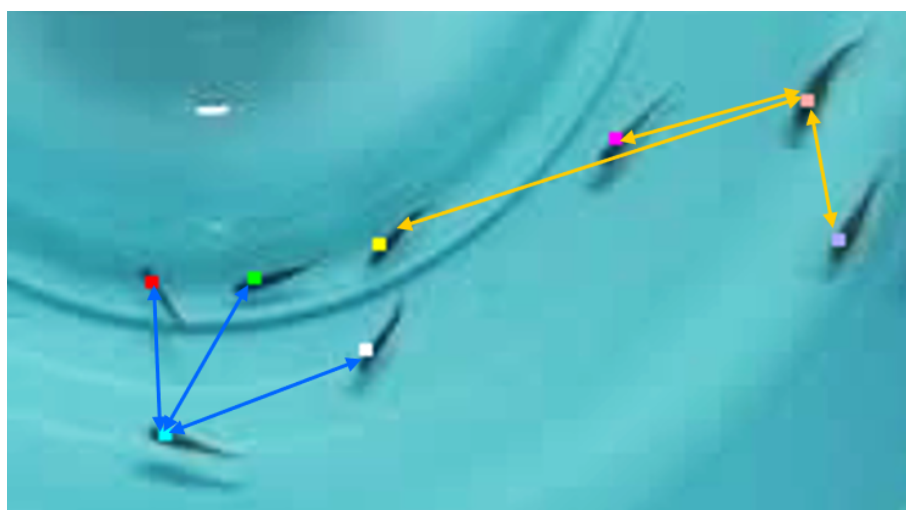


Fig. 3.4.3 Distance in genus.

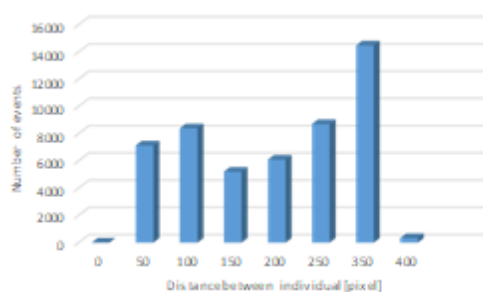


Fig. 3.4.4 Histogram of speed.

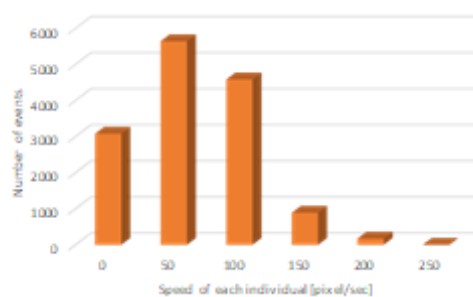


Fig. 3.4.5 Histogram of distance.

3.4.3 残差絶対値の条件改良による効果

本節では、重み付けを行った複数枚のテンプレートを用いた中心差分方向符号照合法において、2.2.4 節にて示した式 (2.19) のようにメダカ系統の検出に特化する為に残差絶対値算出条件の追加を行ったことによる効果を示す。従来の手法では、テンプレートのある画素が持つ方向符号値 a 及び対象画像のある画素が持つ方向符号値 b が共に有効符号を持つ場合、 a と b の残差絶対値を算出し、 a と b がどちらか一方でも無効符号である場合は、残差絶対値の取り得る期待値 $N/4$ を与えるという条件であった。式 (2.19) にて示した条件では、 a と b が共に有効符号である場合の残差絶対値算出方法は同様であるが、 a と b が共に無効符号である場合は $N/4$ を与え、 a と b のどちらか一方が無効符号である場合は $N/4$ を与えるという条件であった。

次図には、従来手法と提案手法を用いて算出した重み付き照合評価値の出現分布を示す。Fig. 3.4.6 には時刻 k での入力画像、3.4.7 には入力画像を方向符号化した画像を示す。この方向符号画像に対し時刻 $k-1$ 以前のテンプレートを用い重み付き複数枚照合評価値を算出する。ここで、従来手法を用いて算出した残差絶対値を用いて導出した重み付き複数枚照合評価値を Fig. 3.4.8 に、提案手法を用いて算出した残差絶対値を用いて導出した前節の式 2.15 にて示したようにテンプレートと対象画像の対応する画素間における中心差分方向符号の残差絶対値は重み付き複数枚照合評価値に影響を与える。Fig. 3.4.8 では、重み付き複数枚照合評価値の大きさ毎に色付けを行い可視化したものである。両図を比較すると、背景の評価値の大きさと対象の検出位置周辺の評価値の大きさに差があるのが見て取れる。このことから、提案手法は従来手法に比べ、背景を低く評価し対象の検出領域周辺を高く評価することで背景と対象の評価値の差を明確にしている。Fig. 3.4.9～Fig. 3.4.12 には、全 239 フレームの動画に対し従来手法と提案手法を用いて行った対象の検出・追跡実験の結果を示している。従来手法を用いた実験結果である Fig. 3.4.9 では、時刻 $k=135$ で検出が失敗しているのに対し、提案手法を用いた実験結果である Fig. 3.4.10 では、全ての時刻において検出・追跡が行えている。これより、残差絶対値算出条件を追加することで、メダカ系統に特化した、より高精度な検出・追跡が可能であることが言える。



Fig. 3.4.6 Original image



Fig. 3.4.7 OC image.

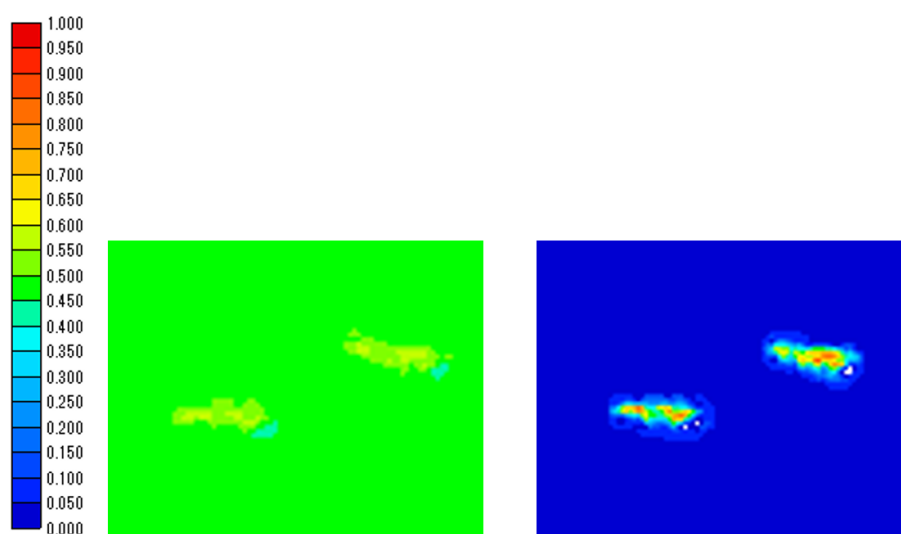


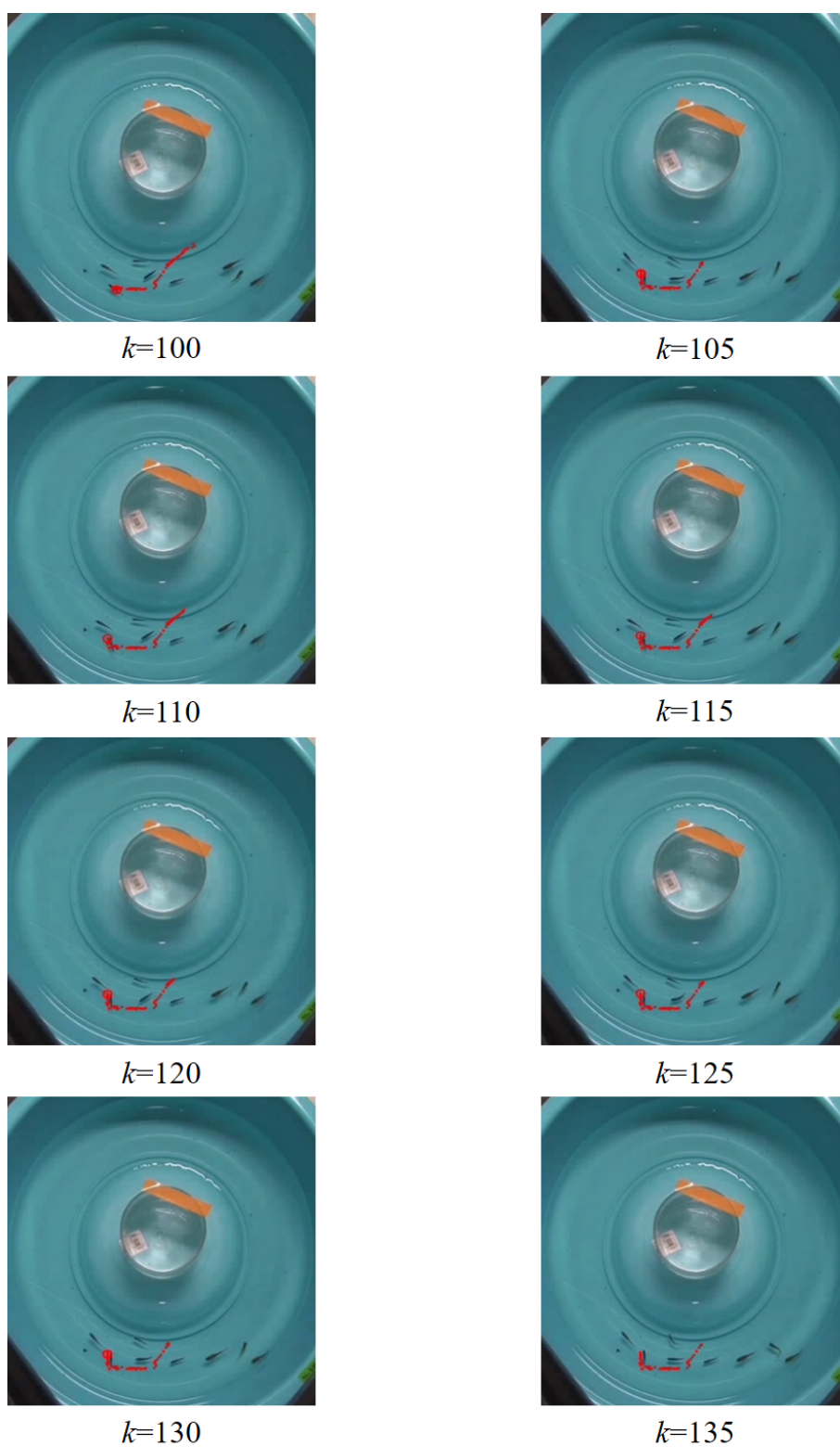
Fig. 3.4.8 Evaluation value.

3.4.4 テンプレート回転角導出法改善による効果

本節では、重み付き複数枚テンプレートを用いた中心差分方向符号照合法におけるテンプレート回転において、回転角導出法を改善したことによる効果を示す。2.2.1 節における式 (2.8) にてレーダーチャートのヒストグラム領域に対する慣性主軸を用いることでテンプレートの回転角を導出する方法を述べた。従来では、テンプレートと対象画像の方向符号の出現頻度を基にヒストグラムを作成し、それらを交差法にて比較することで方向符号の最頻出値に軸を生成し、軸の角度 ϕ をテンプレート回転角としていた。しかし、この方法では角度の取り得る値が量子化幅 $\Delta\theta$ に依存し、 $\Delta\theta = \pi/8$ の場合では 16 通りとなる。そのため、対象同士が近接する際に誤認識が生じる場合がある。そのため、本論文では 2.2.1 節にて述べた量子化幅 $\Delta\theta$ に依存しない手法を用いている。次図 Fig.6.6 には、実験に用いた入力画像を示す。ここでは近接を伴う 2 匹の個体を対象に実験を行った。Fig.6.7 には従来のテンプレート回転角導出法を用いた対象の検出・追跡結果を示し、Fig.6.8 には慣性主軸角度に基づく回転角導出法を用いた対象の検出・追跡結果を示す。Fig.6.7 では、対象同士が近接する際 (時刻 $k=109$) にて対象の誤認識が生じているのが分かる。一方で、Fig.6.8 では、全ての時刻にて誤認識なく対象の検出・追跡が行えている。これより、テンプレート回転角導出法を改善することにより対象同士の近接時に対し、従来の手法に比べロバストな検出・追跡の実施が可能であると言える。

3.4.5 各対象の遊泳軌跡の抽出及び行動評価値の算出

本節では、実際にこれまでに述べた手法を用いて各対象の検出・追跡を実施した結果についてまとめる。また、遊泳軌跡より前節にて述べた手法を用いて各個体における行動評価値の算出を行った。次図には、実際に遊泳軌跡を生成した出力画像を示す。同図より、各個体の遊泳軌跡が誤検出なく出力できているのが分かる。

Fig. 3.4.9 Experiment result($k=100-135$).

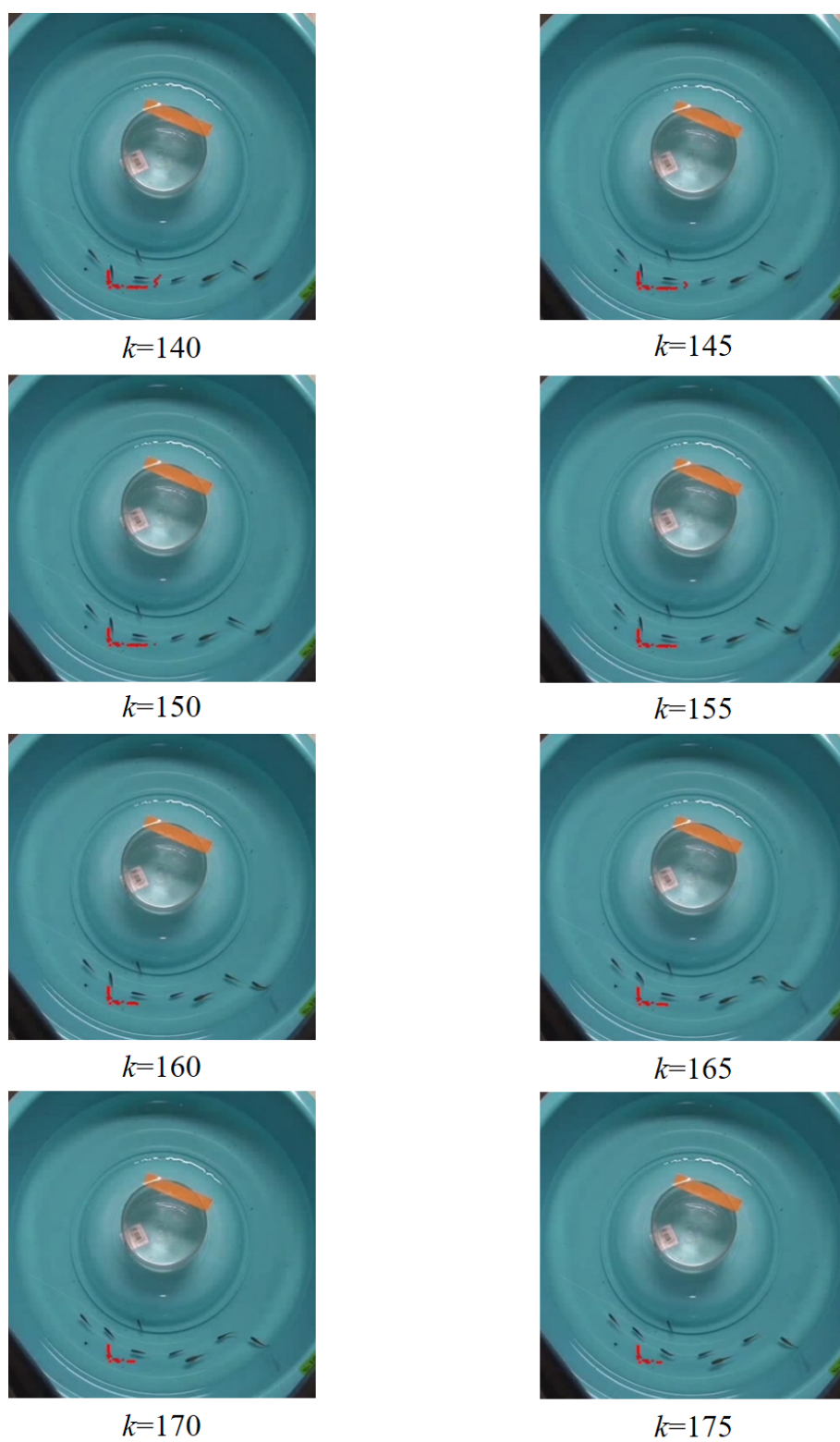
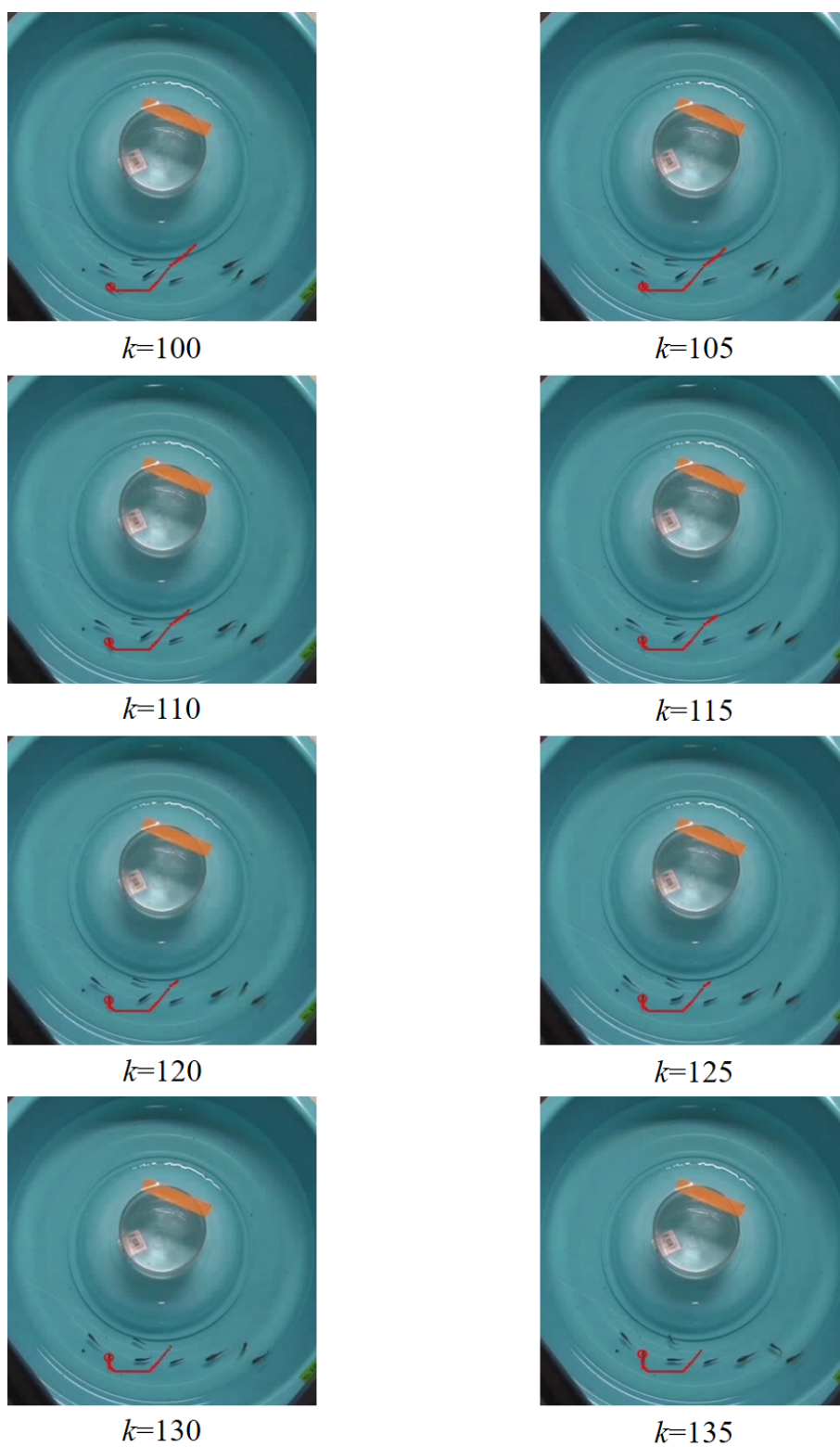


Fig. 3.4.10 Experiment result($k=140-175$).

Fig. 3.4.11 Experiment result($k=100-135$).

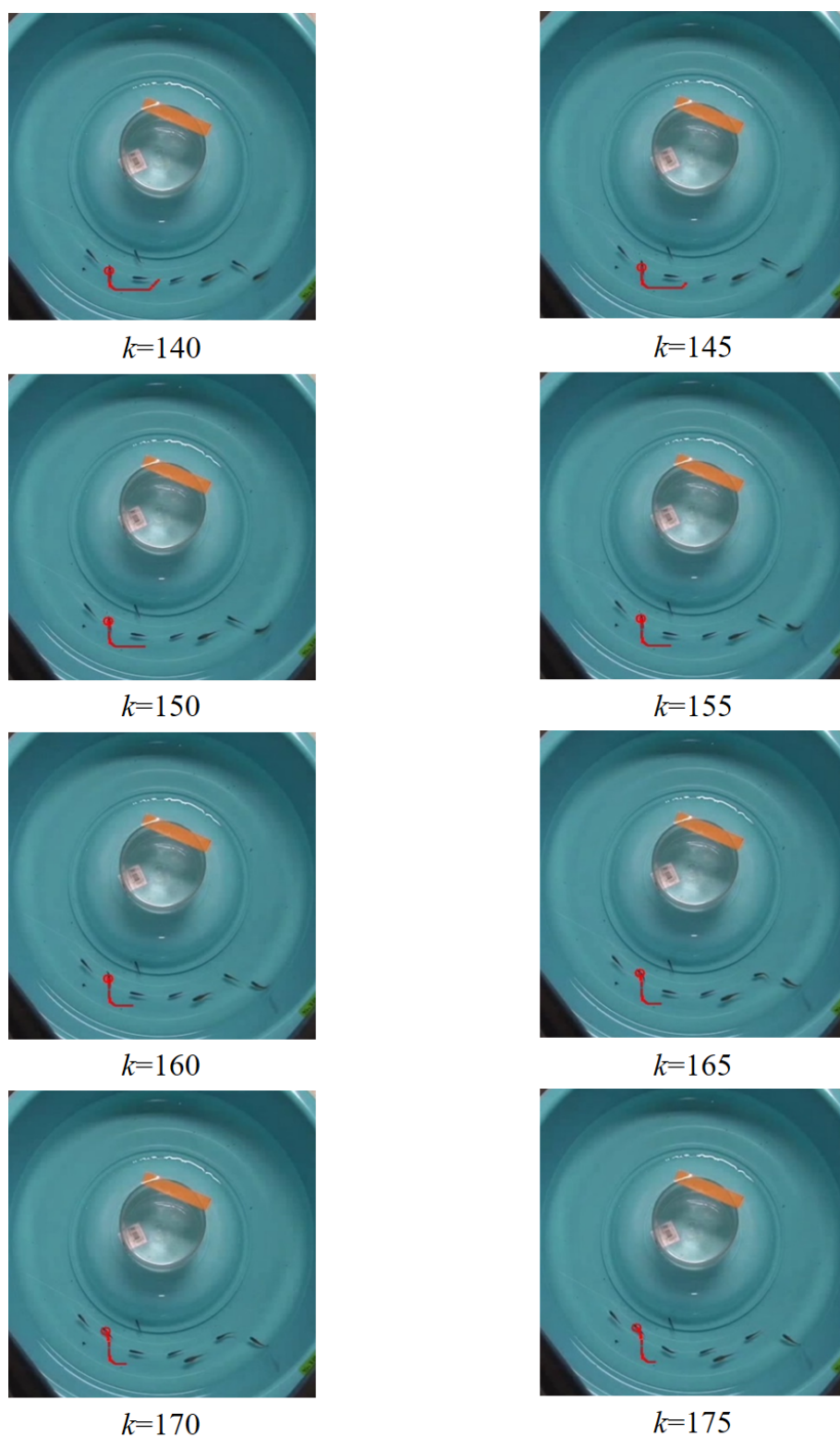


Fig. 3.4.12 Experiment result($k=140-175$).



Fig. 3.4.13 Original image.

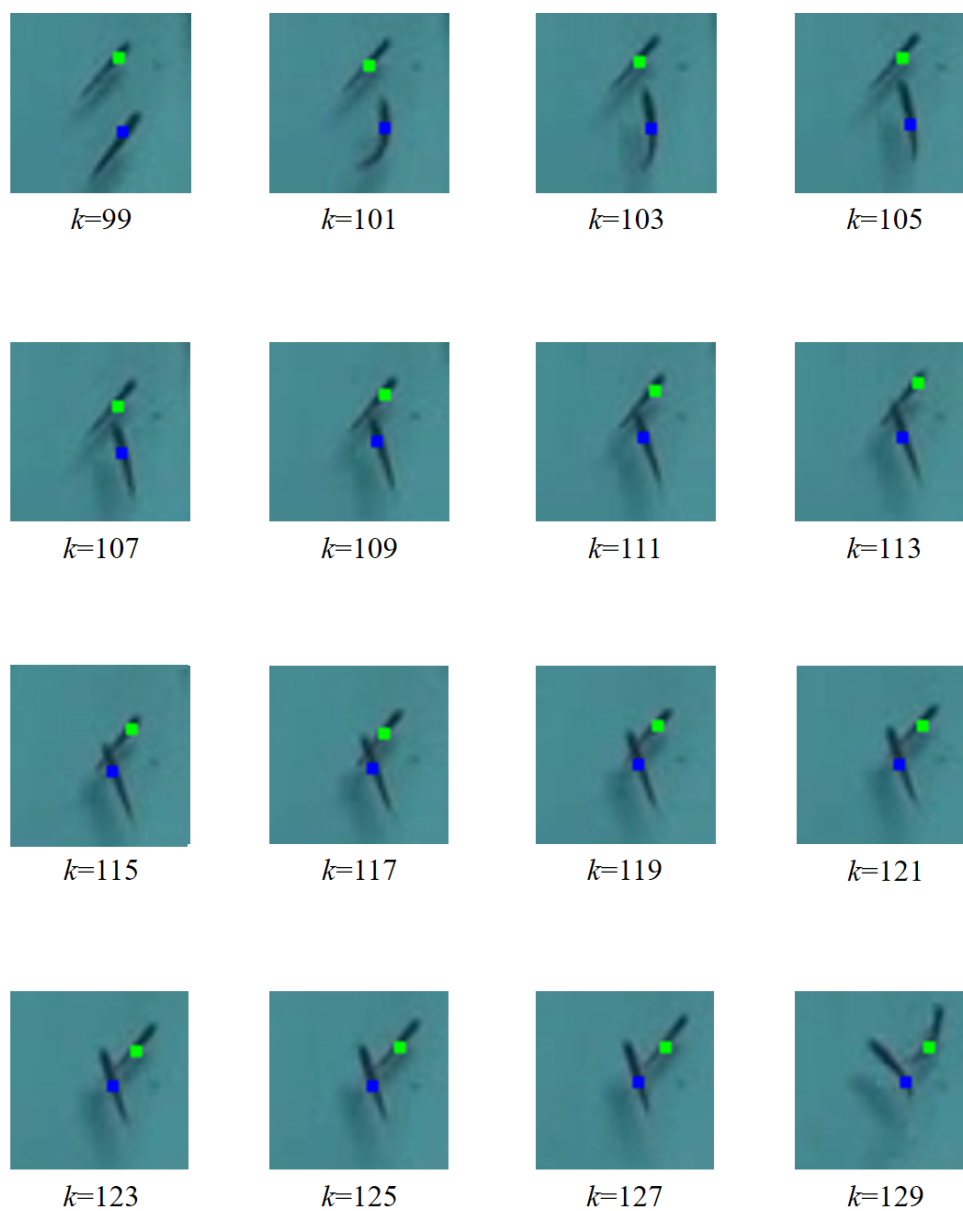


Fig. 3.4.14 Results by using previous method.

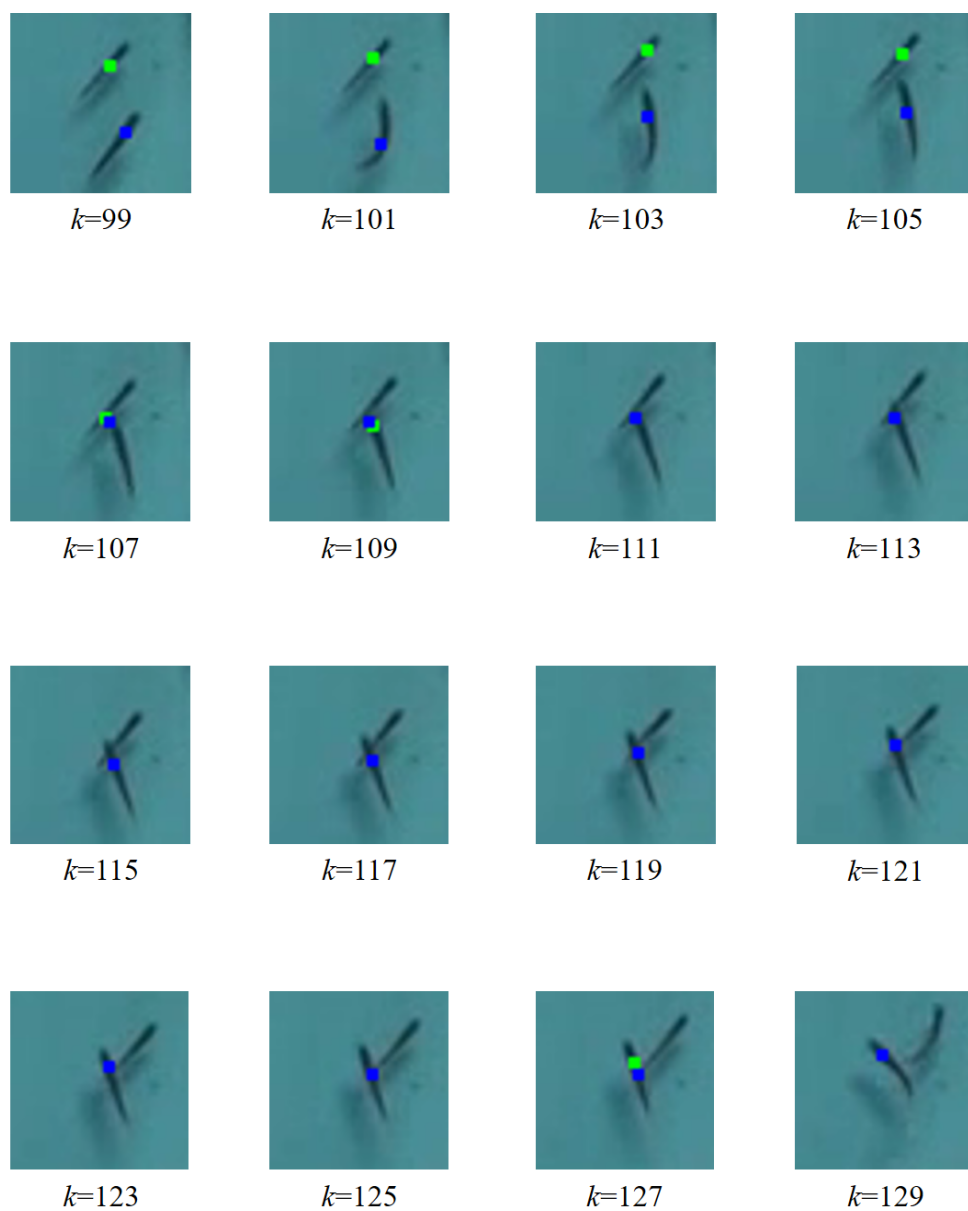


Fig. 3.4.15 Experiment result(Results by using proposed method).

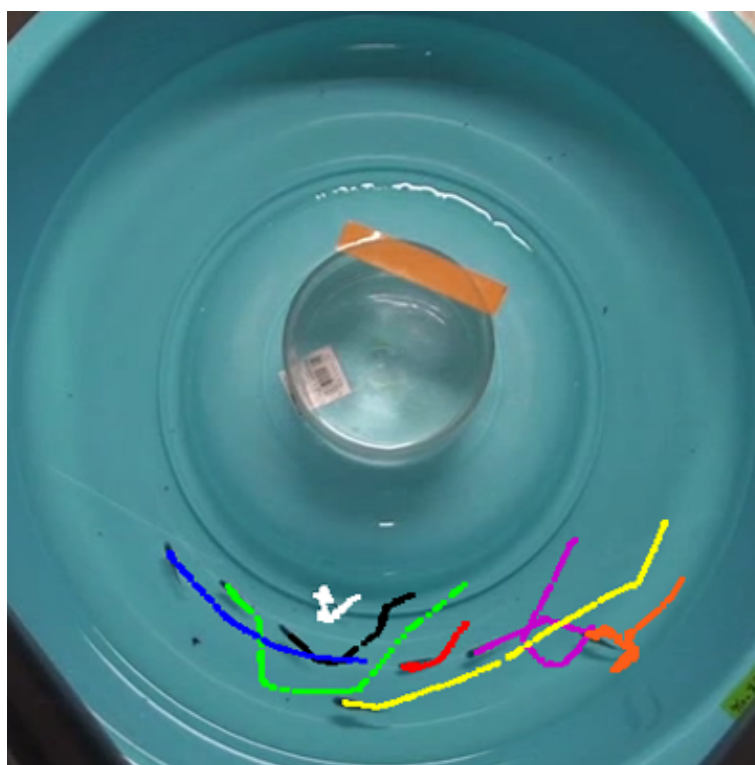


Fig. 3.4.16 Experimental result.

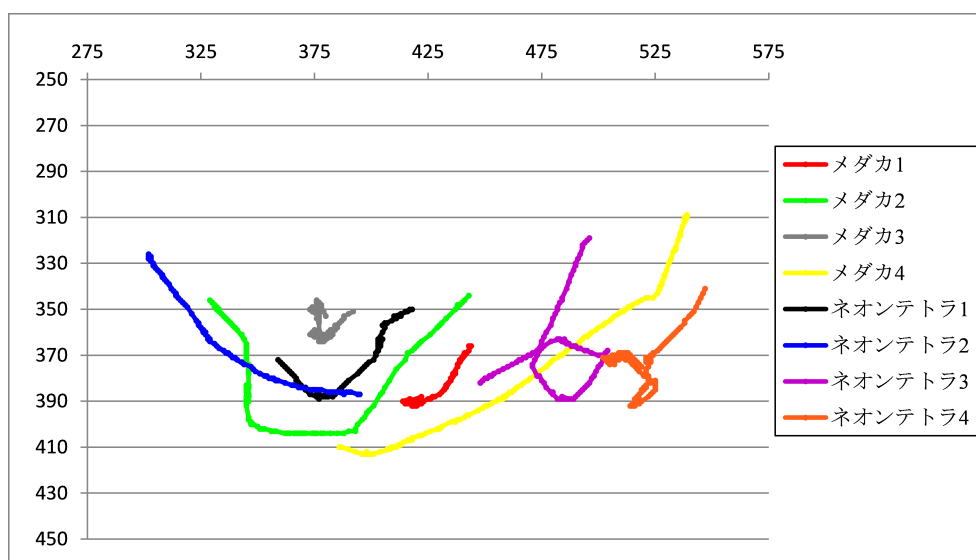


Fig. 3.4.17 Trajectories of each target.

次図 Fig. 3.4.18-Fig. 3.4.20 には各個体の個体間距離の頻度分布を示す。Fig. 3.4.18, Fig. 3.4.19 は種族毎の個体間距離, Fig. 3.4.20 はメダカ系統全体に対する個体間距離の頻度分布を示している。これらの行動評価値を用いることで群れ指標の構築が期待できる。

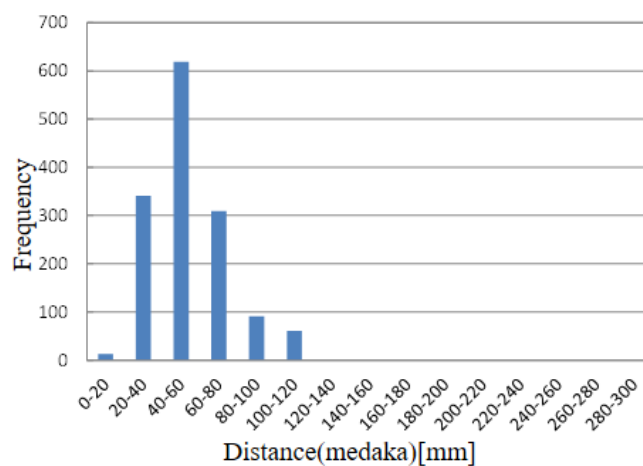


Fig. 3.4.18 Histogram of distance(medaka).

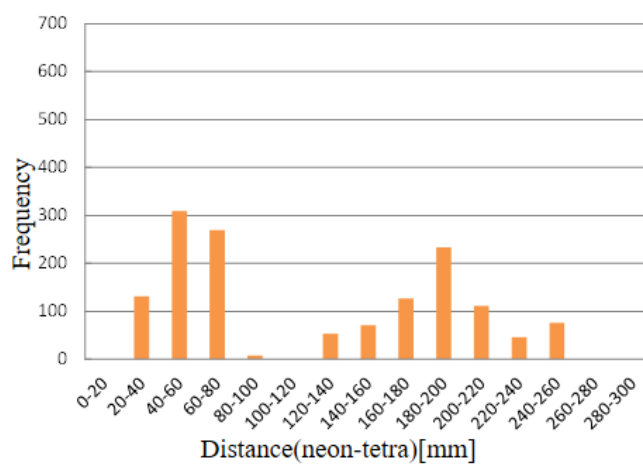


Fig. 3.4.19 Histogram of distance(neon-tetra).

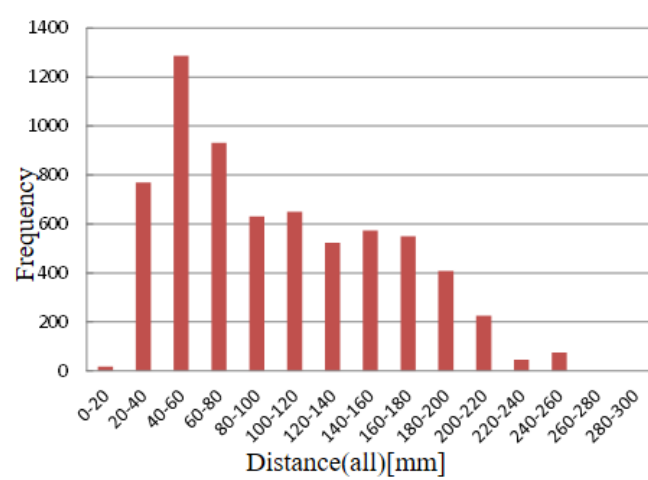


Fig. 3.4.20 Histogram of distance(all).

第4章 アギトアリの大顎の超高速運動計測手法

4.1 概要

種が繁栄するためには他種を”捕食”する必要がある、反対に捕食されないための”保身”も重要な要素であるといえる。生物の多くは進化の過程を経て、この捕食・保身を目的とした身体の機能や構造を獲得してきた。例えば、運動スピードはいずれにおいても重要なファクターである [55]。当たり前であるが、被食者より早く行動できれば捕食でき、捕食者より早く行動できれば逃避することができる。また、社会性を取り入れることも有効な手段である。生物の中には群れを成し生活するものも多く、これは生存率の向上、そして生殖においても有利に働くと考えられる。本章では、生物の付属肢に着目し、上記の用途で超高速運動で駆動する部位の計測に向けた手法構築について議論を展開する。

4.2 高速運動解析の有用性

近年のセンサ技術の向上により、ヒトの視覚の性能をはるかに超えたスピードを伴う行動を記録できるようになった。超高速運動を発現する生物はヒトより小さい生物であり、一般的に知られているもので、シャコが放つパンチやアギトアリと呼ばれるアリが持つ大顎の閉じる動作が考えられる。これらは生物学分野において興味深いテーマであり、機構を解明することは大変有用である。前者に関しては先行研究 [56] にて報告がなされており、説明はそちらに譲る。本研究では、後者のアギトアリを対象と設定する。これらの小さい生物は、非力な筋肉にも関わらず超高速度を発生させることができる。この仕組みは、我々の身の回りに多くなく、運動機構が解明に至れば我々の社会にとっても有意義な知見となることが期待される。

4.3 高速度撮影と生じる課題

ハイスピードカメラでの撮影は高速で運動する物体を捉えることができる反面、いくつかの課題を孕んでいる。まず、高速なシャッタースピードに起因する光量低下の問題である。一般的な室内照明下では光量が不足し非常に暗い画像が出力される。さらに、今回対象とするアリは体表の明度値が低いことから、背景との差別化を図るためには別途照明を用意する必要がある。

次に、出力画像中に生じるノイズによる画質低下の問題である。これは、カメラに使用されている CMOS センサの素子が低光量下において不安定となる特性のためで、撮影環

境の変更による改善は見込めない。また、アリの Strike フェーズを撮影すると、この問題の影響から大顎の多重像（以降、ゴーストと呼ぶ）が発生する。超高速で運動する大顎を高精度に計測するためにはこれらの課題に対処することが求められる。

4.4 アギトアリ属の大顎の運動計測

4.4.1 研究対象

アギトアリ属 *Odontomachus* はハリアリ族の中の一属であり、日本に棲息するアギトアリ *O. monticola* やアギトアリ *O. kuroiwae* もこれに属す。これらのアリは体長 10mm 前後とアリ科の中では大型の種であり、Trap-jaw と呼ばれる大顎を持つことから”Trap-jaw ants” と呼称される。大顎は主に獲物の捕獲や敵からの逃避行動のために使用され [57-61]、頭部内部にある内転筋と外転筋、およびそれらに付随する腱によって開閉動作をすることが知られている [62-64]。さらに、大顎の根元にはラッチ機構があり [65]、大顎を約 180 度開いた状態（閉じた状態を 0 度とし、両顎の駆動角度の総和を指す）でラッチによりロック状態となり、ロックが外れた瞬間に大顎を超高速で閉じることができる。1993 年に Gronenberg らは、この運動速度は動物界最速であると報告している。

近年の計測技術の発達に伴い、Trap-jaw の駆動に係る組織の解明 [66-70] や簡易運動モデルの検討 [71-73] がなされているが、超高速運動を生成するメカニズムについて未解明な点が多い。非力な筋肉で超高速運動を生成する仕組みが解明に至れば、生物学において有用な知見となることに加え、工学分野においても産業機械やロボットへの小型かつ高出力の新たな機構の導入が期待できる。我々の研究グループでは、上記 2 種のアリを研究対象と定め、ハイスピードカメラや X 線マイクロ CT を用いた計測を実施している [74-76]。ハイスピードカメラは大顎の超高速運動を撮影することを目的とし、X 線マイクロ CT はアリの骨格構造や内部組織の位置、形状、および大きさの把握を目的とする。

ハイスピードカメラは高速で運動する物体の撮影に長けたカメラであるが、一方で、高速なシャッタースピードに起因する光量低下や一般的なカメラに比べノイズが増加するために生じる画質低下が課題となる。以上を踏まえ、本稿ではハイスピードカメラにて撮影した画像群より大顎部を抽出し、さらに回転照合を実施する方法について提案する。さらに、提案手法を用いて各フレームにおける大顎の回転角を算出することを本稿の目的と設定する。

4.4.2 Trap-jaw

本章では、大顎の開閉運動の仕組みについてより詳細に説明する。図 3 に示すように大顎の超高速運動は (1)Open, (2)Load, (3)Strike の 3 つのフェーズによりなるサイクルをもつ。まず、大顎が閉じた状態（初期状態）から内転筋が収縮し大顎が開く (Open)。その際、大顎の根元にあるラッチによりロックされる。さらに、ロック状態において外転筋が収縮することで外転筋と大顎に付着する腱に張力が発生する (Load)。そして、ロックが外れると同時に大顎が超高速で閉じる (Strike)。Load フェーズ中では、外骨格に歪みが生じるほどの力が溜められており、この復元力も超高速運動に寄与していると考えられる。

Fig. 4.4.1 *O. monticola*.Fig. 4.4.2 *O. kuroiwae*.

また, Strike フェーズでは基本的にどちらか一方の大顎が先に閉じ, その後もう片方が閉じる。

4.4.3 アプローチ

内転筋, 腱および外骨格のそれぞれの駆動力源の高速回転運動に対する寄与の仕方を総合的にモデル化するために, まず頭部内部の組織構造を知る必要がある. ここでは X 線マイクロ CT による 3D 断層画像データの取得およびそのセグメンテーションによるアプローチをとる. 図 3 は, 個体の内部組織をセグメンテーションし, 色分けした解析例である (Amira-6.0 を用いた手動セグメンテーション). ここでは, 頭部の外骨格内外部の構造理解のためにオキナワアギトアリと外形および内部構造が似ているアギトアリ (*Odontomachus monticola*) に対して解析を実施した. これにより, アギトアリ頭部の詳細な 3 次元構造を取得することが可能となった.

4.5 運動モデルに基づく構造解析

4.5.1 新規仮説の導入

外骨格の歪みを多数の個体において観測すると, Loading 状態における口蓋部の「へこみ」が復元する (大顎部を押し戻す) ことによって高速回転運動に貢献していると考えられる. トラップ・ジョーの超高速運動に貢献する駆動源としてまず腱張力 F_t があることは知られている. 本研究においては, これに加えて外骨格の弾性復元力 F_e の貢献に注目したい. 運動モデルとして, 腱および外骨格の復元力をそれぞれ相当する弾性係数をもつばねの引張力および押付力と考え, 次図に示すようなモデルを想定する. ここで, x_1, x_2 は Open-Load 間における各ばね長の変位を示し, k_1, k_2 は各ばねのばね定数を示す. これらを用いて F_t と F_e は次式で表される.

$$F_t = k_1 x_1 \quad (4.1)$$

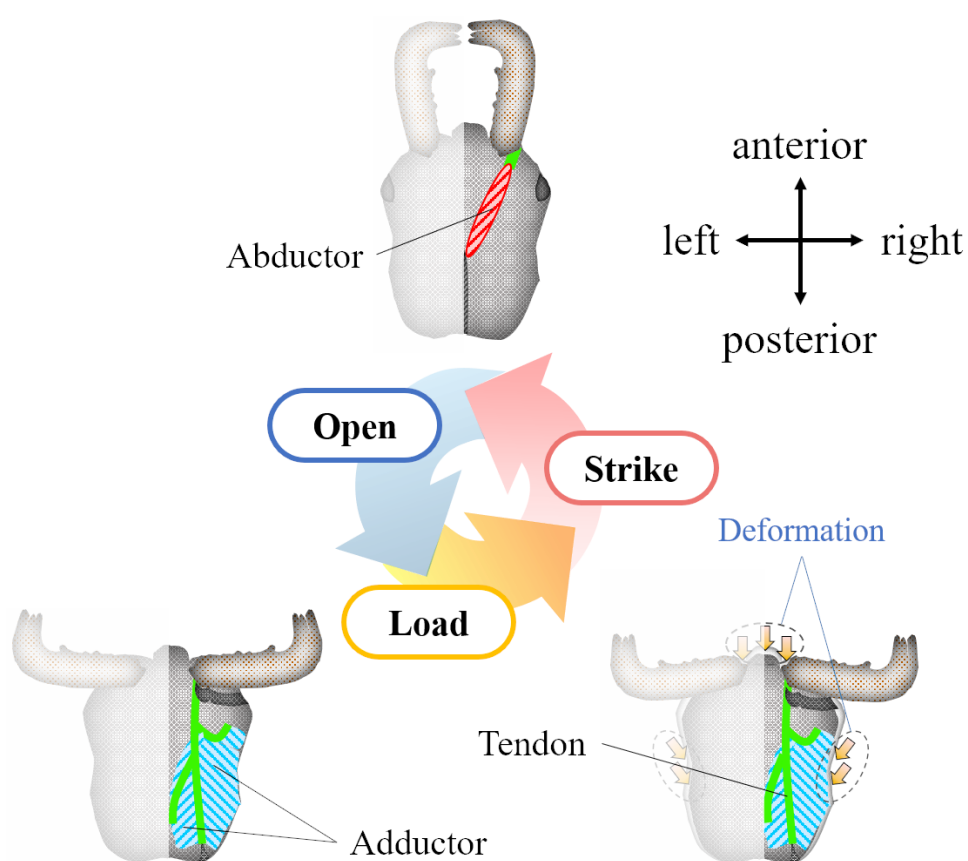


Fig. 4.4.3 Motion cycle of trap-jaw.

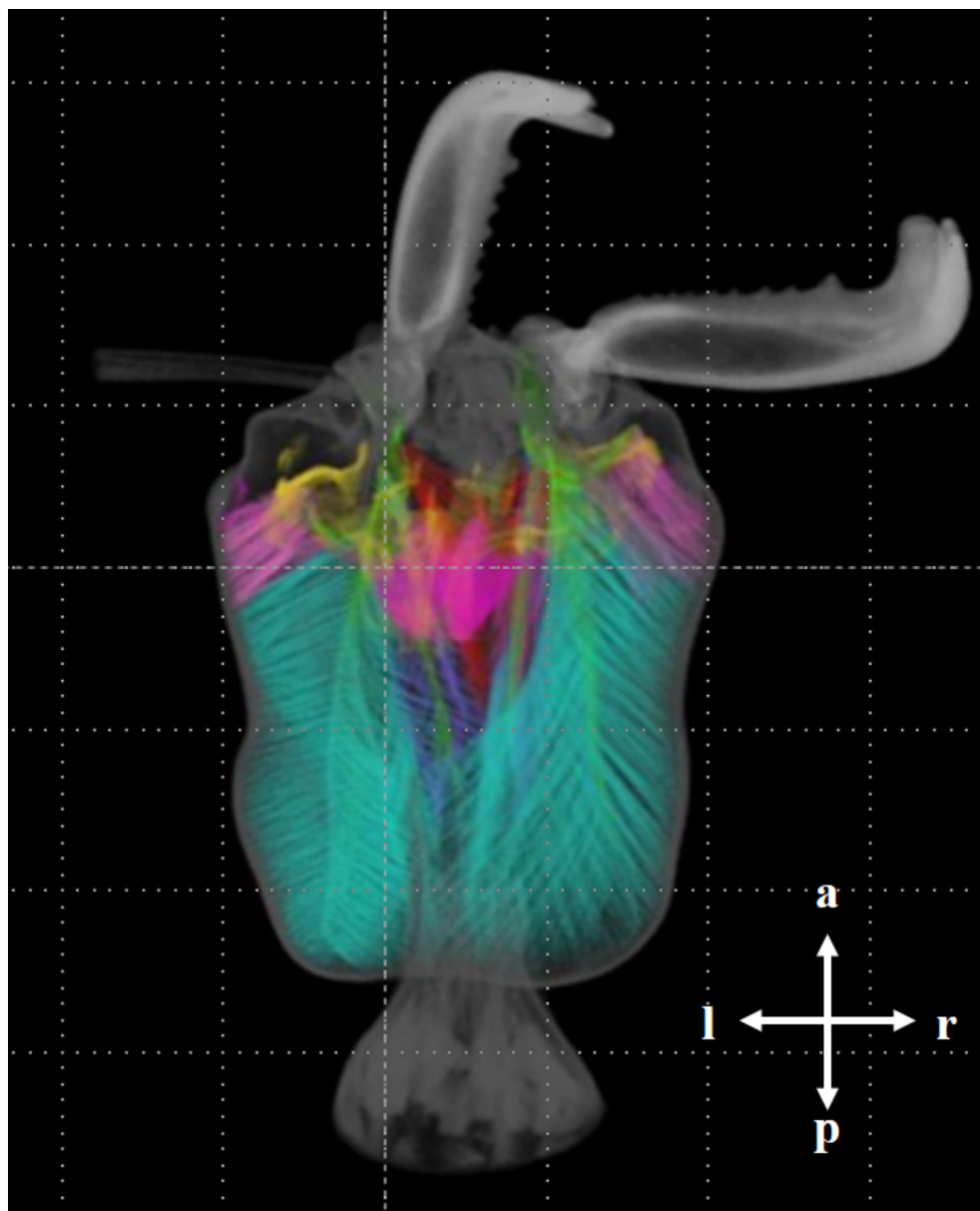


Fig. 4.4.4 Segmentation data by using Amira.

$$F_e = k_2 x_2 \quad (4.2)$$

さらに、以上の関係よりトラップ・ジョーにかかるモメント $M(t)$ は次式 (2) で表される。

$$M_{(t)} = (F_t + F_e) \times r(t) \quad (4.3)$$

ここで $r(t)$ はモメント長（時間関数と考えている）、 t は時間である。モメント長についてはマイクロ X 線 CT による内部組織の解析により推定する予定である。

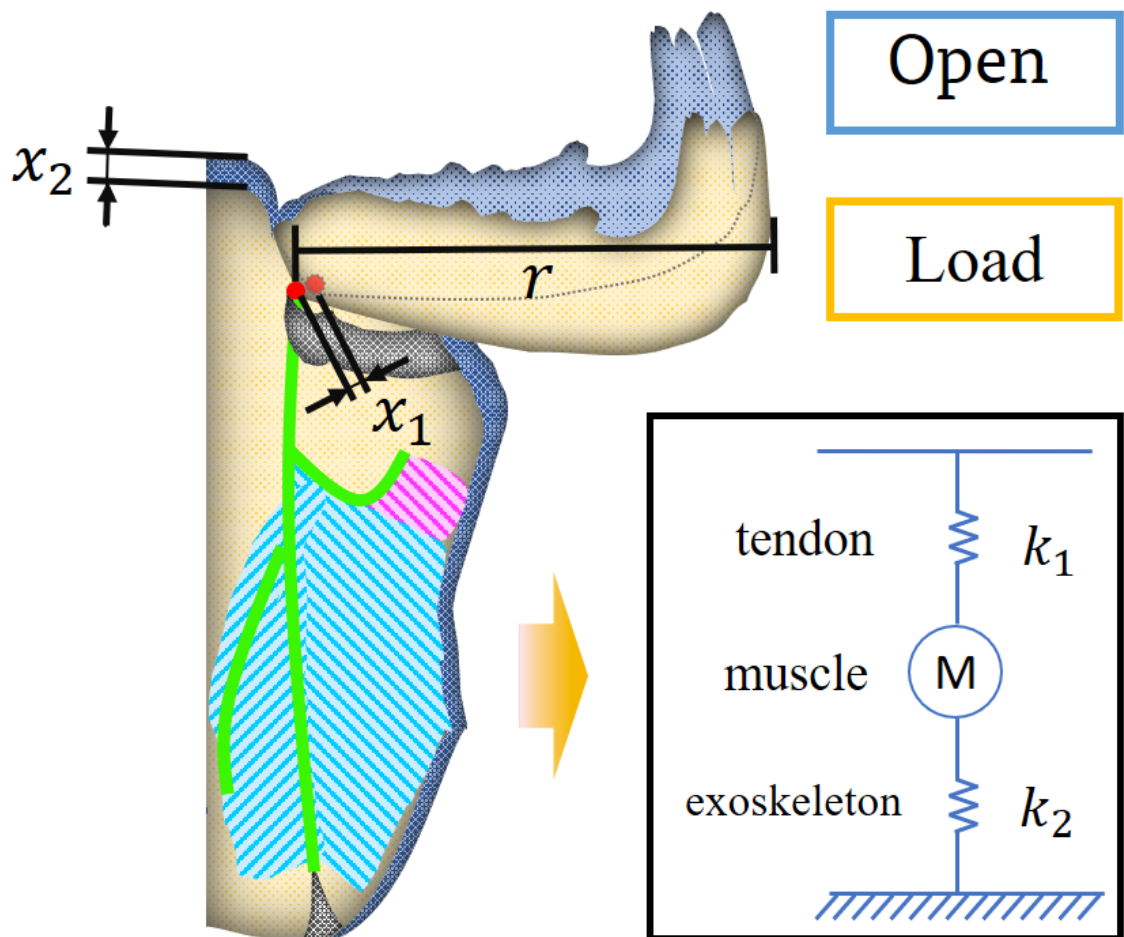


Fig. 4.5.1 Kinetic model.

4.5.2 運動モデルの構築

本章では、前節にて述べた駆動モデルについて力学的視点から、さらに詳しく述べる。先に Fig. 4.5.2 にトラップ・ジョーの力学的モデルを示す。オキナワアギトアリの大顎は複雑な形状をしているが、ここでは回転中心から伸びた細い棒の先端にある質量 m の質点の回転運動を考える。大顎の Loading 状態から Strike 動作間では、まず支点 1 および作用点 2 の構成で腱が大顎の付根に及ぼす引張力 F_t が働くことと仮定する。加えて Loading 状態にて弾性変形をしていた外骨格が復元する駆動力 F_e が支点 2 および作用点 1 の構成で押付力として回転運動に寄与すると思われる。本研究においては新たに外骨格の歪み復元に起因する駆動力を導入する。これによって、腱の引張力の付加と同時に、大顎の回転部分を含むその近傍（引張力の働く支点 1 などを含んで）全体が高速に押し上げられと考えている。これらの力により先端の質点には力 F_{oe} および F_{ot} が働き、これらの合力が大顎の駆動力 F_o となる。本稿では運動モデルの作成においては、X 線 CT 画像の解析に基づく定量的アプローチとともに、2 つの主要な駆動力に関する作用点や支点位置の関係などについては定性的な考察にも依っている。以上の関係より、全体のモーメントは次式にて表すことができる。

$$M = r_1 F_t + r_1 F_e \quad (4.4)$$

このモーメント M は大顎の慣性モーメント I と大顎の角加速度 θ の積に等しくなる。すなわち以上のパラメータを推定できれば、Strike 時における大顎の駆動力が算出可能となり、さらには Load 時における腱および外骨格の張力 F_t 、 F_e が推定可能となる。角加速度 θ については次章にてハイスピードカメラにて撮影した画像群より算出を行い、慣性モーメント I については前述の通り次のステップにて算出することとする。

4.6 外骨格の変形量計測法

外骨格の弾性力 F_e を算出するために必要な変位 x_2 は Load 時の外骨格表面を撮影した動画画像より計測可能であると考え、以下の方法を提案する。まず、Open 時と Loading 状態における頭部外骨格を撮影した 2 枚の画像を比較し、変形が顕著に見られる変形領域と変形がほとんど見られない不変動領域を目視にて設定する。そして、変形領域において三角形領域への分割処理を実施する。ここで、Open 時における i 番目の分割領域の面積を S_i 、Load 時における j 番目の分割領域面積を S_j と定義する ($i=1, 2, \dots, I$, $j=1, 2, \dots, J$)。 I , J は分割領域数を示す。これより、Open 時における変形領域の面積 S_o および Load 時における変形領域の面積 S_l は次式にて算出でき、さらにこれらの比を算出することで収縮率 C が次式より算出できる。

$$S_o = \sum_{i=1}^I S_i \quad (4.5)$$

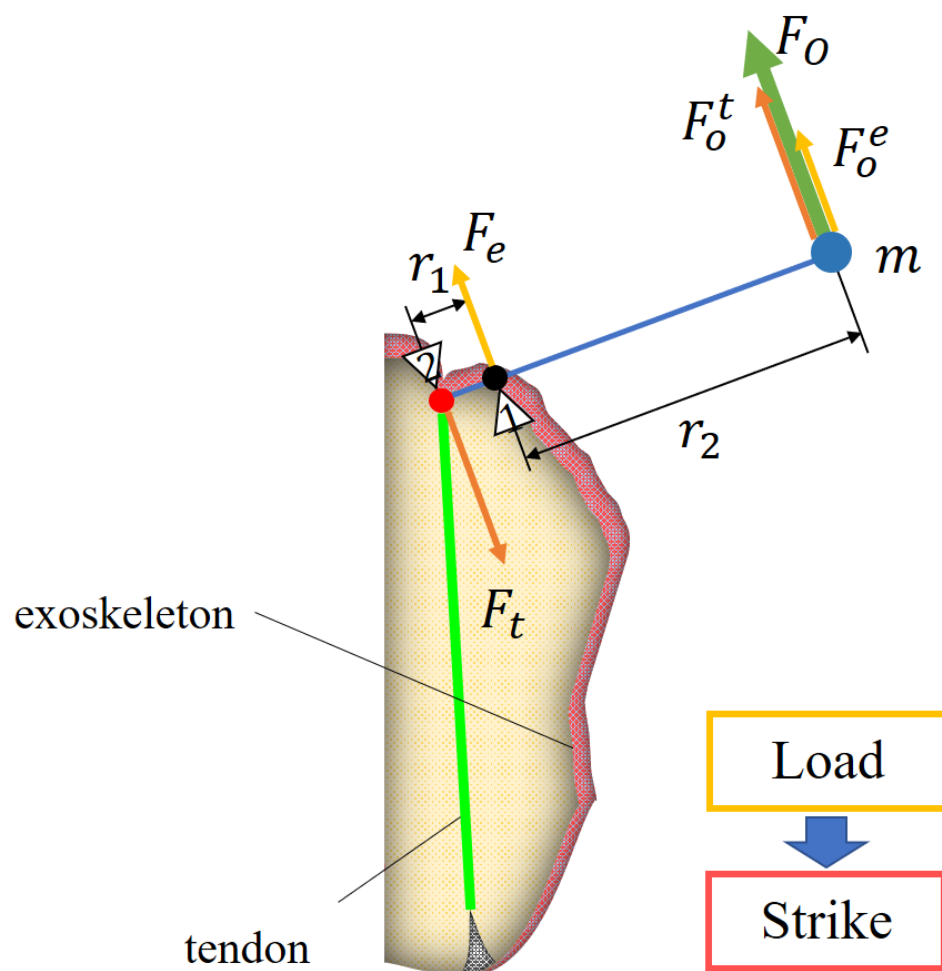


Fig. 4.5.2 Dynamic model.

$$S_l = \sum_{j=1}^J S_j \quad (4.6)$$

$$C = \frac{S_o}{S_l} \quad (4.7)$$

マイクロ X 線 CT 画像より作製したオキナワアギトアリの 3D モデルと画像中の変形領域が対応できれば、収縮率 C を用いて外骨格の変位 x_2 が推定可能となる。

4.7 三点法に基づく大顎の回転角度推定法

本節では、ハイスピードカメラにて撮影した連続画像より大顎の回転角を推定する方法について述べる。ここでは、大顎にある突起を特徴点として考え、それらの位置関係が運動中においても保存されると仮定する。回転角の算出には二点の特徴点および一点の回転中心が必要となる。大顎の回転中心は大顎の根元にあると推測されるが、大顎の根元は頭部外骨格内部に存在しており、回転中心の位置を予め推定しておく必要がある。先に次図に 2 フレーム間における大顎の位置関係を示し、同図に沿って説明を行うこととする。まず、フレーム間において回転中心が変動しないという仮説を導入し、特徴点 p を以下の通り定義する。

$$p_1^k = \begin{pmatrix} p_1^k \\ q_1^k \end{pmatrix} \quad (4.8)$$

$$p_2^k = \begin{pmatrix} p_2^k \\ q_2^k \end{pmatrix} \quad (4.9)$$

ここで、 k は時刻（フレーム番号）に相当し、ここでは $k=1, 2$ とする。さらに、各特徴点に新たな座標系を設定し、その y_k 軸と線分 $p_1^k p_2^k$ が成す角度 θ^k は次式より算出できる。

$$\theta^k = \cos^{-1} \left(\frac{q_1^k - q_2^k}{\sqrt{(p_1^k - p_2^k)^2 + (q_1^k - q_2^k)^2}} \right) \quad (4.10)$$

同式により求めた角度 θ^k を用い、回転中心を次のように定義する。

$$p^0 = \begin{pmatrix} p^0 \\ q^0 \end{pmatrix} \quad (4.11)$$

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p^0 \\ q^0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \end{pmatrix} \quad (4.12)$$

同式中における要素 a および b は以下の通りであり、同様に p^0 および q^0 も次式より算出できる.

$$a_{11} = \cos \theta^1 - \cos \theta^2 \quad (4.13)$$

$$a_{12} = \sin \theta^1 - \sin \theta^2 \quad (4.14)$$

$$a_{21} = -a_{12} \quad (4.15)$$

$$a_{22} = a_{11} \quad (4.16)$$

$$b_1 = \cos \theta^1 p_2^1 - \cos \theta^2 p_2^2 + \sin \theta^1 p_2^1 - \sin \theta^2 p_2^2 \quad (4.17)$$

$$b_2 = -\sin \theta^1 p_2^1 - \sin \theta^2 p_2^2 + \cos \theta^1 p_2^1 - \cos \theta^2 p_2^2 \quad (4.18)$$

$$p^0 = \frac{a_{12}b_2 - a_{22}b_1}{a_{21}a_{12} - a_{11}a_{22}} \quad (4.19)$$

$$q^0 = \frac{-a_{11}b_2 + a_{21}b_1}{a_{21}a_{12} - a_{11}a_{22}} \quad (4.20)$$

4.8 M-ICP に基づく大顎の回転角度推定法

4.8.1 ゴースト除去手法

前節にて特徴点を用いた大顎の回転角度算出方法を示した。これは、フレーム間において回転中心が不動のものであると仮定したものであったが、実際は次図に示すように回転中心は大顎の運動とともに遷移しているものと考えられる。大顎の根元はフレキシブルであること、そして外骨格に生じる歪みに起因すると推察される。以上より、点の位置関係を用いたアプローチでなく大顎の全体の形状を特徴量として用いることとする。

前述の通り、ハイスピードカメラにて撮影された動画像上にはいくつかの課題が生じる。Fig. 4.8.2 は実際にハイスピードカメラで大顎の運動を撮影した画像であり、Fig. 4.8.3

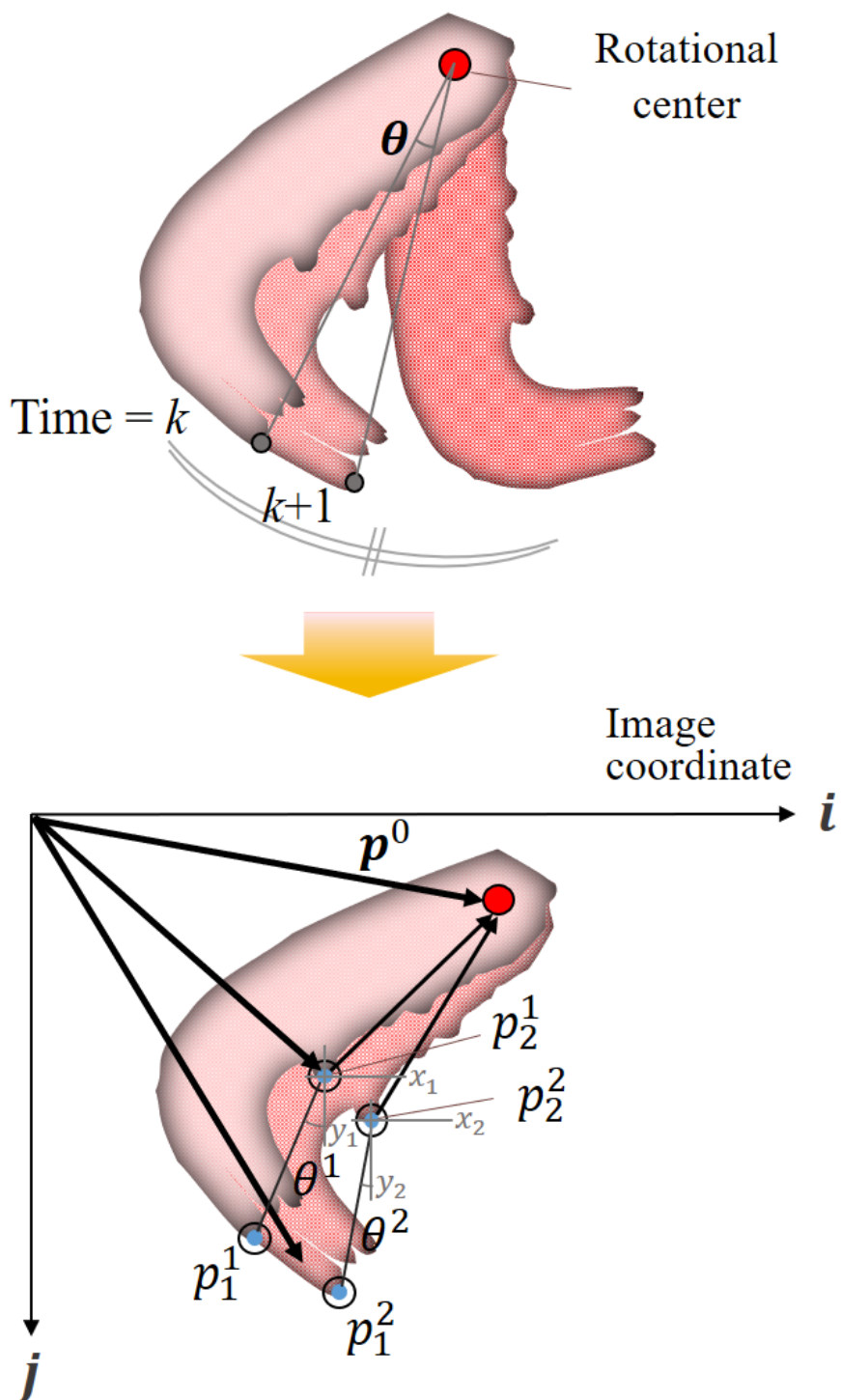


Fig. 4.7.1 Estimate the rotational center.

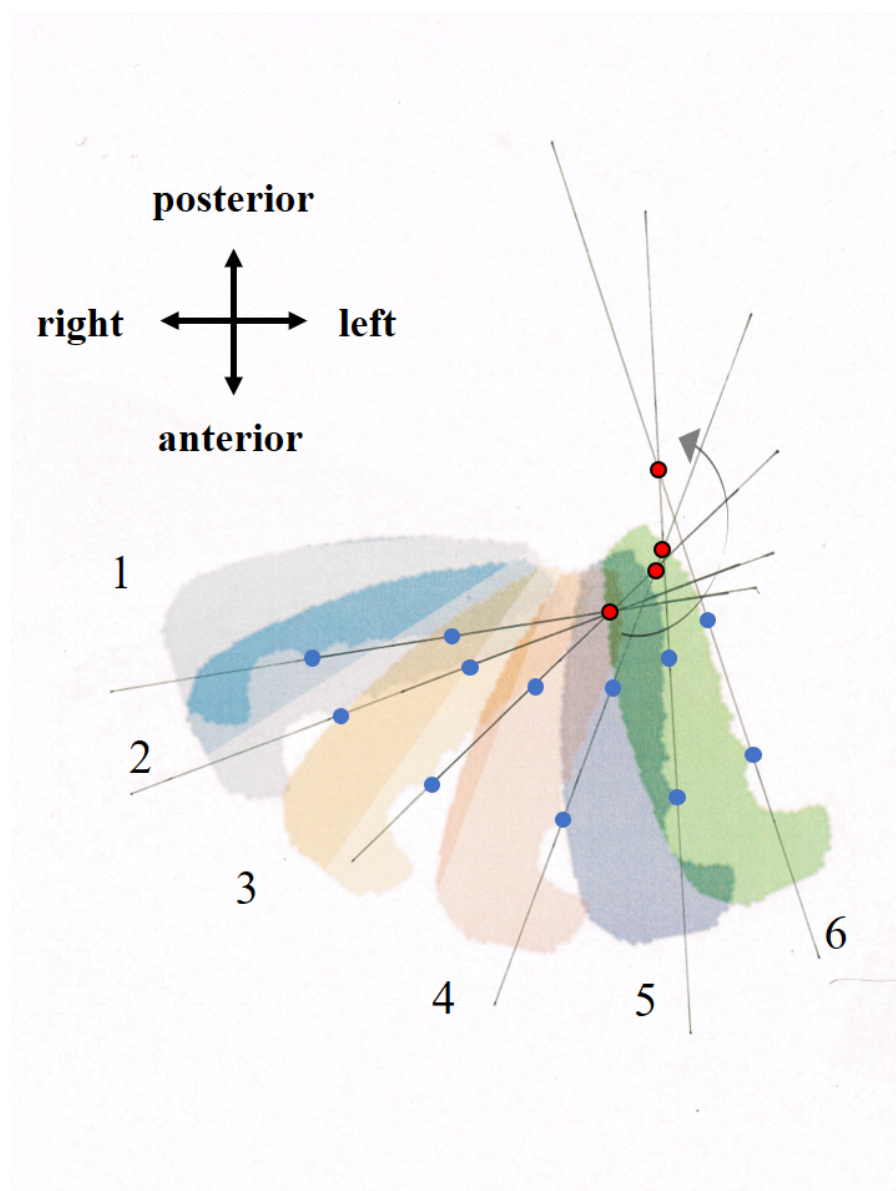


Fig. 4.8.1 Transition of rotational center.



Fig. 4.8.2 High-speed image.



Fig. 4.8.3 Some noises.

は可視化のために明度とコントラストを調整したものである．Fig. 4.8.3 から確認できるように，パタンノイズやゴーストがノイズとなって生じている．これは，CMOS センサが低照度下で不安定になりやすい傾向にあり，電荷の蓄電および放電が上手く行われないことに起因する．本節では，先にゴーストに対応する方法について述べる．

次図を例に大顎のゴースト部の除去方法について述べる．同図は時刻 t において右の大顎が先に Strike している例であり，図中 α がこのフレームでの正しい大顎の位置を示し， β および γ がゴースト部である． β と γ は時刻 $t-1$ 以前に撮影されたフレーム中での大顎の位置であり，CMOS センサ内の素子が少光量下で不安定な状態となり，電荷の蓄積と放出が正常に行えないために生じたと考えられる．取得した原画像は画像全体の明度値が低いため，Fig. 4.8.4 は明度値を 40 %増幅しコントラストを 40%減少させて表示している．

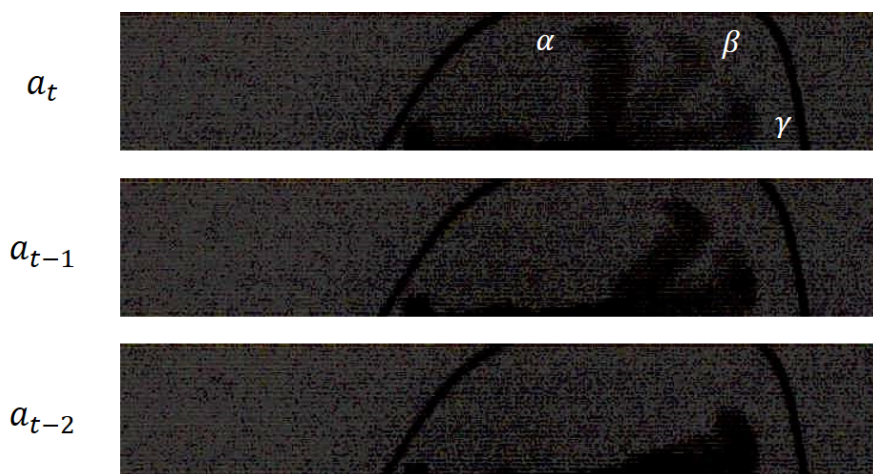


Fig. 4.8.4 Ghost.

ここから，ゴースト部の除去方法について述べる．ハイスピードカメラにより取得できる画像は 24 ビット画像であるが，後の処理のために 8 ビット画像に変換して使用する．まず，正しい大顎の位置にある画素はゴースト上にある画素より明度が低くなるという知見を実験的に得た．この特性を利用し，時系列データ上の 2 フレーム（画像 a_t , a_{t-1} ）における同一画素間の明度関係を利用することでゴースト除去画像 b_t を式 4.21 に従い新たに生成する．

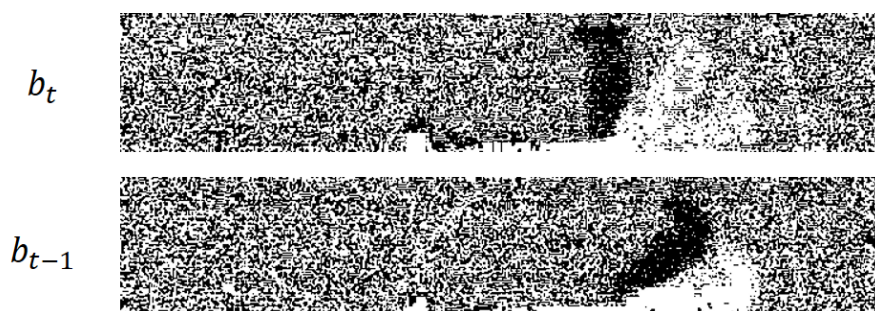


Fig. 4.8.5 Remove ghost.

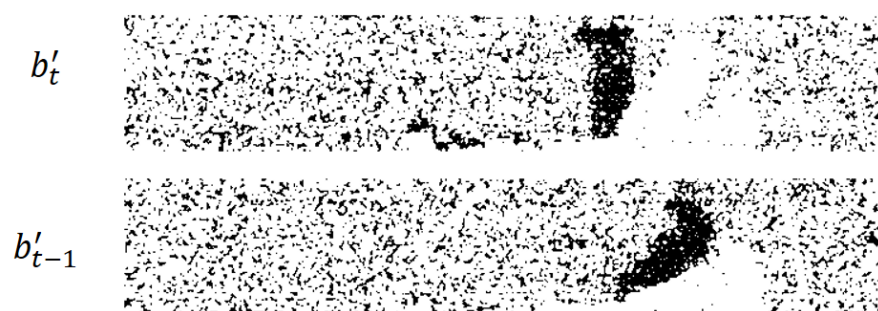


Fig. 4.8.6 Extract mandible.



Fig. 4.8.7 Remove some noises.

$$I_{(x,y)}^{b_t} = \begin{cases} 0 & \text{if } I_{(x,y)}^{a_{t-1}} > I_{(x,y)}^{a_t} \\ 255 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4.21)$$

ここで、 $I_{(x,y)}$ は各画像における座標 (x, y) の画素が持つ明度値である．実際に Fig. 4.8.4 に示す 3 枚の時系列画像をそれぞれ a_t , a_{t-1} , a_{t-2} とし，式 4.21 に従いゴースト除去画像 b_t , b_{t-1} を生成した結果を Fig. 5.2.12 に示す．同図から各時刻におけるゴースト部が除去されていることが確認できる．

ゴーストの除去はできたが，このままでは背景ノイズの影響により照合に用いることができない．そこで，2つの処理を行いノイズ除去と大顎部の抽出を行う．まず，大顎部は背景部と比較して $I_{(x,y)}^b=0$ の画素の密度が高いことに着目し， 3×3 画素の領域毎にゴースト除去画像を全走査し， $I_{(x,y)}^b=0$ の画素をカウントする．そして，各領域において $I_{(x,y)}^b=0$ の画素が 6 画素以下の場合，中心画素の明度値を 255 とし，新たに大顎抽出画像 b'_t , b'_{t-1} を生成する．この処理により背景ノイズの削減が確認できるが，まだ照合に影響を及ぼす量のノイズが残る．そのため，次の処理として収縮・膨張処理を実施する．この処理はごま塩ノイズ等を除去する際に有効な処理であり，画像処理分野において一般的に用いられる．この一連の処理を 2 回繰り返すことで，4.8.7 に示すノイズ除去画像 b''_t , b''_{t-1} を生成する．

4.8.2 M -ICP に基づく大顎の照合

本節では前節にて生成したノイズ除去画像に対し照合を実施する方法を述べる．照合の際，高速度撮影画像は低画質のため参照画像には適していない．そこで今回は，高速度画像と同じ環境下でフレームレートおよびシャッタースピードを下げて撮影した画像を良質画像と定義し，これを照合に使用する．すなわち，良質画像とノイズ除去画像の 2 つの異なる性質の画像間で照合を行う．良質画像は，高速度撮影を実施した後に同個体に対して撮影を行い，レンズや対象の位置関係は変更しない．良質画像もノイズ除去画像同様にグレースケール変換し，二値化処理を行う．さらに，手動にて駆動する方の大顎を抽出し，これを参照画像とする．異質画像間における照合において一般的なテンプレート照合法を用いた場合，性質の相違により両画像間の相関が低下し計測が困難である．以上より，本研究では二値化した 2 種の画像において明度値 0 の値を持つ画素の集合を点群とみなし，例外値を含む場合に頑健な M 推定法に基づく ICP (Iterative Closest Point) を適用する．処理の全体的な流れを以下にて簡潔に述べる．良質画像より取得した点群を F ，時刻 t のノイズ除去画像から取得した点群を G^t と置き，次式にて定義する．

$$F = \{\mathbf{f}_i\}_{i=1}^N \quad (4.22)$$

$$G^t = \{\mathbf{g}_k\}_{k=1}^K \quad (4.23)$$

ここでは、 F を逐次変換して G^t に合わせ込むことを考える。まず、 m 回目のステップにおける両点群間の各点を最小距離に基づき、次式に示すように仮の対応点集合 $C^{(m)}$ とする。

$$C^{(m)} = \{k_i^{(m)}\}_{i=1}^N \quad (4.24)$$

$$k_i^{(m)} = \{k | \min_k |f_i^{(m)} - g_k|\} \quad (4.25)$$

次に、この対応点集合と比較する点群の生成を行う。これは $F^{(m)}$ を合同変換することにより複数生成し、仮対応点集合との残差が最も小さくなるものを最適な点群として選択する。回転行列を $R^{(m)}$ ，並進ベクトルを $t^{(m)}$ とすると、各点の合同変換は次式で定義される。

$$k_i^{(m)} = \{k | \min_k |f_i^{(m)} - g_k|\} \quad (4.26)$$

合同変換には7つのパラメタ ($q_1, q_2, \dots, q_7$; q_1 - q_4 : 回転パラメタ (四元数), q_5 - q_7 : 並進ベクトル) が用いられる。最適な点群の選択には、残差関数 J による評価値が用いられ、これを最適化するために滑降シンプレックス法を用いた。一般的な滑降シンプレックス法では使用するパラメタ+1個の頂点を設定するため、今回は8個の頂点を設定する。すなわち、 $F^{(m)}$ を8種の異なるパラメタにより合同変換した点群 $F_n'^{(m)}$ ($n = 1, 2, \dots, 8$) と仮対応点集合 $C^{(m)}$ の残差が最小となる点群 $F_n'^{(m)}$ を求める。この処理を試行回数 m が一定の回数 T_m より小さく、かつ合同変換による点群 $F^{(m)}$ の平均移動量 E が一定量 T_E より大きい場合に逐次実行する。点群の最適化に用いる残差関数 J を次式示し、式内で用いる Biweight 法に基づく評価関数 $\rho(\cdot)$ を次式に示す。ここで、式 (7) 中の e_x, e_y は各点間の水平・垂直方向の残差を示す。また、 $c=x, y$ である。

$$J = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \{\rho_x(e_x, i) + \rho_y(e_y, i)\} \quad (4.27)$$

$$\rho_c(e_c) = \begin{cases} \frac{B_c^2(1-(1-\frac{e_c}{B_c})^2)^3}{2} & \text{if } |e_c, i| \leq \frac{B_c}{2} \\ \frac{B_c^2}{2} & \text{if } |e_c, i| > \frac{B_c}{2} \end{cases} \quad (4.28)$$

第5章 アギトアリの大顎の駆動に係る部位の計測

5.1 アギトアリ属の外骨格の変形量計測

オキナワアギトアリの首および胸部周辺をワックスで土台に固定し、Fig. 4.4.3 に示した Open-Load-Strike の一連の動作をデジタル一眼レフカメラ（Canon EOS 800D）を用いて頭部右側面より撮影した。本節ではこの実験により取得した動画像に対し、前章の手法を適用した結果について述べる。先に Fig. 5.1.1, Fig. 5.1.2 に実験に使用した画像を示す。同図中において、はじめに緑線で囲んだ領域を不変動領域と定義した。その後、Open 時、Loading 時において変形領域（Open 時：白線、Loading 時：黄線）をそれぞれ設定した。そして、変動領域を三角形領域に分割して面積を算出したところ、 S_o が 111206.5[pixels]、 S_l が 113469.0[pixels]、収縮率 C は 1.02 であった。すなわち頭部外骨格側面では Open-Loading 間においてほとんど面積変化が生じてないことが分かった。さらに、Open-Loading 間の輪郭部分の移動について着目した。頭部上部および頭部前方部において顕著に変形が生じているのが見て取れる（拡大部）。今回はこの2つの輪郭の差を面積と長さを用いて評価した。まずは上記の計測同様に顕著に変形が見られた領域を三角形領域に分割し、頭頂部の変形領域の面積 S_1 、頭部前方部の面積 S_2 をそれぞれ算出した。計測の結果、 S_1 が 8536.5[pixels]、 S_2 が 7218.0[pixels] であった。次に図中に示すように変形領域内にて輪郭線を取得する際に生成された頂点から桃線を引き（頭部上部は垂直線、頭部前方部は水平線）、各領域における領域の長さを計測した。線分を両領域間で区別するため頭部上部における垂直方向の長さには 1-12 の番号を割り当て、頭部前方部における水平方向の長さには a-i の番号を割り振った。計測の結果、線分 1-12 の長さの平均（ $\pm 16.7\%$ ウィンザライズ実施）は 17.4[pixels]、線分 a-i の長さの平均（ $\pm 22.2\%$ ウィンザライズ実施）は 26.4[pixels] であった。以上の結果を踏まえると、頭部前方ではより前方に近い部分（口蓋周辺）で頭部上部に比べ大きな変動が生じており、頭頂上部では上部分全体で変動が生じていることがわかる。この結果は、我々の仮説を助長する結果であると言える。

5.2 アギトアリ属の大顎の運動計測

5.2.1 実験セットアップ

本章では、大顎の運動の撮影に使用したセットアップについて述べる。撮影は、ハイスピードカメラ（DITECT : HAS-D71）を顕微鏡（OLYMPUS : SZX12）に取り付けて実施した。アリは直方体の金属片にデンタルワックスで固定し、134mm の高さに設定した



Fig. 5.1.1 The shape at open-phase.

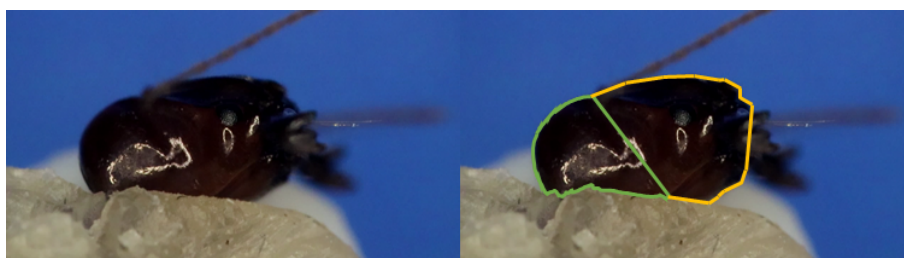


Fig. 5.1.2 The shape at load-phase.

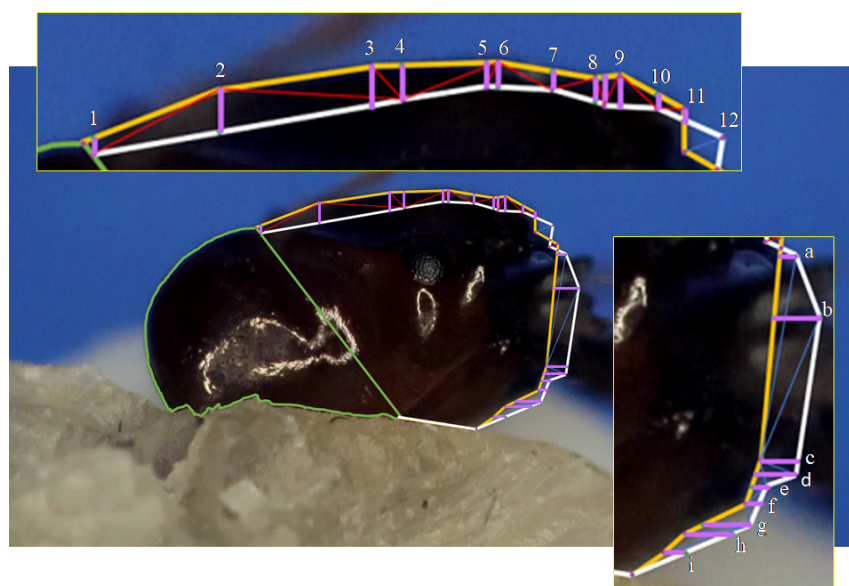


Fig. 5.1.3 Amount of deformation between open and load.

台の上に設置した。台を設置した目的はレンズと対象間の距離を調節するためであり、その距離は64mmとした。また、外骨格の変形を計測するために、側面からデジタル一眼レフカメラ（Canon：EOS 8000D）でビデオ撮影を行った。以上を設置した様子（ハイスピードカメラは画角の関係上、接眼部のみを撮影している）をFig. 5.2.1に示す。次にア



Fig. 5.2.1 Setup.

リの固定方法について述べる。アリは固定する前に二酸化炭素で満たした容器に数十秒程度入れ麻酔をかけ、その後素早く固定を行う。固定にはデンタルワックスを使用し、頭部が不動となるように前胸背板周辺から腹柄にかけてを固定する（Fig. 5.2.2）。麻酔が切れた後は昆虫用の餌を数滴与え、30～40分程度時間を空けた後に撮影を行う。

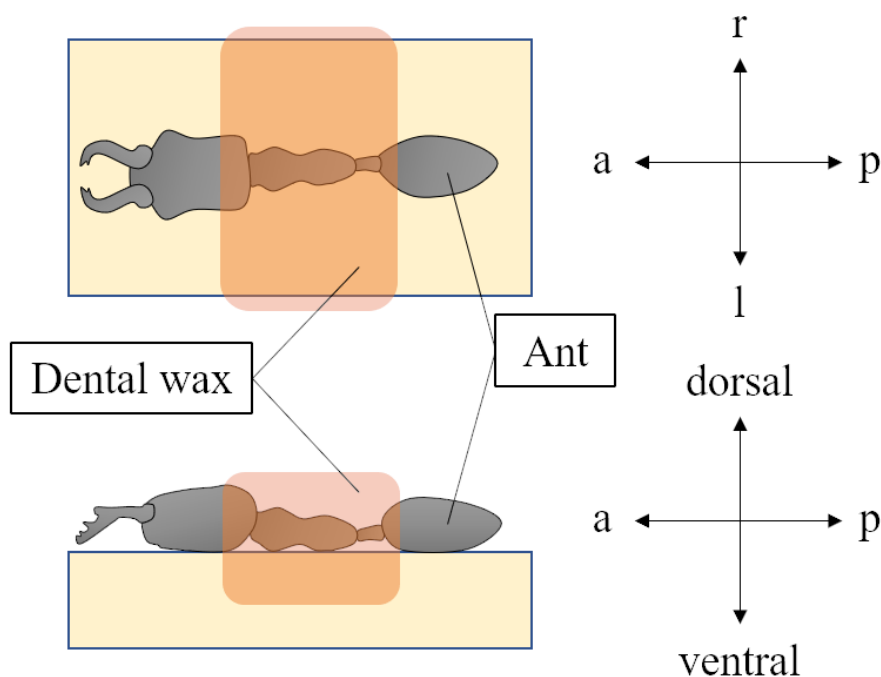


Fig. 5.2.2 Setting an ant.

5.2.2 パラメタ推定

本節では Strike 時の大顎の駆動力を算出するための重要なパラメータの一つである角加速度 θ の算出法について述べる. 超高速運動 (Strike) 時の大顎の動きをハイスピードカメラにより 60,000fps で撮影したものを 30fps の連番画像群として出力し, それらに対して手動で大顎の先端と回転中心を与えることでフレーム間における角度・角速度・角加速度を算出した. 実験に使用した画像群を次図 Fig. 5.2.3 に示す.

同図中における赤色で示した点が大顎の先端位置を示す. 1 フレーム間の実時間は 1.67×10^{-5} [s] となる. Fig. 5.2.4, 5.2.5, 5.2.6 は, それぞれ角度, 角速度, 角加速度を示す. 低分解能と高速度撮影に起因する露出不足による付加ノイズの影響によると思われる不安定性が見られるが, ある程度の測定はできている. 注目する角速度値は Strike 開始時ではなく少しの時間遅れを伴って実現されている. 顎の発揮する瞬発力 (獲物捕獲や逃避に使われる) の値を角加速度と慣性能率値より求める問題は直近の課題である

5.2.3 M-ICP による回転角度計測

提案手法の有効性を示すため, 実証実験を行った. ここでは, Fig. 5.2.7 に示す良質画像 (フレームレート: 500fps, シャッタースピード: 1/500s で撮影) から Fig. 5.2.8 に示す参照画像を生成し, 低品質画像群 (フレームレート: 30,000fps, シャッタースピード: 1/100,000s で撮影) に対して照合を実施した. 参照画像は, 駆動サイクル外の大顎がフリーな状態を撮影した. 前述の通り, 大顎は基本的に片方の大顎が先に閉じるため, 次図に示

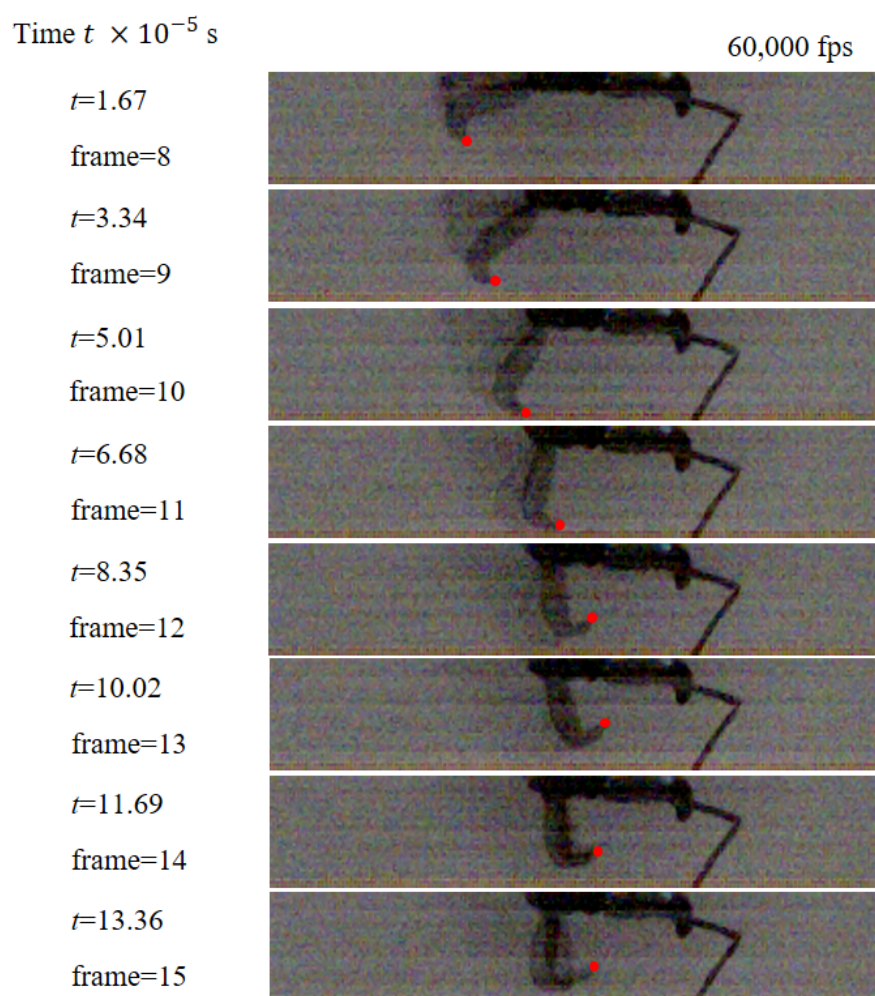


Fig. 5.2.3 High speed image.

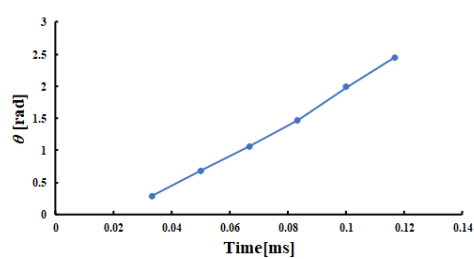


Fig. 5.2.4 Angle.

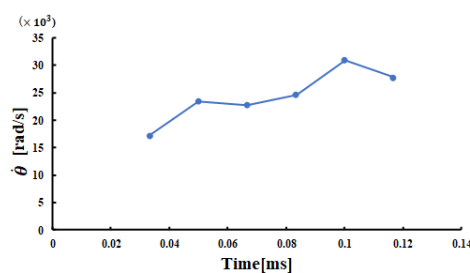


Fig. 5.2.5 Angular velocity.

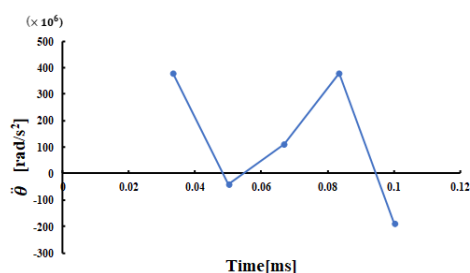


Fig. 5.2.6 Acceleration.

すように左右それぞれの大顎の参照画像を作成し駆動する大顎に合わせて参照画像を選択する。また、撮影に使用したカメラは最大フレームレート 120,000fps, 最大シャッタースピード 1,000,000s で撮影可能であるが、画角と光量の関係を考慮し上記の値を用いた。

実験に使用した 5 個体 (A~E) は 2018 年 5 月 29 日に大阪府箕面市にて同一コロニーより採集したアギトアリ *O. monticola* で、同年 6 月 8 日に実験を行った。実験には第 2 章で述べた撮影環境にて行い、Strike を誘発するための刺激は息の吹きかけとした。先に撮影の結果を表 1 に示す。個体 B は Strike をしなかったため記載していない。個体 A に関して

Table 5.1 Each individual data

Individual	Number of strikes				
	1	2	3	4	5
A	L	-	-	-	-
C	B	R	L	L	R
D	R	B	R	R	L
E	B	L	-	L	B

は、フレームレート 30,000fps, シャッタースピード 1/1,000,000s にて 1 回撮影できたが、このシャッタースピードでは光源を多数設置する必要があり、光源が発する熱により個体が弱ってしまった。そのため、個体 B-E に関してはシャッタースピードを 1/100,000s とし、光源の数を減らして実験を行った。その結果、個体 C-E では 4~5 回の Strike を確認できた。同表において L は左大顎の Strike, R は右大顎の Strike, B は両大顎での Strike

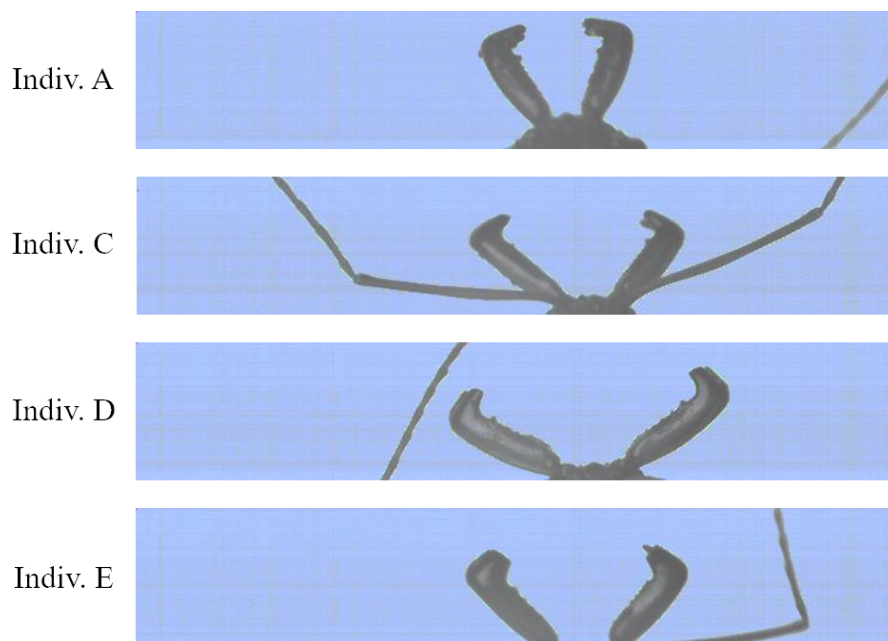


Fig. 5.2.7 High-quality image.

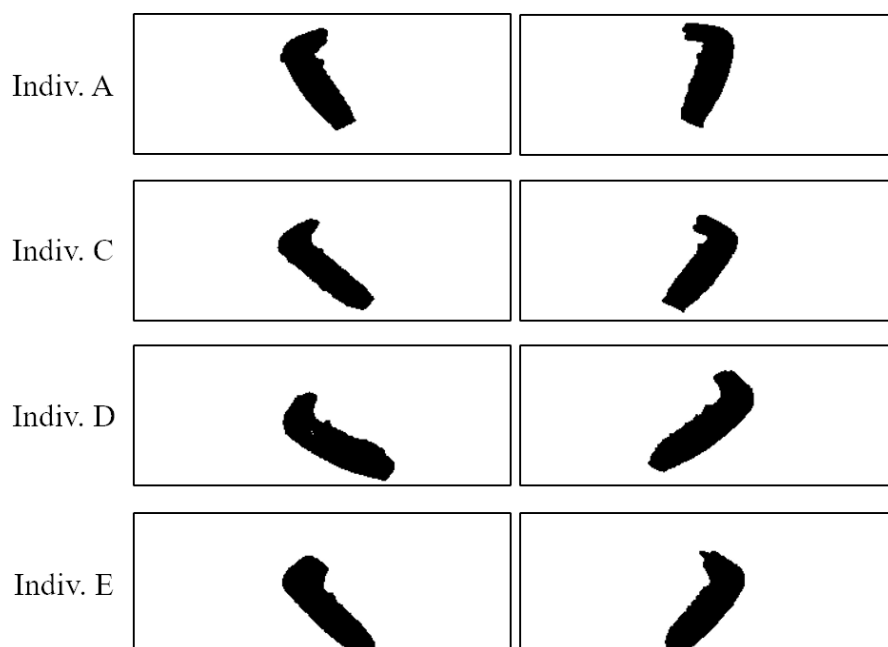


Fig. 5.2.8 Reference image.

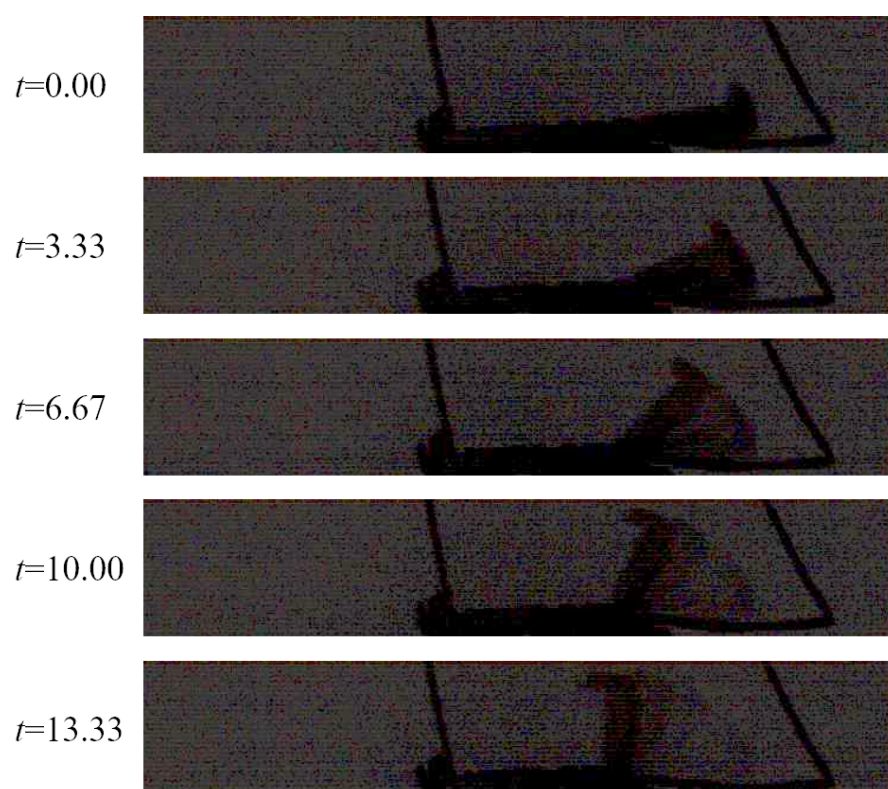


Fig. 5.2.9 Low-quality image.

を指す。本実験では片側のみの Strike フェーズを照合の対象とした。

L, R の高速度撮影画像（低品質画像）群に対し、次図の参照画像を用いて照合を実施した。個体 C-E の各時刻における大顎の回転角度を算出した結果を次図に示す（キャプション中における個体番号後の数字は Strike の回数を意味する）。同図は、参照画像の大顎の角度を基準とした際の角度差をプロットし、サンプル点間を3次スプライン曲線で補間したものである。青色プロットは本提案手法により自動照合された角度値、橙色プロットは目視計測による観測値（真値とみなす）を示す。これより提案手法による照合誤差はいずれも 10 度以内となった。

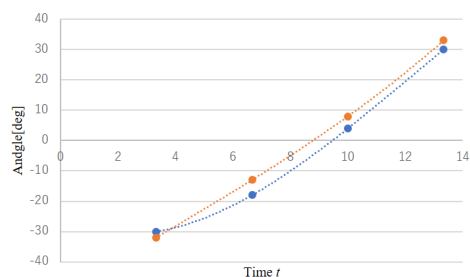


Fig. 5.2.10 Result1(ind. C).

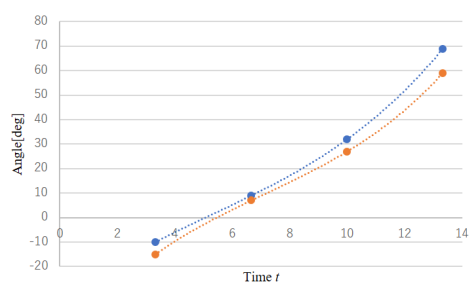


Fig. 5.2.11 Result2(ind. D).

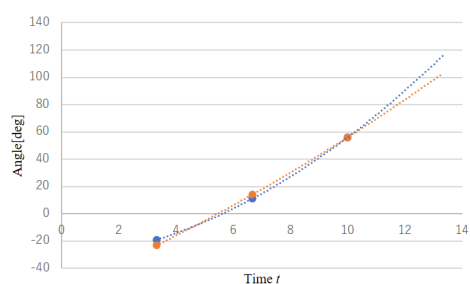


Fig. 5.2.12 Result3(ind. E).

第6章 結論

本章では、これまでに述べた内容のまとめをおこなう。本研究では生物の行動解析に向けた画像パタン計測法について提案を行った。生物が発現する行動には様々あるが、ここでは、パタン計測において困難な課題の一つである姿勢の変化（回転）を含む行動を研究課題と設定し、対象の回転運動に対し頑健性を有し、自動かつ高精度に対象を検出および追跡をする手法を構築することを目的とした。回転運動を発現する生物として、今回はメダカ (*Oryzias latipes*) とアギトアリ属 (*Odontomachus*) を対象生物とした。

第2章、第3章では、複数匹で遊泳するメダカを対象とし、議論を展開した。従来の目視による計測手法は幾つかの問題を孕んでおり、メダカの各個体を定量的に評価するために適しているとは言えない。そこで、本研究ではテンプレート照合法に基づくメダカの検出・追跡手法について提案した。一般的なテンプレート照合法では、対象の回転運動に伴う姿勢の変化やバーストスイミング等の不規則運動に対して脆弱であるため、(1) テンプレートと対象画像をそれぞれ回転し、姿勢を整合させ照合すること、(2) 適切な粒子遷移範囲を設定した粒子フィルタによる対象の位置を推定すること、によりこれらに対応した。また、ベースとする特徴量は一様な照明変動に頑健な方向符号特徴を用いることで人工照明による周期的な輝度外乱にも対応した。画像の回転については、各画像内の方向符号の出現数により作成したレーダーチャートを用いて回転角度を算出しそれに基づいて回転を行った。先に提案された方向符号特徴を用いて画像回転を実施する手法では、テンプレートと対象画像の方向符号差分を用いて回転角度を決定していたが、回転角度が取り得る値が方向符号の量子化幅に依存するという課題があった。この課題に対応すべく、本手法ではレーダーチャートのプロットエリアにおける慣性主軸角度を画像回転角度として用いることで、より高精度な照合を可能とした。さらに、回転先で新たに定義した中心差分方向符号へと方向符号を変換し、これをテンプレート照合に用いた。

実証実験では3つの動画像に対し手法を適用した。いずれに対しても誤検出なく各対象の検出・追跡を可能とし、さらには遊泳軌跡の生成を確認した。また、高速に回転運動を伴う個体に対しても手法を適用し、これに対しても手法の有効性を示唆した。

第4章、第5章では主にアギトアリ属の大顎の超高速を対象とし、議論を展開した。アギトアリ属が有す Trap-jaw が発現する超高速運動は、近年、生物学において関心が高まっており高速度カメラを用いた計測が主として実施される。従来は専門家の目視により大顎の先端をプロットし、大顎の角度や先端の角速度を算出していた。しかし、高速度画像はノイズを多く含み、解像度が低いため目視計測のみでは様々な障害が生じる。そこで、我々は点群照合に基づき、大顎の形状特徴を用いて各フレームにおける大顎の角度、角速度、角加速度を高精度に算出する手法を考案した。この際、高速度カメラの特性に起因す

るゴーストに対応するため、連続する画像間の明度値の関係性を利用し大顎の可動部の抽出を可能とした。さらに、X線マイクロCTにより得られた頭部外骨格内のCT画像に基づきセグメンテーションを行い、3次元モデルを構築した。また、この3次元モデルに加え、Load時に外骨格に変形が生じるという知見を用いて新たな仮説を提唱し、それに基づき運動モデルを考案した。

実証実験では、高速度カメラにて実際に撮影した高速度画像に対し大顎の運動計測を実施し、手法の有効性を確認した。また、デジタルカメラにて撮影した画像から頭部外骨格の変形前後2枚の画像を用いることで変形量について計測を実施し、収縮率の算出を可能とした。

さいごに、以上を踏まえ現状における研究課題をまとめ、今後の展望を述べる。メダカの行動追跡にて使用したテンプレート照合法は、比較的計算コストが低いことが利点であるが、遮蔽に脆弱な欠点がある。また、今回用いた粒子フィルタ内の尤度の一つである等速直線運動に基づく尤度はメダカ同士が近接した場合に誤検出の一因となる可能性を孕んでいる。今後はこれらの課題に対応することが提案手法の精度を向上させる上で重要となる。今後は、テンプレートの回転角と移動方向を統合することでメダカの向きの検出が見込まれる。向きの検出が可能となれば、将来的にメダカの群れ指標構築の実現が期待できる。

アギトアリの大顎の運動は実際に3次元的な姿勢変化を含むが現状では2現平面状での運動を考えている。これは、大顎をより現実的にモデル化する上で重要であると考ええる。今後はCT画像から作製した3次元モデルと高速度画像より抽出した情報を統合して扱うことで、大顎の3次元計測への拡張が期待できる。

参考文献

- [1] 金子俊一: "実世界マシンビジョンのためのロバスト画像照合技術", 電気学会論文誌 C, Vol. 121. No. 5, pp. 830-834 (2001).
- [2] 金子俊一: "ロバスト画像照合アルゴリズムの基礎と最新状況", 映像情報メディア学会誌, Vol. 60. No. 9, pp. 1381-1385 (2001).
- [3] 鷺見和彦, 金子俊一: "マシンビジョン技術の実利用", 電気学会論文誌 C, Vol. 124. No. 3, pp. 598-605 (2004).
- [4] L. G. Brown: "A survey of image registration techniques", *ACM Computing Surveys (CSUR)*, Vol. 24. No. 4, pp. 325-376 (1992).
- [5] A.K. Jain, R.P.W. Duin, Jianchang Mao: "Statistical pattern recognition: a review", *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 22. No. 1, pp. 4-37 (2000).
- [6] 佐藤雄隆, 金子俊一, 坂上勝彦: "ロバストパターン認識技術", 精密工学会誌, Vol. 77. No. 12, pp. 1121-1124 (2011).
- [7] 和島直哉, 高橋悟, 伊藤誠也, 佐藤雄隆, 金子俊一: "Radial Reach Filter を用いたブロック識別法による移動物体追跡", 画像電子学会誌, Vol. 35. No. 4, pp. 306-313 (2006).
- [8] Takumi Honda, Satoru Takahashi, Hidenori Takauji, Shun'ichi Kaneko: "Visual feedback system for tracking of microorganisms using color OCM", *Proceedings of IECON 2010 - 36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, pp. 2739-2743 (2010).
- [9] 本田達也, 高橋悟, 高氏秀則, 金子俊一: "不規則運動を伴う移動体に対するロバスト追跡手法", 画像電子学会誌, Vol. 41, No. 4, pp. 360-365 (2012).
- [10] 奥田泰丈, 高橋悟, 川端邦明, 金子俊一: "細胞観測のためのバイオイメーjing手法", 計測自動制御学会論文集, Vol. 50, No. 5, pp. 424-431 (2014).
- [11] Masahiro Kasahara, Kiyoshi Naruse, Shin Sasaki, Yoichiro Nakatani, Wei Qu, Budrul Ahsan, Tomoyuki Yamada, Yukinobu Nagayasu, Koichiro Doi, Yasuhiro Kasai, Tomoko Jindo, Daisuke Kobayashi, Atsuko Shimada, Atsushi Toyoda, Yoko Kuroki, Asao Fujiyama, Takashi Sasaki, Atsushi Shimizu, Shuichi Asakawa, Nobuyoshi Shimizu, Shin-ichi Hashimoto, Jun Yang, Yongjun Lee, Kouji Matsushima, Sumio

- Sugano, Mitsuru Sakaizumi, Takanori Narita, Kazuko Ohishi, Shinobu Haga, Fumiko Ohta, Hisayo Nomoto, Keiko Nogata, Tomomi Morishita, Tomoko Endo, Tadasu Shin-I, Hiroyuki Takeda, Shinichi Morishita, Yuji Kohara: "The medaka draft genome and insights into vertebrate genome evolution", *Nature*, Vol. 449, No. 7145, pp. 255-382 (2007).
- [12] Shoji Fukamachi, Masato Kinoshita, Kouichi Aizawa, Shoji Oda, Axel Meyer, Hiroshi Mitani: "Dual control by a single gene of secondary sexual characters and mating preferences in medaka", *BMC Biology*, Vol. 7, No. 64, pp. 1-10 (2009).
- [13] 泉 完, 清水秀成, 東 信行, 丸居 篤, 矢田谷健一: "ミナミメダカの突進速度に関する実験", 農業農村工学会論文集, Vol. 86-1, No. 306, pp. II-1-II-7 (2018).
- [14] Drake T. Hechter, Caleb T. Hasler: "Repeatability of burst swimming performance in medaka(*Oryzias latipes*)", *Fish Physiol Biochem*, Vol. 45, No. 4, pp. 1299-1307 (2019).
- [15] Farhan Ullah, Shun'ichi Kaneko, Satoru Igarasi: "Orientation Code Matching for Robust Object Search", *IEICE Transactions on Information and Systems*, Vol. E84-D, No. 8, pp. 999-1006 (2001).
- [16] 高氏秀則, 金子俊一, 田中孝之: "未知環境におけるロバストタギング", 電気学会論文誌 C, Vol. 125, No. 6, pp. 926-934 (2005).
- [17] 樋口知之: "粒子フィルタ", 電子情報通信学会誌, Vol. 88, No. 12, pp. 989-994 (2005).
- [18] Tatsuya Honda, Hidenori Takauji, Shun'ichi Kaneko: "Robust Tracking Method to Moving Object with Random Walk", *The Journal of the Institute of Image Electronics Engineers of Japan*, Vol. 41, No. 4, pp. 360-365 (2012).
- [19] Farhan Ullah, Shun'ichi Kaneko: "Using orientation codes for rotation-invariant template matching", *Pattern Recognition*, Vol. 37, No. 2, pp. 201-209 (2004).
- [20] 浦野貴裕, 金子俊一, 高氏秀則, 田中孝之: "方向符号差分ヒストグラムに基づくロバスト回転不変照合法", 画像電子学会誌, Vol. 36, No. 4, pp. 417-425 (2007).
- [21] Takahiro Urano, Shun'ichi Kaneko, Takayuki Tanaka, Munatoshi Imada: "Using orientation code difference histogram (OCDH) for robust rotation-invariant search", *Proceedings of MVA2005 IAPR Conference on Machine Vision Applications*, pp. 364-367 (2005).
- [22] Ryutaro Tanaka, Yasutake Okuda, Satoru Takahashi, Shoji Oda and Shun'ichi Kaneko: "Medaka Observation based on Rotation Invariant Features", *Proceedings of 1st International Workshop on BioImage Recognition*, 2795a, pp. 328-331 (2013).

- [23] Ryutaro Tanaka, Yasutake Okuda, Satoru Takahashi, Shoji Oda and Shun'ichi Kaneko: "Behavior Tracking Method for Medaka Observation", *Proceedings of International Symposium on Optomechatronic Technologies*, M1A-3 (2013).
- [24] Asahi Matsuda, Satoru Takahashi, Kuniaki Kawabata, Shun'ichi Kaneko: "Behavior Tracking of Medaka based on Rotation Invariant Features", *The 8th International Symposium on Adaptive Motion of Animals and Machines*, pp.43-44 (2017).
- [25] 松田朝陽, 高橋悟, 川端邦明, 尾田正二, 金子俊一: "メダカの群れ行動解析に向けたバイオロギング", 第18回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, pp. 519-522 (2017).
- [26] 松田朝陽, 高橋悟, 川端邦明, 尾田正二, 金子俊一: "メダカの行動解析に向けた遊泳軌跡抽出手法", 電気学会論文誌 D, Vol. 139, No. 4, pp. 424-432 (2019).
- [27] 松田朝陽, 青沼仁志, 金子俊一: "アギトアリの顎の超高速運動解析に向けた動画画像計測手法の検討", 2017年度精密工学会北海道支部学術講演会, pp. 75-76 (2017).
- [28] W. Gronenberg, J. Tautz, and B. Holldobler: "Fast trap jaws and giant neurons in the ant *Odontomachus*", *Science*, Vol. 262, No. 5133, pp. 561-563 (1993).
- [29] Asahi Matsuda, Hitoshi Aonuma, Shun'ichi Kaneko: "A structural analysis based on kinetic model of trap-jaw in *Odontomachus*", *Proceedings of the Seventh Asia International Symposium on Mechatronics*, Vol. 1, pp.289-294 (2019).
- [30] 松田朝陽, 青沼仁志, 金子俊一: アギトアリの大顎の超高速運動計測のための回転照合法, 第25回画像センシングシンポジウム (2019).
- [31] 松田朝陽, 青沼仁志, 金子俊一: アギトアリの大顎の超高速運動解析のための画像計測手法, 2019年度精密工学会北海道支部学術講演会 (2019).
- [32] 金子俊一, 近藤友紀, 宮本敦, 五十嵐悟: "M 推定を導入したロバスト ICP 位置決め法", 精密工学誌, Vol. 67, No. 8, pp. 1276-1280 (2001).
- [33] Shun'ichi Kaneko, Tomonori Kondo, Atsushi Miyamoto: "Robust matching of 3D contours using iterative closestpoint algorithm improved by m-estimation", *Pattern Recognition*, Vol. 36, No. 9, pp. 2041-2047 (2003).
- [34] 栢場 皓之, 金子 俊一, 高氏 秀則, 戸田 昌孝, 久野 耕嗣, 菅沼 孫之: "三次元形状欠陥認識を指向したモデル形状評価型ロバスト点群照合法", 電子情報通信学会論文誌 D, Vol. 95, No. 1, pp. 97-110 (2012).
- [35] Toshinobu Asai, Hiroshi Senou, Kazumi Hosoya: "*Oryzias sakaizumii*, a new ricefish from northern Japan (Teleostei: Adrianichthyidae)", *Ichthyological Exploration of Freshwaters*, Vol. 22, No. 4, pp. 289-299 (2011).

- [36] Joseph H. Tien, Simon A. Levin, Daniel I. Rubenstein: "Dynamics of fish shoals: identifying key decision rules", *Evolutionary Ecology Research*, Vol. 6, pp. 555-565 (2004).
- [37] 竹内秀明, 末廣勇司, 今田はるか, 奥山輝大, 久保健雄: "小型魚類の適応的行動（視野運動反応, 群れ行動）の脳情報処理原理とその神経・分子的基盤の解明を目指して", 計測と制御, Vol. 46, pp. 922-926 (2007).
- [38] Takashi Ochiai, Yuji Suehiro, Katsuhiro Nishinari, Takeo Kubo, Hideaki Takeuchi: "A new data-mining method to search for behavioral properties that induce alignment and their involvement in social learning in medaka fish (*Oryzias Latipes*)", *PLoS One*, Vol. 8, No. 9, e71685 (2013).
- [39] Yasuhiko Murata, Takako Yasuda, Tomomi Watanabe-Asaka, Shoji Oda, Akiko Mantoku, Kazuhiro Takeyama, Masahiro Chatani, Akira Kudo, Satoko Uchida, Hiromi Suzuki, Fumiaki Tanigaki, Masaki Shirakawa, Koichi Fujisawa, Yoshihiko Hamamoto, Shuji Terai, Hiroshi Mitani: "Histological and transcriptomic analysis of adult Japanese medaka sampled onboard the international space station", *PLoS ONE*, Vol. 10, e0138799 (2015).
- [40] Masahiro Chatani, Akiko Mantoku, Kazuhiro Takeyama, Dawud Abduweli, Yasutaka Sugamori, Kazuhiro Aoki, Keiichi Ohya, Hiromi Suzuki, Satoko Uchida, Toru Sakimura, Yasushi Kono, Fumiaki Tanigaki, Masaki Shirakawa, Yoshiro Takano, Akira Kudo: "Microgravity promotes osteoclast activity in medaka fish reared at the international space station", *Scientific Reports*, Vol. 5, 14172 (2015).
- [41] Masahiro Chatani, Hiroya Morimoto, Kazuhiro Takeyama, Akiko Mantoku, Naoki Tanigawa, Koji Kubota, Hiromi Suzuki, Satoko Uchida, Fumiaki Tanigaki, Masaki Shirakawa, Oleg Gusev, Vladimir Sychev, Yoshiro Takano, Takehiko Itoh, Akira Kudo: "Acute transcriptional up-regulation specific to osteoblasts/osteoclasts in medaka fish immediately after exposure to microgravity", *Scientific Reports*, Vol. 6, 39545 (2016).
- [42] Tsukasa Fukunaga, Shoko Kubota, Shoji Oda, Wataru Iwasaki: "GroupTracker: Video tracking system for multiple animals under severe occlusion", *Computational Biology and Chemistry*, Vol. 57, pp. 39-45 (2015).
- [43] "Recommendation Itu-r Bt.601-7 Studio Encoding Parameters of Digital Television for Standard 4:3 and Wide-screen 16:9 Aspect Ratios Bt Series Broadcasting Service (television)" (2011).
- [44] Farhan Ullah, Shun'ichi Kaneko, Satoru Igarashi: "8-4 Object Search Using Orientation Code Matching", *Proceedings of the IAPR Conference on Machine Vision Applications (IAPR MVA 2000)*, pp. 262-266 (2000).

- [45] Yukiyasu Domae, Shun'ichi Kaneko, Takayuki Tanaka: "Robust tracking based on orientation code matching under irregular conditions", *Proceedings of Optomechatronic Machine Vision*, pp. 60510S1-60510S9 (2005).
- [46] 高氏 秀則, 金子 俊一, 田中 孝之: "方向符号化密度に基づいたスケーラブル画像探索", 精密工学会誌論文集, Vol. 72, No. 4, pp. 487-493 (2006).
- [47] Yuan Li, Isao Ohmura, Hidenori Takauji, Shun'ichi Kaneko, Takayuki Tanaka: "Robust focusing by orientation code matching and its application to depth reconstruction", *Proc. SPIE 6356, Eighth International Conference on Quality Control by Artificial Vision*, 635610 (2007).
- [48] Yuan Li, Hidenori Takauji, Shun'ichi Kaneko, Takayuki Tanaka, Isao Ohmura: "Matching-based focusing by orientation code matching and depth reconstruction", *Proc. SPIE 6718, Optomechatronic Computer-Vision Systems II*, 671802 (2007).
- [49] Kazuhiro Kagoike, Satoru Takahashi, Hidenori Takauji, Shun'ichi Kaneko: "Tracking Method to Random Walk Model based on Orientation Code Matching", *Proceedings of International Symposium on Optomechatronic Technologies*, Vol. 7266, pp. 72660K1-72660K8 (2008).
- [50] Yuan Li, Hidenori Takauji, Shun'ichi Kaneko, Takayuki Tanaka, Isao Oh: "Robust focusing using orientation code matching", *Electronic Letters on Computer Vision and Image Analysis*, Vol. 7, No. 3, pp. 101-114 (2008).
- [51] 李 媛, 高氏 秀則, 大村 功, 金子 俊一, 田中 孝之: "方向符号照合に基づくロバスト合焦法", 精密工学会誌, Vol. 75, No. 5, pp. 650-656 (2009).
- [52] 本田 匠, 高氏 秀則, 金子 俊一: "照明スペクトル変動に対してロバストな重み付きカラー方向符号照合法", 精密工学会誌, Vol. 75, No. 2, pp. 313-320 (2009).
- [53] 清水邦夫: "方向統計学の最近の発展", 電子情報通信学会誌, Vol. 19, No. 2, pp. 127-150 (2008).
- [54] 高橋悟, 野田祥希, 松田朝陽, 川端邦明, 鈴木剛, 武村史朗, 小笠原敬, 金子俊一: "海洋観測に向けた海中ランドマークの生成手法", *Journal of Signal Processing*, Vol.21, No. 1, pp. 15-24 (2017).
- [55] 青沼 仁志: "生き物がもつ身体構造と身体運動", システム／制御／情報, Vol. 63, No. 6, pp. 223-228 (2019).
- [56] K. Kagaya, S. N. Patek: "Feed-forward motor control of ultrafast, ballistic movements", *Journal of Experimental biology*, Vol. 219, pp. 319-333 (2016).
- [57] M. Burrows, G. Sutton: "Interacting gears synchronize propulsive leg movements in a jumping insect", *Science*, Vol. 341, No. 6151, pp. 1254-1256 (2013).

- [58] S. N. Patek, J. E. Baio, B. L. Fisher, A. V. Suarez: “ Multifunctionality and mechanical origins: ballistic jaw propulsion in trap-jaw ants ”, *Proceedings of Natl Acad Sci USA*, Vol. 103, No. 34, pp. 12787-12792 (2006).
- [59] De La Mora A, Perez-Lachaud G, Lachaud J-P: “ Mandible strike: The lethal weapon of *Odontomachus opaciventris* against small prey ”, *Behav Processes*, Vol. 78, No. 1, pp. 64-75 (2008).
- [60] N. F. Carlin, D. S. Gladstein: “ The ”bouncer” diffense of *Odontomachus ruginodis* and other odontomachine ants (*Hymenoptera: formicidae*) ”, *Psyche*, Vol. 96, No. 1-2, pp. 1-19 (1989).
- [61] J. C. Spagna, A. Schelkopf, T. Carrillo, A. V. Suarez: “ Evidence of behavioral co-option from context-dependent variation in mandible use in trap-jaw ants (*Odontomachus* spp.) ”, *Naturwissenschaften*, Vol. 96, No. 2, pp. 243-250 (2009).
- [62] F. J. Larabee, A. V. Suarez: “ Mandible-powered escape jumps in trap-jaw ants increase survival rates during predator-prey encounters ”, *PLoS ONE*, 10, p. e0124871 (2015).
- [63] W. Gronenberg: “ The trap-jaw mechanism in the dacetine ants *Deceton amigerum* and *Strumigenus* sp. ”, *The Journal of Experimental Biology*, Vol. 199, No. 9, pp. 2021-2033 (1996).
- [64] W. Gronenberg: “ Mandible muscle fibers in ants: fast of powerful? ”, *Cell Tissue Res*, Vol. 289, No. 2, pp. 347-361 (1997).
- [65] S. Just, W. Gronenberg: ” The control of mandible movements in the ant *Odontomachus* ”, *Journal of Insect Physiology*, Vol. 45, No. 3, pp. 231-240 (1999).
- [66] H. Aonuma, K. Kagaya, A. Matsuda, S. Kaneko, K. Osuka: ” Slow and ultra-fast movement of the mandible in the trap jaw ant genus *Odontomachus* ”, *Proceedings of the 39th annual meeting of the Japanese Society for Comparative Physiology and Biochemistry*, pp. 66 (2017).
- [67] W. Gronenberg: “ The fast mandible strike in the trap-jaw ant *Odontomachus*: 1. Temporal properties and morphological characteristics ”, *Journal of Comparative Physiology A Neuroethol Sens Neural Behav Physiol*, Vol. 176, No. 3, pp. 391-398 (1995a).
- [68] W. Gronenberg: “ The fast mandible strike in the trap-jaw ant *Odontomachus*: 2. Motor control ”, *Journal of Comparative Physiology A Neuroethol Sens Neural Behav Physiol*, Vol. 176, No. 3, pp. 399-408 (1995b).
- [69] W. Gronenberg, C. R. F. Brandao, B. H. Dietz, S. Just: “ Trap-jaws revisited: the mandible mechanism of the ant *Acanthognathus* ”, *Physiological Entomology*, Vol. 23, No. 3, pp. 227-240 (1998).

- [70] W. Gronenberg, B. Holldobler, G. D. Alpert: “Jaws that snap: the mandible mechanism of the ant *Mystrium*”, *Journal of Insect Physiology*, Vol. 44, No. 3, pp. 241-253 (1998).
- [71] F. J. Larabee, W. Gronenberg and A. V. Suarez: “Performance, morphology and control of power-amplified in the trap-jaw ant *Mymoteras* (Hymenoptera: Formicidae)”, *The Journal of Experimental Biology*, Vol. 220, No. 17, pp. 3062-3071 (2017).
- [72] 松田朝陽, 青沼仁志, 浪花啓右, 金子俊一: “オキナワアギトアリの顎の超高速回転運動の機構モデル構築のためのパタン計測”, 第24回画像センシングシンポジウム, IS2-19 (2018).
- [73] 松田朝陽, 青沼仁志, 浪花啓右, 金子俊一: “アギトアリの大顎の機構モデリング”, 2018年度精密工学会秋季大会・精密工学会学術講演会講演論文集, pp. 646-647 (2018).
- [74] Asahi Matsuda, Hitoshi Aonuma, Keisuke Naniwa, Shun'ichi Kaneko: “Image-based measurement of ultra-fast movement of mandible in trap-jaw ants”, *Proceedings of 2018 12th France-Japan and 10th Europe-Asia Congress on Mechatronics*, pp.83-86 (2018), (USB).
- [75] Asahi Matsuda, Hitoshi Aonuma, Keisuke Naniwa, Shun'ichi Kaneko: “Image-based measurement of ultra-fast movement of mandible in trap-jaw ants”, *Proceedings of 2018 12th France-Japan and 10th Europe-Asia Congress on Mechatronics*, pp. 83-86 (2018).
- [76] Hitoshi Aonuma, Katsushi Kagaya, Asahi Matsuda, Shun'ichi Kaneko, Koichi Osuka: “Slow and ultra-fast movements of the mandible in the trap jaw ant genus *Odontomachus*”, 日本比較生理生化学会 第39回福岡大会, pp. 66 (2017).
- [77] Hitoshi Aonuma, Koichi Osuka, Kyohsuke Ohkawara: “Mechanisms of ultra-high speed movement in the trap jaw ant”, *Society of Instrument and Control Engineers of Japan (SICE), 2017 56th Annual Conference of the, (IEEE)*, pp. 15-18 (2017).

謝辞

論文執筆に際し、大変多くの先生方からご指導ご鞭撻を賜りましたことを冒頭にて先に厚く御礼申し上げます。

はじめに、ヒューマンセントリック工学研究室にてご指導いただきました、金子俊一教授、田中孝之准教授、松下昭彦助教への謝辞を述べます。金子俊一教授には指導教員として日ごろのLMをはじめ、多くのご助言をいただきました。また、研究者・教育者として何が重要か、また、研究を進める上で生じる課題にどのように対峙するかについてご教示いただきました。私の今後の人生において大切な財産となりました。田中孝之准教授には、研究では運動解析の分野でより専門的なご助言をいただき、研究の幅を大幅に広げることができました。研究活動外では、いつも気さくに話しかけていただき、研究活動を進める上で大きな支えとなりました。松下助教には、主にGMにてお世話になりました。質問等頂戴し、活発な議論をすることができました。つぎに、私を客員研究員として在籍させてくださった電子科学研究所人間数理研究室の青沼仁志准教授に心から謝意を示します。研究を進める上で、実験環境を提供していただき、さらに、セミナーでは生物学的視点から多くのご助言をいただきました。そして、本論文をまとめる上で、副査として多くのご助言をいただきました小野里雅彦教授に感謝申し上げます。

私は、香川大学で学士課程2年間と修士課程2年間で過ごしました。その際、在籍しておりました高橋研究室の高橋悟教授には研究活動を通じ、現在の土台となる研究姿勢や考え方をご教示頂きました。高橋研で過ごした3年半により現在の自分があると思っております。感謝申し上げます。そして、学士課程よりお世話になっております日本原子力研究開発機構の川端邦明先生には、日頃より研究から考え方に至るまで多くのご助言をいただきました。”物事を多角的に捉え考察すること”は今でも私の教訓です。今後もこの教訓を胸に精進致します。

メダカの研究を進める上でお世話になりました東京大学の尾田正二准教授におかれましては、多数のデータをご提供いただき、手法を開発する上で大変助かりました。また、メダカに関する質問にもご回答いただき、知見を広げることができました。御礼申し上げます。さいごに、研究活動に従事する中でサポートしていただいた方々への謝意を示します。ヒューマンセントリック工学研究室では、吉川美紀秘書、途中雅恵秘書に日ごろから大変お世話になりました。いつでも優しく接していただき、大変豊かな研究室生活を送ることができました。また、博士課程1年次に近い立場からいつもご助言をくださった、日下聖氏および土谷圭央氏に感謝申し上げます。身近なところに、お二人のような高い目標がいてくださり、高いモチベーションとなりました。OBの高氏秀則氏、本田匠氏におかれましても研究室外でお会いした際に、多くのご助言を賜りました。感謝申し上げます。そして、共に生活した後輩の皆さんには多くのご迷惑をおかけしました。先輩として何もしてあげれていませんが、皆さんと研究し、会話をし、食事をし、飽きることもない素晴らし

い日常を過ごすことができました。本当に恵まれていました。ありがとう。人間数理研究室では、浪花啓右氏、同期の脇田大樹君に多分野視点での多くのご助言をいただきました。心から感謝いたします。高橋研究室では、奥田泰丈氏、田中龍太郎氏に特にお世話になり、メダカの研究を進める上で多くを学びました。この場をお借りし、御礼申し上げます。

末筆ながら、私の同期であり友である、橋本光太郎君、宮島沙織さんに心からの謝意を示します。互いに深く干渉せず、でも、言いたいことは言い合えるというバランスが心地よく、修了後もずっと関係を継続できればと期待しております。

研究業績目録

学位関連論文

査読付き学会誌等

- (1) 松田朝陽, 高橋悟, 川端邦明, 尾田正二, 金子俊一, メダカの行動解析に向けた遊泳軌跡抽出手法, 電気学会論文誌 D, Vol.139, No.4, pp.424-432, 2019.04.

査読付き国際会議プロシーディングス

- (1) Asahi Matsuda, Hitoshi Aonuma, Keisuke Naniwa, Shun'ichi Kaneko, Image-based measurement of ultra-fast movement of mandible in trap-jaw ants, Proceedings of 2018 12th France-Japan and 10th Europe-Asia Congress on Mechatronics, 2018.
- (2) Asahi Matsuda, Hitoshi Aonuma, Shun'ichi Kaneko, A structural analysis based on kinetic model of trap-jaw in *Odontomachus*, Proceedings of the Seventh Asia International Symposium on Mechatronics, Vol. 1, pp.289-294, 2019.

学術講演

- (1) Asahi Matsuda, Satoru Takahashi, Kuniaki Kawabata, Shun'ichi Kaneko, Behavior Tracking of Medaka based on Rotation Invariant Features, the 8th International Symposium on Adaptive Motion of Animals and Machines, pp.43-44, 2017. 06.
- (2) 松田朝陽, 青沼仁志, 金子俊一, アギトアリの顎の超高速運動解析に向けた動画像計測手法の検討, 2017 年度精密工学会北海道支部学術講演会, pp. 75-76, 2017.09.
- (3) Hitoshi Aonuma, Katsushi Kagaya, Asahi Matsuda, Shun'ichi Kaneko, Koichi Osuka, Slow and ultra-fast movements of the mandible in the trap jaw ant genus *Odontomachus*, 日本比較生理生化学会 第 39 回福岡大会, pp. 66, 2017.11.
- (4) 松田朝陽, 高橋悟, 川端邦明, 尾田正二, 金子俊一, メダカの群れ行動解析に向けたバイオリギング, 第 18 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, pp. 519-522, 2017.12.
- (5) 松田朝陽, 青沼仁志, 浪花啓介, 金子俊一, オキナワアギトアリの大顎の超高速回転運動の機構モデル構築のための画像パターン計測, SSII2018, 2018.06.

- (6) 松田朝陽, 青沼仁志, 浪花啓介, 金子俊一, アギトアリの大顎の機構モデリング, 精密工学会秋季大会学術講演会, 2018.09.
- (7) Asahi Matsuda, Hitoshi Aonuma, Keisuke Naniwa, Shun'ichi Kaneko, Image-based Measurement of Ultra-fast Movement of Mandible in Trap-Jaw Ants, 2018 winter international symposium on big-data, cybersecurity and IoT, 2018.12.
- (8) 松田朝陽, 青沼仁志, 金子俊一, アギトアリの大顎の超高速運動計測のための回転照合法, SSII2019, 2019.06.
- (9) 松田朝陽, 青沼仁志, 金子俊一, アギトアリの大顎の超高速運動解析のための画像計測手法, 2019 年度精密工学会北海道支部学術講演会, 2019.08.

その他の業績

査読付き学会誌等

- (1) 高橋悟, 野田祥希, 松田朝陽, 川端邦明, 鈴木剛, 武村史朗, 小笠原敬, 金子俊一, 海洋観測に向けた海中ランドマークの生成手法, Journal of Signal Processing, Vol.21, No. 1, pp. 15-24, 2017.

学術講演

- (1) Asahi Matsuda, Satoru Takahashi, Kuniaki Kawabata, Fumiaki Takemura, Kei Ogasawara, Extraction Method of Texture Features on Monitoring Image of Coral Reef, IEEEJ International Workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization, V-17, 2016.03.
- (2) 松田朝陽, 奥田雄大, 高橋悟, 川端邦明, 小笠原敬, サンゴ被度の自動検出に向けたテクスチャ解析, 第 17 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, pp. 0569-0571, 2016.12.
- (3) 早瀬友美乃, 中西秀, 坂上貴洋, 青沼仁志, 高原聡, 松田朝陽, 金子俊一, マイクロ CT を使った丸めた紙の 3 次元構造解析, 日本物理学会, 2017.09.