

# 大規模魚群行動解析のための位置姿勢変化を考慮した個体追跡

## Individual Fish Tracking for Behavior Analysis of Large Scale Fish school

竹内 よしき† 本郷 昂貴† 寺山 慧‡ 波部 斉†  
Takeuchi Yoshiki Hongo Kouki Terayama Kei Hitoshi Habe

### 1. はじめに

魚の行動には、未だに解明されていないことが多数存在する[1]. 例として、トーラス状に泳いでいる魚群(図1)の個々の魚の遊泳している位置は常に同じなのか、魚はお互いに接触することなく一定の間隔を保ち続けながらおおよいでいるのか、などが挙げられる. 魚の動きの獲得は、これらのメカニズムの解明の第一歩となる. 非接触で動きを獲得するためには、映像解析が有用であるが、大規模魚群を構成する魚を対象にする際、魚同士の重なる多発が問題になる.

魚群の行動を扱った研究としては、魚群全体の挙動を形成するモデルの作成やシミュレーションによる魚群の形態調査、トーラス状に回転する魚群のローテーションカーブの推定などが行われている[2][3][4][5][6]が、多くは魚群のマクロな挙動を扱うものであり、魚群の個々の魚が群れの中でどのような移動を行っているかを知るものではない. 個々の魚の動きを探る研究では、魚影モデルを用いた個体追跡手法[7][8]が提案されているが、魚同士の重なりにより追跡精度が低下する、最適な魚影が見つからずに追跡に失敗する問題があった.

本研究では、魚の遊泳時の姿勢変化を表現するモデルを導入し、パーティクルフィルタを用いて魚同士の重なりに対応した追跡を行う手法を提案する. 提案手法では、魚同士の重なりが起こる状況下でも魚群中の個々の魚を追跡可能とすることを目的とし、追跡を可能にするため姿勢に着目して追跡を行う. 魚は常に姿勢を変化させながら遊泳する特徴をもつことから、魚の位置や遊泳方向だけでなく、姿勢も考慮することで魚同士の重なりに対応した追跡ができると期待される. そこで、魚の姿勢を表現するために魚が遊泳する際の姿勢(位相・振幅)変化を表現する魚影の時系列変化モデル[9]を導入し、その変化を観測するために、対象物体の状態を逐次的に推定する上で汎用性の高い、パーティクルフィルタ[10]を用いた. これにより、魚同士の重なりが発生している箇所であっても、追跡が行うことができると考える.

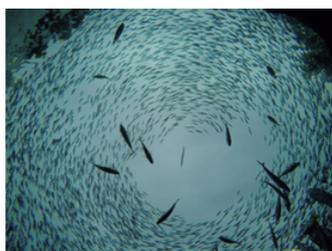


図1 水槽の底から撮影したイワシの魚群

### 1 関連研究

#### 1.1 物体の検出・追跡

映像内の移動物体の追跡を行う手段の一つとして、パーティクルフィルタと呼ばれる追跡対象の状態を逐次的に推定する技術が挙げられる[11]. 人を対象としたものでは、追跡対象の大きさや複数台のカメラを用いて、パーティクルフィルタの状態量を2次元座標空間ではなく3次元座標空間で表現し、奥行きを考慮することで複雑な重なりに対して頑健な追跡を行う研究などが報告されている.[12][13][14]. しかし、本研究で対象としている魚群中の個々の魚では非常に尾数が多く、魚同士の重なりが多発する上、見た目にもほとんど違いがなく大きさも変わらないため、奥行きを考慮し重なりに対応することは困難である. 松田らは、メダカを対象として、輝度変動及び回転に頑健な中心差分方向符号を特徴とした中心差分方向符号法と二重尤度に基づくパーティクルフィルタを統合することにより、各フレームでメダカの位置を検出し、時系列で推定することで複数のメダカの各々の個体の遊泳軌跡を出力することを可能にしている[15]. この手法では、魚の姿勢は考慮していないため遊泳中の魚がどのような姿勢をしているのかはわからないため、位置予測精度が低下すると考えられる. そのため、この手法を魚群中の個々の魚に対して用いることは困難である. 本論文では、NACA0012 翼型を用いることで魚の姿勢を表現しパーティクルフィルタと合わせることで、魚群中の個々の魚の状態を推定し重なりに対して頑健な追跡手法の確立を目指す.

#### 1.1 魚の検出・追跡

個々の魚の検出・追跡する研究に関しても様々な研究が行われている[7][8][16][17][18][20][21][22].

Decoultらは、小さな水槽に複数の魚を用意し照明や鏡、複数のカメラを用いて3次元での計測を行い水槽の正面からの映像では魚同士の重なりによって見えなくなっている魚の位置を獲得し、追跡を行った[23]. この研究は小さな水槽での実験が行われているため、本論文で対象としている水族館などの巨大な水槽で3次元での計測を行うことは困難である.

そこで我々は、2次元での計測を行うために魚が持つ特徴の1つである姿勢に着目する. 魚は遊泳する際、頭と尾びれを左右にビートさせながら遊泳する特徴を持つ. そのため、魚の姿勢を表現することができれば、より高精度な魚の位置推定・追跡が可能となる. [7]では映像中の魚を基に様々な姿勢をとる魚の姿勢画像を作成し、それらを用いてパターンマッチングを行い、個々の魚の位置や遊泳方向や姿勢を獲得した.[8]ではNACA0012翼型とSA法[19]を用いて、[7]での問題であった映像中の魚の姿勢をパラメトリ

†近畿大学 Kindai University

‡理化学研究所/京都大学 RIKEN/Kyoto University

ックに表現することが可能となり、より詳細な姿勢情報を獲得できた。

しかし[7][8]とも複数匹の魚同士の重なりが発生した場合、魚の位置や向きを推定する処理時間がかかってしまう問題や、最適な姿勢が見つからず追跡が途切れ、失敗する問題が起こる。本稿での提案手法は、この問題に対処するために、パーティクルフィルタの枠組みを用いて、位置・遊泳方向の他に魚の姿勢(位相・振幅)の変化を表現し、魚同士の重なりにより魚の全身が不明確な状態でも各フレームでの魚の位置・遊泳方向・姿勢を推定するものである。

## 2. 提案手法の概要

本節では、提案手法について詳しく述べる。2.1 節では魚の姿勢を表現する際に使用している、魚影の作成方法と作成された魚影画像から得られる情報の注意点を記述する。2.2 節では、魚の位置・遊泳方向・姿勢(位相・振幅)の状態とその変化を表現する際に使用するパーティクルフィルタについて記述する。

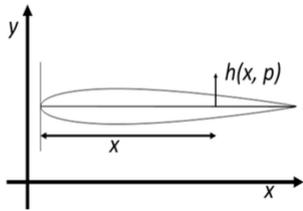


図2 魚影モデル NACA0012 翼型

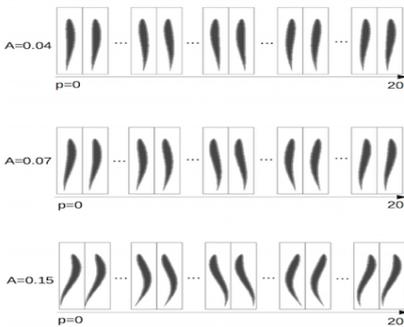


図3 時系列変化する魚影モデル

### 2.1 NACA0012 翼型を利用した魚影の作成

[8]の手法にならって魚の姿勢を表現し、各時刻での魚の位置と姿勢を獲得する。この手法では、飛行機の翼の断面形状の一つとして知られている図2のNACA0012翼型を利用する[9]。これを利用することで、魚の姿勢をパラメトリックに表現できるだけでなく、姿勢を表すパラメータを連続的に変化させることによって、図3のように魚の自然な動きを表現できる。

以下の式を用いて魚影の形を変形させ図3を作成している。

$$h(x, p) = A(-(x-1)^2 + 1)\cos 2\pi/\lambda(x - cp) \quad \dots \quad (1)$$

(1)式のパラメータはAが最大振幅、 $\lambda$ がビートの振れ幅、cが単位時間当たりのビート回数の増減、xが図2で示す頭からの距離、pが時刻を示す。魚は遊泳する際、頭と尾びれを左右にビートさせながら遊泳するという特徴があり、頭の方向が進行方向に一致しているわけではない。提案手

法では画像上に定められた軸を基準として、各魚の進行方向となす角度( $\theta$ )を求めて進行方向とする。

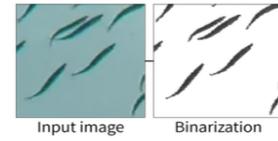


図5 二値化処理

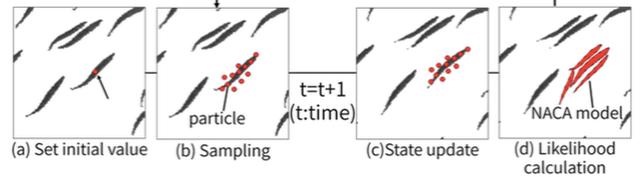


図6 状態推定

### 2.2 パーティクルフィルタによる状態推定

パーティクルフィルタによる推定の流れを図5,6に示す。以下では、図5,6に適した流れに沿って説明を行う。

#### 1. 二値化処理

まず、尤度推定を行うための準備として、パーティクルフィルタによる状態推定を行うために使用するすべての入力画像に対して二値化処理を行う。入力画像に対して大津の二値化によって二値化を行い、魚領域と背景領域を分ける(図5)。

#### 2. 初期値の設定

図6(a)では、追跡対象とする魚に対して位置( $x, y$ )、遊泳方向( $\theta$ )、姿勢を表す振幅(A)、位相(p)の要素を持つパーティクルを設定する。

#### 3. パーティクルの生成・再生成

図6(b)ではパーティクルの生成を行う。初期フレーム( $t = 1$ )では、図6(a)で設定した各要素を持つパーティクルを任意の数(N個)生成し、それぞれに対してノイズを加える。ノイズには一様乱数を用い、以下の式を用いてパーティクルの生成を行う。

$$x_N = x_1 + n \quad \dots \quad (2)$$

(2)式のパラメータは $x_N$ が生成されたパーティクルの各要素の値、 $x_1$ が図6(a)で設定したパーティクルの初期値、nがノイズである。

2フレーム目以降( $t \geq 2$ )では、図6(d)で求められた尤度を基にパーティクルの再生成を行う。

#### 4. 状態の更新

図6(c)では以下の式を用いてパーティクルの状態更新を行う。

$$x_{t+1} = f(x_t, x_{t-1}) + n \quad \dots \quad (3)$$

(3)式のパラメータは、 $x_{t+1}$ が更新されたパーティクルの各要素の値、 $f(x_t, x_{t-1})$ が時刻tとt-1から1求まる追跡対象の魚の状態遷移、nがノイズである。

#### 5. 尤度推定

パーティクルの各要素が更新された際、振幅(A)の値が著しく大きいものや小さいものが出てくることがある。異常な値を持つ振幅(A)によって魚影が生成されると魚の形を形成していない魚影が生成される。これらの魚影が尤度推定で使用されると追跡失敗の原因となるため、振幅(A)の値が異常な場合に

は、尤度を0とし、次フレームで異常値を持つパーティクルが削除されるようにする。

図6(d)では尤度推定を行う。各パーティクルの持つ姿勢情報からNACA0012翼型による魚影を生成し、観測画像との輝度の差の絶対値を求め、魚影全体でのその和を誤差( $d$ )とする。以下の式(4)によって尤度( $L$ )を算出する。 $\sigma$ は分布の標準偏差を表す。

$$L = \sigma(-(d/\sigma)^2) \quad \dots \quad (4)$$

以上の1~5の処理を繰り返すことで追跡を行う。

### 3. 実験

提案手法の有効性を検証するために2つの実験を行った。実験1ではあらかじめ定めた各パラメータから魚影を作成し、提案手法で推定した位置・姿勢(振幅・位相)との比較を行い、提案手法の有効性を示す。実験2では複雑かつ連続的な重なりが多発する実映像を使って追跡を行い、魚同士の重なりが多発する状況であっても追跡に失敗しないかどうかを調べ、提案手法の有効性を検証する。



図7 単独遊泳する魚影(127フレーム)

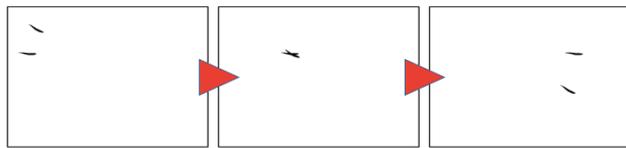


図8 単純な交差をする魚影(100フレーム)

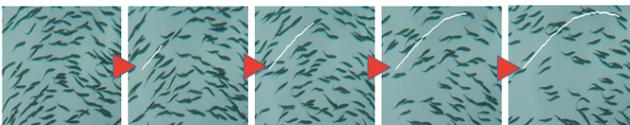


図9 複雑かつ連続的な重なりが発生する魚の映像(120フレーム)

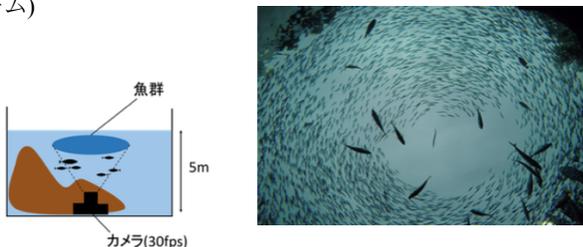


図10 実験環境と撮影された魚群

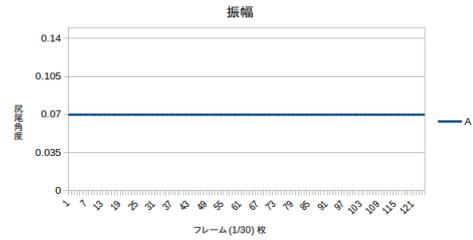


図11 振幅の遷移

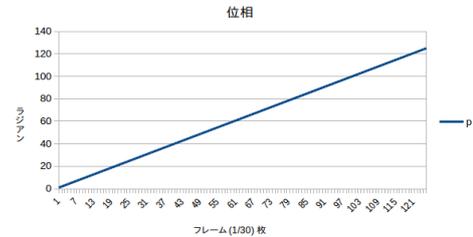


図12 位相の遷移

#### 3.1 データセット

実験1では各パラメータをあらかじめ定め、それを基に単独遊泳する魚影、2匹で交差する魚影を作成したもの(図7,8)を用いる。実験2では西海国立公園九十九島水族館にて撮影された1分間の映像を1539枚(30フレーム/秒)に分割したものの一部を用いる(図9)。ここでは図10(a)のように水深約5mの水槽にGoProを沈め、水槽の底から魚群を撮影した(図10(b))。追跡には単独遊泳をする魚影(図7)、単純な交差をする魚影(図8)、複雑かつ連続的に重なりを起こしている魚(図9)を用いる。

#### 3.2 実験1

図7, 8の魚影について提案手法でパラメータを推定した結果を示す。本研究では姿勢に着目しているため、設定した各パラメータの内、姿勢(振幅・位相)のパラメータの遷移を図11, 12に示し、推定値とのずれを確認する。設定した姿勢の値について、振幅の値は一定であり、位相の値は尻尾1往復で20となりその後も直線的に上がり続けるものとする。

誤差平均	位置誤差 (画素)	遊泳方向 (度)	振幅	位相
単独遊泳	0.833	1.413	0.015	0.582
交差(a)	3.576	0.933	0.012	1.019
交差(b)	1.108	0.884	0.015	0.682

表1 各パラメータの平均誤差

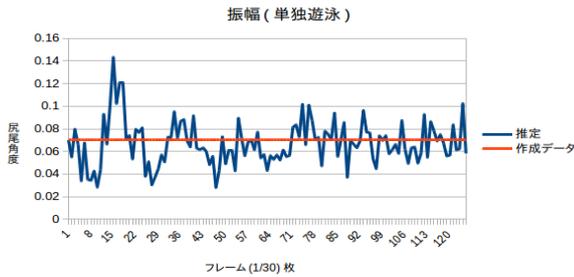


図 1 3 振幅の比較(単独遊泳)

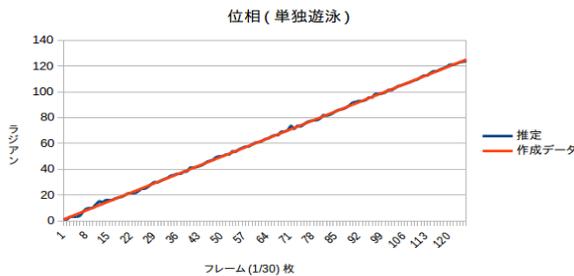


図 1 4 位相の比較(単独遊泳)

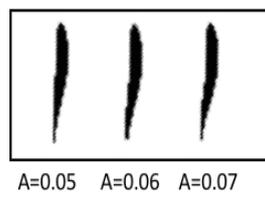
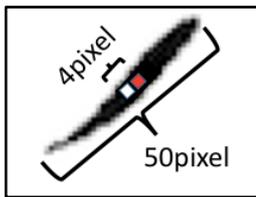


図 1 5 魚の体長と誤差の視覚化 図 1 6 振幅の違い

実験 1 での位置・遊泳方向・姿勢の誤差を表 1 に、例として単独遊泳をしている魚影の姿勢(振幅・位相)の作成データと推定値を比較したグラフを図 1 3, 1 4 に示す。提案手法で推定した値とあらかじめ定めておいた正解値との差の絶対値を各フレームで求め、全フレームで求めた値の平均を求めた。魚の位置誤差の平均は単独遊泳、交差のどちらも 4 画素を下回っていた。図 1 5 に今回使用した魚影モデルの体長と正解座標と提案手法による推定座標の誤差の例を示す。今回使用した魚影モデルの体長は 50 画素程度であり、誤差 4 画素は図 1 5 に示すように 1 匹の魚の領域内に収まるものであり、他の魚の影響を受ける危険性は少ない。遊泳方向も誤差平均が  $1^\circ$  前後と小さな誤差であった。そして、本研究で注目している姿勢誤差について、表 1 と図 1 4 から、位相の値は設定した値から大きく外れることなく正確に推定できていることがわかる。振幅の値はグラフでみるとばらつきがあるように見えるが、表 1 の誤差平均は 0.01 台である。図 1 6 について、位相は同じ値で、(a)は振幅の値が 0.05、(b)は 0.06、(c)は 0.07 とした時である、図 1 6 で示す通り振幅の 0.01 の違いは目視で見ても、違いはほとんどないため、こちらも正確に推定できていると考える。以上のことからあらかじめ用意したデータは正確に推定できていることがわかった。

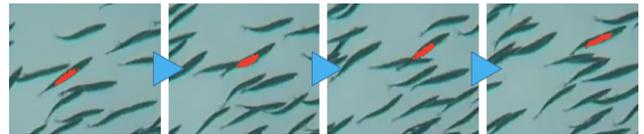


図 1 7 重なりが起きた部分の抜き出し 1 (追跡成功)

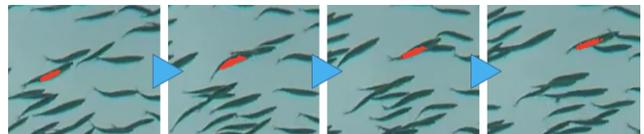


図 1 8 重なりが起きた部分の抜き出し 2 (追跡成功)

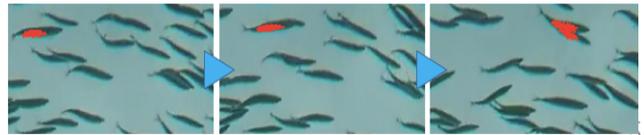


図 1 9 重なりが起きた部分の抜き出し 3 (追跡失敗)

### 3.3 実験 2

複雑かつ連続的な重なりが発生する実映像の追跡では、正解値がなく定量的な観測ができないため、追跡を成功するかどうかに着目して評価する。実映像から魚を 1 匹追跡して、追跡に成功している部分と失敗している部分を図 1 7, 1 8, 1 9 に示す。図中の赤い点はパーティクルを図上に重畳したものである。図 1 7, 1 8 は魚同士の重なりが起こったが問題なく追跡に成功した部分である。図 1 9 は重なりによってパーティクルが分散してしまい追跡に失敗している。その原因として、追跡対象の魚に他の魚が重なり続け、魚同士が重なっている時間が長いということが挙げられる。追跡に成功している図 1 7, 1 8 は追跡対象に他の魚が重なっても、すぐに重なりは解け、重なっている時間が 20 フレーム前後であったことに対して、図 1 9 は追跡対象の魚と他の魚が重なってしまった時、なかなか重なりが解けず、重なっている時間が約 40 フレームであったことがわかった。

### 4 結論

本論文は、大規模魚群中の個々の魚を追跡することによってその行動を把握することを目標として、NACA0012 翼型による魚の姿勢表現とパーティクルフィルタによる魚の状態によって、個々の魚の追跡を行うものである。実験では、提案手法を適用することによって、作成したイワシの魚影を用いて、検出と追跡が高い精度で成功した。そして実際的水族館で遊泳しているイワシの魚群映像を用いて、様々な魚同士の重なりが起きる状態に対して追跡が成功したことから、本手法の有効性が示されたといえる。一方で、3.4 節で述べたように、追跡対象となる魚が他の魚と重なって泳ぎ続けてしまっている時や完全に姿勢がわからなくなる時間が長く発生した場合は、パーティクルが正しい魚の状態を推定できなくなり、他の魚にパーティクルが写ってしまう場合や分散し追跡が途切れることがあった。そのため、瞬発遊泳などによって魚が密集する箇所が発生した場合や日光によって魚が見えない箇所がある場合、追跡が途切れることが考えられる。本実験にしようとした映像はイワシの脅威となるサメなどが近くにおらず、日光が直接水面に当たらない曇天時に撮影され、瞬発遊泳や日光による光の屈折が最小限であったため、本手法が有効であったと

考えられる。今後の課題として、長時間姿勢推定が困難な状況を対象とした個々の魚の位置推定や、個体検出手法との組み合わせによる追跡システムの実装などが挙げられる。

## 謝辞

本研究で利用した映像データ取得は、京都大学大学院人間・環境学研究科阪上雅昭教授、西海国立公園九十九島水族館川久保晶博館長、並びに水族館スタッフの皆様のご協力を得て撮影した。ここに深く御礼申し上げる。また、本研究の一部は JSPS 科研費 JP17H05981, JP26240023 の助成を受けて行った。

## 参考文献

- [1] 海洋動物行動学研究室:  
<http://web.fukuyama-u.ac.jp/life/marine/koudou/index.html> (参照 2018-1-9)
- [2] Couzin, I. D., Krause, J., Franks, N. R. and Levin, S.A. "Effective Leadership and Decision-making in Animal Groups on the Move", *Nature*, Vol. 433, No.7025, pp. 513-516 (2005)
- [3] 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).
- [4] Toner, J. and Tu, Y. "Flocks, herds, and schools: A Quantitative Theory of Flocking", *Physical Review E*, Vol. 58, No. 4, pp. 4828-4858 (1998).
- [5] Vicsek, T. and Zafeiris, A. "Collective Motion, *Physics Reports*", Vol. 517, No. 3, pp. 71-140 (2012).
- [6] 寺山慧, 炭谷竜太, 阪上雅昭. "オプティカルフローを用いた魚群のローテーションカーブの推定", *IP SJ*, Vol. 2014-CVIM-190, No. 17, pp. 1-8 (2014).
- [7] Kei Terayama, Koki Hongo, Hitoshi Habe, Masa-aki Sakagami. "Appearance-based Multiple Fish Tracking for Collective Motion Analysis", *ACPR*(2015).
- [8] Kei Terayama, Hitoshi Habe, Masa-aki Sakagami. "Multiple Fish Tracking with an NACA Airfoil Model for Collective Behavior Analysis", *IP SJ Transactions on Computer Vision and Applications*, Vol. 8, No. 4, pp. 1-7 (2016).
- [9] Hiromichi Akimoto, Hideki Miyata. "Finite-volume simulation of a Flow about a Moving Body with Deformation", *Proc. 5th Int. Symp. Comp. Fluid Dynamics*, Vol. 1, pp. 13-18 (1993).
- [10] 生駒哲一. "パーティクルフィルタ: 基礎から最近の動向まで", *システム/制御/情報* Vol. 59, No. 5, pp. 164-173 (2015).
- [11] Michael Isard, Andrew Blake. "CONDENSATION - Conditional Density Propagation for Visual Tracking", *International Journal of Computer Vision*, Vol. 29, No. 1, pp. 5-28 (1998).
- [12] 西濃拓郎, 滝口哲也, 有木康雄. "複数尤度を用いた3次元パーティクルフィルタによる選手の追跡", *画像の認識・理解シンポジウム* (2010).
- [13] 松本郁佑, 加藤丈和, 和田俊和, 上田博唯. "複数カメラを用いた CONDENSATION による複数人物頭部の実時間検出・追跡", *信学技法 PRMU2005-277*, Vol. 105, No. 674, pp. 121-128 (2006).
- [14] 村北卓也, 石黒浩. "Sampled-Volume-based Data Association Filter による遮へいにロバストな実時間複数人物追跡", *電子情報通信学会論文誌 D*, Vol. J90-D, No. 10, pp. 2868-2883 (2007).
- [15] 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動画画像バイオロギング", *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* (2017).
- [16] 寺山慧, 波部斉, 佐藤僚太, 松岡高輝, 津田宏治. "CNN を用いた大規模魚群の個体検出手法", *画像の認識・理解シンポジウム* (2017).
- [17] 佐藤僚太, 波部斉, 阿部孝司, 井口信和. "CNN を用いた画像解析による大規模魚群の個体検出手法", *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* (2017).
- [18] Delcourt, J., Denoel, M., Ylief, M. and Poncin, P. "Video Multitracking of Fish Behaviour: a synthesis and future perspectives", *Fish and Fishers*, Vol. 14, No. 2, pp. 186-204 (2013).
- [19] Kirkpatrick Scott, C. Daniel Gelatt, Mario P. Vecchi. "Optimization by simulated annealing", *Science*, Vol. 220, No. 4598, pp. 671-680 (1983).
- [20] 本郷昂貴, 寺山慧, 波部斉. "魚群行動解析のための姿勢を考慮した魚の追跡", *情報処理学会 CVIM 研究会* (2016).
- [21] 本郷昂貴, 寺山慧, 波部斉. "魚群行動解析のための姿勢を考慮した魚の移動予測", *画像センシングシンポジウム SSII* (2016).
- [22] 本郷昂貴, 寺山慧, 波部斉. "高精度魚群追跡のための魚影モデルを用いた魚の移動予測", *インテリジェント・システム・シンポジウム* (2016).