

令和 5 年 5 月 16 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2021

課題番号：18H02260

研究課題名(和文) 情報科学と画像解析を応用した新技術展開による養殖魚成育生産管理システムの開発

研究課題名(英文) Development of an aquaculture fish growth and production management system through the new deployment of technology based on information science and image analysis.

研究代表者

高木 力 (TAKAGI, TSUTOMU)

北海道大学・水産科学研究院・教授

研究者番号：80319657

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,300,000円

研究成果の概要(和文)：魚類養殖生産では、生簀内に遊泳する養殖魚の個体数の自動計数技術の実現が以前より要望されている。そこで、流体の流れ可視化技術であるPTV解析(粒子移動追跡法)を個体数自動計数技術に応用し、計数システムの実現可能性について評価した。養殖クロマグロを対象に網底に設置した水中カメラによる撮影画像から深層学習を応用した個体領域抽出と、得られた領域を追跡するアルゴリズムを統合することにより、検出率を0.7以上に高めるには照度が1400-1500lx以内であること、濁度が0.7FTU未満であることが必要とされた。また、個体計数により算出された移動ベクトルから給餌による飽食状態を評価できる可能性が示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

水産物消費量は半世紀で倍増し、養殖業による持続的生産が求められている。しかし海面魚類養殖では生産物が海面下にあるため、生産管理が難しく、特に単価の高い養殖魚では個体数を把握する技術開発が望まれている。本研究では、流体可視化技術を応用することにより個体数計数を行うという発想のもと、光学カメラを用いてその実現性について評価した。その結果、深層学習による個体領域抽出と流体可視化技術の物体追跡技術を統合することにより、その有効性を確認した。生産管理技術へのICT適用はこれまで、魚類養殖で応用されることは少なかったが、漁業・養殖産業においてもDX化による効率的生産が実現できる可能性を示すことができた。

研究成果の概要(英文)：In aquaculture production, it has been desirable to implement an automatic counting technology for the number of cultured fish swimming in fish pens. Therefore, PTV analysis (Particle Tracking Velocimetry), a fluid flow visualisation technique, was applied to automatic counting technology, and the feasibility of the counting system was evaluated. By integrating an algorithm for extracting individual regions from images taken by an underwater camera installed at the bottom of a net for cultured bluefin tuna using deep learning and PTV technique, it was found that an illuminance within 1400-1500 lx and a turbidity of less than 0.7 FTU were required to increase the detection rate to more than 0.7. It was also suggested that the movement vectors calculated from the individual counts system could be used to assess feeding satiation.

研究分野：水産物理学

キーワード：養殖 クロマグロ 個体数 PTV

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

## 1. 研究開始当初の背景

近年食糧産業への ICT 導入により省力化を図り生産性向上をはかろうとする取り組みが世界的な流れとなりつつある。魚類養殖は日常的な生産管理が求められるため、ICT 導入による効率化が検討されているが、生産物が水面下にあることから成育状態の観察が困難となり、農業に比して ICT 導入の立ち後れ感は否めない。魚類養殖生産では、養殖魚のサイズや養成尾数を正確に把握できない状況にもある。また、養殖魚への環境影響や、健康状態を適切に評価することも極めて難しい。そのため魚類養殖生産技術を支援するには高度な情報処理技術が必要とされているが、これらの課題に対応する国内の研究開発基盤は必ずしも強固でない。著者らはこうした技術的背景に対応するため、養殖魚の成育生産管理システムの構築を目指して、非接触で養殖魚の収容数や成育状態を計測する技術研究開発に取り組んできた。なかでも生簀内に遊泳する養殖魚の個体数の自動計数は、生産者にとってはその技術導入への要望が強いことから、工学分野で利用されている流体の流れ可視化技術である PTV 解析(粒子移動追跡法)を個体数自動計数に応用するという独自の発想により、実験環境で生簀内の多数の魚個体を高度なレベルで自動計数できる可能性を示すことができた(H27-28 年度挑戦的萌芽研究の成果、特許出願済(2014-247145)) (図 1)。

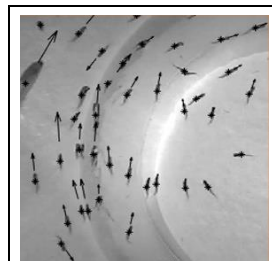


図 1. 実験レベルで得られた魚の画像と PTV 解析により抽出された個体ベクトル。

## 2. 研究の目的

そこで本研究では、魚類養殖のなかでも特に技術開発の要望が強かった養殖クロマグロの生簀内の個体数計数を実現するための技術開発を中心に行ない、養殖魚の生産管理システムの基盤技術構築を目指す。また、個体数計数技術では、そのアルゴリズムは各個体の移動ベクトルを推定し計数するというものだが、各個体のベクトルの状態を評価することによって養殖魚の状態評価への応用も期待できる。行き場のない養殖魚への養殖環境からのインパクトやその健康状態を評価することは重要な管理項目となりうる。そこで取得された各個体の移動ベクトル情報から個体の状態評価を行う指標を導出しその適用性について評価した。

## 3. 研究の方法

### (1) 個体数計数システムの開発

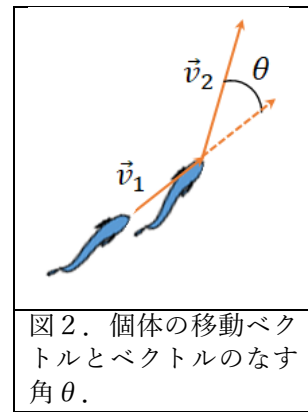
PTV 解析の応用では個体を抽出するために画像フレーム間差分を用いて背景となる画像領域を除去する手法の適用性について評価した。個体計数システムは、背景画像を除去し、個体画像を抽出するための画像処理部と抽出された個体画像から計数のために必要となる個体移動ベクトルの算出を行う運動解析部により構成されている。運動解析部の機能性評価のため抽出された個体候補領域の画像フレームの時系列データに対し KC 法を用いてフレーム間での同一個体の同定を行ない、個体の移動ベクトルを推定できるか検証した。水槽を用いた予備実験では、再現率、適合率とも 1 に近い値が得られたが、実海域では再現率が著しく低下し、個体領域抽出の再検討が必要であると考えられたため、SegNet および DeepLab v3+ とよばれる深層学習を応用したセマンティックセグメンテーション(領域分類)を導入し、個体領域抽出性能の向上が図れるか検討した。さらに、実装時の実用性を評価するため、撮影時の照度と濁度が個体数検出に与える影響を評価した。

### (2) 行動計測による養殖魚の状態評価

個体数計数システムでは、各個体の連続した移動ベクトル情報を取得できるため、養成環境が個体行動に与える影響をベクトル情報から評価できる可能性がある。撮影画像上で取得される各個体の連続する移動ベクトルのなす角  $\theta$  を算出して個体の遊泳方向の変化を把握し(図 2)、給餌により行動の変化が捉えられるか評価した。

### (3) 生け簀内養殖魚のサイズ計測と誤差評価

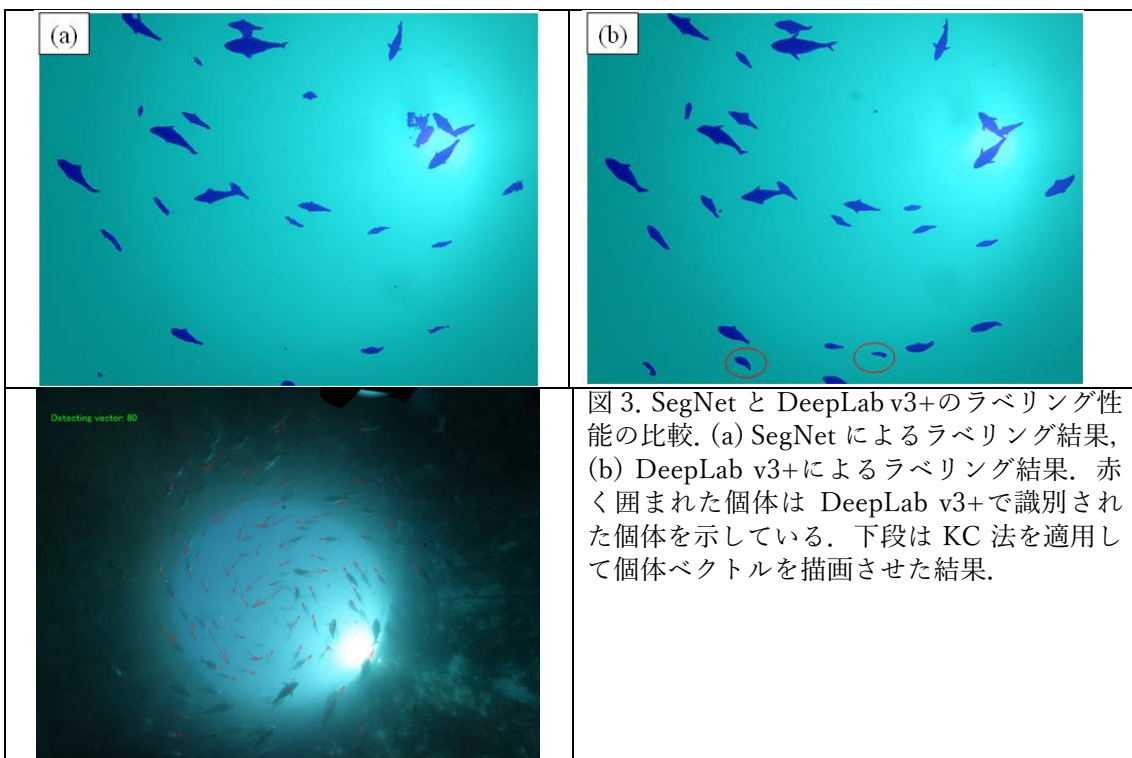
非接触で養殖魚のサイズを計測できる技術導入が求められている。ステレオカメラを用いた三次元計測技術は、視差のある 2 機のカメラで対象物体を撮影することにより特定点の三次元空間座標を推定し、長さベースの三次元計測を可能とする。一方、光学カメラによる三次元計測では DLT 法(Direct Linear Transformation method)を用いた計測によりクロマグロを対象とした尾叉長計測で実用的な精度を担保できることが確認されたが、著者らの研究により対象物とカメラとの距離が 5m 以上となると誤差率が 5% を超え始めるため、本手法を適用した場合の誤差評価が重要と考えられた。そこで、物体の空間的位置によって物体長さがどのようにカメラ画像として捉えられるか評価した。



## 4. 研究成果

### (1) 個体数計数システムの開発

図 3 は SegNet と DeepLabV3+ を用いて生簀内のクロマグロをラベリングしたときの結果を表したものである。SegNet はエンコーダーとデコーダーの対による層構造をした入力-出力モジュールを形成しており、その層数によって対象物のラベリング性能は異なってくる。図 3 (a) は層構造を 5 層としたときのラベリング結果で、教師データの画像フレーム数は 5000 枚である。4 層以下のときは個体以外の背景を誤認識した。一方、6 層以上とすると背景を誤認識することは少なくなるが、対象とする個体のラベリングを取りこぼすことが観測され、適切な層構造があることが確認された。図 3(b) は DeepLabV3+ で個体抽出を行った結果である。教師データは 5500 枚でほぼ同様の学習量となっている。DeepLabV3+ では異なる解像度で特徴マップをサンプリングする ASPP (Atrous Spatial Pyramid Pooling) と呼ばれるアーキテクチャと、Encoder-Decoder ネットワークとを組み合わせることで、高密度の特徴マップを高速に抽出することを可能としている。[1] DeepLabV3+ を用いたラベリングでは、正しく分類された画素数の比率として定義される IoU が SegNet では 0.8 程度であったのに対し、0.9 近くに上昇し、ラベリング性能の向上が確認された。図 3 で示されるように SegNet では認識できなかった個体が



DeepLabV3+では識別されていることがわかる。しかしながら、個体識別後の移動ベクトル同定を高水準で実現するためには、さらに個体の追跡アルゴリズムの性能向上が求められたため、運動解析部内における個体領域データの処理方法を改めて検討した。水槽実験では、抽出された個体領域画像の重心位置から移動ベクトルを同定していたが、実海域では深度方向に対する遊泳により撮影画像として投影される個体領域が大きく変化することが確認されたため、個体領域を形成する画素座標全体の移動ベクトルを算出することにより個体ごとの移動ベクトルを推定するようにした。その結果、100尾以上の個体が観察された生簀内で実際のクロマグロ養殖生簀内を撮影した画像で計数したところ、重心位置から移動ベクトルを同定した場合が、平均で48個体であったのに対し、改良した方法では89個体と個体移動ベクトルの同定性能が大幅に向上した。

システム実装時の運用評価を行うため、照度と濁度の環境パラメータが個体数検出性能に与える影響を評価した。濁度が0.7FTU<sup>1</sup>未満におけるDeepLab v3+による個体検出率と撮影場所の照度との関係を分析した。撮影実験はクロマグロ養殖場に設置された直径30m×深さ23mおよび直径20m×深さ15mの生簀網2機で行われた。生簀内の個体数は140-150尾であった。識別率と照度との関係をプロットし、これらの関係を一般化線形モデルでロジスティック回帰分析した。link関数はlogit関数とした。照度に対するDeepLab v3+による個体のラベリング能力は照度が過度に強まると、水面からの光の入射が強すぎることにより、個体周りで光が回折し背景と個体とのコントラストが明瞭でなくなる、いわゆるハレーションが発生し、撮影環境は悪化する。また、暗すぎる場合では当然だが光がカメラに届かなくなるため個体識別ができなくなる。そのため、横軸を照度とした場合、識別率はある照度で極大値を迎えることになる。実験結果では、個体識別率は1400-1500lxの範囲で最大値は0.7を超える値を示した。一方、濁度が0.7FTU下回ると、生簀内照度とDeepLabV3+による個体識別過程で、個体を識別できる適度な照度帯が提示できなくなったため、濁度が個体数計数を実現するための重要な環境因子であることが示された。

## (2) 行動計測による養殖魚の状態評価

給餌時と非給餌時で各個体の連続する移動ベクトルのなす角 $\theta$ に違いがあるか評価したところ、非給餌時には $\theta$ が平均で0.5未満であったのに対し、給餌時には1.0を超えており、有意な違いが確認された(Wilcoxon rank sum exact test:  $p < 0.05$ )。これは非給餌では生簀内の養殖魚個体が遊泳方向を大きく変化させない一方で、給餌時には短時間でその方向が変化することになり、給餌中の状態が特殊な状態であることを示している。この結果は、養殖魚の飽食度合を移動ベクトルの計測から評価できる可能性を示している。

## (3) 生け簀内養殖魚のサイズ計測と誤差評価

DLT法では三次元空間座標 $(X, Y, Z)$ とカメラの撮影画像平面上の2次元座標 $(u, v)$ との間に次式に示す関係が成立する。

$$\mathbf{y} = \mathbf{W}\mathbf{x} \quad (1)$$

$$\mathbf{y} = [u_a - a_1, v_a - a_2, u_b - b_1, v_b - b_2]^T \quad (2)$$

$$\mathbf{x} = [X, Y, Z]^T \quad (3)$$

ここで、 $\mathbf{y}$ は2機のカメラ画像で取得された計測点の2次元座標、 $(u_a, v_a)$ および $(u_b, v_b)$ を含む観測値ベクトルである。ただし、 $a_1, b_1$ などは、あらかじめキャリブレーションにより導出されているカメラパラメータである。また、 $\mathbf{W}$ はカメラパラメータを含む係数行列である。

<sup>1</sup> 精製水 1L に 1mg の濁度標準液であるホルマジン標準液を添加したとき 1FTU となる

実空間座標  $x$  は(1)式の行列方程式を解くことによって求められる。市販のビデオカメラ 2 機をカメラ光軸距離を 30cm に設定して基台に取り付け、一辺 600mm の立方体を撮影することにより DLT 法に必要なカメラパラメータ(校正パラメータ)を取得したところ、長さベースでの平均誤差は 0.6-1.6%の範囲となった。しかし、物体が空間上のどの位置で撮影され、物体の長手方向がどの方向を向いているかで、ステレオカメラによる DLT 法の計測値に対する感度特性は異なってくる。そこで、3次元計測のために 2 台のカメラを同じ向きに 60cm 離して設置したときの左カメラの感度特性を  $du/dl$  の等値線図として表した(図. 4)。 $du/dl$  は実空間座標上の微小長さ  $l$  の変化に対するカメラ画像平面上の左右方向座標  $u$  の変化量を表す微分値を表している。ステレオカメラの校正は 1.5m の立方体フレームを用いて行った。図中の  $X, Y$  は絶対空間座標系の  $X-Y$  平面を表し、 $X$  はカメラ画像からみると水平左右方向、 $Y$  は奥行き方向を表している。図.4 では  $Z=0$  における  $X-Y$  平面上の左半分の実空間座標で奥行き  $Y$  方向に単位長さだけ変位した際の  $u$  の変化量を  $du/dl$  の値として示している。図中の右下が原点でカメラの設置位置を、またハッチング領域はカメラの視野角外領域を表している。図中の等値曲線は、曲線の接線上の変化量がカメラ座標系の  $u$  の値として表れることを示しており、たとえば、図中の破線で示された曲線はその曲線上の接線方向の 1m の長さのものが、カメラ座標系の  $u$  の値として 10 ピクセル分の長さとして表示されることを意味している。:図のようにカメラ近傍ほど  $du/dl$  値が大きい領域は増える。また、 $Y$  軸上の  $du/dl=0$  の値はカメラの光軸と物体の長手方向が一致するため、物体の奥行き方向がカメラ画像上に映し出されない。一方、この等値線と直交するような曲線を描いた場合は、この曲線上に長手方向がおかれた物体の長さがカメラ座標上の長さが最大となるため、魚の体長を計測する場合は個体の正中線が図 4 の等値曲線に直交するように配置された場合が最も感度良く計測できることになり、空間的には光軸上に直交するよう配置された場合が最も感度が良い。

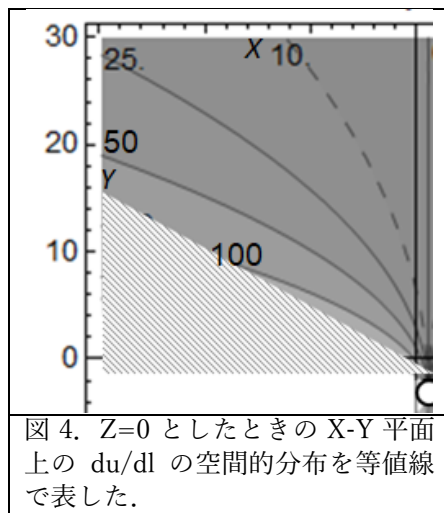


図 4.  $Z=0$  としたときの  $X-Y$  平面上の  $du/dl$  の空間的分布を等値線で表した。

## 参考文献

- [1]L. -C. Chen, G. Papandreou, I. Kokkinos, K. Murphy and A. L. Yuille, "DeepLab: Semantic Image Segmentation with Deep Convolutional Nets, Atrous Convolution, and Fully Connected CRFs," in IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 40, no. 4, pp. 834-848, 1 April 2018, doi: 10.1109/TPAMI.2017.2699184.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 S. Abe, T. Takagi, S. Torisawa, K. Abe, H. Habe, N. Iguchi, K. Takehara, S. Masuma, H. Yagi, T. Yamaguchi, and S. Asaumi	4. 巻 93
2. 論文標題 Development of fish spatio-temporal identifying technology using SegNet in aquaculture net cages	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Aquacultural Engineering	6. 最初と最後の頁 102146
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.aquaeng.2021.102146	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 K. Abe, K. Miyake, and H. Habe	4. 巻 32
2. 論文標題 Method for Measuring Length of Free-swimming Farmed Fry by 3D Monitoring	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Sensor and Materials	6. 最初と最後の頁 3595-3606
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.18494/SAM.2020.2892	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 K. Abe, S. Kuroda, and H. Habe	4. 巻 32
2. 論文標題 A Multiple Video Camera System for 3D Tracking of Farmed Fry in an Aquaculture Tank	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Sensor and Materials	6. 最初と最後の頁 3581-3594
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.18494/SAM.2020.2890	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Abe, S., Takagi, T., Torisawa, S., Habe, H., Abe, K., Iguchi, N., Takehara, K., Masuma, S., Yagi, H., Nakai, S., Yamaguchi, T., And Asaumi, S.	4. 巻 11
2. 論文標題 Examination of image extraction method for fish individuals in aquaculture net cage	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Contributions on the Theory of Fishing Gears and Related Marine Systems	6. 最初と最後の頁 119-127
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 K. Abe, M. Tanaka, H. Habe, Y. Taniguchi, and N. Iguchi	4. 巻 4
2. 論文標題 Video Scene Detection of Burst Swimming by Fry of Farmed-raised Bluefin Tuna	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proc. of the 4th International Conference on Frontiers of Signal Processing (ICFSP 2018)	6. 最初と最後の頁 105-109
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ICFSP.2018.8552079	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 高木 力, 米山 和良, 阿部 悟, 鳥澤 真介, 竹原 幸生, 山口 武治, 浅海 茂	4. 巻 54
2. 論文標題 画像解析を用いた非接触型養殖魚計測システムの開発	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 日本水産工学会誌	6. 最初と最後の頁 209-213
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.18903/fisheng.54.3_209	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

[学会発表] 計13件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 岩井佑樹, 竹長慎太郎, 波部斉, 阿部孝司, 井口信和
2. 発表標題 Single Shot Object Detectorを用いたクロマグロ稚魚の個体検出
3. 学会等名 第26回画像センシングシンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 鈴木励, 波部斉, 大谷雅之, 阿部孝司, 井口信和
2. 発表標題 急激な動き変化に対応したクロマグロ稚魚の移動軌跡の獲得
3. 学会等名 第19回情報科学技術フォーラム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 村田 一星, 波部 斉, 大谷雅之, 阿部孝司, 井口信和
2. 発表標題 水面の見え方変化に頑健な大規模魚群中の稚魚検出手法
3. 学会等名 情報処理学会第83回全国大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 増田裕斗, 谷口義明, 波部斉, 阿部孝司, 井口信和
2. 発表標題 BLE 機器を水中で使用するための音響通信変換システムの開発
3. 学会等名 2019年度情報処理学会関西支部支部大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田中勝, 阿部孝司, 波部斉, 谷口義明, 井口信和
2. 発表標題 ハレーションを含むクロマグ稚魚遊泳動画における瞬発遊泳シーンの検出
3. 学会等名 映像情報メディア学会冬季大会2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 増田裕斗, 谷口義明, 波部斉, 阿部孝司, 井口信和
2. 発表標題 任意のBLE機器を水中で使用するための音響通信変換モジュールの開発
3. 学会等名 電子情報通信学会関西支部第25回学生会研究発表講演会
4. 発表年 2020年



1. 発表者名 金田彩花, 阿部孝司, 波部齊, 谷口義明, 井口信和, 阿部悟, 鳥澤眞介, 高木力
2. 発表標題 映像を用いた生簀内クロマグロの尾数計測
3. 学会等名 電子情報通信学会関西支部学生会研究発表講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 榎野拓真, 阿部孝司, 波部齊
2. 発表標題 側扁型の養殖稚魚を対象とした非接触体長推定
3. 学会等名 電子情報通信学会関西支部学生会研究発表講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 寛野陽生, 阿部孝司, 波部齊, 谷口義明, 井口信和
2. 発表標題 動画を用いた生簀内クロマグロ稚魚の尾数推定
3. 学会等名 電子情報通信学会関西支部学生会研究発表講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 阿部 悟・高木 力・鳥澤眞介・米山和良・波部 齊・阿部孝司・井口信和・竹原幸生・升間主計・八木洋樹・中井彰治・山口武治・浅海 茂
2. 発表標題 魚群を構成する個体数計数技術開発
3. 学会等名 日本水産学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 三宅航暉, 阿部孝司, 波部斉
2. 発表標題 動画を用いた養殖稚魚の非接触体長推定
3. 学会等名 電子情報通信学会関西支部学生会研究発表講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 黒田真一朗, 阿部孝司, 波部斉
2. 発表標題 動画を用いた水槽内稚魚の3Dトラッキング
3. 学会等名 電子情報通信学会関西支部学生会研究発表講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田中勝, 阿部孝司, 波部斉, 谷口義明, 井口信和
2. 発表標題 クログロ稚魚の遊泳映像における 瞬発遊泳シーンを検出するための特徴量
3. 学会等名 平成30年 電気学会 電子・情報・システム部門大会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	阿部 孝司  (ABE KOUJI)  (90367441)	近畿大学・情報学部・准教授   (34419)	参画期間：2019年度 - 2022年度

## 6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	竹原 幸生 (TAKEHARA KOSEI) (50216933)	近畿大学・理工学部・教授  (34419)	参画期間：2018年度 - 2022年度
研究分担者	鳥澤 眞介 (TORISAWA SHINSUKE) (80399097)	近畿大学・農学部・講師  (34419)	参画期間：2018年度 - 2022年度
研究分担者	井口 信和 (IGUCHI NOBUKAZU) (50351565)	近畿大学・理工学部・教授  (34419)	参画期間：2018年度
研究分担者	米山 和良 (KOMEYAMA KAZUYOSHI) (30550420)	北海道大学・水産科学研究院・准教授  (10101)	参画期間：2018年度

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	阿部 悟 (ABE SATORU)	一般財団法人電力中央研究所・サステナブルシステム研究本部・研究員  (82641)	
研究協力者	波部 斉 (HABE HITOSHI)	近畿大学・情報学部・准教授  (34419)	
研究協力者	谷口 義明 (TANIGUCHI YOSHIAKI)	近畿大学・情報学部・准教授  (34419)	

## 7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------