

スマート養殖環境における水中ドローンを 活用した自動監視・点検支援システムの提案

岩上鈴実^{†1} 高橋秀幸^{†2} 戸川大樹^{†3} 深江一輝^{†4}
荒井研一^{†5} 今井哲郎^{†5} 宮島洋文^{†5} 服部充^{†5} 小林透^{†6}

近年、水産養殖において養殖網の状態確認や生け簀構造の点検は不可欠である。しかし、これらの作業は潜水士による目視点検に依存しており、身体的負担や時間的コストが大きいという課題がある。また、水中ドローンの活用が期待されているものの、養殖網全体を自律的に巡回し、汚れ度合いを空間的に把握する技術は十分に確立されていない。本研究では、水中ドローンによる自律巡回と画像処理を用いた養殖網点検、および汚れ度合いの数値化と3次元空間での可視化を統合した点検支援システムの実現を目的とする。本稿では、自律巡回機能、画像処理に基づく汚れ検出・段階評価機能、汚れ分布を可視化する空間可視化機能の設計と試作、シミュレーション環境における予備実験について述べる。

Proposal of an Underwater Drone-Based Automated Monitoring and Inspection System for Smart Aquaculture

Suzumi Iwakami^{†1}, Hideyuki Takahashi^{†2}, Daiki Togawa^{†3},
Kazuki Fukae^{†4}, Kenichi Arai^{†5}, Tetsuro Imai^{†5},
Hirofumi Miyajima^{†5}, Mitsuru Hattori^{†5}, Toru Kobayashi^{†6}

Inspection of aquaculture nets and fish cage structures is essential in aquaculture operations; however, these tasks rely on manual visual inspections by divers, resulting in significant physical burden and time costs. Although underwater drones have attracted attention, technologies for autonomous patrol of entire aquaculture nets and spatial assessment of biofouling conditions remain insufficient.

This study develops an inspection support system that integrates autonomous patrol using an underwater drone, image-processing-based net inspection, and quantitative evaluation and three-dimensional visualization of biofouling conditions, and presents its design, implementation, and preliminary experiments in a simulation environment.

1. はじめに

水産養殖においては、養殖網の状態確認や生け簀構造の点検といった監視作業が不可欠である。これらの作業は、網の破損や汚れの蓄積による養殖環境の悪化を防ぎ、養殖生物の健全な生育や安定した生産を維持する上で重要な役割を担っている。一方で、現在の点検作業は潜水士による目視点検や手作業に依存しており、水中での長時間作業に伴う身体的負担が大きいことに加え、作業時間や人件費といった時間的・経済的コストが大きいという課題がある[1]。また、点検作業は天候や水中環境の影響を受けやすく、十分な視認性が確保できない場合も多い。さらに、点検結果は作業者の経験や主観に依存しやすく、網全体の状態を客観的かつ一貫した基準で把握することが難しいという問題も指摘されている。

近年、これらの課題を解決する手段として、水中ドローンを活用した養殖施設の点検が注目されている。水中ドローンを用いることで、潜水作業を伴わずに広範囲の点検が可能となり、作業負担の軽減や安全性の向上が期待される。しかし、既存の研究や実運用では、操縦者による遠隔操作を前提とした点検が多く、養殖網全体を自律的に巡回しながら汚れ度合いを把握する仕組みは十分に確立されていない。加えて、画像処理を用いて汚れの有無や割合を算出する研究は存在するものの、汚れの位置や分布を網全体の構造と対応付けて空間的に把握する手法は限られている。そのため、点検結果を直感的に理解し、効率的な管理や判断に活用することが難しいという課題が残されている。

本研究では、水中ドローンによる自律巡回と画像処理を用いた養殖網点検、ならびに汚れ度合いの数値化と3次元空間での可視化を統合した点検支援システムの実現を目的とする。提案システムにより、従来の目視点検では困難であった網全体の汚れの位置や程度を空間的に把握し、点検作業の効率化と省力化を目指す。本稿では、提案する点検支援システムの概要を示し、システムを構成する基本機能として、(1)巡回機能、(2)点検機能、(3)空間可視化機能の設計および試作について述べる。また、試作システムを用いた予備実験について述べる。

-
- 1 東北学院大学 教養学部 情報科学科
Department of Information Science, Faculty of Liberal Arts, Tohoku Gakuin University
 - 2 東北学院大学 情報学部 データサイエンス学科
Department of Information Science, Faculty of Informatics, Tohoku Gakuin University
 - 3 長崎大学 情報データ科学部
School of Information and Data Sciences, Nagasaki University
 - 4 長崎総合科学大学 総合情報学部
Faculty of Applied Information Technology, Nagasaki Institute of Applied Science
 - 5 長崎大学大学院 総合生産科学研究科
Graduate School of Integrated Science and Technology, Nagasaki University
 - 6 駒澤大学 グローバル・メディア・スタディーズ学部
Faculty of Global Media Studies, Komazawa University

2. 関連研究と課題

水中ドローンを用いた養殖施設の点検に関する研究は、近年の水中ドローンの普及に伴い、巡回・計測・可視化といった観点から多く報告されている。これらの研究は、主に(1)水中ドローンによる巡回・点検の実証、(2)画像処理や学習手法を用いた汚れや健全性の評価、(3)取得情報の可視化や管理支援の三つの観点から整理できる。

まず、水中ドローンを用いた巡回・点検に関する研究や実証事例では、潜水作業を代替する手段としての有効性が示されている。石田らは、水中ドローンを用いた藻場観測の事例と水中画像解析による分布把握の有効性を示している[2]。また、真珠養殖業における実証事業[3]では、水中ドローンの導入による作業効率化や安全性向上を確認している。これらの研究は、水中ドローンによる巡回点検の有用性を示す一方で、点検経路の自律化や取得情報の定量的評価については十分に議論されていない。

次に、画像処理を用いた養殖網の汚れや健全性評価に関する研究が行われている。Fabijanićらは、深層学習を用いたセグメンテーションにより藻類付着度を高精度に推定する手法を提案している[4]。一方で、学習データの準備や計算コストが大きく、現場での即時的な利用には課題がある。画像の領域分割と網構造解析を組み合わせることを前提としており、付着物が高密度な状況では適用が困難となる可能性がある。

さらに、水中画像処理分野では、光の吸収や散乱による画質劣化への対処を目的とした研究が数多く行われている。Schettiniらは、水中画像における劣化要因と復元・強調手法を体系的に整理している[6]。また、Ancutiらは複数の特徴量を融合することで水中画像を強調する手法を提案している[7]。これらの手法は視認性向上に有効であるが、処理負荷が高く、点検支援への即時的な適用には制約がある。

以上のように、既存研究では、巡回、汚れ評価、画像強調などの要素技術が個別に検討されているものの、水中ドローンによる自律巡回と汚れの定量的評価、さらにその結果を空間的に可視化して点検判断に活用する統合的な枠組みは十分に確立されていない。そこで本研究では、水中ドローンによる自律巡回、輪郭強度に基づく軽量の汚れ評価、および三次元空間での可視化を組み合わせることで、養殖網全体の状態を直感的に把握可能な点検支援手法を提案する。

3. 本研究の概要

3.1 システムの概要

図1に、本研究で提案する水中ドローンを活用した養殖網点検支援システムの概要を示す。本提案システムは、水中ドローンが生け簀の外周を自律的に巡回し、養殖網の映像を取得することから開始される。取得された映像は画像処理による点検機能に

入力され、養殖網の汚れ度合いを数値的に評価するとともに、視覚的に把握可能な形で可視化される。具体的には、巡回中に取得したカメラ映像から画像を抽出し、輪郭強度に基づく汚れ評価を行うことで、網の汚れ度合いを段階的に算出する。算出された評価結果は、ヒートマップとして可視化され、汚れの分布を直感的に確認することが可能となる。さらに、巡回映像から抽出したフレーム画像を用いて三次元再構築を行い、汚れ度合いを反映した生け簀の三次元モデルを生成する。これにより、従来の潜水士による目視点検では把握が困難であった、養殖網全体における汚れの位置や集中領域を空間的に把握することが可能となる。また、点検結果を数値および可視化結果として提示することで、養殖施設の点検作業における効率化と省力化を支援する。

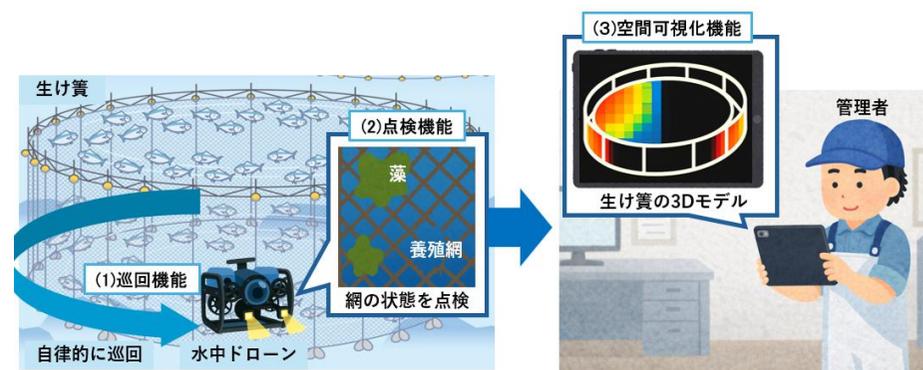


図1 水中ドローンを活用した養殖網点検支援システムの概要

3.2 システムの基本機能

本提案システムは、養殖網の点検作業を支援することを目的としており、(1)巡回機能、(2)点検機能、(3)空間可視化機能の3つの基本機能から構成される。以下に、各機能の概要について述べる。

(1) 巡回機能

巡回機能は、水中ドローンが生け簀の外周を自律的に巡回し、養殖網のカメラ映像を取得する機能である。本研究では、養殖網全体を効率的に観測することを目的として、生け簀外周に沿った巡回経路を設定し、連続的に映像を取得する。これにより、経路全体を巡回しながら、養殖網の映像を連続的に取得することが可能となる。

(2) 点検機能

点検機能は、巡回機能により取得した養殖網映像を用いて、網の汚れ箇所を強調し、

点検判断を支援するための情報を提供する機能である。本機能では、画像中の養殖網の輪郭強度に着目した画像処理を行い、汚れの分布状況をヒートマップとして可視化するとともに、汚れ度合いを段階的な数値として算出する。本機能では、算出された輪郭強度に基づき画素を5段階に分類することで、汚れの程度を段階別に表現する。各段階は可視化に用いるカラーマップの色域と対応付けられており、それぞれの段階が画像全体に占める割合を算出することで、汚れの付着状況を客観的に把握することが可能となる。図2に、ヒートマップを用いた汚れ指標レベルの段階定義を示す。これにより、点検者はヒートマップによる直感的な分布の把握に加え、段階別割合を用いた全体的な汚れの進行度を確認することができ、効率的な点検判断が期待できる。

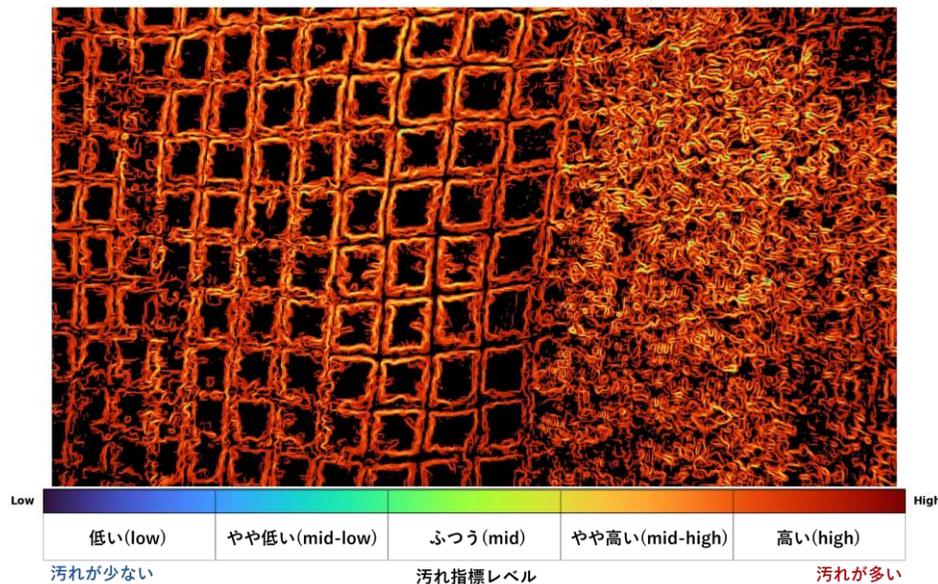


図2 汚れ指標レベルの段階定義

(3) 空間可視化機能

空間可視化機能は、水中ドローンの巡回中に撮影した映像および点検機能の結果を用いて、汚れの分布を三次元空間上に可視化する機能である。巡回映像から一定間隔でフレーム画像を抽出し、生け簀の三次元モデルを生成する。生成された三次元モデルは、点検機能で得られた養殖網の汚れ度合いが反映されるため、生け簀にある養殖網全体における汚れの位置や集中領域を空間的に把握することが可能となる。

4. 試作システムの設計と実装

4.1 設計

図3に試作システムの概要と構成を示す。具体的には、水中ドローンと各機能の動作を確認するためのシミュレーション環境として Gazebo を使い、ロボットシステムの統合基盤には ROS2 を利用した。実環境で想定している水中ドローンの基本機能と簡易的な養殖網をシミュレーション環境で再現することで、本提案システム全体の動作および実現可能性を確認するものである。また、実環境においては、水中ドローンのカメラ、水産試験場の生け簀内を GoPro で撮影した動画像を入力として、可視化を行うための(2)点検機能と(3)空間可視化機能を実装している。

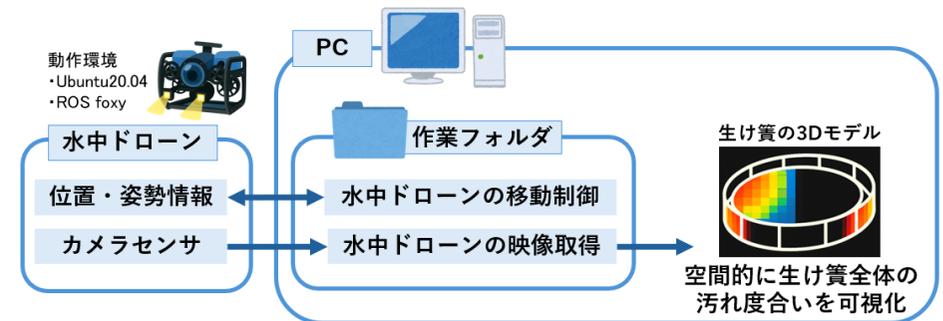


図3 試作システムの構成

4.2 実装

4.2.1 巡回機能

水中ドローンは、一般的に位置情報として GPS などを利用することができない。そのため、本提案システムの巡回機能では、水中ドローンが生け簀の外周に沿って自律的に巡回し、養殖網の映像を連続的に取得する。本研究では、生け簀の中心位置と半径を基に円周経路を導出することで自動巡回を行う。巡回制御には、追跡点を逐次更新しながら経路追従を行う Pure Pursuit 法を用いた。現在位置から一定角度先に設定した追跡点へ向かうように制御を行うことで、急激な姿勢変化を抑えつつ、安定した巡回を行うようにする。

4.2.2 点検機能

点検機能では、取得した養殖網の画像を入力として、養殖網の汚れ箇所を強調し、点検判断を支援するための情報を生成する処理を実装した。まず、入力画像をグレー

スケール化し、Sobel フィルタを用いて水平方向および垂直方向の輝度勾配を算出する。得られた勾配成分を統合することで輪郭強度画像を生成し、正規化処理を行う。正規化した輪郭強度の値に対して Turbo カラーマップを適用することで、汚れの付着状況をヒートマップとして可視化する。同時に、算出された強度に基づき各画素を汚れの度合いに応じた 5 段階に分類し、それぞれの段階が画像全体に占める画素割合を算出する。これにより、点検者はヒートマップによる直感的な分布の把握に加え、段階別割合を用いた定量的な汚れの進行度を確認することが可能となる。

なお、本機能は、長崎県長崎市にある養殖用生け簀を対象とした実証実験フィールドにおいて撮影した映像データを入力として動作確認を行っている。具体的には、GoPro を用いて撮影した養殖網の動画から抽出した静止画像を処理対象とし、管理条件の異なる複数の生け簀において取得した画像データを用いて動作確認を行った。

4.2.3 空間可視化機能

空間可視化機能では、巡回中に取得した映像を用いて汚れ分布を三次元空間上に可視化する。具体的には、巡回映像から一定間隔でフレーム画像を抽出し、三次元再構築ツールである COLMAP に入力することで、生け簀周辺の三次元モデルを生成する。

5. 予備実験

5.1 巡回機能の予備実験

図 4 に巡回機能の動作画面を示す。巡回機能の予備実験では、Gazebo 上に構築した生け簀モデルを対象として、水中ドローンが生け簀の外周に沿って自律的に巡回できることを確認した。また、巡回動作中において、養殖網のカメラ映像を連続的に取得できることを確認した。これにより、生け簀周囲を巡回しながら点検に必要な映像データの収集が可能であることを示した。

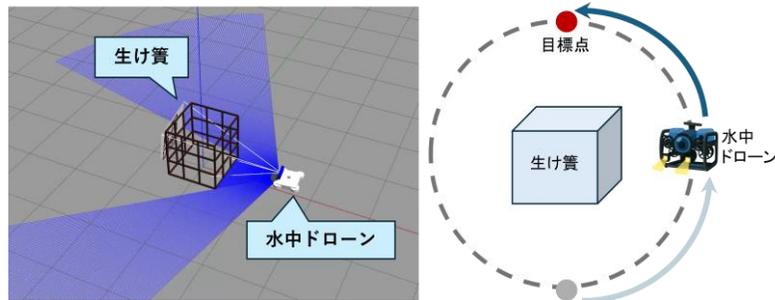


図 4 巡回機能の動作画面

5.2 点検機能の予備実験

図 5 に点検機能の動作画面を示す。点検機能の予備実験では、カメラから取得した養殖網の画像を入力として、汚れの度合いをヒートマップ形式で出力できることを確認した。本機能では、画像内の輝度勾配に基づいた輪郭強度の算出と正規化処理を行うことで、汚れが疑われる箇所を強調し、直感的な把握を可能にする。汚れ度合いを段階的に数値化できることを確認した。これにより、養殖網の汚れ状態を数値情報と可視化結果の両面から客観的に確認することが可能である。

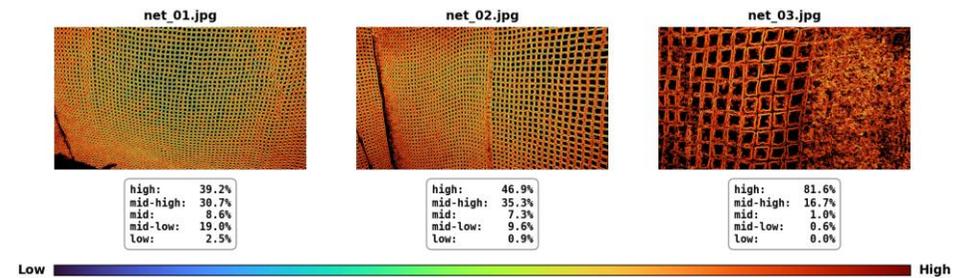


図 5 点検機能の動作画面

5.3 空間可視化機能の予備実験

空間可視化機能の予備実験では、点検機能を実行しながら巡回して撮影した生け簀の映像を用いて、COLMAP による三次元再構築を行った。その結果、シミュレーション環境内の生け簀構造に対応する点群によってモデルの構築ができることを確認した。

5.4 人手評価との比較

本研究の有効性を検証するため、漁業従事者による目視評価と提案手法による評価結果の比較を行った。比較対象として、長崎総合水産試験場の漁業従事者による養殖網の目視評価を用いた。評価の収集には、Google フォームを用いたアンケート調査を実施した。図 6 に、実際に評価時に使用したアンケート画面を示す。評価対象は、藻の付着度合いが異なる養殖網の水中画像 15 枚である。漁業従事者による目視評価では、養殖網の汚れ度合いを 5 段階で評価し、各段階を数値 (1~5) に置き換え、比較の尺度とした。具体的には、「非常に汚れている」を 5、「汚れている」を 4、「ふつう」を 3、「ほとんど汚れていない」を 2、「汚れていない」を 1 と定義した。一方、提案手法による評価では、輪郭強度解析を用いて各汚れ指標レベルの段階割合を算出し、各段階に対して重みを設定した。例えば、汚れ指標レベルが「高」の場合は重み 5、「低」の場合は重み 1 とするよう段階的な重み付けを行い、これらを統合した加重平均値を提案手法の最終評価値とした。

得られた評価結果について、漁業従事者による目視評価と提案手法による評価の一致度を検証するため、Pearson の相関係数および Spearman の順位相関係数を用いて評価を行った。その結果、Pearson の相関係数は 0.67 となり、両者の評価値が数値的に高い連動性を有していることを確認した。また、Spearman の順位相関係数は 0.59 となり、汚れ度合いの高低による順位付けにおいても、漁業従事者の評価と一致する傾向が比較的高いと考えられる。以上の結果から、提案手法による評価結果は、漁業従事者による目視評価と一定の整合性を有しており、養殖網の汚れ度合いを定量的に評価する手法として有効であることが示唆された。



図6 アンケート画面

6. おわりに

本研究では、水中ドローンを活用した養殖網の自律巡回点検と画像処理に基づく汚れの数値化および空間可視化機能を統合した点検支援システムの提案と試作について述べた。本提案システムにより、従来の潜水士による目視点検では把握が困難であっ

た養殖網全体の汚れの位置や分布を、視覚的かつ定量的に把握できる可能性を示した。また、シミュレーション環境における予備実験を通して、自律巡回機能、点検機能、空間可視化機能の基本的な動作および機能の連携を確認した。今後は、汚れ検出精度の向上およびシステム全体の評価を行い、養殖施設における点検作業の効率化と省力化への貢献を目指す。

謝辞 本研究の一部は、JSPS 科研費 24H00744, 24K0793 の助成を受けたものである。

参考文献

- 1) 小林康宏, “水中ドローンを取り巻く状況の変化と課題,” 国土交通省, 第7回海における次世代モビリティに関する産学官協議会 (令和7年2月6日) について, 資料 4-1<https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/ocean_policy/content/001861064.pdf> (参照 2025-12-19)
- 2) Y. Ishida, K. Ishita, K. Nakamura, “The Usage of the Underwater Drone with the Introduction of a Case of Analyzing Underwater Images of Seaweed Bed,” Fisheries Engineering, Vol.60, No.1, pp.27–31, 2023.
- 3) 株式会社 NTT ドコモ, “真珠養殖業における ROV を活用した海洋環境調査の有効性実証,” 令和3年度 海の次世代モビリティの利活用に関する実証事業, 2022.
- 4) M. Fabijanić, N. Kapetanović, N. Mišković, “Autonomous Visual Fish Pen Inspections for Estimating the State of Biofouling Buildup Using ROV,” Journal of Marine Science and Engineering, Vol.11, No.10, Article 1873, pp.1–18, 2023.
- 5) W. Qiu, V. Pakrashi, B. Ghosh, “Fishing Net Health State Estimation Using Underwater Imaging,” Journal of Marine Science and Engineering, Vol.8, No.9, Article 707, DOI:10.3390/jmse8090707, Sep. 2020.
- 6) A. Schettini and S. Corchs, “Underwater Image Processing: State of the Art of Restoration and Image Enhancement Methods,” EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, Vol. 2010, 情報処理学会研究報告
- 7) C. O. Ancuti, C. Ancuti, T. Haber, P. Bekaert, “Enhancing Underwater Images and Videos by Fusion,” Proc. of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), pp. 81–88, Dec. 2012.