

令和 6 年 6 月 2 日現在

機関番号：13302

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2023

課題番号：20K19898

研究課題名（和文）極限水中環境における音響カメラを用いた3次元水中マテリアル分布マップの生成

研究課題名（英文）3D Material Distribution Mapping by Acoustic Camera in Extreme Underwater Environment

研究代表者

池 勇勲（JI, YONGHOON）

北陸先端科学技術大学院大学・先端科学技術研究科・准教授

研究者番号：90823766

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,700,000円

研究成果の概要（和文）：音響カメラを水中ロボットに搭載して水中環境の探査に用いれば、濁った水中環境における3次元空間のセンシングが可能である。

本研究は、周囲環境の形状を直観的に把握可能にするため、音響カメラの計測情報から水中環境における密な3次元形状情報だけでなく、環境の物質・材料に関する情報も同時に反映した水中マテリアル分布マップを生成する手法の構築を目的とする。

音響カメラにより撮影した対象物の物質・材料をセマンティックセグメンテーションにより認識する手法と、認識した情報を3次元でマッピングする手法をそれぞれ新たに構築することで、水中マテリアル分布マップを生成するシステムを実装した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

新空港、港湾、海底トンネルの建設及び干拓事業などの水辺の開発はもちろん、福島第一原子力発電所の原子炉のような人間が入れない環境に対する調査活動での遠隔操作による水中ロボットの活用に注目が集まっている。本研究で実現した音響カメラの計測情報から周囲環境の密な3次元マテリアル分布マップを復元する技術は、周囲環境の直感的な認識が不可欠な無人水中ロボットの運用において極めて重要であり、提案技術の成果はさらに将来的にも水中探査や作業の自動化において大きな技術革新をもたらすと期待され、本研究の学術的な意義が大きい。

研究成果の概要（英文）：An acoustic camera which is mounted on an underwater robot can measure 3D space even in turbid water when exploring the underwater environment.

This study aims to establish a method to generate an underwater material distribution map that includes not only dense 3D shape information but also material information in the environment from the acoustic camera, in order to enable an intuitive understanding of the surrounding environment. We implemented a system that generates an underwater material distribution map by establishing novel methodologies to recognize the materials of objects captured by an acoustic camera using semantic segmentation and generate a 3D map including the recognized material information.

研究分野：知能ロボティクス

キーワード：音響カメラ 水中ロボット SLAM 極限環境 マテリアル分布

### 1. 研究開始当初の背景

新空港、港湾、海底トンネルの建設及び干拓事業などの水辺の開発はもちろん、2011年3月に発生した福島第一原子力発電所の事故における原子炉のような人間が直接入れない環境に対する調査活動での水中ロボットの活用に注目が集まっている。このような極限水中環境では、情報収集のための探査や危険物の除去作業などのために、図1に示すような無人水中ロボットの導入が急務である。最近注目を浴びており、次世代の超音波センサと呼ばれる DIDSON (dual-frequency identification sonar) や ARIS (adaptive resolution imaging sonar) などの音響カメラ (図2) を水中ロボットに搭載して水中環境の探査に用いれば、従来の超音波センサでは不可能であった3次元空間のセンシングが可能となり、濁った水中環境内でも高解像度の画像が出力可能である。さらに、音響画像内の輝度値は、計測対象の物質・材料の性質に強く依存する特性を持っており、これらの性質を物理モデルにより分析し、SLAM (simultaneous localization and mapping) における環境特徴量として活用すれば、信頼性の高い水中マテリアル分布マップの生成が可能である。ここで SLAM 技術とはロボットの位置・姿勢と周辺環境の形状を同時に推定する技術であり、適用するには一般に環境に存在するロバストな特徴量をセンサの計測値から抽出する必要がある。陸上環境における SLAM の場合、既に多くの特徴量抽出に関する研究が報告されている一方、水中 SLAM に適用するための特徴量に関する理論はまだ確立されていないため、音響カメラの撮影情報から環境のマテリアル情報を分析し、水中 SLAM における特徴量として活用する理論を新たに構築する点から、本研究の学術的な意義が大きい。また、生成された水中マテリアル分布マップを関連する意思決定機関へ提供することで、後の水辺の開発計画や減災、廃炉、復旧復興計画などの策定のための活用を図る。提案技術の成果はさらに将来的にも水中ロボットによる探査や作業の自動化において大きな技術革新をもたらすと期待される。

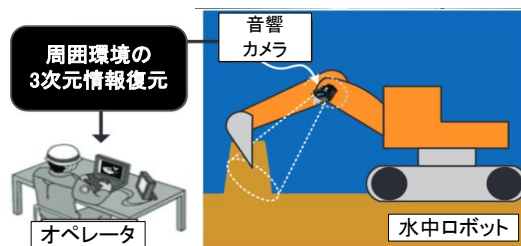


図1 音響カメラを用いた周囲環境の3次元情報復元に基づく遠隔操作型水中ロボットの運用

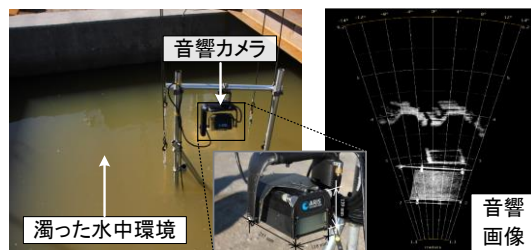


図2 音響カメラARISと濁った水中での撮影画像

### 2. 研究の目的

筆者らは先行研究において、音響カメラを搭載した遠隔操作型水中ロボットによる水中環境の密な3次元形状マップの生成を初めて実現し、多数の研究論文を公表している。しかし、形状情報のみの復元に留まっており、後の様々な計画策定のための参考資料としては限界がある。以上の点を踏まえ、本研究では上記の先行研究の延長として、密な3次元形状情報だけでなく、環境の物質・材料に関する情報も同時に反映した水中マテリアル分布マップの生成を実現するブレークスルーを目指す。

### 3. 研究の方法

本研究では、音響カメラにおける水中マテリアル分布マップの生成を実現するために、以下の2つのアプローチで研究を遂行した。

#### (1) セマンティックセグメンテーションによる材質認識

本研究では、環境を構成する材質の認識を行うために、機械学習に基づくセマンティックセグメンテーションによる手法を採用した。提案システムの概要を図3に示す。まず、音響画像を取得し、音波が物体に入射する際の入射角を推定する。次に、推定した入射角と音響画像上の距離情報を処理することで、機械学習における入力画像となるRGB画像を生成する。その後、機械学習によるセマンティックセグメンテーションを行うことで音響画像上に投影された物体の表面の材質を認識する。提案手法における認識結果を図4に示す。

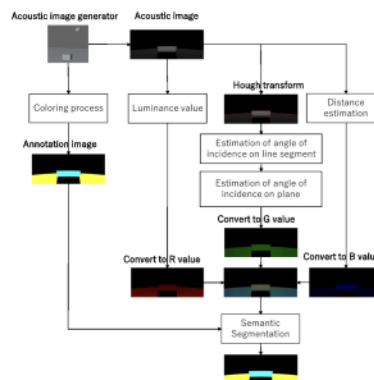


図3 セマンティックセグメンテーションによる材質認識

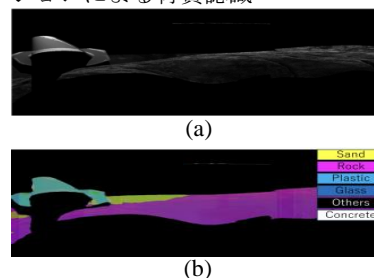


図4 音響カメラにおける材質認識：(a) 音響画像，(b) 認識結果

## (2) 水中マテリアル分布マップの生成のための水中 SLAM

認識した環境の特徴量を水中 SLAM におけるランドマーク情報として活用し、高精度な水中マテリアル分布マップを生成する水中 SLAM 理論を新たに確立した。また、停止状態の音響カメラの位置から 3 次元環境情報を復元するためのアプローチである確率的占有グリッドマッピング手法を改良し、セマンティックセグメンテーションにより認識した材質の情報を反映した水中マテリアル分布マップの生成を可能にした。図 5 に水中マテリアル分布マップの生成結果を示す。

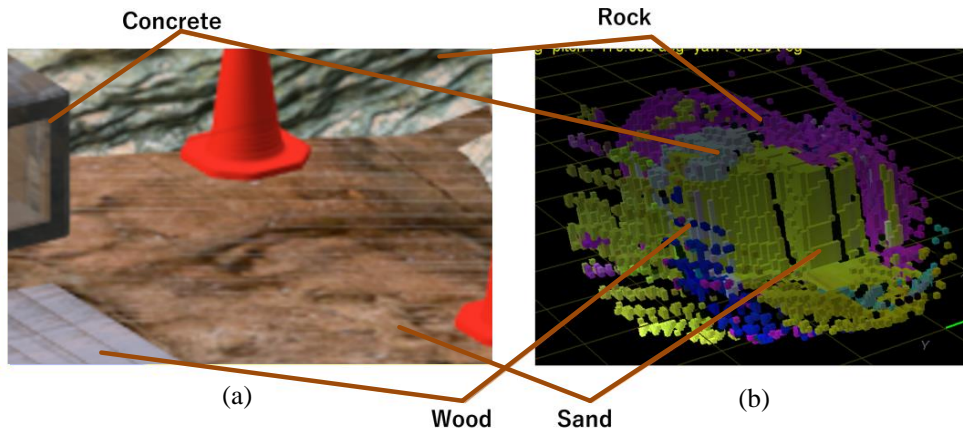


図5 水中マテリアル分布マップの生成：(a) 環境，(b) マッピング結果

## 4. 研究成果

3. における(1)に関しては、研究開始当初の研究計画のとおり、理論の確立、システムの実装、検証実験まで完了し、提案手法の有効性を確認した。シミュレーションにおける検証結果を第 24 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 (SI2023) で発表した。3. における(2)に関しても、研究開始当初の研究計画のとおり、理論の確立、システムの実装、検証実験まで完了し、提案手法の有効性を確認した。シミュレーションにおける水中 SLAM の検証結果を国際学会 The 16th International Conference on Quality Control by Artificial Vision (QCAV2023) で発表した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Wang Yusheng, Ji Yonghoon, Tsuchiya Hiroshi, Ota Jun, Asama Hajime, Yamashita Atsushi	4. 巻 9
2. 論文標題 Acoustic-N-Point for Solving 2D Forward Looking Sonar Pose Estimation	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 IEEE Robotics and Automation Letters	6. 最初と最後の頁 1652 ~ 1659
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/LRA.2024.3349968	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 Wang Yusheng, Ji Yonghoon, Woo Hanwool, Tamura Yusuke, Tsuchiya Hiroshi, Yamashita Atsushi, Asama Hajime	4. 巻 46
2. 論文標題 Acoustic Camera-Based Pose Graph SLAM for Dense 3-D Mapping in Underwater Environments	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Journal of Oceanic Engineering	6. 最初と最後の頁 829 ~ 847
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/JOE.2020.3033036	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 Liu Dingyu, Wang Yusheng, Ji Yonghoon, Tsuchiya Hiroshi, Yamashita Atsushi, Asama Hajime	4. 巻 35
2. 論文標題 CycleGAN-based realistic image dataset generation for forward-looking sonar	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Advanced Robotics	6. 最初と最後の頁 242 ~ 254
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1080/01691864.2021.1873845	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 Wang Yusheng, Ji Yonghoon, Liu Dingyu, Tamura Yusuke, Tsuchiya Hiroshi, Yamashita Atsushi, Asama Hajime	4. 巻 5
2. 論文標題 ACMarker: Acoustic Camera-Based Fiducial Marker System in Underwater Environment	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Robotics and Automation Letters	6. 最初と最後の頁 5018 ~ 5025
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/LRA.2020.3005375	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 Wang Yusheng, Ji Yonghoon, Liu Dingyu, Tsuchiya Hiroshi, Yamashita Atsushi, Asama Hajime	4. 巻 6
2. 論文標題 Elevation Angle Estimation in 2D Acoustic Images Using Pseudo Front View	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Robotics and Automation Letters	6. 最初と最後の頁 1535 ~ 1542
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/LRA.2021.3058911	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 -

〔学会発表〕 計16件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 11件)

1. 発表者名 Yusheng Wang, Yonghoon Ji, Chujie Wu, Hiroshi Tsuchiya, Hajime Asama, Atsushi Yamashita
2. 発表標題 Motion Degeneracy in Self-supervised Learning of Elevation Angle Estimation for 2D Forward-Looking
3. 学会等名 2023 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yusheng Wang, Chujie Wu, Yonghoon Ji, Hiroshi Tsuchiya, Hajime Asama, Atsushi Yamashita
2. 発表標題 2D Forward Looking Sonar Simulation with Ground Echo Modeling
3. 学会等名 20th International Conference on Ubiquitous Robots (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Shotaro Yamaguchi, Yonghoon Ji
2. 発表標題 Acoustic Image Denoising Based on Generative Adversarial Network
3. 学会等名 20th International Conference on Ubiquitous Robots (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Hiroki Nakamura, Takahiro Nonoda, Yonghoon Ji
2. 発表標題 Underwater SLAM Based on Object Recognition Using YOLO in Acoustic Images
3. 学会等名 16th International Conference on Quality Control by Artificial Vision (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Chujie Wu, Yusheng Wang, Yonghoon Ji, Hiroshi Tsuchiya, Hajime Asama, Atsushi Yamashita
2. 発表標題 Acoustic Camera Pose Refinement Using Differentiable Rendering
3. 学会等名 2023 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 野々田 崇大、池 勇勳
2. 発表標題 水中音響カメラにおける入射角及び距離画像推定による材質認識
3. 学会等名 第24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
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 山口 翔太郎、野々田 崇大、池 勇勳
2. 発表標題 水中音響カメラにおける敵対的生成ネットワークに基づく画像ノイズの軽減
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 野々田 崇大、池 勇勳
2. 発表標題 水中環境における水中音響カメラを用いた船底の劣化検出
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yusheng Wang, Yonghoon Ji, Hiroshi Tsuchiya, Hajime Asama, Atsushi Yamashita
2. 発表標題 Learning Pseudo Front Depth for 2D Forward-Looking Sonar-based Multi-view Stereo
3. 学会等名 2022 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中村 洋貴, 池 勇勳, 金田一 亮, 北村 嘉弘
2. 発表標題 水中環境における音響カメラの録画映像処理による3次元環境復元
3. 学会等名 第40回日本ロボット学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Wang Yusheng, Ji Yonghoon, Liu Dingyu, Tsuchiya Hiroshi, Yamashita Atsushi, Asama Hajime
2. 発表標題 Simulator-aided Edge-based Acoustic Camera Pose Estimation
3. 学会等名 OCEANS 2022 Chennai (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Wang Yusheng、Ji Yonghoon、Liu Dingyu、Tsuchiya Hiroshi、Yamashita Atsushi、Asama Hajime
2. 発表標題 Elevation Angle Estimation in 2D Acoustic Images Using Pseudo Front View
3. 学会等名 2021 IEEE International Conference on Robotics and Automation (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Liu Dingyu、Wang Yusheng、Ji Yonghoon、Tsuchiya Hiroshi、Yamashita Atsushi、Asama Hajime
2. 発表標題 Development of Image Simulator for Forward-looking Sonar Using 3D Rendering
3. 学会等名 15th International Conference on Quality Control by Artificial Vision (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Wang Yusheng、Ji Yonghoon、Liu Dingyu、Tamura Yusuke、Tsuchiya Hiroshi、Yamashita Atsushi、Asama Hajime
2. 発表標題 ACMarker: Acoustic Camera-Based Fiducial Marker System in Underwater Environment
3. 学会等名 2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Wang Yusheng、Ji Yonghoon、Hanwool Woo、Tamura Yusuke、Tsuchiya Hiroshi、Yamashita Atsushi、Asama Hajime
2. 発表標題 Planar AnP: A Solution to Acoustic-n-Point Problem on Planar Target
3. 学会等名 Global OCEANS 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年



1. 発表者名 Yusheng Wang、池 勇勳、劉 丁瑜、田村 雄介、土屋 洋、山下 淳、淺間 一
2. 発表標題 音響カメラに基づいた水中環境における人工マーカシステムの開発
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2020
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

北陸先端科学技術大学院大学 池研究室 <a href="http://robotics.jaist.ac.jp">http://robotics.jaist.ac.jp</a>
---

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

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
---------	---------