

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 6 月 16 日現在

機関番号：32641

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2018～2019

課題番号：18H06483・19K21547

研究課題名(和文) 極限水中環境における無人水中ロボットによる音響カメラを用いた3次元環境情報復元

研究課題名(英文) 3D reconstruction of environmental information using acoustic camera mounted on unmanned underwater robot in extreme underwater environment

研究代表者

池 勇勲 (JI, YONGHOON)

中央大学・理工学部・助教

研究者番号：90823766

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,300,000円

研究成果の概要(和文)：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。本研究はオペレータが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次元情報復元手法の構築を目的とする。確率的占有グリッドマッピングとポーズグラフSLAM(simultaneous localization and mapping)の2つのアプローチで取り組み、それぞれ理論の確立、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。

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水中ロボットの作業における周囲環境の密な3次元形状情報を復元し、オペレータに提示する技術は安全かつ効率的な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)：In recent years, the introduction of remote operated underwater robot in the development of waterfronts such as new airports, harbors, undersea tunnel construction and reclamation projects become much more important these days; however, hazards may prohibit human access (e.g., the Fukushima Daiichi nuclear power station). The purpose of this study is to propose a dense 3D reconstruction scheme in the underwater environment from the measurement information of the acoustic camera so that the operator can intuitively grasp the situation of the surrounding environment. We proposed novel probabilistic occupancy grid mapping and pose-graph SLAM (simultaneous localization and mapping) approaches, and theory establishment, system implementation, verification from experiments are completed.

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

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 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、平成23年3月に発生した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、情報収集や危険物の除去及び掘削作業などのために、図1に示すような遠隔操作型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。したがって、これらのセンサの計測情報から水中ロボットの作業における周囲環境の密な3次元地図情報を復元し、オペレータに提示する技術は安全かつ効率的な水中ロボットの運用において極めて重要である。

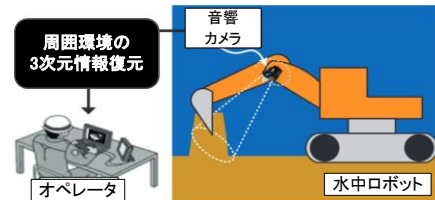


図1 音響カメラを用いた周囲環境の3次元情報復元に基づく遠隔操作型水中ロボットの運用

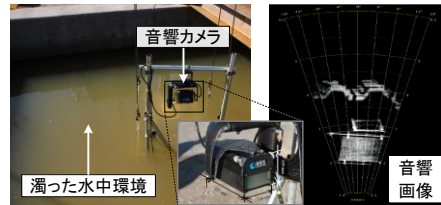


図2 音響カメラARISと濁った水中での撮影画像

### 2. 研究の目的

筆者らは先行研究において、多視点の音響画像を用いた3次元計測の原理を初めて確立し、音響画像から抽出した特徴点及び線分情報に基づく疎な3次元復元技術を提案した。しかし、密な3次元復元を実現した研究はまだ報告されていない現状を踏まえ、本研究では先行研究の延長として、音響カメラの特性を積極的に考慮した上で、水中環境における密な3次元復元手法を提案することにより、オペレータが周囲環境の形状を直感的に把握可能にするブレークスルーを目指す。

### 3. 研究の方法

本研究では、水中環境における音響カメラを用いた密な3次元復元を実現するために、以下の2つのアプローチで研究を遂行した。

#### (1) 確率的占有グリッドマッピング

確率的占有グリッドマッピングに関しては、停止状態の音響カメラの位置から局所3次元環境情報を復元するためのアプローチである。既に確立されている測域センサを使用した陸上環境における2次元確率的占有グリッドマッピング理論を、先行研究で分析した音響カメラ固有の計測特性に適合するように再構築し、水中環境における密な3次元地図を生成する理論を新たに確立した。確率的占有グリッドマッピングは図3に示すように、画像セグメンテーション、3次元入力点群生成、3次元占有グリッドマッピング、ノイズ除去の4つのステップに分かれる。

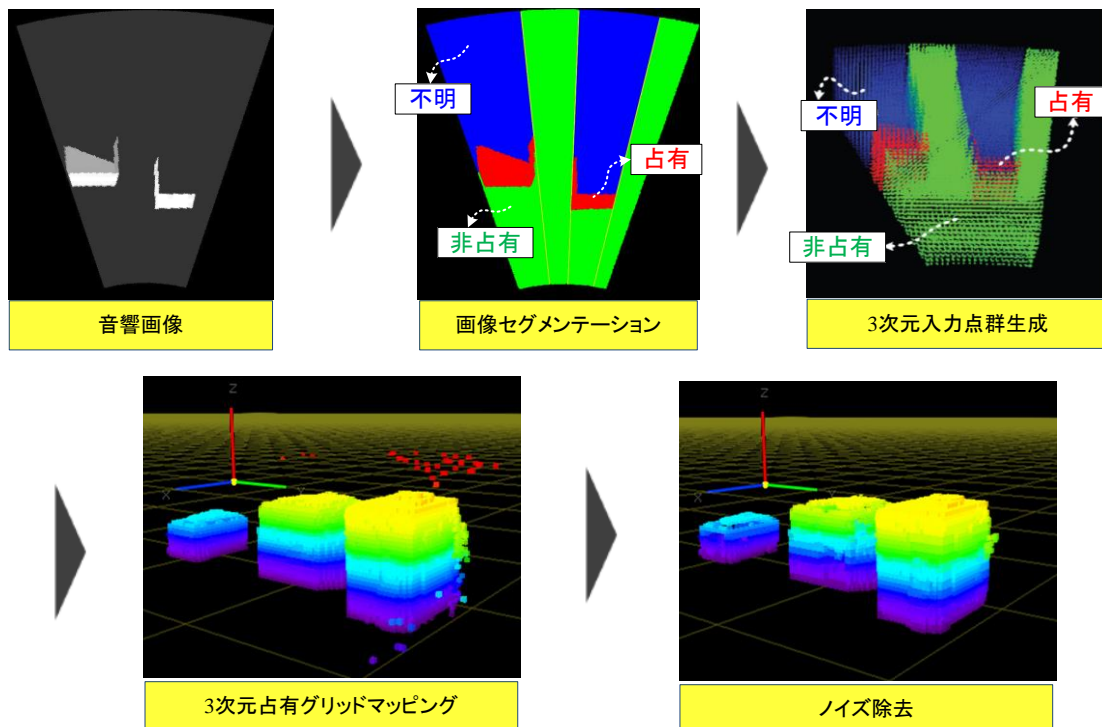


図3 確率的占有グリッドマッピング理論による局所3次元地図の生成過程

画像セグメンテーションステップでは、音波の反射に関する性質を用いて、音響画像を占有、非占有、不明の3つの領域に分割する。3次元入力点群生成ステップでは、画像上では表現されない仰角情報を仮想的に生成することにより、占有グリッドマッピングアルゴリズムに入力する点群を生成する。3次元占有グリッドマッピングステップでは、OctoMap ライブラリを利用し、音軸方向にカメラを回転させながら撮影した複数の音響画像を統合して密な局所3次元環境情報復元を行う。ここで、OctoMap ライブラリを用いた音響画像列による3次元復元を可能にするため、超音波の物理的な性質及び画像の投影原理を分析した逆センサモデルを新たに提案した。最後にノイズ除去ステップでは、半径外れ値除去フィルターを適用し、生成された3次元地図のノイズを除去する。

## (2) ポーズグラフ SLAM (simultaneous localization and mapping)

ポーズグラフ SLAM に関しては、確率的占有グリッドマッピングのアプローチで生成した複数のカメラ位置で生成した各局所3次元地図を統合し、広域3次元環境情報を復元するためのアプローチである。局所3次元地図を生成した各カメラの6自由度位置・姿勢情報を正確に推定するため、音響カメラからの計測情報に適用可能な新しいポーズグラフ SLAM を確立した。ポーズグラフ SLAM は図4に示すように、front-end と back-end の2つのステップに分かれる。Front-end ステップでは、ICP (iterative closest point) による局所3次元地図間の位置合わせが行われ、大まかに統合された広域3次元地図が生成される。Back-end ステップでは、位置合わせの結果として算出された局所3次元地図同士の相対変異・回転量を拘束条件としたポーズグラフ最適化が行われ、広域3次元地図の精度が向上される。

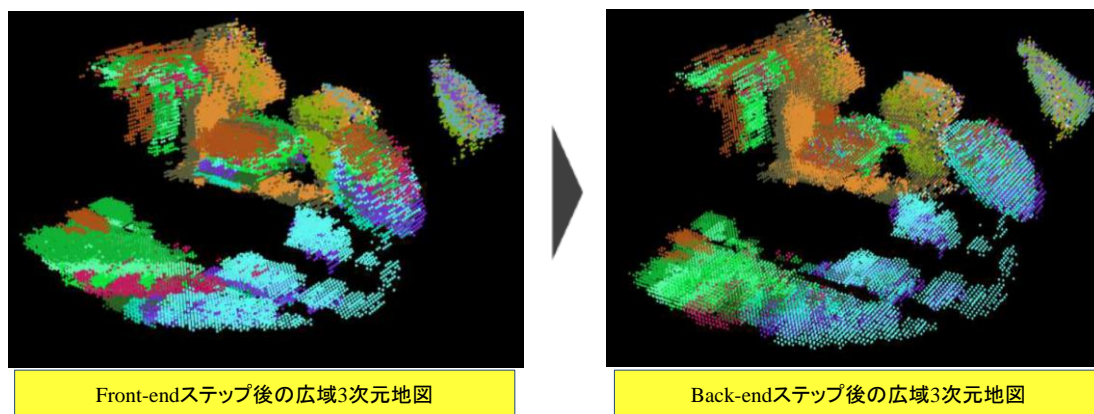


図4 ポーズグラフSLAMによる広域3次元地図の生成過程

## 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。シミュレーション及び音響カメラ ARIS EXPLOROR 3000 を用いた実機における検証結果を国際学会 The 12th Symposium on Robot Control (SYROCO2018) 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検証結果を国際学会 The 2019 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII2019) で発表し、ARIS EXPLOROR 3000 を用いた実機における検証結果についても国際学術誌論文へ投稿中である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Yusheng Wang, Yonghoon Ji, Hanwool Woo, Yusuke Tamura, Hiroshi Tsuchiya, Atsushi Yamashita, Hajime Asama	4. 巻 52
2. 論文標題 Rotation Estimation of Acoustic Camera Based on Illuminated Area in Acoustic Image	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IFAC-PapersOnLine	6. 最初と最後の頁 163-168
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） <a href="https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.12.301">https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.12.301</a>	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 Yusheng Wang, Yonghoon Ji, Hanwool Woo, Yusuke Tamura, Atsushi Yamashita, and Hajime Asama	4. 巻 51
2. 論文標題 3D Occupancy Mapping Framework Based on Acoustic Camera in Underwater Environment	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IFAC-PapersOnLine	6. 最初と最後の頁 324-330
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） <a href="https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.11.562">https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.11.562</a>	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 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件／うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Yusheng Wang, Yonghoon Ji, Hanwool Woo, Yusuke Tamura, Hiroshi Tsuchiya, Atsushi Yamashita, Hajime Asama
2. 発表標題 Rotation Estimation of Acoustic Camera Based on Illuminated Area in Acoustic Image
3. 学会等名 12th IFAC Conference on Marine Systems (CAMS2019)（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 筑紫 彰太, 淵田 正隆, 河野 仁, モロ アレサンドロ, ミヤグスク レナード, アンジェラ ファラガツソ, 禹 ハンウル, 藤井 浩光, 池 勇勳, 田村 雄介, 山川 博司, 山下 淳, 浅間 一
2. 発表標題 災害対応における建設ロボットのための遠隔操作技術の開発
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2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yusheng Wang, Yonghoon Ji, Hanwool Woo, Yusuke Tamura, Atsushi Yamashita, and Hajime Asama
2. 発表標題 Three-dimensional Underwater Environment Reconstruction with Graph Optimization Using Acoustic Camera
3. 学会等名 The 2019 IEEE/SICE International Symposium on System Integrations (SII2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yusheng Wang, Yonghoon Ji, Hanwool Woo, Yusuke Tamura, Atsushi Yamashita, and Hajime Asama
2. 発表標題 3D Occupancy Mapping Framework Based on Acoustic Camera in Underwater Environment
3. 学会等名 The 12th IFAC Symposium on Robot Control (SYROCO2018) (国際学会)
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
研究協力者	浅間 一  (Asama Hajime)		
研究協力者	山下 淳  (Yamashita Atsushi)		
研究協力者	田村 雄介  (Tamura Yusuke)		

## 6. 研究組織（つづき）

	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	禹 ハンウル (Woo Hanwool)		
研究協力者	土屋 洋 (Tsuchiya Hiroshi)		
研究協力者	王 鈺晟 (Wang Yusheng)		