様　式　Ｃ－１９、Ｆ－１９－１、Ｚ－１９　（共通）

科学研究費助成事業　　研究成果報告書

令和　６年　６月１０日現在

機関番号：８２６２７
研究種目：基盤研究(C)（一般）
研究期間：2021～2023
課題番号：２１Ｋ０４５０８

研究課題名（和文）音響画像計測による水中測位手法の開発

研究課題名（英文）Underwater Positioning by Acoustic Imaging

研究代表者
稲葉　祥梧（Inaba，Shogo）

国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所・海上技術安全研究所・主任研究員

研究者番号：２０７５８２６３

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費）　　3,200,000円

研究成果の概要（和文）：水中音響画像に対し、機械学習による物体検出を適用し、測位対象の深度情報を組み合わせる事で測位を実現する手法を提案した。研究ではまず初めに実際のROVを音響画像観測する事で、機械学習に用いる教師データを作成し、音響画像から測位対象のROVを検出するようトレーニングを行った。また、湖水域での測位検証試験により、誤差が大きい場合も含まれるものの、ある程度の精度で提案手法による測位が可能である事を示した。水域での実験で生じた測位誤差の原因を検証するため、水槽試験により物体検出精度と水平距離算出精度の検証を行い、その結果水平距離算出の精度は十分に高い事を確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義
提案手法による測位精度検証のため、水槽環境にて彼我の相対位置を明確に定めた状態にて音響画像観測を行った。一連の実証試験の結果、水平距離算出において十分な測位精度を有する事が示されたほか、試験の解析と考察において、深度情報を参照する測位では、彼我の相対位置関係により測位精度の低下する領域が存在するとの知見を得た。提案手法は一般的な音響測位手法と異なり、一般的な音響画像計測装置を流用し、測位と同時に水底面の音響画像観測が可能である。また、被測位対象に対しトランスポンダ等の搭載が不要であるため、特に近年普及しつつある小型のROVを用いた水中観測に対して、音響測位手段の提供が可能になると期待できる。

研究成果の概要（英文）：In this study, machine learning object detection was applied to the underwater acoustic images, and positioning was performed concerning the depth information of the target. Acoustic images of the ROV were measured to create the training dataset for machine learning, and a neural network was trained to detect the ROV. Then, ROV positioning experiments were conducted in a lake area. The results showed that ROV positioning was possible, although the error was large. To verify the error factor, a tank test was conducted to examine the accuracy of object detection. The results showed that object detection and calculation of horizontal distance were highly accurate.

研究分野：水中ロボティクス

キーワード：水中音響測位　水中音響画像　機械学習

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様　式　Ｃ－１９、Ｆ－１９－１、Ｚ－１９（共通）

１．研究開始当初の背景

水中における各種の調査では、AUV（Autonomous Underwater Vehicle）や ROV（Remotely Operated Vehicle）等の水中機器が用いられる。特に大深度用の高性能な水中機器の運用においては、GPS 等の電波を用いた機器を利用できないため、観測時の自己位置推定や亡失対策の観点から、音響測位装置の併用が不可欠である。一方、近年では「水中ドローン」と呼ばれる小型 ROV に象徴されるように、100m 程度の浅海域を対象とした、小型軽便で運用コストの低い水中機器が普及しつつある。これら軽便な水中機器の運用においては、亡失のリスクが低い事や、小型の機体ゆえにトランスポンダ搭載のペイロードが乏しい事、そして測位データそのものからは観測成果が得られない事などから、水中音響測位の必要性は相対的に低いと言える。しかし、設備点検で発見した異常個所の正確な位置情報の取得や、AUV の長時間運用に伴う自己位置推定の補正など、小型低廉な水中機器においても、観測内容の高度化に従い、今後は水中音響測位の活用が不可欠になると考えられる。

トランスポンダ等の水中機器からの信号発信を用いずに対象を探知する手段として、海底観測に用いるソナーにより測位対象を捉える手法が考えられる。近年では、海底面の音響画像観測を行った結果に対し、自動運転等の分野で発展の著しい機械学習による物体検出技術を適用し、従来は訓練したオペレーターが目視で確認していた音響画像の解析業務を自動化する取り組みがなされている。一般に、AUV や ROV 等の水中機器は形状が既知であり、また活動中にその外形が大きく変化する事も無いため、機械学習による物体検出が十分可能と考えられた。また、海底観測用のソナーは水底調査に用いる一般的な機器であり、音響測位装置と比べ広く普及している。これに機械学習を組み合わせる事で測位が達成できれば、既存の海底観測用のソナーをそのまま測位装置に転用できるため、水中観測の分野において、既存機器を用いて手軽に導入可能な測位手法として、広く活用されると期待された。

２．研究の目的

本研究では、計測に用いる観測用ソナーとして、海底面の音響画像観測を行うサイドスキャンソナー（SSS）を利用する事とした。SSS はスキャンのために観測の都度、水域を測線航走する必要があるため、イメージングソナー等に比べ観測頻度の点で劣るが、観測レンジが広く広域を観測する用途に向き、船舶や ASV（Autonomous Surface Vehicle）等による水底調査で広く利用されている機器であるため、本研究の目的である水底観測用のソナーを応用する観点から、SSS を採用した。提案手法である音響画像による測位の模式図を図 2-1 に示す。測位においてはまず、測位対象までのレンジ（図中 r）を音響画像中からの測位対象物の物体検出により求め、これに測位対象の深度情報（図中 d）を組み合わせる事で、ソナー計測位置からの水平距離（図中 l）を求める。SSS 計測中に測位対象を捉えたタイミングでの、SSS の座標と側線方向から、測位対象の測位を達成する。測位手法の実現に向け、研究当初では以下の 3 点をマイルストーンとして定めた。

（1）物体検出環境の構築と機械学習に必要な教師データの収集・整備

機械学習を用いた物体検出手法について、これを水中音響画像の分野に適用するため、物体検出環境の構築と、独自の物体検出を実現するために必要な、機械学習によるニューラルネットワーク（NN）トレーニングのための教師データの収集を行う。

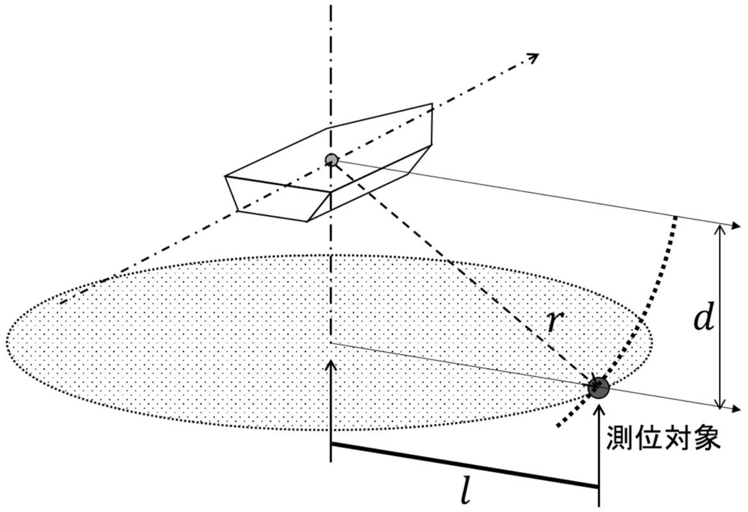

図 2-1　SSS 音響画像からのレンジ計測と深度情報による測位

（2）測位システムの構築
教師データによる NN のトレーニングにより、音響画像から独自に定めた対象を検出する物体検出システムを構築し、これに深度情報を組み合わせる事で測位を行う計算処理を合わせる事で、対象の水平距離を求める測位計算処理システムを構築する。

（3）実水域評価試験の実施
用意した一連の測位計算システムについて、実際に海域等での試験を行い、音響画像観測結果からの特定物体の測位計算を行い、実際の物体座標との比較により提案手法による測位計算の精度検証や実用性の評価を行う。

３．研究の方法
本研究では、AUV や ROV 等の水中機器に対し、水中音響画像による観測と、機械学習を用いた物体検出手法とを組み合わせる事で、水中音響測位を行う手法について研究を行い、各種試験を通じて測位精度の検証等を行う事で、提案手法による音響測位の実現性を示す事を目指した。以下、上記研究目的で述べたマイルストーンに対する研究の具体的な方法について述べる。

研究目的の（1）については、先行事例の調査検討等の結果から、研究で用いる物体検出手法を選定する事とした。また、独自の物体検出に不可欠な NN トレーニング用の教師データについては、測位対象とする AUV や ROV を実際に計測して得た音響画像を用いる事とした。計測には試験水槽を用い、被測位対象との相対位置・測線方位を様々に変化させることで、多様な音響画像を収集する事とした。
研究目的の（2）については、NN のトレーニングにより、音響画像中からの測位対象の検出を実現すると共に、NN の種類や学習のパラメーター等を調整し、その検出精度を向上させる事とした。また、測位計算については後解析での実装とし、音響画像内からの物体検出座標から対象までのレンジを計算して求め、これに深度情報を入力する事で対象の水平距離を、検出したタイミングでの SSS の絶対座標と測線方向から対象の方位を求める計算処理を行い、対象の測位計算を達成した。

研究目的の（3）については、実際に海域、水域での実証試験を実施し、水中に設置した測位対象に対し、周囲からの SSS 観測により対象の音響画像を取得、測位計算を行い、その結果と実際の測位対象物の設置位置情報との比較により、測位精度の検証を試みた。

４．研究成果
本研究で得られた成果について、以下に研究年度ごとの成果を述べ、最後に全体の総括をまとめる。

（1）令和 3 年度
研究で用いる物体検出手法について調査検討を行った。その結果、光学画像の分野で活発な開発がなされており、また過去に先行研究にて音響画像からの特定物体の検出に利用されている、「YOLO」と呼ばれる機械学習による物体検出手法を採用する事とした。本研究ではその中で、当時最新であった「YOLO v5」を用いる事とした。当該物体検出による音響画像からの物体検出を模し、まずはグレースケールの低解像度画像からの物体検出について、独自の教師データを用いた NN のトレーニングと検出を行い、低解像度・グレースケール画像における物体検出への YOLO の適用が十分に可能である事を検証した。
続いて実際の音響画像を用いた実証試験へ進み、海底面に設置されたコンクリート製の錘（アンカー、図 4-1 参照）を対象に、頂上部が凸状に膨らんだ錘と、平坦な形状の錘とを音響画像観測にて計測し、微妙な外観形状の違いを識別可能であるか実証試験を行った。トレーニングの結果、頂上部が凸状の錘と平坦な錘を識別可能である事が実証された。図 4-2 にその一例を示す。一連の成果については、令和 4 年度に国際学会での口頭発表を行った。

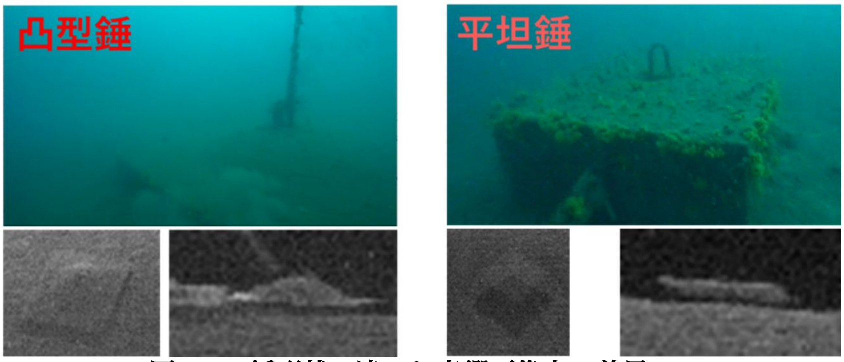

図 4-1　錘形状の違いと音響画像上の差異

図 4-2　錘 2 種の検出・識別結果

（2）令和 4 年度

前年度に実施した試験の結果を踏まえ、実際に小型の AUV を水槽に設置し、これを SSS 計測した場合に識別可能かを検証する水槽試験を実施した。実験では実際にカウル、耐圧容器、金属製のフレーム等、内部構造が複雑な AUV の実機と、ほぼ同じサイズだが、内部に樹脂が充填された構造のモックアップ模型とを同時に設置、計測し、内部構造の違いによる SSS 音響画像の変化についても比較検証を試みた。その結果、SSS 画像においては主に外部カウルからの音響反射成分が明瞭な像として表れており、内部構造による変化は相対的に微小であるとの知見を得た。実際に用いた小型 AUV とモックアップの外観と、得られた音響画像の例を図 4-3 に示す。

続いて、実際に屋外水域において、水上からの SSS 観測によって測位対象を捉え、その位置を算出する実水域試験を湖水域環境にて実施した。実験では有線の小型 ROV を一定深度に吊り下げて固定し、その状態を水上から SSS で観測、得られた音響画像からの物体検出結果より、提案手法による計算で対象までの水平距離を求め、この時の SSS 座標・方位情報から被測位対象の絶対座標を求めた。図 4-4 に実際に得られた ROV の SSS 画像に対し、物体検出による検出結果を出力した図を示す。試験の結果、測位計算に成功したが、誤差が大きい場合もあり、これが測位誤差によるものであるか、吊り下げ設置した ROV の位置ずれ等の試験環境によるものであるかは検証を要する結果となった。一連の成果については、令和 5 年度に国内学会での口頭発表を行った。

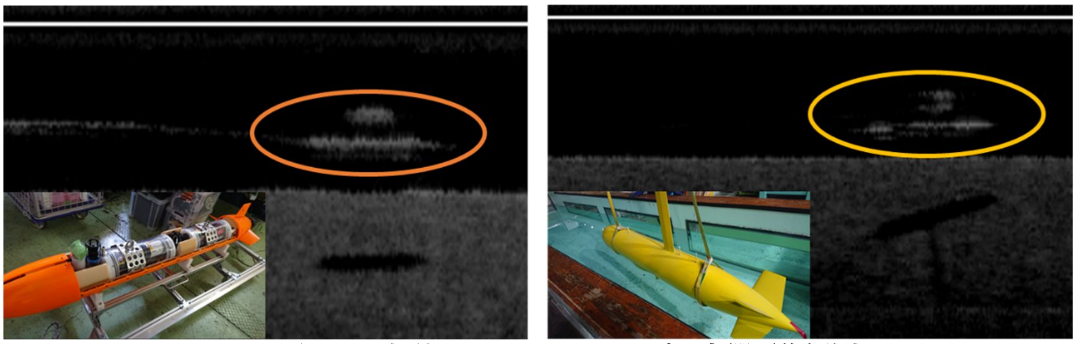

図 4-3　小型 AUV とモックアップの音響画像観測

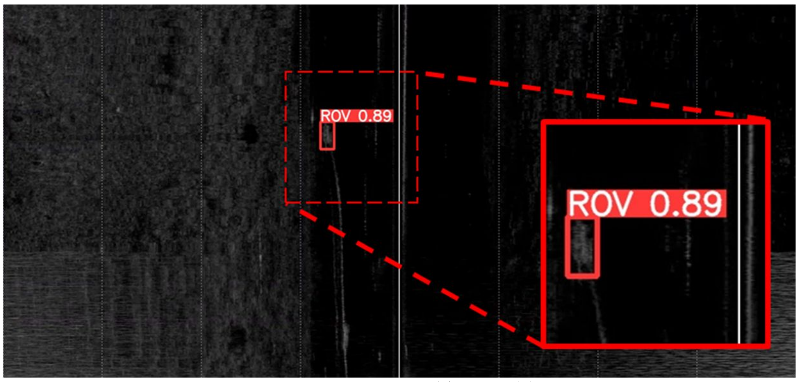

図 4-4　ROV 検出の結果

（3）令和 5 年度

前年度の試験結果を踏まえ、提案手法による SSS 画像内からの測位対象の検出と水平距離算出において発生する、測位計算の誤差を検証する水槽試験を実施した。実験では計測台車を用いて測位対象からの距離や側線の方位、SSS 設置深度などを精緻に制御しつつ観測を行い SSS と測位対象との相対位置関係が確定した状態での SSS 画像観測を実施した。これにより、実験での測線航走の設定値と、測位計算で求めた対象距離の計測値との間でどの程度の誤差が生じるかを検証した。その結果、提案手法による水平距離の算出においては、測位に問題の無い高い精度で対象までの距離を求める事が可能である事を確認した。また、一連の精度検証のための検討・考察の中で、提案手法である深度情報を参照した水平距離の導出においては、レンジ計測の誤差と測位対象の相対位置により、測位計算の精度が大きく変化するとの知見を得た。

（4）まとめ

一連の研究により、SSS による音響画像計測から、水中機器等の特定の物体を物体検出により自動で検出し、深度情報を組み合わせる事で測位を行う本研究の提案手法について、その実現性については令和 4 年度に実施した水域試験にて一定の成果を得た。一方で、測位誤差の要因解析については、令和 5 年度の水槽試験により水平距離算出のプロセスは大きな誤差要因としては考えにくいとの知見が得られたものの、主要因の特定と対策についてはまだ途上であり、今後さらなる追加検証を要すると考える。

研究提案より 3 年間が経過し、機械学習による物体検出については、当時最新だった「YOLO ｖ5」の改良版である「YOLO v8」が公開されるなど、その発展は目覚ましいものがあり、水中観測の分野への応用についてもソナー観測成果の自動解析にとどまらず、AUV のナビゲーションへの応用など、自動化により新たな機能を達成するような研究についても事例が散見される。しかし、音響画像計測を測位に転用する本研究のアイデアはいまだある程度の独自性を保っているものと考える。

５．主な発表論文等

〔雑誌論文〕　計0件

〔学会発表〕　計2件（うち招待講演　0件／うち国際学会　1件）

１．発表者名 稲葉　祥梧
２．発表標題 Similar Object Identification in Sonar Images by Machine Learning
３．学会等名 UT23 （International Symposium on Underwater Technology 2023）（国際学会）
４．発表年 2022年～2023年

１．発表者名 稲葉　祥梧
２．発表標題 機械学習による音響画像中のROVの検出と測位
３．学会等名 第93回日本マリンエンジニアリング学会学術講演会
４．発表年 2023年～2024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	篠野　雅彦 (Sasano Masahiko) (00392689)	国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所・海上技術安全研究所・グループ長 (82627)	

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