

令和 3 年 5 月 31 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的研究（開拓）

研究期間：2017～2020

課題番号：17H06218・20K20291

研究課題名（和文）海底の広域かつ詳細な観測を実現する次世代型AUV

研究課題名（英文）New type AUV for wide-area and detailed observation of seafloor

研究代表者

巻 俊宏（Maki, Toshihiro）

東京大学・生産技術研究所・准教授

研究者番号：50505451

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 20,000,000円

研究成果の概要（和文）：スキャニングソナーとポテンシャル法による海底追従手法を開発し、これをクルーズ型とホバリング型の特徴を併せ持つAUVと組み合わせることで、起伏のある海底を、画像観測に適した低高度かつ高速で追従できる新たな自律型海中ロボット（AUV）の形式を提案した。テストベッドAUV HATTORIを開発し、石垣島のサンゴ礁海域に展開、実際に広域画像観測を行うことで有効性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により低コスト、高速、高効率な海底詳細観測技術を確立した。これにより海中の広い範囲をGoogle Earthのように画像マップ化することができるようになり、人類の海中探査能力の拡大に貢献する。本成果は生物学、地質学、海底考古学などのサイエンス的調査から、資源探査、インフラ点検、捜索救助など幅広いニーズに対応する。

研究成果の概要（英文）：We have proposed new type AUV for wide-area and detailed observation of seafloor, which can follow rugged seafloor at low altitude suitable for visual observation based on scanning sonar and potential method. We have developed AUV HATTORI as a test bed, and verified the performance of the method by performing wide area seafloor observation using the vehicle.

研究分野：海中プラットフォームシステム

キーワード：海中探査 自律型海中ロボット 経路計画

1. 研究開始当初の背景

海底環境を把握するために、写真や動画等の可視光による観測は不可欠であり、生物学、地質学、考古学といった学術調査から、資源探査、環境調査、生物資源量調査、港湾工事、捜索救助活動等多くの分野で採用されている。一方で、海中では視界が悪いため、高品質な画像を得るためには観測対象まで一般に数メートルまで接近する必要がある。このような至近距離においては観測対象への衝突リスクがあるため、海中ロボットは低速で、慎重に移動する必要があった。近年の技術進歩により、人間が操縦する ROV (遠隔操縦ロボット) に代わり AUV (自律型海中ロボット) が画像観測にも使われつつあるが、ホバリング型とよばれるタイプであり、複雑な動きができる反面、速度は一般に 0.5 ノット以下と低速である。魚雷状のクルーズ型 AUV は高速移動が可能であるが、衝突リスクを避けるために数 10 メートル以上の高度で運用されることが多く、海底が平坦な場合を除き画像観測への適用事例はほとんどない。

一方で、亡失時のリスクを下げる手段として、AUV 本体の低コスト化が有効である。これまでの AUV は状態認識のために高価なセンサを必要とし、その結果 1 台あたり数 1000 万円～数億円というコストがかかっていた。このため簡単に運用できず、海中探査が十分に行えないという現状がある。

2. 研究の目的

本研究では、起伏のある海底を、画像観測に適した低高度かつ高速で追従できる新たな自律型海中ロボット (AUV) の形式を提案する。それはクルーズ型とホバリング型の特徴を併せ持つ形式であり、海底の詳細かつ広域な観測を実現する。また、低コスト性も重視する。本研究により低コスト、高速、高効率な海底詳細観測技術を確立することで、海中版ドローンとも呼ぶべき、新たな海洋探査ツールを実現、人類の海中探査能力の拡大に貢献する。本成果は生物学、地質学、海底考古学などのサイエンス的調査から、資源探査、インフラ点検、捜索救助など幅広いニーズに対応する。

3. 研究の方法

起伏のある海底を高速で追従するため重要なことは、周囲の状況を素早く認識し、適切な経路計画を立てることである。本研究では、センサの組み合わせ、配置、そしてデータ処理手法を開発することでこれを実現する。特にスキャニングソナーと呼ばれる超音波センサのデータ処理手法に注力する。スキャニングソナーは扇型の超音波ビームを機械的にスキャンすることで、障害物回避に重要な広域の海底地形情報を取得することができる。マルチビームソナー (多数のビームで同時にスキャンする) と異なり同時に取れるデータ数は少ないが、小型、安価かつ低消費電力である。本研究では深度センサ、姿勢センサ等とのセンサフュージョンにより、スキャニングソナーの欠点であるデータ密度の少なさを克服する。

手法の有効性の検証は、シミュレーションおよび試作機による海域実証試験により行う。水深 200m 対応の試作機を開発し、サイエンス的に興味深い海域へ展開し、実際に海底画像マップを取得することで提案手法の有効性を検証する。

4. 研究成果

4 - 1. 低高度・高速な海底追従手法の開発

図 1 に示すような、スキャニングソナーによる海底追従アルゴリズムを開発した。本手法では AUV 前方に装着したスキャニングソナーにより進路前方および下方をスキャンし、反射強度と AUV 自身の測位結果をもとに反射強度マップを構築する。そして、移動ロボットの経路計画手法として実績のあるポテンシャル法を組み合わせることで、反射強度の高い場所に対して一定距離を保ちながら前進する経路計画手法を構築した。

開発にあたっては、最初にスキャニングソナーの性能評価試験を行った。申請者らの所有する Micron Sonar を用いて水槽にて単体試験を行い、ターゲットへの入射角と反射強度の関係を調べた。また、申請者らの所有する AUV Tri-TON 2 および小型の試作機である HATTORI に搭載し、海域のデータを取得し、これをもとに海底認識および回避経路生成のためのアルゴリズムを開発した。PC 上にオープンソースのロボット開発用フレームワークである ROS 環境を構築し、実測データに基づくシミュレーションによってスキャニングソナーのセンサモデルを構築、さらにそれに基づく海底探知および経路生成アルゴリズムを構築した。そして構築したアルゴリズムを AUV HATTORI に実装し、パラメータを複数に変えて実験を行い、結果を比較したところ、スキャニングソナーの生の計測値をそのまま入力とすることで、反射強度の弱い海底であっても探知できること、また高度を一定に保って航行できることを確認した。

また、本アルゴリズムを拡張し、座標軸の取り方の工夫により、海底面だけでなく、水槽の壁面やサンゴ礁、熱水チムニーなどの鉛直面を追従できるようにした。これにより観測ニーズの高いより複雑な環境への適用力を高めることができる。

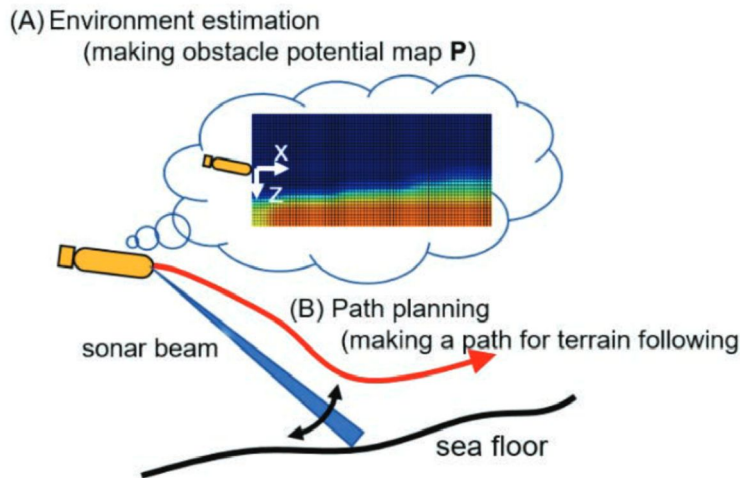


図1 スキャニングソナーとポテンシャル法による海底の低高度・高速追従手法

4 - 2 . AUV HATTORI の開発および海域実証試験

テストベッド機として、AUV HATTORI を開発した。外観を図2に示す。全長約1m、空中重量15kgと、クレーン不要で1~2名で運用できるサイズである。高速性に優れたクルーズ型（魚雷型）と制御性に優れたホバリング型の中間的なデザインであり、4台のスラスタによりサージ（前後移動）、ヨー（旋回）、ロール（左右への傾き）、ピッチ（機首の上げ下げ）の4自由度を制御できる。上下方向の位置制御はクルーズ型のようにピッチ制御により行う。前方にスキャニングソナーを搭載し、本研究で開発したアルゴリズムにより、サンゴ礁のような複雑な海底に対して画像観測に適した低高度（2m程度）を保ちつつ、ホバリング型AUVよりも高速に移動することができる。

提案手法の有効性を確認するため、サンゴ礁の研究者と共同で本機を石垣島の石西礁湖に展開した。その結果、本機によって複雑な凹凸を伴うサンゴ礁を高度1~2mで追従しながら、画像観測することに成功した。図3は本実験より得られた海底画像マップであり、サンゴの種類を識別できる高品質な画像を広範囲にわたって取得できた。本成果は理学系の学会にも報告され、提案手法が海底の学術調査に有効であることが示された。

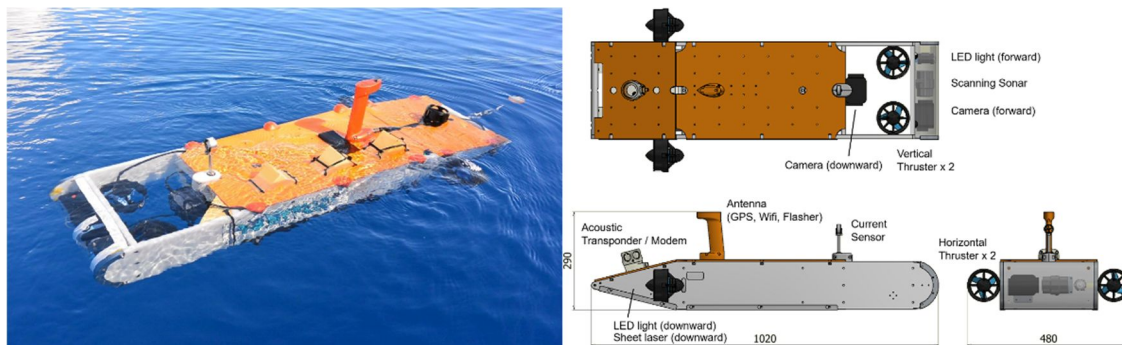


図2 AUV HATTORI

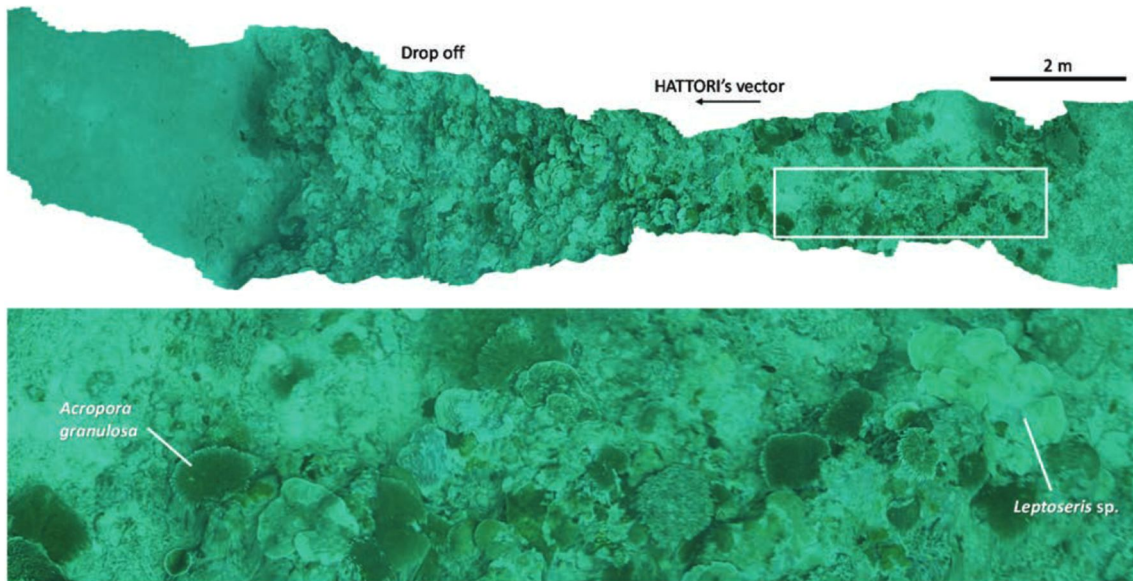


図3 AUV HATTORI によって得られたサンゴ礁の画像マップ

4 - 3 . ASV BUTTORI の開発

AUV や水中ロボットの運用においては、水中での測位が重要である。通常は船に音響測位装置を固定するが、この方法だと船ごとに取り付け治具を作る必要があり、また船の動揺やエンジン音の影響を受けるため、測位精度を上げるためには慣性航法装置等の高級なセンサが必要になる。そこで、低コストな AUV 展開を実現するために、音響測位装置 (SSBL) を搭載した小型の自律無人艇 (ASV: Autonomous Surface Vehicle) を開発した。そして試験機 BUTTORI (図4) を用いた海域試験により、波や流れが存在する中で定点保持できること、そして海底に設置したターゲットを SSBL によって安定して測位できることを確認した。

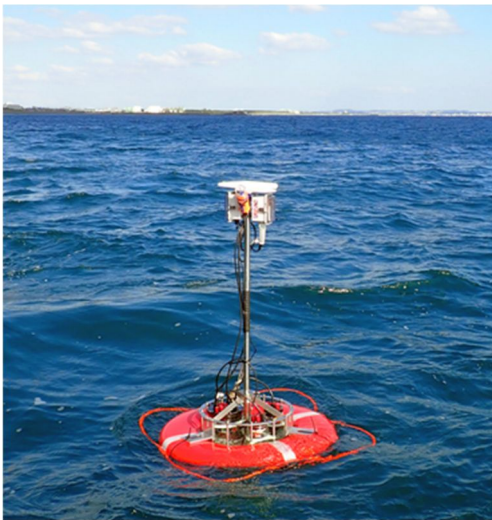


図4 ASV BUTTORI

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 3件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 Noguchi Yukiyasu, Maki Toshihiro	4. 巻 -
2. 論文標題 Tracking Omnidirectional Surfaces Using a Low-Cost Autonomous Underwater Vehicle	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Journal of Oceanic Engineering	6. 最初と最後の頁 1~13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/JOE.2020.2972046	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 Maki Toshihiro, Horimoto Hiroumi, Ishihara Takashi, Kofuji Kazuya	4. 巻 18
2. 論文標題 Tracking a Sea Turtle by an AUV with a Multibeam Imaging Sonar: Toward Robotic Observation of Marine Life	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 International Journal of Control, Automation and Systems	6. 最初と最後の頁 597~604
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s12555-019-0690-4	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 巻俊宏	4. 巻 73
2. 論文標題 HATTORI ~低コストだが使えるAUVを目指して~	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Techno-Ocean News	6. 最初と最後の頁 1~2
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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 T. Maki, Y. Noguchi, Y. Kuranaga, K. Masuda, T. Sakamaki, M. Humblet, and Y. Furushima	4. 巻 30
2. 論文標題 Low-altitude and High-speed Terrain Tracking Method for Lightweight AUVs	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Robotics and Mechatronics	6. 最初と最後の頁 971-979
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.20965/jrm.2018.p0971	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 巻俊宏	4. 巻 12
2. 論文標題 AUV: 自律型海中ロボット	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 日本機械学会誌	6. 最初と最後の頁 24-27
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 巻俊宏	4. 巻 34
2. 論文標題 自律型海中ロボット - 魚のごとく -	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 人工知能	6. 最初と最後の頁 222-227
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 巻俊宏, 吉田弘	4. 巻 76
2. 論文標題 自律型無人探査機 (AUV) による未探査領域調査	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 低温科学	6. 最初と最後の頁 印刷中
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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 B. Thornton, and T. Maki	4. 巻 6
2. 論文標題 UK and Japan Collaboration in Marine Robotics and Coral Mapping	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 IEEE OES Beacon Newsletter	6. 最初と最後の頁 12-13
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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 H. Horimoto, T. Nishimura, T. Matsuda	4. 巻 6
2. 論文標題 AUV "Minty Roll" and results of "Underwater Robot Convention 2017 in JAMSTEC"	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 IEEE OES Beacon Newsletter	6. 最初と最後の頁 77-79
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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 巻俊宏	4. 巻 33
2. 論文標題 水中ドローン ~ローコストAUVは使い物になるか~	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 オキシーテックニュースレター 海	6. 最初と最後の頁 14-18
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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計18件 (うち招待講演 12件 / うち国際学会 6件)

1. 発表者名 Y. Noguchi, T. Maki
2. 発表標題 Path Planning Method based on Artificial Potential Field and Reinforcement Learning for Intervention AUVs
3. 学会等名 IEEE OES Underwater Technology 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Maki
2. 発表標題 Autonomous platform systems for underwater observation
3. 学会等名 1st International Workshop on Safety and Maintenance in Nuclear Engineering and Hazardous and Extreme Environment Robots and Sensing Systems 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 巻俊宏
2. 発表標題 ロボ×海洋探査中!
3. 学会等名 Robo la Night (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 巻俊宏
2. 発表標題 海中ロボット
3. 学会等名 秋田海洋教育フォーラム (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 野口侑要
2. 発表標題 強化学習を用いた自律型海中ロボット制御の可能性
3. 学会等名 第1回海中海底工学フォーラム・ZERO (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 巻俊宏
2. 発表標題 小型無人プラットフォームによる海洋環境計測
3. 学会等名 CSISシンポジウム2018 - ドローンを利用したフィールドサイエンス最前線 - (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 巻俊宏
2. 発表標題 海中で活躍するロボット技術の最新動向と今後の展望
3. 学会等名 日本ロボット学会 第116回ロボット工学セミナー（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 巻俊宏
2. 発表標題 自律型海中ロボット（AUV）の開発
3. 学会等名 SUBSEA TECH JAPAN 2018 併催セミナー（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 巻俊宏
2. 発表標題 Autonomous Underwater Platform Systems
3. 学会等名 The 5th UTokyo-SJTU-KAIST Joint Academic Symposium（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 巻俊宏
2. 発表標題 AUVの最新事情
3. 学会等名 海洋開発利用システム実現学寄付講座 第51回セミナー（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Y. Noguchi
2. 発表標題 Quaternion-based Attitude Control of a Low-cost AUV
3. 学会等名 The 5th UTokyo-SJTU-KAIST Joint Academic Symposium (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 野口侑要, 堀本大洋, 巻俊宏
2. 発表標題 低コスト高速AUV の3次元姿勢制御
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会'18
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 巻俊宏
2. 発表標題 我が国と海外のROV・AUVの動向
3. 学会等名 2017年度港湾及び海洋土木技術者のためのROV等水中機器類技術講習会(招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Maki
2. 発表標題 Recent Developments on our AUV Fleet: Tri-TON 2 and HATTORI
3. 学会等名 The Eighth Symposium on Polar Science (招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 巻俊宏
2. 発表標題 自律型海中観測システム
3. 学会等名 平成29年度 第6回 学融合セミナー（招待講演）
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 T. Maki, Y. Kuranaga, Y. Noguchi, T. Sakamaki, K. Masuda, M. Humblet, and Y. Furushima
2. 発表標題 AUV Hattori: a Lightweight Platform for High-speed Low-altitude Survey of Rough Terrain
3. 学会等名 OCEANS17 MTS/IEEE Anchorage (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 小林亮介, 巻俊宏
2. 発表標題 音響センサを用いた水中狭隘環境向けロボット位置推定技術の開発
3. 学会等名 第35回 日本ロボット学会 学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 蔵永圭則, 巻俊宏, 野口侑要, 坂巻隆
2. 発表標題 スキャンニングソナーを用いたクルーズ型AUVによる高速かつ低高度な海底追従手法
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会'17
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 自律型水中ロボット及びその制御方法	発明者 巻俊宏, 蔵永圭則	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2017-081711	出願年 2017年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

巻研究室 東京大学生産技術研究所 http://makilab.iis.u-tokyo.ac.jp/

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