

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 2 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2012～2014

課題番号：24686097

研究課題名(和文) 自律型海中ロボットと海底ステーションによる海底4次元マッピングシステム

研究課題名(英文) Seafloor 4D mapping system based on an AUV and a seafloor station

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) 20,300,000円

研究成果の概要(和文)：本課題では、自律型海中ロボット(Autonomous Underwater Vehicle, AUV)と海底ステーションの連携により、海底環境の長期間、広範囲かつ密なモニタリングを行う手法の研究開発を実施した。画像と音響の融合によるAUVのステーションへのドッキング手法および磁気共鳴方式による海中での非接触給電手法を開発し、既存のAUVシステムへ実装、水槽および実海域試験を通してその有効性を検証した。本手法は生物学、地質学、考古学といったサイエンス分野のほか、資源探査、漁業、港湾施設維持、搜索救助など幅広い分野への応用が期待される。

研究成果の概要(英文)：This work focused on development of a system to perform long-term, wide-area, and dense observation of seafloor environment based on collaboration of autonomous underwater vehicles (AUVs) and a seafloor station. Autonomous docking method based on acoustic and optical information was developed. A non-contact power charging method suitable for sea water was also developed. The methods were implemented in existing platforms to verify the performance through tank and sea experiments. The method has wide range of applications, such as resource survey, fisheries, facility maintenance, search and rescue, as well as sciences like biology, geology, and archaeology.

研究分野：海中プラットフォームシステム学

キーワード：海洋探査 情報システム ロボティクス

1. 研究開始当初の背景

AUV とはエネルギー源と頭脳（計算機）、推進装置、センサ類を搭載した自己完結型の海中探査機であり、人間の管制を受けずに全自動で活動可能であるため、海中探査のための新たなプラットフォームとして注目されている。しかしながら保持できるエネルギーやデータ量には限りがあるため、全自動といいつつも、その展開・回収・再充電のために母船が必要となり、コスト面では従来の探査システムと大差ないのが現状である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、AUV が海底ステーションを基地とすることで、母船無しで長期間かつ広範囲の海底観測を可能とするシステムを開発することである。具体的な開発項目は以下の通りである。

- ・ AUV がステーションへドッキングするための測位・行動制御手法
- ・ AUV を充電するための、海中での高効率かつ高信頼な送電手法
- ・ 活動中の AUV のリアルタイム測位手法
- ・ 取得データの自動処理手法（4次元マッピング）

本研究で実現を目指すシステムを図1に示す。通常 AUV は観測終了後母船に回収されるが、本システムでは海底ステーションへドッキングし、電池充電とデータの吸出しを行う。これにより母船無しでの長期展開が可能になる。また、ステーションを基準とする音響測位と AUV の持つセンサを確率的に融合することで、AUV の高精度なリアルタイム測位を実現する。

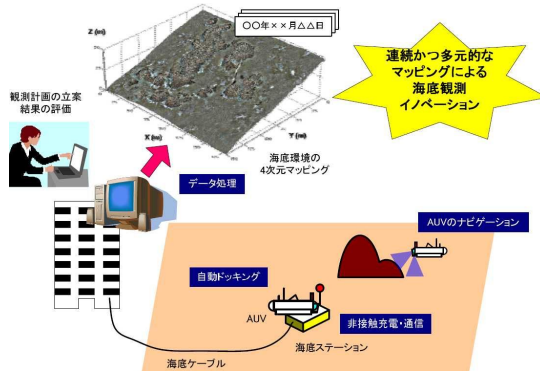


図1 AUV とステーションによる海底観測システム

3. 研究の方法

研究室の既存のプラットフォーム（AUV Tri-TONと海底ステーションA型）を用いて、水槽および浅海域での試験を繰り返しつつ実機ベースで研究開発を行う。非接触給電手法についてはまずは単体で開発したのちに、システムに組み込んでの統合試験を実施する。また、実フィールドでの有効性を検証するために、システムを浅海域に展開して試験を実施する。

4. 研究成果

(1) ドッキング手法

開発したドッキング手法の概要を図2に示す。本手法はホバリング型 AUV が海底ステーションに着座する形でドッキングするためのものであり、測位手法と行動計画手法から構成される。

測位手法は遠距離での測位範囲に優れた音響と、近距離での分解能に優れた可視光の複合方式とする。ステーションに備えられた音響基準局および LED アレイを基準とし、さらに AUV 自身の持つ速度や姿勢センサの情報を確率的に融合することで、ステーションを基準とするロバストなリアルタイム測位を実現する。

行動計画手法としては、まずはステーションの正面に設定された Entry point まで音響測位によって移動し、そこからは音響と画像の融合により Landing point へ移動、真下に降下してドッキングする。

水槽試験および実海域試験によって手法の有効性を確認した。図3に試験に使用した AUV Tri-TON の概要を、図4、5、6に試験結果をそれぞれ示す。

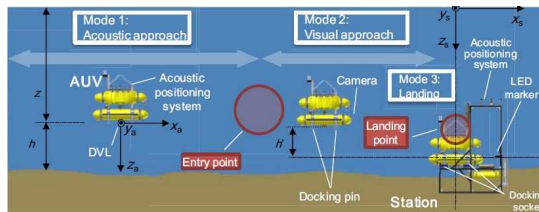


図2 音響と画像によるドッキング手法

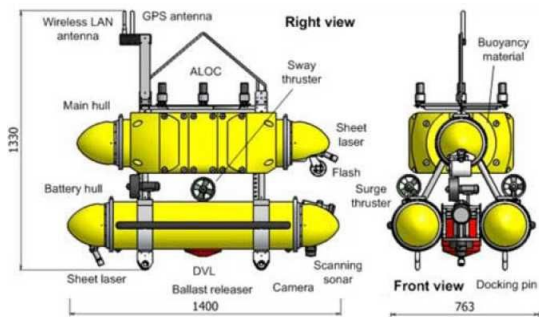


図3 AUV Tri-TON

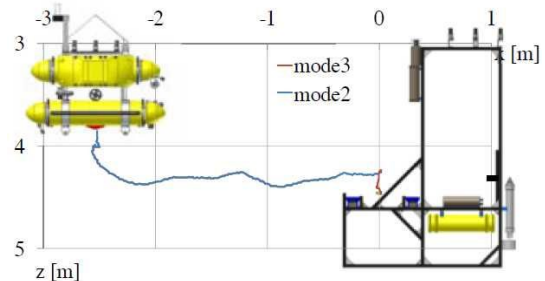


図4 AUV の航跡（XZ 平面）

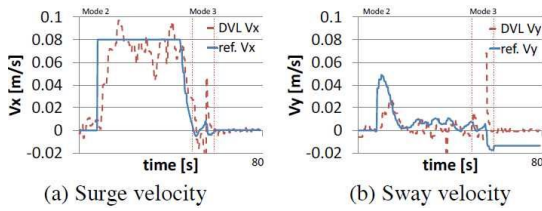


図5 AUVの水平方向の速度



図6 海域でのドッキング中の様子 (駿河湾沿岸域 水深35m)

(2) 非接触充電手法

非接触給電の方式としては一般に、電磁誘導式、電磁界共振結合方式、マイクロ波方式などが知られているが、AUVの場合給電場所が海中であるために、陸上で一般に使われている MHz 帯域では著しくエネルギーが減衰してしまう。電磁誘導式は、コイル間の距離が mm オーダーでしか現実的に使用できず、わずかな位置ずれによって大きく効率が低下してしまう。一方で電磁界共振結合方式は位置ずれに強いという特徴があり、コイル間距離も比較的大きくとすることができる。

そのため本研究においては、約 100kHz という比較的低周波の電磁界共振結合による非接触給電装置を開発、陸上および水槽試験によって性能を検証した。その結果、海水中でも送電できること、最大で効率 80%、出力 350W という、小型のホバリング型 AUV の給電用としては十分な性能が得られることが確認された(図7, 8)。

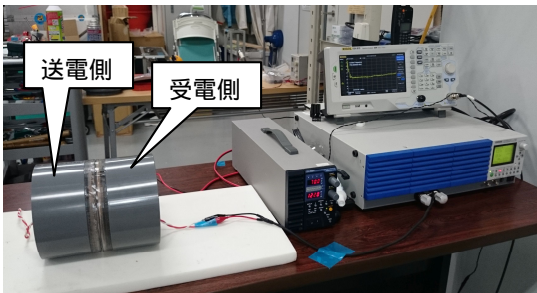


図7 空中試験の様子

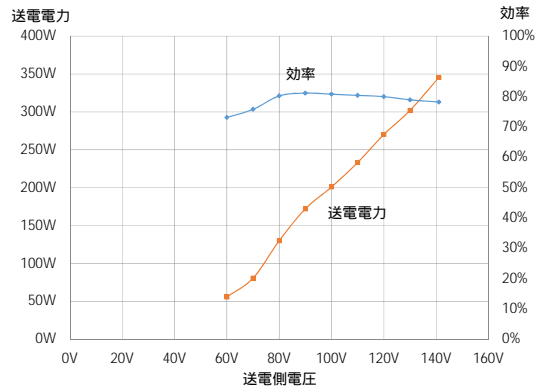


図8 空中試験結果

(3) 総合試験結果

非接触給電装置を組み込み、システム全体での試験を実施した。試験は東京大学生産技術研究所の水槽にて行った。AUV Tri-TON 2により海底ステーションにドッキングし、その状態で充電、その後離脱して再びドッキングさせるという流れを全て自律制御にて実施することに成功した。試験結果を図9, 10, 11に示す。図10より、AUVがドッキング中(約200~500secの間)に電池電圧の上昇が認められ、充電できていることがわかる。

充電まで含めた、ホバリング型 AUV の全自動でのドッキングは世界的にもほとんど例がなく、本研究により海底環境の長期間マッピングのための技術基盤を確立することができた。今後の展望としては、ドッキング手法および非接触充電手法のさらなるロバスト化、実際の海底ケーブルネットワークとの連携等が挙げられる。

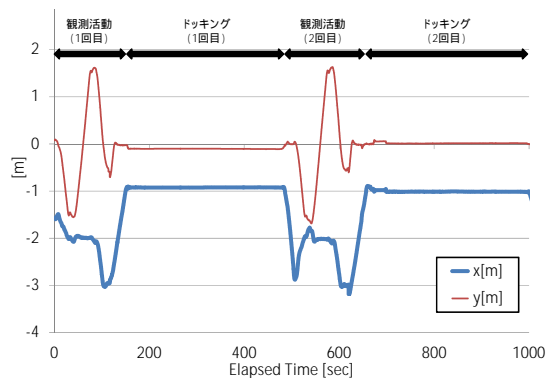


図9 Tri-TON 2の航跡

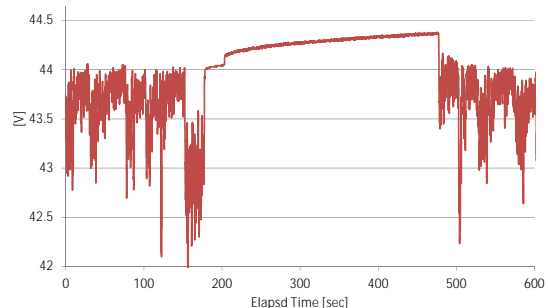


図10 Tri-TON 2の電池電圧

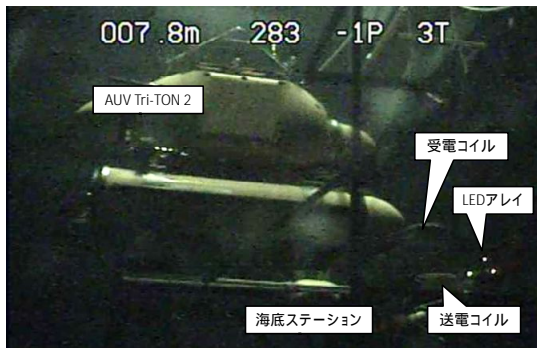


図 11 試験中の様子 (ドッキングの直前)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 7 件)

T. Matsuda, T. Maki, Y. Sato, T. Sakamaki, and T. Ura, A Cooperative Navigation Method of Multiple AUVs for Wide Seafloor Survey -First Performance Evaluation in Sea Environments-, Marine and Underwater Science and Technology (MUST), 査読有 (in press)

T. Matsuda, T. Maki, T. Sakamaki, and T. Ura, State Estimation and Compression Method for the Navigation of Multiple Autonomous Underwater Vehicles with Limited Communication Traffic, IEEE Journal of Oceanic Engineering, 査読有, 40(2), 2015, 337-348

DOI:10.1109/JOE.2014.2323492

Y. Sato, T. Maki, A. Kume, T. Matsuda, T. Sakamaki, and T. Ura, Path Replanning Method for an AUV in Natural Hydrothermal Vent Fields: Toward 3D Imaging of a Hydrothermal Chimney, Marine Technology Society Journal, 査読有, 48(3), 2014, 104-114

DOI:10.4031/MTSJ.48.3.5

巻俊宏, AUV Tri-TON -海底熱水地帯の 3次元画像化を目指して-, 設計工学, 査読無, 49(5), 2014, 225-229

URL: <http://www.jsde.or.jp/shuppan-j/2014/jl201405.html>

T. Yamanaka, K. Maeto, H. Akashi, J. Ishibashi, Y. Miyoshi, K. Okamura, T. Noguchi, Y. Kuwahara, T. Toki, U. Tsunogai, T. Ura, T. Nakatani, T. Maki, K. Kubokawa, and H. Chiba, Shallow submarine hydrothermal activity with

significant contribution of magmatic water producing talc chimneys in the Wakamiko Crater of Kagoshima Bay, southern Kyushu, Japan, Journal of Volcanology and Geothermal Research, 査読有, 258, 2013, 74-84

DOI:10.1016/j.jvolgeores.2013.04.007

A. Kume, T. Maki, T. Sakamaki, T. Ura, A Method for Obtaining High-Coverage 3D Images of Rough Seafloor Using AUV - Real-Time Quality Evaluation and Path-Planning -, Journal of Robotics and Mechatronics, 査読有, 25(2), 2013, 364-374

URL: <https://www.fujipress.jp/finder/xslt.php?mode=present&inputfile=ROBO T002500020011.xml>

T. Maki, T. Matsuda, T. Sakamaki, T. Ura, J. Kojima, Navigation Method for Underwater Vehicles Based on Mutual Acoustical Positioning With a Single Seafloor Station, IEEE Journal of Oceanic Engineering, 査読有, 38(1), 2013, 167-177

DOI:10.1109/JOE.2012.221079

〔学会発表〕(計 18 件)

Y. Sato, *et al.*, Evaluation of Position Estimation of AUV Tri-TON 2 in Real Sea Experiments, MTS/IEEE OCEANS'15 Genova, Genova (イタリア), 2015/5/18

T. Maki, *et al.*, Development of the AUV Tri-TON 2 for detailed survey of rugged seafloor, AUVSI Unmanned Systems 2015, Atlanta (米国), 2015/5/4

Y. Sato, *et al.*, Detailed 3D Seafloor Imaging of Kagoshima Bay by AUV Tri-TON 2, International Symposium on Underwater Technology 2015 (UT15), Chennai (インド), 2015/2/23

T. Maki, Light for the sea, Adventures for the robots!, The 5th International Conference on Underwater System Technology: Theory and Applications 2014 (USYS'14), Melaka (マレーシア), 2014/12/3, 招待講演

T. Maki, *et al.*, AUV Tri-TON 2: An intelligent platform for detailed survey of hydrothermal vent fields, IEEE AUV 2014, Oxford(米国), 2014/10/6

巻俊宏ほか, ホバリング型 AUV の長期展開に向けた電磁界共振結合方式による非

接触給電システムの開発, ロボティクス・メカトロニクス講演会'14, 富山, 2014/5/26

松田匠未ほか, 複数の自律型海中ロボットの状態推定手法, 第31回日本ロボット学会学術講演会, 東京, 2013/9/4

巻俊宏ほか, ホバリング型 AUV Tri-TON の開発 - 複雑環境の3次元画像化を目指して -, ロボティクス・メカトロニクス講演会'13, つくば, 2013/5/22

佐藤芳紀ほか, 複雑環境の高被覆率な画像化に向けた AUV のナビゲーション手法 (第2報) - リアルタイム撮影度評価に基づく観測経路生成による実海域画像マッピング -, ロボティクス・メカトロニクス講演会'13, つくば, 2013/5/22

巻俊宏ほか, ホバリング型 AUV Tri-TON および海底ステーションによる鹿児島湾熱水サイトの画像観測, ブルーアース 2013, 東京, 2013/3/14

T. Maki, *et al.*, AUV Tri-TON - A Hover-Capable Platform for 3D Visualization of Complicated Surfaces -, Underwater Technology 2013, 東京, 2013/3/5

T. Maki, *et al.*, Docking Method for Hovering Type AUVs by Acoustic and Visual Positioning, Underwater Technology 2013, 東京, 2013/3/5

巻俊宏, AUV 技術の最先端 - 海に光を、ロボットに冒険を -, 海洋調査技術学会第24回研究成果発表会, 東京, 2012/11/8, 招待講演

巻俊宏ほか, AUV Tri-TON と海底ステーションによる鹿児島湾若尊カルデラの画像マッピング, 海洋調査技術学会第24回研究成果発表会, 2012/11/8

巻俊宏, 自律型海中ロボットによる海底の広域画像マッピング, 第8回学際領域における分子イメージングフォーラム, 東京, 2012/11/2, 招待講演

巻俊宏ほか, 複雑な海底環境の画像観測用 AUV 「Tri-TON」の開発, 第23回海洋工学シンポジウム, 東京, 2012/8/2

松田匠未ほか, 相互音響測位手法の開発 - 海底ステーションを基準とする自律型海中ロボットの熱水域詳細観測 -, 第23回海洋工学シンポジウム, 東京, 2012/8/2

T. Maki, *et al.*, Large-area mapping of benthic habitats through autonomous robotic surveys, 2012 ASLO Aquatic Sciences Meeting, 大津, 2012/7/8

〔その他〕
ホームページ等
<http://makilab.iis.u-tokyo.ac.jp/>

新聞・雑誌記事
2015/1/6, 平時の用途開拓・災害対応ロボ(下)潜在力高い飛行・水中ロボ, 日刊工業新聞

2014/12/26, 東大生研, 水中構造物を自動で立体撮影するプログラム開発 - AUV に搭載し資源探索, 日刊工業新聞

2014/9, 水中ロボットの海洋分野での活用, SCOPE NET, Vol. 70, 8-12

2012/11/14, 東大生産研千葉実験所 海底探査3D化へ 自律型観測ロボなど紹介, 電気新聞.

2012/11/12, 東大がロボット公開 海底観測・撮影 全自動で, 電気新聞.

6. 研究組織

(1) 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

(2) 研究協力者

佐藤 芳紀 (SATO, Yoshiki)
東京大学・生産技術研究所・特任研究員
研究者番号: 90635210

松田 匠未 (MATSUDA, Takumi)
東京大学・生産技術研究所・特任研究員
研究者番号: 80759861

水島 隼人 (MIZUSHIMA, Hayato)
東京大学・生産技術研究所・特任研究員

坂巻 隆 (SAKAMAKI, Takashi)
東京大学・生産技術研究所・技術専門員

増田 殊大 (MASUDA, Kotohiro)
東京大学・生産技術研究所・学術支援専門職員