

令和 3 年 6 月 10 日現在

機関番号：32682

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01632

研究課題名(和文)高性能AUVを核としたAUVネットワークによる海底の協調探査手法

研究課題名(英文) Cooperative Seafloor Survey Method of Multiple Autonomous Underwater Vehicles Using AUV Network Centered on a High-performance AUV

研究代表者

松田 匠未 (Matsuda, Takumi)

明治大学・理工学部・助教

研究者番号：80759861

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、低コスト・高精度・高効率を同時に満たす海底探査システムを実現するために、自律型海中ロボット群(AUV群)による協調探査手法を提案・開発した。AUV群は1台の高性能なAUV(親機)とシンプルなAUV群(子機群)で構成され、親機を核とした音響ネットワークにより、AUV群は外部からの支援を受けずにリアルタイムに高精度測位および協調観測を実現できる。本研究によりAUVネットワークを活用した自己完結型の新探査手法が確立され、人類の海洋調査能力の拡大に貢献した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

海洋探査においてコスト、観測精度、観測効率はトレードオフの関係にあるため、現状の多くの探査はいずれかを犠牲にして行われている。このような限定的な探査システムによって地球表面の約7割を占める海洋を把握するには限界がある。環境バッファである海洋の継続的かつ統合的なモニタリング技術なしに地球環境を維持することが困難な状況も発生しうる。そこで将来に先駆けて、低コスト・高精度・高効率を同時に満たすAUV群による分散型の海洋探査技術を実現した意義は大きい。本技術は資源探査やインフラ点検、災害被害調査などあらゆる海洋探査方式の転換にもつながるものである。

研究成果の概要(英文)：In this study, we proposed and developed a cooperative survey method of multiple autonomous underwater vehicles (AUVs) to realize a low-cost, highly accurate, and highly efficient seafloor survey system. The AUVs consist of one high-performance AUV (parent AUV) and a group of simple AUVs (child AUVs). The AUVs can realize highly accurate positioning and cooperative observation in real-time by using an acoustic network centered on the parent AUV. Thanks to this research, a new self-complete survey method based on the AUV network was established, and we contributed to the expansion of human ocean survey capabilities.

研究分野：自律型海中ロボット

キーワード：自律型海中ロボット マルチロボット 海底探査 フィールドロボティクス

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

海底資源探査や生物観測を目的として自律型海中ロボット (AUV) による海洋調査が進められている。AUV はエネルギー源とコンピュータを内部に搭載しており、人間の管制を受けずに全自動で海中・海底を調査できることから、世界的に導入が進みつつある。しかし、水中では電波の減衰が大きいため GPS 測位ができず、陸上のように容易に位置を知ることはできない。そのため支援船をベースとして調査が行われることが一般的である。支援船による海洋調査はコストがかかり、機会も限られ、また天候にも左右されやすい。そこで限られた調査時間を有効活用するために複数の AUV を展開し、調査の効率化を図る方法が提案されている。AUV は自律観測を行うために航法センサや測位・通信機器が必要になるが、高精度で信頼性の高いものほどコストがかかるため、一定以上の性能を有する AUV の平均コストは数千万円にもなる。また高性能な AUV ほど大型化しやすく、運用も困難になる。そのため複数機を運用する場合、システム全体のサイズやコストの観点から台数に制約が生じる。限られた台数で地球表面の約 7 割を占める海洋を把握していくには限界があり、海洋観測を進めていくうえで大きな障壁となっている。海洋探査において (1) コスト (運用・システム)、(2) 観測精度、(3) 観測効率はトレードオフの関係にあるため、いずれかを犠牲にして成り立つ現状の探査システムでは海洋探査が継続的に進展しておらず、すべてを実現するような新探査方式が不可欠である。

### 2. 研究の目的

低コスト、高精度、高効率を同時に満たす海底観測を実現するために、高性能な AUV を核とした AUV 群のネットワークによる協調探査手法を提案する (図 1)。これまで複数の AUV が交代で海底に着底して測位のランドマークとなる航法を開発してきた (T. Matsuda, *et al.*, *Journal of Field Robotics*, 35(3), pp. 359-395, 2017)。本手法により外部から支援を受けることなく AUV のみで測位精度の低下を抑えつつ観測範囲を拡大できる。しかし音響測位に基づくランドマークの切り替えによる誤差蓄積や効率低下が課題となっていた。提案システムは 1 台の高性能な AUV (親機) とシンプルな AUV 群 (子機群) で構成され、ランドマークの切り替えを必要としない。親機を核とした音響ネットワークにより、AUV 群はリアルタイムに高精度測位に基づく協調観測を実現する。提案システムにおいて親機の導入コストは要するものの、子機のコストが低下するため、システム全体のコストを抑えられる。また子機の小型化によって運用も容易になり、台数の制約も大幅に緩和される。提案手法を実現するために以下の項目をシミュレーションによる手法設計、実機への実装、実機による水槽・海域試験を通じて開発する。

1. 1 台の高性能な親機を核とした子機群の測位手法の開発
2. 速度制御に基づく協調観測手法の開発
3. 子機の台数や性能に依存しない汎用的な測位手法の開発
4. 提案手法の実機への実装および水槽・海域での性能実証

### 3. 研究の方法

まず本研究の基礎となる親機を核とした子機群の測位手法を開発した。測位手法は複数 AUV の航行シミュレーションを通して検討を進め、親機と同等の測位精度を子機が維持できることを実証した。その過程で親機に対する航行速度を制御することで群として協調観測を行う手法も構築している。3 台の AUV (親機 1 台と子機 2 台) に開発した手法を実装し、水槽での動作確認後、海域にて 3 台による試験を行い、調査範囲が km オーダーに広域化した場合にも測位手法が機能するか性能を評価した。

さらに音響測位情報をもとに自機の航行速度を推定することで、親機と音響測位できない間も精度低下を抑制する方法を開発した。これにより子機単体の測位性能によらない汎用的な測位手法を実現した。また遠隔操縦型水中ロボット (ROV) の製品に開発した自律航行プログラムを実装し、AUV として運用できるようにした (以下低コスト子機)。低コスト子機に提案手法を実装し、性能検証を行った。そして航行シミュレーションにより子機の台数が増加した場合について観測精度や観測効率の観点から検証した。

#### (1) 親機を核とした子機群の測位手法の開発

本手法では親機以外の AUV (子機) は高度な航法センサを搭載していないが、親機を中心とした測位・通信のネットワークを構築し、親機から支援を受けることで親機と同等の調査性能を実現する。すべての AUV は搭載された航法センサ (速度・加速度センサ、ジャイロ等) の情報をもとに自機の状態 (位置・姿勢) を推定する。親機は子機群と音響相対測位を実施し、測位情報を各子機に送信する。各子機は親機基準の相対位置・方位情報をもとに状態を推定する。これにより親機と同等の測位精度を実現する。また親機を中心に群として航行することで効率的に観測範囲を拡大していくことが可能である。

状態推定には確率的手法を用いる。航法センサや相対測位センサの計測値を確率的に扱うことで計測ノイズに対処する。状態推定は航法センサの計測値をもとに状態遷移を行う予測フェーズと親機と子機間の相対測位情報をもとに状態を修正する観測フェーズによって行う。本研究では親機と子機を以下のように定義する。

- 親機  
高仕様な航法センサをもとに外部からの支援を受けることなく高精度に状態を推定する。
- 標準子機  
1 軸の光ファイバジャイロや対地速度計をもとに状態を推定する。外部からの支援がない場合、推定誤差が発生する。
- 低コスト子機  
加速度計や小型ジャイロをもとに状態を推定する。標準子機よりも低仕様な航法センサしか搭載していないため、大きな推定誤差が発生する。  
親機は単体で高精度に状態を推定できるため予測フェーズのみを実施し、子機は単体では推定誤差が発生するため、予測フェーズと観測フェーズの双方を実施する。

(2)速度制御に基づく協調観測手法の開発

子機が海流などの外乱により親機から離れてしまうことで、親機との測位が得られず、推定精度を維持できなくなる。そこで親機は測位信号を発信する際に自分の現在位置と目的地を各子機に送信し、子機はその情報をもとに親機に対する遅れを判断して航行速度を制御する。

(3)子機の台数や性能に依存しない汎用的な測位手法の開発

音響は帯域幅が狭いことから、親機と子機は1対1で測位を行う必要がある。そのため子機の台数が増加するにつれて、親機と各子機の測位間隔が長くなり、子機単体での測位性能が低い場合は、子機の推定精度が顕著に低下してしまうというスケーラビリティの問題が発生する。そこで子機は音響測位の時系列データから自機の航行速度を推定し、測位間での精度低下を抑制する。

(4)提案手法の実機への実装および水槽・海域での性能実証

ホバリング型 AUV Tri-TON 2 (以下 TT2), Tri-Dog 1 (以下 TD), Tri-TON (以下 TT) に提案手法を実装した。TT2 は真方位を検出できる 3 軸の光ファイバジャイロ (Triple-axis FOG) を搭載している。一方 TD と TT は 1 軸の光ファイバジャイロ (Single-axis FOG) を搭載している。いずれもドップラ式対地速度計 (DVL), 深度センサ, 音響測位・通信装置 (USBL device) を搭載している。ここでは TT2 を親機として、TD と TT を標準子機として用いる。さらに低コスト子機として Blue Robotics 社の製品である BlueROV2 に自律航行プログラムを実装し、AUV として運用できるようにした (以下 Blue AUV (BA))。BA は 3 軸の加速度センサ, 3 軸のジャイロセンサ, 3 軸の地磁気センサ, 深度センサ, 光学カメラ, 音響測位・通信装置を搭載している。図 2 に各 AUV を示す。これらの AUV を用いて水槽および海域において提案手法の性能実証を行った。

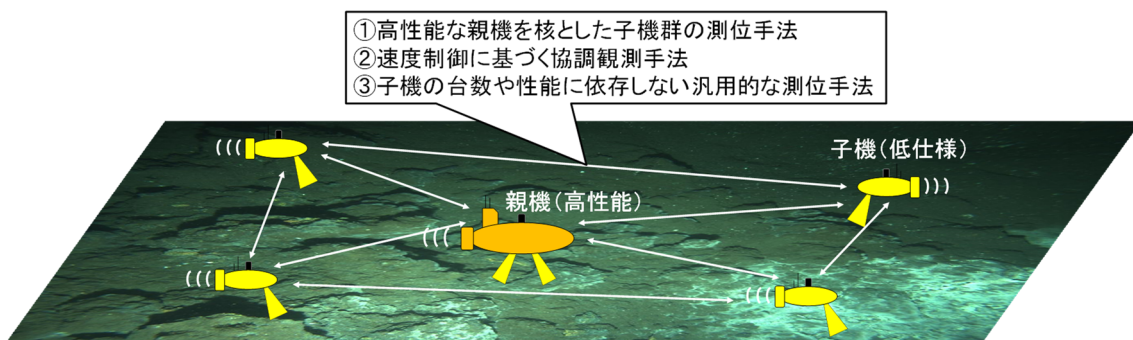


図 1 高性能な AUV を核とした AUV 群による協調探査手法。

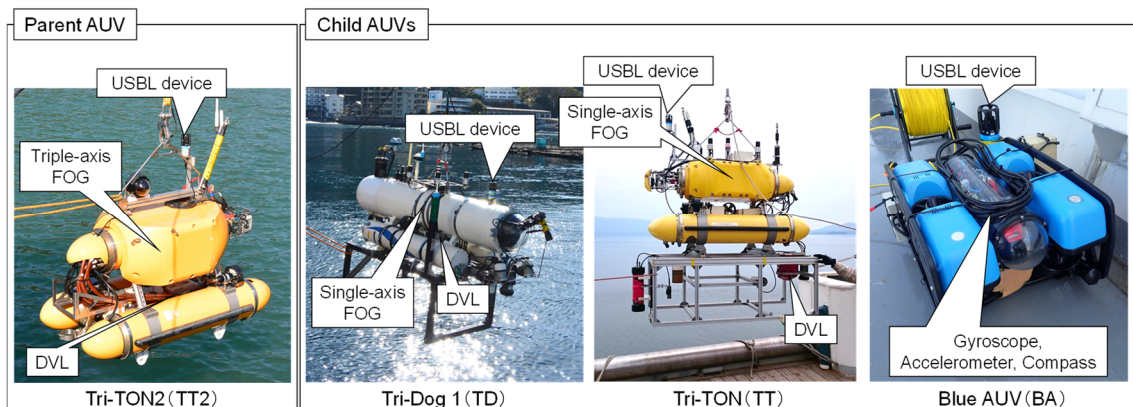


図 2 AUV Tri-TON 2, Tri-Dog 1, Tri-TON, Blue AUV.

#### 4. 研究成果

##### (1) 親機を核とした子機群の測位手法の開発

沼津の内浦湾において AUV TT2, TD, TT の 3 台による海域試験を行った。TT2 を基準に TD と TT は 800m の自律航行に成功した。試験で得られた各種センサデータをもとに、TD と TT の状態を再推定し、TT2 と同等の測位精度（航行距離 1%以下）を実現できることを実証した。

また熱水噴出地帯として科学的に重要なフィールドである鹿児島湾の若尊カルデラにおいて AUV TT2 と TT を用いた実証試験を実施した。TT2 と TT は水深 200m の海底から高度 1.5m を維持した状態で、500m のエリアを 1.5 往復して合計 1.2km を自律航行した。本試験で得られた各時刻の対地速度、姿勢、音響相対測位の計測値を読み込んで TT の状態を再推定して、性能評価を行った。図 3 に再推定航跡、パーティクルの分布（3 分おき）と音響測位結果（TT2：緑実線，TT：黄点線）を示す。TT2 が音響測位で計測した TT との距離と計測時の 2 台の推定位置から算出された距離を比較して子機である TT の推定誤差を評価した。親機との測位がない場合は、10m 以上の誤差が発生した。一方、提案手法では誤差は調査時間を通じて数 m 以内で拡大することなく、TT は TT2 と同等の測位精度で自己位置を推定できる結果が得られた（図 4）。詳細は以下の文献に記載している（T. Matsuda, *et al.*, *IEEE Robotics and Automation Letters*, 4(3), pp. 2333-2339, 2019）。

##### (2) 速度制御に基づく協調観測手法の開発

沼津の内浦湾において TT2 と TD を用いた海域試験を実施した。TD は TT2 との音響通信を介して TT2 の現在位置と目的地の情報を取得し、TT2 に対する遅れをもとに航行速度を制御した。図 5 に 2 台の水平位置を示す。2 台は X 方向に 300m を往復して自律航行した。本手法導入前は、子機は親機に対して指定した位置から 100m 以上離れてしまう状況が発生したが、本手法により平均的に 10m 以内に制御できる結果が得られた。また測位精度の安定性向上にもつながることを示した。詳細は以下の文献に記載している（T. Matsuda, *et al.*, *MTS/IEEE OCEANS' 19 Marseille*, pp. 1-5, 2019）。

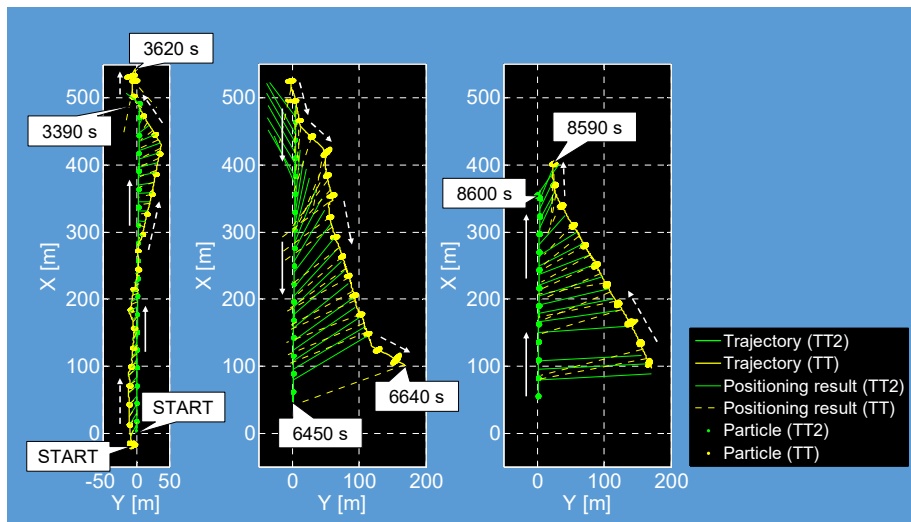


図 3 2 台の推定航跡と相対測位結果.

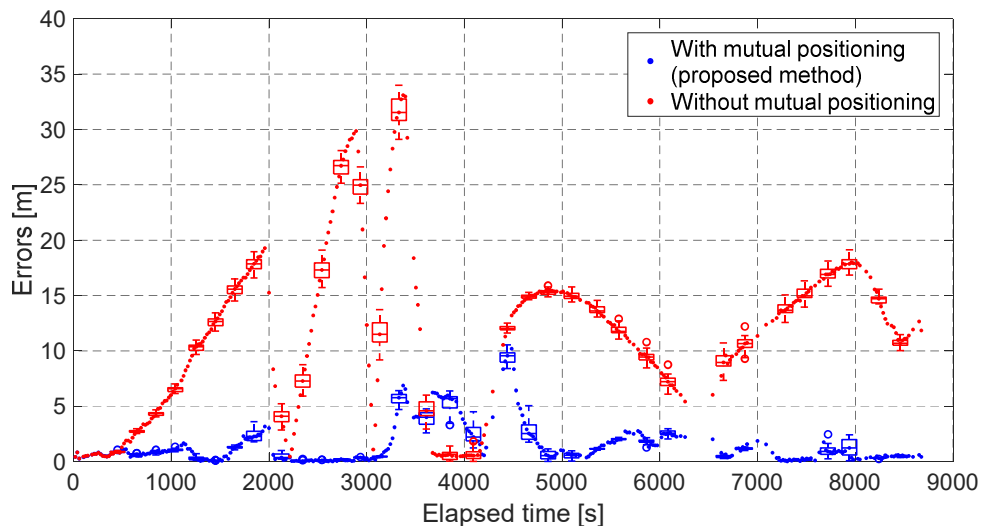


図 4 計測距離に基づく子機の推定誤差.

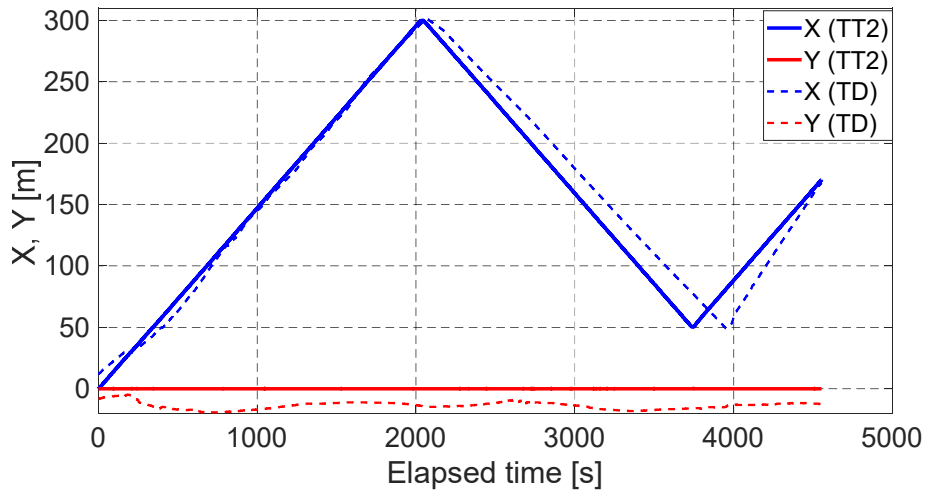


図5 速度制御を導入した2台の水平位置.

### (3) 子機の台数や性能に依存しない汎用的な測位手法の開発

沼津の内浦湾において AUV TT2 (親機), TT (標準子機), BA (低コスト子機) を用いた海域試験を実施した. 本試験では低コスト子機 BA の状態推定の精度を評価することを目的とした. TT に BA を固定した状態で, 3 台は 30m のエリアを X 方向に往復しながら 180m を自律航行した. この間 BA は各種センサデータを取得した.

試験で得られたセンサデータを用いて状態推定を行い, 提案手法の性能を評価した. BA の状態推定は, 0.1 秒間隔の航法センサの計測値に加えて, 音響測位計測値を 4 秒間隔で入力して実施した. 性能比較のため, 状態推定は音響測位計測値を用いない場合と用いる場合 (提案手法) の 2 つの条件で行った. 前者の条件では, 初期位置の誤差を修正するために, 最初の 60 秒間だけ TT2 との音響測位に基づく観測フェーズを行った. また子機の台数に対する提案手法のスケラビリティを評価するため, 6 台の子機が存在する場合について同じデータで状態推定を実施した. この場合, 時間間隔を 6 倍にして音響測位計測値を状態推定に入力することで, 子機 6 台の状況を仮想的に作り出した.

図 6 に各条件の TT と BA の時系列の推定位置を示す. TT2 との音響測位計測値を用いない場合, BA の推定誤差は 40m まで拡大している (図 6-(a)). 提案手法の場合, BA は調査時間を通じて TT とほぼ同じ位置に推定できている (図 6-(b)). また台数が増加した場合も精度を大きく損ねること無く推定できている (図 6-(c)). よって提案手法により, 子機の仕様や台数に大きな影響を受けず, 単体では実現できなかった高精度測位が可能となることが示された.

### (4) 総合評価

上記のシミュレーションおよび実機による海域試験を通じて, 提案手法が海洋探査においてトレードオフの関係にある低コスト, 高精度, 高効率という 3 要素を同時に満たすことを示した. 提案手法はこれまで AUV 探査において課題となっていた低コスト化と高精度化の両立を実現するとともに, AUV ネットワークという分散型の新たな海底探査技術を創出した. 今後は本技術を実用化し, 次世代の海洋可視化技術の構築に向けた取り組みを推進していく.

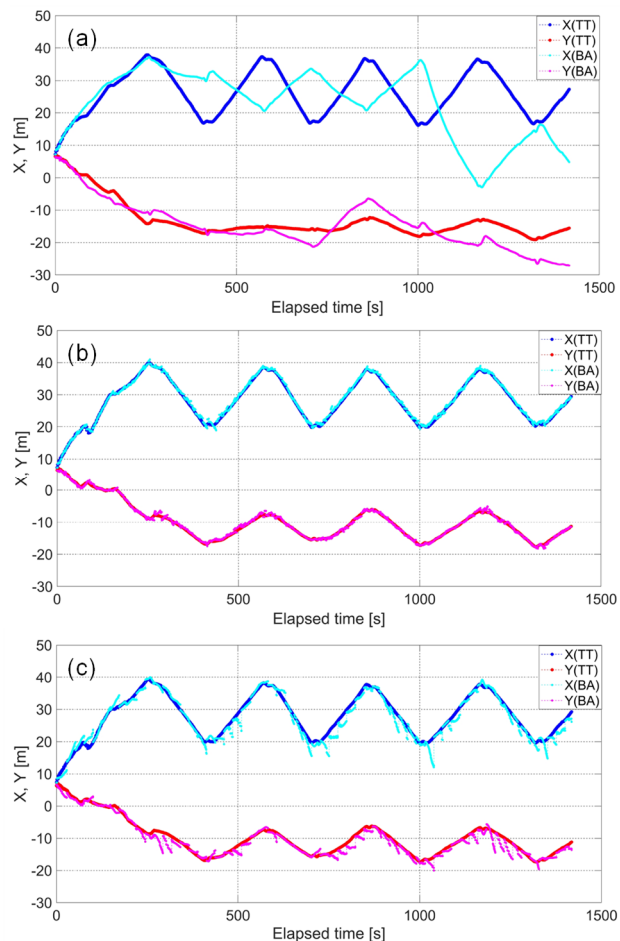


図6 TT と BA の水平位置. (a) 音響測位なし, (b) 子機 1 台の場合, (c) 子機 6 台の場合.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 3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 T. Matsuda, R. Takizawa, T. Sakamaki, and T. Maki	4. 巻 101
2. 論文標題 Landing method of autonomous underwater vehicles for seafloor surveying	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Ocean Research	6. 最初と最後の頁 1-17
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.apor.2020.102221	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 T. Matsuda	4. 巻 9(3)
2. 論文標題 Research and Education Activities Under the Coronavirus Pandemic	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE OES Beacon Newsletter	6. 最初と最後の頁 14-15
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. Matsuda, T. Maki, K. Masuda, and T. Sakamaki	4. 巻 120
2. 論文標題 Resident Autonomous Underwater Vehicle: Underwater System for Prolonged and Continuous Monitoring Based at a Seafloor Station	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Robotics and Autonomous Systems	6. 最初と最後の頁 1-19
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.robot.2019.07.001	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 T. Matsuda	4. 巻 8(3)
2. 論文標題 Underwater Robot Convention in JAMSTEC 2019	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE OES Beacon Newsletter	6. 最初と最後の頁 57-61
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. Matsuda, T. Maki, and T. Sakamaki	4. 巻 4(3)
2. 論文標題 Accurate and Efficient Seafloor Observations with Multiple Autonomous Underwater Vehicles: Theory and Experiments in a Hydrothermal Vent Field	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Robotics and Automation Letters	6. 最初と最後の頁 2333-2339
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/LRA.2019.2902744	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 2件 / うち国際学会 7件)

1. 発表者名 松田匠未, 濱松祐矢, 藤田健一, 坂巻隆, 巻俊宏
2. 発表標題 海洋の完全無人探査に向けた自律型海中ロボット群の協調ナビゲーション
3. 学会等名 2021年 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Matsuda, Y. Hamamatsu, K. Fujita, T. Sakamaki, and T. Maki
2. 発表標題 Parent-Child-Based Navigation Method of Multiple Autonomous Underwater Vehicles for Ship-Free Underwater Survey
3. 学会等名 IEEE OES Underwater Technology 21 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松田匠未, 藤田健一, 濱松祐矢, 坂巻隆, 巻俊宏
2. 発表標題 高性能なAUVを核としたAUVネットワークによる水中完結型の海洋調査手法
3. 学会等名 海洋調査技術学会 第32回研究成果発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 松田匠未
2. 発表標題 海中ロボットの活用「AUVのドッキングシステム」
3. 学会等名 2019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 2019年

1. 発表者名 松田匠未, 巻俊宏, 坂巻隆
2. 発表標題 複数の自律型海中ロボットの連携による水中完結型の海洋調査手法
3. 学会等名 海洋調査技術学会 第31回研究成果発表会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Fujita, T. Matsuda, and T. Maki
2. 発表標題 Bearing Only Localization for Multiple AUV with Acoustic Broadcast Communication
3. 学会等名 The 19th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松田匠未, 坂巻隆, 巻俊宏
2. 発表標題 海底環境の同時多点計測に向けた自律型海中ロボット群による協調測位手法
3. 学会等名 第37回日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2019年



1. 発表者名 T. Matsuda, T. Maki, and T. Sakamaki
2. 発表標題 Navigation Method of Multiple AUVs with Velocity Control for Stable Positioning and Communication among AUVs
3. 学会等名 MTS/IEEE OCEANS'19 Marseille (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Hamamatsu, T. Matsuda, T. Sakamaki, and T. Maki
2. 発表標題 Short Range Tracking Method of Underwater Vehicles based on Vision
3. 学会等名 MTS/IEEE OCEANS'19 Marseille (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 増田殊大, 松田匠未, 巻俊宏
2. 発表標題 AUV長期実海域運用に向けた位置と負荷変動にロバストな非接触充電装置の開発
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会'19
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Matsuda, T. Maki, K. Masuda, T. Sakamaki, and K. Ohkuma
2. 発表標題 Port Experiments of the Docking and Charging System Using an AUV and a Seafloor Station: Towards Long-term Seafloor Observation
3. 学会等名 IEEE OES Autonomous Underwater Vehicle 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 松田匠未, 巻俊宏, 坂巻隆
2. 発表標題 高性能AUVを核としたAUV群の測位手法 -海底熱水地帯における複数AUVの展開-
3. 学会等名 第36回 日本ロボット学会 学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 松田匠未, 瀧澤亮太, 坂巻隆, 巻俊宏
2. 発表標題 海流に正対する方位制御手法および着底の安定性判定手法の開発 -ホバリング型AUVの安定した着底を目指して-
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 増田殊大, 巻俊宏, 松田匠未
2. 発表標題 AUV向け海中非接触充電装置の開発及び海域試験
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 T. Matsuda, T. Maki, and T. Sakamaki
2. 発表標題 Multiple AUV Navigation Based on a Single High-performance AUV for Accurate and Efficient Seafloor Survey: Sea Experiments with 3 AUVs
3. 学会等名 MTS/IEEE OCEANS'18 Kobe (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 S. S. Sandoey, T. Matsuda, T. Maki, and I. Schjoelberg
2. 発表標題 Rao-Blackwellized Particle Filter with grid-mapping for AUV SLAM using Forward-Looking Sonar
3. 学会等名 MTS/IEEE OCEANS' 18 Kobe (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<a href="http://maki lab.iis.u-tokyo.ac.jp/research.html">http://maki lab.iis.u-tokyo.ac.jp/research.html</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
研究協力者	巻 俊宏  (Maki Toshihiro)		
研究協力者	濱松 祐矢  (Hamamatsu Yuya)		
研究協力者	藤田 健一  (Fujita Kenichi)		

6. 研究組織（つづき）

	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	Sandoey Stian Skaalvik  (Sandoey Stian Skaalvik)		

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			
ノルウェー	ノルウェー科学技術大学			