

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 30 年 6 月 20 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2017

課題番号：16K18317

研究課題名(和文) 現場適応型観測経路に基づく複数の自律型海中ロボットの協調探査の実現

研究課題名(英文) Realization of Cooperative Survey by Multiple AUVs Based on On-site Adaptive Observation Routes

研究代表者

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

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)：本研究では未知の海底環境を効率的かつ正確に可視化するための探査手法として、複数の自律型海中ロボット(Autonomous Underwater Vehicle:AUV)による協調探査手法を提案・開発した。音響地形マップに基づいた特徴的な観測対象の自動抽出方法、および抽出した対象を光学センサにより詳細かつ精密に観測するための経路計画方法を開発し、2台のAUVに実装し、水槽試験を通じて有効性を検証した。さらに3台のAUVによる協調観測試験を海域にて実施し、有効性を実証した。本手法は、生物学、地質学といったサイエンス分野や、資源探査、搜索救助など幅広い分野に貢献する。

研究成果の概要(英文)：This work proposed and developed a cooperative survey method by multiple autonomous underwater vehicles (AUVs) to visualize unknown seafloor environments efficiently and accurately. A method for detecting objects of interested based on an acoustic bathymetry map, and a method for generating routes to observe only detected targets using optical sensors in detail and accurately were developed. The methods were implemented in 2 AUVs and verified through tank tests. In addition, cooperative survey with 3 AUVs was conducted in sea environments and the performance of the system was verified. The proposed method contributes to many fields such as resource survey and rescue, as well as science areas like biology and geology.

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 協調 海底探査

1. 研究開始当初の背景

自律型海中ロボット (Autonomous Underwater Vehicle : AUV) はエネルギー源と制御用のコンピュータを内蔵した無人の水中探査機である。人間による制御を受けることなく全自動で海底に接近し、長時間・広範囲を観測できるため、新たな探査技術として注目されている。しかし、現状の調査方式では探査効率の面で大きな課題がある。海底現場の状況が不明な場合、船から計測した限られた情報から観測範囲を絞り、AUV に観測経路を設定する。そのため、AUV は何もない不必要な部分の観測に探査時間のほとんどを費やしており、広大な海を把握していく上で障壁となっている。よって探査方式の転換が必要である。

2. 研究の目的

本研究では未知の海底環境を効率的かつ正確に可視化するための新たな探査手法として、複数の AUV が探査海域の環境計測に基づき、現場に適応した観測経路を全自動で構築し、実施する手法を提案する。これまで開発を進めてきた複数の AUV のうちの 1 台が交互に海底に着底して測位のランドマークとなる相互ランドマーク測位手法をベースに以下の項目を開発する。

1. 音響地形計測センサによる地形マップの作成とそれに基づく特徴的な観測対象の自動抽出方法の開発。
2. 抽出した対象を光学センサで詳細かつ精密に観測するための経路計画方法の開発。
3. 実機による試験、手法の有効性の検証。

3. 研究の方法

提案手法をシミュレーション、実機による水槽試験を経て確立する。図 1 に研究の流れを示す。まず水槽に観測用の人工ターゲットを設置して、AUV で地形計測を行う。そして地形マップの作成、地形マップに基づいた特徴領域の抽出、観測経路の構築方法について開発を行う。手法が確立されたら、2 台の実機に手法を実装し、複数のターゲットを設置した水槽にて試験を行い、手法の有効性を検証する。

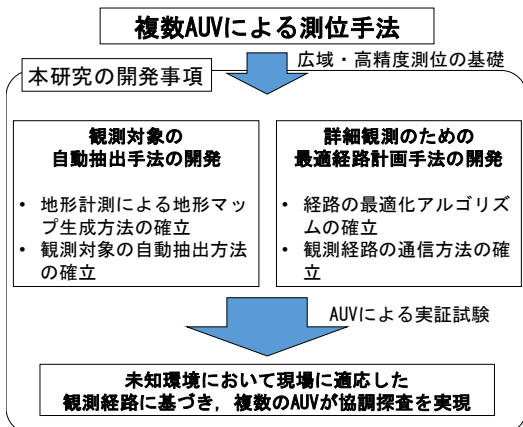


図 1. 研究の流れ。

最終的に海域試験を経て複数 AUV 運用の有効性も合わせて検討する。

(1) 海底地形計測による環境の把握と特徴的な観測対象の自動抽出方法の開発

AUV はライン状に距離を計測する音響センサにより、スキャンする形で海底地形を取得する。海底から高度を上げ、直線的に進むことで一度に広域にわたる海底地形をスキャンできる (図 2 の①)。計測結果から地形マップを作成し、地形の変化量を用いた最急降下法およびクラスタリングのアプローチにより地形をグループ化する。これにより海底地形の特徴的な領域を抽出する (図 2 の②)。

A. 海底地形マップ生成方法の開発

AUV に搭載した音響センサによる海底地形の取得、取得データの処理方法を開発する。所属研究室が保有する水槽 (長さ 8m, 幅 8m, 深さ 8m) において手法実装のための試験を行う。水槽底に海底地形を模擬する人工模型を設置する。音響センサを搭載した AUV を航行させ、水槽底の地形を計測する。これにより海底地形を計測し、AUV の推定位置と地形データから地形マップを生成する方法を開発する。

B. 特徴的な観測対象の自動抽出方法の開発

取得した地形マップから海底地形の変化を捉え、特徴的な観測対象を抽出するアルゴリズムを開発し、AUV に実装する。A で実施した水槽試験での地形データをもとに、対象を抽出するシミュレーションプログラムを作成し、動作の検証を行う。

(2) 抽出した観測対象を効率的かつ正確に可視化するための経路計画方法の開発

地形計測を行った AUV が、抽出した対象を詳細に観測するための経路を自動で生成する。詳細観測は高解像度の観測機器 (光学カメラ) を搭載した AUV が行う。経路を決める際、対象を全てカバーできること、海底に着底した AUV との測位が安定していることを考慮に入れ、最適化を行う。最適化した経路を AUV 間で通信し、共有する (図 2 の②)。 (1) の水槽試験での地形データをもとに、抽出した対象から最適な観測経路を導出する方法を検討する。生成した経路を従来方式と比較して、提案手法の有効性を検証する。

(3) 協調探査の実現 (図 2 の③)

(1) と (2) の項目で開発した方法を統合し、2 台の AUV に実装し、複数 AUV の協調による海底環境の可視化方法を確立する。水槽にて地形計測、特徴領域の抽出、観測経路の最適化、連携観測の一連の流れを検証する。検証の際、詳細観測を行う経路は適切かどうかについて観測精度および所要時間から評価を行う。

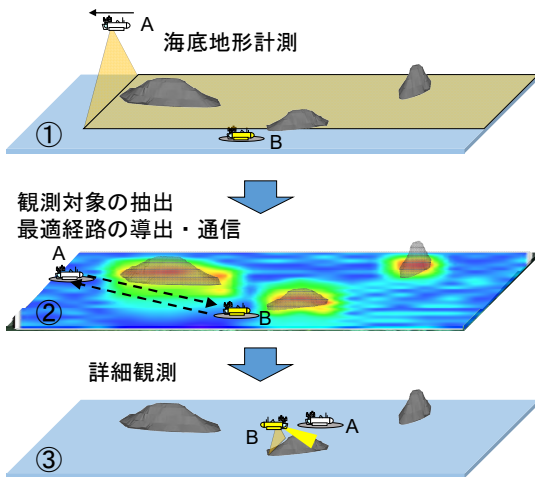


図 2. 提案手法.

#### 4. 研究成果

##### (1) 海底地形計測による特徴的な観測対象の自動抽出方法の結果

AUV “Tri-Dog 1” (以下 TD, 図 3) にライン状に距離を計測する音響センサ (Imagenex 社のマルチビーム 837B Delta T) を搭載し、高高度から地形を取得する試験を水槽にて実施した. 水槽に複数のターゲットを設置し (0.5 m × 0.35 m × 0.2 m, 図 4), 地形データを取得した. 地形マップとそれに基づく特徴エリアの抽出結果を図 5 に示す. 計測ノイズがあるものの, 観測ターゲットを設置した位置が特徴的であると判定されており, 提案手法によりターゲットを抽出できる結果が得られた.

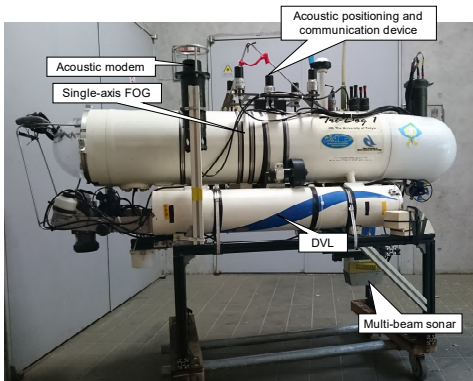


図 3. AUV “Tri-Dog 1” .

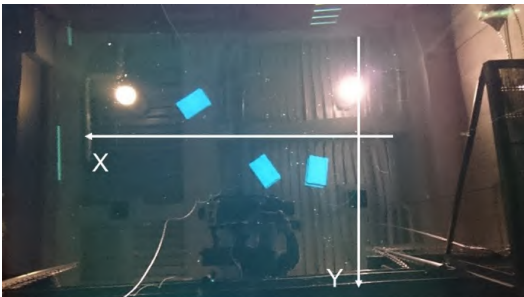


図 4. 水槽底に設置した観測用のターゲットと AUV の水平位置座標系.

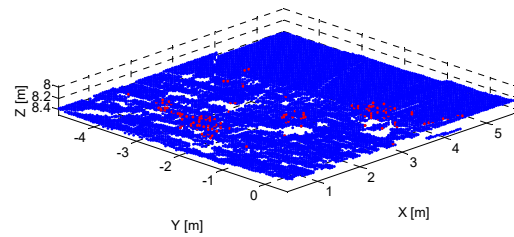


図 5. 地形マップとそれに基づく特徴エリア (赤点) の抽出結果.

##### (2) 抽出した観測対象を効率的かつ正確に可視化するための経路計画方法の結果

(1) の試験結果をもとに特徴点のクラスタリングおよび観測経路を生成するシミュレーションを実施した. 以下の前提条件に基づいている.

- 詳細観測を行う AUV X は原点で着底している.
- 高度 1.5 m で詳細観測を行う.
- 地形計測を行った TD は (5.0, 0.0) の位置にいる.
- AUV X が詳細観測を行う際, TD は着底して測位のランドマークとなる.

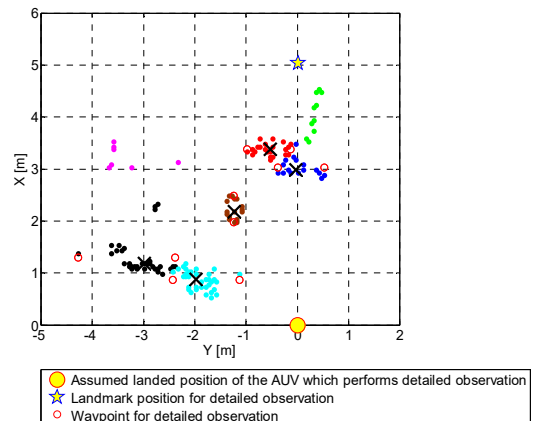


図 6. 詳細観測のための経路と着底位置.

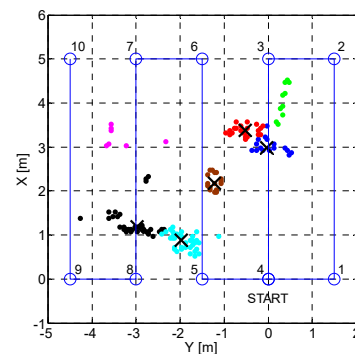


図 7. 従来の観測経路.

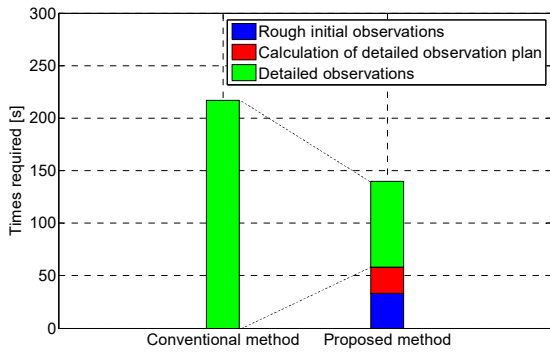


図 8. 従来手法と提案手法の所要時間.

図 6 にクラスタリングの結果とそれに基づく詳細観測経路 (赤丸) および TD の着底位置 (星印) を示す. AUV X がこの経路に基づいて観測を行う場合 (提案手法) とターゲットの位置が不明でくまなく観測を行う場合 (従来手法, 図 7) とで所要時間を比較した (図 8). 観測時間だけ比較した場合, 時間は 60%以上改善している. 地形計測と特徴エリア抽出および詳細観測経路の計算に要する時間を考慮しても, 35%以上短縮されており, 提案手法の有効性が確認できた.

### (3) 協調探査の試験結果

本手法を AUV TD と “Tri-TON” (以下 TT, 図 9) に実装した. 今回は  $1.0\text{ m} \times 1.0\text{ m} \times 1.0\text{ m}$  の観測用のターゲットを水槽底に設置して試験を実施した.

TT は原点で水槽底に着底して静止している. まず TD が高度  $3.0\text{ m}$  からマルチビームで地形計測を実施した (図 10). TD は地形計測終了後, 特徴エリアの抽出および詳細観測経路, 着底位置を計算した (図 11). 着底後, TD は詳細観測経路を TT に音響モデムで送信した. 最終的に TT は受信した経路に基づいて詳細観測を実施し, ターゲットのみを観測することに成功した (図 12). 図 13 に 2 台の推定航跡を示す. 本結果より, 事前の探査エリアの環境計測とそれに基づいて観測経路を導出することで海底観測を効率化することが可能であることが示された.

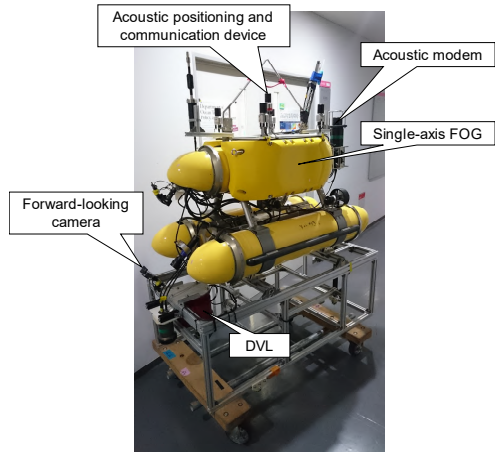


図 9. AUV “Tri-TON”.

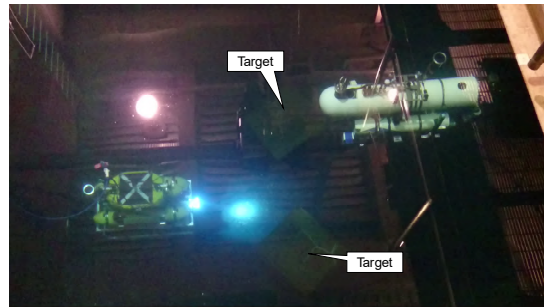


図 10. TD による地形計測の様子.

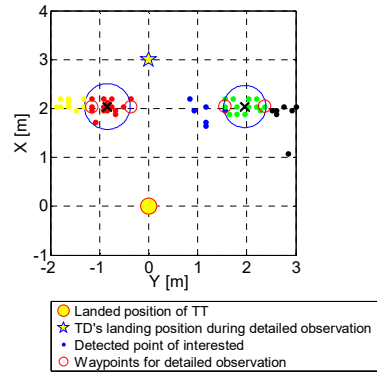


図 11. TD が生成した詳細観測のための経路および着底位置.

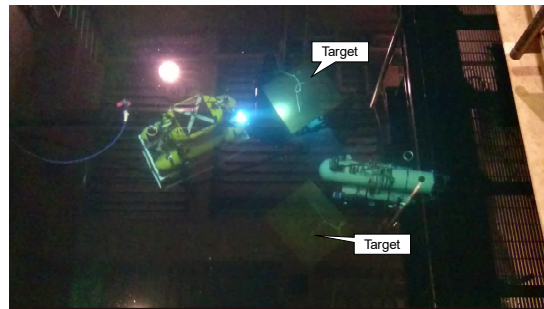


図 12. TT による詳細観測の様子.

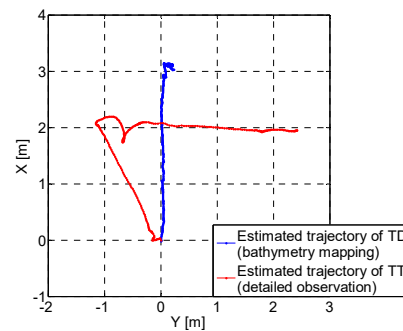


図 13. 2 台の推定航跡.

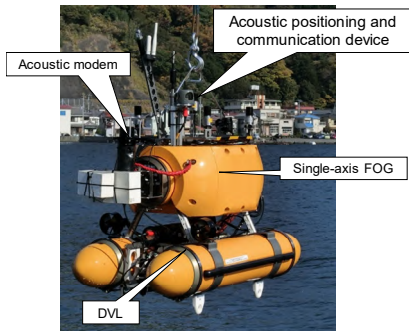


図 1 4. AUV “Tri-TON 2” .

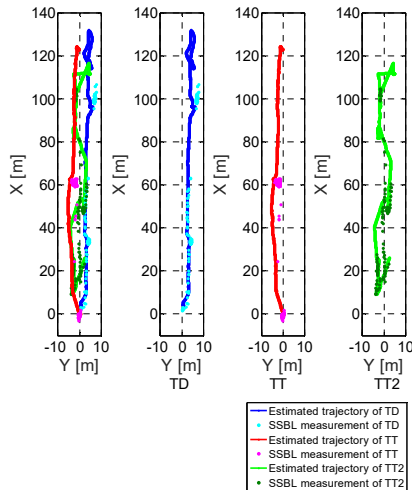


図 1 5. 3 台の推定航跡と SSBL による測位結果.

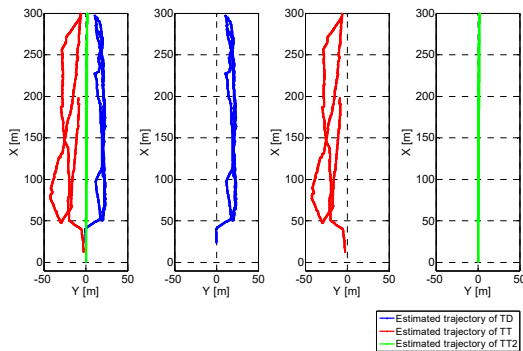


図 1 6. 3 台の推定航跡

#### (4) 複数 AUV による海域試験結果

複数 AUV による相互ランドマーク測位手法の拡張として 3 台の場合について開発を行った。1 台が海底に着底し、残りの 2 台が着底 AUV を測位基準として同時に観測行動を実施する。AUV TD, TT “Tri-TON 2” (以下 TT2, 図 1 4) に手法を実装し、海域試験を実施した。AUV の推定航跡と洋上から Super Short Base Line(SSBL)で計測した AUV の位置から推定精度を検証した。図 1 5 に 3 台の推定航跡と SSBL による測位結果を示す。結果、数 m 以内に誤差を維持しつつ自律航行できることを確認した。

さらに相互ランドマーク測位手法の改良

を行った。新しい手法では、単独で高精度な測位を実現できる AUV を音響測位基準とすることで、他の AUV も高精度な測位を実現する。海域にて上記 3 台の AUV による協調観測試験を実施し、高精度な航法センサを搭載した AUV (TT2) を基準に残りの AUV (TD と TT) も正確な測位を実現できることが示され、手法の有効性を示す結果が得られた。図 1 6 に 3 台の推定航跡を示す。

以上の結果より、複数の AUV が探査海域の環境計測に基づき、現場に適応した観測経路を全自動で構築し、実施する手法および複数 AUV のうちの 1 台が測位のランドマークとなる測位方式を組み合わせることで効率的かつ正確な海底観測を実現可能である。今後は、本手法をベースに複数 AUV が自律的に海底現場で観測計画を構築して、実施することで、海底観測をより効率的に進めることが可能になると考える。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 3 件)

- ① T. Matsuda, T. Maki, Y. Sato, and T. Sakamaki, T. Ura, “Alternating Landmark Navigation of Multiple AUVs for Wide Seafloor Survey: Field Experiment and Performance Verification,” *Journal of Field Robotics*, vol. 35, no. 3, pp. 359-395, 2018, 査読あり, DOI: 10.1002/rob.21742.
- ② T. Matsuda, T. Maki, Y. Sato, and T. Sakamaki, “Experimental Evaluation of Accuracy and Efficiency of Alternating Landmark Navigation by Multiple AUVs,” *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 43, no. 2, pp. 280-310, 2018, 査読あり, DOI: 10.1109/JOE.2018.2792579.
- ③ T. Maki, Y. Sato, T. Matsuda, K. Masuda, and T. Sakamaki, “Docking Method for a Hovering Type AUV Based on Acoustic and Optical Landmarks,” *Journal of Robotics and Mechatronics*, vol. 30, no. 1, pp. 55-64, 2018, 査読あり, DOI: 10.20965/jrm.2018.p0055.

[学会発表] (計 10 件)

- ① T. Matsuda, T. Maki, and M. Sangekar, “Intelligent Seafloor Survey by Cooperative Multiple AUVs Based on Real-time Analysis of Bathymetry Map,” *MTS/IEEE OCEANS17 Anchorage*, Sep. 2017.

- ② 松田匠未, 卷俊宏, 坂巻隆, “複数の自律型海中ロボット(AUV)による海底広域探査 -高性能 AUV を核とした AUV 群の測位手法-,” 第 35 回 日本ロボット学会 学術講演会, 3K3-02, Sep. 2017.
- ③ 瀧澤亮太, 松田匠未, 坂巻隆, 卷俊宏, “自律型海中ロボットの全自動着底手法 -姿勢評価に基づく安定性評価-,” 第 35 回 日本ロボット学会 学術講演会, 3K3-06, Sep. 2017.
- ④ T. Matsuda, T. Maki, Y. Sato, and T. Sakamaki, “Accurate and Efficient Survey of Seafloor by Multiple AUVs Using Alternating Landmark Navigation -Sea Experiments by three AUVs-,” MTS/IEEE OCEANS17 Aberdeen, Jun. 2017, DOI:10.1109/OCEANSE.2017.8084911.
- ⑤ A. Oshida, T. Maki, T. Matsuda, S. Okuma, M. Komazawa, T. Tachibana, R. Kubota, “Ocean Bottom Gravity Measurement Using a Landing AUV,” JpGU-AGU Joint Meeting 2017, May 2017.
- ⑥ 伊東高明, 松田匠未, 卷俊宏, “海底ステーション間を移動する AUV のナビゲーション手法 -自己位置の推定誤差に基づくベイズフィルタの切り替え-,” ロボティクス・メカトロニクス講演会’ 17, 2A2-G07, May 2017.
- ⑦ Y. Sato, T. Maki, K. Masuda, T. Matsuda, T. Sakamaki, “Autonomous Docking of Hovering Type AUV to Seafloor Charging Station based on acoustic and visual sensing,” IEEE OES Underwater Technology 2017, Feb. 2017, DOI: 10.1109/UT.2017.7890282.
- ⑧ T. Matsuda, T. Maki, Y. Sato, and T. Sakamaki, “Sea Experiments and Tank Tests of the Alternating Landmark Navigation by Multiple AUVs -Toward Accurate and Efficient Survey of Seafloor by AUVs-,” IEEE OES AUV 2016, Nov. 2016, DOI: 10.1109/AUV.2016.7778674.
- ⑨ 岡田宣義, 松田匠未, 佐藤芳紀, 水島隼人, 坂巻隆, 卷俊宏, “環境変化にロバストなホバリング型 AUV のドッキング手法,” ロボティクス・メカトロニクス講演会 ’ 16, 1A1-17b1, Jun. 2016.
- ⑩ 卷俊宏, 佐藤芳紀, 水島隼人, 松田匠未, 増田殊大, 岡田宣義, 坂巻隆, “海底ステーションを基地とするホバリング型 AUV の展開手法 -海底環境の長期モニタリングに向けて-,” ロボティクス・メカトロニクス講演会 ’ 16, 1A1-17b4, Jun. 2016.

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 1 件)

名称: 重力測定装置

発明者: 押田淳, 卷俊宏, 松田匠未, 大熊茂雄, 駒澤正夫

権利者: 川崎地質株式会社, 国立大学法人東京大学, 国立研究開発法人産業技術総合研究所

種類: 特許

番号: 特願 2016-166497

出願年月日: 2016 年 8 月 29 日

国内外の別: 国内

〔その他〕

ホームページ等

<http://makilab.iis.u-tokyo.ac.jp/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

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: 8 0 7 5 9 8 6 1