

複雑な海底環境の画像観測用 AUV 「Tri-TON」 の開発

巻 俊宏	東京大学生産技術研究所
松田 匠未	東京大学新領域創成科学研究科
久米 絢佳	東京大学新領域創成科学研究科
佐藤 芳紀	東京大学生産技術研究所
坂巻 隆	東京大学生産技術研究所
浦 環	東京大学生産技術研究所

Development of the AUV Tri-TON for Imaging Rough Seafloor

Toshihiro MAKI	Institute of Industrial Science, The University of Tokyo E-mail: maki@iis.u-tokyo.ac.jp
Takumi MATSUDA	Graduate School of Frontier Sciences, The University of Tokyo
Ayaka KUME	Graduate School of Frontier Sciences, The University of Tokyo
Yoshiki SATO	Institute of Industrial Science, The University of Tokyo
Takashi SAKAMAKI	Institute of Industrial Science, The University of Tokyo
Tamaki URA	Institute of Industrial Science, The University of Tokyo

Abstract

AUV Tri-TON is a hovering type autonomous underwater vehicle developed by the University of Tokyo, launched in 2011. The vehicle was constructed under the governmental project to develop instruments to estimate ore reserves in underwater hydrothermal deposits. The mission of the vehicle is to obtain dense, large-area 3D image of hydrothermal vent fields, in collaboration with a seafloor station. Although the vehicle is not equipped with an inertial navigation system (INS), the vehicle can estimate its position in real-time with a precision enough for rough photo-mosaicing, owing to the mutual acoustic positioning with the station. The vehicle has two suites of imaging instruments looking forward and downward directions in order to image whole surface of bumpy hydrothermal vent fields. This paper also reports experimental results of the vehicle at a test pool and Kagoshima Bay in Japan.

1 はじめに

海底熱水地帯は我が国の EEZ 内に多く存在することが確認されている。その周辺には海底熱水鉱床と呼ばれる金属鉱床が生成されることから我が国の貴重な金属資源として注目されており、現在、資源量の推定、開発による環境影響評価、採掘方法の検討など、開発に向けた具体的な取り組みが急ピッチで進められている¹⁾。

本稿では AUV Tri-TON について紹介するとともに、水槽実験および実海域実験の結果について報告する。AUV Tri-Ton は海底熱水鉱床の開発に資するべく、海底熱水地帯のような複雑な海底環境の表面を 3 次元画像化するために開発されたホバリング型の自律型海中ロボット (Autonomous Underwater Vehicle, AUV) である。本 AUV は文部科学省「海洋資源の利用促進に向けた基盤ツール開発プログラム」の平成 21 年度採択課題「海底設置ステーションと自律探査プローブによる海底環境の 3 次元画像マッピング」において、自律探査プローブの試作機として開発された。本課題においては、プローブ (小型のホバリング型 AUV) と海底ステーションからなるマルチプラットフォームシステムにより、海底熱水鉱床を 3

次元画像化する。プローブはチムニーを含む海底熱水地帯を約 2 メートルという低高度で密にスキャンし、ステーションから 100 メートル以内の範囲の写真撮影並びに地形計測を行う。そしてステーションを基準とする音響測位ならびにセンサフュージョンにより取得データの高精度な位置決めを行い、観測範囲全域を 3 次元画像化する。これにより、資源量把握や環境影響評価に役立つと期待される^{2,3)}。

AUV 技術は近年急速に発達しており、海中の広域探査を実現する切り札として注目されている。今日、AUV は推進効率に優れた「クルーズ型」と呼ばれるタイプを中心に資源探査や防衛の分野で実用化しており、氷海域や熱水地帯の観測といった学術研究にも実績を挙げつつある。例えばノルウェーが開発した HUGIN シリーズは海底石油資源探査に大規模に活用され、2004 年までに延べ 18,000km 以上の距離を観測している⁴⁾。また、局地での複雑な観測活動に適した「ホバリング型」や、低消費エネルギーで長距離・長時間運用が可能な「グライダー型」と呼ばれるタイプも実用化されつつある。特にクルーズ型とグライダー型は量産されており、2012 年現在、複数のメーカーが販売している。我が国では JAMSTEC

のクルーズ型 AUV の「うらしま」⁵⁾が平成 21 年度より公募利用を開始したほか、KDDI 研究所が開発したクルーズ型 AUV 「Aqua Explorer 2」⁶⁾や東京大学生産技術研究所のクルーズ型 AUV 「r2D4」⁷⁾、ホバリング型 AUV 「Tuna-Sand」⁸⁾等が活躍している。

2 AUV Tri-TON

AUV Tri-TON (トライトン) は 2011 年に進水したホバリング型の自律型海中ロボットである。その最大の特徴はカメラ、シートレーザー、フラッシュからなる撮影装置を前方、下方にそれぞれ搭載していることである。これにより、海底熱水鉱床の鉛直にそびえ立つチムニーを平坦な海底面と同じクオリティで撮影することが可能になる。また、筆者らが開発した ALOC (Acoustic Localization and Communication) と呼ばれる音響測位通信装置により、あらかじめ設置しておく海底ステーションを基準として自己位置を推定することができる^{2, 3)}。

2.1 全体構成

Tri-TON の写真を Fig. 1 に、主要スペックを Table. 1 に、一般配置図を Fig. 2 に示す。本機は 3 本のアルミ合金製圧力容器から構成されており、上の 1 本には電子機器類が、下の 2 本には電池が収納されている。上の容器の周囲には浮力材(シntaxチックフォーム)が配されている。このように重心と浮心の距離を離すことで、画像観測時に重要な高い姿勢安定性を確保している。推進器としては、100W の DC モータによるスラストをサージ方向とヒープ方向に各 2 基、スウェイ方向に 1 基の合計 5 基搭載している。これにより、サージ、スウェイ、ヒープ、ヨーの 4 自由度を制御する。

通信機器としては、無線 LAN と音響 (ALOC) の 2 方式を備えている。陸上および水面では、無線 LAN により観測データの移動やプログラムの修正、遠隔操縦等をスムーズに行うことができる。一方潜航中は無線 LAN が使えないため、ALOC のデータ通信機能が用いられる。ただし無線 LAN と比べるとデータレートが非常に低く、通信も不安定になるため、単純なステータス情報や、「ミッション中止」といった単純なコマンドをやりとりするのみである。

ナビゲーション用のセンサとしては、対地速度を計測するドップラ式対地速度計 (Doppler Velocity Log, DVL)、方位角速度を計る光ファイバジャイロ (Fiber Optic Gyro, FOG)、水深を測る圧力計、姿勢センサ等を搭載している。姿勢センサおよび DVL には磁気コンパスが付属している。この他、障害物探知用にスキヤニングソナーを搭載している。また、実海域での運用時には、安全対策としてフラッシュとトランスポンダを装備する。

システム構成を Fig. 3 に示す。本機は Main、Vision という 2 台の計算機によって管理されている。両者は LAN によって接続されており、Main はナビゲーション用の全てのセンサ類や IO の管理をするとともに、AUV の制御全般を担当する。Vision は撮影された画像の保存のほか、画像処理関連のタスクを担当する。

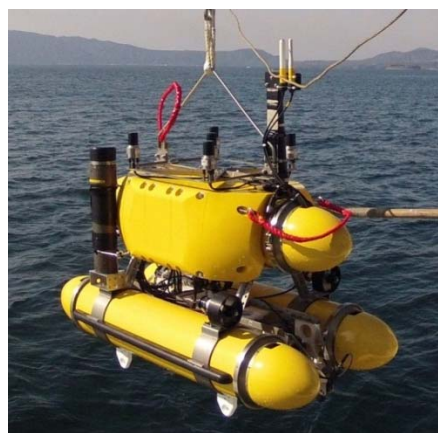


Fig. 1 AUV Tri-TON (at Kagoshima Bay)

Table 1 Specifications of Tri-TON.

Vehicle	
Size	1.40 m (L) x 1.33 m (H) x 0.76 m (W)
Mass	230 kg
Max. speed	0.5 m/s
Max. depth	800 m
Duration	8 hours
Thruster	100 W thruster x 5
Battery	Lilon 26.6 V 25 Ah x 4
Communication	Wireless LAN (in air), ALOC (underwater)
CPU (Main)	Intel Atom Z530
CPU (Vision)	Intel Atom Z530
OS	Microsoft Windows XP
Navigational Instruments	
Ground velocity	Teledyne RDI Navigator 1200 kHz (DVL)
Depth	Mensor DPT6000
Roll & Pitch	OcesnServer OS5000
Heading rate	JAE JG-35FD (FOG)
Obstacle search	Tritex Micron (Scanning sonar)
Position	GPS (in air), ALOC (underwater)
Imaging Instruments	
Camera	Lumenera Lm165 x 2
Flash	Morris Hikaru-komachi 6 x 2
Sheet laser	Global laser GreenLyte-MV Excel x 2

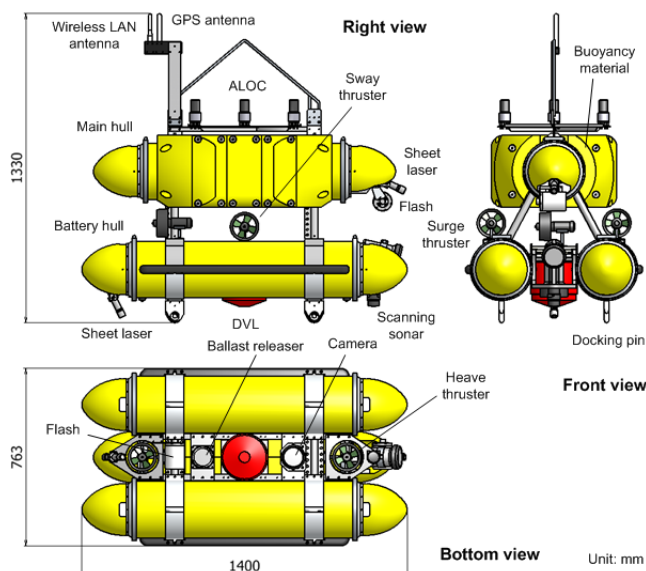


Fig. 2 General arrangement of Tri-TON.

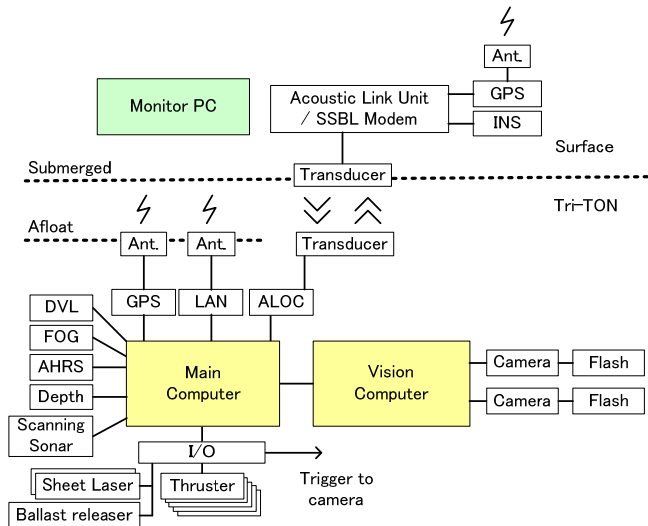


Fig. 3 Schematic drawing of Tri-TON.

Table 2. Specifications of ALOC

Positioning	SBL, Chirp (22-28 kHz)
Communication	Multi-value FSK, 25kHz 100bps

2.2 ALOC

ALOCは1台の送波器と3~4台の受波器、そして制御装置から構成される²⁾。主要スペックをTable 2に示す。ALOCはSBL(Short Base Line)の原理により他の任意のノードとの相対位置関係を測るほか、他のノードから呼ばれた場合は自機から見た相手の方向を求め、さらに音響通信機能によりその情報を相手に送ることができる。このため、ALOCをAUVと海底ステーションに装備することで、AUVは通常の音響測位によって得られる「自機から見た相手の位置」に加えて「相手から見た自機の方角」を知ることができ、ロバストな位置推定が可能となる。また、ALOCもしくは互換性のある音響機器を母船に装備することで、AUVの潜航中の位置確認やステータス確認を行うこともできる。Tri-TONにおいては、送受波器は浮力材の上部に搭載されており、中央の送波器を囲むように受波器が配置されている。

2.2 撮影装置

Figs. 4,5に示すように、本機にはシートレーザー、カメラ、フラッシュからなる撮影システムがそれぞれ前方と下方に向けて設置されている。シートレーザーとカメラで光切断法⁹⁾による地形計測を行い、フラッシュとカメラで通常の写真撮影を行う。そして両者の計測結果を融合することで3次元の画像観測を実現する。シートレーザーは海中で透過性の高い緑色(波長532nm)、出力50mWのものを採用している。有効距離は環境に大きく依存するが、鹿児島湾若尊カルデラの熱水地帯において、2mの距離で計測した実績がある⁹⁾。距離の分解能はカメラの性能やレーザーとの位置関係、計測距離等によって大きく異なるが、本機下向きに設置された構成においては、距離1.5mで5mm、2mで9mm程度である。カメラは2メガピクセルの産業用USBカメラを用いる。フラッシュは市販の外付けフラッシュを分解し、アクリル容器に入れて用いる。

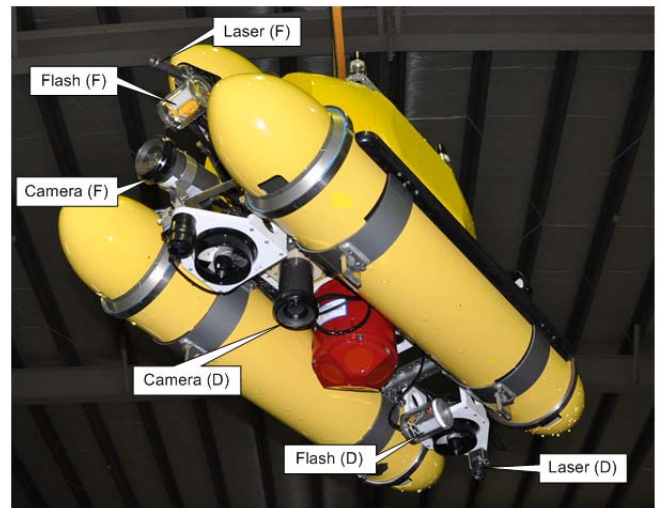


Fig. 4 Imaging instruments. F: Forward-looking, D: Downward-looking.

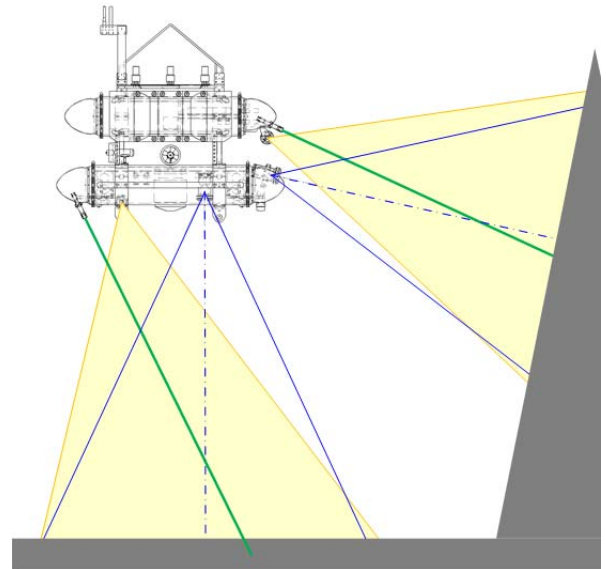


Fig. 5 Arrangement of the imaging instruments (Blue: camera, Green: sheet laser, Yellow: Flash)

カメラは動画対応であるが計算機の性能に制限があるため静止画とし、毎秒1枚撮影している。このうち5~10回に一度フラッシュにより通常の写真撮影を行い、それ以外は光切断用にシートレーザーのみ光らせた状態で撮影する。マリンスノーの影響を抑えるため、カメラとフラッシュは出来る限り離して設置している。撮影条件は環境によるが、基本的には海底からの高度2m、前進速度0.1m/sとしている。

2.3 測位アルゴリズム

AUVの状態は3次元空間上の位置と姿勢であるから、合計6パラメータ存在する。このうち傾斜角(ロール、ピッチ)および深度については高精度な直接計測が可能である。一方、水平位置 x , y 及び方位 ψ については直接計測が難しい。慣性航法装置(Inertial Navigation System, INS)と音響測位の組み合わせ等を使えば可能であるが、高コストであるほか、本機の目的である画像マッピングに必要な精度を安定して実現す

ることは難しい。海底の広範囲を漏れや過度な重複なく撮影するためには、測位誤差は最大でも写真一枚当たりの撮影範囲（約2m）の半分以下に抑えることが望ましい。

そこで本機は海底ステーションとの相互音響測位をベースとし、さらにパーティクルフィルタ¹⁰⁾によりDVLとFOGによる速度計測結果と融合することで、上記の精度を実現する。パーティクルフィルタはモンテカルロ法によるベイズフィルタの実装である。ベイズフィルタの実装形式としてはカルマンフィルタが有名であるが、カルマンフィルタは正規分布の仮定のもとで解析的に推定するのに対し、パーティクルフィルタは多数のサンプルによって近似的に推定する。このため複数の山を持つような複雑な確率分布を扱うこともできる。また実装も容易であることから、計算機の進歩とあいまって、移動ロボットの状態推定手法として近年急速に普及しつつある。なお、短時間であればDVLとFOGのみによる推定、いわゆるデットレコニングでも十分な場合がある。この場合も全く設定を変える必要が無いのがパーティクルフィルタのもう一つの利点である。

本手法の問題点としては、絶対座標系（緯度経度など）における状態を直接推定出来ないことが挙げられる。ただし、ステーションの絶対座標がわかっているれば、後処理によってマッピング範囲を絶対座標系に変換することができるほか、大まかな情報でよければ、投入時にGPSで計測した値、水面からの音響測位による計測値等から推定できる。

本機においては、サンプル数500、更新周期0.2sとしてMain計算機によって処理されている。更新手順をFig. 6に示す。時刻 t におけるサンプル集合 S'_t は予測フェイズ(prediction)、観測フェイズ(observation)という2段階の処理を経て更新される。予測フェイズにおいては、一つ前の状態および計測された状態変化量（水平速度 \hat{v} および方位角速度 $\hat{\omega}$ ）から現在の状態を予測する。観測フェイズにおいては、海底ステーションとの相互測位結果（AUV→ステーションの方向 $\hat{\theta}^{AS}$ 、ステーション→AUVの方向 $\hat{\theta}^{SA}$ 、両者間の距離 \hat{d} ）に基づき予測を修正する。一般的には両フェイズは交互に行われるが、海底ステーションとの測位にはある程度時間がかかるため、海底ステーションへ信号送信後、ステーションから返信が戻ってくるまでは予測フェイズのみを行い、相互測位に成功した場合のみ観測フェイズを行うようにしている。本手法の詳細については文献^{3, 11)}を参照のこと。

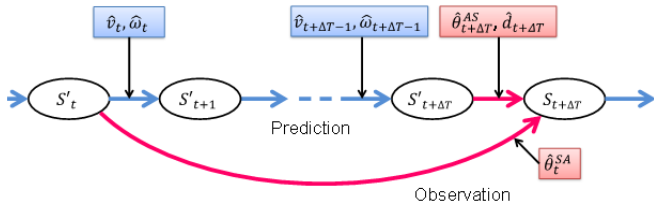


Fig. 6 The procedure for updating the AUV state. The AUV is assumed to ping at time t and receives the reply from the SS at time $t+\Delta T$.

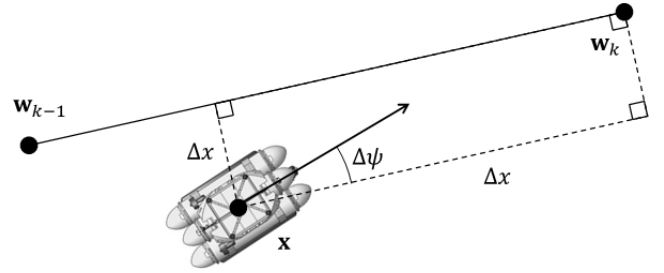


Fig. 7 Waypoint following

2.4 制御アルゴリズム

Tri-TON は自己状態のリアルタイム推定結果に基づき、あらかじめ指定したウェイポイントを順番に辿るように制御される。ウェイポイントは水平位置と上下の位置を含み、方位を含めることも可能である。鉛直方向の位置はヒープスラストにより、水平方向の位置と方位はサージ・スウェイスラストによってそれぞれ独立に制御される。

鉛直方向の制御は深度制御、高度制御の2種類が実装されており、ウェイポイント毎に切り替えることができる。海底観測中は海底から一定の距離を保つため基本的には高度制御としている。ただし高度制御を行うにはDVLによって安定して高度計測できることが条件となるため、高高度（約20m以上）であったり、海底の凹凸が激しいなどDVLの計測値が安定しない場合には深度制御とするべきである。

水平方向の制御は、ウェイポイント間を結ぶ直線に沿って移動することを基本とする。Fig. 7は k 番目のウェイポイント w_k を目指しているときの模式図である。この時、サージ速度、スウェイ速度、ヨー角速度の制御目標値 $u_{ref}, v_{ref}, \omega_{ref}$ はウェイポイント間を結ぶ線分とのオフセット $\Delta x, \Delta y, \Delta \psi$ によりそれぞれ以下の式を用いて決定する。

$$u_{ref} = \begin{cases} g(\Delta x, a_x, b_x) & \text{if } |\Delta \psi| < \Delta \psi_{max} \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (1)$$

$$v_{ref} = \begin{cases} g(\Delta y, a_y, b_y) & \text{if } |\Delta \psi| < \Delta \psi_{max} \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (2)$$

$$\omega_{ref} = g(\Delta \psi, a_\psi, b_\psi) \quad (3)$$

ここで、 $g(x, a, b)$ は傾き a で $\pm b$ の値域をもつ比例関数

$$g(x, a, b) = \begin{cases} b & (b/a < x) \\ ax & (-b/a \leq x \leq b/a) \\ -b & (x < -b/a) \end{cases} \quad (4)$$

である。ただし $a > 0, b > 0$ とする。即ち、方位オフセット $\Delta \psi$ が所定の閾値 $\Delta \psi_{max}$ を超える場合は水平方向の移動はせず、方位のみを修正する。そして方位誤差が $\Delta \psi_{max}$ 以内の場合のみ、位置のオフセットに応じて水平移動を行う。

ウェイポイントへの到達条件は、本機からウェイポイントまでの距離が所定のウェイポイント半径 r_{way} より小さくなった場合、即ち

$$|x - w_k| < r_{way} \quad (5)$$

とする。下位の制御はPID制御とフィードフォワード制御の組み合わせによって行われる。水平速度はDVL、方位角速度はFOGの計測値を用いる。

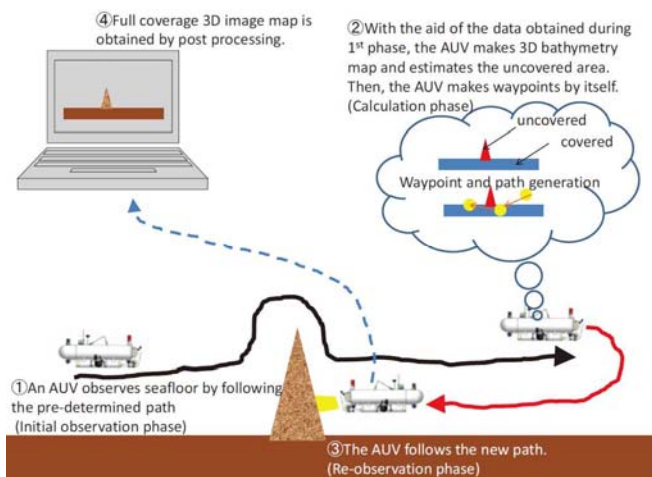


Fig. 8 AUV navigation method for imaging rough terrain, based on real-time quality evaluation and path-planning.



Fig. 9 Experimental setup.

3 水槽試験

本節では、AUV Tri-TON のパフォーマンスを示す一例として、2011 年 12 月に実施された水槽試験について紹介する。本実験の詳細および実装した観測戦略の詳細については文献¹²⁾を参照のこと。

3.1 概要

画像観測用の AUV は一般的に、あらかじめ決められた経路を通りながら下向きカメラによって海底を撮影する。その結果、熱水鉱床のような複雑な海底ではオクルージョンやカメラとの相対位置関係が悪いために撮影できない箇所が生じることがあった¹³⁾。そこで、本研究では自律型海中ロボット (AUV) によりこのような環境の高被覆率な観測を実現するために、観測中リアルタイムに撮影具合を評価し、それに基づき再観測経路を生成する手法を提案する。

提案手法による観測の流れを Fig. 8 に示す。まず、あらかじめ決められた経路を通って撮影と地形計測を行う (①初期観測)。撮影終了後、観測結果から海底地形の 3 次元メッシュを作成し AUV との位置関係を元にそれぞれのメッシュが撮影できたかどうかを判別する。さらに未撮影メッシュを撮影する経路を生成する (②撮影度判定・経路生成)。その後、生成された経路に沿って再観測を行う (③再観測)。そして観測終了後、後処理にて海底の 3 次元画像を復元する (④データ処理)。

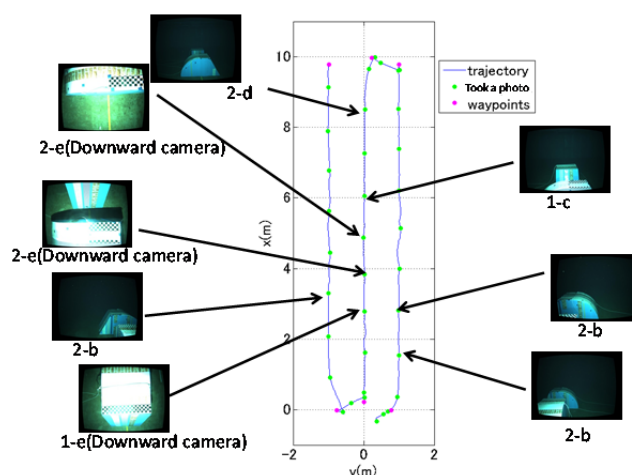


Fig. 10 Result of the initial observation phase. Blue: estimated trajectory of the vehicle. The pictures were taken by the vehicle at the indicated location.

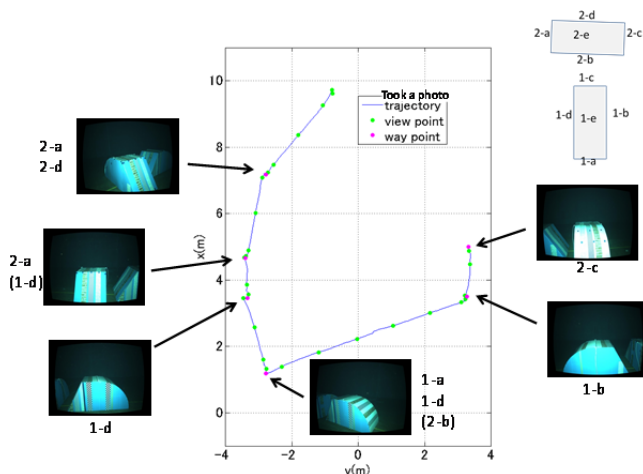


Fig. 11 Result of the re-observation phase. Blue: estimated trajectory of the vehicle. The pictures were taken by the vehicle at the indicated location.

3.2 実験結果

提案手法は AUV Tri-TON に実装され、2011 年 12 月に東京大学生産技術研究所海洋工学水槽において試験が行われた。Fig. 9 に示すように、深さ 5m の水槽の底に撮影用のターゲット (幅 1m, 長さ 2m, 高さ 1m) を 2 台設置し、その上を Tri-TON によって画像マッピングさせた。Fig. 10 に初期観測フェーズにおける Tri-TON の推定経路と撮影写真の一部を示す。第一観測フェーズは 363 秒で終了した。ルートは単純な往復経路としたため、ターゲットの一部、特に側面がうまく撮影できなかった。Fig. 11 に再観測フェーズの結果を示す。このルートは初期観測の結果から Tri-TON が全自動で求めたものである。初期観測で撮影できなかったターゲットの側面を撮影できたことがわかる。このときの撮影は全て前方カメラによる。計算フェーズ (撮影度判定・経路生成) に要した時間は 50 秒であった。ちなみに Tri-TON の測位は海底ステーションなし、即ち完全なドットレコニングで行われた。Fig. 12 に本実験によって得られた 3 次元画像を示す。水槽の底とターゲットの側面が均質に、漏れなく観測されていることが

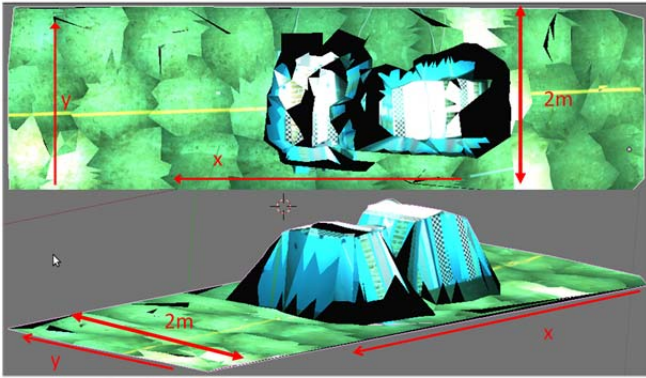


Fig. 12 3D image of the target.

Table 3. Dive log of Tri-TON (NT-12-08)

Dive No.	Date	Duration [h:mm]	Depth [m]
1	2012/4/4	1:07	198
2	2012/4/6	0:20	↓
3	2012/4/6	0:58	↓
4	2012/4/6	0:28	↓
5	2012/4/8	1:01	↓
6	2012/4/8	1:24	↓
7	2012/4/8	1:26	↓

わかる。以上のように、本水槽実験により、Tri-TON の AUV としての基本的な性能を確認するとともに、前方と下方に観測機器を搭載することの利点を確認することができた。

4 鹿児島湾への展開

水槽試験の成功を受け、2012 年 4 月に鹿児島湾にて実海域試験が行われた。海域は海底熱水地帯で知られる鹿児島湾奥部、若尊カルデラ¹⁴⁾の水深約 200m の地点である。3 日間行われた試験において Tri-TON は Table 3 に示すように延べ 7 回、7 時間弱の全自動観測を実施し、あらかじめ設置しておいた海底ステーションを基準とする相対測位を行いつつ、熱水チムニーを含む海底環境を撮影することに成功した。Figs. 13-14 に撮影された画像の例を示す。両者とも通称「大福山と呼ばれる」熱水チムニーである。写真には手動による色補正を施している。

第 7 潜航の結果を Fig. 13 および 14 に示す。Tri-TON は水深約 198m の海底までまっすぐ降下したのち、ALOC によって海底ステーションを発見した。その後は直ちにステーションを基準とする相対座標系（観測座標系）に移行し、同座標系上に設定されたルートに沿って高度 1.6m で移動しつつ、海底環境の観測を実施した。ステーションを基準とする測位の詳細については文献³⁾を参照のこと。Fig. 15 は観測中リアルタイムに推定された Tri-TON の位置と、下カメラの撮影範囲を観測座標系上に示したものである。ウェイポイントは、 $(x, y) = (-40, -25)$ を中心とする 10m 程度の範囲を集中的に観測するように設定した。Fig. 16 はこの範囲の観測結果から作成された画像モザイクである。各画像の位置決めには Tri-TON が観測中リアルタイムに推定した情報のみを用いた。一部の画像が欠けているのは、フラッシュの発行不良および水中ケーブルの不具合があったためである。



Fig. 13 Hydrothermal chimney “Daifuku-Yama” taken by the forward looking camera of Tri-TON (NT12-08 dive 6).

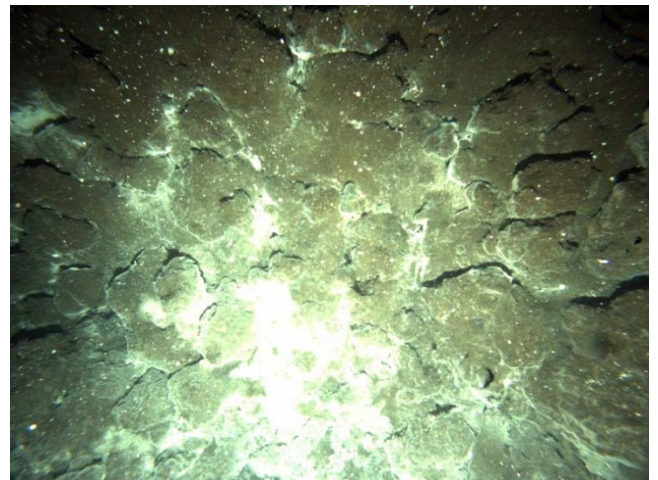


Fig. 14 Hydrothermal chimney “Daifuku-Yama” taken by the downward looking camera of Tri-TON (NT12-08 dive 3).

5 まとめ

本稿では海底熱水地帯のような複雑な海底環境を 3 次元画像化するために開発された AUV Tri-TON について説明した。また、そのパフォーマンスを示す例として 2011 年に 12 月に行われた水槽実験および、2012 年 4 月に鹿児島湾で行われた実海域実験について紹介した。今後は、より複雑な海域へ展開すると共に、3 次元画像化のためのデータ処理手法の開発に取り組む予定である。また、海底ステーションとの連携による長期展開に向けては、自律ドッキング手法、非接触充電手法等の開発が課題となる。

謝辞

本研究は文部科学省「海洋資源の利用促進に向けた基盤ツール開発プログラム」による支援を受けている。海域実験は「なつしま」NT-12-08 次研究航海によって行われたものであり、中村義行船長、山中寿朗主席研究員（岡山大学）、矢野裕亮氏（株式会社博洋堂）を始めとする多くの方々に支援いただいた。Tri-TON の設計・製作については株式会社小野電機製作所殿に支援いただいた。ここに深く感謝の意を表す。

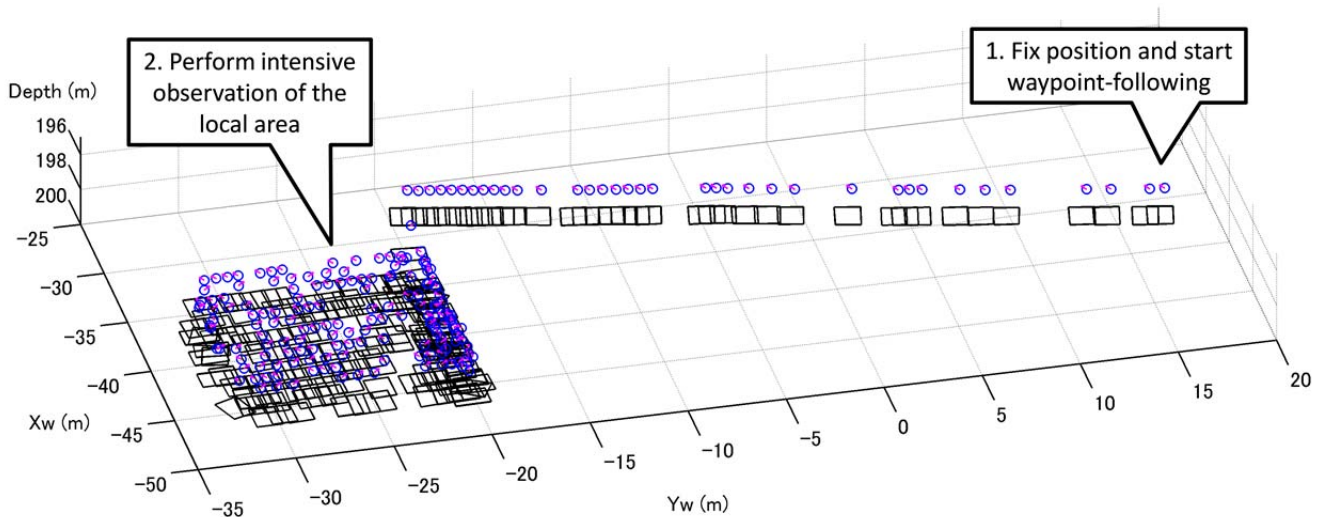


Fig. 15 Estimated location of the images obtained by the downward-looking camera of Tri-TON at dive 7. The reference frame is based on the seafloor station. The position of Tri-TON is also shown by a blue circle (center) and a magenta dot (downward-looking camera).

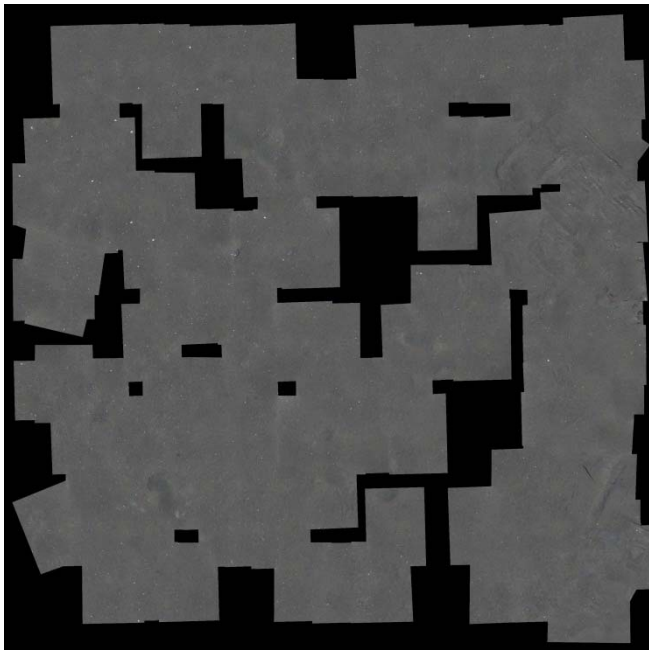


Fig. 15 Photomosaic of the seafloor (12 x 12m)

参考文献

- 1) 海底資源研究の最前線 現状及び今後の動向 講演要旨集, 海洋研究開発機構, 2011.
- 2) 巻俊宏ほか: 海底熱水地帯の3次元画像マッピングシステムの開発, 第22回海洋工学シンポジウム講演要旨集, OES22-044, 2011.
- 3) 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講演要旨集, OES23-038, 2012.
- 4) Marthiniussen, R., et al. HUGIN-AUV concept and operational experiences to date, OCEANS '04. MTS/IEEE TECHNO-OCEAN '04, 2004.
- 5) Hyakudome, T., et al. Autonomous Underwater Vehicle for surveying deep ocean, IEEE International Conference on Industrial Technology 2009, 2009.
- 6) 浅川賢一: 海底ケーブル調査用自律型水中ロボット AQUA EXPLORER 2, 生産研究, 52(7), pp. 297-303, 2000.
- 7) 浦環: 自律型海中ロボット r2D4 の製作と佐渡沖および黒島海丘海底観測, 日本ロボット学会誌, 22(6), pp. 709-713, 2004.
- 8) 中谷武志ほか: 自律型海中ロボット「TUNA-SAND」, 日本マリンエンジニアリング学会誌, 43(4), pp. 523-526, 2008.
- 9) 久米絢佳ほか: 海底の地形及び画像情報によるサツマハオリムシ領域の自動抽出手法, ROBOMECH2010, 1P1-D14, 2010.
- 10) Thrun, S., et al. Probabilistic Robotics, MIT Press, 2005.
- 11) T. Maki et al., Navigation method for underwater vehicles based on mutual acoustical positioning with a single seafloor station, J. Oceanic Engineering, 2012. (in press)
- 12) 久米絢佳, 巻俊宏, 坂巻隆, 浦環, “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,” ロボティクス・メカトロニクス講演会(ROBOMECH) '12, 2A2-G07, 2012.
- 13) 中谷武志, 浦環, 坂巻隆, 伊藤弘志, 南宏樹, 正村達也, “AUV TUNA-SAND による黒島海丘メタン湧出域の海底画像マッピング,” 海洋調査技術学会第22回研究成果発表会講演要旨集, pp.24-25, 2010
- 14) Ishibashi, J., et al. Marine shallow-water hydrothermal activity and mineralization at the Wakamiko crater in Kagoshima bay, south Kyushu, Japan, J. Volcanology and Geothermal Research, 173(1-2), pp.84-98, 2008.