

自律型水中ロボットによる鹿児島湾たぎり噴気帯の 3次元画像マッピング⁺

巻 俊宏*, 近藤 逸人**, 浦 環*, 坂巻 隆*, 水島 隼人***, 柳澤 政生***

3 D Photo Mosaicing of Tagiri Shallow Vent Field by an Autonomous Underwater Vehicle⁺

Toshihiro Maki*, Hayato Kondo**, Tamaki Ura*, Takashi Sakamaki*, Hayato Mizushima*** and Masao Yanagisawa***

ABSTRACT

Although underwater visual observation is an ideal method for detailed survey of seafloors, it is currently a costly process that requires the use of Remotely Operated Vehicles (ROVs) or Human Occupied Vehicles (HOVs), and can cover only a limited area. This paper proposes an innovative method to navigate an autonomous underwater vehicle (AUV) to create both 2 D and 3 D photo mosaics of seafloors with high positioning accuracy without using any vision-based matching.

The vehicle finds vertical pole-like acoustic reflectors to use as positioning landmarks using a profiling sonar based on a SLAM (Simultaneous Localization And Mapping) technique. These reflectors can be either artificial or natural objects, and so the method can be applied to shallow vent fields where conventional acoustic positioning is difficult, since bubble plumes can also be used as landmarks as well as artificial reflectors. Path-planning is performed in real-time based on the positions and types of landmarks so as to navigate safely and stably using landmarks of different types (artificial reflector or bubble plume) found at arbitrary times and locations. Terrain tracker switches control reference between depth and altitude from the seafloor based on a local map of hazardous area created in real-time using onboard perceptual sensors, in order to follow rugged terrains at an altitude of 1 to 2 meters, as this range is ideal for visual observation.

The method was implemented in the AUV Tri-Dog 1 and experiments were carried out at Tagiri vent field, Kagoshima Bay in Japan. The AUV succeeded in fully autonomous observation for more than 160 minutes to create a photo mosaic with an area larger than 600 square meters, which revealed the spatial distribution of detailed features such as tube-worm colonies, bubble plumes and bacteria mats. A fine bathymetry of the same area was also created using a light-section ranging system mounted on the vehicle. Finally a 3 D representation of the environment was created by merging the visual and bathymetry data.

+ 2007年8月31日受付
2008年1月29日受理
* 東京大学生産技術研究所 〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1
Institute of Industrial Science, The University of Tokyo
** 東京海洋大学 〒135-8533 東京都江東区越中島2-1-6
Tokyo University of Marine Science and Technology
*** 早稲田大学 〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1
Waseda University

1. はじめに

2007年3月、筆者らは自律型水中ロボット (Autonomous Underwater Vehicle, AUV) 「トライドッグ1号」を鹿児島湾たぎり噴気帯に展開し、ハオリムシ群集やバクテリアマット等を含む海底面を約600平方mにわたって3次的に画像マッピングすることに成功した。観測場所は図1に示す若尊カルデラ東部の海丘東斜面、水深100メートル程度の領域である。本領域はハオリムシサイトと呼ばれ、活発な噴気活動に加えて1993年にサツマハオリムシを中心とする化学合成生物群集が確認されるなど学術的関心の高い領域である (橋本ほか, 1993)。遠隔操縦ロボット (Remotely Operated Vehicle, ROV) や有人潜水艇 (Human Occupied Vehicle, HOV) による調査結果を基にハオリムシ群集のマッピングが試みられているが、面的な画像マッピングには至っていない (橋本ほか, 1995)。

本論文では筆者らの提案する自律観測アルゴリズムを紹介し、トライドッグ1号について説明するとともに、本観測の結果を報告する。

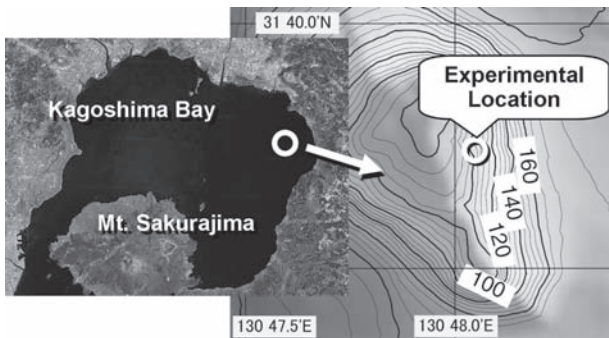


Fig. 1 Experimental location. The depth is shown by contours on the left image.

2. 背景

海底面の画像観測は、サイドスキャンソナーやマルチビームソナーによる音響観測に比べて格段に情報量が多く、生物層や地質、地形などの詳細観測のために必要不可欠である。しかしながら従来のROVやHOVによる画像観測は極めて局所的であり、船上からの音響観測のように広範囲の面的な観測を行うことは非常に困難であった (木下ほか, 1998)。

この原因は図2のように水中における見通し距離の短さと測位精度の悪さにあると考えられる。

水中では空気中と比べて光の減衰が大きいほかマリンスノーや懸濁物による散乱があるため、理想的な画像を得るためには対象まで1～2mの距離に接近しなくてはならない。この結果写真一枚あたりのカバー範囲 (フッ

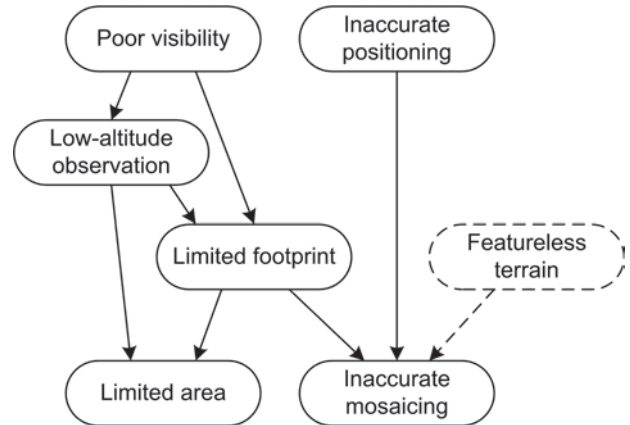


Fig. 2 Correlation chart of difficulties in underwater visual observation.

トプリント) が数mに制限されてしまうので、面的な観測を行うには海底から至近距離を保ちつつ安定した姿勢で高密度 (測線間隔1～2m)・低速 (～1 knot程度) で撮影する必要がある。このため音響観測に比べて時間がかかるほか、海底面へ衝突する危険があるためオペレーターへの負担が大きく、長時間・広範囲の観測は難しい。例えば100×100mの領域を観測する場合、サイドスキャンソナーによる観測はスワップ幅100m、速度1 knotとすると4分弱で終わるのに対し、画像観測の場合は測線間隔2mとすると測線長は5kmになり、前進速度1 knotとすると3時間近くかかることになる。またフットプリントが狭いために広範囲の画像マップを作成するには多数の写真の貼り合わせ (モザイクキング) が必要となる。画像相関を用いて2次元あるいは3次元のモザイクキングを行う手法が研究されているが、画像ベースの手法は計算量が大きく、また画像中に明確な特徴がない場合には正確なマッチングが難しくなる (Negahdaripour and Madjidi, 2003; Pizarro and Singh, 2003; Singh et al., 2004a; 上嶋ほか, 2007)。

次に水中における測位精度であるが、通常用いられるSSBL (Super Short Base Line) やLBL (Long Base Line) による音響測位の場合、測位精度は水深や地形等の環境条件に大きく依存し、一般的には数m～数十m程度である。条件がよければ慣性航法装置や他のセンサとの組み合わせによりサブメートル精度も実現可能であるが、起伏の大きな海底面や海底熱水地帯においては多重反射による精度悪化や音響的な影による測位不能領域の問題がある。特に浅海の海底噴気帯においては噴気そのものが音波を反射するため、安定した測位は困難である。サイドスキャンソナー等による音響観測は画像観測に比べてフットプリントが広いので測位誤差の影響は小さいが、画像観測では前述のように低高度・狭フットプリントとなるため、撮り漏らしや重複を防ぐためには

最低でもサブメートル、理想的にはセンチメートル精度のリアルタイム測位技術が必要となる。撮影した海底面の画像をリアルタイムに張り合わせることで自己位置を相対的に求める手法も提案されているが、先に述べたように画像ベースの手法は計算量が大きく、海底面の特徴が乏しい場合には正確なマッチングが困難となるため、リアルタイム性と安定性が求められる航法への適用には課題が残る (Eustice, 2005; Richmond and Rock, 2006)。

AUVはエネルギー源と頭脳を内蔵した水中ロボットであり、人間による遠隔制御を受けることなく全自動で長時間・広範囲を観測することができる。現在は音響観測などの比較的単純なミッションにおいて実用化されている一方で (Yoerger et al., 1991; Ura et al., 2004)、画像観測への応用に向けた研究が進められている。例としてYoerger et al. (2000) による海底熱水地帯の画像観測や、Singh et al. (2004b) が開発したAUV SeaBEDが挙げられる。また巻ほか (2005) もAUV「トライドッグ1号」による防波堤の全自動観測に成功している。

3. 自律観測手法

AUVが海底環境を観測するためには、環境認知、自己位置推定、経路計画をAUV単独でリアルタイムに行う必要がある。本研究で提案する自律観測手法は図3の

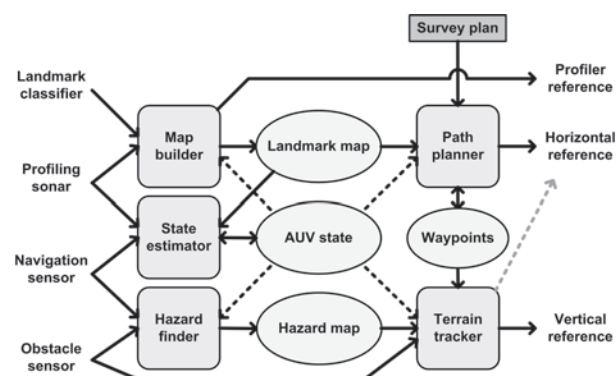


Fig. 3 Proposed software scheme for autonomous operation.

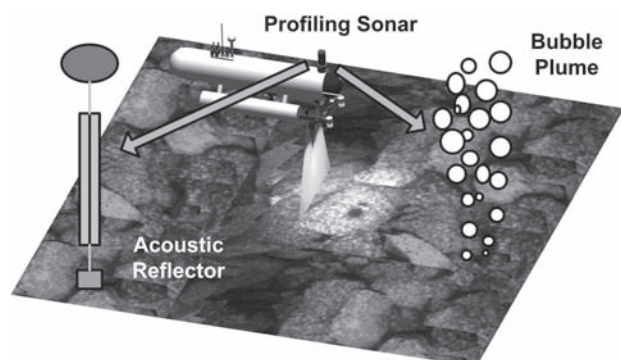


Fig. 4 Positioning method based on a profiling sonar and passive acoustic landmarks.

ように複数のパートから構成されており、速度、深度、姿勢、周辺物までの距離等のセンサデータを受けて水平方向と鉛直方向の制御目標値を出力する。なお、AUVはサージ、スウェイ、ヒープ、ヨーの4自由度が制御可能であるものとする。

本手法の第一のポイントは、測位に図4のようにプロファイリングソナー（指向性の強い音波を周回スキャンするソナー、以後プロファイラーとする）とパッシブ鉛直棒状の音響反射物を用いることである。測位レンジはプロファイラーの探知範囲に制限されるものの、ランドマークまでの距離と方位を直接計測することで既存の音響測位手法よりも高精度かつ安定した測位が可能である。このため外乱等による経路のずれをリアルタイムに修正することができ、撮り漏らしや重複の少ない効率的な観測が可能になるほか、砂地などの画像的特長に乏しい海底面であっても測位データのみから高精度なモザイク画像が生成できる。また、人工の音響反射材のほかに自然の噴気をランドマークとして使えるため、従来の音響測位が困難であった噴気帯にも適用することができる。ただしプロファイラーの計測値からランドマークとそれ以外の障害物を識別することは難しいため、プロファイラーの観測平面にはランドマーク以外の障害物が存在しないことを前提とする。また、流れによるランドマークの傾きは考えない。

第二のポイントは、AUVの軌道制御を水平方向は経路計画部 (Path planner)、鉛直方向は地形追従部 (Terrain tracker) というそれぞれ独立した部分により行うことである。即ち経路計画部は海底地形に関係なく水平方向の観測経路を決定し、地形追従部は水平方向の任意の動きに対応できるように鉛直方向の位置制御を行う。これにより比較的単純なアルゴリズムにより複雑な海底地形であっても安定した観測を可能とする。

以下、SLAM手法（環境認知および自己位置推定）、経路計画手法、地形追従手法の順に説明する。

3-1. SLAM

人工ランドマークにトランスポンダを設置しておくと、SSBLにより船上からおおよその位置を求めることができる。またマルチビームソナーにより船上から自然の噴気を探知することも可能であるが (松尾・田賀, 2004)、いずれの場合も画像観測に十分な精度でランドマーク位置を求めることは難しい。またAUVが現場で得た計測結果を船上で求めたランドマーク地図とリアルタイムにマッチングすることは困難であるため、AUVはランドマークの位置や数を知らずに出発し、観測中リアルタイムにランドマークを探索、マッピングすると

もに自己位置を推定する。このような手法はSLAM (Simultaneous Localization And Mapping) と呼ばれ、自律移動ロボットによる測位・環境マッピング手法として多くの研究がある (Thrun et al., 2004; Bailey and Durrant-Whyte, 2006)。

本手法においてSLAMは図3の状態推定部 (State estimator) と地図作成部 (Map builder) によって行われる。状態推定部はセンサの計測値 (水平速度, 方位角速度, 姿勢角, プロファイラーの計測値, 深度, 高度) および既に発見されているランドマークの位置情報 (Landmark map) から現在のAUV状態 (AUV state) を推定する。水平位置 x と方位 ϕ はパーティクルフィルタ (Doucet et al., 2001) により確率的に推定する一方で, ロール角 θ , ピッチ角 ϕ , 鉛直位置 (深度 d および海底面からの高度 h) はセンサの信頼性が高いため計測値をそのまま利用する。パーティクルフィルタにおいて, AUV状態 $X = [x, \phi]^T$ は重みつきサンプル集合として扱われる。即ちカルマンフィルタ (Welch and Bishop, 2001) ではAUV状態とセンサ誤差がガウス分布に従うという仮定のもとAUV状態の確率密度関数を解析的に求めるのに対し, パーティクルフィルタは任意の誤差モデルのもとでAUV状態の分布をモンテカルロ法により近似する。このため任意の分布が表現でき, またサンプル数 n を変えることで計算負荷と推定精度のバランスをとることができる。

サンプル集合 $S = \{s^i, w^i, i = 1, \dots, n\}$ は図5のように予測フェイズ (Prediction), 観測フェイズ (Observation) という二段階の処理を経て更新される。予測フェイズにおいては, 計測された水平速度 $[u, v]^T$ および方位角速度 ω によって各サンプルを移動させる。各サンプルの移動量にはセンサ誤差に相当する独立なランダムノイズを

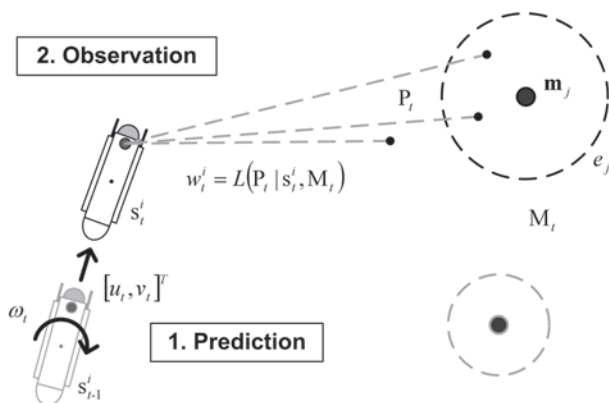


Fig. 5 Update procedure of the sample s^i at time t , ω : yaw angular velocity, u : surge velocity, v : sway velocity, P : profiler measurements, $M = \{m^j, e^j; j = 1, \dots, n\}$: Landmark map, m : horizontal position of a landmark, e : positioning uncertainty of a landmark.

付加するため, サンプル集合は全体として拡散する。これはデッドレコニングによる測位精度悪化を意味している。次に観測フェイズではプロファイラーの計測値 P を各サンプル状態に従って測位座標系に配置し, ランドマーク地図 M と比較することで, 各サンプル状態においてその計測値が得られる尤度 $L(P|s^i, M)$ を推定する。そしてこの尤度をサンプルの重み w^i とし, 次回の予測フェイズの前に重みに従ってサンプル集合の再配置を行う。このように観測フェイズでは, デッドレコニングによって拡散したサンプルをランドマークの観測結果を用いて収束させる。ただしランドマークを観測できない場合はサンプルの重み付けが出来ないため再配置は行われない。このためランドマークを観測できない状態が続くと, サンプル集合はデッドレコニング誤差を反映して拡大してゆくことになる。

以上の処理によって求められたサンプル集合はAUV状態の確率分布 $P(X)$ の近似表現であるため, 制御に用いるための代表値を決めなくてはならない。この決め方としてはさまざまな手法が提案されているが, ここで計算負荷の軽い重みつき平均 $\sum w^i s^i / \sum w^i$ を用いる。

地図作成部はプロファイラーを用いて新たなランドマークを探索し, 発見時のAUV状態を基にランドマーク地図を更新する。プロファイラーのスキャン方向やセクター幅, 観測レンジなどのパラメータは効率的な探索を行うため動的に制御される。通常は決められたレンジで全周スキャンを行うが, 新たなランドマーク候補が見つかるとその周辺を集中的に一定回数スキャンする。そして一定数以上の反応がその周辺に得られたら, 反応点群の重心をランドマークとして登録する。このように集中スキャンを行うことでランドマークの位置精度向上が期待できるほか, 水中浮遊物や生物などによる誤探知を抑制することができる。

ランドマーク地図とAUV状態は相互に深く関連しているため, センサ情報を最大限活用するためには自己位置を更新するたびに環境地図も更新するべきである。しかし本手法においてはリアルタイムでの安定性を重視するため一度発見したランドマーク位置は固定される。かわりに各ランドマークには集中スキャンで得られた点群のばらつき及びAUV状態のサンプル分布から計算される誤差情報を持たせ, これを状態推定部で評価することでランドマークの位置誤差を考慮している。AUVの位置誤差はランドマークに対して相対的に決まるため, 最初のランドマークが発見されるまでの位置誤差はゼロとみなす。

これまでの実験により, 幅10cmの人工反射材なら20~30m程度, 噴気は流量によるが1~10m程度の距離で発

見できることが確認されている (Maki et al., 2006a, 2006b, 2007a). また, 人工反射材が距離10mの位置に二つある場合には, 5cm程度の水平位置精度が安定して得られることが確認されている (Maki et al., 2007b).

3-2. 経路計画

図3の経路計画部 (Path planner) はAUV状態とランドマーク地図, そしてあらかじめ与えておく観測計画 (Survey plan) から水平方向の観測経路を決定し, サージ速度, スウェイ速度, ヨー角速度の制御目標値を出力する. 観測はAUVが海底近くまで潜行した地点を基準として行われるため, 外乱により潜行地点がずれた場合には観測範囲もずれてしまう. そこでAUVに発見したランドマークの種類 (人工反射材か噴気) を自動的に識別させ, 人工反射材が2つ見つかった地点で反射材基準の観測経路へ移行させることにより, 外乱等によりAUVの投入位置がずれても地球固定座標系における観測を可能とする. 従って同じ場所を複数回観測して時間変化を調べることや, 異なる場所の観測結果を繋ぎあわせて広範囲のマップを作ることができる.

制御モードには航行モード (Waypoint tracing), 観測モード (Observation), 回避モード (Avoidance) の三種類があり, 図6のようにランドマークとの幾何学的位置関係およびランドマークの種類に従ってそのいずれかを選択する. 航行モードは観測活動の基本となるモードであり, ウェイポイントを直線で結ぶ進路をとる. もし図6の領域Raに人工反射材もしくは未観測のランドマークがあり, ウェイポイントへ到達する前に衝突が予想される場合は回避モードへ移る. 未観測の場合まず当該ランドマークへ接近しランドマーク識別器 (Landmark Classifier) により噴気か人工反射材かを判断する. そして反射材であれば回避し, 噴気であれば衝突しても無害であるため無視する. このようにランドマークの種類を識別して噴気を無視することで, 噴気が多

い領域であっても安定して観測することができる. 衝突が避けられないほどの至近距離で発見されたランドマークは無条件に噴気と判断される. これは, 人工反射材であればこのような至近距離に至る前に発見できると推定されるためである. 未観測のランドマークが図6の領域Roにある場合には, 観測モードへ移る. このときAUVはランドマークへ接近し, 識別器によって種類を判断した後に180度回頭してもとの経路へ復帰する. 回避・観測モード中はプロファイラーにより当該ランドマークを集中的にスキャンしてターゲットまでの相対位置関係を高精度に計測する.

観測計画には探索用, 観測用という二種類のウェイポイントがあり, どちらも事前に設定してAUVに与えておく. 探索ウェイポイントは観測開始後まず辿るウェイポイントであり, その目的はあらかじめ設置されている人工反射材を発見することである. 探索ウェイポイントはAUVのスタート地点に対して相対的であるため, 外乱によるスタート地点のドリフトや人工反射材の設置位置の誤差を考慮して広範囲をカバーできるように設定する必要がある. 2つの基準点と方位により座標系が一意に定まるので, 反射材が2つ見つかった時点で反射材基準の観測ウェイポイントへ移行する. 2つの反射材のうち南側をA, 北側をBとすると, 観測ウェイポイントは定義座標系の原点がA, X軸の正方向がAからBを向く方向となるように測位座標系に配置される.

ランドマーク識別器はカメラとシートレーザーから構成され, ランドマーク表面に投影したレーザーの輝線が噴気であれば小さく不安定であり, 人工反射材であれば大きく安定していることを利用して識別する. 水槽実験により環境条件がよければほぼ確実に判別できることが確認されている (水島ほか, 2007).

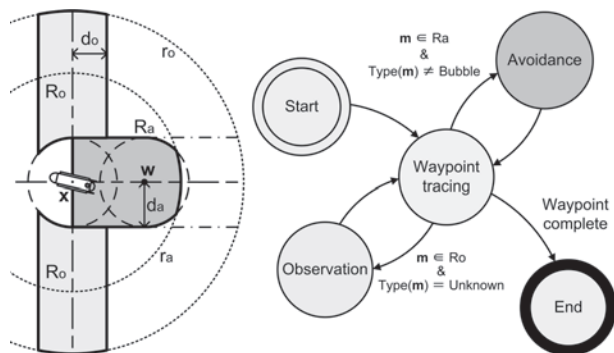


Fig. 6 Path planning strategy. x : horizontal position of the AUV, w : horizontal position of the target waypoint, m : horizontal position of the landmark.

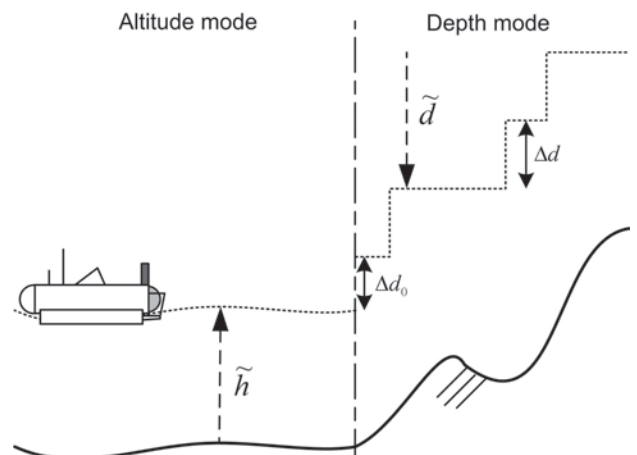


Fig. 7 The two vertical control modes. \tilde{h} : reference altitude, \tilde{d} : reference depth.

3-3. 地形追従

1～2mという低高度においては、単純な一定高度制御では海底面の起伏や生物群集、チムニー等の突起物に対応できないため、下向きだけでなく水平方向や斜め下方に向けた複数の障害物センサによるロバストな地形追従を行うことが望ましい。しかしながら音響による障害物センサは分解能が悪く、また信頼性が対象への入射角に大きく依存するため、障害物センサによって周辺環境の3次元形状を推定することは困難である。一方で、障害物を検知したら反射的に上昇するといったセンサドリブンな回避手法はセンサノイズに弱く、軌道が不安定になる恐れがある。そこで複数の障害物センサによりAUV周辺の局所的な危険領域マップを作成し、これを基に鉛直方向の制御方式を切り替える手法を提案する。実際のAUVを用いて行われた実験では、本手法により高低差2mの起伏に富む地形を高度1.2mで安定して追従することに成功した(Maki et al., 2007c)。

図3の障害物探知部(Hazard finder)は複数の障害物センサを用いてAUV周辺の危険領域に関する地図(Hazard map)を作成する。ハザードマップはAUV周辺の水平面に定義される局所的なマップであり、周囲の障害物や直下の高度異常等を検知すると、その点を中心とする円領域を危険領域として登録する。ただしランドマークを障害物と誤認識することを防ぐために、ランドマーク周辺は障害物センサの探知領域から除外する。

地形追従部(Terrain tracker)はハザードマップとAUV状態、そして障害物センサの計測値を元に鉛直方

向の制御目標値を出力する。制御方法には図7のように海底面からの高度を基準とする高度モードと海表面からの深度を基準とする深度モードの二種類がある。AUVが危険領域の外にいる場合は高度モードであり、ウェイポイント毎に指定された高度 \bar{h} を保つように一定高度制御が行われる。一方、AUVが危険領域に入った場合には深度モードとなる。これは危険領域においては海底面の起伏により高度が正しく計測できない可能性が高く、高度制御では海底面に衝突したり軌道が乱れる恐れがあるためである。深度モードに入った直後の深度指令値 \bar{d} は、その時のAUVの深度よりも Δd_0 だけ浅い深度とする。以後はセンサドリブンな回避法則により、AUV近傍に障害物を検知するか、あるいは高度が閾値よりも小さくなるたびに目標深度を Δd ずつ浅くしてゆく。AUVが危険領域から出ない限り目標深度を深くすることはないためセンサノイズや欠測に対してロバストであり、また旋回を含む任意の水平移動に対応することができる。地形追従部は原則として鉛直方向の制御指令値のみを出力するが、障害物に異常接近した場合は水平方向の移動を停止させる。この場合でも目標深度はしだいに浅くなるので、どれほど高度差の大きい崖であってもオーバーハングのない限りは対応可能である。

4. AUV「トライドッグ1号」

観測に使用するAUV「トライドッグ1号」の一般配置図を図8に、スペックを表1に示す。本機は1999年に完成したホバリング型のAUVであり、6台のスラスタ

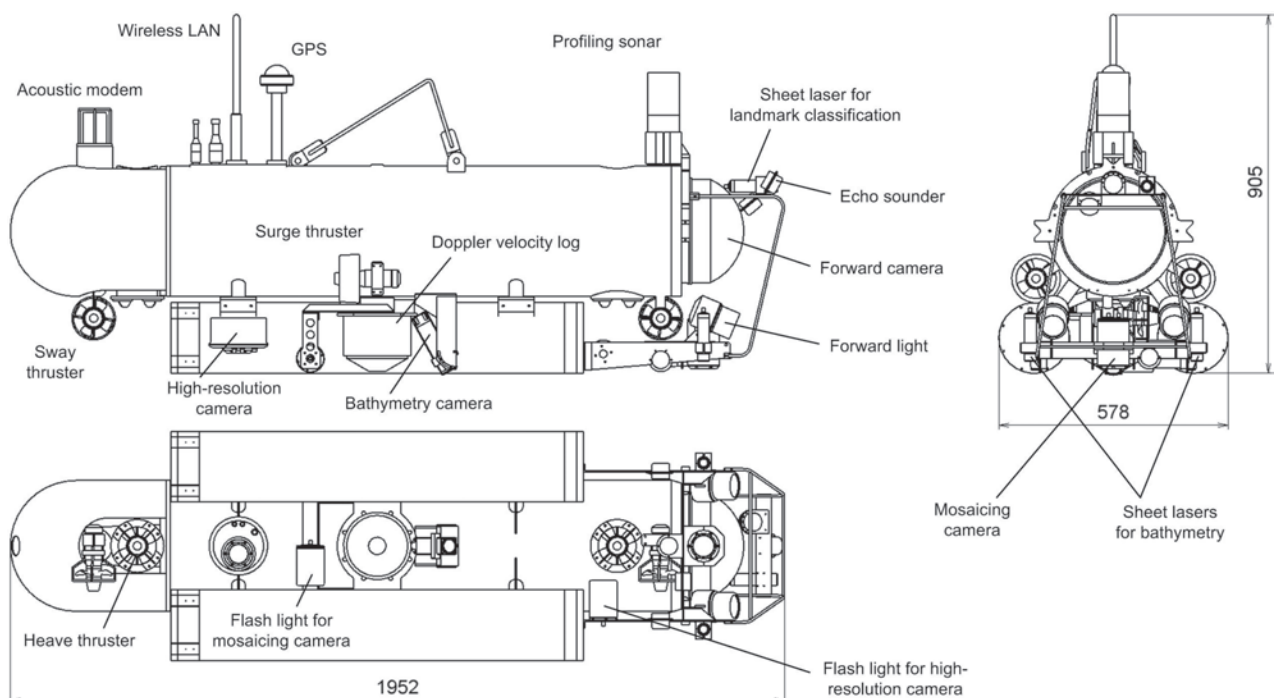


Fig. 8 General arrangement of AUV Tri-Dog 1. The right battery hull is omitted in the side view.

Table I Specifications of the AUV Tri-Dog 1.

Vehicle	
Size	2.0m (L) × 0.9m (H) × 0.6m (W)
Mass	200 kg
Max. speed	0.7 m/s
Max. depth	110 m
Duration	4 hours
Actuators	100 W Thruster × 6
Power	NiCd 25.2 V 20 Ah × 4
Processor (Navigation)	Intel Pentium M 1.1 GHz
Processor (Payloads)	Intel Pentium 4 2.4 GHz
OS	Windows 2000
Sensors	
Velocity & Altitude	RDI Navigator 1200 kHz
Depth	Druck PTX1830
Roll & Pitch	Crossbow AHRS400M/A
Heading	JAE JG-35FD
Landmark search	Imagenex 881A Profiler 675 kHz
Obstacle search	Echo sounder × 6
Payloads	
Forward camera	SONY EVI-D100
Mosaicing camera	PGR Scorpion
High-resolution camera	Ricoh GR digital
Bathymetry camera	SONY XC555
Sheet laser	Crown CRGS-1015L60D × 3

によってサージ、スウェイ、ヒープ、ヨー、ピッチの5自由度を制御することができる (Kondo et al., 2001). 三本の圧力容器から構成されており、中央の圧力容器には電子機器が、左右の圧力容器には電池がそれぞれ収納されている。

通信手段としては、浮上中の無線LANと潜行中の音響コマンドリンクを備えている。ただし音響コマンドリンクはデータレートと通信安定性が低いため専ら船上へのステータス送信に使われ、潜行中止などごく一部のコマンドを除いてAUVへデータを送ることはできない。音響コマンドリンクはSSBLのトランスポンダも兼ねているため船上から潜行中のAUVの位置を求めることができるが、測位精度や信頼性は環境条件に大きく依存する。

4-1. 航法センサ

トライドッグ1号にはプロファイラー以外に速度、方位、進路、高度、深度、姿勢に関するセンサならびに周囲の障害物を認識するためのセンサが搭載されている。プロファイラーは周波数675kHz、ビーム幅2.1度の音響ビームを水平方向にスキャンするもので、AUVの全周にわたって計測を行うことができる。計測は2.4度ステップで行われ、約17秒で一周する。

対地速度はドップラ式対地速度計 (Doppler Velocity Log, DVL) によって計測される。ロール・ピッチは姿勢方位基準器 (Attitude Heading Reference System, AHRS) によるが、AHRSに搭載されている磁気コンパスは環境影響が大きいいため方位に関しては光ファイバジャイロ (Fiber Optical Gyro, FOG) を用いる。

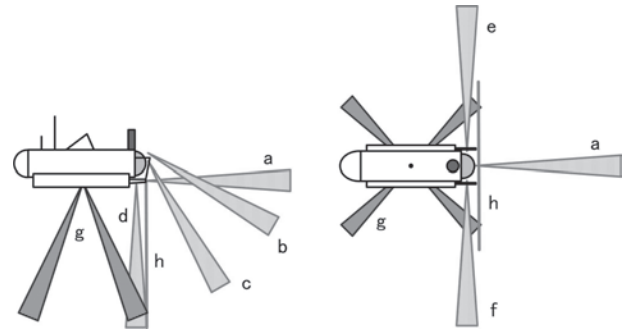


Fig. 9 Arrangement of perceptual sensors.

海底面や障害物を探知するための各種センサの探知範囲を図9に示す。海底面までの距離は低高度ミッションにおいて非常に重要であるため、ドップラ式対地速度計 (g) のほかに超音波レンジセンサ (c, d) とシートレーザーによる測距システム (h) を用いて推定する。水平方向の障害物には超音波レンジセンサ (a, b, e, f) を用いる。

シートレーザーによる測距システムはシートレーザーとカメラから構成されており、光切断法によって海底面の断面形状を計測する。光切断法はソナーに比べて計測レンジが短いものの、分解能が高く面的な計測が可能であることから、水中応用に関して複数の研究がある (Tetlow and Allwood, 1995; 山下ほか, 2003; Kondo et al., 2004)。本AUVにおいては前部下方の2台のシートレーザーにより左右に広がる直線を下向きに投影し、海底面に当たってできる輝線をAUVの中央下部に取り付けられたカメラ (Bathymetry camera) によって観測する。このように二台のレーザーを用いることはフットプリントを広げるとともにオクルージョン防止に役立つ。レーザーの波長は水中での透過性がよい532nm (緑色) であり、出力は一台あたり20mWである。

ランドマーク識別器はAUV前方のシートレーザーとカメラによって構成され、AUV正面のランドマークの種類 (噴気か人工反射材か) をレーザーの反射の大きさから識別する。レーザーは測距システムと同様のものである。カメラはパンチルトが可能なNTSCカメラであり、前方ライトOFFでランドマーク識別に使われる一方、前方ライトONでランドマークそのものや海底面、水中浮遊物などの観測に使用される。前方カメラの映像はAUV内蔵のビデオデッキに録画されるほか、一定間隔で静止画がHDDに保存される。ライトのON/OFFやカメラの向きなどは観測内容に応じて自動制御される。

4-2. 観測機器

海底面撮影用のカメラとして、モザイク用と高画質撮影用の二台が搭載されている。広範囲のモザイク

グを効率的に行うためには広い画角と大きな保存容量が必要であり、また高精度なマッピングにはAUV本体とのアライメントが重要であるため、モザイクング用にはCマウントのIEEE1394カメラ（200万画素・カラー）を用いる。これにより広角レンズが選択でき、また撮影した画像をAUV本体のHDDに直接保存できるため、アライメントが狂う原因となる圧力容器の開閉を頻繁に行う必要がない。その一方で、学術調査においては可能な限り高画質の画像が要求されるため、市販の高画質デジタルカメラをAUV後部に搭載している。

照明は動画撮影を行う前方以外はフラッシュを用いる。この理由は消費エネルギーを抑えるためと、シートレーザーによる地形計測を理想的な条件（暗闇）で行うためである。またカメラとフラッシュの間隔を最大限とって配置することで水中浮遊物による乱反射を抑えている。

5. 観測実験

本観測ではトライドッグ1号を図1に示した鹿児島湾たぎり噴気帯ハオリムシサイトに展開して海底面の数百m規模の画像モザイクならびに3次元地形図を取得し、ハオリムシ群集やバクテリアマット等の3次元的な分布を明らかにすることを目指す。

5-1. 観測アルゴリズムの最適化

観測場所は図10のように東へ下る斜度20%の急斜面であり、また点在するハオリムシ群集の高さは数mに及ぶ。そこで海底面やハオリムシ群集によるランドマークの誤探知を防ぐため、観測アルゴリズムに以下の修正を加える。第一は、海底面による誤探知を防ぐためにプロファイラーによる観測範囲をAUVの東側（斜面の谷側）に制限することである。第二は、ハオリムシ群集による誤探知を防ぐために観測ステージを二段階にわけること

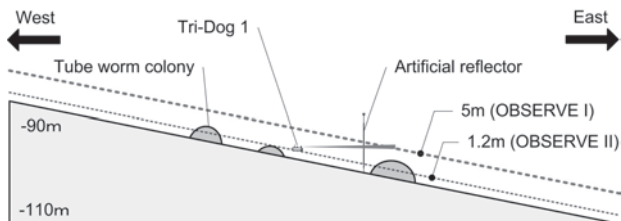


Fig. 10 Tagiri field profile.



Fig. 11 Artificial reflector deployed to the experimental field.

ある。第一ステージでは高度5mにてランドマーク探索を行う。そして人工反射材基準の観測ウェイポイントへ移行した後は第二ステージとし、高度1.2mで画像観測を行うが新たなランドマーク探索は行わない。

5-2. 手順

AUVの展開に先立ち、実験海域に人工の音響反射材を2本設置した。反射材は図11に示すように長さ1mのアルミアングル材2本を断面が十字になるよう背中合わせに固定したものを8セット連結したものであり、錘とブイによって海底から鉛直に立ち上がる構造になっている。本観測ではランドマークの探知範囲をAUVの東側に制限しているため、ランドマークが常にこの範囲にあることが望ましい。そこで観測エリアの東側に南北に15m離して設置することとし、本船から直接投入した。投入目標地点の座標を表2に示す。

図12はAUVに与えた観測計画であり、左側がランドマーク探索用、右側が海底観測用である。探索ウェイポイントは潮流等によるAUVや反射材の投入地点と着底地点のずれを考慮し、60×50mの領域をカバーするように設定する。高度は5mとする。観測ウェイポイントは反射材の6m西側から始まり、南北へ往復しながら40×15mの領域をカバーするように設定する。高度は一点目のみ5m、二点目以降は1.2mとする。ウェイポイントの総延長は、探索用が304m、観測用が280mである。

トライドッグ1号は船上で観測パラメータを受け取った後、クレーンから切り離される直前に自律ミッションを開始する。自律ミッションは図13のように複数のモー

Table II Planned location of the artificial reflectors (WGS84) .

	latitude	Longitude
Reflector A	31-39.741 N	130-48.038 E
Reflector B	31-39.749 N	130-48.038 E

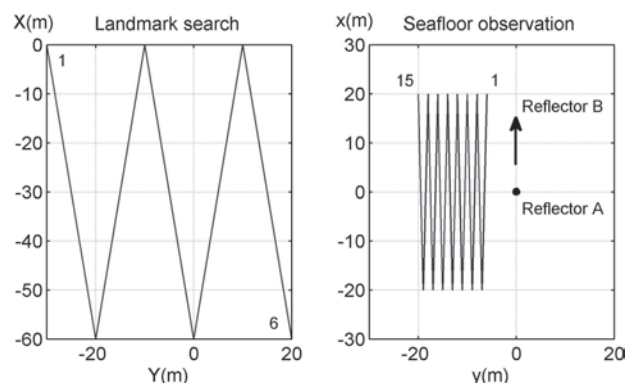


Fig. 12 Survey plan given to the AUV. The observation waypoints are defined based on the artificial reflectors.

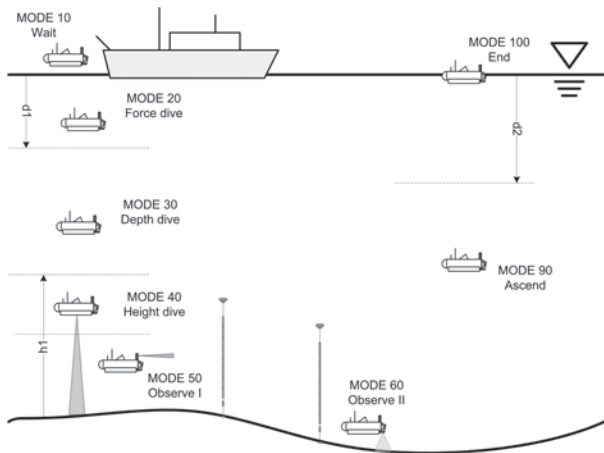


Fig. 13 Mode transition of the AUV during an autonomous operation.

に分割されており、各モードごとに設定された条件をクリアすることで次のモードへ移る。安全対策として、各モードごとに定めた制限時間をオーバーした場合は強制的に浮上させる。MODE10では潜行に向けた最終準備を行うために一定時間待機するモードで、この間に無線LANを切断してAUVをリリースする。MODE20では目標深度 (d_1) に達するまでスラストの回転数を一定に保ちながら降下し、その後MODE30の深度制御へ移る。始めから深度制御にしないのは、MODE20においてはAUVがまだクレーンで吊るされている可能性があるため、スラストが空中で高速回転するのを避けるためである。MODE30における目標深度はDVLで海底面が確実に捉えられる深度にセットしておく。そしてMODE40では海底面までの高度をリファレンスとして降下を続け、高度が探索ウェイポイント一点目の高度である5mとなった時点でMODE50へ移行する。

MODE50およびMODE60が実際の観測ミッションであり、第3章で提案した手法に従って観測活動を行う。観測アルゴリズムの制御周期は5Hz、パーティクルフィルタのサンプル数は200とする。MODE50に移行した瞬間のAUVの位置が提案手法における基準座標系の原点であり、この時にAUV内蔵の磁気コンパスで計測された北方向がX軸の正方向となる。MODE50は5-1節で述べた第一ステージであり、サージ速度0.2m/sで探索ウェイポイントを辿りながら人工反射材を探索する。最初のランドマークが見つかるまでの測位はDVLとFOGによるデッドレコニングとし、この間の測位誤差はゼロとみなす。そして人工反射材が2つ見つかった時点で観測ウェイポイントがロードされ、目標高度が1.2mとなった時点で第二ステージであるMODE60へ移行する。MODE60ではサージ速度0.08m/sで観測ウェイポイントを辿りながら画像観測を行う。撮影間隔はモザイク用カ

メラは8秒、高画質カメラは10秒、光切断による測距システムと前方カメラは1秒とする。観測ウェイポイントを全て通過するとMODE90へ移り、深度制御によって浮上する。そして海面付近まで浮上するとMODE100へ移り、全スラストを停止して自律ミッションを終了する。

浮上後は無線LANが届く距離（条件がよければ100m程度）まで本船を接近させた後、遠隔操縦によりAUVを本船まで誘導してクレーンにより揚収する。そしてAUV内部に保存されている観測データの回収・処理を行う。

5-3. 結果

本観測においてトライドッグ1号は164.3分の全自動ミッションに成功した。AUVの深度と観測モードを図14に、海底面からの高度を図15に示す。横軸はミッショ

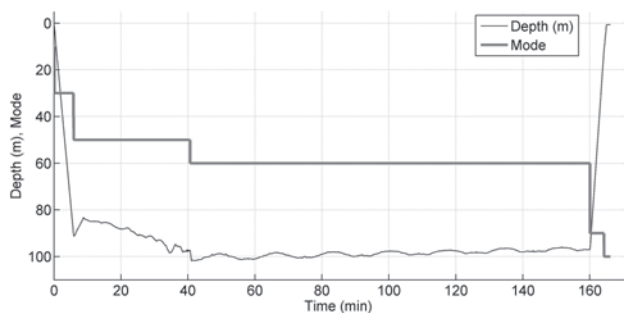


Fig. 14 Depth and mission mode of the AUV.

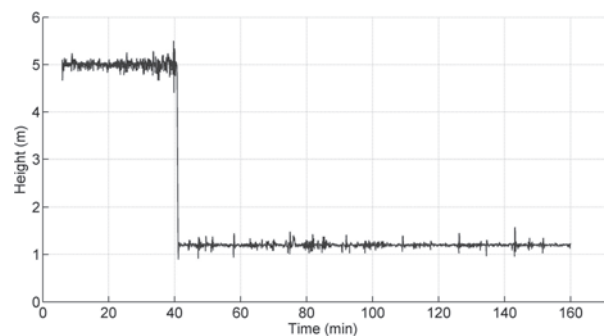


Fig. 15 Altitude from the seafloor.

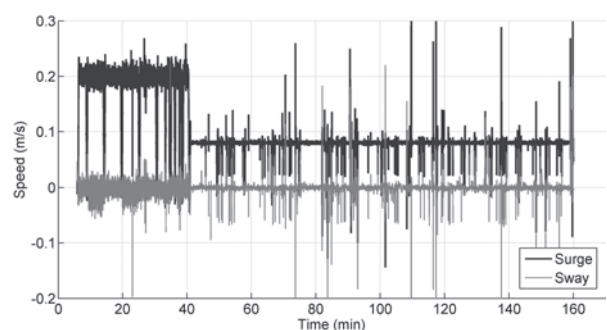


Fig. 16 Surge and sway speed.

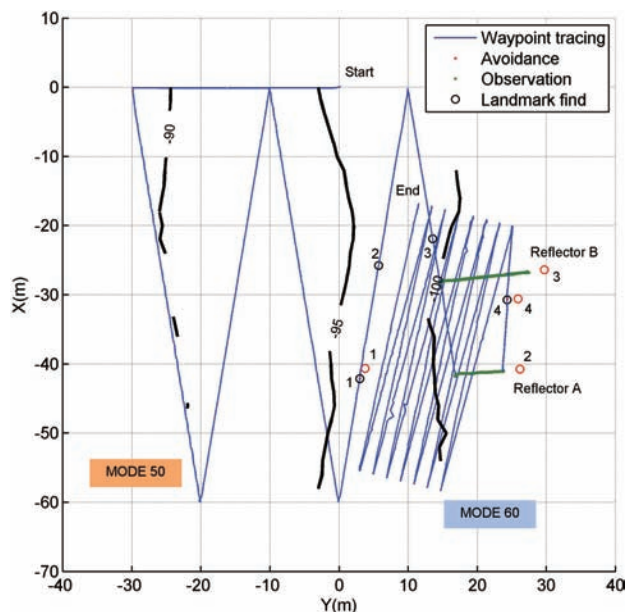


Fig. 17 Horizontal trajectory of the AUV and found landmarks. The trajectory is colored by path-planning mode.

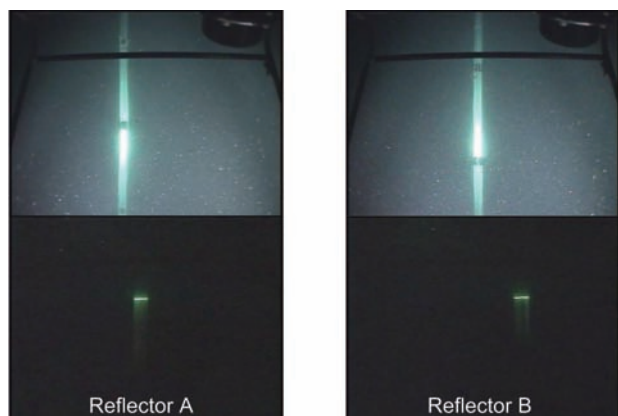


Fig. 18 The artificial reflectors taken by the forward camera. Upper: approaching (light ON), Lower: classification (light OFF).

ン開始からの経過時間である。以後特に明示しない限り、時間はミッション開始からの経過時間とする。AUVは5.9分で海底までの高度5mに達し、ランドマーク探索(MODE50)を開始した。そして40.6分後に画像観測(MODE60)へ移行し、160.1分後に観測ウェイポイントを全てクリアしてMODE90へ移行した。図16はDVLにより計測されたAUVの速度であり、青線がサージ方向、赤線がスウェイ方向を示す。これらの図から、ランドマーク探索中は高度5mでサージ速度0.2m/sに、画像観測中は高度1.2mでサージ速度0.08m/sに制御されていたことがわかる。

観測行動中リアルタイムに推定された航跡を図17に示す。航跡の色は経路計画部の制御モードを表し、青が航行モード、緑が観測モード、赤が回避モードである。黒い太線はAUVの観測結果から推定された等深線である。

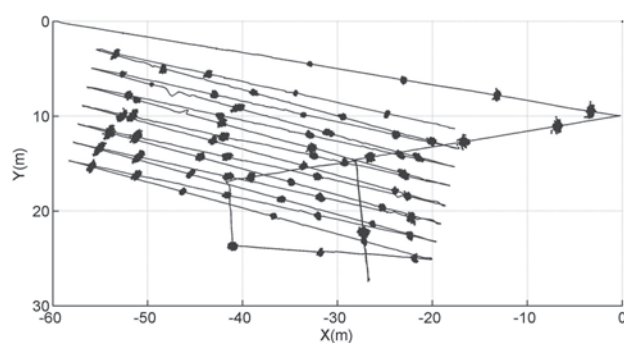


Fig. 19 AUV's trajectory with the samples of particle filter displayed on every 10 m.

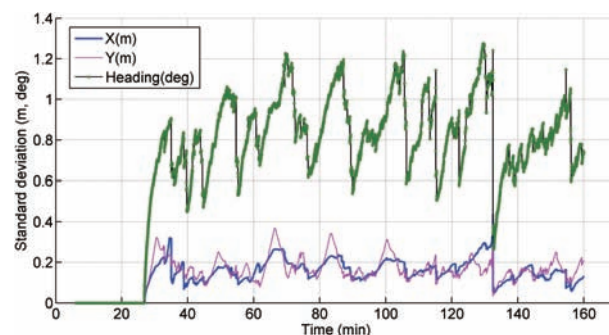


Fig. 20 Standard deviation of the samples of particle filter.

航跡上の黒丸はランドマーク発見時のAUV位置であり、その時に発見したランドマークの位置を対応する番号の付いた赤丸で示す。Start地点を出発したAUVは航行モードで探索ウェイポイントを辿った。1番のランドマークは至近距離で発見したため無条件に泡と判断した。そして2番を25m、3番を15mの距離で発見し、それぞれ進路の真横に来たときに観測モードへ移行して前カメラとシートレーザによる観測を行った。図18はそれぞれのランドマークを観測中に前カメラで撮影した画像であり、上段が接近中、下段がライトを消してレーザによる判定を行っているときのものである。両者ともレーザの反射が大きくはっきりと得られたため人工反射材と判定された。そして2番のランドマークが反射材と判断された時点で反射材が2つ見つかったため、南にある2番のランドマークが原点、2番から3番を向く方向をX軸の正方向として観測ウェイポイントがロードされた。4番のランドマークは至近距離であったため無条件に泡と判定された。そしてAUVが観測ウェイポイントの一点目に達した時点でMODE60へ移行して画像観測を開始し、End地点で最後のウェイポイントへ到達しMODE90へ移行した。

図19はAUVの航跡にパーティクルフィルタのサンプル集合を10mおきに表示したものである。また図20はサンプル集合のX座標、Y座標、方位に関する標準偏差であり、これらの図から水平方向は0.1~0.3m、方位は0.6

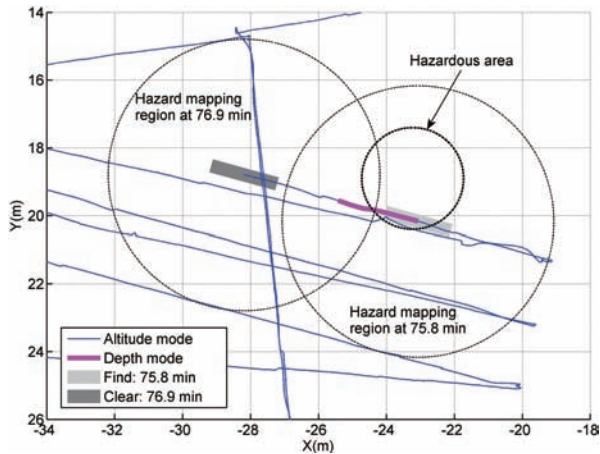


Fig. 21 Hazard map and height control mode. Positions of the AUV when the hazardous area was found and cleared are shown as the gray rectangles.

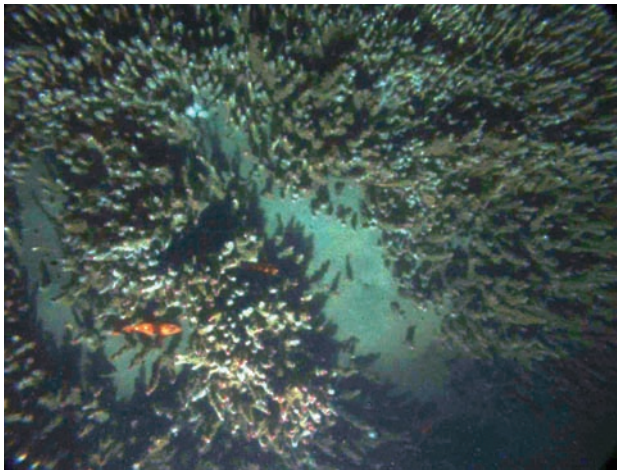


Fig. 22 Tube-worm colony taken by the mosaicing camera.

～1.2度程度の確からしきで測位できたと考えられる。

鉛直方向に関しては、一度だけ深度制御モードへ入った。75.8分時点において図21のようにAUVの右舷側約1mの距離に障害物センサの反応があったため危険領域 (Hazardous area) を登録し、直ちに深度制御モードに移行した。水平方向の制御は独立しているためAUVはそのまま直進し、危険領域を抜けた地点で高度制御に復帰した。そして76.9分後、当該危険領域はAUVから離れたため消去された。

モザイク用カメラの画像を図22および23に、高画質カメラによる画像を図24および25に示す。それぞれ同じハオリムシ群集と噴気を撮影したものであり、モザイク用カメラは高画質カメラに比べて広角であることがわかる。一方で高画質カメラの画像からは、赤いハオリムシ本体が棲管から顔を出している様子や海底面の地質といった細かい情報を読み取ることができる。モザイク用カメラは後ろから照明しているので前に影ができ、反対に

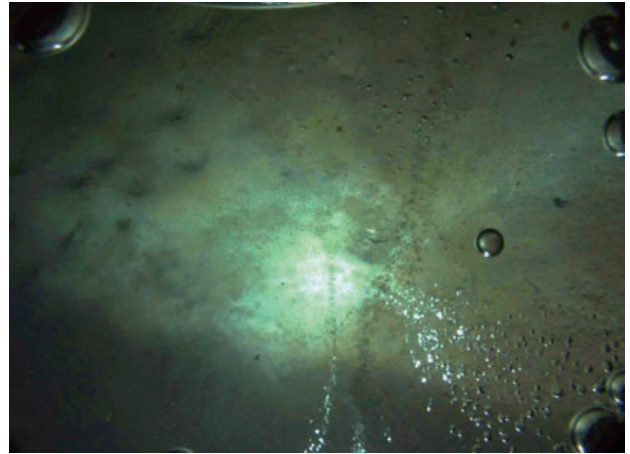


Fig. 23 Bubble plume taken by the mosaicing camera.



Fig. 24 Tube-worm colony taken by the high-resolution camera.



Fig. 25 Bubble plume taken by the high-resolution camera.

高画質カメラは前から照明しているので後ろに影ができている。

モザイク用カメラの画像から作成したモザイク画像を図26に示す。座標系は図17と同一であり、グリッド間隔は5mである。図27は図26に白枠で示した部分の拡大図である。これらの図の作成には観測中リアルタイムに推

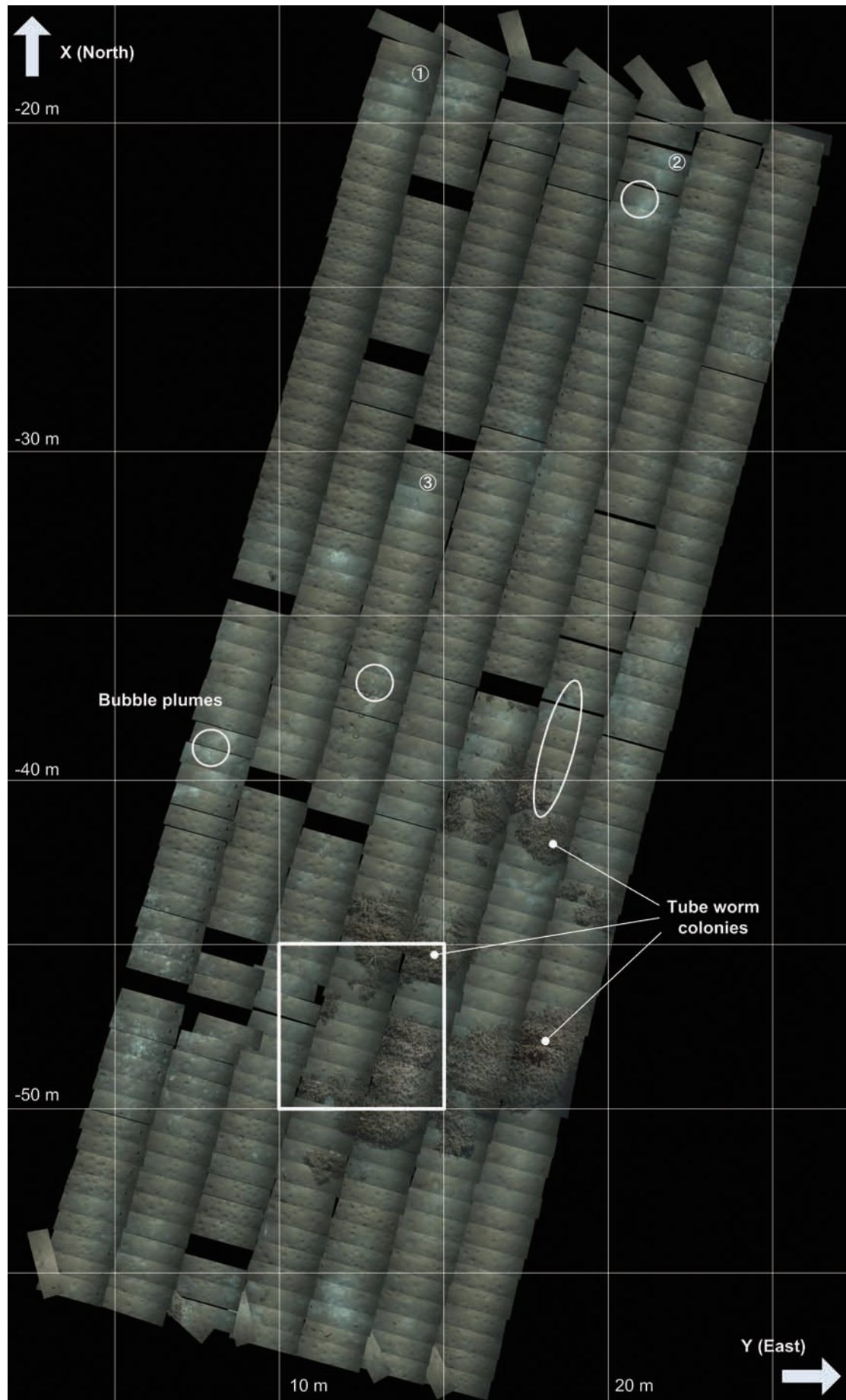


Fig. 26 Photo mosaic of the seafloor made with the pictures of the mosaicing camera. Grid size is 5×5 m. Blanks are caused by failure of the flash light.

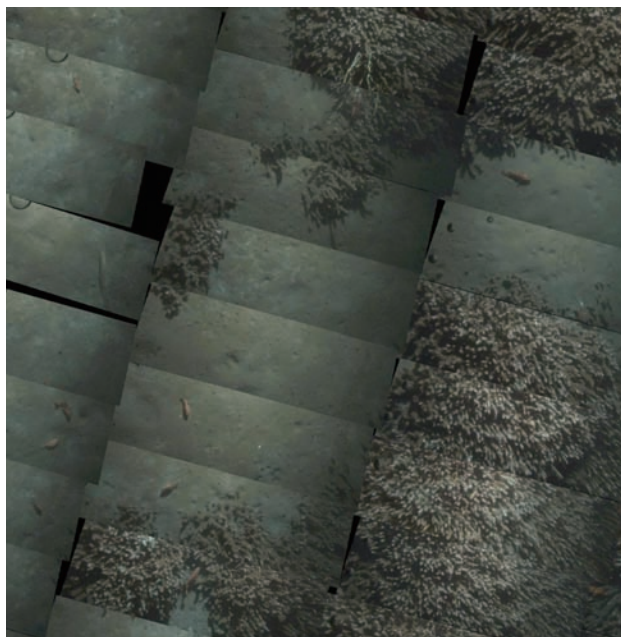


Fig. 27 Part of the photo mosaic (5 × 5 m). The area is shown with the white box in Fig. 26.

定されたAUV状態およびあらかじめ計測しておいたレンズの歪情報のみを用い、画像相関は一切用いていない。ところどころ画像が抜けているのは、フラッシュが発光しなかったためである。各画像の同じ位置に連続して写り込んでいる丸い影はレンズに付着した気泡である。照明の方向を揃えるためにマイナスX方向へ向かう経路のみを用いた。

図28はシートレーザーによる測距システムによって撮影された画像である。左側は平坦面、右側はハオリムシ群集の上で撮影されたものであり、どちらにも海底面に当たったシートレーザーによる輝線が写っている。この線を抽出して光切断法に基づく計算を行い、観測中リアルタイムに得られたAUV状態を用いてマッピングすることで図29に示す三次元地形図を得た。メッシュサイズは0.1mであり、線形補間を行ったのちにスムージング処理を施してある。実線矢印で示した箇所は膨らみがハオリムシ群集である。A地点のハオリムシ群集に図26の対応する部分を重ねて作成した三次元画像を図30に示す。

6. 考察

本実験において、トライドッグ1号は安定した全自動ミッションに成功した。図15や16からは噴気の影響と思われる多数のノイズが確認できるが、図26のモザイク画像には目立った誤差は見られない。このことから、提案手法はセンサノイズに対してロバストであることがわかる。図19のサンプル分布を見ると、 $(X,Y) = (-37, 20)$ の辺りでは直径0.5mの円内に収まっているのに対し、

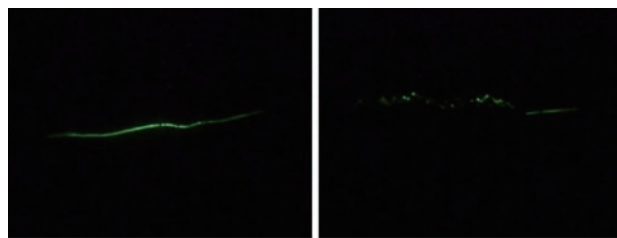


Fig. 28 Images taken by the light-section ranging system. Left: flat area, Right: tube-worm colony.

$(X,Y) = (-55, 13)$ の辺りでは2m以上に広がっている。このことから測位精度はAUVとランドマークの位置関係に依存することがわかる。ランドマークが遠いほどプロファイラーの計測が不安定になることが主な原因であろう。いずれにしても、本手法は従来の音響測位ではほぼ不可能であった、画像マッピングに十分なレベルの高精度測位を実現したといえる。

図17からはランドマークとの位置関係によって経路計画モードが適切に切り替わり、人工反射材が2つ見つかった時点で観測ウェイポイントへ移行したことが確認できる。図18からは、AUVが反射材と推定したランドマークはいずれもあらかじめ投入した人工反射材であることが確認できる。図21のHazardous areaは図26上部のほぼ同じ座標にある噴気が原因と考えられる。本来ならばランドマークとして認識されるべき噴気が障害物として認識されてしまったのは、本実験においては画像観測中は新たなランドマーク探索を行わなかったためであろう。

次に観測結果について考察する。図26の中央から下方にかけて複数のハオリムシ群集があり、カサゴと思われる赤い魚が群れている様子がわかる。また、図中に円で示した領域には噴気が観察される。さらに海底面に点するバクテリアマット（白い領域）やボックマークと思われる微細な窪みが多数確認できるなど、従来は局所的にしか観測できなかった微細な特徴を面的に捉えることに成功した。ただし画像ごとに撮影時刻が異なるため、動く物の計測には注意が必要である。例として図26の楕円で示した領域では一匹の魚がAUVと同じ方向に進んでいたため、連続した複数の画像に写りこんでいる。図29の三次元地形図からは矢印で示したハオリムシ群集の形状のほか、窪地などの微細地形を読み取ることができる。このように、シートレーザーによる測距システムは海底の微細地形の計測に有効であることが証明された。また、図26と29を見比べることで、特徴物の三次元的な分布を把握することができる。例えば図29に番号①～③で示した窪地と図26に番号①～③で示したバクテリアマットが対応していることから、バクテリアマットは窪地

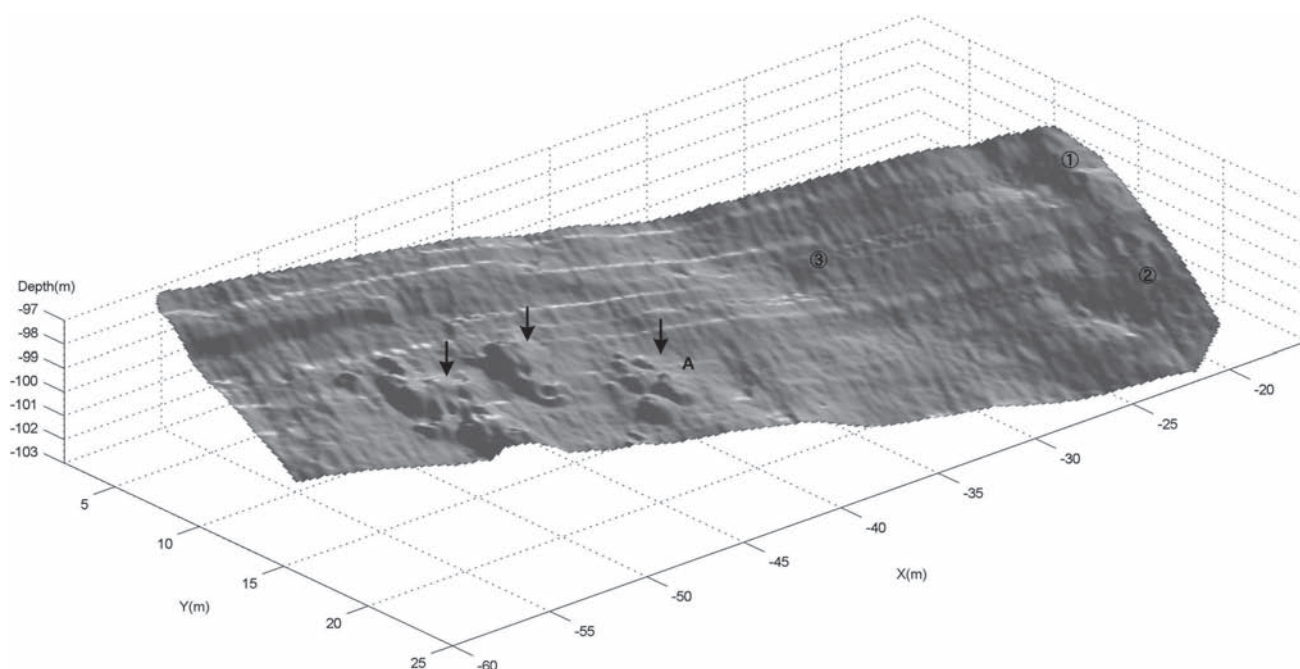


Fig. 29 3D Bathymetry of the vent area taken by the light-section ranging system. The mesh size is 0.1 m.

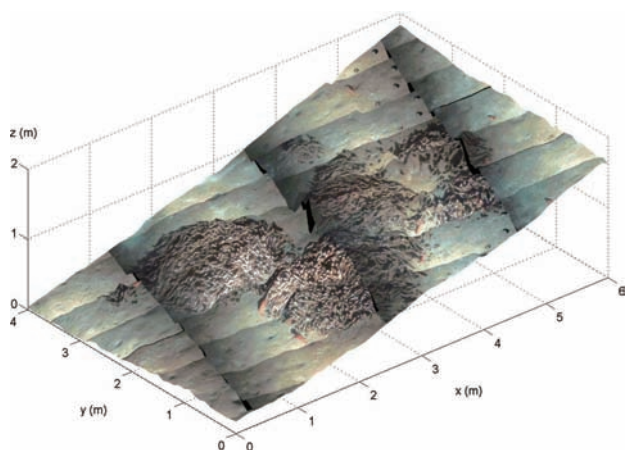


Fig. 30 3D reconstruction of the tube-worm colony shown as A in Fig. 29.

に多いことがわかる。

今後の課題としては、投入時の位置決め精度向上と撮影手法の改善、そして観測範囲の拡大が挙げられる。今回、反射材およびAUV投入時の位置決めには船上のGPSのみを用いたが、本船の位置は微調整が難しく、また降下中の外乱による着底位置のずれが避けられない。本研究で提案した観測ステージをランドマーク探索と画像観測という二段階に分ける手法は、深度に比例して探索範囲を拡大しなくてはならないため深海への適用には制限がある。SSBLなどの音響測位手法も測位精度は水深が深いほど悪くなるため、音響測位によらない手法が必要になる。

撮影手法の問題としてまずは照明が挙げられる。内蔵エネルギーに限られるAUVの場合フラッシュを用いる

のが望ましいが、本AUVに搭載したような市販の小型フラッシュは長時間の連続発光に向かないため発光間隔を長くせざるを得ず、これが撮影間隔のボトルネックとなっている。それでも図26のように発光不良が散見されるため、専用のフラッシュを開発することが望ましい。また、噴気の直上を通過した際に気泡がカメラのレンズに付着するとしばらくの間消えないため、モザイク画像に気泡による影が点々と残ってしまう。圧力容器の形状を工夫して水流が直接当たるようにする、ワイパーをつけるなどの工夫が必要であろう。図29を見るとAUVの状態推定の誤差やセンサのアライメントのずれ、測定誤差等によるマッピング誤差が側線方向あるいは側線と垂直方向に現れている。画像観測はレンジが短いため、広範囲のマッピングを行う場合にはプラットフォームの位置・姿勢やアライメントの精度に関する要求が音響観測に比べてシビアであるといえよう。

観測範囲を拡大するためには、プロファイラーの観測面内に海底地形などのランドマーク以外の固定物が存在してはいけないという条件が課題になる。平坦な海底面、あるいは本実験のように簡単な修正で対応できる場合はウェイポイントやランドマーク配置を工夫することで対応可能である。ランドマークが見えなくても誤差の増大はDVLとFOGによるデッドレコニング程度であるため、誤差が致命的なレベルに達する前にランドマークが見える領域に戻るようウェイポイントを設定すればよい。しかしながら、より大規模で複雑な起伏のある領域に適用するためには、プロファイラーの計測値から反射材と海底地形を切り分ける手法が必要になる。

7. まとめ

本研究では、海底面を面的に三次元画像マッピングするための手法として自律型水中ロボットを用いた手法を提案した。本手法においては海底に設置した鉛直棒状のランドマークをプロファイリングソナーにより発見し測位基準として用いることで、相対的ではあるがリアルタイムに高精度測位を実現する。そしてランドマークの種類・位置に応じて観測経路を動的に変更し、また複数の障害物センサを用いて起伏に富んだ海底面を1～2mの低高度で追従するための手法を組み合わせることで、環境に対してロバストかつ地球固定座標系における全自動観測を可能とする。本手法はランドマークとして人工物以外に海底から立ち上る噴気を利用できることから、従来音響測位の難しかった噴気帯調査へも適用可能である。

提案手法はAUV「トライドッグ1号」に実装され、2007年3月に鹿児島湾たぎり噴気帯において観測実験が行われた。本観測においてトライドッグ1号は160分以上の全自動観測に成功し、600平方mにおよぶ海底面の全自動画像マッピングを行った。そして観測中リアルタイムに得られた測位データから高精度なモザイク画像と3次元地形図を作成し、固有な生物であるサツマハオリムシをはじめバクテリアマット、噴気、微細地形などの3次元的な分布を明らかにした。

以上のように、本手法によって従来はほぼ不可能であった海底面の面的な3次元画像観測を全自動で行うことが可能となった。本手法は学術調査はもちろんのこと、水中土木工事やセキュリティ、環境調査、事故調査など幅広い分野への応用が期待される。また、画像観測にとどまらず化学物質や水質などの精密マッピングへの適用も考えられる。

謝 辞

観測を行うに当たり、東京大学海洋研究所 窪川かおる教授、海洋研究開発機構 藤原義弘プログラムディレクター、岡山大学 山中寿朗准教授および淡青丸第KT-07-03次航海スタッフの方々から多大なるご支援をいただいた。図1の海底地形図は海洋研究開発機構の研究航海(NT-05-12, 13)において取得された。AUVを調整、運用するにあたり能勢義昭助手をはじめとする東京大学生産技術研究所浦研究室の方々から多大なるご支援をいただいた。ここに深く感謝の意を表する。なお、著者の一人(巻)は日本学術振興会特別研究員(DC2)である。

参考文献

- Bailey, T., H. F. Durrant-Whyte : Simultaneous localization and mapping (SLAM) : Part II IEEE Robotics and Automation Magazine, (2006)
- Doucet, A., N. Freitas, N. Gordon: Sequential Monte Carlo Methods in Practice, Springer, (2001)
- Eustice, R.: Large-Area Visually Augmented Navigation for Autonomous Underwater Vehicles: PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology, (2005)
- 橋本惇, 藤倉克則, 三浦知之, 小坂丈予: 有光層におけるハオリムシの発見, しんかいシンポジウム報告書, p.321～326, (1993)
- 橋本惇, 藤倉克則, 藤原義弘, 谷島恵美, 三浦知之, 塚原潤三, 上野宏共, 根建心具, 安藤哲夫, 小坂丈予, 木川田喜一: 鹿児島湾におけるハオリムシ群集のマッピング, 第12回しんかいシンポジウム予稿集, p.110～111, (1995)
- 上嶋正人, 西澤あずさ, 西村清和, 岸本清行: 画像による深海近傍位置データの再構成について(NT03-14 航海: 水曜海山カルデラ), 海洋調査技術, 19, 1, p.1～8, (2007)
- 木下正高, 伊藤希, 赤司あき, 館川恵子: しんかい6500 潜航データを用いた熱水地帯の精密マッピング, JAMSTEC 深海研究, 14, p.661～669, (1998)
- Kondo, H., T. Ura, Y. Nose : Development of an autonomous underwater vehicle "Tri-Dog 1" toward practical use in shallow water: Journal of Robotics and Mechatronics, 13, 2, p.205～211, (2001)
- Kondo, H., T. Maki, T. Ura, Y. Nose, T. Sakamaki, M. Inaishi: Relative navigation of an autonomous underwater vehicle using a light-section profiling system, Proc. of IROS '04, p.1103～1108, (2004)
- 巻俊宏, 近藤逸人, 浦環, 能勢義昭, 坂巻隆: 自律型水中ロボットによる人工構造物の観測, 日本船舶海洋工学会論文集, 1, p.17～26, (2005)
- Maki, T., H. Kondo, T. Ura, T. Sakamaki: Navigation of an autonomous underwater vehicle for photo mosaicing of shallow vent areas, Proc. of OCEANS'06 Asia Pacific, (2006a)
- Maki, T., H. Kondo, T. Ura, T. Sakamaki: Photo mosaicing of Tagiri shallow vent area by the AUV Tri-Dog 1 using a SLAM based

- navigation scheme, Proc. of OCEANS'06 Boston, (2006b)
- 巻俊宏, 近藤逸人, 浦環, 坂巻隆: 自律型水中ロボット「トライドッグ1号」による鹿児島湾たぎり噴気帯の観測, Proc. of ROBOMECH '07, (2007a)
- Maki, T., H. Kondo, T. Ura, T. Sakamaki: Positioning method for an AUV using a profiling sonar and passive acoustic landmarks for close-range observation of seafloors, Proc. of Oceans '07 Europe, (2007b)
- Maki, T., T. Ura, H. Mizushima, H. Kondo, T. Sakamaki, M. Yanagisawa: Low altitude tracking of rugged seafloors for autonomous visual observation, Proc. of UT '07, (2007c)
- 松尾美明, 田賀傑: 「たぎり」と浅海用マルチビーム測深機, 海洋情報部技報, 22, p.73~77, (2004)
- 水島隼人, 巻俊宏, 浦環, 坂巻隆, 近藤逸人, 柳澤政生: 自律型水中ロボットによる噴気帯観測のための噴気と障害物の識別手法, Proc. of ROBOMECH '07, (2007)
- Negahdaripour, S., H. Madjidi: Stereovision imaging on submersible platforms for 3-D mapping of benthic habitats and sea-floor structures, IEEE Journal of Oceanic Engineering, 28, 4, p.625~650, (2003)
- Pizarro, O., H. Singh: Toward large-area mosaicing for underwater scientific applications, IEEE Journal of Oceanic Engineering, 28, 4, p.651~672, (2003)
- Richmond, K., S. Rock: An operational real-time large-scale visual mosaicking and navigation system, Proc. of OCEANS '06 Boston, (2006)
- Singh, H., J. Howland, O. Pizarro: Advances in large-area photomosaicking underwater, IEEE Journal of Oceanic Engineering, 29, 3, p.872~886, (2004a)
- Singh, H., R. Armstrong, F. Gilbes, R. Eustice, C. Roman, O. Pizarro, J. Torres: Imaging coral I: Imaging coral habitats with the SeaBED AUV, Subsurface Sensing Technologies and Applications, 5, 1, p.25~42, (2004b)
- Tetlow, S., R. Allwood: Development and applications of a novel underwater laser illumination system, Underwater Technology, 21, 2, p.13~20, (1995)
- Thrun, S., S. Thayer, W. Whittaker, C. Baker, W. Burgard, D. Ferguson, D. Hahnel, D. Montemerlo, A. Morris, Z. Omohundro, C. Reverte, W. Whittaker: Autonomous exploration and mapping of abandoned mines, IEEE Robotics and automation magazine, 11, 4, p.79~91, (2004)
- Ura, T., T. Obara, K. Nagahashi, K. Kim, Y. Oyabu, T. Sakamaki, A. Asada, H. Koyama: Introduction to an AUV "r2D4" and its Kuroshima Knoll survey mission, Proc. of OCEANS'04, p.840~845, (2004)
- Welch, G., G. Bishop: An introduction to the Kalman filter, SIGGRAPH 2001, (2001)
- 山下淳, 樋口裕和, 金子透, 川田善正: 光切断法による水中物体の3次元計測, 第21回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 2K21, (2003)
- Yoerger, D., A. Bradley, H. Singh, B. Walden, M. Cormier, W. Ryan: Multisensor mapping of the deep seafloor with the Autonomous Benthic Explorer. Proc. of UT '00, p.248~253, (2000)
- Yoerger, D., A. Bradley, B. Walden: The Autonomous Benthic Explorer (ABE): An AUV optimized for deep seafloor studies, Proc. of UUST '91, p.60~70, (1991)