

# 海底環境の精密マッピングに向けた 自律型水中ロボットのナビゲーション手法 鹿児島湾たぎり噴気帯の広域画像マッピング

## Navigation method of an AUV for detailed seafloor mapping

-Large-area photomosaicing of Tagiri vent field, Kagoshima Bay-

正 巻 俊宏 (東大生研) 正 近藤 逸人 (東京海洋大)  
正 浦 環 (東大生研) 正 坂巻 隆 (東大生研)  
水島 隼人 (早大) 正 柳澤 政生 (早大)

Toshihiro MAKI, Institute of Industrial Science, The University of Tokyo, maki@iis.u-tokyo.ac.jp

Hayato KONDO, Tokyo University of Marine Science and Technology

Tamaki URA, Institute of Industrial Science, The University of Tokyo

Takashi SAKAMAKI, Institute of Industrial Science, The University of Tokyo

Hayato MIZUSHIMA, Waseda University

Masao YANAGISAWA, Waseda University

This paper proposes an innovative method to navigate an autonomous underwater vehicle (AUV) for detailed visual seafloor mapping with high positioning accuracy without using any vision-based matching. The method consists of three parts, SLAM (Simultaneous Localization And Mapping), path-planning and terrain tracking. The method was implemented in the AUV Tri-Dog 1 and a series of experiments were carried out at Tagiri vent field, Kagoshima bay in Japan. The AUV succeeded in observation of interesting features of the field including bubble plumes, bacteria mats and tube-worm colonies through 12 fully autonomous dives, totaling 29 hours duration. Finally a photomosaic covering about 3,000 square meters was created.

**Key Words:** Autonomous Underwater Vehicle (AUV), SLAM, Navigation, Photomosaic

### 1. はじめに

海底面の画像観測は生物層や地質、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遠隔操縦ロボットや有人潜水艇による画像観測は極めて局所的であり、広範囲の面的な観測を行うことは非常に困難であった。この原因は水中における撮影可能距離の短さと測位精度の悪さである。海底環境の高解像度な写真撮影をするためには海底面まで1~2mの至近距離まで接近する必要がある。このため写真一枚あたりの撮影範囲は限られ、広範囲を画像化するためには複数の写真を貼り合わせる(モザイクング)必要がある。しかしながら水中では電波がほとんど使用できないためGPSが使えず、精密な測位が難しい。画像相関を用いる測位手法や貼り合わせ手法が提案されているが[1][2]、海底面に十分な視覚的特徴がなければ適用できない。

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。現在は音響による地形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、画像観測への応用に向けた研究が進められている[3][4]。

本研究ではプロファイリングソナーと静的な音響ランドマークを用いた自律型水中ロボット(Autonomous Underwater Vehicle, AUV)の測位・航法アルゴリズムを研究し、従来手法では困難であった海底面の全自動観測を行うための手法を提案する。そして実際のAUV Tri-Dog 1を用いた実海域実験によって提案手法の有効性を検証する。なお、手法および実験の詳細については文献[5][6]を参照のこと。

### 2. AUVによる全自動観測手法

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上記を実現するAUVのナビ

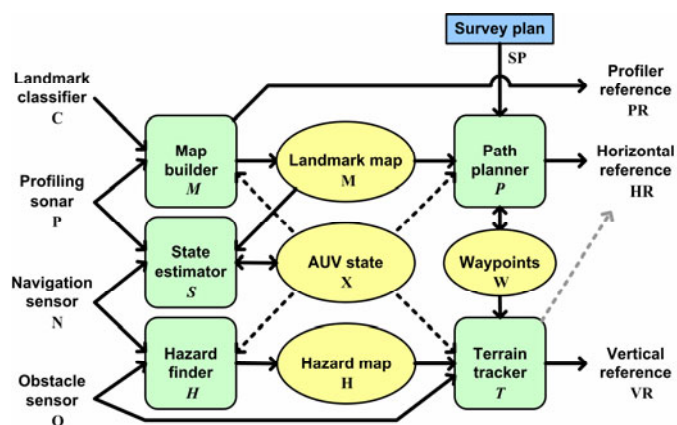


Fig. 1 Proposed software scheme for autonomous operation

ゲーション手法であり、図1のように速度、深度、姿勢、周辺物までの距離等のセンサ入力を受けて水平方向と鉛直方向の制御目標値を出力する。AUVはサージ、スウェイ、ヒープ、ヨーの4自由度が制御可能なホバリング型であるものとする。

第一のポイントは、測位に図2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)と静的な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ため高精度・高信頼性な測位が可能になる。また、ランドマークとして人工の音響反射材のほか自然の噴気を使えるため、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。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

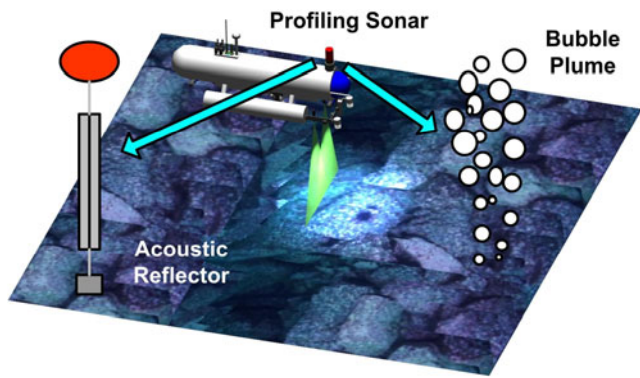


Fig. 2 AUV positioning based on a profiling sonar and passive acoustic landmarks.

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、複雑な海底地形に対して画像観測に適した低高度（1～2m）を保つことができる。

## 2.1 SLAM

AUVとランドマークの位置関係を事前に把握することは困難であるため、AUVは航行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[7]。

本手法においてSLAMは図1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情報とランドマーク情報から現在のAUV状態（AUV state）を推定する。水平位置と方位はパーティクルフィルタ[8]により確率的に推定する一方で、ロール角、ピッチ角、鉛直位置（深度あるいは高度）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。地図作成部はプロファイラ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。通常は360度の周回スキャンを行うが、新たなランドマーク候補が見つかったとその周辺を一定回数集中的にスキャンする。そして一定数以上の反応が得られたら、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経路計画の安定性およびリアルタイム処理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。

琵琶湖における実海域実験でTri-Dog 1によって作成された湖底のモザイク画像を比較したところ誤差が0.1～0.2メートル程度であり、画像観測に十分な性能が得られたことが確かめられた。また、人工反射材からの距離が30メートル程度であれば安定した測位ができることが確かめられた[5][9]。

## 2.2 経路計画

SLAMによって任意の位置・時間に発見されるランドマークに対処するために、経路計画器（Path planner）はランドマークの位置・種類に応じてリアルタイムにAUVの進路を変更する。

経路計画には短期計画と長期計画がある。短期計画は決められたウェイポイントを辿ることを基本とするが、発見されたランドマークの種類を識別し、人工反射材であれば衝突回避を行う。また、噴気であれば衝突しても問題ないため無視する。これを実現するために、三種類の制御モード（航行モード、観測モード、回避モード）をランドマークの位置・種類に応じて切り替える。長期計画はウェイポイントそのものを切り替える。ウェイポイントには探索用、観測用という二種類があり、どちらも事前に与えておく。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。確実に人工反射材を発見できるように、AUVのスタート地点や人工反射材の位置の不確実性を考慮して広範囲をカバーするように設定する必要がある。反射材が2つ見つかったら反射材基準の観測ウェイポイントへ移行する。これにより、外乱等によりAUVの投入位置がずれても反射材基準、即ち地球固定座標系基準の観測が可能となる。

人工反射材と噴気をそれぞれ2本設置して行われた水槽実験では、SLAMによって発見されたこれらのランドマークの種類を適切に識別し、人工反射材のみ衝突回避を行うことに成功した。また、人工反射材を基準とした経路を辿ることに成功した[10]。

## 2.3 地形追従

画像観測を行うには海底面に対して1～2m程度の至近距離を保ちながら移動する必要がある。高度センサによる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を向けた複数の障害物センサを用いることが望ましい。ただし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（Hazard map）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。

障害物探知部（Hazard finder）は複数の障害物センサを用いてハザードマップを作成する。地形追従部（Terrain tracker）はハザードマップを元に鉛直方向の制御目標値を出力する。制御方法には海底面からの高度を基準とする高度モードと海面からの深度を基準とする深度モードの二種類がある。通常はウェイポイント毎に指定された高度を保つ高度モードであるが、危険領域に入った場合に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いため、海面からの深度を制御する深度モードとなる。そしてセンサドリブンの反射的な回避法則により、AUV近傍に障害物を検知するたびに目標深度を浅くする。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。

水槽実験では、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[11]。



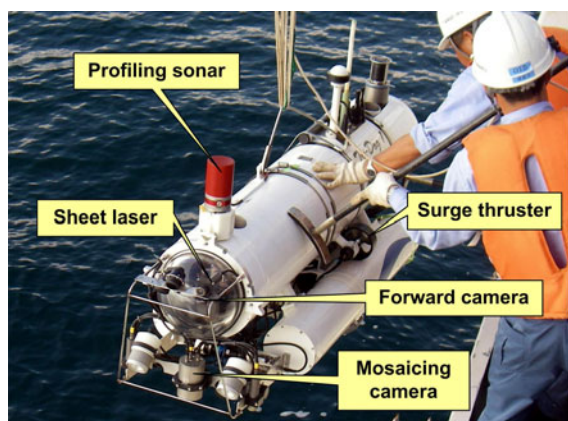


Fig. 3 AUV Tri-Dog 1 at the sea experiments

### 3. 実海域実験

提案手法の有効性を検証するために、AUV Tri-Dog 1 を用いて鹿児島湾たぎり噴気帯において実海域実験が行われた。実験場所は鹿児島湾奥部の海丘東斜面にあり、水深は 100m 前後である。本海域はサツマハオリムシを中心とする独自の生物群集が存在するため学術的価値が高く、これまでに有人潜水艇や遠隔操縦ロボットを用いた複数回の調査が行われている [12]。

#### 3.1 AUV Tri-Dog 1

AUV Tri-Dog 1 (図 3、表 1) は 1999 年に東京大学生産技術研究所海中工学研究センターで開発されたホバリング型の中口ロボットであり、6 台のスラスタによってサージ、スウェイ、ヒープ、ヨーの 4 自由度を制御することができる。以後、本稿では Tri-Dog 1 を AUV と呼ぶ。

航法センサとしては水平速度及び高度を計測するドップラ式対地速度計(Doppler Velocity Log, DVL)、機首方位の角速度を計測する一軸の光ファイバジャイロ(Fiber Optical Gyro, FOG)、ロール・ピッチを計測する姿勢方位基準器(Attitude Heading Reference System, AHRS)、水深計そしてプロファイラーを搭載している。これらのセンサ情報から提案手法によって自身の位置・姿勢をリアルタイムに推定する。障害物センサとしては 6 台の音響レンジセンサを備えている。また、機体前方にはランドマークの種類識別にシートレーザとカメラを備えている。観測装置としては前方、斜め下向き、そして下向きに 2 台の合計 4 台のカメラを装備している。海底面の画像マッピングには機体前部に真下を向けて搭載された 200 万画素のデジタルカラーカメラ (図 3 の Mosaicing camera) を用いる。

#### 3.2 手順

AUV の展開に先立ち、測位基準となる人工ランドマークを 2 本投入する。これは音波をよく反射するように十字の断面を持つ長さ 1m のアルミ柱を 10 本連結したものであり、錘とブイによって図 4 のように海底面から直立させる。AUV の全自動観測は図 4 のように複数のモードに分かれている。MODE10 ~ 40 では海底面近傍まで降下し、MODE50 および 60 で提案手法による観測活動を行う。海底面および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に MODE50 (ランドマーク探知) は海底面から高度 5m にて行う。そして人工ランドマークを二つ発見したあとは MODE60 とし、高度 1.2m で海底面の写真撮影を行うが新たなランドマークの

Table 1 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 AHRS400MA
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

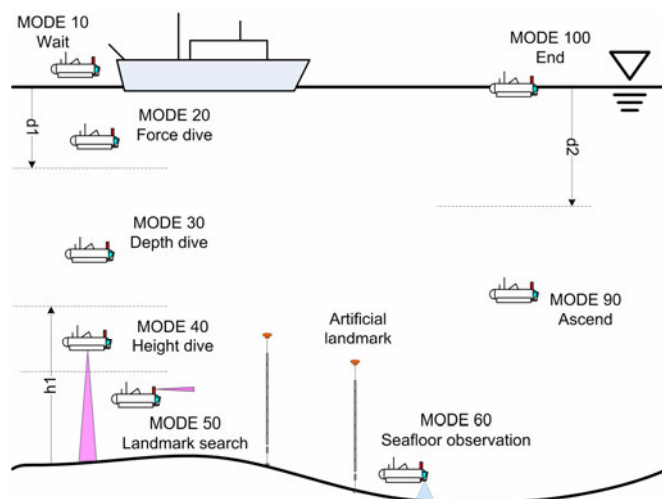


Fig. 4 Mission flow

探索は行わない。前進速度は MODE50 では 0.2m/s、MODE60 では 0.08m/s とする。ウェイポイントを全て通過するか、何らかの異常が発生した場合は直ちに浮上する。浮上後は無線 LAN による遠隔操縦によって母船まで誘導して回収する。AUV は無索・全自動で行動するが、安全のために音響リンクによって母船から AUV のステータスを監視する。

#### 3.3 結果

本実験に置いて AUV は全 12 回の安定した全自動観測に成功した。自律観測の時間は延べ 29 時間、距離は延べ 8,000 m に及ぶ。図 5 は画像観測に成功した潜行における AUV の航跡 (提案手法によるリアルタイム推定値) を、人工ランドマーク位置を基準に地球座標系上に記したものである。ランドマーク A,B,C が人工ランドマークであるが、第 10 潜行の前に A を C に移動したため、実際に存在したのは第 9 潜行までは A と B、第 10 潜行からは B と C のみである。

これらの潜航結果から図 6 の画像マップを作成した。画像マップの範囲は約 3,000 平方メートルで、使用された画像

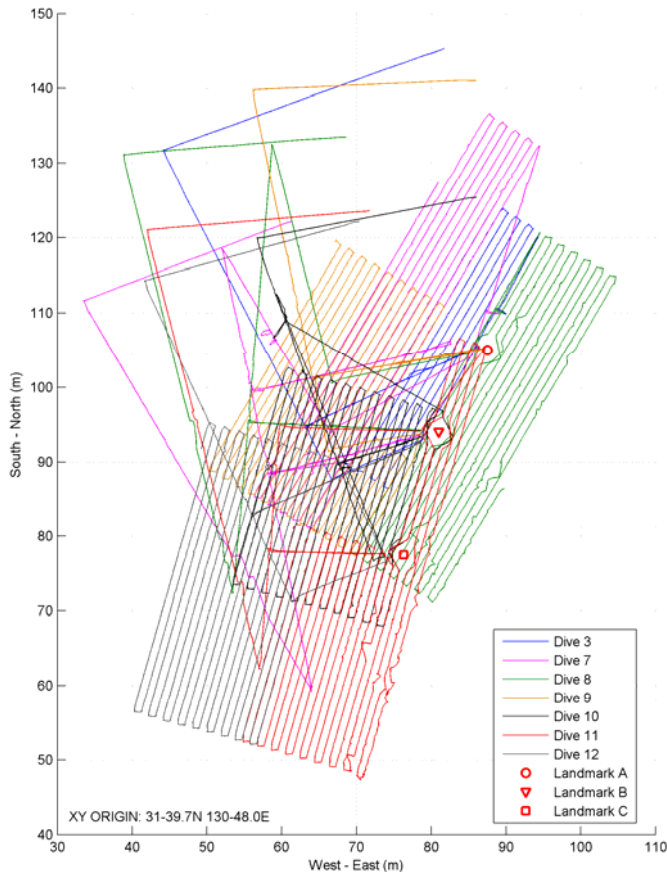


Fig. 5 Estimated trajectory of the AUV

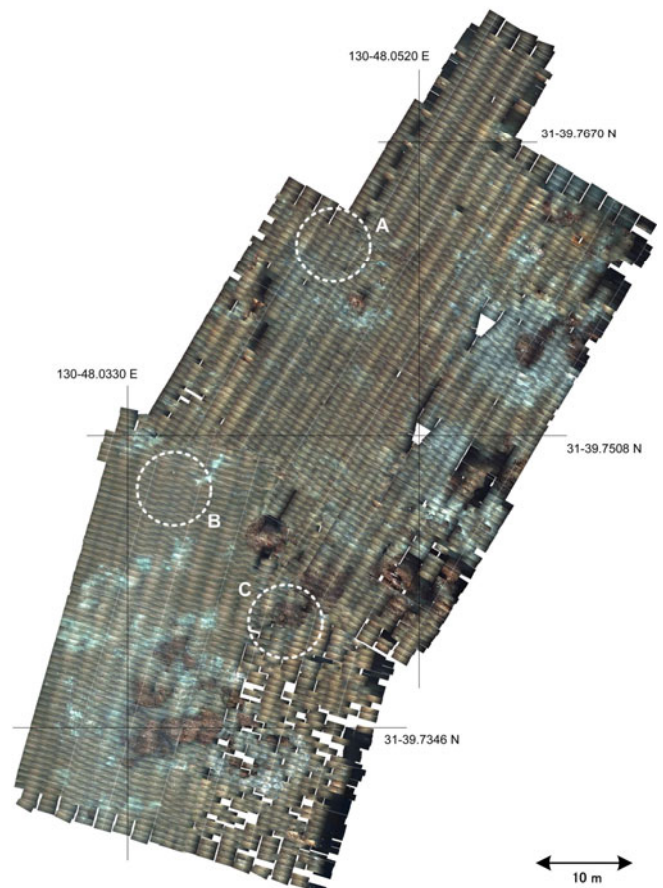


Fig. 6 Photomosaic of the vent field

は7,000枚に上る。写真の張り合わせにはAUVが航行中リアルタイムに推定・計測した情報のみを用い、画像相関による最適化は一切行っていないが、ハオリムシ群集やバクテリアマット(白い部分)等の分布を詳細に把握することができる。

測位精度を検証するために、図6の丸印A~Cの地点について潜行間の比較を行ったところ、相対誤差がそれぞれ0.53m(A)、0.36m(B)、0.81m(C)という結果を得た。この誤差はランドマーク発見、自己位置推定、経路計画、画像の張り合わせを含めた提案手法全体の精度を意味する。この結果は画像マッピングを行うために十分なものであり、ここに観測手法の有効性が検証された。

#### 4. おわりに

本研究により、海底面の全自動観測手法としてAUVによる観測手法を提案することができた。また、提案手法の有効性を実際のAUVを用いた実海域実験によって検証することができた。本手法は海底噴気帯の調査のみならず、海底考古学調査、捜索・救助、セキュリティ、水中土木工事など数多くの分野へ応用されることが期待される。

#### 謝 辞

実験を行うにあたり、東京大学海洋研究所の窪川かおる教授、海洋研究開発機構の藤原義弘プログラムディレクター、岡山大学の山中寿朗准教授ならびに淡青丸KT-07-20次航海スタッフの方々からご支援を頂いた。厚く御礼申し上げます。

#### 文 献

- [1] R. Eustice, "Large-area visually augmented navigation for autonomous underwater vehicles," Ph. D thesis, MIT, 2005.
- [2] H. Singh, J. Howland and O. Pizarro, "Advances in large-area photomosaicking underwater," *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 29(3), pp.872-886, 2004.
- [3] H. Singh, *et al.*, "Imaging coral I: Imaging coral habitats with the SeaBED AUV," *Subsurface Sensing Technologies and Applications*, 5(1), pp.25-42, 2004.
- [4] 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, pp.17-26, 2005.
- [5] 巻俊宏、海底環境の全自動観測の研究、東京大学博士論文, 2008.
- [6] 巻俊宏、近藤逸人、浦環、坂巻隆、水島隼人、柳澤政生、"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," *海洋調査技術*, 20(1), 2008. (in press)
- [7] H. Durrant-Whyte and T. Bailey, "Simultaneous localization and mapping (SLAM): Part I," *Robotics and Automation Magazine*, 13(2), pp.99-110, 2006.
- [8] S. Thrun, D. Fox, W. Burgard and F. Dellaert, "Robust Monte Carlo localization for mobile robots," *Artificial Intelligence*, 128, pp.99-141, 2001.
- [9] T. Maki, H. Kondo, T. Ura and T. Sakamaki, "Positioning method for an AUV using a profiling sonar and passive acoustic landmarks for close-range observation of seafloors," *Proc. of IEEE OCEANS'07 Europe*, 2007.
- [10] T. Maki, H. Mizushima, H. Kondo, T. Ura, T. Sakamaki and M. Yanagisawa, "Real time path-planning of an AUV based on characteristics of passive acoustic landmarks for visual mapping of shallow vent fields," *Proc. of IEEE OCEANS'07 Vancouver*, 2007.
- [11] T. Maki, T. Ura, H. Mizushima, H. Kondo, T. Sakamaki and M. Yanagisawa, "Low altitude tracking of rugged seafloors for autonomous visual observation," *Proc. of Underwater Technology'07*, 2007.
- [12] 橋本惇ほか、"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, pp.110-111, 1995.