

論文の内容の要旨

論文題目 海底環境の全自動観測の研究

氏 名 卷 俊 宏

はじめに

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 を用いた水槽実験及び実海域実験を通して提案手法の有効性を検証する。

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。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[1][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 (Fig. 1) は速度、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。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。

第一のポイントは、測位に Fig. 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、画像観測に十分な測位精度を得ることができる。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。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。

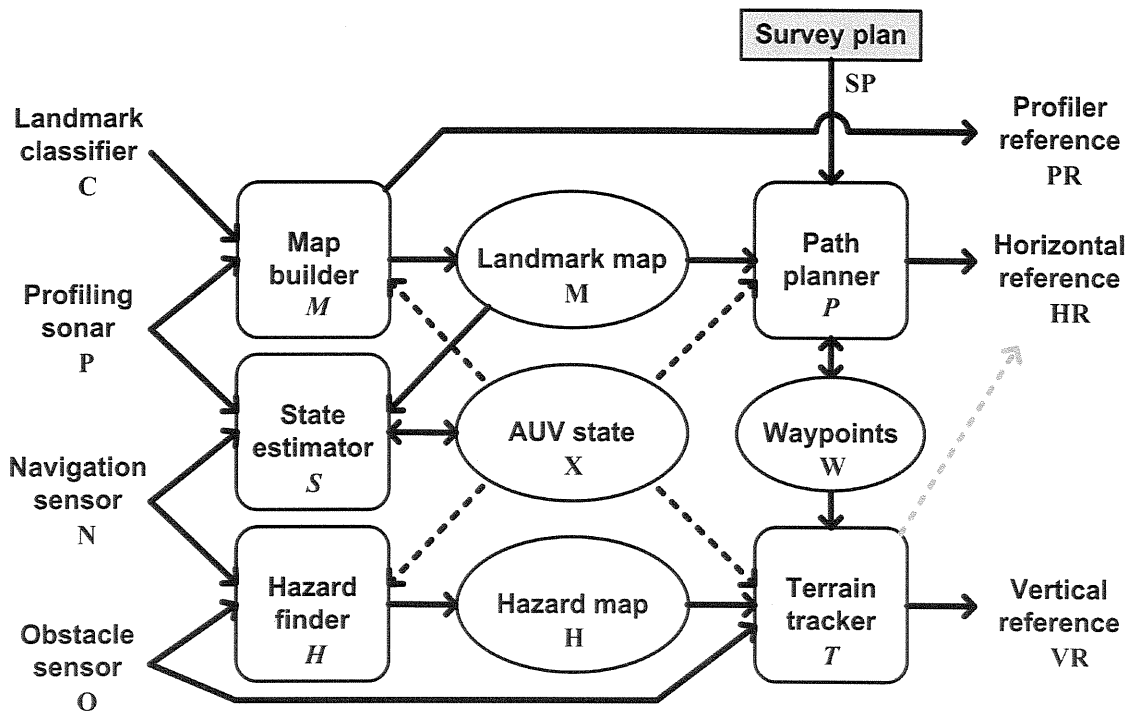


Fig. 1 Proposed software scheme for autonomous operation.

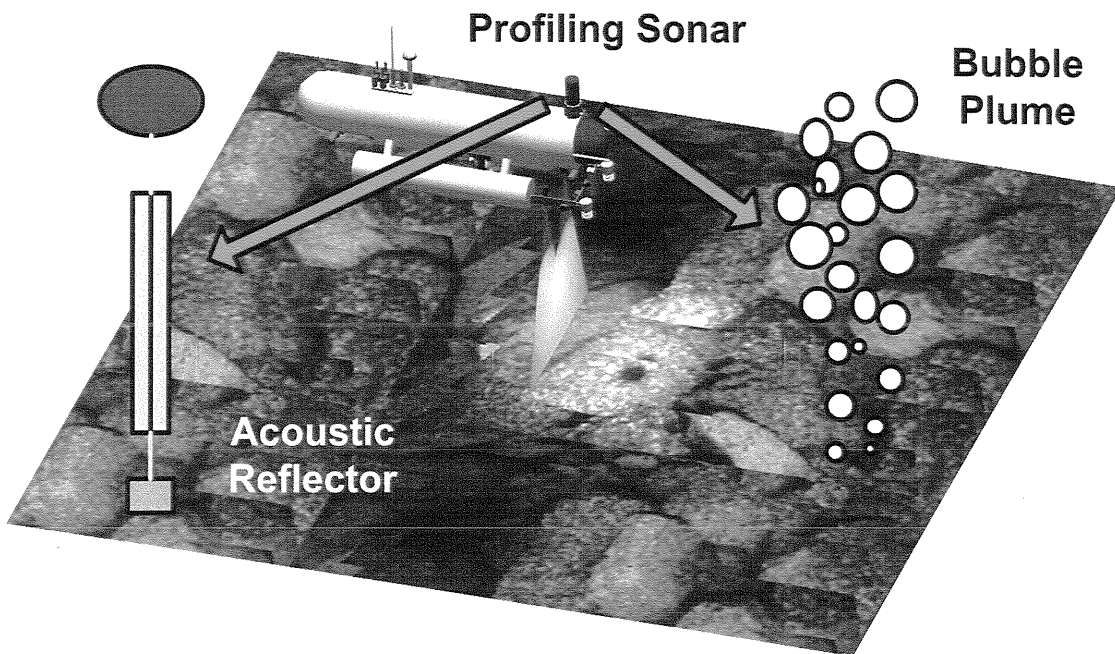


Fig. 2 AUV positioning based on a profiling sonar and passive acoustic landmarks.

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[3]。

本手法において SLAM は Fig. 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[4]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。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る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。

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更新する。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

エイポイントであり、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を辿る間に人工反射材を発見できないと画像観測に移れないため、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を可能とする。

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。

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つ必要がある。しかし高度計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によるロバストな地形追従を行うことが望ましい。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の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。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。

実海域実験

三種類の手法(SLAM、経路計画、地形追従)は全てTri-Dog 1に実装され、鹿児島湾たぎり噴気帯において実海域実験が行われた。実験場所は活発な噴気が存在するため従来の音響測位が困難であり、また海底面には斜面やハオリムシ群集による起伏が存在する。実

海域実験において、Tri-Dog 1 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。そしてこれらの潜航で得られたデータから Fig. 3 に示す海底面の詳細な画像マップを作成することに成功した。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。また、各潜航ごとに作成された画像マップの誤差が 0.6 m 程度であることが確認された (Fig. 4)。この誤差はランドマーク発見、自己位置推定、経路計画を含めた提案手法全体の測位誤差を意味する。本実験により観測手法の有効性が検証された。

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。

参考文献

- [1] H. Singh, R. Armstrong, F. Gibes, R. Eustice, C. Roman, O. Pizarro and J. Torres, "Imaging coral I: Imaging coral habitats with the SeaBED AUV," *Subsurface Sensing Technologies and Applications*, 5(1), pp.25-42, 2004.
- [2] 卷俊宏、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建造物の観測," *日本船舶海洋工学会論文集*, 1, pp.17-26, 2005.
- [3] H. Durrant-Whyte and T. Bailey, "Simultaneous localization and mapping (SLAM): Part I," *Robotics and Automation Magazine*, 13(2), pp.99-110, 2006.
- [4] S. Thrun, D. Fox, W. Burgard, F. Dellaert, "Robust Monte Carlo localization for mobile robots," *Artificial Intelligence*, 128, pp.99-141, 2001.

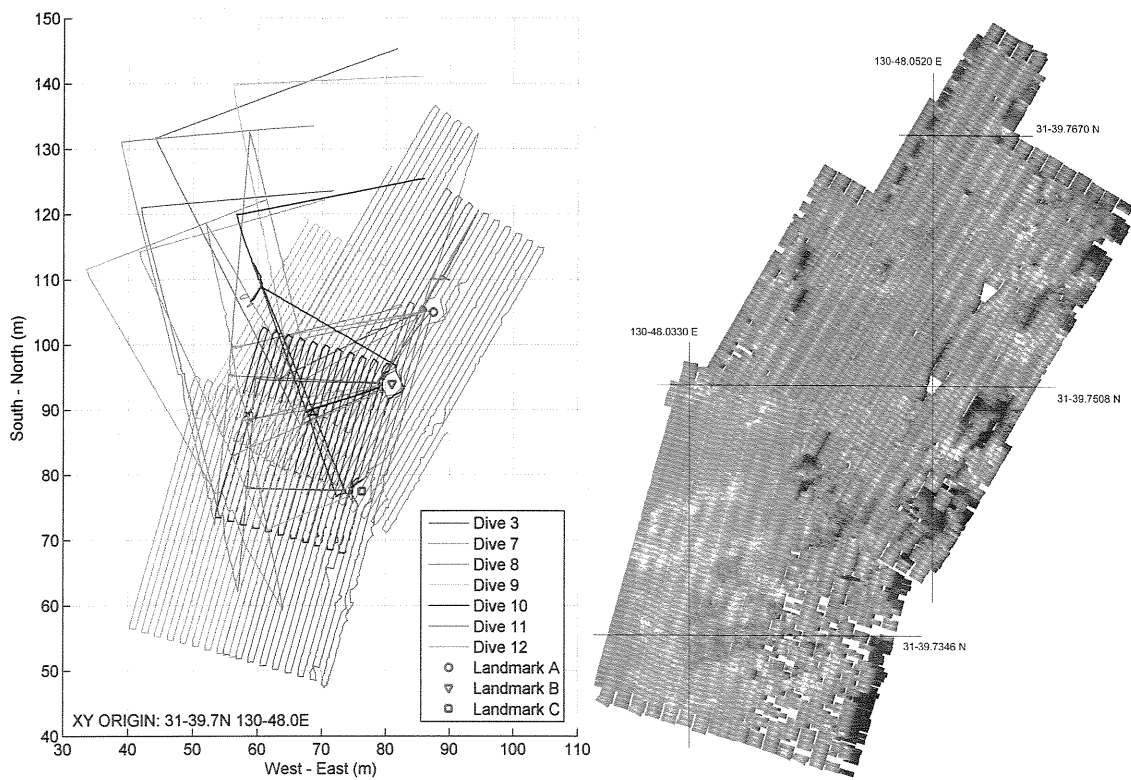


Fig. 3 Results of the sea experiments. Left: Estimated trajectory of the AUV Tri-Dog 1. Right: Photomosaic of the seafloor with a 30 x 30 m grid.

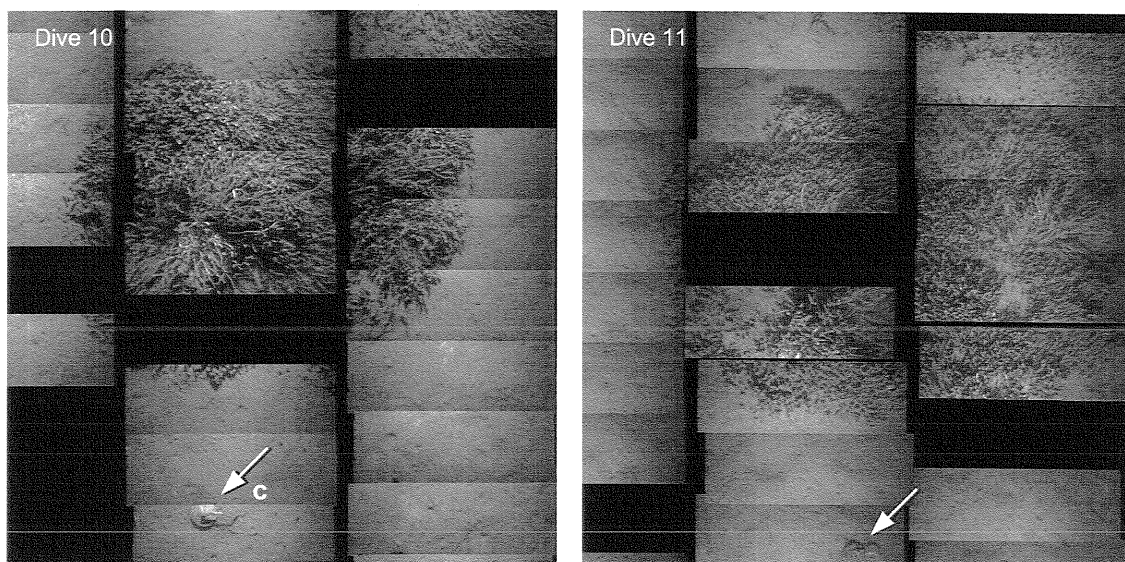


Fig. 4 Comparison of the photomosaics between two dives. Each figure shows the same part of the photomosaic obtained by each dive. The size is 5 x 5 m. The objects indicated by the arrows are the same one.