

# 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\*

ーリアルタイム撮影度評価に基づく観測経路生成ー

**AUV navigation for imaging rough terrain effectively**

**Real-time quality evaluation and path-planning**

久米絢佳 (東大) 巻俊宏 (東大)

浦環 (東大)

Ayaka KUME, The University of Tokyo, kume@iis.u-tokyo.ac.jp

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

Tamaki URA, The University of Tokyo, ura@iis.u-tokyo.ac.jp

Although autonomous underwater vehicles(AUVs) can perform seafloor imaging, it is difficult to evaluate the results on site. Therefore the obtained image map often has omissions caused by occlusions, disturbance, and so on. In order to improve the coverage of the map, the operator have to plan the new path and then deploy the AUV again. It is quite time-consuming and troublesome. The authors propose a navigation scheme for AUVs to obtain a making full-coverage 3D image of seafloor with single deployment. First, an AUV observes the seafloor by following a pre-determined path. Second, the AUV calculate the following things on site based on the obtained data: 3D bathymetry map, uncovered areas on the map, and the next path which can image the uncovered areas effectively. Then, the AUV follows the new path to obtain better results. The performance of this method was verified by tank experiments using the AUV Tri-TON.

**Key Words** : AUV, path-planning, 3D image mapping

## 1. 研究背景と目的

海底計測には主に音響が用いられているが、より高分解能を求める場合や色情報が必要な場合には画像観測が向いている。AUV(Autonomous Underwater Vehicles)は、全自動での運用が可能であるため効率的に広範囲の画像観測を行うことができる。また、海底資源の観点から注目されている熱水鉱床調査においても実際に画像観測が活用されている。従来の画像観測用 AUV は下向きのカメラを搭載し、ジグザグの決められた経路を通り海底を撮影するため複雑な海底ではオクルージョンが生じたり、あるいは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発生することがある<sup>(3)</sup>。その場合浮上後に画像の抜けを確認し、経路計画を行い再投入しなければならない。

そこで本研究では AUV が潜行中に撮影箇所未撮影箇所をリアルタイムに判定し、未撮影箇所を効率的に撮影する再観測経路を生成することで、一度の展開で漏れの少ない画像観測を行う手法を提案する。そして 2 台のカメラを搭載した AUV Tri-TON を用いた水槽実験により提案手法の実用性を示す。

## 2. 提案手法の概要

本手法の前提条件は 3 点である。第一に AUV は前進、上下移動、その場回転が可能なホバリング型とする。第二に AUV は 1 台以上のカメラと地形計測用のセンサーを持つものとする。最後に、AUV には環境に適した自己位置推定・障害物回避が疾走されているものとする。提案手法の概要を Fig.1 に示す。まず、あらかじめ決められた経路を通して撮影と地形計測を行う(①初期観測フェーズ)。次に得られた地形情報から 3 次元メッシュを作成し AUV との位置関係および画像撮影情報を元にそれぞれのメッシュが撮影できているかどうかを判別する(3 章:撮影度判定)。そして未撮影メッシュを撮影する経路を生成(4 章:経路計画)する(②計算フェーズ)。最後に生成された経路に沿って再観測を行う(③再観測フェーズ)。

## 3. 撮影度判定手法

**3-1 メッシュの生成** 初期観測フェーズ終了時に、地形計測によって得られた点群から 3 次元メッシュを構築する。まず、他の点との関係や Sun の手法<sup>(1)</sup>によってノイズを除去する。次にドロネーの三角形分割

によって3次元メッシュを生成する。Quaderic error metrics 法により点の数を削減する。最後に閾値より長い辺を持つメッシュを分割する。

**3.2 メッシュの撮影度判定** 概要を Fig. 2 に示す。各画像そのものと、各画像撮影時のカメラの位置姿勢情報を元に、撮影済みかどうかをメッシュ毎に判定する。具体的には次の5つの条件を満たす画像がある場合、当該メッシュはその画像によって撮影されているとみなす。メッシュの重心座標を  $\mathbf{m}$ 、法線ベクトルを  $\mathbf{n}$ 、撮影時のカメラ位置を  $\mathbf{p}$ 、カメラの視線の中心軸ベクトルを  $\mathbf{c}$  とする。

- [a] 画像は正常に撮影されている。
- [b] 直線距離:  $d = \|\mathbf{m} - \mathbf{p}\| < d_{\max}$  (Fig.2 ①)
- [c] 画像中での位置:  $|\frac{c_z}{c_x}| < h_{\max} \cap |\frac{c_y}{c_x}| < v_{\max}$  (Fig.2 ②) ただし、カメラ座標系でのメッシュの重心は  $(^c x_m, ^c y_m, ^c z_m)$  とする。
- [d] カメラに対する向き:  $|\frac{\mathbf{n} \cdot \mathbf{c}}{\|\mathbf{n}\| \|\mathbf{c}\|}| > s_{\min}$  (Fig.2 ③)
- [e] カメラとの間に他のメッシュが無い (Fig.2 ④)

#### 4. 経路計画手法

手法の目的は、撮影度判定によって判明した未撮影メッシュを少ない移動コストで観測するための経路を求めることである。経路は水平位置  $x, y$  と水深  $z$  および方位  $\psi$  からなるウェイポイントの集合とする。概要を Fig.3 に示す。まずは未撮影メッシュを位置によってグループに分割する。その際に未撮影メッシュの総面積が閾値より小さいグループは削除する(①)。次に各グループ内でウェイポイントとそれらを結ぶ経路を生成する(②)。グループ間での経路を求め(③)、最後に経路の改善を行う(④)。計算量に制約があるため最適解ではなく、AUV の活動時間内に無理なく求められる近似解を求める。

**4.1 グループ内経路計画** グループ内の経路計画では、まず未撮影メッシュを撮影するカメラの位置(撮影点)を求めそれらを通る経路を生成し、AUV の位置(ウェイポイント)を決定していく。

**4.2 撮影点の生成** 初めにそれぞれの未撮影メッシュ  $M_i(x_i^m, y_i^m, z_i^m)$  に対して適切な撮影点  $p_i(x_i, y_i, z_i, \psi_i)$  を求める。撮影点を満たすべき条件は、当該メッシュをカメラの中心で捉えること、メッシュとの距離があらかじめ指定する撮影距離  $D$  であること、そして3.2の条件 d, e を満たすことである。ここではカメラは前向きと鉛直下向きにそれぞれ1台ずつあるものとする。下カメラは方位の制約がないためウェイポイントの自由度が高く、結果として低コストな観測経路を生

成できることが期待されるため下カメラの撮影点を優先する。下カメラで撮影点が見つからなければ前カメラで探しどちらも見つからない場合は観測不能とする。前向きカメラでの撮影点は以下の式で求められる。

$$x_i = x_i - D' \cos \phi \quad (1)$$

$$y_i = y_i - D' \sin \phi \quad (2)$$

$$z_i = z_i^m + D \sin(c_a) \quad (3)$$

$$\psi_i = -\frac{|m_x|}{m_x} \arctan \frac{m_y}{m_x} \quad (4)$$

$$D' = D \cos(c_a) \quad (5)$$

ただし、 $(m_x, m_y, m_z)$  は  $M_i$  の法線ベクトルの成分であり、 $c_a$  はカメラのピッチ角である。

**4.3 撮影点の選別** 撮影点の選択基準はいかに少ない撮影点数で多くのメッシュを撮影できるかである。Algorithm 1 に示すような方法に従ってウェイポイントを決定する。ただし、 $\text{evaluate}(i, j)$  は撮影点  $p_i$  で未撮影メッシュ  $M_j$  が撮影できれば  $s_{ij} = 1$ 、撮影できなければ  $s_{ij} = 0$  とする関数である。可否は撮影度判定手法と同じ条件により判定する。 $p_i$  における撮影可能メッシュ数  $t_i = \sum_j^n s_{ij}$  とする。また、 $M$  を撮影すべき最低メッシュ数とする。

**4.4 経路生成** 次に、グループ内での経路計画を行う。即ち先述のように選別された撮影点の順番を決め、撮影点ごとにウェイポイントを生成する。撮影点  $w_i$  から  $w_j$  に移動する際のコストを  $c_{ij}$  は、 $w_i$  と  $w_j$  の  $xy$  方向の距離を  $a_{ij}$  と、 $w_j$  において回転する角度を  $b_{ij}$  としたとき定数  $W$  を用いて、 $c_{ij} = a_{ij} + W b_{ij}$  と表せる。この問題の実行可能解を求めるために、以下の方法で順番を決定する。

1. 撮影点群の重心から最も離れた撮影点をスタート地点とする。
2. 通っていない撮影点の中で現在地から最も低コストで行ける点を次の地点とし、ウェイポイントを決定する。
3. 2を繰り返し全ての撮影点を通れば終了。

**4.5 グループ間の経路計画** 最後にグループの順番を決める。計算の簡単化のために、各グループのスタート地点とゴール地点だけを考える。実行可能解を求めるために、以下の方法で決定する。

1. AUV の現在地点をスタート地点とする。
2. まだ通っていないグループの中で現在地(ゴール地点)から最も低コストでスタート地点へ行けるグループを次のグループとする。
3. 2を繰り返し全てのグループを通れば終了。

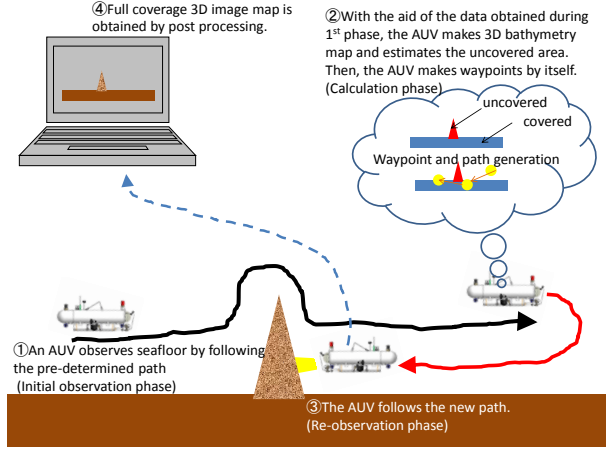


Fig. 1 Outline of the method

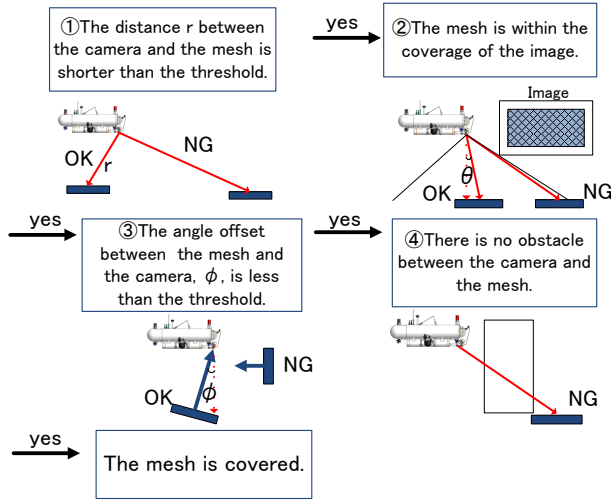


Fig. 2 Outline of mesh evaluation

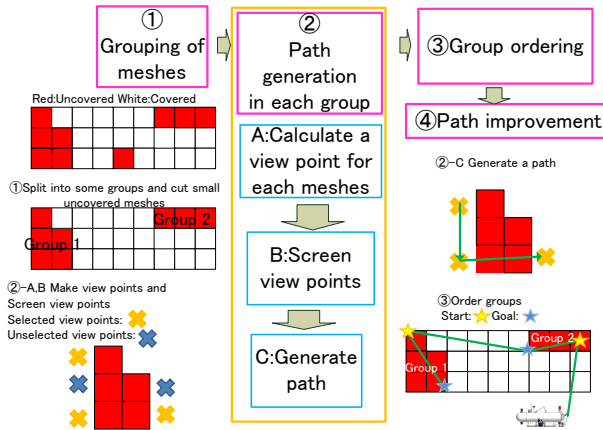


Fig. 3 Outline of path planning

4.6 経路の改善 最後に計算量を考慮した経路の改善を行う．ウェイポイント数が少数の場合は全探索で最短経路を求める．それ以外の場合は 3-opt 法を応用した手法で一度生成された経路を改善する．

### Algorithm 1 Screen view points

```

# Initialization
for  $i = 0$  to  $N$  do
  for  $j = 0$  to  $N$  do
     $s_{ij} = \text{evaluate}(i, j)$ 
  end for
end for
for  $i = 0$  to  $N$  do
   $t_i = 0$ 
  for  $j = 0$  to  $N$  do
     $t_i += s_{ij}$ 
  end for
end for
# Screen view points
while  $\max(t) < M$  do
   $k = \arg\max_i t_i$ 
  Select  $k$  as view point
  for  $i = 0$  to  $N$  do
    for  $j = 0$  to  $N$  do
       $s_{ij} = (1 - s_{kj})s_{ij}$ 
    end for
  end for
  for  $i = 0$  to  $N$  do
     $t_i = 0$ 
    for  $j = 0$  to  $N$  do
       $t_i += s_{ij}$ 
    end for
  end for
end while

```

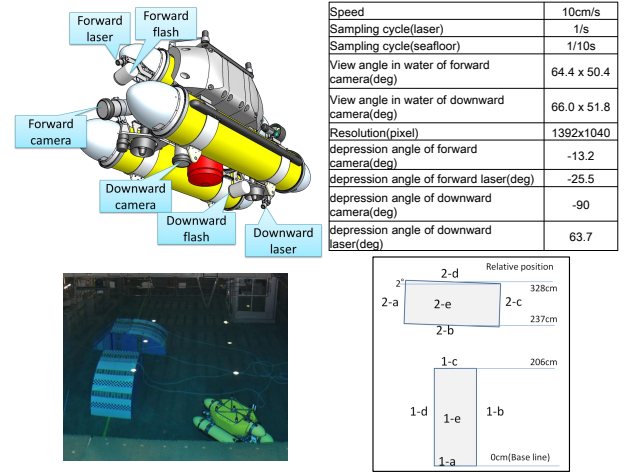


Fig. 4 AUV Tri-TON and targets

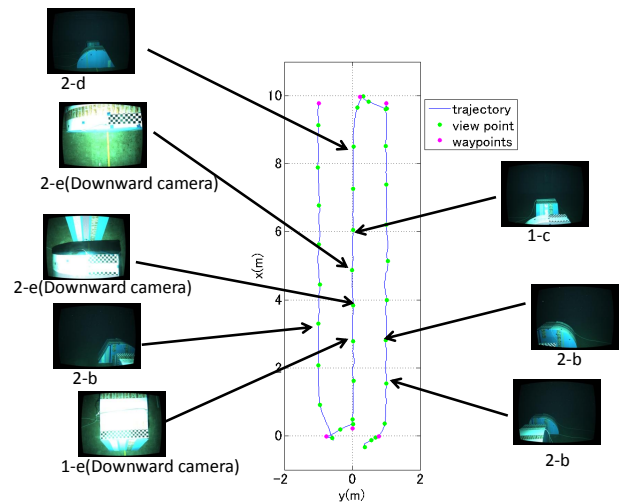


Fig. 5 Trajectory of initial observation phase

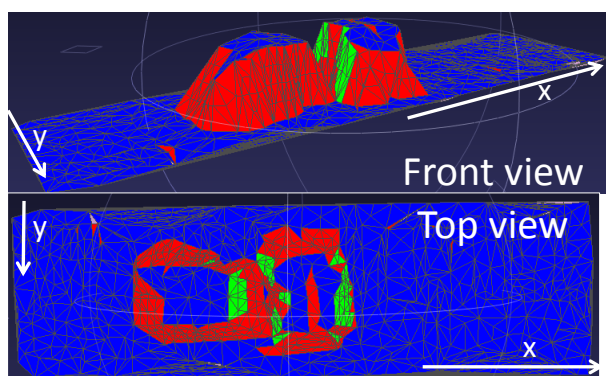


Fig. 6 Results of mesh evaluation after initial observation Blue: covered by the downward camera Green: by the forward one Red: uncovered

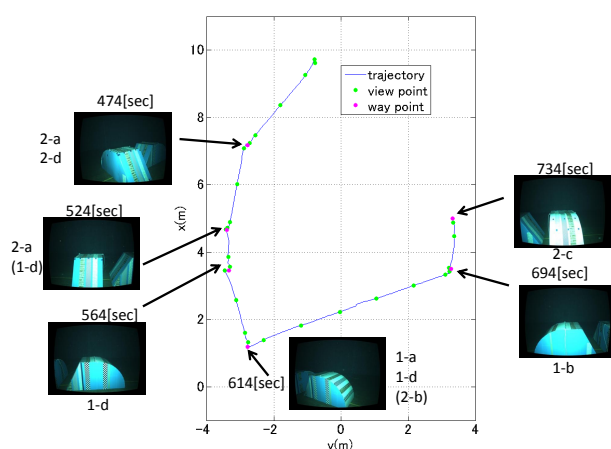


Fig. 7 Trajectory of re-observation phase

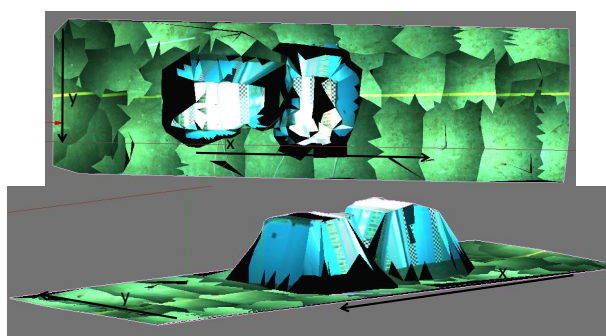


Fig. 8 Texture mapping results

## 5. 水槽実験

2011 年 12 月海洋工学水槽にて提案手法の検証実験を行った。使用した AUV は東京大学生産技術研究所巻研究室にて開発された Tri-TON<sup>(2)</sup>である。地形情報については、写真撮影用のカメラとシートレーザを用いて光切断法により求めた。AUV と撮影対象物の概要を Fig. 4 に、初期観測フェーズの撮影経路と撮影した写

真を Fig.5 に示す。撮影度判定の結果を Fig. 6 に示す。各種パラメータについては、 $d_{max} = 4000$ ,  $h_{max} = 0.47$ ,  $v_{max} = 0.38$ ,  $s_{min} = 0.71(45deg)$  とした。カバー率を全体のメッシュに対する撮影されたメッシュの面積と定義した時、カバー率は 73%, 前カメラのカバー率は 6%であった。なお、青が下カメラで緑が前カメラで撮影されたメッシュであり、赤は未撮影を表している。以下も同様の色分けを用いる。生成した経路とそこで撮影した写真を Fig.7 に示す。テクスチャマッピングの結果を Fig.8 に示す。

計算フェーズにかかった時間は 50 秒であり、実海域でも十分に使用できる速度であると言える。また、再観測の結果カバー率は 82%, 前カメラのカバー率は 15%となった。18%撮影漏れが生じたのは、安全策により低高度で撮影できなかったこと、ノイズ除去過剰で正しいメッシュが生成されなかったこと、生成ウェイポイント数の閾値(最低撮影メッシュ数 15)を上げすぎたことが原因である。安全策がなかった場合のシュミレーション結果ではカバー率は 88%となった。しかし Fig.6, Fig.7 から未撮影箇所のみを撮影するウェイポイントが生成されていることがわかり、経路計画手法が効果を発揮していることがわかる。

## 6. 結論と今後の課題

本論文では AUV による画像マッピングをリアルタイムの 3 次元メッシュ生成、画像評価、経路計画によって実現する手法の提案を行った。水槽実験により提案手法が実際に従来手法だけでは撮影漏れができる地形において有効であることが示された。今後は、各種パラメータの値を地形の複雑さや対象領域の広さなどに対応して検討する必要がある。

## 文 献

- (1) X. Sun, P.L. Rosin, R.R. Martin, and F.C. Langbein. Fast and effective feature-preserving mesh denoising. *IEEE Trans. Visualization and Computer Graphics*, Vol. 13, No. 5, pp. 925–938, 2007.
- (2) 巻俊宏, 松田匠未, 小島淳一ほか. 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. 日本海洋工学会・日本船舶海洋工学会, 2011.
- (3) 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.