

# PS-3 複雑海底地形照合による AUV 自己位置推定手法

海洋先端技術系 \* 佐藤 匠, 金 岡 秀

## 1. はじめに

自律型水中ロボット(Autonomous Underwater Vehicle, 以下 AUV)は、搭載された人工知能による高度な運動制御により、効率的な海底資源調査が可能である。海上技術安全研究所では、戦略的イノベーションプログラム (SIP) において、複数機の AUV を開発し、隊列制御による効率的な海底調査手法について研究してきた<sup>1)</sup>。

AUV には慣性航法装置とドップラー流速計 (以下 DVL) が搭載されており、センサーから取得した速度・姿勢から自己位置を計算する。しかしながら、時間経過によって蓄積する位置誤差は、AUV の安全性及び取得データの信頼性に悪影響を与えてしまう。よって一般的な運用手順では、目標深度へ到達後にその場で定点待機もしくは旋回待機させ、洋上からの音響測位・通信によって自己位置を補正する。しかしながら、音響測位・通信による補正には精度・安定性において課題が多い。AUV 本体のみで自己完結するナビゲーションシステムの実現のためには、リアルタイムセンサー情報に基づいた高精度の自己位置推定手法が必要となる。

地形情報を利用して自己位置を推定する手法として誘導ミサイル等の飛行体に利用されている TERCOM(Terrain Contour Matching)<sup>2)</sup>は、水中においても有効な手法として着目され研究が進められてきた<sup>3)</sup>。これは、予め持っている地形情報と、リアルタイムに計測する地形情報を照合することで正確な自己位置を推定する手法である。先行研究では、海底地形計測センサーとして MBES (Multi Beam Echo Sounder)<sup>3)</sup>やプロファイリングソナー等、高精度なソナーを用いたものがある。しかしながら、海底計測センサーが限定されると汎用性が失われてしまい、搭載機器が異なる AUV 間での実装が難しい。さらに、TERCOM 自体の根本的な問題として、調査海域の海底地形が単調であった場合に、位置推定精度が大きく下がってしまう点がある。単調な地形から絶対位置を探索する場合、類似した地形が複数候補として発生してしまい、計算時間の増大や位置推定精度の低下を招く。

そこで本研究では、地形計測センサーを高度計として使用可能な DVL のみに限定することで汎用性を確保する。さらに、潜航前に調査域内で地形照合しやすい場所を選定するフェーズを組み込むことで位置推定精度の向上を図る。提案手法では、海底付近到達後の待機時間において地形照合・位置推定を行う。図-1 に従来の自己位置補正手法と提案手法の比較を示す。

## 2. 提案手法

図-2 に提案手法の流れを示す。提案手法は、大きく分けて①潜航前と②潜航中の2つのフェーズに分けられる。

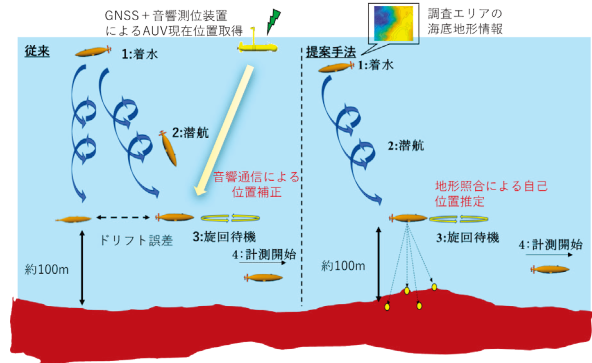


図-1 従来の自己位置補正手法と提案手法の比較

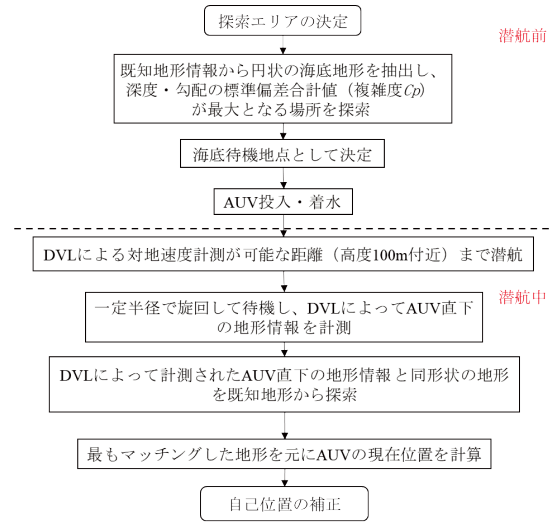


図-2 提案手法の流れ

①では、既知の海底地形情報から複雑な地形を探索し、位置推定を行う場所を決定する。まず、計測エリア全域に対して、円状地形を格子点毎にずらしながら抽出する。抽出された円状地形において、全ての点に対して隣接点の X 方向の勾配・Y 方向の勾配を計算し、その標準偏差を求める。得られた標準偏差を式(2.1)に基づいて加算した結果を地形複雑度  $C_p$  (式(2.1)) と定義し、全域に対して計算することで、最も地形複雑度の高い地形を選定する。

$$C_p = W_d * STD(z) + W_g * STD\left(\frac{\delta z}{\delta x}\right) + W_g * STD\left(\frac{\delta z}{\delta y}\right) \quad (2.1)$$

$x, y, z$  は点群の位置座標,  $STD$  は、括弧内の標準偏差を示す。 $W_d, W_g$  は深度, 勾配の標準偏差に対する重み係数とする。

次に、②では海底付近 (高度 100m 程度) において一定半径・一定深度で旋回させる。DVL は、機体固定座標系  $X_r, Y_r$  平面 (前方:  $X_r$ , 右舷方向:  $Y_r$ ) において前方を 0 度とした場合

に、45度、135度、225度、315度の方向に俯角60度の4本の音響ビームを放射し、測距を行う。1周巡回した際に、4本のDVLビームで測距された地形点群情報をテンプレートとし、既知海底地形データとマッチングを行う。類似度の尺度として、深度情報のSSD (Sum of Squared Difference) を計算する。また、探索手法は最急降下法を使用する。その後マッチング結果から逆問題を解くことでAUVの位置を推定する。DVLのビーム毎に得られた推定位置に対して、各ビームのSSD値の逆数に比例する重み係数に基づいた重み付け平均を行う(以下、WC (Weighted Combination))。WCにより、マッチング精度の悪いビームを信頼せずに平均化可能となる。よって、位置推定の最終結果はWCの値を用いたものとする。

### 3. AUVシミュレーションについて

提案手法の有効性を検証するためシミュレーションを実施した。海底地形データは、実海域にて取得されたものを使用し、グリッド幅を10mに設定した。

まずは、10mグリッドの地形データを2m間隔の地形グリッドに切り直し、全ての格子点に対して、格子点を巡回開始点とした円状地形を抽出後、地形複雑度 $C_p$ (式(2.1))を計算した。AUVは半径60mの真円巡回運動を行い、AUV直下の地

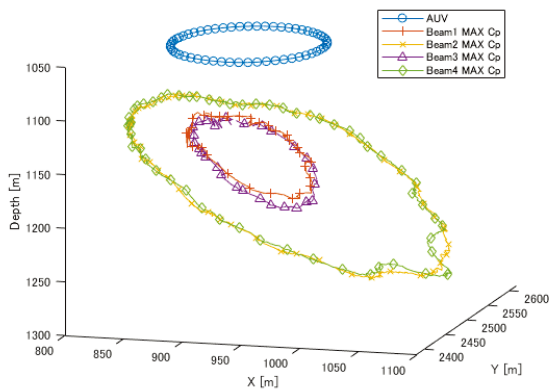


図-3  $C_p$  最大の場合の選定地形

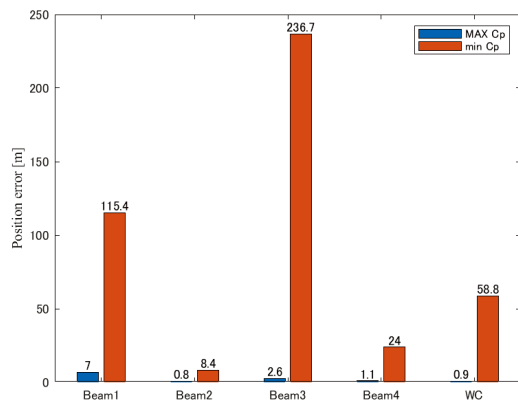


図-4 自己位置推定結果 (Beam1-4: ビーム毎の自己位置推定結果, WC: ビーム4本で得られた推定結果に対し、ビーム毎のSSDの逆数による荷重平均をしたもの)

形が計測されると仮定した。その後、 $C_p$ が最大となる場所(以下、MAX  $C_p$ )を潜航中フェーズにおける待機位置に決定した。潜航中フェーズでは、 $C_p$ が最小の場所(以下、min  $C_p$ )を待機位置とした場合の位置推定も行い、潜航前フェーズでの地形選定効果を評価した。

本シミュレーションでは、DVLのビームの長さに正規分布に基づくランダム誤差(平均値0cm, 標準偏差5cm)を加算した。

### 4. 結果と考察

図-3に、地形複雑度 $C_p$ による海底地形選定の計算結果例を示す。縦軸・横軸は、地形のX軸、Y軸とし $C_p$ が最大の円状地形(MAX  $C_p$ )を示している。

図-4に、ビーム毎に推定した場合の自己位置推定誤差と、ビーム4本のWCを示す。まずMAX  $C_p$ とmin  $C_p$ を比較すると、min  $C_p$ の方が位置推定精度が低くなっている。特にmin  $C_p$ においては、200m以上の誤差が出る場合も見られた。単調な地形の場合は類似地形が周辺に集まっていることから、位置推定精度の誤差が大きいことがわかった。したがって潜航前フェーズは、潜航中フェーズでのセンサー誤差影響を相殺する効果があることが示された。

MAX  $C_p$ の場合であっても、Beam1の場合に7mの誤差が発生している。このような結果をなるべく排除して平均化するために提案しているWCの結果を見ると、0.9m誤差となっている。WCの結果は、マッチング精度の低いビームを信頼せずに平均化しているため、ビーム本数の冗長性を利用していることとなる。

### 5. 結言

本稿では、自己完結的な潜航の実現を目的として、既知の地形情報を元に潜航開始位置を決定し、地形照合によって自己位置を推定する手法を提案した。手法の有効性を検証するため、自己位置推定のシミュレーションを実施し、誤差が1m以内に収まるという結果を得た。これは、従来手法である音響測位・通信と同等、またはそれ以上の精度である。

### 謝辞

本研究はJSPS 科研費JP22K04558の助成を受けたものです。関係各位に深く感謝申し上げます。

### 参考文献

- 1) T. Urabe et al, Next-generation technology for ocean resources exploration (Zipangu-in-the-Ocean) project in Japan, Proceedings of OCEANS 2015, 1-5.
- 2) J. P. Golden et al, Terrain contour matching (tercom): a cruise missile guidance aid, SPIE, Vol. 238(1980), 10-18.
- 3) K. B. Anonsen et al, An Analysis of Real-Time Terrain Aided Navigation Results from HUGIN AUV, Proceedings of OCEANS 2010, 1-9.