

## 論文の内容の要旨

### 論文題目 低コスト AUV による海底マッピングおよびインターベンション手法

氏名 野口 侑要

#### 1. 研究目的と概要

自律型海中ロボット (AUV: Autonomous Underwater Vehicle) は海底資源探査等の様々な分野で活躍しているが、運用コストが高いうえに複雑な環境での機能が限られているのが現状である。近年、AUV によるインターベンション (物体の回収や移動など、環境に介入する動作) 手法の研究が始まっているが、インターベンションは AUV にとって極めて困難な動作であり、実用化には至っていない。そこで本研究は、低コストな AUV による海底マッピングおよびインターベンション手法の経路計画手法を開発することで、海洋開発に貢献することを目的とする。本手法はまず AUV が深度センサ等の低コストなセンサを用いて広範囲の海底 3 次元マッピングを行った後、得られた海底環境のモデルの中で強化学習を用いたパスプランニングを行うことで、安全かつ効率的なインターベンションの動作計画を行うものである (Fig. 1)。

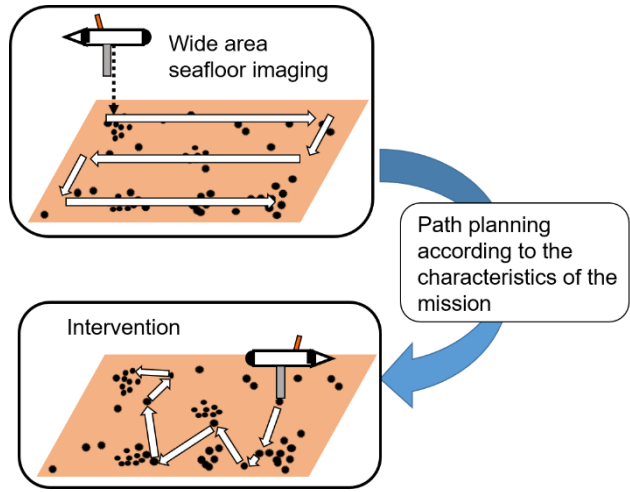


Fig. 1 Outline of the proposed system

#### 2. 低コスト AUV による海底 3 次元マッピング手法

AUV による海底 3 次元マップ作成は DVL (Doppler Velocity Log) 等の高コストなセンサに依存したものであった。一方本手法は低コストな AUV を用いながらも複雑な海底地形を高速に観測可能なうえ、合理的な海底 3 次元マップや海底付近の流速場を推定可能である。

提案手法は 1. AUV による海底自動観測と 2. 後処理による海底 3 次元マップと流速場推定から成る。1. においては筆者が以前開発した任意方向の壁面追従手法を拡張し、険しい海底を低コスト AUV で安全に観測する。ここでは 2. の海底 3 次元マップ作成について説明する。

近年、複数の光学画像から 3 次元マップを簡単に作成できる写真測量ソフトウェアが盛んに利用されている。しかし海底マップ作成への応用においては、海中で AUV の位置を正確に測定することが困難であるため、海底のスケール等の変数の同定や妥当性の検証が困難なことが問題となる。そこで本手法は安価で比較的精度良く計測できる深度データを利用し、海底のスケール等を計算するとともに、マップの妥当性検証を行う。

写真測量ソフトウェアにて計算された各写真撮影時の時刻  $\{t_i; i = 0, \dots, N\}$  と AUV のポーズ  $\{\xi_i; i = 0, \dots, N\}$  (4 次元の同次変換行列で示す位置と姿勢) が、AUV の潜航ログデータによる航跡  $X^{log}(t), Y^{log}(t), Z^{log}(t)$  に合致するように変換パラメータ  $(t_\Delta, x_\Delta, y_\Delta, z_\Delta, \varphi_\Delta, \theta_\Delta, \psi_\Delta, s_\Delta)$  を求める。世界座標系は NED (North-East-Down) 座標系とする。

まず、深度方向のフィッティングを行う。変換パラメータのうち、時間 $t_\Delta$ 、深度 $z_\Delta$ 、姿勢 $\varphi_\Delta, \theta_\Delta$ 、スケール $s_\Delta$ を用いて、以下の式による変換を考える。

$$\xi'_i = \mathbf{T}(0, 0, z_\Delta) \mathbf{R}(\varphi_\Delta, \theta_\Delta, 0) \mathbf{S}(s_\Delta) \xi_i \mathbf{S}\left(\frac{1}{s_\Delta}\right) \quad (1)$$

ただし $\mathbf{T}(x_\Delta, y_\Delta, z_\Delta)$ 、 $\mathbf{S}(s_\Delta)$ はそれぞれ平行移動とスケール変換のための同次変換行列である。

$\mathbf{R}(\varphi_\Delta, \theta_\Delta, \psi_\Delta)$ はロール、ピッチ、ヨーにそれぞれ $\varphi_\Delta, \theta_\Delta, \psi_\Delta$ 回転させる同次変換行列である。

以下の最適化問題を差分進化法[1]によって解くことで、時刻オフセット $t_\Delta$ も含む5変数 $(t_\Delta, z_\Delta, s_\Delta, \varphi_\Delta, \theta_\Delta)$ を、求める。ただし、 $Z_{\xi'_i}$ は $\xi'_i$ のZ方向の座標を示す。

$$\min_{t_\Delta, z_\Delta, s_\Delta, \varphi_\Delta, \theta_\Delta} \sum_{i=1}^N \left( Z^{\log}(t_i + t_\Delta) - Z_{\xi'_i} \right)^2 \quad (2)$$

ここで以下の平均二乗誤差 (MSE)を定義し、これを 3 次元マップの妥当性検証のために用いる。

$$\frac{\sum_{i=1}^N \left( Z^{\log}(t_i + t_\Delta) - Z_{\xi'_i} \right)^2}{N} \quad (3)$$

次に水平方向のフィッティングを以下のように行う。

$$\xi_i^* = \mathbf{T}(x_\Delta, y_\Delta, 0) \mathbf{R}(0, 0, \psi_\Delta) \xi_i \quad (4)$$

$x_\Delta, y_\Delta, \psi_\Delta$ は以下の最適化問題を差分進化法で解くことで求める。ただし $X_{\xi_i^*}, Y_{\xi_i^*}$ は $\xi_i^*$ のそれぞれX方向、Y方向の座標を示す。

$$\min_{x_\Delta, y_\Delta, \psi_\Delta} \sum_{i=1}^N \left( \left( X^{\log}(t_i + t_\Delta) - X_{\xi_i^*} \right)^2 + \left( Y^{\log}(t_i + t_\Delta) - Y_{\xi_i^*} \right)^2 \right) \quad (5)$$

## 2. 2. 実海域試験

提案手法の有効性を検証するため、新たに開発したAUV "HATTORI-2" (長さ 1.1 [m] × 幅 0.36 [m] × 高さ 0.2 [m]、質量 30 [kg]) を用いて実海域試験を行った(Fig. 2)。以下にDive7の結果を示す。HATTORI-2は約 0.6 [m/s]の速度で海底を追従し、約 400 秒の海底画像を得た。後処理により得られた海底 3次元マップと流速場をそれぞれ Fig. 3 と Fig. 4 に示す。深度フィッティングの MSE は 0.025 [m<sup>2</sup>]となった。観測した海底の面積は 1109 [m<sup>2</sup>]であった。



Fig. 2 HATTORI-2

次に提案手法の評価を行った。提案手法によって計算された $s_\Delta$ は 0.835 であった。一方、シートレーザと USBL によって計算された $s_\Delta$ はそれぞれ、0.941, 0.821 となり、提案手法と他の手法による誤差は 12 パーセント以下にとどまった。また Fig. 3 に示した点 AB 間の水平距離を、同じ領域を観測した Dive6 による計測結果と比較すると、誤差は 5 パーセント以下にとどまり、高い再現性を示した。

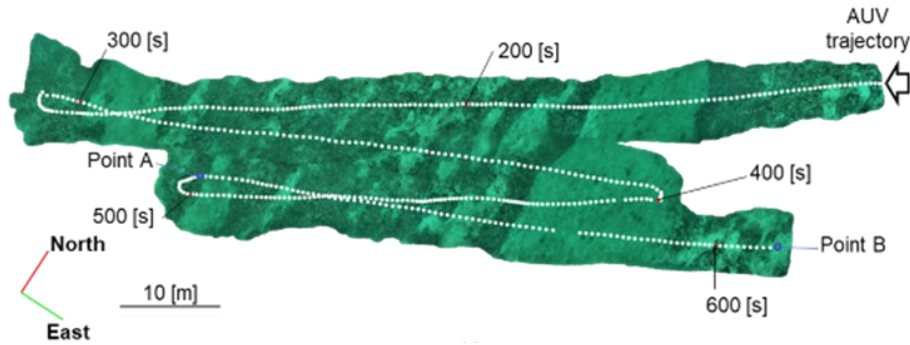


Fig. 3 3D image of the seafloor

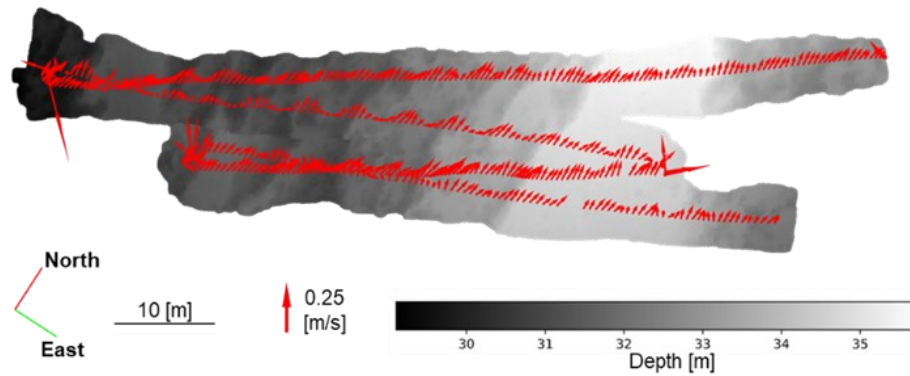


Fig. 4 Flow velocity field

### 3. 複雑環境下でのミッションの特性に応じたインターベンションの経路計画手法

AUV によるインターベンションの研究が行われているが、実用化には至っていないのが現状である。本研究では、複雑環境下でのミッションの特性に応じたインターベンションの経路計画手法の開発を行う。本手法におけるインターベンションは、固定されたアームの先をターゲットに近接させるものを考える。また、AUV は一般的にホバリング型 AUV と呼ばれるような平行移動とヨー角の制御によって動作するものとする。本手法は”A. Local Path Planning”と”B. Global Path Planning”から成る。A ではあらかじめミッションの特性に応じて定義しておいた報酬関数に基づき、モデル内で Soft Actor-Critic (SAC)[2]を用いた強化学習を行うことで、各ターゲットに近接する報酬の期待値が最も大きくなる経路を探す。B においては A で計算した期待値をもとにどのターゲットをどの順番で回るべきかを線形計画法で計算する (Fig. 5)。

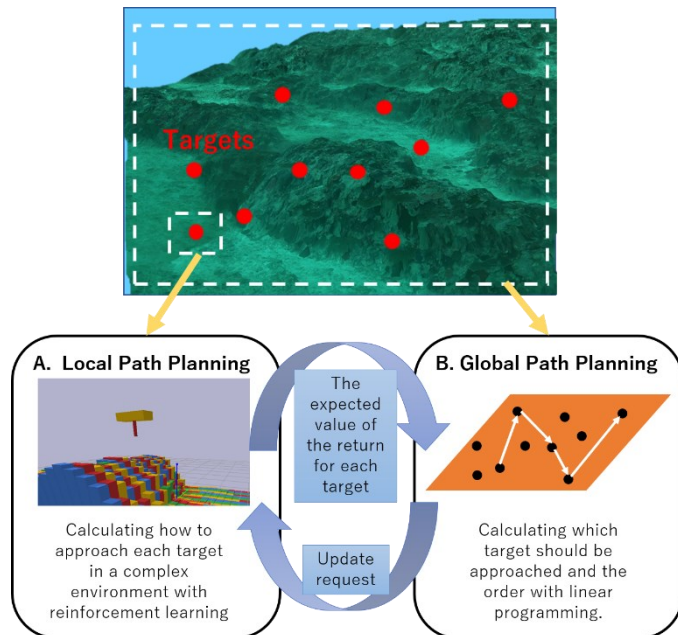


Fig. 5 Path planning

### 3. 2. 有効性検証シミュレーション

先述した Dive7 のマップにターゲットを 10 個設定して有効性の検証を行った。使用する機体の形状は HATTORI-2 と同じものであり、底面方向に長さ 0.3 [m] の固定アームが装着されている。アームの先がターゲットにたどり着いた時と機体が障害物に接触した時はそれぞれ、報酬 1 と -0.5 を与えた。また 1 [s] の動作あたり時間経過報酬 -0.01 を与えた。また AUV の位置とヨー角の推定に誤差がないミッション  $\alpha$  と、標準偏差がそれぞれ 0.1 [m] と 0.1 [rad] のガウス分布で表される誤差を持つミッション  $\beta$  を定義した。

合計 1100 回の強化学習を行って得られた経路を Fig. 6 に示す。ミッション  $\alpha$  では、幾何的に衝突無しで取ることのできないターゲット 1 つを除く計 9 個のターゲットに近接する経路を得られた。一方ミッション  $\beta$  では、位置と方位推定のノイズにより衝突せずに近接することが困難なターゲットをさらに 1 つパスし、計 8 個のターゲットに近接する経路が得られた。このようにノイズの有無というミッションの特性に応じた戦略的な経路計画ができていたことが確認できた。

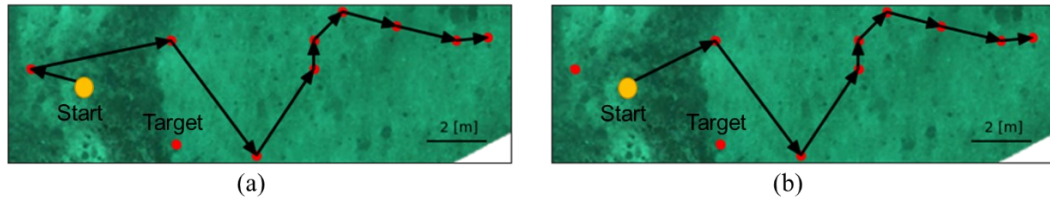


Fig. 6 Calculated global path. (a) Mission  $\alpha$ , (b) Mission  $\beta$ .

### 4. 総合的な考察

海底マッピングのスケールの誤差が存在している時に有効なインターベンションの経路計画ができるか検証するため、3. 2. の経路計画の条件に海底マップの誤差モデルを加えたシミュレーションを行った。スケールの誤差が標準偏差 40 パーセントのガウス分布で与えられる条件で経路計画を行ったが、得られたグローバルパスプランニングの結果は Fig. 6 と同じものになった。スケールの誤差が経路計画に与える影響はターゲット回りの海底の形状に依存するが、3. 2. のターゲットに関しては影響が軽微であることが分かった。2. 2 で得られた複数の海底マップのうち、最大のスケールの誤差は推定 40% であったが、本手法はその程度の海底の誤差を想定しても、誤差がない時と同様にターゲットに近接することが期待できることがわかった。

### 5. 結論

AUV を用いた海洋開発に貢献することを目的とし、低コストな AUV による海底 3 次元マッピング手法およびインターベンションの経路計画手法を開発した。マッピング手法においては低コストなセンサを利用し、険しい海底の合理的な 3 次元マップと流速場を推定することに成功した。インターベンション手法においては強化学習を用いて険しい海底 3 次元マップに対してミッションの特性に応じたインターベンションを行う経路を計画できることを示した。

### 参考文献

- [1] R. Storn and K. Price, "Differential Evolution – A Simple and Efficient Heuristic for Global Optimization over Continuous Spaces", *Journal of Global Optimization* 11: 341–359, 1997.
- [2] T. Haarnoja, A. Zhou, P. Abbeel, S. Levine, "Soft Actor-Critic: Off-Policy Maximum Entropy Deep Reinforcement Learning with a Stochastic Actor", *arXiv preprint arXiv:1801.01290*, 2018.