

# PS-10 航行型 AUV の隊列制御による海底鉱物資源調査の安定化

海洋先端技術系 \* 佐藤 匠, 金 岡秀, 篠野 雅彦, 稲葉 祥梧, 藤原 敏文

## 1. はじめに

自律型水中ロボット (Autonomous Underwater Vehicle, 以下 AUV) は, 強力な観測システムとして海底資源調査に多く採用されている. 海上技術安全研究所 (以下, 海技研) では, 戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) 第 2 期において「深海 AUV 複数運用技術に関する研究開発」として, 複数機 AUV を用いた隊列制御に関する研究を進めている.

AUV には慣性航法装置とドップラー流速計が搭載されており, センサー値から自己位置を計算する. しかしながら, 長時間の潜航調査では自己位置計算結果に誤差が蓄積してしまう. 水中は自己位置を GPS 等で容易に計測することはできないため, GPS を持つ自律型無人水上機 (Autonomous Surface Vehicle, 以下 ASV) から, 音響測位・通信によって自己位置補正を行っている<sup>1)</sup>. また, 潜航中は AUV 内部情報及び現在位置の取得を随時行える環境を整えておくことは, 潜航を安全に完遂するために不可欠である. しかしながら, 音響通信・測位は指向性の問題から, 音響通信・測位が可能な範囲が ASV 周辺に限られている. 本研究では, リーダー機 (ASV) ・フォロワー機 (航行型 AUV) によって構成された隊列航走により, 安定した音響通信・測位環境を構築する制御手法を提案する.

## 2. 提案手法

### 2.1 隊列制御航走の概要

本手法では, ASV をリーダー機, AUV をフォロワー機とし, ASV の航走に AUV が追従する形で隊列を維持する. 図-1 に隊列制御による潜航調査の流れを示す. リーダー機である ASV を洋上待機させた状態で, フォロワー機である航行型 AUV (図中 C-AUV#3, #4) の潜航を開始する. その後, 隊列航走を開始する時刻まで海中で旋回待機させる. 旋回待機中に, 音響通信による位置補正を行う. 隊列制御航走開始時刻になったら, リーダー機はフォロワー機への定期通信を行いながら航走を行う. 対してフォロワー機はリーダー機から受信したリーダー機位置情報を元に新規のウェイポイント (以下, 文中では WP とする) を生成し航走する (動的 WP 航走). リーダー機の最終 WP を通過したら, 1 機ずつ浮上させ揚収作業を行う.

### 2.2 リーダー機・フォロワー機の内部制御フロー

リーダー機は, 航走開始後は変更されない固定 WP を含んだコースデータに従い, 独立して航走する. 本研究では, リーダー機は GPS の使用が可能であり, 自機位置推定の信頼性の高い航走が実現している. また, 音響通信によってフォロワー機に対して自機位置および送信時刻を定期送信する. フ

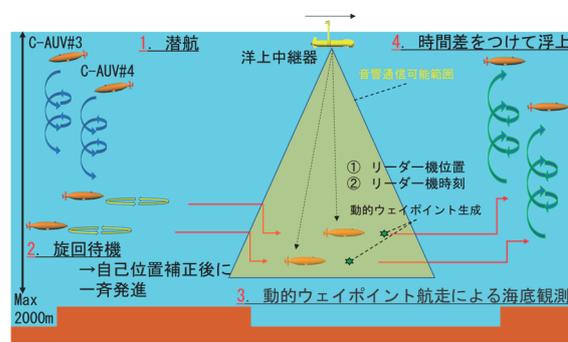


図-1 隊列制御による潜航調査の流れ

ォロワー機側からは位置や内部状態が返答され, 得られたフォロワー機情報を調査母船へ転送する.

リーダー機からの信号を受信したフォロワー機は, アルゴリズムに従って新規 WP 及び目標速度を算出する. 図-2 にフォロワー機の内部フローを示す. フォロワー機の目標 WP は, リーダー機位置・リーダー機 Yaw 角度・リーダー機座標系でのフォロワー機の目標相対位置に基づいて算出される. 目標 WP からフォロワー機の目標 Yaw 角度を求める. 次に, リーダー機により設定された WP 到達目標時間と, WP までの距離から, 目標速度を算出する. 速度は, AUV の機体性能によって制限されるため, 速度の制御可能範囲をあらかじめ設定することで, 急な加減速を防ぎ過電流によるトラブルを防止する. フォロワー機は最新の WP に到達してしまうと, 次の WP に更新されるまで現在の WP 周辺で位置保持する. フォロワー機は, 各々コースデータを入力しており, 音響通信の切断が発生してしまった場合でも固定 WP 航走に切り替える事が可能である.

固定 WP 航走は, AUV への外部干渉ができない反面, 各々の中で航路計画が完結しているため, 安定した航走が可能であるが, AUV 毎の機体特性によって隊列を維持することは難し

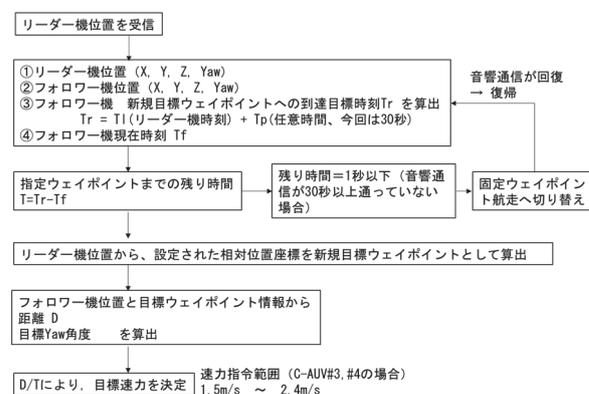


図-2 フォロワー機の内部制御フロー

い。本手法は、定期的な WP 更新によって自機位置を調整し、隊列の崩れの修正が可能である。

### 3. 実海域試験

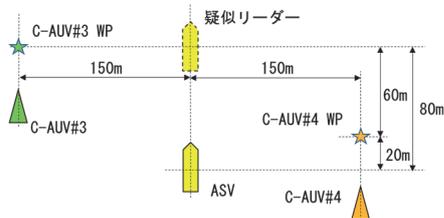


図-3 ASV, AUV の相対位置関係

2019 年 12 月に駿河湾海域において、NMRI 航行型 AUV3 号機・4 号機（以下、C-AUV#3, C-AUV#4 とする）及び洋上中継機（以下、ASV とする）<sup>1),2)</sup>によって隊列を組んだ状態で海底地形計測を行った。計測対象とした海域は、海底深度が 800m~1100m の海域とした。図-3 に、設定したリーダー機・フォロワー機位置関係を示す。リーダー機位置は ASV の前方 80m に設定した（図中の疑似リーダー）。これは、ASV が潮流による速力低下を引き起こした場合でもフォロワー機を先行させないためである。リーダー機からフォロワー機への通信間隔は 10s とした。

### 4. 実海域試験結果と考察

図-4 に、C-AUV#3, #4 の航跡及び海底地形計測結果例を示す。本潜航では潜航時間の半分までは ASV, AUV 共に固定 WP 航走を行い、その後隊列航走を行った。図中の右半分が固定 WP 航走、左半分が隊列航走となっている。固定 WP 航走時では、各 AUV に蓄積した位置誤差によって左右方向に位置ずれが発生したことから未計測部分が発生しているが、隊列航走を開始後は徐々に未計測部分が減少し、良好な地形計測を完遂した。旋回時において内側を走る AUV が 90deg 旋回ではなく、一度オーバーシュートしてから旋回する動きが見られる。これは極端な速力減少による制御不良を防ぐため、目標速力の最低値を 1.5m/s に設定していたためである。

目標とする安定した音響通信・測位環境は、ASV を頂点とした円錐体積内となる。今回用いた Teledyne Benthos 社の指向性音響モデムでの、ASV を中心とした航走深度円半径を計算する。指向角のカタログ値は、鉛直下向きを 0deg とした場合  $\pm 35\text{deg}$  とされているため、AUV 深度 900m の場合は、ASV を中心として半径 630m と計算できる。図-5 に、ASV・AUV 機間の水平距離を示す。固定 WP 航走時は、外側を航走している C-AUV#3 で顕著に見られる様に ASV・AUV 間距離が最大 800m まで拡大している。対して、隊列航走開始から終了までは C-AUV#3 及び #4 共に、300m の範囲内を維持できている事がわかる。結果として、提案する隊列制御手法によって、安定した音響通信・測位環境が実現できていることがわかる。

### 5. 結言

本研究では、C-AUV#3, #4, ASV を用いて、音響通信・測位

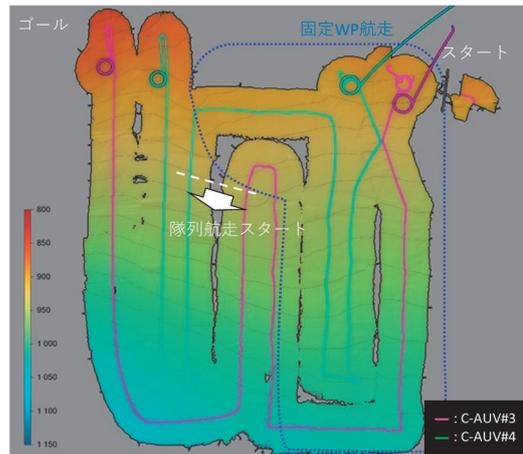


図-4 航跡図及び計測された海底地形図

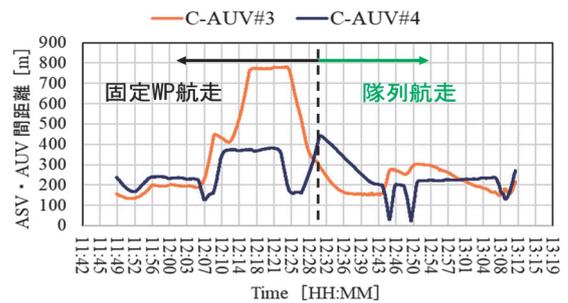


図-5 ASV・AUV 間距離の変化

環境を安定化する隊列制御手法の有効性を検証した。結果として、隊列航走中は安定した測位・通信が実現され、2m メッシュの高解像度地形図を取得することに成功した。今後は、様々な機種のアUV を含めた隊列制御手法へと拡張し、高度な海底観測システムの実現を目指す。

### 謝辞

本研究は、総合科学技術・イノベーション会議の SIP（戦略的イノベーション創造プログラム）「革新的深海資源調査技術」（管理法人：JAMSTEC）によって実施されたことを附記し、関係各位に御礼申し上げます。また、本研究に貢献頂いた海洋先端技術系研究員等関係各位に加え、実海域試験における AUV 運用及び海底地形解析を担当された一般社団法人海洋調査協会様に厚く御礼申し上げます。

### 参考文献

- 1) Sato, T., Kim, K., Inaba, S., Matsuda, T., Takashima, S., Oono, A., Takahashi, D., Oota, K., Takatsuki, N.: Exploring hydrothermal deposits with multiple autonomous underwater vehicles, Proc. of 2019 IEEE Underwater Technology (UT) (2019), pp.1-5.
- 2) 今里元信, 金岡秀, 佐藤匠, 大藪祐司, 伊藤譲: 深海調査に向けた小型軽量航行型 AUV の開発, マリンエンジニアリング学会誌第 55 巻第 3 号(2020), pp.75-80.