

2 先進的海洋無人機システムの創出に向けた 海技研の取り組み

金 岡秀*, 佐藤 匠*, 岡本 章裕*, 稲葉 祥梧*
藤原 敏文**, 篠野 雅彦*, 瀧本 忠教***

NMRI's Challenges towards the Creation of an Advanced Marine Unmanned Vehicle System

by

KIM Kangsoo, SATO Takumi, OKAMOTO Akihiro, INABA Shogo
FUJIWARA Toshifumi, SASANO Masahiko, TAKIMOTO Tadanori

Abstract

NMRI has been conducting research and development toward the creation of an advanced marine unmanned vehicle system; however, there have been a number of challenges, particularly in the development of technologies for multi-AUV operation. This paper discusses the need for an advanced marine unmanned vehicle system, as well as the challenges associated with developing such a system. In particular, we highlight the difficulties associated with multi-AUV operation, such as the navigation for multi-agent coordination, communication, positioning, and bottom survey issues. We also present an overview of the various technologies that have been developed to address these challenges, including multi-AUV navigation algorithms, improved acoustic communication and positioning systems, and strategies for acoustic bottom surveying. Additionally, we highlight the potential benefits of an advanced marine unmanned vehicle system, including enhanced efficiency, safety, and cost-effectiveness in various marine applications. Lastly, we present the results of at-sea deployments of our advanced marine unmanned vehicle system, which demonstrate the effectiveness and utility of our integrated technologies.

* 海洋先端技術系, ** 研究統括監, *** 企画部

原稿受付 令和 5年 5月 9日

審査日 令和 5年 5月 25日

1. はじめに

近年、海洋利用・開発に向けた新しいモバイル・プラットフォームとして、資源探査、環境保全、安全保障、海洋土木等の分野を中心に、AUV(Autonomous Underwater Vehicle)の活用が広まりつつある。中でも日本では世界に先駆けて、海底鉱物資源の調査にAUVを活用しようとする動きが、2000年代初頭から始まった¹⁾。これまでの調査により、日本のEEZ内には多種多様で豊富な海底鉱物資源が存在し、事業ベースの開発まで見込める高いポテンシャルを有することが確認されている²⁾。こうした背景から、国が主導して民間企業とともに、効率的かつ効果的な海底資源調査技術を確立することを目指し、海洋分野の戦略的イノベーション創造プログラム(Strategic Innovation Promotion program: SIP)、通称「海洋SIP」の第1期が、2014年度からスタートした²⁾。海洋SIPへの参画をきっかけに、海上技術安全研究所(以下、海技研)はAUVやASV(Autonomous Surface Vehicle)のような海洋無人機の研究開発に取り組み始めた²⁾。更に、2016年度から始まった海技研の第1期中長期計画では、海洋資源開発等に係る探査システムの基盤技術及び運用技術の開発をテーマに、海洋無人機に関する研究開発が本格化した。2018年度からは海洋SIP第2期が始まり、2022年度末をもち、海洋SIP第2期と第1期中長期計画は共に終了した。本稿では、第1期中長期計画および海洋SIP第2期における海技研の海洋無人機関連研究開発の成果を紹介すると共に、2023年度から新たにスタートした第2期中長期計画における研究開発について概説する。

2. 高効率海底調査

日本は国土面積の12倍にも及ぶ447万km²の広大な領海および排他的経済水域(EEZ)を有しており、その広さは世界第6位である^{1,2)}。一方、多くの場合AUVは3ノット前後の航行速度で運用され、これは水上船と比べてもはるかに低速である。AUVの低速運用は主に水の流体抵抗を意識したものである。ROV(Remotely Operated Vehicle)のような有索の無人機とは異なり、無索潜水機のAUVは外部からの電力(エネルギー)供給に頼ることができない。そのため、AUVは低速航行を基本とし、流体抵抗によるエネルギー消費を極力抑えようとしている³⁾。ここで分かるのが海底調査のニーズに対する対応力量の深刻なミスマッチで、広大な面積を低速で調査せざるを得ない事情から、AUVによる海底調査においては、単位時間当たりの調査面積を一段と拡大する高効率化が強く求められてきた。海底調査の高効率化を実現する手段の一つとして、以前から国内外で注目されてきたのが複数AUVの同時運用である。高速化の難しいAUVの特性から、多数のAUVを同時に展開し運用することで、単位時間当たりの調査面積を拡大しようとする試みである。海技研は前述の海洋SIP第1期から複数AUV同時運用技術の研究・開発に本格的に乗り出し、SIP第2期ではより高度な運用技術を開発・実装し、数多くの複数AUVの同時運用を実演した¹⁾。

3. 複数AUV同時運用技術

自律航行を基本とするAUVは、様々な航法、誘導および制御技術を駆使して自ら判断し、与えられた任務を遂行する。中でも慣性・水中音響航法およびウェイポイント(Waypoint、以下WP)誘導は、水中無人機ならではの特殊性に基づいたもので、世界中で運用されているほとんどのAUVに共通する航法・誘導技術である³⁾。一方、単機運用と比べて格段と複雑化する運用環境のため、複数AUV同時運用では複数機ならではの運用環境に対応する航法、誘導および制御技術が求められる^{1,4)}。

3.1 AUV管制

自律型無人機とは言え、人間による監視や介入を全く必要としない完全自律化のレベルには達していない現状から、潜航中のAUVには人間による適宜の管制が必要である。AUV管制は通信と測位で大別されるが、電波の届かない水中環境の制約から、音波を用いた水中音響通信と測位で賄っている。こうしたAUV管制は、慣性航法を補助する形でAUV航法の一部を構成しており、それが前述した水中音響航法³⁾である。支援船としての水上船を中心に形成され、AUV管制に用いられる音響通信および測位が有効に働く領域を有効管制域(effective control zone)と言い、安全で有効な任務遂行のため、潜航中のAUVは常に有効管制域内に留まる必要がある⁴⁾。ところが、同時運用する機数の増加に伴い、複数AUVによる水平面内の占有域が拡張し、また、各機の現在位置のばらつきがもたらす更なる占有域の拡散により、有効管制域内に全機が入りきれない事態の発生が、機数と運用時間に比例して益々深刻化する。こうした問題の解決に向け、海技研は第1期中長期計画のもと、動的WP誘導および基本隊列制御と言った2種類の複数AUV同時運用手法を開発・実装し、実海域試験を通じてその有効性を実証した^{1,4)}。

3.2 動的WP誘導

WPとはAUVが通過・到達すべき目標位置を定める時系列情報で、水平面内の緯度・経度と、鉛直面内の海面からの深度、もしくは海底からの高度とを組み合わせた3次元座標で定義する⁵⁾。動的WP(Dynamic Waypoint、以下DWP)とは、従来の空間固定WP(以下、固定WP)を動座標系上に拡張したもので⁵⁾、集中型マルチエージェント制御法の一つとしてよく知られている、リーダー・フォロワー(leader-follower)群制御法に基づいたWPの定義である。図-1でO-XYは地球固定座標系、o-xyはリーダー機に原点を置く動座標系である。また、 r_l はリーダー機、 r_{fi} 、 r_{fi} はフォロワー機AUV_i及びそのWPの位置ベクトルである。 $r_{r_{fi}}$ はリーダー機に対するAUV_iのWPの相対位置ベクトルで、 e_{fi} はAUV_iの目標位置と現在位置との差分を表すベクトルである。 $r_{r_{fi}}$ により各フォロワー機の相対位置が直接制御でき、動的WP誘導は複数AUV占有域の抑制に有力な手法である。

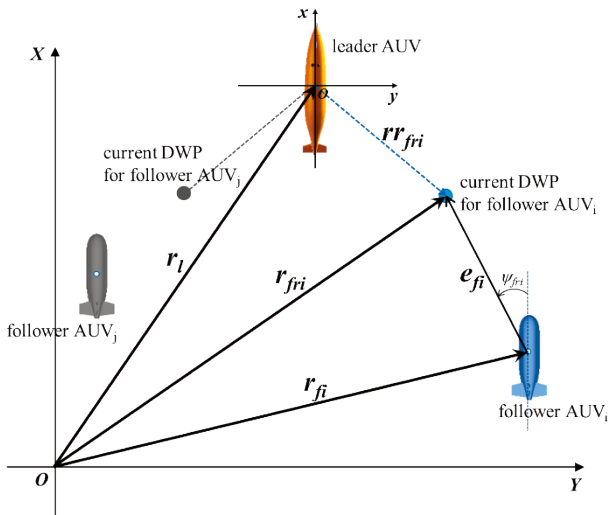


図-1 動的 WP による複数 AUV 誘導

3.3 基本隊列制御

リーダー・フォロワー群制御ではリーダーの役割が極めて重要で、リーダーの不具合や異常行動に対して致命的な脆弱性を持つ。こうした問題を踏まえ、よりロバストな複数 AUV の同時運用手法として海技研が開発したのが基本隊列制御である。これは、従来の固定 WP 誘導をベースに、AUV 管制に増・減速の機能を取り入れることで、複数 AUV による占有域の発散を防ごうとする取り組みである^{4,5)}。図-2 に基本隊列制御の概念を示す。非常にシンプルなロジックで、現存するほとんどの AUV に対し、大きな改造を必要とせず簡単に実装できるのが最も大きな特長である。また、動的 WP 誘導とは異なり、リーダー機が存在しないため、ロバストな複数機同時運用が可能となる点も、重要な特性である。

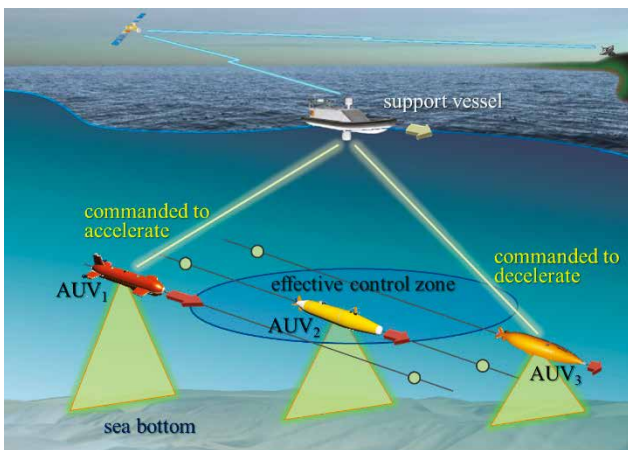


図-2 基本隊列制御の概念

4. 実海域実証試験

4.1 動的 WP 誘導実海域実証試験

2019年12月、海技研は動的 WP 誘導技術を実機実装し、静岡県沼津市沖合の駿河湾で実証試験を行った。この試験では、海技研が開発して保有していた1機の ASV と2機の AUV

が使われ、リーダー機としての ASV から動的 WP が発行され、フォロワー機としての各 AUV がそれを追従した。また、高効率・高精度の海底調査に対する動的 WP 誘導の有効性を確認すべく、MBES(Multi-Beam Echo Sounder)による海底音響観測を実施した。図-3 に各 AUV の航跡と MBES 観測から得られた駿河湾水深 1000 m 海域の海底地形を示す。

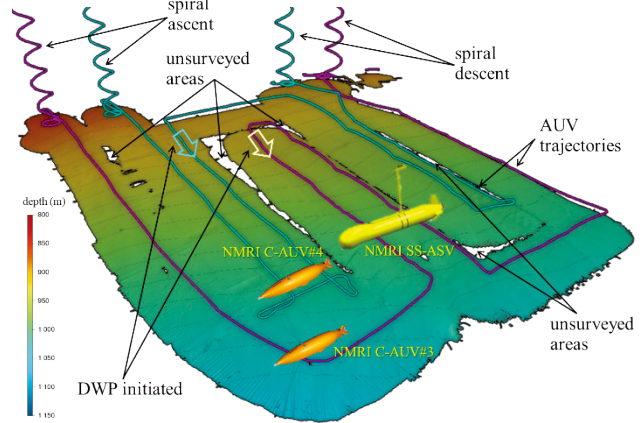


図-3 動的 WP による AUV 2 機同時運用の結果

本試験では、リーダー機としての NMRI Semi-Submersible ASV (以下、NMRI SS-ASV) が音響通信および測位の洋上中継を行い、フォロワー機としての NMRI C-AUV #3 及び #4 が海底観測を行った。2機の AUV は全区間の約 6 割を従来の固定 WP 誘導で航行した後、動的 WP 誘導に切り替え、残り約 4 割の区間を航行した。観測効率を最優先とした測線間隔設定で、本試験では多少の欠測域が発生している。ところが、図-3 から分かるように、動的 WP 誘導に切り替えた後、欠測域は著しく減少している。これは、動的 WP 誘導により AUV 間の距離が直接制御され、より高い精度の測線追従が行われたことに起因し、AUV による海底音響観測における動的 WP 誘導ならではのメリットと言える。

4.2 基本隊列制御実海域実証試験

より優れた汎用性と高いロバスト性を有する複数 AUV 同時運用の手法として、海技研は 2020 年度から基本隊列制御の研究開発を始めた。そして 2022 年 9 月、開発した技術を実機実装し、駿河湾で実海域実証試験を行った。優れた汎用性を十分に活かすため、本試験では開発・運用主体の異なる 1 機の ASV と 4 機の AUV を選び、異機種の海洋無人機による海底調査ユニットを構成した。図-4 から分かるように、当該ユニットでは海洋研究開発機構(以下、JAMSTEC)の ASV 「KaiKoo」が洋上中継機としての役割を務め、海技研の AUV3 機と IHI の AUV1 機が、MBES による海底音響観測の任務を担った。図-5 に AUV4 機の航跡と MBES 観測から得られた駿河湾水深 1400 m 海域の海底地形を示す。図から分かるように、異機種の海底調査ユニットは与えられた任務を全うし、高効率・高精度の海底観測をやり遂げていて、基本隊列制御の優れた汎用性と有効性を実証した。



図-4 基本隊列制御で構成した海底観測ユニット

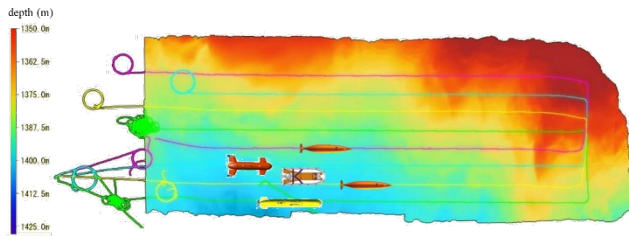


図-5 基本隊列制御による異機種 AUV4 機同時運用結果

5. 先進的海洋無人機システム

前述のとおり、2022 年度までの第 1 期中長期計画において、海技研は複数 AUV 同時運用技術を中心テーマとした海洋無人機関連の研究開発を行い、高効率・高精度の海底調査に資する成果をあげた。こうした成果の更なる高度化による先進的海洋無人機システムの創出に向け、2023 年度から始まる第 2 期中長期計画において、海技研は以下のような研究開発を新たに展開する。

5.1 複数 AUV 協調群制御および海洋環境広域モニタリング

本課題では、先進的海洋無人機システムによる先鋭的海洋調査の実現に向け、協調群制御の手法に基づいた AUV 複数機の同時運用技術とともに、より高度な広域の海洋環境モニタリング手法について、研究開発する（図-6）。

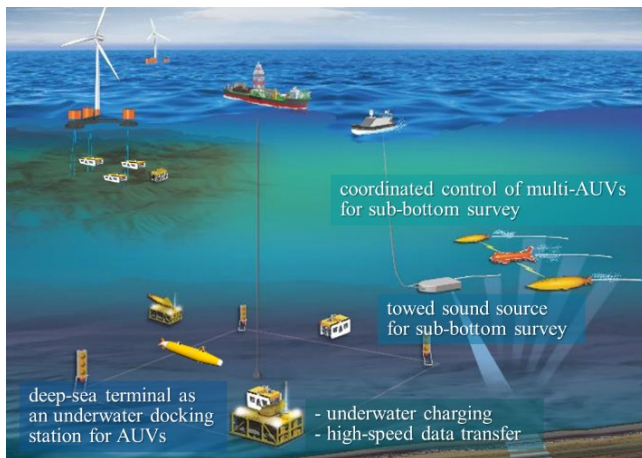


図-6 複数 AUV 協調群制御および海洋環境広域モニタリング

従来の複数 AUV 制御が水上船や ASV を介して行われたのに対し、本課題で研究開発する複数 AUV 協調群制御は、AUV 同士の通信・測位で具現化する。海面からの通信・測位と比べはるかに近距離で行われることから、AUV-AUV 間の通信・測位は精度や信頼性において著しく優位性がある。こうした優位性を活かし、本課題では AUV 複数機による海底下地盤

調査など、高精度の AUV 間相対位置制御が求められる高度な海底調査に挑む。また、本課題では海中での充電や高速データ転送の実現に向け、AUV の海中ドッキングステーションとして深海ターミナルを研究開発する。

5.2 海空無人機システム

現状、海洋観測における AUV の活用では、観測対象の海域まで AUV および関連機材を輸送するには支援船が必要で、コスト、機動性や効率性において問題が大きい。こうした現状を踏まえ、本課題では小型軽量化した AUV とそれを自動的に運搬・展開・揚収できる無人飛行艇で構成される、言わば海空無人機システムについて研究開発する。現状の AUV 運用におけるコスト、機動性や効率性の問題を革新的に改善する有力な手段として、海空無人機システムは総合的な海洋安全保障に資する最先端の運用体系と言えよう。

6. まとめ

本稿では、2022 年度をもって終了した第 1 期中長期計画および海洋 SIP 第 2 期のもと、海技研が実施した海洋無人機関連研究開発の成果を紹介した。また、2023 年度から 7 年間の計画で新たにスタートした第 2 期中長期計画における研究開発について概説した。海洋国家日本にとって、海洋利用・開発はもちろん安全保障の観点からも、海洋無人機は今後その重要性が益々高まるのであろう。こうした社会的ニーズに対する海技研の答えが、より高度な任務に対応する省人化・無人化システムとしての先進的海洋無人機システムである。

謝辞

本研究の一部は、総合科学技術・イノベーション会議の SIP 「革新的深海資源調査技術」（研究推進法人：JAMSTEC）によって実施されました。また、実海域試験におきましては（一社）海洋調査協会の皆様から多大なるご協力を頂きました。

References

- 1) Kim, K. et al.: Simultaneous Multi-AUV Operation as Real Practice - High-efficiency and High-definition Bottom Survey in Izu Islands, Marine Engineering, Vol.56, No.1(2021), pp. 132-138.
- 2) Ocean Policy Research Institute (OPRI), Sasakawa Peace Foundation: 2019 White Papers on the Oceans and Ocean Policy in Japan (2020), pp. 72-82.
- 3) Kim, K.: Optimal Waypoint Navigation for Underactuated Cruising AUVs, Proc. ICINCO 2019, Prague, pp. 124-134.
- 4) Okamoto, A. et al.: Development of a Basic Formation Control System for Heterogeneous Autonomous Marine Vehicles and its Sea Trials in Suruga Bay, Proc. 2023 IEEE Underwater Technology (UT), Tokyo, pp. 1-10.
- 5) Fujiwara, T. et al.: Sea Trials Summarization on Fundamental Formation Control of Multiple Cruising AUVs, Proc. OMAE 2021, Online, Vol.5, V005T05A025.