

# 無人ロボットで 海洋フロンティアに挑む

## 自律型の海洋無人ロボットシステム

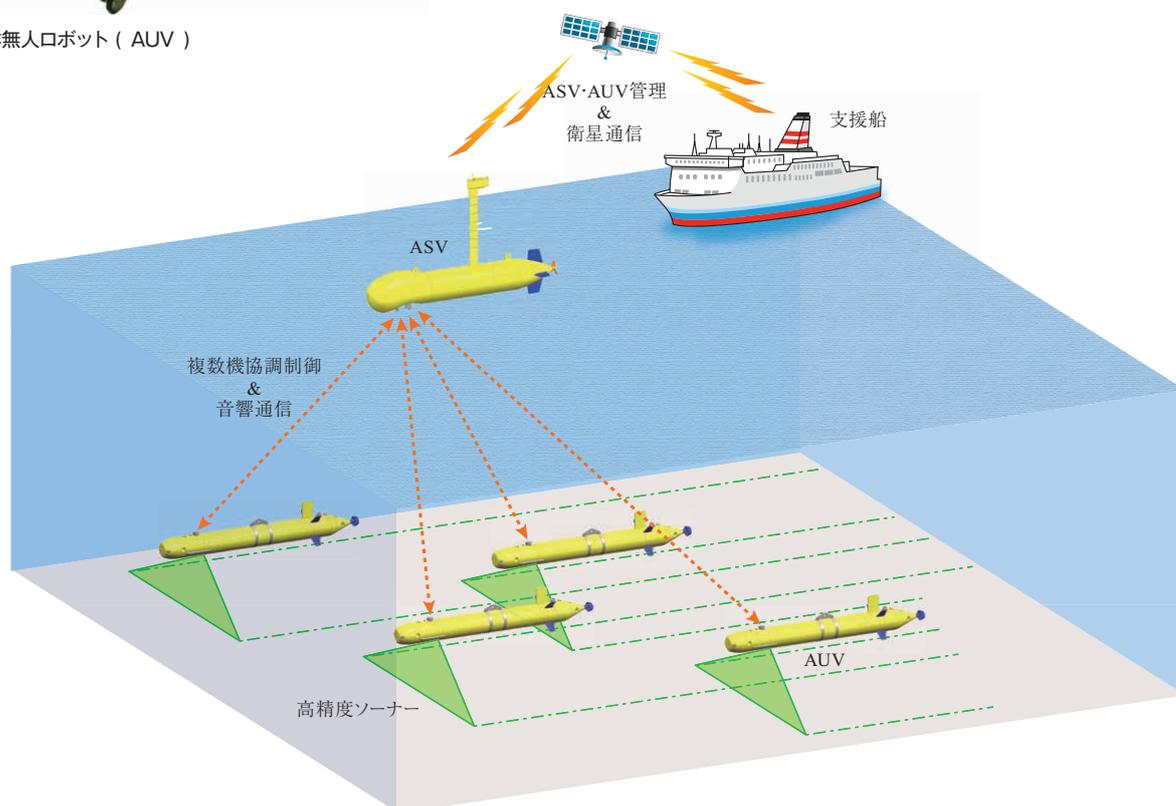
近年、日本を取り囲む広大な海洋において、水産資源だけでなく、石油・天然ガスやレアメタルを含む鉱物などの海底資源が注目されるようになり、国を挙げた調査が進められている。

IHI は、これまでに培ってきたロボット技術により、水深 1 000 m を超える海洋の詳細調査を行う自律型の海洋無人ロボットシステムの実現にまた一步前進した。

株式会社 IHI 技術開発本部  
航空宇宙事業本部



自律型海洋無人ロボット ( AUV )



複数の海洋無人ロボットによる海底探査

## 海洋フロンティア

わが国は、国土の四方を海に囲まれた海洋国家である。領海と排他的経済水域 (EEZ) を合わせた面積は、世界第 6 位の 447 万 km<sup>2</sup> と広大である。我々は、歴史的にこの海域を主に水産と海運の分野で利用してきたが、近年、この海域の深海底にメタンハイドレートなどの新たなエネルギー資源や、海底熱水鉱床などの鉱物資源の存在が確認され、こうした資源の開発に期待が高まっている。さらに、この海域においては、洋上の風力、潮力や海流などの自然エネルギーを利用した発電システムの開発や、海洋微生物を利用した新たなバイオテクノロジーの探究など、新しい利用の可能性についても関心が高まっている。

一方で、これらの海域にはまだ解明されていないことが多く残されている。その大きな要因は、容易に“行けない”、“見えない”、“伝えられない”、という海洋環境の特質にあると考えられる。海の中は過酷な世界であり、潜れば 10 m ごとに水圧が 1 気圧ずつ増していく。例えば世界の大洋の平均水深は約 3 800 m で、このときの水圧は約 380 気圧にもなる。この高圧への対策がなければ目的地に到達することもできない。また、海洋で光が到達する深さは、汚染のない外洋でも最大 200 m と言われており、海面から海底を透視することは難しい。さらに、通信についても、日常使用している電波の海中での伝搬距離は数 m 程度で、情報伝達の大きな制約となっている。

このように海の中は、人間の進出を阻み続ける厳しい環境の広がる世界であるが、この過酷な環境に挑戦する手段の一つとして、海洋無人ロボットの利用が注目されている。本稿では、IHI がこれまで培ってきた海洋無人ロボット技術について紹介する。

## 海洋無人ロボット

海洋で使われるロボットには海上ロボットと海中ロボットがある。求められる仕事には、海上・海中・海底において搭載した計測機器による情報取得やマニピュレータなどによる実作業がある。ここでは海中ロボットについて説明する。

海中ロボットは、大別してロボット内に人が搭乗する有人ロボットとそれ以外の無人ロボットに分けられる。

有人ロボットのメリットには、人間が自分の目や耳で取得した情報からその場で判断して、優先度の高い仕事を効率的に行うことができること、マニピュレータなどの操作が正確に素早く行えることなどがある。一方で、以下のようなデメリットが考えられる。

- ・人が搭乗するため、全体システムの信頼性・安全性を高める必要があり、一般的に無人ロボットに比べて非常に高価で大型になる。
- ・有人ロボットの運用中は専用支援船による十分な支援体制が必要である。
- ・人が活動するために必要な環境条件（空調、食料など）の確保に伴うエネルギーなどの制約に起因して、運用時間も制約を受ける。

一方、無人ロボットでは上記のような有人ロボットの制約が緩和される。

無人ロボットには、支援船とケーブルでつながれた ROV ( Remotely Operated Vehicle ) と、ケーブルがなく自由に航走できる AUV ( Autonomous Underwater Vehicle ) がある。

ROV は、ケーブル通信により人が継続的に遠隔操作を行う海中ロボットで、ケーブルをとおしてエネルギーを供給できるタイプもある。エネルギーを供給する場合には、ケーブルは太くなり、大深度の海底で作業する場合には、ケーブルに働く水からの抵抗が大きくなるため、支援船の設備も大規模になり、ROV にも大パワーが必要になる。一方、エネルギー源を内蔵し、通信だけを光ファイバをとおして行うタイプの ROV では、大深度でもケーブルによる拘束は限定的であり、自由に動き回ることができるが、ケーブル切断のリスクが増加する。

AUV はケーブルのない自律型の海中ロボットである。自律とはロボットに則していえば、開始指令を受けるだけで与えられた目的を自動的に達成することといえる。AUV は、ある海域の探査指令を受けて運用を開始した後は、人が関与する必要がなく、ケーブルによる拘束がないので、少ないエネルギーで事前に設定された目標への軌道を精度良く自律的にたどることが可能である。AUV はエネルギーの続く限り自動で長時間の探査ができるため、広大な海洋の探査には適したロボットといえる。

## 立ちはだかるハードル

海洋無人ロボットでは、次章で述べる自律性の確立が最大の課題と言えるが、過酷な環境で使用される海中ロボットの前にはそのほかにも立ちはだかるハードルが幾つか存在する。

まず、大水深での運用における耐水圧性である。日本の EEZ 内で開発が期待されている海底熱水鉱床は水深 700 ~ 2 000 m の海域に分布している。この水深 2 000 m の海中ではたった 1 cm<sup>2</sup> の面積に約 200 kgf もの水圧が掛かっている。可搬型の直径 20 cm × 長さ 100 cm 程度の小型海中ロボットでさえ、その全表面には 1 400 tf 近くの水圧が掛かることになる。大きな水圧に耐えるロボットの耐圧容器の板厚は厚く、重くなる。この対策として油漬均圧法が良く用いられる。これは、容器内に海水と同等の圧縮率の絶縁油などを満たし、容器内外の圧力を等しくできる構造を設けることで容器の耐圧性を不要とする方法で、容器を薄く軽くできる。現状、電池などで利用されている。

次に、海中における情報伝達の難しさがある。海中ロボットでは、通常用いられる電波と比較して通信距離が短く、通信速度の遅い音響通信を用いざるを得ない。最近では、複数の海中ロボットによる音響通信の中継による通信能力向上が期待されている。IHI でも、音響通信器自体の性能を向上させるだけでなく、複数のロボットを協調制御することにより、音響通信の弱点である通信距離の短さや通信速度の遅さを克服する取り組みを行っている。

また、エネルギー源も大きなハードルといえる。酸素のない海中では内燃機関を使うことができないため、海中ロボットでは専ら二次電池をエネルギー源としている。現状、海中ロボットの運用時間は 12 時間程度のものが多いが、次世代のリチウムイオン二次電池ではエネルギー容量が現状の 2 倍になる可能性があり、実現すれば 24 時間連続の運用が見込まれる。また、IHI では海中ロボットの運用時間を延ばす別のアプローチとして、海中非接触給電技術の開発も行っている。

そのほかにも海中では GPS を利用できないことによる自己位置把握の難しさ、海象の影響を受けやすい荒天時のロボットの投入・回収など、海中ロボットにはいろいろなハードルが立ちはだかっているが、これらを乗り越えるための研究開発を鋭意進めている。

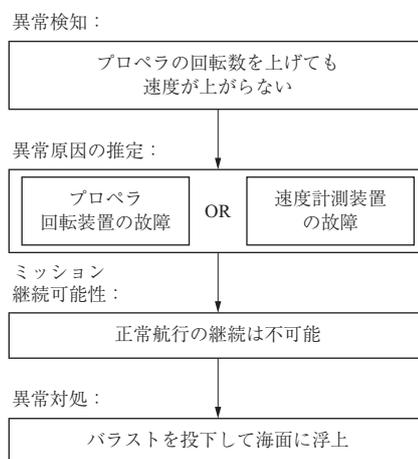
## 高度な自律制御

AUV に求められる主要な自律性としては、事前に設定された目標地点に向かうための経路を生成し、その経路を適切な速度・姿勢で移動すること。そして、発生した異常状態を異常と判断して（異常検知）、発生した異常に対して可能な範囲で作業を継続し、継続不可能と判断した場合は作業を中止して回収に向けたプロセスに移行すること（異常対処）などが考えられる。複数の無人ロボット運用時には、さらにほかのロボットとの協調制御が付加される。

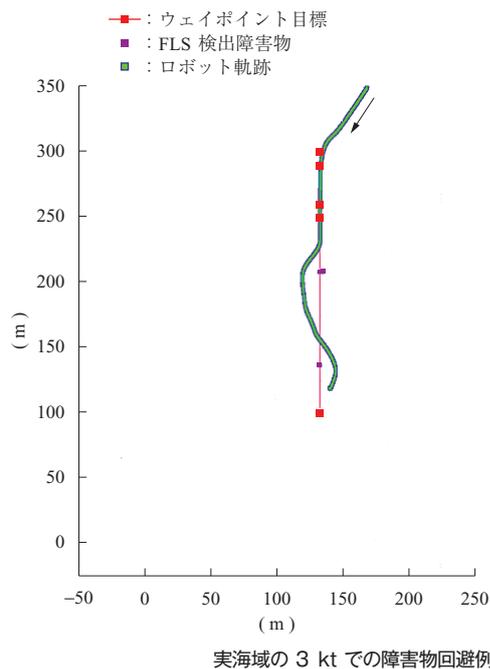
AUV における異常検知と異常対処の構築方法は、「このような場合にはこのように対処する」というルールの集まりで作られるのが一般的である。すなわち、「ある状態でのセンサーの計測値や状態推定値の正常範囲を定め、その範囲外では異常と考え、異常ごとに対処する」というルールの集まりで構築する。ルールの一例として「プロペラの回転数を上げてても速度が上がらない」異常を検知した場合の対処フローを下図に示す。

「何を異常として判定するか」、「その異常に対する適切な対処は何か」の制御ルールの積み上げが AUV を含む自律型無人ロボットの優劣を左右する技術情報である。IHI では AUV の実際の運用をとおして、こうした技術情報の蓄積に取り組んでいる。

また、自律型無人ロボット自身のシステム異常とはいええないが、異常な状態として自律的な対処が求められる事例として、経路上の障害物回避がある。この場合もルールとフローで実現されることが一般的である。

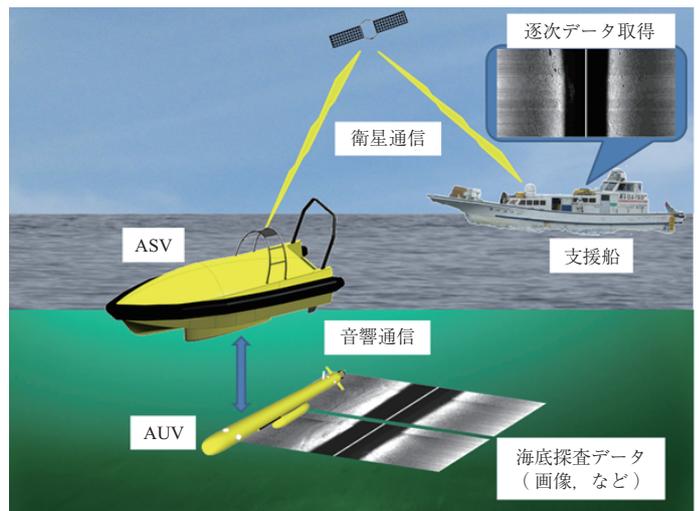


異常検知・異常対処フローの一例



AUV の機首に取り付けられた前方探知ソナー (FLS : Forward Looking Sonar) で経路上の障害物を探知し、回避した例を上図に示す。直線経路上に配置された二つの水中障害物を AUV が 3 kt で航走しながら連続で左右に回避している。

さらに高い自律性として複数の海洋無人ロボットによる協調航走が挙げられる。従来、AUV による海底探査では、AUV は支援船で輸送され、現場で投入されたのち、支援船の監視の下、1 対 1 で運用されていた。これに対して、同時に複数の AUV を運用できれば探査効率を高めることができる (タイトル下右図)。さらに、運用コストの高い支援船の代わりに AUV の監視を自律型海上無人ロボット (ASV : Autonomous Surface Vehicle) で行い、ASV からの情報に基づく遠隔監視が実現できれば、支援船はその間に別の作業が可能となり、より効率的である。このとき、ASV は、対象の AUV の位置、速度および目標方位などの情報を用いて AUV と協調航走すると共に、AUV の情報を逐次無線通信により支援船に伝送する。IHI が実現した ASV と AUV による協調航走と逐次データ伝送システムの概念図 (右上図) を示す。ASV が AUV と 5 kt で協調航走しながら、AUV の探査データを音響通信により取得し、そのデータを衛星通信により支援船に逐次伝送を行った。ASV の協調制御では、



協調航走と逐次データ伝送システム

AUV の測位ができない場合や、音響通信を失敗した場合の異常対処が特に重要となる。

## これからの展開

これまでに培ってきた自律型の海洋無人ロボット技術をもって 2010 年から 2014 年に実施された防衛省研究試作「無人航走体構成要素の研究試作」に参加し、ASV と AUV による協調航走、AUV のソナーデータの逐次データ伝送技術などを実現した。また、現在、内閣府主導の戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) の「次世代海洋資源調査技術」に参加し、複数の AUV と協調航走し、1 台でこれらを管制する ASV の開発を進めており、効率の良い海底探査システムの構築を目指している。さらに、社内では各種要素技術の開発に用いるため運用深度 3 000 m の AUV の開発も進めており (タイトル下左図)、これを活用したさらなる自律性、協調性の向上、海中ネットワーク技術、海中非接触給電技術、海中ドッキング技術などの開発を目指している。

問い合わせ先

株式会社 IHI

技術開発本部 管理部

電話 (045) 759-2213

URL : [www.ihj.co.jp/](http://www.ihj.co.jp/)