

# 複数の海底通信ノードと一つの移動する水中ロボットからなる 水中通信ネットワーク

## Underwater communication network consisting of multiple sea-bottom nodes and single moving underwater vehicle

近藤 逸人  
Hayato Kondo

東京海洋大学 学術研究院 海事システム工学部門

Department of Maritime Systems Engineering, Faculty, Tokyo University of Marine Science and Technology

Demand to observe underwater event where humans are hard to reach for years is increasing. Predicting the future by knowing the influence of the climate changes for marine ecosystem, Monitoring the environmental disturbances with the development of submarine resources are the present problems. This paper studies communication, positioning and control of an underwater vehicle in an underwater observation network which consists of multiple sea-bottom nodes, those are connected by cables from land and have power supply with fast communication channel, and a single underwater moving vehicle which carries battery cells and have slow acoustic communication channel with bottom nodes.

### 1. はじめに

人手が届きにくい海の中で起きている事象を、長期にわたって観測する需要が増している。気候変動が海洋生態系に及ぼす影響を把握して、将来の予測をしたり、海底資源開発に伴う環境擾乱をモニタリングしたりすることなどが直近の課題としてあげられる。本論文は、海底に敷設してケーブルで接続され、電源と高速な通信を確保できる複数の海底ノードと、電源をバッテリーとして自らに搭載して移動し、海底ノードとは音波を使って低速な通信しかおこなえない、一つの水中ロボットからなる海洋観測ネットワークを想定し、このネットワーク内の通信と、ロボットの測位および制御について考察する。

### 2. 海底観測ノードと自律型水中ロボット

海洋の中でどのような事象が起きているかということは、観測をすることにより把握することができる。従来、海洋観測は船から採水器や観測装置を降ろすという手法でおこなわれてきた。この後、有人潜水船や無人潜水機が開発され、深海を含めて多くの貴重な発見がもたらされた。これらの手法では、直接海中でサンプルを取得することができる点があり、観測できる空間領域は点や線、あるいは小さな面というのが大半であり、時間領域では、船舶が同じ場所へ観測に赴く必要があるため、非常に限定されたものであった。

近年では、海底に固定式の観測ノードを設置して各種のセンサを繋ぎ、陸からケーブルでこれらを結んで(ケーブル・オペレーター)365日24時間のリアルタイム観測が可能となった。空間的には限定されるものの、機器が故障しない限り、時間的には連続したデータを取得し続けることができる。日本では[地震津波海域観測研究開発センター]の地震・津波観測監視システム(DONET)が、米国では[Ocean Observatories Initiative]の観測網が、それぞれ既に稼働を始めており、世界的にも同様な海洋観測ネットワークが展開されていく方向となっている。

一方で、海中を比較的広範囲にわたって自動的に航行し、搭載したセンサで観測をおこなう自律型的水中ロボット(Autonomous Underwater Vehicle: 以下 AUV)が開発され、実用に供する時代となっている。

AUVは、バッテリー、コンピュータ、スラスタ(アクチュエータ)、運動・測位センサ、観測用装置等を搭載して、プリプログラムされて動作し、海中に投入されてからは、あらかじめ設定された航路点(ウェイポイント)を辿りながら、その間を一定高度、または一定深度で航行し、観測が終わると浮上して船舶に回収される。記録したデータはサイズも大きいので、回収後に取り出すのが一般的である。搭載可能なバッテリーの容量には重量的に限りがあり、観測可能な広さは限定的ではあるが、船とは独立して行動することができ、数時間から十数時間の間、自動的に観測をおこなう海洋観測プラットフォームとして大変有望視されている。AUVは3次元的空间領域を観測可能である点と、海上における風浪の影響を受けることなく、安定した観測をおこなえるため、得られる観測データの質が高いことが利点である。

容易に想像できる通り、空間的には限定的であるが、時間的には制限なく連続データを取得可能な海底観測ノードと、時間的には限定的な連続データではあるが、空間的な観測能力が高いAUVが組み合わせられれば、理想的な海洋観測ネットワークが構築されることになる。先に述べた海洋観測網に関しても、海底に固定されるノードにAUVがドッキングして充電をおこなう、ケーブルネットワークを通じてデータを陸上へ転送するという計画が進んでいる。

### 3. 海洋観測ネットワークにおける通信と測位

#### 3.1 従来のAUV通信と測位

従来のAUVの運用方法は、支援母船1隻に対してAUV1台により成り立っており、現在でも大半はこの形態で運用されている。自律型として、自動的に海中の観測をおこなうとはいえ、ひとたびロボットが水中に潜ってしまうと、正常に動作しているのか、不足の状況に立ち往生しているのか、海上から何時間も全く様子がわからないというのは、運用者の立場としては好ましくない。このため、通常は音波を使った水中音響通信により、支援母船とAUVの間に通信チャンネルが確保される。

連絡先: 近藤 逸人, 東京海洋大学 越中島キャンパス, 〒135-8533 東京都江東区越中島 2-1-6, 03-5245-7384, hkondo@kaiyodai.ac.jp

水中音響通信の変調方式は、周波数変調や位相変調が一般的に多く用いられ、周波数は数kHzから数十kHz程度、通信速度は数十bpsから数十kbps程度である。通信可能距離は、数千mから1万mを超えることも可能ではあるが、水中環境は船舶自身の放射する雑音や海象による雑音の影響を強く受け、海底や海面における多重反射や、海水の温度・密度分布により水中で屈折や反射が起きて、通信の途絶が頻繁に起こりやすい。AUVや船舶は互いに移動し、これに伴い、海底地形や海水の状況が時々刻々と変化する。通信速度(変調方式)により、通信の繋がりやすさや途絶の状況は変化し、高速であるほど、実際の環境では接続自体が難しくなる。このため、数百から数kbpsという通信速度多く使われる。さらに、水中における音波の伝搬速度はおよそ1,500m/sであり、通信遅れが生じる。

電波通信と比較すると、格段に通信速度が遅く、遅れ、途絶の頻度が高い。この環境下で複数のノードがネットワークを構成すること自体が、非常に困難であるため、理論的な研究が多く、実海域で用いられている音響通信ネットワークは、研究段階のものが多い。

AUVの測位については、海中でGPSは使うことができず、大半は音波による三角測量で位置を決めるか、ロボットに搭載されているドップラ式対地速度センサ、ジャイロコンパス、慣性航法装置等のセンサ情報から、積分により位置を推定する推測航法が用いられる。一般的には、これらを組み合わせて、時間的に位置推定誤差が蓄積していかないように運用されている。

### 3.2 沿岸域における海洋観測ネットワーク

本研究は、黒潮および内部波が強く影響する海域において、マルチスケールにおける動植物プランクトンの多様性の変動を評価し、その予測をすることを目的とした[山崎 2012 年~]の研究プロジェクトにおいて、東京湾沖の伊豆大島沿岸に海底観測ノードを設置し、この周辺をAUV[近藤 2014 年]が観測するという観測網の構築にあたり、AUVと海底ノードとの通信、および測位の手法を提案するものである。

深海観測などのように、一時的に観測をおこなう場合には、海底に幾つかの音響装置を沈めて、AUVからの問い合わせ信号に各装置が異なる周波数で同時に返答し、それぞれの往復時間を計測して、各装置との距離を求め、位置を推定するLBL音響測位法、あるいは、船舶に複数のハイドロフォンをアレイ状に配置し、その装置からAUVへ問い合わせ信号を発信して、AUVからの返答信号をアレイで受信して、距離と音波の到来方向を求めるUSBL音響測位法などがとられる。

本研究で対象とする海域は、沿岸部で水深が数十メートルと浅く、音響測位や音響通信にとって困難が予想される場所である。できる限り、多重反射の影響を受けないように、直接波により測位をおこなう必要があり、通信はなるべく短いパケットを用いる。このため、音響測位と音響通信は個別のものとして、音響通信に測位機能を兼用させる構成とする。

図1にネットワークの構成概念図を示す。AUVは沿岸部の浅い領域を観測するため、海底などと衝突する危険性が高く、深海における運用と比較して、頻繁に通信によって自らの状態を報告させる。頻繁におこなわれるこの通信を使って、AUVに原子時計と組み合わせた通信装置を搭載し、海底と陸上の装置と同期した通信をおこなう。通常、音響通信による距離計測は、相互通信が成立した段階で、ようやく一つの距離が求まるが、時刻同期をさせたネットワークを構築することにより、水中ロボットからの報告通信を、各海底ノードが受信すると、それぞれに対する距離をほぼ同時に求めることができる。この測位結果

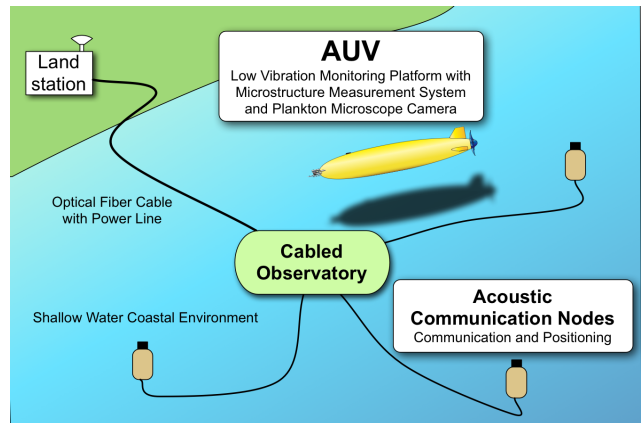


図1 浅海域の海洋観測ネットワーク

を、AUVの最寄りのノードから次の通信タイミングでAUVに対してデータ通信により伝送する。

この手順により、陸上ではAUVの状況と位置を絶えず把握することができ、かつAUV自身の測位と制御に対しても、位置データを供給してやるのが可能となる。

### 4. おわりに

本論文は、複数の海底ノードと一つのAUVから成る海洋観測ネットワークにおいて、音響通信ネットワークを使った通信と、測位の手法について述べた。

世界的に海底観測網とAUVが組み合わせて展開されるようになってきており、将来的には、船舶を運航させずとも、陸上の施設から海洋で起こっている事象をリアルタイムに把握しつつ、異常などがあればAUVに指示を送って、現場を調査させるといったような運用形態が実現されることになると思われる。

### 参考文献

- [地震津波海域観測研究開発センター]  
<http://www.jamstec.go.jp/donet/j/>
- [Ocean Observatories Initiative]  
<http://oceanobservatories.org/>
- [山崎 2012 年~]  
<http://www2.kaiyodai.ac.jp/~hide/JEDI/index.html>
- [近藤 2014 年] Hayato Kondo, Makoto Sato, Takeo Hotta, Acta Withamana, Masahiro Osakabe and Yohei Matsumoto: Development of a Marine Ecosystem and Microstructure Monitoring AUV for Plankton Environment, Proc. of 2014 IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicles (AUV2014) CD-ROM, pp.1-5, IEEE/OES, 2014.