

テーマ①-1 藻場探査用自律海中ロボットの開発 2017年度進捗報告  
(水中・水上ロボットシステムの開発)

内田博志\*1・仲嶋一\*2・池岡宏\*3・伍賀正典\*2

\*1 機械システム工学科、\*2 工学部スマートシステム学科、\*3 情報工学科

本文

■研究内容

- ① 藻場内部に生息する魚類の生態解明、藻場の分布や流れの調査を目的とする探査技術・探査システムを実現する。複雑に絡み合う藻類をくぐって内部に生息する魚類等の海洋生物の記録を取る水中ロボットを開発する。
- ② 水中ロボットの位置同定を支援すると同時に、海上、上空からも多角的な探査を行い、また水中ロボットからの探査情報を地上局に伝送するための、海中・海上ロボットシステム(水上ロボット、飛行ロボットを含む)を開発する。



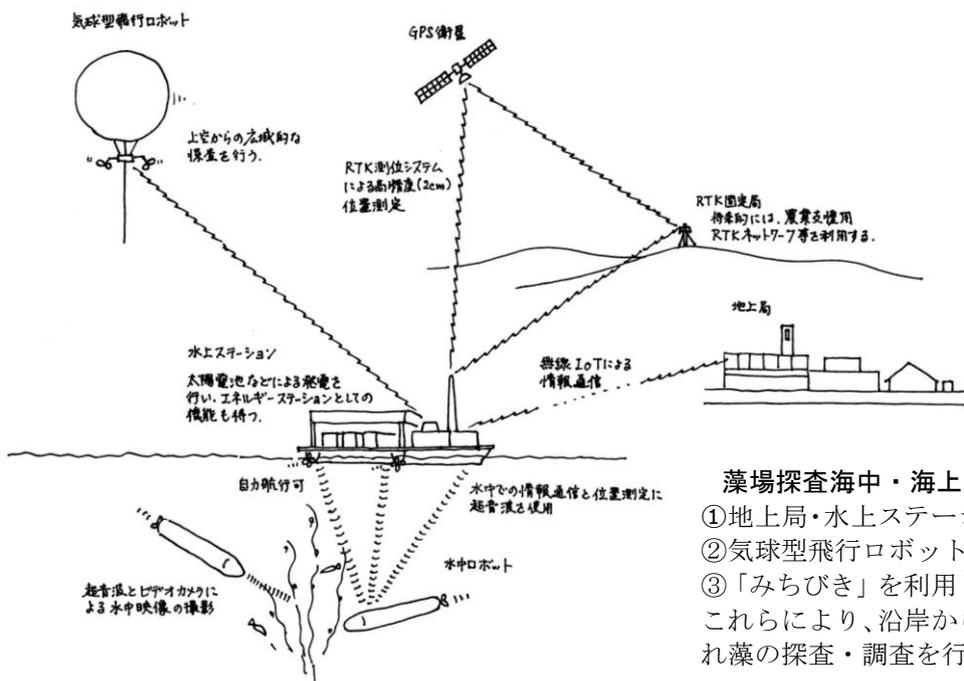
内海生物資源研究所(マリンバイオセンター)前の海岸(左)と同海域の藻場(右)



藻場探索海域(左)と開発中の水中ロボット(右)

■2017年度の主な成果

- ・ 水中ロボットと水上ロボットの雛形機の製作に着手した。ハードウェアは概ね完成し、現在、ソフトウェア開発と動作実験の方法について検討を進めている。
- ・ 水中ロボット、水上ロボット、飛行ロボットの三者からなる藻場探査ロボットシステムの全体構想を立案し、プロトタイプによる研究に必要な機材・資材の選定と導入を完了した。



藻場探査海中・海上ロボットシステム

- ① 地上局・水上ステーション間の無線通信
- ② 気球型飛行ロボットによる空中探査
- ③ 「みちびき」を利用した高精度位置計測  
これらにより、沿岸から離れた海域での流れ藻の探査・調査を行う

## ■2018年度の研究計画

- 海中・海上ロボットは、2017年度に製作した雛形機による実験を通じて運動制御技術の基礎技術を開発する。気球型飛行ロボットは、2017年度に購入を用いて行った基礎テストをもとに、藻場探査を目的とする最適形状と制御方法を見出し、独自方式の飛行ロボットを製作する。それぞれの具体的な研究内容は以下の通り：

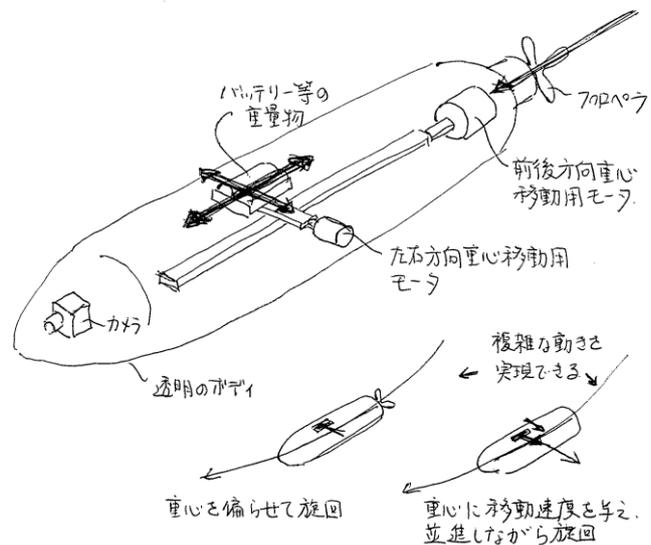
- ① 海中・海上ロボット：各ロボットの力学モデルに基づいて運動制御プログラムを作成し、遠隔操作で動作できるロボットを完成させる。実験用水槽内、内海研前の海岸などで実験を行い、藻場内での運動性など基本的な機能・性能を検証する。また観察対象である魚類への影響度を観察する。
- ② 気球型飛行ロボット：係留状態下の遠隔操作で、海面上空から藻場の分布状態などを観察するための基本方策を確立する。具体的には、気球に取り付けた小型ドローンにより、気球の動作を安定化するための制御プログラムを作成する。

## ■運動制御面の研究課題

### (1) 運動制御機構

水中ロボットは、藻場探査に関連して最も運動制御面の技術を要する。藻場は不定形の海藻類が海中に繁茂する場所であり、その中を支障なく円滑に航行して探査活動を行うためには、小型で、船体に突起部を持たず、外形は魚のように滑らかである必要がある。このため、浮上、降下、転舵などの運動制御は、水中翼や昇降舵、方向舵などによらず、内部に可動式の質量（電源用バッテリーなどを利用）を持ち、それによる船体の重心移動によって行う（右図参照）。

このような運動制御方法は、「水中グライダー」と呼ばれる自律水中ロボットに一部採用されているが、全面的な運動制御に用いた例はまだ見られない。



水中ロボットの運動制御機構概念図

### (2) 運動制御法

また水中ロボットの運動制御に関連する他の課題として、この種の移動体の「非ホロノミック性」が挙げられる。水中や空中を拘束なく移動する物体は6つの自由度（3方向の並進と3軸周りの回転）を持つが、それに対して推進機が6未満の自由度しか持たない場合には、その移動体は非ホロノミック系となり、位置や向きを完全に自由に制御することができない。水中ロボットは、通常3個前後のスラストしか持たないので一般に非ホロノミック系となるが、そのような条件下でも疑似的に6自由度の推進機を与える制御方法の研究が行われている。

興味深い制御方法の一つとして、「エネルギー最適制御」と呼ばれる制御法を水中ロボットの運動制御に適用することにより、わずか1個のスラストで6自由度の位置・姿勢制御を行ったとする報告が見られる。

本研究では、以上の機構や制御法の適用・改良により、動作困難な藻場内部での自由度の高い水中ロボットの運動を実現する考えである。

参考文献：

- [1] N. Fukushima, et. al; An Optimal Control Method Based on the Energy Flow Equation, IEEE Trans. on Control Systems Technology, pp. 866-875 (2009).
- [2] M. S. Arslan, et. al; Nonlinear optimal control of an AUV and its actuator failure compensation, 2008 10th Int. Conf. on Control, Automation, Robotics and Vision, pp. 668-673 (2008).
- [3] M. S. Arslan, et. al; Control of an ellipsoidal underwater vehicle with single actuator, 2008 Canadian Conf. on Electrical and Computer Engineering, pp. 001433-001436 (2008).
- [4] M. S. Arslan, et. al; Optimal Control of an Underwater Vehicle with Single Actuator, 2007 Sym. on Underwater Technology and Workshop on Scientific Use of Submarine Cables and Related Technologies, pp. 581-587 (2007).

#### ■2019 年度以降の研究計画

(2019 年度)

- 水中および実際の海中での実験を通じて、技術の完成度を高める。自律運転に必要な、環境認識、経路計画、ポジショニングの各技術を実験システムに組み込む。
- 自律ロボットシステムの主要技術を完成させる。
- ロボット運動制御面では、スムーズで柔軟性の高い非ホロミック系制御技術を完成させる。

(2020 年度)

- 超音波と光によるセンシング・通信技術との統合により、自律的に海中探査を行うロボットシステムを実現する
- 生命工学部との共同により、流れ藻内の生態系調査など、実際的な海洋調査研究課題への適用を検討する。

(2021 年度)

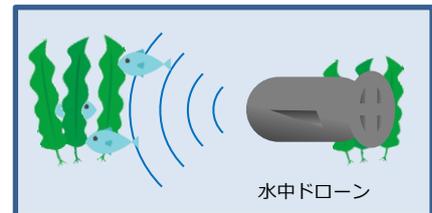
- 地元漁業・水産業との連携や共同研究、他の海洋調査研究への応用展開を検討する。

## テーマ①-1 藻場探査用自律海中ロボットの開発 2017年度進捗報告 (人工知能技術を用いた水中ドローン自律航行支援システムの開発)

池岡宏  
工学部情報工学科

### ■研究の背景目的

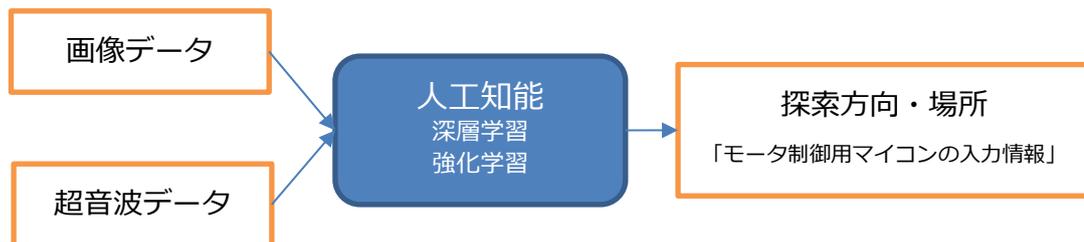
多くの魚類が生息する「藻場」の生態観測に、水中ドローンを用いた直近観測の実現が有用であると考えられる。ただし、藻場は瀬戸内海の広範囲に点在するため、その探索や観測には様々な面で大きなコストがかかる。そこで、人工知能技術による水中ドローンの自動航行を支援することで、効率的な藻場探索・観測の実現を目指す。



### ■研究内容

藻場探索・観測用水中ドローンの自動航行を実現する際、海底の様子・状況を把握するため、画像センサ（カメラ）と超音波センサを利用することを考えている。なお、それぞれのデータから得られる情報の性格は、水中では以下のような特徴を持つ。

- (1) 画像データ： 長所「詳細な海底環境の情報の取得」、短所「近傍領域に限定」
  - (2) 超音波データ： 長所「広範囲領域に対応」、短所「距離、おおまかな材質※の判定」
- ※魚類、海藻、泥質、岩礁 など



研究スケジュールの前半は、シミュレーション環境下で、基本的な性能を持った人工知能を構築することが目標となる。従ってまずは、シミュレーション下で意味のある学習ができる仮想の海中空間の構築が、当面の目標となる。なお、本研究で用いる人工知能技術は深層学習（ディープラーニング）や強化学習となるが、実環境下での実験をスムーズに進めるためにも、本段階で転移学習の基盤となる信頼性の高いニューラルネットワークを構築することがその後の実験の進捗に大きく影響することになる。現在は、実際の海底深度データ等を使うなどして、できるだけリアルな海底を仮想空間（シミュレーション）上に再現することを試みている。

加えて、実際に搭載可能なハードウェアについても検討していく必要がある。実機に搭載可能なセンサ（カメラおよび超音波装置）には、水中ドローンの構造・性能やコストに係る大きな制約が課せられる。従って、各センサから得られるデータの精度等を確認することも重要であり、それらの制約を盛り込んだうえで、シミュレーション下で意味のある学習を行う予定である。最終的には、実環境下での実験で人工知能技術の改良を行うことになる。

### ■将来の展望

本研究では、単機的水中ドローンによる藻場探索・観測の自動化・高効率化が目標となるが、本研究の先には、複数の水中ドローンが連携し、より広範囲をより短時間で効率良く藻場探査・観測を可能とするシステムへの拡張という展望も見えてくる。その際の検討項目として、水中ドローン間での通信、連携用の人工知能の開発など、新たな検討項目が挙げられるが、水中ドローンへの人工知能技術の搭載については、大きな可能性がある。

## テーマ①-1 藻場探査用自律海中ロボットの開発 2017年度進捗報告 (水中/水上間通信システムの開発)

仲嶋一

工学部スマートシステム学科

### 本文

#### ① 目的

藻場を自律的に移動し観測しデータを取得する海中ロボットシステムにおいても、各時点における観測対象の状況は研究者による把握が必要である。このため、水中ロボットから得られる画像その他の情報は動画でなくとも、秒数枚程度の準リアルタイムで陸上の研究ステーションに伝送される必要がある。一方、藻場を縫いながら移動・探査するロボットにとって通信ケーブルは行動を阻害し、時として障害物に絡まって行動不能になる危険があり、極力ワイヤレスのシステムとするのが良いと考えられる。このような背景と、水中ロボットには常にその上部に水上ステーションが追従し、その深度つまり水上ステーションと水中ロボットの距離が 10m程度であることを前提とし、最適の通信システムを構築し、水中ロボットシステムに実装することをこの課題の目的としている。

#### ②2017 年度の実施目標及び実施計画

本年度は水中ロボット本体の構築を主として実施されたため、本通信システムに関しては先行技術調査と構想設計、2018 年度以降の実施計画の策定につき実施した。

#### ③成果（方式検討）

水中では電磁波は 100kHz~1MHz にて-10~-31dB/m 程度<sup>(1)</sup>と極めて減衰が激しく、10m 程度の距離の通信を行うことは極めて困難である。このため、海中の通信としては音波が主に用いられてきた。しかし、音波の水中の伝搬減衰は小さいものの、マルチパスによる遅延波が主信号に干渉することにより通信品質を劣化させる現象、音速が比較的小さいことによる媒質（海水）の流れによるドップラー効果が発生する。この影響を低減するため、デジタルデータ伝送ではスペクトラム拡散方式がよく用いられる。この方式は、送信側の一次変調の周波数スペクトルを広域のスペクトルに拡散し、受信側で狭帯域に復調するもので、ノイズや干渉の影響が広いスペクトル帯域に分散されるので、耐干渉性、耐雑音性が高いという特徴がある。これに BCH 符号やリードソロモン符号と言った誤り訂正符号を付したものが現行の通信機として用いられている。このような処理方式のデジタル音響通信機としては、JAMSTIC のうらしま搭載の 16kbps 画像伝送用通信機、KDDI の AQUA EXPLORER 2 搭載の 16kbps 高速データ通信機がある<sup>(2)</sup>。しかし、これら通信機は深海域の探査用 AUV に搭載される大型の機器であり、藻場のような浅深度の小型探査機に用いるものとは基本構想から異なるものである。

全長 20~30cm の小型で音響反射の激しい海底に添って移動する探査機に搭載する通信機として考えるとき、上記のような高速通信は非常に困難が予想される。このような悪環境下で用いられる機器の開発は技術的に意義深いものであるが、探査機の短期的な開発としては不適と考えられた。一方、光通信は音響通信に比べて減衰が激しいものの、可視域で 10m 程度の距離であれば 1/100 以下の減衰での伝搬が可能である。

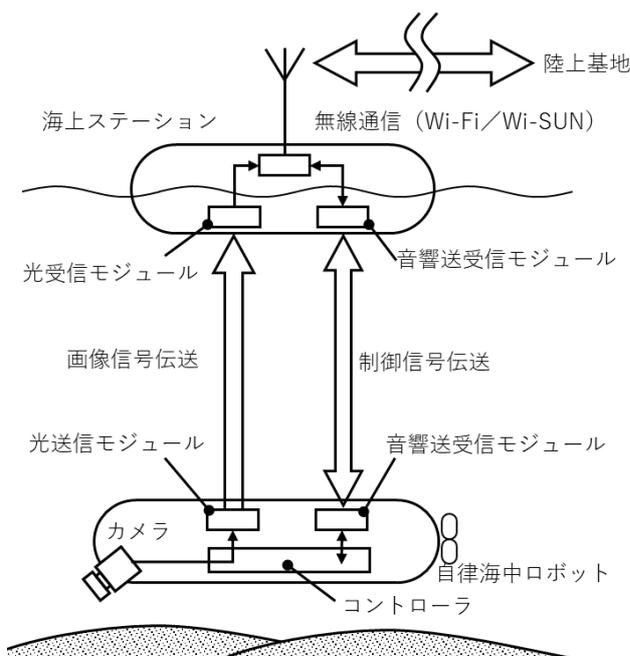


図1 通信システム構成概要

また、画像の伝送を行うような場合は比較的海中の澄んだ状態であり、光通信でも十分に可能であると考えられる。さらに可視光通信は屋内近距離通信用に多数開発、市販化されており、これらの変復調回路に LED 駆動回路を付加して高出力化する事により容易に通信系を構築する事が可能である。上記のような理由により、自律海中ロボットの高速データ伝送用としては可視光 LED による通信を採用する事とする。

一方、制御信号用としては、海水の濁度の増加や海藻による遮蔽などを含むあらゆる環境での双方向通信が必要である事、画像程の通信容量を必要としない事から、音響通信を採用する事とする。音響通信に関しては、本研究のような環境での高速通信に対する課題が存在する事から、長期的な研究課題として並行して開発を進める事とし、状況によっては音響通信に一本化した通信システムを海中ロボットに搭載する事も検討する。

#### ④今後の計画

2019 年度：LED 通信モジュールを改造した送受信系及び音響送受信系を試作し、海中ロボットを模擬した機密容器に封入して海中での通信性能を評価する。評価結果に基づき改良、最適化した通信モジュールを試作し、海中ロボットに搭載する。

2020 年度：海中ロボットの実運用による性能評価を行い、適宜改善を実施する。並行して超音波通信の高速化として、海中ロボットの動作環境下でのマルチパスの影響や海流、海中ロボット・海上ステーションの動きによるドップラー効果の影響を評価し、通信システムの基本設計を行う。

2021 年度：音響高速通信システムの基礎評価モデルを試作し、実環境における評価を行って課題抽出を行う。

2022 年度：海中ロボットの通信システムとしての妥当性を判断し、妥当であれば以降の観察システムとして組み込み、研究に供する。

#### 参考文献

- (1) JAMSTEC ホームページ：<https://www.jamstec.go.jp/j/kids/jiyu-kenkyu/006/>
- (2) 平成 16 年度水中音響通信の高度化による海洋産業の発展と新事業創出等効果に関する調査研究報告書、日本機械工業連合会