

テーマ①-2 藻場探査用自律水中ロボットの開発 2018 年度進捗報告 (海中探査ロボットシステムの開発)

内田博志

工学部機械システム工学科

① 目的

藻場内部に生息する魚類の生態解明、藻場の分布の調査を目的とする探査技術・探査システムを実現する。海中、海上、上空から多角的な探査を行うための、海中探査ロボットシステムを開発する。

② 2018 年度の実施目標及び実施計画

2018 年度は、下記の 3 項目を実施目標とする活動を行った。

- 1) 水中ロボットシミュレータ：水中ロボット制御プログラム開発環境の一つとして、水中ロボットシミュレータ（以下 UWRS）を開発する。これを通じて、ロボットの力学モデルに基づく運動制御方法、超音波センサ信号や海底の画像情報に基づく自律制御方法を検討する。
- 2) 水中ロボットシステム：小型水中ロボットの試作改良とプログラム開発を行う。実験用水槽内、内海資源研究所付近の海岸などで実験を行い、水中での運動性能など基本的な機能・性能を検証する。
- 3) 空撮による藻場地図情報取得：気球による空撮で藻場の位置や形状の情報を得る実験を内海資源研究所付近の海岸で行う。通常の小型デジタルカメラによる空撮に加えて、赤外線カメラによる空撮も行い、両カメラによる藻場地図情報取得の可能性を探る。

③ 成果

1) 水中ロボットシミュレータ

水中ロボットの運動制御・自律制御プログラム開発環境として 3 種類のソフトウェア（UWsim、uuv simulator、AirSim）をプラットフォームとする UWRS の開発を行った。

UWsim と uuv simulator はいずれも Linux 上で動作するオープンソースの UWRS であり、UWsim は専用のグラフィックウィンドーによる高速動作を、uuv simulator は汎用ロボットシミュレータである Gazebo をベースとする応用可能性の広さを特徴とする。いずれも水中ロボットのダイナミクスや装備するセンサを設定するためのパッケージやプラグインが提供されているので、ロボットの設計条件を変更しつつシミュレーションを行うことが可能である（ただしロボットの基本構造を変更する標準機能は UWsim では提供されていない）。またいずれもロボット動作環境の設計機能を有するが、藻場を含む環境モデルは提供されていないため、現在、藻場環境の製作を進めている。図 1 に、UWsim による AUV 型水中ロボットのシミュレーションの様子を示す。

AirSim は Windows 上で動作するオープンソースの自動車・マルチコプター用シミュレータであるが、本研究ではマルチコプター向けの機能を流用して UWRS として利用している。このため、現在のシミュレーションにおける水中ロボットはマルチコプター型を仮定している。

AirSim はゲーム用ソフトウェアである Unreal Engine をプラットフォームとする動作モードと、同じくゲーム用である Unity による動作モードを持ち、いずれにおいても動作環境のモデリング機能が提供されている。したがって UWRS 用水中動作環境のモデリングを独自に行うことが可能であるが、ゲーム用動作環境として、藻場を含む複数の水中環境モデルが公開されている

（AirSim の標準機能ではなく Unreal Engine や Unity の一般ユーザーによる有償の公開情報）ため、それらのモデルを利用すれば藻場環境のモデリングは比較的容易である。半面、ロボットの基本構造の設定機能は提供されていないため、現在、実験用水中ロボットの構造をシミュレータ内に設定するための方法を調査中である。図 2 に、AirSim によるマルチコプター型水中ロボットの藻場内潜行シミュレーションの様子を示す。



図 1. UWsim による AUV 型水中ロボットのシミュレーション



図 2. AirSim によるマルチコプター型水中ロボットの藻場内潜行シミュレーション

2) 水中ロボットシステム

藻場内を探索するためのロボットシステムは、水中ロボット、水上ロボット、飛行ロボットの三者による構成を考えているが、現段階ではシステムの中核となる水中ロボットを優先して開発している。図 3 に開発中の小型水中ロボットを、図 4 にその構成を示す。この水中ロボットは、メインコントローラとして Arduino Uno を用いており、その周辺に内界センサとしてのデジタルコンパス、加速度センサ (ジャイロを含む)、外界センサとしての小型デジタルカメラ、超音波センサ 6 個、アクチュエータとしてのスラスタ 3 基などを備えている。

水中ロボットの制御プログラムは未完成であるが、2018 年度は一部の制御プログラムを用いて水槽内での潜行実験を行った (図 5)。実験は数回行ったが、日を置いて実験を再開するたびにスラスタの動作不良が生じたため、スラスタを分解してその原因を調べたところ、スラスタ内への水の浸入によりモーターに腐食が生じていることがわかった (図 6)。

スラスタには自作水中模型用として手軽に利用できるタミヤ製水中モーターを用いており、これは元来水中で使用するものであるが、上記の経験から水中使用時の耐久性は必ずしも高くはないことがわかった。またこの水中モーター 3 基をスラスタとする水中ロボットの航行速度は比較的遅く 50~100mm/s 程度であった。このため現在、水中での使用によく耐え、より大きな推力が得られるスラスタの製作を検討中である。

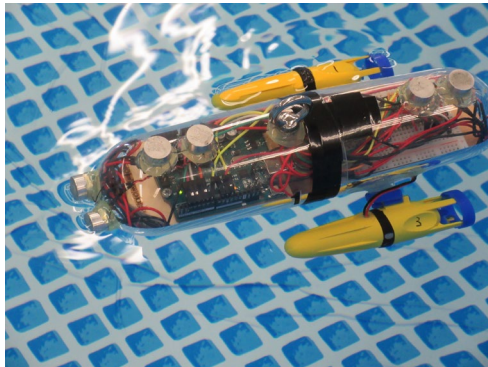


図 3. 開発中の小型水中ロボット

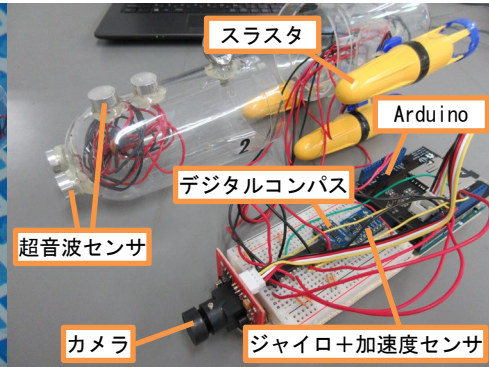


図 4. 左の水中ロボットの構成



図 5. 水槽内での潜行実験

図 6. スラスタ内の浸水によるモーターの腐食

3) 空撮による藻場地図情報取得

水中ロボットによる海中の自律探索では、ロボットにあらかじめ藻場の地図情報を与えておくことにより、より確実に効率的な藻場探査が期待できる。そこで、海面の空撮写真から藻場が辺別できるかを確認するための実験を、福山大学内海資源研究所東側の海岸付近で行った(図 7)。



図 7. 気球による藻場観測実験

図 8 は、気球を約 120m の高さまで上げたときの、通常のデジタルカメラによる空撮写真である。浅瀬の一部に藻場らしきものが見えるものの、海底の深さが一定以上の領域では全体に海面の青緑色が広がっており、藻場の位置が判然としない。そこで画像の微妙な色の違いを強調するため、画像処理手法の一つであるカラースワッピングを施したところ、藻場と海底の砂地の部分が異なる色となり、藻場の範囲が比較的明瞭に判別できる画像となった(画像中の線や文字は海洋生物科学科の山岸幸正准教授による)。アオサ藻体は不定形で、アマモは線状の葉を持つが、そのような形状の違いも幾分確認できている。

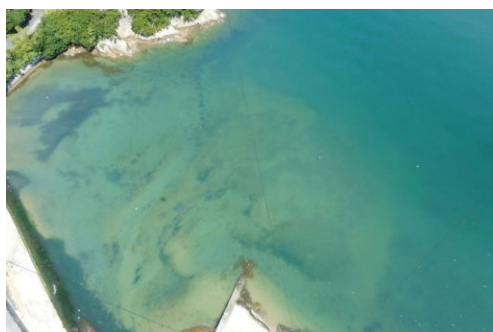


図 8. 通常のデジタルカメラによる藻場海域の空撮写真

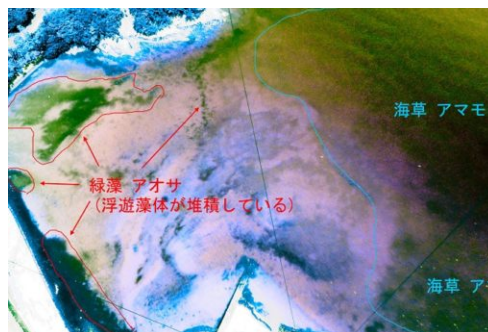


図 9. 画像処理による藻場領域の強調

次に、赤外線カメラによる空撮を行った。赤外線カメラは、普通の小型デジタルカメラを改造(IR カットフィルタを除去し IR フィルタを挿入)して製作した。図 10 は、図 8 と同じ海岸部分を、その赤外線カメラで空撮したものである(カラー写真として撮影後、画像処理によりモノクロ化した)。水中では青緑色領域以外の光は減衰が大きく、赤外光は特に強く減衰されるため、海面はほぼ黒一色となるが、植物は赤外線を強く反射する性質があるため、白色に近い色となって現れる。海面上に見られる白い筋状の部分は枯死して海底から抜けたアマモが一群となって海面を浮遊しているものである。



図 10. 赤外線カメラによる藻場海域の空撮写真

図 11 と図 12 は、通常のデジタルカメラによる藻場海域沿岸部の写真と、同位置から撮影した赤外線写真を比較したものである。図 11 の通常写真では判別しにくいアマモの浮遊物が、図 12 の赤外線写真（右）では明瞭に判別できる。海藻や海草が抜けて海面を浮遊する「流れ藻」は、種々の海洋動物の生息場所として海洋生物学における重要な研究対象の一つとなっており、赤外線による空撮は、流れ藻研究に寄与する観測手段として期待が持てるといえる。



図 11. 通常のデジタルカメラによる藻場海域沿岸部の写真



図 12. 左と同位置の赤外線写真

④ 今後の計画

- 1) 水中ロボットシミュレータ：ロボット構造や海中環境などを完成レベルのものにすると同時に、2018 年度は着手できなかった運動制御方法、自律制御方法の検討を進める。
- 2) 水中ロボットシステム：耐水性をはじめとする信頼性を向上して、長時間・長期間の水中活動に耐える機体構造を開発する。また大きな推力を発生してロボットの運動性能を高める小型水中ロボット用スラストを開発する。
- 3) 空撮による藻場地図情報取得：気球に GPS と無線通信器を装備し、地上および浮上中の水中ロボットに藻場の位置・形状情報を提供する機能を開発する。

参考文献

- [1] UWSim | The UnderWater Simulator, <http://www.irs.uji.es/uwsim/>
- [2] Unmanned Underwater Vehicle Simulator Documentation, <https://uuvsimulator.github.io/>
- [3] AirSim - Microsoft Open Source, <https://microsoft.github.io/AirSim/>
- [4] G. M. Hale and M. R. Querry, "Optical constants of water in the 200nm to 200 μ m wavelength region," *Appl. Opt.*, 12, 555--563, (1973).
- [5] W. M. Irvine, J. B. Pollack, "Infrared optical properties of water and ice spheres," *Icarus*, 8, 324-360 (1968).

テーマ①-2 藻場探査用自律水中ロボットの開発 2018 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

① 目的

藻場を自律的に移動し観測しデータを取得する水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随し、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。

② 2018 年度の実施目標及び実施計画

送受信系を試作し、水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、水中ロボットに搭載する。



図 1 評価した素子

③ 成果 (方式検討)

前年度の検討にて抽出した音響通信と光通信の 2 方式に対し、音響通信より検討を開始した。送受信デバイスとしては、海中での防水性能が確保されていてかつ高周波の超音波を送受信可能なものとしてソナーが考えられた。但し、ソナーはパルス駆動はするものの通信機としての高周波の動作が保証されているものではなく特性の開示もされていないので、その動作特性の評価より開始した。選定したソナー振動子は本多電子製 TD04A で、使用周波数は 200kHz である。

図 2 にソナー素子を直近に対向させて送受信を行い、その波形を観測した結果

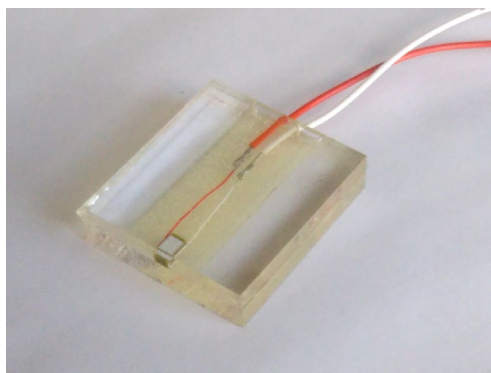


図 3 積層セラミックアクチュエータを用いた試作センサ

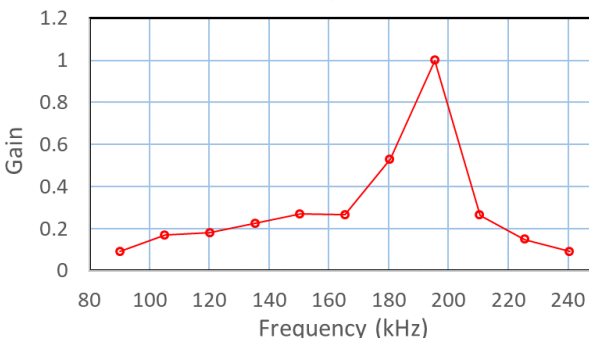
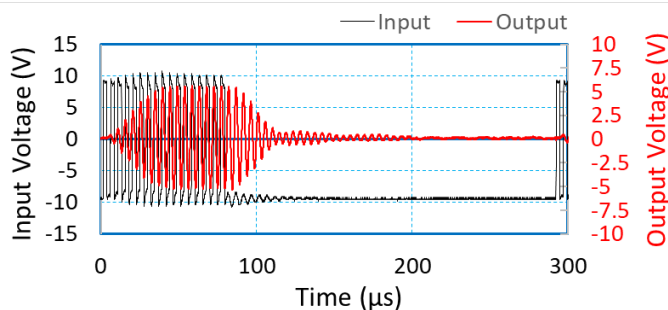


図 5 ソナーの送信周波数特性 (アクチュエータ改造センサによる測定)

図 4 アクチュエータを送受信素子とした場合の周波数特性

を示す。搬送波は 200kHz の矩形波であり、それを幅約 80 μ s のパルスでソナーに入力している。信号の立ち上がり時間は約 30 μ s であり、系の帯域幅

は約 11kHz と見積もられた。

また、特性評価用に超音波アクチュエータ (Tokin, AE0203D04DF, 共振周波数仕様 261kHz) を購入し、周囲をアクリル樹脂板とエポキシ樹脂で覆って、図 3 のような耐水センサを試作した。このアクチュエータを 2 個付き合わせて送受信した場合の周波数特性を図 4 に示す。約 250kHz にピークを持っており、仕様値に近い値であるが周辺の物質の影響を受け若干低下している。このセンサを受信としてソナーの周波数特性を測定したものが図 5 である。図 4 の特性の 1/2 乗の逆数をセンサ単体の周波数特性補正值として乗算している。190~200kHz にピークを持ち半値全幅で 20kHz 程度である。以上より、ソナーを使った通信では、200kHz を搬送波として、せいぜい 20kHz の信号伝送が可能という事であり、QPSK を用いて 40kbps/s が目標となる。

④今後の計画

2019 年度：ソナー素子を送受信とする最適駆動回路を設計・試作し、その動作特の検証と実環境での送受信試験を行って海流による位相揺らぎや海底、海面からの反射によるマルチパスの影響を評価してビットエラーレート、通信容量の見積もりを行と共に、ダイバーシティの検討を行う。

2020 年度：水中ロボットへの搭載に向けた設計を行う。超音波通信の高速化として、水中ロボットの動作環境下でのマルチパスの影響や海流、水中ロボット・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。

参考文献

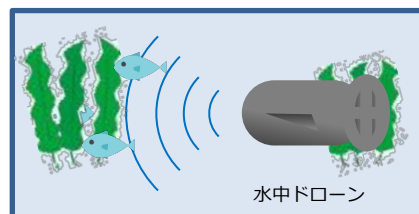
- (1) JAMSTEC ホームページ : <https://www.jamstec.go.jp/j/kids/jiyu-kenkyu/006/>
- (2) 平成 16 年度水中音響通信の高度化による海洋産業の発展と新事業創出等効果に関する調査研究報告書、日本機械工業連合会

テーマ①-2 藻場探査用自律水中ロボットの開発 2018 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・観察の実現を目指す。



■ 2018 年度の実施目標および実施計画内容

2018 年度は、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を目標とした。

そこで、まずシミュレーション下で学習ができるように、仮想の海中空間の構築作業をおこなった。日本海洋データセンターのメッシュデータで瀬戸内海の基本的な海底形状を生成し、その後ランダムノイズで、海底の形状の細部を再現した。加えて、岩や魚、藻場等のモデルも乱数を元に配した。また、奥行に伴い視界が悪くなるように水に濁りを加えるなども行った。

平行して、障害物を避けながら藻場探索用の基礎的な人工知能の開発を行った。本開発では、模倣学習の手法を取り入れた強化学習を試行した。模倣学習とは人間が予め手で水中ドローン进行操作し、そのデータに基づき学習を開始することで、学習効率を上げる手法である。現段階では、水中ドローン前方に対する距離計および藻場かそれ以外かの判別可能な簡易的なカメラモデルを装備した形でシミュレーションを実施した。水中ドローンの移動速度が速いと藻場探索は素早く行われるが、障害物に衝突することが多くなり、一方移動速度が遅いと、藻場探索に非常に時間がかかる。これらの報酬設計を適切に行うことで、人工知能に学習が可能であることを確認した。

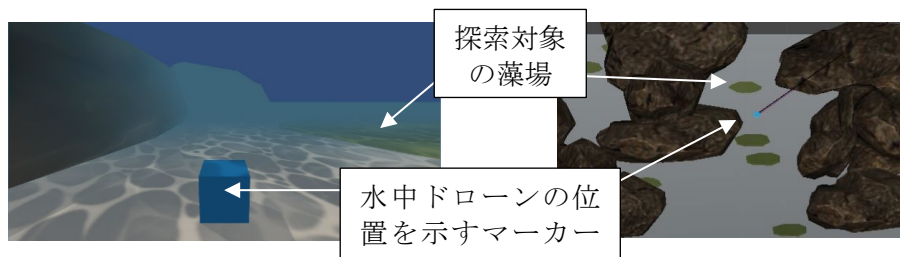


図 シミュレーション環境と人工知能の学習の様子

■ 今後の計画

さらに実環境に近いシミュレーション環境の構築を進める予定である。現在利用しているメッシュデータは無料で利用可能な非常に粗いものであり、細かいメッシュデータに切り替える予定である。加えて、海底の岩や藻場の配置も単純な乱数を用いたものから、ある程度瀬戸内海の特徴を反映したものにする。また、時期にも依存する水中の濁りや水流等を整備し、さらに報酬設計を見直すことで人工知能の学習環境の強化を図る予定である。並行して、実画像による藻場判別可能な画像認識部の開発が必要である。このためには、大量の画像データが必要になるため、この取得方法について検討したい。なお、実際に大量のデータさえ入手できれば、ディープラーニングを用いた画像認識性能を考えると、ある程度の性能が出るが見込める。