

田中聡・伍賀正典・仲嶋一
工学部スマートシステム学科

■ 目的

瀬戸内海の里海と呼ばれる生物多様性を有する沿岸海域において、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のために、水中の様々な環境情報を多角的方面から取得するシステムを開発する(図1)。生物の生態は環境に大きく依存して(適応して)いることは周知の通りである。海流によってプランクトンや稚魚が漂流し、それを追って大型魚が集まる。そのような捕食者から逃れるように藻場に隠れて多くの魚類が生息するとは考えられているが、実際はそれがどのような場になっているのかを知ることが難しい。

今回の研究プロジェクトではそのような場にメスをいれて、多くの観測器を分布的に海底に設置し、広い範囲で藻場の中の環境を明らかにすることを目標としている。そのためには生息する生物に大きな擾乱を与えないで観測する手段を比較的低価格で用意する必要がある。筆者らはそうした場に固定カメラを設置して長時間の動画やデータの記録を残すことを最終目標としている。

生物観察用や観光用など海底に置くカメラは既に多く製品化されている[1][2]。しかしながら、筆者らの目標とするのはまずは物理的な環境要因を画像から解析することである。すなわち瀬戸内海のような遠浅で水底まで日光が入るような環境において、どのように海流や温度が変化してそれにとまってどのように海藻や魚類が移動・変化するのかを調べることである。海流の速度や方向の測定は実際にやってみると難しい場合が多い。たとえば、河川の水流はニュートン流体ならば表面が最も早く水底ほど遅いはずだが、実際は水面から20%の深さが最も流速が早い場合が多い。これは水面では波や風の抵抗で層流とはならないからだといわれている。海表面はさらに複雑で海面の波の動きは浜辺に寄る波と浜辺から離れる波などさまざまな方向への波面がモザイク状に組み合っており、海中の海水の動きとつながりがみられないものも多く、海流の動きを表層から見るだけではわからないといえる。そこで、海中にカメラを置いて、海中を移動する物体に焦点をあてて追跡することにより、その深さでどのような海流があるのかを調べようというのがこのカメラの目的である。

この装置は、画像取得のために実装されたカメラを海底から海面の方向に向けて設置し、海中を移動する物体の3次元座標を測定することにより海流の方向や流速を求める機能がある。

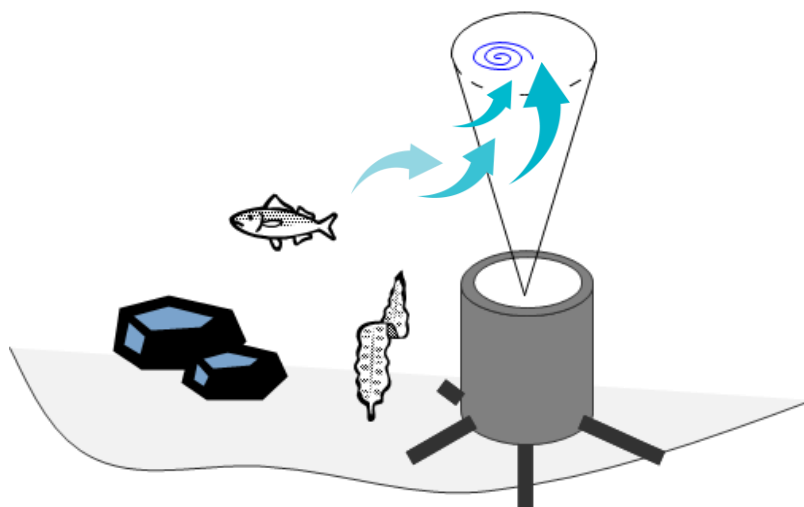


図1 藻場環境観測システムのイメージ

さらに水深、流速、温度(水温)、カメラの方向、時刻を測定してデータの補正を行う。本装置

は実験段階とはいえ実用システムとしての運用を目指していることから、信頼性および安全性、長期安定性に十分に配慮した設計が求められているとともに、性能のみならず、運用上の利便性や課題にも配慮した構造とし、周辺機器および運用ソフトウェアやマニュアルの充実も考慮して開発する必要がある。

■ 2017 年度の実施目標及び実施計画

本年度は研究ブランディング事業採択による研究開始年度のため、藻場環境観測プロジェクト全体として藻場の状態を把握するために有効な環境パラメータの抽出と構想設計、2018 年度以降の実施計画の策定に特化して研究を進めた。その中で、海水の流れを低価格で計測する手段としてカメラを用いての水流センサの開発、このカメラによる計測を基本として更に水深、流速、温度（水温）、カメラの方向、時刻を測定してデータの補正を行う統合センサシステム、長期設置による観測窓への藻類の付着を防止する構造、このコンセプトから実行計画に至るまでが 2017 年度の実施事項である。

■ 参考文献

- [1] 水中カメラ 広和株式会社,<http://www.kwk.co.jp/marine/products/camera.html>
- [2] Waterproof Marine Network IP Cameras , IRIS Co.,
<http://www.boat-cameras.com/products/ip-cameras/>

藻場環境観測システムの開発 (海流を計測するための海底カメラシステム)

田中 聡
工学部スマートシステム学科

本文

■研究の背景目的

筆者らは藻場に固定カメラを設置して長時間の動画記録を残し、瀬戸内海のような遠浅で水底まで日光が入るような環境においてどのように海流が変化してそれにもなまって海藻や魚類が移動するのかを調べることを最終目標としている。海流の速度や方向の測定は実際にやってみると難しい場合が多い。たとえば、河川の水流はニュートン流体ならば表面が最も早く水底ほど遅いはずだが、実際は水面から20%の深さが最も流速が早い場合が多い。これは水面では波や風の抵抗で層流とはならないからだといわれている。海表面はさらに複雑で海面の波の動きは浜辺に寄る波と浜辺から離れる波などさまざまな方向への波面がモザイク状に組み合っており、海中の海水の動きとつながりがみられないものも多く、海流の動きを表層から見ただけではわからないといえる。そこで、海中にカメラを置いて、海中を移動する物体に焦点をあてて追跡することにより、その深さでどのような海流があるのかを調べようというのがこのカメラの目的である。

■研究の課題

本装置を海底という環境において長時間動作するための課題や目的とする機能を実現するための課題について以下にまとめる。

課題

1. 多湿環境における電子回路への結露、漏水への対策
2. 腐食性のある海水に耐える容器
3. バッテリーを長持ちさせるための省電力化
4. 付着生物による視界やセンサの不良への対策
5. 海流のある海底に垂直に立てるという設置方法
6. 画像処理によるオブジェクトトラッキング技術
7. 漁労による盗難

耐海水性の容器としてはチタン製のものがよく用いられるが、高価であり入手が容易ではない。7の漁猟による盗難を考えると高価なシステムは経済的損失が大きく、数年以下という短期間の運用目標を考えると、容器は樹脂製か特別な耐海水性はないがしばらくは使用できる金属製が適している。樹脂製は入手や加工に難があり耐加重や耐衝撃のために大型化する。内部にある温度センサと海水との温度差が大きくなることも避けなければならない。こうした点から金属製の容器を採用することとした。さらに、海底でのカメラの姿勢を知るために地磁気による方位センサが必要であるため強靱な鉄製容器を塗装したものは採用できず、ステンレスの中でも磁性をもたないオーステナイト系の SUS304 を用いることになる。ただし、オーステナイト系ステンレスで作られた容器であっても加工中に結晶構造が変化して磁性を持つ場合もあるため事前に磁化の状態を注意深く確認しておく必要である。

次に1の多湿環境への対応についてであるが、バッテリーや電子回路への結露は避けなければならない。吸湿材料を使って内部の湿度を下げることも必要だが、あらかじめ内圧を高めておいて海水の侵入を防ぐ予防的対応も行う。この時、乾燥空気が窒素ガスを必要な圧力で注入することになるが、事前に内部の水蒸気や水分の排出が必要である。このようなガス作業は研究室のような屋内作業となるが、データの入出力や充電といった作業はフィールドで実施することも想定するので、給電部分のコネクタとガス配管を取り出した、完全密閉型の構造を想定している。密封に必要なガスケットはほとんどがゴム系であり、海中での使用では劣化が大きいとされている。しかしながら、海中撮影用のカメラハウジングの使用例を見る限り数年の使用で使えなくなるほどのものではないと言えそうである。とはいえ、Oリングを容易に交換できるような構造とする。

装置の消費電力が大きいのは LED ライトであり 1000lm の光束を得るためには 10W 程度を消費する。また、カメラを含むマイコンボード部分も 5W 程度を必要とする。演算性能と消費電力はほぼ比例することからクロック周波数を高くしないことが望ましい。次に消費電力の大きい LED ライトについては撮影するタイミングで発光する構造とすることにより消費電力を半減させることができる。紫外線 LED の照射間隔については実証実験を行って決めることになる。

カメラの窓部分の透明窓材料として潜水艇ではアクリル樹脂を用いるケースも多いが長時間の海中での放置により表面の腐食により曇ってしまう場合が多いので、摩耗に強いガラスを用いる。また付着生物に対する対策として、ガラス表面に近紫外線 (405nm) を照射 [1] する方法や 365nm 帯域を照射する実験 [2] が行われて成果を上げており、今回の実験でもこの方法を採用し効果を実証する。

海底にカメラのみを設置するという方式について、メンテナンスやバッテリーの面から海上ユニットと海底ユニットに分け、充電や通信は海上部分から行うという提案があったものの、現場の研究者の方から、海上と海底を結ぶテザーケーブルが切断される可能性が高いとの指摘があり採用は見送った。バッテリー容量の面から、運用期間は 1 日から 2 日に制限されることになり、頻繁に設置と引き上げを繰り返すことになる。その際に、海底に安定して同じ姿勢で着地させることができるかどうかは課題になる (課題 5)。海底は整地ではないので着地用の脚の構造は重要であるとともに、実際の着地姿勢を計測して画面の方向を正しく認識するための仕組みが必要である。

瀬戸内海の水深の平均値はおよそ 30m である。テザーケーブルなしに海底に設置する場合、ケーブルで吊り下ろし、さらに、網などでひっかけて回収する必要があるが、このような運用は現実には難しい可能性がある。そこで当面は干潮時に浅瀬で上げ下ろしをする運用を選択した。瀬戸内海の干満差は大潮でも 4m くらいであるため、設置できる場所の最大の水深は 10m 程度と見込んでいる。

課題 7 については漁労の盛んな瀬戸内海地域で完全に保護することは難しいとの指摘があった。展開と回収を頻繁に行って監視をする必要があるようだ。

■ システムの構成

図 2 に海底カメラの外形の 3D イメージを示す。円筒形の容器の上面に円形のガラス窓があり、その周囲は遮光用のフードがある。また、底面には脚部が 4 方向 (本数は変わる可能性がある) に伸びている。

この海底カメラの特徴は

- ① ステレオカメラによる浮遊物体のトラッキングによる 3 次元流速測定
- ② 紫外線照射によるガラス窓面への付着防止実験
- ③ 水圧及び温度測定による水深の計測
- ④ 内部には感想空気もしくは窒素ガス 2atm を充填して結露の防止

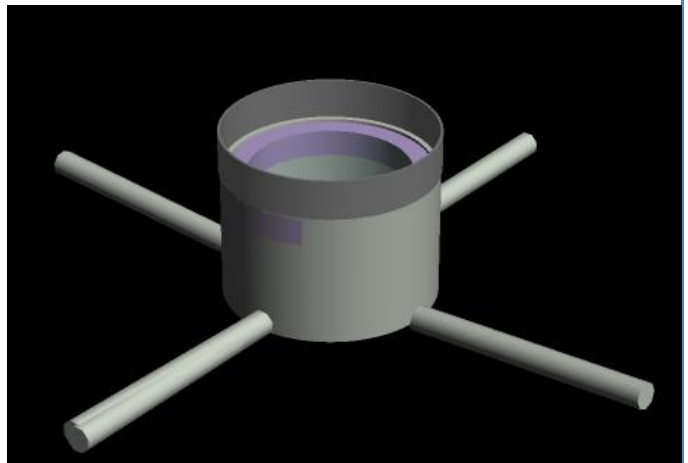


図 2 海底カメラのイメージ

(1) 本体の構成

海底カメラの筐体は市販のステンレス真空容器に用いられる部材を使用して製作する。

- ① ステンレス ICF フランジ+石英ガラス窓 = (ビューポート) を使用
- ② ステンレス円筒チャンバ (ICF フランジ付きニブルを活用する)
- ③ 真空容器のためのケーブル用のポート
- ④ ガス入出力用の配管 (1/4 インチ)
- ⑤ 海底に安定して固定するための支持脚を設けまた、高さを低くして低重心化
- ⑥ 水深測定のために外部圧力計の設置
- ⑦ 電食による防食の予防のために電位計
- ⑧ 海中を照らす白色ライトを装備
- ⑨ レーザによる光通信の実験のためのスペースを確保

⑩ 外部インターフェイスのためのケーブル端子（キャップ付き）

重心の高い容器は海底で倒れる可能性が高いので平たい形状の方が良いと考えている。内部に収納する機材のうち大きいものはモバイルバッテリーであり対角で220mm厚さ45mmは必要である。また、のぞき窓の部分はカメラのレンズ間隔が100mm以上を必要としていることから窓を取り付けるフランジはICF203が必要である。

カメラが傾いた場合に自動的に上に向ける機能を搭載することを考えていたが、薄型が必須である点とポートの窓にカメラが斜めに面した場合には画面が歪むことがわかってきた。そういった点から窓を大きくして画角も広げる方向で設計を行うこととした。さらに、カメラレンズの場合には側面から強い光が入射するとガラス面でハレーションを生じるため、ガラス側面に遮蔽を設けることとする。

円形窓ガラス厚の設計は次の計算式による。ガラス材料は300nm近辺の紫外線透過率の高い熔融石英を用いる。海底カメラの当面運用する水深は10mであるから1気圧でよいので

$$\frac{t}{D} = 0.866 \sqrt{\frac{P}{F_a}} \quad (1)$$

t：厚さ， D：形状が円形時の解放部の直径

Fa：見かけの弾性限界（熔融石英では680 kg/cm²）， P：単位面積あたりの圧力（kg/cm²）

水深10mの場合には10mm、30mの場合には18mmの厚さを必要とすることがわかる。

（2）海底カメラの回路

海中カメラのブロック構成を図3に示す。構成の観点から本システムの特徴や目標とする仕様を以下に記述する。

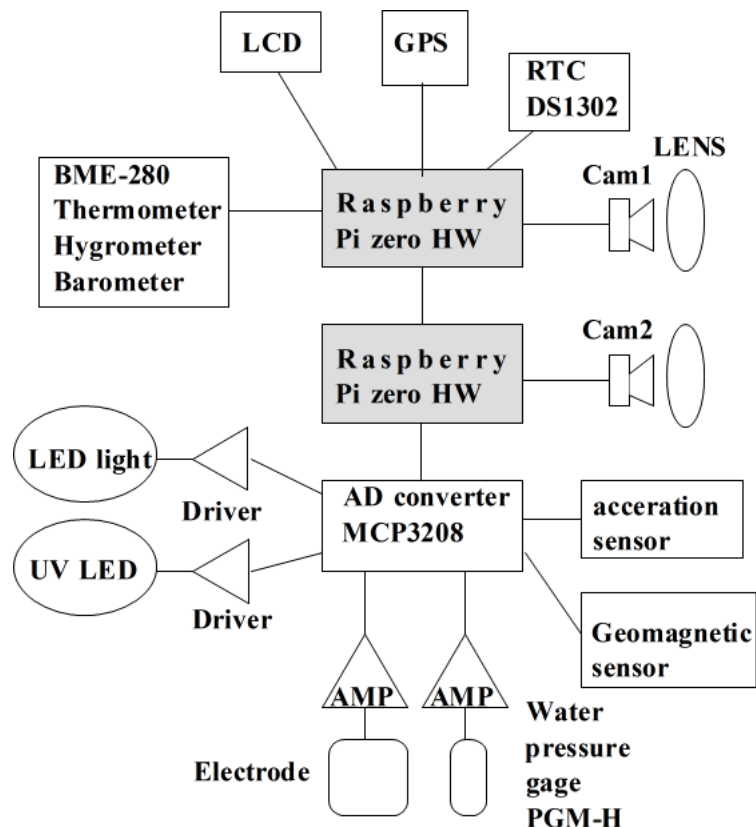


図3 2台のRaspberry Piを用いる構成

1. 制御用のコンピュータとして小型で実装が容易であり Linux OS 上でソフトウェア開発のできる Raspberry Pi を採用した。
2. Raspberry Pi では時刻は電源起動時から始まるため、RTC を装備する必要がある。GPS はフィールドにおいて正確な時刻を取得してこの RTC に設定するために用いる。
3. ステレオカメラとして CSI2 接続のカメラを 2 つ使う場合には Raspberry Pi zero WH (Wi-Fi および Bluetooth 機能あり) を 2 個使用する。CSI インターフェイスを 2 つもつ Raspberry pi compute module 3 を用いれば 1 個で接続できるが、接続のための基板の製作が別途必要となる。
4. 2 つの Raspberry Pi zero WH の間のカメラ同期や時刻同期のためのシリアル通信路を相互に設ける。カメラ同期用の信号路は GPIO を用いているが、シリアル通信は USB を経由するか Wi-Fi や Bluetooth を用いるかは接続実験の結果により決めることとした。
5. GPS が接続されている側の Raspberry Pi には NTP タイムサーバを設け、他方の Raspberry Pi では systemd-timesyncd を起動して時刻同期を行う。
6. GPS は水没するまで地点座標を記録しているため、測定を行った位置情報を正確に記録することができる。
7. 128GB の SD Card を用いれば後述する容量計算の結果からみて 2 日間の動画を保存できる。
8. 設置方向およびカメラの傾斜を測定するためにコンパスセンサおよび加速度センサを装備する。容器のステンレス SUS304 は非磁性のため磁気を使うコンパスセンサは地磁気に対応した方向を計測することができる。
9. それぞれの Raspberry pi には Watch Dog timer を設けて異常状態ではリセットが行われる。
10. 海食の防止のために電位測定を行う。リファレンス用の陽極を外部に設置する。
11. 内部の気圧計 BME-280 は容器からの窒素ガス漏れを監視する。ただし、BME-280 の最大計測圧力は 1100hPa であるため測定のためには 2 気圧で加圧された状態では機能しない。
12. 運用において容器内の減圧、加圧時のみにバルブの開閉が必要となる。ガス管の外部端は簡単なキャップをつけるのみとなり、強いストレスや加圧に弱いため、容器の内部において電磁バルブを用いて開閉を行う構造としている。
13. 水深の測定のために水圧計を容器外部に向けて装着する。水圧測定には圧力計 PGM-H (最大圧力 500kPa KYOWA 製) を容器外部に取り付けて用いる。(リファレンスは近辺の陸上に設置している気圧計) 水圧測定の圧力計は容器外に露出していることから長期の運用では付着生物による防汚のためにワイパーが必要となる可能性がある。

回路図を図 4 (左半分) , 図 5 (右半分) に示すが回路図は GPIO ポートと中心としているため USB の接続やカメラの CSI ポートへの接続は省略されている。

センサへの接続は I2C および SPI、シリアル接続としている。高速な通信を必要とするデバイスはないので問題はない。

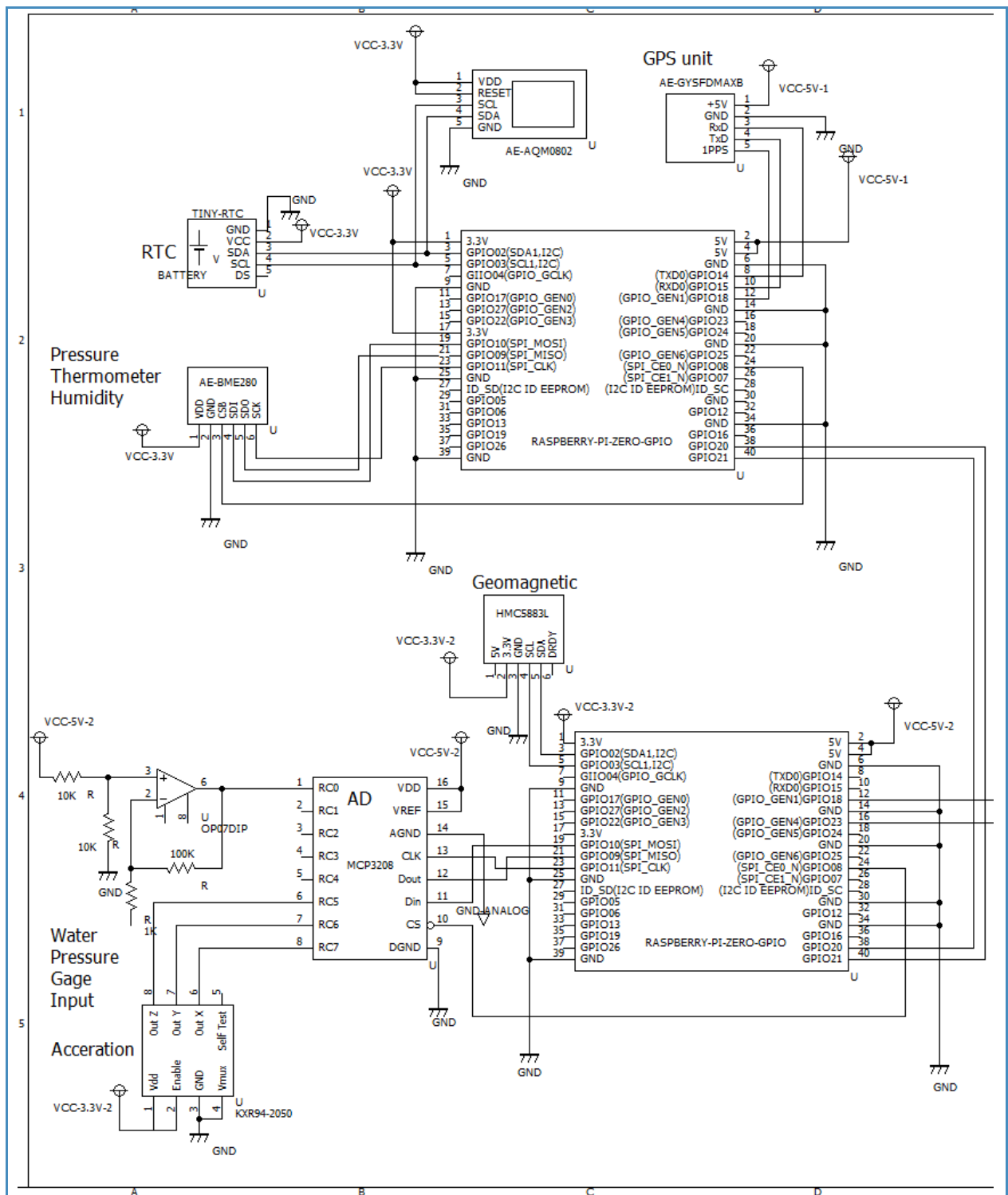


図4 回路構成 (左半分)

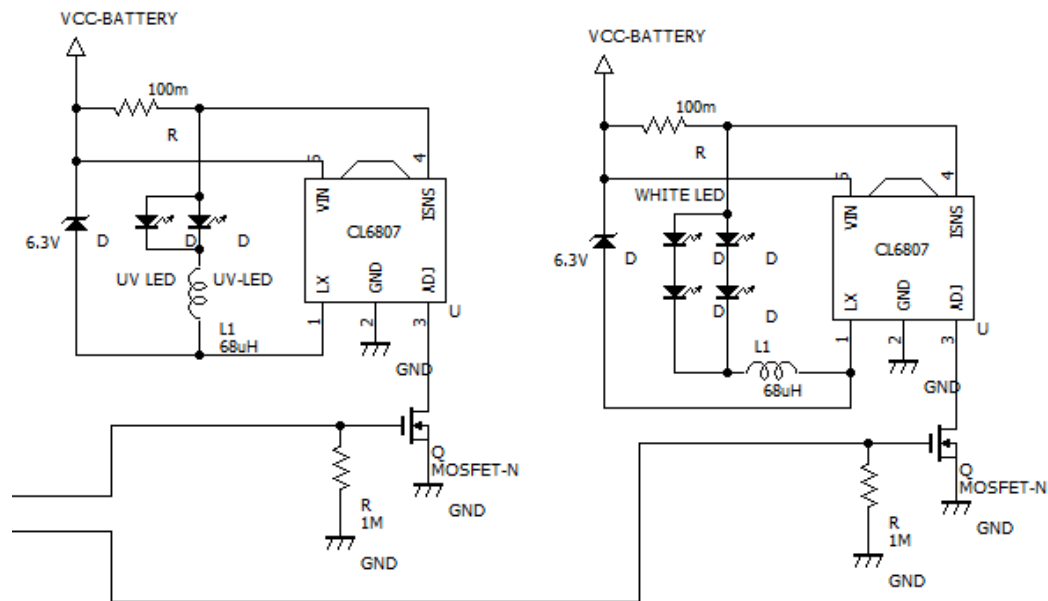


図5 回路構成（右半分）

（4）外部接続の部材の選定

- ・防水プラグ（キャップ付き）
耐水性能のあるプラグであり、



図6 ヒロセ 防水プラグ（キャップ付き）

- ・水圧センサ

セラミックダイアフラムを用いた圧力形である。筐体に外付けして水圧を測定する。



図7 KYOWA PGM-H 最大 500kPa

- ・給電・通信系統

電源	充電のための給電	2 端子
通信	Ethernet インターフェイス	8 端子
無線 LAN	Raspberry Pi の Wi-Fi および Bluetooth を利用	
電源の強制リセット		2 端子

メンテナンス作業や設置作業中は無線 LAN を用いて遠隔でセンサやカメラ画像を確認することができる。水没後は次のような製品のケーブルを本体表面（ガラス窓）に貼り付けておけば無線 LAN や Bluetooth による接続が可能と考えている。（設置終了後にどうやってこのケーブルを外すのかという点は課題）

(5) 消費電力の概算

ここではバッテリー容量と消費電力の関係を確認する。表1は機器の平均的な消費電力である。(ピーク時は数倍になるものもある。)

表1 消費電力量の概算

ユニット	平均消費	24時間の消費電力	省電力化後(目標値を含む)
CPUボード (Raspberry pi)x2台	4W	4Wx24=96Wh	96Wh
紫外線ランプ	1W	1Wx24=24Wh	3Wh
LEDライト(1000lm)	8W	8Wx24=192Wh	30Wh
GPSユニット	100mW	0.1Wx24=2.4Wh	0Wh
合計	4.5W	13.1x24*1.2=337.3Wh	129Wh

*1.2はインバータの変換効率

バッテリー(リチウムイオン電池)は下記のを搭載する予定である。

20000mAh x 2 = 40Ah 重量 500g x 3 = 1.5kg

充電性能が劣化してもしばらくは使えることを目標としてマージンを50%とすると、使用可能な充電容量の目安は30Ahである。ワット容量に換算すると150Whであり、単純な消費電力では24時間動作としては不足している。

そこで、最も消費電力が大きいものはLEDライトであり、この消費を抑制することを検討した。

1. 日中は点灯しない。
2. 点灯はカメラの撮影タイミングに同期させて発光する。
3. 紫外線ランプの点灯デューティを10%程度に減らす。

GPSユニットは海中では動作しないので電源を停止することにより幾分かの省電力化が図れるが、他の外部ユニットの消費電力は格段に小さく効果が低い。上記1においてカメラによる照度の測定が必要となる。また、3については紫外線による防汚効果の実験結果によっては連続点灯が必要とされる場合も予想されるので省電力の目標にも余裕を持たせている。

(6) カメラ画像の記録

取得した画像はSDカードに保存される。画像データは大きいため、記録には大容量の記憶装置が必要になる。表2は従来からよく使われている動画圧縮方式により圧縮されたデータの容量の見込みを示したものである。

2画面分の映像があるため上記表の倍の容量が必要であるが、フレームレートを下げることでデータ量を減らすことができる。

図8は本システムのカメラ画像処理システムの構成ブロック図である。Raspberry Piには64個のGPUが搭載されており、GPUを使った動画変換処理などが実現できるが、これらのシステムはMMAL(Multi Media Abstraction Layer)と呼ばれるファームウェアとして実装されておりMMALのAPIを通じて実行できる仕組みとなっている。

表2 動画の圧縮方式とデータ量の関係

	画素数	フレームレ	圧縮方式	ビットレート	1日(24時間)
--	-----	-------	------	--------	----------

		ート			のデータ量
	426x240	30fps	H. 264	300k-500k	6. 5G-10G
SD	640x360			500k-1Mbps	10G-22G
SD	640x480	30fps	H. 264	1M - 2. 4Mbps	22G-45G
HD	1280x720	30fps	H. 264	2 M-4Mbps	43G-86G
フル HD 2K	1920x1080	30pfs	H. 264	4. 5-9Mbps	97G-194G
4K	3840x2160	30fps	MPEG-2	35-45Mbps	0. 75T-0. 97T
8K	7680x4320	60fps	HEVC/H. 265	200Mbps	4. 3T

実装されている MMAL ではカメラからの画像データを3つの出力に分配して取り出すことができるが、今回は preview 出力と video 出力を利用する。Preview 出力は VGA (640x480) の低解像度で取り出して、jpeg に変換して mjpeg-streamer[3]を用いてネットワーク上にストリーム出力している。これは設置や調整においてカメラの状態をモニタリングすることを目的としている。一方で、video 出力は HD (1280x720) で出力しており、この出力には画像の下部の画像を削除してそこに撮影時刻を表すタイムスタンプを書き込んでいる。図9に実際にタイムスタンプが書き込まれた画像を示す。

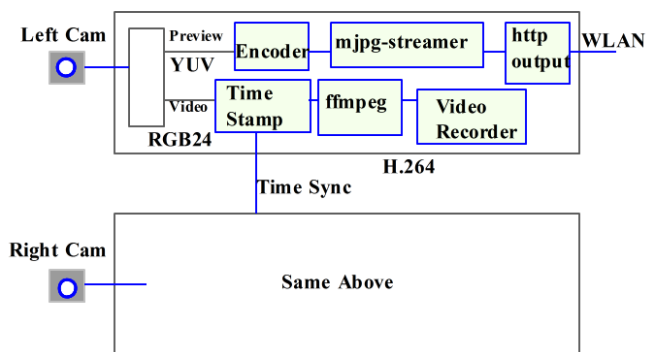


図8 カメラ画像の処理系のブロック図

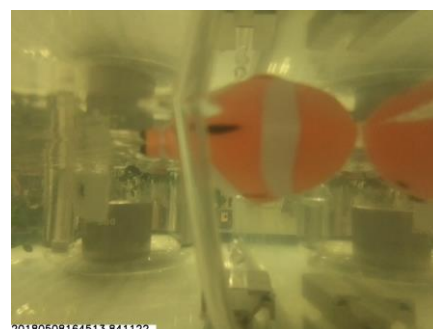


図9 左下にタイムスタンプが書き込まれた画像

今回のカメラではステレオ画像が別のカメラで撮影され記録される。データを解析する際には2つの動画データと同時に結合して作業する場合が多いことから、データの管理方法が問題になる。画像データのタイムスタンプを画像上に直接書き込むことにより画像の拡大縮小に対応でき単独画像からの情報検索が可能になった。

一方、大量の画像データを管理するためにはタイムスタンプを機械的に読み取って画像データを管理するソフトウェアが必要となる。画像処理ソフト群として定評のある opencv の opencv_contrib にはオープンソースライブラリ tesseract-ocr の呼び出す方法が実装されている[4]。今回はこれを利用してタイムスタンプを読み出したが、良好な応答時間で解析することができる。

(7) その他の計測データ (温度、湿度、圧力、加速度、GPS)

搭載している各種センサのデータ読み取りソフトウェア(python)を開発した。読み取ったデータはデータベース postgresql に時間データとともに記録される。計測データの読みだしはSQL文によるが、将来的にはCSV形式などに変換して出力する機能の実装を予定している。

各種センサの性能を表3にまとめた。表において気圧センサは内部の水蒸気を排出完了をチェックするには最小値の値が高すぎる可能性がある(赤字部分)。

表3 各種センサの性能一覧

測定項目	センサ	測定レンジ	精度(確度)	応答速度(オーバーサンプルなし)	最大定格
------	-----	-------	--------	------------------	------

気圧	BME280	300 - 1100hPa	0.2Pa	記載なし	0 - 20000 hPa
水圧	PGM-5KH	-5000hPa	±0.5%	固有振動 19kHz	記載なし
湿度	BME280	0-100 %	3% relative	1 秒	無通電時は結露を容認
温度	BME280	-40 - +85℃	1℃	記載なし	-45 - +85℃
方位	HMC5883L	3 軸	1° - 2°	75Hz	-8 to +8Gauss
姿勢 (加速度)	KXR94-2050	3 軸	0.1%FS	800Hz	±2G
座標	GYSFDMAXB	GSS QZSS	2m	1 秒	

(8) 海水位測定

海底にある装置にかかる水圧を用いて海水の水位を測定することができる。しかし、海底の水圧は大気圧と海水の水圧の和であるため、リファレンスとして大気圧の同時測定が必須である。大気圧は測定現場に近辺の陸上に設置した気圧計の値を用いる。

また、海水の比重は海水の温度により変化するため海水温のプロファイルが必要になる。海水温プロファイルの測定のために、接触型の水位水温ロガーHOB0 U-20 (図 1 0) を導入した。実際の測定は図 1 1 のように船舶を用いて行う必要があるため、24時間の連続測定は不可能といえる。

試行的な測定の結果、水温のプロファイルの日変化や季節変化の特徴が得られればその結果を用いて海水位の測定精度を高めることができるものと期待している。



図 1 0 HOB0-U20L 水温測定器

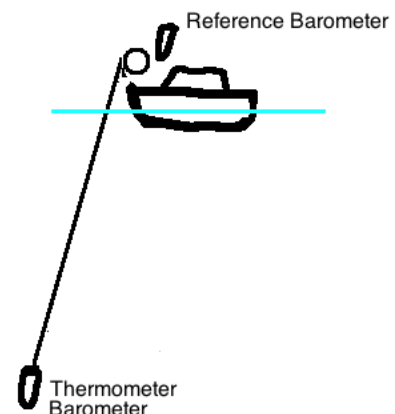


図 1 1 水温プロファイル測定イメージ

(8) ステレオカメラ解析の評価

図 1 2 のように撮像角度 θ のカメラを D の距離に同じ向き (光軸を平行) に配置した場合、カメラから距離 Z の距離において 2 つのカメラが同時に観測できる範囲 WS を計算した。次の表 4 は 1/30 秒において秒速 5 m (およそ 10kn) で物体が移動した時に観測が可能な角度 θ の限界を示している。ここで画面の利用率とは画面内にある画像のうちで、ステレオ法により測距できる範囲 (ピクセル数) の割合を表しており、カメラ間隔を離すほど利用率が低下する傾向にある。

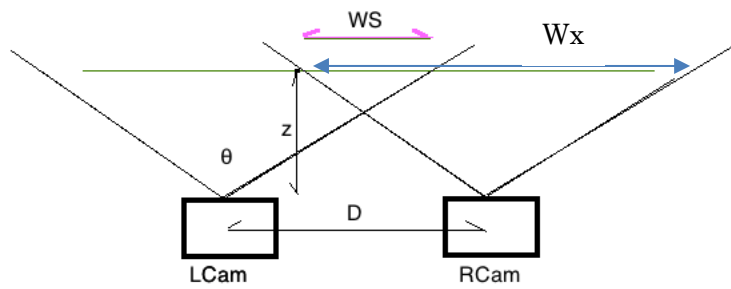


図 1 2 ステレオカメラの画角と利用範囲

$$\tan\left(\frac{\theta}{2}\right) = \frac{W_x/2}{z} \quad (2)$$

$$W_s = 2 z \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) - D \quad (3)$$

$$\text{画面の利用率} = W_s/W_x \quad (4)$$

表 4 画角 θ の最低値 (θ deg) 及び画面の利用率(カッコ内)

Z (mm)	D=30mm	D=40mm	D=50mm	D=100mm	D=200mm
50	130 (0.86)	130 (0.81)	130 (0.77)	140 (0.63)	
100	90 (0.85)	90 (0.8)	90 (0.75)	110 (0.65)	130 (0.5)
150	70 (0.86)	70 (0.81)	70 (0.76)	80 (0.6)	100 (0.44)
200	50 (0.84)	60 (0.83)	60 (0.78)	70 (0.64)	90 (0.5)

以上の計算結果から見て画角の大きいレンズを用いれば近くを通り過ぎた物体にも対応できるが、画面の利用率は高くない。画面の周辺は曲がりが大きくなり距離測定誤差が増える。

ステレオ法による計測は、カメラの間隔 D が遠方における距離測定誤差に影響する。Z 方向の誤差は参考文献[5]のように計算する。

イメージセンサとして SONY IMX219PQ (セルサイズ 3298x2515 1.12um 1/4.0 インチ) に、画角 70 度のレンズを用いる場合は、画角 70° で fw=3.28mm 画角 120° で fw=1.32mm である。計算結果を図 1 3、図 1 4 に示す。

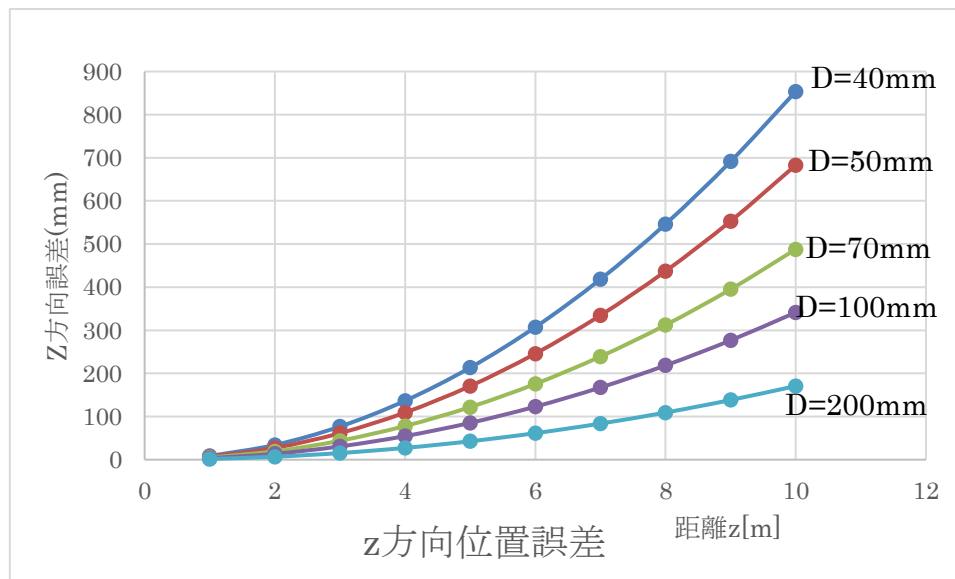


図 1 3 カメラ間隔と z 方向の誤差

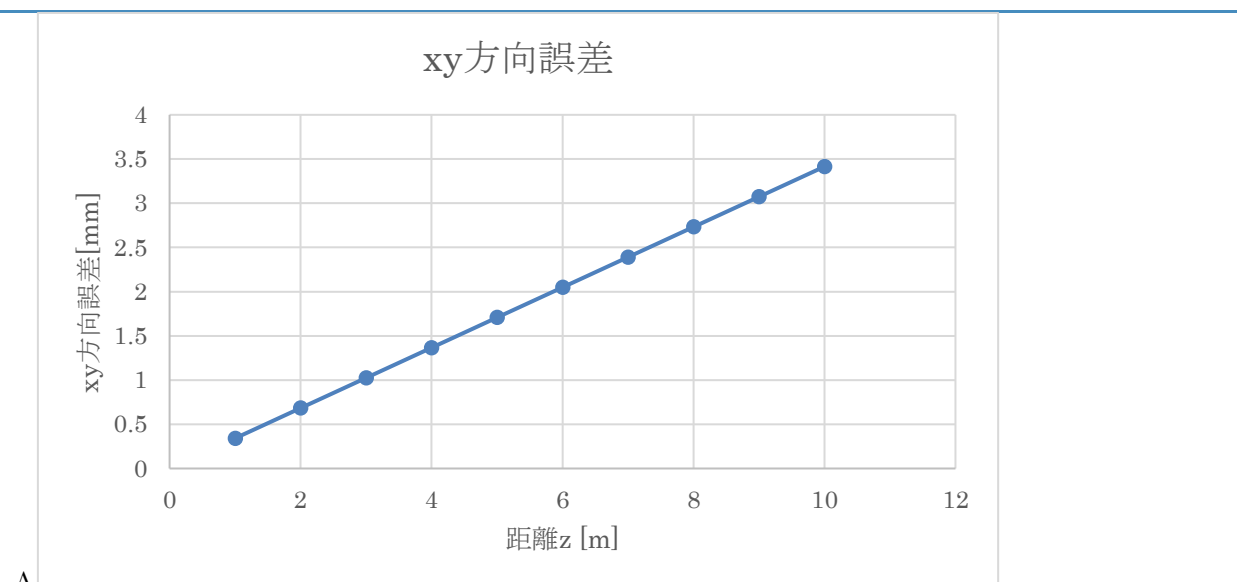


図 1 4 z 方向距離に対する xy 方向の誤差

今回の解析では画面解像度を HD 相当としているが、解像度を SD (640x480) とすると誤差が 4 倍になる。Z 方向潮流は主な測定項目ではなく、また、瀬戸内海沿岸での干満差は平常時はせいぜい 4m 程度なので、干潮時に設置し測定するという今回の運用においては Z 方向深度は 4m 程度で良いことになる。

速度誤差は位置の測定誤差 Δx と時間差 Δt の比で求められる。

$$\Delta v = \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (5)$$

奥行き z 方向に誤差がある場合はそれが大きな誤差になると言える。よってカメラの仕様は次の仕様とする。

表 5 ステレオカメラの構成

項目	値	重要度	備考
解像度	1280x720 16:9		画面比 4:3 を用いないのは動画への圧縮手順を簡易化するため
画角	80° (X 方向) 70° (Y 方向)		
カメラ間隔	1 0 0 mm	◎	
最小測定距離	200mm		流速 10kn 時
Z 方向測定誤差	50mm		距離 4m 時
Xy 方向測定誤差	2 mm		距離 4m 時

速度の測定誤差は画面内に連続して存在する場合は平均化して測定できるため誤差を低減する操作ができる。

現在は 3D のステレオカメラを用いて深度座標（奥行）を測定するためのソフトウェア開発を行っている。製作した 3D カメラの測距性能を高めるためにはピクセル単位の座標マッチングを必要としており、試作段階や実装後においてできるだけ早くかつ最も良い状態にカメラ位置やレンズ方向を定めて固定する手法も検討している。

カメラの画角および海中での写り具合をチェックするためには光路の解析、レンズの解析が必要である。この解析のために Pov-Ray によるレイトレーシングを用いる予定である。

(9) オブジェクトトラッキング（オプティカルフロー）

カメラ画像によるオブジェクトトラッキングについては多くの実施例がある。筆者は1つのカメラ画像を用いて2次元のオブジェクトトラッキングシステムを構築して実験を行った。図15に実験に使った実験装置の外観を示す。水を入れた水槽の斜め下側に海底カメラの試作版として製作した1眼のカメラ（写真奥側にある青色のボディ）を設置し、水面を下から見上げる方向で動画を撮影している。撮影された動画は無線LAN経由で別の raspberry pi3 のコンピュータに送信されて画像処理される。



図15 実験装置の構成（カメラは奥側と手前の2個ある）

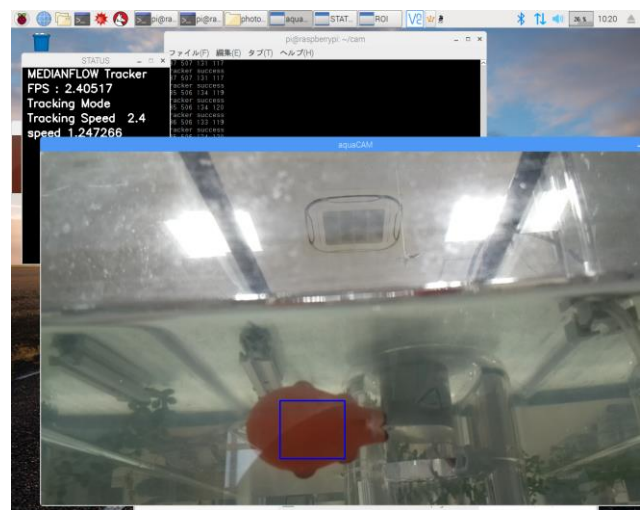


図16 速度測定画面

奥側のカメラの画像を用いてクマノミの模型の動きを追跡している。各フレームの処理時間と画像の伝送時間がほぼ一致している。左上のウィンドウに速度が表示される。

使用しているソフトウェアはopencv-contribで提供されている object tracking のうちの median flow[6]を用いて制作した。図16はプログラムの実行画面である。画面中央に見えるクマノミの模型の2次元画面上での移動速度を計測している。この実験では HD 画像(1280x720)を2FPS の速度でトラッキングすることができている。対象物の速度が速くなったり、大きく回転して形状が変化する場合にはトラッキングを失敗する場合がある。

本実験装置での画像取得はネットワークを介してリアルタイムに行っており、その分画像のフレームレートが劣化している。画像を SD カードに直接保存して、後処理に一般的なパソコンを用いればリアルタイム時間に近いフレームレートが期待できる。

3次元計測のためのステレオカメラ画像から3次元のオプティカルフロー解析(Lucas-Kanade optical flow method)が挙げられる[7]。この手法では、追跡するターゲットとなるボクセルを追跡して3次元方向の移動を測定する。この手法を実現するために

- (1) ステレオカメラの左右画像のピクセルレベルのマッチング技法
- (2) 2つのビデオカメラの撮影の同期
- (3) トラッキングすべきオブジェクトの自動認識

を技術確立する必要がある。

また、画像による流速測定はオプティカルフローが用いられることが多いが、追跡している物体の変形（向きが変わる場合も含む）に対して弱い。そこで種々のオブジェクトトラッキング技法が提案されている中で、近年の人工知能研究で使われている CNN を用いた GOTURN という手法[6]の適

用を検討している。

(10) オブジェクト認識

本研究において最も技術開発要素の大きい部分がオブジェクト認識である。海中にある物体の動きを追跡するためには、追跡すべき物体を自動的に識別する機能が求められる。特に魚類や船舶をトラッキングしても流速の測定にはならないため、どのような物体の追跡が望ましいのかを実際に海洋でのフィールド実験において確認する必要がある。

オブジェクト認識技術については次のように複数の企業からフレームワークがリリースされているのでそれらを利用することを検討している。

- (1) Google 社 Cloud Vision API [8]
- (2) Facebook Style transfer [9]
- (3) Apple Gore ML [10]

■実験結果

現在実現している機能は以下である。

- (1) 単一カメラによる画像トラッキング（オプティカルフロー）
- (2) 撮影画像のストリーミング
- (3) 画像へのタイムスタンプの書き込みとタイムスタンプの読み取り
- (4) 磁気センサ、温度センサなどの各種センサの入力とデータベース保存
- (5) 3D カメラによるデプス画像の作成

実際にフィールドで運用する場合にはシステム全体の機能の安定性を総合的に検証する必要がある、さらなるソフトウェア開発とチューニングが必要となると考えられる。

■今後の課題

試作テストの結果から見える当面の課題は次のような点である。

- (1) カメラにおいて HD 画像を動画として高効率圧縮（H264）を行う場合に Raspberry Pi zero では性能追いつかず 2 フレーム/秒程度の速度しか得られなかった。(8) で検討したように早い流速を測定できない可能性がある。画面解像度を下げてフレームレートを高めるか、低フレームレートでも確かなトラッキングを目指すといった判断が必要。
- (2) 加速度センサや地磁気センサの測定結果をもとにカメラの向きを算出する計画ではあるが、使用しているセンサの値のブレ幅が大きいため予想以上の方向誤差が出る可能性がある。
- (3) カメラに使用する真空容器や窓のコストが予想以上に大きく、当初予定したような、多点に設置して同時に測定するにはコストがかかりすぎるといえる。試作版の結果を元にして廉価に実現できる方策の検討が必要。

現在製作中のステレオカメラ方式の海底カメラを用いて、一方向の直線的な海流を作ることのできる大型の実験装置（キャビテーション実験装置）を用いた流速測定実験を行う。また、3次元の層状の流れや上下方向の流れの測定実験のためにアクリル製の大型水槽に水中ポンプで流れを作り出して測定実験を行い、性能の向上を図る実験を予定している。その後は、試作機を海底に設置する実験を行い、およそ1年ほどで連続実験ができる体制を整える計画である。

■参考文献

- [1] 柳川俊治：“近紫外域 LED による生物付着対策技術の開発”，エネルギー総研レビュー，No. 51, pp8-9.
- [2] セリルリサーチ：“海棲付着生物の着生・繁殖を防止する方法”，<http://www.ekouhou.net/disp-applicant-507030863.html>
- [3] jacsonliam: mjpeg-streamer <https://github.com/jacsonliam/mjpeg-streamer>

- [4]” Scene Text Detection and Recognition in Natural Scene Images” ,
- [5] CHEN / QIAN:” 三角測量の形状計測” ,
<http://www.wakayama-u.ac.jp/~chen/education/cv/stereo.pdf>
https://github.com/opencv/opencv_contrib/tree/master/modules/text
- [6] opencv-contrib: “Object tracking MedianFlow” ,
https://docs.opencv.org/master/d7/d86/classcv_1_1TrackerMedianFlow.html
- [7] J. L. Barron, N. A. Thacker:” Tutorial: Computing 2D and 3D Optical Flow” , 20/1/2005,
- [8] Google, “Cloud Vision API” , <https://cloud.google.com/vision/>
- [9] Facebook ,” style transfer” , <https://techcrunch.com/2016/10/25/facebook-video-filters/>
- [10] Apple,”Gore ML”, <http://developer.apple.com/documentation/coreml>

藻場環境観測システムの開発

(画像取得カメラを中心とした水中環境認識用統合センサシステム)

伍賀 正典

工学部スマートシステム学科

本文

■概要

瀬戸内海の里海と呼ばれる生物多様性を有する沿岸海域において、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のために、海中画像を取得するデバイスを中心とした水中の様々な環境情報を多角的方面から取得する能力をする水中環境認識用統合センサを提案する。この装置は、画像取得のために実装されたカメラを海底から海面の方向に向けて設置し、海中を移動する物体の3次元座標を測定することにより海流の方向や中速を求める機能がある。

さらに水深、流速、温度（水温）、カメラの方向、時刻を測定してデータの補正を行う。本装置は実験段階とはいえ実用システムとしての運用を目指していることから、信頼性および安全性、安定性に十分に配慮した設計が求められているとともに、性能のみならず、運用上の利便性や課題にも配慮した構造とし、周辺機器および運用ソフトウェアやマニュアルの充実も考慮して開発する必要がある。

■研究の課題

本研究では、画像取得のためのカメラを中心とした様々な計測装置で瀬戸内海沿岸の藻場と呼ばれる環境の情報を多角的方面から取得する。単一のセンサから得られる以上の情報を複数のセンサからの情報の処理で取得する試みはセンサフュージョンと呼ばれる研究領域で扱われる。本研究で提案するシステムの中のカメラも複数を利用して3Dステレオ画像を取得することが狙いであり、両眼融合（binocular fusion）の技術のその一例である。

また、海洋観測の現場ではCTD（Conductivity Temperature Depth profiler）と呼ばれる電気伝導度、温度、水深を計測する機器が用いられておりこれらの計測データから塩分密度の算出がされており、センサフュージョンの一つであるセンサ統合（integration）の技術が用いられてきたとも言える。これらを踏まえ本研究では、水中画像、気圧、水圧、湿度、温度、方位、加速度、座標などの取得した環境情報を処理し、局所的な水流に代表される高次データを生成し、瀬戸内沿岸の藻場における生物多様性の構造との相関を示す知見を探ることを課題とする。

この藻場とは、海面下で「海の森」とも呼ばれ、多くの水生生物の生存を支え、沿岸領域において非常に大きな役割を担っているものとされている。水産庁の調査では、藻場には、水質の浄化、生物多様性の維持、波浪抑制と底質の安定の機能を有していることが指摘されている。これらを踏まえて、本研究での当初の課題は、以下の環境情報の取得と解析である。

(1) ミクロスケール潮流

瀬戸内海沿岸の藻場において、局所的な海水の流れの動きを長期間連続的に取得することで、藻場の持つ波浪抑制機能や、海流と藻場と水中浮遊生物の関係に関して知見を得る。

(2) 水質汚濁状況、底質汚濁状況

海水透明度、底層溶存酸素量、底生生物の個体数及び種類数の検出し、藻場の持つ懸濁防止機能と酸素供給等による水質浄化機能、これらと生物種の保全に関して知見を得る。

(3) 総合的な生物生息環境

流れ藻としての機能、産卵場・養育場としての機能、生物相の総合的な観測をする。

■ システムの構成

統合センサシステムに実装するセンサの性能を表 1 に示す。また、このシステムの制御用のコンピュータとして小型で実装が容易であり Linux OS 上でソフトウェア開発のできる Raspberry Pi の採用を想定している。この場合のシステムのブロック構成を図 2 に示す。

表 1 各種センサの性能一覧

測定項目	センサ	測定レンジ	精度 (確度)	応答速度 (オーバーサンプルなし)	最大定格
気圧	BME280	300 - 1100hPa	0.2Pa	記載なし	0 - 20000 hPa
水圧	PGM-5KH	-5000hPa	±0.5%	固有振動 19kHz	記載なし
湿度	BME280	0-100 %	3% relative	1 秒	無通電時は結露を容認
温度	BME280	-40 - +85℃	1℃	記載なし	-45 - +85℃
方位	HMC5883L	3 軸	1° - 2°	75Hz	-8 to +8Gauss
姿勢 (加速度)	KXR94-2050	3 軸	0.1%FS	800Hz	±2G
座標	GYSFDMAXB	GSS QZSS	2m	1 秒	

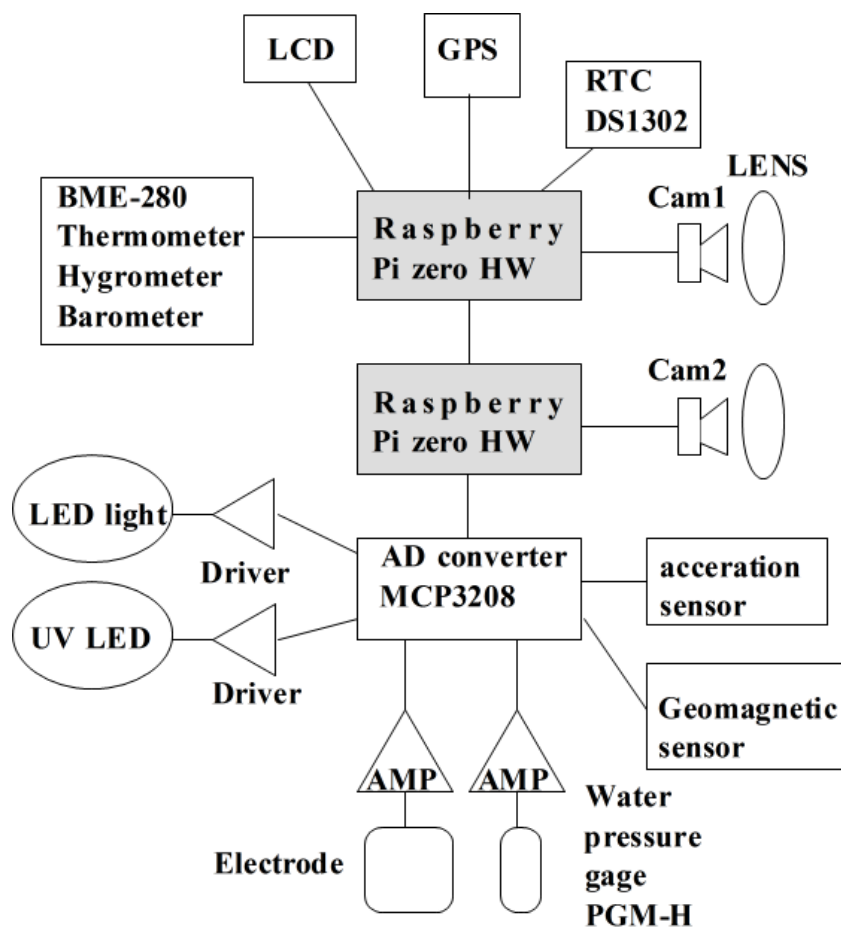


図 2 2 台の Raspberry Pi を用いる構成

統合センサシステムを実装した回路は図 3 に示す構造に封入される。2つの観測窓を備えているが、各種センサの実装の方法を現在検討中である。

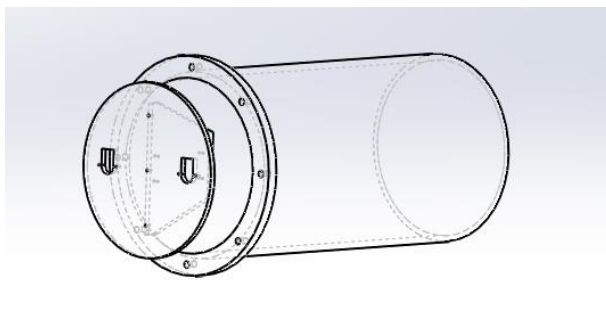


図 3 統合センサ構造図

■今後の課題
回路の試作を行う。

藻場環境観測システムの開発 (観測窓の微生物付着防止の研究)

仲嶋一

工学部スマートシステム学科

本文

■ 目的

藻場の環境を観測し、観測データを陸上の観測拠点に伝送するシステムの構築を目指しており、観測機を低コストに構築することにより、観測機を複数の定点に分散設置し、多数点の環境データを連続に取得可能なシステムを究極の目的としている。その低コスト化の手段として本研究プロジェクトでは、海中漂流斑をステレオカメラで捉え、距離画像のフローにより海流を計測する計測器の開発を行うが、海中において観測窓には海中微生物が付着しやすく、現存の機器にはワイパー付きの観測窓を有する装置もあるが、長期間のメンテナンスフリーの使用は難しく、比較的短期間での回収と窓洗浄などの保守を必要としている。

ワイパー以外の微生物の除去方法としては 250～300nm の殺菌紫外線照射が有望であるが、これまでは短波長の紫外線を発生する手段として低圧水銀ランプ等の放電管以外になく、海中の機器への応用は困難であった。しかし、近年紫外線 LED の進歩により、殺菌効果の高い UV-C 領域である 260nm 台の紫外線 LED が市販となり、コンパクトな微生物付着防止機能の実現の可能性が出てきている。そこで、本研究プロジェクトの研究課題の一つとして、250～280nm のいわゆる殺菌線を発する LED の光を観測窓に照射することによる窓の汚れ防止効果について研究し、その結果を観測機に適用する。

■ 成果

図 1 に観測窓の構想設計を示した。観測窓材には UV-C (200～280nm) を透過する熔融石英ガラスを用いる。LED による観測窓照射域はステレオカメラの視野の範囲であるが、カメラの視界を妨げないよう斜方の入射としているが、斜方入射による反射損失が大きくなる。このため、光量が不足する場合には、プリズムを用いた入射メカニズムや窓材端面からの入射を検討する必要があるが、プリズムと窓との接合材による損失⁽²⁾や窓材の取り付け構造の複雑化が懸念されるため、まずは平板の窓材による藻類付着防止効果の見極めを行う。

文献(1)、(2)によれば、酵母およびカビを 99.9%死滅させるのに必要な照射紫外線強度はそれぞれ、40mJ/cm²、400mJ/cm²程度である。使用予定の紫外線 LED の放射束は 0.5mW であるので、照射効率 50%として 160 秒で酵母菌、1600 秒でカビ菌を死滅できると見積もられる。しかしながら、海中の藻類およびその窓付着や貝類等動物の付着への防御効果に関する知見は無く、実験による検証が必要である。

■ 今後の計画

2018 年度については、紫外線照射の観測窓への藻類付着抑制効果の検証を主に実施する。実験としては、図 2 に示すように、観測窓を模擬するように熔融石英ガラスを張り付けた箱を藻類の賠償水槽に浸し、空中より紫外線 LED の照射を行い、一定期間後の窓の可視光透過率の変化を測定し、同時に実施する紫外線照射をしない参照試験体との比較検証を実施する。これにより、藻類の繁殖する水中環境で、照射光量と窓への藻類付着量の関係を測定する。一定の照射による効果が来止められる場合は、実機に照射機構を組み込み実用途における性能検証を行う。さらに追加の基礎検討として間欠照射の実験も行い、最も付着防止効果の高い照射方法を確立して実機に適用する。図 1 に示した構造は一般のソーダガラスの観測窓にて製作を行い、実環境に於ける耐水性や撮像・計測性能の検証を先行して実施する。

■ 参考文献

- (1) 河端俊治, 原田常雄, 殺菌灯による水の消毒, 照明学会誌, 36(3), pp. 89-96, 1952
- (2) 吉野潔, 黒カビ(*Aspergillus niger*)を光照射の指標微生物として使用する際の条件の検討, IWASAKI 技報 No. 21, pp. 14-19, 2009

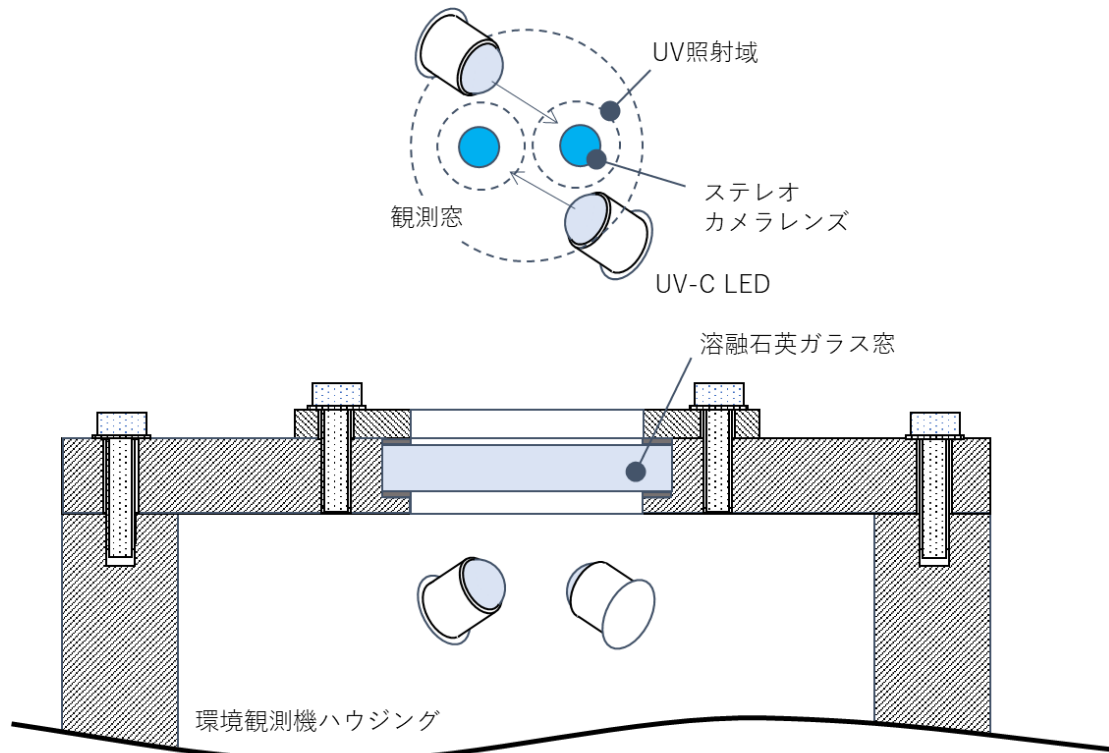


図1 藻類付着防止観測窓の基本構成図

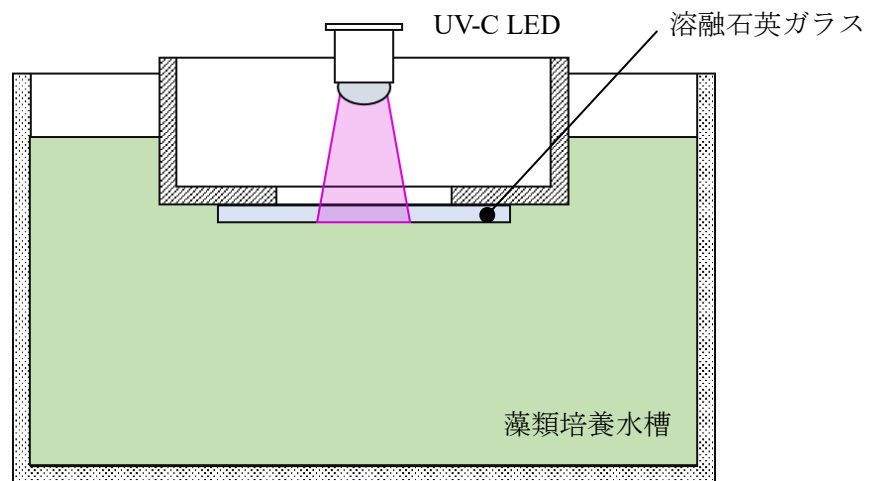


図2 基礎実験系の構想図