

オニヒトデ捕獲作業のための画像処理技術を用いた海中移動体の位置計測システムに関する研究

代表研究者	武村 史朗	沖縄工業高等専門学校 機械システム工学科 准教授
共同研究者	上地 夏月	沖縄工業高等専門学校 創造システム工学専攻 学生
共同研究者	川端 邦明	理化学研究所 理研-XJTU 連携研究ユニット リーダー
共同研究者	相良 慎一	九州工業大学 工学部 機械知能工学科 准教授

1 はじめに

近年、地球環境の変化により環境維持・保全に関する活動が推進されている。特に、沖縄等に存在するサンゴ礁は生態系の基盤であると共に、人間が生活する上で重要な存在であるが[1]、国際自然保護連合 (IUCN) による報告では世界の造礁サンゴのうち約3分の1が絶滅危惧種と報告されており[2]、環境要因が生態系に与える影響の分析に基づくサンゴ礁の保全・保護が急務となっている。

サンゴ礁の保全活動として、ダイバーによるオニヒトデ・ヒメシロレイシガイダマシの捕獲、サンゴの植生が行われているが、これらの作業はすべて人手で行われている。そのため、肉体的負担・危険性の除去が望まれる。サンゴは太陽光の届く深度で生息していることから水深 20m を超えるとサンゴの数は急速に少なくなる[3]ので、サンゴ礁の保全活動を行う海中ロボットとしては、水深 20m 程度で活動できればよい。そこで、筆者らは水深 20m で作業が行える水中ロボットの開発・研究を行っている[4][5]。

サンゴの調査・研究・保全活動においては、一定期間ごとに調査を行う場合が多い。減少の原因を究明するうえで時刻と位置情報は重要な情報であるが、海中ロボットは空中・陸上や海上で使用可能な GPS が使えず、「位置情報」が把握できない。海中内では音波・超音波を使った位置計測が主に行われているが、十分な精度を得るには高価な機器が必要になる。そこで、本研究では海中ロボットの位置情報を取得するシステムの開発を行う。陸上で単眼カメラを用いた位置計測の研究はなされている[6]が、海中の視界の悪さから海中物体の位置計測への応用例はない。筆者らの開発している海中ロボットは沖縄近海でのサンゴ保全活動を目的としており、透明度が高い深度・海域で活動する海中ロボットの位置計測のため、単眼カメラを用いた位置計測が十分可能であると考えられる。また、単眼カメラ映像を水中ロボットのオペレータに提供することにより、海中ロボットの操作支援にも使える。

まずは、海中での視認性の確認をするため、青サンゴが生息している名護市大浦湾で海上から、海底深度 5m 程度の深さのところを撮影した。そのときの写真を図 1 に示す。図 2 は赤枠の部分拡大した写真である。図 1, 2 に示すように 5m 離れた海上からも青サンゴの視認ができることを確認した。以下に本研究の概要を報告する。

2 海中移動体の位置計測方法

2-1 位置計測の概要

本研究で使用する水中ロボットは有線であり、海上（陸上）のオペレータ PC とは有線 LAN で繋がっている遠隔操縦ロボット (ROV) である。水中ロボットには次の装置を搭載する。

水中ロボット搭載機器

- ・ LED マーカー
- ・ 深度センサ

深度センサによる水中ロボットの深度情報は有線 LAN を介して、既知であるとする。

位置計測方法を図 3 に図示する。スラスト付の海上移動体を海上に浮かべ、その海上移動体に下向き単眼カメラを搭載する。海上移動体には次の装置を搭載する。



図1： 沖縄県名護市大浦湾の青サンゴ 海上からの撮影 海底深度5 m程度



図2： 赤枠線の部分の拡大

海上移動体搭載機器

- GPS
- 姿勢センサ（加速度センサやジャイロセンサ）
- スラスタ

単眼カメラを海面に浮かべた状態を海面と平行になっていると仮定する。深度センサにより、水中ロボットの深さは計測可能とする。カメラパラメータを取得することにより、海上からのカメラ画像の歪補正を行っておく。深度に対しての1pixelあたりの実距離の換算式をあらかじめ作っておく。これにより、原点からマーカまでのpixel数をカウントし、実位置への換算式水中ロボットの深度情報と組み合わせることで、実際の位置がわかる。

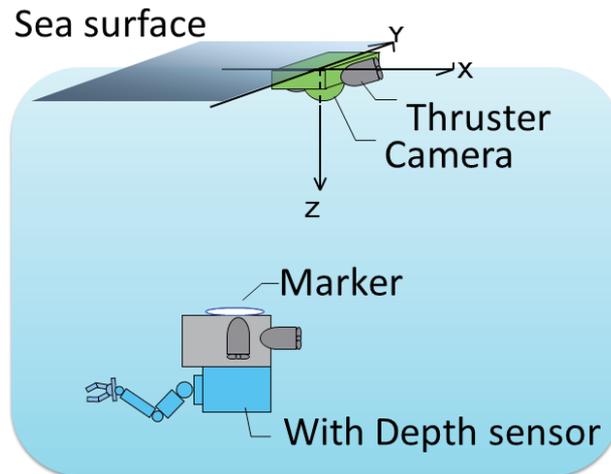


図 3 : 位置計測方法の概念図

ここでは、単眼カメラは海面と平行になると仮定しているが、実際にそのような状況はない。そこで、将来的には、搭載している姿勢センサの情報を用いて姿勢補正を行い、GPS 情報と統合することで、水中ロボットのグローバル座標を取得するシステムとする。さらに、スラスタを搭載することで、画像中心に水中ロボットが位置するように海上移動体を移動させることを想定している。本実験では、カメラとマーカーは正対しているものとする。

2-2 深度情報に基づいた 1pixel と実位置の換算方法

本位置計測システムにおいては単眼カメラを用いるため、位置情報は pixel 値で表される。したがって、pixel 値を実位置[m]に換算する必要がある。

海上のカメラと水中ロボットの位置関係を図 4 に示す。深度 D [m] は水中ロボットの深度センサより既知である。写真の垂直サイズを H [pixel]、垂直画角を α_H [rad]、水平サイズを W [pixel]、水平画角を α_W [rad] とする。垂直方向の pixel-実位置変換係数を c_H 、水平方向の pixel-実位置変換係数を c_W とすれば、次式のような関係が成り立つ。

$$c_H = \frac{2D \tan \frac{\alpha_H}{2}}{H} \text{ [m/pixel] } \dots (1)$$

$$c_W = \frac{2D \tan \frac{\alpha_W}{2}}{W} \text{ [m/pixel] } \dots (2)$$

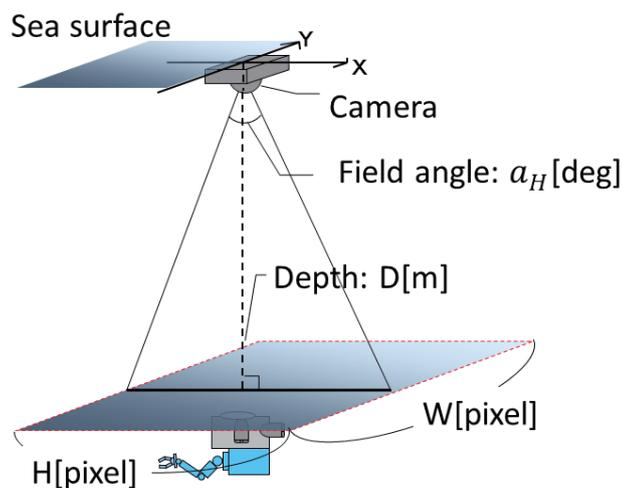


図 4 : pixel 値と実距離との関係

カメラには歪が生じているため、そのまま、位置検出に用いると位置誤差を含んでしまう。そこで、歪補正を行い、pixel-実距離変換係数 c_H と c_W を求める。歪補正後の画像サイズと水平画角、垂直画角を Table 1 に示す。使用しているネットワークカメラは CANON VB-M600D である。カメラが変わると画角も変わるので、カメラを変えた際には再度、画角の計算が必要になる。

表 1 : 使用しているカメラの画角

Picture size	W:1280 x H:960 [pixel]
Field angle -vertical-	a_H : 80.9 [deg]
Field angle -horizontal-	a_W : 66.3 [deg]

これより、画像内の pixel 値 (垂直方向の位置 P_H , 水平方向の位置 P_W) より次式の換算式を用いることで、実位置 (R_H, R_W) を求めることができる。

$$R_H = C_H \cdot P_H = 0.00133D \cdot P_H \text{ [m] } \dots(3)$$

$$R_W = C_W \cdot P_W = 0.00136D \cdot P_W \text{ [m] } \dots(4)$$

2-3 画像処理の方法

画像処理プログラムは Microsoft Visual C++ 2010 Express Edition を使用し、画像処理ライブラリはオープンソースである OpenCV1.0 を使用している。

画像処理の流れを図 5 に示す。画像補正後に、HSV 変換を行い、パーティクルフィルタによりマーカを検出する。パーティクルの位置の平均値を画像上のマーカ的位置とする。パーティクルの中心位置から式 (3), (4) を元にして実位置を求める。

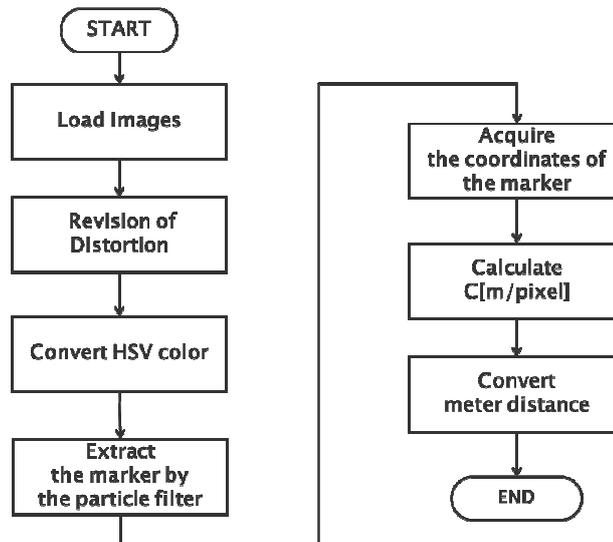


図 5 : 画像処理のフローチャート

マーカの色としては、赤や青を試みたが、屋外では光量の変化により検出のロバスト性に不安があることが実験では確認できたため、本実験では、白色高輝度 LED を用いた水中ライトを用いる。

プール実験時の画像処理した様子を図 6 に示す。本実験時には V (明度) 値を尤度として指定する。すべてのパーティクルの座標の平均値を LED ライトの座標としている。緑色の点がパーティクルで、青い点で示されている部分が全パーティクルの平均位置である。

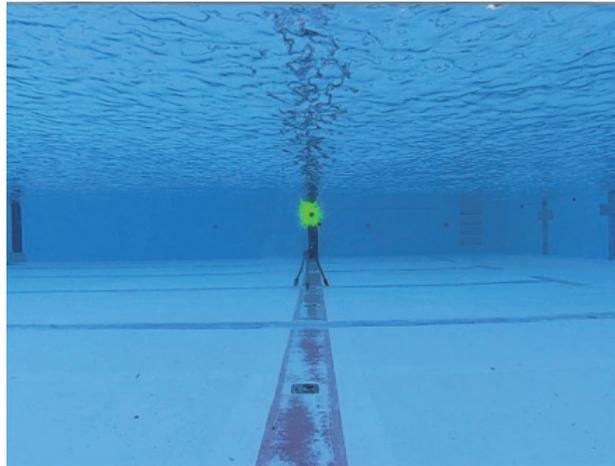


図 6 : 画像処理の様子

3 水中での位置計測基礎実験

3-1 実験方法

作成したプログラムを用いて、プールでの位置計測を行う。図 7 に示す位置にマーカーを配置し、各位置で画像を取得する。この時、カメラとマーカーとの距離は 5m とし、カメラの対称性を調べるためにカメラを 180 度回転させて、画像の下半分でも同様に計測を行う。得られた画像より実座標の計算を行い、理論値と実測値の精度を比較する。

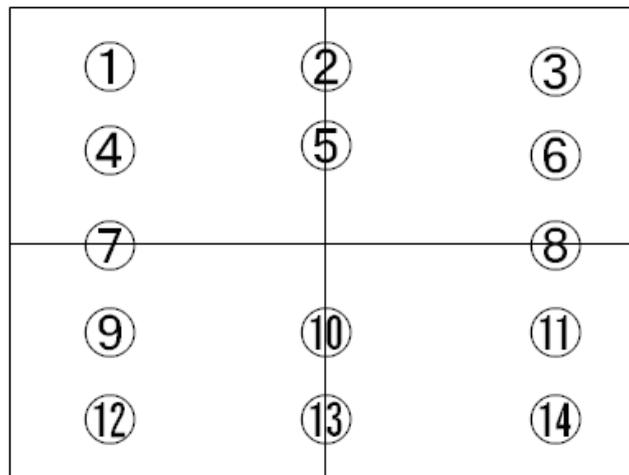


図 7 : 計測箇所

実験の手順

- (1) 三脚にカメラとマーカーをそれぞれ固定する。
 - (2) カメラを水中に入れ、重りを使って壁際に固定する。
 - (3) カメラとマーカーを所定の距離だけ離し、図 7 に示した箇所にマーカーを配置する。
 - (4) LED ライトの光がカメラから確認できるように、ライトの向きを調節する。
 - (5) ネットワークカメラのスナップショット機能を使い画像を取得する。
- (1)～(5)の操作を適宜繰り返し、計 14 枚の画像を取得する。

3-2 実験結果

プールでの位置計測実験の結果の一部を図8, 9に示す. それぞれ, ②, ⑧のときの写真である. 画像左はスナップショットにて取得したもので, 画像右は歪補正, HSV 変換, パーティクルフィルタを施し, マーカーを検出したものである.

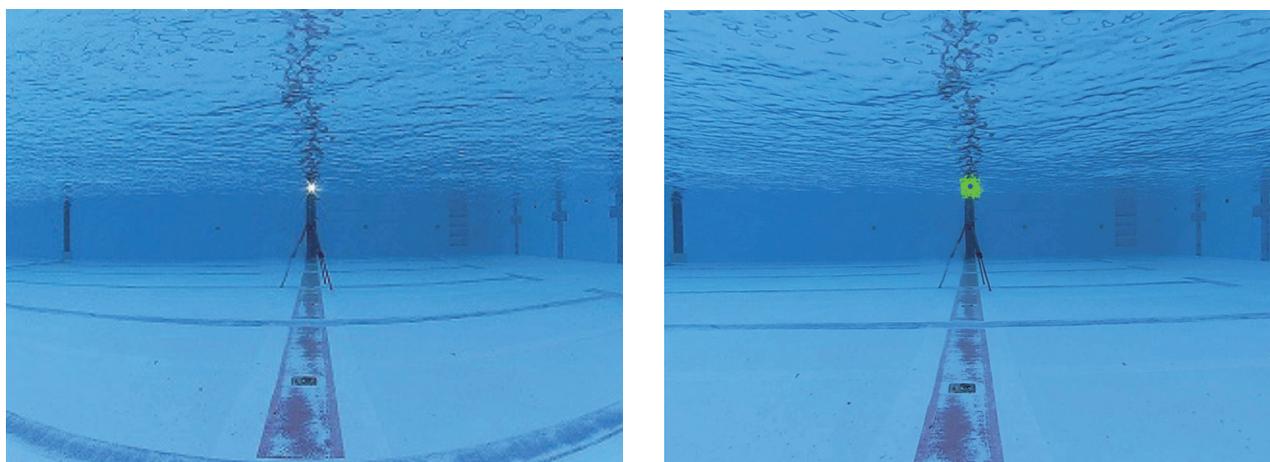


図8 ②の実行結果

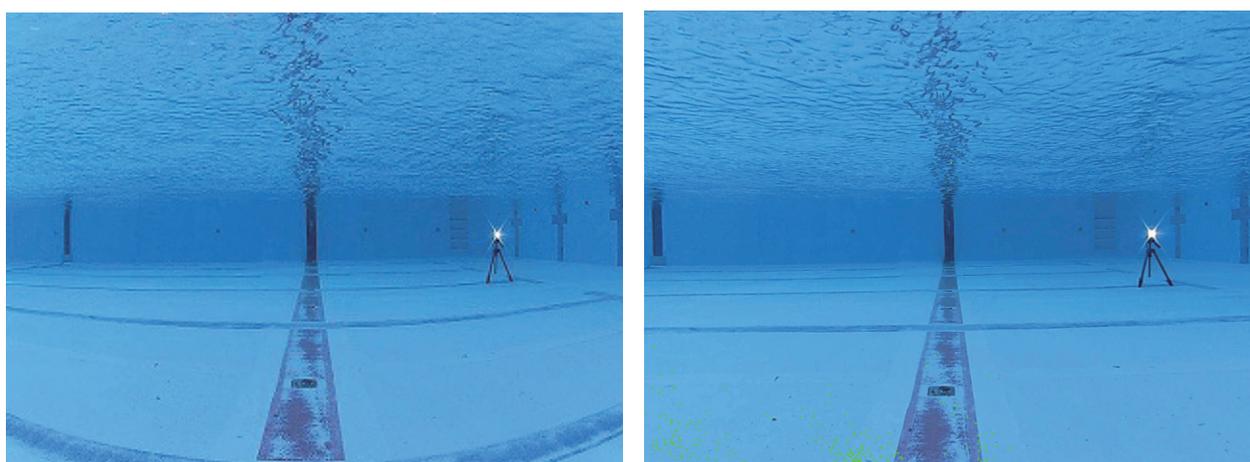


図9 : ⑧の実行結果

計測できた地点を表2に示し, 各点の画像処理による x,y 座標と, 実測座標, その誤差と平均値を表2に示す. また①~⑭の番号は図7に示す番号と対応している.

表2より, 最小誤差は②の位置で 46cm, 最大誤差は⑭の位置で 73cm, 全体の平均誤差は 52cm となっている. また, 縦方向の中心線上である②, ⑤, ⑩, ⑬の4箇所は全てパーティクルフィルタでの検出が行えているのに対し, 画像端にマーカーを設置した場合ではほとんどが検出できていない. さらに, ②, ⑤, ⑩, ⑬の4箇所は画像端の⑨, ⑭よりも比較的誤差が小さい.

表2 実測値と理論値の比較

		②	⑤	⑨	⑩	⑬	⑭	平均
計測値	x [m]	-0.02	-0.06	-2.76	0.11	0.09	2.92	-
	y [m]	0.76	0.38	-0.42	-0.35	-0.74	-0.66	-
実測値	x' [m]	0	0	-2.39	0	0	2.39	2.39
	y' [m]	1.22	0.89	-0.89	-0.89	-1.22	-1.17	0.64
誤差	$\sqrt{(x-x')^2+(y-y')^2}$	0.46	0.52	0.60	0.55	0.49	0.73	0.52

図9のようにすべての位置で画像処理を用いた検出はできていない。そのため、パーティクルフィルタのパラメータの調整を今後行っていく必要がある。

4 研究の成果と今後の予定

海中移動体を LED ライトとみなし、単眼カメラを用いて、画像処理による LED の位置検出を試みた。基礎実験においては、5m の距離に対して、10%程度の平均誤差 52cm の結果を得ることができた。しかしながら、すべての位置で LED ライトの検出ができていないため、今後はパーティクルフィルタのパラメータを調整する必要がある。

筆者らは、オフラインにおいて、GPS データと姿勢センサのデータと単眼カメラの映像を統合した基礎実験をすでに行っている。今後は画像処理の改良と海洋基礎実験を重ね、オンラインによる位置検出を目標に研究を行っていく。

【参考文献】

- [1] 環境省, “環境白書 循環型社会白書／生物多様性白書 ～地球環境の健全な一部となる経済への転換～”, 平成 21 年度版(2009), pp 47
- [2] Kent E. Carpenter et al. “One-Third of Reef-Building Corals Face Elevated Extinction Risk from Climate Change and Local Impact”, Science, 321(2008), pp560-563
- [3] 本川達雄, サンゴとサンゴ礁のはなし, 中公新書, (2008)
- [4] F. Takemura and R. T. Shiroku, “Development of the Actuator Concentration Type Removable Underwater Manipulator”, The 11th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision (ICARCV2010), pp.2124-2128, (2010)
- [5] 普天間, 白久, 武村, 川端, 相良, "受動型スラスト姿勢維持機構を用いた水中ロボットの姿勢安定性の検討", 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス部門講演会 2012 講演論文集, 2A2-G09, (2012)
- [6] T. Zhang, W. Li, K. Kuhlentz and M. Buss, “Multi-sensory motion estimation and control of an autonomous quadrotor”, Advanced Robotics, Vol.25, pp.1493-1514, (2011)

〈発表資料〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
単眼カメラを用いた海中移動体の位置計測システムの基礎実験	計測自動制御学会 第13回システムインテグレーション部門講演会	2012年12月