

光カメラ通信を用いた水中モビリティの自己位置推定 Self-localization for Underwater Vehicle using Optical Camera Communication

安井 唯華[†] 蓬田 康雄[‡] 中山 悠[†]
Yuika Yasui Yasuo Yomogida Yu Nakayama

1. はじめに

近年海中を新たな経済圏とすることへの期待が高まっているが、人手不足という課題があるため、水中モビリティの活用が期待されている。一方で、水中モビリティの自己位置推定は難しく、従来手法は高コストで、反射等により精度が低下するという課題があった[1][2]。そこで本研究では、光カメラ通信を用いた水中モビリティの自己位置推定を提案する。本提案手法の検証は、360度回転可能な光源と水中用カメラを用いて行った。まず場所・距離・深さなどの条件を変えて撮影し、セグメンテーションモデルを開発した。このモデルを使用し、リアルタイムで光源-水中用カメラ間の距離を推定した結果、ほぼ正確に距離を推定することができた。以上から光カメラ通信を用いた水中モビリティの自己位置推定の実現可能性が示唆された。

2. 提案手法

2.1 コンセプト

提案手法の概要を図1に示す。位置が既知であるLEDユニットから、当該ユニットのIDを光信号として送信する。水中モビリティのカメラにより撮影した動画像から、LEDユニットを検出する。送信された光信号を水中光カメラ通信により復調し、LEDユニットのIDを識別する。さらに歪み補正などの処理を行った上で、LEDユニットとカメラの位置関係から、幾何学的にカメラの自己位置を推定する。この詳細については次節にて述べる。

2.2 水中モビリティの自己位置推定

グローバル座標系をXYZ軸で表すこととし、 i 番目のLEDのグローバル座標を (X_i, Y_i, Z_i) とする。本手法の目的は、カメラが撮影した画像平面におけるLED座標とカメラの角度から、カメラのグローバル座標 $[X_r, Y_r, Z_r]$ を推定することである。

カメラの3次元の回転角をそれぞれ $(\theta_x, \theta_y, \theta_z)$ 、カメラの水平・垂直方向の画角を (a_w, a_h) 、画像の解像度を (m_w, m_h) と定義する。するとカメラの内部パラメータ K と外部パラメータ R は以下のように表せる。

$$R = \begin{pmatrix} \cos\theta_z & -\sin\theta_z & 0 \\ \sin\theta_z & \cos\theta_z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos\theta_y & 0 & \sin\theta_y \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta_y & 0 & \cos\theta_y \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta_x & -\sin\theta_x \\ 0 & \sin\theta_x & \cos\theta_x \end{pmatrix} \quad (1)$$

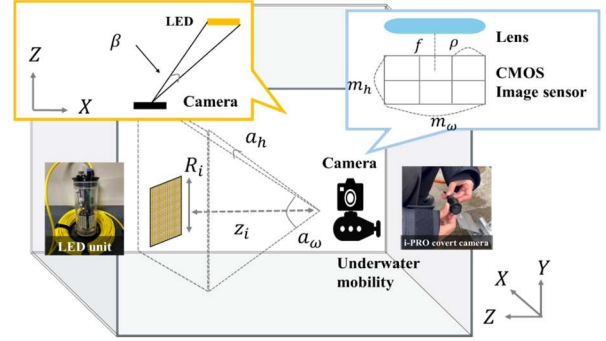


図1：提案手法の概要

$$K = \begin{bmatrix} \frac{m_w}{\tan\left(\frac{a_w}{2.0}\right)} & 0 & \frac{m_w}{2} \\ 0 & \frac{m_h}{\tan\left(\frac{a_h}{2.0}\right)} & \frac{m_h}{2} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

次に画像上のLEDの大きさから、LEDとカメラ間の距離 z_i を計算する。実世界と画像平面における i 番目のLEDの大きさをそれぞれ r_i と p_i とし、 ρ をCMOSイメージセンサのセルサイズ、 f はカメラの焦点距離と定義する。このとき、LEDとカメラ間の距離は以下のように計算される。

$$z_i = \frac{r_i f}{p_i \rho} \alpha \quad (3)$$

ただし、上式における α は歪み補正係数であり、以下のようにして定まる。水中における歪み補正は2つの要素から構成される。すなわち、まず撮影領域の中心部と周辺部で像の大きさが変化することによって生じる歪曲の補正である[3]。続いて水の屈折[4]やアクリルなど伝搬路上での諸要因による屈折を考慮して像の大きさが変化することによって生じる歪みの補正である。以上の2点の歪み補正を考慮すると、補正後のLED-カメラ間距離 z_{ai} は以下のように計算される。

$$z_{ai} = \frac{r_i f}{p_i \rho} \cdot \frac{k}{d} \quad (4)$$

このとき、歪み補正係数を k, d とした。なお k は伝搬路上での諸要因によって定まる値で、 d はレンズとイメージセンサの特性によって定まる機種依存の値である。

以上から画像平面におけるLEDの中心座標を (u_i, v_i) と定義すると、抽出された各LEDについて、カメラの相対座標は次のように推定される。

$$(X_{i,c}, Y_{i,c}, Z_{i,c}) = (X_i, Y_i, Z_i) + R \cdot K^{-1} \cdot \begin{bmatrix} z_{ai} u_i \\ z_{ai} v_i \\ z_{ai} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$(X_{i,c}, Y_{i,c}, Z_{i,c})$ は、画像上に存在する光源の数だけ算出される。2次元イメージセンサで光を受光しA/D変換を行っているため、算出された光源の直径は画素数を単位として量子化される。光源 i の長さの量子化誤差を ϵ_i とおけば、これ

[†]東京農工大学 大学院 工学府 知能情報システム工学専攻
Department of Electrical Engineering and Computer Sciences,
Tokyo University of Agriculture and Technology

[‡]i-PRO 株式会社
i-PRO Co., Ltd.

は 0.5 画素を単位として量子化されるため、以下のように計算できる。

$$\epsilon_i = \left(\frac{r_i f}{\rho \left(p_i \frac{d}{1.08} + 0.25 \right)} - \frac{r_i f}{\rho \left(p_i \frac{d}{1.08} - 0.25 \right)} \right) \quad (6)$$

結果として、光源ごとに推定したカメラの実世界座標は $(X_{i,c}, Y_{i,c}, Z_{i,c}) \pm \epsilon_i$ の範囲に存在する。全光源を用いて測位した結果から、以下の式を用いて最も確からしい座標 (X, Y, Z) を算出し、自己位置推定を行う。

$$\begin{cases} X_r = \frac{\max(X_{i,c} - \epsilon_i) + \min(X_{i,c} + \epsilon_i)}{2} \\ Y_r = \frac{\max(Y_{i,c} - \epsilon_i) + \min(Y_{i,c} + \epsilon_i)}{2} \\ Z_r = \frac{\max(Z_{i,c} - \epsilon_i) + \min(Z_{i,c} + \epsilon_i)}{2} \end{cases} \quad (7)$$

3. 結果

3.1 実験方法

送信機として図 1 に示す LED ユニットを使用した。円筒形の耐圧容器内に 3.5×7.0 cm の LED パネル 5 枚、Arduino、5V 電源を収納しており、側面 360 度に光信号を送出する。シンボル数は 4 とし、赤、青、緑、白を使用した。受信機として、i-PRO 株式会社のコバートカメラ (図 1) を使用した。カメラの解像度は 1920×1080 ピクセルで、水平方向と垂直方向の画角はそれぞれ 108° 、 58° である。イメージセンササイズは 5.6 mm(横) \times 3.2 mm(縦)で、焦点距離は 3.16 mm である。

実験は神戸市のメリケンパーク周辺海域で実施し、以下の手順で行った。LED ユニットとコバートカメラを固定用機材にそれぞれ取り付け、水深 1.0 - 6.6 m の場所に設置した。コバートカメラは水平方向からの光信号を記録した。LED ユニット-カメラ間距離を 1.0 - 5.0 m とし、0.5 m 間隔で測距した。

また水中で LED ユニットの複数回撮影し、カメラの画角に応じて生じる歪みの理論式 $d = \cos\beta$ を算出した。このとき β は図 1 中で示した角度で、LED の 4 点の座標から算出した。また実測値から $k=1.08$ とした。

3.2 実験結果

まず、LED ユニットの検出から測位までをリアルタイムに実行可能なことを確認した。カメラから RTSP (Real Time Streaming Protocol) により取得した画像からインスタンスセグメンテーションの代表的アルゴリズムである Mask R-CNN により LED ピクセルを検出した。図 2 は、LED 検出結果の例および検出成功率を表している。時刻や深さによっては水面の反射などを検出するケースもあったが、形状などを考慮することで誤検出の抑制に成功した。

次に、検出された LED 921 サンプルのうち、誤検出を除く 838 サンプルについて、距離推定の精度は図 3 のようになった。各距離における推定結果の平均値をプロットし、y 軸のエラーバーは標準偏差を示している。緑は歪み補正なし、青は歪み補正を行った値である。この結果から、全

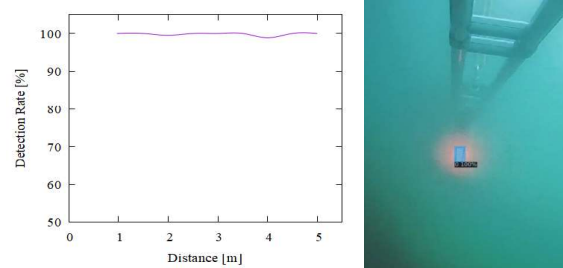


図 2 LED 検出率と LED を検出する様子

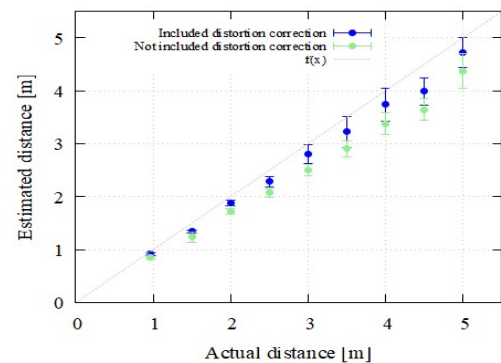


図 3 距離推定の精度

体として数 cm～十数 cm の精度で測距できていることが分かる。ただし、海中での濁りや光の減衰などにより、距離が遠くなるほど LED が不鮮明になるため、測距精度が低下する。この課題については、海中に設置する LED の数を複数にすることなどで解決が可能であると考えられる。

4. 考察及び結論

本論文では、光カメラ通信を用いた水中モビリティの自己位置推定を提案した。水中用カメラは水中環境に配置された LED からの光信号を受信し、そのサイズから LED との距離を推定する。従来の音響と比較して、到達距離が短い一方でコストが低く、ノイズや干渉に強いといった利点がある。本実験では、5m 前後の距離で数 cm～十数 cm の精度でのリアルタイム測位が可能であることを確認した。本システムは、水中環境や水中施設のモニタリングに貢献する。今後、水中用カメラに IMU 等のセンサを取り付け、自己位置推定の検証を行う。

謝辞

本研究の一部は、JST さきがけ(JPMJPR2137)および神戸市海プロジェクトの支援を受けて行われた。

参考文献

- [1] X. Sun et al., "A review on practical considerations and solutions in underwater wireless optical communication," J. Lightwave Tech., Vol. 38, No. 2, pp. 421-431(2020).
- [2] Mitsuyasu DEGUCHI et al., "Challenges and R&D on Underwater Acoustic Communication", 電子情報通信学会誌, Vol.105 No.4 pp.286-293(2022).
- [3] Haike Guan et al., "Digital Image Correcting Method for Digital Camera", Ricoh Technical Report, No.31(2005).
- [4] E.D. Palik (editor): "Handbook of Optical Constants of Solids", Academic Press, New York, p. 1069 (1985).