

SLAMによる地図構築とロボット制御

Robot Control by Simultaneous Localization and Mapping

正 見浪 護 (岡山大)

戸田 雄一郎 (岡山大)

学 ○窪内 優灯 (岡山大)

岡田 優也 (岡山大)

Mamoru MINAMI, Okayama University

Yuichiro TODA, Okayama University

Yuhi KUBOUCHI, Okayama University, pzuo0hiz@s.okayama-u.ac.jp

Yuya OKADA, Okayama University

Currently, various underwater robots have been researched and developed for seafloor surveys. The purpose of our research is to construct a system that recognizes the power supply equipment based on the information of the two cameras attached to the robot, and automatically charges the robot's battery. In order for an autonomous underwater robot to act in an unknown environment, the robot itself needs to recognize the surrounding environment and estimate its own position in the given environment. For that purpose, a method called SLAM (Simultaneous Localization and Mapping), which simultaneously performs map generation and localization, is required. In this paper we proposed SLAM based on Projection-based 3D perception(Pb-3DP). It is expected that it will be difficult to acquire visual information because the actual seabed is in a dark environment. Therefore, we constructed a SLAM function by making using cameras with LED. In this paper, we report the explanation of the proposed method and the operation verification experiment results.

Key Words: Underwater robot , GA, Simultaneous Localization and Mapping

1 緒言

近年、海底調査等のために様々な水中ロボットが研究・開発されている。我々の研究目的はロボットに取り付けた2台のカメラ情報によって給電設備を認識し、自動で充電を行い充電するシステムの構築である。我々は、先行研究において、実海域での連続航行実験に成功している。しかし、ロボットが給電設備周辺から離れ、水中ロボットが未知環境で行動するためにはロボット自身が周囲の環境を計測し、自己位置推定する必要がある。そのためには、地図生成と自己位置推定を同時に行うSLAM(Simultaneous Localization and Mapping)と呼ばれる手法が必要とされる。そこで、我々はPb-3DPを用いたSLAMによる自己位置推定と地図生成手法を提案した。SLAMではカメラを用いることで距離情報だけでなく視覚情報も同時に取得できるが、実際の海底は暗闇環境であるため情報の取得が困難となることが想定される。そこで我々は、LED付きカメラを用いて暗闇環境下での地図構築とロボット制御の検証を行った。本論文では、提案手法の説明と動作の検証実験について報告する。

2 認識手法

2.1 Projection-based 3D perception

Fig.1にProjection-based 3D perceptionの概略図を示す。Delta-150には2台のカメラを鉛直下向き搭載している。基準点を手先座標系 Σ_H とする。またワールド座標系を Σ_W とする。左カメラ座標系を Σ_{CL} 、画像座標系を Σ_{IL} 、右カメラ座標系を Σ_{CR} 、画像座標系を Σ_{IR} とする。左カメラに映った対象をモデルとして抽出し、3次元空間における位置・姿勢をGAによって決定する。このモデルを左カメラ画像から3次元空間へ逆射影し、右カメラ画像に再度射影することで、平面モデルを得る。この平面モデルと右カメラ画像を照合し、相関度を評価する。そして、平面モデルの位置・姿勢が対象物の位置・姿勢と一致したとき、適合度関数の値が最大値を示す。そのため、対象物の認識問題は、適合度関数の最大値探索問題に変換できる。適合度関数の最大値を探索・発見する場合、様々な方法があるが、一番単純かつ簡単な方法は全探索法である。これは、全ての関数値を計算することで最大値を発見するものであり、必ず最大値を発見できるが効率が悪い、つまり計算時間を多く費やすといった欠点を持っている。本手法では動画認識により自己位置推定を行なってい

る。したがって、動画認識は計算処理が短いことが重要となるため、本研究では最適解探索にGAを適用することで、効率良く短時間で最大値探索処理を行う。そして、GAがある程度収束した時、GAの遺伝子により決定される立体モデルの位置・姿勢を対象物の位置・姿勢と考えることで、対象物の位置・姿勢が計測できる。

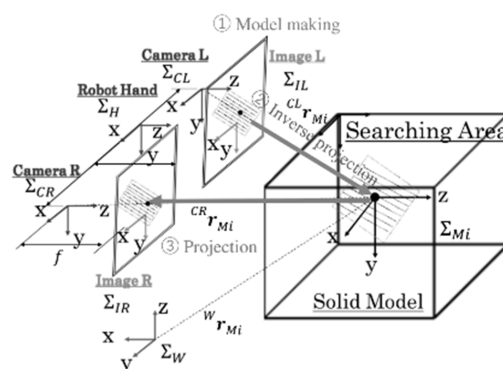


Fig.1 Overview of Projection-based 3D perception

2.2 Projection-based 3D perceptionを用いたSLAM

Fig.2に本手法のフローチャートを示す。初めに左カメラ画像の画像中心から探索モデルを作成し、2次元マップと比較することで位置2変数 (x, y) と姿勢 (ϵ_3) を推定する。また、右カメラ上に逆射影された探索モデルを用いて視線方向の位置 (z) を推定する。そして、算出された位置・姿勢 $\phi = (x, y, z, \epsilon_3)$ をもとにワールド座標系でのロボットの位置を計算を行う。その後、その位置情報に基づいてマップを更新し、水中ロボットを制御する。この処理をフレームレート毎に行なうことでリアルタイムでのSLAMによるROV制御が可能になる。

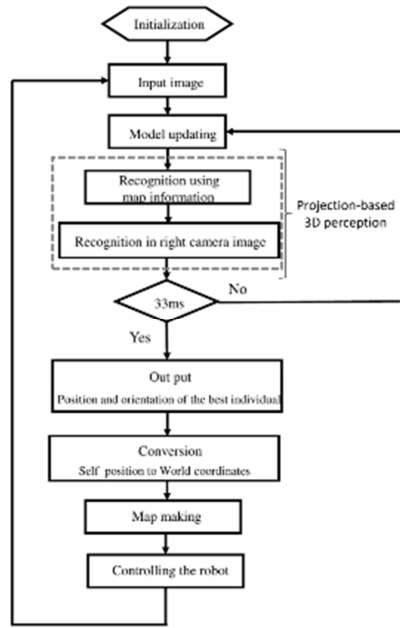


Fig.2 The flowchart of SLAM using Projection-based 3D perception

2.3 適合度関数

本手法では、画像の RGB 値から HSV 表色系の色相値と輝度を算出し、以下の適合度関数に基づいてモデルと画像の相関度を評価する。この適合度関数は、式 (1) に示す通り色相値にも基づく色適合度 $F_H(\phi_M^j)$ と輝度による発光適合度 $F_B(\phi_M^j)$ により構成されている。ここで、色適合度 $F_H(\phi_M^j)$ は式 (2),(3) で定義される。 $p_H(Ir_i^j(\phi_M^j))$ は射影されたモデルと画像の評価値であり、色相の差が閾値以内であれば加算、閾値以上であれば減算するものである。発光適合度 $F_B(Ir_i^j(\phi_M^j))$ も同様に式 (4),(5) で定義される。この適合度関数は、空間中に逆射影されたモデルの持つ位置 / 姿勢情報より一意に決定する関数であり、射影されたモデルと画像上の対象物が一致している場合に、適合度が高くなるように設定されている。この適合度関数を用いることで、最適化問題を適合度の最大化問題に落とし込んでいる。

$$F(\phi_M^j) = F_H(Ir_i^j(\phi_M^j)) + F_B(Ir_i^j(\phi_M^j)) - F_H(Ir_i^j(\phi_M^j)) \cdot F_B(Ir_i^j(\phi_M^j)) \quad (1)$$

$$F_H(Ir_i^j(\phi_M^j)) = \frac{\sum p_H(\phi_M^j)}{2 \cdot N} \quad (2)$$

$$p_H(Ir_i^j(\phi_M^j)) = \begin{cases} 2 & |(H_I(\phi_M^j) - H_M(\phi_M^j))| \leq 30 \\ -1 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

$$F_B(Ir_i^j(\phi_M^j)) = \frac{\sum p_B(\phi_M^j)}{2 \cdot N} \quad (4)$$

$$p_B(Ir_i^j(\phi_M^j)) = \begin{cases} 2 & |(B_I(\phi_M^j) - B_M(\phi_M^j))| \leq 20 \\ -1 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

2.4 自己位置推定とワールド座標系への変換

自己位置推定において、ワールド座標系での現在の位置・姿勢を求めるためには、認識により得られる位置 (x, y, z) と姿勢 (ε_3) の移動量 (変化量) を累積する必要がある。 $n[s]$ における推定の際のハンド座標系を Σ_n とする。また、この際の推定により得ら

れる移動量ベクトルを ${}^{n-1}\mathbf{r}_{n-1,n}$ とし、姿勢の推定量に基づく回転行列を ${}^{n-1}\mathbf{R}_n$ とすると、 Σ_{n-1} から Σ_n への同次変換行列 ${}^{n-1}\mathbf{T}_n$ は式 (6) のように示される。

$${}^{n-1}\mathbf{T}_n = \begin{bmatrix} {}^{n-1}\mathbf{R}_n & {}^{n-1}\mathbf{r}_{n-1,n} \\ \mathbf{0} & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

ワールド座標系での現在のロボットの位置姿勢による回転行列 ${}^W\mathbf{R}_n$ と位置ベクトル ${}^W\mathbf{r}_n$ は式 (3) のように初期位置から現在までの同次変換行列の積で計算することができる。現在のロボットの姿勢 (ε_3) は回転行列 ${}^W\mathbf{R}_n$ を逆算することで、求めることができる。

$$\begin{bmatrix} {}^W\mathbf{R}_n & {}^W\mathbf{r}_n \\ \mathbf{0} & 1 \end{bmatrix} = {}^W\mathbf{T}_0 \cdot {}^0\mathbf{T}_1 \cdots {}^{n-1}\mathbf{T}_n \quad (7)$$

モデル更新毎にこの変換を行なうことで、逐次ワールド座標系でのロボットの位置姿勢を計算することができる。

2.5 マップの更新

SLAM では逐次 2 次元マップを更新しながら、探索モデルとマップを比較することにより自己位置推定を行う。式 (8),(9) では 33[ms] ごとに計測されるワールド座標系での位置、姿勢に基づき探索モデルの各評価点が 2 次元マップ上のどの位置に存在するかを計算する。ここで、 f はカメラの焦点距離 [mm]、 $\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}$ は x, y, z 各方向の推定値 [mm]、 ${}^W\mathbf{R}_n$ はワールド座標系での姿勢の認識値 ε_3 から得られる回転行列である。また、 η_x, η_y はカメラ座標と画像座標系における x 軸、 y 軸の距離の比 [mm/pixel]、 R_{map} は実環境からマップ座標空間へのスケール係数である。

$$\begin{bmatrix} {}^{Map}x_i \\ {}^{Map}y_j \end{bmatrix} = \frac{1}{R_{map}} \left(\mathbf{P} \begin{bmatrix} {}^W\mathbf{R}_n(\varepsilon_3) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^Mx_i \\ {}^My_j \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{y} \end{bmatrix} \right) \quad (8)$$

$$\mathbf{P} = \frac{1}{\hat{z}} \begin{bmatrix} f/\eta_x & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f/\eta_y & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

3 認識性能確認実験

3.1 実験目的

実海域は光が届く環境だけではなく、海底などの光が届かない暗闇環境も存在することが考えられる。そこで、同じプログラムを用いて昼・夜の 2 つの環境下で地図生成と自己位置推定が正しく行えるかその精度を検証する。

3.2 実験環境

実験環境を Fig.3 に示す。今回の実験は 11 号館内のプールにおいて行った。プールの底面には海底を模した背景を敷き、認識対象となるマーカーを並べている。ROV には下向きカメラとして広和 LED マリンアイが 2 台搭載されている。2 台のカメラの中心を手先座標系 Σ_H とし、左方向に x 軸正方向、奥行き方向に y 軸正方向、下方向に z 軸正方向とする。またシステムが開始された時点の手先座標系をワールド座標系 Σ_W とする。下向きカメラのカメラ間距離は 100[mm] としており、カメラ角度は $0[^\circ]$ としている。

今回は昼・夜の 2 つの環境下で実験を行った。昼の際は 530[Lux]、夜の際は 1[Lux] の環境下で行った。また夜環境では可変抵抗が取り付けられた広和 LED マリンアイを認識画像が白飛びしない程度に調節して使用し実験を行った。その時の電流値は 7.27[mA] であった。

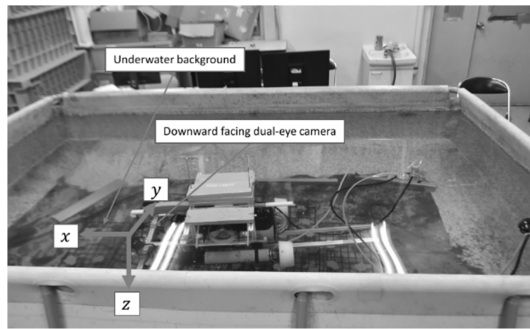


Fig.3 Experimental environment

3.3 実験内容

初期位置から y 軸方向の目標値を $0[\text{mm}]$ に、 z 軸方向の目標値を $0[\text{mm}]$ 、 z 軸周りの角度の目標値を $0[^\circ]$ とし、その位置・姿勢を維持させたまま、 x 軸方向に $1000[\text{mm}]$ 前進させる。前進が完了の後、一定時間停滞し初期位置まで後退する軌道を設定し、 $1000[\text{mm}]$ の往復運動を行う。またその時の y, z, z 軸周りの角度の誘導条件範囲は $\pm 50[\text{mm}]$ 、 ε_3 は $\pm 5[^\circ]$ とする。同じ実験を昼・夜で行う。

3.4 実験結果・考察

今回の実験では昼・夜の環境下でどちらも連続3回の往復運動に成功した。Fig.4, Fig.5 にはそれぞれの環境下での1回目の往復時の自己値推定及び (A)~(C) の認識時の左右カメラ画像とマッピング画像を示している。(A) と (B) を比較すると、昼・夜ともにロボットの前進に伴いマップが更新されていることがわかる。また、マップ内の赤枠は左カメラから作成した検索モデルとマップの比較による自己位置推定に基づきロボットがマップ上のどの位置に存在するかを示している。(A) と (C) では、左右カメラ画像からおおよそ同じ位置に存在することがわかり、認識結果についても、昼の場合 (A) では $(x, y, z) = (0.34, 10.7, 0.091)[\text{mm}]$ 、(C) では $(x, y, z) = (0.85, 6.2, -8.3)[\text{mm}]$ 、夜の場合 (A) では $(x, y, z) = (2.0, -2.9, -3.1)[\text{mm}]$ 、(C) では $(x, y, z) = (1.4, -2.1, 1.5)[\text{mm}]$ であり認識結果の誤差がともに $10[\text{mm}]$ 以内に収まっている。

4 結言

本報告では、SLAM による地図構築とロボット制御の検証実験について報告した。昼と夜で実験を行いそれぞれの実験結果を比較することで、暗闇環境下でもロボットの地図構築と自己位置推定が問題なく行われていることが確認できた。今回は識別しやすい色付きマーカーを使用した。今後はマーカーがない環境にも対応できるシステムの構築を目指すなど、SLAM の精度の向上に努める。

参考文献

- [1] Myint, M., Yonemori, K., Yanou, A., Ishiyama, S., Minami, M., "Robustness of visual-servo against air bubble disturbance of underwater vehicle system using three-dimensional marker and dual-eye cameras", In OCEANS 2015-MTS/IEEE, Washington DC, USA (2015), pp. 1-8.
- [2] Myint, M., Yonemori, K., Yanou, A., Lwin, K N., Minami, M., Ishiyama, S., "Visual-based deep sea docking simulation of underwater vehicle using dual-eyes cameras with lighting adaptation", Proceedings of OCEAN 2016-Shanghai, (2016), pp. 1-8.
- [3] Xiang Li, Yuya Nishida, Myo Myint, Kenta Yonemori, Naoki Mukada, Khin Nwe Lwin, Matsuno Takayuki, Mamoru Minami, "Dual-eyes Vision-based Docking Experiment of AUV for Sea Bottom Battery Recharging," MTS / IEEE OCEANS '17, Aberdeen Scotland, June 19-22, 2017.
- [4] 大西祥太, 須浪唯介, 西村健太, 矢納陽, 石山新太郎, 見浪護 (岡山大), 藤本勝樹 (広和 (株)) "MOS 制御知能を搭載した遠隔操作型水中ロボット (ROV) の自律制御化 (AUV) 技術", 第 57 回自動制御連合講演会, 1B08-2, 2014.
- [5] Daiki Yamada, Naoki Mukada, Myo Myint, Khin Nwe Lwin, Takayuki Matsuno and Mamoru Minami "Improvement of 3D-Pose Real-time Estimation by Active Marker and HSV-evaluated Function", 23rd International Symposium on Artificial Life and Robotics, B-Con Plaza Beppu, January 18-20, 2018
- [6] W. Song, M. Minami, S. Aoyagi, "On-line Stable Evolutionary Recognition Based on Unit Quaternion Representation by Motion-Feedforward Compensation", International Journal of Intelligent Computing in Medical Sciences and Image Processing (IC-MED) Vol. 2, No. 2, pp 127-139, 2007.

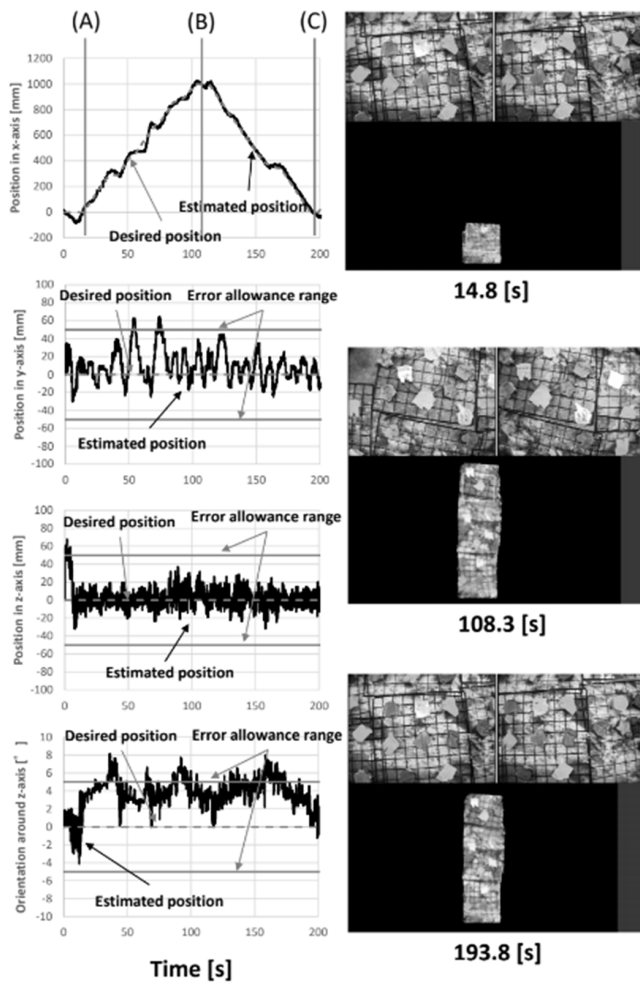


Fig.4 1st reciprocating of Day result

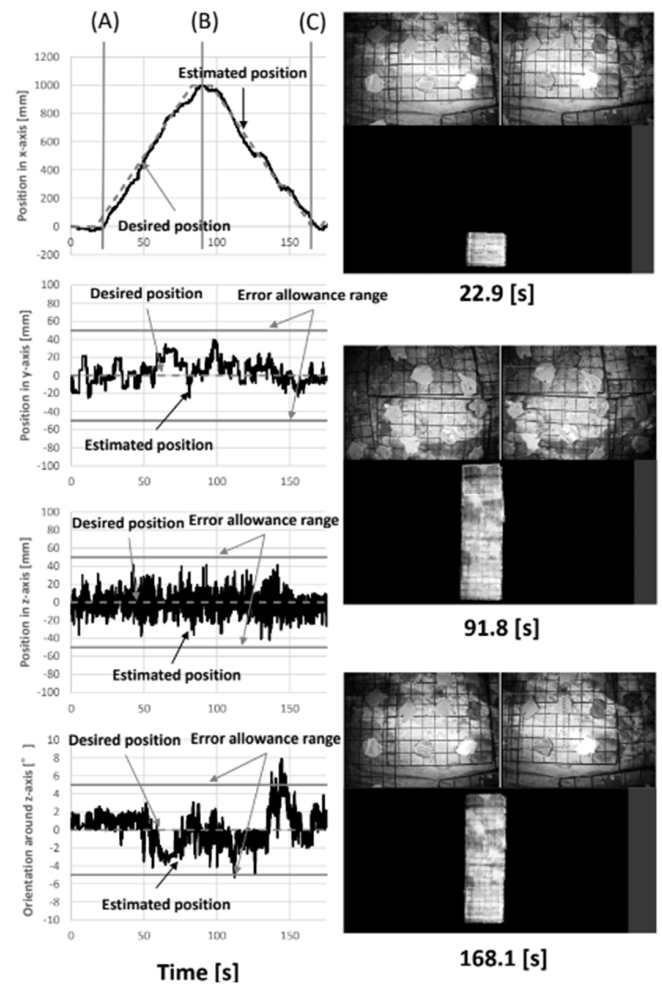


Fig.5 1st reciprocating of Night result