

音響カメラに基づいた水中環境における人工マーカシステムの開発

Development of an Artificial Marker System based on Acoustic Camera for Underwater Environment

○ 学 Yusheng Wang (東大) 正 池 勇勲 (JAIST) 劉 丁瑜 (東大)
正 田村 雄介 (東北大) 土屋 洋 (若築建設) 正 山下 淳 (東大)
正 浅間 一 (東大)

Yusheng WANG, The University of Tokyo, wang@robot.t.u-tokyo.ac.jp

Yonghoon JI, Japan Advanced Institute of Science and Technology

Dingyu LIU, The University of Tokyo

Yusuke TAMURA, Tohoku University

Hiroshi TSUCHIYA, Wakachiku Construction Co., Ltd.

Atsushi YAMASHITA, The University of Tokyo

Hajime ASAMA, The University of Tokyo

This paper introduces an artificial marker system for underwater environments using acoustic camera. The system is composed of detection of the designed square markers, ID identification and six-degree-of-freedom (6DoF) pose estimation. The proposed system can be applied to tasks such as underwater positioning, underwater vehicle navigation and augmented reality (AR).

Key Words: Marine robotics, acoustic camera, artificial marker system, pose estimation

1 序論

コンピュータビジョンなどの発展により、ArUco のような光学カメラに基づいた人工マーカシステムは拡張現実 (AR)、位置・姿勢推定、ロボットナビゲーションなど様々な分野に適用されている [1]。しかし、濁り等による可視光線の拡散要因が多い水中環境においては、光学カメラを応用した人工マーカシステムの幅広い適用は難しい。これに対して、音波を用いた水中可視化技術として濁りに強く比較的高精度な画像を取得することの可能な ARIS や DIDSON のような次世代音響カメラを用いる技術が発展している。これを光学カメラ同様のマーカシステムとして活用できれば、水中距離計測をはじめ、短距離多点同時水中測位等、水中における工学的な活動において極めて有用な技術として期待される。

音響カメラに基づいた 2 次元マーカシステムの先行研究として、Lee らは円型の 2 次元マーカをデザインし、その識別システムを提案した [2]。このマーカシステムでは、音響画像からマーカの領域と中心の位置および ID 情報の抽出機能に留まっており、カメラとマーカ間の 6 自由度の位置・姿勢推定は不可能である。また、マーカの識別手法において、1 枚の画像からは識別できず、時系列の画像が必要である。光学カメラに基づくマーカシステムの場合、正方形のマーカからコーナー点を検出し、PnP 問題を解くことにより、6 自由度の相対位置・姿勢の推定が可能である。しかし、音響カメラは特殊な投影原理を持つため、正確に相対位置・姿勢を推定できる理論はまだ確立されていない。筆者らは共面点から音響カメラの外部パラメータを推定する手法を提案した。しかし、マーカのサイズが小さく ($0.25 \text{ m} \times 0.25 \text{ m}$)、対応点の数が少ない (3, 4 点) 場合、正確に推定できるパラメータは 5 自由度が限界である [3]。

以上の点を踏まえ、本研究では、新しい正方形のマーカをデザインし、1 枚の画像から、マーカを検出する手法を提案する。次に、マーカごとの ID を識別する方法を提案する。最後に、画像上のマーカから検出されるコーナー点と illuminated area (IA) [4] を使い、6 自由度の位置・姿勢関係を正確に推定可能な手法を構築する。提案手法の有効性は、実機実験により検証する。

2 提案手法

2.1 人工マーカデザイン

アクティブソナーである音響カメラは、音波の後方散乱反射によって画像を生成する。後方散乱反射の強度は物体の材質に依存する。例えば、金属のような鏡面反射材の場合、後方散乱反射が弱い。一方、石膏、木材などの拡散反射材の場合、後方散乱反射が強い。したがって、適切な材料を選択および組み合わせにより、複数材質のコントラスト比を高くすることで、画像上での自動認識が可能なパターンを製作可能である。本研究では、実験により、ステンレスとコンクリートの組み合わせから理想的な結果が得られた。また、図 1 に示されたように、さらにステンレス上にペンキを塗るか、拡散反射材を貼り、音響画像上でのマーカのパターンを識別可能になる。

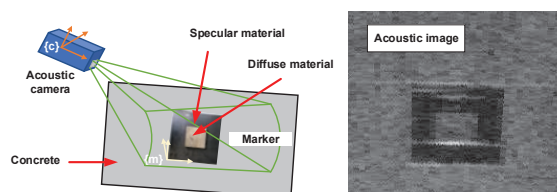


Fig.1 音響カメラのための人工マーカ

2.2 投影モデル

本節では、音響カメラの特殊な投影モデルを説明する。カメラ座標系上の 3 次元の点は極座標 (r, θ, ϕ) とユークリッド座標 (X_c, Y_c, Z_c) で表示できる。また、図 2 に示すように、この 3 次元の点は扇形の 2 次元平面に投影される。したがって、音響カメラの投影モデルは以下の式で表現可能である。

$$\begin{bmatrix} x_c & y_c & 0 \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} \alpha & 0 & 0 \\ 0 & \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_c & Y_c & Z_c \end{bmatrix}^T \quad (1)$$

ここで、 $\alpha = \frac{1}{\cos \phi}$ であり、仰角 ϕ の範囲は $\phi_{\min}$ から $\phi_{\max}$ までである。ARIS EXPLORER 3000 の場合、 $\phi_{\min}$ と $\phi_{\max}$ はそ

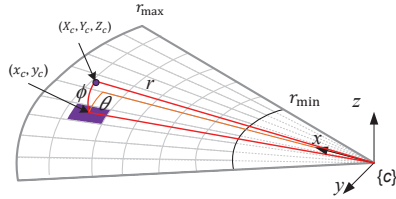


Fig.2 音響カメラの投影モデル

れぞれ -7° と 7° であるため、 α の範囲は 1 から 1.0075 までとなる。 α を定数として考えると、 $\alpha = 1$ の場合、音響カメラの投影モデルは直交投影に近似することができる。一方、 $\alpha > 1$ の場合、音響カメラの投影モデルは弱透視投影モデルに近似することができる。

2.3 マーカ識別

本節では、マーカの識別手法について述べる。まず、画像から四角形領域を検出するため maximally stable extremal regions (MSER) を用いる。また、モルフォロジーオープニング処理を通して領域の辺をスムージングする。次に、各領域の輪郭を検出し、Douglas-Peucker (DP) アルゴリズム [5] を用いて領域の輪郭を多角形に近似する。最後に、辺の数が 4 つの凸四角形を領域の候補とする。

続いて、Negahdaripour が提案したソナーホモグラフィ [6] を利用して各領域候補に対しての ID 認識を行う。 α が定数、かつマーカが小さい場合、ソナーホモグラフィはアフィン変換に近似することが可能である。したがって、本研究では、この原理に基づきいてマーカの投影歪みを除き除去し、テンプレートマッチングを適用することによりマーカの ID を認識する。

2.4 6 自由度の位置・姿勢推定

正確な 6 自由度の位置・姿勢関係を推定するためには、マーカのコーナー点と IA 情報 [4] を利用する必要がある。IA とは、音響カメラが平面をセンシングする場合、 $\phi_{\min}$ から $\phi_{\max}$ までの範囲により生じる、画像上の明るい領域である。IA は上境界 b_u と下境界 b_l の 2 つの境界線を有する。本研究では、 b_u と b_l の中心点と 4 つのコーナー点を利用し、6 自由度の位置・姿勢推定を行う。場合によって、信号が弱く、 b_u の中心点が検出できない場合、 b_l の中心点のみを使う。この 2 つの中心点においては $\theta = 0$ であるため、それぞれの距離情報 r を $\mathfrak{R}_u$ と $\mathfrak{R}_l$ で表記することが可能である。

2.4.1 IA 境界線中点検出

まず、画像を Otsu 法で二値化し、各画素に対し、連通する画素数をカウントする。孤立した画素を消去する。次に、 $\theta = 0$ 方向で一次元探索を行う。これによって、 $\mathfrak{R}_u$ と $\mathfrak{R}_l$ を求められる。

2.4.2 初期値推定

音響カメラの投影モデルを弱透視投影モデルに近似すれば、コーナー点から相対位置・姿勢の解析解を容易に求めることができる。本研究では、弱透視投影モデルを使って相対位置・姿勢の初期値を求める。しかし、弱透視投影モデルからは 5 自由度のみ推定可能であり、カメラ座標系の z 方向の移動の推定はできない。筆者らは、5 自由度の推定結果を固定し、非線形投影モデルを使ってカメラ座標系の z 方向の移動の初期値を推定した後、その初期値を利用して、非線形投影に基づいて、最適結果を求める手法を提案した [3]。しかし、カメラ座標系の z 方向の移動には 0.1 m ~ 0.2 m ぐらいの誤差が残っている。そこで本研究では、IA 情報を追加し、パーティクルフィルタを使って、正確な 6 自由度の位置・姿勢推定を行う手法を新たに提案した。

2.4.3 パーティクルフィルタによる最適化

本研究では、さらにパーティクルフィルタを局所最適化を行うために用いる。推定された初期値の周りに、ランダムにパーティクルを生成し、サンプリング段階で、各パーティクルにガウシアンノイズを入れる。ここで、カメラ座標系の z 方向の不確かさを高くするため、より大きい分散のノイズを入れる。パーティクルの重みはコーナー点の再投影誤差と $\mathfrak{R}_u$ と $\mathfrak{R}_l$ の計測値および推定値の差によって計算される。最後は重み付きの平均の位置・姿勢を計算し、最終結果を求める。

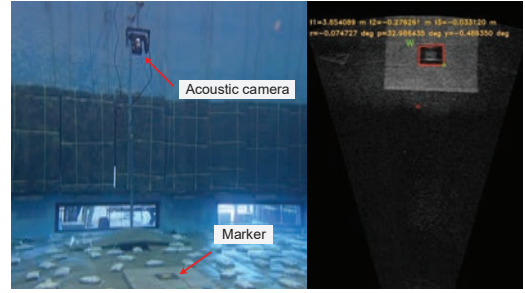


Fig.3 実機実験の様子

3 実験

図 3 で示す環境において音響カメラ ARIS EXPLORER 3000 を用いたマーカの認識と位置・姿勢推定の実験を行った。画像の解像度は 0.003 m、サイズは 128 pixels $\times$ 1483 pixels であった。本実験では、木材をステンレスの上に貼ることでマーカをデザインした。ステンレス板のサイズは 0.25 m $\times$ 0.25 m であり、木材のサイズは 0.25 m $\times$ 0.25 m であった。並進の真値は直接定規で計測し、回転の真値はローターの制御入力で取得した。ここで、51 枚の画像を使って評価を行った。51 個のマーカの内、46 枚のマーカが正しく識別された。木材の板は 0.01 m の厚みがあり、2 次反射などが識別率に影響を及ぼしたと考えられる。ペンキなど厚みがない材料を使えば、識別精度を向上できると予測される。マーカの相対位置・姿勢の推定について、今回は $\mathfrak{R}_u$ はソナーの 5 m の有効距離を超えてしまったため、 $\mathfrak{R}_l$ のみを使った。推定結果について、推定位置に関する RMSE 誤差は 0.077 ± 0.068 m であり、回転の RMSE 誤差は 0.031 ± 0.020 rad であった。処理時間は、Intel(R) Core(TM) i7-8750H CPU @ 2.20 GHz を用いた場合、8.0 Hz であった。結果的に高精度での推定が実現でき、提案手法の有効性が示された。

4 結論

本研究では、音響カメラを用いた人工マーカシステムを提案した。実験で得られた画像を本システムに適用したところ、水中環境におけるマーカ識別のほか、正確かつ高精度な 6 自由度の位置姿勢推定が可能となった。この結果は、水中測位、ナビゲーション、水中 AR システムなどに応用可能であり、水中における各種調査研究や構造物構築などの基礎技術として有用であると考えられる。今後は、マーカ検出のロバスト性の向上、IA 情報以外を使っての 6 自由度の位置・姿勢推定の可能性等を確認し、応用性、汎用性の向上を目指す。

参考文献

- [1] S. Garrido-Jurado, R. Munoz-Salinas, F. Madrid-Cuevas, and M. Marin-Jimenez, "Automatic Generation and Detection of Highly Reliable Fiducial Markers Under Occlusion," *Pattern Recognition*, vol. 47, no. 6, pp. 2280–2292, Jun. 2014.
- [2] Y. Lee, J. Choi, N. Y. Ko, and H. T. Choi, "Probability-based Recognition Framework for Underwater Landmarks Using Sonar Images," *Sensors*, vol. 17, no. 9, 1953, Sep. 2017.
- [3] Y. Wang, Y. Ji, H. Woo, Y. Tamura, H. Tsuchiya, A. Yamashita, and H. Asama, "Planar AnP: A Solution to Acoustic-n-Point Problem on Planar Target," *Proceedings of the 2020 MTS/IEEE conference on OCEANS-Singapore*, Aug. 2020.
- [4] Y. Wang, Y. Ji, H. Woo, Y. Tamura, H. Tsuchiya, A. Yamashita, and H. Asama, "Rotation Estimation of Acoustic Camera based on Illuminated Area in Acoustic Image," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 52, no. 21, pp. 163–168, Sep. 2019.
- [5] D. Douglas and T. Peucker, "Algorithms for the Reduction of the Number of Points Required to Represent a Digitized Line or Its Caricature," *The Canadian Cartographer*, vol. 10, no. 2, pp. 112–122, Dec. 1973.
- [6] S. Negahdaripour, "Visual Motion Ambiguities of a Plane in 2-d FS Sonar Motion Sequences," *Computer Vision and Image Understanding*, vol. 116, no. 6, pp. 754–764, Jun. 2012.