# 音響カメラ画像を用いた拡張カルマンフィルタに基づく 水中物体の3次元計測手法の構築

〇マイ ゴク チュン (東京大学) 禹 ハンウル (東京大学) 池 勇勳 (東京大学)
田村 雄介 (東京大学) 山下 淳 (東京大学) 淺間 一 (東京大学)

# 1. 序論

災害地など人の入れない水中環境では、ロボットに よる探査が期待される [1][2]. ロボットによる無人探査 を行うためには、水中における物体認識が極めて重要 である.通常、水中環境の情報を取得するには光学式 カメラが用いられている.光学カメラには解像度の高 い画像が得られる利点があり、光学カメラを用いた水 中物体の3次元測定や水中の位置姿勢と地図の同時推 定 (Simultaneous Localization And Mapping, SLAM) の研究は多く行われている [3]-[6].しかし、光学カメ ラは透明な水中環境に適しているセンサであり、濁っ た水中では使用することが困難である.

一方,超音波センサは濁った水中でも信頼性のある 情報取得が可能であり,海底鉱物資源や水産資源の調 査,海底地形計測などに使用されている.さらに近年 では,次世代超音波センサと呼ばれる dual-frequency identification sonar (DIDSON) や adaptive resolution imaging sonar (ARIS) などの音響カメラが開発され, より効果的に水中環境における情報取得が可能になっ た [7][8].

多視点での音響カメラ画像を用いた水中物体の3次 元計測手法として,Kwakらの研究がある[9].この研 究では,多視点における音響カメラの位置と姿勢情報 を既知と仮定し,水中物体の3次元計測を行った.し かし,事前情報として音響カメラの位置と姿勢情報を 正確に把握することは困難であるため,3次元計測の 精度に限界があった.したがって,より正確な3次元 計測を行うためには,カメラの位置・姿勢の誤差を考 慮することが必須である.

本研究では,音響カメラの位置・姿勢情報に発生する 誤差を考慮した3次元計測モデルの構築を目的とする. 音響カメラの位置・姿勢情報と水中物体の3次元情報を 同時に推定するため,拡張カルマンフィルタ(Extended Kalman Filter, EKF)を用いる[10]. 多視点における 音響カメラの画像における複数の特徴点を利用し,カ メラの位置・姿勢と水中物体の3次元情報を同時に推 定する(図1).

## 2. 音響カメラの基本原理

# 2.1 音響カメラのプロジェクションモデル

音響カメラはある3次元空間の範囲で超音波を発することで音響カメラ画像を生成する.その範囲は、図2に示すように最大測定距離 $r_{cam}$ ,方位角 $\theta_{cam}$ ,そして仰角 $\phi_{cam}$ によって定まる.音響カメラから発された超音波はセンシング領域を進行し、物体にあたって反射され、音響カメラに戻る.音響カメラは測定距離r,方



図1 音響カメラを用いた多視点における物体の観測



図2 音響カメラのプロジェクションモデル

位角θ,そして反射強度Ιに基づいて画像を生成する.

#### 2.2 音響カメラ画像生成における幾何学的モデル

図2に示すようにセンシング領域にある調査対象の 点 P は、音響カメラを基準としたモデル座標(r,  $\theta$ ,  $\phi$ ) で表される.しかし、音響カメラ画像に出力される ときは、図3に示すように、2次元の画像となる.音 響カメラ画像において、調査対象はカメラを基準とし た極座標上に表現され、画像から音響カメラ画像が測 定距離r、方位角 $\theta$ の値が得られるが、仰角 $\phi$ の値は 得られない.

## 2.3 音響カメラ画像における特徴点

音響カメラ画像における画素の位置は測定距離 r, 方位角θで定まり,該当画素には反射強度 I に基づい





図4 提案手法の概要

た値が記録される.本研究では、反射強度が急変する 物体の頂点を特徴点として用いることを想定し、図 1 における赤い点、青い点、黄色い点を特徴点として定 義する.音響カメラ画像からは特徴点までの距離rと 方位角 $\theta$ が得られる.

## 3. 提案手法

#### 3.1 問題設定

本研究で提案する手法の概要を図4に示す.入力情 報として,誤差を含むカメラの移動制御入力と音響カ メラの画像が使用され,音響カメラの位置・姿勢情報お よび水中物体の特徴点の位置情報は拡張カルマンフィ ルタアルゴリズムから推定される.ここで,カメラの 位置・姿勢を示すベクトルと特徴点の位置を示すベク トルをそれぞれ $x_c \ge x_{l(1:n)} \ge 0$ ,式(1)~式(3)のよ うに定義する.また,カメラの位置・姿勢 $x_c$ に加えて 全ての特徴点の位置 $x_{l(1:n)}$ を含むベクトルをX と置 き,状態ベクトルと呼ぶ.状態ベクトルXは式(4)の ように表される.

$$\boldsymbol{x}_{c} = \begin{bmatrix} x_{c} & y_{c} & z_{c} & \psi_{c} & \theta_{c} & \varphi_{c} \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$$
(1)

$$\boldsymbol{x}_{l(1:n)} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{x}_{l1}^{\mathrm{T}} & \boldsymbol{x}_{l2}^{\mathrm{T}} & \cdots & \boldsymbol{x}_{li}^{\mathrm{T}} & \cdots & \boldsymbol{x}_{ln}^{\mathrm{T}} \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$$
(2)

$$\boldsymbol{x}_{li} = \begin{bmatrix} x_{li} & y_{li} & z_{li} \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$$
(3)

$$\boldsymbol{X} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{x}_{c}^{\mathrm{T}} & \boldsymbol{x}_{l(1:n)}^{\mathrm{T}} \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$$
(4)

$$\boldsymbol{P} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{P}_c & \boldsymbol{P}_{c,l} \\ \boldsymbol{P}_{l,c} & \boldsymbol{P}_l \end{bmatrix}$$
(5)

状態ベクトル X の不確実性を示す共分散行列は P と 置き,式(5)のように示される.拡張カルマンフィル タ推定では,予測と更新の2つのステップを繰り返す ことにより,カメラの位置・姿勢と特徴点の位置の推 定を行う.

#### 3.2 運動モデルと予測ステップ

予測ステップでは、オドメトリ情報に基づいた運動 モデルを定義し、これにより次の時刻の状態ベクトル と共分散行列の予測を行う.時刻t-1の状態ベクトル  $X_{t-1}$ にカメラ移動の制御入力 $u_t$ を適用するとき、時



図 5 計測モデルのイメージ図

刻 t の状態ベクトルの  $\bar{X}_t$  と共分散行列  $\bar{P}_t$  は式 (6) と 式 (7) のように予測される.

$$\bar{\boldsymbol{X}}_t = g(\boldsymbol{u}_t, \boldsymbol{X}_{t-1}) \tag{6}$$

$$\bar{\boldsymbol{P}}_t = \boldsymbol{G}_t \boldsymbol{P}_{t-1} \boldsymbol{G}_t^{\mathrm{T}} + \boldsymbol{R}_t \tag{7}$$

関数gはシステムの運動モデル関数を示す. $R_t$ はプロ セスノイズ, $G_t$ は状態ベクトルに対する運動モデルの ヤコビ行列である.このように予測ステップでは、制 御入力とプロセスノイズを使用し、状態ベクトルや共 分散行列を予測する.この時点では計測情報はまだ反 映されない.

## 3.3 計測モデルと更新ステップ

更新ステップでは、計測情報(本研究では音響カメ ラ画像上の特徴点)を使用し、予測ステップで推定し た状態ベクトル  $\bar{X}_t$ と共分散行列  $\bar{P}_t$ を更新する.この ステップでは、まず、各計測に対して、予測される計 測値が計算される.その予測される計測値は式(8)の ように予測ステップで予測した状態ベクトルによって 推定できる.ここでは、水中物体が持つ特徴点に対し て、音響カメラの計測モデルを立てる必要がある.

$$\hat{\boldsymbol{z}}_t = h(\boldsymbol{X}_t) \tag{8}$$

ここで,図5に示すように,世界座標系 $(X_w, Y_w, Z_w)$ の他に,カメラの位置を原点とし,カメラの姿勢を軸方向とするカメラ座標系 $(X_c, Y_c, Z_c)$ を定義する.状態ベクトル $\bar{X}_t$ に含まれる特徴点の世界座標系 $(X_w, Y_w, Z_w)$ での位置情報 $(x_{li,t}, y_{li,t}, z_{li,t})$ を用いて,カメラ座標系 $(X_c, Y_c, Z_c)$ での特徴点の位置 $(x_{li,t}', y_{li,t}', z_{li,t}')$ は式 (9)のように求められる.

$$\begin{bmatrix} x_{li,t}' \\ y_{li,t}' \\ z_{li,t}' \end{bmatrix} = \mathbf{R}_t \begin{bmatrix} x_{li,t} - x_{c,t} \\ y_{li,t} - y_{c,t} \\ z_{li,t} - z_{c,t} \end{bmatrix}$$
(9)

 $(x_{c,t}, y_{c,t}, z_{c,t})$ はカメラの位置で, $R_t$ は座標変換の回転行列である.

音響カメラの場合,計測できる情報 $\hat{z}_t$ は距離 $\hat{r}$ と方 位角 $\hat{\theta}$ であり,式(10)のように求められる.

$$\hat{z}_{i,t} = \begin{bmatrix} \hat{r}_{i,t} \\ \hat{\theta}_{i,t} \end{bmatrix}$$
$$= \begin{bmatrix} \sqrt{x_{li,t}'^{2} + y_{li,t}'^{2} + z_{li,t}'^{2}} \\ \tan^{-1}(y_{li,t}'/x_{li,t}') \end{bmatrix}$$
(10)

ここで,実際に計測した計測情報  $z_t$ ,式 (8)~式 (10) を用いて予測した  $\hat{z}_t$  に対してカルマンゲイン  $K_t$  が 式 (11) で計算される.そして,カルマンゲイン  $K_t$  を 使用し,状態ベクトル  $X_t$  と共分散行列  $P_t$  を式 (12) と 式 (13) ように更新される.

$$\boldsymbol{K}_{t} = \bar{\boldsymbol{P}}_{t} \boldsymbol{H}_{t}^{\mathrm{T}} (\boldsymbol{H}_{t} \bar{\boldsymbol{P}}_{t} \boldsymbol{H}_{t}^{\mathrm{T}} + \boldsymbol{Q}_{t})^{-1}$$
(11)

$$\boldsymbol{X}_t = \bar{\boldsymbol{X}}_t + \boldsymbol{K}_t (\boldsymbol{z}_t - \hat{\boldsymbol{z}}_t)$$
(12)

$$\boldsymbol{P}_t = (\boldsymbol{I} - \boldsymbol{K}_t \boldsymbol{H}_t) \bar{\boldsymbol{P}}_t \tag{13}$$

ここで、 $Q_t$ は計測値に対するノイズ、 $H_t$ は状態ベクトルに対する計測モデルのヤコビ行列である.以上より各時刻におけるカメラの位置・姿勢と特徴点の位置を推定する.

## 4. シミュレーション実験

#### 4.1 実験条件

本章では提案した手法を用い、調査対象の3次元形 状を復元するシミュレーション実験について述べる.各 視点の音響カメラ画像における複数の特徴点を利用す ることによって,調査対象の3次元計測を行う.シミュ レーション実験ではすべての特徴点を同時に計測およ び識別でき、またそれらの対応関係も既知であると仮 定する.調査対象は図1に示すように複数の特徴点が 抽出できる3角柱を用い、特徴点の数はn = 6,視点 の数は T = 20 にした. 移動制御の誤差は正規分布に 従うと仮定し,移動量に比例するように設定した.本 実験では、調査対象は最初のカメラの位置からおよそ 5m ほど先にあり、カメラが常に物体の方向を向くよう にカメラの軌跡を設定した.設定したカメラの軌跡で は、カメラの位置・姿勢の成分 ( $x_c$ ,  $y_c$ ,  $z_c$ ,  $\psi_c$ ,  $\theta_c$ ,  $\varphi_c$ )の中で,  $x_c$ ,  $y_c$ ,  $z_c$ ,  $\psi_c$  が変動し,  $\theta_c$  と  $\varphi_c$  の値 はつねに0である.ただし、 $\psi_c$ 、 $\theta_c$ 、 $\varphi_c$ はそれぞれカ メラの各 X<sub>c</sub>, Y<sub>c</sub>, Z<sub>c</sub> 軸における回転角を表す.

最初のカメラの位置・姿勢を 3 次元座標系(世界座 標系)の原点とした.特徴点の初期設定は最初に計測 された距離情報 r と方位角情報  $\theta$  を使うった.未知な 仰角情報  $\phi$  の初期値は 0 と設定した.

#### 4.2 実験結果

### 4.2.1 カメラ位置・姿勢の推定結果

提案手法を用い,カメラの位置を推定した結果を図6 に示す.図6に示すように,カメラが動いた軌跡の真値 は青い各点,オドメトリ情報は緑の各点である.ここ で,オドメトリ情報には誤差が入っているため,移動量 が増えるほど誤差が蓄積され,徐々に真値からずれて 行く.本研究で提案した手法でカメラ位置を推定した 結果は赤い各点であり,オドメトリ情報に比べ,より 真値に近い結果が得られた.このことは図7と図8か らも見られる.図7には,推定したカメラ位置の誤差を 示す.オドメトリ情報は誤差が蓄積され,大きくなる傾 向があるが,提案した手法で推定したカメラ位置の誤 差はある範囲内に保たれている.同じように,図8に は推定したカメラ姿勢(ψ<sub>c</sub>の成分)の誤差を示す.図8 にも図7と同様の傾向が見られた.



図 8 カメラ姿勢 (x 軸回りの回転  $\psi_c$  成分)の誤差

#### 4.2.2 特徴点の位置の推定結果

特徴点の3次元座標の推定結果を図9に示す.青い 点と緑の点はそれぞれ各特徴点の真値と設定した初期 値を表しており,赤い点は各特徴点の推定した値を表 している.図9に示すように,初期設定した値が真値 から離れたことに,推定結果はかなり真値に近づいた. 音響カメラの画像の枚数とその推定した誤差の関係を



図10 各特徴点の推定の誤差

図 10 に示す.図 10 から音響カメラの画像の枚数が増 えるにつれて誤差が減少する傾向が見られた.

## 5. 結論

本研究では多視点における音響カメラ画像を用いた 拡張カルマンフィルタに基づく水中物体の特徴点の3 次元情報を取得するモデルを提案した.このモデルに より,シミュレーション環境でカメラ位置・姿勢の推 定及び水中物体の特徴点の3次元計測ができることを 確認した.

今後,実画像を用い,実測実験で検証することが必 要となる.また,特徴量の自動抽出と自動対応付けは 今後の課題である.本研究で取り扱った特徴量は単純 な特徴点である.音響カメラ画像の特徴量の自動抽出 と自動対応付けに対しても音響カメラ画像に適した新 しい特徴量(直線,面など)を考えることが今後の研 究の課題である.

## 謝辞

本研究の一部は,総合科学技術・イノベーション会 議により制度設計された革新的研究開発促進プログラ ム(ImPACT)「タフ・ロボティクス・チャレンジ」の 援助を受けた.

また,本研究は極東建設,東陽テクニカ及び日創建 の支援を受けた.

- [1] E. D. R. Yoerger, A. M. Bradley, B. B. Walden, M. H. Cormier and W. B.F. Ryan, "Fine-Scale Seafloor Survey in Rugged Deep-Ocean Terrainwith an Autonomous Robot," in *Proc. 2000 IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, vol. 2, pp. 1767–1774, 2000.
- [2] S. Williams and I. Mahon, "Simultaneous Localisation and Mapping on the Great Barrier Reef," in *Proc. 2004 IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, vol. 2, pp. 1771–1776, 2004.
- [3] Y. Zhang, R. S. McEwen, J. P. Ryan, J. G. Bellingham and H. Thomas, "A Peak-Capture Algorithm Used on an Autonomous Underwater Vehicle in the 2010 Gulf of Mexico Oil Spill Response Scientific Survey," J. Field Robotics, vol. 28, no. 4, pp. 484-496, 2011.
- [4] A. Shibata, H. Fujii, A. Yamashita and H. Asama, "Scale-Reconstructable Structure from Motion Using Refraction with a Single Camera," in *Proc.* 2015 IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp. 5239-5244, 2015.
- [5] R. Eustice, H. Singh, J. Leonard, M. Walter and R. Ballard, "Visually Navigating the RMS Titanic with SLAM Information Filters," in *Proc. Robotics: Science and Systems*, pp. 57-64, 2005.
- [6] R. Eustice, H. Singh, J. Leonard and M. Walter, "Visually Mapping the RMS Titanic: Conservative Covariance Estimates for SLAM Information Filters," *Int. J. Robotics Research*, vol. 25, no. 12, pp. 1223-1242, 2006.
- [7] E. Belcher, W. Hanot and J. Burch, "Dualfrequency Identification Sonar (DIDSON)," in Proc. 2002 IEEE International Symposium on Underwater Technology, pp. 187–192, 2002.
- [8] "ARIS", 2015, retrieved May 20, 2016, from http://www.soundmetrics.com/Products/ ARIS-Sonars/ARIS-Explorer-3000
- [9] S. Kwak, Y. Ji, A. Yamashita and H. Asama, "3-D Reconstruction of Underwater Objects Using Arbitrary Acoustic Views," in Proc. 11th France-Japan congress on Mechatronics / 9th Europe-Asia congress on Mechatronics / 17th Int. Conf. on Research and Education in Mechatronics, pp. 74-79, 2016.
- [10] Greg Welch and Gary Bishop, "An Introduction to the Kalman Filter," in *Proc. ACM SIGGRAPH*, Course 8, 2001.