

パーティクルフィルタと適応テンプレートマッチングによる 海底生物の追跡

西田 健 相良 慎一 (九州工業大学)

武村 史朗* (沖縄工業高等専門学校)

Tracking of Ocean-Floor Organisms Using a Particle Filter and an Adaptive Template Matching

Takeshi Nishida, Shinichi Sagara, (Kyushu Institute of Technology)

Fumiaki Takemura*, (Okinawa National College of Technology)

Novel probabilistic tracking method for an underwater vision system installed into an underwater robot to manipulate ocean-floor organisms is introduced. The method is constructed with adaptive template matching and optical flow methods combined with a particle filter framework. We applied the proposed method to real video images, and examined its effectiveness.

キーワード : 水中ロボット, 対象追跡, 画像処理, 海底生物, パーティクルフィルタ, 適応テンプレートマッチング
(Keywords, underwater robot, target tracking, image processing, ocean-floor organisms, particle filter, adaptive template matching)

1. はじめに

近年, 海洋生態系のバランスを保つために重要であるサンゴ群集の保全に関する研究が多方面で進められており⁽¹⁾, その一環として, ヒトによる作業が困難な水深において長時間に渡るオニヒトデの駆除作業の代行作業を行うことを目指したUVMS (underwater vehicle-manipulator system) の開発が行われている (Fig.1)^{(2)~(4)}. このUVMSは2自由度のアーム型マニピュレータを持ち, 海中で6自由度の姿勢変化が可能である。また, オペレータによる遠隔操縦系と自動制御系の並列的な駆動を実現するためのマスタースレーブ機構を有し, 水中ビジョンシステムによって検知および計測された対象に接近して種々の操作が実行できる。

水中ビジョンシステムによって得られる情報をUVMSの位置姿勢制御系や対象物体把持系の駆動に利用するためには, 対象検出機能, 対象追跡機能, および対象の相対位置計測機能が重要である。またこれらの機能は, UVMSが対象物に接近する間, もしくはアーム型マニピュレータにより対象を操作する間の揺れや波などの影響にロバストでなければならない。先行研究⁽³⁾⁽⁴⁾では, 3点のLED光源を計測対象として利用する基礎的な実験条件の下で, 各種機能の構築と検証が行われている。しかし, 対象の特徴量の抽出や撮影画像の揺れなどの計測外乱を考慮したロバストなトラッキングおよび距離計測の機能構築は成されていない。

一方, 対象の色相値に基づく追跡と形状推定をロバストに行うCAMSHIFT (continuously adaptive mean shift) アルゴリズム⁽⁵⁾を, 確率的手法であるパーティクルフィルタ (PF: particle filter)⁽⁶⁾と組み合わせることによって, 複数の仮説を同時に駆動するCAMSGPF (CAMSHIFT guided particle filter) が提案され⁽⁷⁾, 環境変動に対するロバストな

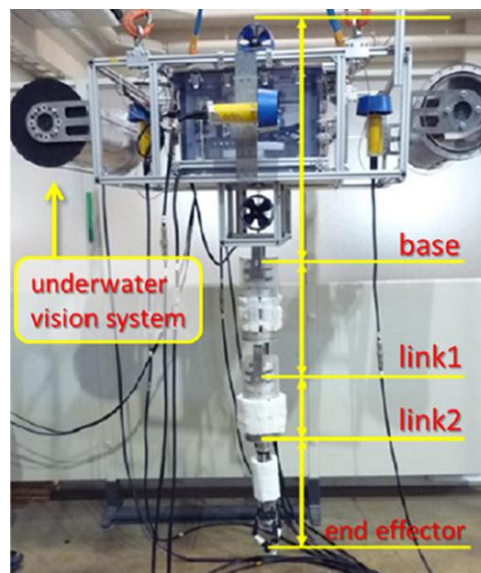


図 1 UVMS の外観

Fig. 1. Overview of the UVMS.

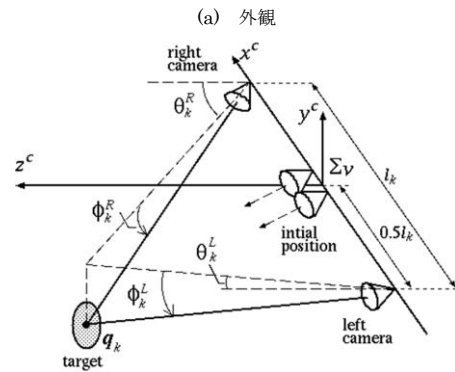
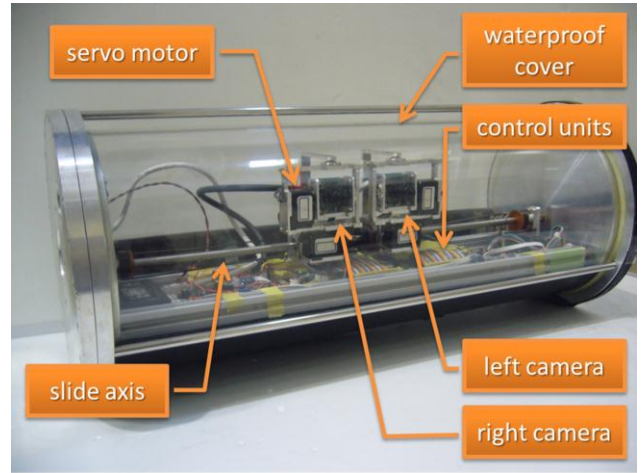
対象追跡性能と高い計算効率を有することが示されている。我々は最近、適応テンプレートマッチングによる対象検出機能とシーンのオプティカルフローの平均を用いるカメラ移動の補償機能をCAMSGPFに統合する手法を提案した。本稿ではこの提案手法を概説し、構築したシステムの性能と有効性を検証する。

2. 水中ビジョンシステム

〈2・1〉水中ビジョンシステムの構成 提案手法の搭載を想定する水中ビジョンシステムの概観をFig.2(a)に示す。2台のCCDカメラが搭載されており、それぞれのレンズ中心とパン・チルトの回転中心が一致するようにサーボモータが取り付けられている。カメラ信号はNTSCであり、 $640 \times 480[\text{pixel}]$ の画像を $30[\text{fps}]$ で撮影できる。さらに、これらの左右カメラはスライド軸に沿って、それぞれ中央から左右方向に等距離の移動が可能であり、左右カメラ間距離は $68[\text{mm}]$ から $380[\text{mm}]$ の範囲で変更が可能である。このシステムは、外部の海水と完全に遮断する防水壁として幅 $595[\text{mm}]$ 、直径 $300[\text{mm}]$ の円筒の亚克力材を利用しており、内部には空気が封入される。

〈2・2〉距離計測 水中ビジョンシステムの座標系と対象の関係をFig.2(b)に示す。ただし図中の Σ_v はスライド軸中心を原点とする水中ビジョンシステム座標系、 $q_k \triangleq (q_{xk}, q_{yk}, q_{zk})^T \in \Sigma_v$ は時刻 k における計測対象の中心位置、 l_k は左右カメラ間距離、 θ_k^L および θ_k^R は左右カメラのパン角、 ϕ_k^L および ϕ_k^R は左右カメラのチルト角を表す。この水中ビジョンシステムをUVMSに搭載し、ステレオ視による距離計測を行うためには、左右カメラ画像からの特徴量の抽出やそれらの追跡、左右カメラ間での特徴量の正しい対応付けが必要である。また、UVMSの移動や操作のために十分な精度の距離計測を海中で行うためには、外乱にロバストな計測手法を構築する必要がある。ステレオ視のための従来手法には、並行ステレオやエピポーラ幾何に基づく手法などがあるが、これらは環境光の変動に脆弱であるため、海中で利用する本システムへの適用は困難である。さらに、水中ビジョンシステムを覆う防水壁で屈折現象により撮像が歪むため、画像全体に対する特徴追跡や対応点探索を行う手法では、高精度のカメラ校正や複雑な非線形画像変換が必要となり、その処理がUVMSの各種制御系のオンライン駆動のオーバーヘッドになる。そこで、距離計測のための画像処理のエピポーラ幾何の計算と特徴点の対応付けをメカニクスによって解決する手法⁽³⁾を利用する。すなわち本システムでは、以上の問題を解決するために、次の手順によって対象までの距離を計測する。

- (1-1) 左右カメラをスライド軸の中心で近接させ、パン・チルト角度を一致させることによって、ほぼ同一領域の撮影を行う。
- (1-2) オペレータによって右カメラ画像上で追跡領域が指定される。
- (1-3) 左カメラ画像に同一の初期追跡領域を設定する。



(b) 水中ビジョンシステムの座標系と対象の関係

図2 水中ビジョンシステム

Fig. 2. Underwater vision system.

- (1-4) 指定領域を画像中央に追跡するようにパン・チルト角を制御しながら左右カメラを同時にスライドさせてカメラ間距離を広げる。ただし、対象の追跡および計測において、チルト角は常に $\phi_k^L = \phi_k^R$ となるように制御する。

以上の手順によって、左右カメラ画像における特徴量の抽出と対応付けは手順(1-2)と(1-3)によって初期に一度のみ実行され、その後は手順(2-4)による追跡結果を利用することで対象までの距離の算出が可能である。時刻 k における対象の相対位置は、左右カメラのパン・チルト角を用いて、

$$q_{xk} = \left(\frac{1}{2} - \frac{\sin \theta_k^R \cos \theta_k^L}{\sin(\theta_k^R - \theta_k^L)} \right) l_k \dots \dots \dots (1)$$

$$q_{yk} = \frac{\cos \theta_k^R \cos \theta_k^L}{\sin(\theta_k^R - \theta_k^L)} l_k \cos \phi_k^R \dots \dots \dots (2)$$

$$q_{zk} = \frac{\cos \theta_k^R \cos \theta_k^L}{\sin(\theta_k^R - \theta_k^L)} l_k \sin \phi_k^R \dots \dots \dots (3)$$

と求まる。さらに、本システムではカメラ間距離を増加すると、パン・チルト角に発生する計測ノイズを相対的に小さくすることができる⁽³⁾。ただし、精度の高い計測には防水壁における屈折現象の補正が必要である⁽³⁾。

3. 海底の追跡

- 〈3・1〉オニヒトデの特徴 オニヒトデの移動速度は平均

5[m/day]から10[m/day]程度であり、UVMSの動作速度と比較すると大変遅い⁽⁸⁾。オニヒトデの自動検出技術に関する先行研究において、以下のような報告がある：色相値のみに基づいて画像からオニヒトデを検出する手法⁽⁹⁾では、個体による色のばらつきや海水の濁りが原因となり、精度の高い対象の検出が困難である；事前に設定したオニヒトデの色相値とテンプレート画像を併用する手法⁽¹⁰⁾により78%の認識率が達成された。そこで本研究では、これらの先行研究よりもさらにロバストな対象の追跡を実現するために、適応テンプレートマッチング法による対象の検出、CAMSHIFTアルゴリズムによる対象の色相値に基づく追跡と形状推定、およびオブティカルフローによるカメラ移動の補償法をPFの枠組みで統合する手法を構築する。

〈3・2〉 状態量の定義 ビジョンシステムの左右カメラで離散時刻 k において撮影される映像を、それぞれ左画像 I_k^L および右画像 I_k^R と表し、画素 (x, y) における画素値を I_k^L と表す。ただし、画像の左下端を原点として x は横方向、 y は縦方向の画像座標を表す。また、動画像中の追跡対象の状態量を次のようにおく。

$$\mathbf{x}_k^* \triangleq (x_k^* \ y_k^* \ w_k^* \ h_k^*) \dots \dots \dots (4)$$

これは、幅 w_k^* および高さ h_k^* 、中心画素が $(x_k^* \ y_k^*)$ の矩形領域を表す。また、 $x_k^* \in W \triangleq \{1, 2, \dots, W_n\}$ 、 $y_k^* \in H \triangleq \{1, 2, \dots, H_n\}$ であり、 $W_n = 640$ と $H_n = 480$ は画像の横方向および縦方向の画素数を表す。 $*$ は左右カメラを意味する L もしくは R を表す。さらに、位置と大きさを表す部分的な状態量を次のように定義する。

$$\mathbf{p}_k^* \triangleq (x_k^* \ y_k^*) \dots \dots \dots (5)$$

$$\mathbf{s}_k^* \triangleq (w_k^* \ h_k^*) \dots \dots \dots (6)$$

〈3・3〉 適応テンプレートマッチング まず、追跡する画像領域がオペレータによって設定される。この時、設定された画像領域を初期テンプレート画像 T_0^* とし、その状態量を

$$\mathbf{x}_0^* = (x_0^* \ y_0^* \ w_0^* \ h_0^*)^T = (\mathbf{p}_0^* \ \mathbf{s}_0^*)^T \dots \dots \dots (7)$$

と表す。次に、各時刻 k において以下のような適応的テンプレートマッチング法を適用し、対象の存在領域を検出する。正規化相関係数を用いるテンプレートマッチング手法⁽¹⁸⁾によってテンプレート画像 T_k^* と入力画像 I_k^* の画素 (x, y) における正規化相関係数 $N_k^*(x, y) \in [-1, 1]$ を次のように計算する。

$$N_k^*(x, y) = \frac{R_k^*(x, y)}{Z_k^*(x, y)} \dots \dots \dots (8)$$

ここで、

$$R_k^*(x, y) = \sum_{x', y'} [T_k^*(x', y') \cdot I_k^*(x', y')]$$

$$Z_k^*(x, y) = \sqrt{\sum_{x', y'} T_k^*(x', y')^2 \sum_{x', y'} I_k^*(x', y')^2}$$

および、

$$T_k^*(x', y') = T_k^*(x', y') - \frac{\sum_{x'', y''} T_k^*(x'', y'')}{W_n H_n}$$

$$I_k^*(x', y') = I_k^*(x', y') - \frac{\sum_{x'', y''} I_k^*(x'', y'')}{W_n H_n}$$

$$x', x'' \in X = \left\{ x \left| x_0^* - \frac{w_0^* - 1}{2} \leq x \leq x_0^* + \frac{w_0^* - 1}{2} \right. \right\} \subset \mathbb{N}_+$$

$$y', y'' \in Y = \left\{ y \left| y_0^* - \frac{h_0^* - 1}{2} \leq y \leq y_0^* + \frac{h_0^* - 1}{2} \right. \right\} \subset \mathbb{N}_+$$

である。さらに、最大の $N_k^*(x, y)$ を有する画素を \mathbf{p}_k^* と表す。以降に示す追跡処理では $\hat{\mathbf{p}}_k^*$ を利用することによって、時刻 k における対象の状態量の確率分布を推定し、さらに最大事後確率 (MAP: maximum a posteriori) を算出することで時刻 k における画像上の対象の位置や見えを特定する。本研究ではUVMS やカメラの移動に伴う対象の見えの変化に対応するために、後述の追跡処理の結果として獲得される $\mathbf{p}_k^{\text{MAP}*}$ を利用して、次時刻に用いるためのテンプレート画像 T_{k+1}^* の状態量を次のように更新する。

$$\mathbf{x}_{k+1}^* := (\mathbf{p}_k^{\text{MAP}*} \ \mathbf{s}_0^*)^T \dots \dots \dots (9)$$

ここで“=”は代入を意味する。また、画像中に追跡生物と類似した複数の生物が存在する場合には、追跡領域と似通った色相値を持つ領域が複数発生するということを考慮し、探索窓の大きさが広がりすぎないように、これらの値を初期値から不変、すなわち \mathbf{s}_0^* とする。以上に示したテンプレートマッチング手法は、追跡手法の実行結果に依存してテンプレート画像の更新を行うので、環境変化や水中ビジョンシステムの移動による対象の見えの変化に対して適応的である。

〈3・4〉 パーティクルフィルタによる追跡

(1) **追跡処理の流れ** 2章に示した水中ビジョンシステムによる対象の追跡は次の流れで行う：

- (2-1) 追跡する矩形領域 $\mathbf{x}_0^R \in I_0^R$ を設定する。
 - (2-2) 左画像に $\mathbf{x}_0^L = \mathbf{x}_0^R \in I_0^L$ を設定する。
 - (2-3) 左右カメラ画像に対して並行してCAMSGPFによる追跡処理を開始する。
 - (2-4) $\mathbf{p}_k^{\text{MAP}*}$ が画像中央に位置するようにカメラのパン・チルト角を制御しながらカメラ間距離 l_k を広げる。
 - (2-5) $l_k = l_{\text{set}}$ でカメラ移動を停止し対象の位置を計測する。ここで、CAMSGPFはPFのサンプリングにCAMSHIFTを利用するアルゴリズムである。詳細を以下に述べる。
- (2) **追跡アルゴリズム** 追跡対象はマルコフ性を有する離散時間システムで表されるとし、その時間遷移を次のシステムモデルで表す。

$$\mathbf{x}_k \sim f(\mathbf{x}_k | \mathbf{x}_{k-1}) \dots \dots \dots (10)$$

また、観測 \mathbf{y}_k は次の観測モデルによって得られるとする。

$$\mathbf{y}_k \sim h(\mathbf{y}_k | \mathbf{x}_k) \dots \dots \dots (11)$$

これらのモデルに従い、状態 \mathbf{x}_k を M 個の重み付けされた粒子の集合 $\left\{ (\mathbf{x}_k^{(m)}, \pi_k^{(m)}) \right\}_{m=1}^M$ を用いて表現する。ここで、 $\mathbf{x}_k^{(m)} \in \mathbb{R}^4$ は状態空間中の仮説を表す粒子の位置、 $\pi_k^{(m)} \geq 0$ は粒子の重みであり、 $\mathbf{y}_k^{(m)} \in \mathbb{R}^2$ は追跡対象の画像上の位置を表す。また簡単のため、ここでは左右カメラの区別をしない。提案手法では、粒子を各時刻において以下の3ステッ

ブで更新する。

Step 0: 追跡対象の初期テンプレート \mathbf{T}_0 と状態量 \mathbf{x}_0 , およびその領域のHSV表色系における色相値のヒストグラム $\mathbf{H}_0 \triangleq \mathbf{H}(\mathbf{T}_0)$ を与える。 $k = 1$ として**Step 1**へ移る。

Step 1: (サンプリング) 前時刻の粒子と現時刻の観測ベクトルを提案分布 $q(\cdot)$ の条件部分に適用して得られる確率分布に従い現時刻の粒子を生成する。ここで提案分布とは、前時刻の状態が所与の下で現時刻の観測データを参照して現時刻の状態を予測するために設計された確率分布である。追跡対象のオニヒトデは海底に存在し、その移動速度は画像処理の周期よりも極めて遅いため無視できる。したがって、移動や海流などの外力によるUVMSの姿勢変化に対応するために、粒子を次のように分布させる。

$$\hat{\mathbf{x}}_k^{(m)} = \mathbf{x}_{k-1}^{(m)} + \bar{\mathbf{o}}_{k:k-1} + \mathcal{N}(\mathbf{0}, \Sigma_D) \dots \dots \dots (12)$$

ここで $\mathcal{N}(\mathbf{0}, \Sigma_D)$ は、中心が $\mathbf{0}$ で分散が $\Sigma_D \triangleq \text{diag}(\sigma_D^2, \sigma_D^2)$ のガウス分布を表す。また、 $\bar{\mathbf{o}}_{k:k-1}$ は時刻 k と $k-1$ の画像の特徴点の対応付けによって算出されるオプティカルフローの平均ベクトルを表す。画像全体のオプティカルフローの平均を粒子の分布に利用することで、カメラの姿勢変動による画像の平行移動成分を補償する。オプティカルフローは、共分散行列の固有値が大きな画素をGFT (good features to track) ⁽¹¹⁾として200点抽出し、それらをピラミッド型Lucas-Kanade法⁽¹²⁾により対応付けすることで算出した。さらに、各仮説に対して、現時刻に得られた観測を用いてCAMSHIFT アルゴリズムを適用し最適化を行う。

$$\hat{\mathbf{x}}_k^{(m)} = \text{CamShift}(\hat{\mathbf{x}}_k^{(m)}, \mathbf{B}_k) \dots \dots \dots (13)$$

ここで、 $\text{CamShift}(\cdot)$ はCAMSHIFT アルゴリズムの適用結果を返す関数であり、 \mathbf{B}_k は時刻 k の画像フレーム \mathbf{I}_k をHSV変換することによって得られる色相画像 $\mathbf{I}_k^{\text{hue}}$ に対して、参照ヒストグラム \mathbf{H}_0 を用いるヒストグラム逆投影法⁽¹³⁾を適用した逆投影画像⁽¹⁴⁾

$$\mathbf{B}_k = \text{BackProject}(\mathbf{H}_0, \mathbf{I}_k^{\text{hue}}) \in \mathbb{R}^{H_n \times W_n} \dots (14)$$

である。 \mathbf{B}_k の各画素は参照ヒストグラム \mathbf{H}_0 との一致の度合いを表す確率値である⁽¹⁴⁾。

Step 2: (ゆう度評価) $f(\cdot)$, $h(\cdot)$ および $q(\cdot)$ に従って粒子 $\hat{\mathbf{x}}_k^{(m)}$ の重み $\pi_k^{(m)}$ を次のように更新する。

$$\tilde{\pi}_k^{(m)} \propto \pi_{k-1}^{(m)} h(\mathbf{y}_k | \hat{\mathbf{x}}_k^{(m)}), (\forall m) \dots \dots \dots (15)$$

ゆう度関数 $h(\mathbf{y}_k | \hat{\mathbf{x}}_k^{(m)})$ は、テンプレートマッチングにより検出された対象の位置 $\hat{\mathbf{p}}_k$ との距離を用いて次のように定める。

$$h(\mathbf{y}_k | \hat{\mathbf{x}}_k^{(m)}) = \exp\left(-\left\|\hat{\mathbf{p}}_k - \hat{\mathbf{p}}_k^{(m)}\right\|/\sigma_o^2\right). (16)$$

ここで、 σ_o は計測モデルの分散を表し、本研究では

経験的に $\sigma_o = 10$ と定めた。

Step 3: (リサンプリング) $\tilde{\pi}_k^{(m)}$ の確率で $\hat{\mathbf{x}}_k^{(m)}$ を復元抽出する。

$$\mathbf{x}_k^{(m)} \sim \begin{cases} \hat{\mathbf{x}}_k^{(1)} & \text{with prob. } \tilde{\pi}_k^{(1)} \\ \vdots & \vdots \\ \hat{\mathbf{x}}_k^{(M)} & \text{with prob. } \tilde{\pi}_k^{(M)} \end{cases}, (\forall m) \dots (17)$$

その後、重みを均等化する。

$$\pi_k^{(m)} := 1/M, (\forall m) \dots \dots \dots (18)$$

以上の処理によって新しい時刻の粒子の集合

$$\{(\mathbf{x}_k^{(m)}, \pi_k^{(m)})\}_{m=1}^M \sim p(\mathbf{x}_k | \mathbf{y}_{1:k})$$

が獲得される。また、CAMSGPFの時刻 k における推定には最大の重みを有する粒子を用いる。

$$\mathbf{x}_k^{\text{MAP}} = (\mathbf{p}_k^{\text{MAP}} \mathbf{s}_0)^T := \mathbf{x}_k^{(\alpha)} \dots \dots \dots (19)$$

$$\alpha = \arg \max_m \pi_k^{(m)} \dots \dots \dots (20)$$

式(9)によってテンプレートを更新し、 $k := k + 1$ として**Step 1**に戻る。

以上に示した提案手法は、以下の点でCAMSGPFと異なる：1) 画像全体のオプティカルフローの平均ベクトルをサンプリングに利用する；2) ゆう度評価に適応パターンマッチングの結果を用いる；3) PFの推定結果を利用してテンプレートパターンを更新する。これらの特徴によって、カメラ画像の振動の補償と、複数の特徴量を融合して用いる対象追跡が可能となる。

〈3・5〉提案手法の特徴

提案手法による対象の追跡には次のような特徴がある：1) UVMSの姿勢変動やカメラの移動による画像の揺れをオプティカルフローに基づくサンプリングによって補償できる；2) CAMSHIFTアルゴリズムによって対象の姿勢や大きさの変化に適応可能である；3) PFによる確率的な対象追跡により、複数の仮説領域を並列かつ時系列を考慮して探索するため、推定結果はノイズや環境変化にロバストである；4) 適応テンプレートマッチングを用いるので、棘で全身が覆われているオニヒトデのように特徴的な外観を有する対象の追跡に有効である；5) CAMSGPFはCAMSHIFTとPFを連動することで、PFの粒子数(すなわち計算量)を大幅に低減することができる。

4. 実験

〈4・1〉追跡機能の評価実験

(1) **実験条件** 海中のサンゴ群集上のオニヒトデを撮影した約8秒間で250フレーム、30[fps]の動画像を用いて、対象大きさの変化に対するロバスト性と、類似する対象が複数存在する場合の追跡のロバスト性を評価する。この動画像に提案手法を適用するための各種設定パラメータは以下のように与えた：追跡対象の初期の状態量を $\mathbf{x}_0 = (100, 100, 50, 50)^T$ とした；CAMSGPFの粒子数を経験的に、システムモデルの分散を経験的に $\sigma_D = 5[\text{pixel}]$ とし、画像フレーム数と提案手法の適用周期 k を一致させた。粒子数 M が少ない場合には、粒子の多様性の欠如によって追跡結果

に微小な振動を生じることがある。一方で、より多くの粒子数を利用すると、粒子の多様性が増加し追跡のロバスト性が向上する反面、計算量が増加する。分散 σ_D の値が小さい場合には、粒子の多様性を欠き、ノイズに対するロバスト性が低下する。一方で、大きすぎる値では、ロバスト性が向上するが、幅広い粒子の多様性を記憶するために、より多くの計算容量が必要となる。

次に、海中では海水の濁りによって、カメラからの距離が遠い場所の輝度値は急激に低下するため、本研究ではカメラから近距離にある環境に注目して対象の追跡を行うことを目的として次の前処理を施した。すなわち、入力画像にHSV変換を適用した後に、輝度画像において220以上255以下の輝度値を持つ画像領域の画素値を1、それ以外を0とするマスク画像を生成し、これを用いるフィルタリング処理によって輝度値の高い画像領域のみを対象とした色相画像を生成してCAMSGPFの一連の処理に利用した。使用した計算機のCPUはインテル Core2Duo プロセッサ 2.66[GHz]である。

(2) **実験結果** 提案手法を適用して対象とするオニヒトデを追跡した結果をFig.3に示す。図中の楕円はゆう度評価を行った後の粒子の状態量を表している。また、矩形は適応テンプレートマッチングによって抽出された領域を表しており、それらを統合して判定された対象の中心位置をターゲットマークで表している。本手法により、時刻 $k = 0$ から $k = 80$ においては比較的安定して対象の追跡が達成された。 $k = 80$ 以降の画像フレームにおいて追跡対象以外のオニヒトデが出現した際に、粒子の一部がそちらに移動した(同図(d)参照)が、追跡結果が追跡対象のオニヒトデの存在領域から外れることは無かった。これは、適応テンプレートマッチングによって同じ対象が検出され続けたことによる。

〈4.2〉 **他手法との性能比較** 次に、1) 提案手法、2) CAMSGPFのみ、3) 適応パターンマッチングのみ、という3種類の手法による対象の追跡実験を行い、それらの性能比較を行った。実験結果として得られた追跡対象の画素位置の時間推移をFig. 4に示す。まず、CAMSGPFのみによる追跡では $k = 200$ 以降に対象の追跡が失敗し、追跡結果が振動していることが実験結果よりわかる。これは、複数のオニヒトデの存在によって、類似した色相値を持つ画像領域が広範囲に発生したことが原因となり、粒子が振動的に移動および分布したことで生じた結果である。次に適応パターンマッチングのみによる対象の追跡では、 $k = 70$ 以降に対象の追跡が失敗する状況が頻発した。これは画像全体に、テンプレートパターンと類似した領域が広く存在していたためである。提案手法では、テンプレートパターンによる対象の位置の検出と色相値の分布に基づく推定を相補的に統合して追跡するため、追跡対象を見失うことなく追跡できたことがわかる。

〈4.3〉 **粒子数、処理速度および認識率の関係** 提案手法における粒子数、処理速度および認識率の関係を検証す



(a) $k = 0$



(b) $k = 50$



(c) $k = 100$



(d) $k = 238$

図3 提案手法を対象物の追跡に適用した例
Fig. 3. Examples of applying the proposed method to tracking of a target object.

るために、粒子数を1から20まで変化させた場合の1フレームあたりの平均処理速度と全フレームを通じて対象が正し

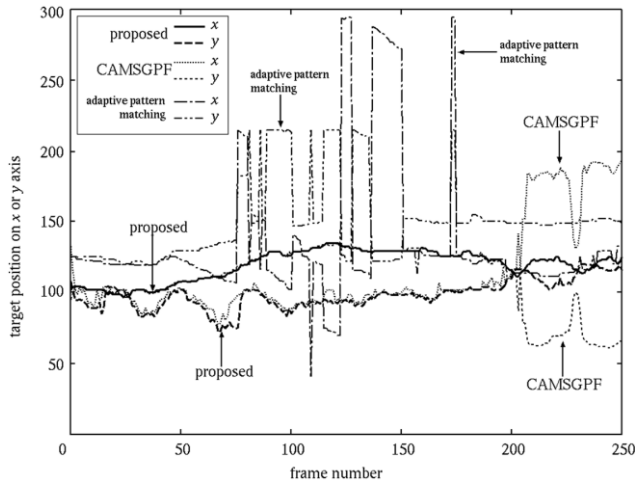


図 4 追跡点の時間推移

Fig. 4. Time evolution of tracked target points.

く追跡された割合を調べた。実験結果をFig.5に示す。この結果より、粒子数を増加させることで認識率を向上できる傾向があることが分かる。また処理速度についても、粒子数が1から20のすべての場合において、リアルタイム処理の実現に必要な1フレームあたり0.033[sec]以内の処理を、〈4・1・1〉項に示した性能の汎用計算機によって実現できたことが分かる。

5. おわりに

本論文では、海中において対象生物ロボストに追跡する手法を提案した。本手法は、UVMS に搭載する水中ビジョンシステムに組み込むことを想定している。本提案手法は、CAMSHIFTアルゴリズムと適応パターンマッチング手法をPFの枠組みで統合して用いる対象追跡手法である。また、カメラの移動による対象の見え方の変動や画像の揺れを補償するために、PFのサンプリング手順に画像全体のオブティカルフローを利用する。本手法は複数の特徴量に基づいて対象の追跡を行うため、単一の特徴量の計測に従う追跡手法よりもロボストである。さらに、動画像を用いた実験により、本提案手法を用いることによってオニヒトデのロボストな追跡が達成できることを示した。

文 献

(1) 岩瀬文人:「オニヒトデ駆除マニュアル」, 黒潮生物研究財団 (2011)
 (2) S. Sagara, T.Yatoh, H.Ikeuchi, N.Sakagami and F.Takemura : "Basic Experiment of Position and Orientation Measurement System for Catching Acanthaster Planci", Proc. Of SI2005, pp.657-658 (2005)(in Japanese)
 相良・矢藤・池内・坂上・武村:「2台の稼働カメラを用いたオニヒトデ捕獲 UVMS 用位置・姿勢計測システムの水基礎実験」, 第6回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会論文集雑誌名, pp. 657-658 (2005)
 (3) S.Sagara, H.Ikeuchi, N.Sakagami, and F.Takemura: "Development of a Capturing Object Position and Attitude Measurement System for UVMS", Proc. of the 2005 JSME Conf. on Robotics and Mechatronics, 2P1-S-009, (2005) (in Japanese)
 相良・池内・坂上・武村:「UVMS 用捕獲物位置・姿勢計測システ

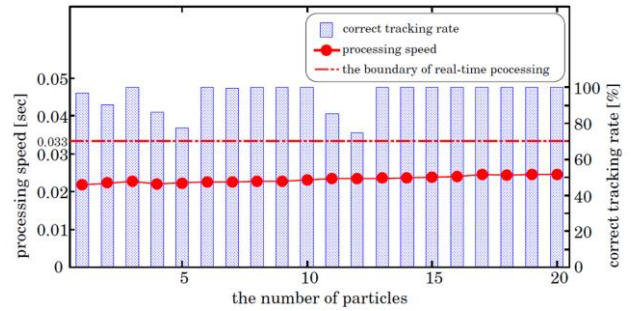


図 5 粒子数に対する処理速度, および粒子数に対する正しい追跡率

Fig. 5. The relations of the number of particles vs. the processing speed and the number of particles vs. the

ムの開発」, 日本機械学会 ROBOMEC'05 講演論文集, 2P1-S-009 (2005)

(4) S.Sagara, T.Yatoh, H.Sakai, and S.Yoshitake: "An experiment of an objective position and attitude measurement system enclosed in cylindrical case for UVMS", Proc. of the 2008 JSME Conf. on Robotics and Mechatronics, 2A1-A09 (2008) (in Japanese)
 相良・矢藤・酒井・武村:「円筒型防水容器を用いた UVMS 用物体位置・姿勢計測システムの水基礎実験」, 日本機械学会 ROBOMEC'10 講演論文集, 2A1-A09 (2008)
 (5) G.R.Bradschi: "Computer Vision Face Tracking For Use in a Perceptual User Interface", Intel Technology Journal, No. Q2. (1998)
 (6) 生駒哲一:「逐次モンテカルロ法とパーティクルフィルタ」, 21世紀統計科学III, 第11章, 国友直人等 (監修), 東京大学出版会 (2008)
 (7) Z.Wang, X.Yang, Y.Xu, and S.Yu: "CamShift guided particle filter", Pattern Recognition Letters, No.30, pp.407-413 (2009)
 (8) 本川達雄:「サンゴとサンゴ礁のはなし」, 中公新書, pp. 236-237 (2008)
 (9) S.Tomita, F.Takemura, N.Sakagami, and S.Sagara : "A study of image processing technique for recognizing Acanthaster planci", Proc. of the 2005 JSME Conf. on Robotics and Mechatronics, 2P1-S-012, (2005) (in Japanese)
 坂上・富田・武村・相良:「オニヒトデ認識のための画像処理技術の検討」, 日本機械学会 ROBOMEC'05 講演論文集, 2P1-S-012 (2005)
 (10) S.Tomita, F.Takemura, N.Sakagami, and S.Sagara : "A study of image processing technique for recognizing Acanthaster planci", Proc. of the 2006 JSME Conf. on Robotics and Mechatronics, 1P1-E35 (2006) (in Japanese)
 坂上・富田・武村・相良:「オニヒトデ認識のための動画像処理技術の検討」, 日本機械学会 ROBOMEC'06 講演論文集, 1P1-E35 (2006)
 (11) J.Shi and C.Tomashi: "Good features to track", 9th IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition (1994)
 (12) J.Y.Bouguet: "Pyramidal Implementation of the Lucas Kanade Feature Tracker", Technical Report, Intel Corporation, Microprocessor Research Labs, OpenCV documentation (2000)
 (13) M.J.Swain and D.H.Ballard: "Color Indexing", Int. J. Computer Vision, Vol.7, No.1, pp. 11-32 (1991)
 (14) G.Bradschi, A.Kaehler: Learning OpenCV, O'Reilly Media (2008)