

# パーティクルフィルタによる海底生物の追跡

正員 西田 健\* 非会員 相良 慎一\* 正員 武村 史朗\*\*

## Tracking of Ocean-Floor Organisms Using a Particle Filter

Takeshi Nishida\*, Member, Shinichi Sagara\*, Non-member, Fumiaki Takemura\*\*, Member

(2012年3月1日受付, 2012年6月11日再受付)

This paper describes the development of a visual tracking method of an underwater vision system installed into a UVMS (underwater vehicle-manipulator system) to manipulate ocean-floor organisms such as acanthaster. First, an execution procedure of UVMS for approaching the target is shown. Next, a novel and robust target tracking method by using particle filter framework in order to achieve the procedure is proposed. We applied the proposed method to real video images, and examined its effectiveness by comparing it with other methods. The results of some experiments that evaluate the performance of the developed method are given.

キーワード: 水中ロボット, 水中ビジョンシステム, 対象追跡, パーティクルフィルタ

**Keywords:** underwater vehicle-manipulator system, underwater vision system, target tracking, particle filter

### 1. はじめに

近年, 海中の生物資源の活用や保全のための自動化技術に関する研究が多方面で進められており, 特に, 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は枚挙に暇がない。その中でも注目を集めているのは, 沖縄の沿岸を中心としてサンゴに白点病などの被害をもたらすオニヒトデ等の有害生物の大量発生である。現在はサンゴ群集の保全のために, それらの有害生物の駆除が大勢のダイバにより行われている<sup>(1)</sup>。中でもオニヒトデには有毒の棘があり, 直接手で触れることができないため専用のカギ棒を利用して駆除作業が行われるが, その作業は複雑であり, 常に刺傷傷害の危険が伴う。また, 水深30[m]以下での作業や長時間の潜水ではダイバが減圧障害を罹患するリスクが発生する。そこで近年, 人的な危険性を排除するため, UVMS (underwater vehicle-manipulator system) によるオニヒトデの駆除作業の代行が模索されている<sup>(2)-(4)</sup>。

先行研究<sup>(2)-(4)</sup>では, ヒトによる作業が困難な水深におい

て長時間に渡る作業を行うことを目指し, Fig. 1 に示すような UVMS の開発が行われている。この UVMS は水中で6自由度の姿勢変化が可能であり, 2自由度のアーム型のマニピュレータを有する。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<sup>(5)</sup>, 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マニピュレータによって種々の操作を行うことができる。例えばオニヒトデの駆除が目的である場合には, 注射針による酢酸の注入による駆除作業<sup>(1)</sup>をマニピュレータにより行う。

水中ビジョンシステムによって得られる情報を, UVMS

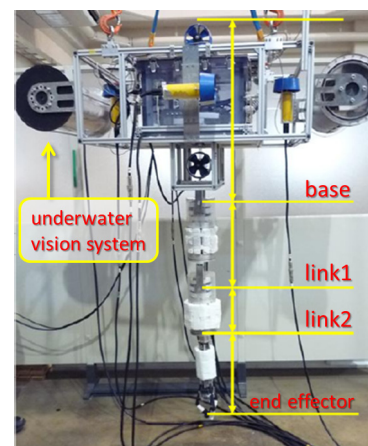


Fig. 1. Overview of the UVMS.

\* 九州工業大学  
〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町 1-1  
Kyushu Institute of Technology  
1-1, Sensui, Tobata, Kitakyushu 804-8550, Japan  
\*\* 沖縄工業高等専門学校  
〒905-2192 名護市辺野古 905  
Okinawa National College of Technology  
905, Henoko, Nago 905-2192, Japan

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、対象を検出する機能 (検出機能)、検出された対象を追跡する機能 (トラッキング機能)、および対象の相対位置や姿勢などを計測する機能 (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<sup>(2)(3)</sup>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に基づいて、各種機能の構築と検証が行われている<sup>(4)~(6)</sup>。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<sup>(7)</sup>を、確率的手法であるパーティクルフィルタ (PF: particle filter)<sup>(8)</sup>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、環境変動に対するロバストな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<sup>(9)</sup>。そこで本論文では、海底面やサンゴ群集に生息するオニヒトデの特徴、すなわち特徴的な概観を有することやUVMSよりも十分に動きが遅いことを考慮し、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、さらにCAMSGPFに統合する手法を提案する。すなわち、UVMSに搭載される水中ビジョンシステムに組み込み海中のオニヒトデのロバストな検出とトラッキングを実現する画像処理手法を提案する。さらに、構築したシステムの性能と有効性を検証する。

本論文の構成は以下の通りである。まず、2章においてUVMSと水中ビジョンシステムの構成を示す。3章において、海底の対象生物の追跡を行うための提案手法を示す。4章には提案手法の性能を検証するための実験結果を示す。最後に5節で本論文の結論を述べる。

## 2. 水中ビジョンシステム

### 〈2・1〉 水中ビジョンシステムを用いる UVMS の動作

UVMSによる対象への接近と操作は、水中ビジョンシステムの計測に基づいて次の手順に従って実行される。

- (1-1) UVMSが水中を移動し、水中ビジョンシステムによって海底やサンゴ群集を撮影する。
- (1-2) 水中ビジョンシステムの撮影画像内における対象生物を検知する。
- (1-3) 対象を操作できる位置までUVMSが移動し、対象との相対位置を一定に保つ。
- (1-4) マニピュレータによって対象の操作を行う。

まず手順(1-1)において、海底を広範囲に撮影して対象を探索するために、広範なカメラの撮影可能域が必要である。広角レンズを搭載するカメラの利用が考えられるが、屈折現象の考慮が必要な水中カメラシステムではカメラ校

正や歪曲修正のための計算コストが高くなることが予測され、また、局所領域の画像解像度が低下するなどの問題の発生が見込まれる。そこで本研究では、サーボモータによるパン・チルト機能を有するカメラシステム構造を想定する。さらに、本研究で考える海底生物のマニピュレーションの一連の操作は、UVMSの制御系による自律動作とオペレータによる操作が適宜切り替えられながら実行されることを想定する。したがって、手順(1-2)では、まずオペレータがカメラ画像を見ながら遠隔操作によって対象を検出し、追跡する画像領域を指定する。次に、その指定領域の画像パターンや色相値の分布等の特徴量を初期値としてトラッキング機能を起動し、自動的な対象の追跡を開始する。さらに、トラッキング機能と並列して左右カメラのパン・チルト制御機構を利用する計測機能を実行し、手順(1-3)におけるUVMSの移動制御系の駆動に利用する。最後に、手順(1-4)において、対象まで一定の距離に接近した後にUVMSの姿勢を保持し、対象のマニピュレーションを行う。この作業が完了したら再び手順(1-1)に戻り、他の対象のマニピュレーションに移る。

本論文では、上述のように想定されるUVMSの動作に必要な水中ビジョンシステムの機能の実現のための画像処理手法の構築に焦点を当てる。

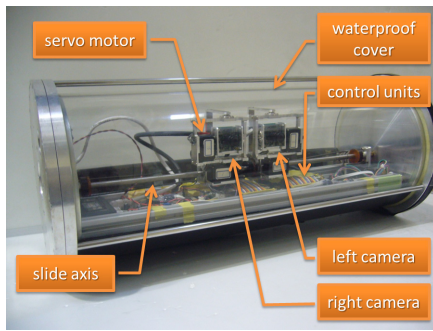
〈2・2〉 水中ビジョンシステムの構成 提案手法の搭載を想定する水中ビジョンシステムの概観と構成をFig. 2に示す。2台のCCDカメラが搭載されており、それぞれのレンズ中心とパン・チルトの回転中心が一致するようにサーボモータが取り付けられている。カメラ信号はNTSCであり、640×480 [pixel]の画像を30 [fps]で撮影できる。さらに、これらの左右カメラはスライド軸に沿って、それぞれ中央から左右方向に等距離の移動が可能であり、左右カメラ間距離は68 [mm]から380 [mm]の範囲で変更が可能である。このビジョンシステムは、外部の海水と完全に遮断する防水壁として幅595 [mm]、直径300 [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・3〉 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. 3に示す。ただし図中の $\Sigma_v$ はスライド軸中心を原点とする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、 $\theta_k^L$ および $\theta_k^R$ は左右カメラのパン角、 $\phi_k^L$ および $\phi_k^R$ は左右カメラのチルト角を表す。ここで、カメラが $z^c$ 方向を向いている場合のパン角とチルト角を0 [rad]と定め、カメラが右方向 $\dagger$ を向いた場合のパン角の符号を正、上方向 $\ddagger$ を向いた場合をチルト角の符号を正とする。

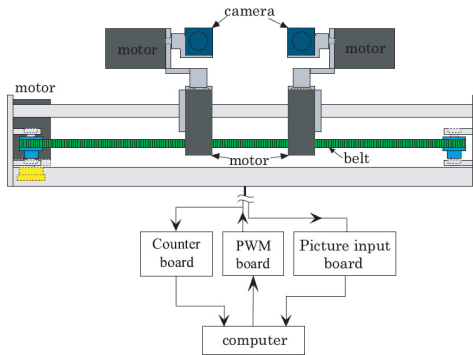
この水中ビジョンシステムをUVMSに搭載し、ステレオ視による距離計測を行うためには、左右カメラ画像からの特徴量の抽出、それらの追跡、左右カメラ間の特徴量の正しい対応付けが必要である。また、UVMSの移動や操

$\dagger y^c$  軸について時計周り方向

$\ddagger x^c$  軸について時計周り方向



(a) Appearance of the underwater vision system



(b) Schematic diagram of the underwater vision system

Fig. 2. Underwater vision system.

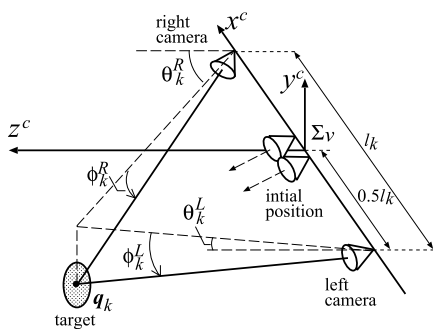


Fig. 3. Measurement model by the vision system.

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<sup>(12)</sup>やエピポーラ幾何に基づく手法<sup>(13)</sup>などがあるが、これらは環境光の変動に脆弱であるため<sup>(14)</sup>、海中で利用する本システムへの適用は困難であると考えられる。さらに、屈折現象により水中ビジョンシステムを覆う防水壁で撮像が歪むため、画像全体に対する特徴追跡や対応点探索を行う従来手法では、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恐れがある。そこで本システムによる距離計測には、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<sup>(3)</sup>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。

- (2-1) 左右カメラをスライド軸の中心を挟んで近接させる。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。
  - (2-2) 手順 (1-1) により、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<sup>†</sup>。
  - (2-3) 左カメラ画像に同一の初期追跡領域を設定する。
  - (2-4) 指定領域を画像中央に追跡するようパン・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 (2-2) と (2-3) 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  $l_k$  の値を増加すると、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ため、計測精度を向上させることができる<sup>(3)</sup>。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。本装置の具体的な補正の手法の解説は文献<sup>(6)</sup>に譲るが、ここでは屈折現象によって生ずる計測誤差の例を示す。今、対象は本計測装置の正面、すなわち  $z^c$  軸上にあるとし、海水の屈折率を 1.339、カメラ間距離は最大 ( $l=380$  [mm]) であるとする。この時、計測原点から 1000 [mm] の距離にある対象を屈折補正無しで計測すると、その見かけの距離は約 779 [mm] となる。同様にして、5000 [mm] の場合は約 3786 [mm]、10000 [mm] の場合には約 7537 [mm] となる。すなわち、屈折現象による見かけの距離は実距離よりも 20% 以上短く算出されるため、本装置による距離計測では屈折現象の正確な補正が重要である。

### 3. 海底生物の追跡

**〈3-1〉 オニヒトデの特徴** 本研究では、UVMS によって操作する具体的な海底生物として、オニヒトデを想定する。典型的なオニヒトデを Fig. 4 に示す。オニヒトデは青灰色の皮膚に赤褐色の斑紋があり、棘は赤褐色であることが多い<sup>(4)(15)</sup>。成体は約 15 本の腕と表面に 20 [mm] から 30 [mm] の多数の毒棘を有し、全長は最大で約 600 [mm] である<sup>(15)</sup>。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。

<sup>†</sup> 本システムでは、左右どちらの画像を基準としても計測に差異は発生しない。





Fig. 4. An acanthaster planci (original image courtesy of Dr. Shoko Isomura).

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<sup>(4)</sup>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<sup>(6)</sup>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、およびオプ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提案する。

**(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  $I_k^L(x, y)$  と表す<sup>†</sup>。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。

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

これは、幅  $w_k$  および高さ  $h_k$ 、中心画素が<sup>§</sup>  $(x_k, y_k)$  の矩形領域を表す<sup>††</sup>。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** 本論文で構築する水中ビジョンシステムでは、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  $\mathbf{T}_0^*$  とし、その状態量を

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

<sup>†</sup> 画素値の種類等は適宜定義する。  
<sup>††</sup>  $\mathbf{x}_k^*$  は中心画素を有する矩形領域であるので、 $w_k$  および  $h_k$  は常に奇数である。

と表す。次に、各時刻  $k$  において以下のような適応的の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 (NCMM : normalized coefficient matching method)<sup>(18)</sup> によってテンプレート画像  $\mathbf{T}_k^*$  と入力画像  $\mathbf{I}_k^*$  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

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

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

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

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

である。さらに、最大の  $N_k^*(x, y)$  を有する画素を  $\hat{\mathbf{p}}_k^*$  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  $\mathbf{T}_{k+1}^*$  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**

**(3・4・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：

**(3-1)** 追跡する矩形領域  $\mathbf{x}_0^R \in \mathbf{I}_0^R$  を設定する。

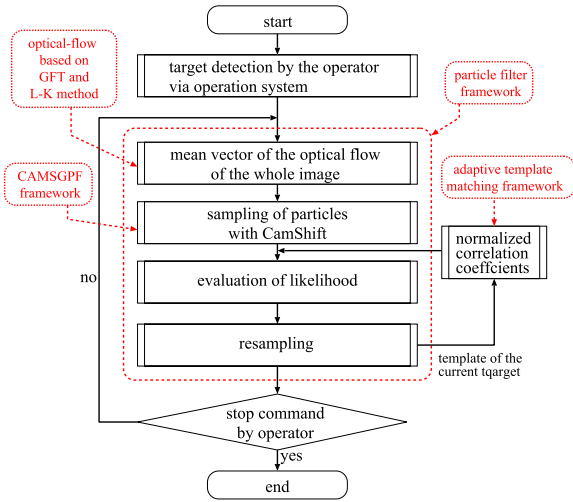


Fig. 5. Flow of the target tracking method.

- (3-2) 左画像に  $\mathbf{x}_0^L = \mathbf{x}_0^R \in \mathbf{I}_0^L$  を設定する。
- (3-3) 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。
- (3-4)  $p_k^{\text{MAP*}}$  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。
- (3-5)  $l_k = l_{\text{set}}$  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。対象を追跡するための画像処理の流れを Fig. 5 に示し, 詳細を以下に述べる。

〈3・4・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  $\{(\mathbf{x}_k^{(m)}, \pi_k^{(m)})\}_{m=1}^M$  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,  $\mathbf{y}_k \in \mathbb{R}^2$  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 ステップで更新する。

**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。

$$\tilde{\mathbf{x}}_k^{(m)} \sim q(\mathbf{x}_k|\mathbf{x}_{k-1}^{(m)}, \mathbf{y}_k), (\forall m) \dots \dots \dots (12)$$

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。

$$\hat{\mathbf{x}}_k^{(m)} = \mathbf{x}_{k-1}^{(m)} + \bar{\mathbf{o}}_{k:k-1} + \mathcal{N}(\mathbf{0}, \Sigma_D) \dots \dots \dots (13)$$

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  $k-1$  と  $k$  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。本研究で対象とする海底生物は静止していると見なせるため, 画像全体のオプティカルフローの平均はカメラの姿勢変動を表現すると考えられる。したがって, 粒子の分布に  $\bar{\mathbf{o}}_{k:k-1}$  を利用することで, 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ことができる。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) <sup>(19)</sup> として 200 点抽出し, それらをピラミッド型 Lucas-Kanade 法 <sup>(20)</sup> により対応付けすることで算出した。さらに, 各仮説  $\tilde{\mathbf{x}}_k^{(m)}$  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。

$$\hat{\mathbf{x}}_k^{(m)} = \text{CamShift}(\tilde{\mathbf{x}}_k^{(m)}, \mathbf{B}_k) \dots \dots \dots (14)$$

ここで,  $\text{CamShift}(\mathbf{x}, \mathbf{B}_k)$  は CAMSHIFT アルゴリズムの適用結果を返す関数であり (アルゴリズムの詳細は文献 <sup>(9)</sup> と付録 1 を参照されたい),  $\mathbf{B}_k$  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 <sup>(17)</sup> を適用した逆投影画像 <sup>(18)</sup>

$$\mathbf{B}_k = \text{BackProject}(\mathbf{H}_0, \mathbf{I}_k^{\text{hue}}) \in \mathbb{R}^{H_n \times W_n} \dots \dots \dots (15)$$

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 <sup>(18)</sup>。

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

$$\tilde{\pi}_k^{(m)} \propto \pi_{k-1}^{(m)} \frac{f(\tilde{\mathbf{x}}_k^{(m)}|\mathbf{x}_{k-1}^{(m)}) \cdot h(\mathbf{y}_k|\tilde{\mathbf{x}}_k^{(m)})}{q(\tilde{\mathbf{x}}_k^{(m)}|\mathbf{x}_{k-1}^{(m)}, \mathbf{y}_k)}, (\forall m) \dots \dots \dots (16)$$

ただし  $\sum_{i=1}^M \tilde{\pi}_k^{(i)} = 1$  となるように正規化する。

本研究では対象は海底もしくはサンゴ群集上に存在し, 短時間では不動であるとみなすため, 対象のダイナミクスに基づくシステムモデルと観測に基づく提案分布を区別して設計する必要が無い。したがって

$$f(\tilde{\mathbf{x}}_k^{(m)}|\mathbf{x}_{k-1}^{(m)}) \triangleq q(\tilde{\mathbf{x}}_k^{(m)}|\mathbf{x}_{k-1}^{(m)}, \mathbf{y}_k) \dots \dots \dots (17)$$

とし, (16) 式を次のように簡単化する。

$$\tilde{\pi}_k^{(m)} \propto \pi_{k-1}^{(m)} h(\mathbf{y}_k|\tilde{\mathbf{x}}_k^{(m)}), (\forall m) \dots \dots \dots (18)$$

ゆう度関数  $h(\mathbf{y}_k|\tilde{\mathbf{x}}_k^{(m)})$  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。

$$h(\mathbf{y}_k | \tilde{\mathbf{x}}_k^{(m)}) = \exp(-\|\hat{\mathbf{p}}_k - \tilde{\mathbf{p}}_k^{(m)}\| / \sigma_o^2) \dots \dots \dots (19)$$

ここで、 $\sigma_o$  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  $\tilde{\mathbf{x}}_k^{(m)}$  を復元抽出する。

$$\mathbf{x}_k^{(m)} \sim \begin{cases} \tilde{\mathbf{x}}_k^{(1)} & \text{with prob. } \tilde{\pi}_k^{(1)} \\ \vdots & \vdots \\ \tilde{\mathbf{x}}_k^{(M)} & \text{with prob. } \tilde{\pi}_k^{(M)} \end{cases}, (\forall m) \dots \dots \dots (20)$$

その後、重みを均等化する。

$$\pi_k^{(m)} := 1/M, (\forall m) \dots \dots \dots (21)$$

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。

$$\mathbf{x}_k^{\text{MAP}} = (\mathbf{p}_k^{\text{MAP}} \quad s_0)^T := \mathbf{x}_k^{(\alpha)} \dots \dots \dots (22)$$

$$\alpha = \arg \max_m \pi_k^{(m)} \dots \dots \dots (23)$$

(9) 式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<sup>(11)</sup>。

一方で、次のような場合には、追跡が失敗する可能性があるため注意が必要である：1) 対象が撮影画像から消失する場合や、カメラが対象から遠ざかって対象の画像領域が小さくなる場合には、オプティカルフローによる補償や適応テンプレートマッチングが機能しなくなる；2) PF のシステムモデルは、対象が一つであるという前提で構成されているため、追跡対象と類似した物体が画像中に複数存在す

る場合には、追跡結果が多数の追跡候補の間で振動的に移動する場合がある<sup>†</sup>；3) テンプレートと類似する特徴が画像上に広く分布し、かつ対象と同様の色相値が広範囲に分布する場合には、適切な結果が得られない場合がある。実際の場面でこれらの制約を回避するためには、 $N_k^*(x, y)$  の値により対象追跡の確度を判定し、対象を見失った場合や適切に検出されないと判定される場合には追跡を中断し手続き (1-2) に戻る必要がある。

## 4. 実験

### 〈4・1〉 追跡機能の性能評価実験

**〈4・1・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] の動画画像<sup>††</sup>を用いて、オニヒトデを追跡する実験を行った。Fig. 6(a) から (d) に利用した動画画像の一部を示す。この動画画像では、初期の画像フレームにおいて追跡対象とするオニヒトデが画面中央付近に大きく撮影されており、その後カメラ位置が徐々に後退して、80 フレーム以降の動画画像において複数のオニヒトデが画像右上から出現する。この動画画像により、以下の項目について本手法の性能評価を行う：1) この動画ではカメラの移動により、対象のオニヒトデの見えの大きさが 1 倍から約 1/4 倍まで変化するため、対象大きさの変化に対する本手法のロバスト性を評価する；2) 複数のオニヒトデが動画中に出現するため、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  $\sigma_D = 5$  [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<sup>†††</sup>。分散  $\sigma_D$  の値が小さすぎる場合には、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

<sup>†</sup> このような場合においても、提案手法は従来手法よりも安定した対象の検出が可能であることを、後述の実験により示す。

<sup>††</sup> 琉球放送テレビ製作部から映像の提供を受けた。

<sup>†††</sup> 本実験で用いた動画画像に対しては、 $M = 20$  以上の粒子を用いても追跡性能の有意な向上は観測されなかった。



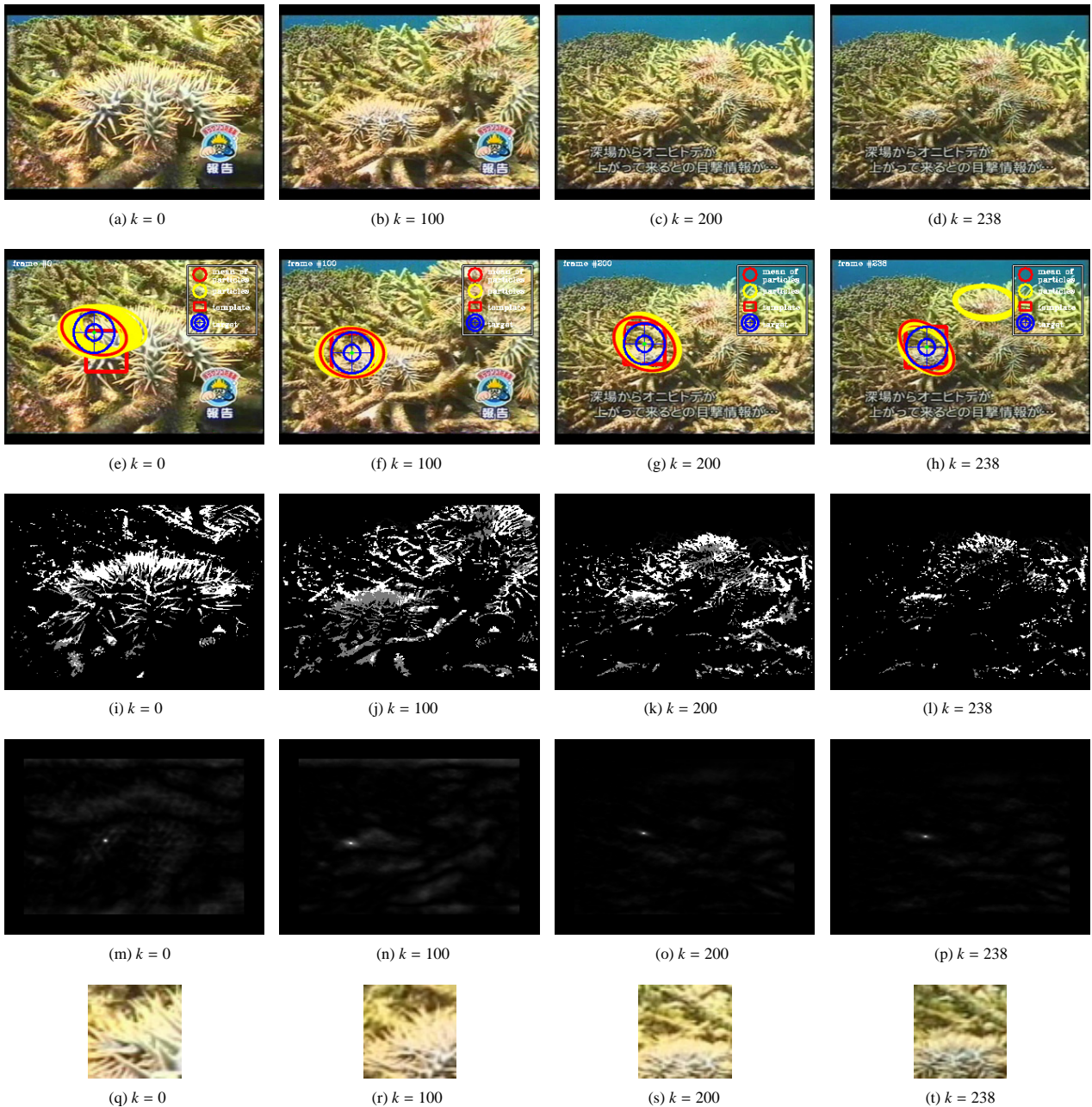


Fig. 6. Examples of applying the proposed method to tracking of a target object: (a)–(d) are raw images; (e)–(h) are processed images, the yellow ellipses represent the states of each particle, the red ellipse is the MAP (maximum a posteriori) of the particles, the red rectangle is the template image extracted accommodatively, and the blue target mark represents the estimated position of the target; (i)–(l) are backprojection images based on the target hue value histogram; (m)–(p) are the score images provided by template matching (the white pixels have high score value); and (q)–(t) are template images.

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 OS は Vine Linux 5.2, CPU はインテル Core2Duo プロセッサ 2.66 [GHz] である。また, 提案手法は C 言語で実装した。これらの条件に基づいて行った各手法を用いる後述の実験は, すべて 30 [fps] 以内, すなわちオンラインで実行された。

〈4・1・2〉 実験結果 まず, 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. 6(e) から (h) に示す。

図中の黄色の楕円はゆう度評価を行った後の粒子の状態量を表し, 赤色の楕円は最大の重みを持つ粒子の状態量を表している。また, 赤色の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青色のターゲットマークで表している。提案手法により, 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))

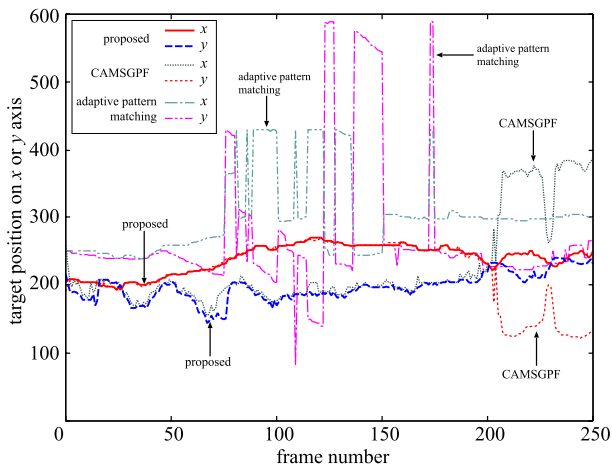


Fig. 7. Time evolution of tracked target positions.

参照) が、実験に用いた全画像フレームにおいて、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なかった。

次に、同図 (i) から (l) には CAMSGPF に利用する逆投影画像を示している。同図 (m) から (p) は、適応パターンマッチングによる正規化相関係数の分布を表しており、白い画素ほど高い値を持つ<sup>†</sup>。これらの図より、各時刻において対象のオニヒトデから切り出されるテンプレートパターンの利用によって、画像上で唯一の点が検出されていることがわかる。また、複数のオニヒトデが画像に出現した後も同様に唯一の点が検出されており、適応パターン認識が有効に機能していることがわかる。

同図 (m) から (p) は、各時刻において生成されて利用されたテンプレート画像を表しており、各時刻において適応的にテンプレート画像が更新された様子がわかる。

〈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. 7 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。

<sup>†</sup> ここではマッチング結果の分布を先鋭化して見やすくするために、 $N(x, y)$  を 3 乗した分布を示している。

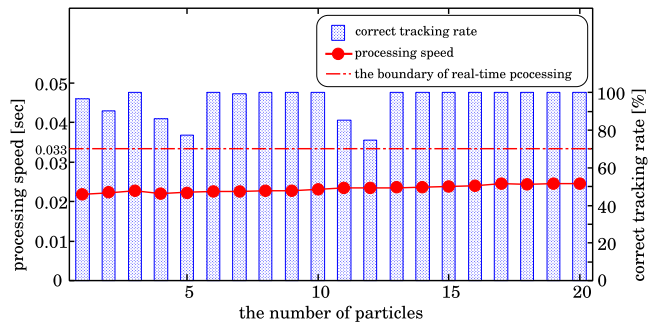


Fig. 8. The relations of the number of particles vs. the processing speed and the number of particles vs. the correct tracking rate.

〈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く追跡された割合を調べた。実験結果を Fig. 8 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プ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。

今後の課題として、2 台のカメラをバン・チルト・スライドさせることが可能な機構を搭載した水中ビジョンシステムに提案手法を組み込み、実際の海洋における実験を行うことが挙げられる。また、水中で周囲を照らす LED ライトの搭載や、レーザ距離計やソナーなどの他の計測原理に基づくセンサと本システムの融合などが挙げられる。さらに海中における実験に基づき、本提案手法の実際的な運用方法についての知見を得る必要がある。特に、周囲の明るさの変化や海水の透明度の変化など、環境変動に対する本手法のロボスト性の検証や評価が今後の重要な課題である。



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 Experiments of Position and Orientation Measurement System for Catching *Acanthaster Planci*", Proc. of SI2005, pp.657-658 (2005) (in Japanese)  
相良慎一・矢藤 孝・池内裕明・坂上憲光・武村史朗: 「2 台の可動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中基礎実験」, 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, 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)  
相良慎一・池内裕明・坂上憲光・武村史朗: 「UVMS 用捕獲物体位置・姿勢計測システムの開発」, 日本機械学会 ROBOMECH'05 講演論文集, 2P1-S-009 (2005)

(4) 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)  
富田哲史・武村史朗・坂上憲光・相良慎一: 「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 ROBOMECH'05 講演論文集, 2P1-S-012 (2005)

(5) K. Kawano, T. Shimozawa, and S. Sagara: "A Master-Slave Control System for Semi-Autonomous Underwater Vehicle-Manipulator System", Proc. of the 16th Int. Symposium on Artificial Life and Robotics, pp.142-145 (2011)

(6) H. Kawakami, S. Tomita, N. Sakagami, F. Takemura, and S. Sagara: "Touching an underwater object using image processing for underwater vehicle-manipulator systems", Proc. of the 2007 JSME Conf. on Robotics and Mechatronics, 2A2-C07 (2007) (in Japanese)  
川上 大・富田哲史・坂上憲光・武村史朗・相良慎一: 「マニピュレータを搭載した水中ロボットの画像処理を利用した接触作業」, 日本機械学会 ROBOMECH'07 講演論文集, 2A2-C07 (2007)

(7) S. Sagara, T. Yatoh, H. Sakai, and F. Takemura: "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)  
相良慎一・矢藤 孝・酒井 一・武村史朗: 「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中基礎実験」, 日本機械学会 ROBOMECH'10 講演論文集, 2A1-A09 (2008)

(8) T. Shimozawa, T. Yoshitake, S. Sagara, and F. Takemura: "A development of an object position and attitude measurement system used FPGA for UVMS", Proc. of the 2010 JSME Conf. on Robotics and Mechatronics, 1P1-C24 (2010) (in Japanese)  
下沢智啓・吉武 努・相良慎一・武村史朗: 「FPGA を用いた UVMS 用物体位置・姿勢計測システムの開発」, 日本機械学会 ROBOMECH'10 講演論文集, 1P1-C24 (2010)

(9) G.R. Bradski: "Computer Vision Face Tracking For Use in a Perceptual User Interface", Intel Technology Journal, No.Q2. (1998)

(10) 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 世紀の統計科学 III, 第 11 章, 国友直人等 (監修), 東京大学出版会 (2008)

(11) Z. Wang, X. Yang, Y. Xu, and S. Yu: "CamShift guided particle filter", Pattern Recognition Letters, No.30, pp.407-413 (2009)

(12) S. Birchfield and C. Tomasi: "Depth discontinuities by pixel-to-pixel stereo", Proc. of the 6th IEEE International Conference on Computer Vision, pp.1073-1080 (1998)

(13) R. Hartley and A. Zisserman: Multiple View Geometry in Computer Vision Second Edition, Cambridge University Press (2003)

(14) T. Nishida, S. Kurogi, K. Yamanaka, W. Kogushi, and Y. Arimura: "Development of Pilot Assistance System with Stereo Vision for Robot Manipulation", Xiong Zhihui (Ed.), Computer Vision, pp.282-302, Chapter 17 (2008)

(15) 本川達雄: サンゴとサンゴ礁のはなし, 中公新書, pp.236-237 (2008)

(16) 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)  
坂上憲光・富田哲史・武村史朗・相良慎一: 「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 ROBOMECH'06 講演論文集, 1P1-E35 (2006)

(17) M.J. Swain and D.H. Ballard: "Color Indexing", Int. J. Computer Vision, Vol.7, No.1, pp.11-32 (1991)

(18) G. Bradski and A. Kaehler: Learning OpenCV, O'Reilly Media (2008)

(19) J. Shi and C. Tomasi: "Good features to track", 9th IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition (1994)

(20) J.Y. Bouquet: "Pyramidal Implementation of the Lucas Kanade Feature Tracker", Technical Report, Intel Corporation, Microprocessor Research Labs, OpenCV documentation (2000)

付 録

1. CAMSHIFT アルゴリズム

以下には CAMSHIFT アルゴリズム<sup>(9)</sup>の処理手順と, 提案手法に利用する際に発生する手順の相違について示す。

CAMSHIFT では,  $\mathbf{x}_k^{(m)}$  について, 条件を満たすまで逆投影画像  $\mathbf{B}_k$  において以下の処理を繰り返し最適化を行う。

**Given** 初期の探索窓を  $\mathbf{x}_k^{(m)}$  とする。

**step 1** 探索窓の 0 次モーメントと 1 次モーメントを求める。

$$M_{00} = \sum_x \sum_y P_k(x, y) \dots\dots\dots (付 1)$$

$$M_{10} = \sum_x \sum_y x P_k(x, y) \dots\dots\dots (付 2)$$

$$M_{01} = \sum_x \sum_y y P_k(x, y) \dots\dots\dots (付 3)$$

ここで  $P(x, y)$  は矩形領域  $\mathbf{x}_k^{(m)}$  に含まれる画素の座標  $(x, y)$  の画素値を表す。

**step 2** 新しい探索窓の中心位置を求める。

$$(x_c, y_c) = \left( \frac{M_{10}}{M_{00}}, \frac{M_{01}}{M_{00}} \right) \dots\dots\dots (付 4)$$

**step 3** 収束するまで step 1 と step 2 を繰り返す。収束した後の状態量を  $\tilde{\mathbf{p}}_k^{(m)}$  と表す。

**step 4** 対象の姿勢を求めるために, 2 次モーメントを次のように求める。

$$M_{20} = \sum_x \sum_y x^2 \tilde{P}_k(x, y) \dots\dots\dots (付 5)$$

$$M_{02} = \sum_x \sum_y y^2 \tilde{P}_k(x, y) \dots\dots\dots (付 6)$$

ここで  $\tilde{P}(x, y)$  は矩形領域  $\tilde{\mathbf{x}}_k^{(m)}$  に含まれる画素の座標  $(x, y)$  の画素値を表す。これらより, 対象の姿勢は次のように求められる。

$$\theta_k^{(m)} = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left\{ \frac{2 \left( \frac{M_{11}}{M_{00}} - x_c y_c \right)}{\left( \frac{M_{20}}{M_{00}} - x_c^2 \right) - \left( \frac{M_{02}}{M_{00}} - y_c^2 \right)} \right\} \dots (付 7)$$

**step 5** 探索窓の大きさは次のように求める。

$$h_k^{(m)} = k_1 \beta \dots\dots\dots (付 8)$$

$$w_k^{(m)} = k_2 \beta \dots\dots\dots (付 9)$$

$$\beta = 2 \sqrt{M_{00}/256} \dots\dots\dots (付 10)$$

ここで,  $k_1$  と  $k_2$  は追跡対象によって経験的に設定される値である。ただし提案手法では, 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  $\tilde{\mathbf{s}}_k^{(m)} = \mathbf{s}_0$  とした。

**step 6**  $k := k + 1$  として step 1 に戻る。

西田 健



（正員） 1998年九州工業大学工学部設計生産工学科卒業。2002年九州工業大学大学院博士後期課程修了。同年より九州工業大学機械知能工学科助手。2007年より助教，博士（工学）。屋外移動ロボットに関する研究に従事。日本ロボット学会，計測自動制御学会，日本神経回路学会などの各会員。

武村 史朗



（正員） 2003年NPO法人国際レスキューシステム研究機構特別研究員，2007年沖縄工業高等専門学校機械システム工学科准教授，現在に至る。博士（工学）。空気圧駆動アクチュエータの制御，ワイヤ駆動ロボット，レスキューロボット，水中ロボットの研究に従事。IEEE，日本ロボット学会，日本機械学会などの各会員。

相良 慎一



（非会員） 1989年九州工業大学大学院工学研究科修士課程制御工学専攻修了。同年農林水産省水産大学校機関学科助手，1990年九州工業大学工学部設計生産工助手を経て現在九州工業大学機械知能工学科准教授。博士（工学）。ロボット工学・制御工学の教育と研究に従事。IEEE，計測自動制御学会，日本機械学会，日本ロボット学会の各会員。