

# ステレオカメラを用いた気泡ノイズにロバストな水中環境観測

加藤 進      山下 淳      金子 透  
静岡大学 工学部 機械工学科  
〒432-8561 静岡県 浜松市 城北 3-5-1

水中観測では、状況によっては気泡がカメラ画像にノイズとして写り込み、観測に支障を来すことがある。また、撮像光学系において、空気と水の屈折率の違いによる光の屈折が起きるため、観測対象が実際の位置・形状とは異なって観測されるという問題点も存在する。そこで本論文では、画像処理による気泡の識別・除去と光の屈折を考慮した3次元計測を行うことで、これらの問題に対応したロバストな水中環境観測手法を提案する。

## Robust Observation in Underwater Environments against Bubble Noises with a Stereo Camera System

Susumu Kato   Atsushi Yamashita   Toru Kaneko  
Department of Mechanical Engineering, Shizuoka University  
3-5-1 Johoku, Hamamatsu -shi, Shizuoka 432-8561, Japan

Observation in underwater environments meets the difficulty that scenes are sometimes disturbed by air bubbles. It has also the problem that, when a camera is set in air behind a watertight glass plate, refraction occurs at the boundary surface between air and water, resulting in geometrical distortion of images. This paper proposes a robust observation method for underwater environments observation, which is realized by image processing for bubble image removal and three-dimensional measurement where refraction is taken into account.

### 1. 序論

#### 1.1 研究背景

近年、資源発掘や環境調査、レスキューやサルベージ等危険を伴う海底での作業が増え、人間に代わって活動する水中ロボット、無人潜水艇等の観測・作業システムの必要性が増してきた。そのため、搭載したカメラから水中の様子を正確に観測するための技術が求められるようになってきた。しかし、水中の状態をカメラ画像から正確に観測するのは非常に困難である。

まず、水中では、気泡等が浮遊物として存在し、さらに状況によっては、小魚やその他の浮遊生物等も存在する。これらがノイズとなって水中観測を妨げることがある (Fig.1)。

また、防水の容器にカメラを収容して水中を撮影する場合の問題点として、屈折率の影響が挙げられる。この場合、カメラは防水された空気中に存在し、被写体は保護ガラス等を介して水中に存在することになる。このとき、光は屈折率の異なる物体間を通過することとなり屈折を起こす (Fig.2)。そのため、水中に存在する物体は、実際の位置・形状とは異なって観測されてしまう。



Fig.1 気泡ノイズ



Fig.2 光の屈折の影響

前者の問題に対しては、特に水中ノイズを対象としているわけではないが、降雪ノイズ、水滴ノイズを対象としたノイズ除去の研究が行われている。降雪ノイズを対象とした研究<sup>(1)</sup>では、時間方向にメディアンフィルタをかけることにより降雪ノイズを除去している。しかし、この手法では、降雪ノイズ以外の動物体が存在する場合に十分対応できていないという問題点も存在する。

水滴ノイズを対象とした研究<sup>(2)</sup>では、カメラの保護ガラスに付着した水滴等をその画像特徴から識別し、除去している。この手法は、画面の静的ノイズを対象としたものであるが、原理的には動的ノイズにも対応可能である。しかし、視差がないような遠景画像のみを対象としており、本研究が対象としている水中の動的な気泡に関しては適用が難しい。

後者の光の屈折の問題に関しては、水中での3次元計測における屈折率の影響に関する研究が行われている<sup>(3)~(6)</sup>。これらは、空気、ガラス、水といった異なる屈折率を持つ物体間での光の屈折を考慮してカメラの光線追跡を行うことにより、水中での3次元計測を実現した研究である。これらの手法を用いれば水中での計測は原理的には可能であると考えられるが、そのためには、上記浮遊物ノイズや低透明度のために劣化した画像を処理して、いかに計測に必要な情報を精度良く抽出するかが重要となる。

## 1.2 研究の目的

本研究では、画像処理によって水中観測における気泡ノイズの影響を軽減することを第1の目的とする。気泡ノイズの影響を軽減する手段として、今回はクラスタリング(2.2節参照)を用い、大きさや色等の特徴量を基に画像中の動物体を分類し、その中から気泡ノイズだけを識別・除去する。

次に、光の屈折を考慮した3次元計測を行うことで、観測対象の3次元位置を正確に追跡することを第2の目的とする。計測方法として、2台のカメラを用いてステレオ計測を行う。

最終的に、これら2つの手法を組み合わせることにより、ロバストな水中環境観測手法を実現する。

## 2. 画像処理による気泡ノイズの識別・除去

提案手法の概要を Fig.3 に示す。本手法では、背景差分法により撮影画像から動物体を抽出した後、その動物体をクラスタリングにより気泡ノイズとそれ以外の観測対象物に分類する。最終的に、その分類した中から気泡ノイズだけを識別・除去すること

で、気泡ノイズの存在しない画像を生成する。

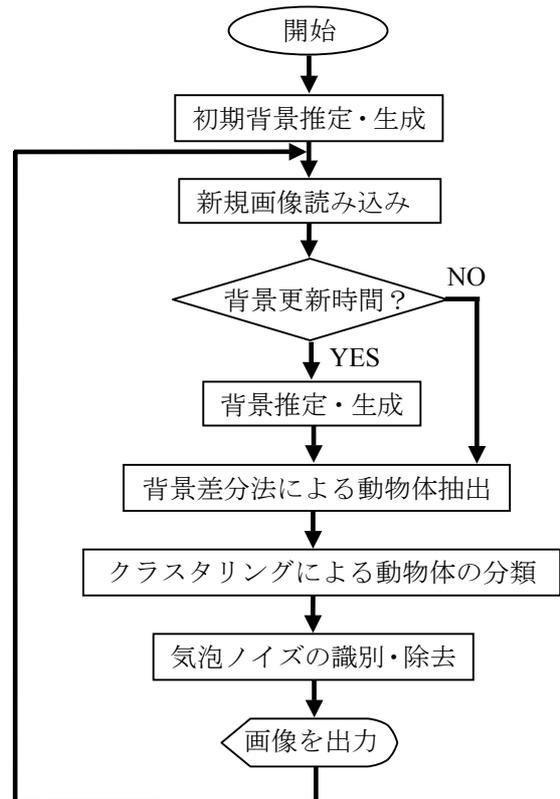


Fig.3 提案手法の概要

### 2.1 背景差分法による動物体抽出

撮影した画像から動物体を抽出する。本研究では、動物体を抽出するのに背景差分法を用いる。

背景差分法に用いる背景画像は、予め用意、あるいは観測の途中で生成する必要がある。背景差分法に伴う背景画像の推定・生成に関しては、すでに様々な研究がされている<sup>(7)~(9)</sup>。本研究では、時系列輝度ヒストグラム<sup>(9)</sup>を用いた背景推定・生成を行う。

時系列輝度ヒストグラムを用いた背景推定・生成は次のように行う。まず一定時間、画像データを R, G, B 成分から成るカラーデータとして蓄積する。次に、この時系列画像データをグレースケール化したものを考え、各画素ごとに横軸が輝度値、縦軸が各輝度値の発生頻度を表す時系列輝度ヒストグラムを作成する。そして、このヒストグラムにおいて最も出現頻度の高い輝度値を背景画素の輝度値とする (Fig.4)。

この状態では、背景画像はグレースケールのままなので、グレースケールからカラーに変換しなければならない。ところが、各画素を時系列で見ると上記で求めた輝度値を持つ画素が複数個存在する。輝度値と RGB 値の対応は一つではないので、背

景画素の RGB 値の組は複数個存在する．本手法では，それらの平均値を背景画素の RGB 値とする．

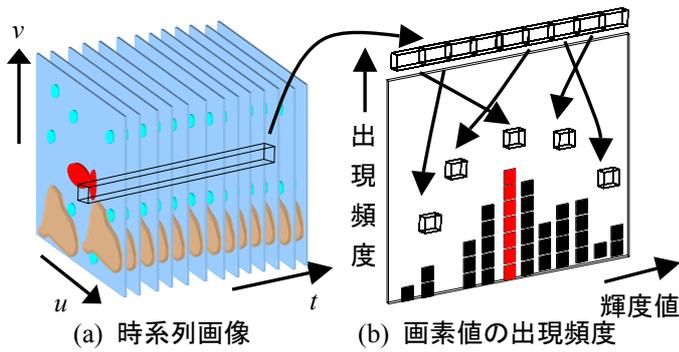
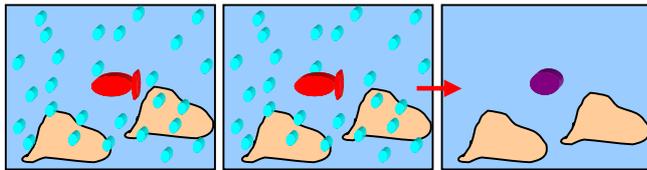


Fig.4 背景推定・生成

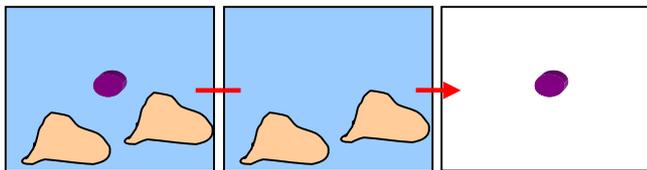
この時系列輝度ヒストグラムを用いた背景推定・生成手法では，画像を蓄積した一定時間内にほとんど動かないような遅い移動速度の動物体は，その動物体の一部が背景画像として残ってしまうことがある (Fig.5) .



(a) 蓄積画像 1 (b) 蓄積画像 n (c) 生成画像

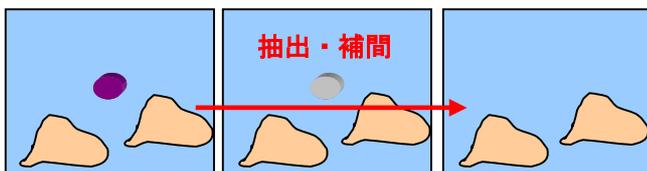
Fig.5 背景推定・生成の例

そこで本研究では，以下の手法でこの問題に対応している．まず，1 つ前に生成した背景画像との時間方向差分をとり，ある閾値以上の部分を抽出する (Fig.6) . 短時間に背景が大きく変化することは少ないので，この部分を上で述べた動物体の残留部分であると考えられることができる．そこで，この部分を1 つ前の生成背景画像の対応部分から抽出して補間することにより除去する (Fig.7) .



(a) 現背景画像 (b) 前背景画像 (c) 背景間差分

Fig.6 背景画像の時系列差分



(a) 現背景画像 (b) 前背景の対応部分 (c) 補間画像

Fig.7 背景画像の補間

## 2.2 クラスタリングによる動物体の分類

本研究では，クラスタリング手法の中でも非階層クラスタリングの一手法である ISODATA 法<sup>(10)~(11)</sup> (Iterative Self Organizing Data Analysis techniques A, Fig.8) を用いる．

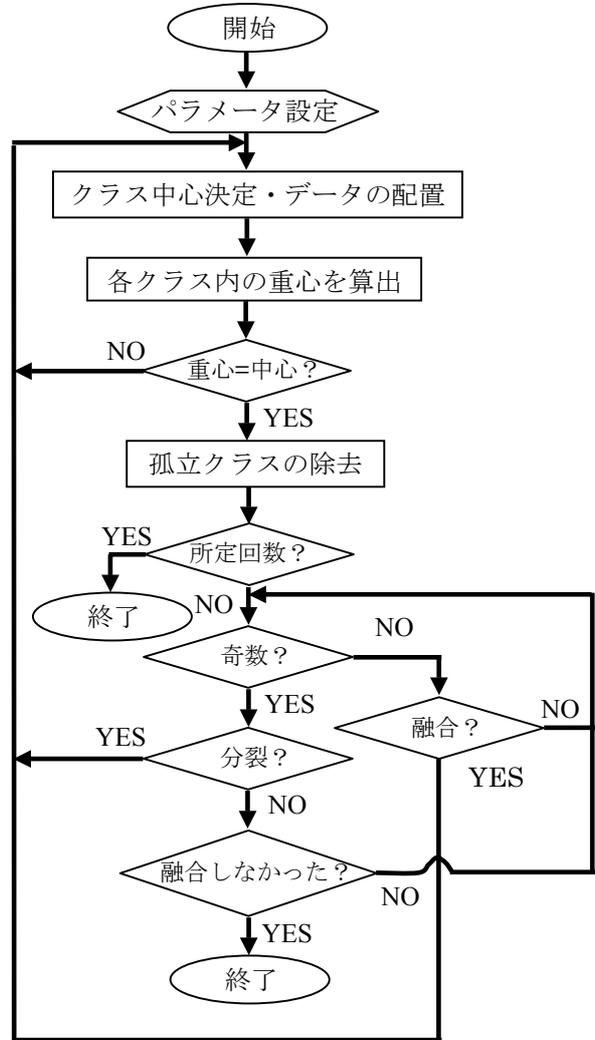


Fig.8 ISODATA 法

本研究で用いる ISODATA 法の特徴は，最適クラス数 (対象データを最終的にいくつに分類すべきか) が処理の中でクラスの融合・分裂を行うことにより初期指定値の約 2 分の 1 から 2 倍まで可変である点であり，初期クラス中心 (分類したい各クラスの初期サンプル値) さえ正しく与えれば，最適クラス数の設定がある程度曖昧な場合でも，与えられたデータを適当なクラス数で分類することが可能である．

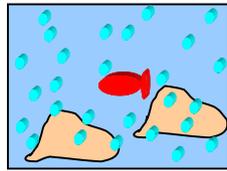
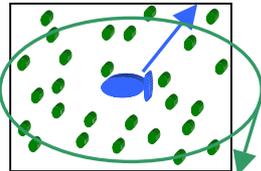
クラスタリング手法でデータとして与えるのは，分類対象の情報であり，大きさ，色，動き等の特徴量が考えられる．本手法では大きさと色に関して，

各動物体の大きさ（ラベリングされた各々の連結成分ごとの総画素数）、周囲長、RGB表色系の各濃度の平均値の5個の特徴量を与える。

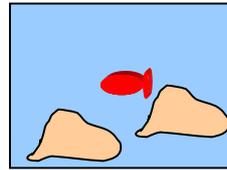
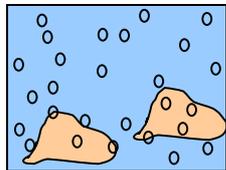
### 2.3 気泡ノイズの識別・除去

本研究では、大量の気泡ノイズによって視野が遮られた状況を想定している。そのため、気泡ノイズの要素数は、それ以外の動物体の要素数に比べて多いことが言える。そこで、クラスタリングにより分類されたクラスの中で要素数が一定値  $T$  以上のクラスを気泡ノイズのクラスとし、そのクラスに属する動物体を気泡ノイズであると認識させる (Fig.9 (a))。そして、そのクラスの画素に対応する元の対象画像の部分背景画像から抽出して補間する (Fig.9 (b) (c) (d))。

クラス1: 要素数  $N (< T)$  = 観測対象



クラス2: 要素数  $M (\geq T)$  = 気泡ノイズ  
(a) 分類画像



(b) 対象画像  
(c) 背景画像の対応位置 (d) 補間後の対象画像  
Fig.9 気泡ノイズの識別・除去

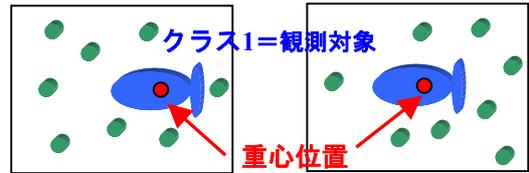
以上の手法により、対象画像から気泡ノイズだけを除去する。

### 3. 光の屈折を考慮したステレオ3次元計測

3次元計測を行う際に光の屈折を考慮したカメラの光線追跡を行うことで、水中における観測対象の正確な位置計測を可能にする。3次元計測の手法には、レーザー光等を用いたスポット光投影法やスリット光投影法が存在するが、これらの手法の場合、観測対象物が動くとそれを追跡して投影光を当てなければならない。本手法では、そのような面倒な操作が必要なく、カメラだけの簡単な構成で計測が可能なステレオ法を用いて3次元計測を行う。光の屈折の問題は、1.1節で示した光線追跡手法<sup>(1)~(2)</sup>を用いることで対処する。

### 3.1 左右画像の対応点探索

ステレオ計測を行うには、まず左右のカメラの画像から対応する点を探す必要がある。本手法では、対応点の探索に2章で行ったクラスタリングの結果を用いる。左右の画像のクラスタリングによって気泡以外の動物体、つまりは観測対象と識別された動物体に関して左右それぞれ重心位置を求め、それを左右の画像の対応点とする (Fig.10)。



(a) 左分類画像 (b) 右分類画像

Fig.10 左右画像の対応点

### 3.2 カメラの光線追跡

空気、ガラス、水と屈折率が変化する部分においては、入射角と屈折角、屈折率の関係をスネルの法則を用いて求め、それを光線追跡に反映させることで、光の屈折の影響を考慮した計測を行う。

Fig.11 にガラス面における光の屈折の様子を示す。空気とガラスの屈折率をそれぞれ  $n_1, n_2$  とし、空気からガラスへの入射角を  $\theta_1$  とする。また、空気中のカメラの単位光線ベクトルを  $(\alpha_1, \beta_1, \gamma_1)^T$ 、ガラス面の法線ベクトルを  $(\lambda, \mu, \nu)^T$  とすると、ガラス中を進む単位光線ベクトル  $(\alpha_2, \beta_2, \gamma_2)^T$  は、

$$\begin{pmatrix} \alpha_2 \\ \beta_2 \\ \gamma_2 \end{pmatrix} = \frac{n_1}{n_2} \begin{pmatrix} \alpha_1 \\ \beta_1 \\ \gamma_1 \end{pmatrix} + \left( \sqrt{1 - \left( \frac{n_1}{n_2} \right)^2 \sin^2 \theta_1} - \frac{n_1}{n_2} \cos \theta_1 \right) \begin{pmatrix} \lambda \\ \mu \\ \nu \end{pmatrix} \quad (1)$$

となる。また、水の屈折率を  $n_3$  とし、ガラスから水への入射角を  $\theta_3$  とすると、水中を進む単位光線ベクトル  $(\alpha_3, \beta_3, \gamma_3)^T$  は、

$$\begin{pmatrix} \alpha_3 \\ \beta_3 \\ \gamma_3 \end{pmatrix} = \frac{n_2}{n_3} \begin{pmatrix} \alpha_2 \\ \beta_2 \\ \gamma_2 \end{pmatrix} + \left( \sqrt{1 - \left( \frac{n_2}{n_3} \right)^2 \sin^2 \theta_3} - \frac{n_2}{n_3} \cos \theta_3 \right) \begin{pmatrix} \lambda \\ \mu \\ \nu \end{pmatrix} \quad (2)$$

となる。水中側の水槽面の通過点を  $(x_2, y_2, z_2)^T$  とすると、光線ベクトル上の任意点  $(x_p, y_p, z_p)^T$  は、

$$\begin{pmatrix} x_p \\ y_p \\ z_p \end{pmatrix} = C \begin{pmatrix} \alpha_3 \\ \beta_3 \\ \gamma_3 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{pmatrix} \quad (3)$$

と表すことができる。ただし  $C$  は定数である。

光線ベクトルは、左右それぞれのカメラで求めることができ、この2本の光線ベクトルが交わった点が計測すべき点である。しかし、この2本の光線ベクトルは、キャリブレーションによる誤差や画像中のノイズの影響などにより交わらないことが多い。そこで、この2本の光線ベクトル間の距離が最短になる点をそれぞれの光線上において求め、その2点の中点を計測点とみなすこととする。

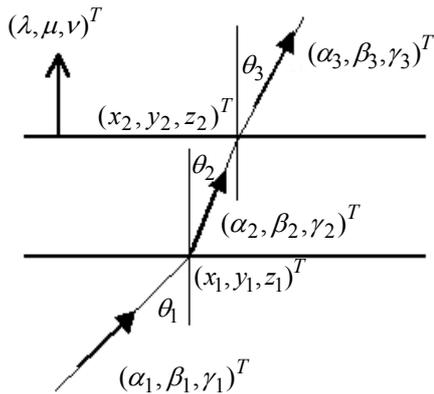


Fig.11 ガラス面での光の屈折

## 4. 実験

### 4.1 実験装置

木製の球と赤い柄のはさみを観測対象とし、背景に海藻等の写真が貼ってある水槽とエアシャワー（気泡発生装置）を使用して実験を行った。カメラは市販のデジタルビデオカメラ（3CCD、動画時有効画素 64 万画素×3）を2台使用し（Fig.12）、各種演算処理はPC（Celeron 2.5GHz、Memory 512MB、Windows2000）を使用した。動画のフォーマットは 320×240 pixel, 30fps、撮影時間は 60～120s とした。また、気泡ノイズ除去のための新たな背景の更新間隔は 0.33s に 1 回とした。



Fig.12 実験環境

### 4.2 気泡ノイズ除去結果

対象画像を Fig.13(a)に示す。次に、画像中の動物体を識別・分類した画像を Fig.13 (b)に示す。最後に気泡ノイズを除去した画像を Fig.13 (c)に示す。1フレーム当りの処理時間は、0.5～1.0sであった。



(a) 対象画像



(b) クラスタリング画像



(c) 気泡ノイズ除去画像

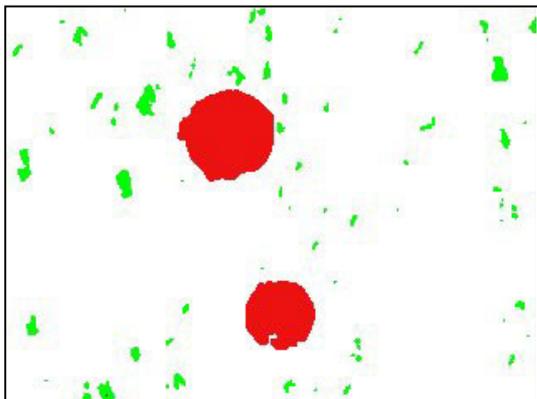
Fig.13 実験結果 1

この結果を見ると、Fig.13 (b)では動物体が気泡ノイズと木球の2つのクラスに正しく分類されているのが確認できる。また、Fig.13 (c)では木球を残して気泡ノイズだけを除去できているのが確認できる。

複数の木球が存在する場合について気泡ノイズ除去を行った画像を Fig.14 に示す.



(a) 対象画像



(b) クラスタリング画像



(c) 気泡ノイズ除去画像

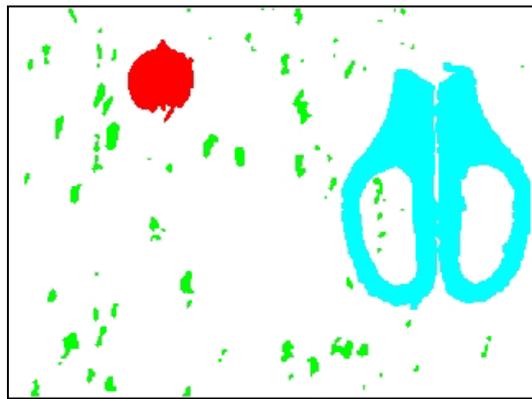
Fig.14 実験結果 2

このように、複数の動物体が存在するような場合でも、その特徴量の類似性から正しく気泡と木球が分類され、気泡ノイズのみが除去できているのが確認できる。しかし、Fig.14 (c)に示すように、木球と重なっている気泡ノイズに関しては、補間元の背景画像に対応する部分が存在しないので、現状の手法では除去できていない。この問題に関しては、今後検討していく予定である。

同様に、赤い柄のはさみと木球が混在する場合についての結果を Fig.15 に示す.



(a) 対象画像



(b) クラスタリング画像



(c) 気泡ノイズ除去画像

Fig.15 実験結果 3

この場合では、それぞれの動物体が別々の物体として正しく分類されており、はさみと木球に重なっている部分の気泡ノイズ以外は、ほとんど除去できているのが確認できる。しかし、このような異なる動物体が混在するような場合では、誤分類が頻繁に起こっていて安定した分類ができていない。誤分類の原因としては、初期クラス中心の設定や特徴量の冗長性に問題があると考えられる。

### 4.3 光の屈折を考慮した3次元計測

3章で説明した光の屈折を考慮した3次元計測を行うことで、気泡の発生している水槽中を水平方向に移動している木製ブロックの3次元位置を追跡した。計測に用いる画像は気泡除去処理を行って得られた画像である (Fig.16)。計測結果を評価するために、マニピュレータを用いてブロックを把持・移動させ (Fig.17), その移動経路と計測結果を比較した。



(a) 左カメラ画像 (b) 右カメラ画像  
Fig.16 対象画像

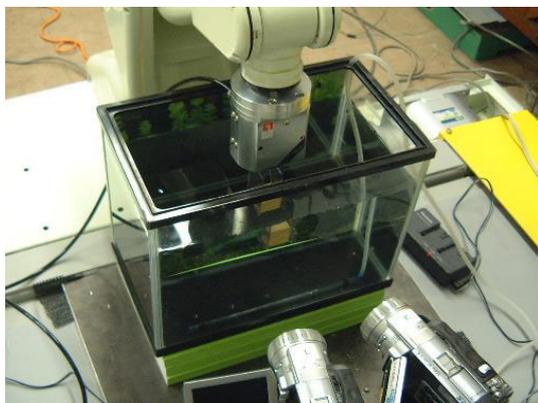
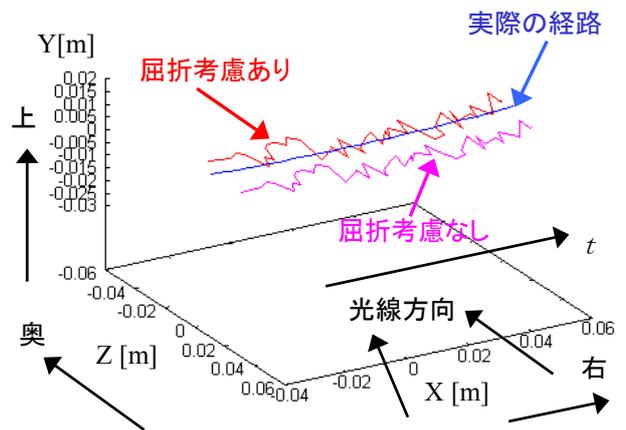


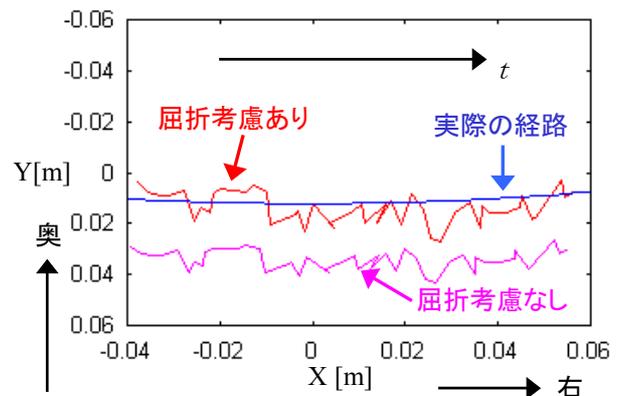
Fig.17 マニピュレータを用いた動物体の移動

3次元位置追跡結果を Fig.18(a)(b)に示す。これを見ると、屈折率を考慮していない場合は、実際の経路に比べて2~3cm手前側に近づいて観測されているのに対し、屈折率を考慮した場合は、実際の経路近辺に観測されているのがわかる。

現状では、屈折率を考慮した場合でも、実際の経路との間に1~2cm程度の誤差が生じている。また、計測結果に全体的なばらつきが見られる。この原因に関しては以下のことが考えられる。本研究では、ステレオ計測の際の対応点探索にあたって、簡単のためにクラスタリング結果から動物体を識別し、その重心を取る方法を用いた。そのため、対応点が正確に取れておらず、それが計測結果に影響を及ぼしたと考えられる。



(a) 3次元位置追跡結果



(b) 水槽上面から見た3次元位置

Fig.18 計測結果

## 5. 結論

本論文では、クラスタリング手法を用いて画像中の動物体の中から気泡ノイズだけを識別・除去することで、気泡ノイズに影響されない水中環境観測手法を提案した。実験結果より、比較的良い精度で気泡ノイズの識別と除去ができていることが確認できた。また、光の屈折を考慮した3次元計測については、光の屈折を考慮しない場合よりも考慮した場合の方が、精度の良い計測ができていることが確認できた。

今後の課題としては、以下の点が挙げられる。気泡の識別・除去に関しては、まず、分類の精度を上げるためにクラスタリング手法を改良する必要がある。主に、初期クラス中心の設定や特徴量の追加・削除等に関して検討が必要である。また、観測対象に重なってしまったノイズにも対応していかなければならない。他にも、気泡以外のノイズにも対応できるようにするためのノイズの識別条件の改良、実時間処理に近づけるための処理の高速化等が必要である。3次元計測に関しては、計測精度を向上させるために、左右画像の対応点探索手法の改良が必要である。

## 謝辞

本研究の一部は、財団法人中部電力基礎技術研究所、及び日本学術振興会科学研究費基盤研究(C)14550416の補助を受けた。

## 参考文献

- (1) 三宅一永, 米田政明, 長谷博行, 酒井充, 丸山博: “時間メディアンフィルタによる降雪ノイズ除去”, 画像電子学会誌, Vol.30, No.3, pp.251-259, 2001.
- (2) Yamashita, Kuramoto, Kaneko and T. Miura: “A Virtual Wiper -Restoration of Deteriorated Images by Using Multiple Cameras-“, Proceedings of the 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.3126-3131, 2003.
- (3) R.Li, H.Li, W.Zou, R.G.Smith and T.A.Curran: “Quantitative Photogrammetric Analysis of Digital Underwater Video Imagery”, IEEE Journal of Oceanic Engineering, Vol.22, No.2, pp.364-375, 1997.
- (4) 中山大介, 中野敦史, 金子透, 三浦憲二郎, 久保高啓: “ステレオ視によるガラス水槽中物体の3次元計測のための観測パラメータ取得”, 電子情

報通信学会論文誌 D-II, Vol.J84-D-II, No.12, pp.2684-2689, 2001.

- (5) Yamashita, Hayashimoto, Kaneko and Kawata: “3-D Measurement of Objects in a Cylindrical Glass Water Tank with a Laser Range Finder”, Proceedings of the 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.1578-1583, 2003.
- (6) Yamashita, Higuchi, Kaneko and Kawata: “Three Dimensional Measurement of Object's Surface in Water Using the Light Stripe Projection Method”, Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA04), 2004, to appear.
- (7) 島井博行, 栗田多喜夫, 梅山伸二, 田中勝, 三島健稔: “ロバスト統計に基づいた適応的な背景推定法”, 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol.J84-D-II, No.6, pp.796-806, 2003.
- (8) 長屋茂喜, 宮武孝文, 藤田武洋, 伊藤渡, 上田博唯: “時間相関型背景推定法による移動物体抽出”, 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol.J79-D-II, No.4, pp.568-576, 1996.
- (9) 波多野博康, 斉藤文彦: “時系列2次元エッジ差分評価に基づく動画背景生成”, 第5回動画画像処理実利用ワークショップ講演論文集, pp.107-112, 2004.
- (10) G.H.Ball, D.J.Hall: ISODATA-Novel Method of Data Analysis and Pattern Classification, Stanford Research Institute, 1965.
- (11) 高橋圭子, 阿部圭一: “ISODATA クラスタリング法を用いたカラー画像の領域分割”, 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol.J82-D-II, No.4, pp.751-762, 1999.