

ステレオカメラを用いた気泡ノイズにロバストな 水中環境センシング

○加藤 進 山下 淳 金子 透
静岡大学工学部機械工学科

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

○Susumu Kato, Atsushi Yamashita, Toru Kaneko
Department of Mechanical Engineering, Shizuoka University

Abstract: Sensing in underwater environments meets the difficulty that, when a camera is set in air behind a watertight glass plate, an image distortion occurs by refraction of light at the boundary surface between air and water. It has also the problem that air bubble noises sometimes disturb image processing. This paper proposes a robust sensing method, which is realized by “three-dimensional measurement that took refraction of light into account” and “accurate extraction of measurement object from bubble noises by image processing” in underwater environments.

Key Words: Underwater sensing, Stereo measurement, Bubble noises

1. 序論

近年、資源発掘や環境調査、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構造物等を正確に計測するための技術が求められるようになってきている。水中ロボット等から水中を撮影する場合、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。また、空気中にあるカメラで水槽中の物体を計測する場合にも、空気-ガラス-水と水中ロボットの場合同様の屈折系となる。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。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る (Fig.1)。

この問題に関して、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⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾。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



Fig.1 光の屈折の影響



Fig.2 気泡ノイズ

を実現した研究である。この手法を用いれば、原理的には水中での正確な計測が可能である。しかし、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 (Fig.2)。そのため、この手法を用いて水中の物体を計測するには、気泡等のノイズが存在する画像の中から、計測対象を精度良く抽出することが重要となる。

そこで本研究では、静止した状態の水中ロボットから水中の様子を観測する場合を想定し、気泡等のノイズが存在する場合にも、動いている計測対象を精度良く識別・抽出することを第1の目的とする。大きさや色等の特徴量を基にクラスタリングを用いて画像中の動物体を分類し、その中から計測対象だけを識別・抽出する。次に、画像から抽出した計測対象に関して光の屈折を考慮した3次元計測を行うことで、計測対象の3次元位置を正確に計測することを第2の目的とする。

本研究では、水中カメラと同様の空気-ガラス-水の屈折系における計測手法を構築することを目指す。具体的には、空気中にあるステレオカメラを用いて水で満たされた水槽中の物体の計測を行い、提案手法の有効性を検証する。

2. 画像処理による計測対象の識別

提案手法の概要を Fig.3 に示す。本手法では、まず、背景差分法により撮影画像から動物体を抽

出し、その動物体をクラスタリングにより分類する。次に、その分類した中から観測対象だけを識別し、それをもとに観測対象の3次元位置を計測する。

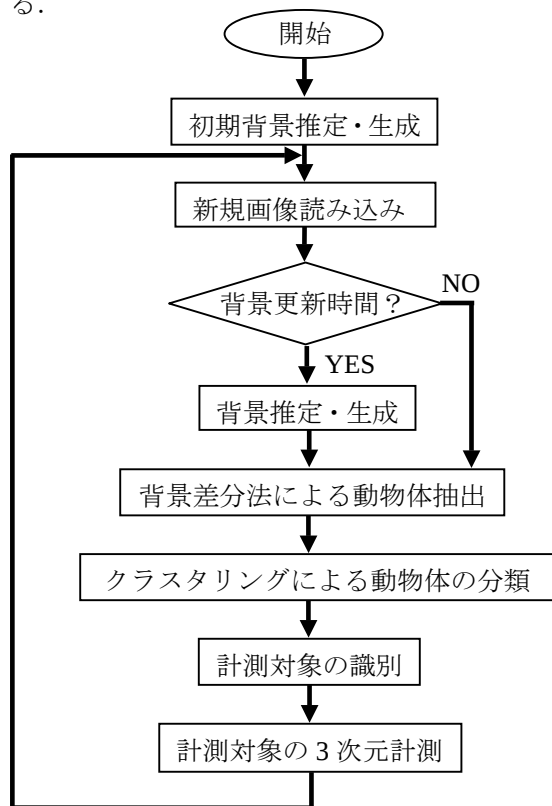


Fig.3 提案手法の概要

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⁽⁵⁾⁻⁽⁷⁾。本研究では、時系列輝度ヒストグラムを用いた背景推定・生成を行う。

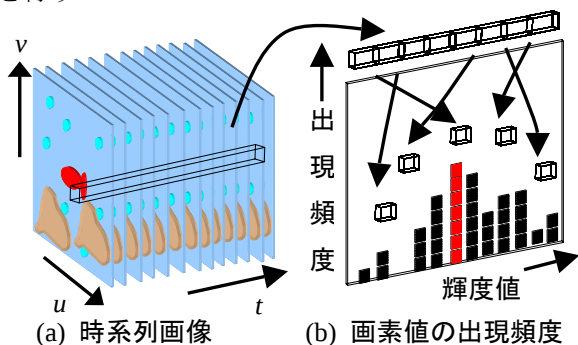


Fig.4 背景推定・生成

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であるとする (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する必要がある。しかし、各画素を時系列で見ていくと上記で求めた輝度値を持つ画素は複数あり、また輝度値とRGB値の対応は一对一ではないので、背景画素のRGB値の組は複数組存在することになる。本手法では、それらの平均値を背景画素のRGB値とする。

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)。

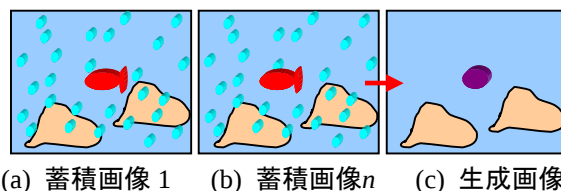


Fig.5 背景推定・生成の例

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取り、ある閾値以上の部分を抽出する (Fig.6)。

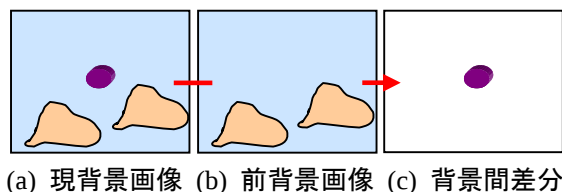
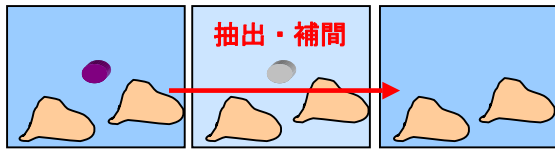


Fig.6 背景画像の時系列差分

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。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完することにより除去する (Fig.7)。



(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

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⁽⁸⁾ (Iterative Self Organizing Data Analysis techniques A) を用いる。

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。本研究では、文献⁽⁹⁾を参考に改良を加え、Fig.8 に示すような流れで分類を行った。

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）を特徴量として与える。

2.3 計測対象の識別

本研究では、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以上のクラスを気泡ノイズのクラスとし、それ以外のクラスに属する動物体を計測対象であると認識させる。

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⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾を用いることで対処する。

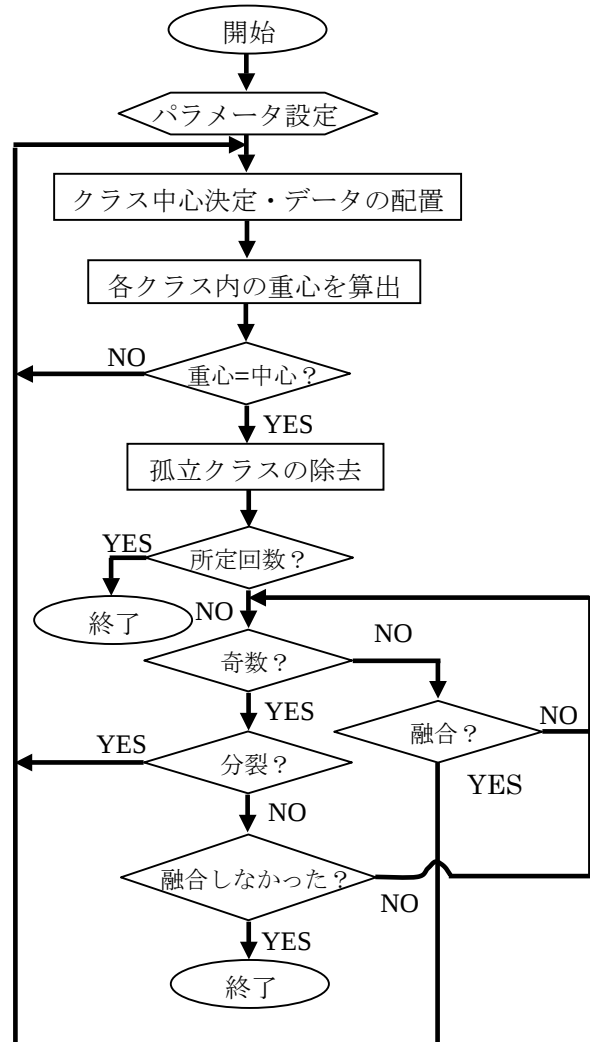


Fig.8 ISODATA法

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、つまりは計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。重心位置を求める際、Fig.9 (a) に示すように計測対象の周りに気泡の一部が残ってしまい、正確に計測対象が抽出できない場合がある。このままだと重心位置もずれてしまうため、本手法では、前の時間

のフレームと現在のフレームで計測対象の位置合わせをし、論理積を取って余分な画素を取り除くことによりこの問題を解決している (Fig.9 (c)) .

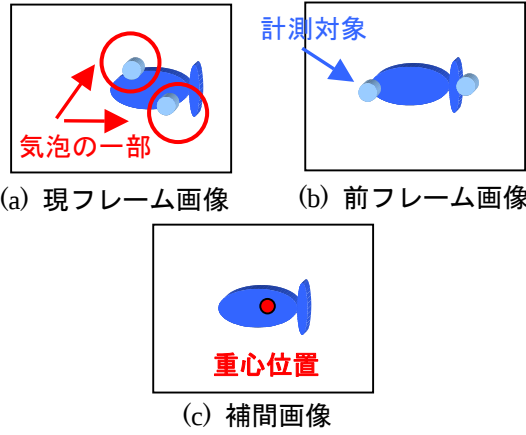


Fig.9 左右画像の対応点探索

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.10 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 θ_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 θ_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.

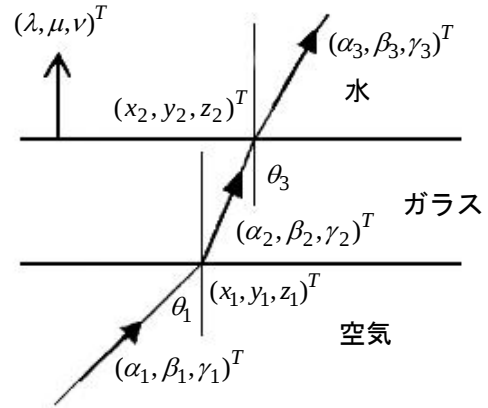


Fig.10 ガラス面での光の屈折

4. 実験

4.1 実験装置

本研究では, 静止した状態の水中ロボットから水中の様子を観測する場合を想定している. また, 撮影画像には, 突発的に気泡ノイズが映り込む場合があるとする. 今回, 実験を行うにあたって, 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) を用いて, 水中ロボットと同等の屈折系を持つ環境を空気中に再現した (Fig.11). 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 $\times$ 3) を 2 台使用し, 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 $\times$ 240 pixel, 30fps, 撮影時間は 60~120s とした. また, 新たな背景の更新間隔は 0.33s に 1 回とした.



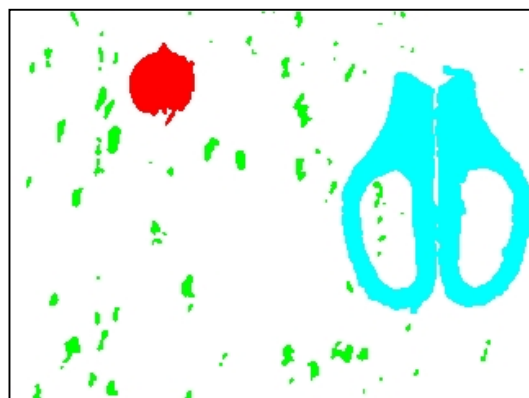
Fig.11 実験環境

4.2 計測対象の識別・抽出結果

赤い柄のはさみと木球が混在する場合について実験した結果を次に示す。対象画像を Fig.12 (a)に示す。次に、画像中の動物体を分類した画像を Fig.12 (b)に示す。最後に気泡ノイズを除去し、計測対象のみを抽出した画像を Fig.12 (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。実験結果を見ると、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、正確に計測対象を識別・抽出できているのが確認できる。



(a) 対象画像



(b) クラスティング画像



(c) 識別・抽出画像

Fig.12 実験結果

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次元位置を計測した (Fig.13)。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、その移動経路と計測結果を比較した。

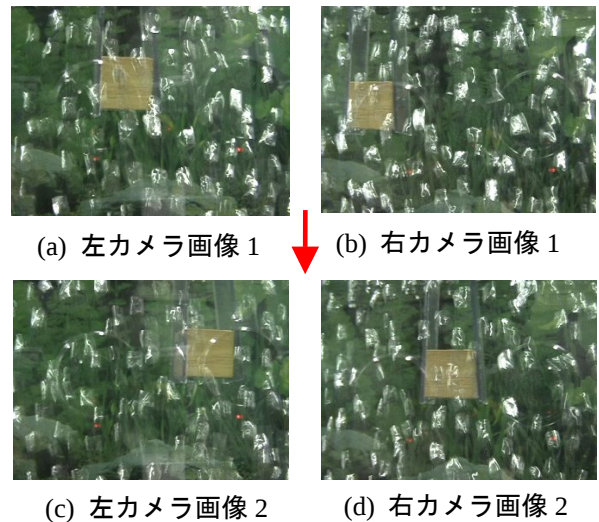
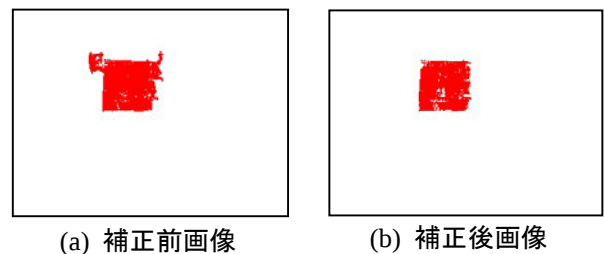


Fig.13 対象画像

Fig.13 (a)を形状補正をした結果をFig.14に示す。これを見ると、形状補正により計測対象本来の形状により近い形で抽出されていることがわかる。



(a) 補正前画像

(b) 補正後画像



(c) 識別・抽出画像

Fig.14 計測対象の形状補正

3次元位置計測結果をFig.15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20～30mm手前側に近づいて計測されているのに対し、屈折率を考慮した場合は、実際の経路近辺に計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奥行き方向で 10mm 程度の誤差が生じている。また、全体的に計測結果にばらつきも見られる。本研究では、ステレオ計測の際の対応点探索に、簡単のため、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。上記の誤差は、この手法によって決定された対応の曖昧さから来るものであると考えられる。

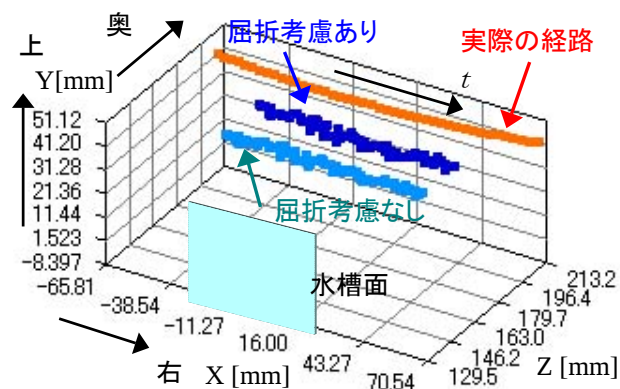


Fig.15 3次元位置追跡結果

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計測対象だけを識別・抽出することで、気泡ノイズに影響されない水中環境計測手法を提案した。実験結果より、比較的良好な精度で計測対象の識別・抽出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。

一方、計測対象の抽出・識別に関して、異なる動物体が混在するような場合においては誤分類が起りやすくなっており、安定した計測対象の抽出・識別が困難になっている。また、現状では処理時間も比較的にかかるため、今後、計測対象の識別・抽出手法を改良していく必要がある。また、3次元計測に関しても、左右画像の対応点探索等、計測精度に対しての更なる検討が必要であると考えられる。

謝辞

本研究の一部は、財団法人中部電力基礎技術研究所の補助を受けた。

参考文献

- (1) 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.
- (2) 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.
- (3) A. Yamashita, Y. Hayashimoto, T. Kaneko and Y. 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.
- (4) A. Yamashita, H. Higuchi, T. Kaneko and Y. 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*, pp.2736-2741, 2004.
- (5) 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.
- (6) 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.
- (7) 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.
- (8) G. H. Ball and D.J.Hall: *ISODATA-Novel Method of Data Analysis and Pattern Classification*, Stanford Research Institute, 1965.
- (9) 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.