

複光路単眼ステレオによる 直方体容器中の水中物体の3次元計測*

伊部公紀** 小林祐一** 金子 透*** 山下 淳***

Three-Dimensional Measurement of Underwater Objects in a Rectangular Vessel by Using Bi-Path Stereoscopy

Hirotoishi IBE, Yuichi KOBAYASHI, Toru KANEKO and Atsushi YAMASHITA

It is important to measure shape of objects in a transparent vessel for 3D digital preservation of underwater creatures. We propose a measurement method using a bi-path stereoscopic image of the objects acquired with a monocular camera via rectangular vessel planes. The method estimates the posture of rectangular planes based on bundle adjustment considering light refraction, and measures the 3D shape of underwater objects using ray tracing. Experimental results demonstrated the effectiveness of the proposed method.

Key words: underwater measurement, bi-path stereoscopy, monocular camera, bundle adjustment, ray tracing, Fermat's principle, Snell's law, digital archive

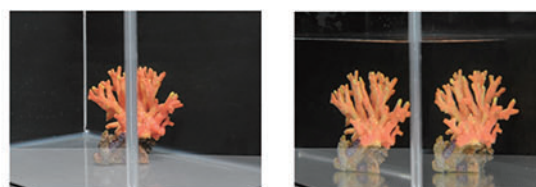
1. 序 論

計測技術の発展に伴い、歴史的な建造物などの3次元形状を計測しデジタルアーカイブとして保存する試みが進められている¹⁾。従来研究の多くは空気中に置かれている物体を対象としているが、容器内で飼育される希少な水中生物のアーカイブ化ができれば、生物研究や教育分野への応用が期待できる。

水中生物は傷付き易いため容器から取り出さずに、容器越しに非接触で3次元計測する手法が必要となる。ソナーを用いた手法は、水中において非接触かつ遠距離の計測が可能であるが、容器内のような近距離かつ狭所の空間では干渉の影響により計測に適さない。そこで、カメラ画像を用いる画像計測手法は、容器越しに撮影した水中物体の画像から非接触に3次元形状や色情報を計測できることから、これまでに様々な水中環境下における画像計測手法が提案されている^{2)~7)}。

複数台のカメラを用いた受動的ステレオ法やカメラと光源を組合せた能動的ステレオ法は、高精度ではあるが装置が複雑かつ高価になることや装置間の位置姿勢関係の校正が必要となる。一方、単眼カメラに光の進行経路を2つ生じさせる複プリズムなどを取り付けることで3次元計測する手法がある⁸⁾⁹⁾。この手法はカメラ1台で計測できるため廉価であり、カメラ間の色調整が不要となる利点があるが、複プリズムなどの器具が必要となる。また、複数台の装置を使う場合と同様に、計測を行う前に器具とカメラ間の位置姿勢を校正する必要がある⁸⁾。

水槽として広く用いられる直方体形状の容器の四隅の角から容器内の水中物体を観察すると、角を構成する2面が複光路となることでステレオ像が得られることに着目する。図1は直方体形状容器の角越しに容器内に設置した物体を撮影した画像である。水がない状態では容器内の物体が1つの像として撮影さ



(a) Without Water

(b) Filled with Water

Fig.1 Bi-path Stereoscopy via Rectangular Vessel

れるが、水で満たされている状態では物体が光の屈折により容器の角を構成する2つの面のそれぞれを通過することでステレオ像となることが確認できる。このようなステレオ画像を複光路単眼ステレオ画像と呼ぶことにする。本論文では、容器の特性を利用し、1台のカメラを用いて容器の角越しに撮影した水中物体の複光路単眼ステレオ画像から水中物体の3次元形状を計測する廉価かつ簡便な計測手法の構築を目的とする。

水中物体を画像計測するには、光の進行方向が変化する屈折現象を考慮する必要がある。容器越しに水中物体を撮影する場合、水中物体からの光は水と容器（アクリルなど）および容器と空気が接する2つの屈折境界面で光が屈折する。光の屈折を考慮して水中物体の位置を正確に計測するために、光線追跡とスネルの法則を用いることでカメラ画像側から水中環境へと光の経路を調べる手法が提案されている¹⁰⁾。

スネルの法則により光の屈折方向を求めるには、屈折境界面となる容器の形状や位置姿勢の情報が必要となる。Liら¹⁰⁾は、水中に既知形状物体を配置し、得られた画像から光線追跡を行った結果が既知形状と一致するように屈折境界面を推定する方法を提案している。この方法は、水中ロボットなどハウジングとカメラとの関係を事前に校正できる場合は有効だが、容器中の水中物体を計測する場合には既に容器内に水中物体が存在することが多く、既知形状物体を容器内に配置する際に水中物体を傷つけるリスクや水中物体と容器との間隔が狭い場合に既知形状物体を配置できないことがある。

* 原稿受付 平成 27 年 3 月 17 日

掲載決定 平成 27 年 7 月 13 日

** 正 会 員 静岡大学大学院工学研究科
(静岡県浜松市中区城北 3-5-1)

*** 正 会 員 東京大学大学院工学系研究科
(東京都文京区本郷 7-3-1)

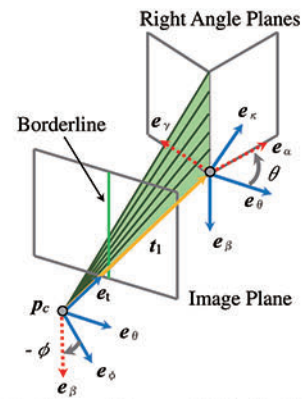
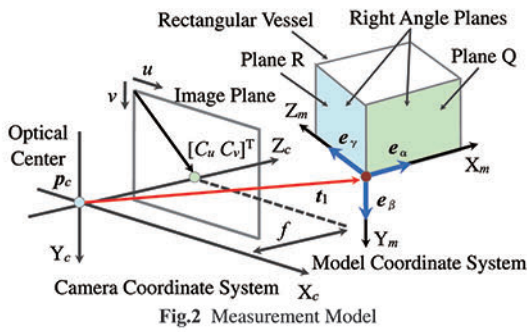


Fig.2 Measurement Model

Fig.3 Position and Posture of Right Angle Planes

著者らは、カメラとレーザを用いて容器の形状と水中物体の両方を計測する手法⁷⁾を提案したが、この方法は移動する水中生物には適用できない。未知形状の水中物体の画像からバンドル調整により屈折境界面の位置姿勢を推定する手法が提案されている¹¹⁾。この手法は、ステレオカメラを用いて平面の容器越しに撮影したステレオ画像から平面の位置姿勢を推定する。本論文では、容器の角を構成する2つの面の位置姿勢を、角越しに撮影した複光路単眼ステレオ画像上の水中物体の対応点の組からバンドル調整を用いて推定する手法を提案する。これにより、既知形状物体を用いずに1台のカメラを用いて水中物体の3次元形状を計測する。また、1台のカメラによる計測では一般にスケールが未知となるが、画像上に映る容器の一部の情報からスケールを推定する手法も合わせて提案する。

2. 計測モデル

本研究では、容器の角が直角に2つの平面が交わる直角面であると仮定し、直方体容器の直角面越しに校正済の単眼カメラを用いて容器内の水中物体を撮影した複光路単眼ステレオ画像から水中物体の3次元形状を計測する。光の屈折を考慮して計測するためには光が屈折する直角面の位置姿勢情報が必要となるが、本研究では画像中に映る容器と水中物体の視覚的特徴から直角面の位置姿勢を推定する。

図2にカメラと容器の直角面の位置姿勢関係を表す計測モデルを示す。計測にはカメラ座標系 $X_c Y_c Z_c$ とモデル座標系 $X_m Y_m Z_m$ の2つを用いる。カメラ座標系はカメラの光学中心 p_c を原点とし、 Z_c 軸はカメラの光軸と一致させ、撮像面と平行となるように X_c 軸と Y_c 軸を設定する。また、カメラを透視投影モデルにより表し、光学中心から撮像面までの光軸方向の距離を像距離（焦点距離とも呼ばれる） f により表す。撮像面上の画像座標を画像の左上を原点として $[u \ v]^T$ と表し、光軸と撮像面との交点となる画像中心の画像座標を $[C_u \ C_v]^T$ と表す。なお、 T は転置記号である。

水中物体の複光路単眼ステレオ画像を撮影する直方体容器の直角面を構成する2つの平面のうち、右の平面を面Qと呼び、左の平面を面Rと呼ぶことにする。モデル座標系を直角面の角上の位置を原点とし、 Y_m 軸を直角面の角に沿った方向に一致させ、 $X_m Y_m$ 平面を面Qに沿って配置し、 $Y_m Z_m$ 平面を面Rに沿って配置する。

カメラ座標系におけるモデル座標系の原点位置を t_1 により表す。また、カメラ座標系におけるモデル座標系の各軸方向の単位基底ベクトルを e_α 、 e_β および e_γ により表す。これにより、モデル座標系上の位置 x_m からカメラ座標系上の位置 x_c

への変換は次式により表される。

$$\begin{bmatrix} x_c \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_m & t_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_m \\ 1 \end{bmatrix}, \quad R_m = \begin{bmatrix} e_\alpha & e_\beta & e_\gamma \end{bmatrix} \quad (1)$$

直角面の位置姿勢は位置ベクトル t_1 およびモデル座標系の単位基底ベクトル e_α 、 e_β および e_γ により表すことができる。ここで、直角面の角には容器の支柱やアクリルの接合部などが存在し、画像上で直角面の角を直線として観察できると仮定する。この直線を面Qと面Rの境目であることから境界直線と呼ぶことにする。画像上において境界直線は水平にならないものとし、次式により表す。

$$u = a_s v + b_s \quad (2)$$

なお、 a_s および b_s は直線のパラメータである。

境界直線を用いて直角面の位置姿勢情報に関する未知パラメータの数を低減させる。図3に境界直線と直角面の位置姿勢との関係を示す。画像座標 $[u \ v]^T$ を通過する光学中心からの光線方向ベクトル v_c は次式により求められる。

$$v_c = \begin{bmatrix} \frac{u - C_u}{f_u} & \frac{v - C_v}{f_v} & 1 \end{bmatrix}^T \quad (3)$$

ただし、 f_u および f_v は水平方向の画素ピッチ δ_u と垂直方向の画素ピッチ δ_v により像距離 f をそれぞれピクセル単位で表現したものであり、 $f_u = f/\delta_u$ および $f_v = f/\delta_v$ である。

ここで、 $t_1 = [t_x \ t_y \ t_z]^T$ が $Z_c X_c$ 平面内にあるものとし、 $t_y = 0$ とする。境界直線は直角面の角上の点が撮像面上に投影された直線であるため、直角面の角上の位置を表す t_1 を撮像面上に投影した画像座標は式(2)を満たす。よって、 $t_z = 1$ としたときの位置ベクトル t_{z1} は式(2)および式(3)から次式により表される。

$$t_{z1} = \begin{bmatrix} -C_u + a_s C_v + b_s & 0 & 1 \end{bmatrix}^T \quad (4)$$

t_1 と t_{z1} は同一方向ベクトルであるから、 t_{z1} を正規化して t_1 の単位方向ベクトル e_t を得る。また、カメラと直角面間の距離をスケール ρ_t により表すことで $t_1 = \rho_t e_t$ となる。

次に、直角面の姿勢について考える。境界直線上の各点から式(3)により求めた光線ベクトルはいずれも直角面の角と交差する。よって、境界直線上の点群から得られる方向ベクトルの集合により構成される平面（面Φ）内に、直角面の角の方向を表す単位基底ベクトル e_β が含まれることがわかる。

e_β を求めるために、面Φ内における直交する2つの単位ベクトルを作る。ここで、 e_t が面Φに含まれるため、 e_t に

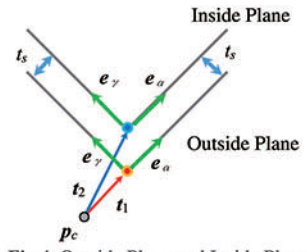


Fig.4 Outside Plane and Inside Plane

直交する面 Φ 内におけるベクトルを求める。まず、境界直線上の画像座標 $[b_s \ 0]^T$ から式 (2) により面 Φ 内のベクトル v_{v0} を求める。 v_{v0} および e_t から面 Φ の単位法線ベクトル $e_\theta = (e_t \times v_{v0}) / \|e_t \times v_{v0}\|$ を求める。これにより、面 Φ 内において e_t と直交する単位ベクトル $e_\phi = e_t \times e_\theta$ を得る。得られた e_ϕ を基準にし、 e_θ 周りの回転角 ϕ を用いて $e_\beta = (\cos \phi) e_\phi + (\sin \phi) e_t$ とする。

e_β が決定すれば残りの単位基底ベクトルは e_α および e_γ となる。 e_β に直交する平面 (面 Θ) を考え、面 Θ 内における直交する2つのベクトルを作る。面 Θ 内のベクトルとして e_θ を選び、 e_θ に直交するベクトル $e_\kappa = e_\theta \times e_\beta$ を作る。これにより、 e_β 周りの回転角 θ を用いて $e_\alpha = (\cos \theta) e_\theta + (\sin \theta) e_\kappa$ および $e_\gamma = (-\sin \theta) e_\theta + (\cos \theta) e_\kappa$ とする。

以上により、直角面の位置姿勢はスケールパラメータ ρ_t と姿勢を決定する2つのパラメータ ϕ および θ の3つの未知パラメータにより記述される。なお、以上の直角面の位置姿勢は容器と空気が接する表面部分についての記述となるが、光の屈折は表面だけでなく容器と水が接する裏面部分でも生じるため、裏面における直角面の位置姿勢についても記述する必要がある。図4に直角面の表面と裏面の位置姿勢関係を示す。本研究で対象とする直方体容器は表面と裏面が平行でその厚みを既知とする。また、面Qと面Rのそれぞれの厚みは等しく t_s と表す。表面と裏面は平行であることからその姿勢は一致する。よって、表面の位置ベクトル t_1 および容器の厚み t_s から裏面の位置 $t_2 = t_1 + t_s (e_\alpha + e_\gamma)$ が求まる。

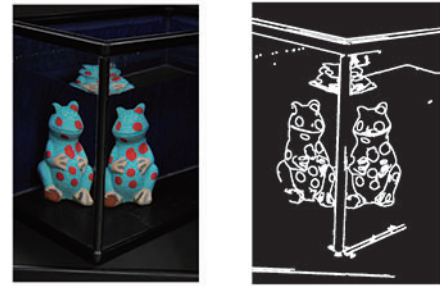
3. 提案手法

3.1 処理手順

校正済の単眼カメラを用いて容器の直角面越しに水中物体の複光路単眼ステレオ画像を取得する。取得画像には、直角面を構成する2つの面のそれぞれを通過した水中物体の像がステレオ画像として映る。そこで、ステレオ画像を分離して扱うためにステレオ画像の境界となる直線 (境界直線) を抽出する。光の屈折を考慮して水中物体の3次元計測を行うために、撮影に用いるカメラと容器の直角面との位置姿勢関係を推定する。

位置情報は、カメラから直角面への単位方向ベクトルとその長さとなるスケールによって表す。直角面への単位方向ベクトルは、取得画像から得られた境界直線情報から求める。なお、位置姿勢推定では単眼カメラのスケール不定性のため、カメラと直角面間の距離を基準とし、スケールを1とする。

次に、SIFT特徴量を用いて取得画像上で水中物体の同一点を表す対応点の組を複数抽出し、対応点の情報から光の屈折を考慮した光線追跡と再投影処理に基づいたバンドル調整を行うことで直角面の姿勢を推定する。また、推定された直角面の位置姿勢情報から容器の寸法を既知とすることでスケール情報を求める。最後に、直角面の位置姿勢情報を用いて、ステレオ



(a) Original

(b) Edges



(c) Lines



(d) Borderline

Fig.5 Detection of Borderline

マッチングにより水中物体の密な3次元形状計測を行う。

3.2 境界直線抽出

直方体容器の直角面越しに撮影した複光路単眼ステレオ画像から直角面の境界直線を抽出する。本研究では図1のように角に支柱を有している容器を対象とし、支柱の両端を平行線として抽出し、その中心線を境界直線として抽出する。図5に境界直線抽出の処理過程を示す。

前処理として取得画像に歪曲補正とバイラテラルフィルタによる平滑化を適用し、画像上の幾何学的な歪みの補正と輝度のノイズ除去を行う。図5(a)に取得した複光路単眼ステレオ画像に前処理を施したものを示す。

平行線抽出のために、Cannyのエッジ検出法¹²⁾を用いてエッジを検出し、検出されたエッジからHough変換¹³⁾を用いて直線群を抽出する。図5(a)から検出したエッジを図5(b)に、Hough変換により抽出した直線を図5(c)に示す。

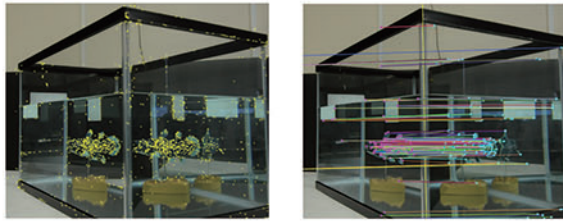
Hough変換により抽出した直線は画像上の左上原点から直線までの垂直距離 ρ_h と画像の水平軸を基準とした角度 θ_h により表される。これを式(2)に示す直線パラメータ a_s および b_s の組に以下の式を用いて変換する。

$$a_s = -\tan \theta_h \tag{5}$$

$$b_s = \rho_h (\cos \theta_h - a_s \sin \theta_h) \tag{6}$$

境界直線は垂直方向にあるものと仮定し、 $|\cos \theta_h| \geq \xi_h$ を満たす直線を平行線の候補として絞り込む。なお、 ξ_h は平行線の候補を絞り込むための閾値である。

ここで、抽出する平行線は近接した2本の直線の組と定義し、抽出された直線群から平行線を抽出する。直線群から着目する直線を選択し、その直線パラメータを a_{sb} および b_{sb} とする。着目した直線を除いた直線群から候補となる直線を取り出



(a) Feature Points (b) Matched Points

Fig.6 Detection Process of Corresponding Points

し、その直線パラメータを a_{sp} および b_{sp} とし、傾きの差の絶対値が $|a_{sp} - a_{sb}| \leq \xi_a$ を満たした直線で、切片の差の絶対値 $b_{dif} = |b_{sp} - b_{sb}|$ が最小となるものを、着目した直線と対となる平行直線として抽出する。このとき、 ξ_a は直線の傾きの差を許容するための閾値であり、3次元空間上の2直線が画像上に投影されることで平行性が失われることを考慮して設定する必要がある。抽出された平行線が複数組存在する場合は b_{dif} が最大となる平行線を選択する。

抽出された平行線の2直線のパラメータをそれぞれ a_{sl} , b_{sl} および a_{sr} , b_{sr} とすると、境界直線のパラメータ a_s , b_s は以下の式により求める。

$$a_s = (a_{sl} + a_{sr}) / 2 \quad (7)$$

$$b_s = (b_{sl} + b_{sr}) / 2 \quad (8)$$

図 5(d) に抽出された平行線と境界直線を示す。容器の支柱に沿った平行線が抽出され、それらの中間線として境界直線が得られた。

3.3 対応点抽出

バンドル調整¹⁴⁾を用いて直角面の姿勢推定を行うために、ステレオ画像から水中物体上の同一点を表す画像座標の組により表される対応点を抽出する。対応点抽出は、ステレオ画像から輝度変化や回転変化およびスケール変化にロバストな SIFT¹⁵⁾ と呼ばれる手法を用いて特徴点を抽出し、得られた特徴点をマッチングすることにより行う。

図 6(a) に SIFT を用いて抽出した特徴点群を示す。SIFT により抽出された特徴点群は画像全体から抽出したものであるため、これらの点群を直角面の面 Q に対応する点群と面 R に対応する点群に分離する。SIFT 特徴点の画像座標を $\mathbf{u}_f = [u_f \ v_f]^T$ 、面 Q に対応する特徴点を \mathbf{u}_q および面 R に対応する特徴点を \mathbf{u}_r と表すものとする。画像から抽出された境界直線のパラメータ a_s および b_s を用いて、 \mathbf{u}_f が $\mathbf{u}_f - (a_s v_f + b_s) > 0$ を満たすとき \mathbf{u}_f を \mathbf{u}_q に分類し、満たさなければ \mathbf{u}_r に分類する。

なお、境界直線付近の特徴点は容器の支柱部分の特徴点であるため、特徴点 \mathbf{u}_f と境界直線との垂直距離 L_u が $L_u < \delta_u$ となる \mathbf{u}_f は特徴点から除外する。 δ_u は支柱付近の特徴点を除外するための閾値であり、支柱の厚みを考慮して与える必要がある。また、 L_u は以下の式により求められる。

$$\mathbf{u}_L = \frac{1}{1 + a_s^2} \begin{bmatrix} a_s^2 u_f + a_s v_f + b_s \\ a_s u_f - a_s b_s + v_f \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$L_u = \|\mathbf{u}_f - \mathbf{u}_L\| \quad (10)$$

分離された面 Q と面 R のそれぞれの特徴点群の中から対応

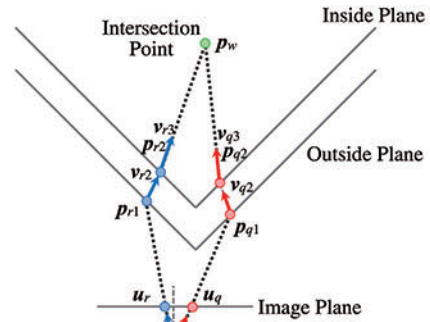


Fig.7 Ray Tracing

する特徴点の対となる対応点を抽出する。ここでは、面 Q の特徴点群を基準とし、各特徴点について面 R の特徴点群の中から対応する特徴点を探索する。SIFT により抽出された特徴点には 128 次元ベクトルの特徴量が記述される。2 つの特徴点の特徴量ベクトル間の距離が最小となる特徴点を探索することで対応点を得る。しかし、類似した特徴量を持つ特徴点が複数存在する場合やオクルージョンなどによって対応する特徴点が存在しない場合などに誤対応を生じる可能性があるため、対応付けに条件を設定する必要がある。

図 1(b) に示すように、複光路単眼ステレオ画像では容器の角に対応する境界直線を境に境界直線の垂直方向に複光路像が生じる。厳密には光の屈折により対応する複光路像の位置は境界直線の垂直方向から差異が生じるが、境界直線方向において近接した領域内に存在する特徴点に探索を絞ることで誤対応のリスクを低減することが期待できる。面 Q の特徴点 \mathbf{u}_q および面 R の特徴点 \mathbf{u}_r のそれぞれを境界直線上に垂直に下ろした点を \mathbf{u}'_q および \mathbf{u}'_r とすると、 \mathbf{u}'_q と \mathbf{u}'_r との距離 D_{qr} は以下の式により求められる。

$$D_{qr}(\mathbf{u}_q, \mathbf{u}_r) = \left| \frac{\langle \mathbf{a}, \mathbf{u}_q - \mathbf{u}_r \rangle}{\|\mathbf{a}\|} \right| \quad (11)$$

ただし、 $\langle \mathbf{x}, \mathbf{y} \rangle$ はベクトル \mathbf{x} , \mathbf{y} の内積を表し、 $\mathbf{a} = [a_s \ 1]^T$ である。これにより、特徴点 \mathbf{u}_q の対応点探索では $D_{qr}(\mathbf{u}_q, \mathbf{u}_r) < \delta_{qr}$ を満たす特徴点 \mathbf{u}_r のみを候補とすることで誤対応の低減を図る。なお、 δ_{qr} は探索範囲を限定するための閾値である。これにより面 Q の特徴点と面 R の特徴点のマッチングを行い、最も特徴量が類似する特徴点を対応点として抽出する。図 6(a) から抽出された対応点群を図 6(b) に示す。

3.4 直角面の姿勢推定

3.4.1 バンドル調整

得られた対応点群を用いてバンドル調整¹⁴⁾により直角面の姿勢パラメータ ϕ および θ を推定する。対応点となる 2 つの画像座標は水中物体上の同一点を表し、同一点からの光が直角面を構成する 2 面のそれぞれを通過および屈折してカメラの撮像面上に投影されたものである。よって、複数組の対応点のそれぞれについてカメラ側から水中環境へと逆側に光線追跡を行い、水中内で光線が交差する条件を探索することで直角面の姿勢を推定する。なお、単眼カメラのスケール不正性から姿勢推定の段階ではカメラから直角面までの距離をスケールの基準とし、スケールパラメータを $\rho_t = 1$ とする。

対応点からの光線が水中内で交差または近接していることを評価する指標として再投影誤差和を用いる。再投影誤差和は対

応点の画像座標と対応点から光線追跡して得られた交点を再度撮像面へと再投影した画像座標とのユークリッド距離をすべての対応点について総和したものである。再投影誤差和を最小とするパラメータを探索し、それを姿勢パラメータとして推定する。

対応点の2つの画像座標を u_q および u_r としたとき、水中環境下への光線追跡の模式図を図7に示す。光線を位置ベクトルと単位方向ベクトルにより表し、 u_q を通る光線は面 Q を経由し、 u_r を通る光線は面 R を経由して追跡する。

u_q からの光線追跡について述べる。空気中における光線の位置ベクトルは光学中心の位置 p_c であり、単位方向ベクトル v_{q1} は式(3)から求まるベクトルを正規化することで得られる。容器媒質中における光線の位置ベクトル p_{q1} は空気中における光線と面 Q の表面との交点として求められる。容器媒質中における光線の単位方向ベクトル v_{q2} は空気と容器と屈折率の異なる媒質を通過するため屈折により v_{q1} とは方向が異なる。

入射単位方向ベクトルを v_i 、屈折単位方向ベクトルを v_o 、屈折境界面の単位法線ベクトルを m とし、入射側媒質の屈折率を n_i および屈折側媒質の屈折率を n_o とすると、 v_o はスネルの法則により以下の式で求められる。

$$v_o = \kappa_1 v_i + \kappa_2 m \quad (12)$$

$$\kappa_1 = \frac{n_i}{n_o} \quad (13)$$

$$\kappa_2 = \sqrt{1 - \kappa_1^2 \sin^2 \omega} - \kappa_1 \cos \omega \quad (14)$$

ただし、 ω は入射角を表し、 $\cos \omega = \langle v_i, m \rangle$ である。 v_{q2} は空気を入射側、容器を屈折側とすることで式(12)により求められる。水中における光線の位置ベクトル v_{q3} および単位方向ベクトル p_{q2} は表面における計算と同様に求められる。

対応点のもう1つの画像座標 u_r から水中への光線追跡は面 R の単位法線ベクトルが e_α となる違いがあるが、 u_q からの光線追跡と同様の手順により水中における位置ベクトル p_{r2} および v_{r3} を求めることができる。

水中における面 Q 経由の光線 (p_{q2}, v_{q3}) と面 R 経由の光線 (p_{r2}, v_{r3}) の交点 p_w を光線の最近接点間の midpoint として以下の式により求める。

$$p_w = \frac{1}{2} [(\tau_q v_{q3} + p_{q2}) + (\tau_r v_{r3} + p_{r2})] \quad (15)$$

$$\tau_q = -\frac{\eta_e - \eta_c + \eta_a (\eta_b - \eta_d)}{1 - \eta_a^2} \quad (16)$$

$$\tau_r = \tau_q \eta_a + \eta_d - \eta_b \quad (17)$$

ただし、 $\eta_a = \langle v_{q3}, v_{r3} \rangle$, $\eta_b = \langle p_{r2}, v_{r3} \rangle$, $\eta_c = \langle p_{r2}, v_{q3} \rangle$, $\eta_d = \langle p_{q2}, v_{r3} \rangle$ および $\eta_e = \langle p_{q2}, v_{q3} \rangle$ である。

次に、求められた水中における光線の交点 p_w を面 Q および面 R のそれぞれを通過させて撮像面へと再投影した画像座標を求める。光線追跡では画像座標からの光線方向が得られることからスネルの法則により水中までの光線の経路を計算することができるが、水中内の位置から空気中への投影では光線の方向ベクトルが得られないため数値解析的に経路を求める必要がある。

水中の位置 p_w からの光線が撮像面へ入射するには空気中における光線がカメラの光学中心 p_c を通過しなければならない。 p_w から p_c までの光線の経路はフェルマーの原理により光の移動時間が最小となる経路になるため、 p_w から p_c までの光線が通過する各媒質ごとの光学的距離の和 L_s を最小化する

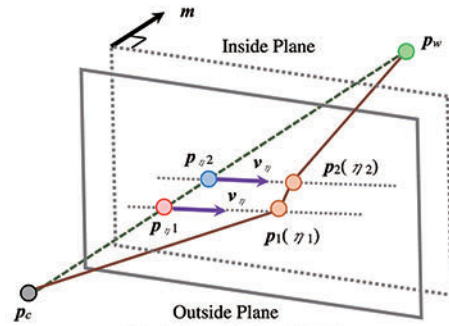


Fig.8 Reprojection Model

ことで光線の経路を算出する。なお、光学的距離は各媒質の屈折率と光の伝播距離を掛け合わせたものであり、移動時間の最小化と光学的距離の最小化は等価である。 L_s を次式に示す。

$$L_s = n_w L_w + n_g L_g + n_a L_a \quad (18)$$

ただし、 n_w , n_g および n_a はそれぞれ水、容器そして空気の屈折率である。また、 L_w , L_g および L_a は光が各媒質を伝播する距離である。

図8に p_w から p_c への経路を算出する幾何学モデルを示す。光の経路を決定するための制御点を屈折境界面である容器の表面と裏面のそれぞれに設定し、表面の制御点を p_1 および裏面を p_2 とする。これらの制御点はそれぞれの平面上に拘束されるため一般には4パラメータの推定問題となる。ここで、表面と裏面が平行な平面であり法線方向が一致することに着目すると、光の経路は面の単位法線ベクトル m と $(p_w - p_c)$ が成す平面内に限定され、制御点の位置はその面と表面および裏面との交線に拘束される。

制御点を拘束する交線の単位方向ベクトル v_η は表面および裏面で等しく、次式により求められる。

$$v_\eta = \frac{m \times (m \times (p_w - p_c))}{\|m \times (m \times (p_w - p_c))\|} \quad (19)$$

また、表面における交線の位置ベクトル $p_{\eta 1}$ は $p_w - p_c$ と表面との交点位置に設定し、裏面における交線の位置ベクトル $p_{\eta 2}$ は $p_w - p_c$ と裏面との交点位置に設定する。よって、交線上の制御点は媒介変数 η_1 および η_2 を用いることにより以下の式により表される。

$$p_1(\eta_1) = \eta_1 v_\eta + p_{\eta 1} \quad (20)$$

$$p_2(\eta_2) = \eta_2 v_\eta + p_{\eta 2} \quad (21)$$

以上により、式(18)を最小とする η_1 および η_2 を求め、得られた容器表面の制御点 p_1 を画像上に投影することで再投影画像座標を算出する。

任意の姿勢パラメータ ϕ および θ を設定したとき、抽出された N 組の対応点群の i 番目の対応点から再投影誤差 $J_i^{\phi, \theta}$ を求め、すべての対応点における再投影誤差の和 $J_S^{\phi, \theta}$ を次式により求める。

$$J_S^{\phi, \theta} = \sum_{i=1}^N J_i^{\phi, \theta}, J_i^{\phi, \theta} = \|u_{qi} - u_{qi}^*\| + \|u_{ri} - u_{ri}^*\| \quad (22)$$

u_{qi} および u_{ri} は抽出された対応点の画像座標であり、これらの座標から光線追跡と再投影を行って得られる再投影画像座標を u_{qi}^* および u_{ri}^* とする。 $J_S^{\phi, \theta} \rightarrow \min$ となる ϕ および θ を直角面の姿勢パラメータとして推定する。

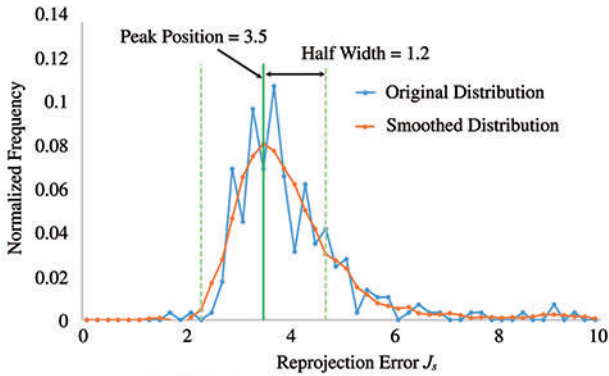


Fig.9 Distribution of Reprojection Error



Fig.10 Removed Error Matching Points

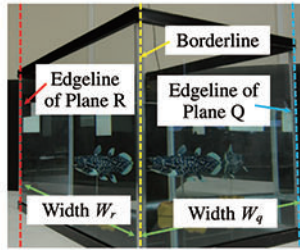


Fig.11 Scale Estimation

3.4.2 誤対応除去

図 6(b) に示すように抽出された対応点群の中には誤対応が含まれる場合がある。そこで直角面の姿勢推定を行う前にロバスト推定手法の一種である最小メディアン法¹⁶⁾を用いて以下の手順により誤対応を除去する。

1. 以下の処理を複数回実行
 - (a) 対応点のランダムサンプリング
 - (b) 再投影誤差和の最小化
2. 仮のパラメータ選択
3. 再投影誤差分布の算出
4. 誤差許容範囲の抽出
5. 誤対応除去

N 組の対応点の中から N_s 組の対応点をランダムサンプリングする。サンプリングした対応点について式 (22) の再投影誤差和を最小化し、最小化となる姿勢パラメータと再投影誤差和の値を記録する。これを複数回実行して得られた再投影誤差和の値の中からそれらの中央値となる姿勢パラメータを仮の姿勢パラメータ (ϕ^*, θ^*) として選択する。

N 組の全対応点のそれぞれについて仮のパラメータ ϕ^* および θ^* における再投影誤差 $J_i^{\phi^*, \theta^*}$ を式 (22) により求め、その再投影誤差の分布をヒストグラムとして取得する。ここでは、誤差許容範囲を分布におけるピーク位置から半値幅の範囲内とする。なお、分布形状によってはピークを抽出困難なケースがあるため、ピーク検出の前に Savitzky-Golay フィルタ¹⁷⁾を用いてヒストグラムを平滑化する。

図 9 に図 6(b) の対応点群から求めた再投影誤差の分布と誤差許容範囲を示す。再投影誤差がピーク位置から半値幅の範囲外となる対応点を誤対応として除去し、残った対応点を正対応として直角面の姿勢推定を行う。図 10 に誤対応除去後の対応点群を示す。

3.5 スケール推定

単眼カメラによる計測では実スケール情報が得られないが、カメラと直角面までの距離 ρ_t を 1 として基準にすることで、姿勢推定により得られた直角面の姿勢情報を用いて水中物体の形状計測を行える。正確な実スケールを必要としないアミューズメント分野などの用途においては形状計測で対応できると考えられるが、生物研究や教育分野への応用には適さない。

そこで、画像上に映る容器の輪郭の一部とそれに対応する寸法の情報から実スケールを推定する。ここでは、図 11 に示す画像上の面 Q の右端の直線または面 R の左端の直線情報とそれぞれの面の幅の実スケールが得られるものとする。面 Q 右端の直線および面 R 左端の直線を式 (2) と同じ直線式で抽出するものとし、それぞれ直線のパラメータを (a_q, b_q) および (a_r, b_r) とする。また、面 Q の幅の実寸法を W_q とし、面 R の幅を W_r とする。

3次元空間における面 Q 右端直線上の 1 つの位置座標を $\rho_t \mathbf{e}_t + \mathbf{e}_\alpha$ と記述することができるが、これを撮像面に投影した画像座標は (a_q, b_q) のパラメータが示す画像上の直線に拘束される。よって、これを ρ について解くと次式が得られる。

$$\rho_t = -\frac{\langle \mathbf{a}_q, \mathbf{e}_\alpha \rangle}{\langle \mathbf{a}_q, \mathbf{e}_t \rangle} W_q \quad (23)$$

ただし、 $\mathbf{a}_q = [f_u - a_q f_v \ (C_u - a_q C_v - b_q)]^T$ である。同様に面 R の左端直線と幅寸法を用いた場合のスケールは次式となる。

$$\rho_t = -\frac{\langle \mathbf{a}_r, \mathbf{e}_\gamma \rangle}{\langle \mathbf{a}_r, \mathbf{e}_t \rangle} W_r \quad (24)$$

ただし、 $\mathbf{a}_r = [f_u - a_r f_v \ (C_u - a_r C_v - b_r)]^T$ である。取得画像上で面 Q および面 R の端直線の両方を抽出できる場合は、面 Q の幅と端の直線から推定されるスケールを ρ_{tq} とし、面 R から推定されるスケールを ρ_{tr} として、 ρ_t は ρ_{tq} と ρ_{tr} の平均により求めるものとする。

3.6 水中物体の3次元計測

水中物体を3次元計測するために推定した直角面の姿勢およびスケール情報から直角面の位置姿勢を求める。なお、容器の両端が画像内に映らずスケールを推定できない場合はスケールを $\rho_t = 1$ として水中物体の形状を計測する。水中物体の計測は図 7 に示すように対応点から光線追跡、スネルの法則および中点法により水中の3次元座標を得ることで行う。直角面の姿勢推定の際に取得した特徴点に基づく対応点では計測点が疎となるため、密な計測を行うためにステレオマッチングにより対応点を取得する。

図 12 にステレオマッチングの探索範囲を示す。面 Q に対応する画像領域内の画素 \mathbf{u}_q を着目画素とし \mathbf{u}_q から光線追跡を用いて水中内の光線の位置ベクトル \mathbf{p}_{wq} および方向ベクトル \mathbf{v}_{wq} を得る。水中の伝播距離を ρ_{min} から ρ_{max} の区間として対応する水中座標を $\mathbf{p}_{min} = \rho_{min} \mathbf{v}_{wq} + \mathbf{p}_{wq}$ および $\mathbf{p}_{max} = \rho_{max} \mathbf{v}_{wq} + \mathbf{p}_{wq}$ により求める。 \mathbf{p}_{min} および \mathbf{p}_{max} を面 R を経由し再投影により得られる画像座標を直線で結んだ領域を探索直線としステレオマッチングの探索範囲とする。

ブロックマッチングにより着目画素 \mathbf{u}_q に対応する画素を正規化相互相関を評価指標に用いて探索直線上の画素について探索する。なお、探索は探索直線上の画素を 1pixel 単位で評価するものとし、画素が存在しない部分はバイリニア補間により取得する。マッチングにより得られた対応画素をパラボラフィッ

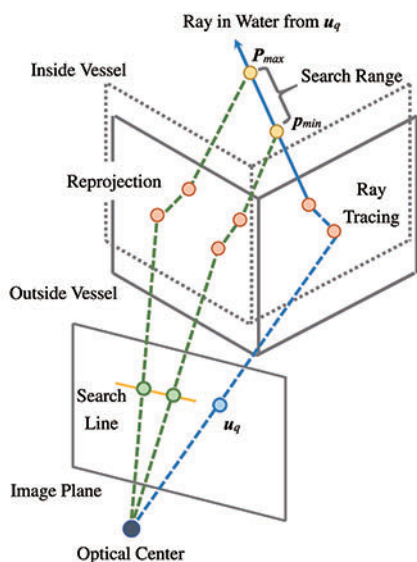


Fig.12 Stereo Matching



Fig.13 Camera



Fig.14 Rectangular Vessel

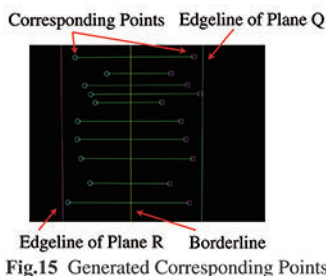


Fig.15 Generated Corresponding Points

ティング¹⁸⁾により探索直線上においてサブピクセル化する。サブピクセル化された対応画素から光線追跡を行い着目画素からの水中光線との交点を算出して水中物体上の3次元位置を計測する。

4. 実験

提案手法の有効性を確認するためにシミュレーション、精度評価実験および3次元計測実験を行った。撮影に用いた単眼カメラを図13に示す。また、図14に実験に用いたガラス製の容器を示す。カメラの撮像サイズは2048×1536pixelとした。また、カメラのパラメータをZhangの方法¹⁹⁾を用いてキャリブレーションした結果は $C_u = 857\text{pixel}$, $C_v = 773\text{pixel}$, $f_u = 1679.9\text{pixel}$ および $f_v = 1679.5\text{pixel}$ となった。直方体形状容器の寸法は290mm×445mm×300mmであり、幅290mmの面を面Qに用い、幅445mmの面を面Rに用いた。また、容器の厚さは $t_s = 3\text{mm}$ である。容器内に満たす液体には水道水を用い、空気、容器のガラスおよび水の屈折率をそれぞれ $n_a = 1.00$, $n_g = 1.49$, $n_w = 1.33$ とした。

4.1 直角面の位置姿勢推定シミュレーション

直角面の位置姿勢を提案手法により推定できることをシミュレーションにより確認した。また、取得画像から抽出した境界直線、対応点およびスケール推定に用いる容器の端直線の抽出

Table1 Estimated Errors by Error of a_s

Error of a_s deg	ϕ_{er} deg	θ_{er} deg	ρ_{tqe} mm	ρ_{tre} mm
-1.00	-18.0	0.842	0.00	0.00
-0.50	-7.93	0.122	0.00	0.00
-0.10	-1.55	-0.0523	0.00	0.00
0.10	1.56	0.973	0.00	0.00
0.50	8.44	0.997	0.00	0.00
1.00	19.7	3.13	0.00	0.00

Table2 Estimated Errors by Error of b_s

Error of b_s pixel	ϕ_{er} deg	θ_{er} deg	ρ_{tqe} mm	ρ_{tre} mm
-50.0	-0.667	-2.97	0.00	0.00
-25.0	-0.408	-1.45	0.00	0.00
-10.0	-0.193	-0.581	0.00	0.00
10.0	0.262	0.594	0.00	0.00
25.0	0.796	1.50	0.00	0.00
50.0	1.69	2.88	0.00	0.00

Table3 Estimated Errors by Errors of Corresponding Points

σ_{er} pixel	Standard Deviation (SD) of ϕ_{er} deg	SD of θ_{er} deg
1.00	0.511	0.200
2.00	1.52	0.712
3.00	2.30	1.22
4.00	1.92	1.09
5.00	5.20	1.72

誤差と位置姿勢の推定精度との関係性を検証した。

シミュレーションでは、カメラのパラメータを $f_u = 1700\text{pixel}$, $f_v = 1700\text{pixel}$, $C_u = 940\text{pixel}$ および $C_v = 770\text{pixel}$ とし、画像サイズを2048×1536pixelと設定した。また、直角面の位置姿勢をスケールを $\rho_t = 440\text{mm}$, 姿勢パラメータを $\phi = 1.62\text{deg}$, $\theta = 38.0\text{deg}$ とし、境界直線を $a_s = 0.001745$ (0.1deg), $b_s = 880\text{pixel}$ として設定した。容器寸法および各媒質の屈折率は実験環境と同じ値を用いた。図15に10組の対応点をシミュレーションで生成した画像を示す。なお、シミュレーションでは誤対応の対応点は含まれないものとする。設定した境界直線の値と生成した対応点情報からバンドル調整により姿勢推定を行った結果は $\phi = 1.62\text{deg}$ および $\theta = 38.0\text{deg}$ となり、スケール推定の結果は $\rho_{tq} = 440\text{mm}$ および $\rho_{tr} = 440\text{mm}$ となり、提案手法により直角面の位置姿勢を正しく推定できること確認した。しかし、取得画像から抽出した境界直線、対応点およびスケール推定に用いる容器の端直線には誤差が含まれることが考えられ、これらの誤差が直角面の位置姿勢推定の結果に与える影響を検証する必要がある。

表1および表2に誤差を加えた境界直線のパラメータ a_s , b_s から位置姿勢推定を行った場合の姿勢推定誤差およびスケール推定誤差を示す。姿勢 ϕ および θ の推定誤差を ϕ_{er} および θ_{er} とし、スケール ρ_{tq} および ρ_{tr} の推定誤差を ρ_{tqe} および ρ_{tre} とした。 a_s の誤差は ϕ の誤差に影響し、 b_s の誤差は逆に θ の誤差に影響することが確認されたが、どちらもスケールの誤差には影響がみられなかった。また、 a_s は1deg未満のわずかな誤差でも姿勢の誤差に大きく影響することがわかった。

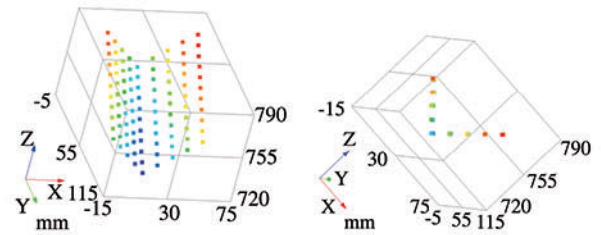
表3に正規分布 $\mathcal{N}(0, \sigma_{er}^2)$ に従う誤差を加えた対応点の画像座標から位置姿勢推定を行った場合の姿勢推定誤差の標準偏差を示す。なお、標準偏差を求めるための試行回数を10回とした。対応点の画像座標の誤差により姿勢推定の誤差は ϕ が θ よりも2倍程度の誤差が生じる傾向がみられた。また、境界直線の誤差と同様にスケール推定の結果には誤差が生じなかった。

Table4 Estimation Errors by Errors of Edgeline of Plane Q

Error of a_q deg	ρ_{tqe} mm	Error of b_q pixel	ρ_{tqe} mm
-1.00	13.6	-50.0	54.9
-0.5	6.72	-25.0	26.3
-0.1	1.33	-10.0	10.3
0.1	-1.33	10.0	-9.93
0.5	-6.58	25.0	-24.2
1.0	-13.0	50.0	-46.7

Table5 Estimated Errors by Errors of Edgeline of Plane R

Error of a_r deg	ρ_{tre} mm	Error of b_r pixel	ρ_{tre} mm
-1.00	-16.7	-50.0	-60.4
-0.5	-8.46	-25.0	-31.4
-0.1	-1.71	-10.0	-12.9
0.1	1.72	10.0	13.3
0.5	8.66	25.0	34.1
1.0	17.5	50.0	71.4



(a) Bird's-eye View (b) Top View

Fig.19 Reconstruction of Cuboid Object

Table7 Evaluation of Measurement Accuracy

	Pattern A	Pattern B	Pattern C	Pattern D
μ_{ha} mm	11.9	11.9	11.8	11.9
μ_{hb} mm	10.5	9.23	9.33	9.2
μ_{va} mm	9.20	10.5	10.5	10.5
μ_{vb} mm	10.4	10.3	10.4	10.3

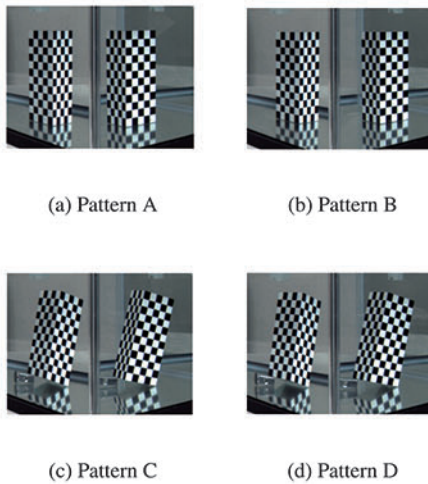


Fig.16 Acquired Images for Evaluations

4.2 精度評価実験

格子パターンを表面に塗装したアルミ製の直方体物体を精度検証用の計測対象物として用いた。計測対象物の寸法は50mm×50mm×120mmであり、塗装した格子間隔は10mmである。精度検証では容器とカメラの位置姿勢を固定し、容器中に設置した計測対象物の位置姿勢を変更して4つのパターンの画像を取得する。図16に取得した計測用画像を示す(図は画像の一部である)。計測に用いる格子点は水平方向に9点、垂直方向に11点の計99点とした。正確さを期すために対応点は手動で設定した後、ハリスのコーナー検出により得られたコーナー一点に修正してから画像座標のサブピクセル化を行った。図17にパターンDの取得画像から得られたコーナー一点を示す。提案手法との比較のために、図18に示す容器の直角面に貼り付けた格子パターンから直角面の位置姿勢を校正した。校正により得られた姿勢パラメータは $\phi = 1.62\text{deg}$ および $\theta = 38.5\text{deg}$ となり、スケールは $\rho_t = 438.8\text{mm}$ となった。表6に取得画像から抽出したコーナー一点を用いて姿勢推定およびスケール推定を行った結果を示す。

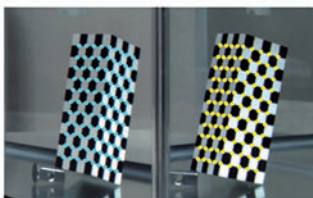


Fig.17 Detected Corner Points



Fig.18 Chess Pattern Image

Table6 Results of Estimation of Rectangular Vessel

	Pattern A	Pattern B	Pattern C	Pattern D
ϕ deg	1.41	1.17	1.29	1.28
θ deg	43.9	43.6	43.8	43.9
ρ_t mm	460.7	459.6	460.3	460.8
ρ_{tq} mm	390.4	394.5	392.0	390.2
ρ_{tr} mm	531.1	524.7	528.5	531.3

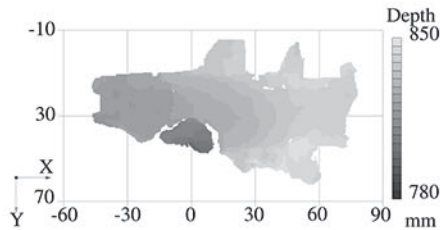
表4および表5に誤差を加えた容器の端直線からスケール推定を行った場合のスケール推定誤差を示す。直線の傾きに1degの誤差がある場合、推定されたスケールには10mm以上の誤差が生じている。また、面Qの端直線のスケール推定誤差は面Rの端直線のスケール推定誤差に比べて小さい傾向がみられる。これはスケール推定の式(23)および式(24)から幅寸法の大小が影響していると考えられる。

各パターンから推定された姿勢およびスケールはほぼ同様の結果となった。校正により得られた姿勢およびスケールと比較すると、姿勢 ϕ は1deg未満(0.2deg~0.4deg)の差で推定されており、姿勢 θ は約5degの差で推定された。また、推定されたスケール ρ_t は20mm程度の差があり、 ρ_{tq} と ρ_{tr} との間に140mm程度の差があることが確認された。校正により得られた姿勢および境界直線情報からスケールを推定した結果、 $\rho_t = 440.4\text{mm}$ ($\rho_{tq} = 449.4\text{mm}$, $\rho_{tr} = 431.4\text{mm}$)となった。このことから、境界直線の抽出誤差、端直線の抽出誤差および直角面の姿勢推定誤差によりスケール推定誤差が生じているものと考えられる。

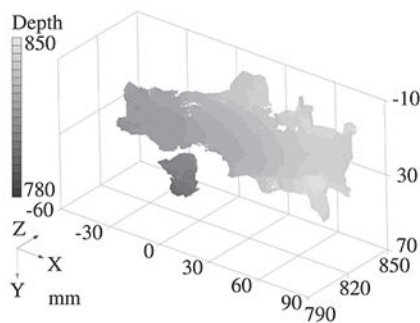
図19に推定された直角面の位置姿勢情報を基にパターンDの対応点群から3次元再構成した結果を示す。計測対象物の右面を面Aとし、左面を面Bとしてそれぞれの面の再構成された計測点間の距離を評価した。表7に評価結果を示す。なお、面Aの水平方向における計測点間の平均距離を μ_{ha} 、垂直方向における平均距離を μ_{va} とし、面Bの水平方向における計測点間の平均距離を μ_{hb} 、垂直方向における平均距離を μ_{vb} とした。各面について水平方向および垂直方向の計測点間の平均



Fig.20 Underwater Object



(a) Front View



(b) Bird's-eye View

Fig.21 Reconstruction of Underwater Object

距離を求めたところ 10mm の寸法に対して 1 - 2mm 程度の誤差で計測された。ただし、水平方向については面 A と面 B で 3mm 程度の差が生じている。校正により得られた境界直線と姿勢情報を用いてスケール推定を行い、それらの値を用いてパターン D の対応点を 3 次元計測した結果、 $\mu_{ha} = 9.81\text{mm}$, $\mu_{hb} = 10.3\text{mm}$, $\mu_{va} = 9.91$ および $\mu_{vb} = 9.89\text{mm}$ となり 1mm 未満の誤差となった。このことから、3 次元計測の誤差要因として境界直線の抽出誤差および姿勢推定誤差が寄与していると考えられる。

4.3 3次元計測実験

図 20 に示すテクスチャと曲面形状を有するモデルを水中物体として 3 次元計測実験を行った。SIFT 特徴点のマッチングと誤対応除去により対応点群を取得し、得られた特徴点群から直角面の姿勢を推定し容器寸法からスケールを推定した。推定された直角面の位置姿勢情報を基に水中物体の 3 次元形状をステレオマッチングにより計測した。なお、マッチングにおける窓サイズを 15×15 pixel とした。図 21 に計測された水中物体の 3 次元形状を 3 次元再構成した結果を示す。水中物体の胴体から背びれ部分の形状が再構成されていることを確認した。

5. 結 論

直方体形状容器の特性を利用しキャリブレーションされた単眼カメラ 1 台のみを用いて容器内の水中物体を計測する手法を提案した。シミュレーションおよび精度評価実験により提案手法を評価した結果から、直線抽出の誤差と姿勢推定誤差により

スケール推定誤差や計測誤差が生じることを確認した。水中物体の 3 次元計測実験では一部に誤計測がみられるが概ね水中物体の形状を再構成できることを確認した。

今後の課題は直線抽出および容器の姿勢推定の精度向上および光の屈折による画像歪みに対してロバストなマッチング手法の導入などがある。また、提案手法を用いて動画像処理により水中物体の多視点計測を行い、それらを統合することで水中物体の全周囲計測データを生成することなどが考えられる。

謝 辞

本研究の一部は、科研費若手研究 (A) 22680017, および財団法人旭硝子財団の援助を受けた。

参 考 文 献

- 1) A. Banno, T. Masuda, T. Oishi and K. Ikeuchi: Flying Laser Range Sensor for Large-Scale Site-Modeling and Its Applications in Bayon Digital Archival Project, International Journal of Computer Vision, **78**, 2-3, (2008) 207.
- 2) A. K. Chong and P. Stanford: Underwater Digital Stereo-Observation Technique for Red Hydrocoral Study, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, **68**, 7, (2002) 745.
- 3) R. Kawai, A. Yamashita and T. Kaneko: Three-Dimensional Measurement of Objects in Water by Using Space Encoding Method, Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation, (2009) 2830.
- 4) A. Yamashita, R. Kawanishi, T. Koketsu, T. Kaneko and H. Asama: Underwater Sensing with Omni-Directional Stereo Camera, Proceedings of the 11th Workshop on Omnidirectional Vision, Camera Networks and Non-classical Camera, (2011) 304.
- 5) T. Yano, S. Nobuhara and T. Matsuyama: 3D Shape from Silhouettes in Water for Online Novel-View Synthesis, IPSJ Transactions on Computer Vision and Applications, **5**, (2013) 65.
- 6) 成瀬達哉, 山下淳, 金子透, 小林祐一: 魚眼ステレオカメラを用いた水中物体の 3 次元形状計測, 精密工学会誌, **79**, 4, (2013) 334.
- 7) 伊部公紀, 山下淳, 金子透, 小林祐一: マニピュレータに搭載したレーザレンジファインダを用いた透明容器中の液中物体の 3 次元形状計測, 映像情報メディア学会誌, **67**, 11, (2013) J379.
- 8) D. H. Lee, I. S. Kweon and R. Cipolla: A Biprism-Stereo Camera System, Proceedings of the 1999 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, **1**, (1999) 82.
- 9) A. Yamashita, Y. Shirane and T. Kaneko: Monocular Underwater Stereo -3D Measurement Using Difference of Appearance Depending on Optical Paths-, Proceedings of the 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, (2010) 3652.
- 10) 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, **22**, 2, (1997) 364.
- 11) A. Sedlazeck and R. Koch: Calibration of Housing Parameters for Underwater Stereo-Camera Rigs, Proceedings of the British Machine Vision Conference, (2011) 118.1.
- 12) J. Canny: A Computational Approach to Edge Detection, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, **8**, 6, (1986) 679.
- 13) R. O. Duda and P. E. Hart: Use of the Hough Transformation to Detect Lines and Curves in Pictures, Communications of the ACM, **15**, 1, (1972).
- 14) B. Triggs, P. F. McLauchlan, R. I. Hartley and A. W. Fitzgibbon: Bundle Adjustment - A Modern Synthesis, Proceedings of the International Workshop on Vision Algorithms: Theory and Practice, **1883**, (2000) 298.
- 15) D. G. Lowe: Object Recognition from Local Scale-Invariant Features, Proceedings of the International Conference on Computer Vision, **2**, (1999) 1150.
- 16) P. J. Rousseeuw and A. M. Leroy: Robust Regression and Outlier Detection, Wiley Series in Probability and Statistics, New York, (1987).
- 17) A. Savitzky and M. J. E. Golay: Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures, Analytical Chemistry, **36**, (1964) 1627.
- 18) 清水雅夫, 奥富正敏: 画像のマッチングにおけるサブピクセル推定の意味と性質, 電子情報通信学会論文誌 D-II, **J85-D-II**, 12, (2002) 1791.
- 19) Z. Zhang: A Flexible New Technique for Camera Calibration, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, **22**, 11, (2000) 1330.