角型容器越し複光路単眼ステレオによる水中物体の3次元形状計測

3-D Measurement of Underwater Object Using Bi-Path Stereoscopy via Rectangular Vessel

○伊部公紀*, 小林祐一*, 金子透*, 山下淳‡ Hirotoshi IBE*, Yuichi KOBAYASHI*, Toru KANEKO* and Atsushi YAMASHITA‡

*:静岡大学創造科学技術大学院自然科学系教育部 情報科学専攻
†:静岡大学大学院工学研究科 機械工学専攻
‡:東京大学大学院工学系研究科 精密工学専攻

概要: 直方体形状の角型水槽容器内に置かれた水中物体を容器四隅の一角から観察すると角を構成する2つの面のそれぞれが光路となり複光路像が生じる.角を構成する2平面が直角となる容器を対象とし、単眼カメラを用いて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バンドル調整により直角面の姿勢推定を行い、光線追跡により水中物体の3次元形状を計測する手法を提案する.また、実験により提案手法の有効性を示す.

<キーワード> 水中物体計測, 画像センシング, 複光路単眼ステレオ

1. 序論

水で満たされた容器内で飼育される熱帯魚や貴重 な深海魚の液浸標本など水中環境下に置かれた水 中物体の3次元形状や色などを計測することにより, 水中物体をディジタルアーカイブ化することで,生物 研究や教育への応用または CG によるアミューズメン ト分野へ利用することが期待される[1][2][3].

画像計測は,透明容器越しに水中物体の画像を 撮影することで,水中物体を容器に入れたまま非接 触に計測できることから,これまでに様々な画像計測 を用いた水中物体の計測手法が提案されている [2][3][4][5][6][7].

複数台のカメラを用いた受動的ステレオ法 [3][4][5][7]やカメラと光源(レーザまたはプロジェク タ)を組み合わせた能動的ステレオ法[2][6]は高精度 であるが装置が複雑かつ高価になることやカメラ間ま たはカメラと光源間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,一台のカメラでも3次元計 測が可能となる手法がある[8][9].この手法はカメラ 一台で計測できるため廉価であるが,複光路を生じ させるための器具が必要であり,器具とカメラ間の校 正が必要となる.

ここで本研究では、水槽として広く用いられている



図1角型容器越し複光路単眼ステレオ画像

角型容器(直方体形状)の四隅の一角から水中物体 を観察すると、単眼カメラでも光の屈折により、図1に 示す複光路ステレオ画像が得られることに着目する. この特性を利用することにより、複プリズムなどを用い ず単眼カメラにより水中物体が計測できると考えられ る.

ここで、画像計測により水中物体の計測を行うため には、水中物体からの光が水中、容器中(ガラス、ア クリルなど)、そして空気中へと屈折率の異なる媒質 に進む際に、光の進行方向が変化する屈折現象が 問題となる.この問題を解決するために Li ら[10]は、 光線追跡とスネルの法則を用いることで、カメラ側か ら水中環境への光の経路を追跡する手法を提案して いる.光線追跡を用いて水中物体を計測するために は、光が屈折する屈折境界面である容器表面(空気 と容器が接する面)と容器裏面(容器と水が接する面)の位置形状情報が必要となる.

透明な容器の位置形状を調べるためにLiら[10]は, 水中環境に既知形状物体を配置し,撮影した画像からの光線追跡と一致するように位置形状のパラメータ を取得する手法を提案している.しかし,この方法で は既に容器内に水中物体が置かれている場合には 適用が困難である.そこで Sedlazeck ら[11]は,水中 物体を撮影したステレオ画像対上の複数の対応点の 組を用いたバンドル調整により,平面容器の位置姿 勢を推定する手法を提案している.

本研究は、2 面が直交する容器の角越しに撮影した複光路単眼ステレオ画像から、バンドル調整[11]により容器の姿勢推定を行い、光線追跡[10]を用いることで単眼カメラにより水中物体の3次元形状を計測する手法を提案する.

2. 処理手順

提案手法により水中物体の3次元形状を計測する 処理手順を図2に示す.なお,計測に用いる単眼カ メラは校正済みであるとする.

最初に,校正済の単眼カメラを用い,角型容器の 隅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.

次に、バンドル調整を用いて、容器表面の直角面 とカメラ間の姿勢を推定する.このとき、単眼カメラは スケール情報を持たないため、カメラと直角面間の距 離を1として基準にする.なお、容器表面と裏面は平 行であり、容器の厚みは既知とする.撮影された画像 内に容器の端部分が含まれている場合には、容器の 寸法を与えることでカメラと直角面間の距離の実スケ ール値を推定する.

最後に,得られた直角面の位置姿勢情報を用いて, 水中物体の3次元形状計測を行う.

3. 計測モデル

図3に提案手法で用いた計測モデルの構成を示 す.計測にはカメラの光学中心に原点を置いたカメラ 座標系 $X_cY_cZ_c$ を用いる.カメラは透視投影モデル により表し、画像面と光学中心 p_c との距離である像 距離をfとする.

画像面上の座標は画像上左上を原点とし,座標 (u,v)として表す.また,カメラの光軸 $(Z_c = h)$ と画像 面との交点座標を (C_u, C_v) とする.



容器表面の直角面を表すために直交座標系のモ デル座標系 $X_{\alpha}Y_{\beta}Z_{\gamma}$ を導入する. モデル座標の Y_{β} 軸は直角面の角に相当する. 直角面を構成する 2 つの平面をそれぞれ, 面 Q および面 R と呼ぶこと にし, 面 Q は $X_{\alpha}Y_{\beta}$ 平面, 面 R は $Y_{\beta}Z_{\gamma}$ 平面に対応 させる. モデル座標系の原点位置への位置ベクトル を \mathbf{t}_{1} とし, モデル座標系の各軸の単位基底ベクトル を \mathbf{e}_{α} , \mathbf{e}_{β} および \mathbf{e}_{γ} とする.

直角面の角(Y_{β} 軸)を画像面に投影した直線を境 界直線と呼ぶことにする. 画像上の境界直線は水平 にならないと仮定し, 以下の式により表す.

$$u = a_s v + b_s \tag{1}$$

なお, *a*_s および*b*_s は直線のパラメータである.本研 究では,容器の角に支柱が設置されているものを対 象とし,画像処理により境界直線の抽出する.また, 境界直線を用いて直角面の位置姿勢を簡単化す る.

画像上の座標(u,v)に入射した光を,カメラ側から 逆向きで表した方向ベクトル v_c とすると, v_c は次式 により求められる.

 $\boldsymbol{v}_{c} = ((u - C_{u}) / f_{u}, (v - C_{v}) / f_{v}, 1)^{\mathrm{T}}$ (2) ここで f_{u} および f_{v} は、水平方向の画素ピッチと垂直 方向の画素ピッチにより,像距離 f をそれぞれ pixel 単位で表現したものである.

直角面の位置を表す $t_1 = (t_x, t_y, t_z)^T \operatorname{tr} Z_c X_c$ 平面 内にあるものとし, $t_y = 0$ とする. ここで, $t_1 \operatorname{tr} Y_\beta$ 軸 上の位置を表しているため, t_1 を画像面に投影した 点は境界直線上に位置し, 式(1)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(1)および式 (2)により, 次式のように求められる.

$$\boldsymbol{t}_{z1} = \left(\frac{-C_u + a_s C_v + b_s}{f_u}, 0, 1\right)^{\mathrm{T}}$$
 (3)

 t_{z1} は t_1 と同一方向のベクトルであることから、 t_{z1} を正 規化することにより、 t_1 の単位ベクトル e_i を得る.また、 t_1 の長さをスケール σ_i と表すと、 t_1 は次式により表さ れる.

$$\boldsymbol{t}_1 = \boldsymbol{\sigma}_t \boldsymbol{e}_t \tag{4}$$

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(2)により求めたベクトルはいずれもモデル座標の Y_{β} 軸上と交差する.よって、境界直線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 Φ 内に Y_{β} 軸の単位基底ベクトル e_{β} が含まれる.

 \mathbf{e}_{β} を求めるために、平面 Φ 内における直交する2 つの単位ベクトルを求める. \mathbf{e}_{t} は平面 Φ に含まれる. また、式(1)から境界直線に含まれる座標(b_{s} , 0)を用 い、この座標からの方向ベクトル $\mathbf{v}_{v\theta}$ を式(2)により求 める. これにより平面 Φ の法線ベクトル \mathbf{n}_{θ} は次式に より求められる.

$$\boldsymbol{n}_{\theta} = \boldsymbol{e}_t \times \boldsymbol{v}_{v0} \tag{5}$$

なお、×はベクトルの外積を表す.これにより、 e_t と直 交し、平面 Φ に含まれるベクトル v_{ϕ} は次式により得 られる.

$$\boldsymbol{v}_{\phi} = \boldsymbol{e}_t \times \boldsymbol{n}_{\theta} \tag{6}$$

 v_{ϕ} を正規化した単位ベクトル e_{ϕ} を基準とし、平面 Φ において e_{ι} に進む回転角を ϕ とすると、基底ベクトル e_{β} は次式により求まる.

$$\mathbf{e}_{\beta} = (\cos\phi)\mathbf{e}_{\phi} + (\sin\phi)\mathbf{e}_{t} \tag{7}$$

残りの基底ベクトル \mathbf{e}_{α} および \mathbf{e}_{γ} は \mathbf{e}_{β} に直交する 平面 Θ に含まれるものとし、同様に求められる. \boldsymbol{n}_{θ} は平面 Θ に含まれるため、 \boldsymbol{n}_{θ} を正規化したベクトル を \mathbf{e}_{θ} とする. \mathbf{e}_{θ} に直交する単位ベクトル \mathbf{e}_{κ} は次式 により得られる.

$$\boldsymbol{e}_{\kappa} = \boldsymbol{e}_{\theta} \times \boldsymbol{e}_{\beta} \tag{8}$$

よって、 \mathbf{e}_{θ} を基準とすることにより、残りの基底ベクト ルは回転角 θ を用いて、それぞれ以下のように表さ



れる.

$$\mathbf{e}_{\alpha} = (\cos\theta)\mathbf{e}_{\theta} + (\sin\theta)\mathbf{e}_{\kappa}$$
$$\mathbf{e}_{\gamma} = (-\sin\theta)\mathbf{e}_{\theta} + (\cos\theta)\mathbf{e}_{\kappa}$$
(10)

以上のことから、直角面の姿勢は 2 つの回転角 ϕ および回転角 θ を用いて表される.

容器表面と裏面との関係を図 4 に示す. 容器裏面 のモデル座標系を $X'_{\alpha}Y'_{\beta}Z'_{\gamma}$ とする. また,表面と裏 面は平行とし,面 Q と裏面 Q'との厚みと面 R と裏面 R'との厚みは等しく t_s とする. 表面と裏面は平行であ るから,裏面の各軸の基底ベクトルは表面と同様, \mathbf{e}_{α} , \mathbf{e}_{β} および \mathbf{e}_{γ} である.

裏面の直角面への位置ベクトル \mathbf{t}_2 は表面の位置 ベクトル \mathbf{t}_1 ,基底ベクトル \mathbf{e}_{α} , \mathbf{e}_{γ} および厚み t_s によ り,次式で求まる.

$$\boldsymbol{t}_2 = \boldsymbol{t}_1 + \boldsymbol{t}_s \left(\boldsymbol{e}_\alpha + \boldsymbol{e}_\gamma \right) \tag{11}$$

4. 境界直線の抽出

最初にカメラの校正データを用い,撮影した複光 路ステレオ画像の歪み補正を行う.

単眼カメラにより撮影し, 歪み補正を行った複光路 ステレオ画像の一部拡大図を図 5(a)に示す.本研究 では容器の角が支柱により構成されているものを対 象とする.境界直線の抽出では,まず角を構成する 支柱の両端を平行線対として抽出し, その平行線対 の中心線を境界直線として抽出する.

図 5(b)に Canny のエッジ検出法により抽出したエッジ画像を示す.抽出されたエッジからハフ変換により 直線抽出を行う.ハフ変換では、画像上の左上原点 から直線までの垂直距離を σ_h 、画像の水平軸を基 準とした直線の角度 θ_h の2つのパラメータにより表す. 図 5(c)にハフ変換により抽出した直線を赤線により示 す.

境界直線は式(1)に示す直線パラメータ (a_s, b_s) に





(a) 撮影画像





(c) ハフ変換(d) 境界直線図 5 境界直線の抽出過程

より表現するため、次式によりパラメータを変換する.

$$a_s = -\tan\theta_h \tag{12}$$

$$b_s = \rho_h \left(\cos \theta_h - a_s \sin \theta_h \right)$$
(13)

一般に,角型容器を撮影する場合,境界直線は垂直 に近い形で画像上に表れる.そこで,以下の式を満 たす直線を平行線対の候補として絞り込む.

$$\left|\cos\theta_{h}\right| \geq \xi_{h} \tag{14}$$

なお、 ξ_h は平行線の候補を絞り込むための閾値である.

平行線対は平行線を成す 2 つの直線の組とする. 基準となる直線パラメータを (a_{sb}, b_{sb}) ,対の候補となる直線パラメータを (a_{sp}, b_{sp}) としたとき,傾きの差の絶対値 $|a_{sp} - a_{sb}|$ が閾値 ξ_a 未満であり,なおかつ切片の差の絶対値 $|b_{sp} - b_{sb}|$ が最小となる直線の組を平行線として抽出する.

直角面越しに撮影する場合,直角面の角は他の 物体(角型容器の他の垂直な支柱など)に比べ,カメ ラに近い位置に存在することになる.そこで,抽出さ れた平行線対の中で切片差の絶対値が最大となる 平行線対を直角面の角に対応するものとして抽出し,



図6 再投影誤差最小化

平行線対の中心線として境界直線のパラメータを推定する.図 5(d)に抽出された角に対応する平行線対を緑線,推定された境界直線を黄線により示す.

ここで、3 次元空間上で容器の支柱の両端が平行 であっても、画像上に透視投影された場合、平行線 にはならない.そこで、支柱の幅が短いことを前提と し、平行線対の閾値 ξ_a を調節することで対応する.

5. 直角面の姿勢推定

境界直線のパラメータにより直角面の未知パラメー タは、位置スケール σ_t 、姿勢を示す角度パラメータ ϕ および θ の3パラメータとなる。単眼カメラのスケー ル不定性により σ_t =1とし、バンドル調整[11][12]に より ϕ および θ の2パラメータを推定する。

画像上の面 Q および面 R に対応する領域におい て、水中物体上の同一点を示す画像座標の組を対 応点と呼び、複数の対応点の組を用い、図 6 に示す 再投影誤差最小化により、 Ø および Ø を推定する.

まず、 ¢およびθに任意の値を与え、直角面の位 置姿勢を算出する.各対応点について、光線追跡と スネルの法則により、水中における光線をそれぞれ 求め、光線間の距離が最小となる位置における光線 間の中点座標を光線の交点として求める.求めた交 点座標を容器の面Qおよび面Rのそれぞれを通して 画像面上の2次元座標に再投影する.対応点の座 標と再投影により得られた座標とのユークリッド距離 を求め、複数組についての距離の総和である再投影 誤差を算出する.この再投影誤差が最小となる ¢お よびθを推定値として求める.

画像上,面Qを通過した光に対応する領域の画像 座標を $u_q = (u_q, v_q)$ とし,面 R に対応する領域の画 像座標を $u_r = (u_r, v_r)$ とする. ここで, u_q および u_r



が対応点であるとき、それぞれの画像座標から光線 追跡を行い、水中における 3 次元交点座標 *p*wを算 出する.

図7に光線追跡の流れを示す.式(2)により、 u_q および u_r からの光線方向を求め、それを正規化したものをそれぞれ、 v_{q1} および v_{r1} とする.

次に,光線と容器の面の交点を算出するために平 面のモデルが必要となる.平面の方程式は次式で表 される.

$$Ax + By + Cz + D = 0 \tag{15}$$

なお、A, B, CおよびDは平面のパラメータであり、 $(x, y, z)^{T}$ はカメラ座標系における座標である.光線が通過する平面は、面Q、面Q'、面Rおよび面R'の4つであり、それぞれの平面パラメータを求める.

面 Q の法線方向は、計測モデルから e_{γ} となり、平 面への位置ベクトル t_1 から面 Q の平面パラメータ (A_q, B_q, C_q, D_q) は

$$\left(A_q, B_q, C_q\right) = \boldsymbol{e}_{\gamma}^{\mathrm{T}}$$
(16)

$$D_q = -\boldsymbol{e}_{\gamma} \cdot \boldsymbol{t}_1 \tag{17}$$

となる. 面 Q'の平面パラメータは, 位置ベクトル t_2 により同様に求まる. また, 面 R および面 R'の平面パラメータは, 法線方向を e_α とすることで同様に求まる.

単位方向ベクトル $v = (v_x, v_y, v_z)^T$ と位置ベクトル $p = (p_x, p_y, p_z)^T$ からなる光線ベクトルとパラメータ (A, B, C, D)となる平面との交点座標 p'は,以下の 式により求められる.

$$\boldsymbol{p} = \rho_f \boldsymbol{v} + \boldsymbol{p} \tag{18}$$

$$\rho_f = -\frac{A \, p_x + B \, p_y + C \, p_z + D}{A \, v_x + B \, v_z + C \, v_z} \tag{19}$$

カメラからの光線(実際にはカメラ側への光線であ

るが,計算上はカメラ側から逆に求める)は,各面に 入射する際に屈折により方向ベクトルが変化する.そ こで,スネルの法則により屈折後の方向ベクトルを算 出することで,屈折を考慮して光線追跡することが可 能となる.

面の単位法線ベクトルを $m = (\lambda, \mu, \nu)^{T}$,単位入 射ベクトルを $v_{1} = (v_{x1}, v_{y1}, v_{z1})^{T}$ および屈折後の単 位屈折ベクトルを $v_{2} = (v_{x2}, v_{y2}, v_{z2})^{T}$ とする.入射 側の屈折率を n_{i} ,屈折側の屈折率を n_{o} としたとき, 屈折ベクトル v_{2} は以下の式により求められる[10].

$$\begin{pmatrix} v_{x2} \\ v_{y2} \\ v_{z2} \end{pmatrix} = \frac{n_i}{n_o} \begin{pmatrix} v_{x1} \\ v_{y1} \\ v_{z1} \end{pmatrix} + \kappa \begin{pmatrix} \lambda \\ \mu \\ \nu \end{pmatrix}$$
(20)
$$\kappa = \left[\sqrt{1 - \sin^2 \omega \left(\frac{n_i}{n_o}\right)^2} - \cos \omega \left(\frac{n_i}{n_o}\right) \right]$$
(21)

ただし、 ω は入射角を表し、 $\cos \omega = v_1 \cdot m$ である.

空気中における u_q からの光線ベクトルは、単位方 向ベクトル v_{q1} および位置ベクトル p_c から構成される. 容器媒質内における光線ベクトルは、面Q上の交点 位置ベクトル p_{q1} と容器内における単位方向ベクトル v_{q2} により構成され、 p_{q1} と v_{q2} はそれぞれ式(18)およ び式(20)により求められる.水中における光線ベクト ルは、面Q'上の交点位置ベクトル p_{q2} と水中におけ る単位方向ベクトル v_{q3} により構成され、容器内の光 線ベクトルと同様に求められる.

 u_r からの光線ベクトルについても同様であり、通過 する面を面 R および面 R'とすることで、水中における 光線の位置ベクトル p_{r_2} と単位方向ベクトル v_{r_3} まで 求められる.

*u_q*および*u_r*からの光線の水中における交点座標 *p_w*は中点法を用い,以下の式により求められる.

$$\boldsymbol{p}_{w} = \frac{1}{2} \left[\left(\tau_{q} \boldsymbol{v}_{q3} + \boldsymbol{p}_{q2} \right) + \left(\tau_{r} \boldsymbol{v}_{r3} + \boldsymbol{p}_{r2} \right) \right] \quad (22)$$
$$\tau_{q} = -\frac{\eta_{e} - \eta_{c} + \eta_{a} \left(\eta_{b} - \eta_{d} \right)}{1 - n^{2}} \quad (23)$$

$$\tau_r = \tau_q \eta_a + \eta_d - \eta_b \tag{24}$$

ただし、 η_a 、 η_b 、 η_c 、 η_d および η_e は、位置ベクトル と方向ベクトルの内積により求まるパラメータである。 式中の各パラメータはそれぞれ、 $\eta_a = \mathbf{v}_{q3} \cdot \mathbf{v}_{r3}$ 、 $\eta_b = \mathbf{p}_{r2} \cdot \mathbf{v}_{r3}$ 、 $\eta_c = \mathbf{p}_{r2} \cdot \mathbf{v}_{q3}$ 、 $\eta_d = \mathbf{p}_{q2} \cdot \mathbf{v}_{r3}$ およ び $\eta_e = \mathbf{p}_{q2} \cdot \mathbf{v}_{q3}$ である。



図8水中から画像面への再投影

次に,算出された水中における交点座標 p_w を画像面に再投影する.ここで,水中の3次元座標から空気中の画像面への再投影座標を解析的に求めることが困難であることが問題となる.

カメラ側から光線追跡する場合,画像上の座標か ら光線の方向が得られ,逐次的にスネルの法則によ り屈折方向を求めていくことができる.これに対し,水 中の3次元座標からは,光線の方向が得られないた め光線追跡を用いることができない.

そこで、フェルマーの原理によりこの問題を数値的 に解く方法が用いられている[11].水中の3次元座標 からの光線が画像に撮像されるためには、光線はカ メラの光学中心を通過する必要がある.よって、水中 の3次元座標 *p*_wと光学中心 *p*_cとを結ぶ経路を求め ることで、*p*_wを画像面に再投影することができる.

 p_w から p_c へと進む経路のうち,水中を通過する ユークリッド距離を L_w ,容器内を通過する距離を L_v および空気中を通過する距離を L_a とすると,光の経 路はフェルマーの原理により,次式に示す光学的距 離和 L_s を最小化したものとして得られる.

$$L_s = n_w L_w + n_v L_v + n_a L_a \tag{25}$$

ただし、 n_w は水の屈折率、 n_v は容器の屈折率および n_a は空気の屈折率である.

図 8 に面 Q を通して, 水中の 3 次元座標 p_w から 画像面の座標 u_q^* への再投影の様子を示す.まず, p_w から p_c へ直線で結んだ経路を初期値とし, 面 Q および面 Q'上の点を制御点として式(25)が最小とな る経路を算出する.算出された経路から画像面上の 再投影座標 u_q^* を得る.面 R を通した再投影座標 u_r^* も同様に求められる.

撮影した複光路ステレオ画像からN組の対応点 が得られたとき, i番目の対応点の画像座標を u_{qi} , u_{ri} とし, 姿勢パラメータ ϕ および θ を与えたときの再



図9 面の端直線

投影画像座標を $u_{qi}^{*}(\phi, \theta)$ および $u_{ri}^{*}(\phi, \theta)$ とする. こ のとき, 姿勢パラメータ ϕ , θ における再投影誤差Eを次式により定義する.

$$E(\boldsymbol{\phi},\boldsymbol{\theta}) = \sum_{i} \left\| \boldsymbol{u}_{qi} - \boldsymbol{u}_{qi}^{*}(\boldsymbol{\phi},\boldsymbol{\theta}) \right\| + \sum_{i} \left\| \boldsymbol{u}_{ri} - \boldsymbol{u}_{ri}^{*}(\boldsymbol{\phi},\boldsymbol{\theta}) \right\|$$
(26)

式(26)を最小とする ϕ および θ を姿勢パラメータとして推定する.

6. スケール推定

単眼カメラのスケール不定性により直角面の位置 をカメラと直角面間の距離を $\sigma_i = 1$ とし、これを長さ の基準として計測することになる.水中物体の実際の 距離を求めない用途の場合は問題ないが、生物研 究など実際のスケールが必要となる分野には対応で きない.

そこで, 図9に示すように角型容器の面Qまたは面 Rの両端の直線が画像内に含まれている場合, 容器 寸法からスケールを推定する.

面 Q の両端の直線が得られる場合,境界直線に対応する式(1)で表される面 Q の右端の直線パラメータを a_q , b_q を取得し,面 Q の幅寸法 W_q により,スケール σ ,は次式により求められる.

$$\sigma_{t} = \frac{-e_{ax}f_{u} + a_{q}e_{ay}f_{v} + e_{az}(-C_{u} + a_{q}C_{v} + b_{q})}{e_{tx}f_{u} - a_{q}e_{ty}f_{v} - e_{tz}(-C_{u} + a_{q}C_{v} + b_{q})}W_{q} \quad (27)$$

ただし、基底ベクトル $\boldsymbol{e}_{\alpha} = (\boldsymbol{e}_{\alpha x}, \boldsymbol{e}_{\alpha y}, \boldsymbol{e}_{\alpha z})^{\mathrm{T}}$ および直角 面への単位方向ベクトル $\boldsymbol{e}_{t} = (\boldsymbol{e}_{tx}, \boldsymbol{e}_{ty}, \boldsymbol{e}_{tz})^{\mathrm{T}}$ とした.

同様に,面 R の左端の直線パラメータ a_r , b_r および面 R の幅寸法 W_r が得られた場合は

$$\sigma_{t} = \frac{-e_{\gamma x} f_{u} + a_{r} e_{\gamma y} f_{v} + e_{\gamma z} (-C_{u} + a_{r} C_{v} + b_{r})}{e_{t x} f_{u} - a_{r} e_{t y} f_{v} - e_{t z} (-C_{u} + a_{r} C_{v} + b_{r})} W_{r}$$
(28)

となる. なお, 基底ベクトル $e_{\alpha} = (e_{\alpha x}, e_{\alpha y}, e_{\alpha z})^{T}$ とした. これにより, 単眼カメラを用いて実スケールでのステ レオ計測が可能となる.

7. 3次元形状計測

バンドル調整により得られた直角面の姿勢パラメー タ ϕ , θ およびスケール推定により得られた σ_t から, モデル座標系の基底ベクトル e_α , e_β , e_γ および直 角面への位置ベクトル t_1 , t_2 を求める. 次に, 面 Q, 面 Q', 面 R および面 R'の平面パラメータを算出する. これにより, 撮影された複光路ステレオ画像から得ら れた対応点から, 光線追跡とスネルの法則および中 点法によって水中物体上の3 次元座標を計測する.

8. 実験

提案手法を用いて容器の直角面の位置姿勢推定 と水中物体の3次元計測実験を行った.図10に実験 の様子を示す.

容器にはアクリル製角型容器を用いた. 容器の寸 法は,幅 190mm,奥行き 305mm および高さ 235mm, アクリルの厚みは, $t_s = 2.02$ mm である. 計測に用 いたカメラの解像度は, 2128×1416pixel である. また, Zhang の方法[13]によりカメラを校正した結果,画素 単位の像距離はそれぞれ $f_u = 2376.9$ pixel, $f_v = 2378.8$ pixel,光学中心は $C_u = 1117.9$ pixel, $C_u = 691.9$ pixel となった.

容器に水を満たし,容器内に水中物体として図 11 に示すチェスパターンの立方体を配置した.水中物 体の一辺のサイズは 100mm,チェスパターンの格子 間隔は 20mm である.各媒質の屈折率はそれぞれ空 気 1.00, アクリル 1.49 および水 1.33 とした.

図 12 に容器の直角面越しに水中物体を撮影した 複光路画像を示す. チェス格子を手動で対応付け, 対応点群を 18 組取得した. 緑の直線は抽出された 境界直線を示し,対応群について面Qに対応する点 を赤点,面 R に対応する点を青点で表示し,色付き の直線により対応関係を示した.

対応点群を用いて推定した直角面の姿勢パラメー タは、 $\phi = 16.1 \deg$ 、 $\theta = 43.3 \deg$ となった。面Qの 幅寸法 $W_q = 305 \text{ mm}$ を用いてスケールを求めた結 果は $\sigma_t = 624.5 \text{ mm}$ となった。同様に面Rの幅寸法 $W_q = 190 \text{ mm}$ から求めた結果は $\sigma_t = 604.1 \text{ mm}$ と なった。図13に直角面の位置姿勢パラメータを用い、 18組の対応点から水中物体の3次元計測を行った 結果を示す。

また比較のために、図 14 に示すように容器の直角 面に平面状のチェスパターンを直接貼り付け、直角 面の位置姿勢を校正した結果、 $\phi = 16.6 \deg$ 、





図 10 実験の様子

図 11 計測対象物



図12撮影画像(歪み補正,境界直線抽出)



 $\theta = 45.2 \deg および, \rho_t = 604.7 \, \text{mm} となった.$ $表1にバンドル調整と幅寸法<math>W_q$ を与えて得られた 直角面のパラメータ,バンドル調整と幅寸法W, を与えて得られた直角面パラメータおよびチェスパターン により校正した直角面パラメータのそれぞれで水中 物体の3次元計測を行い,求められた格子間隔の平 均値および標準偏差を算出した結果を示す.

9. 結論

角型容器の直角面越し複光路単眼ステレオ画像 から直角面の位置姿勢を推定し,水中物体の3次元 形状を計測する手法を提案した.その有効性を実験



図 14 チェスパターンによる直角面の校正

	平均[mm]	標準偏差[mm]
幅寸法 W_q	20.4	0.39
幅寸法 <i>W_r</i>	19.7	0.37
校正結果	20.1	0.50

表1 各直角面パラメータによる計測値

により確認した.

今後の課題として、バンドル調整に用いる対応点を 自動で取得することや、推定された直角面の位置姿 勢情報を用い複光路ステレオ画像から屈折を考慮し たステレオマッチングによる3次元計測などが考えら 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

- 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, Vol.78, No.2-3, pp.207-222, 2008.
- [2] 伊部公紀、山下淳、金子透、小林祐一、レーザレンジフ アインダによる透明容器と液中物体の3次元形状計測、 動的画像処理実利用化ワークショップ2013 講演論文集、 pp.131-136, 2013.
- [3] 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, Vol.5, No.0, pp.65-69, 2013.
- [4] A. K. Chong and P. Stanford, Underwater Digital Stereo-Observation Technique for Red Hydrocoral Study, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol.68, No.7, pp.745-571, 2002.
- [5] 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 Cameras (OMNIVIS2011), pp.304-311,

2011.

- [6] 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 (ICRA2009), pp.2830-2835, 2009.
- [7] 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次元計測,精密工学会誌, Vol.79, No.4, pp.344-348, 2013.
- [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 (CVPR1999), Vol.1, pp.82-87. 1999.
- [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 (IROS2010), pp.3652-3657, 2010.
- [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, Vol.22, No.2, pp.364-375, 1997.
- [11] A. Sedlazeck and R. Koch: Calibration of Housing Parameters for Underwater Stereo-Camera Rigs, Proceedings of the British Machine Vision Conference, pp.118.1-118.11, 2011.
- [12] 岩元祐輝, 菅谷保之, 金谷健一, 3 次元復元のためのバンドル調整の実装と評価, 情報処理学会研究報告, コンピュータビジョンとイメージメディア(CVIM), 2011-CVIM-175, 19, pp.1-8, 2011.
- [13] Z. Zhang, A Flexible New Technique for Camera Calibration, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.22, No.11, pp.1330-1334, 2000.
- 伊部公紀:2005年,静岡理工科大学理工学部卒業.2007年, 静岡理工科大学大学院理工学研究科修了.現在,静岡 大学創造科学技術大学院自然科学系教育部博士課程 在学中.水中環境下における画像計測の研究に従事.
- 小林祐一:1997 年,東京大学工学部卒業.1999 年,東京大 学大学院工学研究科修了.2002 年,同博士課程修了. 現在,静岡大学大学院工学研究科准教授.博士(工学). ロボット学習と自律分散システムの研究に従事.
- 金子透:1972 年,東京大学工学部卒業.1974 年,東京大学 大学院工学系研究科修士課程修了.現在,静岡大学大 学院工学研究科教授.工学博士.画像処理,コンピュー タビジョンの研究に従事.
- 山下淳:1996 年,東京大学工学卒業.1998 年,東京大学大 学院工学系研究科修士課程修了.2001年,同博士課程 修了.現在,東京大学大学院工学系研究科精密工学専 攻准教授.博士(工学).画像処理,コンピュータビジョン, ロボットの知能化などの研究に従事.