

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‡

Hirotoishi 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

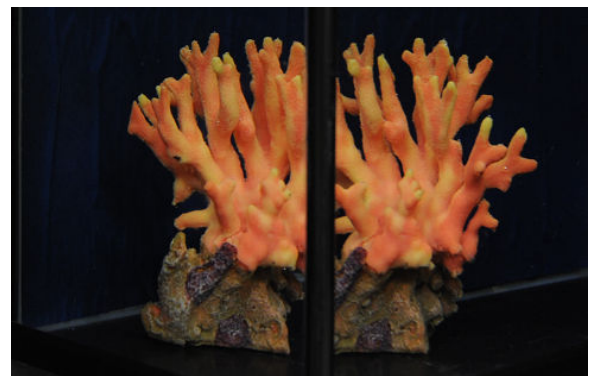


図1 角型容器越し複光路単眼ステレオ画像

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、校正済み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 $X_c Y_c Z_c$ 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 軸) と画像面との交点座標を (C_u, C_v) とする。

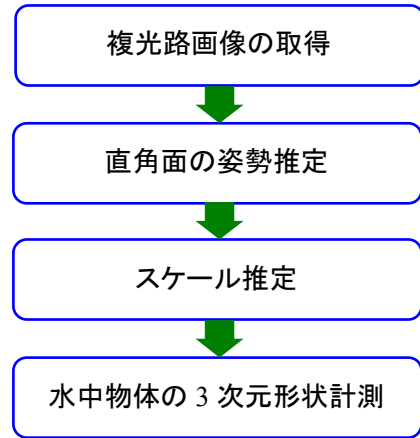


図2 処理手順

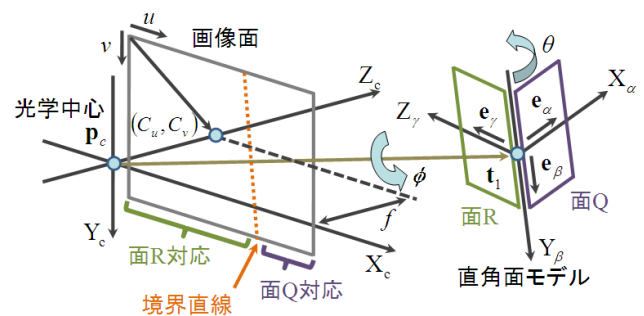


図3 計測モデル

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 t_1 とし、モデル座標系の各軸の単位基底ベクトルを e_α 、 e_β および 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。

$$u = a_s v + b_s \quad (1)$$

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。

$$v_c = \left((u - C_u) / f_u, (v - C_v) / f_v, 1 \right)^T \quad (2)$$

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 $\mathbf{t}_1 = (t_x, t_y, t_z)^T$ は $Z_c X_c$ 平面内にあるものとし、 $t_y = 0$ とする。ここで、 \mathbf{t}_1 は Y_β 軸上の位置を表しているため、 \mathbf{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 \mathbf{t}_{z1} は式(1)および式(2)により、次式のように求められる。

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

\mathbf{t}_{z1} は \mathbf{t}_1 と同一方向のベクトルであることから、 \mathbf{t}_{z1} を正規化することにより、 \mathbf{t}_1 の単位ベクトル \mathbf{e}_t を得る。また、 \mathbf{t}_1 の長さをスケール σ_t と表すと、 \mathbf{t}_1 は次式により表される。

$$\mathbf{t}_1 = \sigma_t \mathbf{e}_t \quad (4)$$

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 \mathbf{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}_{v0} 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。

$$\mathbf{n}_\theta = \mathbf{e}_t \times \mathbf{v}_{v0} \quad (5)$$

なお、 \times はベクトルの外積を表す。これにより、 \mathbf{e}_t と直交し、平面 Φ に含まれるベクトル \mathbf{v}_ϕ は次式により得られる。

$$\mathbf{v}_\phi = \mathbf{e}_t \times \mathbf{n}_\theta \quad (6)$$

\mathbf{v}_ϕ を正規化した単位ベクトル \mathbf{e}_ϕ を基準とし、平面 Φ において \mathbf{e}_t に進む回転角を ϕ とすると、基底ベクトル \mathbf{e}_β は次式により求まる。

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

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。 \mathbf{n}_θ は平面 Θ に含まれるため、 \mathbf{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。

$$\mathbf{e}_\kappa = \mathbf{e}_\theta \times \mathbf{e}_\beta \quad (8)$$

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

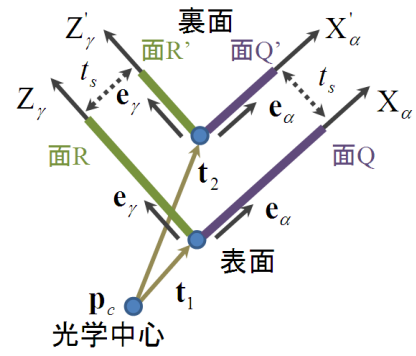


図4 表面と裏面の直角面

れる。

$$\begin{aligned} \mathbf{e}_\alpha &= (\cos \theta) \mathbf{e}_\theta + (\sin \theta) \mathbf{e}_\kappa \\ \mathbf{e}_\gamma &= (-\sin \theta) \mathbf{e}_\theta + (\cos \theta) \mathbf{e}_\kappa \end{aligned} \quad (10)$$

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。

$$\mathbf{t}_2 = \mathbf{t}_1 + t_s (\mathbf{e}_\alpha + \mathbf{e}_\gamma) \quad (11)$$

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

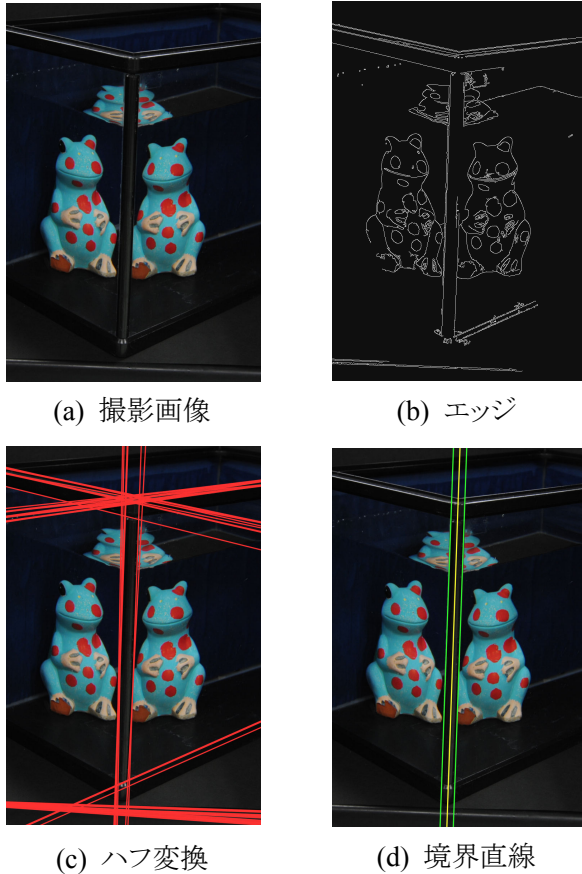


図5 境界直線の抽出過程

より表現するため、次式によりパラメータを変換する。

$$a_s = -\tan \theta_h \quad (12)$$

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

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。

$$|\cos \theta_h| \geq \xi_h \quad (14)$$

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対として抽出する。

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、

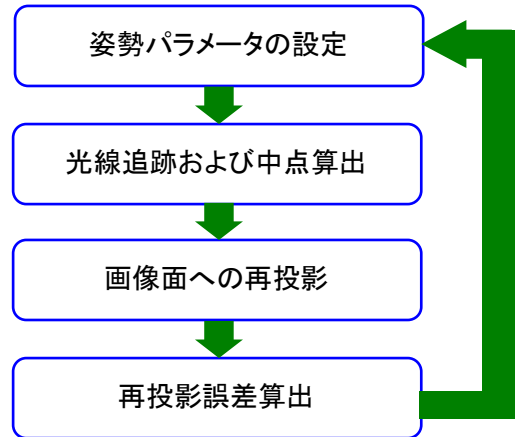


図6 再投影誤差最小化

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_l 、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 $\sigma_l = 1$ 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、 ϕ および θ を推定する。

まず、 ϕ 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 ϕ 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 $\mathbf{u}_q = (u_q, v_q)$ とし、面Rに対応する領域の画像座標を $\mathbf{u}_r = (u_r, v_r)$ とする。ここで、 \mathbf{u}_q および \mathbf{u}_r

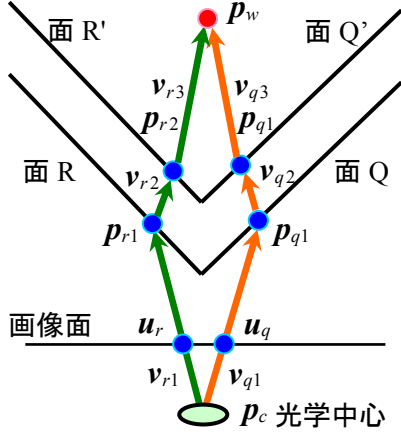


図7 光線追跡

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。

$$Ax + By + Cz + D = 0 \quad (15)$$

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_y 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

$$(A_q, B_q, C_q) = e_y^T \quad (16)$$

$$D_q = -e_y \cdot t_1 \quad (17)$$

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_x 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。

$$p' = \rho_f v + p \quad (18)$$

$$\rho_f = -\frac{Ap_x + Bp_y + Cp_z + D}{Av_x + Bv_y + Cv_z} \quad (19)$$

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]。

$$\begin{pmatrix} v_{x2} \\ v_{y2} \\ v_{z2} \end{pmatrix} = \frac{n_i}{n_o} \begin{pmatrix} v_{x1} \\ v_{y1} \\ v_{z1} \end{pmatrix} + \kappa \begin{pmatrix} \lambda \\ \mu \\ \nu \end{pmatrix} \quad (20)$$

$$\kappa = \left[\sqrt{1 - \sin^2 \omega \left(\frac{n_i}{n_o} \right)^2} - \cos \omega \left(\frac{n_i}{n_o} \right) \right] \quad (21)$$

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_{r2} と単位方向ベクトル v_{r3} 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。

$$p_w = \frac{1}{2} [(\tau_q v_{q3} + p_{q2}) + (\tau_r v_{r3} + p_{r2})] \quad (22)$$

$$\tau_q = -\frac{\eta_e - \eta_c + \eta_a(\eta_b - \eta_d)}{1 - \eta_a^2} \quad (23)$$

$$\tau_r = \tau_q \eta_a + \eta_d - \eta_b \quad (24)$$

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

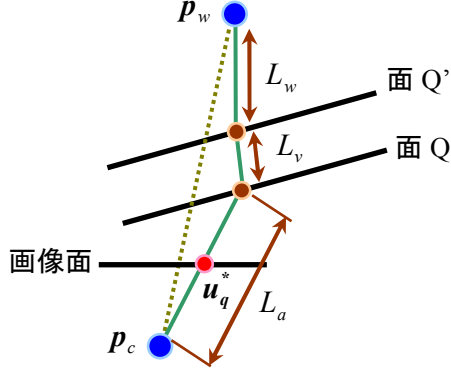


図8 水中から画像面への再投影

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次元座標から空气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值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 および空气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 L_s を最小化したものとして得られる。

$$L_s = n_w L_w + n_v L_v + n_a L_a \quad (25)$$

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 組の対応点を得られたとき、 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

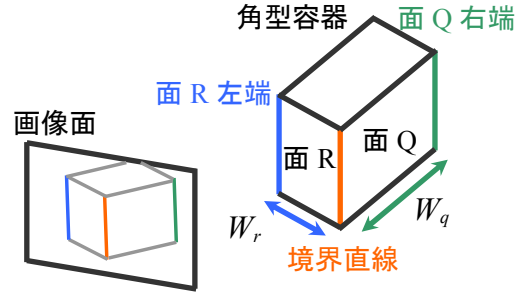


図9 面の端直線

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。

$$E(\phi, \theta) = \sum_i \|u_{qi} - u_{qi}^*(\phi, \theta)\| + \sum_i \|u_{ri} - u_{ri}^*(\phi, \theta)\| \quad (26)$$

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には問題ないが、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_i は次式により求められる。

$$\sigma_i = \frac{-e_{ax} f_u + a_q e_{ay} f_v + e_{az} (-C_u + a_q C_v + b_q)}{e_{ix} f_u - a_q e_{iy} f_v - e_{iz} (-C_u + a_q C_v + b_q)} W_q \quad (27)$$

ただし、基底ベクトル $e_\alpha = (e_{ax}, e_{ay}, e_{az})^T$ および直角面への単位方向ベクトル $e_t = (e_{tx}, e_{ty}, e_{tz})^T$ 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

$$\sigma_i = \frac{-e_{rx} f_u + a_r e_{ry} f_v + e_{rz} (-C_u + a_r C_v + b_r)}{e_{ix} f_u - a_r e_{iy} f_v - e_{iz} (-C_u + a_r C_v + b_r)} W_r \quad (28)$$

となる。なお、基底ベクトル $e_\alpha = (e_{ax}, e_{ay}, e_{az})^T$ 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_i から、モデル座標系の基底ベクトル \mathbf{e}_α , \mathbf{e}_β , \mathbf{e}_γ および直角面への位置ベクトル \mathbf{t}_1 , \mathbf{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、 $t_s = 2.02 \text{ mm}$ である. 計測に用いたカメラの解像度は、 $2128 \times 1416 \text{ pixel}$ 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 $f_u = 2376.9 \text{ pixel}$, $f_v = 2378.8 \text{ pixel}$, 光学中心は $C_u = 1117.9 \text{ pixel}$, $C_v = 691.9 \text{ pixel}$ 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、 $\phi = 16.1 \text{ deg}$, $\theta = 43.3 \text{ deg}$ 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 $\sigma_i = 624.5 \text{ mm}$ となった. 同様に面 R の幅寸法 $W_r = 190 \text{ mm}$ から求めた結果は $\sigma_i = 604.1 \text{ mm}$ 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、 $\phi = 16.6 \text{ deg}$,

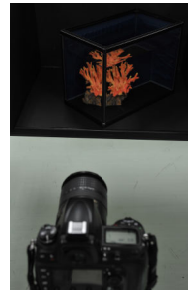


図10 実験の様子

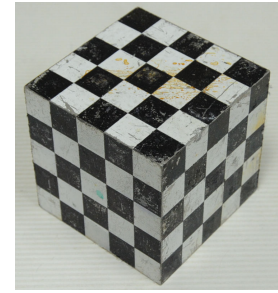


図11 計測対象物

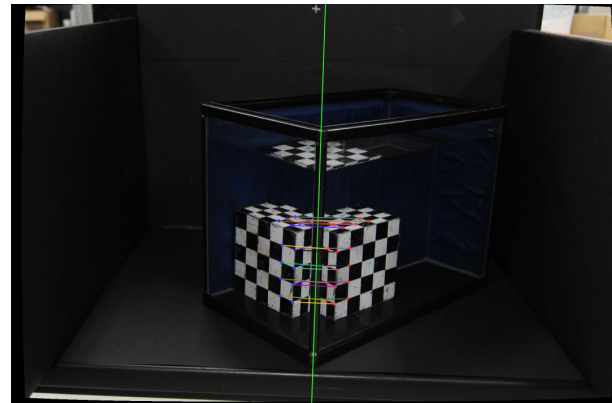


図12 撮影画像(歪み補正, 境界直線抽出)

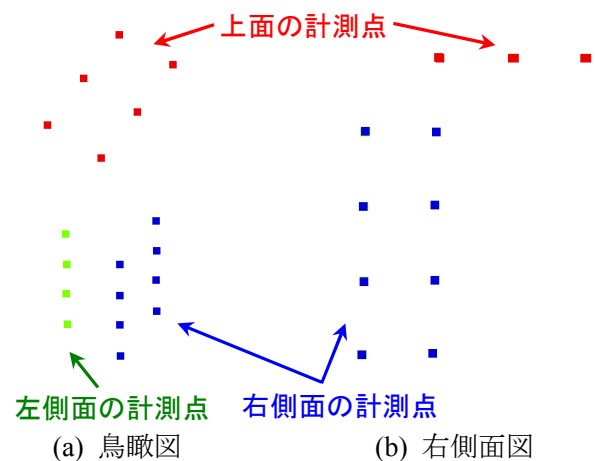


図13 水中物体の3次元計測結果

$\theta = 45.2 \text{ deg}$ および、 $\rho_i = 604.7 \text{ mm}$ となった.

表1にバンドル調整と幅寸法 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_r 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

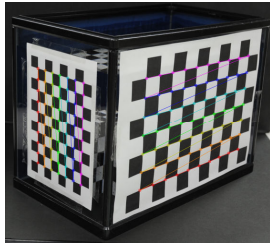


図 14 チェスパターンによる直角面の校正

表 1 各直角面パラメータによる計測値

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

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

- [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, Vol.78, No.2-3, pp.207-222, 2008.
- [2] 伊部公紀, 山下淳, 金子透, 小林祐一, レーザレンジファ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.745-751, 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, 東京大学大学院理工学研究科修了. 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.