

画素依存型バリフォーカルカメラモデルによる 水中多視点カメラ群の線形外部キャリブレーション

川原 僚^{1,a)} 延原 章平^{1,b)} 松山 隆司^{1,c)}

概要: 本報告では水中多視点撮影環境のように、それぞれ独立したハウジング層を持つ水中カメラ群の外部キャリブレーション法を提案する。屈折を考慮した多視点幾何は水中光線に基づいて記述することができ、本報告ではこの点に着目した画素依存型バリフォーカルカメラモデルを用いて 16 個の対応点を用いた線形解法を実現した。また実際に水中物体の全周囲 3 次元形状復元を行うことで水中撮影環境における提案手法の有効性を示した。

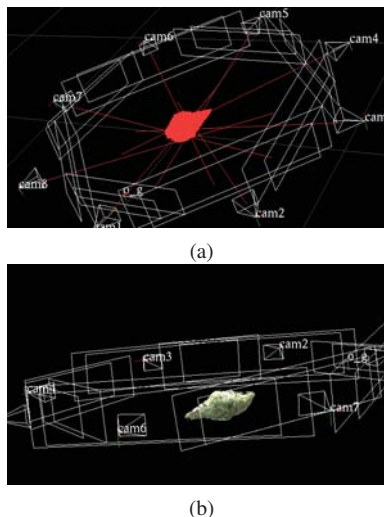


図 1 8 角柱水槽内の貝の形状復元 (a) 視体積交差法による復元結果
(b) スペース・カービング法を用いた復元結果

1. はじめに

1.1 研究背景

コンピュータビジョンにおける多視点幾何は、シーン撮像面の光の経路をモデル化することで画像からの 3 次元シーン復元を可能にしてきた。そして、水中のような撮影環境の変化に対してもこのような技術を応用することが期待されている。例えば、受精卵の全周囲 3 次元形状復元によりその発達を解析することなど、医学・生物学への応用が挙げられる。

これまでの研究では透視投影変換が可能なピンホールカメラモデルが広く用いられ、シーンから撮像面への光の経路は一直線と仮定されてきた [4]。しかしながら、カメラをハウジングで保護する水中撮影環境のように撮像過程に複数の媒質が存在する場合は、屈折現象が生じるために投影過程全体を透視投影としてモデル化することは適切ではない。これはコンピュータビジョン技術の水中への応用における問題点となっている。このような環境の中で 3 次元シーンの復元を実現するための課題として以下が挙げられる。

- 媒質間での屈折を考慮した水中カメラのモデル化
- 水中多視点カメラ群における幾何学的関係の定式化とキャリブレーションの実現
- 水中カメラモデルを用いた 3 次元形状復元法およびシステムの確立

本報告ではこのような課題に対し、水中カメラモデルを導入した新たな水中多視点カメラ群の外部キャリブレーション法を提案し、その有効性を定量的に評価する。

1.2 提案手法

水中の 3 次元シーンの復元における上記課題に対し、本研究では屈折を含む投影経路を媒質ごとに分割し、そのうちの水中部分 (図 2 の l_w に対応し、以下では水中光線とよぶ) のみに注目し、画素と水中光線の対応関係をモデル化するアプローチをとる。つまり、撮影画像の画素と光線に対応づける Raxel カメラ [3] の表現を利用する。このような考えに基づき、仮想的に透視投影変換が可能な水中カメラモデルとして画素依存型バリフォーカルカメラモデル (Pixel-wise varifocal camera model : PVCM) [6] [13] を導入

¹ 京都大学大学院情報学研究科 〒 606-8501 京都市左京区吉田本町

^{a)} kawahara@vision.kuee.kyoto-u.ac.jp

^{b)} nob@vision.kuee.kyoto-u.ac.jp

^{c)} tm@vision.kuee.kyoto-u.ac.jp

する。PVCМの特徴は、ハウジング層を含む光学系全体を1つの仮想カメラとして扱える点と、画素ごとに光線を対応させる考えを応用して仮想焦点距離による効率的な順投影の計算を可能にしている点である。また、PVCМにより水中カメラ群における幾何学的関係の定式化とキャリブレーションを実現することができる。

これらを踏まえ、本報告の構成は以下ようになる。まず、第2節で関連研究について述べ、第3節で水中撮影における投影モデルを単視点・多視点の場合について定義する。第4節でキャリブレーションアルゴリズムを示し、この中でPVCМによるDLT法に基づく奥行き計測、および特徴点ベースの線形外部キャリブレーションを定式化する。また、第5節ではシミュレーションによる外部キャリブレーションの定量的な評価を行い、実際に8台のカメラを用いたスペース・カービング法の復元結果によりモデルの有効性を示す。

2. 関連研究

水中におけるコンピュータ・ビジョンの研究では、ドーム型のハウジングを用いることで媒質間の屈折を無視する方法 [9,11] が考えられる一方で、平面ハウジングを用いた水中カメラシステムや水槽面などのように平面の媒質境界面を仮定する環境も多く存在する [1,2,5,10]。本報告では後者をより一般化したシステムとして、それぞれ異なる平面ハウジングで保護された複数の水中カメラを考えるものとする。

複数の水中カメラ同士の位置推定の手法としては、特別なキャリブレーション物体を必要としない特徴点ベースの手法が広く用いられている。特徴点を含む多視点幾何の定式化については Chari と Sturm [2] の光線ベースの方法が挙げられる。この方法では Pücker 座標系を用いることで特徴点と水中の光線が満たす拘束条件を基本行列を用いて定式化している。しかし一方で、このような光線同士の幾何制約を姿勢推定に用いる方法が提案されていない。本報告では、Pücker 座標系を PVCМ に適用し、基本行列の推定を行うアプローチをとる。PVCМの仮想焦点距離を利用すると、線形外部キャリブレーションは光線ごとに仮想的なピンホールカメラモデルが存在する問題として扱うことができ、カメラ群同士の外部キャリブレーション [7] の特殊な場合となる。

また、姿勢推定の非線形最適化は、屈折過程を含む再投影誤差の最小化として定式化される。順投影過程としては12次方程式を解く方法が挙げられるが [1]、効率面から独立な過程としての順投影を用いない方法が提案されている。Kang [5] らは水中でなく屈折境界面上の点からの順投影を考え、この点から水中への逆投影は制約条件としている。Sedlazeck と Koch [10] はある画素に対応する透視投影可能な仮想カメラを用いて、再投影の際にもこの仮想カメ

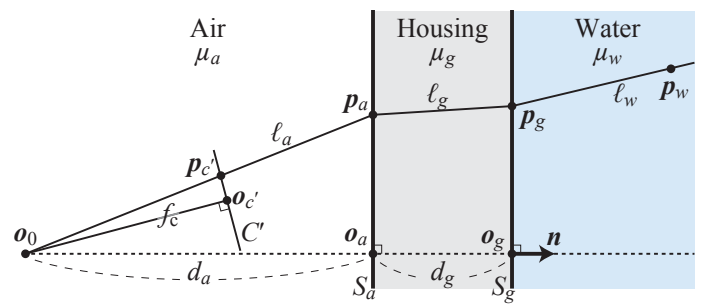


図2 水中撮影における単視点投影モデル

ラに投影することでその誤差を指標にしている。これらの方法に対し、本報告では非線形最適化のために、PVCМによる効率的な順投影を利用して再投影誤差を計算し、その評価を行う。

3. 水中撮影における投影モデル

3.1 単視点の場合

本報告では水中撮影における投影を図2のようにモデル化する。PVCМもこの投影モデルに基づくものであり、以下の要素からなる。

- カメラ … 空気中においては o_0 を投影中心とする焦点距離 f_c 、内部パラメータ行列 A 、レンズ歪み係数 k のピンホールカメラ C' である。
- ハウジング … 厚さ d_g の平面ハウジングであり、 o_0 から距離 d_a の位置に存在する。
- 媒質 … 空気、ハウジング、水の層が存在し、各媒質の屈折率は μ_a, μ_g 、および μ_w である。 S_g と S_g は平行な各媒質間の境界平面である。

水中の3次元点 p_w から画像平面上の点 $p_{c'}$ への光の経路は各境界平面上での点 p_g, p_a および光線 l_w, l_g 、および l_a で記述される。ここで、実カメラ C' の代わりに光軸方向がハウジング平面の法線である axial カメラ C を用いても一般性を失わない。このカメラ C に対して光の投影経路は光軸方向 Z に関して軸対称となるため、以下では座標系の表記として $(r, z)^T$ を用いるものとする。また、表記として r_α と z_α をそれぞれ α の r, z 方向成分とし、 $v_X = (r_{v_X}, z_{v_X})^T$ は光線 l_X のカメラから水中への方向ベクトルと定義する。

また、スネルの法則を用いると $\mu_a r_{v_a} = \mu_g r_{v_g} = \mu_w r_{v_w}$ を満たすため、水中の方向ベクトル v_w は以下のようにして導出される。

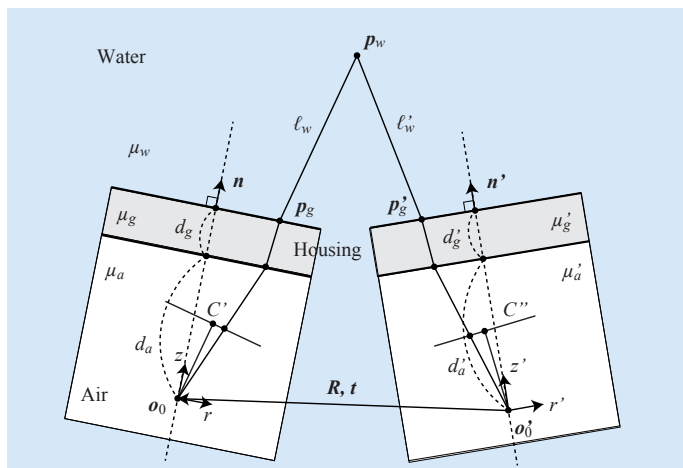


図3 水中撮影における複数視点投影モデル

$$\mathbf{v}_a = \left(\frac{r_{p_a}}{\sqrt{r_{p_a}^2 + d_a^2}}, \frac{f_c}{\sqrt{r_{p_a}^2 + d_a^2}} \right)^T, \quad (1)$$

$$\mathbf{p}_a = \frac{d_a}{f_c} \mathbf{v}_a, \quad (2)$$

$$\mathbf{v}_g = \left(\frac{\mu_a}{\mu_g} r_{v_a}, \sqrt{1 - r_{v_g}^2} \right)^T, \quad (3)$$

$$\mathbf{p}_g = \mathbf{p}_a + \frac{d_g}{z_{v_g}} \mathbf{v}_g, \quad (4)$$

$$\mathbf{v}_w = \left(\frac{\mu_g}{\mu_w} r_{v_g}, \sqrt{1 - r_{v_w}^2} \right)^T, \quad (5)$$

3.2 複数視点の場合

異なるハウジングで保護された複数の水中カメラは、図3のようにモデル化される。カメラ C' および C'' はそれぞれ原点を \mathbf{o}_g , \mathbf{o}'_g とする異なる座標系をもち、 \mathbf{o}_g 座標系へは \mathbf{R} および \mathbf{t} で座標変換されるものとする。

4. キャリブレーションアルゴリズム

4.1 概要

第3.2節のモデルを、本研究ではPVCMMを用いて以下の手順によりキャリブレーションする。

- 単一のPVCMMのキャリブレーションによる A, \mathbf{k} および $\mathbf{n}, d_a, d_g, \mu_g$ の推定
- 複数のPVCMMの外部キャリブレーションによる \mathbf{R}, \mathbf{t} および μ_w の推定

そこで、まずPVCMMの定義について次節で述べることにする。

4.2 画素依存型パリアフォーカルカメラモデルの定義

PVCMM C_v は以下のように定義される。

- 仮想カメラの光軸... axialカメラ C と同様である。
- 仮想スクリーン... 媒質境界面 S_g に存在する仮想的な撮像面である。
- 仮想焦点距離... 点 \mathbf{o}_g から \mathbf{o}_{q_g} への距離であり、図4

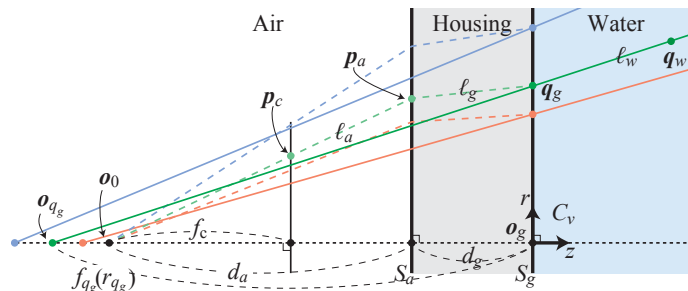


図4 画素依存型パリアフォーカルカメラモデル

に示すように画素ごとに異なる値をとる

- 実カメラ C' への変換は C からホモグラフィ行列 H によって行われる。

画素ごとに異なる仮想焦点距離 f_{q_g} は $f_{q_g}(r_{q_g})$ として表すことができ、この関係はあらかじめ任意の精度で用意することが可能である。また、定義より仮想焦点距離は以下の式を満たす。

$$\frac{r_{q_w}}{z_{q_w} + f_{q_g}(r_{q_g})} = \frac{r_{p_g}}{f_{q_g}(r_{q_g})}, \quad (6)$$

$$\Leftrightarrow f_{q_g}(r_{q_g}) = \frac{r_{q_g}}{r_{q_w} - r_{q_g}} z_{q_w}.$$

4.3 PVCMMのキャリブレーション

上述の定義より、PVCMMは以下のパラメータ群から構成される。

- 実カメラ C' の内部パラメータ A, \mathbf{k}
- ハウジング平面の法線ベクトル \mathbf{n}
- \mathbf{o}_g と各媒質境界面との距離 d_a, d_g
- 各媒質の屈折率 μ_a, μ_g, μ_w
- カメラ C から C' へのホモグラフィ行列 H

単一のPVCMMのキャリブレーションについて、本研究では文献[13]のように、まず内部パラメータ A, \mathbf{k} を空気中での内部キャリブレーション[12]で推定し、 $H, \mathbf{n}, d_a, d_g, \mu_a, \mu_g$ については、 S_g 上に用意したマーカーを用いて文献[1]の方法で推定する。なお、 μ_w についてはこの段階では既知(例えば1.33)と仮定し、第4.8節の非線形最適化で推定する。

4.4 逆投影

これは第3節の過程そのものであり、水中の光線 ℓ_w は点 \mathbf{o}_{p_g} および方向ベクトル \mathbf{v}_w によって表現されている。

4.5 順投影

第3節の投影モデルから考えると、順投影の過程は次に示される式(7)を r_{v_w} について解くことと等価である。

$$r_{q_w} = \frac{r_{v_a} d_a}{z_{v_a}} + \frac{r_{v_g} d_g}{z_{v_g}} + \frac{r_{v_w} z_{q_w}}{z_{v_w}} \\ = \frac{\mu_w r_{v_w} d_a}{\sqrt{\mu_a^2 - \mu_w^2 r_{v_w}^2}} + \frac{\mu_w r_{v_w} d_g}{\sqrt{\mu_g^2 - \mu_w^2 r_{v_w}^2}} + \frac{r_{v_w} z_{q_w}}{\sqrt{1 - r_{v_w}^2}} \quad (7)$$

式(7)の変形によって12次方程式が導かれる[1]が、その解を解析的に得ることはできない。これに対して、PVCMMは定義より $f_{q_g}(r_{q_g})$ の関係を与えることができるため、式(6)から漸化式

$$r_{q_{k+1}} = \frac{r_{q_k} f_{q_g}(r_{q_k})}{(z_{q_w} + f_{q_g}(r_{q_k}))} \quad (8)$$

を用いた順投影を考えることができる。PVCMMは効率的な順投影を

- 式(7)の解をNewton法を用いて得る方法
- 漸化式(8)を用いて解を得る方法

を組み合わせることによって実現している[6]。

4.6 水中多視点カメラ群におけるDLT法に基づく奥行き計測

本節では水中多視点カメラシステムのために、PVCMMを用いたDLT法に基づく奥行き計測について述べることにする。

ある仮想カメラ C_{v1} 上の画素 q_{g1} と C_{v2} 上の画素 q_{g2} がともに単一の3次元点 $q_w = R_2 q_{w2} + t_2$ から投影されたとする。ただし、 q_w および q_{w2} はそれぞれのカメラ座標系 C_{v1} および C_{v2} における位置であり、 R_2, t_2 はこれらのカメラの相対的な姿勢および位置である。

まず、式(6)より、水中の3次元点は

$$r_{q_w} = r_{p_g} + \frac{r_{p_g}}{f_{q_g}(r_{q_g})} z_{q_w}, \quad (9)$$

と与えられるため、これを $x-y-z$ 成分に拡張すると、3次元点 q_w は

$$q_w = \begin{pmatrix} r_{q_w} \frac{x_{v_w}}{r_{v_w}} & r_{q_w} \frac{y_{v_w}}{r_{v_w}} & z_{q_w} \end{pmatrix}^T, \quad (10)$$

となる。よって式(6)および式(10)より、

$$A_1 q_w = b_1, \quad (11)$$

を得る。ただし、

$$A_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & -\frac{x_{v_w}}{z_{v_w}} \\ 0 & 1 & -\frac{y_{v_w}}{z_{v_w}} \end{pmatrix}, \quad b_1 = \begin{pmatrix} \frac{x_{v_w} r_p}{r_{v_w}} \\ \frac{y_{v_w} r_p}{r_{v_w}} \end{pmatrix}, \quad (12)$$

である。同様に、 C_{v2} についても

$$A_2 q_{w2} = b_2, \quad (13)$$

を得る。式(11)および式(13)より、水中の3次元点 q_w はDLT法による奥行き計測の式

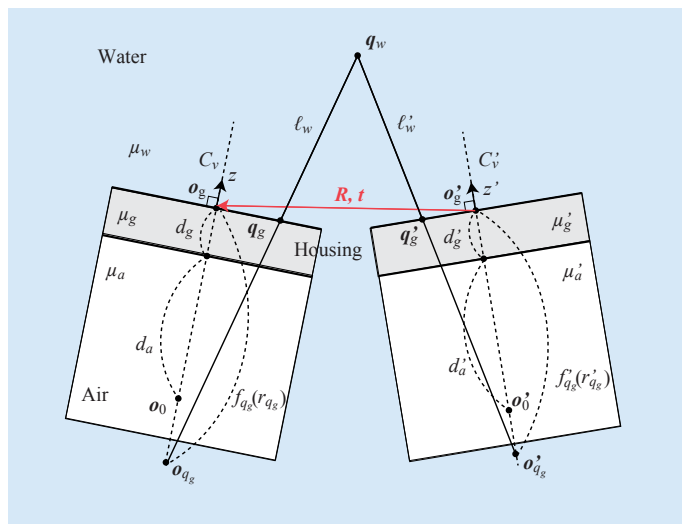


図5 PVCMMの外部キャリブレーション

$$\begin{pmatrix} A_1 \\ A_2 R_2^{-1} \end{pmatrix} q_w = \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 + A_2 R_2^{-1} t_2 \end{pmatrix} \\ \Leftrightarrow q_w = \begin{pmatrix} A_1 \\ A_2 R_2^{-1} \end{pmatrix}^+ \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 + A_2 R_2^{-1} t_2 \end{pmatrix}, \quad (14)$$

によって求めることができる。ここで、 M^+ は M の逆行列である。3つ以上のPVCMMに対しては、これを拡張して

$$\begin{pmatrix} A_1 \\ A_2 R_2^{-1} \\ A_3 R_3^{-1} \\ \vdots \end{pmatrix} q_w = \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 + A_2 R_2^{-1} t_2 \\ b_3 + A_3 R_3^{-1} t_3 \\ \vdots \end{pmatrix}, \quad (15)$$

のように定式化することができる。

4.7 16組の対応点による外部キャリブレーション

2つのPVCMM C_v および C'_v 間の相対的な姿勢と位置 R, t を求めることを考える。まず、個々のPVCMMはキャリブレーション済みであるとする。逆投影の表現として、ピンホールカメラモデルではカメラ座標系における視線ベクトルを方向ベクトル v_a と暗黙的に投影中心 o_0 で表す。仮想カメラ C_v では、これを方向ベクトル v_w と o_{q_g} を用いて表現できる*1。つまり、水中の点は q_w は

$$\begin{cases} q_w = \lambda_{q_w} v_w + o_{q_g} \\ q_w = R(\lambda'_{q_w} v'_w + o'_{q_g}) + t \end{cases} \quad (16) \\ \Leftrightarrow \lambda_{q_w} v_w - \lambda'_{q_w} R v'_w = R o'_{q_g} + t - o_{q_g},$$

と表すことができる。ただし、 λ_{q_w} および λ'_{q_w} はそれぞれ o_{q_g} および o'_{q_g} からの未知の奥行きである。これより v_w 、 $R v'_w$ 、および $R o'_{q_g} + t - o_{q_g}$ は同一平面上に存在するため、

*1 原点は o_g とする。

$$\mathbf{v}_w^\top \left(\left(\mathbf{R} \mathbf{o}'_{q_g} + \mathbf{t} - \mathbf{o}_{q_g} \right) \times \left(\mathbf{R} \mathbf{v}'_w \right) \right) = 0, \quad (17)$$

となる。これを要素ごとに分解し、Pücker 座標系を用いて整理すると

$$\begin{aligned} & \mathbf{l}_w^\top \mathbf{E}_v \mathbf{l}'_w = 0, \\ & \begin{pmatrix} x_{vw} \\ y_{vw} \\ z_{vw} \\ \mathbf{o}_{q_g} \times \begin{pmatrix} x_{vw} \\ y_{vw} \\ z_{vw} \end{pmatrix} \end{pmatrix}^\top \begin{pmatrix} \mathbf{t} \times \mathbf{R} & \mathbf{R} \\ \mathbf{R} & \mathbf{0} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x'_{vw} \\ y'_{vw} \\ z'_{vw} \\ \mathbf{o}'_{q_g} \times \begin{pmatrix} x'_{vw} \\ y'_{vw} \\ z'_{vw} \end{pmatrix} \end{pmatrix} = 0, \end{aligned} \quad (18)$$

を得ることができる。\$E_v\$ に含まれる未知数は定数倍の不定性を残して 16 である。したがって、16 組以上の対応点を用いることにより \$E_v\$ を得ることができれば、\$\mathbf{R}\$ の正規直交性より \$\mathbf{R}\$ が決定される。このとき

$$\begin{pmatrix} x_{vw} \\ y_{vw} \\ z_{vw} \\ -f_{q_g} y_{vw} \\ f_{q_g} x_{vw} \\ 0 \end{pmatrix}^\top \begin{pmatrix} \mathbf{t} & \mathbf{I} \\ \mathbf{I} & \mathbf{0} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R \begin{pmatrix} x'_{vw} \\ y'_{vw} \\ z'_{vw} \end{pmatrix} \\ R \begin{pmatrix} -f'_{q_g} y'_{vw} \\ f'_{q_g} x'_{vw} \\ 0 \end{pmatrix} \end{pmatrix} = 0, \quad (19)$$

であり、右側の新たな直線を \$\hat{\ell}\$ とすると、

$$\begin{aligned} & \begin{pmatrix} z_{vw} \hat{\ell}_2 - y_{vw} \hat{\ell}_3 \\ x_{vw} \hat{\ell}_3 - z_{vw} \hat{\ell}_1 \\ y_{vw} \hat{\ell}_1 - x_{vw} \hat{\ell}_2 \end{pmatrix}^\top \begin{pmatrix} x_t \\ y_t \\ z_t \end{pmatrix} \\ & = z_{vw} \hat{\ell}_6 + y_{vw} (\hat{\ell}_5 - f_{q_g} \hat{\ell}_1) + x_{vw} (\hat{\ell}_4 - f_{q_g} \hat{\ell}_2), \end{aligned} \quad (20)$$

となり、\$\mathbf{t}\$ を求めることができる。また、文献 [7] で述べられている一般解

$$\mathbf{E}_v = \begin{pmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{I} \\ \mathbf{I} & \mathbf{0} \end{pmatrix}, \quad (21)$$

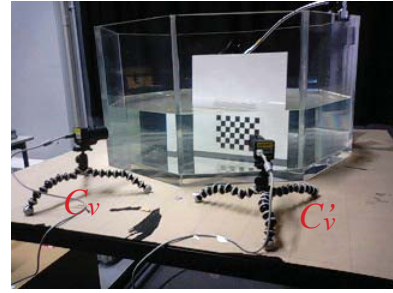
は \$f_{q_g} = f'_{q_g}\$ であるときのみ成り立つため、PVCМ の場合は \$E_v\$ を線形に求めることができる。

4.8 再投影誤差の最小化による非線形最適化

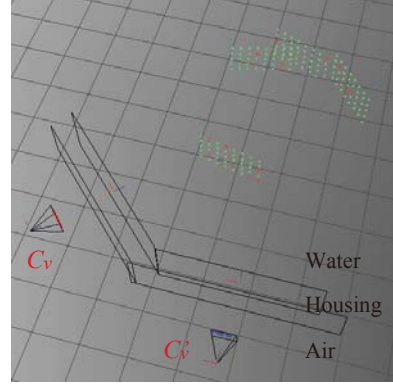
線形外部キャリブレーションにより得られた解を初期値として、物理的な意味での最適化を再投影誤差の最小化によって行う。ここで、\$n\$ 台の仮想カメラ \$C_{v1} \dots C_{vn}\$ の画像で対応点の組が得られているとすると、

- 入力：仮想カメラ \$C_{v1} \dots C_{vn}\$ の画像における対応の組 \$\mathbf{q}_{g1}^k \dots \mathbf{q}_{gn}^k\$
- 出力：仮想カメラ \$C_{v2} \dots C_{vn}\$ の \$C_{v1}\$ に対する姿勢 \$\mathbf{R}_2^* \dots \mathbf{R}_n^*\$ と位置 \$\mathbf{t}_2^* \dots \mathbf{t}_n^*\$

である。まず現在の姿勢 \$\mathbf{R}_2 \dots \mathbf{R}_n\$ と位置 \$\mathbf{t}_2 \dots \mathbf{t}_n\$ を用いて、\$\mathbf{q}_{g1}^k \dots \mathbf{q}_{gn}^k\$ から第 4.6 節の DLT 法に基づいて \$\mathbf{q}_w^k\$ を得る。この \$\mathbf{q}_w^k\$ から各仮想カメラに再び順投影し、得られた仮想スクリーン上の点をそれぞれ \$\hat{\mathbf{q}}_{g1}^k \dots \hat{\mathbf{q}}_{gn}^k\$ とすると、\$i\$ 番目の仮想カメラ \$C_{vi}\$ における \$k\$ 番目の組の再投影誤差 \$e_i^k\$ は次のように定義される。

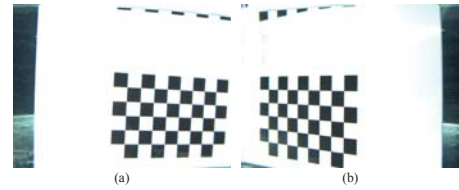


(a)



(b)

図 6 評価実験環境 (a) 2 台のカメラによる正八角形水槽内のチェスボードの撮影 (b) 外部キャリブレーションの結果



(a)

(b)

図 7 2 台のカメラで撮影された入力画像の例 6(a).

$$\begin{aligned} & e_i^k (\mathbf{q}_{g1}^k \dots \mathbf{q}_{gn}^k, \mathbf{R}_2 \dots \mathbf{R}_n, \mathbf{t}_2 \dots \mathbf{t}_n) \\ & = \mathbf{q}_{gi}^k - \hat{\mathbf{q}}_{gi}^k. \end{aligned} \quad (22)$$

よって最適化は次の誤差関数 \$\mathbf{E}_{rep}\$ の最小化によって与えられる。

$$\mathbf{E}_{rep} = \sum_i \sum_k |e_i^k|^2. \quad (23)$$

また、単一の PVCМ のキャリブレーションにおいて既知としていた \$\mu_w\$ を再投影誤差 \$e_i^k\$ のパラメータに加え、

$$\begin{aligned} & e_i^k (\mathbf{q}_{g1}^k \dots \mathbf{q}_{gn}^k, \mathbf{R}_2 \dots \mathbf{R}_n, \mathbf{t}_2 \dots \mathbf{t}_n, \mu_w) \\ & = \mathbf{q}_{gi}^k - \hat{\mathbf{q}}_{gi}^k, \end{aligned} \quad (24)$$

とすることによって PVCМ 外の媒質の屈折率の変化に対応することができる。

5. 評価実験

5.1 外部キャリブレーション法の評価

複数の水中カメラを用いた撮影環境を想定し、図 6 のような設定で実験を行った。約 35mm 厚、一辺約 373mm の

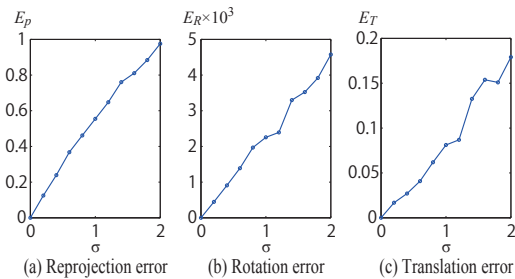


図8 Quantitative evaluations of our extrinsic calibration

正8角形の水槽が存在し、水槽の各面に対してカメラを配置して水槽内の物体を撮影している。これは約35mm厚の平面防水ハウジングを備えた水中カメラ群によって水中物体を撮影している状況と等価である。また、図7は入力画像の例である。ただし、チェスボードを用いるのは特徴点抽出のためであり、チェスパターンの構造は利用しないものとする。この環境において、

- シミュレーションによる、外部キャリブレーションのノイズに対する頑健性の評価
- 実画像を用いた外部キャリブレーションによる実用性の評価
- 透視投影モデルとの比較によるPCVMを用いた手法の評価

を行う。

なお、各水中カメラは第4.3節の手法で事前にキャリブレーションされているものとする。また、各評価実験において、入力は2台のカメラ C_v , C'_v の撮影画像間における画素の対応の組である。撮影実験では、(CCD 1/3" 型, 1280×960 pixel) のカメラを用いた。

5.1.1 シミュレーションによる評価

撮影環境として図6(a)を想定し、水中の3次元点 q_w を160点生成した。このうち各カメラにランダムに16点投影したものにノイズを加えて入力として与える。ここで扱うノイズは、実カメラの画像平面における生成データとのピクセル単位の誤差であるとする。ノイズは大きさが平均0, 標準偏差 $\sigma = 0.1, 0.2, \dots, 2.0$ pixel の正規分布でランダムな方向に与えられるとする。その後座標系 C_v , C'_v にそれぞれ変換し、パラメータの推定を行い、各ノイズに対する再投影誤差および姿勢 R , 位置 t のノイズ特性を評価するものとする。

結果を図8に示す。横軸は入力に与えるノイズの標準偏差であり、それぞれのグラフは100回の試行の平均値のプロットである。また、姿勢 R の誤差指標は Riemannian distance [8] であり、位置 t の指標は t によって正規化された RMS error である。結果より、本報告の外部キャリブレーション法はノイズに対して頑健であることがわかる。

5.1.2 実画像を用いた実験による評価

図7に示されるような実際の撮影画像を入力とした外部キャリブレーションを行う。各カメラの撮影画像上のチェ

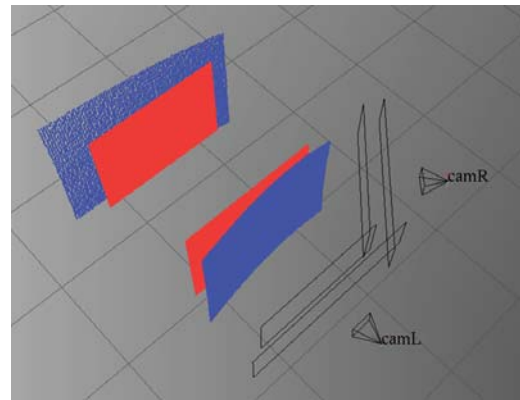


図9 水中多視点撮影における奥行き計測結果の比較

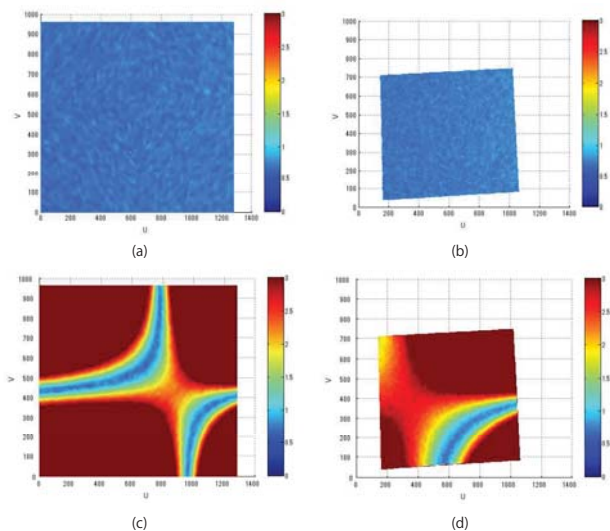


図10 水中多視点撮影における再投影誤差の特性

(a)PVCM, $z=200$ mm, (b)PVCM, $z=500$ mm, (c) ピンホールカメラモデル, $z=200$ mm, (d) ピンホールカメラモデル, $z=500$ mm

スボードから抽出した対応点の組を入力として与えて外部キャリブレーションを行い、再投影誤差および既知であるハウジングの姿勢を用いて評価する。

この実験の結果を図6(b)に示す。再投影誤差は0.35pixelとなり、また2台のカメラ C_v , C'_v 間の相対姿勢は 134.7° と推定された。実際的水槽は正8角形であるため、理論値は 135.0° である。これらより、本手法の有効性が示されているといえる。

5.1.3 透視投影モデルとの比較によるPCVMを用いた手法の評価

実際に第5.1.2節で得られた位置姿勢と同じ R , t を用いて透視投影モデルとPVCMを用いた奥行き計測および再投影を行い、それらの結果を評価することで水中多視点撮影におけるPVCMの有効性と、再投影誤差の評価指標としての有効性を示す。

図9において、赤点群は生成された水中3次元点を示しており、青点群は2台のカメラにおける赤点群の透視投影像をもとに、ピンホールカメラモデルを用いて屈折を無視

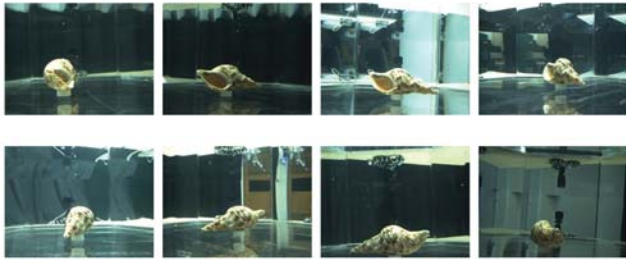


図 11 Input images captured by the 8 cameras

した奥行き計測によって推定された点の位置を示している、
また、図 10 は、赤点群の投影像に標準偏差 $\sigma = 1.0$ pixel のノイズを与えたものを入力とし、PVCMM およびピンホールカメラモデルで水中 3 次元点を推定し、それらを再投影した各カメラモデルで再投影したときの誤差を示している。これらの結果から、屈折を無視し得ない状況に対して、PVCMM によるモデル化が有効であることがわかる。

6. 8 台の水中カメラによる物体表面の復元

第 4.7 節の方法により外部キャリブレーション済みの 8 台のカメラを用いて、スペースカービング法に基づく物体表面の形状復元を行った。図 11 は各カメラの入力画像であり、図 1(a) に示されるようにシルエットの制約を導入しながらスペースカービングを行った。図 1(b) はその結果である。この復元では、空間を一辺 2.5mm ボクセルによって分割した。シルエット制約による初期のボクセル数は 12121 個であり、8 台のカメラに対して投影を行うため、少なくとも 96968 回の順投影が必要となる。つまり、PVCMM を用いなければ空間分解能に伴って 12 次方程式 [1] を解く回数が増えることを意味する。このことは順投影および逆投影を効率的に利用できる PVCMM の一つの有効性を示す結果となっている。

7. まとめと今後の課題

コンピュータビジョン技術の水中への適用を実現するために、まずその基盤技術として PVCMM を用いた水中カメラ群のモデル化とそのキャリブレーション、およびこれを用いた投影計算法を提案した。この手法のポイントは、水中光線と画素の対応関係を画素依存の仮想焦点距離として表すことであり、これによって DLT による奥行き計測、線形外部キャリブレーションを実現した。

今後は、このような水中多視点カメラモデルに基づいて、アクティブステレオを利用したシステムや、鏡を利用した多視点カメラシステムの実現を目指す。このようなシステムを用いて対象の形状・位置・動き・色の情報をあらゆる水中環境で得ることは、さらに対象への働きかけを可能とする知的なシステムへの発展が期待される。

参考文献

- [1] Amit Agrawal, Srikumar Ramalingam, Yuichi Taguchi, and Vishes Chari. A theory of multi-layer flat refractive geometry. In *cvpr*, pp. 3346–3353, 2012.
- [2] Vishes Chari and Peter Sturm. Multiple-view geometry of the refractive plane. In *bmvc*, 2009.
- [3] Michael D. Grossberg and Shree K. Nayar. The raxel imaging model and ray-based calibration. *ijcv*, Vol. 61, No. 2, pp. 119–137, feb 2005.
- [4] R. I. Hartley and A. Zisserman. *Multiple View Geometry in Computer Vision*. Cambridge University Press, 2000.
- [5] Lai Kang, Lingda Wu, and Yee-Hong Yang. Two-view underwater structure and motion for cameras under flat refractive interfaces. In *eccv*, pp. 303–316, 2012.
- [6] Ryo Kawahara, Shohei Nobuhara, and Takashi Matsuyama. A pixel-wise varifocal camera model for efficient forward projection and linear extrinsic calibration of underwater cameras with flat housings. In *Proc. of ICCV2013 Workshop on Underwater Vision*, pp. 819–824, 2013.
- [7] Hongdong Li, R. Hartley, and Jae-Hak Kim. A linear approach to motion estimation using generalized camera models. In *cvpr*, pp. 1–8, 2008.
- [8] Maher Moakher. Means and averaging in the group of rotations. *SIAM J. Matrix Anal. Appl.*, Vol. 24, pp. 1–16, January 2002.
- [9] Yoav Y. Schechner and Nir Karpel. Recovery of underwater visibility and structure by polarization analysis. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, pp. 570–587, 2005.
- [10] Anne Sedlazeck and Reinhard Koch. Refractive structure-from-motion on underwater images. In *iccv*, 2013.
- [11] Tali Treibitz and Yoav Y. Schechner. Active polarization descattering. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 31, No. 3, pp. 385–399, 2009.
- [12] Z. Zhang. A flexible new technique for camera calibration. *pami*, Vol. 22, No. 11, pp. 1330–1334, nov 2000.
- [13] 川原僚, 延原章平, 松山隆司. 水中撮影のための画素依存型バリフォーカルカメラモデル. 情報処理学会研究報告. CVIM, [コンピュータビジョンとイメージメディア] 2013-CVIM, 第 187(11) 巻, pp. 1–8, 2013.5.31.