

# 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

川原 僚<sup>1,a)</sup> 延原 章平<sup>1,b)</sup> 松山 隆司<sup>1,c)</sup>

**概要:** 本論文では水中撮影におけるハウジング層のように、撮像過程に屈折率の異なる層が含まれた光学系を全体として1つの仮想カメラとして扱うためのカメラモデルを提案する。提案モデルの特徴は、画素毎に異なる仮想焦点距離を設定することによって、水中での光路と画素の関係の簡潔な記述を実現した点である。本論文では具体的なキャリブレーション手法を示すとともに、実験によってモデルの有効性を定量的に示した。

## 1. はじめに

### 1.1 研究背景

水中世界をとらえ働きかけるためには、水中の対象の形状・位置・動き・色の情報を得ることが重要となる。本研究ではその方法として、コンピュータ・ビジョンを水中環境に適用し、撮影画像から水中の3次元シーンを復元することを想定する。このアプローチは水中ロボットビジョンとしての展開も期待される。

これまでコンピュータ・ビジョンでは、投影モデルとして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てきた [4]。しかし、カメラをハウジングで保護する水中撮影環境のように複数の媒質が存在する場合は、対象の3次元点から撮像面への光路が屈折現象により一直線とならないため、透視投影変換を行うことができない。

このような屈折を含む投影変換を簡潔に実現するために、本論文では新たなカメラモデルを提案する。このモデルはハウジング層を含む光学系全体を仮想カメラとし、屈折を画素毎に異なる仮想焦点距離によって扱うことで屈折を含む投影変換をコンパクトに表現することができる。

本論文では、まずこの画素依存型バリフォーカルカメラモデルとそれによる順投影および逆投影のアルゴリズムを示し、次にハウジングを利用した具体的なキャリブレーション手法を示す。そして最後に、2台のカメラを用いた撮影実験によりこのモデルが有効であることを示す。

### 1.2 関連研究

従来研究における屈折を含む投影変換の考え方は、投影される光の屈折課程を明示的に扱うか否かによって、大きく2種類に分けられる。

#### 1.2.1 Geometry-based モデル

水、ハウジング層などの媒質の屈折率、厚さおよび姿勢を与え、スネルの法則に従って投影変換を行うモデルである [1,2,5]。特に媒質境界面が複数存在する場合に、順投影の計算は高次方程式を解く過程を含んでいる。例えば [1] は各媒質境界が平行平面群であるとき、その平行平面群に対する実カメラの姿勢によらず、平行平面群の法線方向を光軸とした仮想カメラを用いれば、屈折過程が軸対象な構造を持つことを利用したモデルを提案している。このモデルではハウジングを介した順投影計算は12次方程式の解として与えられる。

#### 1.2.2 Appearance-based モデル

これに対して appearance-based モデルは、屈折過程を考えるのではなく、画像面上の画素と、この画素に投影される水中の光の対応関係のみに注目する [3,8,9]。例えば [8] は、投影される水中の光が透視投影できるような仮想カメラの位置が曲面を形成することに着目し、この曲面を学習することで投影変換を行う。また [3] は、各画素に対して、それに対応する水中の直線を返す回帰関数を学習することによって投影変換を行っている。これらはいずれも簡便な逆投影計算を実現するが、順投影計算には複雑な反復計算を要する。

これに対して、本論文で提案する画素依存型バリフォーカルカメラモデルは、両者を統合したアプローチを採る。すなわち提案するカメラモデルは、投影変換をコンパクトに表現するために appearance-based な仮想カメラを用いるが、その仮想カメラのパラメータは geometry-based

<sup>1</sup> 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



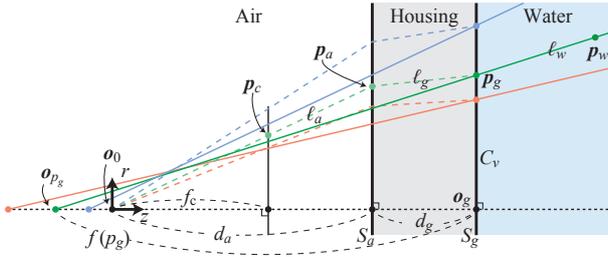


図3 画素依存型バリフォーカルカメラモデル

レーション済みのパラメータを用いて仮想焦点の位置を計算し、コンパクトな投影がどのように実現されるかを考える。

## 2.1 仮想カメラによるモデル化

まずカメラ  $C_v$  座標系について、光軸対称な表現のために座標系はカメラ  $C$  と同じく、原点が  $o_0$ 、光軸が  $\mathbf{n}$  方向の仮想のカメラ座標系とすればよい\*1。

また、投影変換として関連付けるのは画素とこれに対して一意に定まる水中の直線  $\ell_w$  である。これを仮想の焦点とスクリーン  $S_g$  上の点および、仮想焦点距離  $f(p_g)$  を通る直線として扱うモデルを定義する。

## 2.2 画素依存型バリフォーカルカメラモデルの定義

図3に示すように、画素依存型バリフォーカルカメラモデルを以下のように定義する。

- 仮想スクリーンは、水中の対象側から光が最初に入射するハウジング-水境界平面  $S_g$  であり、スクリーン上の点  $\mathbf{q}_g = \mathbf{p}_g$  は画素  $\mathbf{u}_{c'}$  と1対1に対応する。
- 仮想カメラの光軸は、実際のカメラの焦点  $o_0$  を通り仮想スクリーン平面に垂直であるとする。
- 仮想カメラの焦点は、画素ごとに決まる直線  $\ell_w$  が、仮想カメラの光軸と交わる点に設定する。これを仮想焦点距離  $f(p_g)$  とし、仮想の投影中心を  $o_{p_g} = (0, -f(p_g))^T$  とする。

## 2.3 画素依存型焦点の計算

画素依存型バリフォーカルカメラモデルにおいて、仮想焦点距離  $f(p_g)$  は

$$\begin{pmatrix} 0 \\ -f(r_{p_g}) \end{pmatrix} = t \begin{pmatrix} \frac{\mu_g r_{v_g}}{\mu_w} \\ \sqrt{1 - r_{v_w}^2} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} r_{p_g} \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (8)$$

$$t = -\frac{r_{p_g}}{r_{v_w}}, \quad (9)$$

$$f(r_{p_g}) = \frac{r_{p_g}}{r_{v_w}} \sqrt{1 - r_{v_w}^2}, \quad (10)$$

$$= \frac{\mu_w r_{p_g}}{\mu_g r_{v_g}} \sqrt{1 - \left(\frac{\mu_g}{\mu_w} r_{v_g}\right)^2}, \quad (11)$$

$$= \frac{\mu_w r_{p_g}}{\mu_a r_{v_a}} \sqrt{1 - \left(\frac{\mu_a}{\mu_w} r_{v_a}\right)^2} \quad (12)$$

\*1 光軸方向以外の座標軸については、第4.1節で定義する。

であるから、これに(6)式を適用すればよい。

## 3. 画素依存型バリフォーカルカメラモデルの投影過程

### 3.1 モデルにおける逆投影

これは第2.3節の過程そのものであり、水中での光路を示す  $\ell_w$  は画素依存型バリフォーカルカメラモデルによって、 $\mathbf{p}_g$  と仮想焦点距離  $f(p_g)$  によって以下のように表現される。

$$\mathbf{p}_w = \mathbf{p}_g + \begin{pmatrix} r_{p_g}/f(p_g) \\ 1 \end{pmatrix} z_{p_w} \quad (13)$$

### 3.2 モデルにおける順投影

画素依存型バリフォーカルカメラモデルの順投影は、geometry-based モデルとしては水中の点  $\mathbf{p}_w$  から  $\mathbf{p}_c$  を求める過程であり、appearance-based モデルとしては  $\mathbf{p}_w$  から対応する仮想焦点距離  $f(p_g)$  を得る過程である。

#### 3.2.1 順投影における屈折過程のモデル化

まず、水中撮影における順投影過程を geometry-based モデルに基づいて考える。仮想スクリーン上の点  $\mathbf{p}_g$  を通る  $\ell_w$  の方向ベクトルが満たす関係は(7)式で表現されている。一方で、水中の点  $\mathbf{p}_w$  を用いた  $\mathbf{p}_g$  への表現は、(10)式および(13)式より、geometry-based モデルにおいて、

$$\begin{aligned} r_{p_g} &= E_f(r_{v_w}) \\ &= r_{p_w} - \frac{r_{v_w}}{\sqrt{1 - r_{v_w}^2}} z_{p_w} \end{aligned} \quad (14)$$

であるため、 $f(p_g)$  が満たすべき条件は、

$$\begin{aligned} E_b(r_{v_w}) - E_f(r_{v_w}) &= E(r_{v_w}) \\ &= 0 \end{aligned} \quad (15)$$

である。このような  $f(p_g)$  の決定方法に対して、以下の解法が考えられる。

- (1) 解析解...  $E(r_{v_w})$  で表される  $r_{v_w}$  についての12次方程式の解析解を求める。
- (2) 反復解...  $E(r_{v_w})$  に仮の  $r_{v_w}$  を初期値として与えて、その差異から  $r_{v_w}$  を更新、決定する。
- (3) 近似解...  $E(r_{v_w})$  で記述される水中の点  $\mathbf{p}_w$  と  $\ell_w$  の方向の関係を関数近似し、 $\mathbf{p}_w$  から  $r_{v_w}$  を求められるようにする。

1. は12次方程式の解析解であり、モデルを最も厳密に表現しているが、求解は困難である。また、仮に求められたとしても、実数解の中から物理的に正しい解をスネルの法則を使って選ぶ必要があり、計算コストが高い。

2. は関連研究でも用いられている方法である。これは水中の各点に対し反復解を求めることにほかならないが、以下に示すように、画素依存型バリフォーカルカメラモデルを用いれば簡潔に定式化することができる。

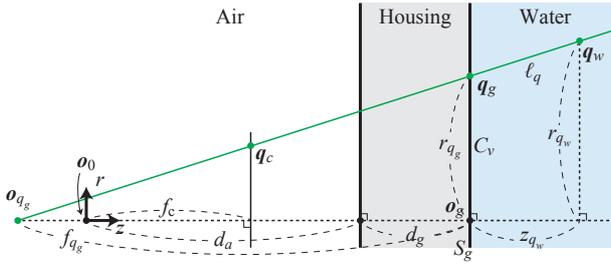


図 4 画素依存型バリフォーカルカメラモデルにおける順投影

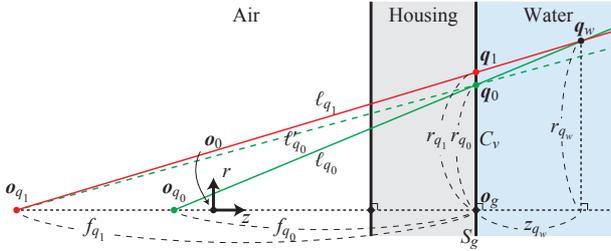


図 5 反復解法による順投影

3. の解としての厳密性は撮像素子の分解能との比較によって評価でき、近似誤差が撮像素子の分解能の半分以下であれば、解析解と同様に扱えると考えられる。しかしカメラとハウジングの任意の組み合わせに対応できる近似関数は自明ではない。

### 3.2.2 画素依存焦点距離を用いた順投影の反復解法

#### 3.2.2.1 漸化式による計算法

図 4 に示すように、 $q_w = p_w$  から  $C_v$  の仮想スクリーン  $S_g$  上で  $q_g = p_g$  を通り、仮想焦点  $o_{q_g}$  と交わる経路  $\ell_q$  を考える。geometry-based モデルにおいて (7) 式で示される  $E_b(r_{v_w})$  が満たす関係は、appearance-based モデルにおいて、仮想スクリーン  $S_g$  上の  $q_g$  と 1 対 1 に対応する仮想焦点距離  $f_{q_g} = f(r_{q_g})$  を得ることに対応する。一方で、水中の点  $p_w$  を用いた  $p_g$  の表現は、逆投影と同様に (13) 式を用いて

$$r_{q_g} = \frac{r_{q_w} f_{q_g}}{z_{q_w} + f_{q_g}} \quad (16)$$

と表現し、これらを用いて以下のような反復解法を考える。図 5 に示すように、 $q_w$  から、初期値として、実カメラの焦点  $o_{q_0} = (0, -f_{q_0})^T$  を通る  $\ell_{q_0}$  を考える。このとき、仮想スクリーン  $S_g$  上の  $q_0$  にはただ 1 つ対応する仮想焦点距離  $f_{q_0} = f(r_{q_0})$  が存在するため、これを用いて仮想焦点を  $o_{q_1} = (0, -f_{q_1})^T$  として更新し、これを通る  $\ell_{q_1}$  を考える。つまり、(16) 式より、

$$r_{q_{k+1}} = \frac{r_{q_w} f(r_{q_k})}{z_{q_w} + f(r_{q_k})} \quad (17)$$

によって  $f_{q_k}$  を更新する。この手法の解の収束性は、第 3.2.2.2 節に示すように保証され、

$$\begin{aligned} r_{q_1} > r_{q_0} &\Rightarrow r_{q_{k+1}} \geq r_{q_k}, \\ r_{q_1} < r_{q_0} &\Rightarrow r_{q_{k+1}} \leq r_{q_k} \end{aligned} \quad (18)$$

を満たす。また、画素依存型バリフォーカルカメラモデルの定義から、

$$r_{q_{k+1}} = r_{q_k} \Leftrightarrow f(r_{q_{k+1}}) = f_{q_k} \quad (19)$$

であり、

$$d_a + d_g \leq \forall f_{q_k} \quad (20)$$

を満たしている。

#### 3.2.2.2 Newton 法による計算法

(15) 式より、 $E(r_{v_w}) = 0$  を満たす  $r_{v_w}$  は Newton 法により初期値によらず求めることができる。

証明. 関数  $f(x)$  が単調増加する凸関数であり、零点をもつならば、Newton 法によって初期値によらず大域的最適解を求めることができる [6]。 (15) 式より、 $E(r_{v_w})$  は連続微分可能であり、 $E(r_{v_w})$  の 1 階微分は

$$\begin{aligned} \frac{dE(r_{v_w})}{dr_{v_w}} &= \frac{z_q}{E_1(r_{v_w})} + \frac{z_q r_{v_w}^2}{E_1(r_{v_w})^3} + \frac{d_g \mu_w}{E_2(r_{v_w})} \\ &+ \frac{d_g \mu_w^3 r_{v_w}^2}{E_2(r_{v_w})^3} + \frac{d_a \mu_w}{E_3(r_{v_w})} + \frac{d_a \mu_w^3 r_{v_w}^2}{E_3(r_{v_w})^3} \end{aligned} \quad (21)$$

であり、2 階微分は

$$\begin{aligned} \frac{d^2 E(r_{v_w})}{dr_{v_w}^2} &= \frac{3 z_q r_{v_w}}{E_1(r_{v_w})^3} + \frac{3 z_q r_{v_w}^3}{E_1(r_{v_w})^5} + \frac{3 d_g \mu_w^3 r_{v_w}}{E_2(r_{v_w})^3} \\ &+ \frac{3 d_g \mu_w^5 r_{v_w}^3}{E_2(r_{v_w})^5} + \frac{3 d_a \mu_w^3 r_{v_w}}{E_3(r_{v_w})^3} + \frac{3 d_a \mu_w^5 r_{v_w}^3}{E_3(r_{v_w})^5} \end{aligned} \quad (22)$$

となる。ただし、

$$\begin{aligned} E_1(r_{v_w}) &= \sqrt{1 - r_{v_w}^2}, \\ E_2(r_{v_w}) &= \sqrt{\mu_g^2 - \mu_w^2 r_{v_w}^2}, \\ E_3(r_{v_w}) &= \sqrt{\mu_a^2 - \mu_w^2 r_{v_w}^2} \end{aligned} \quad (23)$$

である。 $r_{v_w}$  の定義域  $[0, \mu_w/\mu_g]$  より、 $\frac{d^2 E(r_{v_w})}{dr_{v_w}^2} \geq 0$  であり、 $E(r_{v_w})$  は単調増加する凸関数である。また  $E(r_{v_w})$  は  $r_{v_w} \geq 0$  の範囲で  $E(r_{v_w}) = 0$  となることから、Newton 法によって初期値によらず解を求めることができる。□

$r_{v_w}$  の初期値としては、(17) 式を用いた方法との組み合わせにより、例として  $r_{q_1}$  を用いて改善可能である。これらの関係性については、第 6.3 節で考察する。

#### 3.2.3 順投影の近似解法

近似により表現することを考える関係は、水中の点  $q_w$  と  $r_{v_w}$  の関係である。つまり、注目する変数は  $r_{q_w}$ ,  $z_{q_w}$ ,  $r_{v_w}$ , またはこれらと自明な関係にある変数である。そこで近似する関数を  $C : (r_{q_w}, z_{q_w}) \rightarrow r_{v_w}$  と表すこととする。

### 3.2.3.1 関数 $C$ を曲面の fitting で近似する方法

$C : (r_{q_w}, z_{q_w}) \rightarrow r_{v_w}$  を得る方法として、逆投影から得られる  $r_{q_w}, z_{q_w}, r_{v_w}$  の値をもとに関数の fitting をする方法が考えられる。ここで、定義域の関係から  $r_{v_w} = C(r_{q_w}, z_{q_w})$  の関係を近似曲面として表すときの軸としてこれらと自明な関係にある変数である図5の  $r_{p_c}, r_{q_c}$ , および  $z_{q_w}$  を選び、それらを近似曲面の学習データとする。

### 3.2.3.2 Fitting に用いる近似関数の表現方法

まずパラメータを選ぶにあたって、関数の概形に基づいて考える。第3.2.2.2節で示したように、(15)式で示される関数  $E(r_{v_w}, z_{q_w})$  は凸関数である。凸関数に対しては、分母のパラメータによって次数を制御できる有理関数での近似が考えられる。つまり、

$$A = \sum_n \sum_m a_{nm} r_{q_c}^{\frac{n}{2}} z_{q_w}^{\frac{m}{2}}$$

$$B = 1 + \sum_i \sum_j b_{ij} r_{q_c}^{\frac{i}{2}} z_{q_w}^{\frac{j}{2}} \quad (24)$$

を用いて  $r_{p_c} = A/B$  のような形にすればよい。ただし、第3.2.1節で述べたように、(24)式がカメラとハウジングの任意の組み合わせに対応できるかは自明ではない。

## 4. 画素依存型バリフォーカルカメラモデルのキャリブレーション法

モデルにおける未知パラメータの推定においては、水中環境下で可能であるかを考慮する必要がある。そこで本研究では、ハウジング平面に既知の座標点を設置する方法を考える。

### 4.1 パラメータ推定の概要

図1において、以下の対応を用いてキャリブレーションを考える。

- $\mathbf{u}_{c'} = (u, v, 1)^T \dots$  実カメラ  $C'$  の画像平面上的画素
- $\mathbf{p}_g = (x_g, y_g, z_g)^T \dots$  ハウジング-水境界平面  $S_g$  上の点

ここで、 $S_g$  上に用意する点は、3次元点として原点を  $S_a$  上に置いたときに、用意したすべての点の座標が既知な座標系が存在するものとする。この座標系を  $C_{S_a}$  と定義する。また仮想カメラ  $C_v$  座標系は  $C_{S_a}$  の原点を  $\mathbf{o}_g$  に平行移動した座標系である。

ここでまず、キャリブレーションを考えるにあたり画素依存型バリフォーカルカメラモデルに必要なパラメータを整理しておく。

#### 既知のパラメータ

- $\mathbf{A} \dots$  カメラの内部パラメータ行列 (カメラの焦点距離  $f_c$  を含む)
- $\mu_a \dots$  空気の屈折率
- $\mu_w \dots$  水の屈折率

#### 未知のパラメータ

- $(C'_v \mathbf{R} \ C'_v \mathbf{T})$  カメラの外部パラメータ行列
- $d_g \dots$  ガラスの厚み
- $\mu_g \dots$  ガラスの屈折率

#### 入力の定義

ハウジング-水境界平面に  $C_{S_a}$  において既知の座標点を用意し、カメラで撮影する。得られる対応の組は、

$$\mathbf{p}_g = (x_g, y_g, d_g)^T \text{ および } \mathbf{u}_{c'} = (u, v, 1)^T$$

の組と定義する。

#### パラメータ推定の手順

撮影画像をもとに以下の手順で未知のパラメータを求める。

- 既知の3次元点  $\mathbf{p}_g$  と投影先  $\mathbf{u}_{c'}$  の対応の組から、パラメータ  $(C'_v \mathbf{R} \ C'_v \mathbf{T})$  およびパラメータ  $\mu_g, d_g$  の初期値を解析解として求める。
- $\mathbf{p}_g$  の順投影により得られる画像平面上的座標  $\hat{\mathbf{u}}_{c'} : \hat{\mathbf{u}}_{c'} = (\hat{u}, \hat{v}, 1)^T$  と、観測された  $\mathbf{u}_{c'}$  との誤差の最小化によりパラメータを決定する。

### 4.2 パラメータの導出方法

既知の対応点の組から、未知のパラメータを逆投影過程に基づいて導出する。ただし、ここで得られるのはモデルの投影過程から導出される拘束式を満足する解であり、物理的な意味で誤差最小となるパラメータではない。

#### 4.2.1 ハウジング-水境界平面上と画像平面上的対応点の組による外部パラメータの導出

ハウジング外側の平面上的点  $\mathbf{p}_g$  と画像平面上的画素  $\mathbf{u}_{c'}$  の組を用いるとき、[1]で述べられているように、屈折平面がハウジング平面と直交するという条件のみで、姿勢としての外部パラメータを推定できる。つまり、座標系  $O_v$  において、 $x, y$  方向の比が一定であり、

$$\begin{pmatrix} x_c & y_c & 1 \end{pmatrix}^T = \begin{pmatrix} x_g & y_g & \alpha \end{pmatrix}^T \quad (25)$$

と表されることを用いて、外部パラメータを推定する。ただし、 $z$  方向の平行移動成分  $d_a$  はこの方法では推定されないため、次節で述べる方法によって導出する。

#### 4.2.2 ハウジング外側の平面上的点と画像平面上的点の組による屈折に関するパラメータの導出

拘束条件は、 $\mathbf{p}_g$  および  $\mathbf{u}_{c'}$  の関係をスネルの法則を用いて表した(6)式である。 $\mu_a = 1$  とし、入力を変換して  $y = r_{p_c}/f$  として与えることで(6)式を変形すると、

$$(r_{p_g} - d_a y)^2 (y^2 + 1) \mu_g^2 - y^2 d_g^2 - (r_{p_g} - d_a y)^2 y^2 = 0 \quad (26)$$

となる。得られた外部パラメータを用いて  $\mathbf{p}_g$  および  $y$  を与え、この拘束条件により残りの未知のパラメータを全て導出することができる。このようにして得られたパラ

メータは、パラメータの非線形最適化の初期値として使用する。

## 5. 2つの画素依存型バリフォーカルカメラを用いたDLT法による水中での奥行き計測

逆投影の式(13)を用いて、2台のカメラの撮影画像から得られた対応の組から奥行き計測を行う。ここで、それぞれの仮想カメラ  $C_v$  および  $C'_v$  における仮想スクリーン上の点  $q_g$  および  $q'_g$  は同一の水中の点  $q_w = \begin{matrix} C_v \\ C'_v \end{matrix} \mathbf{R} q'_w + \begin{matrix} C_v \\ C'_v \end{matrix} \mathbf{T}$  から投影される点である。また、 $x, y, z$  成分は

$$q_w = \begin{pmatrix} r_{q_w} \frac{x_{v_w}}{r_{v_w}}, & r_{q_w} \frac{y_{v_w}}{r_{v_w}}, & z_{q_w} \end{pmatrix}^T \quad (27)$$

であるため、(13)式および(27)式を用いて、仮想カメラ  $C_v$  上で

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & -\frac{x_{v_w}}{r_{v_w}} \\ 0 & 1 & -\frac{y_{v_w}}{r_{v_w}} \end{pmatrix}, \quad \mathbf{b} = \begin{pmatrix} \frac{x_{v_w}}{r_{v_w}} T_p \\ \frac{y_{v_w}}{r_{v_w}} T_p \end{pmatrix} \quad (28)$$

として

$$\mathbf{A} q_w = \mathbf{b} \quad (29)$$

を得る。同様に、仮想カメラ  $C'_v$  上で

$$\mathbf{A}' q'_w = \mathbf{b}' \quad (30)$$

よって、(29)式、(30)式から、DLT法に基づき  $q_w$  を以下のように得ることができる。 $\mathbf{R}^{-1} = \begin{matrix} C'_v \\ C_v \end{matrix} \mathbf{R}$ ,  $\mathbf{T}' = \begin{matrix} C'_v \\ C_v \end{matrix} \mathbf{T}$  とすると、

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} \mathbf{A} \\ \mathbf{A}' \mathbf{R}^{-1} \end{pmatrix} q_w &= \begin{pmatrix} \mathbf{b} \\ \mathbf{b}' + \mathbf{A}' \mathbf{R}^{-1} \mathbf{T}' \end{pmatrix} \\ \Leftrightarrow q_w &= \begin{pmatrix} \mathbf{A} \\ \mathbf{A}' \mathbf{R}^{-1} \end{pmatrix}^+ \begin{pmatrix} \mathbf{b} \\ \mathbf{b}' + \mathbf{A}' \mathbf{R}^{-1} \mathbf{T}' \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (31)$$

として解を得ることができる。

## 6. 評価実験

### 6.1 キャリブレーション

まず画素依存型バリフォーカカメラモデルのキャリブレーションにおけるノイズ特性をシミュレーションにより検証する。

#### 6.1.1 対応点の与え方

パラメータを全て与えた上で、 $S_g$  上の点と画像平面上の画素の組をそれぞれ用意する。

ハウジング平面に既知の座標点を用意するために、世界座標を  $C_{S_a}$  とする。画像座標については、ハウジング内側の平面上の点を順投影により画像座標  $u_{c'} = (u, v, 1)^T$  へ投影する。つまり、

$$c_z u_{c'} = \mathbf{A} \left( \begin{matrix} C'_v \\ C_{S_a} \end{matrix} \mathbf{R} \mid \begin{matrix} C'_v \\ C_{S_a} \end{matrix} \mathbf{T} \right) p_a \quad (32)$$

である。次に、この  $u_{c'} = (u, v, 1)^T$  から逆投影によりハウジング外側の平面上の点  $p_g$  を生成する。

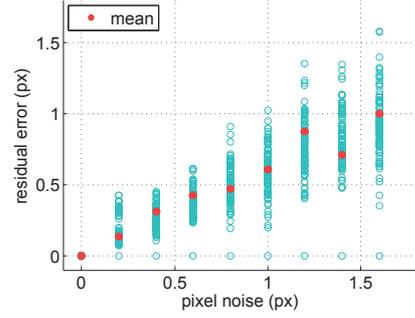


図6 再投影誤差のノイズ特性 (キャリブレーション)

### 6.1.2 モデルパラメータ

対応点を生成するためのパラメータに関しては、次のように設定した。

- $f_c \cdots 5$  (mm),  $d_g \cdots 30$  (mm),  $d_a \cdots 185$  (mm)
- $\mu_g \cdots 1.49$ ,  $\mu_w \cdots 1.33$

また、対応点の組としてそれぞれ16組ずつ生成し、実カメラ  $C'$  はカメラ  $C$  座標系において  $y$  軸方向に  $15^\circ$ ,  $x$  軸方向に  $15^\circ$  回転させている。

### 6.1.3 ノイズ特性の評価

#### 6.1.3.1 ノイズの定義

ここで扱うノイズは、撮影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。つまり、実カメラ  $C'$  座標系における誤差である。ノイズは  $u_c = (u, v, 1)^T$  に対し、大きさが平均0(px)、分散0~1.6(px)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  $C_{S_a}$  に変換し、パラメータの推定を行う。

#### 6.1.3.2 ノイズ特性の評価方法

シミュレーションにおけるカメラ画素  $u_{c'}$  にノイズを与え\*2、上記のキャリブレーションを行い、の  $u$  方向および  $v$  方向の残差によってノイズ特性を

$$E_c = \|P'(u_{c'}) - P'(\check{u}_{c'})\| \quad (33)$$

のように評価する。ただし、 $\check{u}_{c'}$  は非線形最適化における最適解であり、ノイズは16点の  $(u, v, 1)^T$  に対して与えているため、それぞれの  $u, v$  方向の残差の2乗ノルムを1点あたりに換算してノイズに対する誤差とする。

#### 6.1.4 シミュレーション結果

座標系  $O_i$  におけるノイズに対する投影誤差を図6に示す。投影誤差は平均的に与えるノイズの上限値までに収まっていることがわかる。

## 6.2 投影の評価実験の設定

以降の投影の評価では、実際に撮影実験によりキャリブレーションを行っておき、その結果を用いて投影の評価を行うものとする。撮影は図8の環境で行っており、具体的

\*2 ハウジング内側の平面上の点とのデータセットと外側の点とのデータセットでも別々にノイズを与える。

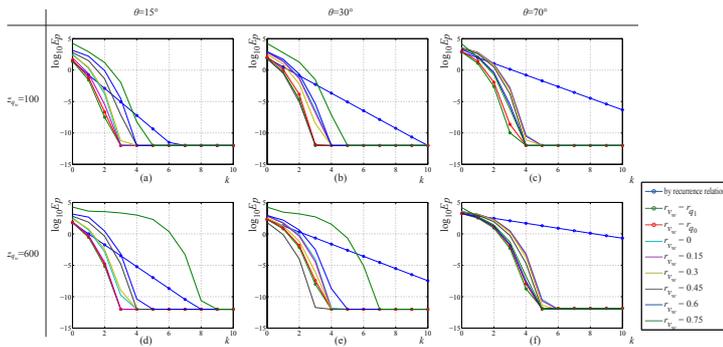


図 7 反復法による順投影における解の収束性:  $E_p$  は pixel 単位であり, 丸め誤差の影響から  $10^{-12}$ px を下限として表示している。

には

- カメラ ... 内部パラメータは [10] の方法により取得済み\*3, CCD 1/3" 型, 画素 1280×960(px)
- 水槽 ... アクリル樹脂, アクリル平面の厚さ 30mm, 奥行き 600mm(外寸)

である。また, 2 台のカメラについて以下のようなキャリブレーション結果が得られた。

- カメラ  $C_v$  ... 誤差: 1.05 px,  $d=166$ mm
- カメラ  $C'_v$  ... 誤差: 0.877 px,  $d=159$ mm
- $\mu_g = 1.19$ ,  $d_g = 24.6$ mm
- $C'_v \mathbf{T} = (167, 4.13, -6.76)^\top$  mm

以降では, この環境および結果を用いて投影の評価実験を行うものとする。

### 6.3 順投影の評価

第 6.2 節のキャリブレーション結果を用いて 3.2.2 節に示した順投影の反復解法をシミュレーションによって評価する。図 7 のように, カメラ  $C_v$  に対し異なる位置の  $q_w$  を設定し, それぞれの位置において仮想焦点を利用した漸化式による反復計算法および, Newton 法を行った場合の  $n$  回目の反復計算における再投影誤差を

$$E_p = \|P'(\hat{r}_q) - P'(r_{q_n})\| \quad (34)$$

として評価する。ただし,  $\hat{r}_q$  はシミュレーションにおける真値であり,  $r_{q_n}$  は  $n$  回目の反復計算で得られた値である。

Newton 法においては  $[0, \mu_w/\mu_g]$  の  $r_{v_w}$  の初期値のうち  $r_{q_0}, r_{q_1}$  に対応するものはすべての場合において, 3 回の反復計算によって 0.5px 以下の再投影誤差となっていることがわかる。

ただし, 漸化式による反復計算において  $r_{q_n}$  に対する  $f(r_{q_n})$  は 1 変数の LUT により取得可能であることを考慮すると, 1 回あたりの反復計算のコストは Newton 法とは異なる。また図 7 における線形性から,  $k = 1$  において 0.5px 以下の再投影誤差となるための反復回数が推定可能

\*3 レンズ歪み補正済みの画像における画素を  $u_{c'}$  として扱うものとする。

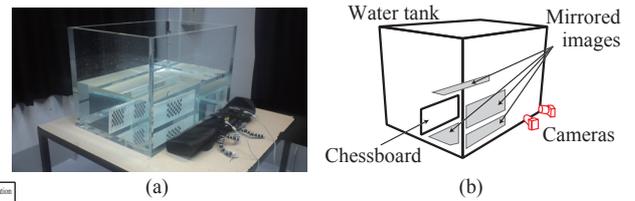


図 8 撮影実験の設定

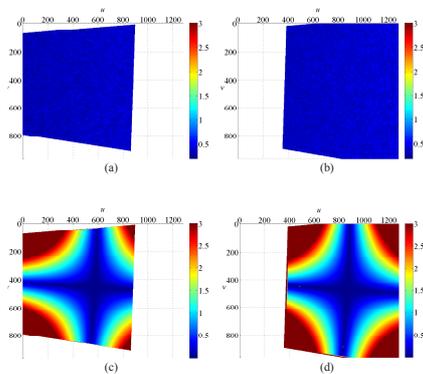


図 9 再投影誤差の空間的特性

であり, そのコストに応じて Newton 法へと切り替えることも考えられる。

### 6.4 DLT 法による水中での奥行き計測の誤差評価

第 6.2 節のキャリブレーション結果を用いて第 5 節の DLT 法による奥行き計測を行い, 再投影誤差を指標としてモデルの逆投影を評価することとする。ただし, まず再投影誤差が評価の指標になることを示すためにシミュレーションを行い, 次に実際の撮影画像を用いて評価実験を行うものとする。

#### 6.4.1 シミュレーション

$z_{q_w} = 50$ mm および  $z_{q_w} = 500$ mm の場合について, 画素依存型パリアフォーカルカメラモデルを用いた奥行き計測のシミュレーションを行う。再投影誤差のノイズ特性, および光学系全体にピンホールカメラモデルを適用した場合との再投影誤差の空間的特性の比較によって再投影誤差が評価の指標として扱えることを示す。ここでの再投影誤差はカメラ  $C_v$  を基準として,

$$E_r = \|P'(\hat{r}_q) - P'(\check{r}_q)\| \quad (35)$$

とする。ただし,  $\hat{r}_q$  は真値であり,  $\check{r}_q$  は DLT 法における最適解である。

##### 6.4.1.1 空間的特性

分散  $\sigma=1$  px のノイズを与えたときの再投影誤差を図 9 に示す。

ここで, 画素依存型パリアフォーカルカメラモデルを用いた結果についても, 比較のためにカメラ  $C'_v$  の画像平面上へ変換している, このように, ピンホールカメラモデルを用いた場合は屈折の影響が再投影誤差として現れている。

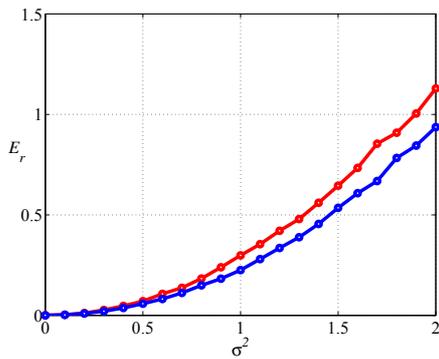


図 10 再投影誤差のノイズ特性 (奥行き計測)

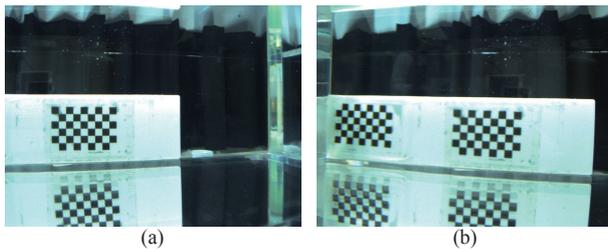


図 11 撮影実験における入力画像

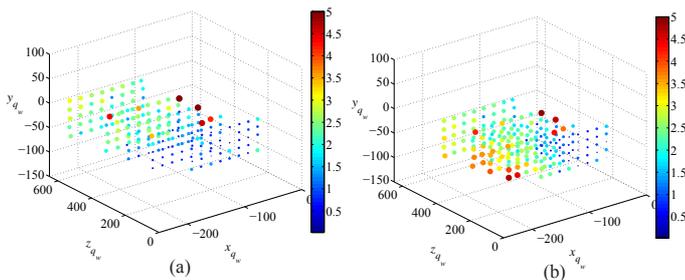


図 12 撮影実験の再投影誤差 : (a) 画素依存型バリフォーカルカメラモデル (b) ピンホールカメラモデル

#### 6.4.1.2 ノイズ特性

ノイズに対する再投影誤差の特性は図 10 ように、再投影誤差として現れている。

ただし、図 10 における  $E_r$  は、図 9 に示す画素ごとの再投影誤差を平均したものである。

これらの結果から、再投影誤差を評価の指標として画素依存型バリフォーカルカメラモデルが有効であることがわかる。

#### 6.4.2 撮影実験による評価

図 8 の状況において、図 11 のようなパターン平面を  $z_w$  がおよそ 100mm, 200mm, 400mm, 600 mm となるように設置し、2 台のカメラで撮影した。

図 12 は DLT 法による奥行き計測を行った結果であり、カメラ  $C_v$  において、 $q_w$  で示される位置に、 $E_r$  に対応する色、大きさの点を配置している。このように、ピンホールカメラモデルを用いた場合には、パターン平面は  $z_w$  の小さい位置に復元されており、画素依存型バリフォーカルカメラモデルを用いた場合より大きな再投影誤差となっ

ていることがわかる。

## 7. 結論

本論文では、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を提案し、順投影および逆投影に新たなデータ表現が適用できることを示すと同時に、モデルにおいて水中環境下でのキャリブレーションを想定した方法の有用性を示した。

今後検討すべき問題として、複数のカメラを用いた水中物体の 3 次元形状復元が考えられ、その手法としてスペーススケーリング法 [7] や、テンプレートを用いた対応点探索などが挙げられる。テンプレートを用いる際は、その形状を屈折を考慮しながらどのように設定すべきかは自明ではない。これは水中カメラ間でエピソード線を計算することにも相当し、このような水中多視点幾何モデルを構築する必要がある。

## 謝辞

本研究の一部は JSPS 科研費 25540068 の助成をうけて行った。

## 参考文献

- [1] Amit Agrawal, Srikumar Ramalingam, Yuichi Taguchi, and Visesh Chari. A theory of multi-layer flat refractive geometry. In *CVPR*, pages 3346–3353. IEEE, 2012.
- [2] Visesh Chari and Peter Sturm. Multiple-view geometry of the refractive plane. In *Proceedings of the 20th British Machine Vision Conference, London, UK, sep 2009*.
- [3] James Gregson, Michael Krimerman, Matthias B. Hullin, and Wolfgang Heidrich. Stochastic tomography and its applications in 3d imaging of mixing fluids. In *siggraph*, pages 52:1–52:10, 2012.
- [4] R. I. Hartley and A. Zisserman. *Multiple View Geometry in Computer Vision*. Cambridge University Press, ISBN: 0521540518, second edition, 2004.
- [5] Lai Kang, Lingda Wu, and Yee-Hong Yang. Two-view underwater structure and motion for cameras under flat refractive interfaces. In *eccv*, pages 303–316, 2012.
- [6] David Kincaid and Ward Cheney. *Numerical Analysis: Mathematics of Scientific Computing*. Pure and Applied Undergraduate Texts Series. American Mathematical Society, 2002.
- [7] Kiriakos N. Kutulakos and Steven M. Seitz. A theory of shape by space carving. In *iccv*, pages 307–314, 1999.
- [8] Anne Sedlazeck and Reinhard Koch. Calibration of housing parameters for underwater stereo-camera rigs. In *Proceedings of the British Machine Vision Conference*, 2012.
- [9] Borislav Trifonov, Derek Bradley, and Wolfgang Heidrich. Tomographic reconstruction of transparent objects. In *Proc. of Eurographics Conf. on Rendering Techniques*, pages 51–60, 2006.
- [10] Zhengyou Zhang. A flexible new technique for camera calibration. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 22(11):1330–1334, 2000.