Vol.2017-CVIM-207 No.4
2017/5/10

平行平面屈折層を備えたプロジェクタ・カメラシステムの自己較正

奥野 琢也[1,a)]　延原 章平[1]

概要：本論文は平行平面屈折層を備えたプロジェクタ・カメラシステムの自己較正を目的としたものであり，具体的には水槽などの未知屈折層を通して対象物体を撮影した画像から，プロジェクタ・カメラシステムの相互位置推定と被写体の 3 次元形状計測を同時に行う．対応点から逆投影した光線の水中における同一平面拘束として屈折環境下でのエピポーラ拘束を表現することにより, 屈折層の形状と位置姿勢を同時に推定できることを示した．

1. 背景と目的

これまでの研究でカメラやプロジェクタに対するキャリブレーション手法が様々に提案されてきたが，多くの場合は対象物体からカメラまでの光路において屈折や反射が起こらない状況を仮定していた．そのため，水槽ガラス越しに水中の物体を撮影するような場合ではそれらの手法を用いることができない．そこで本研究では投影における光路中で起こる屈折現象に焦点を当て，測定機器が同一の平行平面屈折層を通して対象を撮影する際の光路に関する幾何関係から位置関係を推定するキャリブレーション手法を提案する．

本論文においては，内部パラメータをキャリブレーション済みのカメラ・プロジェクタが同一の平行平面屈折層を通して水中の物体に対して撮影・投光した際の，両画像の対応から対象からの光路の屈折・軌跡を計算し，そこで生じる幾何関係からカメラとプロジェクタ，屈折面との位置関係を推定することを目標としている．

2. 関連研究

本章ではまず空気中に置かれた物体を対象として行われる一般的なキャリブレーション手法に関する従来の研究について述べ，次に対象物体が水中に存在するため屈折を考慮しなければならない場合においてのキャリブレーション手法について述べる．そこから本研究とそれらとの相違点を述べる．

1　京都大学大学院情報学研究科
a)　okuno@vision.kuee.kyoto-u.ac.jp

2.1 空気中の物体を対象としたキャリブレーション

Zhang は座標が既知の平面パターンを参照物体として姿勢を変えながら複数枚撮影し，画像間の対応から平面に対する投影行列を求めることでカメラの内部パラメータおよび外部パラメータを推定する手法を考案した [1]．ここでは座標が既知のパターンとしてチェッカーパターンを用い，画像上の格子点の位置から対応を取っている．

Yamazaki らは投光パターンとしてグレイコードと正弦波コードを使用して対応点を求め，そこからキャリブレーションを行いカメラパラメータを求めている [2]．この際彼らはレンズの半径方向歪みまで考慮した基礎行列を作り出し，それを分解することでパラメータを推定している．

2.2 水中物体を対象としたキャリブレーション

測定対象が水中にある場合，対象からカメラまでの光路で屈折が生じるため，キャリブレーションを行う際はそれを考慮しなければならず，先に述べた手法をそのまま適用することはできない．Chari らは水面で屈折が 1 回生じる場合について，Plücker 座標系を用いて屈折を含めた基礎行列を計算する方法を提案し，これを分解することでキャリブレーションが行えることを示した [3].
Grossberg と Nayer はカメラモデル自体を屈折に対応させ，カメラの各画素と対象空間における光線とを対応付けした Ray-Pixel カメラモデルを考案した [4]．Kawahara らはこれをさらに発展させ，画素ごとに焦点が変化する PVCM カメラモデルを考案し，このキャリブレーションを行った [5]．このように水中の対象に対するキャリブレーション手法もいくつか提案されているが，参照物体を用いている

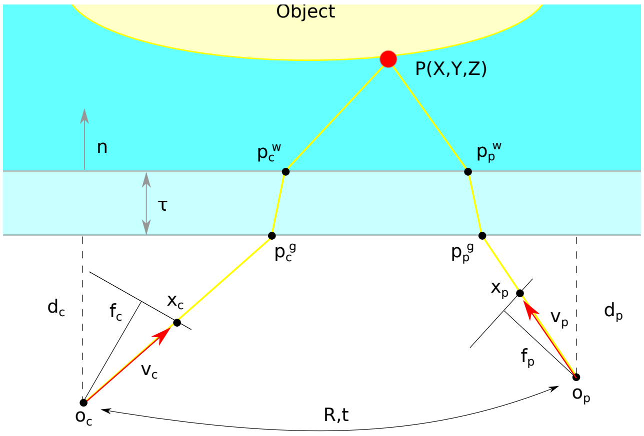


図 1　計測モデル

ことなどにより測定状況が限られる可能性があるという問題を含んでいた．そこで本研究では，より実用的なキャリブレーションの手法として参照物体を用いないセルフキャリブレーションによる手法を提案する．

3. 提案手法

3.1 問題設定

3.1.1 計測モデル

本研究では平行な平面屈折層を挟んで対象物体が水中に，カメラ・プロジェクタが空気中に配置された図（1）のような光学系をモデルとする．

まず前提条件を次のように置く．

前提条件

- 空気層における投影光路は透視投影モデルに従う．
- カメラおよびプロジェクタの内部パラメータ行列 $\boldsymbol{K}_c$ および $\boldsymbol{K}_p$ はそれぞれ事前に推定済みである．
- カメラ座標系を世界座標系とする．
- 屈折層の 2 つの屈折境界平面は平行で法線方向も等しい．
- カメラとプロジェクタは同一の平行平面屈折層を通して対象に対する撮影および投光を行う．
- 各媒質の屈折率はすべて既知かつ媒質中で均一．
- カメラ・プロジェクタ画像間で十分に密な対応が与えられる．
- 撮影環境より各パラメータの値についてある程度妥当な初期値を与えられる．

またモデルにおける各種パラメータを次のように定義する．

各種パラメータ

$\boldsymbol{R}$, $\boldsymbol{t}$　カメラ・プロジェクタ間の回転行列，移動ベクトル
$\boldsymbol{n}$　屈折面の法線方向ベクトル
τ　屈折層の厚み
μ_a, μ_g, μ_w　3 つの媒質 (空気，ガラス，水) の屈折率
$\boldsymbol{P}$　対象点の 3 次元位置座標, $\boldsymbol{P} = [X, Y, Z]^{\mathrm{T}}$
$\boldsymbol{o}_c$,$\boldsymbol{o}_p$　投影中心
$\boldsymbol{x}_c$,$\boldsymbol{x}_p$　点 $\boldsymbol{P}$ を撮影した際の画像座標
$\boldsymbol{v}_c$,$\boldsymbol{v}_p$　投影中心へ向かう光の方向ベクトル
f_c, f_p　焦点距離
d_c, d_p　屈折面との距離
$\boldsymbol{p}_c^g$,$\boldsymbol{p}_p^g$　屈折の生じる点 (屈折面と空気中の境界)
$\boldsymbol{p}_c^w$,$\boldsymbol{p}_p^w$　屈折の生じる点 (屈折面と水面の境界)

ここで添え字 c・p はそれぞれカメラ・プロジェクタを表す．なお後述の最適化問題におけるパラメータ数削減のため，行列 $\boldsymbol{R}$ は回転ベクトル $\boldsymbol{r}$ として 3 変数を用いて表す．なお $\boldsymbol{r}$ が回転の軸方向の単位ベクトル $\boldsymbol{k}$ と回転角 θ を用いて $\boldsymbol{r} = \theta\boldsymbol{k}$ と表されるとき，$\boldsymbol{r}$ と $\boldsymbol{R}$ の関係は Rodrigues の式より $\boldsymbol{k}$ の外積の行列表現 $\boldsymbol{K}$ を用いて次のように表される．

$$\boldsymbol{R} = \boldsymbol{I}_3 + (\sin\theta)\boldsymbol{K} + (1 - \cos\theta)\boldsymbol{K}^2 \tag{1}$$

$$\boldsymbol{K} = \begin{pmatrix} 0 & -k_z & k_y \\ k_z & 0 & -k_x \\ -k_y & k_x & 0 \end{pmatrix} = [\boldsymbol{k}]_\times \tag{2}$$

法線方向 $\boldsymbol{n}$ についても同様の理由から，大きさを 1 として角度の 2 変数 θ および ϕ を用いて $\boldsymbol{n} = [\ \sin\theta\cos\phi,\ \sin\theta\ \cos\phi,\ \cos\phi\ ]^{\mathrm{T}}$ と表されることとする．

3.1.2 屈折のモデル化

透視投影モデルにおいて $\boldsymbol{p}_c, \boldsymbol{p}_p$ と内部パラメータ $\boldsymbol{K}_c, \boldsymbol{K}_p$ がすでに得られている場合，$\boldsymbol{p}$ に左から $\boldsymbol{K}$ の逆行列をかけることで投影中心から見た 3 次元点の方向，すなわち投影中心から物体に向かう光線の方向ベクトル $\boldsymbol{v}_c, \boldsymbol{v}_p$ がそれぞれ求められる．

$$\boldsymbol{v} = \frac{\boldsymbol{K}^{-1}\boldsymbol{p}}{|\boldsymbol{K}^{-1}\boldsymbol{p}|} \tag{3}$$

ただしここではスネルの法則に基づく計算のため，ベクトル $\boldsymbol{v}$ の大きさを 1 とした．

さらに屈折面での入射・反射方向について，次のスネルの法則が成り立つ．

$$\boldsymbol{v}' = r\boldsymbol{v} - (rc - \sqrt{1 - r^2(1 - c^2)})\boldsymbol{n}. \tag{4}$$

r　相対屈折率，$r = \mu_o/\mu_i$
c　$\boldsymbol{v}$ の $\boldsymbol{n}$ 方向成分，$c = \boldsymbol{n} \cdot \boldsymbol{v}$
$\boldsymbol{v}$　入射光の方向ベクトル
$\boldsymbol{v}'$　出射光の方向ベクトル
μ　屈折率￥

上式から，カメラおよびプロジェクタ中心からの光線の 2 回屈折後の方向ベクトル $\boldsymbol{v}''$ を次のように計算することができる．

$$\boldsymbol{v}_c' = r_g \boldsymbol{v}_c - (r_g c_c - \sqrt{1 - r_g^2(1 - c_c^2)})\boldsymbol{n}. \tag{5}$$

$$\boldsymbol{v}_p' = r_g \boldsymbol{v}_p - (r_g c_p - \sqrt{1 - r_g^2(1 - c_p^2)})\boldsymbol{n}. \tag{6}$$

$$\boldsymbol{v}_c'' = r_w \boldsymbol{v}_c' - (r_w c_c' - \sqrt{1 - r_w^2(1 - c_c'^2)})\boldsymbol{n}. \tag{7}$$

$$\boldsymbol{v}_p'' = r_w \boldsymbol{v}_p' - (r_w c_p' - \sqrt{1 - r_w^2(1 - c_p'^2)})\boldsymbol{n}. \tag{8}$$

ここで r_g, r_w はそれぞれガラス/空気，水/ガラスの間の相対屈折率 $\mu_g/\mu_a, \mu_w/\mu_g$ を，c, c' はそれぞれ $\boldsymbol{v}, \boldsymbol{v}'$ の $\boldsymbol{n}$ 方向成分を表す．
加えて，式 (5)，(6) で得られた $\boldsymbol{v}_c'$，$\boldsymbol{v}_p'$ と $\boldsymbol{R}, \boldsymbol{t}, \boldsymbol{n}, d_c, \tau, \mu$ から，2 回目の屈折が生じる点 $\boldsymbol{p}_c^w, \boldsymbol{p}_p^w$ を次のように計算できる．

$$\boldsymbol{p}_c^g = \frac{c_c}{d_c}\boldsymbol{v}_c \tag{9}$$

$$\boldsymbol{p}_p^g = \frac{c_p}{d_c - \boldsymbol{n} \cdot \boldsymbol{t}}\boldsymbol{v}_p + \boldsymbol{t} \tag{10}$$

$$\boldsymbol{p}_c^w = \boldsymbol{p}_c^g + \frac{c_c'}{\tau}\boldsymbol{v}_c' \tag{11}$$

$$\boldsymbol{p}_p^w = \boldsymbol{p}_p^g + \frac{c_p'}{\tau}\boldsymbol{v}_p' \tag{12}$$

本論文では設定した測定モデルのパラメータのうち，外部パラメータの $\boldsymbol{R}$，$\boldsymbol{t}$，および $\boldsymbol{n}, d, \tau$ と対象物体の 3 次元座標 P が未知であるとし，その他の既知のパラメータとカメラ・プロジェクタの内部パラメータ，および画像間の対応点群を入力として，キャリブレーションによるパラメータ推定を行う．なお最適化による推定に際して未知パラメータには適当な初期値を与えることとする．

3.2 アルゴリズムの概要

提案手法の概要を以下に示す．
(1) 与えられた対応点の画像座標と内部パラメータから，投影中心から射出する光路の方向ベクトル $\boldsymbol{v}$ を計算する（式 (3)）．
(2) $\boldsymbol{v}$ とモデル上の各パラメータを用いて屈折を考慮した投影光路を求める（式 (4) ～ (12)）．
(3) 投影光路における幾何的拘束条件から拘束式をたて，これを対応点ごとに計算する（第 3.3 節）．
(4) 複数の対応点から得られた拘束式に対して適当な初期値から最小二乗法により未知パラメータ $\boldsymbol{\theta} = (\boldsymbol{R}, \boldsymbol{t}, \boldsymbol{n}, d_c, \tau)$ の推定を行う．
(5) 推定されたパラメータを用いて再投影とその誤差の計算を行い，誤差に関しての最小化を行うことでパラメータの最適化を行う（第 3.4 節）．
以下では 3 から順に具体的手順を述べる．

3.3 投影光路における平面拘束

先に述べられた計算式から，まずカメラ・プロジェクタの各投影中心から出ていく光線の方向ベクトル $\boldsymbol{v}$ が式 (3) から計算される．そこから $\boldsymbol{\theta} = (\boldsymbol{R}, \boldsymbol{t}, \boldsymbol{n}, d_c, \tau)$ に対して初期値を与えることで，第 3.1.2 節の屈折の計算式から $\boldsymbol{v}_c'$，$\boldsymbol{v}_p'$，$\boldsymbol{p}_c^w, \boldsymbol{p}_p^w$ が求められる．

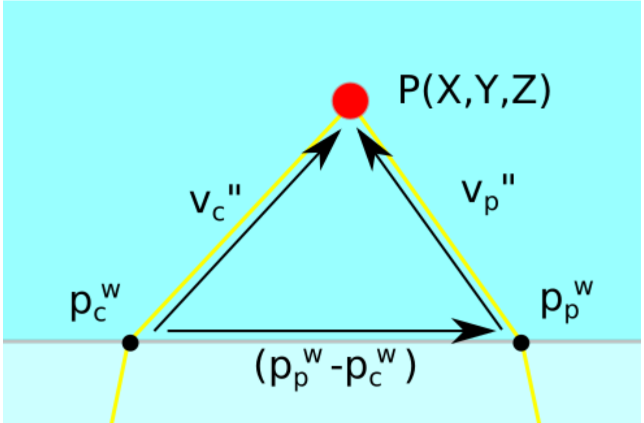


図 2　水中における投影光路の幾何学的関係

得られたこれらの値について，2 点 $\boldsymbol{p}_c^w, \boldsymbol{p}_p^w$ とそれぞれから出る光線 $\boldsymbol{v}_c'', \boldsymbol{v}_p''$ は画像座標に投影されたもともとの 3 次元点 $\boldsymbol{P}$ で交わるはずである．よって 3 つのベクトル $\boldsymbol{v}_c'', \boldsymbol{v}_p'', (\boldsymbol{p}_p^w - \boldsymbol{p}_c^w)$ は図 (2) のように三角形を形成し同一平面に存在することが期待される．

このとき同一平面上のベクトルに関するスカラー三重積の式

$$(\boldsymbol{v}_c'' \times \boldsymbol{v}_p'') \cdot (\boldsymbol{p}_c^w - \boldsymbol{p}_p^w) = 0. \tag{13}$$

が成り立つ．ここで $\times$ は外積を，$\cdot$ は内積を表す．
この拘束式をパラメータ $\boldsymbol{\theta} = (\boldsymbol{R}, \boldsymbol{t}, \boldsymbol{n}, d_c, \tau)$ と対応点 $\boldsymbol{x}_c$ と $\boldsymbol{x}_p$ についての関数

$$f(\boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{x}_c, \boldsymbol{x}_p) = (\boldsymbol{v}_c'' \times \boldsymbol{v}_p'') \cdot (\boldsymbol{p}_c^w - \boldsymbol{p}_p^w) \tag{14}$$

と置く．対応点ごとに拘束式を一つ得ることができるため，i 番目の対応点 $\boldsymbol{x}_c^i$ と $\boldsymbol{x}_p^i$ に対するスカラー 3 重積の関数を

$$f_i(\boldsymbol{\theta}) = f(\boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{x}_c^i, \boldsymbol{x}_p^i) \tag{15}$$

とすることで，n 個の対応点に対して次のような連立方程式がたてられる．

$$f(\boldsymbol{\theta}) = \begin{pmatrix} f_1(\boldsymbol{\theta}) \\ \vdots \\ f_n(\boldsymbol{\theta}) \end{pmatrix} = \boldsymbol{0}_{n \times 1} \tag{16}$$

正しいパラメータ $\hat{\boldsymbol{\theta}}$ について，$f_i(\hat{\boldsymbol{\theta}})$ の値はすべて 0 となることから，$f(\boldsymbol{\theta})$ に対する最小二乗法を用いることでパラメータの推定を行う．

3.4 再投影誤差の最小化による非線形最適化

観測に基づいたキャリブレーションパラメータの最尤推定とは，一般に観測対応点座標に平均 0 のガウスノイズが含まれるとするならば，推定されたモデルパラメータによって再現された撮影点と元の観測点とのユークリッド距

離を最小化するものである．この意味において，前節で推定されたパラメータはスカラ三重積を最小化するものであり，必ずしも内部パラメータの推定における最適性は持っていない．しかしそれらを用いて再投影計算を行うことで，入力として与えられた画像座標と計算より得られた画像座標との誤差が計算できる．これが最小となるように改めて調整を行うことでパラメータの最適化を行う．

まず第 3.1.2 節で述べた方法により，2 回目の屈折が生じる点と屈折後の光線の方向ベクトルが計算される．続いて得られた 2 点と 2 ベクトルから DLT 法により画像座標に対応する対象物体の 3 次元点 $\boldsymbol{P}$ を求める．この点 $\boldsymbol{P}$ について Agrawal の手法 [6] を用いた投影中心までの屈折の軌跡の計算が行えるため，推定されたパラメータを入力として軌跡から再投影された画像座標 $\hat{\boldsymbol{x}}$ を求め，元の座標との距離を誤差として計算し，各点ごとに求めた誤差に対して最小二乗法による最適化を施し，パラメータの微調整を行う．

$$\arg\min_{\boldsymbol{\theta}} \ \delta_i^2 \tag{17}$$

$$\delta_i = |\hat{\boldsymbol{x}}_c^i - \boldsymbol{x}_c^i| + |\hat{\boldsymbol{x}}_p^i - \boldsymbol{x}_p^i| \tag{18}$$

3.5 初期値の計算

関数の複雑さから，目的関数の最適化における大域的収束性を保証することはできない．そのため入力とした初期値によっては真値と大きく外れた局所最適値に収束してしまう場合がある．したがって最適化の入力として適切な値を初期値として与えなければならない．

そこでカメラ・プロジェクタ間の回転行列 $\boldsymbol{R}$ については，画像間の対応から屈折を無視した状態で基礎行列の推定を行い，これを分解することで初期値の決定を行う．ここで屈折がない状況で撮影された画像の対応点 $(\boldsymbol{x}_c^i, \boldsymbol{x}_p^i)$ と基礎行列についてエピポーラ幾何関係から

$$\boldsymbol{x}_p^{i\,\mathrm{T}} \boldsymbol{F} \boldsymbol{x}_c^i = 0. \tag{19}$$

といった式がたてられるため，基礎行列 $\boldsymbol{F}$ の推定として

$$\arg\min_{\boldsymbol{F}} \sum_i \frac{\boldsymbol{x}_p^{i\,\mathrm{T}} \boldsymbol{F} \boldsymbol{x}_c^i}{|\boldsymbol{I}_3 \boldsymbol{F}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{x}_p^i| + |\boldsymbol{I}_3 \boldsymbol{F} \boldsymbol{x}_c^i|} \tag{20}$$

について総和を最小とする行列 $\boldsymbol{F}$ を求めることで推定を行う．
基礎行列 $\boldsymbol{F}$ を推定したのち，カメラ内部行列から以下の式 (21) より基本行列 $\boldsymbol{E}$ を計算する．$\boldsymbol{E}$ が式 (22) で表されることより，これを [7] に従い分解することで $\boldsymbol{R}$ の初期値を求めた．なお $[\boldsymbol{t}]_\times$ はベクトル $\boldsymbol{t}$ の外積の行列表現であり歪対象行列で表される．

$$\boldsymbol{E} = {\boldsymbol{K}_p}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{F} \boldsymbol{K}_c \tag{21}$$

$$\boldsymbol{E} = [\boldsymbol{t}]_\times \boldsymbol{R} \tag{22}$$

並進ベクトル $\boldsymbol{t}$ については方向のみが求まり実際のスケールがわからないため，本手法においてはカメラと屈折面との距離や屈折層の厚みと同様実際の測定状況に合わせて適当に初期値を与えることとする．

3.6 画素ノイズに対するロバスト性

現実の撮影環境においては，撮影の際や対応点探索の際に画素のずれが生じる．最適化を試みたときにこのノイズが外れ値となり，適切な最適化が行えなくなる可能性がある．そこで関数に対して次の Huber 関数を適用し，閾値より大きくなった場合は二乗でなく線形にすることで最適化計算のロバスト性の向上を目指した．

$$L_\delta(a) = \begin{cases} \frac{1}{2}a^2 & (|a| \le \delta) \\ \delta(|a| - \frac{1}{2}\delta) & (otherwise) \end{cases} \tag{23}$$

なお，関数の閾値となる δ については想定されるノイズに合わせて適当に設定した．

4. 評価実験

4.1 シミュレーション

4.1.1 設定

図 (1) のように配置されたカメラ，プロジェクタ，屈折境界面，対象物体について各パラメータを次のように設定した．

- 回転行列 (回転ベクトル)
  $$\boldsymbol{R} = \begin{pmatrix} 0.9659 & 0 & -0.2588 \\ 0 & 1.0000 & 0 \\ 0.2588 & 0 & 0.9659 \end{pmatrix}$$
  $\Leftrightarrow \boldsymbol{r} = [0, pi/12, 0]$
- 並進ベクトル
  $\boldsymbol{t} = [600, 10, 20]^{\mathrm{T}}$
- 屈折面の垂直方向
  $\boldsymbol{n} = [0.0499, 0.0499, 0.9975]^{\mathrm{T}}$
- カメラ中心と屈折面との距離
  $d_c = 100$
- 屈折層の厚み
  $\tau = 30$
- 各媒質の相対屈折率
  $\mu_g = 1.49,\ \mu_w = 1.33$
- 内部行列
  $$\boldsymbol{K}_c = \begin{pmatrix} 160 & 0 & 320 \\ 0 & 160 & 240 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$
  $$\boldsymbol{K}_p = \begin{pmatrix} 160 & 0 & 320 \\ 0 & 160 & 240 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$
- 焦点距離
  $f_c = 160,\ f_p = 160$

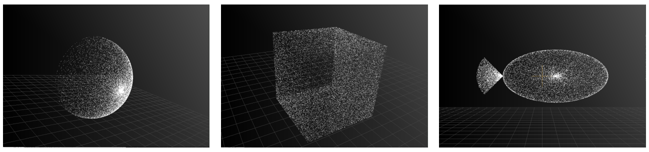


図 3　3 次元形状の真値

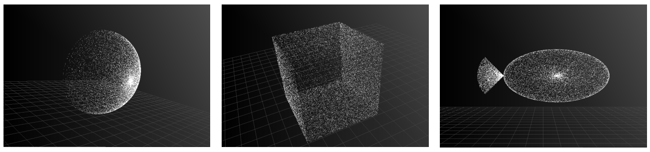


図 4　形状復元結果（ノイズがない場合）

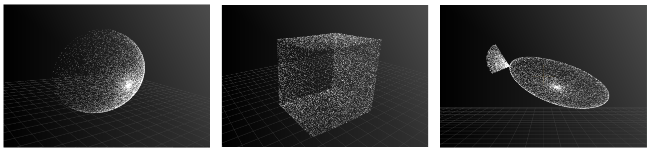


図 5　形状復元結果（ノイズの分散 $\sigma^2 = 0.5$）

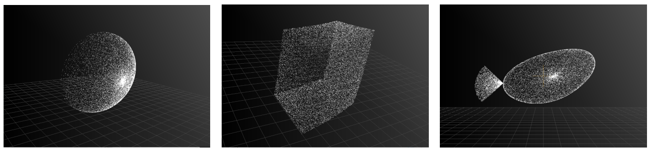


図 6　形状復元結果（ノイズの分散 $\sigma^2 = 1.0$）

このように設定した測定状況において，まず画素ノイズがない場合を考え，適当に設計した対象物体について物体表面の対象点ごとに Agrawal の手法 [8] を用いて屈折層を通る投影光路を計算し，カメラ・プロジェクタ画像における画素およびその対応を生成した．ただしここでは画像座標に離散化の影響がないものとした．ここで得た対応点と内部パラメータなどを入力として提案手法による推定を行い，上で設定した真値との比較を行いキャリブレーションの精度評価を行った．また推定されたパラメータを用いた 3 次元形状復元および再投影誤差計算も実施し，もとの対象物体と比較することでも評価を行った．

次に測定データにノイズが存在する状況を想定し，画素ごとに適当なノイズを与えたうえで同様の実験を行った．ノイズとしては平均が 0 の正規分布を用い，対応点の各画素に足し合わせる形とした．分散の大きさを変化させながらそれぞれ再投影誤差の計算を行い，その大きさと分散との関係を調べた．

4.1.2　結果

ノイズがない場合について初期値を適当に与えてパラメータ推定を行った結果，初期値と真値との間に大幅なずれがない場合においては，厚みが真値と等しくなるようスケールを調整すると，推定されたパラメータは真値に近い値となった．その結果を表 (1) に示す．ここで回転行列における誤差 E_r は Riemannian distance[9] から，法線方向の誤差 E_n は真値と推定値の 2 つのベクトルのなす角から計算した．またこのときの各対象物体について，形状復元した物体と物体形状の真値との比較を図 (3，4) に示す．図のように形状復元したものについても，元の形状と近いものが得られた．一方，初期値と真値との間に大きなずれがある場合については，最適化において真値とは離れた値に収束してしまい正しい値は得られなかった．

次に画素ごとに正規分布ノイズを与え同様の実験を行った時の，分散を変化させたときの再投影誤差と形状復元結果を表 (3) および図 (5),(6) および図 (7) に示す．このように再投影誤差はノイズの標準偏差におよそ近い値となった．しかし推定された各パラメータは表 (2) のようになり，真値とのずれが見られた．また，分散が大きくなるにつれて回転 $\boldsymbol{R}$ の初期値を求める計算が正しく行われなくなっていき，その結果によっては屈折の計算がうまく行えなくなり推定が途中で停止することもあった．また形状復元結果についても分散が大きくなるほど元の形より異なったものになっていってしまった．

	r1	r2	r3	t1	t2	t3	θ	ϕ	d_c	τ
Object1	4.1E-6	0.2618	8.4E-6	599.7	9.997	19.99	0.0707	0.7852	99.95	30
Object2	-2.3E-6	0.2618	-2.4E-4	587.8	9.801	19.59	0.0706	0.7858	98.01	30
Object3	-1.1E-6	0.2618	-6.1E-6	597.3	9.958	19.91	0.0706	0.7854	99.56	30
真値	0	0.2618	0	600.0	10.00	20.00	0.0706	0.7854	100.0	30

(1) 推定された各パラメータ

	E_r	E_{t1}	E_{t2}	E_{t3}	E_n	E_{dc}
Object1	1.7E-5	0.05	0.03	0.04	1.1E-4	0.05
Object2	6.6E-6	2.03	1.99	2.06	1.6E-5	1.99
Object3	4.8E-6	0.45	0.42	0.44	9.9E-6	0.44

(2) 各パラメータと真値との誤差

表 1　ノイズがない場合の自己較正結果
（E_r は Riemannian distance[9]，r,θ,ϕ,E_n の単位は radian，t,d_c,τ は次元はスケール，その他の単位は真値に対する百分率である．）

4.1.3　評価

ノイズがない場合については，$\boldsymbol{R}$ の初期値の推定，スカラー 3 重積を目的関数とした最適化，再投影誤差を用いたバンドル調整のいずれにおいても適切な推定が行われていたと思われる．これは用いた理論の正しさを示しているといえる．

しかし一方でノイズが存在する場合においては，ノイズが大きくなるにつれて回転の初期値の計算およびスカラー 3 重積の計算による最適化が十分に機能しなくなっていってしまった．原因としては最適化において目的関数や上限下限の設定が適切でなかったことや，スカラー 3 重積が拘束条件としては弱いことなどが可能性として考えられる．

	r1	r2	r3	θ	ϕ
Object1	-0.0421	-0.0901	-0.2099	1.147	1.692
Object2	9.0E-4	0.2438	0.0355	0.2334	7.063
Object3	-0.0854	0.1216	-0.1671	0.6175	2.225
真値	0	0.2618	0	0.0706	0.7854

t1	t2	t3	d_c	τ
364.7	65.28	-29.09	112.5	30
578.2	9.642	-13.88	112.4	30
598.9	49.69	62.21	77.35	30
600.0	10.00	20.00	100.0	30

(1) 推定された各パラメータ

	E_r	E_{t1}	E_{t2}	E_{t3}	E_n	E_{dc}
Object1	0.3	39.2	552	245	1.1	12.5
Object2	0.03	3.6	3.6	169	0.2	12.3
Object3	0.2	0.2	397	211	0.6	22.6

(2) 各パラメータと真値との誤差

表 2 ノイズがある場合の自己較正結果（単位は表 1 と同様）

		再投影誤差		
分散	標準偏差	Object1	Object1	Object3
0	0	2.76E-06	2.28E-05	9.49E-5
0.01	0.100	0.112	0.109	0.110
0.1	0.316	0.360	0.343	0.355
0.3	0.548	0.623	0.630	0.604
0.5	0.707	0.803	0.769	0.796
1.0	1.000	1.102	1.114	1.067
1.5	1.224	1.412	1.317	1.275
2.0	1.412	1.642	1.532	1.634

表 3 ノイズがある場合の再投影誤差（pixel）

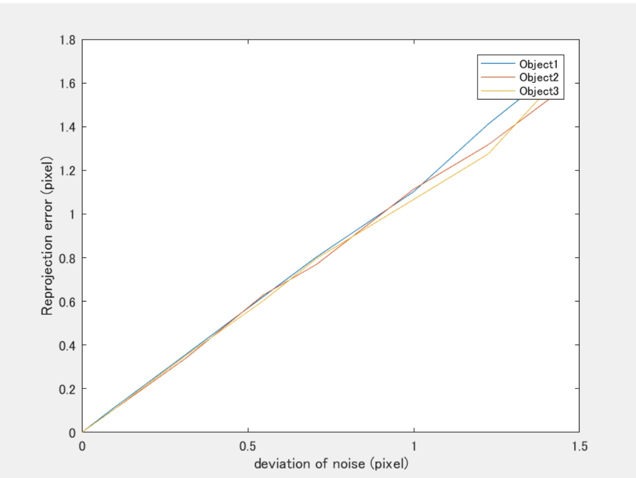


図 7 ノイズの分散の大きさと再投影誤差の関係

またこのとき推定された各パラメータが真値とずれた結果になってしまったのは，ノイズの加わった各画素値を用いて最適化を行った際にオーバーフィッティングが生じてしまったためとも考えられる．

4.2 実環境での計測による評価

次に実際にカメラ・プロジェクタを用いて屈折層越しに撮影・投光を行って得られた対応点から提案手法によるパラメータ推定を試みた．対応点探索手法としてグレイコードおよび正弦波コードの投光を行い（図 9）そこから各画素の対応を取った．またシミュレーションと違い真値が与えられていないので，すでに得られている対応点とカメラパラメータから計算される値を初期値として与え，再投影誤差を計算し精度評価を行った．

4.2.1 設定

水中に物体を設置し，水槽を挟んでカメラ・プロジェクタを図 (8) のように配置した．事前に行ったキャリブレーションにより得られたカメラ・プロジェクタの内部パラメータが以下のようになる．

- カメラ内部行列

$$K_c = \begin{pmatrix} 3218 & 0 & 616.3 \\ 0 & 3219 & 531.9 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

- プロジェクタ内部行列

$$K_c = \begin{pmatrix} 2447 & 0 & 641.6 \\ 0 & 2447 & 863.2 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

また実際の測定状況に基づき，各パラメータの初期値として次のような値を与えた．

- 回転ベクトル
  $\boldsymbol{r} = [0, \pi/6, 0]$
- 並進ベクトル
  $\boldsymbol{t} = [-150, 0, -150]^{\mathrm{T}}$
- 屈折面の垂直方向
  $\boldsymbol{n} = [0.5, 0.2, 0.9]^{\mathrm{T}}$
- カメラ中心と屈折面との距離
  $d_c = 150$
- 屈折層の厚み
  $\tau = 30$
- 各媒質の相対屈折率
  $\mu_g = 1.49,\ \mu_w = 1.33$

このように与えたパラメータと初期値，およびパターン光の投影により得られた対応点を用いて提案手法によるキャリブレーションを実施した．

4.2.2 結果

提案手法を用いて推定された各パラメータを用いて再投影誤差の計算を行った結果，画素ごとの誤差の平均 E_r は $E_r = 20.5$(pixel) と大きな値となった．また同様に 3 次元形状を復元した結果が (10) 図右のようになった．物体のもとの形状 (図左) と比較しても大きく歪んだ形となった．

4.2.3 評価

実際に画像を用いてキャリブレーションを行った結果

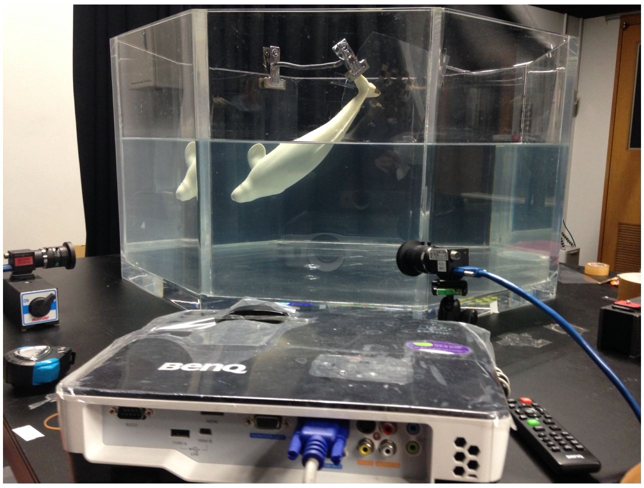
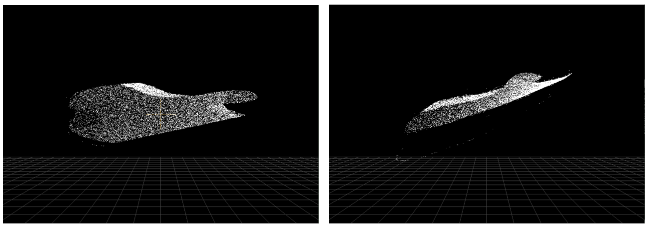


図 **8**　実験環境

図 **9**　グレイコードパターンの投光



(1) 形状の真値　　(2) 復元した形状

図 **10**　実画像を用いた形状復元

は，シミュレーションにおいて画素ごとにノイズを加えた場合と比較してさらに精度が落ちたものとなっていた．これは実画像をもとに対応画素などを入力として与えたため，シミュレーション時よりもノイズの影響が大きかったためと考えうる．対応点探索の際に対応誤りが生じたことも可能性として考えられる．また事前にキャリブレーションを行ったカメラ・プロジェクタの内部パラメータ，および正しい値として与えた媒質の屈折率などについても，実際には誤差が含まれる．いずれにせよ，本手法のノイズに対する頑健性が実環境に対して十分でないことが改めて明らかになった．

4.3　考察

シミュレーション，および実画像を用いた場合それぞれにおいて提案手法による計算を行った結果，用いた理論の正しさが確認された．しかし同時にノイズに対する脆弱性も明らかとなった．実環境において画像からキャリブレーションを行う際，様々な要因から用いるデータにノイズが生じることは避けられない事態である．実際に画像を用いて物体の 3 次元形状を計測していくことを考えると，ノイズに対する頑健性が不可欠になってくる．今回用いた手法はそれに対する考慮が不十分であったと思われるため，ノイズに対する頑健性の向上を今後の研究の課題とする．

5.　結論

提案手法によって屈折を含んだ投影を伴うカメラ・プロジェクタシステムの自己較正が実現できた．しかしノイズに対する頑健性などの面で課題が残されていることも明らかになった．

理論的な面では，カメラ・プロジェクタ間の回転の初期値を求める際に屈折を無視して大まかな値のみを求めているが，屈折の影響が大きい状況など計算が正確に行われなくなる場合なども起こるため屈折を何らかの方法で近似するなどしたうえで妥当な初期値の推定を行う手法の検討が必要である．またスカラー 3 重積の最小化による最適化についても，それ単体での物理的拘束の弱さを考慮したより頑健な目的関数の作成を行う必要がある．

実用化を考えたうえでの課題としては，手法の前提としてカメラ・プロジェクタが正確にキャリブレーションされていることや媒質の屈折率が事前にわかっていることなどが条件となっている．また屈折面との距離などのパラメータの初期値を適切に与えなければならないという問題もある．検討すべき課題として，スケールパラメータ $\boldsymbol{t}, d_c, \tau$ の初期値を与える計算方法や，カメラパラメータや屈折率まで含めた最適化による計算手法などが今後考えていく必要があるものといえる．またノイズに対するロバスト性についても合わせて考慮していく必要がある．

これからの研究としては以上の課題を考慮しつつ，本論文で述べた自己較正手法をより発展させていきたいと考えている．

謝辞　本研究は科研費（課題番号 26240023）の補助を受けて行った．

参考文献

[1] Zhang, Z.: A flexible new technique for camera calibration, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 22, No. 11, p. 13301334 (2000).
[2] Yamazaki, S., Mochimaru, M. and Kanade, T.: Simultaneous Self-Calibration of a Projector and a Camera Using Structured Light, *Proc. Projector Camera Systems*, pp. 67–74 (2011).
[3] Chari, V. and Sturm, P.: Multiple-View Geometry of the Refractive Plane, *BMVC 2009 - 20th British Machine Vision Conference*, The British Machine Vision Association (BMVA), pp. 1–11 (online), DOI: 10.5244/C.23.56 (2009).
[4] Grossberg, M. and Nayer, S.: The Raxel Imaging Model and Ray-Based Calibration, *International Journal on Computer Vision*, Vol. 61 (2005).
[5] Kawahara, R., Nobuhara, S. and Matsuyama, T.: Underwater 3D Surface Capture Using Multi-view Projectors

and Cameras with Flat Housings, *IPSJ Transactions on Computer Vision and Applications*, Vol. 6, pp. 43–47 (online), DOI: 10.2197/ipsjtcva.6.43 (2014).

[6] Agrawal, A. K., Ramalingam, S., Taguchi, Y. and Chari, V.: A theory of multi-layer flat refractive geometry., *CVPR*, IEEE Computer Society, pp. 3346–3353 (2012).

[7] Hartley, R. and Zisserman, A.: *Multiple View Geometry in Computer Vision 2nd edition*, Cambridge University Press (2004).

[8] Agrawal, A.: A Theory of Multi-Layer Flat Refractive Geometry.

[9] Moakher, M.: Means and Averaging in the Group of Rotations, *SIAM J. Matrix Anal. Appl.*, Vol. 24 (2002).