

複合鏡を用いた単一深度カメラによる 全周囲3次元形状計測

柏野 孝士^{1,a)} 延原 章平^{1,b)} 松山 隆司^{1,c)}

概要: 本研究では顕微鏡のように物理的に1視点のみから被写体を観測できる環境を想定し、1台のカメラによる全周囲3次元形状計測の実現を目指す。この目的のために、特に本研究では複数枚の鏡を被写体背後に配置することで仮想的な多視点撮影環境を構成するとともに、深度カメラ (ToF カメラ) を用いることで対象領域検出とその領域の奥行き情報を直接計測する。実験では鏡の位置姿勢を深度カメラ画像から推定するとともに、実際に全周囲3次元形状計測を行うことで有効性を確認した。

1. はじめに

コンピュータビジョンにおける全周囲3次元形状計測 [3,5] は、計測対象の多視点からの画像が必要となる。多くの場合、複数のカメラを対象の周りに配置することで、多視点からの画像を撮影し、それぞれの画像の対応を考え、3次元形状を獲得する。しかし複数のカメラを使用するには各カメラのパラメータを求める必要がある、また得られる画像の対応づけにあいまいさが生じるなどの問題が生じる。そこで1台のカメラのみで全周囲3次元形状計測を行う方法はないか考えた。

本研究では複数のカメラの代わりに複数の鏡を使用する。計測対象の背後に鏡を配置し、鏡の反射を利用してことで仮想的に多視点からの撮影を可能にする。またカメラには深度カメラを利用することで対象領域の検出と奥行き情報の計測を行う。

これらをまとめると本研究のカギとなるのは、

- カメラ1台で全周囲3次元形状計測
 - 複数のカメラの代わりに複数の鏡を使用
 - カラーカメラの代わりに深度カメラを使用
- である。

本論文の構成は以下ようになる。まず、第2節では本研究の関連研究について、第3節では本研究で用いた計測モデルについて、第4節では本研究の計測アルゴリズムについて述べる。また、第5節では実際に本研究のアルゴリズムに従い実験を行った結果を示す。

2. 関連研究

2.1 単眼カメラと鏡を用いた3次元形状計測

Keith Forbes ら [1] は本研究と同じように、1台のカメラと2枚の鏡を配置して、鏡の反射像を利用して対象の全周囲3次元形状計測を行っている。彼らの研究では、まず鏡2枚と計測対象を対象が5視点(カメラに直接映る1視点、鏡による反射の2視点、鏡による反射の反射の2視点)から見えるように配置し、得られる5視点の画像からカメラのキャリブレーションを行う。そしてキャリブレーションを終えたあと、5視点の画像から対象のシルエットを抜き出し、そのシルエットを用いて視体積交差法を行い、全周囲3次元形状を復元している。

しかし、視体積交差法には欠点がある。視体積交差法は錐体の積集合であるため凹形状を考慮することができない。そこで本研究では深度カメラを利用することで奥行きを直接計測し、凹形状にも対応できるようにした。

2.2 鏡の位置、姿勢推定

高橋ら [6] は外部パラメータを求める際の参照物体がカメラの画像中に映らないという条件で参照物体に対するカメラの位置、姿勢を獲得する方法を考えた。彼らの論文では、画像中の領域に参照物体が映るように鏡を配置し、それによって得られる参照物体の鏡映像から外部パラメータを得る方法を述べている。これを行うことによってカメラの位置、姿勢だけでなく、鏡の位置、姿勢も得ることができる。

本研究では鏡を用いるにあたってカメラに対する鏡の位置、姿勢を得ることは絶対条件となる。今回は鏡平面の上

¹ 京都大学大学院情報学研究科

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

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

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

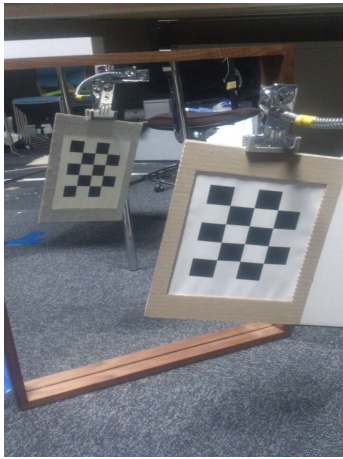


図1 両面チェスボードを用いた鏡のキャリブレーション

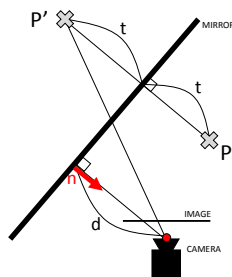


図2 計測モデル

に参照物体としてチェスボード(格子点)を配置することによって鏡の位置, 姿勢を得ている.

また, 本研究では鏡面にチェスボードを配置せずに鏡の姿勢を知る方法として, 両面チェスボードを使用した方法も述べる. 今回使用した ToF カメラは距離画像と同時に輝度画像も撮影可能であった. そこで, 厚みの無視できる両面チェスボードに対し, 図1のような位置関係で輝度画像と距離画像を撮影し, チェスボードの格子点までの距離を計測した. 鏡に映るチェスボード裏面の格子点までの距離を未知の鏡のパラメータ(法線ベクトル n , 距離 d)を用いて折り返すことでチェスボード表面の格子点との誤差がもっとも小さくなる n, d を求めた.

3. 複合鏡を用いた単一深度カメラによる全周囲3次元形状計測

3.1 計測モデル

本研究では, 図2に示すようにカメラと鏡, 被写体を配置して計測を行う.

鏡の法線ベクトルを $n(|n|=1)$, 鏡とカメラの距離を d としたとき, 下に示す計算式によって鏡の反射を考えることができる. 鏡を介した点を $P' = (x', y', z')$, 実際の被写体の位置を $P = (x, y, z)$ とすると,

$$P = P' + 2tn \quad (1)$$

$|n|=1$ より, P' と n の内積を考え,

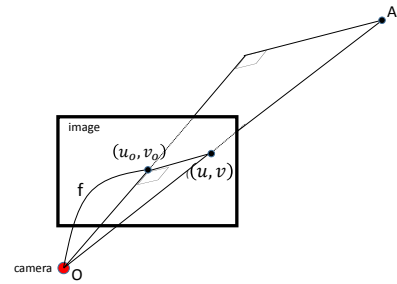


図3 深度カメラによる距離計測

$$t + d = -n \cdot P' \quad (2)$$

上の2式より t を削除することで P を求めることができる.

$$P = -2(n \cdot P' + d)n + P' \quad (3)$$

3.2 深度カメラによる距離計測

深度カメラによって得られる画像の各ピクセルには物体までの距離が格納されている. ここでは, 距離画像からカメラ座標系への変換の手法を述べる. まず, 内部パラメータより画像の中心座標 (u_0, v_0) が分かる. 距離画像の座標 (u, v) に格納されている距離を d とすると, カメラ座標系 (x, y, z) で次のように表される. 図3のような関係である.

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \frac{z_d}{\sqrt{f^2 + (u - u_0)^2 + (v - v_0)^2}} \begin{bmatrix} u - u_0 \\ v - v_0 \\ f \end{bmatrix} \quad (4)$$

3.3 キャリブレーション手順

3.3.1 鏡面にチェスボードを配置した方法

今回研究に用いた深度カメラは距離画像と同時に輝度画像も撮影可能であった. そのため鏡面にチェスパターンを配置し, Zhang ら [8] の方法を利用することで, カメラの内部, 外部パラメータを求めた. 得られたパラメータより, 鏡面の距離, 向きを計算した.

● 鏡面の法線ベクトル n

外部パラメータを R, T , 鏡面に配置したチェスパターンの座標系を鏡座標系とすると, 法線ベクトル n は鏡座標系における z 軸方向, すなわち $(0, 0, 1)^T - (0, 0, 0)^T$ であるので, カメラ座標系で考えると,

$$n = (R \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} + T) - (R \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + T) = R \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

よって, 法線ベクトル n は, 回転行列 R の第3列目の要素である.

● 鏡とカメラの距離 d

鏡とカメラの距離は、鏡座標系から見たカメラの位置の z 座標であるので、鏡座標系におけるカメラの位置を (x, y, z) とすると、カメラ座標系においてカメラの位置は当然 $(0, 0, 0)$ なので、

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + T \quad (6)$$

この式を変形して、

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = -R^{-1}T \quad (7)$$

よって鏡とカメラの距離 d は、 $-R^{-1}T$ の第3行目の要素である。

3.3.2 両面チェスパードを用いた深度カメラと鏡のキャリブレーション

図1のような表裏両面にチェスパターンを持った厚さの無視できる平面物体 X があるとす。深度カメラ C により X の片方の面 (表面) を直接撮影し、もう一方の面 (裏面) を X の背後に置かれた鏡 Π を介して撮影するとき、深度カメラのキャリブレーションと鏡の位置・姿勢の双方を同時にキャリブレーションする方法を考える。

まず深度カメラはシーンの深度画像 D と輝度画像 I を出力することができ、かつ両者は物理的に同一のセンサから得られ各画素は完全に一対一対応すると仮定する。

このことはチェスパターンのカメラからの距離が、深度画像 D と、輝度画像 I からそれぞれ独立に推定可能であることを意味している。すなわち深度画像 D を用いるとカメラから任意の点への距離が直接獲得でき、一方輝度画像 I からはチェスパターンとカメラの位置・姿勢が Zhang の手法によって得られるため、結果的にチェスパターンの各格子点までの距離が得られる。

このように2つの独立した過程で得られる距離情報をもとにして、本研究では深度画像による距離情報よりも輝度画像による距離情報のほうが精度が高いという仮定に基づいて以下の方針でキャリブレーションを行う。

- (1) D と I 中の格子点を検出する。
 - D 中の直接像と鏡像をそれぞれ $p_i, q_i (i = 1, \dots, N)$ とする。
 - I 中の直接像と鏡像をそれぞれ $r_i, s_i (i = 1, \dots, N)$ とする。
 - X 上の格子点を P_i 、その鏡像を $Q_i (i = 1, \dots, N)$ とする。
- (2) D の画素 p_i および q_i における観測値から、 P_i および Q_i までの距離 λ_i^r, λ_i^g が得られる。
- (3) 一方 r_i および s_i によって、Zhang の手法から表面およ

び裏面のチェスパターンに対する深度カメラの位置・姿勢がそれぞれ R_f, t_f および R_r, t_r として求まる。これらは以下の式を満たす。

$$\lambda_i^r r_i = A(R_f P_i + t_f) \quad (8)$$

$$\lambda_i^s s_i = A(R_r Q_i + t_r) \quad (9)$$

(4) このとき λ_i^r は λ_i^r の、 λ_i^s は λ_i^s の真値であるとみなす。つまり深度画像 D から距離 λ_i^r (もしくは λ_i^s) なる計測値が得られたときは、距離 λ_i^r (もしくは λ_i^s) と補正するような回帰関数 $\lambda = g(\lambda')$ を学習する。

(5) また R_f, t_f および R_r, t_r によって P_i および Q_i のカメラ座標系における3次元位置が $R_f P_i + t_f$ および $R_r Q_i + t_r$ として得られるが、両者は鏡 Π による鏡像である。したがって鏡 Π のパラメータは、両者の垂直二等分面として計算できる。

3.3.3 深度補正関数 $\lambda = g(\lambda')$ の推定

上記のようにチェスパターンの表裏から λ と λ' の組み合わせが得られたとき、両者の関係を表す回帰関数 g を求める。本研究では実験的に線形回帰としてモデル化し、 $\lambda = g(\lambda') = a\lambda' + b$ としてパラメータ a および b を最尤推定した。

3.3.4 鏡 Π の位置・姿勢推定

上記のように P_i および Q_i のカメラ座標系における3次元位置が $R_f P_i + t_f$ および $R_r Q_i + t_r$ として得られ、両者は鏡 Π による鏡像である。したがって鏡 Π の平面を法線 n およびカメラ座標系原点からの距離 d としたとき、

$$n \propto \sum_i ((R_f P_i + t_f) - (R_r Q_i + t_r)) \quad (10)$$

より n が求まり、また

$$2tn + (R_r Q_i + t_r) = (R_f P_i + t_f) \quad (11)$$

$$n^\top (R_r Q_i + t_r) = d + t \quad (12)$$

の連立方程式より d が求まる。ただし t は P_i および Q_i から鏡 Π への距離である。

4. 複合鏡を用いた全周囲3次元形状計測アルゴリズム

対象の背後に配置された鏡を用いて対象の全周囲3次元形状を得るために検討しなくてはならない点は次の2点である。

- 対象領域をどのようにして抽出するのか
- 対象領域を直接像と鏡映像にどのようにして分割するのか

ここで対象領域とは撮影された深度画像の中で被写体を写している画素の集合であり、そのような対象領域は、さらに対象を直接写した直接像領域と、鏡を介して間接的に写



図4 前景画像(左)と背景画像(右)

した鏡映像領域に分割することができるとしている。

本報告では前者は背景差分によって、後者は前述のキャリブレーションで得られた鏡のパラメータを用いて撮影空間を3次元的に分割することで実現する。

4.1 撮影

撮影時、カメラと撮影対象を動かさずに n 枚ずつ撮影する。そして画像を読み込んで扱う際は n 枚の画像の平均を用いる。

各画像を $I_1, I_2, I_3, \dots, I_n$ とすると n 枚の画像の平均は

$$I = \sum_{p=0}^n \frac{I_p}{n} \quad (13)$$

画像の1ピクセルにかかる雑音のモデルを平均0、標準偏差 σ のガウシアンノイズとすると、 n 枚撮影したときの信号 S と雑音 N の関係 S/N は次のようになる。

$$\frac{S}{N} = \frac{nS}{\sqrt{n\sigma^2}} = \frac{S}{\sqrt{\frac{1}{n}\sigma^2}} \quad (14)$$

これより平均画像 I の雑音レベルは $1/\sqrt{n}$ 倍となることが分かる。

本研究では、下に示すように、カメラは動かさずに2種類の画像を n 枚ずつ撮影する。

- 画像 M(図4左)・・・対象+鏡
- 画像 B(図4右)・・・鏡のみ

4.2 背景差分による対象領域抽出

[画像 M]–[画像 B] の計算を行うと、2つの画像中の計測対象の存在しない部分(背景)の距離はほぼ等しいため、計算結果の差の小さい部分を背景に対応する画素、逆に計算結果の差の大きい部分を計測対象に対応する画素と、画像を2つの画素の集合に分けることができる。

すなわち、画像 M の各画素 $M(u, v)$ 、画像 B の各画素 $B(u, v)$ に対して、ある閾値 T を設定し、

$$|M(u, v) - B(u, v)| > T \quad (15)$$

を満たす画素は計測対象領域とみなす。ただし、 T が小さすぎると鏡でない部分を鏡と認識してしまう。 T が大きすぎると鏡があっても鏡を認識できない。そのため T の値は適切な値を実験的に選ぶ。

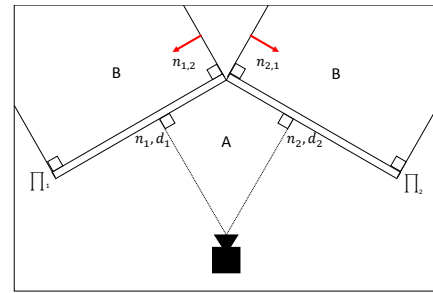


図5 鏡平面を用いた直接像・鏡映像の3次元分離

と表現できる。続いて後者の他の鏡との交差による制約は次のように定義できる。まず鏡 Π_i は鏡 Π_j と交差しているとしよう。このとき鏡 Π_i と鏡 Π_j の交線 $l_{i,j}$ の方向ベクトル $m_{i,j}$ は、それぞれの法線の外積として求まる。

4.3 鏡平面を用いた直接像・鏡映像の3次元分離

事前に鏡 Π_i の平面パラメータがその法線 n_i ($|n_i| = 1$) とカメラ中心からの距離 d_i として得られているとする。また特に n_i はカメラ中心に向かう方向ベクトルであるとすると、

$$n_i^\top p + d_i > 0 \quad (16)$$

を満たす点 p は鏡 Π_i よりカメラ中心側に存在しているといえるため、直接像とはこの不等式制約を全ての鏡に対して同時に満たす点と言える(図5の領域A)。

一方、鏡 Π_i による鏡映像とは、図5の領域Bのように鏡 Π_i の平面の裏側であり、かつ他の鏡との交差によって生じる境界内の領域といえる。まず前者の鏡 Π_i 平面の裏側という制約は

$$n_i^\top p + d_i < 0 \quad (17)$$

と表現できる。続いて後者の他の鏡との交差による制約は次のように定義できる。まず鏡 Π_i は鏡 Π_j と交差しているとしよう。このとき鏡 Π_i と鏡 Π_j の交線 $l_{i,j}$ の方向ベクトル $m_{i,j}$ は、それぞれの法線の外積として求まる。

$$m_{i,j} = n_j \times n_i \quad (18)$$

したがって鏡 Π_i が鏡 Π_j によって交差することで生じる境界面 $\Pi_{i,j}$ の法線 $n_{i,j}$ は

$$n_{i,j} = n_i \times m_{i,j} \quad (19)$$

として得られる。またこの境界面 $\Pi_{i,j}$ が通過する1点は交線 $l_{i,j}$ 上の1点を適当に決めることで得られる。すなわち $z = 0$ など適当な条件を設定してそのときの点を求めればよい。この点を $q_{i,j}$ とすると、

$$n_{i,j}^\top (p - q_{i,j}) > 0 \quad (20)$$

を満たすとき、点 p は境界面 $\Pi_{i,j}$ よりも鏡 Π_i 側に存在するといえる。したがって点 p が

$$n_i^\top p + d_i < 0 \quad (21)$$

および全ての隣接する鏡 Π_j に対して



図 6 実験環境

$$n_{i,j}^T(p - q_{i,j}) > 0 \quad (22)$$

を同時に満たすとき、鏡 II による鏡映像であると判別できる。

4.4 複合鏡を用いた全周囲 3 次元形状計測アルゴリズム

以上を組み合わせることによって、本研究では以下のように複合鏡を用いた全周囲 3 次元形状計測アルゴリズムを設計した。

- (1) 両面チェスボードを用いて鏡と深度カメラのキャリブレーションを行う
- (2) 直接像と鏡映像を分離する境界面を計算する
- (3) 背景深度画像を撮影する
- (4) 前景深度画像を撮影する
- (5) 前景深度画像と背景深度画像の差分により対象領域を抽出する
- (6) 分離境界面を用いて対象領域を直接像と鏡映像領域に分割する
- (7) 各鏡映像領域を鏡のパラメータを用いて鏡映変換する (式 (3))
- (8) 直接像と鏡映変換で復元された像を合成して全周囲 3 次元形状として出力する

5. 評価実験

5.1 実験環境

提案手法の有効性を検証するために、図 6 のような環境を用意して実験を行った。図 6 に示すようにカメラ正面に被写体として石膏像を使用し、その背後に 2 枚の鏡を配置した。石膏像の大きさは約 45cm、カメラからの距離は約 60cm とした。また鏡からカメラの距離は約 90cm とした。またカメラは PMD 社製の CamCube3.0 を使用した。このカメラの画像解像度は 200 × 200 ピクセル、奥行き分解能は 6mm、精度は約 5cm である。

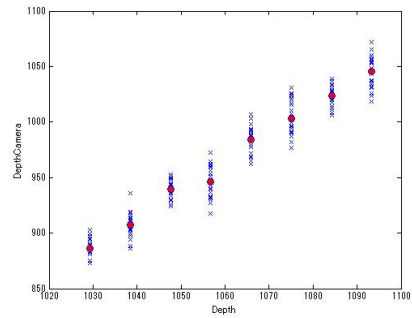


図 7 深度カメラの計測精度

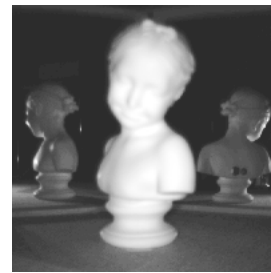


図 8 実験に使用したデータの輝度画像

5.2 深度カメラの計測精度

カメラの精度を確かめるためにカメラとチェスボードを動かさずに連続で 30 枚撮影し、チェスボードの格子点の深度を深度カメラと、キャリブレーションにより得られる回転行列 R 、並進行列 T (外部パラメータ) から計算し、ズレを確認した。その結果を図 7 に乗せる。縦軸は深度カメラで得られる距離、横軸は外部パラメータによって計算される距離である。縦軸の青い点が 30 枚の画像それぞれの距離、赤い点が 30 枚の平均距離である。平均距離はほぼ直線上にあることがわかる。また、縦軸と横軸を比べることで深度カメラで得られる距離と外部パラメータから得られる距離に差があることが分かる。今回この差をカメラと鏡の距離から引くことで修正をおこなって実験した。

5.3 鏡 2 枚使用したときの形状復元

5.3.1 実験結果

本論文で述べたアルゴリズムに従って、実験を行った。鏡のキャリブレーションは、鏡面にチェスボードを配置する方法と両面チェスボードを使用する方法の 2 つで行った。実際に復元に使用するデータはカメラ視点から見ると鏡と対象は輝度画像により、図 8 のように撮影していることが分かる。

まず得られる距離画像から鏡の反射を考慮せずに距離計算し、3 次元空間にプロットした様子が図 9、図 10 である。鏡対象が鏡の奥にあるように計算されていることが分かる。

次に直接像領域かつ対象領域に対応する画素の検出を行

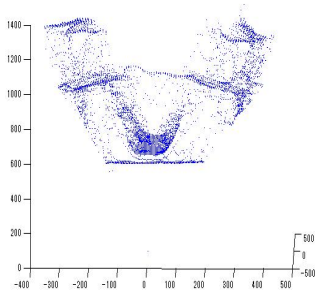


図9 距離画像 (俯瞰図)

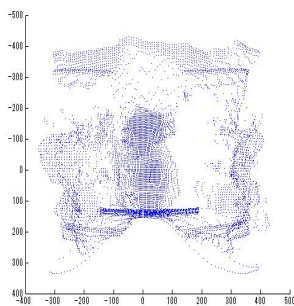


図10 距離画像 (正面図)

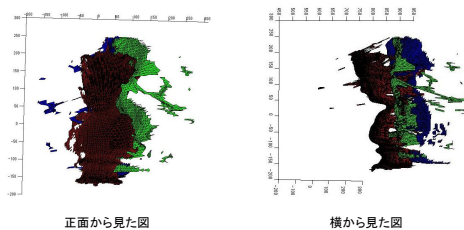


図11 鏡面にチェスボードを配置

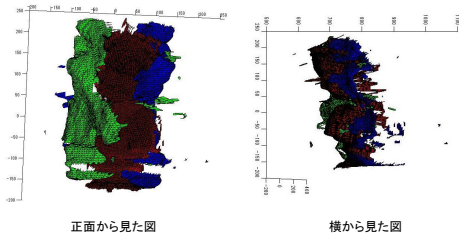


図12 両面チェスボードを使用

い、その画素の距離情報から計算し、3次元空間にプロットした。また、同時に鏡像領域かつ対象領域に対応する画素の検出を行い、その領域の距離情報から反射を考慮して計算し、3次元空間にプロットした。その結果が図11、図12である。赤色のプロットは直接像を表し、緑色の部分は右の鏡が反射したもの、青色の部分は左の鏡が反射したものである。上の図が鏡面にチェスボードを配置して鏡を

キャリブレーションしたもの、下の図が両面チェスボードを利用して鏡のキャリブレーションを行ったものである。この図では分かりやすいように点群をメッシュにして表している。

5.3.2 考察

図11、図12を見て分かるように鏡の面を介して計算された鏡の面内の点群と鏡の面を介さず鏡の面外の点群の位置は近い位置にプロットされている。このことよりおおまかな鏡の面の位置、姿勢、反射計算は合っているのではないかと考えられる。今回の結果から見ると鏡面にチェスボードを配置した結果のほうが良いように思われる。しかし鏡面にチェスボードを配置して鏡のキャリブレーションを行うことはチェスボードの厚み、チェスボードと鏡の隙間などが生じるため望ましくない。両面チェスボードを用いてより正確な鏡のキャリブレーションを行うのが望ましい。参照点を増やすなどして制約を増やすことで、より正確なキャリブレーションを行うことが出来ると考えられる。

また実験結果にはノイズがプロットされている。これは鏡面の薄いガラスの膜による屈折などが考えられる。鏡の面を介したときの深度カメラの精度などを調べる必要がある。

また本実験で用いた Matlab による実装での処理時間は約1分であったが、本質的には ToF カメラによる撮影の後は3次元幾何計算のみであるので、実時間処理が可能であると考えられる。

6. まとめと今後の課題

本論文では1台の深度カメラを用いた全周囲3次元形状計測を実現するために、複合鏡を使用したアルゴリズムを提案した。また実際の ToF カメラを用いた実験では、最小構成となる2枚の鏡による1回反射像と、直接像を組み合わせることで、全周囲3次元形状計測が可能であることを実証した。

本研究の今後の課題は以下のとおりである。

- まず第一に鏡の位置、姿勢の正確な獲得が考えられる。これに関して、両面チェスボードを用いた方法の改善を行う。また、鏡の位置、姿勢は関連研究 [6] によって本研究より正確に得られている。この論文を参考に発展させて複数の鏡に対して位置を計測できるようにしていきたい。
- 次に、ノイズの原因と考えられる鏡の薄いガラス膜での屈折のモデル化、もしくは薄いガラス膜のない鏡(表面反射鏡、スパッタリングミラー)の使用などさまざまな対策を行っていきたい。
- また今回の実験では2枚の鏡を使用した。鏡の最適な枚数と位置については検討していない。カメラの画素のうち、対象を写していない画素を無効画素と呼ぶとすると、鏡の枚数、配置を工夫し、また多重反射像



図 13 鏡 3 枚使用したときの反射の様子

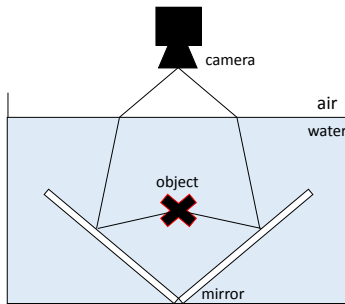


図 14 水中物体の計測モデル

を活用することでこのような無効画素を削減し、深度カメラの能力を最大限利用することができると考えられる。しかし鏡の面を増やすことで計測の難易度も増す。鏡の枚数を増やすと、お互いの鏡で反射が繰り返され、得られる反射像はどこで何回反射したのかを考える必要がある。そのためにはより正確な鏡の位置の獲得が必要となる。それが出来ていない場合鏡に像が届くまでに反射された回数が多いと、実際の対象の位置とのズレが大きくなる。現在、次の段階として、図 13 のような三角錐型の 3 枚の鏡を用いて実験を行うことを予定している。図 13 から見て分かるようにどの像が対象のどの位置に対応しているのかを検討する必要があり、本研究より難易度が増すと考えられる。

また今後の方針としては、カラーカメラの併用や、水中微小物体の撮影などが挙げられる。カラーカメラも同時に使用することで、対象表面形状に加えて表面テクスチャも獲得できれば、3次元形状計測法としての応用範囲がより広くなると考えられる。また今回の被写体は空気中に存在したが、水中の物体を撮影することができるようになれば、水中生物、受精卵などの 3次元形状計測などが可能となる [2,4,7]。例えば図 14 のように水面上にカメラを配置し、水中に鏡と計測対象を沈めたとしたときにどのように 3次元形状を計測するのかを考えると、水中と空気中の境界では屈折が生じるために難易度が増す。この屈折を考えるにあたって、どのようにモデル化するか検討していきたいと思う。

参考文献

- [1] Keith Forbes, Fred Nicolls, Gerhard De Jager, and Anthon Voigt. Shape-from-silhouette with two mirrors and an uncalibrated camera. In *In Proceedings of the 9th European Conference on Computer Vision (ECCV)*, 2006.
- [2] James Gregson, Michael Krimerman, Matthias B. Hullin, and Wolfgang Heidrich. Stochastic tomography and its applications in 3d imaging of mixing fluids. pp. 52:1–52:10, 2012.
- [3] Katsushi Ikeuchi, Takeshi Oishi, Jun Takamatsu, Ryusuke Sagawa, Atsushi Nakazawa, Ryo Kurazume, Ko Nishino, Mawo Kamakura, and Yasuhide Okamoto. The great buddha project: Digitally archiving, restoring, and analyzing cultural heritage objects. Vol. 75, pp. 189–208, 2007.
- [4] 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 *In Proc. of ICCV 2013 Underwater Vision Workshop*, December 2013.
- [5] Takashi Matsuyama, Shohei Nobuhara, Takeshi Takai, and Tony Tung. *3D Video and Its Applications*. Springer Publishing Company, Incorporated, 2012.
- [6] K. Takahashi, S. Nobuhara, and T. Matsuyama. A new mirror-based extrinsic camera calibration using an orthogonality constraint. *2013 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, Vol. 0, pp. 1051–1058, 2012.
- [7] Yano Tomohiko, Nobuhara Shohei, and Matsuyama Takashi. 3d shape from silhouettes in water for online novel-view synthesis. *IPSI Transactions on Computer Vision and Applications (CVA)*, Vol. 5, pp. 65–69, jul 2013.
- [8] Zhengyou Zhang. A flexible new technique for camera calibration. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, Vol. 22, No. 11, pp. 1330–1334, 2000.