プロジェクタ・カメラシステムの キャリブレーションに関する研究

見市 伸裕, 和田 俊和, 松山 隆司 京都大学大学院情報学研究科知能情報学専攻

概要 プロジェクタの画像を観測者に歪みなく見せるためには、投影する画像を適切に補正しな ければならない. この補正を行うためにカメラを用いる場合、プロジェクタの投影する画像とカ メラの撮影する画像に関する画素毎の対応づけを求める必要があり、この対応づけを行うため に空間コーディングが一般的に用いられている. しかし、平面のスクリーンに対して空間コー ディングを行う実験をした結果、通常の実験環境で一般的に生じ得る画像のぼけによって、空間 コーディングの結果に誤差が含まれることを発見した. 本稿では、画像のぼけによる誤差の大き さとその分布について考察する.

Calibration of Projector-Camera System

Nobuhiro MIICHI and Toshikazu WADA and Takashi MATSUYAMA

Department of Intelligence Science and Technology, Graduate School of Infomatics, Kyoto University

abstract To show a picture projected by a projector without distortion, it is necessary to correct the picture appropriately. When a camera is used to correct the picture, the picture projected and the picture captured have to be correlated pixel by pixel. Spacecoding is used generally to correlate them. But, when spacecoding for a flat screen we found out that the result includes errors because of being out of focus that can exist in usual experimental situation. In this report, we consider value and distribution of the error.

1 序論

プロジェクタは、3次元空間中の物体表面に画像 を投影するデバイスである.このデバイスを用いれ ば、現実世界に仮想的な物体を映し出すことができ る.たとえば、実際にはそこに存在しない3次元的 な物体の形状を、画像の投影されている部分に映し 出すことが考えられる.このようなことを実現する には、プロジェクタの投影する画像が、画像を提供 する側が希望する形状で観測者に観測される必要が ある.そのためには、観測者の視点や投影する物体 表面の形状に応じて投影する画像を補正しなければ ならない.

投影する画像の補正を行うために、観測者の位置 にカメラを置くことを考える.このような状況で上 記のような補正を行うためには、プロジェクタに入 力する画像とカメラから得られる画像の画素毎の対 応関係を知る必要がある. 今, プロジェクタとその投影する画像を観測する カメラの組を, プロジェクタ・カメラシステムと呼ぶ ことにする. プロジェクタ・カメラシステムの両画 像間の対応関係を求める手法として, 空間コーディ ング [4] が挙げられる. 空間コーディングは画素の 対応づけを高速に数多く求めることができる優れた 手法として, レンジファインダなどで一般的に用い られている [3]. 観測者の位置にカメラを置いた場 合にも, 空間コーディングを用いて画素を対応づけ することが妥当であると思われる.

しかし、プロジェクタによる投影には被写界深度 の違いやレンズの集光能力の限界によるぼけが含 まれるので、空間コーディングの結果には画像のぼ けによる誤差が含まれる。例えばプロジェクタの画 像をスクリーンに対して斜めから投影した場合、画 像の場所によって投影される距離が異なるため、ス クリーン上の画像の全域に渡ってピントが合うこと はあり得ない。またピントを最大限合わせた状態で



図 1: 空間コーディング

も、特に対象までの距離が遠い場合にはレンズの集 光能力が十分でないためにぼけが生じ得る.カメラ に関しても全く同じ理由で、撮影した画像にぼけが 現れる.

プロジェクタ・カメラシステムではこれらの原因 によって、必ず画像にぼけが生じる. ぼけによる誤 差の大きさは、カメラの撮影した画像上で数画素程 度である、カメラを観測者の視点とみなしたプロ ジェクタ・カメラシステムでは投影対象からの距離 が数 m 以上である状況が一般的であり, 数画素に 相当する領域はスクリーン上で数 cm の大きさにな る. この場合のプロジェクタ・カメラシステムは観 測者に画像を見せることを目的とするので、この数 画素の誤差を無視することはできない.特に投影対 象が平面でない場合には、見せるべき画像の一部が 数画素のずれによって観測者の死角に入ることが考 えられるため、ぼけによる誤差は重大な意味を持つ. 本稿では、スクリーンが平面である場合のプロジェ クタ・カメラシステムについて空間コーディングを 行いホモグラフィーを計算し、空間コーディングの 結果とホモグラフィーの対応づけを比較することに よって、画像のぼけによる誤差の分布を調査し原因 を考察する.

2 空間コーディング

プロジェクタの投影する画像を補正するために、 プロジェクタとカメラの画素間の対応関係を求めた い. プロジェクタの各画素を1点ずつ光らせ、それを カメラで撮影する方法をとれば、確実に全画素間の 対応関係を求めることができる.しかし、この方法 では画素の数だけ撮影が必要となる.空間コーディ ングは、以下の作業によってより少ない回数でカメ ラの全画素に対する対応関係を求める手法である.

プロジェクタの画像の縦軸を v 軸, 横軸を u 軸と する.まず,図1のようにプロジェクタの各画素に ついてその u 座標値の範囲で入力画像をいくつか の領域に分割し,それぞれの領域に白,黒を割り当 てる.領域を区切る u 座標値の範囲を変化させて入 力画像のパターンを変え,投影された画像を順時カ メラで撮影する.それらの撮影画像の任意の画素に 対し画像毎の輝度値の変化を観測することで,対応 するプロジェクタの画素の u 座標を復元する.同様 の作業を v 座標についても行う.

この手法を用いれば、たとえば解像度 1024 × 768 のプロジェクタに対し、縦横 10 枚ずつの入力画像か ら全ての画素に対して対応関係を求めることができ る.以下ではコーディングに用いる白黒の入力画像 を「コーディング画像」と呼び、コーディング画像 から座標を復元する作業を「デコード」、プロジェ クタとカメラの画素同士の対応関係を「対応点デー タ」と呼ぶ.

このように少ない撮影回数で全ての対応点データ を求めることができる空間コーディングであるが、 その結果がどの程度信頼できるものかを評価した い.そこで平面に対して空間コーディングを行い、 その結果得られる対応点データとホモグラフィーに よる対応づけを比較することによって、その信頼度 の評価を行う.次節ではホモグラフィーについて述 べる.

3 ホモグラフィーによる検証

ステレオカメラで平面を観測する時,ホモグラ フィーによってそれぞれの画像の画素同士を対応づ けることができる.プロジェクタ・カメラシステム で平面のスクリーンに画像を投影する場合にも,ス テレオカメラと同様ホモグラフィーによって画素を 対応づけられる.



図 2: ステレオカメラの対応点データ (m1, m2)

ここでは, ステレオカメラ, プロジェクタ・カメ ラシステムのホモグラフィーとホモグラフィーの具 体的な計算法について述べる.

3.1 ステレオカメラのホモグラフィー

ステレオカメラの2台のカメラをそれぞれカメラ 1,カメラ2とする.それぞれのカメラにはピンホー ルカメラモデルを適用するものとする.

図 2 のように空間中の同一の点を観測した時、そ の点がカメラ 1 の画像上で座標 m₁、カメラ 2 の画 像上で 座標 m₂ で表されたとする.3 次元空間中の 同一平面上で、かつ両方のカメラの視野内にあるよ うな全ての点について、m₁,m₂の同次座標 m₁,m₂ が

$$\lambda \tilde{\mathbf{m}_1} = \mathbf{H} \tilde{\mathbf{m}_2} \tag{1}$$

を満たすような H が存在する. ここで, H は 3×3 行列, λ は m_1, m_2 によって決まる定数である. こ の行列 H をホモグラフィーという. H の自由度は 4 であり, 同一平面上の 4 個以上の m_1, m_2 の組か ら計算できる.

ホモグラフィー H は,2 台のカメラ間の回転・並 進を表す回転行列 R 及び並進ベクトル T を用いて

$$\mathbf{H} = \mathbf{A}_1 [\mathbf{R} + \mathbf{T}\mathbf{n}^{\top}] \mathbf{A}_2^{-1}$$
(2)

のように表現することができる. ここで n^{\top} は m_1 または m_2 によって決まるベクトルである. また, A_1, A_2 は, それぞれのカメラについて

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} k_u & s & u_0 \\ 0 & k_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$
(3)

の形で表現される行列である. ここで k_u, k_v, s はそ れぞれ 1 画素のu方向の大きさの逆数, 1 画素のv 方向の大きさの逆数, スキューであり, *u*₀, *v*₀ は光軸 と画像面の交点の座標である.

カメラにピンホールカメラモデルが適用できる場合には、 A_1, A_2 が既知であれば、これらの行列で補正した座標系において $\mathbf{R} \ge \mathbf{T}($ および $\mathbf{n}^{\top})$ のみからなる \mathbf{H} を求めることができる.

さて、実際にステレオ視で対象を観測する場合に は、それぞれのカメラにピンホールカメラモデルを 適用できるように、レンズによる幾何光学的な歪み を補正しなければならない.

レンズの幾何光学的歪みのうちで最も典型的なものにラディアルディストーションがある. ラディア ルディストーションはレンズの光軸を中心とする. 光線の不均一な屈折によって生じる歪みである. こ の歪みはほとんどの場合レンズの光軸に対し等方に 現れるケースを想定し. 画像面上の二次元的な歪み として扱われる. ラディアルディストーションは本 来ピンホールカメラでは座標 (*x*, *y*) に投影されるべ き点が座標 (*x*_d, *y*_d) に移動するとして

$$\begin{aligned} x_d &= x + \kappa_1 (x - x_{dc})^2 + \kappa_2 (x - x_{dc})^4 + \cdots (4) \\ y_d &= y + \kappa_1 (y - y_{dc})^2 + \kappa_2 (y - y_{dc})^4 + \cdots (5) \end{aligned}$$

のようにモデル化される. ただし (x_{dc}, y_{dc}) は歪み中 心の座標である. このモデル式中の $\kappa_i (i = 1, 2, \cdots)$ を i 次のレンズ歪み係数と言う. このレンズ歪み係 数を求めることにより. 点対称なラディアルディス トーションを補正できる.

光軸に対する撮像面の傾きが小さい時, ラディア ルディストーションはほぼ点対称となる.従って, そのような2台のカメラについて, $\kappa_i(i = 1, 2, \cdots)$ によって補正した座標系で,1つの平面に対して4 組以上の対応点データを得ることができれば, ホモ グラフィーを求めることができる.

3.2 プロジェク・カメラシステムのホモ グラフィー

プロジェクタは,投影モデルとしてはカメラと同様に考えることができる.したがって投影モデルを 考える時,プロジェクタ・カメラシステムは内部パ ラメータの異なる2台のカメラとみなすことができ る.ここではプロジェクタ・カメラシステムのホモ グラフィーを通常のステレオカメラと同様に求める 方法について述べる. ホモグラフィーを求める際に注意すべきステレオ カメラとプロジェクタ・カメラシステムの相違点と して, 左右のデバイスの内部パラメータの差が挙げ られる.

ステレオカメラの場合は、左右のカメラにどちら も同じ型のカメラを用いるのが一般的であり、本来 ホモグラフィーは左右のカメラの内部パラメータの 投影中心と撮像面の距離や解像度、それらの基準と なる画素の大きさがほぼ等しいような場合について の写像である.これに対し、プロジェクタ・カメラ システムでは左右のデバイスが異なるので、それら のパラメータが大きく異なることに注意しなければ ならない.

以下に内部パラメータのそれぞれ異なるステレオ カメラのホモグラフィーを定義する座標系とホモグ ラフィーの計算法について述べる.

3.3 ホモグラフィーの求め方

以下では,カメラは内部パラメータについてキャ リプレーションされているものとする.

2 台のカメラをカメラ 1, カメラ 2 とする. ワー ルド座標系で (X, Y, Z) と表される点は 3 × 4 行列 P'_1 を用いて, 次のようにカメラ 1 のカメラ座標系 (x_1, y_1, z_1) に変換できる.

$$\alpha_1 \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{P'_1} \\ \mathbf{P'_1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix}$$
(6)

ただし α_1 はワールド座標系におけるカメラ 1 の 1 画素の大きさである.

点 (x_1, y_1, z_1) を,平面 $Z = f_1$ 上に原点を中心に 中心投影した結果,点 (u_1, v_1, f_1) に写ったとする. ただし, f_1 はカメラ 1 の焦点距離である.その時,次の式が成り立つ.

$$\begin{pmatrix} u_1 \\ v_1 \\ f_1 \end{pmatrix} = \frac{f_1}{z_1} \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{pmatrix}$$
(7)

今, ワールド座標系で平面 Z = 0 上の点について 考える. この時式 (6),(7) より

$$\begin{pmatrix} u_1 \\ v_1 \\ f_1 \end{pmatrix} = \frac{f_1}{z_1 \alpha_1} \begin{pmatrix} \mathbf{P_1} \\ \mathbf{P_1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{pmatrix}$$
(8)

が成り立つ. ただし, P_1 は P_1' の第 3 列目の成分 を除いた 3 × 3 行列である. カメラ 2 についてカメ ラ 1 と同様に $\alpha_2, z_2, f_2, u_2, v_2$ を定義すると, カメ ラ 2 についても式 (8) と同様の式が成り立つので 2 台のカメラに関する式 (8) をまとめると次のように なる.

$$\frac{f_2 z_1 \alpha_1}{f_1 z_2 \alpha_2} \begin{pmatrix} u_1 \\ v_1 \\ f_1 \end{pmatrix} = \mathbf{P}_1 \mathbf{P}_2^{-1} \begin{pmatrix} u_2 \\ v_2 \\ f_2 \end{pmatrix}$$
(9)

この場合, 左辺の f, z, α からなる係数が式 (1) の λ に相当する. 従ってそれぞれのカメラの画像座標, 焦点距離から計算できるホモグラフィー H は,

$$\mathbf{H} = \mathbf{P}_1 \mathbf{P}_2^{-1} \tag{10}$$

であり, 焦点距離や画素の大きさがほぼ等しい通常 のステレオカメラのホモグラフィーと同様に表現で きることがわかる.

しかし、ホモグラフィーはもともと平面上の点を 一台のカメラが視点を変えて観測した時の画像座標 を対応づける変換である.そのため、焦点距離の大 きく異なる2つのカメラの間のホモグラフィーを計 算する手法はあまり一般的ではない.そこで焦点距 離の等しいステレオカメラと同様にホモグラフィー を計算するために、画像座標をそれぞれ焦点距離で 正規化する.この時、式(9)は

$$\frac{z_1 \alpha_1}{z_2 \alpha_2} \begin{pmatrix} u_1/f_1 \\ v_1/f_1 \\ 1 \end{pmatrix} = \mathbf{P}_1 \mathbf{P}_2^{-1} \begin{pmatrix} u_2/f_2 \\ v_2/f_2 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (11)$$

のようになり、この座標系を用いれば両カメラとも 焦点距離を1と考えることによって、焦点距離の等 しいステレオカメラと同じようにホモグラフィーを 計算できる.

3.4 ホモグラフィーの計算

同一平面上の点に関する対応点データは取り終え たものとして、それらのデータからホモグラフィー を計算する方法を簡単に説明する.





図 4: カメラ画像誤差の大きいデータの分布

TLP771

図 3: カメラ画像誤差の大きさの分布

得られた対応点データが全部で4組である場合 は式(6)についてその4組の座標値をそれぞれ代入 し、連立方程式を解くことで行列Hを計算する.

本研究のように 5 組以上の対応点データからホ モグラフィーを計算する場合には,式(1)において $\sum_{k=1}^{N} ||\lambda \mathbf{m_1} - \mathbf{Hm_2}||^2$ を最も小さくする最小 2 乗 法を用いて計算する.ただし,ここで N はカメラ画 像上でプロジェクタの出力画像が占める領域内に含 まれるカメラの画素の数である.従って対応点デー タの数が多ければ多いほど,正確に画像面同士を関 係づけるホモグラフィーを計算できる¹.

4 実験

使用器具及びそのセッティング

空間コーディングの結果をホモグラフィーによっ て検証する実験を行った.実感に用いた器具は以下 の通りである.

カメラ SONY DFW VL500

 プロジェクタ 東芝
 LCD
 DATA
 PROJECTOR

 1詳しい計算については [2] を参照

上記のカメラの画像の解像度は 640 × 480, プロ ジェクタの画像の解像度は 1024 × 768 である. スク リーンは通常の OHP 用のものを用いた. スクリー ンを平面と仮定し, プロジェクタの出力する画像の 全領域がスクリーン上に映し出されるようプロジェ クタとスクリーンを設置した. その後, スクリーン 上のプロジェクタの画像領域が視野内に全て含まれ るようにカメラを設置した. このような状況でカメ ラとプロジェクタのズームとフォーカスを調整し, 固定した後にそれぞれの内部パラメータ (レンズ歪 みも含む)をキャリブレーションし, 空間コーディ ングを行い, その結果を用いてホモグラフィーを計 算した.

プロジェクタの内部パラメータは Z. Zhang の方 法 [1] によって求めた. また, カメラに関しては文 献 [5] の方法でキャリブレーションを行った². 空間 コーディングでは, 縦横軸の座標値に二進コードを 割り当てるような入力画像を使用した.

計算結果の評価

空間コーディングの結果が正確であるならば、その結果とそれから計算できるホモグラフィーによる対応づけが完全に一致するはずである. 空間コーディングの精度は、その結果がホモグラフィーによ

²[5] を参照



図 5: プロジェクタ画像誤差の分布

る対応づけといかによく一致するか、で評価できる. 今回の実験ではカメラの全ての画素に対して対応点 データをとったので、計算で求めたホモグラフィー によるカメラ座標値の変換が、その計算の基となっ た対応点データとどの程度一致するかによって計算 結果を評価できる.そのために、対応点データ中の プロジェクタ座標(*u*,*v*)をホモグラフィー H でカ メラ座標(*x'*,*y'*)に変換する.対応点データ中で プ ロジェクタ座標(*u*,*v*)に対応するカメラ座標(*x*,*y*) に対する(*x'*,*y'*)のずれを「カメラ画像誤差」と定 義し、このカメラ画像誤差を用いて計算結果を評価 する.

全対応点データについてカメラ画像誤差を求め, 誤差ベクトルの平均とその大きさの平均を計算し た.その結果,誤差ベクトル $(x'-x,y'-y)^{\top}$ の平均 は pixel 単位で (-0.009692,-0.003822) であった.ま た,誤差ベクトルの大きさの平均は7.05pixel であっ た.カメラ画像上の座標値と誤差ベクトルの大きさ の関係を調べたところ,図3,図4のような分布が 得られた.この図によると,平均値に比べはるかに 大きい誤差ベクトルをもつデータが複数存在する.

このような誤差の起こる原因について、次節で考察する.

4.1 誤差の分布に対する考察

デコードミス

空間コーディングではコーディングをした後デ コードを行うが、コーディングの段階で図4にある ような大きな誤差が生じることは実験環境の安定性 から考えてあり得ない. もし空間コーディングの過 程で誤差が生じているとするならば、それはデコー 図 6: プロジェクタ画像誤差の大きいデータの分布

ドミスによるものである.

デコードミスとは輝度値の判定ミスである. この判定ミスは、ホモグラフィーの計算過程において プロジェクタ画像上でのずれとなって現れる. 対応 点データ毎にプロジェクタ画像上のずれの大きさを 評価するために、前章で求めたホモグラフィーが理 想値であると仮定する. このホモグラフィーが理 れてカメラ座標(x,y)を変換したプロジェクタ座標 を(u',v')とする. (x,y)の対応点データ(u,v)の (u',v')に対するずれをプロジェクタ画像誤差と定 義する. この誤差は、デコードミスが上位のコーディ ング画像で起こるほど大きくなる.

各対応点データについてプロジェクタ画像誤差を 計算し、プロジェクタ画像上の位置とその誤差ベク トルの関係を図5に、その中で特に誤差の値の大き いデータの分布を図6に示した.この図より、コー ディング画像の境界線付近で誤差が特に大きく、上 位ビットの境界線付近ほど誤差が大きくなっている ことが確認できる.この結果から、コーディング画 像の縞の境界線付近でデコードミスが起きていると 推測できる.

グレイコードによる再実験

縞の境界線付近で生じるデコードミスに対し頑健 なコーディングパターンとして、グレイコードが挙 げられる. グレイコードでは、隣り合う数とのハミ ング距離が常に1に保たれる. 従って縞の境界で起 きたデコードミスは、プロジェクタの1画素分のず れとしてしか影響しない. また図7からわかるよう に、通常の二進コードでは同じ部分に何度も縞の境 界が現れるが、グレイコードではあるビットの画像 で一度境界の現れた部分に他のビットの画像で再び



図 7: グレイコードと二進コードの比較

境界が現れることはない. つまりデコードミスによるビットの反転は,各画素について *u*, *v* 方向にそれ ぞれ最大でも1ビットしか起こり得ない.

これらのことから,理論的にはグレイコードのデ コード結果にプロジェクタ画像誤差が2画素を越 えるようなデータは含まれない.空間解像度はプロ ジェクタの方がカメラよりも高いので,カメラ画像 誤差は最大でも1画素であると期待できる.

実際にグレイコードを用いて対応づけを行い,そ の結果からホモグラフィーを計算したところ,その カメラ画像誤差は最大でも5画素以下であった.グ レイコードによるコーディングによってカメラ画像 誤差が大幅に小さくなったことから,縞の境界付近 でデコードミスが起きていることが確認できた.し かし一方でグレイコードでは生じないはずの,プロ ジェクタ画像誤差が2画素を越えるような対応づ けが多数存在した.その中で特に誤差の値の大きな データの分布は図8のようになった.

このような誤差の原因として、スクリーンが完全 な平面でないことや各デバイスの内部パラメータの 測定誤差である.しかしそれらのような原因によっ て図8のように格子上の領域に誤差をもつデータが 分布することは考えにくい.この格子は、その方向 がコーディング画像の縞の境界と一致する.この分 布の原因がデコードミスであるとすると、図8の格 子上の領域では複数ビットでデコードミスが生じて いると考えられる.

そこであるコーディング画像について縞の境界を



図 8: プロジェクタ画像誤差が5 画素を越える点の 分布

撮影した部分を拡大して見た所, 図9のようになった.カメラの画素のうち, 縞の境界が通過する画素 の付近の画素についても輝度値に影響が出ているこ とがわかる.このことは撮影した画像がぼけている ことを意味する.このぼけのために,下位ビットに 対応する縞の細かいコーディング画像のデコードに ミスが生じ, 縞の境界とぼけの両方のデコードミス によって複数のビットが反転するような画素が存在 すると考えられる.

プロジェクタ、カメラのピント調整を十分行って 撮影したにも関わらず、このような画像のぼけが撮 影画像の全域に渡って存在した.このぼけの原因は、 画素毎にプロジェクタやカメラからの距離が異なる ことであると思われる.その他の原因として、カメ ラのピントをできる限り合わせた状態であってもレ ンズの集光の性能が十分でないために撮影画像にぼ けが生じることも考えられる.これらを原因とする ぼけは通常の実験環境では一般的に起きる.

実験の結果、プロジェクタ・カメラシステムの画 素の対応づけに空間コーディングを持ちいた場合に は、上記のような原因で一般的に起きる画像のぼけ によって、誤差が含まれるを確認した.

5 結論

平面のスクリーンに対し、空間コーディングを用 いてプロジェクタ・カメラシステムの両方の画像の 対応関係を求めたところ、その結果には大きな誤差 を含む対応点データが含まれていることがわかった.



図 9: 境界線上の画素の拡大図

また,その誤差の原因がコーディング画像の縞の境 界線上で生じるデコードミスであることもわかった.

この誤差に対する解決法としてコーディングパ ターンにグレイコードを用いたところ、デコードミ スによる誤差の影響は小さくなったが、それでも誤 差の大きさが予想を越えるようなデータが多数存 在した.その誤差は、撮影した画像のぼけによるデ コードミスによるものと思われる.

カメラを観測者の位置に置いたプロジェクタ・カ メラシステムは投影対象が平面でない場合にも応 用できるべきであるが、その場合には画像のぼけに よる影響が大きい.なぜなら、その場合にはホモグ ラフィーのような写像で画素同士を対応づけること はできないため、ぼけによるデコードミスの影響が 投影する画像に直接現れるからである。今後の課題 は、ぼけによるデコードミスに対する解決法を提案 し、提供すべき画像をより精度の高い状態で観測者 に見せることである.

なお,本研究は科学研究費補助金特定領域研究 13224051の補助を受けて行った.

参考文献

[1] Z. Zhang. A Flexible New Technique for Camera Calibration. http://research.microsoft.com/zhang/Calib/.

- [2] 金谷健一. 画像理解 3 次元認識の数理. 森北出 版, 1990.
- [3] 服部数幸,佐藤幸男.レーザーパターンシフト による高精度空間コード化法.画像の認識・理 解シンポジウム (MIRU'96), 1996.
- [4] 井口征士, 佐藤宏介. 三次元画像計測. 昭晃堂, 1990.
- [5] 物部祐亮. 視点固定型パン・チルト・ズームカ メラを用いた実時間対象検出・追跡. Master's thesis, 京都大学, 1997.