

プロジェクターカメラシステムの基礎と校正方法

岡谷 貴之

Fundamentals of Projector-Camera Systems and Their Calibration Methods

Takayuki OKATANI

To make the images projected by projector(s) appear as desired, it is effective and sometimes an only choice to capture the projected images using a camera and control the images of the projectors by analyzing the captured images. To perform this, it is necessary to be able to calibrate the system consisting of projectors and camera(s), called the projector-camera system. A projector is similar to a camera geometrically as well as photometrically. Thus, methods of multi-view, projective geometry developed in the field of computer vision, which were originally targeted at cameras, can be utilized for projector-camera systems. This paper explains how to do this, in an unified and exhaustive manner, by categorizing problems in terms of purposes of the system, surface shapes of the projection target etc.

Key words: projector-camera, calibration, multi-view geometry

プロジェクターを用いて物体の表面に映像を投影するとき、望んだ通りに像が見えるようにするにはどうすればよいただろうか。像がその形、濃淡（明るさ）、色の3つの要素について望むものとなるようにするには、プロジェクターに入力する画像を適切に制御する必要がある。単純な用途であれば、投影像を見ながら手動でこれらの各要素について、画像を調整することで目的は果たせるだろう。しかしある程度複雑なことをしようとするれば、カメラを使ってプロジェクターの投影像を撮影し、その撮影像を使ってプロジェクターの画像を制御する必要が生じる。

本稿では、そのようなことを考える上で必要になる知識をまとめた。具体的には、プロジェクターによって物体表面上にどのように像が生成されるかを記述する投影像生成過程のモデル（1章）、プロジェクターとカメラを組み合わせた「プロジェクターカメラ系」の多視点幾何学（2章）ならびにそれに基づくさまざまなキャリブレーション方法（3章）、そしてそこで必要となるプロジェクターとカメラの画像間対応の求め方（4章）である。

著者はこれまで、コンピュータービジョンの研究を行ってきた。カメラを使う三次元復元の問題をおもな対象に、アルゴリズムや数値計算法、それらが拠って立つ統計的な

推定理論を開発する傍らで、プロジェクターを用いた応用研究を行った。例えば、画像を1枚撮影するだけで、複数プロジェクターからの投影像をシームレスにつなぎ合わせて1枚の高解像度画像を生成できるような校正の方法（図1（a））、複数プロジェクターの投影像を重ねて投影像の解像度を向上させる超解像（図1（b））、手持ちのプロジェクターによる投影像を固定ビデオカメラで撮影し、投影像を安定化（動き補償）しながらシステムを校正する方法（図1（c））、プロジェクターとカメラを使った形状計測で、システムの校正を自動的に行う方法、ならびに、その計測結果を元に立体形状に像を投影し、表面の材質が変わったように見せる方法（図1（d））などである。

本稿は、著者がこれらの研究を元に、プロジェクターカメラ系の校正（キャリブレーション）手法を統一的に論じたものである。カメラの校正手法を俯瞰する解説は多数あるが、プロジェクターを対象とする同様のものは、著者の知る限りこれまでなかった。プロジェクターとカメラは幾何学的には相似であり、カメラを対象に構築された多視点・射影幾何学に関する膨大な研究成果¹⁾の多くが、プロジェクターを含むシステムにも適用できる。とはいえ、撮影と投影では像生成の向きが逆であり、それらの理論を

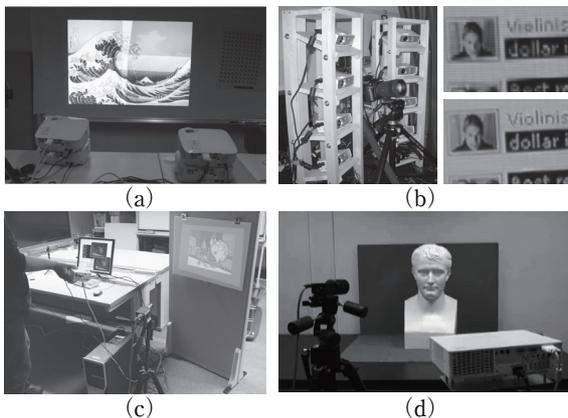


図1 プロジェクター応用システム事例.

実際の運用に結びつける上で、その差異は重要である。また、多視点・射影幾何学は時に難解な数学を伴い、プロジェクターの応用システム開発に携わる実務家には敷居が高いかもしい。本稿がその敷居を少しでも低くし、これらの研究成果が現場でもっと利用されるようになる一助となれば幸いである。

1. 投影による像生成のモデル

1.1 幾何学的モデル

プロジェクターの画像の1点が、空間のどの点に投影されるかを記述することを考える。そのために、座標系を図2のように定義する。3種類の座標系、すなわち世界座標系 $O-XYZ$ 、プロジェクター座標系 $O'-X'Y'Z'$ 、および画像座標系 $o-xy$ を考える。世界座標系は、シーンに固定された三次元(ユークリッド)座標系であり、プロジェクター座標系は同図のように、プロジェクターに固定され、プロジェクターと一緒に動く三次元座標系である。画像座標系は画像面上に決めた二次元座標系である。このプロジェクター座標系は、プロジェクターのレンズの光軸、およびそれと一般に直交するように作られている画像面に沿って、各軸を選ぶこととする。すなわち、 Z' 軸を光軸に一致するように、 X' 、 Y' 各軸を、画像座標 x, y に平行になるようにとる。その画像座標は、 x, y 軸がプロジェクターの入力画像と自然に対応するようにとるのが便利である。つまり、座標原点が画像の左上隅にあり、 x, y 軸が、画像の水平、垂直方向にそれぞれにあたるようにする。また、画像座標の単位は画素とする。すなわち、プロジェクターの入力画像が XGA サイズなら、画像の左上隅が $(x, y) = (0, 0)$ 、右下隅が $(1024, 768)$ となる。

以上の座標系を使うと、プロジェクターの画像面の点 (x, y) が、シーンの点 (X, Y, Z) に投影されるとき、両者の関係は次のように記述される。

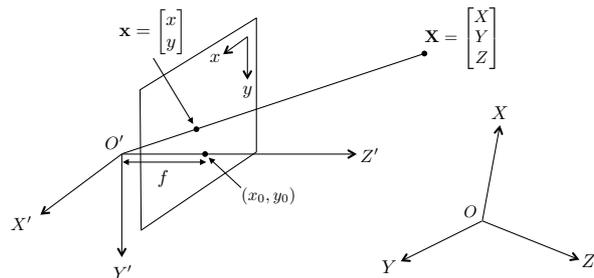


図2 投影の幾何学モデルを表現する3つの座標系.

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \propto \mathbf{K}[\mathbf{R}|\mathbf{t}] \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

ここで、 \propto は両辺のベクトルの向きが等しいことを示す等号である。(右辺の計算結果を $[\tilde{X}, \tilde{Y}, \tilde{Z}]$ と書くと、上の式は $x = \tilde{X}/\tilde{Z}$ および $y = \tilde{Y}/\tilde{Z}$ と等価である。) \mathbf{K} は 3×3 行列で、 \mathbf{R} は三次元空間の回転を表す 3×3 行列、 \mathbf{t} は3成分のベクトルである。 $[\mathbf{R}|\mathbf{t}]$ の表記は、この2つを左から順に並べて 3×4 行列を作ることを表す。

\mathbf{K} は具体的には次のような形

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} f & sf & x_0 \\ 0 & \alpha f & y_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

をとり、 f は焦点距離、 s はスキュー、 α はアスペクト比、 (x_0, y_0) は画像中心とよばれ、これらはまとめてプロジェクターの内部パラメーター(の行列)とよばれる。 f は焦点距離と通称されるが、レンズのスペックとしての焦点距離ではなく、投影中心(レンズの光学中心)と画像面間の距離であることに注意する。(つまり、ズームはもちろん焦点調節によっても変化し得る。) s は通常は0としてよく、 α はプロジェクターの画素の縦横比を表す(画素が正方形なら $\alpha = 1$)。 (x_0, y_0) は、図2のように、回転対称なレンズの光軸が画像面のどの位置を貫くかを表す。

これらパラメーターは、画像中心 (x_0, y_0) を除き、カメラと同様に考えてよい。カメラのレンズでは通常、 (x_0, y_0) は画像のちょうど中央付近に来るように設計されている。一方プロジェクター、特に通常の映像プロジェクターでは、机の上に設置した状態で、上方にあるスクリーンめがけて像を投影する使い方を前提とする。これにあわせて y_0 は、画像の下方に位置する(x_0 は中央にある)。このことは、プロジェクターの内部パラメーター校正時に知っておく必要がある。

像投影に関わるこの他に重要なものとして、レンズのひずみがある。理想的なカメラのレンズは、空間の直線が画

像上でも直線として結像するようなものであるが、現実のレンズはそうならず、像のひずみ(歪曲)を生む。プロジェクターでもこれは同じで、一般的な回転対称な光学系をもつ光学系の場合、カメラで使われるのと同じひずみモデルが用いられている。具体的な式は誌面都合で割愛するが、文献¹⁾やOpenCVのドキュメント^{*1}などを参照されたい。近年、極端な短焦点を実現するプロジェクターが一般的になっており、それらは回転非対称な光学系を使用するものが多く、上とは異なったひずみのモデル化が必要だろう(今のところ一般的な方法論は存在しない)。

1.2 測光学的モデル

次に、投影像各点の明るさ(濃淡値)がどのように決まるかを記述する測光学的(photometric)モデルを考える。カメラにおける像生成のモデルは文献²⁾などに詳しい。プロジェクターの場合、画像面から光が放出され、物体表面上に像を結ぶので、この向きに像生成のモデルを構成する。

図3のような系を考え、プロジェクターのある画素の輝度値を I_p とし、これに対応する物体表面の点の面素の放射照度 $[W/m^2]$ を E_o とすると、両者の関係を求めることを考える。カメラのレンズ同様プロジェクターでも、コサイン四乗則³⁾に代表される周辺光量の低下を補正するような設計が通常なされているはずである。つまり、プロジェクターと正対するスクリーン上に像を投影する理想的な場合を考えると、この場合のスクリーンの面素の放射照度 E_o は、入力画像の輝度値に比例し、すなわち

$$E_o \propto g(I_p) \quad (3)$$

となる。ただし関数 $g(\)$ は、画像の輝度値 I_p を物理的な光量に変換する非線形関数で、いわゆるガンマ補正等を含んだものである。この関係式を議論の出発点にする。

図3のような投影対象が曲面となる一般の場合を考えると、曲面上の面素の放射照度 E_o は

$$E_o \propto g(I_p) \frac{\cos \alpha}{r^2 \cos \theta} \quad (4)$$

となる。ここで α は、プロジェクターのレンズと面素を結ぶ線と、面素の向きのなす角である。式がその余弦を含むのは、レンズ方向から見るとこの面素の面積が小さく見える分、受け取る光量が小さくなる効果による。 θ はレンズと面素を結ぶ線とプロジェクターの光軸のなす角である。分母の余弦によって、投影対象が理想的な正対する平面のとき、 $\alpha = \theta$ となって分母分子の余弦がキャンセルし合う。 r はプロジェクターから面素までの光軸にそって測った距

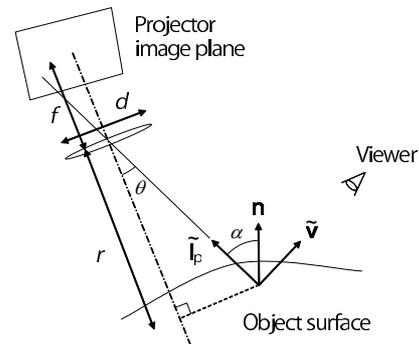


図3 プロジェクターの画素の輝度値と物体表面の対応点(微小面素)の照度の関係に寄与する各変数。

離で、明るさは距離の二乗に反比例することに対応する。

プロジェクターから E_o の光を受け取ったこの面素は、さまざまな方向に光を反射する。方向による反射強度は、この物体表面の材質等が決める反射特性によって最終的に決まる。最も単純なランバート面(あらゆる方向に等しく光を拡散する)の場合、どの方向からみても面素の明るさは E_o に比例した一定値となる。より一般的には、この反射特性はBRDF(双方向性反射率分布関数)によって表現される。BRDFは、一般に、入射方向 \tilde{l}_p と放射方向 \tilde{v} の(4変数)関数として記述される。この2つのベクトルは、この面素上にとった局所座標系で表す。BRDFを $f_o(\tilde{l}_p, \tilde{v})$ と書くと、この面素が \tilde{v} 方向へ放射する放射輝度 L_o は

$$L_o \propto f_o(\tilde{l}_p, \tilde{v}) E_o \quad (5)$$

と書ける。

式(4)と式(5)を組み合わせると、プロジェクターの画素の明るさ I_p と、特定方向 \tilde{v} から見たその投影像の明るさの関係が導ける。これを逆に使えば、望みの方向から望みの明るさをもつような像を投影するのに、どのように I_p を決めればよいかわかることになる。実際の応用では、対象物表面のBRDFを得るのはそれほど簡単ではないので、投影面をランバート面で近似するか、あるいは後述のようにカメラを用いてプロジェクターの投影像を制御することになるだろう。

2. プロジェクターカメラ系の幾何学

プロジェクターからの投影像が望みの性質をもつようにするために、これをカメラで撮影し、その画像から必要な情報を得てプロジェクターへの入力画像を制御することが行われる。本章では、このような「プロジェクターカメラ系」の幾何学を考える。プロジェクターへの入力画像とその投影像をカメラで撮影した画像との間の関係を、図4の

*1 <http://doc.opencv.org>

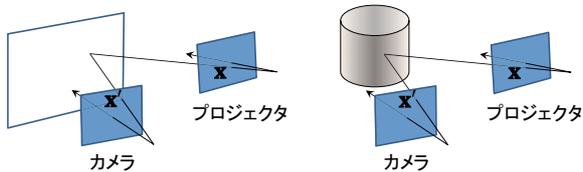


図4 プロジェクターの画像とカメラの画像間の関係。投影対象物の形状が平面であるか(左), 立体であるか(右)によってそのモデルが変わる。

ように, 投影の対象となる物体表面が平面なのか, 立体なのかによって分けて考える。

2.1 投影面が平面の場合

プロジェクターの画像の1点 $[x, y]$ と, その投影像の空間座標 $[X, Y, Z]$ の関係を記述した式(1)において, 今世界座標系 $O\text{-}XYZ$ を投影面上にとったとする。具体的には, XY 平面が投影面(平面)上にあつて, したがつて座標原点 O も投影面上, Z 軸が投影面と垂直であるような座標系である。このように座標をとると, 投影面上の点は常に $Z=0$ であり, 投影像の各点の空間座標は $[X, Y, 0]$ で表せる。このように恒等的に $Z=0$ であるから, 式(1)は

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \propto \mathbf{K}[\mathbf{r}_1 \ \mathbf{r}_2 \ \mathbf{t}] \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix} \propto \mathbf{H} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

と書き直せる。ここで $\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2$ は, 回転行列 \mathbf{R} の第1, 第2列ベクトルであり, $\mathbf{H} \equiv \mathbf{K}[\mathbf{r}_1 \ \mathbf{r}_2 \ \mathbf{t}]$ である。このように表せる変換は, 一般に(二次元)射影変換(あるいはホモグラフィ)とよばれる。

平面とその画像の関係はカメラでも全く同じように記述される。したがつてこの投影面を撮影するカメラについて, 平面座標 $[X, Y]$ とそのカメラ画像の座標 $[x', y']$ は, 上と同様に $[x', y', 1]^T \propto \mathbf{H}'[X, Y, 1]$ のように関係付けられる。この $[X, Y, 1]$ に式(6)を代入すると,

$$\mathbf{x}' \propto \mathbf{H}'\mathbf{H}^{-1}\mathbf{x} \quad (7)$$

となる。ただし $\mathbf{x}' = [x', y', 1]$, $\mathbf{x} = [x, y, 1]$ である。つまり, プロジェクター画像の1点と, その平面投影像を撮影したカメラ画像の点は, 2つの射影変換を合成した $\mathbf{H}'\mathbf{H}^{-1}$ で表すことができ, この合成変換も二次元射影変換となる。

なお, 一般に二次元射影変換 $\mathbf{x}' \propto \mathbf{H}\mathbf{x}$ は, $(\mathbf{x}, \mathbf{x}')$ のペアが4組以上 ($\{(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}'_i) \mid i=1, \dots\}$) 与えられれば計算できる。(コンピュータービジョンのライブラリである OpenCV では `findHomography` という関数がこれを計算する。)

2.2 投影面が立体形状の場合

次に投影面が立体形状の場合に, プロジェクターの画像の点 \mathbf{x} とそのカメラ画像の像 \mathbf{x}' の関係を考える。詳細は多視点幾何の教科書¹⁾などに譲るが, 両者の関係は, 基礎

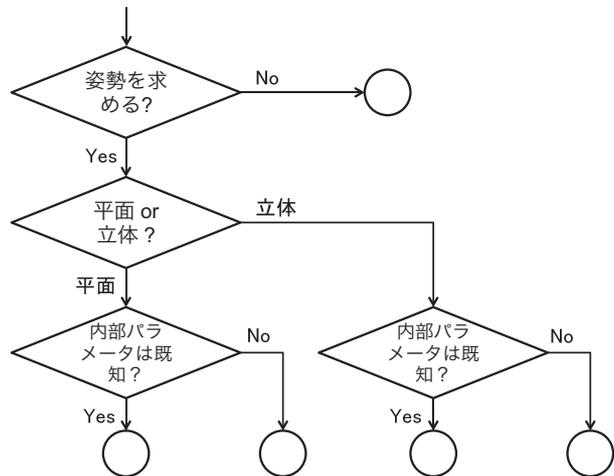


図5 プロジェクターカメラ系の校正方法を分類するフローチャート。

行列とよばれる 3×3 行列 \mathbf{F} によって,

$$\mathbf{x}'^T \mathbf{F} \mathbf{x} = 0 \quad (8)$$

のように記述される。 \mathbf{F} は, プロジェクターとカメラの内部行列をそれぞれ \mathbf{K}, \mathbf{K}' とし,

$$\mathbf{F} = \mathbf{K}'^{-T} \mathbf{E} \mathbf{K}^{-1} \quad (9)$$

と与えられる。 \mathbf{E} は基本行列とよばれ, $\mathbf{E} \equiv [\mathbf{t}]_{\times} \mathbf{R} ([\mathbf{t}]_{\times})^T$ は, \mathbf{t} の成分を成分とする 3×3 のひずみ対称行列で, 左からベクトルを掛けると外積を与える, つまり $[\mathbf{t}]_{\times} \mathbf{a} = \mathbf{t} \times \mathbf{a}$ となるようなもの)のように定義される。 \mathbf{R}, \mathbf{t} は, プロジェクター座標系とカメラ座標系(プロジェクター同様にカメラの光学系に合わせてとった座標系)間の座標変換 $\mathbf{X} = \mathbf{R}\mathbf{x} + \mathbf{t}$ を表す回転行列および並進ベクトルである。

なお基礎行列 \mathbf{F} は, $(\mathbf{x}', \mathbf{x})$ のペアが7組以上あれば計算できる(ただし8組以上あるとより単純な計算方法が使え, その分計算結果も安定する)。OpenCVでは `findFundamentalMat` という関数を使う。基本行列 \mathbf{E} は5組以上あれば計算できる。

3. プロジェクターカメラ系の校正

プロジェクターカメラ系の校正方法は, 図5に示すように類型化される。類型にかかる要素は3つあり, 1つはプロジェクターから像を投影する物体表面の形状(平面か立体か), 1つはプロジェクターの姿勢(外部パラメーター)を陽に推定するかしないか, 最後の1つは, プロジェクターの内部パラメーターが既知であるかどうかである。以下, 各場合を順に述べる。

3.1 特定視点に対する映像補正

最初の場合は, 投影像を特定視点から見たとき, それが望ましい性質をもつようにしたい場合である。これは, その位置にカメラを設置可能なことを前提とする。典型例と

しては、図6 (b) のようにドーム型のスクリーンに複数のプロジェクターから像を分割して投影し、映像がシームレスにつながることに同時に、幾何学的なひずみを補正したい場合がある。定めた位置（例えば映像を見る人の頭部があるはずの場所）にカメラを設置し、撮影像がひずみなく理想的に見えるように、各プロジェクターに入力する画像を幾何学的に（また測光学的に）調整すればよい。この場合には、プロジェクターの内部・外部パラメーターを知る必要がない。

幾何学的な調整は、プロジェクターへの入力画像と、その投影像をカメラで撮影して得られる画像間の対応、すなわち前者の点 (x, y) と後者の点 (u, v) の対応 $u = u(x, y)$, $v = v(x, y)$ を知ることで可能となる。これには、4章で述べる方法のどれかを使えばよい。 $(u(x, y), v(x, y))$ の表現には、画像を格子状にサンプルした点群についてこの対応を表として保持し、間の点は適当な補間を行う（バイリニアやバイキュービックなど）ノンパラメトリックなものを使えば、どんな形状の投影面も扱える。

3.2 姿勢を求める場合

いくつかのプロジェクター応用では、プロジェクターの姿勢、つまり外部パラメーター \mathbf{R}, \mathbf{t} を知りたい場合がある。また、応用上陽に知る必要はないが、結果的に計算しなければならぬ場合もある。このように、プロジェクターの外部パラメーターを陽に推定する場合を考える。

3.2.1 投影面が平面の場合

2.1節で述べたように、投影面が平面の場合、プロジェクターと投影像、投影像とそれをカメラで撮影した画像の間はそれぞれ、二次元の射影変換でモデル化される。投影像とカメラの画像面間の射影変換を \mathbf{H}_c 、投影像とプロジェクターの画像面間の射影変換を \mathbf{H}_p と表すと、プロジェクターの画像からカメラの画像への変換は $\mathbf{H}_{pc} \propto \mathbf{H}_c \mathbf{H}_p^{-1}$ のようになる。簡単のため $\mathbf{H}_{cp} = \mathbf{H}_{pc}^{-1}$ を考えると

$$\mathbf{H}_{cp} \propto \mathbf{H}_p \mathbf{H}_c^{-1} \quad (10)$$

と書ける。

大抵の応用で、 \mathbf{H}_p を知ることが目標となる。これを知れば、投影面上の位置 $[X, Y]$ に対応するプロジェクターの映像の点 $[x, y]$ を、 $[x, y, 1] \propto \mathbf{H}_p [X, Y, 1]^T$ のように計算できるからである。いま、プロジェクターに入力する画像と、その投影像を撮影したカメラの画像が手元にあるので、4章の方法で両画像間の対応を求めることで、 \mathbf{H}_{cp} を計算することができる。これから \mathbf{H}_p を求めたい。

投影面上に位置がわかっているマーカーがあれば、 \mathbf{H}_c を簡単に知ることが可能である。マーカーを含む投影面の画像を、例えば事前にそのカメラで撮影しておき、マ-

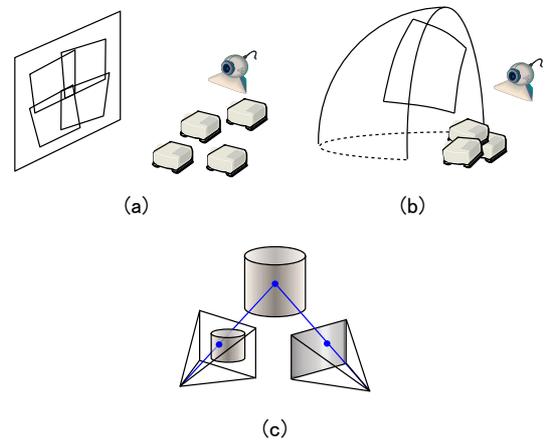


図6 プロジェクターカメラ系のいくつかの構成。

カーの平面上の座標 $[X, Y]$ とその画像間 $[x_c, y_c]$ の対応の組が4つ以上あれば、2.1節に述べた方法で \mathbf{H}_c を決定できる。これを使ってただちに $\mathbf{H}_p \propto \mathbf{H}_{cp} \mathbf{H}_c$ のように \mathbf{H}_p を計算できる。

事前に \mathbf{H}_c を知ることができなくても、図6 (a) のようにプロジェクターの姿勢が複数あって、どのプロジェクターも像を同一平面上に投影しているときは、同じ目標を達成できる場合がある。具体的には、静止プロジェクターが複数台ある場合⁴⁾ や、手持ちの小型プロジェクターが空間を動きながら像投影を行う場合⁵⁾ である。どちらも1台の固定されたカメラがそれら投影像を撮影できるとする。結果のみを要約すると、このとき、使用しているプロジェクターの内部パラメーターが完全に既知である場合、プロジェクターの姿勢が2以上あれば \mathbf{H}_c を決定できる⁶⁾。内部パラメーター5個のうち1つだけ未知の場合には、4視点以上プロジェクターの視点があれば \mathbf{H}_c を決定できる⁴⁾。

3.2.2 投影面が立体形状の場合

投影面が立体形状をもつ場合、プロジェクターの画像と投影像を撮影したカメラの画像間で、十分な数の点対応を求めることができれば、プロジェクターの姿勢を求めることが可能となる。この場合に解くべき問題は、幾何学的には、2台のカメラからなるステレオカメラを使った三次元復元と等価である（図6 (c)）。

この場合も、プロジェクター（とカメラ）の内部パラメーターが既知かどうかで問題の難易度が変わる。プロジェクターとカメラの内部パラメーター \mathbf{K} および \mathbf{K}' が既知の場合、2.2節に述べたとおり、画像間の対応点 $\mathbf{x} \leftrightarrow \mathbf{x}'$ は、未知の基本行列 \mathbf{E} によって $(\mathbf{K}'\mathbf{x}')^T \mathbf{E} (\mathbf{K}\mathbf{x}) = 0$ と関係付けられる。複数の点対応から $\mathbf{E} = [\mathbf{t}]_x \mathbf{R}$ を求め、これを分解すれば、プロジェクターとカメラ間の相対姿勢を表す \mathbf{R}, \mathbf{t} を求められる。なおこの分解は4通り可能で、そのう

ち1つが真の解となるが、その選び方等の詳細は文献¹⁾に譲る。

プロジェクターとカメラの内部パラメーターがともに完全に未知の場合、画像間対応のみからは基礎行列 \mathbf{F} しか求めることができず、上のようなことはできない。ただし、内部パラメーターのいくつかが既知の場合には、その限りでない。例えばプロジェクターとカメラのともに焦点距離以外がすべて既知の場合、 \mathbf{F} を分解し、それぞれの焦点距離と、プロジェクターとカメラ間の相対姿勢を表す \mathbf{R}, \mathbf{t} をすべて求めることができる¹⁾。また、平面の場合同様にプロジェクターの姿勢が複数ある場合には、未知パラメーターの数が多くても問題が解ける場合がある。いくつ姿勢があればどれだけの内部パラメーターを未知数として推定できるかなどの解析は文献¹⁾にある。ただしこのような自己校正は、一般に計算が不安定になる傾向があるので、カメラの場合は焦点距離、プロジェクターの場合は焦点距離プラス画像中心の y 座標程度を未知数に選ぶ（それ以外は事前の校正で決めておく）のが現実的な選択といえる。

3.3 内部パラメーターの推定

上述のようにいくつかの場合に、プロジェクターの内部パラメーター \mathbf{K} を知る必要がある。そのことを（狭義の）校正とよぶ。それにもやはりカメラを使う方法が最も万能である。カメラのキャリブレーションでは、寸法が正確にわかっているチャートを印刷した平面を使う方法が最も一般的である。そこでは、このチャートを最低3枚以上の方向からカメラで撮影する⁷⁾。

これと同じ方法をプロジェクターにも用いるのがひとつの方法である。プロジェクターの入力画像上の複数の点について、それらの平面上の像点の位置を正確に知ることができれば、全く同様に内部パラメーターを計算できる。このためには、少なくとも四隅にマーカーを印刷した白い板を使い、これにプロジェクターから何らかのパターンを投影し、その状態を、内部パラメーターを校正済みのカメラで撮影すればよい。四隅のマーカーの画像上の位置を使って、この板から画像への二次元射影変換 \mathbf{H}_c を求められる。次に、プロジェクターの入力画像の各点が、カメラの画像のどこに写っているかを4章の方法で調べる。その画像の位置を \mathbf{H}_c^{-1} によって、板上の座標（マーカーの位置によって決まる）に変換すれば、プロジェクターの入力画像の点と、板状のその投影像の点の組が得られる。平面の姿勢を3回以上変化させつつ、以上を繰り返せば、上述のカメラを対象とした校正方法⁷⁾ が適用できる。

なお、これはカメラにもいえるが、実用的には、内部パラメーターのうち本当に校正で求めるべきは焦点距離 f と

画像中心 (x_0, y_0) である場合が多い。アスペクト比はデバイスのカタログ値から決められるし、スキューは0としてしまつて構わない。なお画像中心は、プロジェクターが通常備えるズーム機能を使うと、簡単な方法で求められる。それは、プロジェクターから平面スクリーンにパターンを投影しておいて、ズームを変化させたときのパターンの拡大縮小の中心を求める方法である。

4. 画像間対応の取得方法

上述のほとんどのキャリブレーション方法で、プロジェクターとカメラ間の画像間対応が必要である。これをどのように求めるかについて述べる。システムの構成および目的に応じて、やり方が変わる。特に、プロジェクターから複数の像を投影し、それぞれ（ビデオ）カメラで撮影できる場合と、1枚しか投影・撮影を行えない場合とに大別できる。

4.1 複数の画像を取得できる場合

プロジェクターとカメラが空間に固定されていて、ある程度時間をかけて複数の画像を投影・撮影できる場合を考える。このとき、プロジェクターから構造化されたパターンを何種類か対象に投影する方法が使える。

最も簡単なのは、プロジェクターの視点から空間を分割し、分割された空間を符号化する空間コード化法である。バイナリー（二値＝白黒）の縞模様のパターンで、画像を粗→細の順に分割したものを投影する。このような n 枚のパターンを用いることで、空間を 2^n 通りに分割する。カメラの画像側では、その各画素について、 n 枚のパターンを撮影した画像の濃淡が白黒どのように変化するかをみる。これにより、画素がプロジェクターの画像上のどの縞一本に対応するかがわかる。2方向の縞模様、すなわち x 方向と y 方向にそれぞれ n パターン用いることで、カメラ画像とプロジェクター画像の点対応を求める。この判定の安定性を高めるため、グレイコードによる投影パターンを用い、またポジ、ネガパターンを投影するなど行う。

空間コード化法は、よくても画素オーダーの精度での対応付けしかできない。実際には、空間コード判別の安定性を優先すると、数画素単位の精度しか達成できないと思われる。ずっと高い精度（サブピクセルオーダー）を達成できる方法に位相シフト法があり、あらゆる方法の中で画像間対応を最も高精度に求める方法であるといえる。

位相シフト法では、プロジェクターから正弦波状の濃淡パターンを、その位相を何通りか変えて投影し、それぞれをカメラで撮影する。画像上の各点で、複数の画像間の濃淡変化をみれば、最初の撮影画像における正弦波の位相

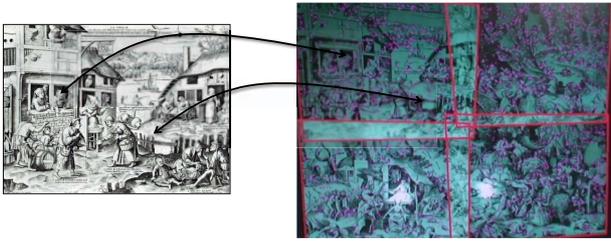


図7 局所特徴を用いた画像間対応付け.

(初期位相とよぶ) が同定できる. 画像のすべての点についてこれを実行すると, 各点での初期位相 = プロジェクターの画像面上での (1 枚目の) 正弦波パターンにおける位置がわかる. 空間コード化法と同様に, x 方向の正弦波パターンと, y 方向の正弦波パターンを使うことで, プロジェクターと画像間の点対応を求められる. ただし, この方法では正弦波の周期内の位相がわかるだけで, グローバルにどの周期なのかは特定できない (位相接続の問題) ので, 上述の空間コード化法と組み合わせるのがよい.

4.2 画像を 1 枚しか取得できない場合

例えばプロジェクターの投影像を手持ちのカメラで撮影する場合, あるいはカメラは固定でもプロジェクターが手持ちの場合など, おもにプロジェクターカメラ間の姿勢が時間的に変化する場合, プロジェクターカメラ間の対応関係をたった 1 枚の画像の投影・撮影で済ませる必要がある.

このような場合, Q コードや AR マーカーのように, 他と識別しやすいような局所パターンを並べて投影パターンを作ることが考えられる. ただし, 適度にランダムな濃淡パターンを用いれば, SIFT⁸⁾ に代表される汎用の局所特徴量を使うことで, 十分な精度で画像間対応を求めることができる. これはコンピュータービジョンでは定番の方法で, 具体的には OpenCV のチュートリアルページ^{*2} や教科書¹⁾ を参照されたい.

ここではその方法を簡潔に述べる. SIFT によって, まずプロジェクターとカメラの各画像上で大量の特徴点を抽出し, 次にこれらの両画像の特徴点間で, SIFT 特徴量の類似度に基づいて対応する点のペアを求める. このとき, 特徴量の類似度だけでは誤った対応が混入するので, プロジェクターとカメラの画像間の幾何学的な変換を制約条件に, RANSAC (RANdom SAmple Consensus) というランダムサンプリングに基づく方法を用いて正しい対応のみを取り出す. 制約となる画像間の幾何学的な変換は, 2 章で

述べたように投影面が平面か立体形状かに応じて決まる.

著者は, いくつかのプロジェクターカメラシステムのキャリブレーションに, ブリュエール (Brugel) の版画「7つの大罪」を画像化したものを用いることで, よい結果を得た. 画像を使い分けることで, 1 枚の画像に写る複数プロジェクターからの投影像を同時に対応付けることもできる (図7).

プロジェクターカメラ系の基礎と, 特に幾何学的な校正方法について述べた. 誌面の都合で省略したが, 校正を高精度化するために通常, 未知パラメータに関する最適化を校正の最終段階で行う. これには, 投影像の各点について, そのカメラの画像上の位置と, 未知パラメータの現在の推定値から予測される位置とのずれ (=再投影誤差とよぶ) を最小化する方法が一般的によく行われる. この方法はバンドル調整とよばれるきわめて一般的な方法であり, 詳細は文献⁹⁾ を参照されたい. このほか本稿で扱わなかったが重要なものに, 色の制御がある. 例えば色のついた物体表面に画像を投影したとき, どのように見えるか, また投影像が望みの色をもつように制御する方法, そもそも制御できるのかなどである. このあたりは文献¹⁰⁾ に詳しい.

文 献

- 1) R. Hartley and A. Zisserman: *Multi-View Geometry in Computer Vision* (Cambridge University Press, 2000).
- 2) B. K. P. Horn: *Robot Vision* (MIT Press, Cambridge, 1986).
- 3) 高野栄一: レンズデザインガイド (写真工業出版社, 1993)
- 4) T. Okatani and K. Deguchi: "Easy calibration of a multi-projector display system," *Int. J. Comput. Vision*, **85** (2009) 1-18.
- 5) D. Abe, T. Okatani and K. Deguchi: "Flexible online calibration for a mobile projector-camera system," *Proc. ACCV* (2010), *Lect. Notes Comput. Sci.*, **4695** (2011) 565-579.
- 6) T. Okatani and K. Deguchi: "Autocalibration of a projector-camera system," *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, **27** (2005) 1845-1855.
- 7) Z. Zhang: "A flexible new technique for camera calibration," *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, **22** (2000) 1330-1334.
- 8) David G. Lowe: "Distinctive image features from scale-invariant keypoints," *Int. J. Comput. Vision*, **60** (2003) 91-110.
- 9) 岡谷貴之: コンピュータビジョン最先端ガイド3, バンドルアジャストメント (アドコム・メディア, 2010).
- 10) M. Ashdown, T. Okabe, I. Sato and Y. Sato: "Robust content-dependent photometric projector compensation," *Proc. IEEE Int. Workshop on Projector-Camera Systems* (2006) pp. 60-67.

(2014年6月19日受理)

^{*2} <http://docs.opencv.org/doc/tutorials/tutorials.html> の "2D Features framework" の項目を参照されたい.