

第七章 デジタル画像による 2 次元計測

1. 写真によって計測するには
 - 写真に含まれる様々な歪み
 - 航空写真と地図の決定的な違い
2. カメラの幾何学
 - 内部標定
 - + 外部標定
 - 外部標定要素
 - 共線条件式
3. 地上基準点を用いた標定

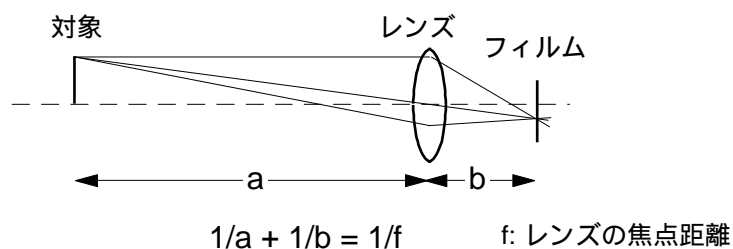
問題

1. 地図のコピーは通常のコピー機ではなく、青焼きと呼ばれる方法でコピーする。これは、地図と同じ大きさのフィルムに地図が描かれてあり、写される紙にこのフィルムを密着させてコピーをとる。出来上がったものは、線が青く印刷される。今でもこの青焼きによってコピーをとるのが普通である。なぜこのような方法でコピーするか考えよ。
2. デジタルカメラを用いて、長さを測る実験をなさい。

写真によって計測するには

1. レンズによる物体の投影

- 写真は忠実に物体をフィルム上に投影してくれる。したがって当然計測に写真は利用出来る。したがって、投影の原理を把握しておくことは極めて重要である。
- 水平面に対して垂直に立つ線分の長さを写真によって計測することを考えてみよう。まず写真撮影する時、線分とフィルム面が平行でなければ、実際よりも長く歪んでフィルムに投影されてしまう。また、レンズから対象までの距離が判らなければ、物体の長さを計算することは出来ない。線分の長さの算出法は下図の下に示した式を参考にすること。

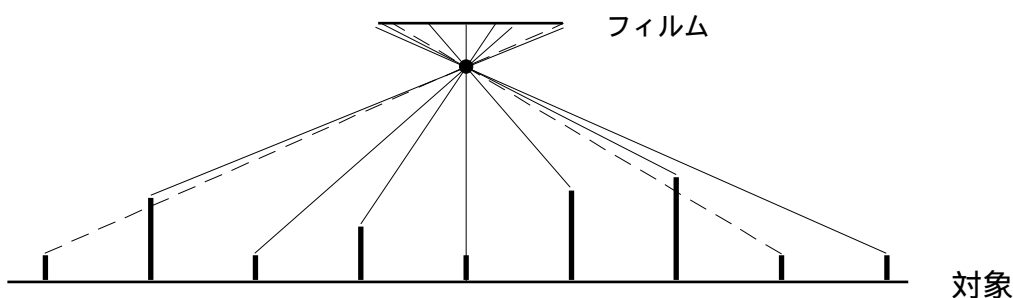


- + 線分とフィルムとが平行であったとしても、厳密には様々な歪みの発生が考えられる。精密に測るにはこれらの要素も考慮にいれなければならない。
 - レンズの歪み
 - フィルムの平面性
 - 大気による歪み

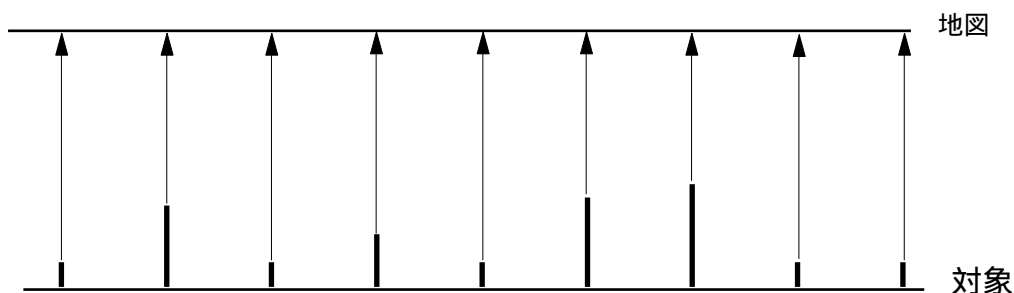
中心投影の幾何学

1. 写真と地図との決定的な違い

- 等間隔にならび様々な高さを持つ物体は、フィルム上にどう投影されるかを考えてみよう。



- 上図のように、レンズの焦点直下（投影中心）に位置する物体の位置は、物体の高さに関らず同じであるが、中心から物体が離れると、その距離と物体の高さに従って投影位置が大きくなっていく。これはレンズの幾何学によるもので、この投影を特に中心投影と呼んでいる。もちろん人間の目もレンズの一種であるから、見え方はフィルムと同じである。
- ところで、地図はどうであろうか。高いビルがあるからといって、位置がずれていることはない。地図は平行投影（正斜投影）で描かれているので、位置を忠実に表現出来るのである。



カメラで何が測れるのか？

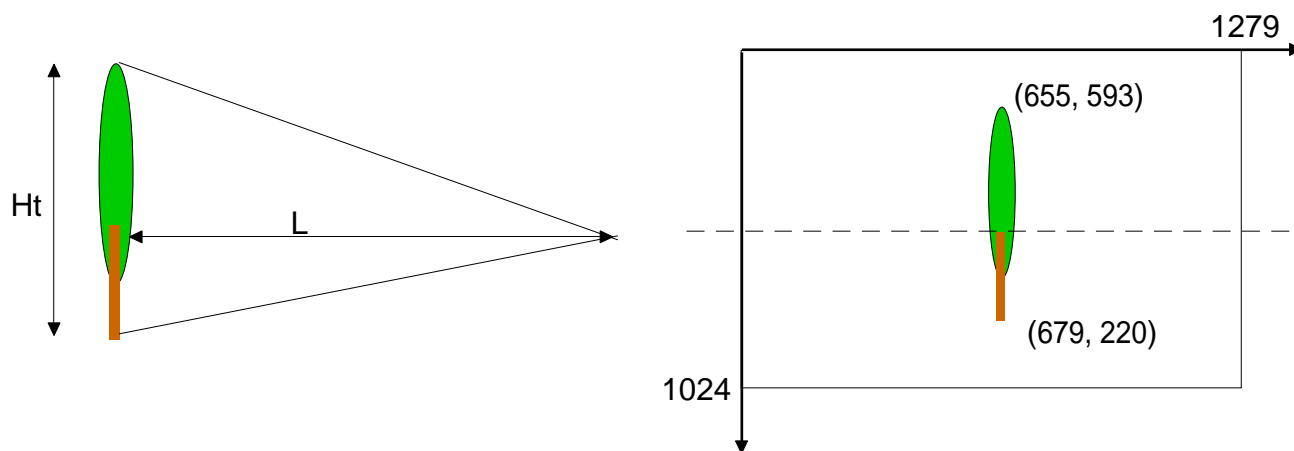
1. 角度（角距離）の計測

- 中心投影については，前章で述べたとおり．対象物・投影中心・画像として投影された位置は一直線に並ぶ．したがって画像における位置情報は，角度が表されているのである．
- 画像によって角度を求め，対象物までの距離が解れば，長さを求めることができるのである．
- 画像による角度の読み取り精度は，基本的には画像の解像度とレンズの焦点距離に依存する．

画像によって木の高さを測ってみよう

デジタルカメラによって木を撮影し，木の根元と一番上の座標を画像から読み取るとそれぞれ(655, 593) (679, 220)であった．1画素あたりの角度が 0.040968° であり，撮影地点から木までの距離が14.37mのとき，木の高さを求めなさい．

なお，デジタルカメラは水平方向を向いて撮影されており，画像の大きさは 1279×1024 画素で構成されている．



カメラの幾何学（内部標定）

1. 標定とは？

- 写真測量において写真の幾何学的な条件を再現することをいう。使用したカメラやフィルム（CCD）に関連した内部幾何構造の補正・キャリブレーションを内部標定といい，撮影した時のカメラの位置・姿勢を決定することを外部標定という。

2. 内部標定

- フィルム（CCD）における対象物の位置(u,v)を正確に求めることが必要である。したがって，フィルム（CCD）の大きさ，レンズの焦点距離(f)，投影中心の位置などを決定しなければならない。これらのパラメータを求めることを内部標定という。
- また，レンズの歪み・レンズとフィルムの位置関係（偏心等）・フィルムの平面性についても決定する。

3. 内部標定のための座標変換

- レンズ歪み・レンズとフィルムの位置関係については，あらかじめ計測可能である。例えば，方眼用紙を撮影することも可能である。
- ブラックボックス的に座標変換式を用いても補正できる。

内部歪みに伴う，画像の変形を考えてみよう

カメラの幾何学（外部標定）

1. 外部標定

+ 撮影した時のカメラの位置・姿勢を決定することが外部標定であるが、カメラの位置 (X_0, Y_0, Z_0) と姿勢 (α, β, γ) を特に外部標定要素という。ここで、カメラの位置というのは非常に曖昧な表現なので、ここからは、幾何学的な名称である投影中心位置という言葉を用いる。

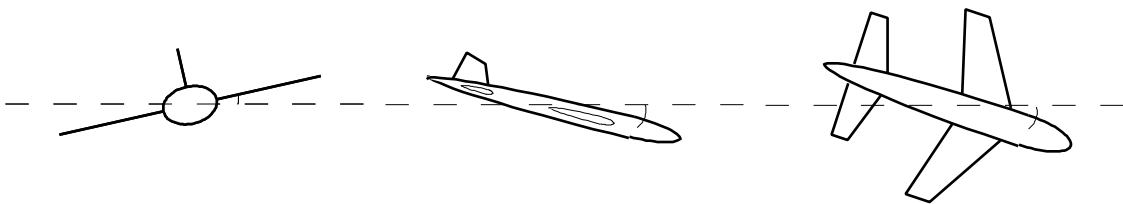
- 投影中心位置 (X_0, Y_0, Z_0) は、普通地上座標系で表す。

+ 姿勢 (α, β, γ)

： 進行方向の軸の回転角（ローリング）

： 進行方向に直角で水平な軸の回転角（ピッチング）

： 鉛直方向の軸の回転角（ヨーイング）



- 中心投影の位置と姿勢が決まれば、目的となる対象物の平面的な位置が決定出来る。この位置決定のためには、投影中心・フィルム上の位置・対象物は一直線上にあるという関係を用いる。これに基づくと共線条件式をたてることができる。

外部歪みに伴う、画像の変形を考えてみよう

カメラの幾何学（共線条件）

1. 共線条件

+ 下図は、投影中心・フィルム上の位置・対象物は一直線上にあるという関係を示したものである。各変数の意味を示す。

$O(X_0, Y_0, Z_0)$: 投影中心.....地上座標系

$P(X, Y, Z)$: 対象物の位置.....地上座標系

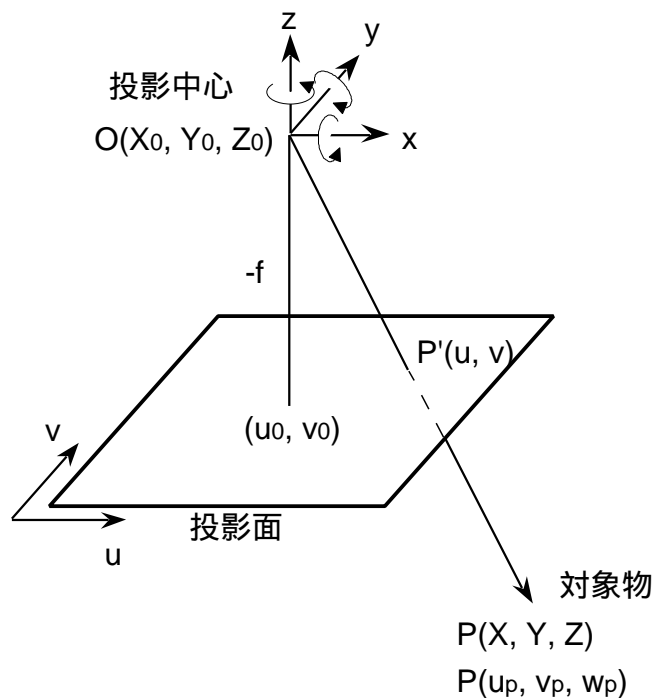
$P'(u, v)$: フィルム上の対象物位置.....投影中心座標系

f : 焦点距離

本来投影面は投影中心の上側に来るが、ここでは図を描く便宜上、下に投影面を描いた。従って f は負となる。

+ ここで問題となるのは、異なる座標系（地上座標系と投影中心座標系）が混在していることである。そこでまず、 P の位置をフィルム座標系で表してみる。

$P(u_p, v_p, w_p)$: 対象物位置.....投影中心座標系



カメラの幾何学（共線条件）

1. 共線条件の定式化

$P(u_p, v_p, w_p)$ は、回転の座標変換により次のように表すことができる。

$$\begin{bmatrix} u_p \\ v_p \\ w_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos & -\sin \\ 0 & \sin & \cos \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos & 0 & \sin \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin & 0 & \cos \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos & -\sin & 0 \\ \sin & \cos & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X-X_0 \\ Y-Y_0 \\ Z-Z_0 \end{bmatrix}$$

従って、共線条件式は以下のようなになる。

$$u = \frac{-f}{w_p} \quad u_p = -f \frac{a_{11}(X - X_0) + a_{12}(Y - Y_0) + a_{13}(Z - Z_0)}{a_{31}(X - X_0) + a_{32}(Y - Y_0) + a_{33}(Z - Z_0)}$$

$$v = \frac{-f}{w_p} \quad v_p = -f \frac{a_{21}(X - X_0) + a_{22}(Y - Y_0) + a_{23}(Z - Z_0)}{a_{31}(X - X_0) + a_{32}(Y - Y_0) + a_{33}(Z - Z_0)}$$

なお、 a_{ij} は、回転行列の要素である（下式参照）。

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos & -\sin \\ 0 & \sin & \cos \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos & 0 & \sin \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin & 0 & \cos \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos & -\sin & 0 \\ \sin & \cos & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

地上基準点を用いた標定

1. 地上基準点の必要性

- 最近では、GPSとジャイロを用いて外部標定要素をすばやく得ることが出来つつある。しかし通常、精密に外部標定要素を求めるには、地上基準点が必要である。つまり、地上座標が既知の点（対空標識などを用いることもある）を写真から拾いだし、外部標定要素を逆算する訳である。対象物の写真上の座標はコンパレータを用いて、地上座標は地形図を用いて取得する。精度の高い地上基準点は、たくさんあればあるだけ標定要素の誤差は小さくなる。

問題：ここで、標定計算のために必要な基準点の数を考えてみよう。

2. 逐次近似解による標定

- 地上基準点を用いた標定計算には、最小二乗法が適用できる。しかし、共線条件式は線形ではないので一筋縄で解くことはできない。非線形の連立方程式から解を求める場合には、解の近似値を与え、近似値のまわりにテーラー展開して線形化し、最少二乗法により補正量を求めて近似値を補正し、さらに同様の操作を繰り返して収束解を得る。

3. 標定後の図化

- 標定後は、地図を作る図化という作業が伴う。図化機によって撮影したフィルムを撮影条件(X_0, Y_0, Z_0, \dots)で再現し、撮影した時とは逆にフィルムの後ろから光りを当てて図面に投影する。投影されたものをトレースすれば、地図が出来上がるのである。ただし、山間部などの高さのあるものは正確な位置が投影されない。したがって山間部の対象物や等高線などは、ステレオ写真を利用しなければならない。これについては第8章において解説する。

地上基準点を用いたデジタル画像の幾何補正

1. 地上基準点の配置

- デジタル画像においても、精密に外部標定要素を求めるには、地上基準点が必要である。さて、地上基準点をどのように配置させるかが、精度に大きく影響する。下図は、地上基準点の配置と誤差との関係を図に表したものである。case1のように、画像上である部分に偏ることなく均等に配置させれば誤差が小さくなる。

2. 人工衛星画像の幾何補正

- 人工衛星の画像は、極めて高い位置（800km以上）からデータを取得する。人工衛星画像の空間分解能が低い（10～50m）ことも相まって、非常に険しい山岳地を除けば、外部標定のように複雑な計算でなく、通常の座標変換式（アフィン変換や多項式変換など）で補正可能である。ただし、非常に広範囲のデータを取得するセンサや、センサ自身が傾いてデータを取得するセンサ、空間分解能が1m未満の超高解像度衛星画像の場合は外部標定が必要である。

