

画像情報処理

カメラの幾何学

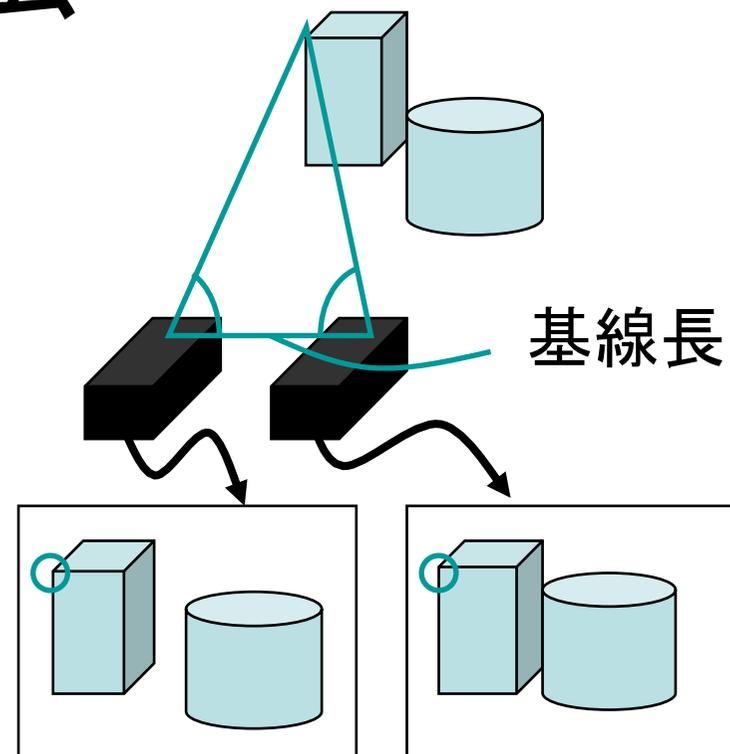
今回の内容

- カメラの幾何学
 - 3次元空間と2次元画像の関係
 - カメラの数式表現
 - カメラの各パラメータの推定（キャリブレーション）

ステレオ法

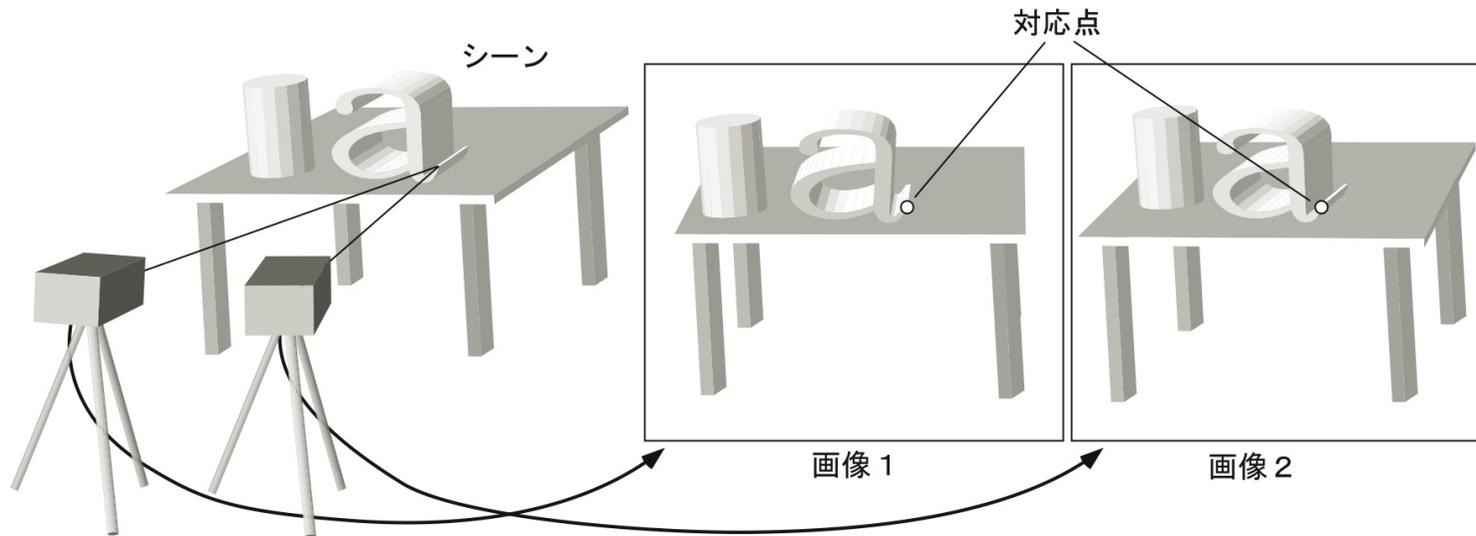
- ステレオ計測

- 二つ以上の視点を使用
(人間の両目に相当)
- 左右の画像の「ずれ」を利用
(三角測量法)
- 太陽光・室内照明などが
必要
- テクスチャのない平坦な部分の距離計測が困難
例: 真っ白な壁や滑らかで曲面的な物体
- 実質的な空間分解能が低い
- 対応点探索の計算量が大きい・安定度が低い



→ハードウェアによる高速化・多眼による安定化

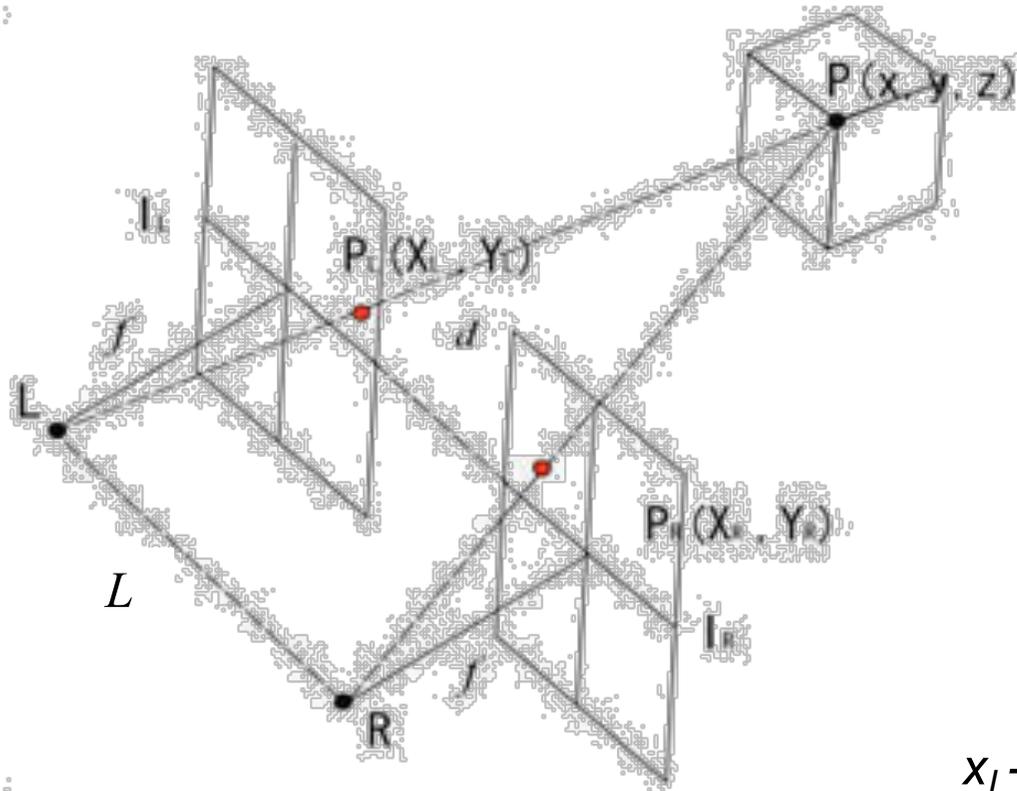
ステレオ法



- 左右の画像間で対応点を探す必要あり
 - 平坦な部分では形状計測不可
 - 対応点探索の計算量が大きい

ステレオマッチング

左右画像の特徴点位置から以下の関係が成り立つ



$$x = \frac{x_L + x_R}{2} \frac{L}{x_L - x_R}$$

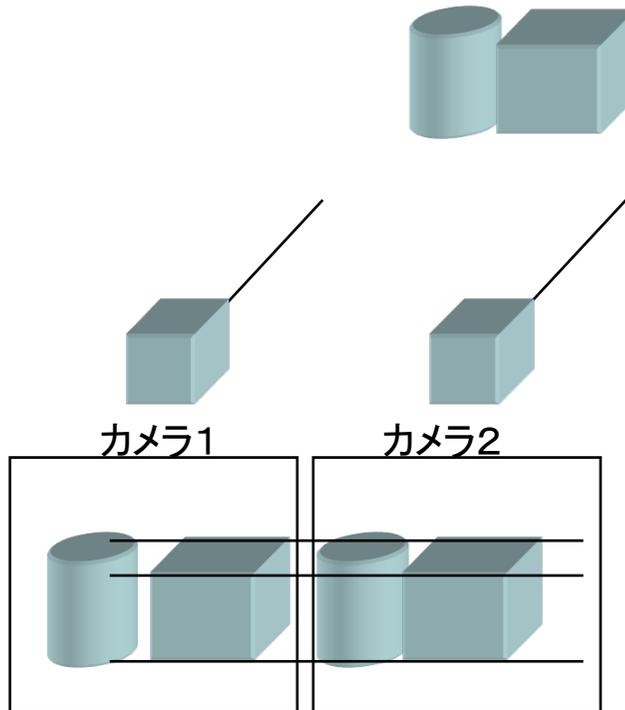
$$y = y_L \frac{L}{x_L - x_R}$$

$$z = f \frac{L}{x_L - x_R}$$

$x_L - x_R$ は両眼視差を表している
(距離は視差に反比例する)

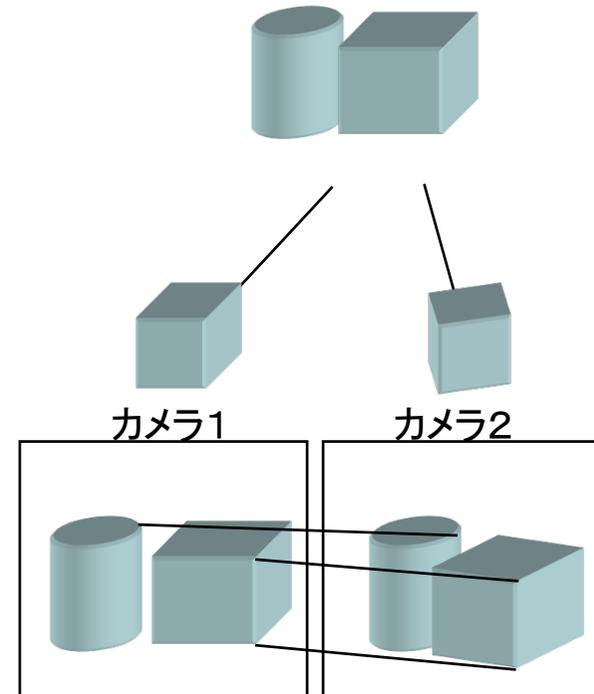
カメラの配置と画像処理

光軸が並行な場合



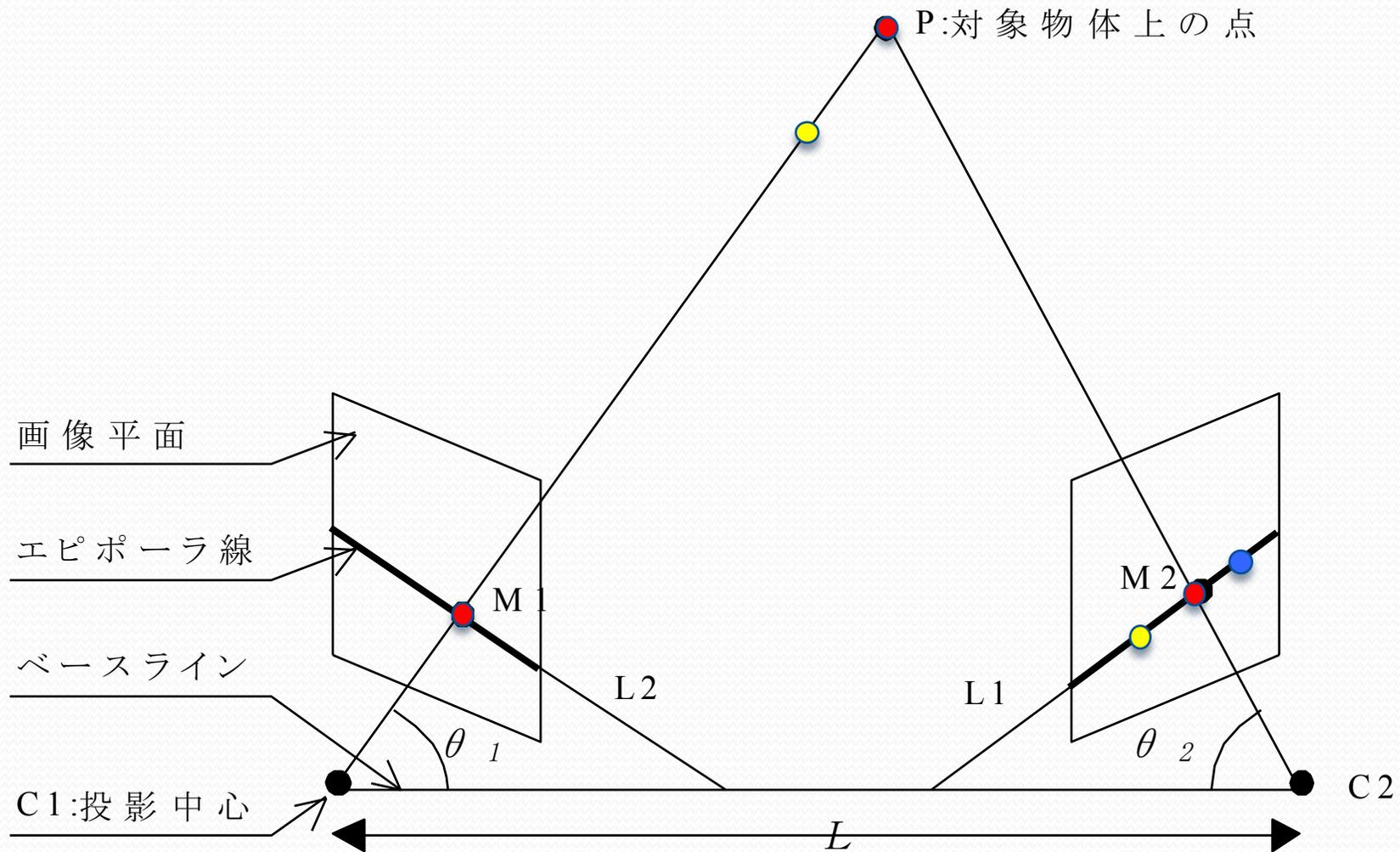
× 視野の共通領域が狭い
○ エピポーラ線が平行

光軸が並行でない場合



× エピポーラ線が放射状
→ 画像処理で解決可

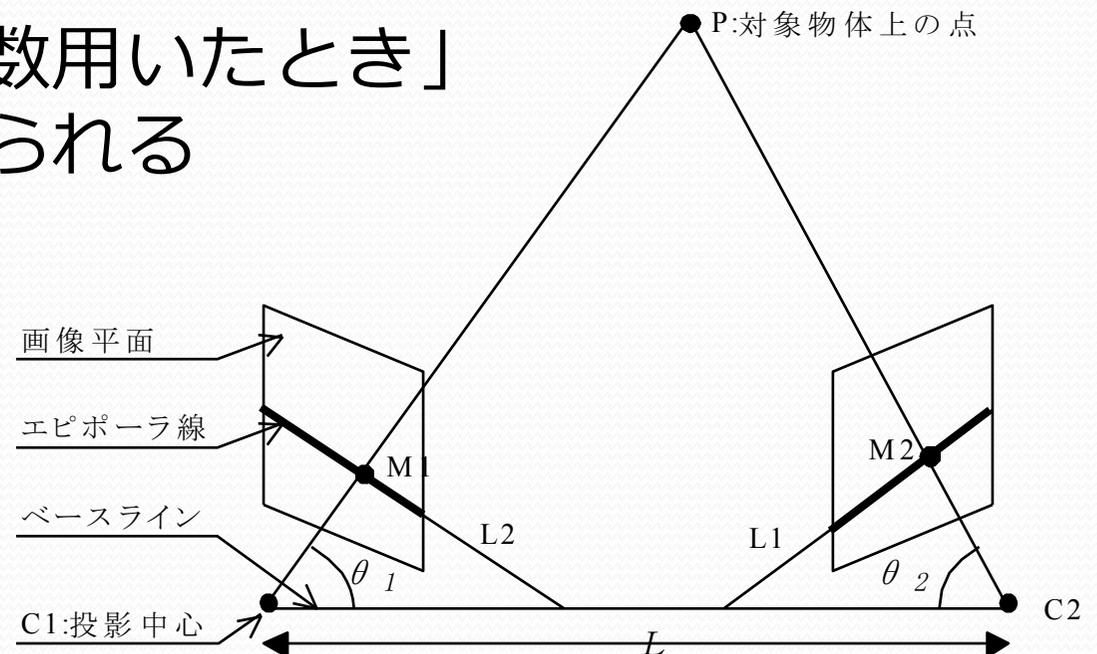
エピポラ幾何



2台のカメラが固定されているとき、点 p がそれぞれの画像のどこに写るのかを決める法則。例えば点 P が、カメラ C_1 の画像上で座標 M_1 に写ることがわかれば、その点 P はカメラ C_2 の画像上ではある直線 L_1 上に写る。画像全体のどこにでも現れるわけではない。

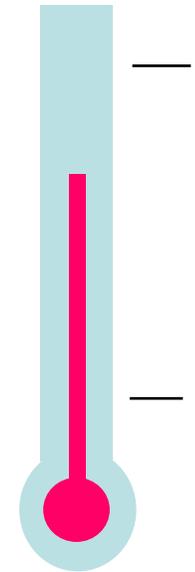
エピポーラ幾何のメリット

- ステレオカメラでの距離計測
 - 一方のカメラ画像に写っている物体上の1点が、もう一方のカメラ画像のどこに写っているのか？
 - エピポーラ幾何を使わない場合：画像全体を縦・横の2次元的に探す必要がある。時間がかかる。
 - エピポーラ幾何を使った場合：ある1本の直線上だけを探せば良い。時間が短縮され、精度も向上する。
- 他にも、「カメラを複数用いたとき」の画像処理で広く用いられる

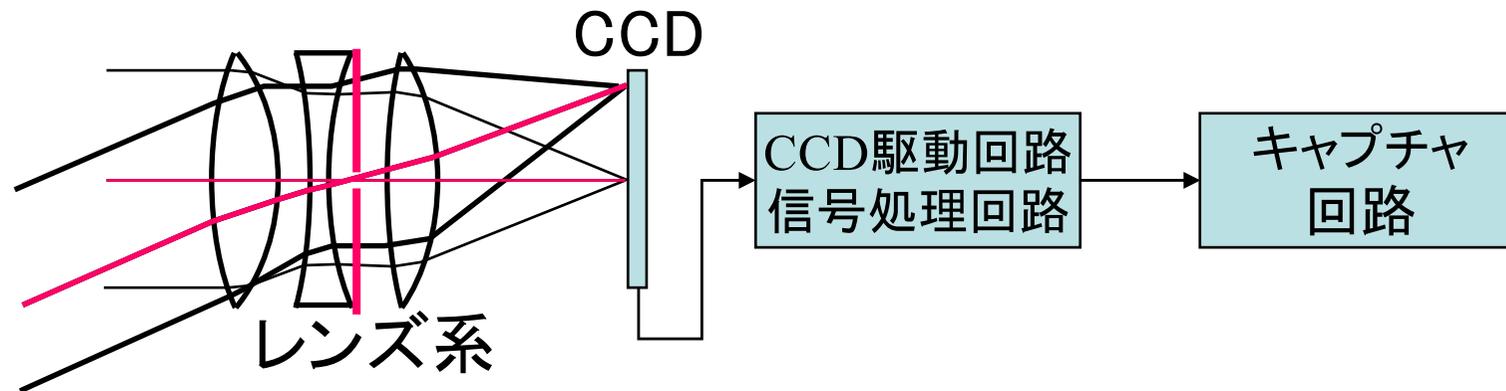


キャリブレーション

- 機器の構造からのキャリブレーションは困難
 - 実焦点距離 (フォーカシング距離により可変)
 - 投影中心 (レンズの中, 計測困難)
- 大きさ, 位置が既知の物体を計測してキャリブレーション
 - cf. 温度計の較正 (氷水, 沸騰水)
 - 熱膨張係数の二次成分が0と仮定
 - 画像の場合も同様, レンズ歪みなどをモデリングするか? (モデルを複雑にするほど較正は困難)

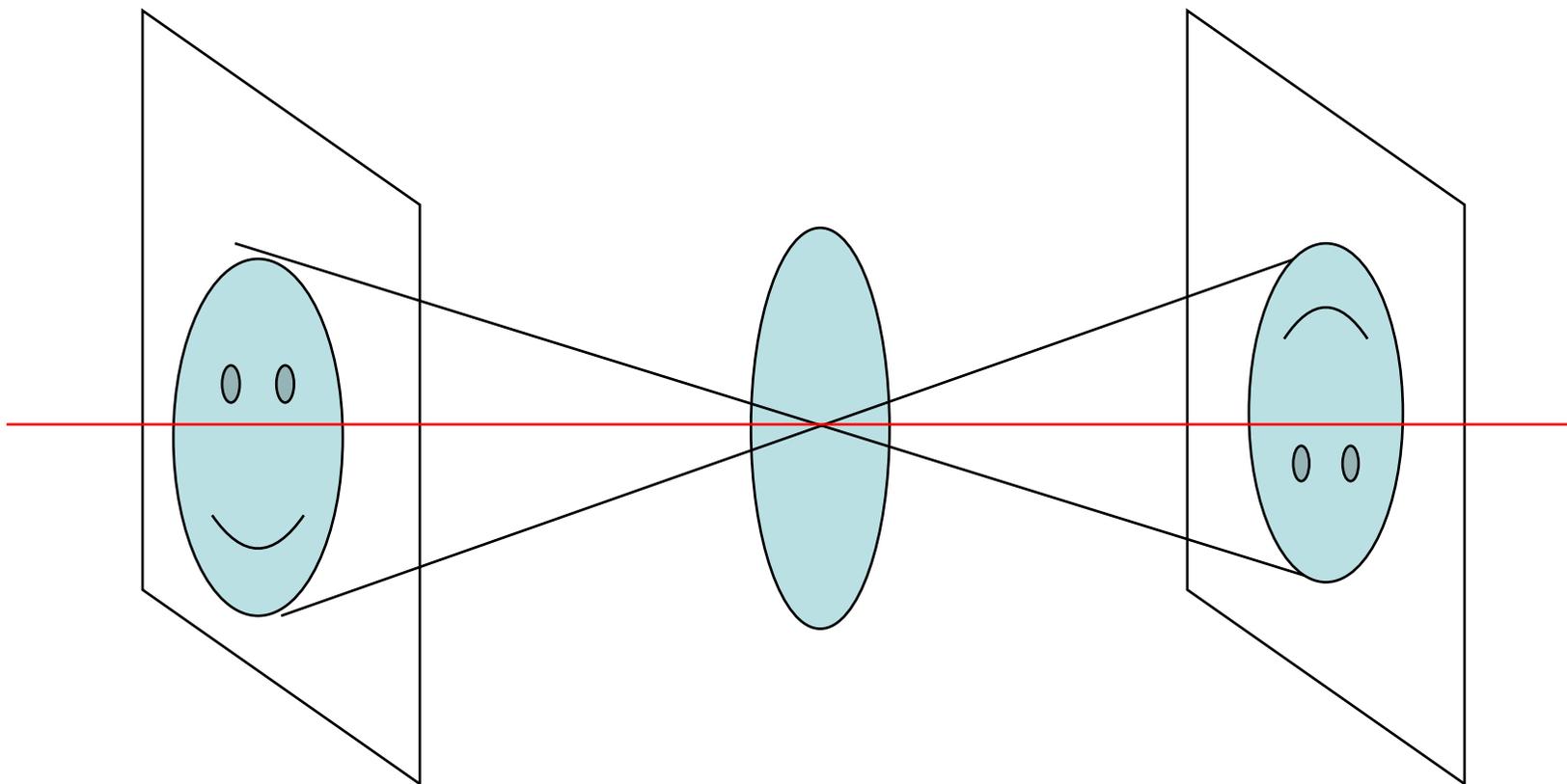


カメラの構造



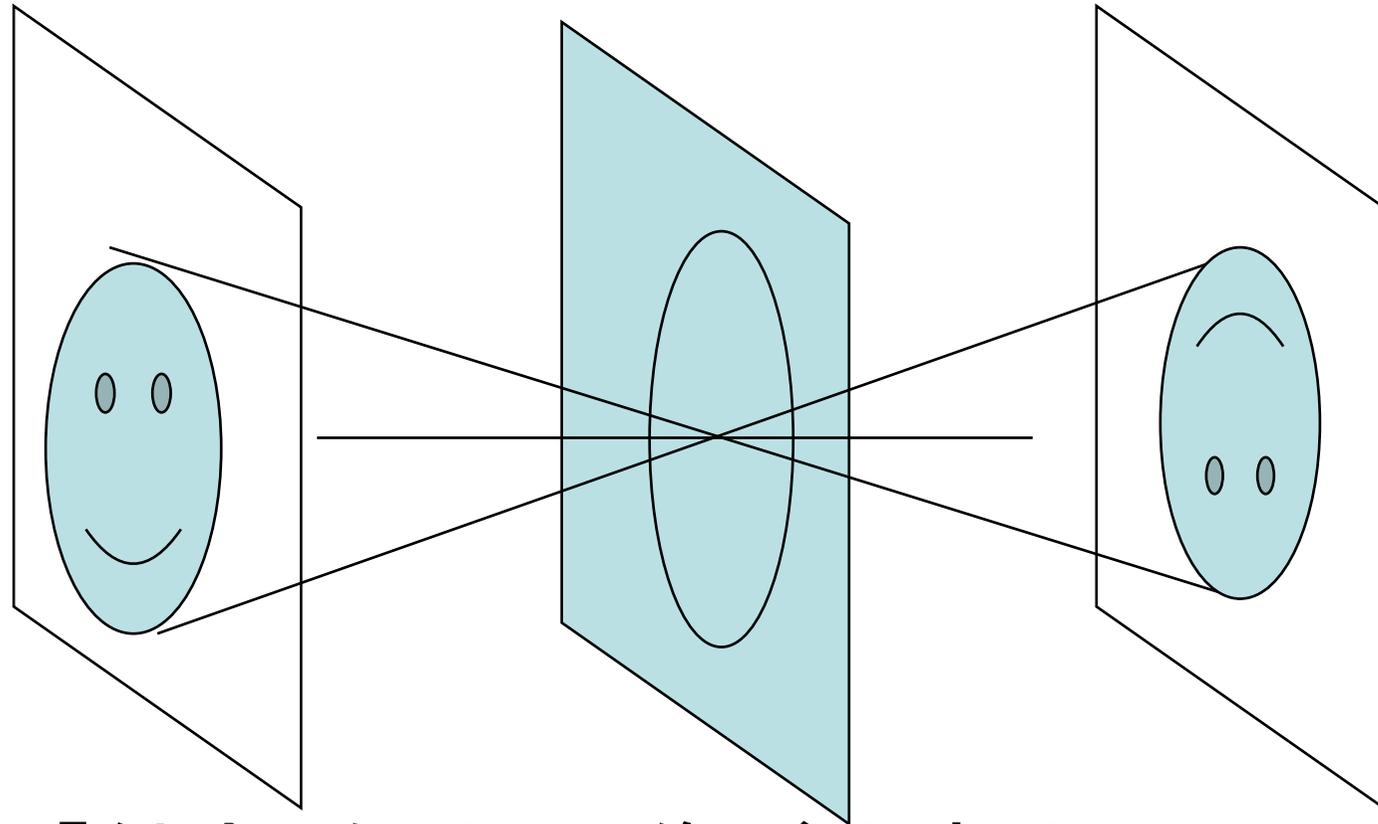
- レンズ - 集光するためのデバイス
 - 画像のぼけを無視した場合, 無関係
 - 絞りを閉じた系で考える(主光線)

理想的な画像センサとは



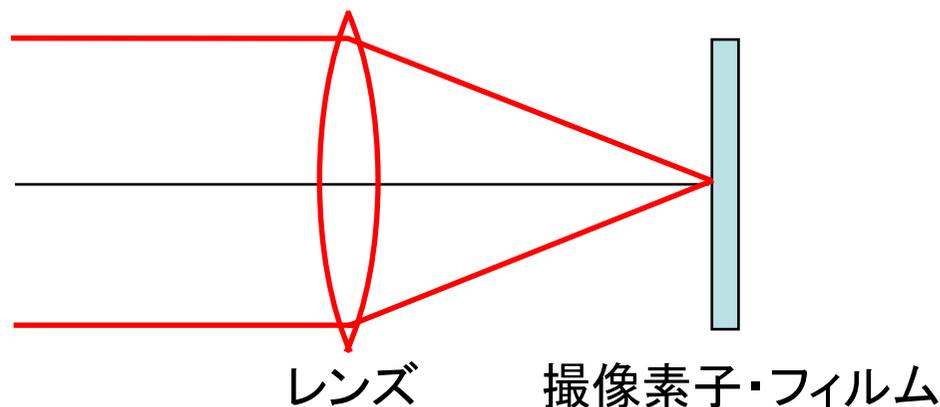
- 光軸(レンズの対称軸)に垂直な平面上の図形に対して,
相似の像が得られること
 - ゆがみがあってはいけない
 - ぼけがあってはいけない

ピンホールカメラ



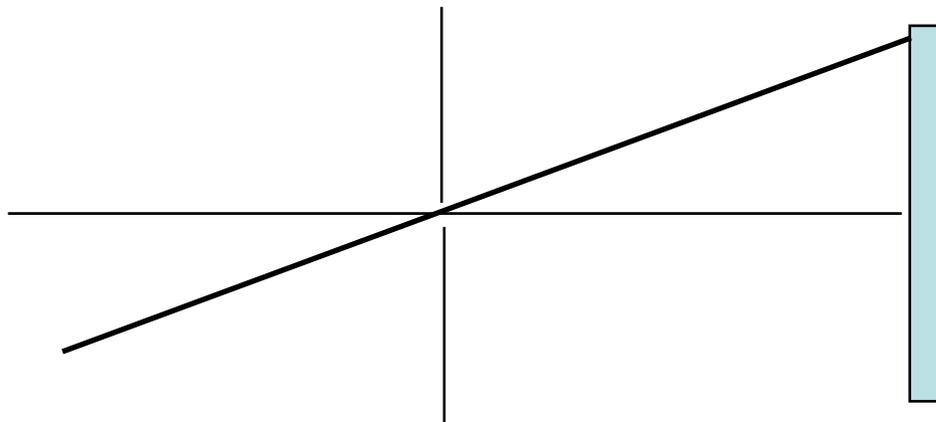
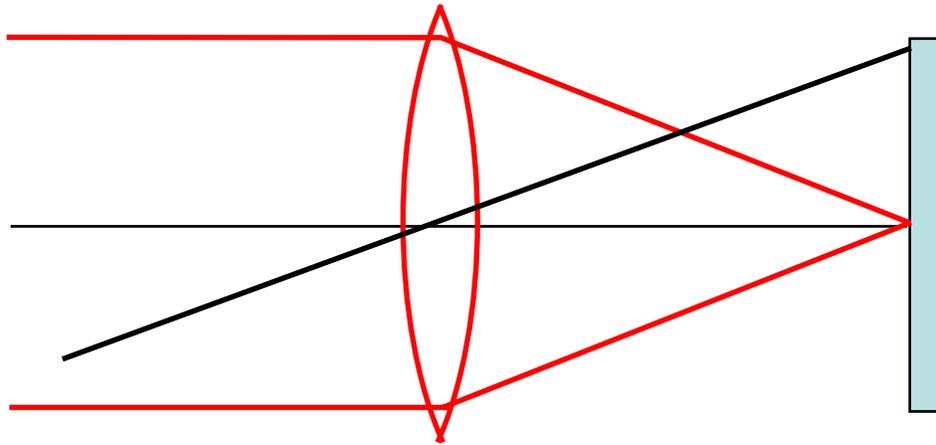
- 小さな「針穴」を通して像が出来る
 - 被写体と像の間には厳密な幾何学的関係が成立している(光の直進性より)
 - 実際には像が暗すぎてほとんど使われない

レンズの役割



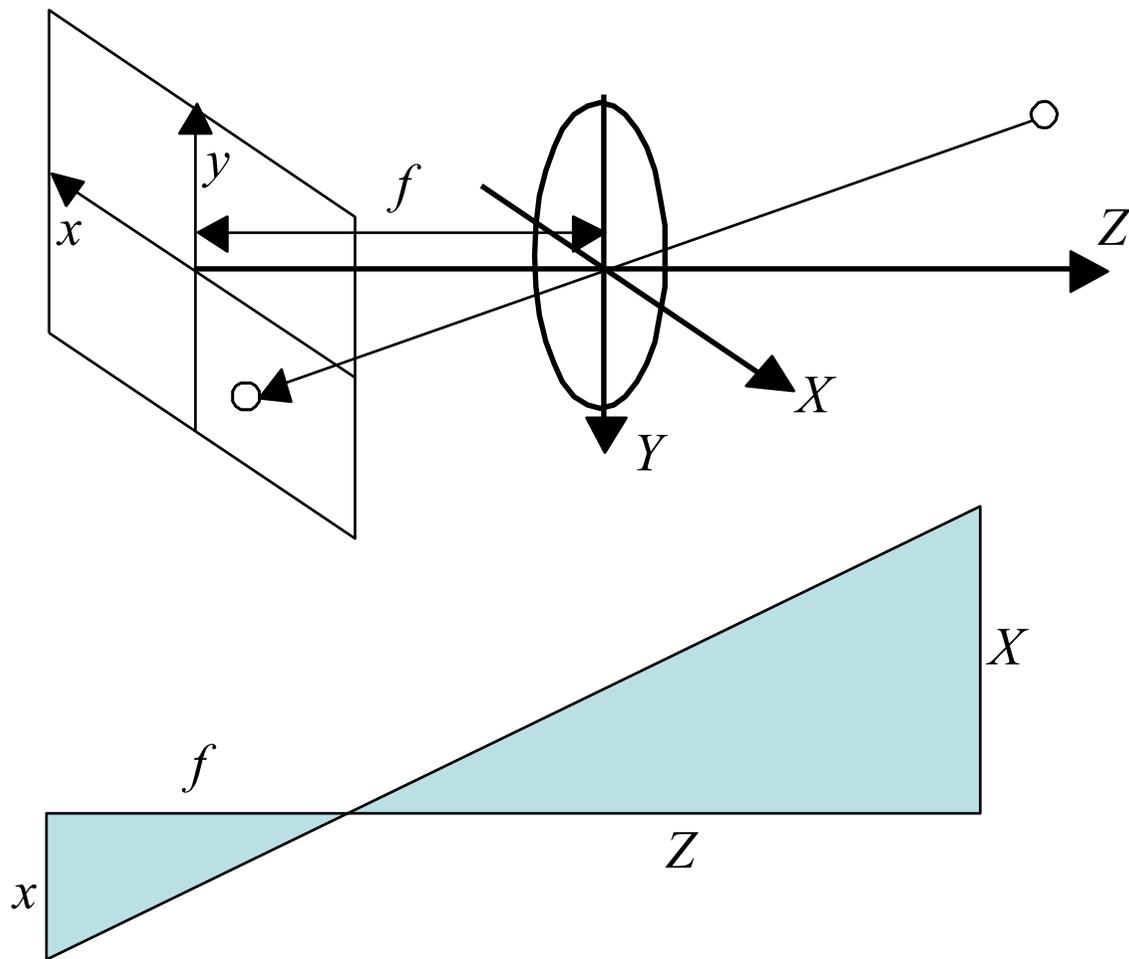
- 撮影に十分な量の光を撮像素子に集める
- 画像処理ではほとんどの場合、カメラの特性は出来るだけピンホールカメラに近いほうが良い
 - 図形が歪まない・像が甘くならない
 - 単純な1枚のレンズでは実現できない
 - ボケが生じない(光量確保に相反する要求)

ピンホールカメラ



- 薄いレンズの中央を通る光は屈折されない
- レンズを絞り込んでいくとピンホールカメラに近づく

ピンホールカメラ



- ピンホール中央
(=前側レンズ主点)
に原点を取る

$$\begin{cases} x = f \frac{X}{Z} \\ y = f \frac{Y}{Z} \end{cases}$$

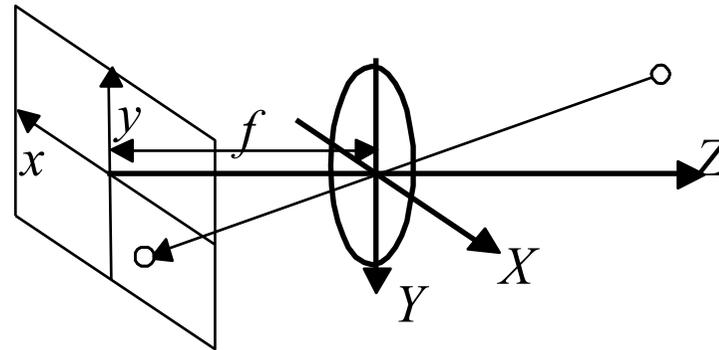
透視変換の同次座標表現

$$\begin{cases} x = f \frac{X}{Z} \\ y = f \frac{Y}{Z} \end{cases} \Leftrightarrow h \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}$$

- 透視変換には除算が含まれる
 - 除算だけを最後まで「延期」して計算
(最後に h を消去)
→ 行列計算により透視変換を表現
 - 各ベクトルの末尾に要素“1”を追加する
(同次座標表現)

透視変換に対する座標変換の導入

$$h \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}$$



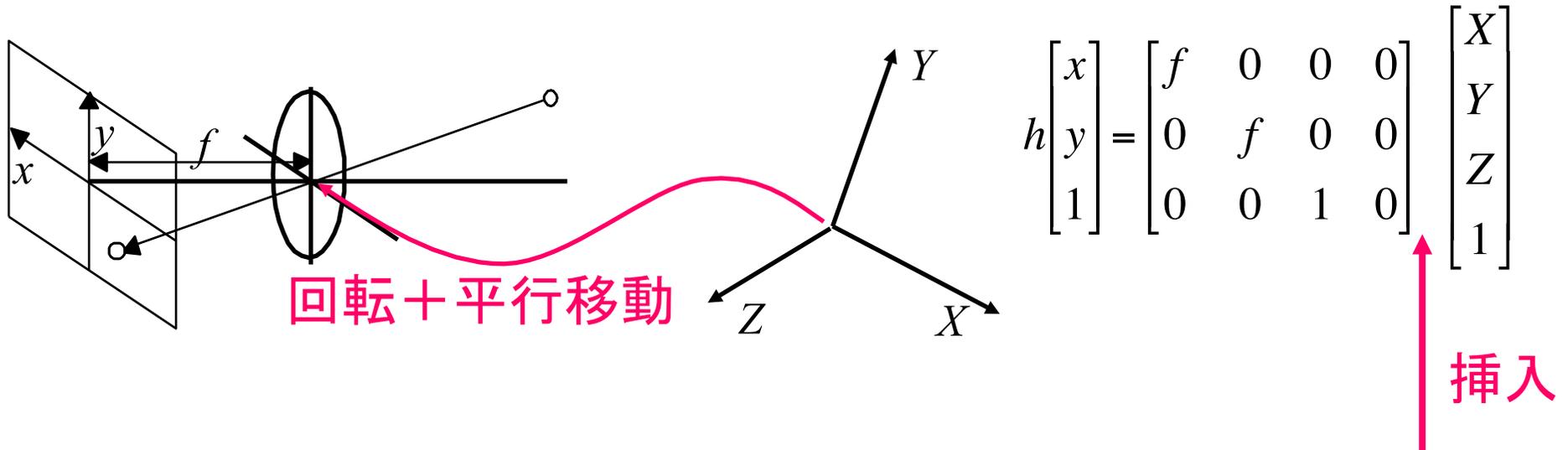
- 上記の透視変換表現は様々な制限を有する
 - 世界座標の原点 = 投影中心 (レンズ主点)
 - 光軸 = Z軸に平行
 - 画像の中心 = 投影中心から下ろした垂線の足
 - アスペクト比 = 1.0
 - 座標変換を導入する必要あり

同次座標を用いた平行移動の表現

$$\begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} \\ r_{21} & r_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \end{bmatrix} \Leftrightarrow \left[\begin{array}{cc|c} x_2 \\ y_2 \\ 1 \end{array} \right] = \left[\begin{array}{cc|c} r_{11} & r_{12} & t_x \\ r_{21} & r_{22} & t_y \\ \hline 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \left[\begin{array}{c} x \\ y \\ 1 \end{array} \right]$$

- 同次座標では積により平行移動が表現可能
 - $r_{11} \sim r_{22} \rightarrow$ 一次変換
 - $t_x \sim t_y \rightarrow$ 平行移動

世界座標系の導入



- 透視変換行列と世界座標の間に、同次座標変換を挿入

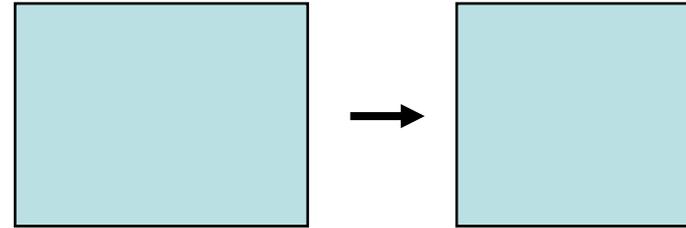
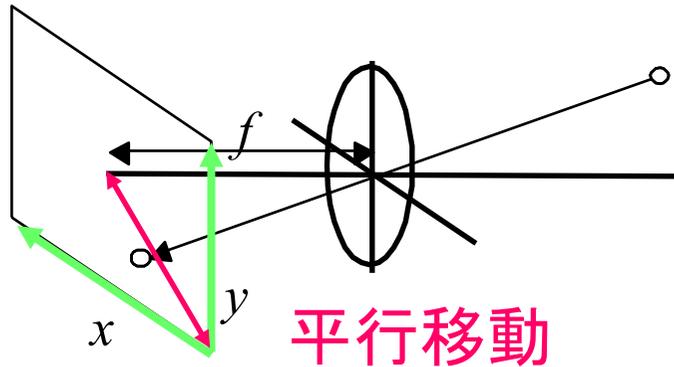
- 外部パラメータ
 - 回転: 3自由度
 - 平行移動: 3自由度

外部パラメータは、全部で6自由度！

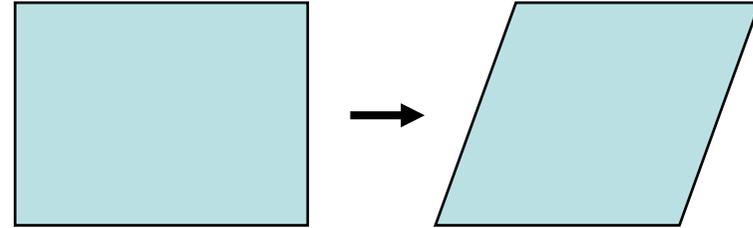
$$\begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_X \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_Y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_Z \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

外部パラメータ

内部パラメータの表現



アスペクト比



スキュー

- 内部パラメータ

- 焦点距離 f (1自由度)
- 画像中心 (2自由度)
- アスペクト比 (1自由度)
- スキュー歪み (1自由度)

内部パラメータは、
全部で5自由度！

内部パラメータの導入

- 内部パラメータは、透視変換行列の前に同次座標変換を掛ける

– a : アスペクト比

– s : スキュー比

– t_x, t_y : 画像中心

$$h \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}$$

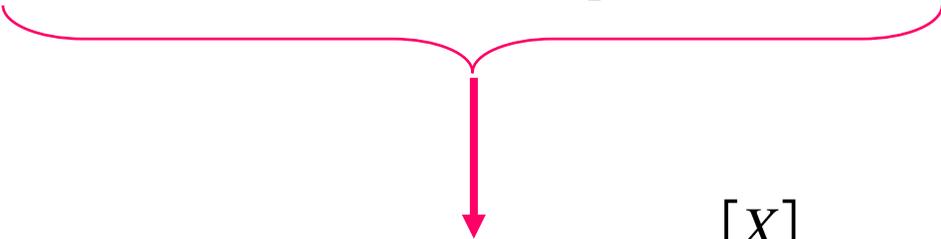
挿入

$$\left[\begin{array}{cc|c} 1 & s & t_x \\ 0 & a & t_y \\ \hline 0 & 0 & 1 \end{array} \right]$$

内部パラメータ

カメラパラメータ行列

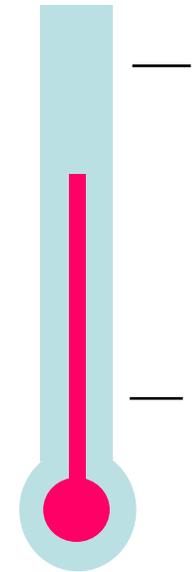
$$h \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & s & t_x \\ 0 & a & t_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_X \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_Y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_Z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}$$


$$h \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & c_{24} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & c_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}$$

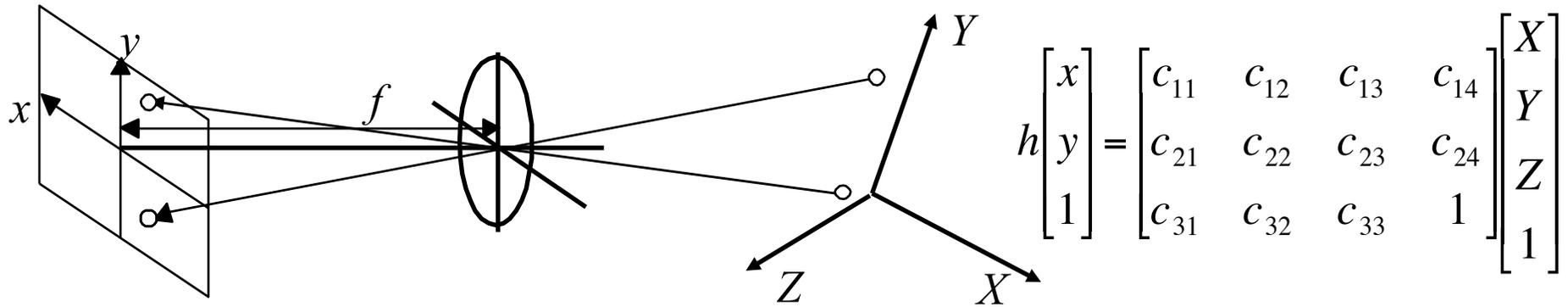
- 行列の積をあらかじめ計算
 - 3行4列の行列
カメラパラメータ
 - パラメータ数
(自由度)は**11**
→カメラパラメータ
行列は定数倍しても意味が不変

キャリブレーション

- 機器の構造からのキャリブレーションは困難
 - 実焦点距離 (フォーカシング距離により可変)
 - 投影中心 (レンズの中, 計測困難)
- 大きさ, 位置が既知の物体を計測してキャリブレーション
 - cf. 温度計の較正 (氷水, 沸騰水)
 - 熱膨張係数の二次成分が0と仮定
 - 画像の場合も同様, レンズ歪みなどをモデリングするか? (モデルを複雑にするほど較正は困難)



基本的なキャリブレーション法



- 既知の $(X, Y, Z) \rightarrow (x, y)$ の組から較正
 - カメラパラメータから h を消去

$$\begin{cases} hx = c_{11}X + c_{12}Y + c_{13}Z + c_{14} \\ hy = c_{21}X + c_{22}Y + c_{23}Z + c_{24} \\ h = c_{31}X + c_{32}Y + c_{33}Z + 1 \end{cases} \rightarrow \begin{cases} c_{31}Xx + c_{32}Yx + c_{33}Zx + x = c_{11}X + c_{12}Y + c_{13}Z + c_{14} \\ c_{31}Xy + c_{32}Yy + c_{33}Zy + y = c_{21}X + c_{22}Y + c_{23}Z + c_{24} \end{cases}$$

パラメータの計算

$$\begin{bmatrix}
 X_1 & Y_1 & Z_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -X_1x_1 & -Y_1x_1 & -Z_1x_1 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & X_1 & Y_1 & Z_1 & 1 & -X_1y_1 & -Y_1y_1 & -Z_1y_1 \\
 \vdots & & & & \vdots & & & & \vdots & & \\
 X_n & Y_n & Z_n & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -X_nx_n & -Y_nx_n & -Z_nx_n \\
 0 & 0 & 0 & 0 & X_n & Y_n & Z_n & 1 & -X_ny_n & -Y_ny_n & -Z_ny_n
 \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix}
 c_{11} \\
 c_{12} \\
 c_{13} \\
 c_{14} \\
 c_{21} \\
 c_{22} \\
 c_{23} \\
 c_{24} \\
 c_{31} \\
 c_{32} \\
 c_{33}
 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 x_1 \\
 y_1 \\
 \vdots \\
 x_n \\
 y_n
 \end{bmatrix}$$

- 未知数 11, 式 2n (n:特徴点数)
 - 最小二乗法で解く.
 - 上式を $Ax=y$ の形とすると

$$x = (A^T A)^{-1} A^T y$$

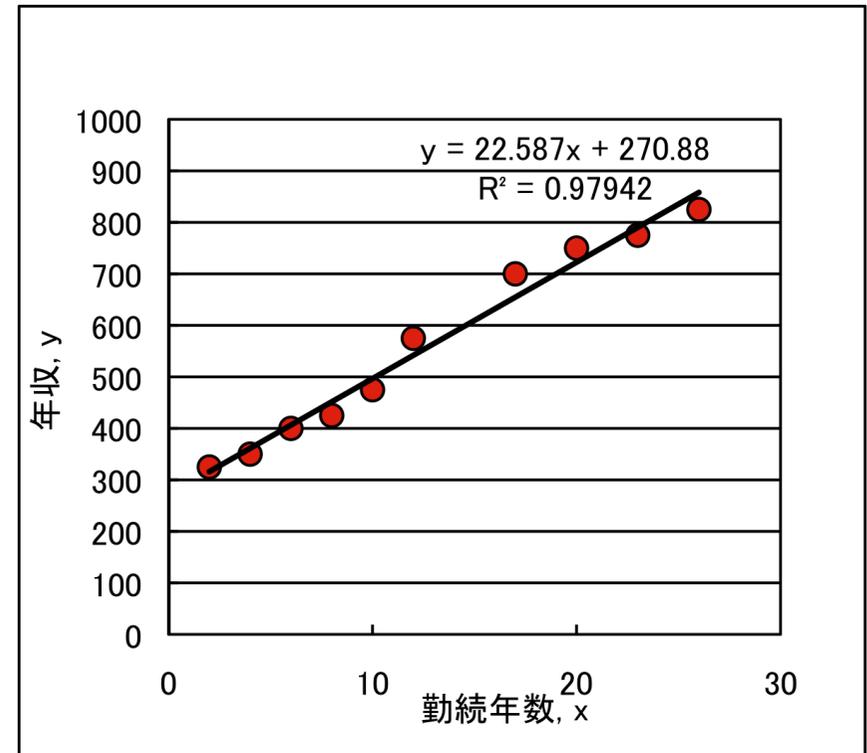
単回帰分析

1つの変数 x から、1つの変数 y を推定する。

例) 勤続年数と年収の関係を分析する。
直線で関係式を表現する。

$$y = ax + b \quad \begin{array}{l} x : \text{説明変数} \\ y : \text{目的変数} \end{array}$$

勤続年数, x	年収, y
2	325
4	350
6	400
8	425
10	475
12	575
17	700
20	750
23	775
26	825



最小二乗法

- モデル, データ
 - 回帰モデル $y = ax + b$
 - データ $(x_i, y_i), i = 1, \dots, N$
- 規範
 - 残差平方和 $S = \sum (y_i - ax_i - b)^2$ を最小にする
- 算法
 - S は a, b の二次式なので, $dS/da=0, dS/db=0$

$$\frac{\partial S}{\partial a} = \sum_{i=1}^N 2(y_i - ax_i - b) \cdot (-x_i) = - \sum_{i=1}^N 2(y_i x_i - ax_i^2 - bx_i) = 0$$

$$\frac{\partial S}{\partial b} = \sum_{i=1}^N 2(y_i - ax_i - b) \cdot (-1) = - \sum_{i=1}^N 2(y_i - ax_i - b) = 0$$

最小二乗法の行列解法

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^N y_i x_i &= a \sum_{i=1}^N x_i^2 + b \sum_{i=1}^N x_i \\ \sum_{i=1}^N y_i &= a \sum_{i=1}^N x_i + b \sum_{i=1}^N 1 \end{aligned} \quad \longrightarrow \quad \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^N x_i^2 & \sum_{i=1}^N x_i \\ \sum_{i=1}^N x_i & \sum_{i=1}^N 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^N y_i x_i \\ \sum_{i=1}^N y_i \end{bmatrix}$$

$$ax_i + b = y_i$$

共分散行列

$$\begin{bmatrix} x_1 & 1 \\ x_2 & 1 \\ \vdots & \vdots \\ x_N & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_N \end{bmatrix}$$

$$\longrightarrow X = \underbrace{(A^T A)^{-1}}_{A \text{ の擬似逆行列}} \underbrace{A^T B}$$

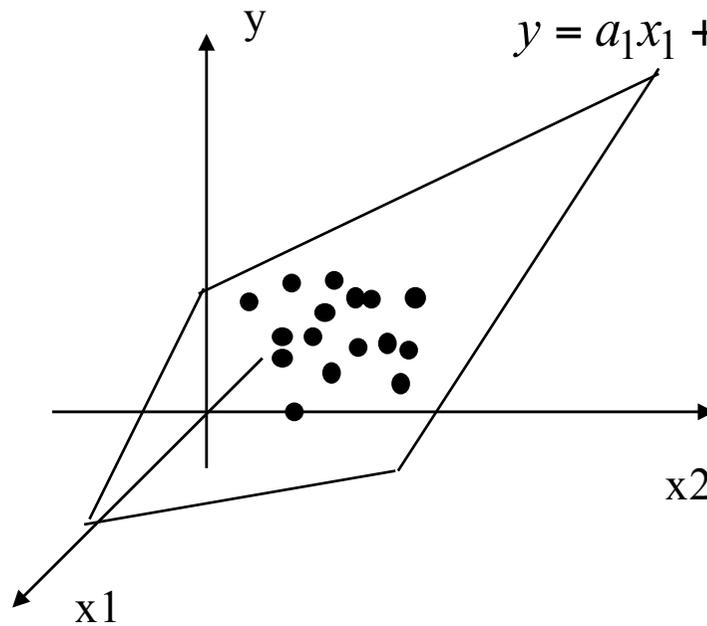
Aの擬似逆行列

$$AX = B$$

重回帰分析

2つ以上の変数 x_1, x_2, \dots から、1つの変数 y を推定する。

例) 最低気温 (y) と緯度 (x_1), 標高 (x_2) の関係



各地のデータ (サンプル) から回帰係数 a_1, a_2, a_3 を決定する。

線形回帰分析

- 線形な例

- $y = ax + b$

- $y = ax^2 + bx + c$

- $z = ax + by + c$

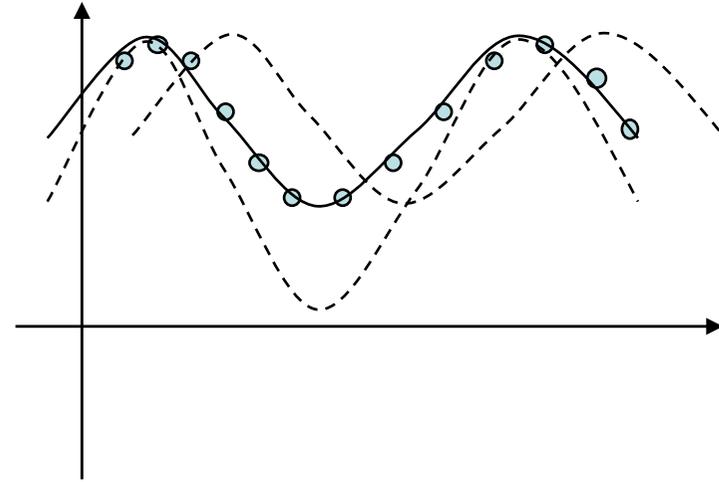
- $y = a \sin(\theta + b) + c = a \sin\theta \cos b + \cos\theta \sin b + c$

- 非線形な例

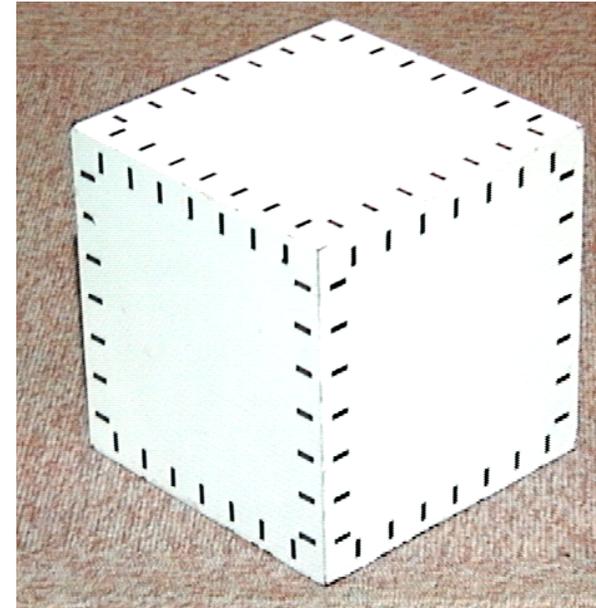
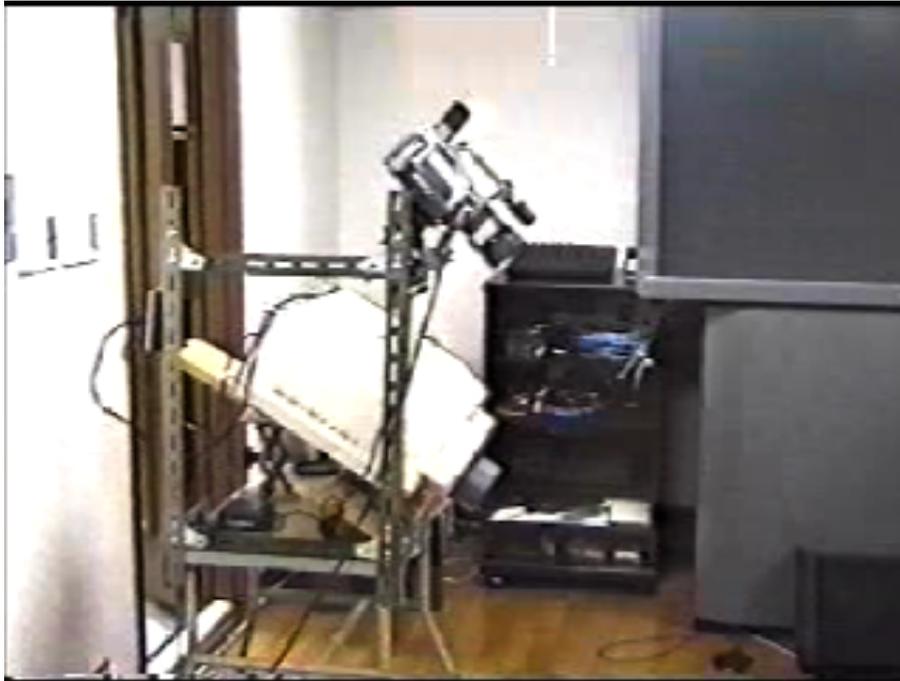
- $y = \sin(ax) + b$

- 非線形最適化によりパラメータを出す.

- 最急降下法, GA, SA, . . .



キャリブレーションの実際



キャリブレーションに用いる
対象物体(一辺16cm)

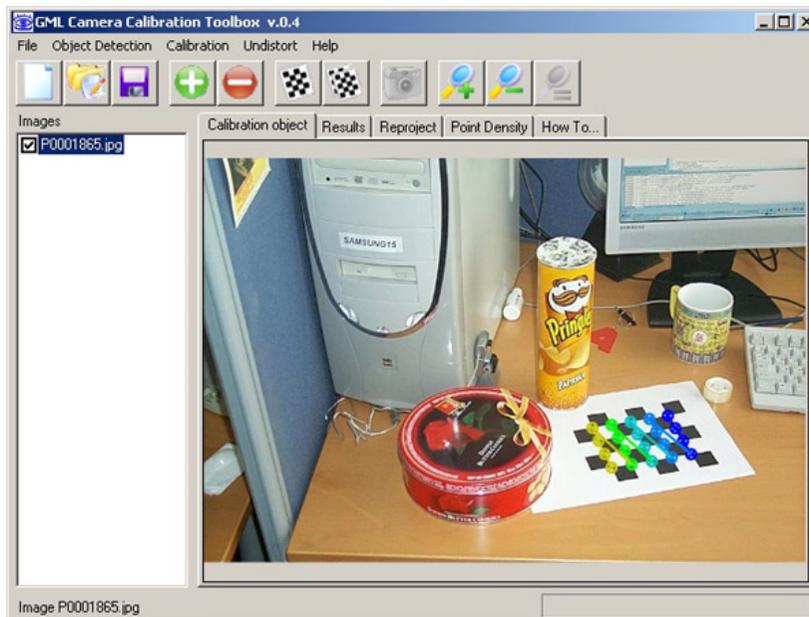
バンドル調整

$$\begin{cases} hx = c_{11}X + c_{12}Y + c_{13}Z + c_{14} \\ hy = c_{21}X + c_{22}Y + c_{23}Z + c_{24} \\ h = c_{31}X + c_{32}Y + c_{33}Z + 1 \end{cases} \rightarrow \arg \min_{c_{11}-c_{33}} \sum_n \left(\begin{bmatrix} \frac{c_{11}X_n + c_{12}Y_n + c_{13}Z_n + c_{14}}{c_{31}X_n + c_{32}Y_n + c_{33}Z_n + 1} \\ \frac{c_{21}X_n + c_{22}Y_n + c_{23}Z_n + c_{24}}{c_{31}X_n + c_{32}Y_n + c_{33}Z_n + 1} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_n \\ y_n \end{bmatrix} \right)^2$$

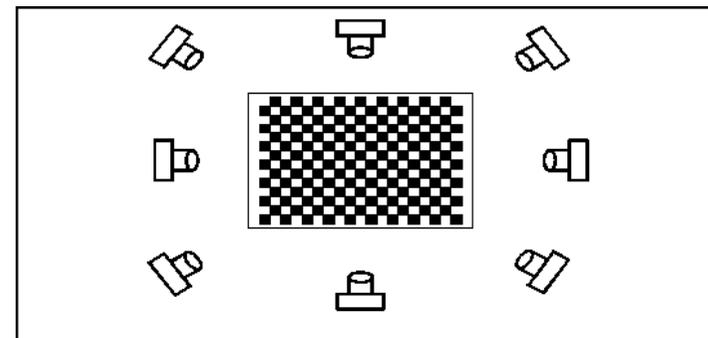
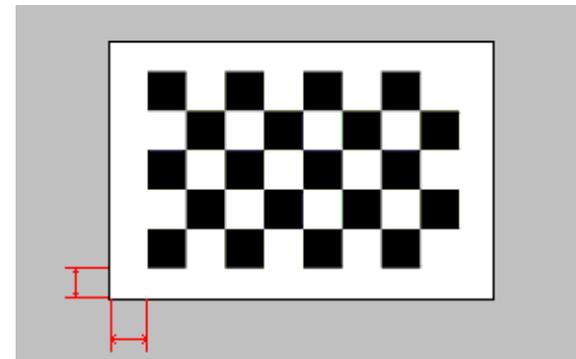
- 画像上の点の距離二乗和(再投影誤差)を最小化
 - 初期値: 線形解法
 - bundle adjustment: 非線形最適化
 - 最急降下法, マルカート法などで計算する.

キャリブレーションツール

- Z. Y. Zhang の手法
 - OpenCV ライブラリ (Intel)
 - GML C++ Camera Calibration toolbox



Calibration date	21.10.2005 18:09:15
Square size	38.000 (mm)
Focal length	[2592.554 2600.251] ± [0.490 0.444]
Principal point	[1134.869 824.027] ± [0.716 0.468]
Distortion	[-0.211038 0.226479 -0.001461 -0.000326] ± [0.000936 0.005006 0.000040 0.000053]
The camera matrix	[2592.554 0 1134.869; 0 2600.251 824.027; 0 0 1]
Pixel error	[0.42 0.33]



Camera Calibration

- Define intrinsic and extrinsic camera parameters.
- Define Distortion parameters

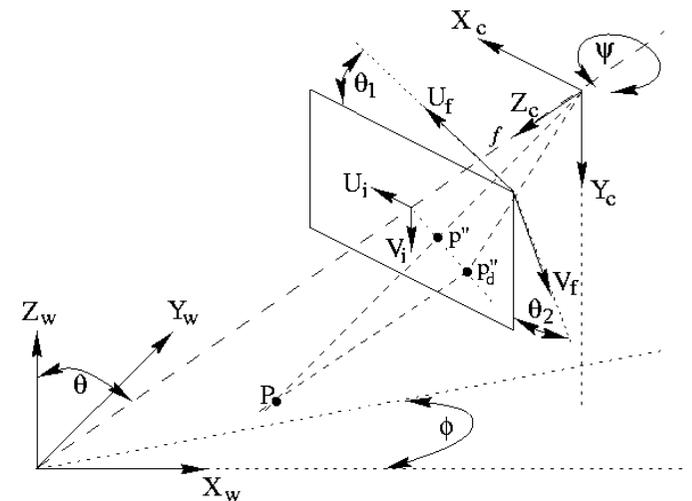
$$p = A[RT]P,$$

$$A = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}, \quad T = \begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \end{bmatrix}, \quad P = [X, Y, Z], \quad p = [u, v]$$

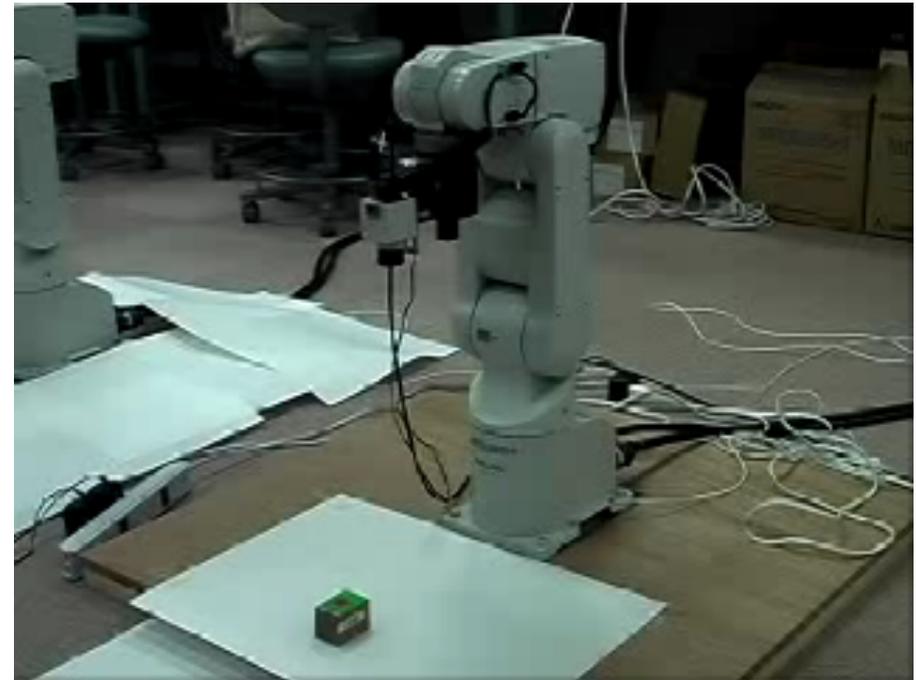
$$\tilde{u} = u + (u - c_x) \cdot [k_1 \cdot r^2 + k_2 \cdot r^4 + 2p_1 y + p_2 (r^2 / x + 2x)],$$

$$\tilde{v} = v + (v - c_y) \cdot [k_1 \cdot r^2 + k_2 \cdot r^4 + 2p_2 x + p_1 (r^2 / y + 2y)],$$

$$r^2 = x^2 + y^2.$$



キャリブレーション応用例



学生実験(学部4年次)での
画像処理・ロボット応用実習風景

カメラパラメータからの解析

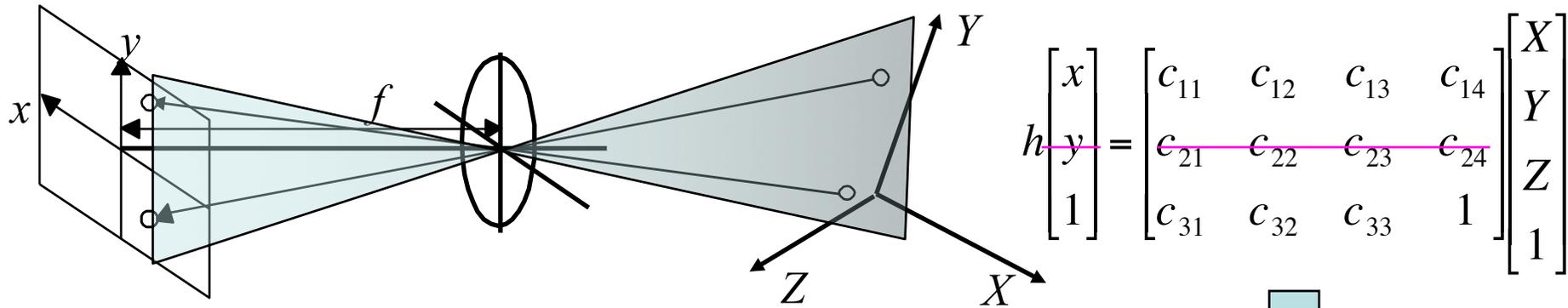
$$h \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & s \cdot f & t_x \\ 0 & a \cdot f & t_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \iff h \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_{14} \\ c_{24} \\ c_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}$$

内部パラメータ
上三角行列

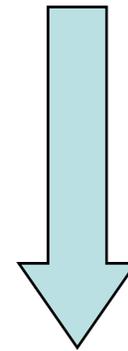
外部パラメータ
(左3x3)
正規直交行列

- カメラパラメータの左3x3を直交化
 - グラム・シュミットの正規直交化法を用いる
 - 内部パラメータとカメラの姿勢が求められる
 - 平行移動成分は内部パラメータ行列の逆行列を用いて求められる

カメラ2台の場合



- 一方のカメラのy座標は不要
 – y座標の行を削除して考える



$$h \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & c_{24} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}$$

カメラ1

$$h \begin{bmatrix} x_p \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{14} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}$$

カメラ2

三次元座標の算出

- 情報: スリット番号 x_p , 画素位置 x, y
 - カメラパラメータ, プロジェクタパラメータを使用

$$F = \begin{bmatrix} x \cdot c_{34} - c_{14} \\ y \cdot c_{34} - c_{24} \\ x_p \cdot p_{24} - p_{14} \end{bmatrix} \quad Q = \begin{bmatrix} c_{11} - x \cdot c_{31} & c_{12} - x \cdot c_{32} & c_{13} - x \cdot c_{33} \\ c_{21} - y \cdot c_{31} & c_{22} - y \cdot c_{32} & c_{23} - y \cdot c_{33} \\ p_{11} - x_p \cdot p_{21} & p_{12} - x_p \cdot p_{22} & p_{13} - x_p \cdot p_{23} \end{bmatrix}$$

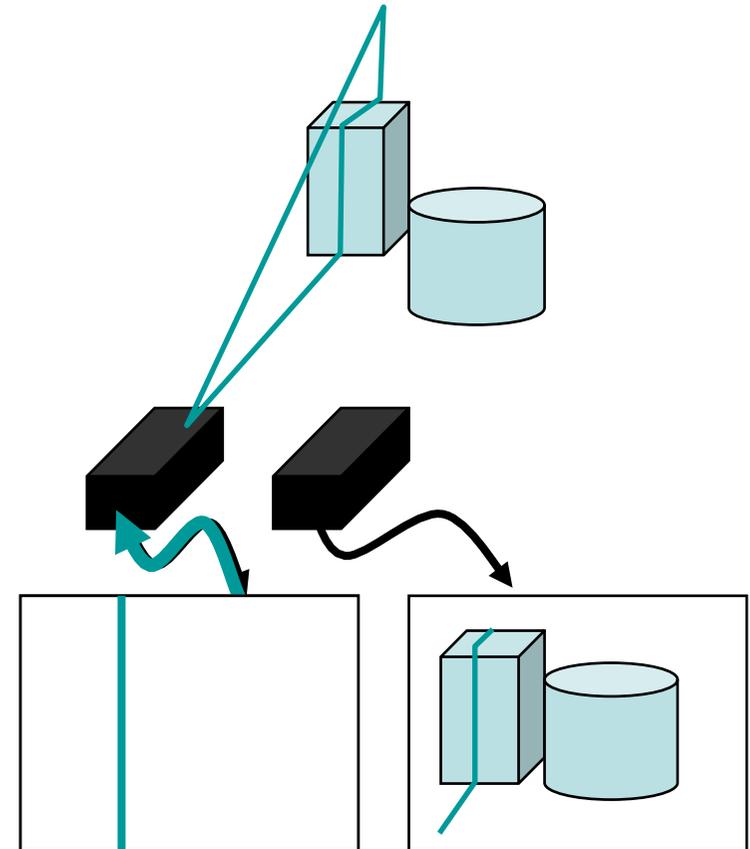
– より

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = Q^{-1} \cdot F$$

で座標が求められる

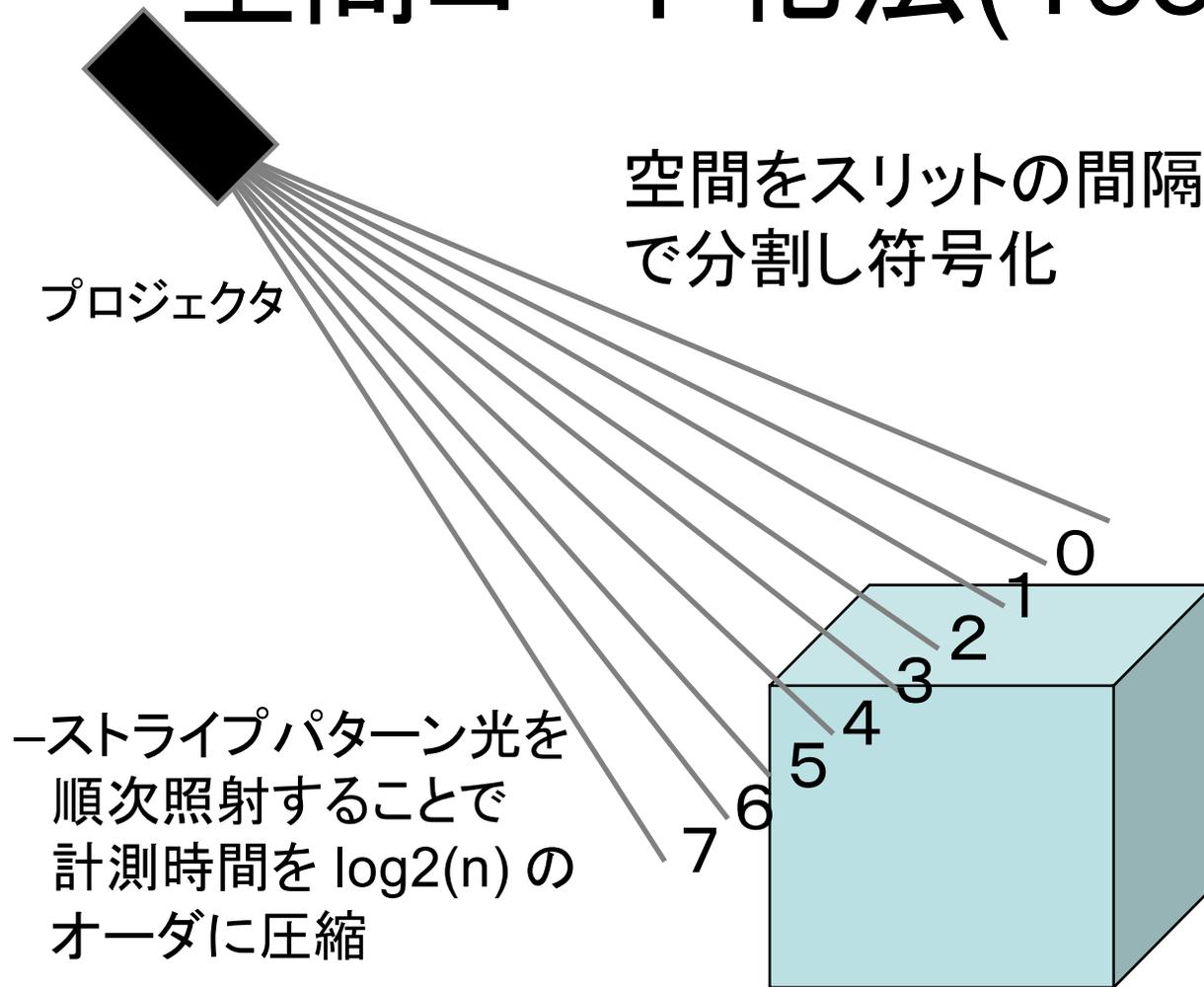
能動型ステレオ法

- 一方のカメラをプロジェクタに置き換える(光を投影)
 - もう一方のカメラでその光パターンの像を計測
 - 対応付け問題が簡単に
 - 模様のない物体でも計測可能
 - パターン光を投影しながら画像を取り込む
 - 画像の取り込み回数が多い, 時間がかかる



→ハードウェアによる高速化・投影光の工夫等

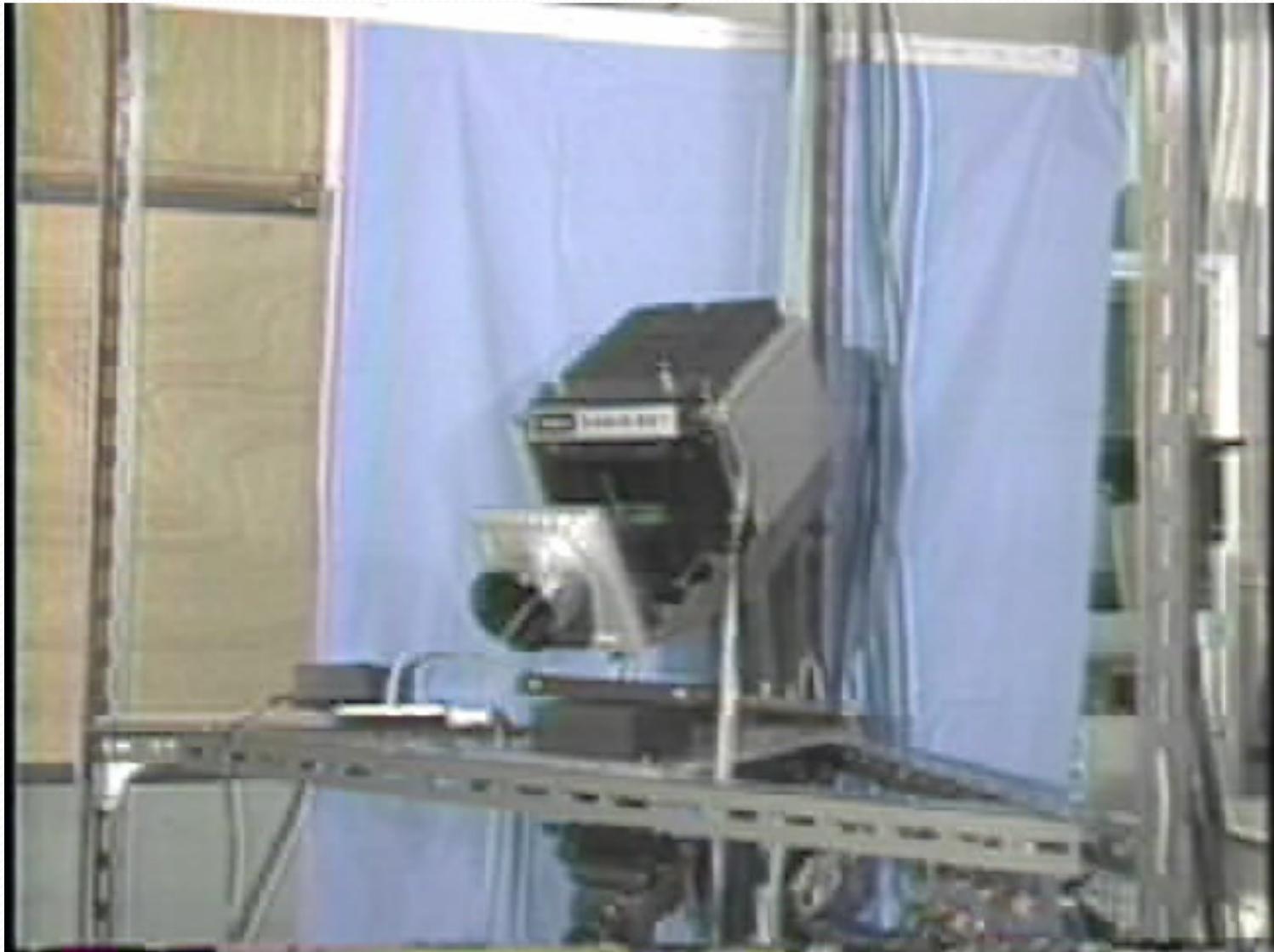
空間コード化法(1985)



- 佐藤宏介, 井口征士, "空間コード化による距離画像入力", 信学論, Vol. J68-D, No. 3, pp. 369-375, 1985.
- 佐藤宏介, 井口征士, "液晶レンジファインダー—液晶シャッターによる高速距離画像計測システム—", 信学論, Vol. J71-D, No. 7, pp. 1249-1257, 1988.

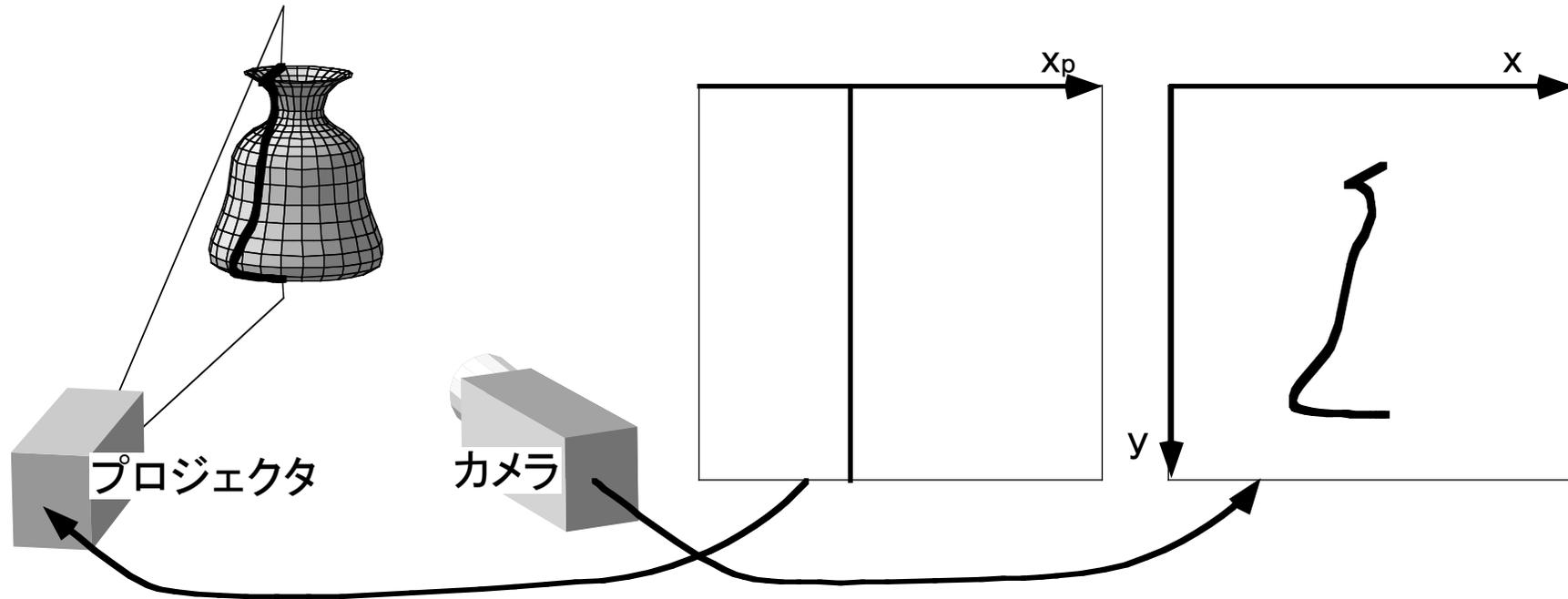
グレイコード				
0	0	0	0	000
1	0	0	1	001
2	0	1	1	011
3	0	1	0	010
4	1	1	0	110
5	1	1	1	111
6	1	0	1	101
7	1	0	0	100
二進コード				
0	0	0	0	000
1	0	0	1	001
2	0	1	0	010
3	0	1	1	011
4	1	0	0	100
5	1	0	1	101
6	1	1	0	110
7	1	1	1	111

液晶レンジファインダ



- 専用（スリット型）液晶パネルを開発

応用: レンジファインダ



- スリット光投影法
 - プロジェクタはカメラ同様にモデル化可能

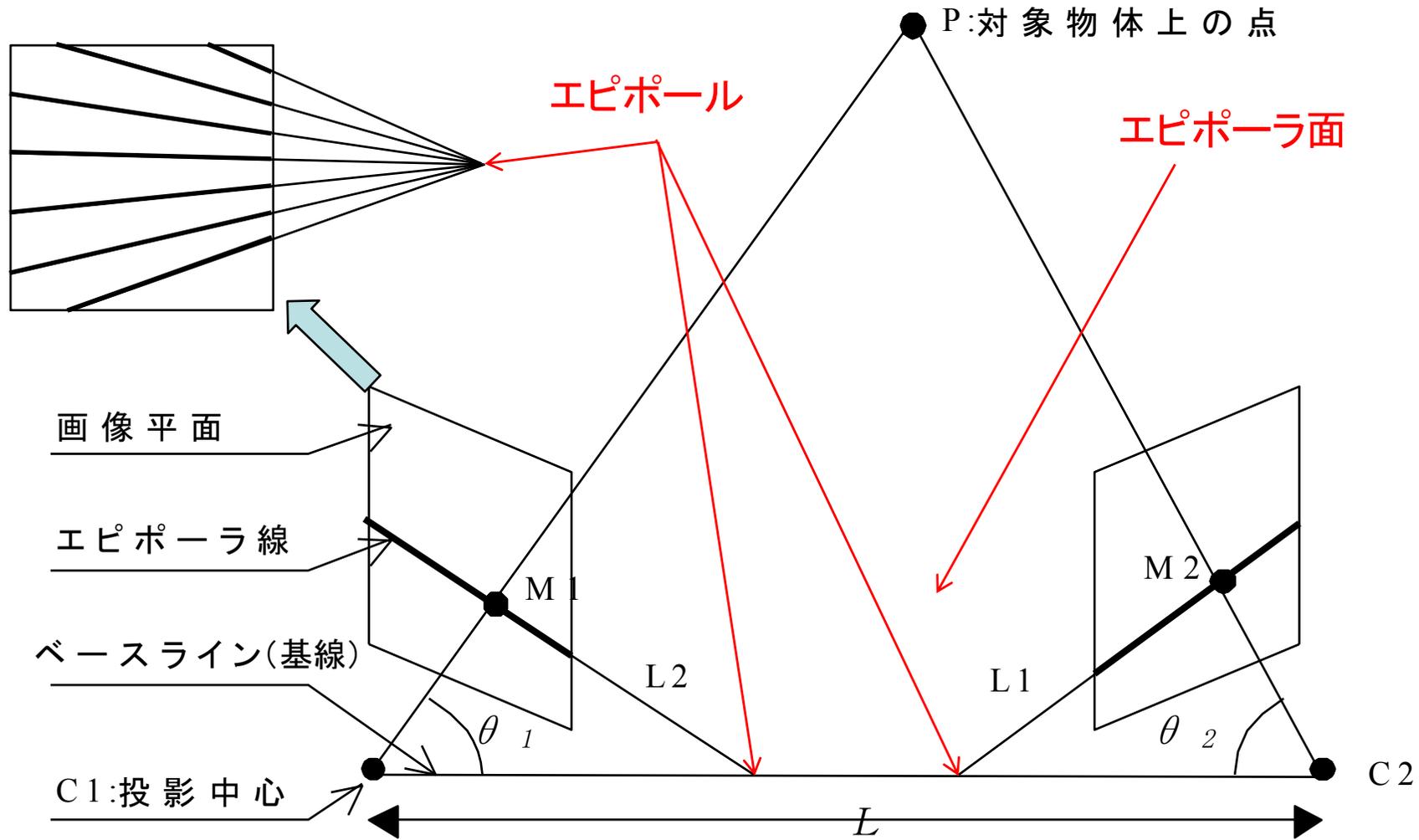
プロジェクタのモデル化

- スリット光プロジェクタは1次元表示デバイス
 - y は任意の値をとるため, y 成分を省く

$$h \begin{bmatrix} x_p \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{14} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}$$

- カメラと同様にキャリブレーション可能
どの位置のスリット光が, どの座標に到達するか

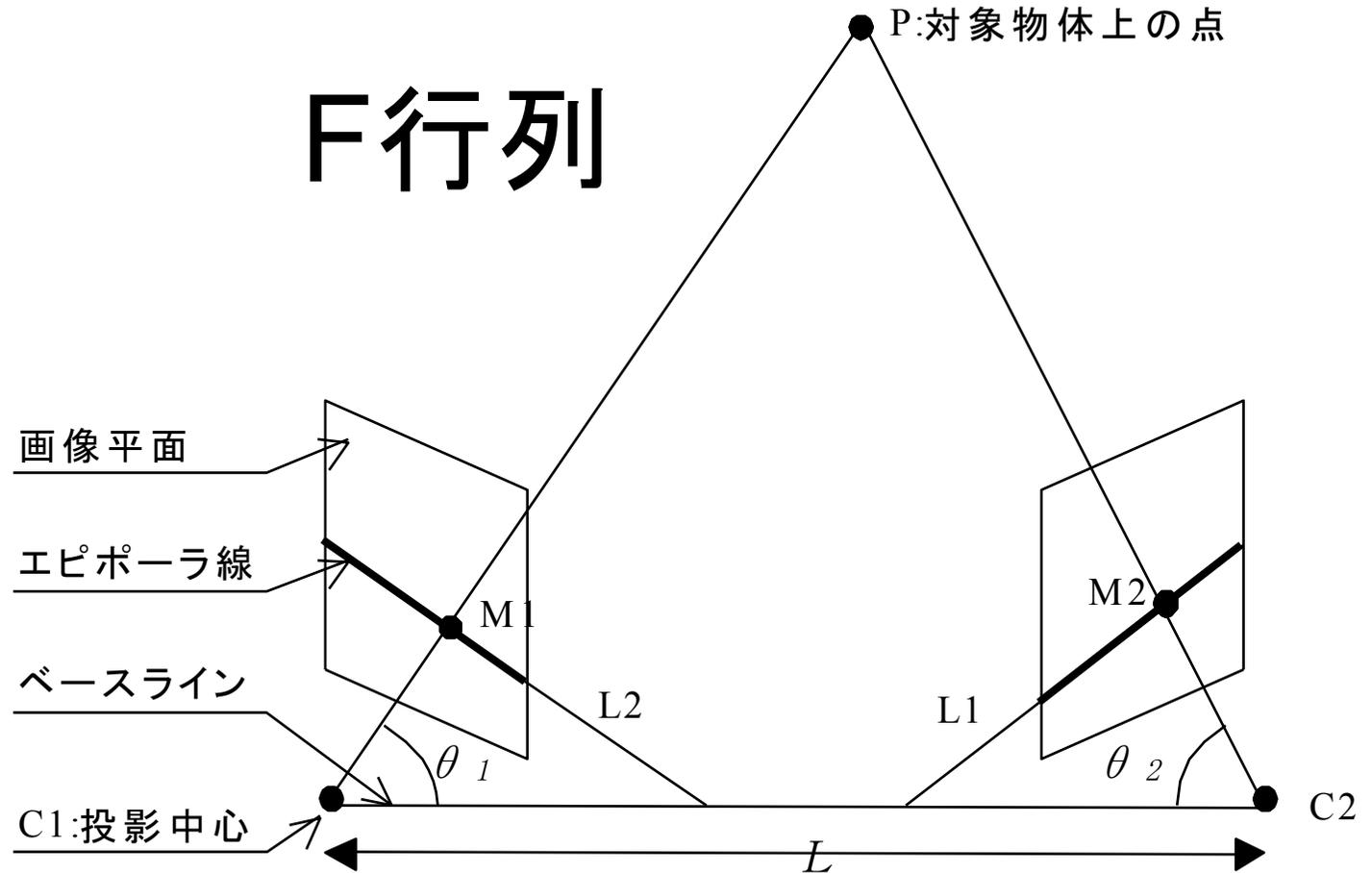
エピポーラ幾何の用語



F行列

$$m_1 = \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$m_2 = \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ 1 \end{bmatrix}$$



$$\begin{bmatrix} x_1 & y_1 & 1 \end{bmatrix} \cdot F \cdot \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ 1 \end{bmatrix} = 0$$

(x_2, y_2) を決めると $ax_1 + by_1 + c = 0$
 (x_1, y_1) を決めると $ax_2 + by_2 + c = 0$

$m_1^T F m_2 = 0$ F はカメラパラメータから算出可能