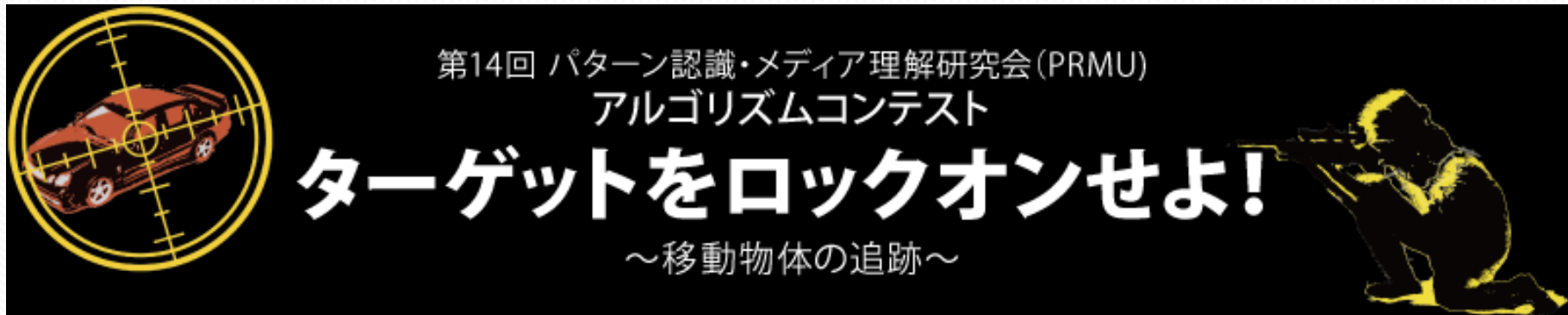


# 画像メディア工学特論(6)

3次元空間における物体とカメラの動き

# 2010年PRMUアルコン



第14回 パターン認識・メディア理解研究会 (PRMU)  
アルゴリズムコンテスト

**ターゲットをロックオンせよ!**  
～移動物体の追跡～

The banner features a red car on the left, overlaid with a yellow target reticle. On the right, a silhouette of a person is shown kneeling and aiming a rifle. The background is black with white text.

[http://www.murase.m.is.nagoya-u.ac.jp/  
alcon2010/](http://www.murase.m.is.nagoya-u.ac.jp/alcon2010/)

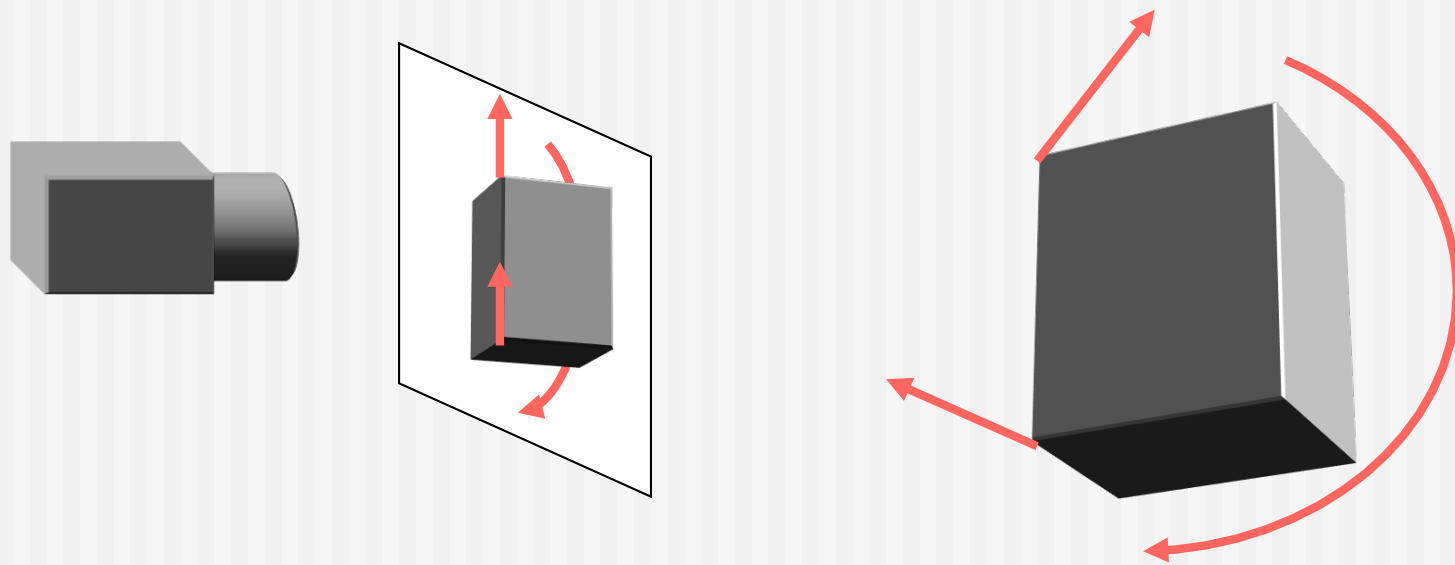
- コンテストサンプルをダウンロード, コンパイル
- パラメータを変えてどうなるか試してみる

# 今回の内容

- 3次元空間における，物体の動き，カメラの動き
    - エピポーラ拘束
    - カメラの幾何学
    - 動きの推定方法
- など

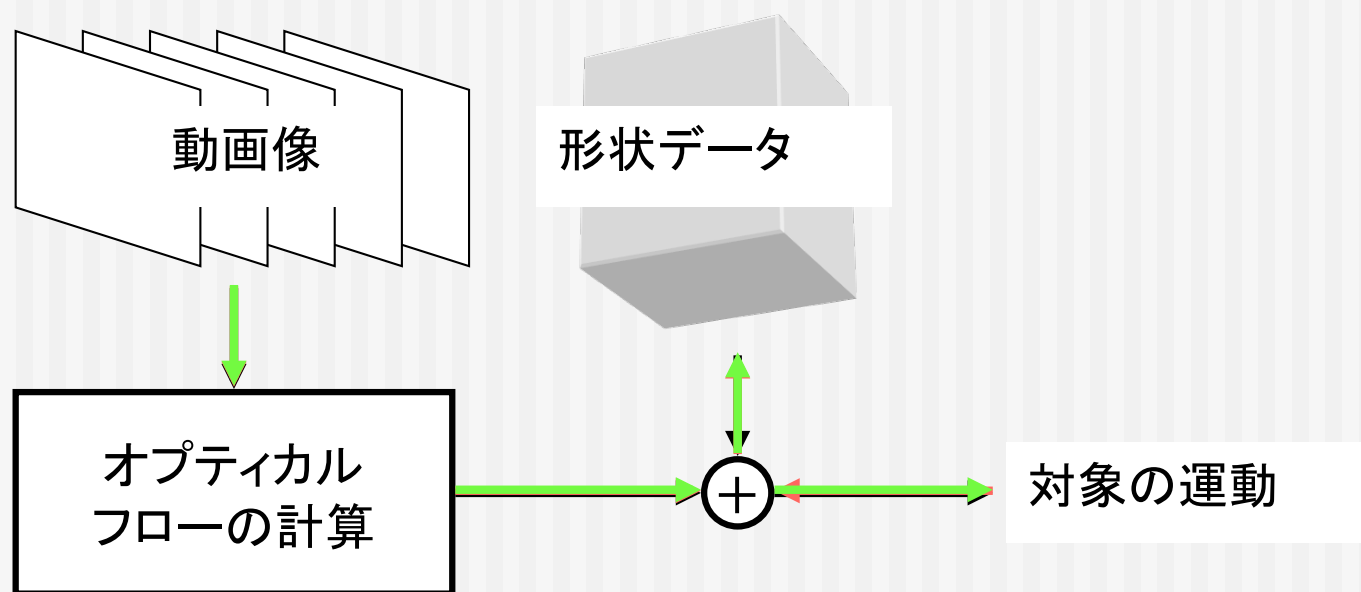
# オプティカルフロー

---



- 3次元的な動きを画像平面に投影したもの
  - 実際の物体の動きは求められない

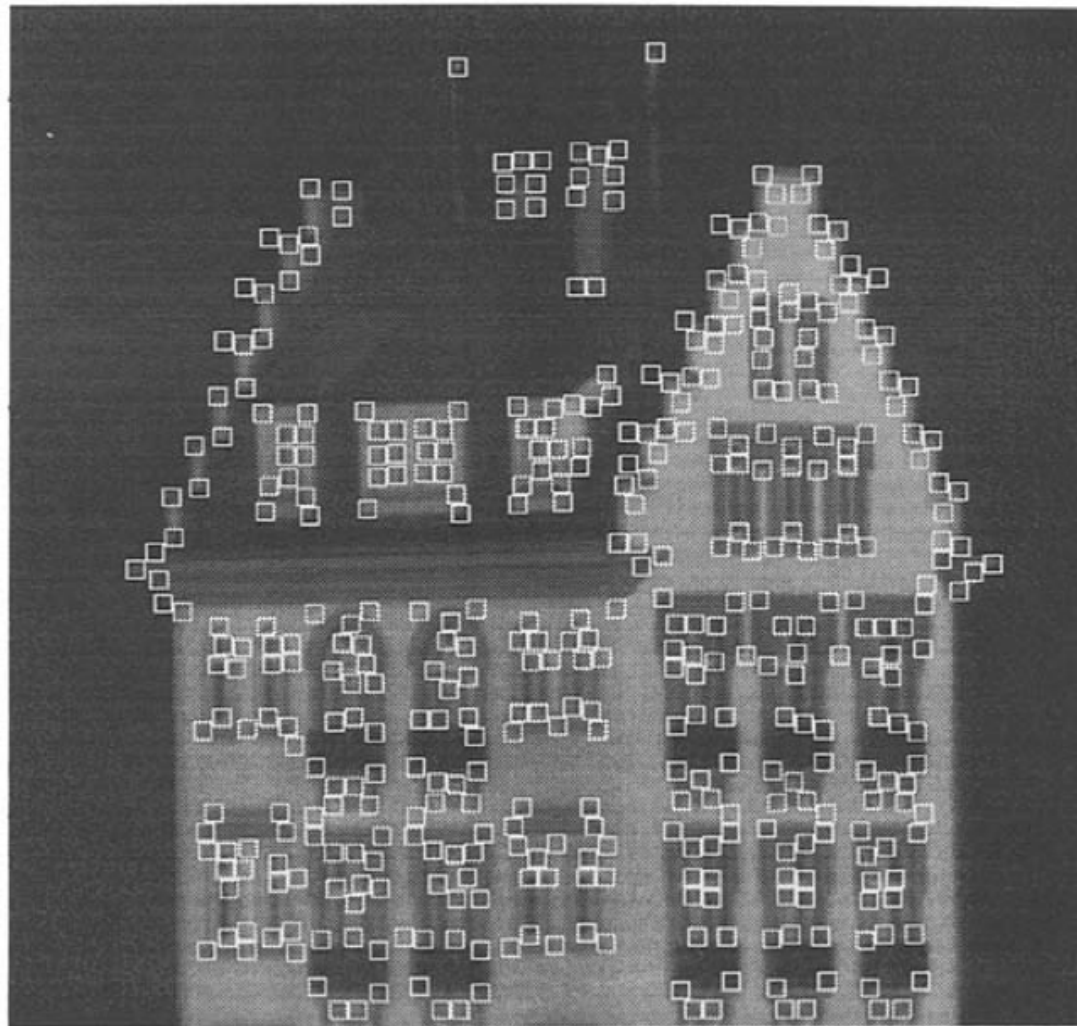
# 動画像処理の流れ



- 形状計測
- 運動計測
- 形状と運動の同時推定

# 特徴点追跡の応用

追跡され  
た特徴点



(b)

Fig. 2b. The "Hotel" stream: the 430 features selected by the automatic detection method.

Carlo Tomasi and Takeo Kanade. (November 1992.). "Shape and motion from image streams under orthography: a factorization method.". *International Journal of Computer Vision*, 9 (2): 137-154.

# 特徴点追跡の応用

推定された形状

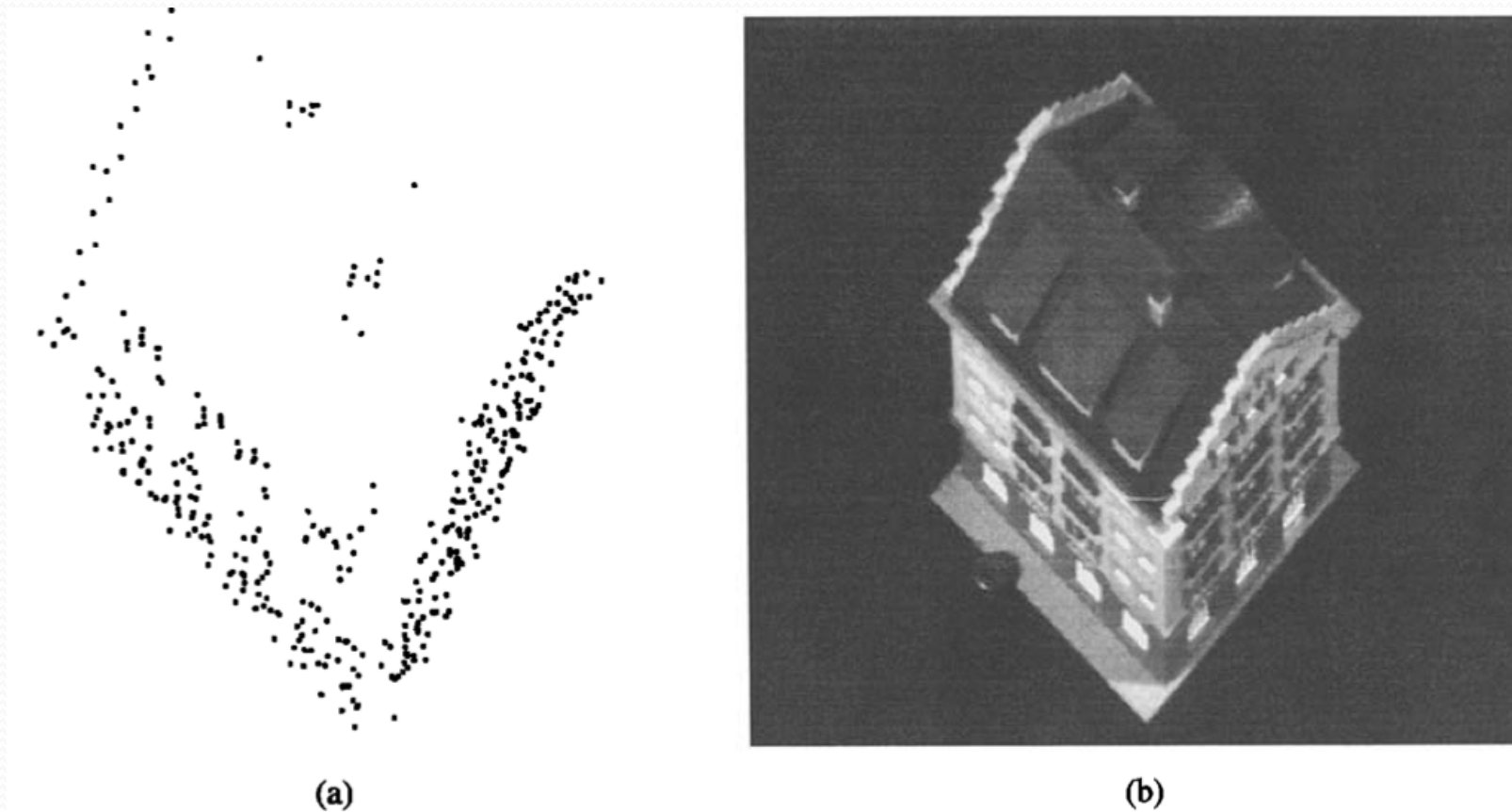


Fig. 4. Qualitative shape results for the "Hotel" stream: top view of the (a) computed and (b) actual shape.

Carlo Tomasi and Takeo Kanade. (November 1992.). "Shape and motion from image streams under orthography: a factorization method.". *International Journal of Computer Vision*, 9 (2): 137-154.

# 運動と奥行き



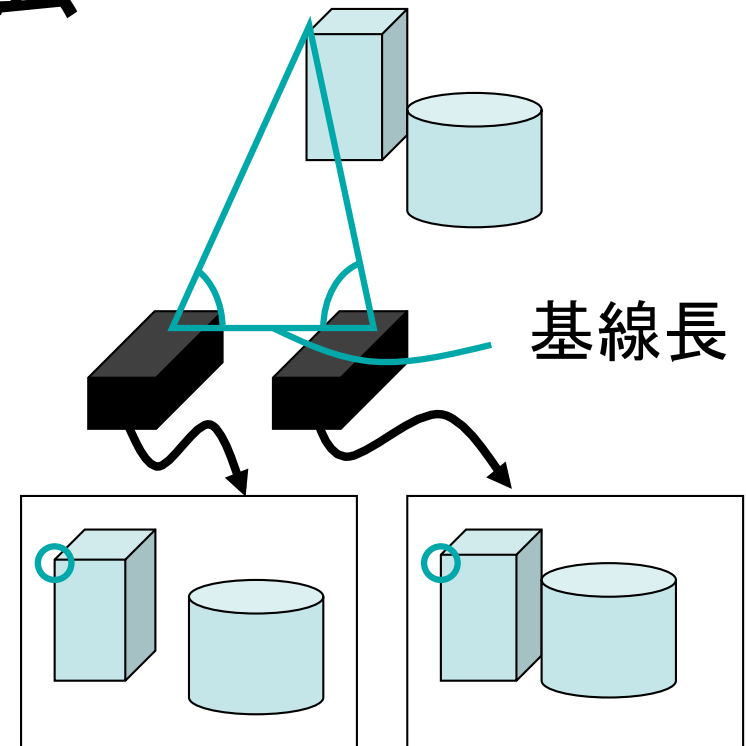
この画像では、奥の物体ほど大きく動いている



# ステレオ法

- ステレオ計測

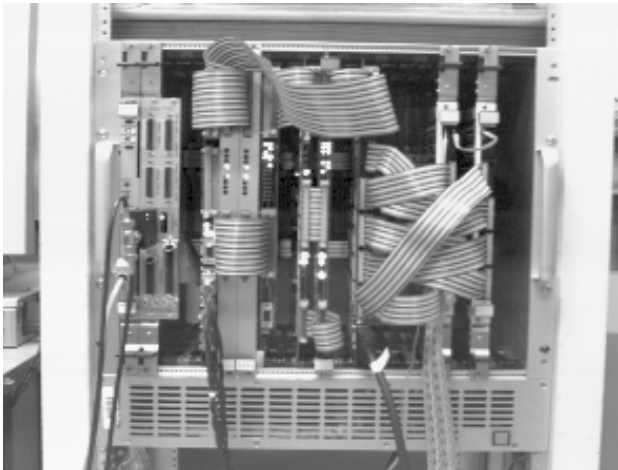
- 二つ以上の視点を使用  
(人間の両目に相当)
- 左右の画像の「ずれ」を利用  
(三角測量法)
- 太陽光・室内照明などが  
必要
- テクスチャのない平坦な部分の距離計測が困難  
例: 真っ白な壁や滑らかで曲面的な物体
- 実質的な空間分解能が低い
- 対応点探索の計算量が大きい・安定度が低い



→ハードウェアによる高速化・多眼による安定化

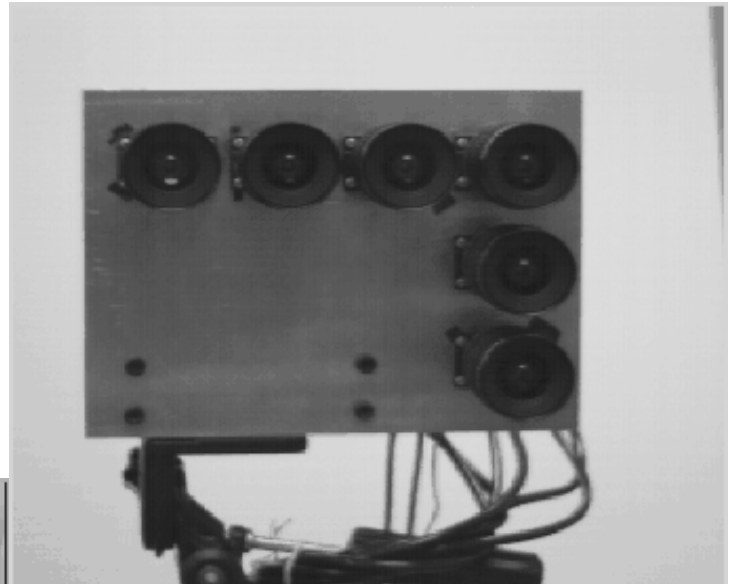
# ステレオハードウェア(1)

- Video-Rate Stereo Machine (CMU, 1995)



Example scenes and their disparity maps

T. Kanade, H. Kano and S. Kimura,  
"Development of a Video-Rate Stereo Machine,"  
Proc. of Int. Robotics and Systems Conf. (IROS'95),  
pp. 95-100, 1995.

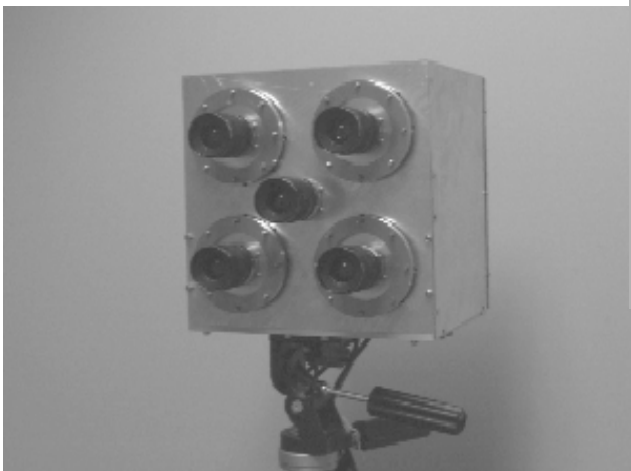


(a)



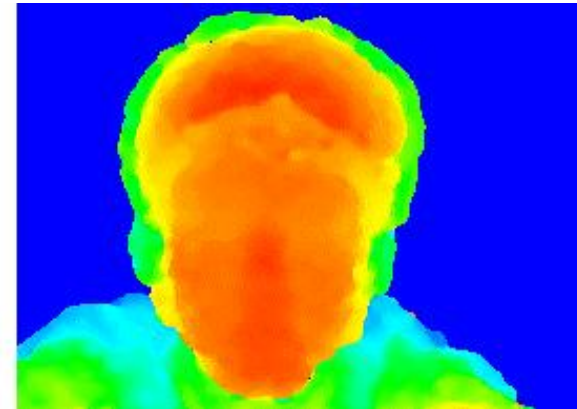
(b)

Figure 7: The CMU Video-Rate Stereo Machine Prototype System: (a) camera head; (b) processor boards

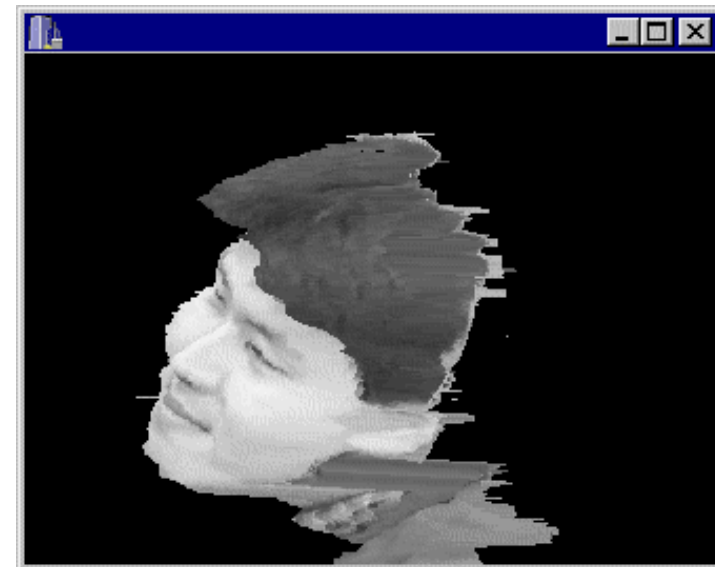
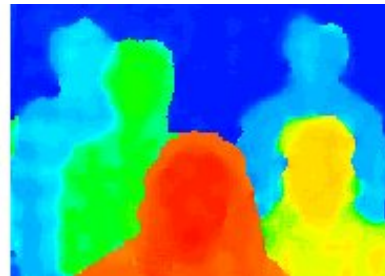


# ステレオハードウェア(2)

- コマツ  
VF<sup>2</sup>Z



9眼センサ  
280x200, 30frames/sec  
(視差20画素以内)



# ステレオハードウェア(3)

- Sony SDR-4X 頭部内蔵のステレオハード

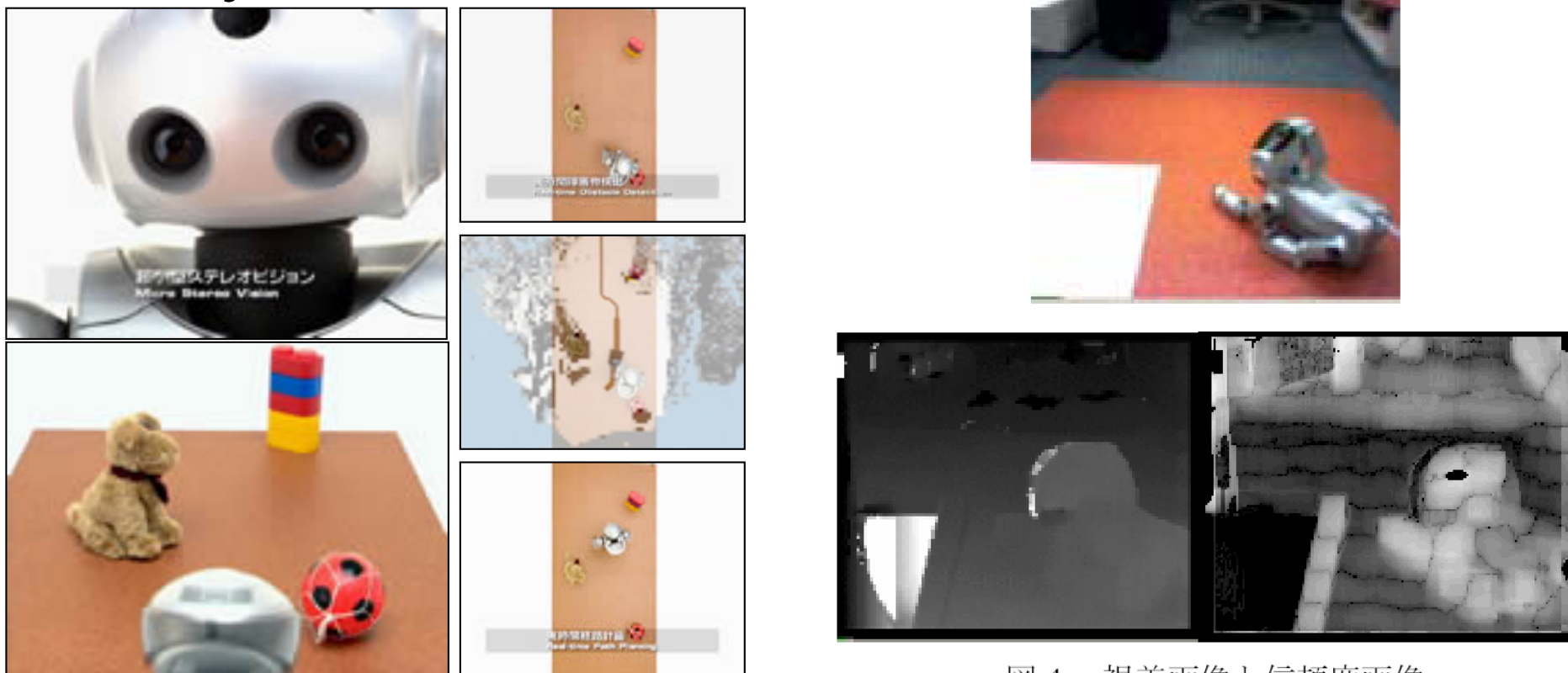
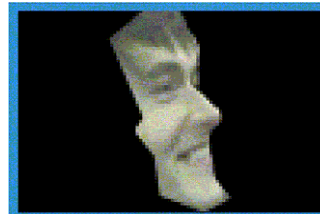
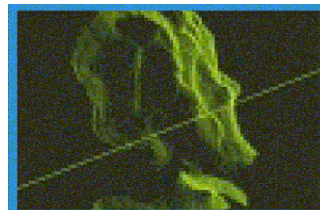
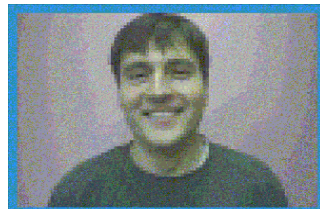
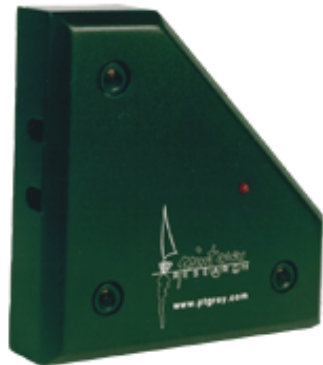


図4：視差画像と信頼度画像

- FPGA 等による構成
- 176 x 144, 25frames/sec

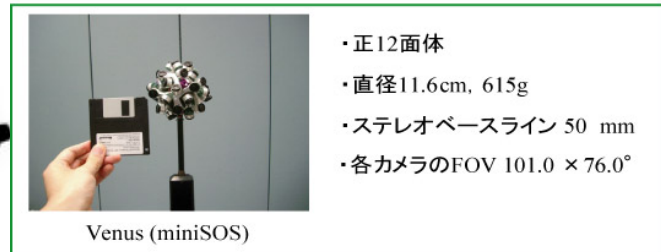
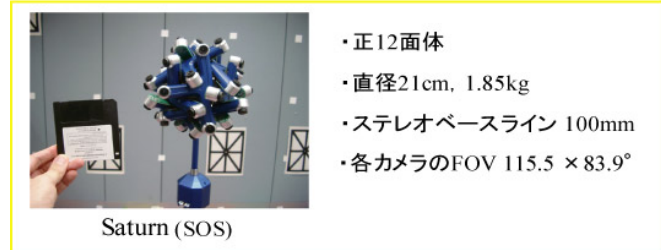
•<http://www.sony.co.jp/SonyInfo/News/Press/200203/02-0319/>  
•芦ヶ原隆之, 佐部浩太郎, "二足歩行ロボット用小型ステレオビジョンとそのアプリケーションの開発", 情処研報 2003-CVIM-136, pp.43-50, 2003.

# その他のステレオ用ハードウェア



Digiclops (Pointgrey Research)

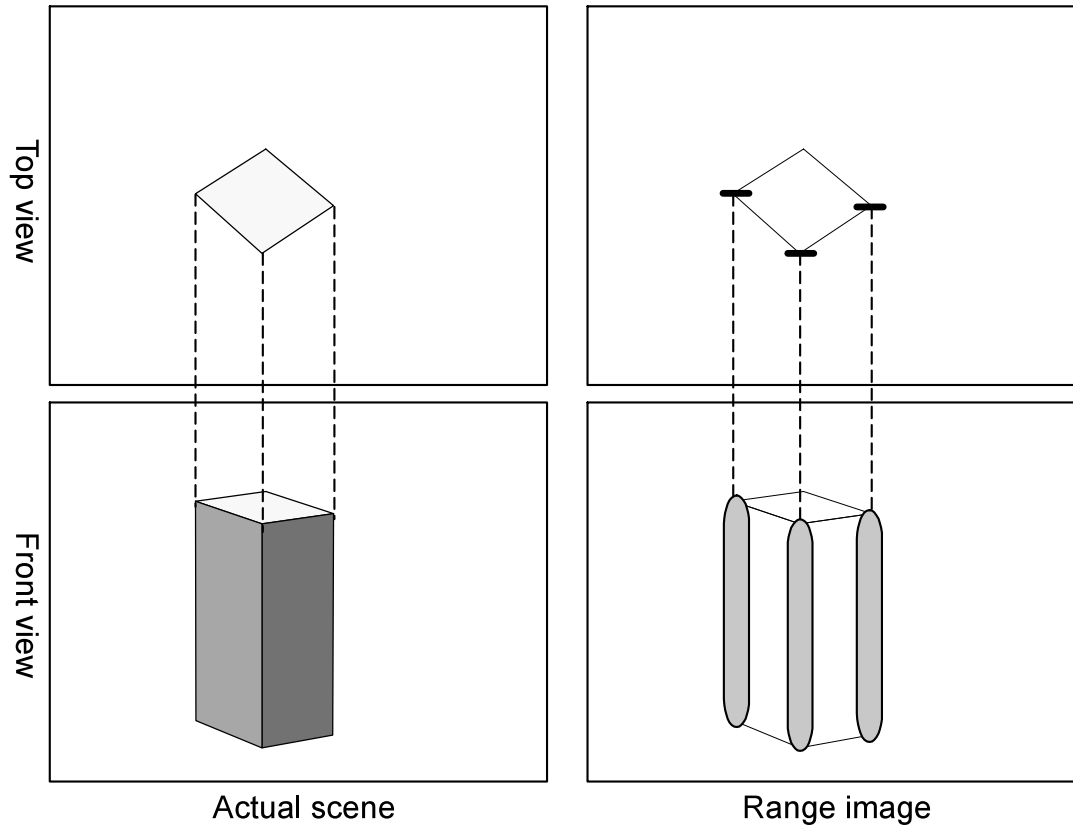
<http://www.ptgrey.com/>



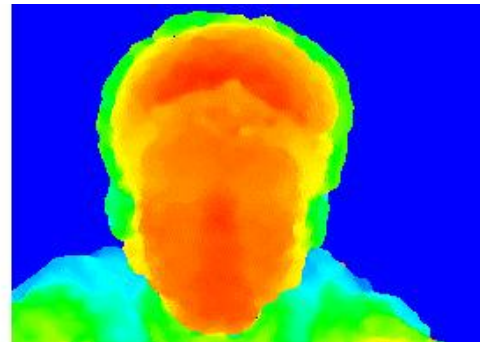
SOS (Stereo Omni directional System)  
(岐阜県地域結集型共同研究事業 HOIP)

棚橋英樹, 山本和彦, 桑島茂純, 丹羽義典,  
"ステレオ全方向画像システム(SOS)の開発",  
第6回画像センシングシンポジウム講演論文集,  
pp.145-150, Jun. 2000.

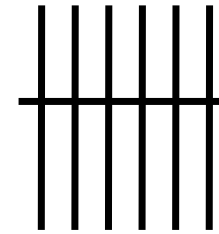
# 受動型ステレオ法の問題点



- テンプレートサイズに関するトレードオフ
  - テンプレート大 解像度の低下
  - テンプレート小 対応付けの不安定化

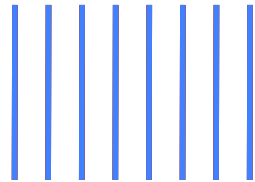
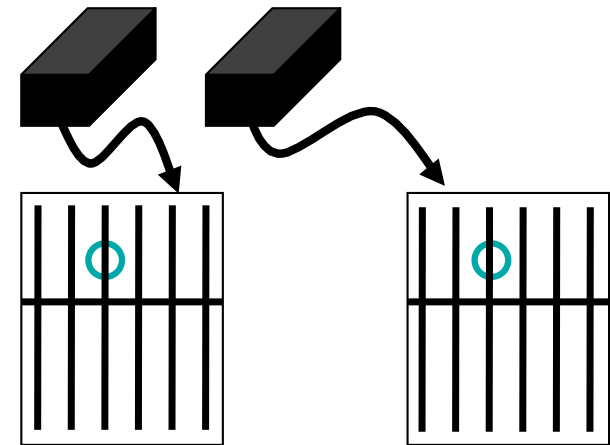


# 多眼ステレオ



- 対応点問題

- 縞模様では、対応点がわかりにくい  
(よく似た点が複数ある)  
→ 様々なカメラの間隔を用いる
- ベースラインに並行な直線は対応点が決められない  
→ カメラのベースラインの方向を様々な増やす



→ ハードウェアによる高速化・多眼による安定化

# マルチベースラインステレオ

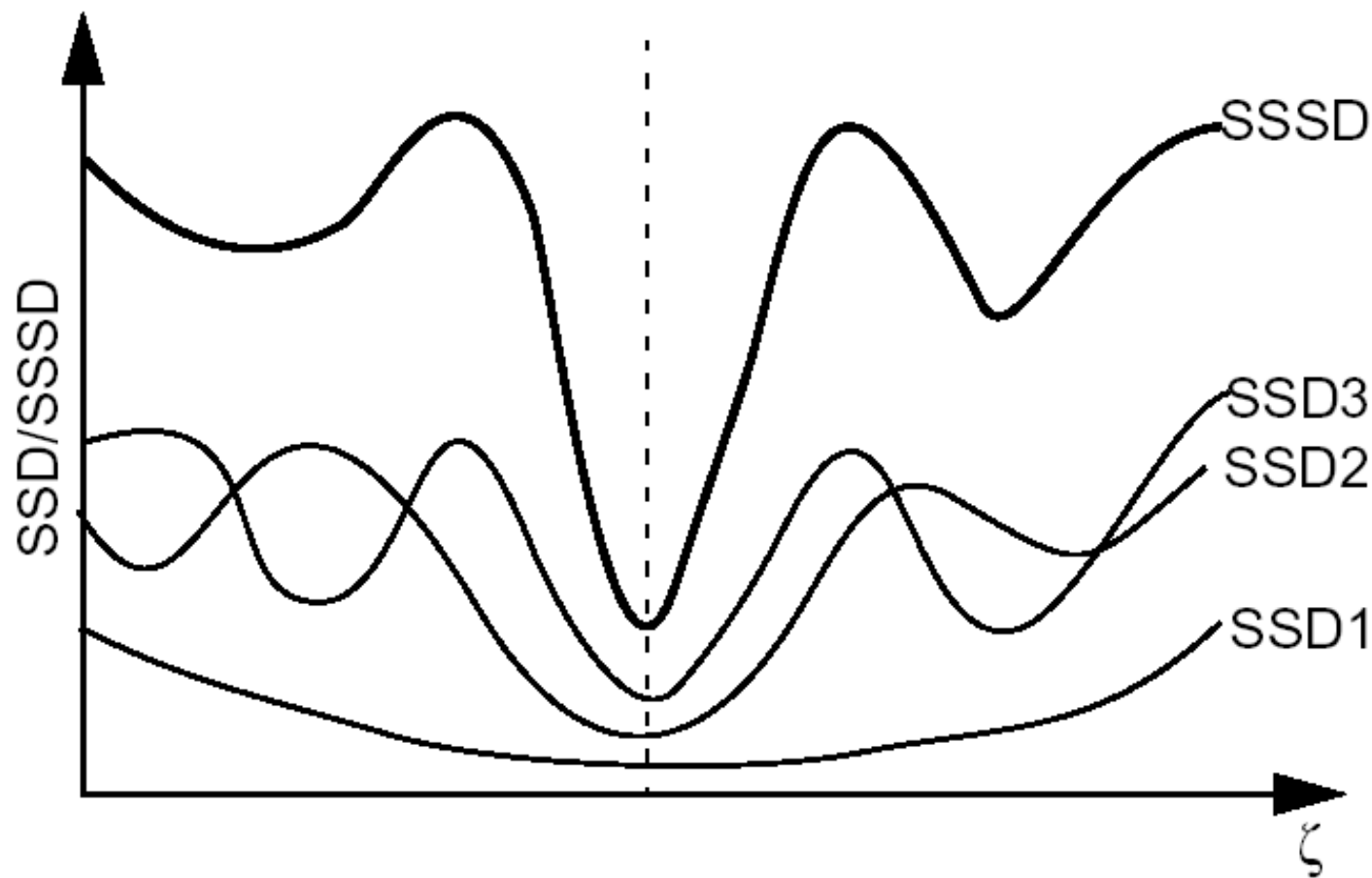


Figure 1: SSD and SSSD functions

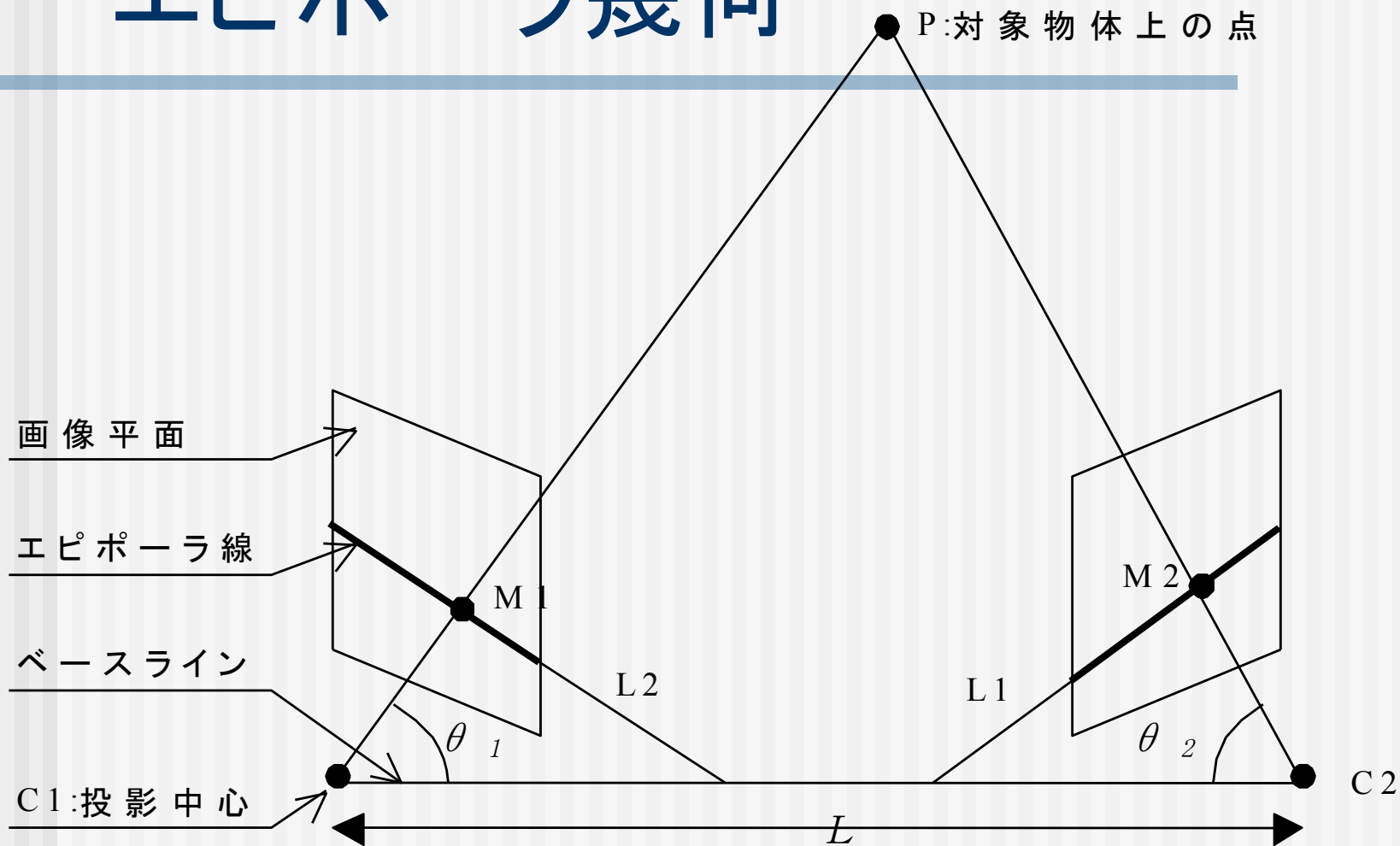
- 視差の合成による誤対応の抑制

M. Okutomi and T. Kanade, "A multiple-baseline stereo," IEEE Trans. PAMI 15(4), pp. 353-363, 1993.

SSSD = Sum of Sum of Squared Difference

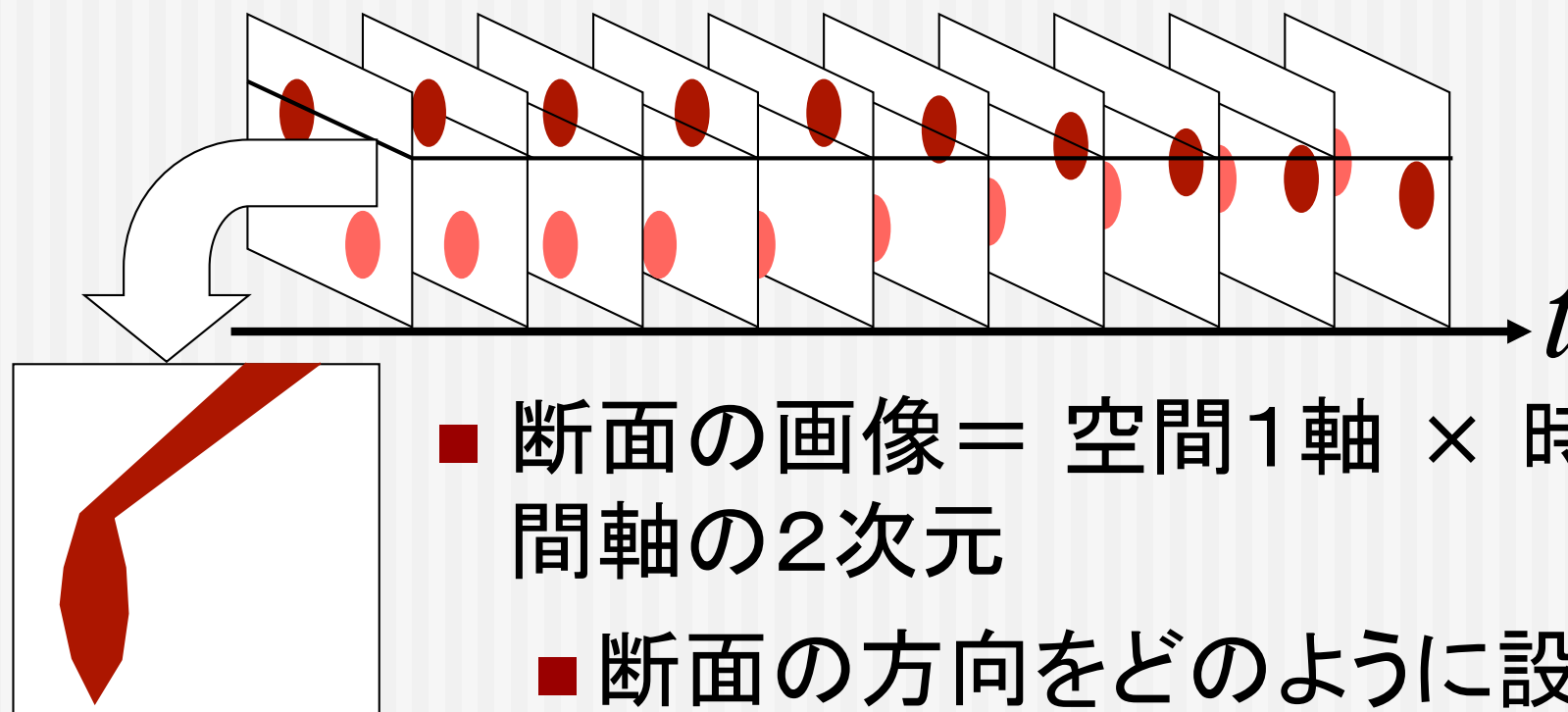


# エピポーラ幾何



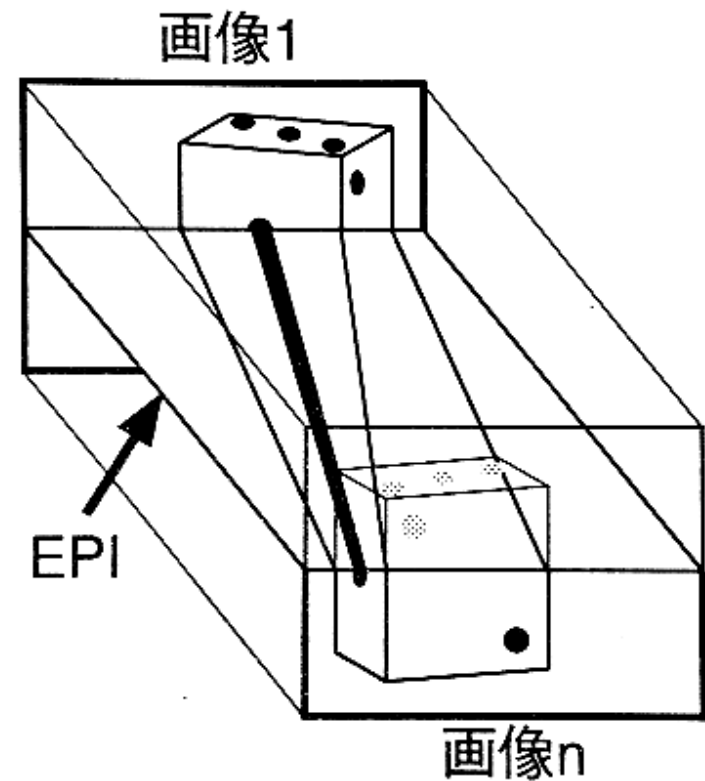
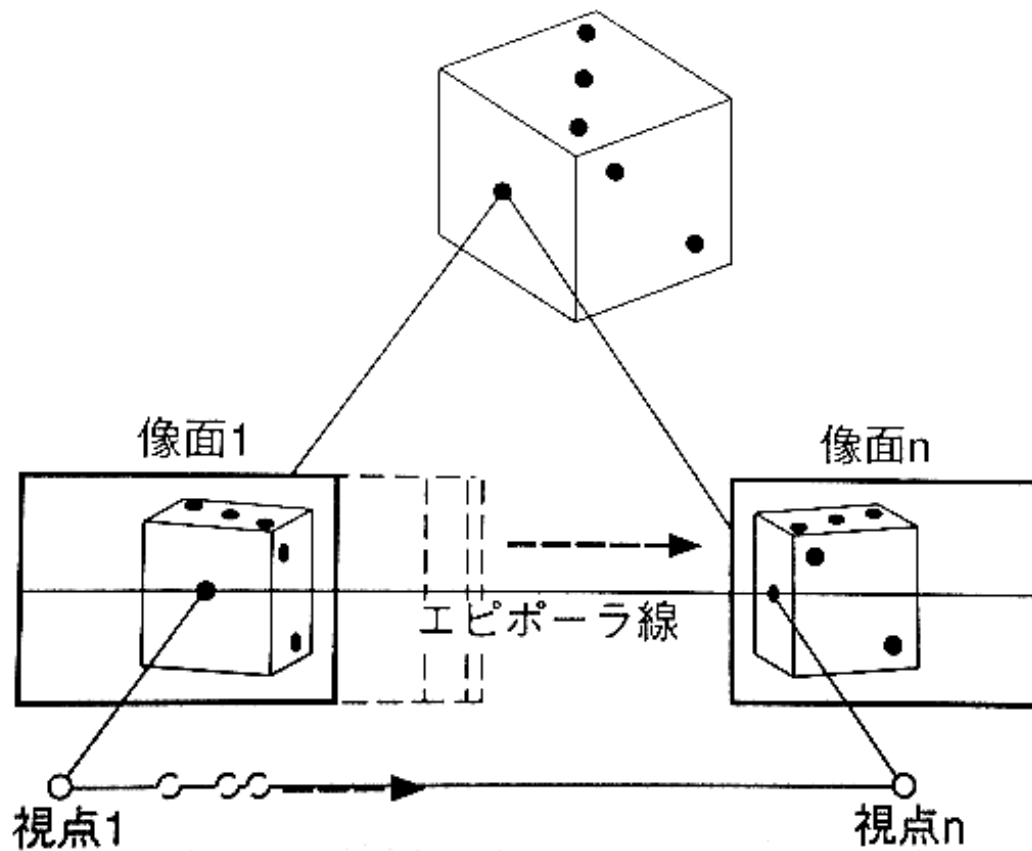
# 時空間画像解析

- 動画像 =  $(x,y)$ 空間軸  $\times$  時間軸の三次元



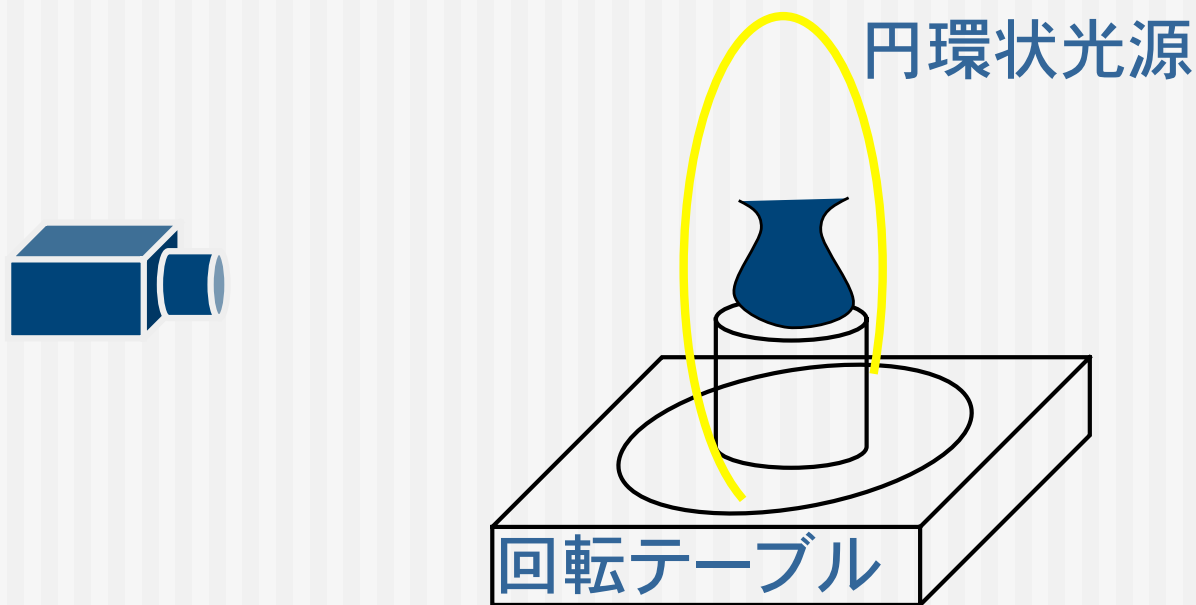
- 断面の画像 = 空間1軸  $\times$  時間軸の2次元
  - 断面の方向をどのように設定するか？

# エピポーラ画像解析

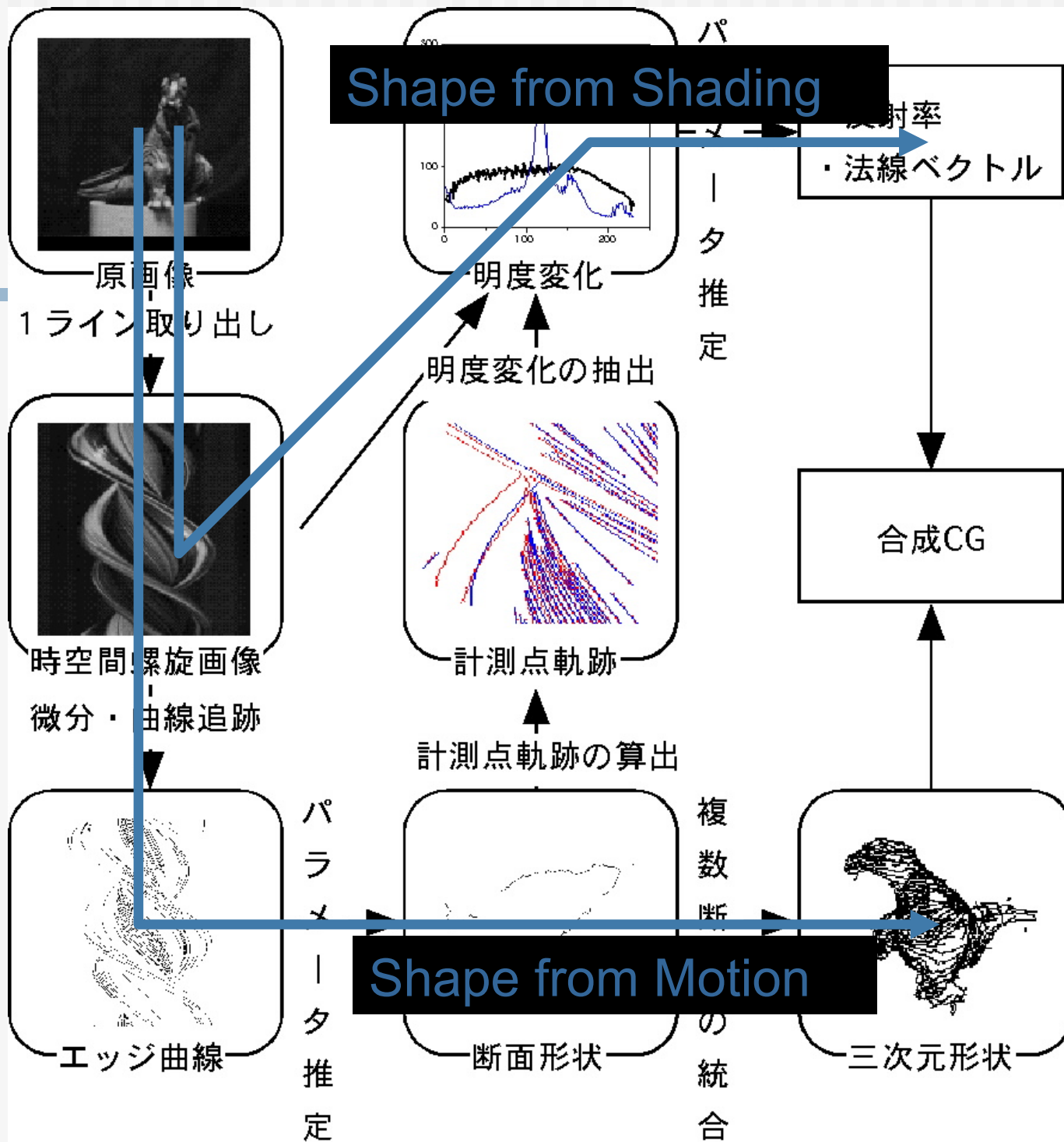


視点が直線上を運動するとき、**エピポーラ面が不動**  
→同一エピポーラ面上の像を集めて処理

# 対象物体の回転による形状と反射率の同時計測 (1)

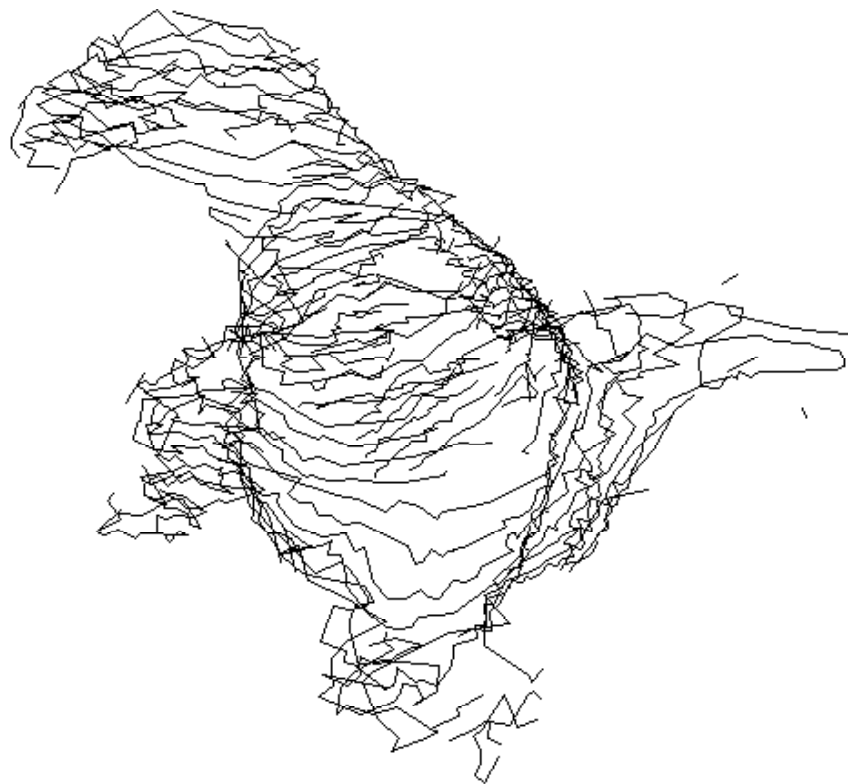


- 既知運動・既知光源のもとで形状, 反射率, 法線ベクトルを同時計測



対象物体の回転による形状と反射率の同時計測 (3)

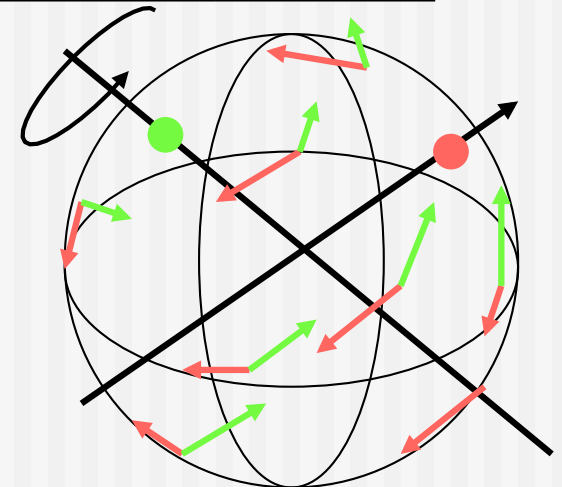
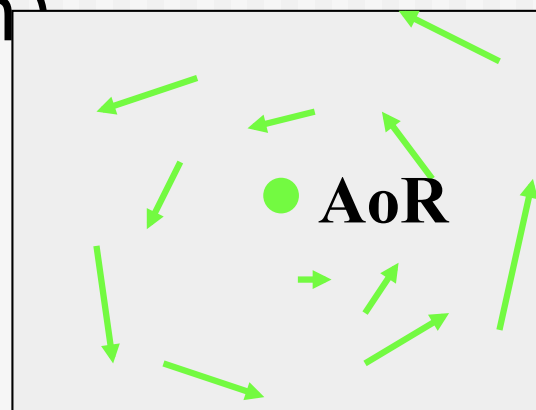
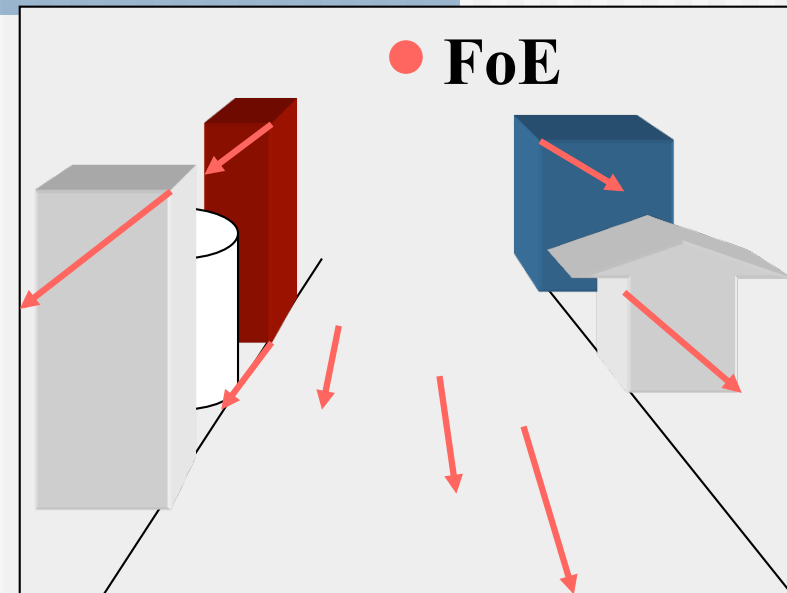
## 対象物体の回転による形状と反射率の同時計測 (4)



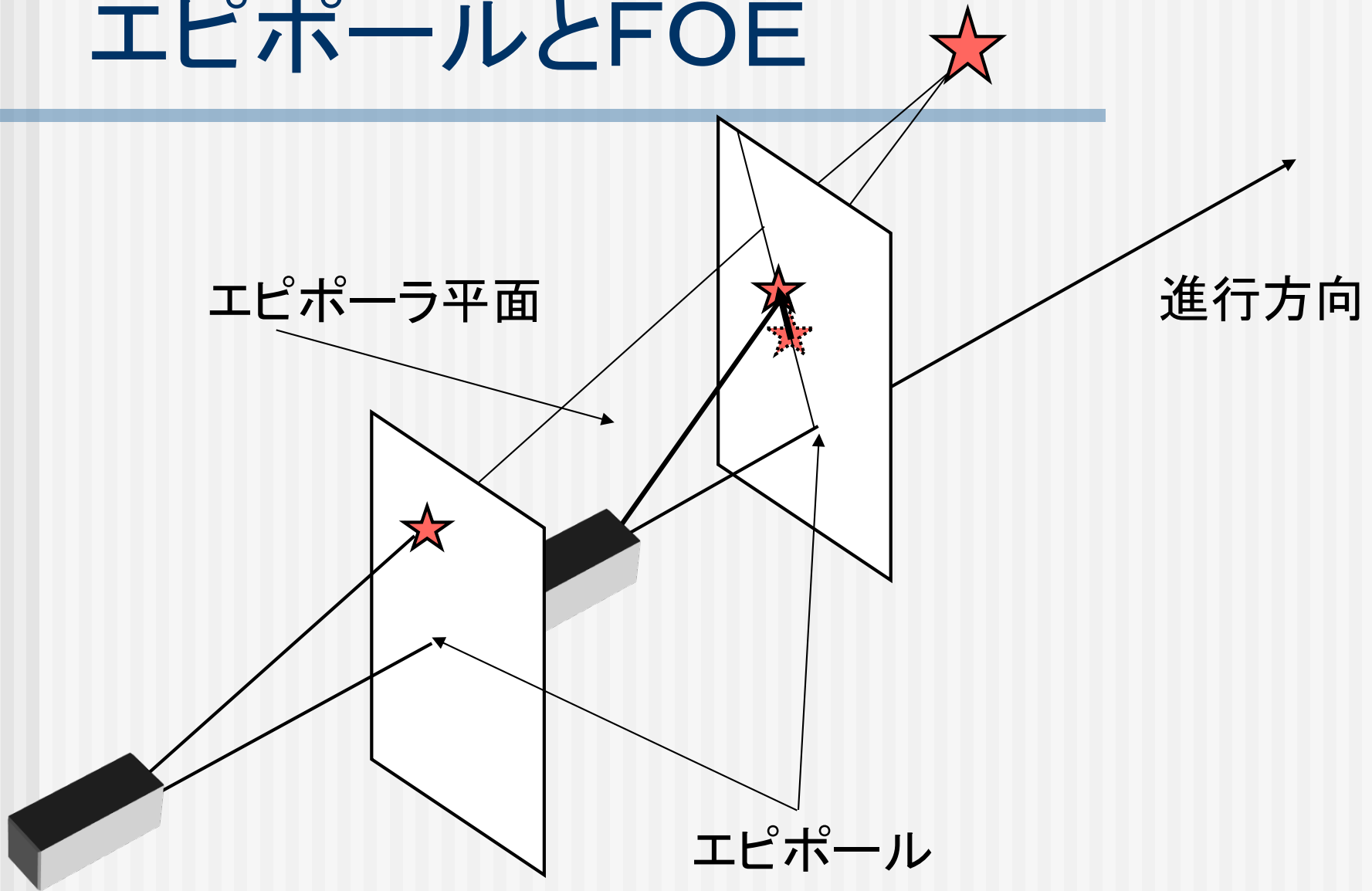
- 計測対象と復元された三次元形状

# オプティカルフローとFoE/AoR

- オプティカルフローから進行方向が計算可  
(像上の進行方向 = Focus of Expansion)
- 回転についても同様  
(Axis of Rotation)
- 両者が混合していても分析可能



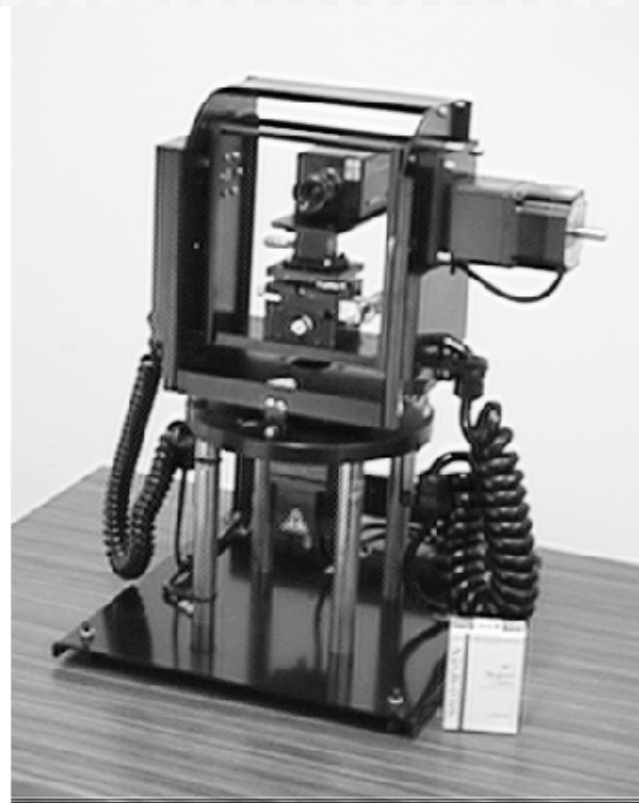
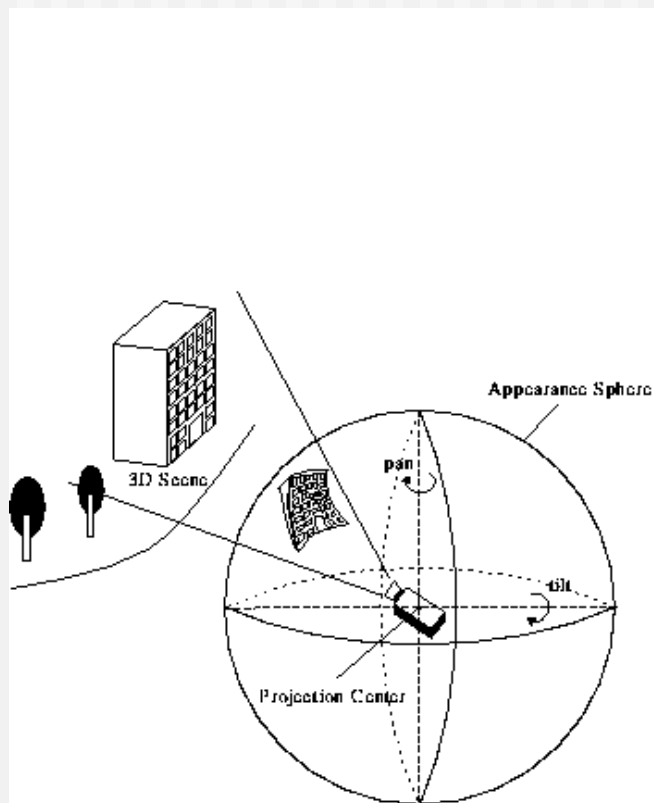
# エピソードとFOE





# AOR と視点固定型カメラ

- カメラの回転のみ → 視差が生じない
  - 得られる画像が変形・移動するだけ



# 視点固定型カメラの利用



a) Projected image



a) Projected image



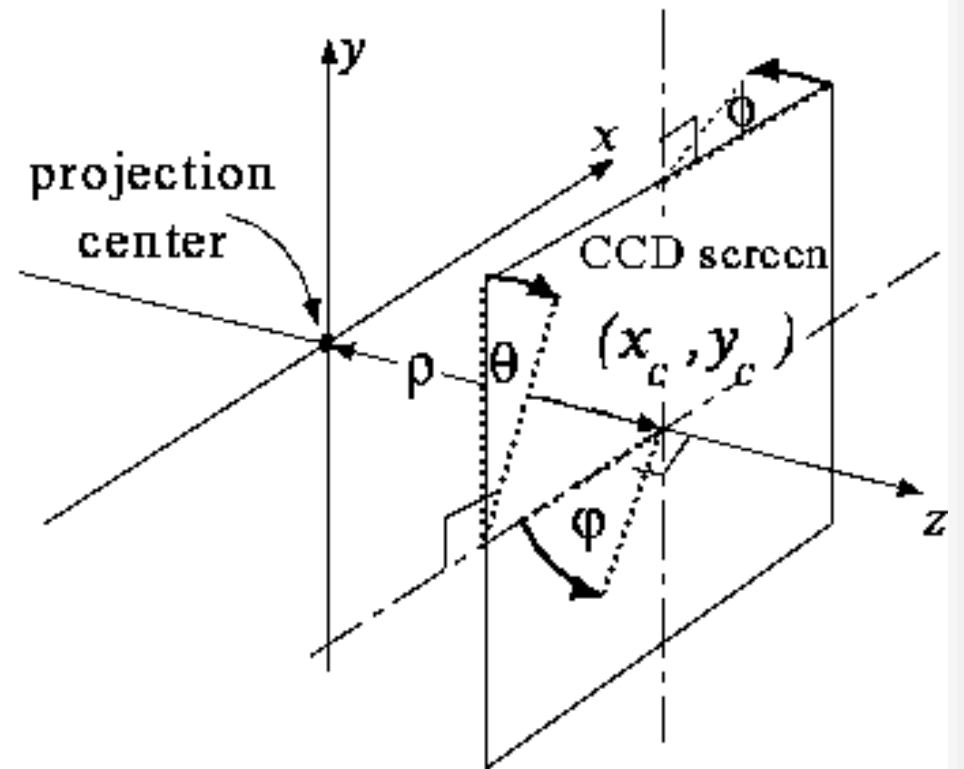
b) Gray-level difference in overlapped areas



b) Gray-level difference in overlapped areas

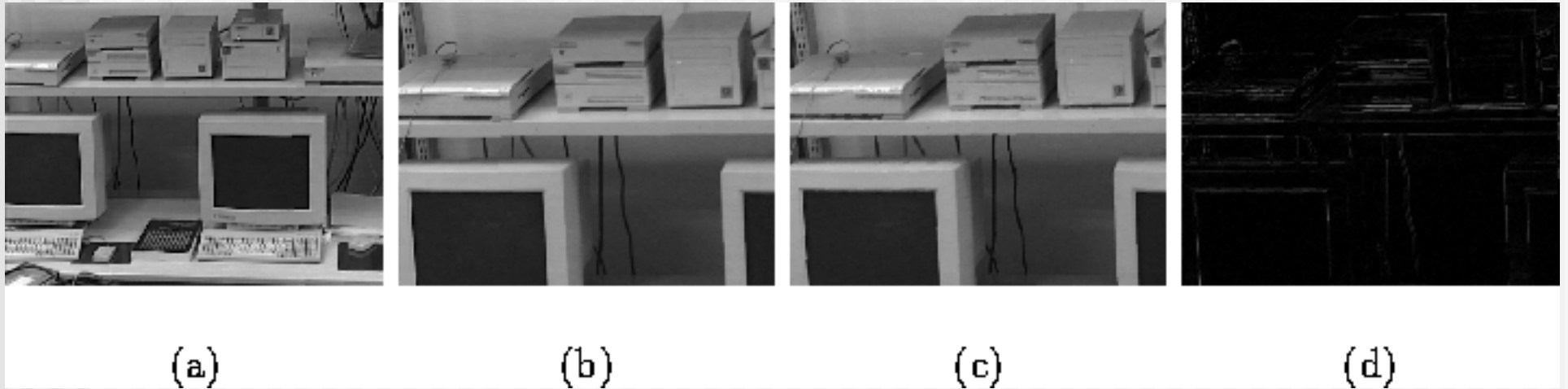
- 画像のずれがなくなるように張り合わせ

# 市販のパン・チルト・ズームカメラ



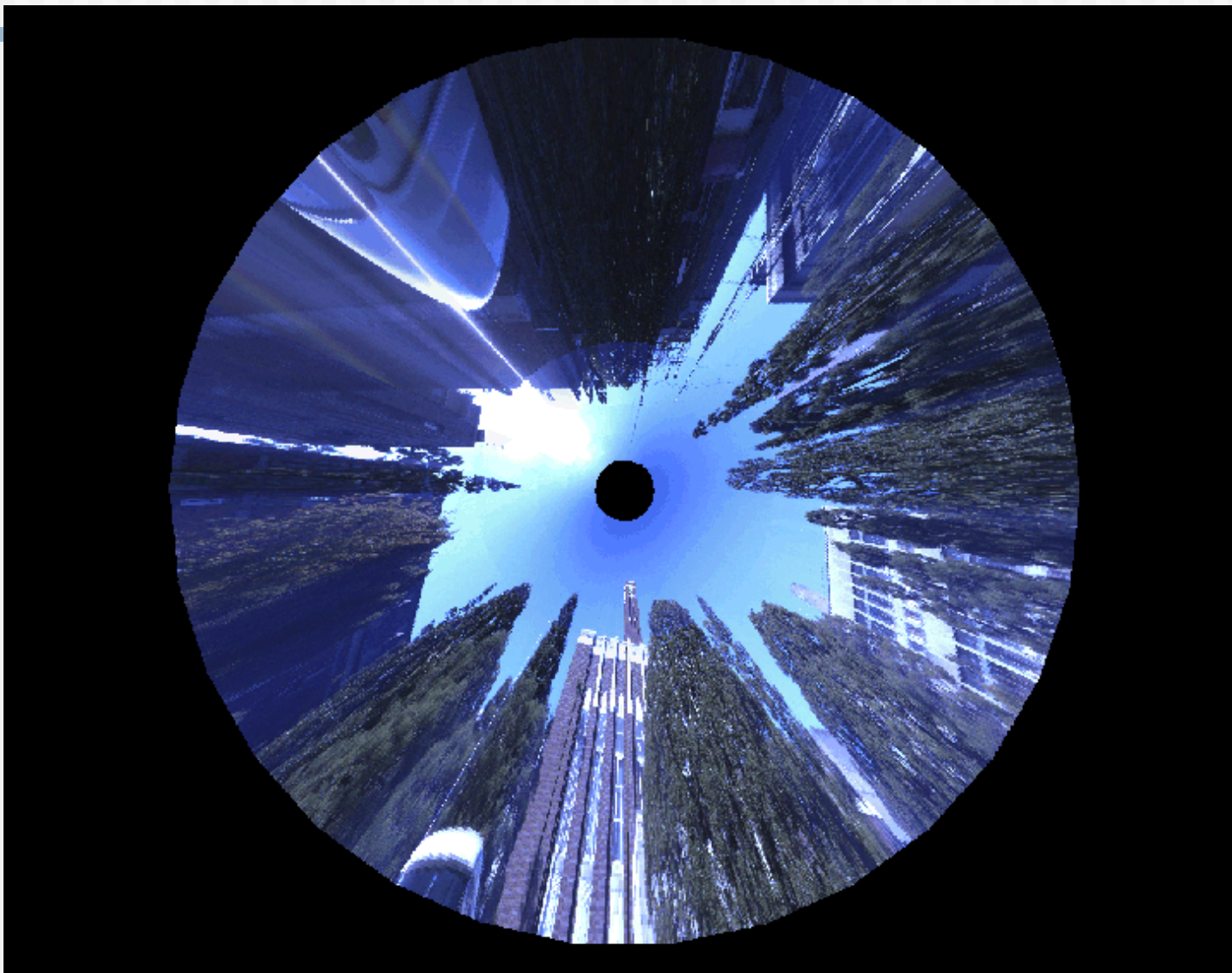
- Sony EVI-G20 は視点固定型に近い

# 合成画像の比較



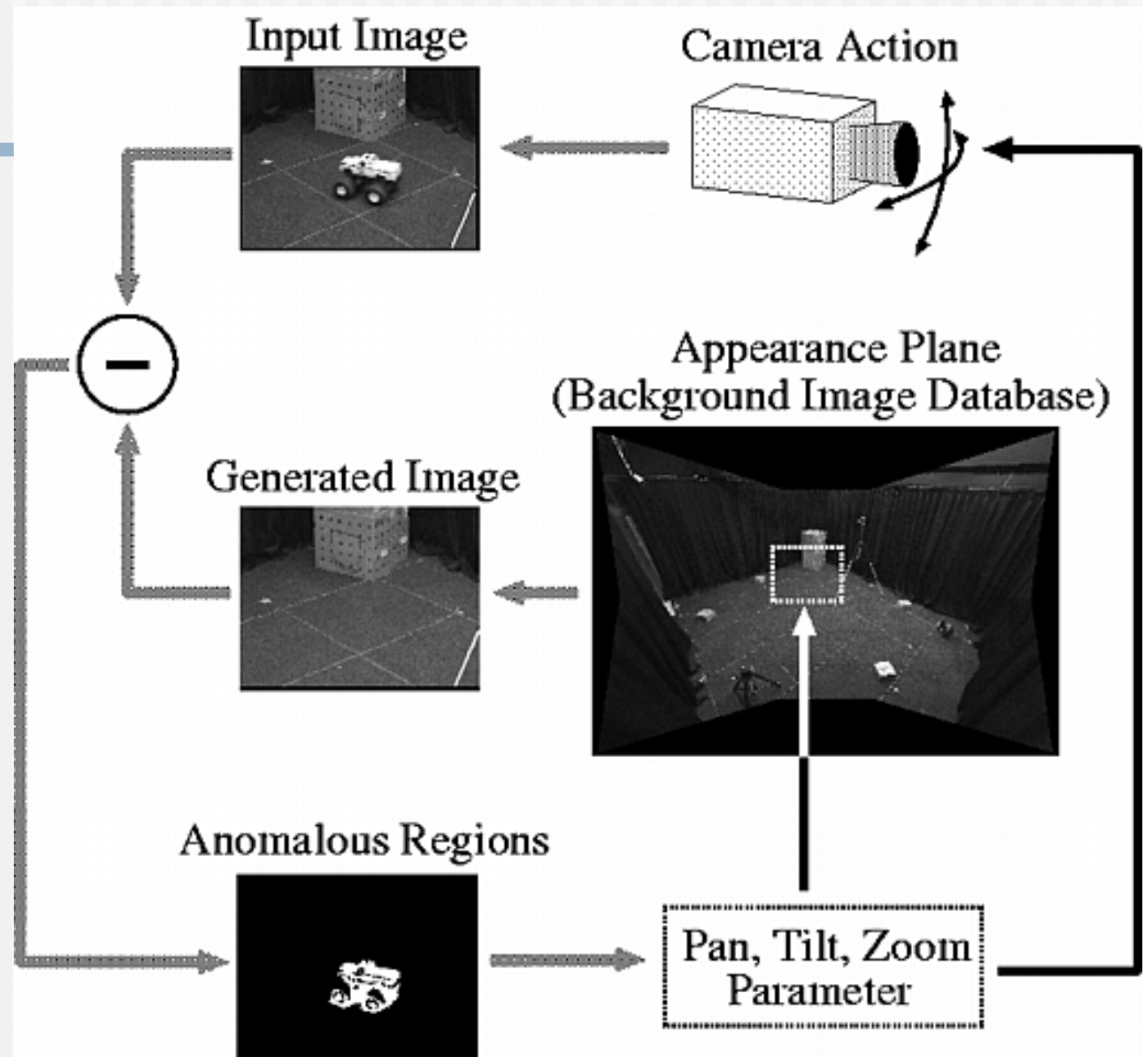
- 入力画像と合成画像の差はわずか

# 視点固定型カメラの応用



# 視点固定カメラを用いた物体追跡

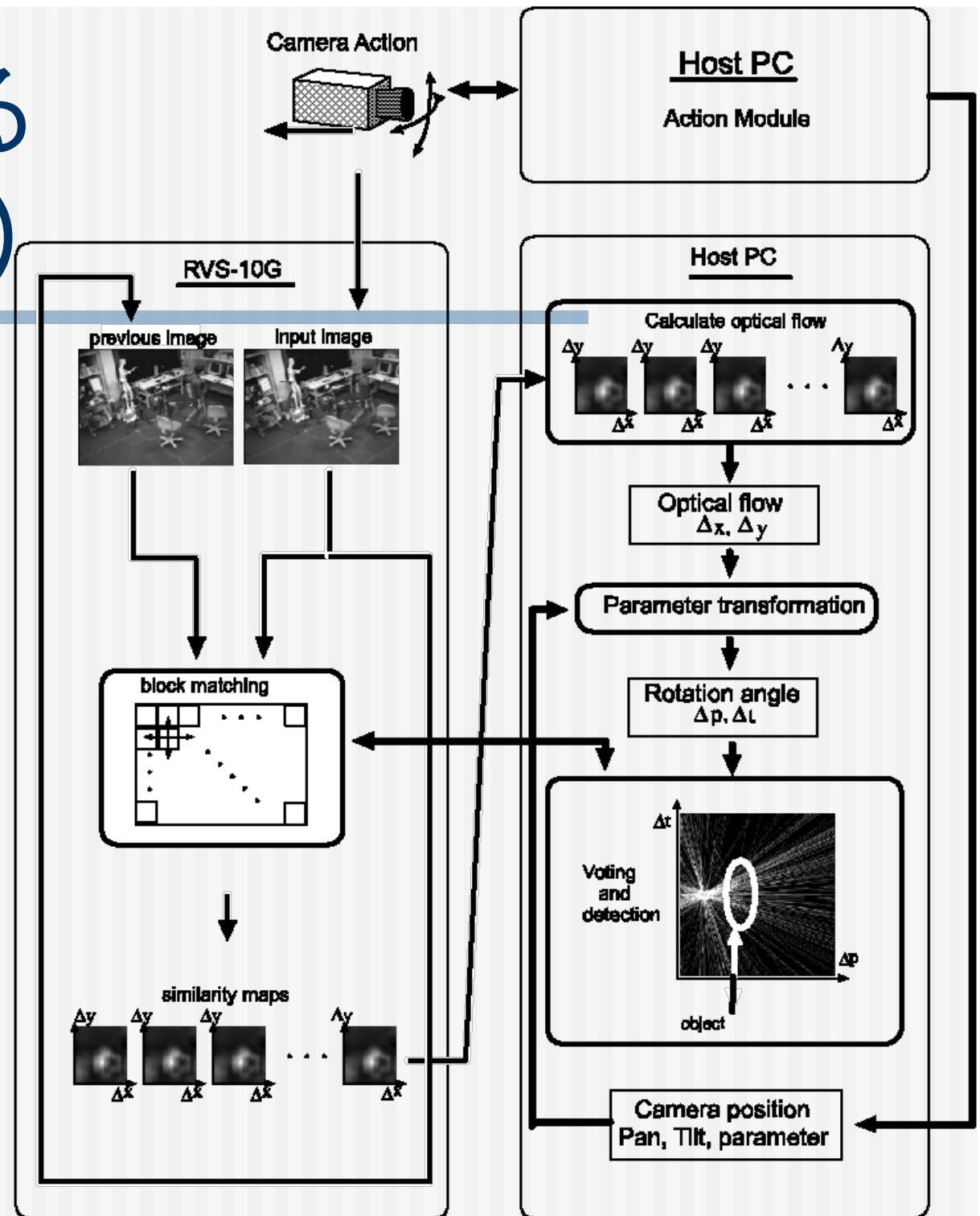
- 合成画像を用いた背景差分処理



# 視点固定による動物体追跡(2)

- フロー解析による動物体の抽出

Real-Time Object Tracking



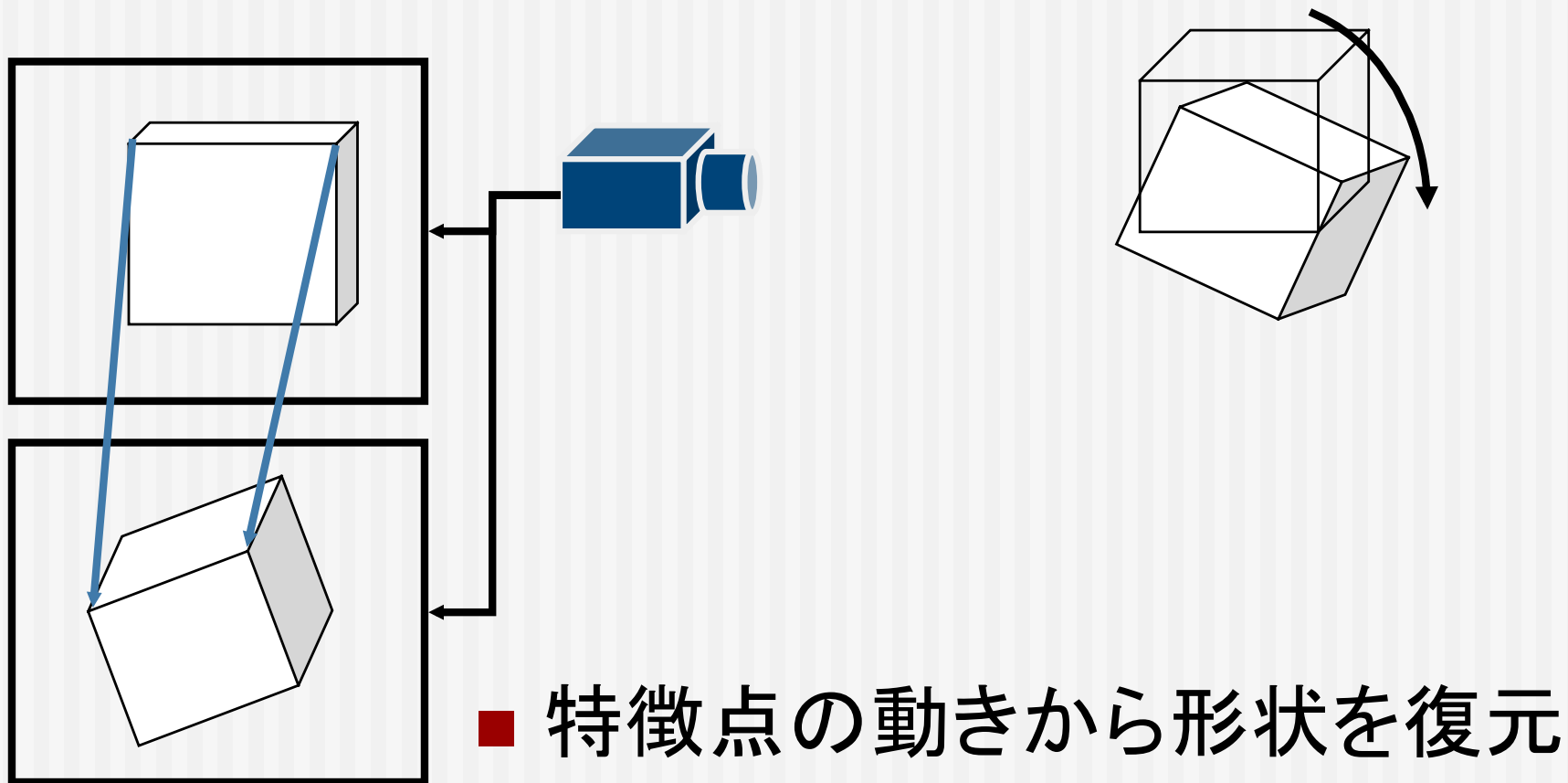
# 勾配法に関する研究

## 鏡面物体の位置・姿勢の追跡

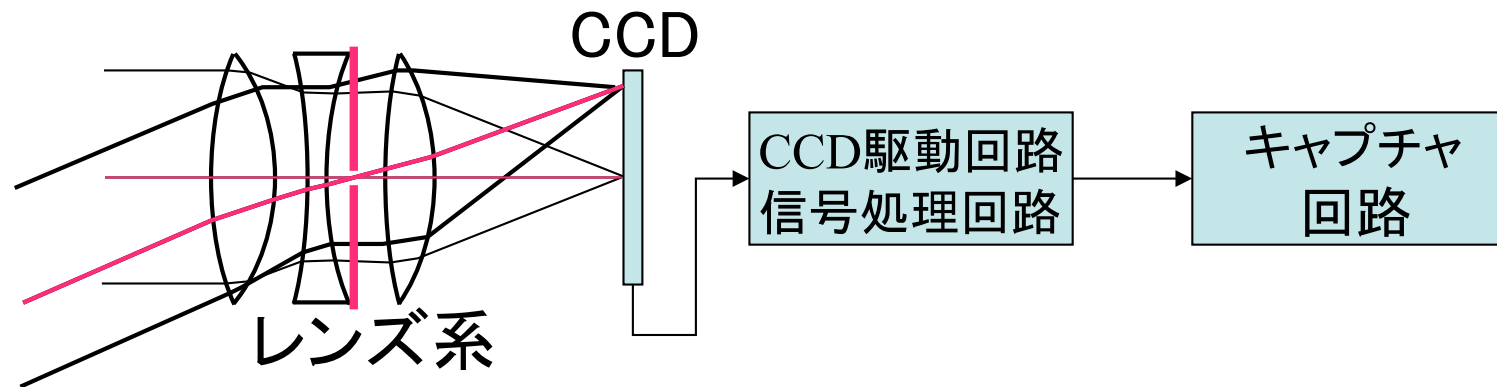
森谷 貴行 日浦 慎作 佐藤 宏介



# Shape from Motion (1)

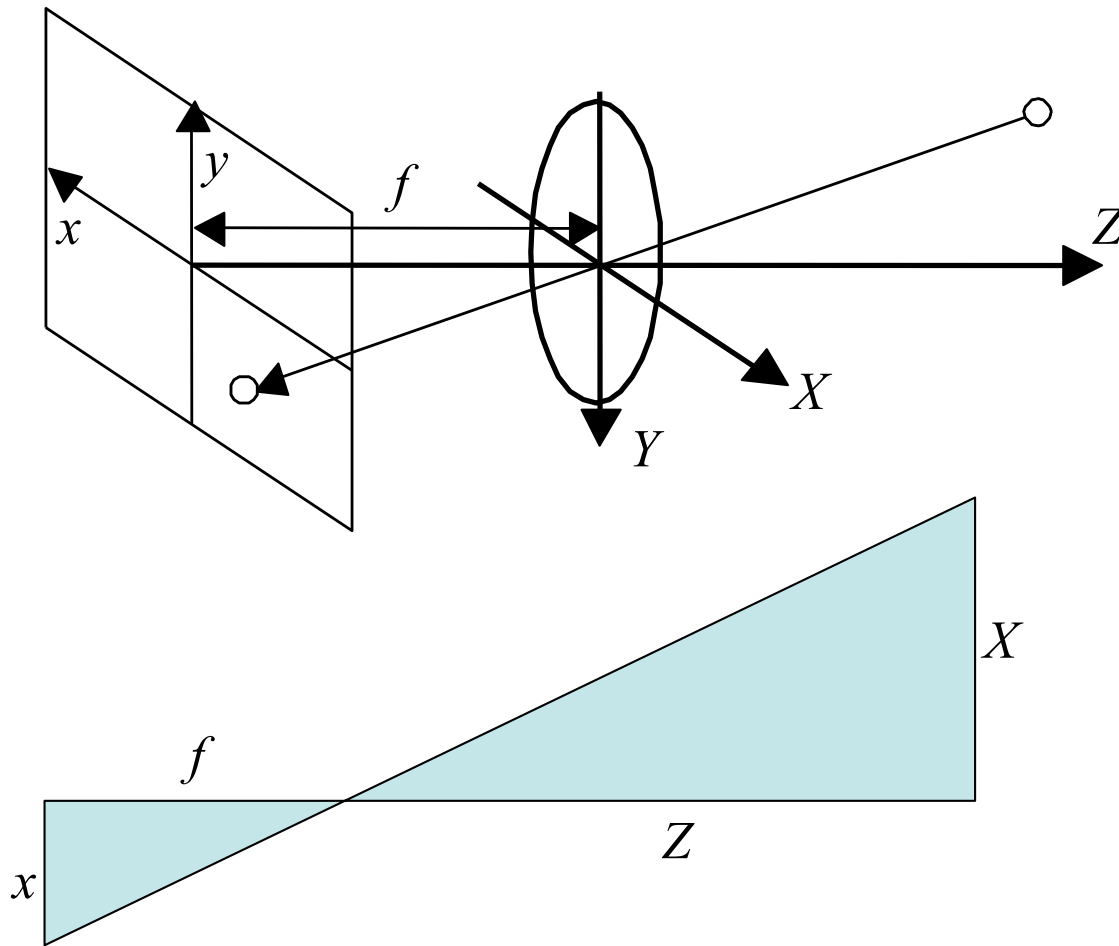


# カメラの構造(再)



- 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)

# 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

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

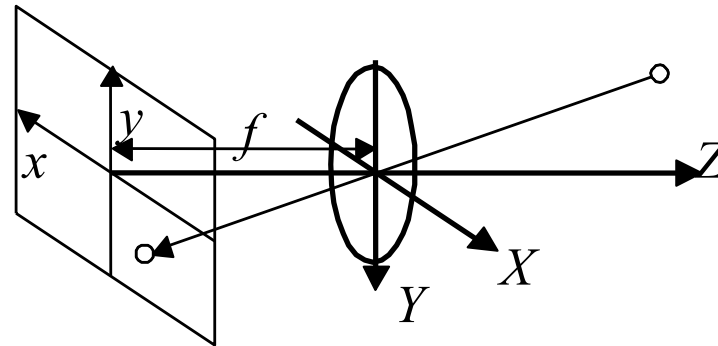
# 透視変換の同次座標表現

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

- 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

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



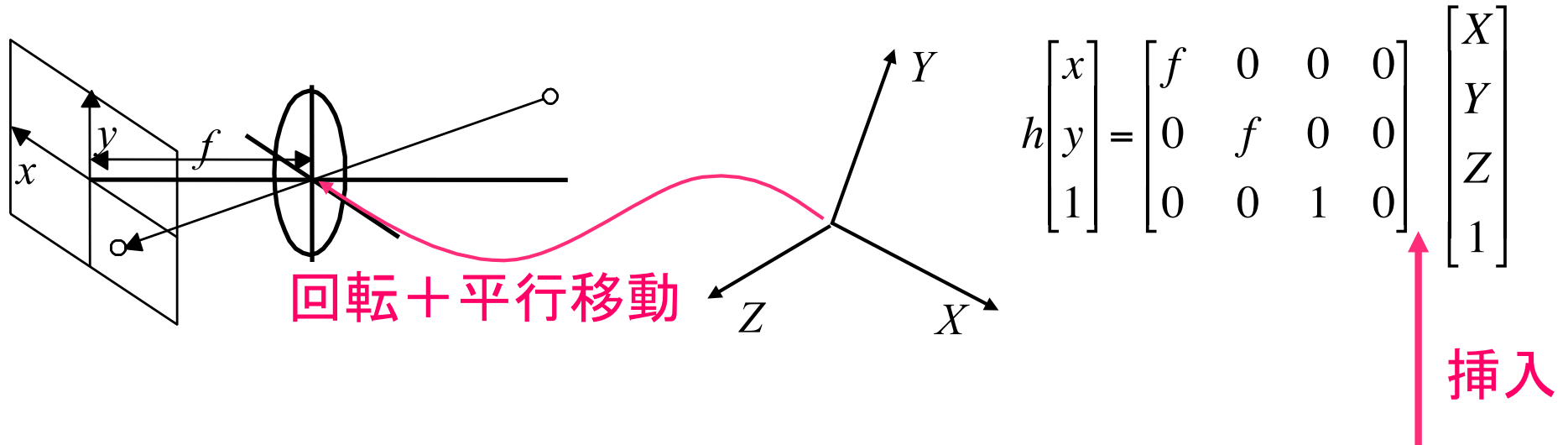
- 上記の透視変換表現は様々な制限を有する
  - 世界座標の原点 = 投影中心 (レンズ主点)
  - 光軸 = Z軸に平行
  - 画像の中心 = 投影中心から下ろした垂線の足
  - アスペクト比 = 1.0
    - 座標変換を導入する必要あり

# 同次座標を用いた平行移動の表現

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

- 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



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

- 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 (6パラメータ)

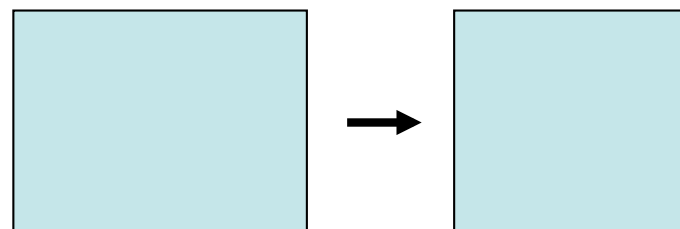
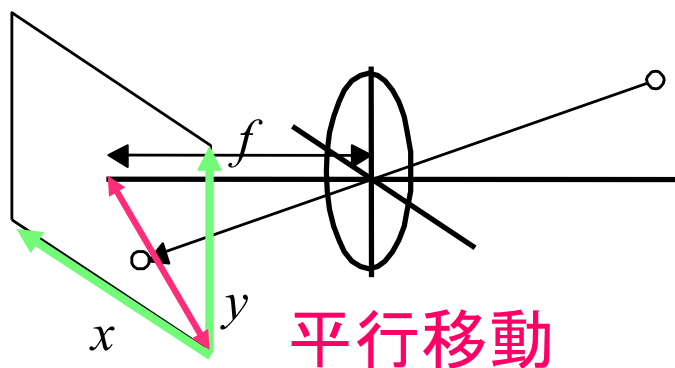
回転: 3自由度

平行移動: 3自由度

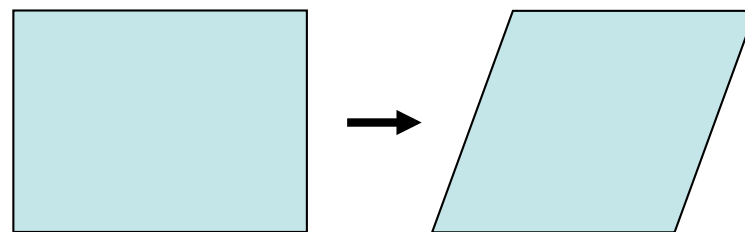
$$\left[ \begin{array}{ccc|c} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_z \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right]$$

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

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

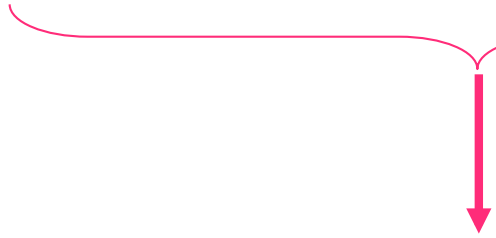
挿入

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

内部パラメータ

# カメラパラメータ行列

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



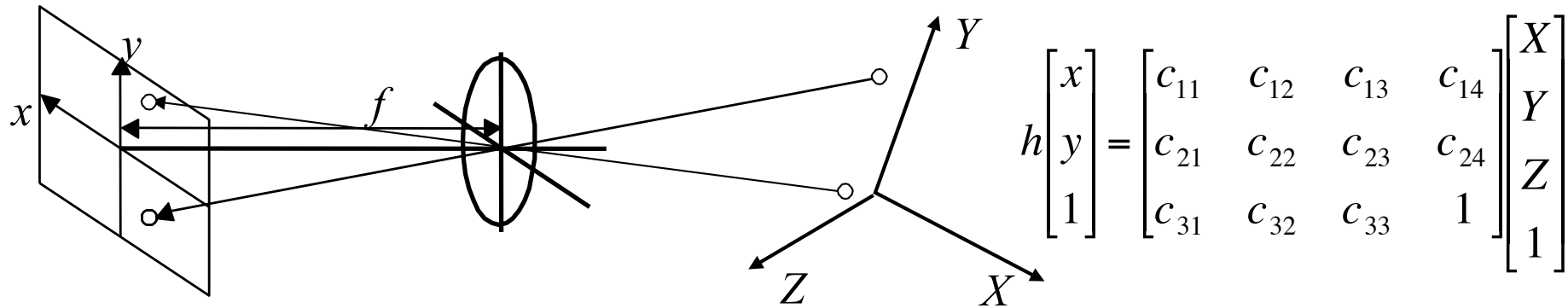
$$h \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & c_{24} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & c_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}$$

- 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

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

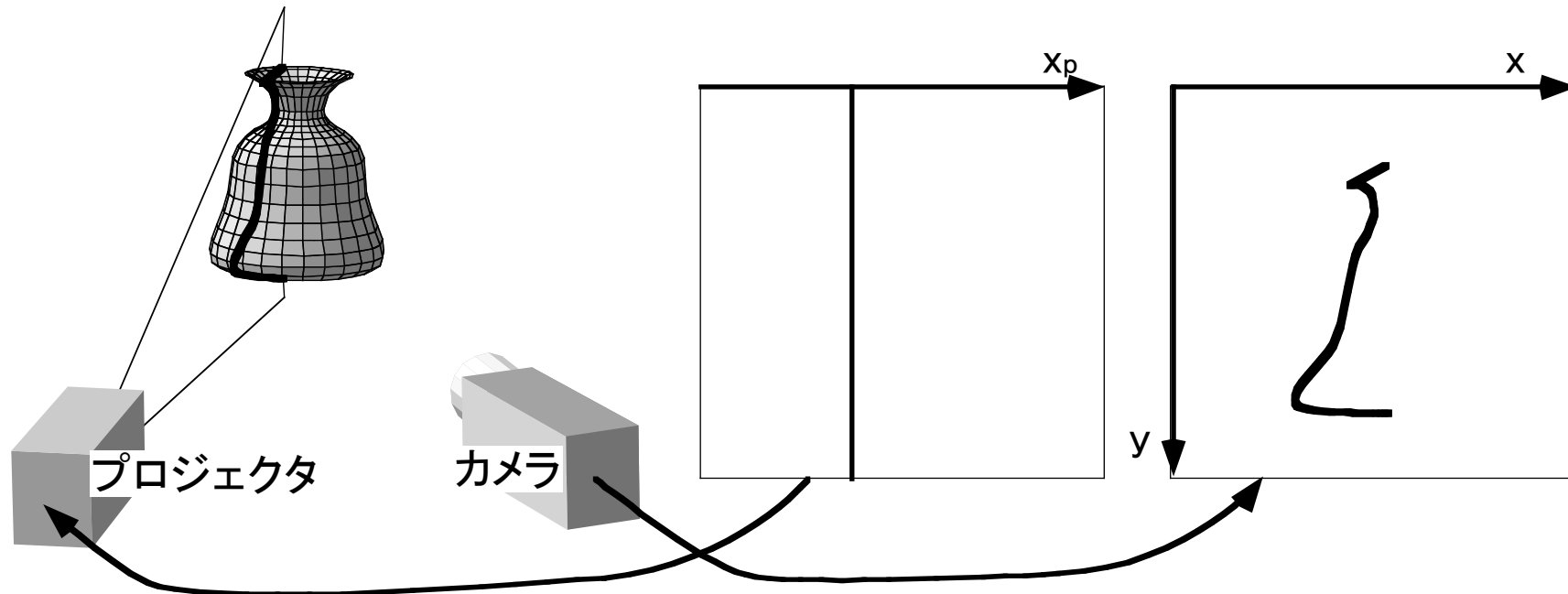
# パラメータの計算

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

- 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

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

# 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

# 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

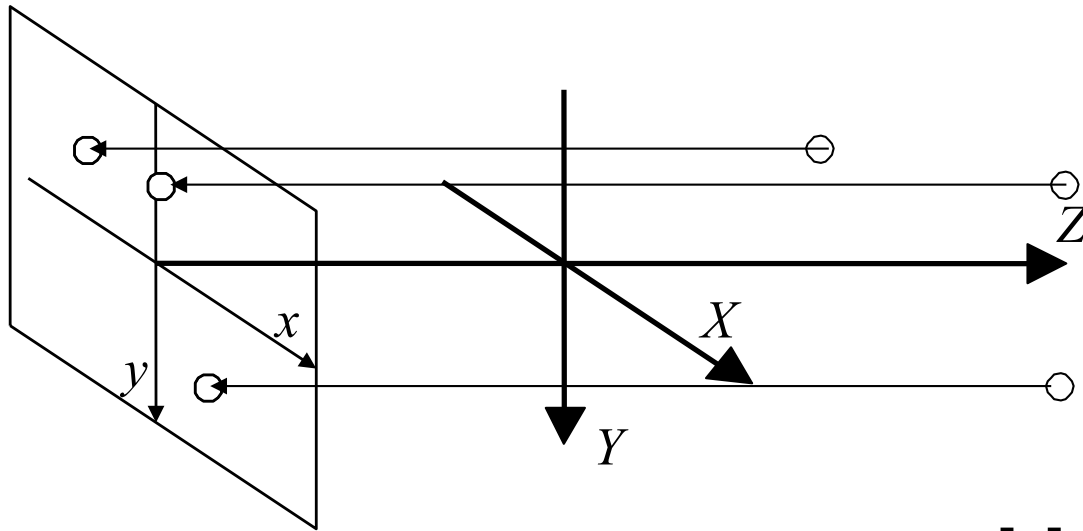
$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = Q^{-1} \cdot F$$

で座標が求められる



# その他のカメラモデル

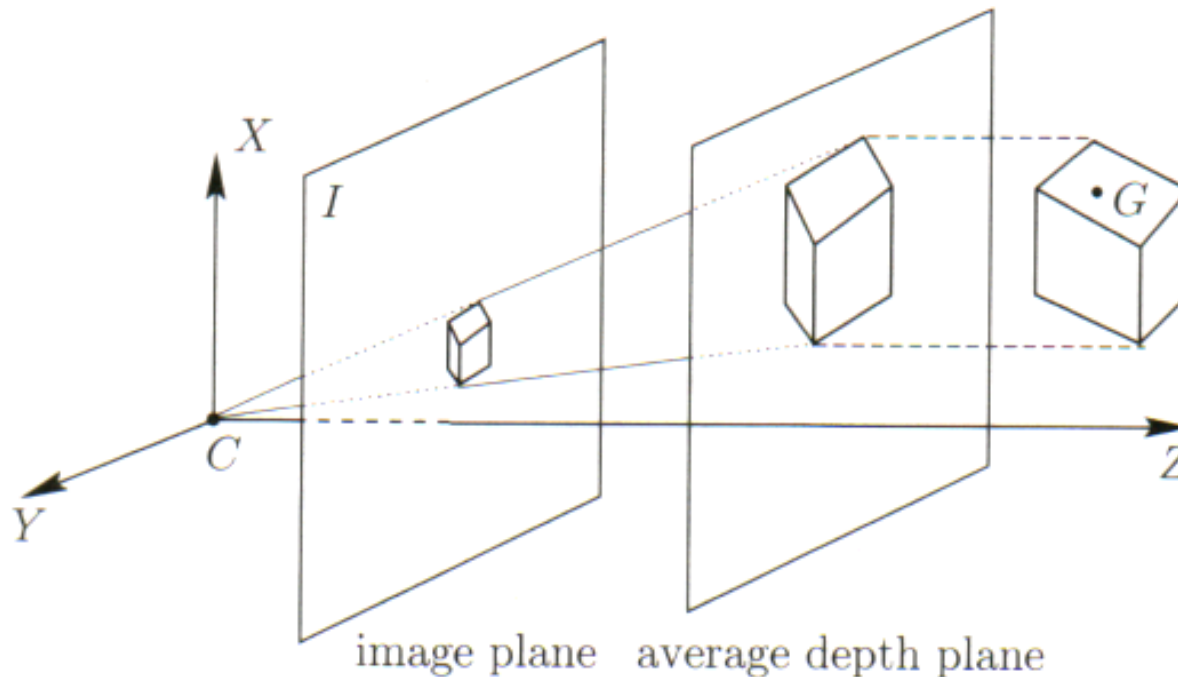
- 並行射影  $x = X, y = Y$



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

# 弱中心射影

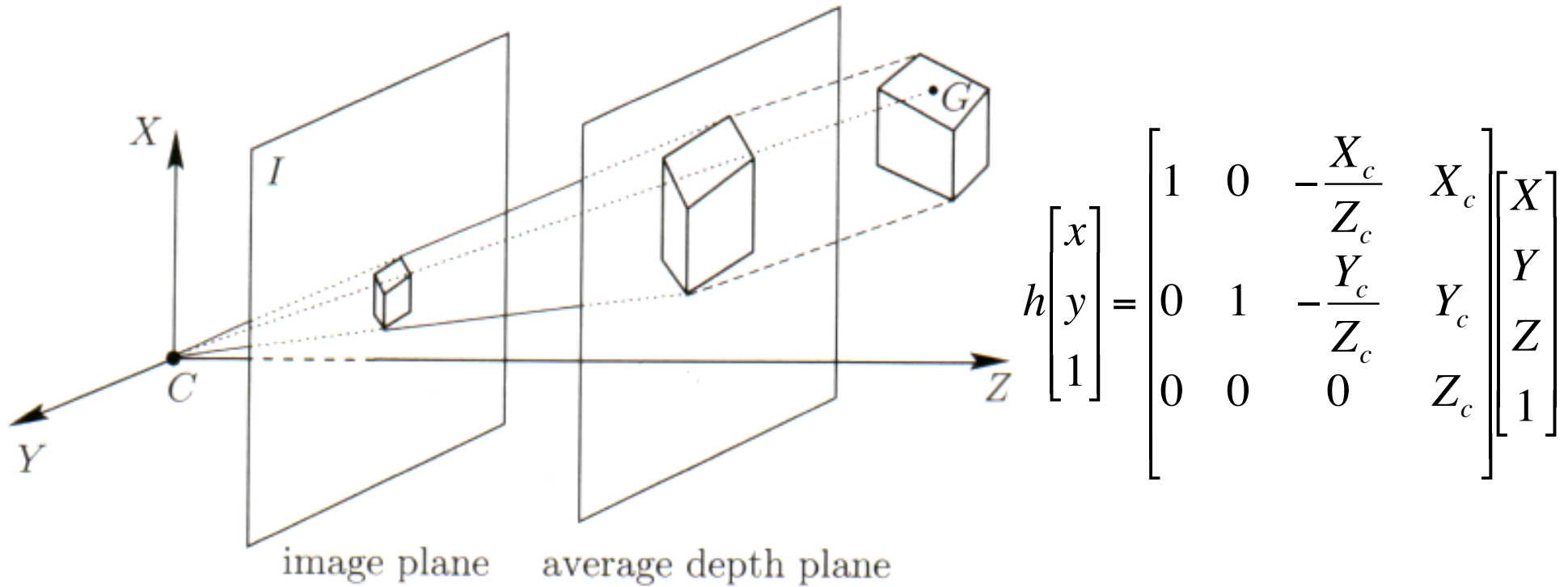
- 距離に応じて並行射影を拡大・縮小
  - 距離は代表点(重心など)で計算



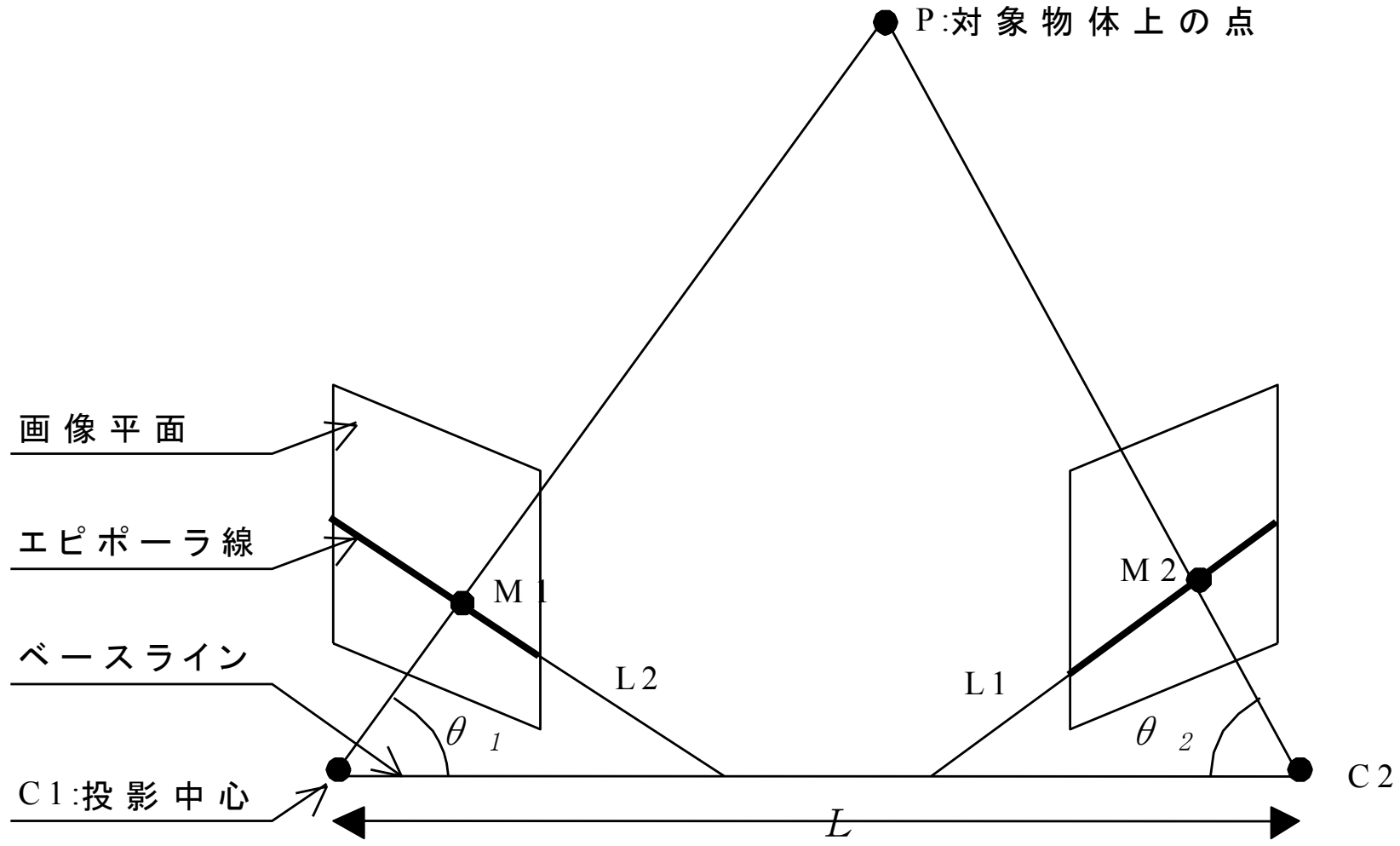
$$h \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Z_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}$$

# 擬似中心射影

- 物体の光軸からの距離も勘案



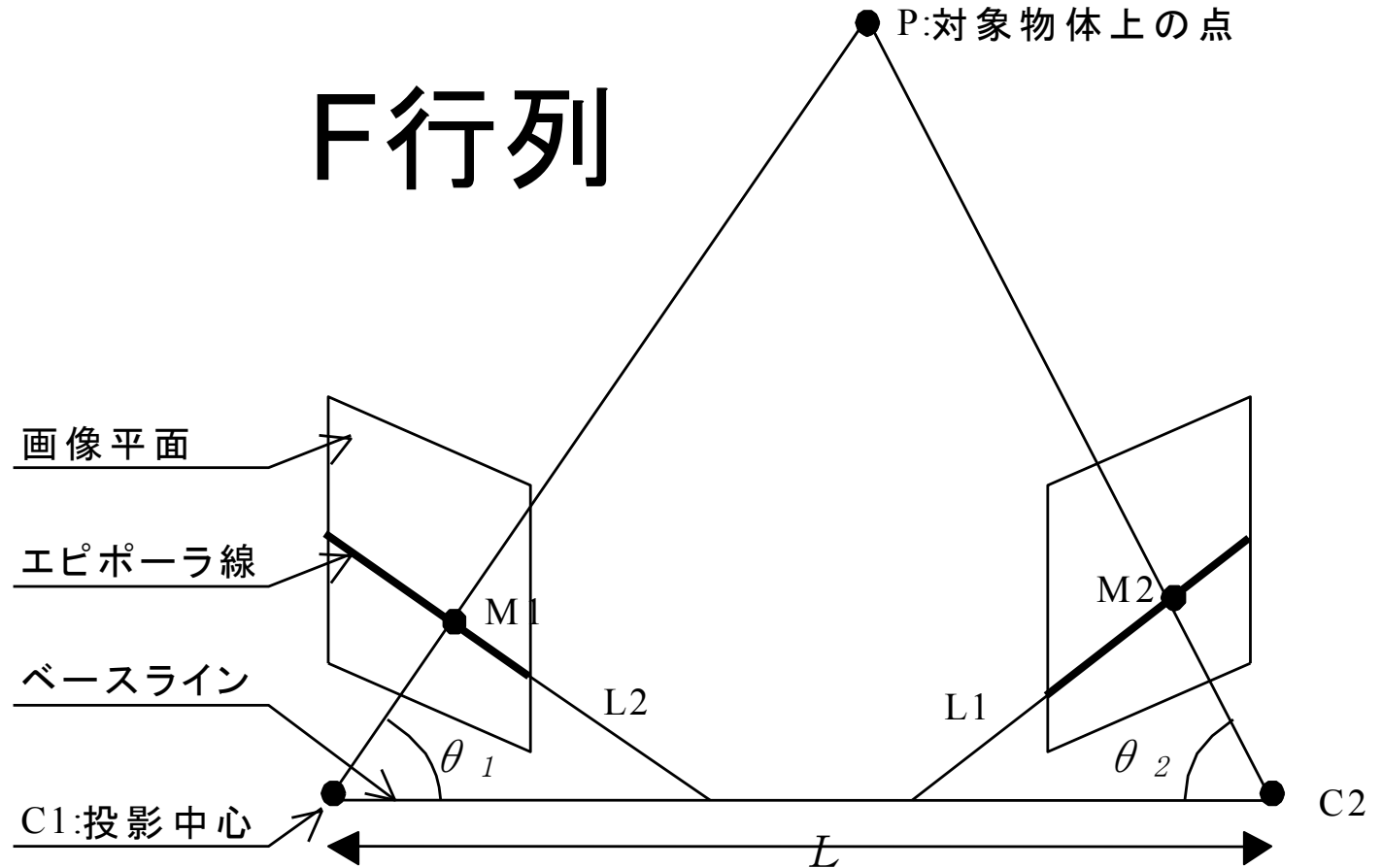
# エピポーラ幾何



# F行列

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

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



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

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

$$m_1^T F m_2 = 0 \quad F \text{ はカメラパラメータから算出可能}$$

# 弱較正

- 世界座標系中の既知座標点はいない
  - 2台のカメラ間の点対応のみから較正
  - F行列が求められる(F行列の自由度は7)
  - 8点の対応がとれれば, F行列が容易に算出可(最小二乗法)

$$\begin{bmatrix} x_1 & y_1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & f_{13} \\ f_{21} & f_{22} & f_{23} \\ f_{31} & f_{32} & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ 1 \end{bmatrix} = 0$$

展開

$$x_1(f_{11}x_2 + f_{12}y_2 + f_{13}) + y_1(f_{21}x_2 + f_{22}y_2 + f_{23}) + f_{31}x_2 + f_{32}y_2 + 1 = 0$$

fの要素に関する線形和



# Factorization Method (2)

## ■ 平行投影による1点の投影

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{xx} & r_{yx} & r_{zx} \\ r_{xy} & r_{yy} & r_{zy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad r: \text{像面の配置 (カメラの向き)}$$

## ■ 多視点(F)・多特徴点(P)へ拡張 $I=RS$

$$\begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1P} \\ y_{11} & \cdots & y_{1P} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{F1} & \cdots & x_{FP} \\ y_{F1} & \cdots & y_{FP} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{xx1} & r_{yx1} & r_{zx1} \\ r_{xy1} & r_{yy1} & r_{zy1} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{xxF} & r_{yxF} & r_{zxF} \\ r_{xyF} & r_{yyF} & r_{zyF} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 & \cdots & X_P \\ Y_1 & \cdots & Y_P \\ Z_1 & \cdots & Z_P \end{bmatrix}$$



# Factorization Method (3)

- 2F行P列の行列Iのランクは3 → 特異値分解

$$I = U\Sigma V$$

$$R' = U'[\Sigma']^{1/2}$$

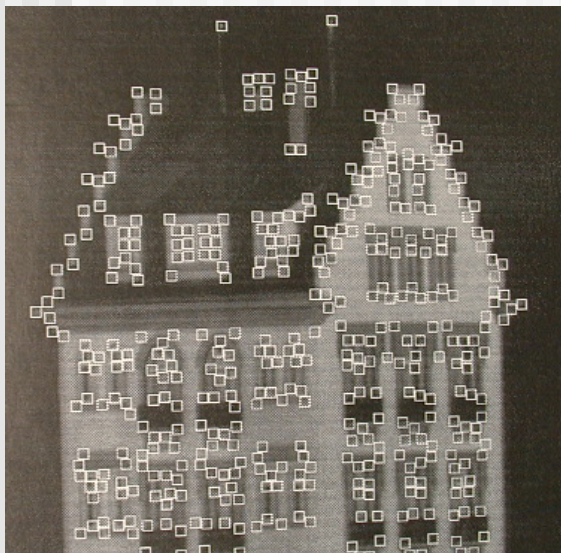
$$S' = [\Sigma']^{1/2} V'$$

$U'$ :  $U$  の2F行3列の左部分行列

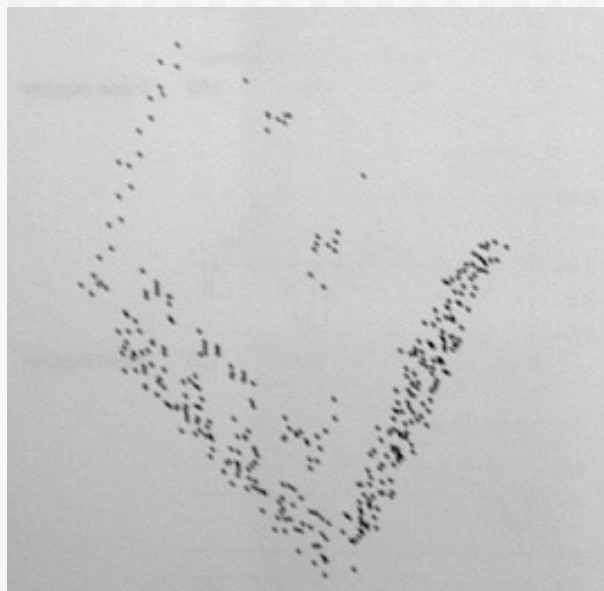
$\Sigma'$ :  $\Sigma$  の3行3列の左上部分行列

$V'$ :  $V$  の3行P列の上部分行列

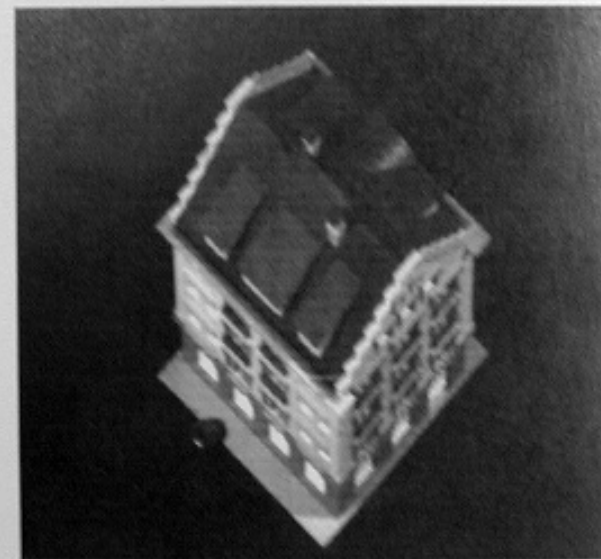
# Factorization Method (3)



抽出された特徴点

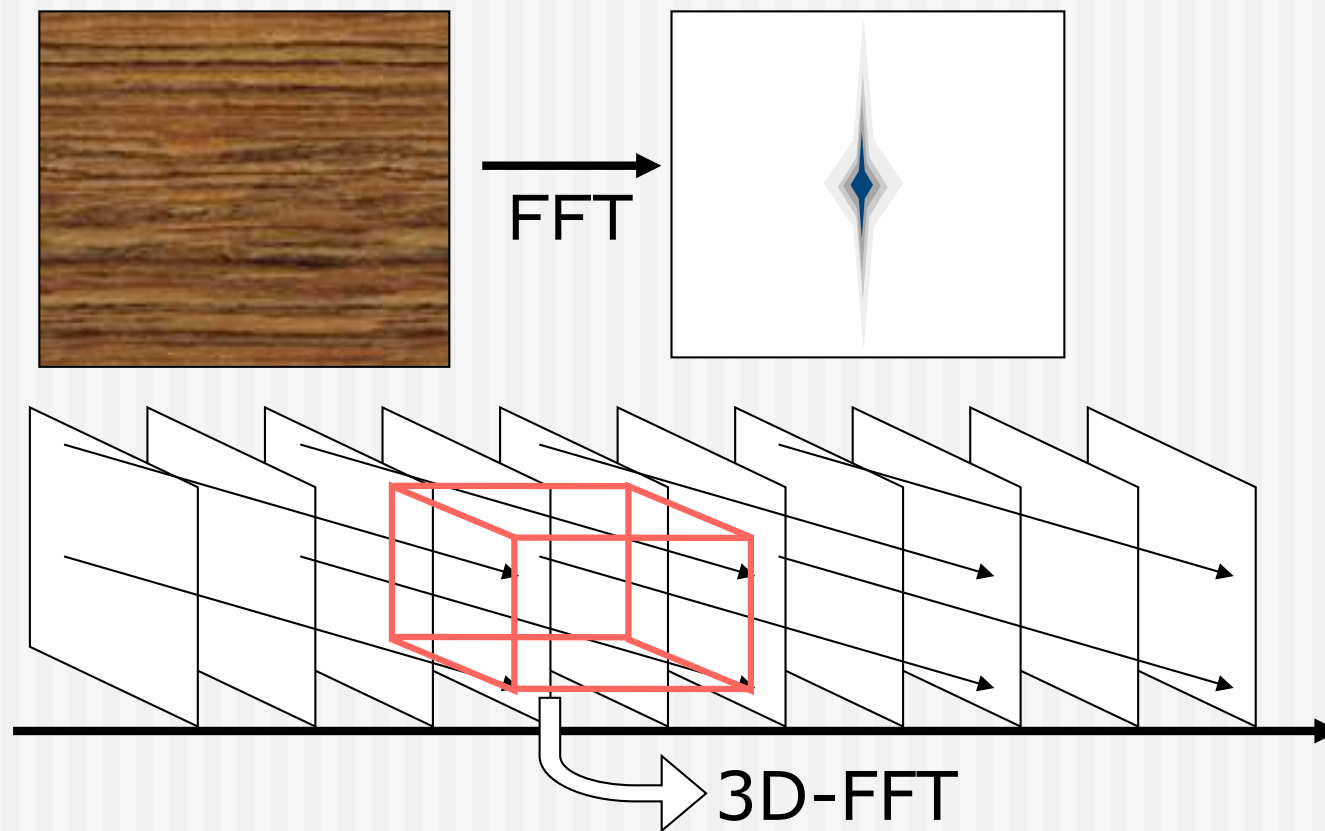


特徴点の座標plot



テクスチャマッピング

# 3D-FFT



- 画像をフーリエ変換すると、縞に直角の方向に分布が広がる → モーメントから移動方向を計算