

ARToolKitとは

- マーカーのカメラ座標系における位置姿勢を単眼カメラの映像から算出することにより，拡張現実 (Augmented Reality; Mixed Reality)空間を容易に構築できる計測システム.
- 現奈良先端大教授(元 阪大基礎工 西田研助教授)の加藤博一先生が，ワシントン大学HITラボ滞在中に開発.
- H.Kato, M. Billinghurst: Marker Tracking and HMD Calibration for a Video-Based Augmented Reality Conferencing System, Proceedings of the 2nd IEEE and ACM International Workshop on Augmented Reality, 1999

平面のマーカを使いたい

■ 歴史的経緯

- 1990年代までは、Augmented Reality技術を用いたアプリケーションを作るためには、高価な位置姿勢計測装置が必要だった.
- 単眼カメラと、平面のマーカ(印刷すれば誰でも作れる)で、対象物の位置姿勢計測を行えるARToolKitの登場により、ARアプリケーションの実装が非常に容易になった.
- マーカを用いたトラッキングの研究は一段落し、現在は、マーカレスで何ができるか、どこまでできるか、に焦点が当てられている.

ARToolKit



Mixed Reality / Augmented Reality の整合性

- 幾何学的整合性
- 光学的整合性
- 時間的整合性

ARToolKitは幾何学的整合性を実現

ARToolKitの特徴

■ 利点

- 正方形の平面マーカの位置姿勢計測が可能.
- 同時に多数のマーカについての計測が可能.
- 導入が非常に容易.

■ 弱点

- マーカの向きによって精度が異なる.
- オクルージョン(マーカの一部の隠蔽)に弱い.

ARToolKitの動作原理

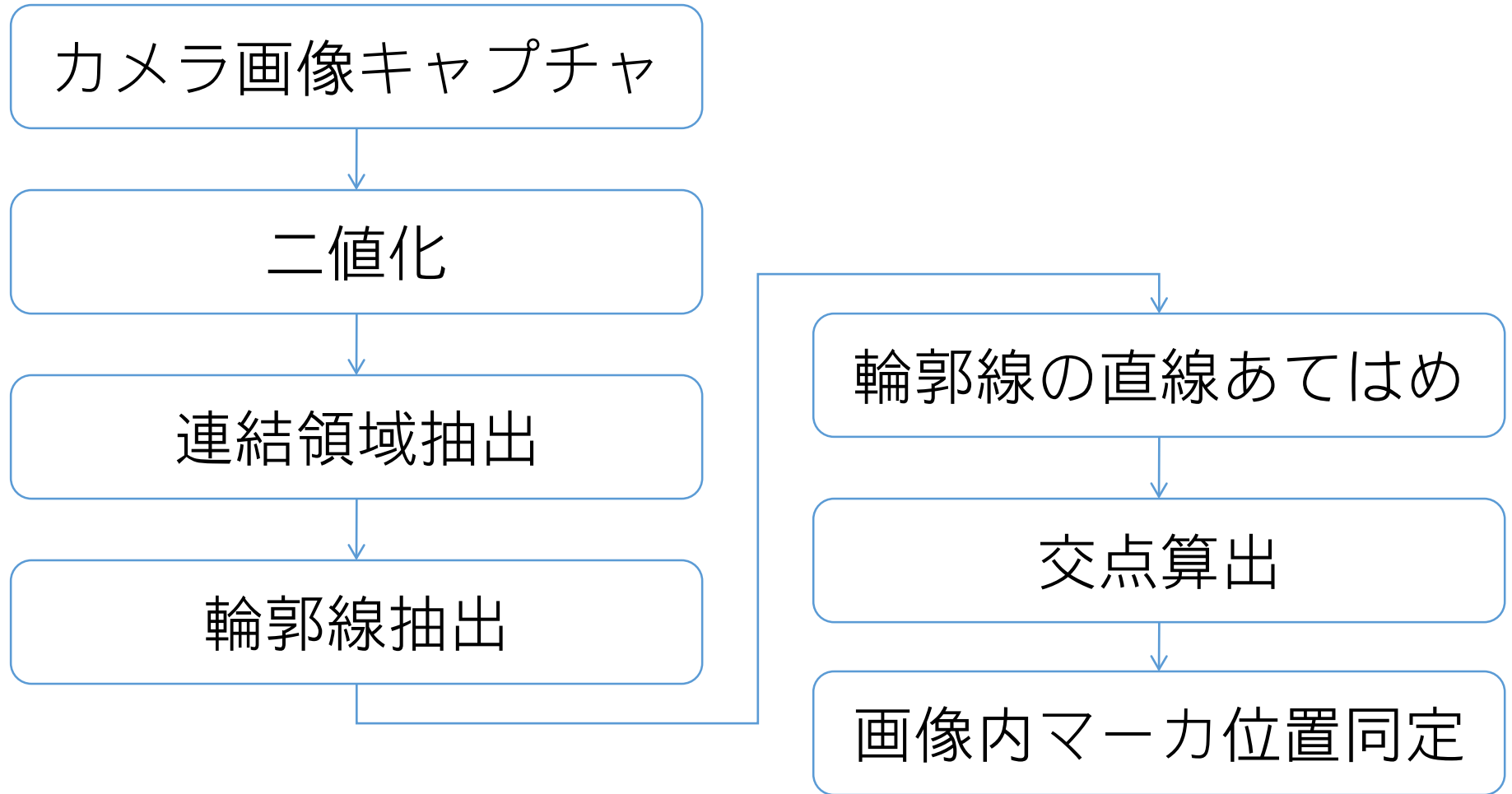
求めたいのは何か？

- マーカ座標系から，カメラ座標系への剛体変換行列(カメラの外部パラメータ;内部パラメータ既知)

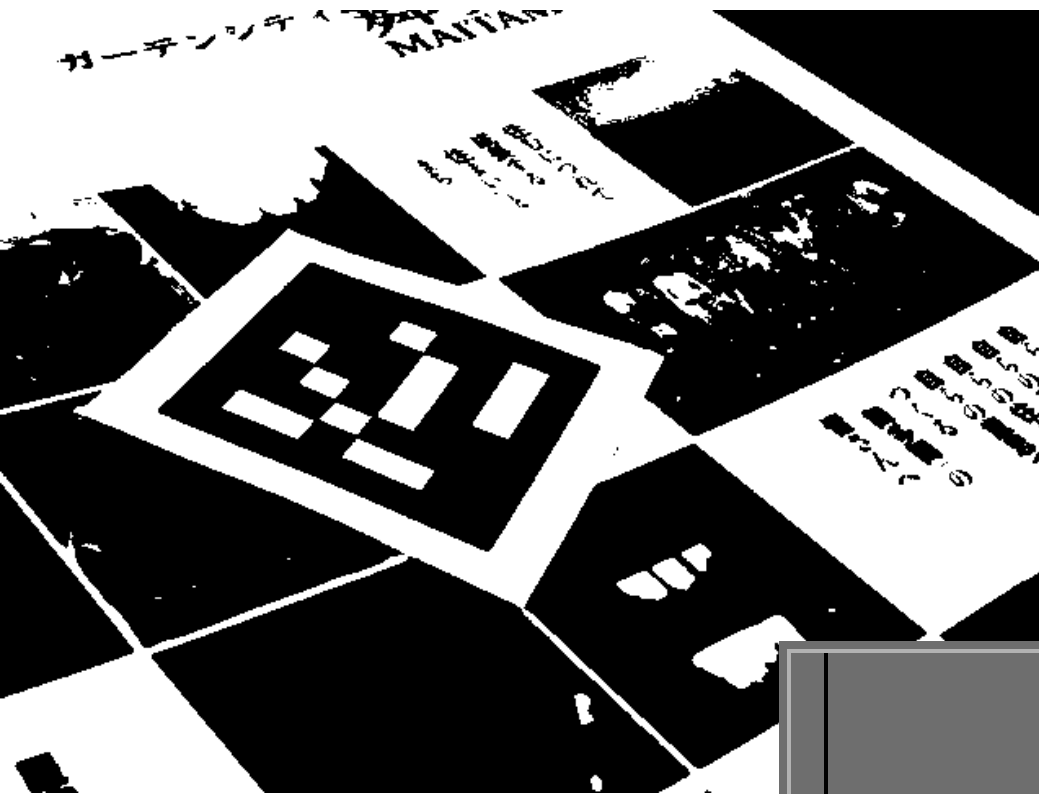
$$\begin{pmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{t} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_m \\ y_m \\ z_m \\ 1 \end{pmatrix}$$

- 方針
 - 画像からマーカの角を抽出
 - マーカの辺ベクトルのカメラ座標系での成分を求める(R)
 - 並進成分(t)を求める

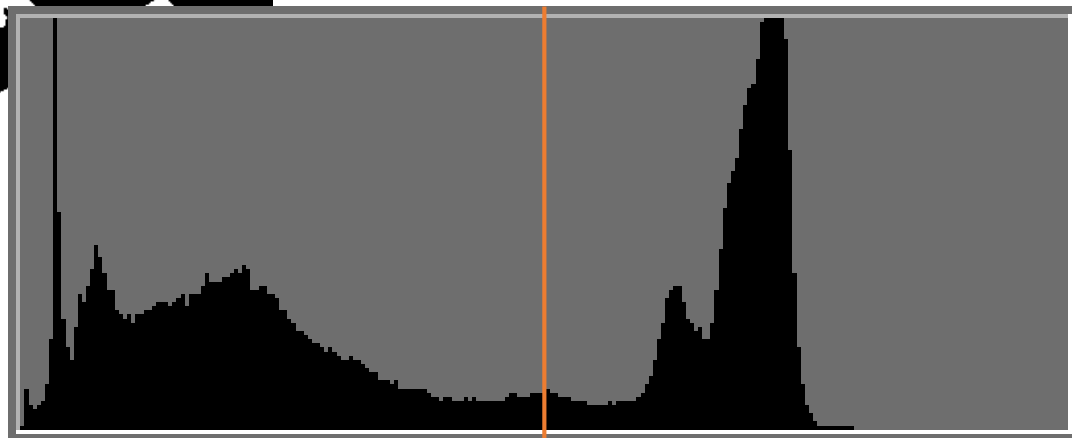
画像内のマーカ検出



二値化



> デモ@photoshop

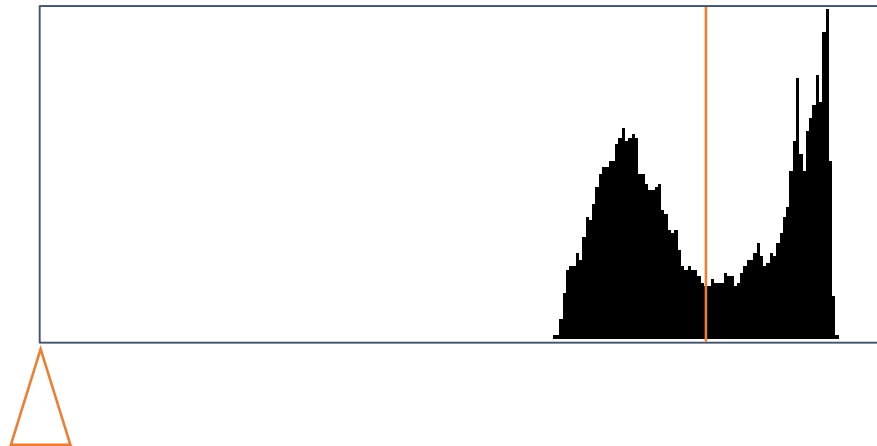


判別分析

- 課題: 二値化の閾値 t をどうやって決めるか?
 - 照明条件, カメラのオートゲイン...
- 手法: 判別分析
 - 二つ以上のクラス(この場合, 黒と白)を分類する基準を得るための手法
 - クラス間分散が大きく, クラス内分散が小さい程, よい分類がなされているとする

判別分析

- 取り得るあらゆる閾値 t で画像の二値化を行った結果を評価し，最も高い評価が得られた t を最適な閾値として採用



判別分析法

■ クラス間分散を求める方法

- 画素数を N とし, 各画素の画素値は m 段階に離散化されているものとする ($m=256$ が一般的)
- 画素値 z を持つ画素数を $h(z)$ とすると, 画素値 z の出現確率 $p(z)$ は,

$$p(z) = \frac{h(z)}{N} \qquad N = \sum_{z=0}^{m-1} h(z)$$

- 全画素の平均画素値は,

$$M_{\text{total}} = \sum_{z=0}^{m-1} zp(z)$$

判別分析法 続き

- 画素値の閾値 t で二つのクラス C_0, C_1 に分割する.
それぞれのクラスの出現確率 w_0, w_1 および平均値 M_0, M_1 は以下のようなになる.

$$w_0 = \sum_{z=0}^t p(z) \equiv w(t)$$

$$w_1 = \sum_{z=t+1}^{m-1} p(z) = 1 - w(t)$$

$$M_0 = \frac{\sum_{z=0}^t zp(z)}{w_0} \equiv \frac{M(t)}{w(t)}$$

$$M_1 = \frac{\sum_{z=t+1}^{m-1} zp(z)}{w_1} = \frac{M_{\text{total}} - M(t)}{1 - w(t)}$$

判別分析法 続き

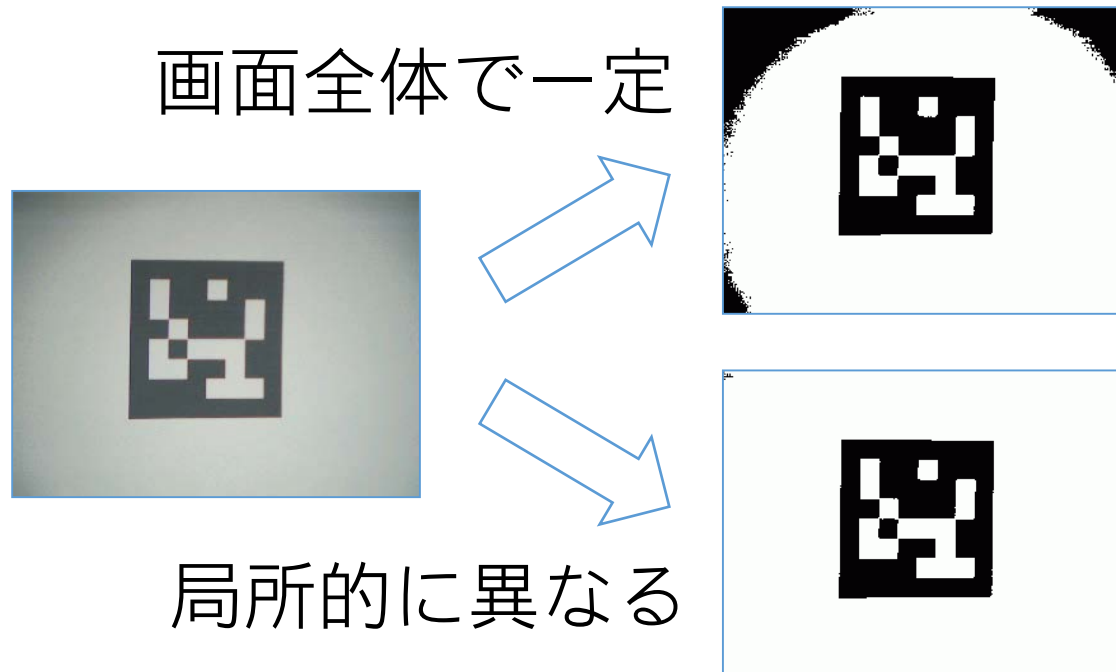
- クラス間分散は，そのクラスに属する全てのデータがクラス内平均に存在していると考えた際の分散である．

$$\begin{aligned}\sigma^2(t) &= w_0(M_0 - M_{\text{total}})^2 + w_1(M_1 - M_{\text{total}})^2 \\ &= \frac{\{M_{\text{total}}w(t) - M(t)\}^2}{w(t)(1 - w(t))}\end{aligned}$$

- 閾値 t を変えながら，この値が最大になる t を探す

局所的な閾値の使用

- 課題: 1枚の画像中でも，場所によって平均的な明るさが異なる
- 手法: 局所的に閾値を決定する



エッジ抽出

■ 画像の空間微分により抽出可能

■ 画像は離散的であるので，差分により近似

$$f_x(i, j) = \frac{1}{2} \{ f(i+1, j) - f(i-1, j) \} \quad \Rightarrow$$

0	0	0
-1	0	1
0	0	0

$$f_y(i, j) = \frac{1}{2} \{ f(i, j+1) - f(i, j-1) \}$$

$$f_{xx}(i, j) = f(i+1, j) - 2f(i, j) + f(i-1, j)$$

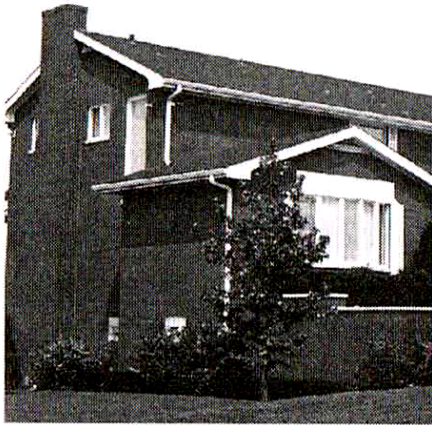
$$f_{yy}(i, j) = f(i, j+1) - 2f(i, j) + f(i, j-1)$$

$$\nabla^2 f(i, j) = f_{xx}(i, j) + f_{yy}(i, j) \quad \Rightarrow$$

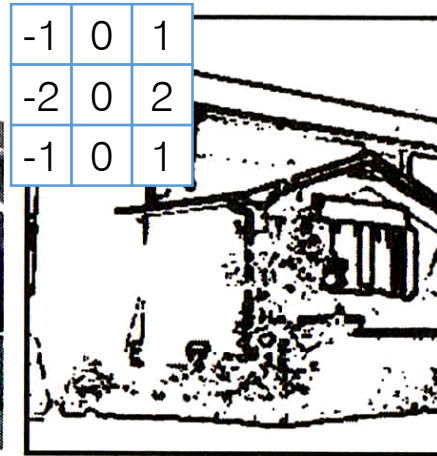
(ラプラシアン)

0	1	0
1	-4	1
0	1	0

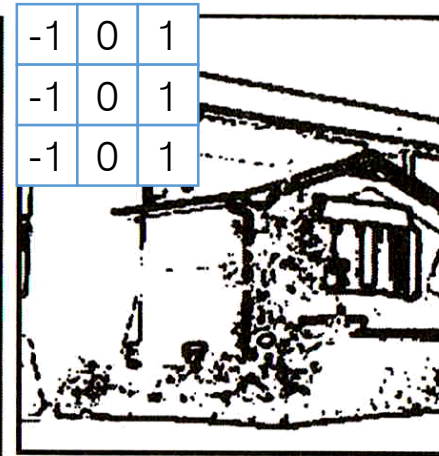
代表的なエッジ抽出



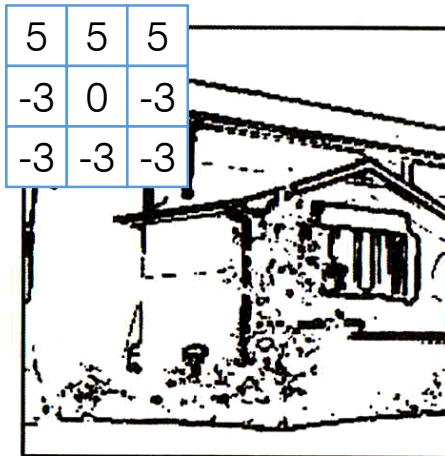
(a) 原画像



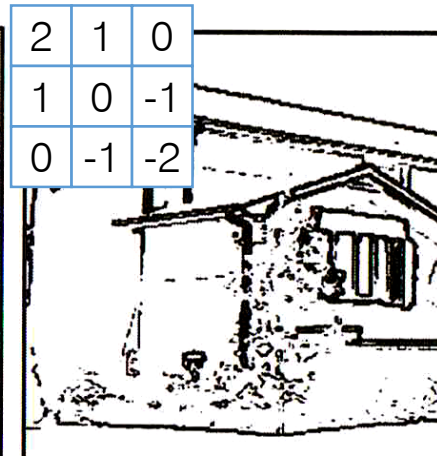
(b) Sobel



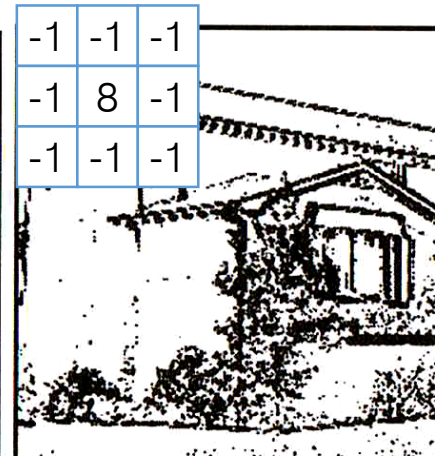
(c) Prewitt



(d) Kirsch



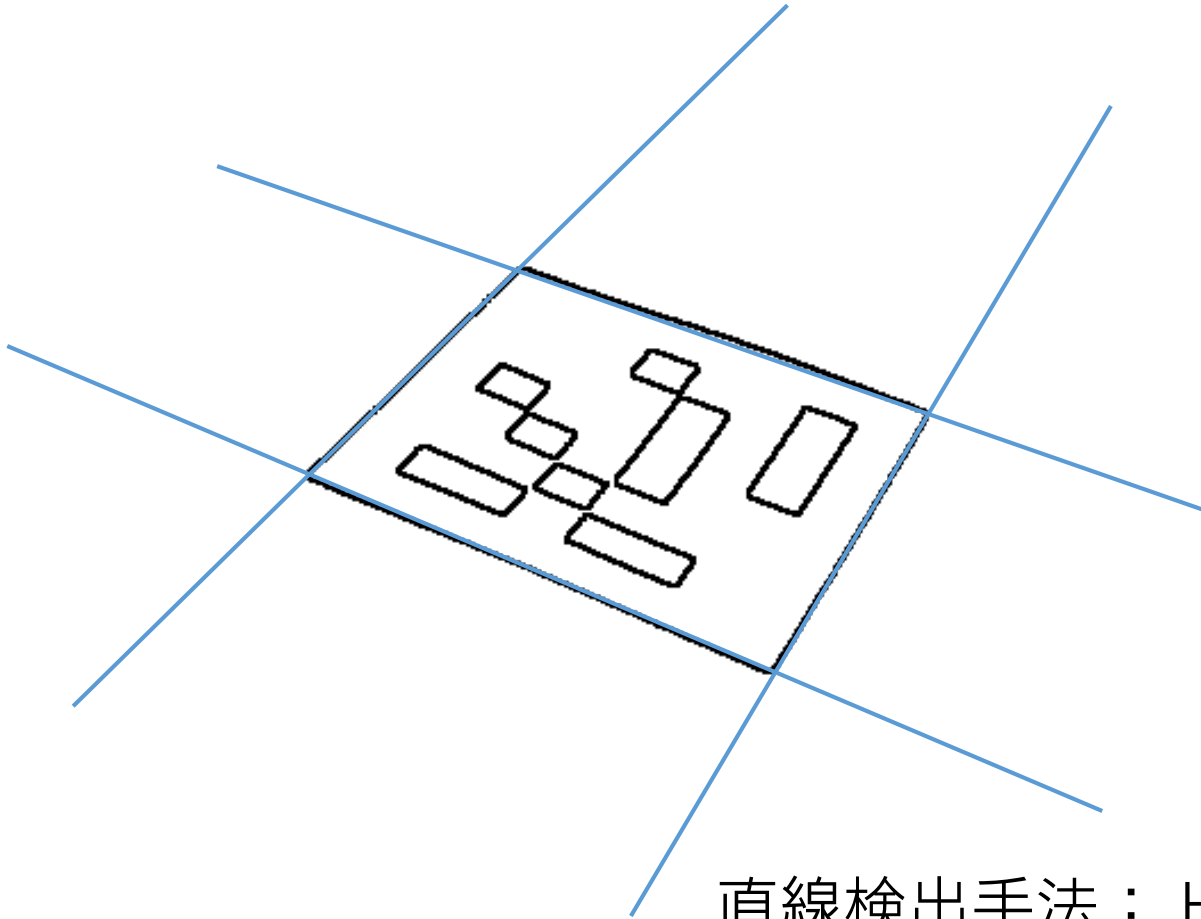
(e) Robinson



(f) ラプラシアン

> デモ

直線あてはめと交点算出



直線検出手法： Hough 変換など

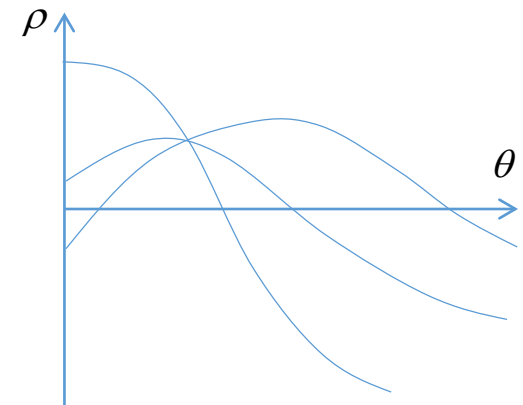
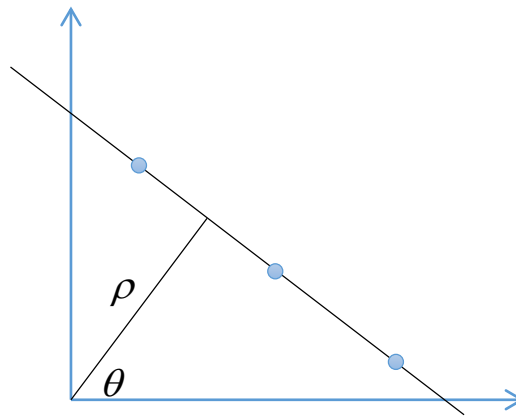
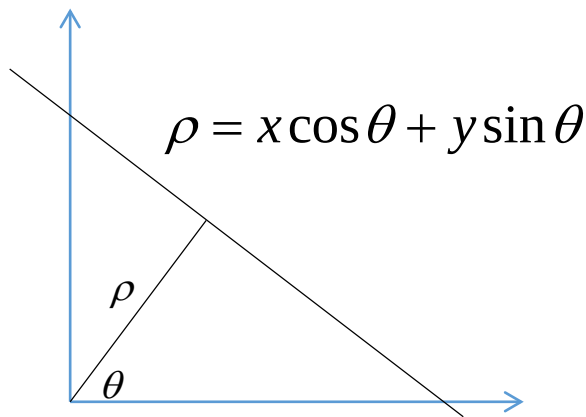
> デモ

Hough変換

- 平面上の直線をパラメータ ρ, θ で表す.

$$\rho = x \cos \theta + y \sin \theta$$

- ある点 (x_i, y_i) が乗っている可能性のある直線群を, パラメータ ρ, θ で表すと, $\rho - \theta$ 平面上の曲線になる.
- 全てのエッジ点を, $\rho - \theta$ 平面に写像し, 軌跡が集中している ρ_0, θ_0 が求める直線である.



画面上での直線の方程式

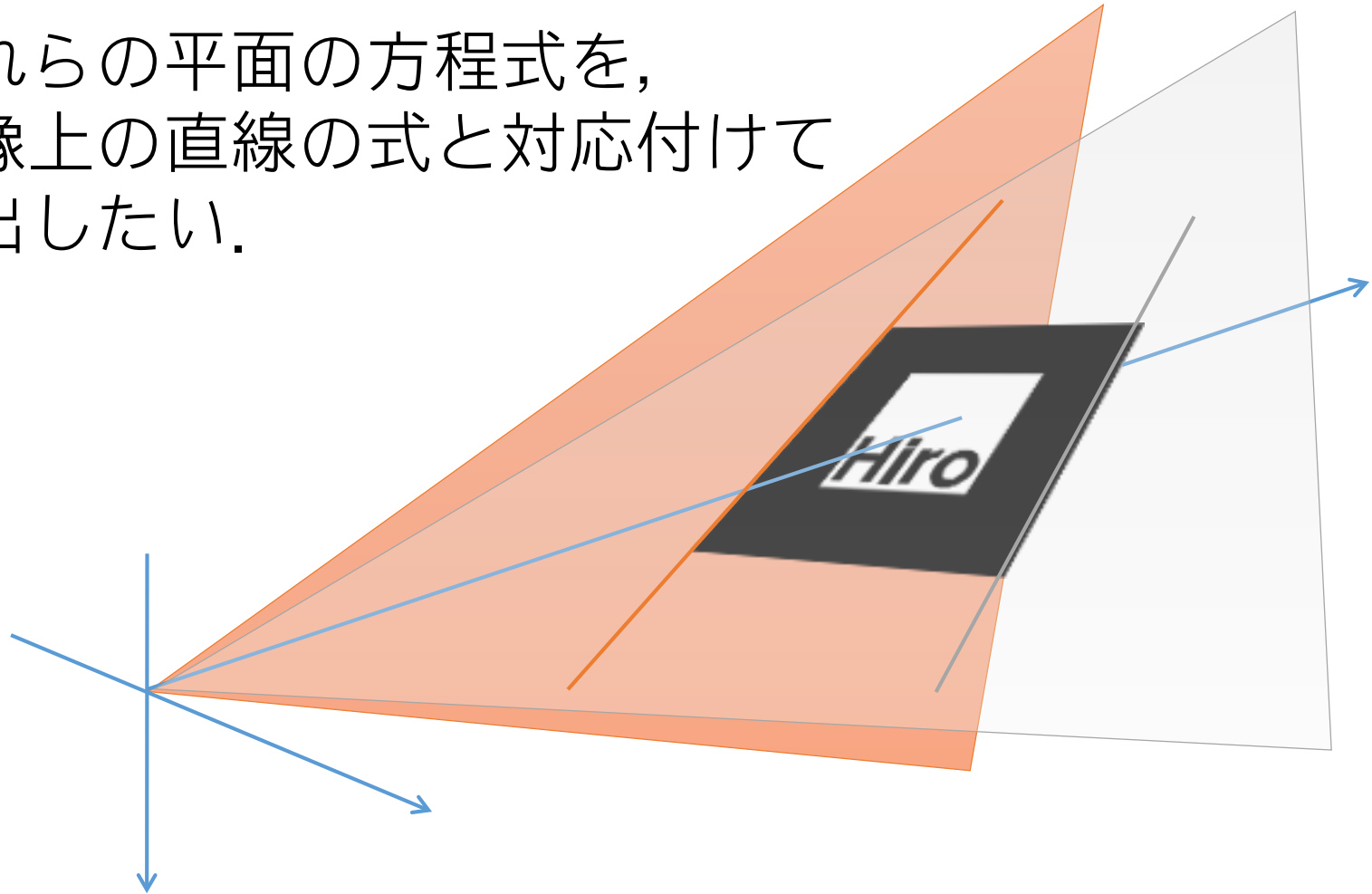
$$a_1x + b_1y + c_1 = 0$$

$$a_2x + b_2y + c_2 = 0$$



実空間上では平面

これらの平面の方程式を，
画像上の直線の式と対応付けて
導出したい．



中心射影行列

内部パラメータはキャリブレーションで求めるものとする

$$\begin{pmatrix} hx \\ hy \\ h \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha_u & -\alpha_u \cot \theta & u_0 & 0 \\ 0 & \alpha_v / \sin \theta & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix}$$



$$\begin{pmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} & 0 \\ 0 & P_{22} & P_{23} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

画像上の直線と実空間の平面

- 画像平面に投影したときに、直線となっている3次元空間内の点の集合 = 平面



- 任意の3次元空間内の点を、画像平面上に投影することを考える
- 画像平面上に投影した点がある直線上にあるために、3次元空間内の点が満たす条件 = 平面の方程式

辺(赤)が存在する平面の方程式

■ 中心射影行列から

$$hx = P_{11}X + P_{12}Y + P_{13}Z$$

$$hy = P_{22}Y + P_{23}Z$$

$$h = Z$$

■ 画像上での直線の式に代入

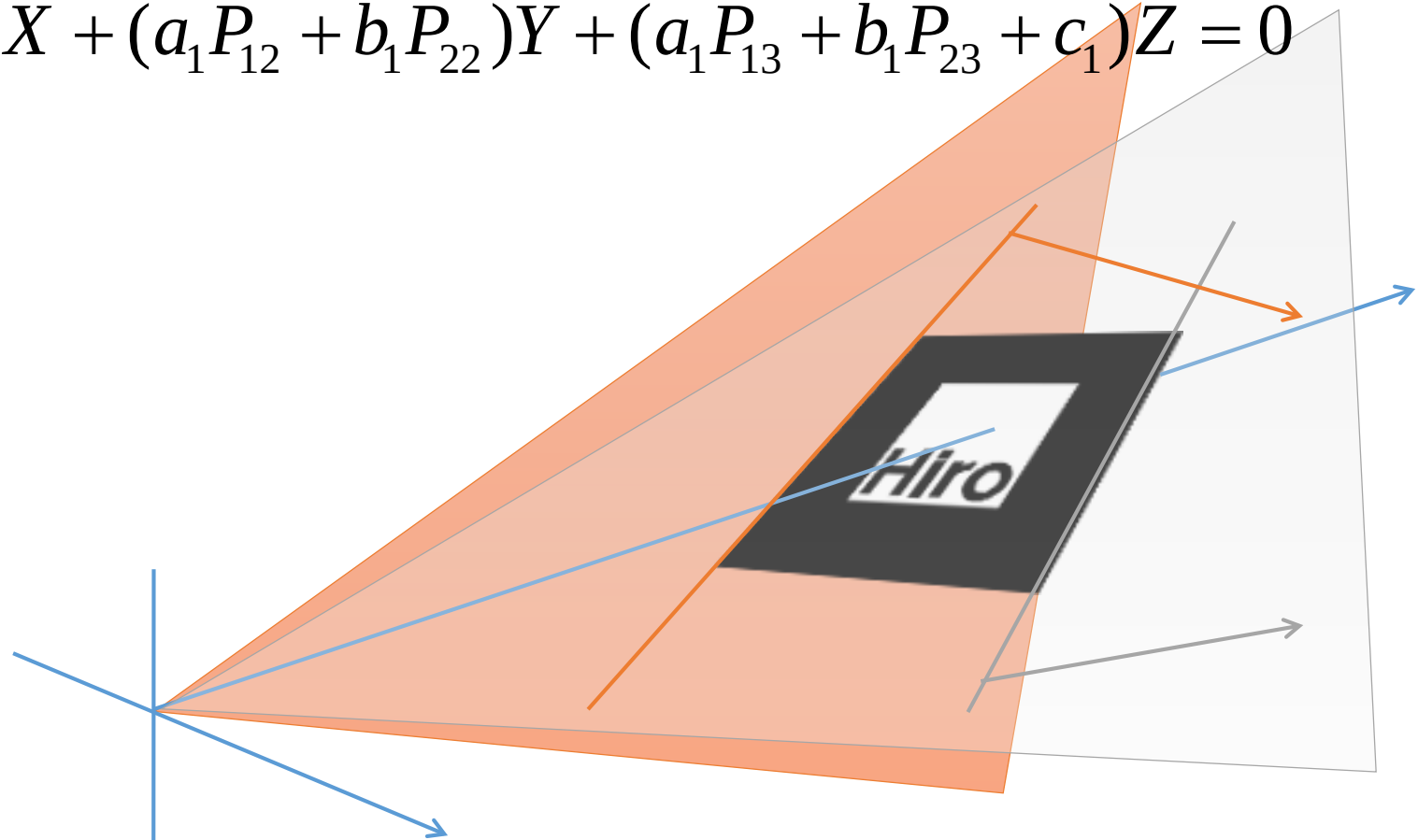
$$a_1(hx) + b_1(hy) + c_1h = 0$$

$$a_1(P_{11}X + P_{12}Y + P_{13}Z) + b_1(P_{22}Y + P_{23}Z) + c_1Z = 0$$

$$\Leftrightarrow \underline{a_1P_{11}X + (a_1P_{12} + b_1P_{22})Y + (a_1P_{13} + b_1P_{23} + c_1)Z = 0}$$

平面の方程式が求められた

$$a_1 P_{11} X + (a_1 P_{12} + b_1 P_{22}) Y + (a_1 P_{13} + b_1 P_{23} + c_1) Z = 0$$



$$a_2 P_{11} X + (a_2 P_{12} + b_2 P_{22}) Y + (a_2 P_{13} + b_2 P_{23} + c_2) Z = 0$$

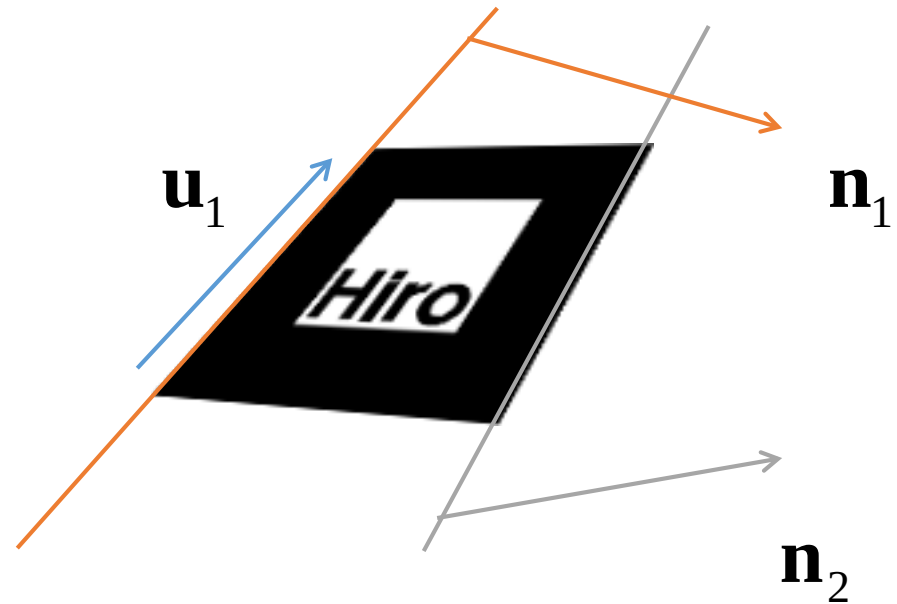
平面の法線と辺の方向ベクトルの関係

$$\mathbf{n}_1 = \begin{pmatrix} a_1 P_{11} \\ a_1 P_{12} + b_1 P_{22} \\ a_1 P_{13} + b_1 P_{23} + c_1 \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{n}_2 = \begin{pmatrix} a_2 P_{11} \\ a_2 P_{12} + b_2 P_{22} \\ a_2 P_{13} + b_2 P_{23} + c_2 \end{pmatrix}$$

$$\Rightarrow \mathbf{u}_1 = \mathbf{n}_1 \times \mathbf{n}_2$$

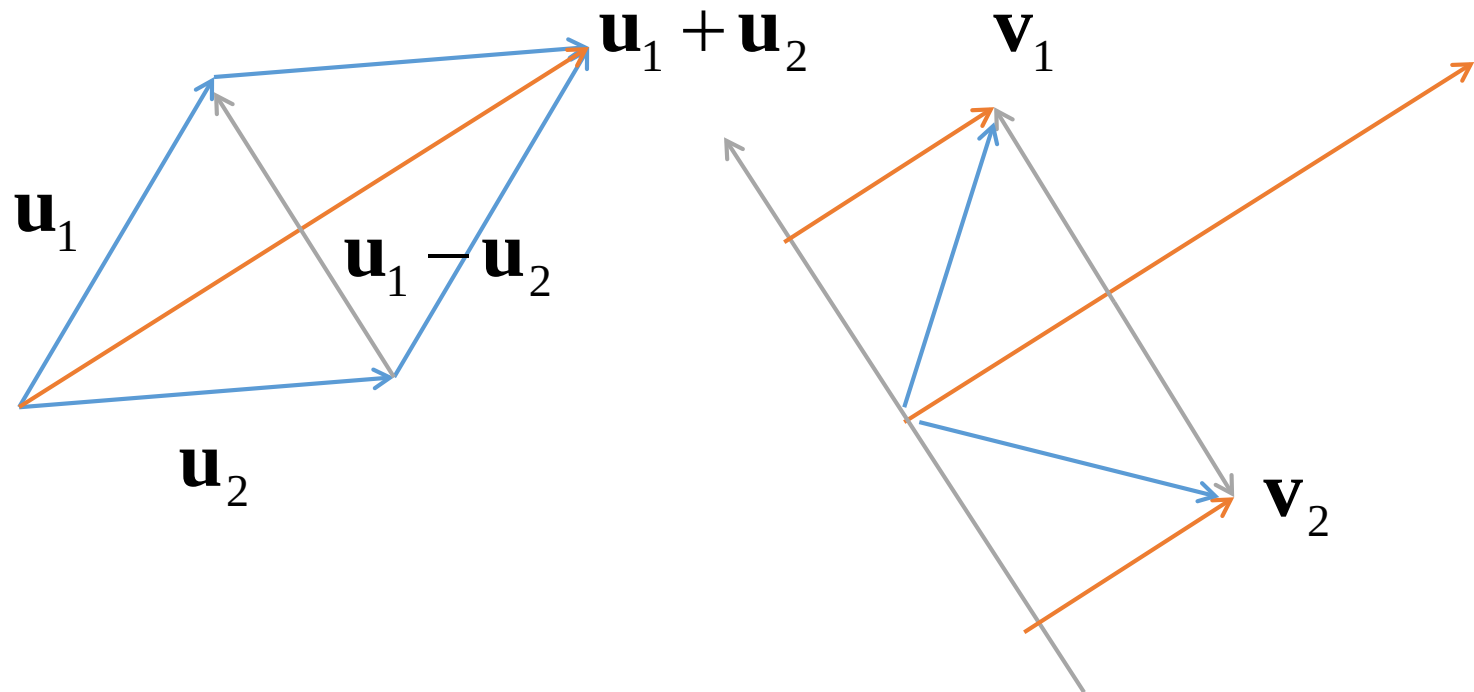
辺の方向のベクトルは、
平面の法線の双方に垂直



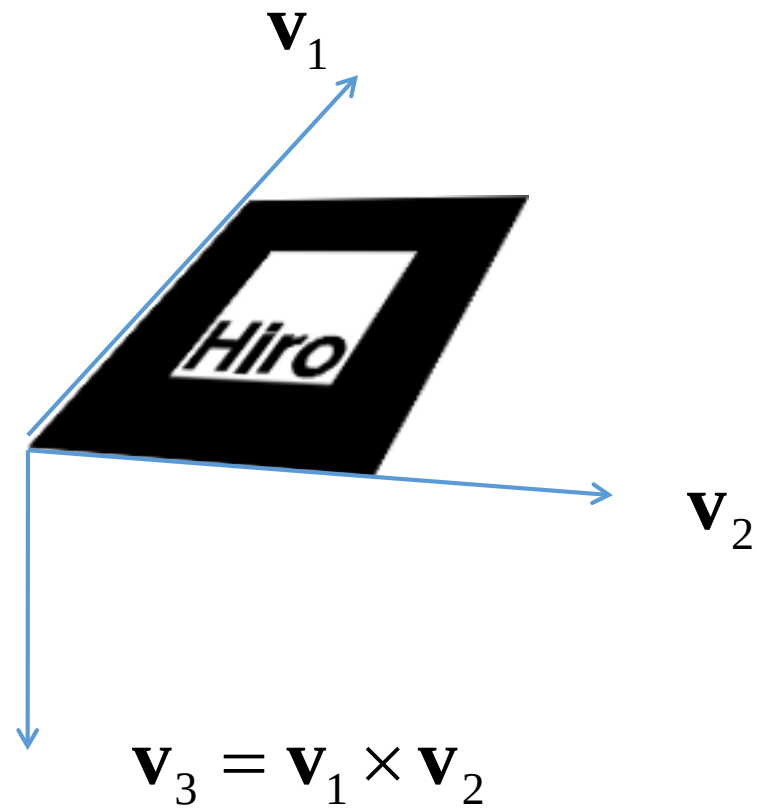
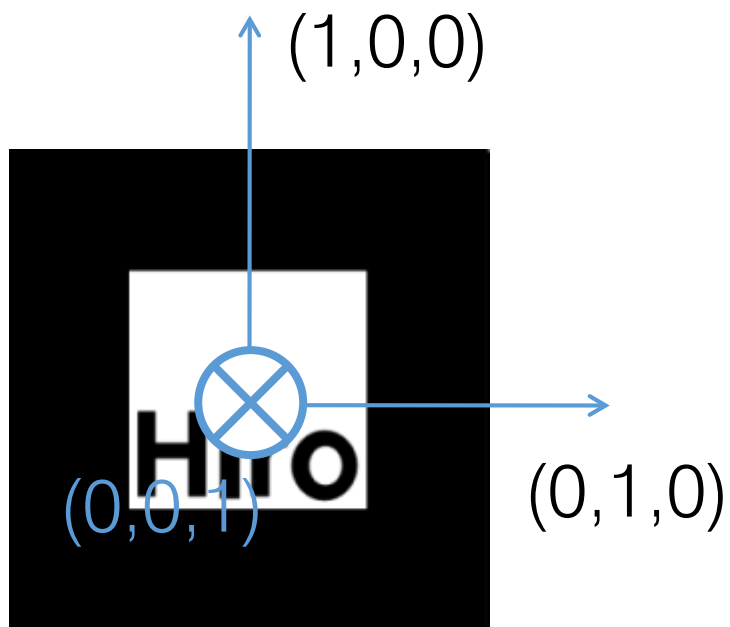
カメラ座標系での辺の方向ベクトルの成分を算出

直交するベクトルの生成

- 誤差により $\mathbf{u}_1$ と $\mathbf{u}_2$ は直交していない可能性がある.
- $\mathbf{u}_1$ と $\mathbf{u}_2$ から、それらと同一平面上にあり直交する二つのベクトル $\mathbf{v}_1$ と $\mathbf{v}_2$ を生成する.



回轉成分



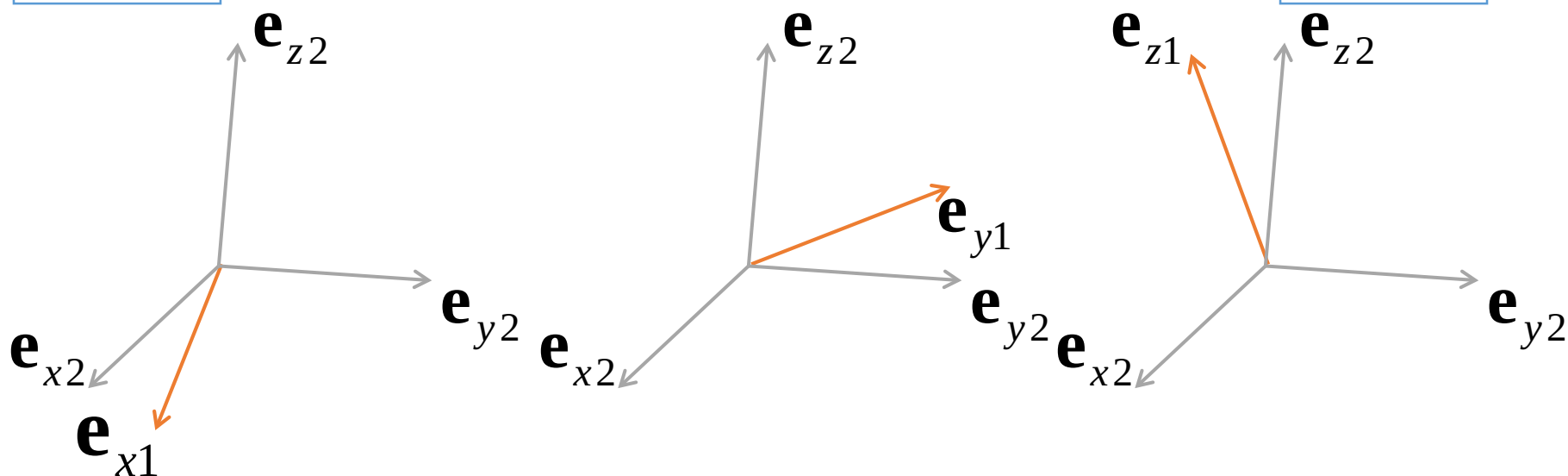
$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} \mathbf{v}_1 & \mathbf{v}_2 & \mathbf{v}_3 \end{pmatrix}$$

回転の行列表現

$$\begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{e}_{x1} \cdot \mathbf{e}_{x2} & \mathbf{e}_{y1} \cdot \mathbf{e}_{x2} & \mathbf{e}_{z1} \cdot \mathbf{e}_{x2} \\ \mathbf{e}_{x1} \cdot \mathbf{e}_{y2} & \mathbf{e}_{y1} \cdot \mathbf{e}_{y2} & \mathbf{e}_{z1} \cdot \mathbf{e}_{y2} \\ \mathbf{e}_{x1} \cdot \mathbf{e}_{z2} & \mathbf{e}_{y1} \cdot \mathbf{e}_{z2} & \mathbf{e}_{z1} \cdot \mathbf{e}_{z2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{pmatrix}$$

カメラ

マーカ



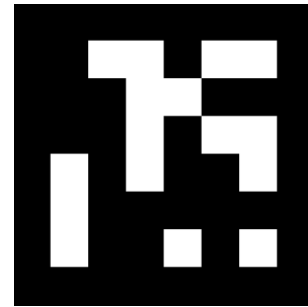
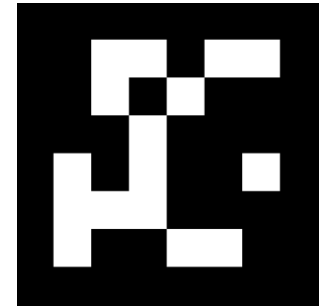
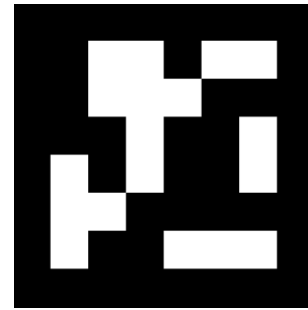
並進成分

- 並進の3成分を未知数とする
- マーカの各コーナーは,
 - マーカ座標系での座標値がわかっている
 - 画像上での座標値がわかっている
- よって, 対応点1組ごとに2本の方程式が得られる
- マーカの角は4点あるため, 未知数3個に対して8本の方程式が得られる→最小二乗法

カメラ-マーカ間の変換行列が得られた

マーカの判別

マーカの判別



2次元を2次元に射影: ホモグラフィー

一般的な透視投影変換

$$\begin{pmatrix} hx_c \\ hy_c \\ h \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix}$$

3次元空間を $Z=0$ に限定

$$\begin{pmatrix} hx_c \\ hy_c \\ h \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{14} \\ C_{21} & C_{22} & C_{24} \\ C_{31} & C_{32} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{pmatrix}$$

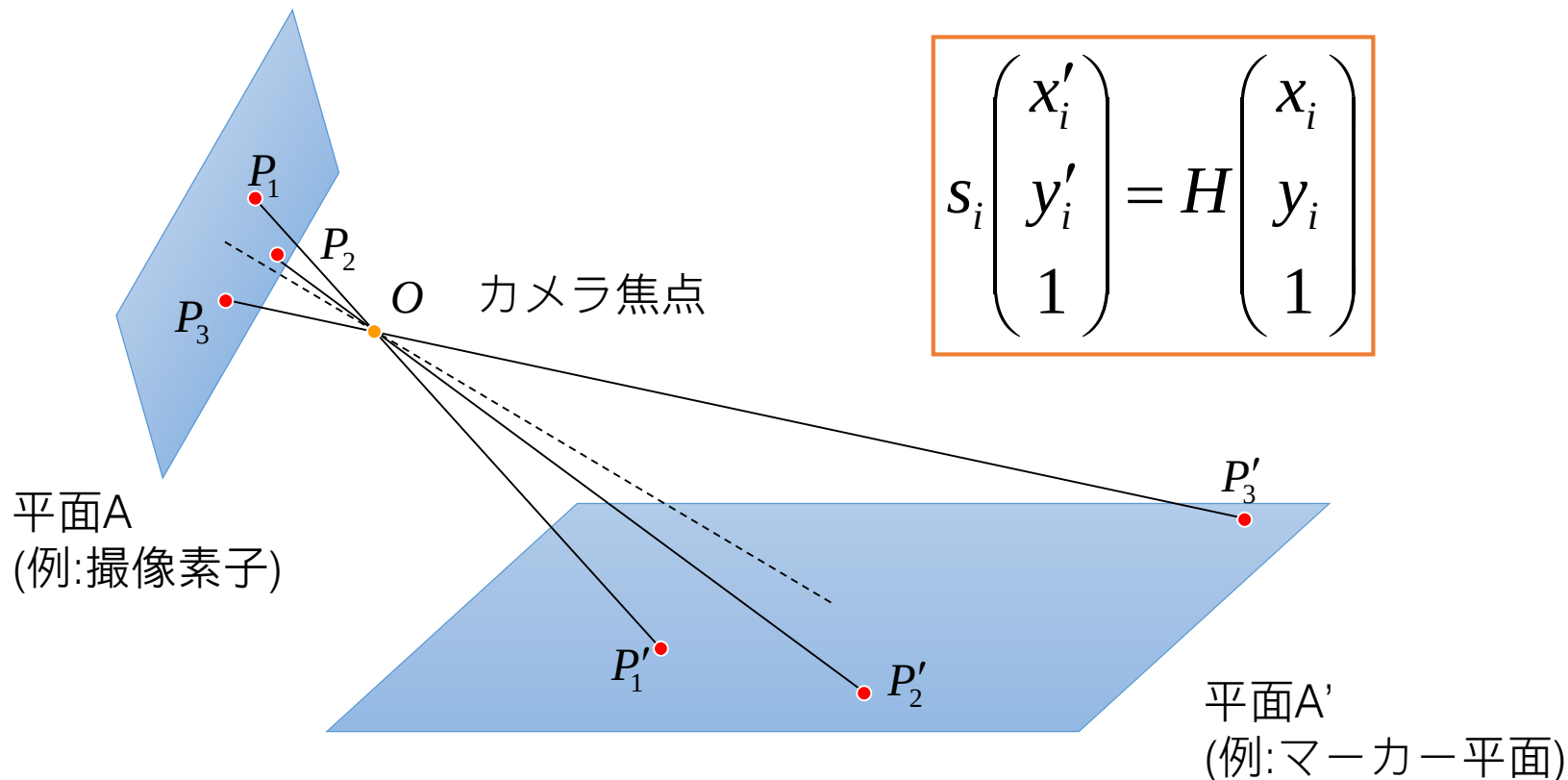


4組の対応点から射影変換行列(ホモグラフィー行列)を算出できる

射影変換(Homography)

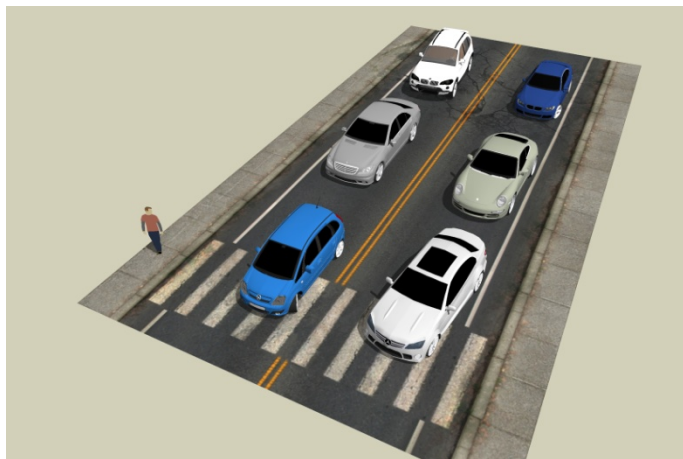
■ 斜めから見た平面を上から見た平面に変換

透視投影変換によって関係付けられている2平面間の関係

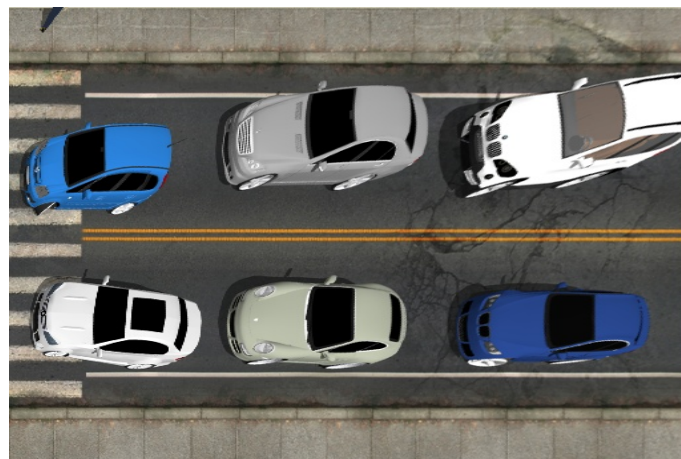


射影变换

俯瞰画像



变换画像



上方画像



重叠画像

