

# 四角形状の認識と 四角形頂点の点群マッチング プログラムのご紹介

2024年8月27日

河内山 博

(株)アイディール 代表取締役

<https://www.eyeddeal.co.jp>

# はじめに

## □ 画像処理の実践に向けて

画像処理アルゴリズムを駆使して画像処理システムを実用化しようと考え  
ると、数学・物理等の基礎技術、機械学習技術、人工知能技術、高速化技術、  
周辺機器技術等の知見、経験、知識が必要である。

## □ OpenCV

OpenCVは、画像処理の基本機能や先進的なアルゴリズムを使用した機能を  
網羅しているので、PythonやC言語で手軽に画像処理システムを構築・  
実用化できる。

## □ 四角形状の認識と四角形頂点の点群マッチングプログラム

四角形状の移動により位置と傾きの補正量を求めるプログラムである。本  
プログラムでは、OpenCVの輪郭抽出機能を使用する。

# プログラム概要

## □ プログラムの機能

四角形状の四辺の直線から四角形状の位置と傾き取得し、次に四角形状を動かし、元の位置・姿勢と移動先の姿勢と位置を補正するプログラムである。

## □ プログラムの応用例

### ➤ □ロボットピッキング

ピッキング対象の位置・傾きを取得し、ロボットの位置・姿勢を合わせる。

### ➤ 部品の組み立て

2つの部品の位置・傾きのズレを求めて片方を補正し、2つの部品を重ねる。

## □ プログラム環境

- PC：Windows 10、64ビット
- プログラム言語：C++（ISO/IEC 14882：2020）
- OpenCV 4.3.0（動作確認済のバージョン）
- ビルド確認：Visual Studio 2022
- ライブラリ：eyemLib\_ver154a

# プログラムの流れ

Cannyフィルタと二値化処理による輪郭画像を生成する。

輪郭座標データから直線ハフ変換により四角形状の四辺の直線を得る。

ロバスト推定法で四辺の直線式を求める。

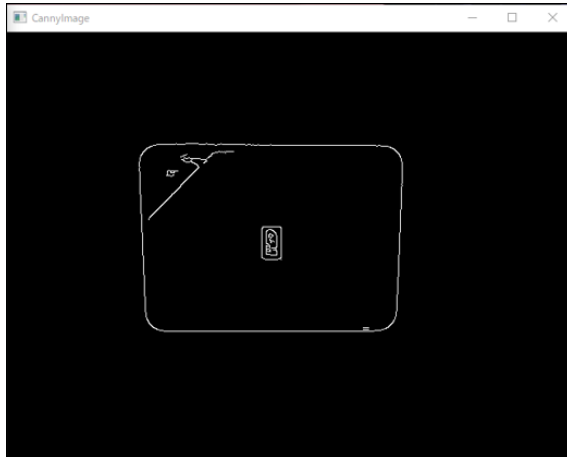
四角形状の頂点を求める。

四角形状の頂点同士によるMasterとTargetの点群マッチングを行う。

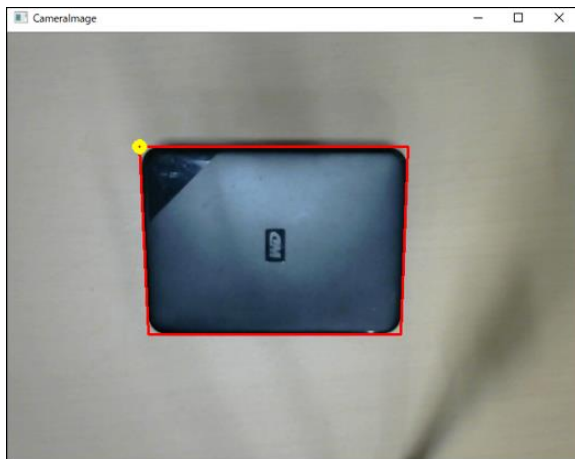
位置と傾きの補正量を求める。

位置と傾きを同次変換行列で変換する。

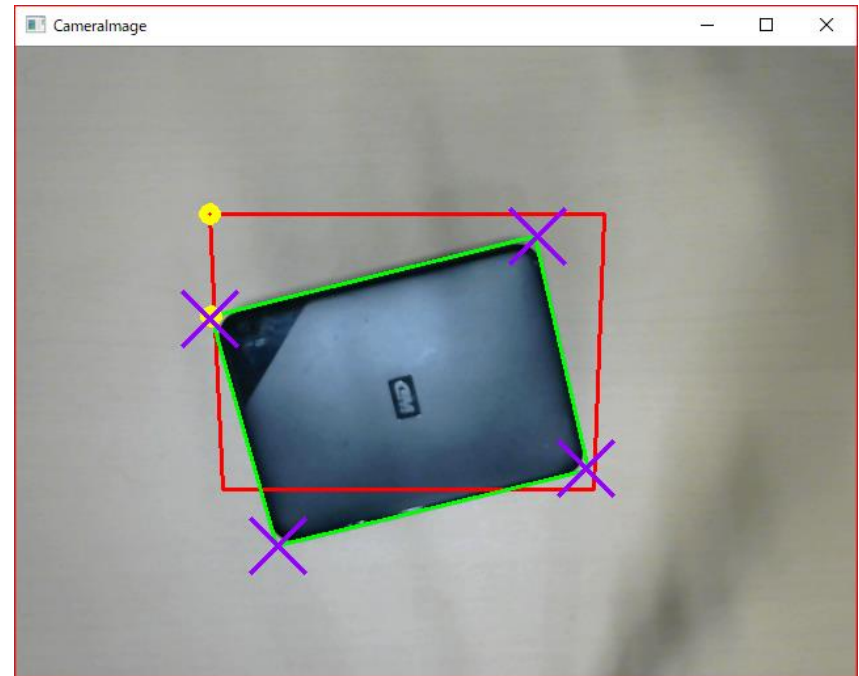
# プログラムの流れ



輪郭画像



四辺の直線取得(マスター登録)



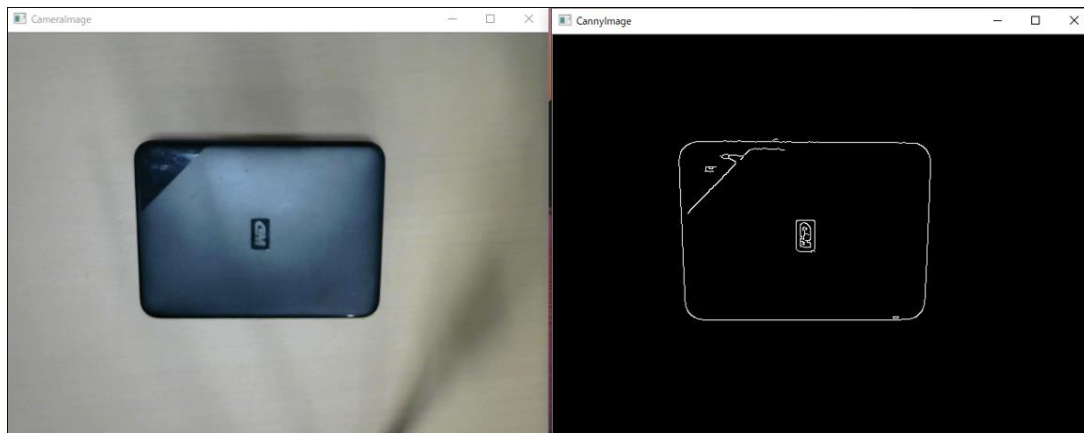
移動(ターゲット)と点群マッチングおよび座標変換

# プログラムの技術内容

- 四角形状の画像を入力
- 輪郭画像の生成
  - Cannyフィルタ ----- OpenCV
  - 二値化処理 ----- OpenCV
- 四辺の直線を生成
  - 直線ハフ変換 ----- Cコード
  - 直線のロバスト推定 ----- eyemLib
- 四頂点を計算
- 四角形状の移動
- 元の位置・傾きと移動後の位置・傾きのずれを計算
  - 点群マッチング ----- Cコード
  - 同次変換行列 ----- Cコード

# 輪郭画像の生成

## □ Cannyフィルタと二値化処理



## □ 一般的な輪郭強調フィルタ

フィルタ	概要・特徴
Sobel	画像の縦と横で別々に微分処理を行い、その結果を合成します。小さい輝度値の変化も強調する1次微分フィルタである。
Prewitt	Sobelと同様に画像の縦と横で別々に微分処理を行い、その結果を合成します。平滑化の要素も含まれた1次微分フィルタである。
Laplacian	変化が大きいところを強調する2次微分フィルタである。

# 輪郭画像の生成(Cannyフィルタ)

## □ Cannyフィルタの特徴

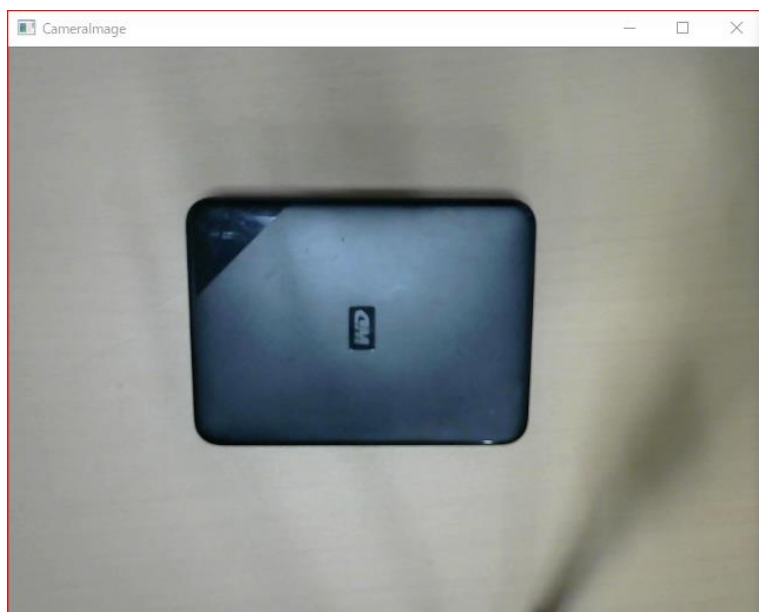
- ノイズ除去のためのGaussianフィルタと、輪郭強調のためのSobelフィルタを組み合わせた複合フィルタ処理である。
- 最大閾値検出処理と最大・最小の2つのヒステリシス閾値処理によって、ノイズや孤立した輪郭を抽出しない。



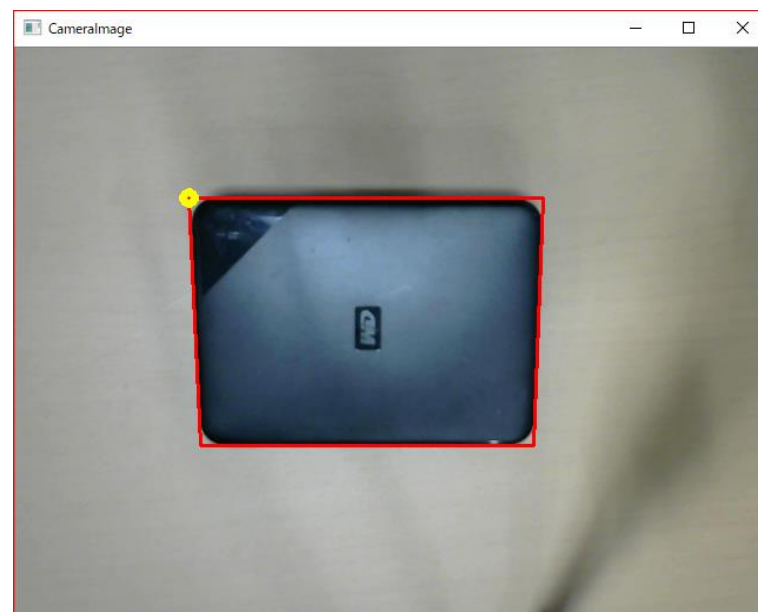
- 実際のエッジを検出し損ねる確率が低く、かつ、エッジでない点や線を間違っ検出する確率が低い。
- エッジとして検出した点や線が、真のエッジの中心の近くにある。
- 一つのエッジに対して、唯一の検出結果を与える。



# 四辺の直線を取得

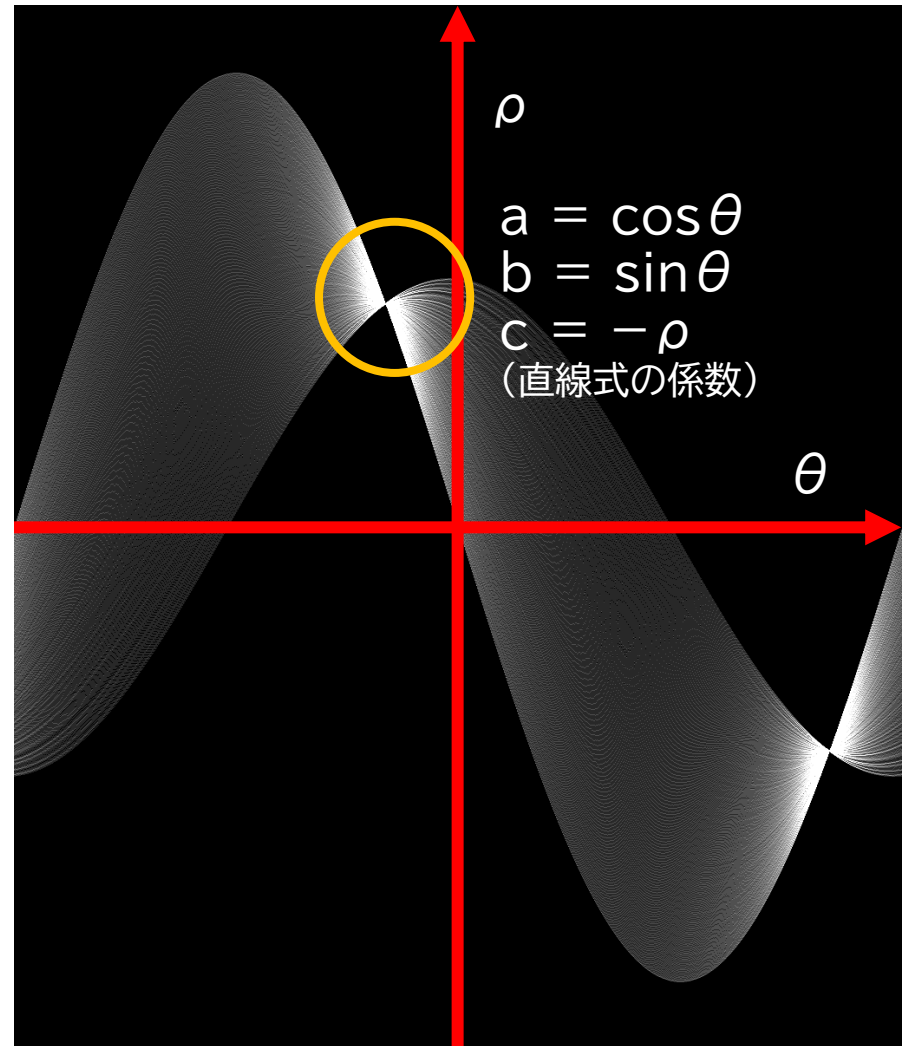
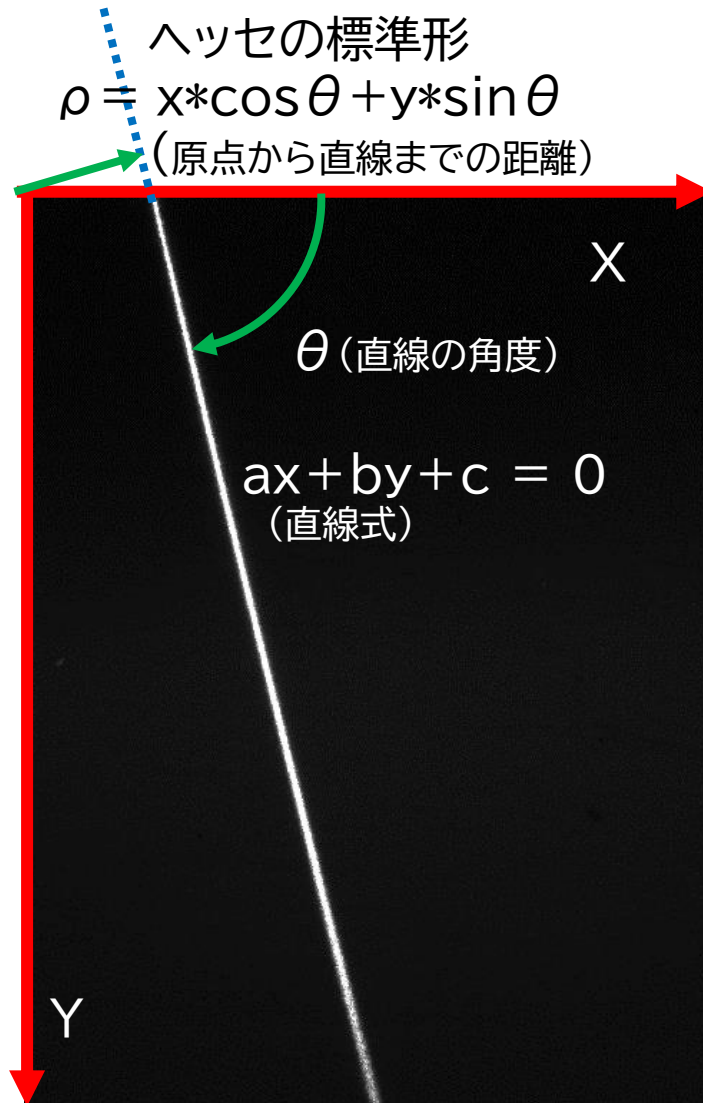


カメラ画像

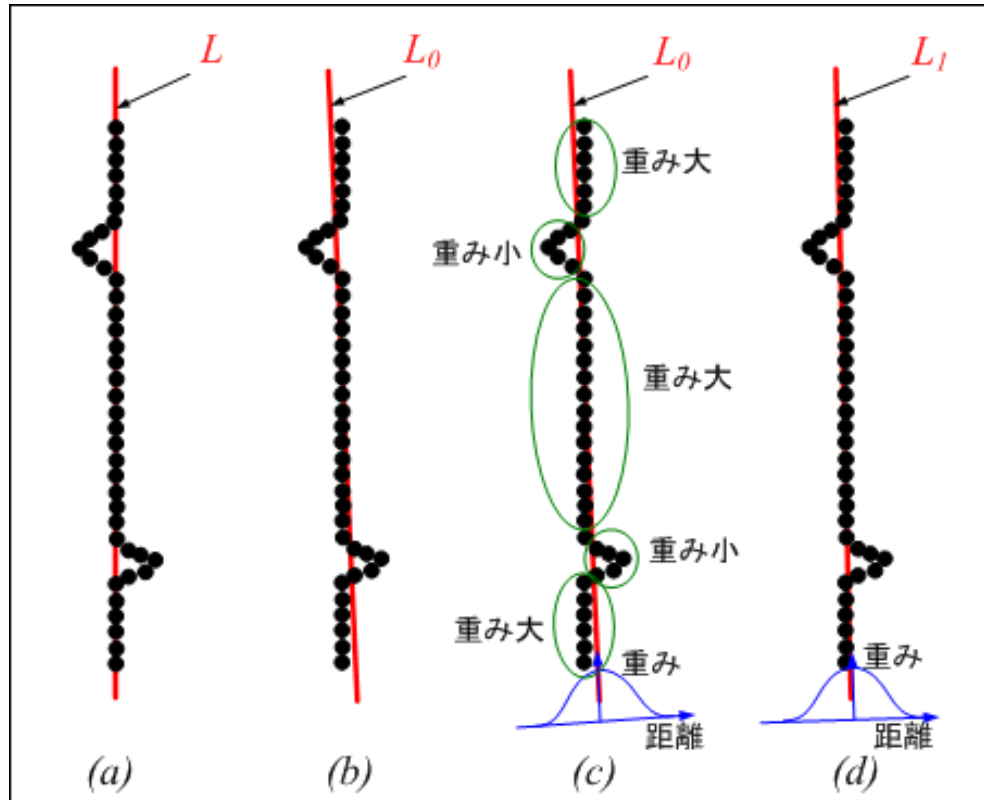


四辺の直線取得

# 四辺の直線を取得(直線ハフ変換)



# 四辺の直線式を求める(直線ロバスト推定)



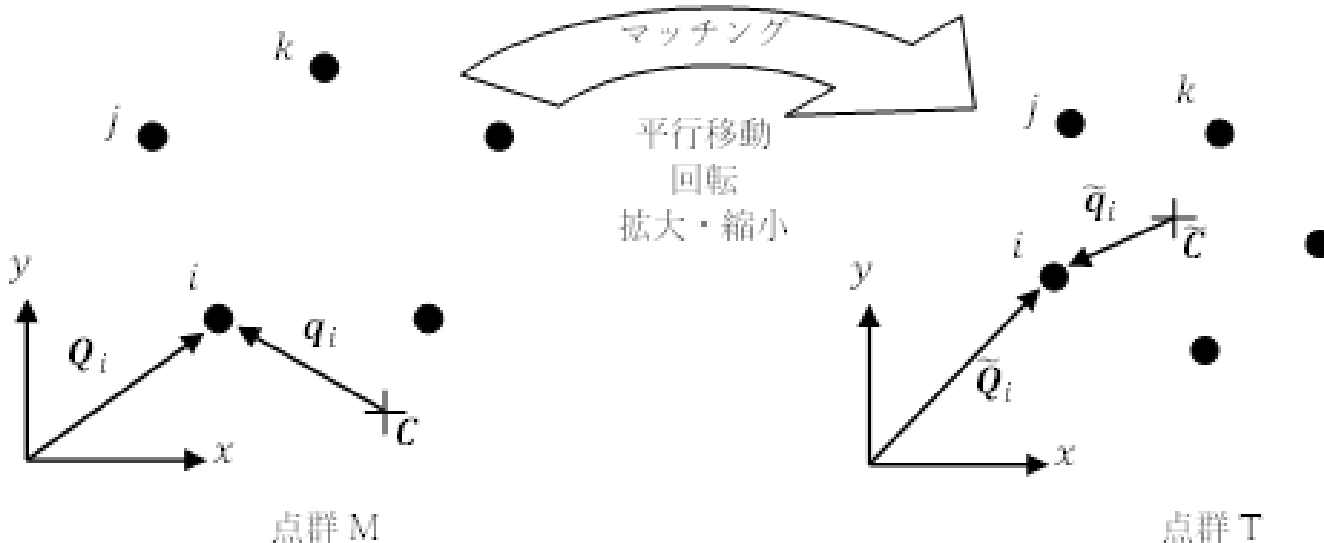
$L$ が求めたい直線を示、 $L_0$ が最小2乗推定法による近似で得られた直線、 $L_1$ がロバスト推定法で求めた直線である。

$L_1$ がほぼ $L$ に等しくなる。ロバスト推定法は、最小2乗推定法に重みの概念を組み込んだもので、重みを調整しながら反復処理させて精度を高めている。

なお、(c)はロバスト推定法の初期状態(最小2乗法と一致)で、(d)が終了状態を表している。

# 点群マッチング

MasterとTargetの頂点同士の点群マッチングを行う。



- $C$ : 点群Mの基準点の位置ベクトル
- $\tilde{C}$ : 点群Tの重心の位置ベクトル(定ベクトル)
- $Q_i, \tilde{Q}_i$ : 各点の位置ベクトル( $\tilde{Q}_i$  は定ベクトル)
- $q_i$ : 点群M各点の基準点からの位置ベクトル(定ベクトル)、 $q_i = \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \end{pmatrix}$
- $\tilde{q}_i$ : 点群T各点の重心からの位置ベクトル(定ベクトル)、 $\tilde{q}_i = \begin{pmatrix} \tilde{x}_i \\ \tilde{y}_i \end{pmatrix}$

- $s$ : スケール(相似比)
- $R$ : 角度  $\theta$  の回転行列、すなわち
 
$$R = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}$$
- $\langle u, v \rangle$ : 縦ベクトル  $u$  と縦ベクトル  $v$  の内積、すなわち  $\langle u, v \rangle = u^T v$  (Tは転置)
- $\|u\|$ : ベクトル  $u$  のユークリッドノルム、すなわち  $\|u\| = \sqrt{\langle u, u \rangle}$

# 点群マッチング

## □ 最小二乗法(使用コード)

二つの点群のそれぞれの重心を合わせた後、対応点の誤差の二乗和が最小となるように、テンプレート点群の回転角および相似比を探す。

最小二乗法で最小化すべき評価関数  $f(\mathbf{C}, \theta, s)$

$$f(\mathbf{C}, \theta, s) = \sum_{i=1}^n \|\mathbf{Q}_i - \mathbf{Q}_i\|^2$$

最小二乗解すなわち式の  $f(\mathbf{C}, \theta, s)$  を最小化する解は、 $f$  をパラメータ  $\mathbf{C}, \theta, s$  ごとに微分して0とおき、それらを解くことで得られる。

## □ ロバスト推定法

二つの点群のそれぞれの重心を合わせた後、対応点の重み付き誤差の二乗和が最小となるように、テンプレート点群の回転角および相似比を探す。

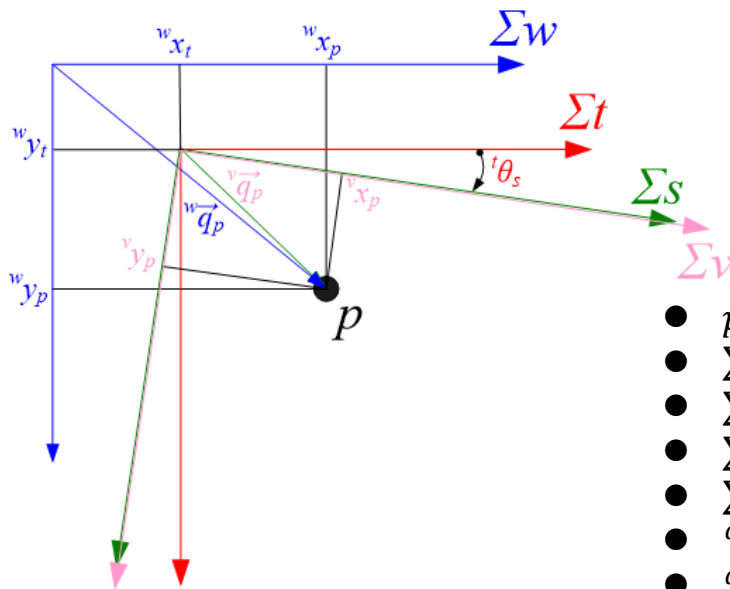
## □ ミニマックス法

目標点群の各点を中心として、テンプレート点群の対応点が入るように同一半径の円を設ける。テンプレート点群をいろいろに動かしたとき、円の半径が最小となる位置・回転角および相似比を探す。

# 同次変換行列による座標変換

平行変換と回転変換とスケール変換を同次変換行列で表現し、すべての変換を行列演算により実施し、Masterの頂点をTargetの頂点に合わせる。

$$\begin{pmatrix} {}^w x_p \\ {}^w y_p \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & {}^w x_t \\ 0 & 1 & {}^w y_t \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos^t \theta_s & -\sin^t \theta_s & 0 \\ \sin^t \theta_s & \cos^t \theta_s & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} {}^s \lambda_v & 0 & 0 \\ 0 & {}^s \lambda_v & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} {}^v x_p \\ {}^v y_p \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} {}^s \lambda_v \cos^t \theta_s & -{}^s \lambda_v \sin^t \theta_s & {}^w x_t \\ {}^s \lambda_v \sin^t \theta_s & {}^s \lambda_v \cos^t \theta_s & {}^w y_t \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} {}^v x_p \\ {}^v y_p \\ 1 \end{pmatrix}$$



- $p$  : 任意の点
- $\Sigma w$  : 変換先の座標系
- $\Sigma v$  : 変換元の座標系
- $\Sigma s$  : スケール変換先の座標系
- $\Sigma t$  : 回転変換先の座標系
- ${}^a x_b, {}^a y_b$  : 座標系  $a$  から見た座標系  $b$  の原点の  $x$  座標、 $y$  座標
- ${}^a \theta_b$  : 座標系  $a$  の  $x$  軸から座標系  $b$  の  $x$  軸への傾き角
- ${}^a \vec{q}_p$  : 座標系  $a$  の任意の点  $p$  へのベクトル

# 数値演算ライブラリeyemLib

(株)アイディールの技術紹介

<https://www.eyedeal.co.jp/eyemlib.html#spb-bookmark-12>

名称	内容
数学ユーティリティ	ベクトル、内積、外積、2次、3次、4次方程式解等
行列計算ユーティリティ	加算、乗算、転置、逆行列等
近似計算	直線、平面、円、楕円近似等
計算幾何	点群の凸包、線分と凸多角形の交点等
2次元幾何計算（2次元キャパー）	点と直線の距離、2直線の交角、3点を通る円等
3次元幾何計算（3次元キャパー）	点と平面の距離、直線と平面の交点、2平面の光線等
2値ブロップ解析	判別分析法、ブロップの膨張・収縮、ブロップ解析等
1次元エッジ抽出	濃度差最大のエッジ点、濃度勾配が最大のエッジ点等
点群マッチング	2点群のマッチング等
カメラ・キャリブレーション	射影変換、カメラ内部・外部パラメータ等

# 基本アルゴリズム

(株)アイディールの技術紹介

コアアルゴリズム	用途							
	位置決め		検査		計測		認識	
	前処理	本処理	前処理	本処理	前処理	本処理	前処理	本処理
特殊画質改善	●		●		●		●	
特殊エッジ抽出	●	●	●	●	●	●	●	●
特殊2値化	●	●	●	●				●
モルフォロジ	●	●		●			●	●
フーリエ変換				●				
ウェーブレット変換		●	●	●				
カラー認識				●				
ロバスト推定法	●	●	●	●	●	●	●	●
ハフ変換(直線・円)	●	●			●	●		
正規化相関	●	●			●	●		
ジオメトリックハッシング	●	●						
KL変換							●	●
遺伝的アルゴリズム	●		●		●		●	
ニューロ(MLP)							●	●
ファジィ理論							●	●
3次元処理(射影幾何学)	●	●			●	●		
弛緩法(確率的・適応型)	●	●	●	●				
スネークス			●	●			●	●
計算幾何学				●				●
場の理論				●				●
カオス理論								●
多変量解析	●	●	●	●	●	●	●	●
位置決め理論(狭視野系)		●				●		
キネマティクス		●						



# 高機能画像処理ファンクション

(株)アイディールの技術紹介

## □ 実績のある100種類以上のファンクション群(抜粋)

ステレオカメラ次元ピック&プレース	確率的弛緩法を応用したエッジ強調と連結	インナーリードの先端座標検出
最小2乗法とロバスト推定法	良品登録のみによる良否判定	2点を使った相似変換パラメータ算出
クラック抽出	粒子の分散度算出	拡張型正規化相関サーチ
部分空間正規化相関サーチ	パターン自動登録型正規化相関,ウェーブレット変換	カラーカメラのモザイクング
重み付きフィルタ,射影フィルタ,ヒストグラムフィルタ	1次元ウェーブレット利用欠陥抽出	主成分分析を使ったパターン認識
斜め1次元ウェーブレット利用欠陥抽出	相互相関法を応用した回転量の算出	4次方程式の解法
アフィン変換の最小2乗推定法	ユークリッド変換式の導出	ジオメトリックハッシング
楕円と点の距離算出	画像の正対化に必要な対応点算出	2直線の狭角を拘束条件にしたコーナ検出
Cannyの最適フィルタ	マハラノビス計量によるロバストな検査	ベイズの決定則の導出
ベクトルによる偏微分	3次元キャリブレーション	テレセントリックレンズとシャインプルーフレレンズによる3次元計測

# 3次元計測

(株)アイディールの技術紹介

## □ 3次元計測技術

- ステレオ3次元計測
- 光切断3次元計測

## □ 2眼ステレオ計測用カメラユニット例

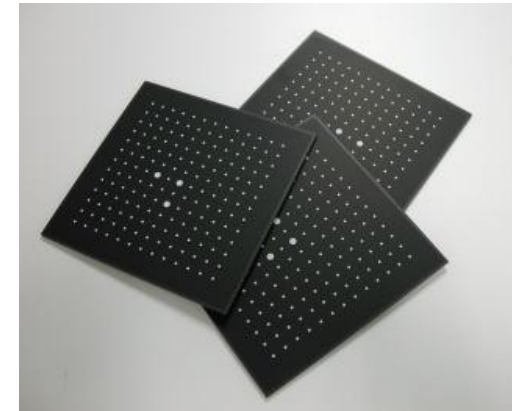


## □ 光切断計測例



## □ キャリブレーションボード

2台のカメラ間、カメラとレーザ間のキャリブレーションに使用します。

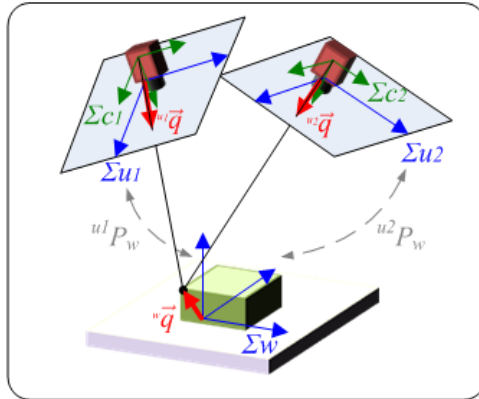


3Dハンディスキャナ LC-GEAR は(株)コムビック製  
<http://comvic.co.jp/>

# 3次元ライブラリ

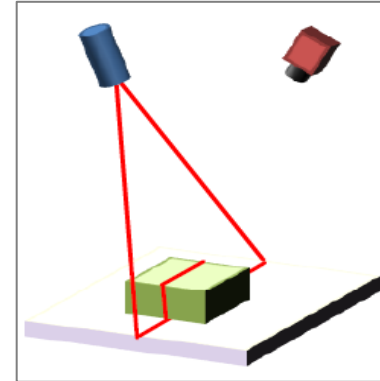
(株)アイディールの技術紹介

## □ 2眼ステレオ計測ライブラリ



- 2台のカメラで得られた2次元座標から3次元座標を求める。

## □ 光切断計測ライブラリ



- レーザーとカメラを組み合わせ、3次元計測を実現する。

## □ 曲面近似ライブラリ

3次元点群にたいして、N次元曲面をあてはめ、曲面方程式を求める。

## □ 3次元マッチングライブラリ

ICP(Iterative Closest Point)アルゴリズムによる、3次元点群同士のマッチングをロバスト推定で実行する。

## □ Structure from Motionライブラリ

多始点画像から3次元形状の3次元点群を生成する。

# ご清聴ありがとうございました。

## 参考文献

1. 石井 晴之, 村田 暁紀, 上野 史 他; 相似な三角形に基づくクレータマッチングによるSLIM探査機の自己位置推定とその精度向上, 航空宇宙技術, Vol.17, pp.69-78, 2018 年
2. OpenCV 2.2 C++ リファレンス  
[http://opencv.jp/opencv-2svn/cpp/imgproc\\_feature\\_detection.html?highlight=canny#Canny](http://opencv.jp/opencv-2svn/cpp/imgproc_feature_detection.html?highlight=canny#Canny)
3. (株)アイディール; 点群マッチングのアルゴリズム(Ver.1.1), 2013  
[https://www.eyeddeal.co.jp/img/eyemLib\\_matching.pdf](https://www.eyeddeal.co.jp/img/eyemLib_matching.pdf)