

コンピュータビジョン

担当: 井尻 敬

コンピュータビジョン、2020

4/09	序論	: イントロダクション, テクスチャ合成
4/16	特徴検出1	: テンプレートマッチング、コーナー・エッジ検出
4/23	特徴検出2	: DoG特徴量, SIFT特徴量, ハフ変換
4/30	領域分割	: 領域分割とは, 閾値法, 領域拡張法, 動的輪郭モデル
5/14	領域分割	: グラフカット, モーフォロジー処理, Marching cubes
5/21	パターン認識基礎1: パターン認識概論	, サポートベクタマシン
5/28	パターン認識基礎2: ニューラルネットワーク	, 深層学習
6/04	パターン認識基礎3: 主成分分析	, オートエンコーダ
6/11	筆記試験 (50点満点)	
6/18	プログラミング演習 1	
6/25	プログラミング演習 2	
7/02	プログラミング演習 3	
7/09	プログラミング演習 4	
7/16	プログラミング演習 5	

特徴検出 と パターン認識

第2,3回 - パターン・図形・特徴の検出とマッチング

画像の中から, 特定のパターン, コーナー, 直線, 円, などの特徴点を検出するアルゴリズムを紹介する

第6-8回-- パターン認識

既存のデータセットからクラス分類を学習し, 未知画像がどのクラス属すかを推測する手法を紹介する

深層学習にも触れる

Contents 画像内の特定パターンを発見する手法

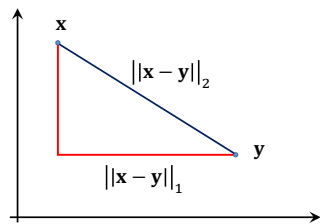
- テンプレートマッチング
- 特徴点検出
 - コーナー検出 (Harris corner detector/FAST)
 - エッジ検出 (Canny edge detector)
 - その他有名な特徴点 (SIFT/BRIEF/ORB)
- 特徴点の対応付け
- Hough変換

準備: ノルム(norm)

d 次元空間のベクトル $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ の p -ノルムは以下の通り定義される

$$\|\mathbf{x}\|_p = (|x_1|^p + |x_2|^p + \dots + |x_n|^p)^{\frac{1}{p}}$$

例 $d=2$ のとき



$p=2$ なら...

$$\|\mathbf{x} - \mathbf{y}\|_2 = \sqrt{(x_1 - y_1)^2 + (x_2 - y_2)^2}$$

これはよく知っているユークリッド空間の距離

$p=1$ なら...

$$\|\mathbf{x} - \mathbf{y}\|_1 = |x_1 - y_1| + |x_2 - y_2|$$

点 \mathbf{x} から点 \mathbf{y} へ、軸に沿った方向のみで移動した際の距離
市街地における移動距離になぞらえて**市街地距離**や**マンハッタンノルム**と呼ばれる

左の画像から右の画像を探せ



※地味な例ですみません。。。

左の画像から右の画像を探せ



※地味な例ですみません。。。

テンプレート マッチング

TemplateMatching.py



入力画像



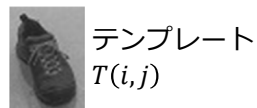
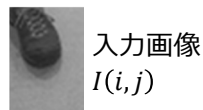
比較



テンプレート
画像

- 入力画像を**ラスタスキャン**し、入力画像と**テンプレート**の**類似度**を比較
- 類似度が閾値より高い部分を出力する
- ※**テンプレート**: 検索対象を表す標準画像
- ※**ラスタスキャン**: 画像を左から右に、上から下に、一画素ずつ走査すること

類似度（相違度）の定義



Grayscale化
されている

- 相違度: **S**um of **S**quare **D**istance

$$R_{SSD} = \sum_{i,j} (I(i,j) - T(i,j))^2$$

- 相違度: **S**um of **A**bsolute **D**istance

$$R_{SAD} = \sum_{i,j} |I(i,j) - T(i,j)|$$

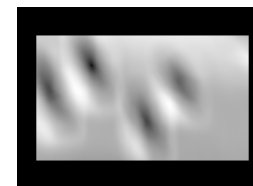
- 類似度: **N**ormalized **C**ross **C**orrelation(正規化相互相関)

$$R_{NCC} = \frac{\sum_{i,j} I(i,j)T(i,j)}{\sqrt{\sum_{i,j} I(i,j)^2 \sum_{i,j} T(i,j)^2}}$$

テンプレートマッチングの結果



SAD



SSD



NCC



$$\sum_{i,j} |I(i,j) - T(i,j)|$$

$$\sum_{i,j} (I(i,j) - T(i,j))^2$$

$$\frac{\sum_{i,j} I(i,j)T(i,j)}{\sqrt{\sum_{i,j} I(i,j)^2 \sum_{i,j} T(i,j)^2}}$$

SAD/SSDは相違度なので、近いところほど値が小さくなる

NCCは類似度なので近いところほど値が大きくなる

例えば、閾値以下の局所最小部を検出対象とすればよい

テンプレートマッチングの結果

TemplateMaching.py



SAD



SSD



NCC



$$\sum_{i,j} |I(i,j) - T(i,j)|$$

$$\sum_{i,j} (I(i,j) - T(i,j))^2$$

$$\frac{\sum_{i,j} I(i,j)T(i,j)}{\sqrt{\sum_{i,j} I(i,j)^2 \sum_{i,j} T(i,j)^2}}$$

SAD/SSDは相違度なので、近いところほど値が小さくなる

NCCは類似度なので近いところほど値が大きくなる

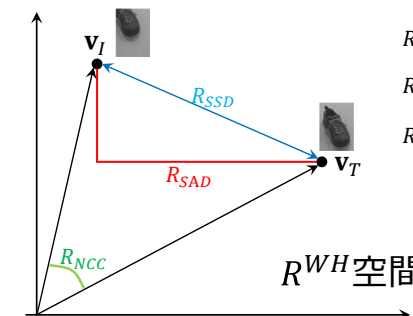
例えば、閾値以下の局所最小部を検出対象とすればよい

類似度・相違度の定性的理解

- 入力画像・テンプレートは $W \times H$ グレースケール画像
- これを (WH) -次元ベクトルと考える



$$\mathbf{v}_I, \mathbf{v}_T \in R^{WH}$$



R_{SSD} は $\mathbf{v}_I, \mathbf{v}_T$ のユークリッド距離

R_{SAD} は $\mathbf{v}_I, \mathbf{v}_T$ の市街地距離

R_{NCC} は $\mathbf{v}_I, \mathbf{v}_T$ の角度のコサイン

R^{WH} 空間

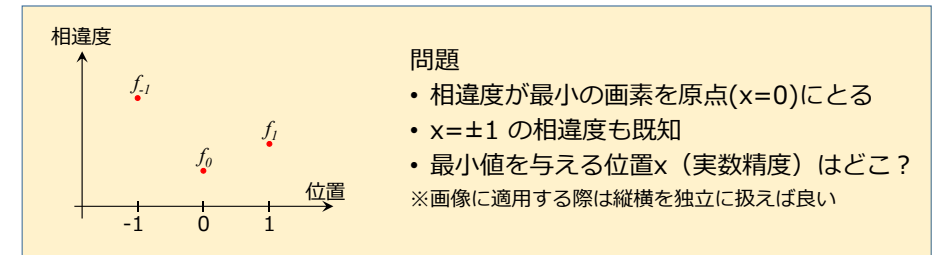
サブピクセル精度のテンプレートマッチング

- テンプレートマッチングは目的画像にテンプレート画像を重ね差分を評価するため発見できる位置は**ピクセル単位（離散値）**
- サブピクセル（連続値）**精度で位置検出を行いたい

- 局所的に関数をフィッティングし、最小値を求める

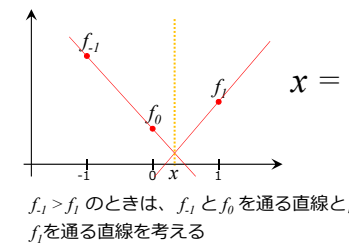
→ 等角直線フィッティング

→ パラボラフィッティング



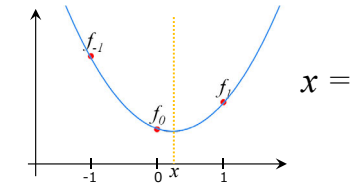
等角直線フィッティング

下図の通り傾きが-1倍の2本の直線の交点を利用

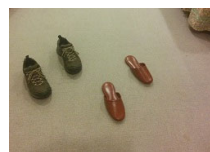


パラボラフィッティング

二次関数で相違度を補間し相違度の最小位置を求める



テンプレートマッチングの高速化

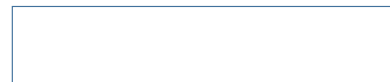


W×H



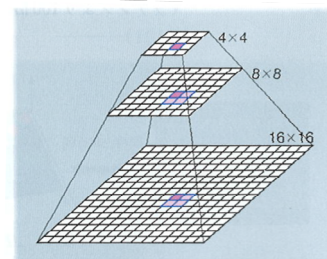
w×h

対象画像全領域にテンプレートを重ね合わせて差分を計算する計算複雑度は…



残差逐次検定：目標画像をラスタスキャンしテンプレートとの差分計算をする際、現在の最小値よりも差分が大きくなったら計算を打ち切る

粗密探索法：ガウシアンピラミッドを生成。低解像度画像にてマッチングする画素を発見。ひとレベル高解像度画像に移動し、発見した画素に関する数画素のみに対してマッチングを計算する



■図11.5—イメージピラミッド

教科書 図11.5

復習: Steepest descent - 最急降下法

最小化問題

関数 $f(x)$ を最小化する x を求めよ

$$\arg \min_x f(x)$$

※ 関数 $f(x)$ の形が分かっている $\nabla f(x) = 0$ が解けるならそれでよいが、そうでない場合に使える手法の一つが最急降下法

最急降下法

- x^0 を初期解とする（何らかの方法で発見する）
- 変化が十分少なくなるまで以下を繰り返す

$$x^{t+1} = x^t - h \nabla f(x)$$

Chamfer Matching

1. 入力画像 I のエッジ画像 $I_E(x, y)$ を生成し, エッジ画素からの距離画像 I_{DT} を計算

2. テンプレート画像 T をエッジ画像 T_E に変換

$$T_E(u, v) = \begin{cases} 0 & (u, v) \text{ がエッジ画素} \\ 1 & \text{それ以外} \end{cases}$$

3. 相違度を以下の通り定義する

$$S(x, y) = \sum_{v=0}^H \sum_{u=0}^H T_E(u, v) I_{DT}(x + u, y + v)$$

※ エッジ画素上で距離画像をサンプリング

※ テンプレート全体を見ないので高速

教科書図 11.7

Chamfer Matching

3. 相違度を以下の通り定義する

$$S(x, y) = \sum_{v=0}^H \sum_{u=0}^W T_E(u, v) I_{DT}(x + u, y + v)$$

4. 初期位置 (x^0, y^0) から最急降下法により相違度が最小となる位置を探索する

$$\begin{pmatrix} x^{t+1} \\ y^{t+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x^t \\ y^t \end{pmatrix} - \nabla S(x, y)$$

※ 勾配の式は以下の通り

$$\nabla S(x, y) = \begin{pmatrix} \sum_v \sum_u T_E(u, v) \frac{\partial}{\partial x} I_{DT}(x + u, y + v) \\ \sum_v \sum_u T_E(u, v) \frac{\partial}{\partial y} I_{DT}(x + u, y + v) \end{pmatrix}$$

教科書図 11.7

まとめ：テンプレートマッチング

- 入力画像から物体を検出するための手法
- 検出対象の画像（テンプレート）を用意し, 入力画像をラスタスキャンし相違度を評価
- 相違度が閾値以下の領域を出力する
- 相違(類似)度：SAD, SSD, NCCなど

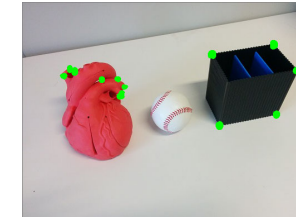


サブピクセル精度で検出するための関数フィッティング

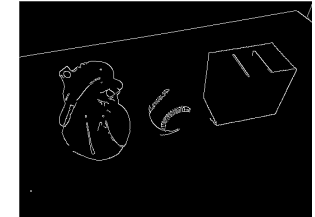
高速化のための残差逐次検定・粗密(coarse to fine)探索・chamfer matching

コーナー、輪郭線の検出

物体認識・物体追跡・位置あわせなど, より高度な画像処理に利用するため画像から『コーナー』や『輪郭線』といった特徴的な点・曲線を検出する



コーナー検出
(Harris Corner Detector)

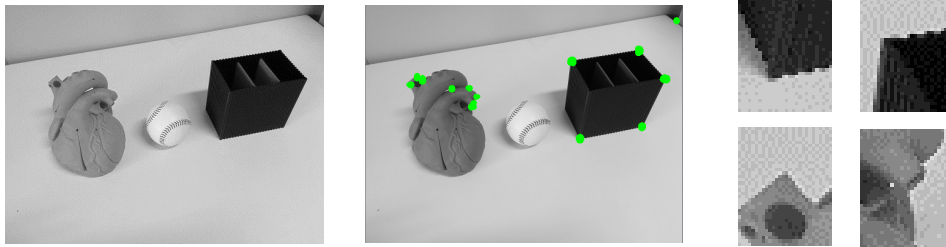


輪郭検出
(Canny Edge detector)

HarrisCorner.py
CannyEdge.py

Harrisのコーナー検出アルゴリズム

[C. Harris & M. Stephens (1988). "A Combined Corner and Edge Detector". Proc. of the 4th ALVEY Vision Conference. pp. 147-151.]



• 入力：グレースケール画像

• 出力：コーナー画素群

• 手法の概要

Harris行列（又はStructure tensor matrixと呼ばれる）を定義し、この固有値固有ベクトルを用いて、局所領域の輝度変化方向と変化量を検出する
局所領域の輝度変化が、直交する2方向について大きくなる部分をコーナーと定義

Structure tensor matrix (1/3)

画像上の点 (x, y) の輝度値を $I(x, y)$ と表す

点 (x, y) における**Structure tensor matrix**は以下の通り定義される

$$\mathbf{A}(x, y) = \sum_{u, v} G(u, v) \begin{pmatrix} I_x I_x & I_x I_y \\ I_x I_y & I_y I_y \end{pmatrix}$$

ただし、 $I_y = I_y(x + u, y + v)$, $I_x = I_x(x + u, y + v)$ と省略したもの
 I_x と I_y は画像の微分（sobel filter）

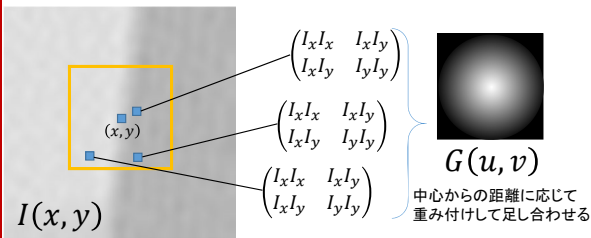
また、 $G(u, v)$ は重み関数（ガウシアンを用いる）

※教科書の式11.6 ~ 11.9に対応する

Structure tensor matrix (2/3)

実際の計算手順

$$\mathbf{A}(x, y) = \sum_{u, v} G(u, v) \begin{pmatrix} I_x I_x & I_x I_y \\ I_x I_y & I_y I_y \end{pmatrix}$$



Structure Tensorの性質

- 固有値を λ_1, λ_2 とする ($\lambda_1 > \lambda_2$)
- 固有ベクトルを $\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2$ とする
- 対称行列 → 固有値は実数
- 対称行列 → 固有ベクトルは直交
- 半正定置 → $\lambda_1 \geq 0, \lambda_2 \geq 0$
 - 半正定置行列の和なのでStructure tensorは半正定値になる

- \mathbf{v}_1 は輝度値変化の最も大きな方向
- λ_1 は \mathbf{v}_1 方向の輝度値変化の大きさ
- λ_2 は \mathbf{v}_2 方向の輝度値変化の大きさ

Harrisのコーナー検出アルゴリズム

グレースケール画像からコーナーを検出

1. 各画素 (x, y) におけるStructure Tensor \mathbf{A} と固有値 λ_1, λ_2 を計算

2. 各画素 (x, y) において $R = \lambda_1 \lambda_2 - k(\lambda_1 + \lambda_2)^2$ を計算

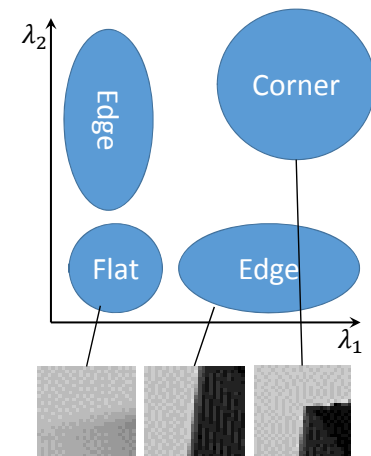
3. R が極大かつ閾値以上の点をコーナーとして出力する

※ただし、 k はユーザが指定するパラメタ (0.04~0.06)

※ $R = \lambda_1 \lambda_2 - k(\lambda_1 + \lambda_2)^2$ は、コーナーらしさを現す関数：
 λ_1 と λ_2 が大きかつ近いときに大きな値を返す

評価式Rの3Dプロット →

[http://www.wolframalpha.com/input/?i=z%3Dx*y+-+0.02*\(x%2By\)%5E2](http://www.wolframalpha.com/input/?i=z%3Dx*y+-+0.02*(x%2By)%5E2)



Harrisのコーナー検出アルゴリズム

グレースケール画像からコーナーを検出

1. 各画素 (x,y) におけるStructure Tensor \mathbf{A} と固有値 λ_1, λ_2 を計算
2. 各画素 (x,y) において $R = \lambda_1 \lambda_2 - k(\lambda_1 + \lambda_2)^2$ を計算
3. R が極大かつ閾値以上の点をコーナーとして出力する



グレースケール画像からコーナーを検出 **new**

1. 各画素 (x,y) におけるStructure Tensor \mathbf{A} を計算
2. 各画素 (x,y) において $R = \det \mathbf{A} - k(\text{tr } \mathbf{A})^2$ を計算
3. R が極大かつ閾値以上の点をコーナーとして出力する

固有値の計算時間が無駄

$$\det \mathbf{A} = \lambda_1 \times \lambda_2$$

$$\text{tr } \mathbf{A} = \lambda_1 + \lambda_2$$

**という関係を利用すると
計算を効率化できる**

※練習) 上記の関係を証明せよ

Harrisのコーナー検出アルゴリズム（実装例）

Cannyの輪郭線検出アルゴリズム(1/2)

※井尻はキャニーと呼んでますが、教科書はケニーですね。。。。

1. ガウシアンフィルタをかける： $I \rightarrow G * I$

例) 5x5, $\sigma=1.4$ のガウシアンなどが利用される

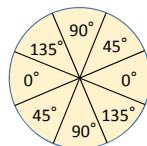
2. 勾配強度・勾配方向計算

Sobel filterにより縦横方向の微分を計算： $I \rightarrow I_x, I_y$

$$\text{勾配強度} : g(x,y) = \sqrt{I_x(x,y)^2 + I_y(x,y)^2}$$

$$\text{勾配方向} : d(x,y) = \tan^{-1} \frac{I_y(x,y)}{I_x(x,y)}$$

(0°/45°/90°/135°の4通りに量子化)



Cannyの輪郭線検出アルゴリズム(2/2)

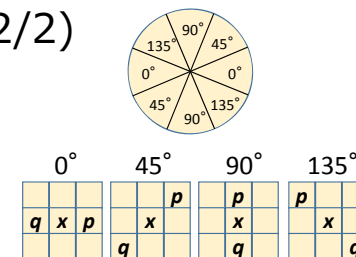
3. non-maximum suppression

細い輪郭線抽出のため、勾配強度が極大となる画素のみを残す

勾配強度画像の各画素 x に対して…

勾配方向に隣接する2画素 p,q と x の勾配強度を比較

画素 x の勾配強度が p,q と比べて最大でないなら x の勾配強度を0に



4. 閾値処理

二つの閾値 T_{max} と T_{min} を用意

勾配強度画像の画素 x の勾配強度が…

- T_{max} より大きい → Strong edge: 画素 x は輪郭線である
- T_{min} より小さい → not edge: 画素 x は輪郭線でない
- それ以外 → weak edge: もしstrong edgeに隣接していれば輪郭線とする

参考: OpenCV http://docs.opencv.org/2.4/doc/tutorials/imgproc/imgtrans/canny_detector/canny_detector.html

原著論文: Canny, J., A Computational Approach To Edge Detection, IEEE PAMI, 1986.

※紹介したものは実装の一例です。

Cannyの輪郭線検出アルゴリズム（実装例）

まとめ：コーナー・輪郭検出

コーナー検出：画像中の『角』形状を検出

• Harris Corner detection

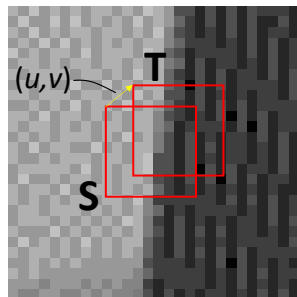
- Structure Tensorの固有値により角らしさを定義
- 様々な手法が知られる(FAST/SUSAN/ハッセ行列)

輪郭検出：画像中の物体と物体の境界を検出

• Canny Edge Detection

- 微分フィルタによる勾配画像取得
- 勾配方向を考慮した細線化
- 二つの閾値処理
- 様々な手法が知られる(Sobel/Hough変換…)

補足資料



Structure Tensor Matrix（導出）

[A Combined Corner and Edge Detector in 1988]

窓領域SとSを微少量(u,v)だけ移動した領域Tを考える。
この2領域の重み付き二乗誤差は以下の通り。

$$D(u, v) = \sum_{(x, y) \in S} G(x, y) (I(x + u, y + v) - I(x, y))^2 \quad \dots (1)$$

これはSを(u,v)だけずらした際の画像の変化量を示す

※ 重み関数G(x,y)には、ガウシアンがよく用いられる。

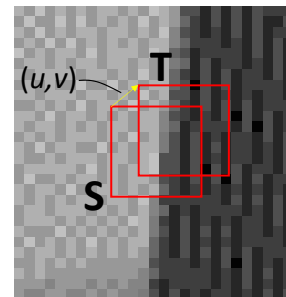
テーラー展開し2次以降の項を無視すると、以下の変形が得られる

$$I(x + u, y + v) \approx I(x, y) + uI_x(x, y) + vI_y(x, y)$$

これを(1)に代入すると、以下の通りStructure Tensor Matrix A が現れる

$$D(u, v) = (u, v) \mathbf{A} \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix}, \quad \mathbf{A} = \sum_{(x, y) \in S} G(x, y) \begin{pmatrix} I_x I_x & I_x I_y \\ I_x I_y & I_y I_y \end{pmatrix}$$

補足資料



Structure Tensor Matrix（導出）

窓領域SとSを(u,v)だけ移動した領域Tの二乗誤差は以下の通り

$$D(u, v) = (u, v) \mathbf{A} \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix}, \quad \mathbf{A} = \sum_{(x, y) \in S} G(x, y) \begin{pmatrix} I_x I_x & I_x I_y \\ I_x I_y & I_y I_y \end{pmatrix}$$

今知りたいのは、どの方向(u,v)に動かすと差分が最大になるか？つまり、画像の変化が大きいか？である。そのため以下の最大化問題を考える。

$$\operatorname{argmax}_{(u, v)} \frac{(u, v) \mathbf{A} \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix}}{\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix}}$$

この目的関数はレイリー商と呼ばれ、(u,v)が行列Aの固有ベクトルに一致するとき、最大値（最小値）をとり、最大値・最小値は固有値と一致することが知られている(証明省略)。

つまり、Structure Tensor matrixの固有値固有ベクトルを λ_1, λ_2 ($\lambda_1 > \lambda_2$) $\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2$ とすると、(u,v)が \mathbf{v}_1 に一致するとき画像は最も大きく変化する。また(u,v)が \mathbf{v}_2 に一致するとき画像の変化は最小になる。