画像情報処理1
－ 第11回 －

立命館大学　情報理工学部
画像・音メディアコース
岩本 祐太郎、徐　剛

シラバス

- 画像解析するための画像特徴を抽出する方法について学ぶ
- 画像認識方法(顔，物体etc.)について学ぶ

9 / 徐剛	画像特徴の抽出１
	画像の微分、勾配、エッジ抽出、Sobelフィルタ ※【BCPレベル1~2】対面で実施、【BCPレベル3~4】webで実施
10 / 徐剛	画像特徴の抽出２
	Cannyフィルタ、ヒステリシス閾値処理 ※【BCPレベル1~2】対面で実施、【BCPレベル3~4】webで実施
11 / 徐剛	画像特徴の抽出３
	２次元特徴、コーナーの抽出、Harrisオペレータ ※【BCPレベル1~2】対面で実施、【BCPレベル3~4】webで実施
12 / 徐剛	画像特徴の抽出４
	ハフ空間、ハフ変換、直接抽出 ※【BCPレベル1~2】対面で実施、【BCPレベル3~4】webで実施
13 / 徐剛	画像照合と認識１
	テンプレートマッチング、輝度の線形変換、正規化相関 ※【BCPレベル1~2】対面で実施、【BCPレベル3~4】webで実施
14 / 徐剛	画像照合と認識２
	ディスタンスマップ、２次元パターンの探索、影や隠れにもロバストなエッジマッチング ※【BCPレベル1~2】対面で実施、【BCPレベル3~4】webで実施
15 / 徐剛	確認テスト(60分)と解説(30分)
	第９～１４回の授業内容についてのテスト ※【BCPレベル1~2】対面で実施、【BCPレベル3~4】webで実施

参考文献・データセット

- CG-ARTS, ”ディジタル画像処理[改訂第二版]”, 2020/2/26.
- C. Harris, M. Stephens, “A Combined Corner and Edge Detector, ” Alvery Vision Conference, Vol. 15, No. 50, 1988.
- Robert Collins, CSE486, Penn State “Lecture 06 Harris Corner Detector”, http://www.cse.psu.edu/~rtc12/CSE486/lecture06.pdf
- 金澤靖, 金谷健一, “解説 コンピュータビジョンのための画像の特徴点の抽出”, 電子情報通信学会誌, Vol. 87, No. 12, 2004.
- 神奈川工科大学標準画像/サンプルデータ

  http://www.ess.ic.kanagawait.ac.jp/app_images_j.html

※スライドの画像は画像処理でよく用いられる上記の標準画像を利用

今日の目的

- Harrisオペレータの原理理解
  二次元特徴量・コーナーの検出

入力画像

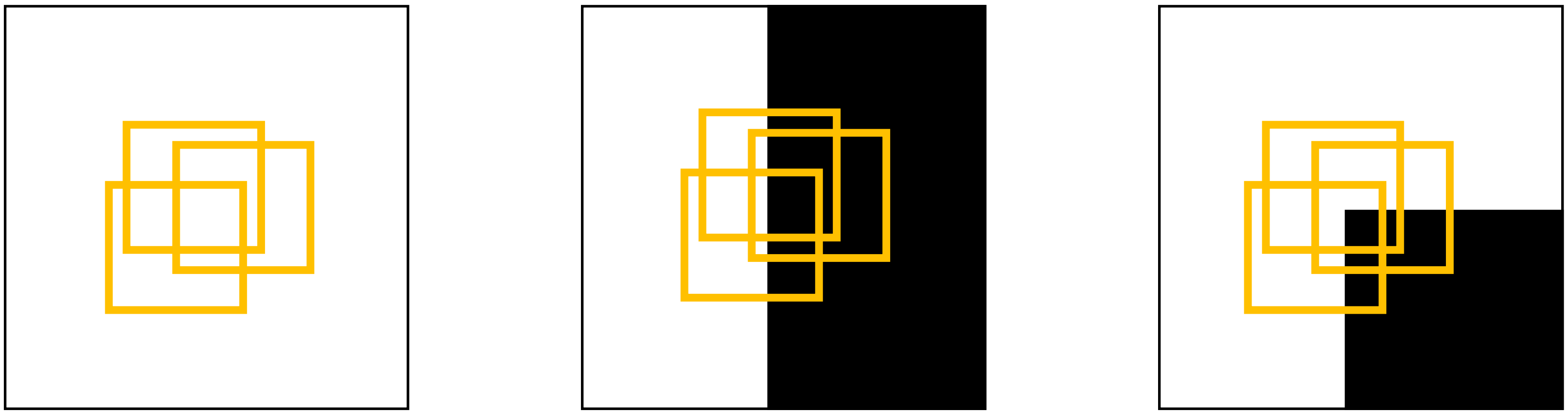
出力画像

コーナー検出の目的

- パノラマ画像等の位置合わせに利用される.
- 画像の特徴量として三次元再構成時に利用される.
- 画像の特徴量としてオブジェクト認識に利用される.

C. Harris, M. Stephens, “A Combined Corner and Edge Detector, ” Alvery Vision Conference, Vol. 15, No. 50, 1988.

Harrisオペレータの考え方1



平坦
パッチ間に違いは殆どない.

エッジ
一方向に変化が大きく，もう一方の方向には変化が少ない.

コーナー
どの方向に対しても変化が大きい.

※パッチ：画像中の小領域(上図ではオレンジ枠)

■ 微小量[u,v]移動した際の重み付き二乗誤差で評価

$$E(u, v) = \sum_{x,y} w(x, y)\,|I(x + u, y + v) - I(x, y)|^2$$

w: ガウス関数等

C. Harris, M. Stephens, “A Combined Corner and Edge Detector, ” Alvery Vision Conference, Vol. 15, No. 50, 1988.
Robert Collins, CSE486, Penn State “Lecture 06 Harris Corner Detector”, http://www.cse.psu.edu/~rtc12/CSE486/lecture06.pdf

Harrisオペレータの考え方2

■ 微小量[u,v]移動した際の重み付き二乗誤差で評価

$$E(u,v) = \sum_{x,y} w(x,y)\left[I(x+u, y+v) - I(x,y)\right]^2 \quad (1)$$

■ テーラー展開(１次近似)

$$I(x+u, y+v) \approx I(x,y) + uI_x(x,y) + vI_y(x,y) \quad (2)$$

■ 式(1)と式(2)より

$$\begin{aligned} E(u,v) &\approx \sum_{x,y} w(x,y)\left|uI_x(x,y) + vI_y(x,y)\right|^2 \\ &= \textstyle\sum_{x,y} w(x,y)\left\{u^2 I_x^2(x,y) + 2uvI_x(x,y)I_y(x,y) + v^2 I_y^2(x,y)\right\} \\ &= \begin{bmatrix} u & v \end{bmatrix} \boxed{\sum_{x,y} w(x,y) \begin{bmatrix} I_x^2 & I_xI_y \\ I_xI_y & I_y^2 \end{bmatrix}} \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3)$$

C. Harris, M. Stephens, "A Combined Corner and Edge Detector, " Alvery Vision Conference, Vol. 15, No. 50, 1988.
Robert Collins, CSE486, Penn State "Lecture 06 Harris Corner Detector", http://www.cse.psu.edu/~rtc12/CSE486/lecture06.pdf

Harrisオペレータの考え方3

■ 式(1)と式(2)より

$$E(u,v) \approx \sum_{x,y} w(x,y)\,[uI_x(x,y) + vI_y(x,y)]^2$$

$$= \sum_{x,y} w(x,y)\, u^2 I_x^2(x,y) + 2uvI_x(x,y)I_y(x,y) + v^2\, I_y^2(x,y)$$

$$= [u \quad v] \boxed{\sum_{x,y} w(x,y) \begin{bmatrix} I_x^2 & I_xI_y \\ I_xI_y & I_y^2 \end{bmatrix}} \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} \quad (3)$$

固有値問題**Ax=λx** (λ_1, λ_2)

変化量の大きい方向にλ_1,その方向と直交した方向にλ_2をとると

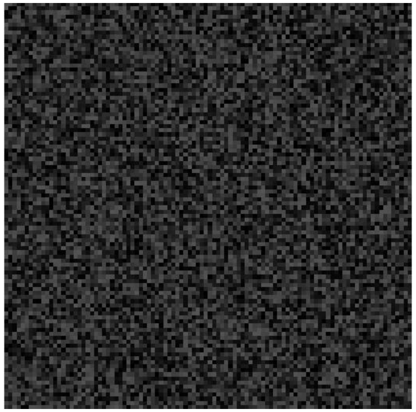
・λ_1とλ_2が共に小さいと平坦

・λ_1またはλ_2が大きいとエッジ

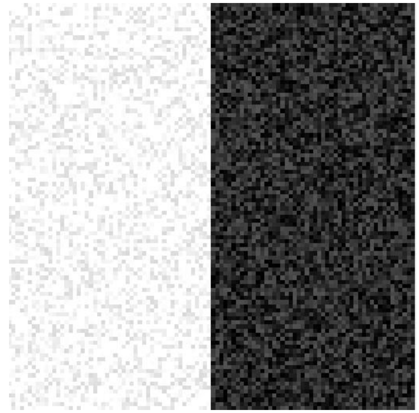
・λ_1とλ_2が共に大きいとコーナー

C. Harris, M. Stephens, “A Combined Corner and Edge Detector, ” Alvery Vision Conference, Vol. 15, No. 50, 1988.
Robert Collins, CSE486, Penn State “Lecture 06 Harris Corner Detector”, http://www.cse.psu.edu/~rtc12/CSE486/lecture06.pdf

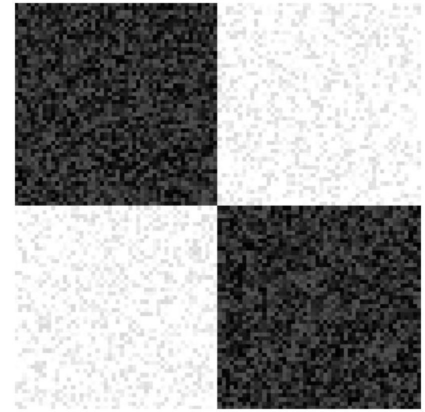
Harrisオペレータの考え方4



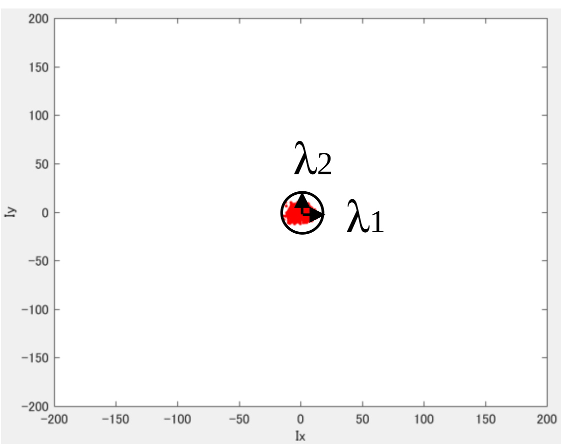
平坦



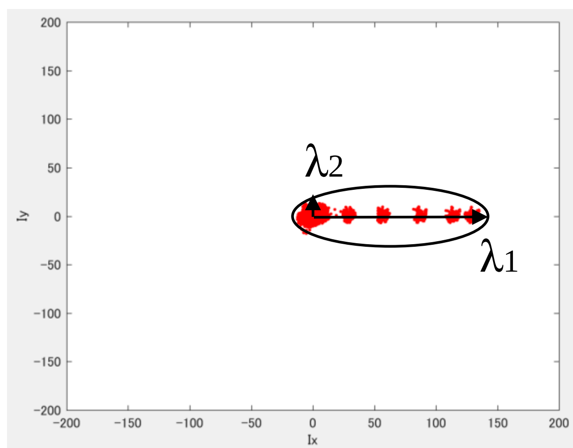
エッジ



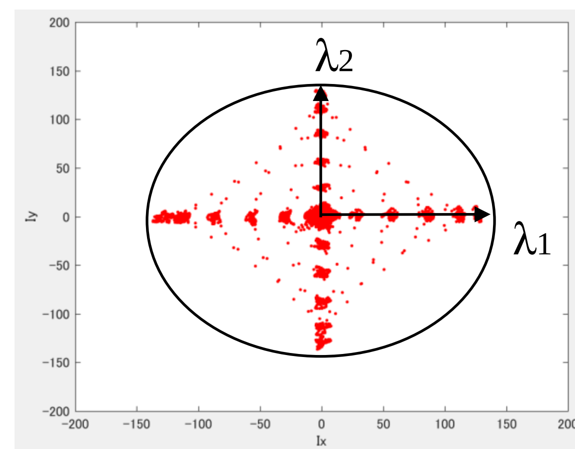
コーナー



λ_1 and λ_2 小さい



λ_1 or λ_2 大きい



λ_1 and λ_2 大きい

※ Gaussian [13,13], σ=3.0

C. Harris, M. Stephens, “A Combined Corner and Edge Detector, ” Alvery Vision Conference, Vol. 15, No. 50, 1988.
Robert Collins, CSE486, Penn State “Lecture 06 Harris Corner Detector”, http://www.cse.psu.edu/~rtc12/CSE486/lecture06.pdf

Harrisオペレータの考え方4

Harris手法ではコーナー関数の値が大きく，
局所的に最大値となる点がコーナーである．

■ コーナー関数

$$R = \lambda_1\lambda_2 - k(\lambda_1+\lambda_2)^2$$
$$= det\mathbf{M} - k(tr\mathbf{M})^2$$

固有値を求める必要がない！

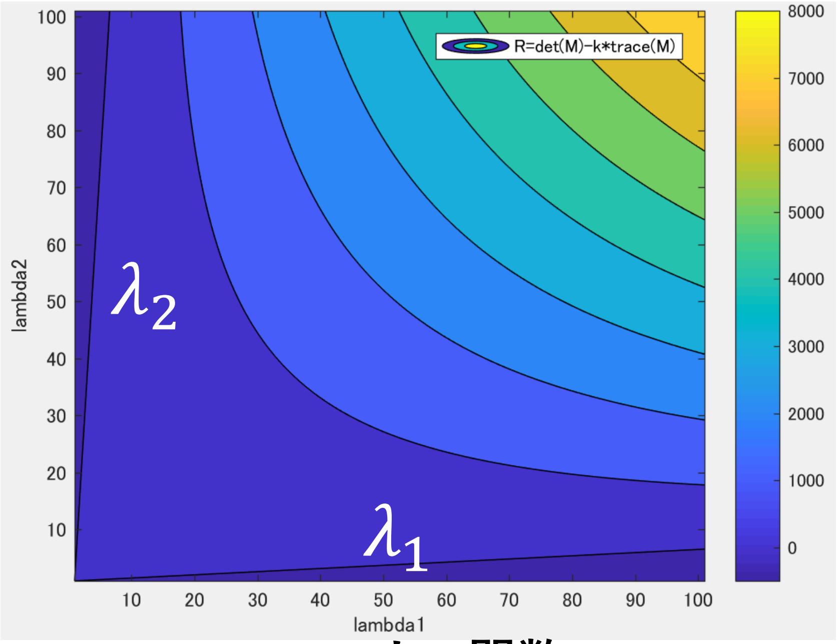
◆固有値の積は行列式に等しい　k: 0.04〜0.06程度

det:行列式 $det\mathbf{M} = AB - C^2 = \lambda_1\lambda_2$

◆固有値の和は行列の跡に等しい ※跡：せき，トレース

tr:行列の跡 $\mathrm{tr}\mathbf{M} = A + B = \lambda_1 + \lambda_2$

ただし，$\mathbf{M} = \sum_{x,y} w(x,y) \begin{bmatrix} I_x^2 & I_xI_y \\ I_xI_y & I_y^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & C \\ C & B \end{bmatrix}$



コーナー関数

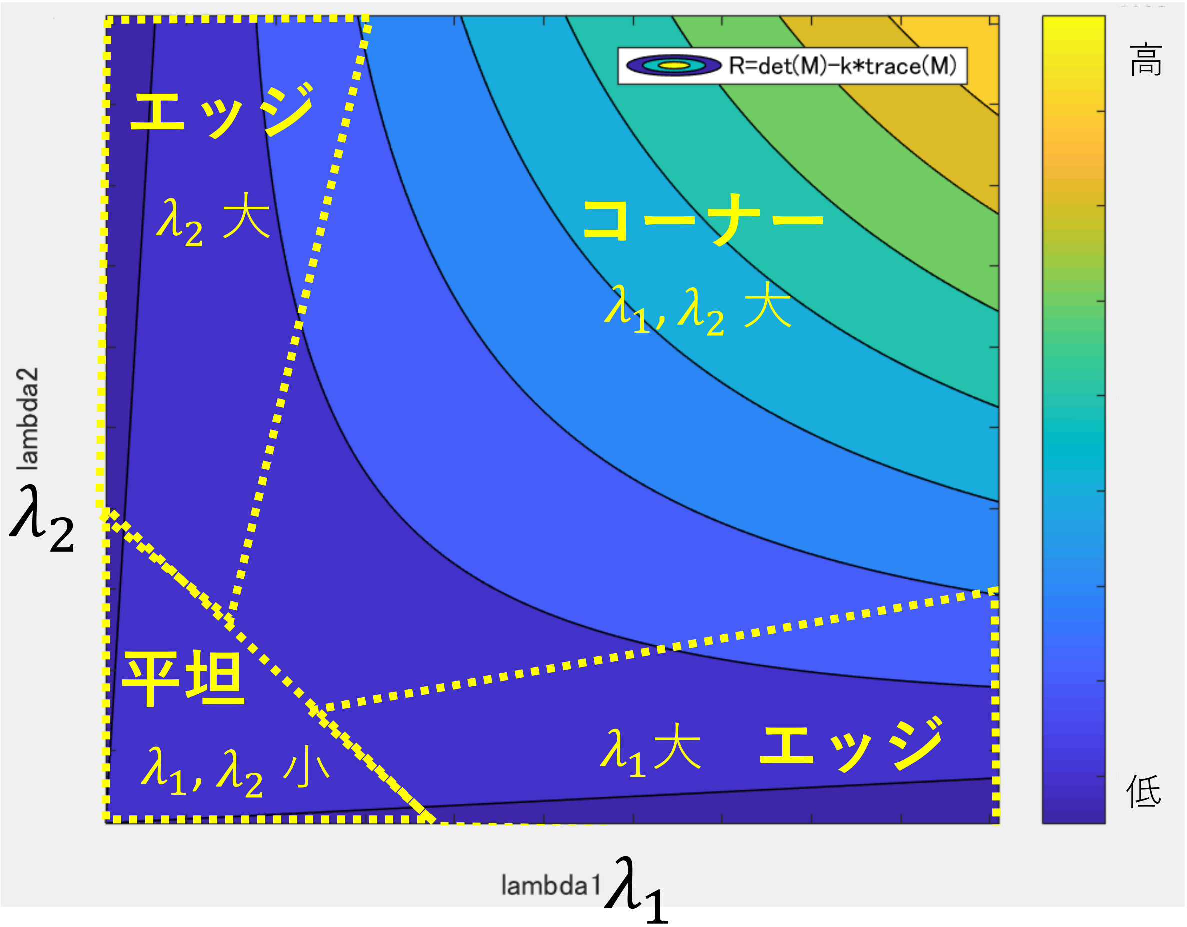
C. Harris, M. Stephens, "A Combined Corner and Edge Detector, " Alvery Vision Conference, Vol. 15, No. 50, 1988.
Robert Collins, CSE486, Penn State "Lecture 06 Harris Corner Detector", http://www.cse.psu.edu/~rtc12/CSE486/lecture06.pdf

Harrisオペレータの考え方5

■ コーナー関数

$$R = \lambda_1\lambda_2 - k(\lambda_1+\lambda_2)^2$$
$$= det\mathbf{M} - k(tr\mathbf{M})^2$$

・λ_1とλ_2が共に小さいと平坦
・λ_1またはλ_2が大きいとエッジ
・λ_1とλ_2が共に大きいとコーナー



コーナー関数

C. Harris, M. Stephens, "A Combined Corner and Edge Detector," Alvery Vision Conference, Vol. 15, No. 50, 1988.
Robert Collins, CSE486, Penn State "Lecture 06 Harris Corner Detector", http://www.cse.psu.edu/~rtc12/CSE486/lecture06.pdf

【補足】固有値問題

Ax=λxを満たす固有値λと固有ベクトル**x(x≠0)**を求める問題.

例： $\mathbf{A}=\begin{bmatrix}1 & 6\\ 3 & 4\end{bmatrix}$のとき

解：

$$\det(\mathbf{A}-\lambda I)=0$$

$$\left|\begin{bmatrix}1 & 6\\ 3 & 4\end{bmatrix}-\begin{bmatrix}\lambda & 0\\ 0 & \lambda\end{bmatrix}\right|=\left|\begin{bmatrix}1-\lambda & 6\\ 3 & 4-\lambda\end{bmatrix}\right|=0$$

$$(1-\lambda)(4-\lambda)-18=0$$

$$\lambda^2-5\lambda-14=0$$

$$(\lambda-7)(\lambda+2)=0$$

$\lambda=7,-2$ (固有値)

(固有ベクトル)

$\lambda=7$のとき

$$\begin{bmatrix}1-\lambda & 6\\ 3 & 4-\lambda\end{bmatrix}\begin{bmatrix}x_1\\ x_2\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}-6 & 6\\ 3 & -3\end{bmatrix}\begin{bmatrix}x_1\\ x_2\end{bmatrix}=0$$

$x_1=x_2$より，x_1=tのときx_2=tなので

$\mathbf{x}=t\begin{bmatrix}1\\ 1\end{bmatrix}$, (tは任意の定数)

$\lambda=-2$のとき

$$\begin{bmatrix}1-\lambda & 6\\ 3 & 4-\lambda\end{bmatrix}\begin{bmatrix}x_1\\ x_2\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}3 & 6\\ 3 & 6\end{bmatrix}\begin{bmatrix}x_1\\ x_2\end{bmatrix}=0$$

$x_1=-2x_2$より，x_1=tのときx_2=-$\frac{1}{2}$tなので

$\mathbf{x}=t\begin{bmatrix}1\\ -\frac{1}{2}\end{bmatrix}$, (tは任意の定数)

【補足】固有値問題

結果が正しいか確認！Ax=λx

$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 6 \\ 3 & 4 \end{bmatrix}$ のとき

$\lambda = 7$

$\mathbf{x} = t\begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}$, (tは任意の定数)

左辺= $\begin{bmatrix} 1 & 6 \\ 3 & 4 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 7 \\ 7 \end{bmatrix}$

右辺= $7\begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 7 \\ 7 \end{bmatrix}$

一致

$\lambda = -2$

$\mathbf{x} = t\begin{bmatrix} 1 \\ -\frac{1}{2} \end{bmatrix}$, (tは任意の定数)

左辺= $\begin{bmatrix} 1 & 6 \\ 3 & 4 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} 1 \\ -\frac{1}{2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -2 \\ 1 \end{bmatrix}$

右辺= $-2\begin{bmatrix} 1 \\ -\frac{1}{2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -2 \\ 1 \end{bmatrix}$

一致

Harrisコーナー検出アルゴリズム

C. Harris, M. Stephens, “A Combined Corner and Edge Detector, ” Alvery Vision Conference, Vol. 15, No. 50, 1988.

勾配画像の生成(ガウス関数の微分)

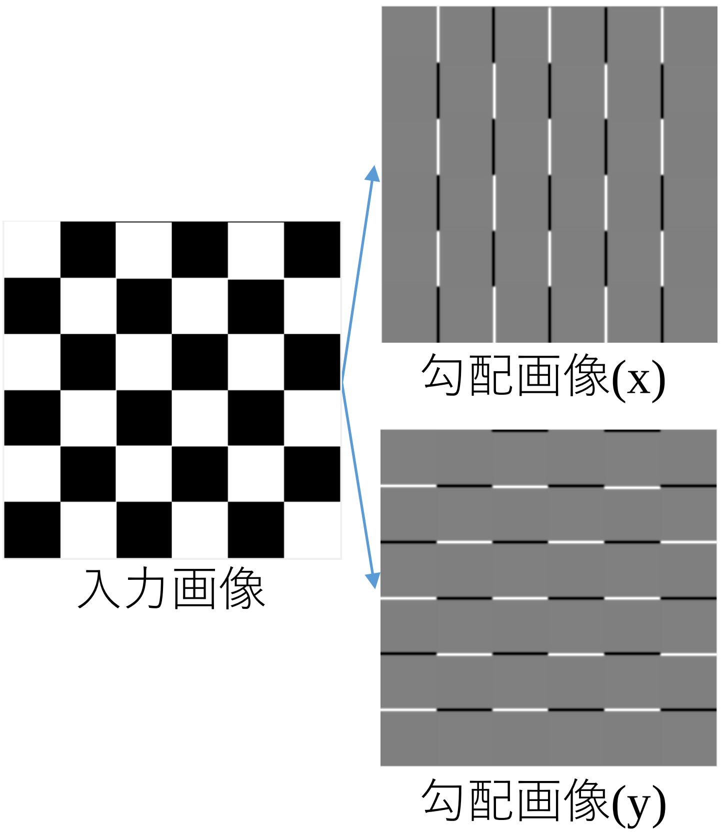
各方向の勾配の大きさを算出

近傍領域の勾配の総和の算出

コーナー関数Rからコーナー候補を算出

極大値の検出

閾値処理によるコーナー特徴量の抽出

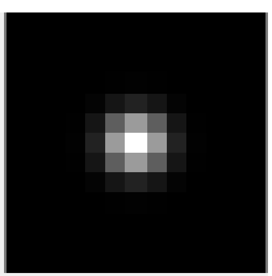


勾配画像の生成（ガウス関数の微分）

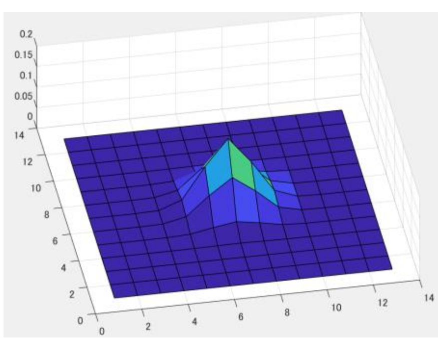
２次元ガウス関数をx,y方向それぞれに微分したフィルタを画像にフィルタリングし勾配画像を生成する

■ 二次元ガウス分布

$$Gauss(x,y)=\frac{1}{2\pi\sigma^2}\boxed{exp\left(-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}\right)}$$



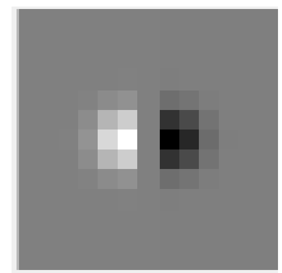
G(13×13)



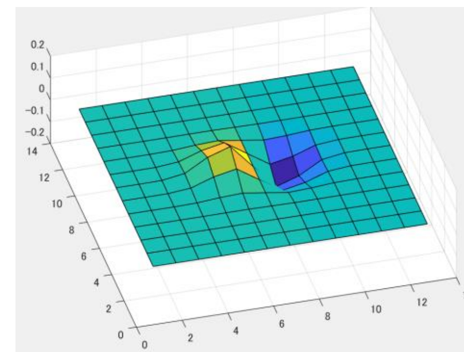
$*$

[-1,0,1]

$=$

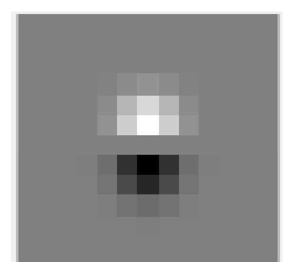


GDx(13×13)

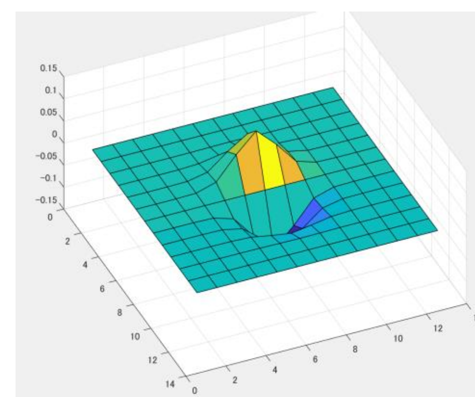


$\begin{bmatrix} -1, \\ 0, \\ 1 \end{bmatrix}$

$=$



GDy(13×13)

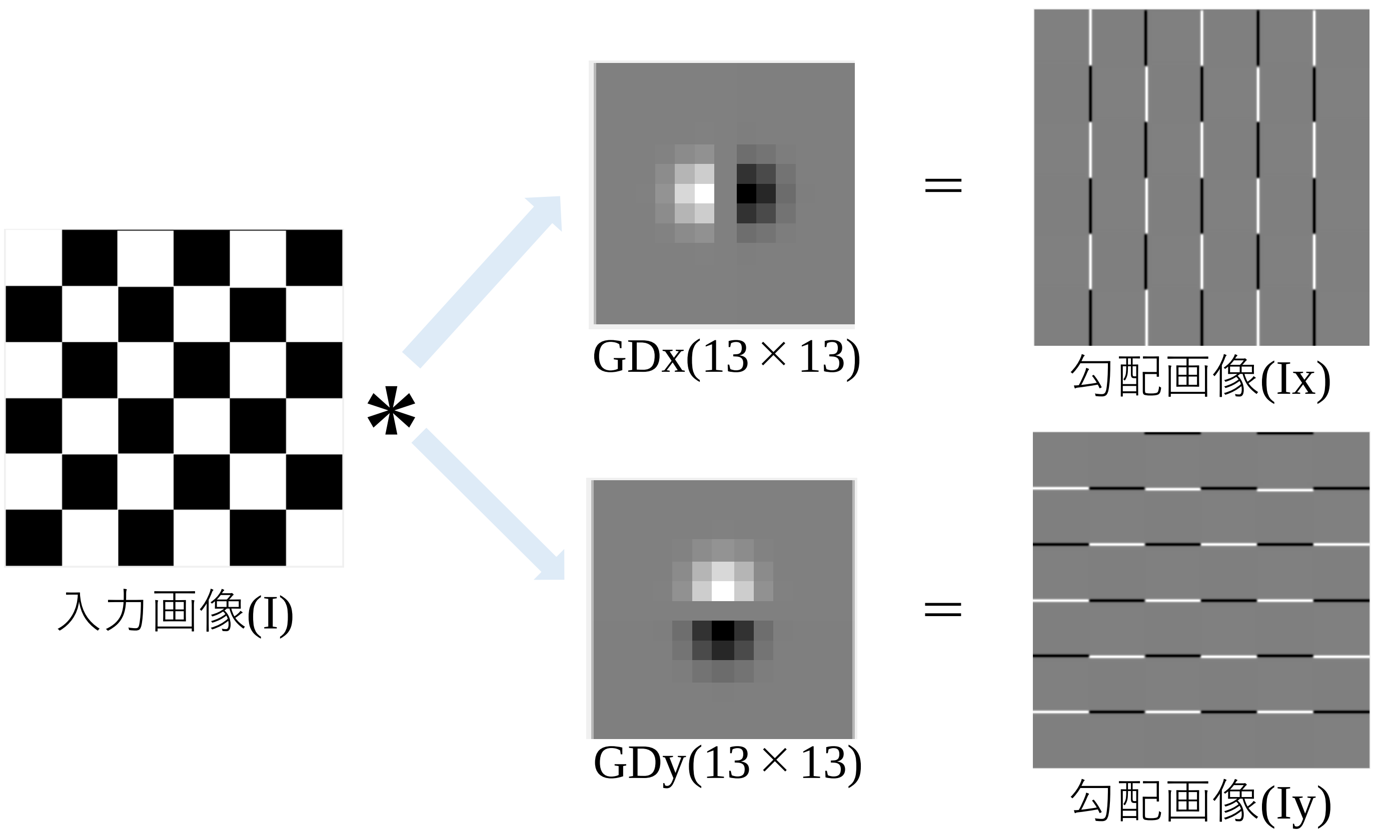


$$\frac{\partial Gauss(x,y)}{\partial x}=\frac{-x}{2\pi\sigma^4}exp\left(-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}\right),\frac{\partial Gauss(x,y)}{\partial y}=\frac{-y}{2\pi\sigma^4}exp\left(-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}\right)$$

からフィルタを作成すればよい.

勾配画像の生成（ガウス関数の微分）

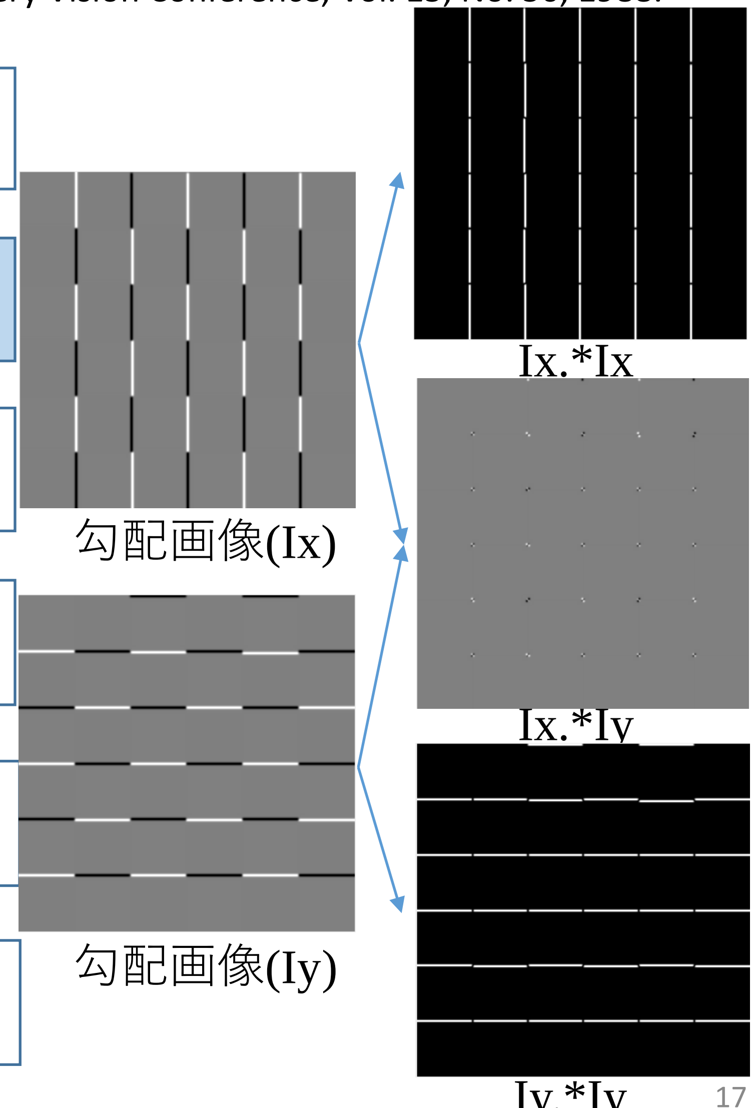
２次元ガウス関数をx,y方向それぞれに微分したフィルタを画像にフィルタリングし勾配画像を生成する



Harrisコーナー検出アルゴリズム

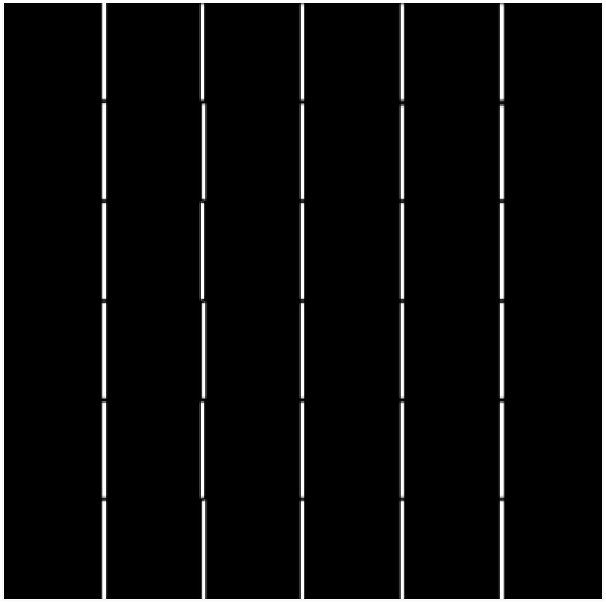
C. Harris, M. Stephens, “A Combined Corner and Edge Detector, ” Alvery Vision Conference, Vol. 15, No. 50, 1988.

1. 勾配画像の生成(ガウス関数の微分)
2. **各方向の勾配の大きさを算出**
3. 近傍領域の勾配の総和の算出
4. コーナー関数Rからコーナー候補を算出
5. 極大値の検出
6. 閾値処理によるコーナー特徴量の抽出



各方向の勾配の大きさを算出

各勾配画像の要素毎の積により，各方向の勾配の大きさを算出する．

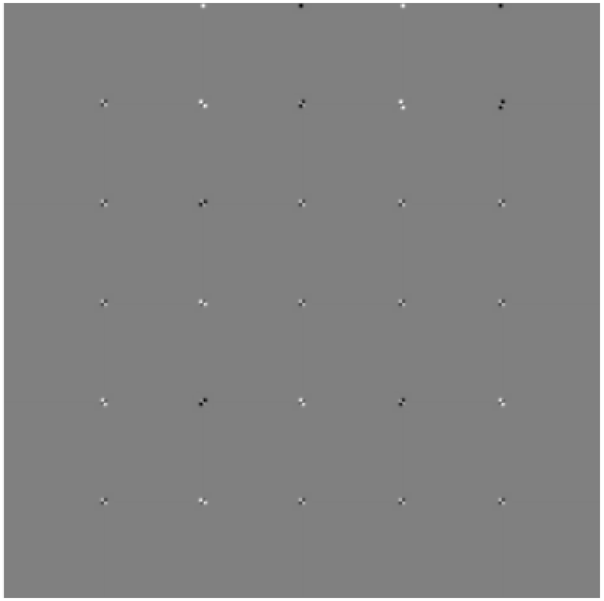


Ix.*Ix

※黒がゼロ

Iy.*Iy

※黒がゼロ



Ix.*Iy

※グレーがゼロ

Harrisコーナー検出アルゴリズム

C. Harris, M. Stephens, “A Combined Corner and Edge Detector, ” Alvery Vision Conference, Vol. 15, No. 50, 1988.

勾配画像の生成(ガウス関数の微分)

↓

各方向の勾配の大きさを算出

↓

近傍領域の勾配の総和の算出

↓

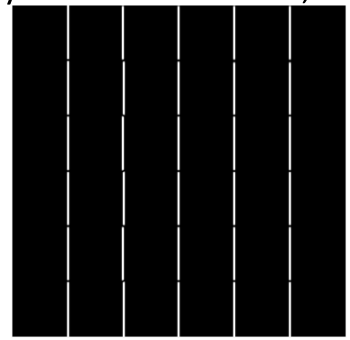
コーナー関数Rからコーナー候補を算出

↓

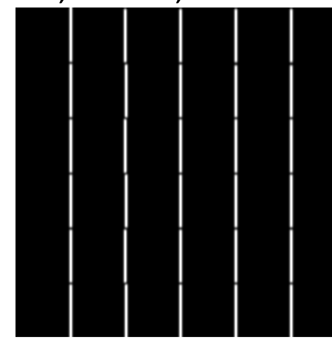
極大値の検出

↓

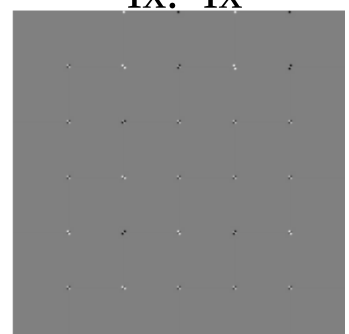
閾値処理によるコーナー特徴量の抽出



Ix.*Ix

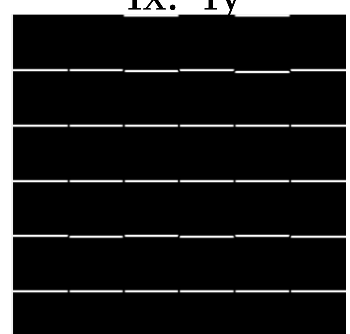


G(Ix.*Ix)

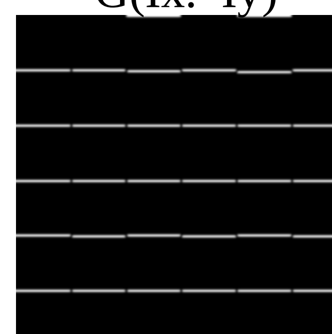


Ix.*Iy

G(Ix.*Iy)



Iy.*Iy



G(Iy.*Iy)

近傍領域の勾配の総和の算出

勾配方向の広がり度合いをはかるため，近傍領域の勾配の総和を計算する．(平滑化フィルタをかける)

中心画素からの距離を考慮した重み付き和(ガウシアンカーネル)を用いることが多い．
※ただの近傍領域の平均でもよい．

G(Ix.*Ix)　G(Iy.*Iy)　G(Ix.*Iy)

金澤靖，金谷健一, “解説 コンピュータビジョンのための画像の特徴点の抽出”，電子情報通信学会誌, Vol. 87, No. 12, 2004.

Harrisコーナー検出アルゴリズム

C. Harris, M. Stephens, “A Combined Corner and Edge Detector, ” Alvery Vision Conference, Vol. 15, No. 50, 1988.

勾配画像の生成(ガウス関数の微分)

↓

各方向の勾配の大きさを算出

↓

近傍領域の勾配の総和の算出

↓

コーナー関数Rからコーナー候補を算出

↓

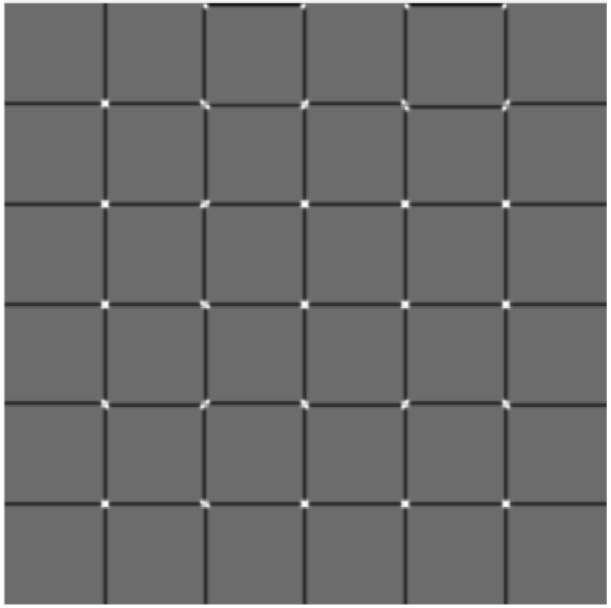
極大値の検出

↓

閾値処理によるコーナー特徴量の抽出

■ コーナー関数

$$R = \lambda_1\lambda_2 - k(\lambda_1+\lambda_2)^2$$
$$= det\mathbf{M} - k(tr\mathbf{M})^2$$



コーナー関数Rからコーナー候補を算出

画素毎に行列**M(x,y)**を定義し，コーナー関数の値を算出する．

■ コーナー関数

$$R = \lambda_1\lambda_2 - k(\lambda_1+\lambda_2)^2$$
$$= det\mathbf{M} - k(tr\mathbf{M})^2$$

固有値を求める必要がない！

◆固有値の積は行列式に等しい　k: 0.04〜0.06程度

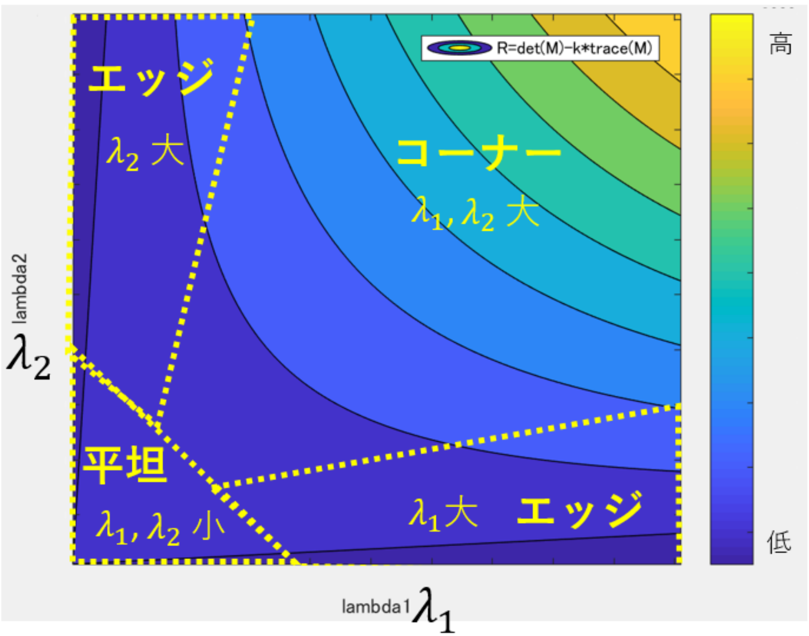
det:行列式 $det\mathbf{M} = AB - C^2 = \lambda_1\lambda_2$

◆固有値の和は行列の跡に等しい ※跡：せき，トレース

tr:行列の跡 $\mathrm{tr}\mathbf{M} = A + B = \lambda_1 + \lambda_2$

ただし，$\mathbf{M} = \sum_{x,y} w(x,y) \begin{bmatrix} I_x^2 & I_xI_y \\ I_xI_y & I_y^2 \end{bmatrix}$

$$= \begin{bmatrix} G(I_x^2) & G(I_xI_y) \\ G(I_xI_y) & G(I_y^2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & C \\ C & B \end{bmatrix}$$



コーナー関数

《擬似コード》

```
For i = 1:H(画像の高さ)
  For j = 1:W(画像の幅)

    // 画素(i,j)における行列Mの定義
```

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} G(I_x^2(i,j)) & G(I_x(i,j)I_y(i,j)) \\ G(I_x(i,j)I_y(i,j)) & G(I_y^2(i,j)) \end{bmatrix};$$

```
    //行列式と行列の跡の計算
    detM = M(1,1)*M(2,2)-M(1,2)*M(2,1);
    trM = M(1,1)+M(2,2);

    // コーナー関数値の算出
    R = detM – k*trM*trM;
    output(i,j) = R;
  End
End
```

Harrisコーナー検出アルゴリズム

C. Harris, M. Stephens, “A Combined Corner and Edge Detector, ” Alvery Vision Conference, Vol. 15, No. 50, 1988.

勾配画像の生成(ガウス関数の微分)

↓

各方向の勾配の大きさを算出

↓

近傍領域の勾配の総和の算出

↓

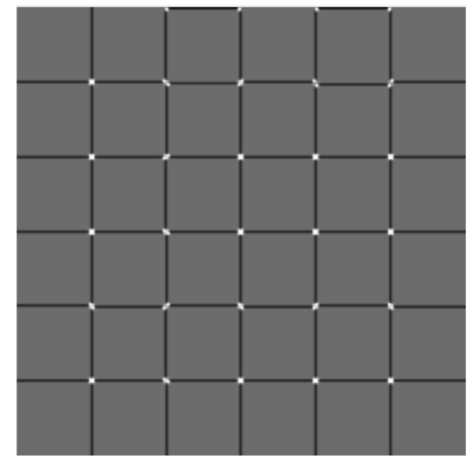
コーナー関数Rからコーナー候補を算出

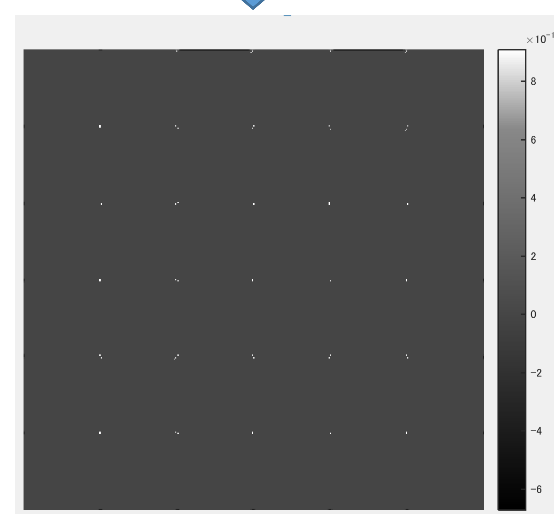
↓

極大値の検出

↓

閾値処理によるコーナー特徴量の抽出



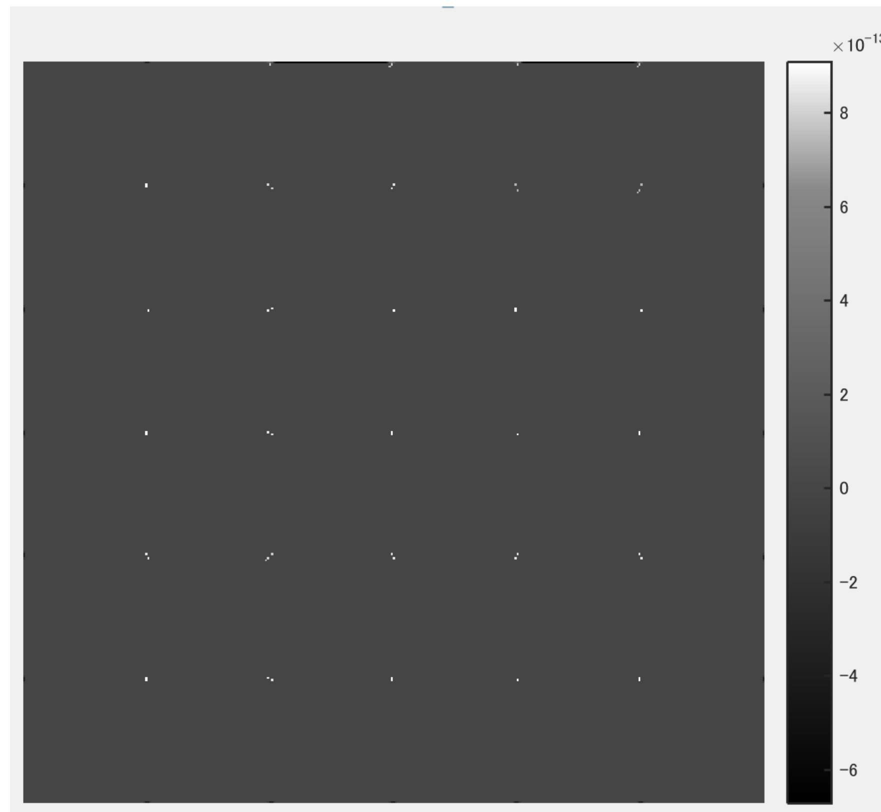


極大値の検出

近傍画素のコーナー関数値を比較し，注目画素が最大値となる画素のみ残す．

近傍画素と比較して，中心画素が最大値の場合のみ値を残す．

30	**30**	**70**
30	**90**	**30**
20	**30**	**30**



Harrisコーナー検出アルゴリズム

C. Harris, M. Stephens, “A Combined Corner and Edge Detector, ” Alvery Vision Conference, Vol. 15, No. 50, 1988.

勾配画像の生成(ガウス関数の微分)

↓

各方向の勾配の大きさを算出

↓

近傍領域の勾配の総和の算出

↓

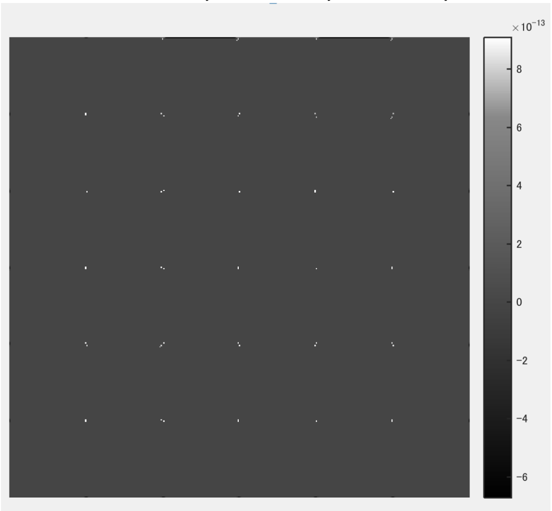
コーナー関数Rからコーナー候補を算出

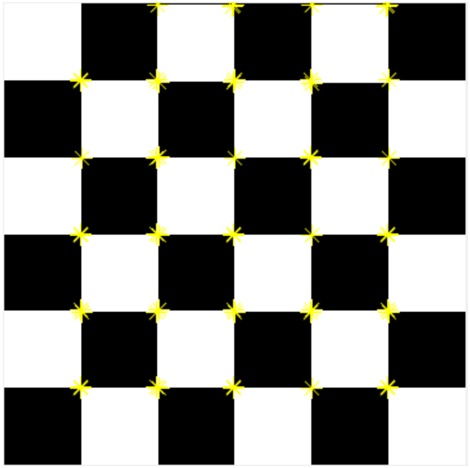
↓

極大値の探索

↓

閾値処理によるコーナー特徴量の抽出

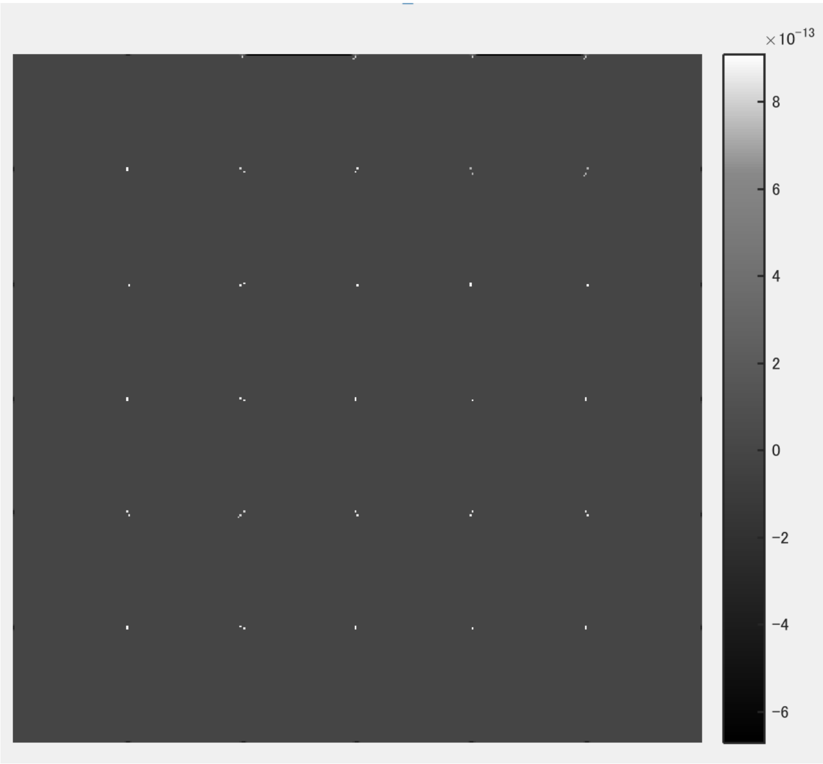


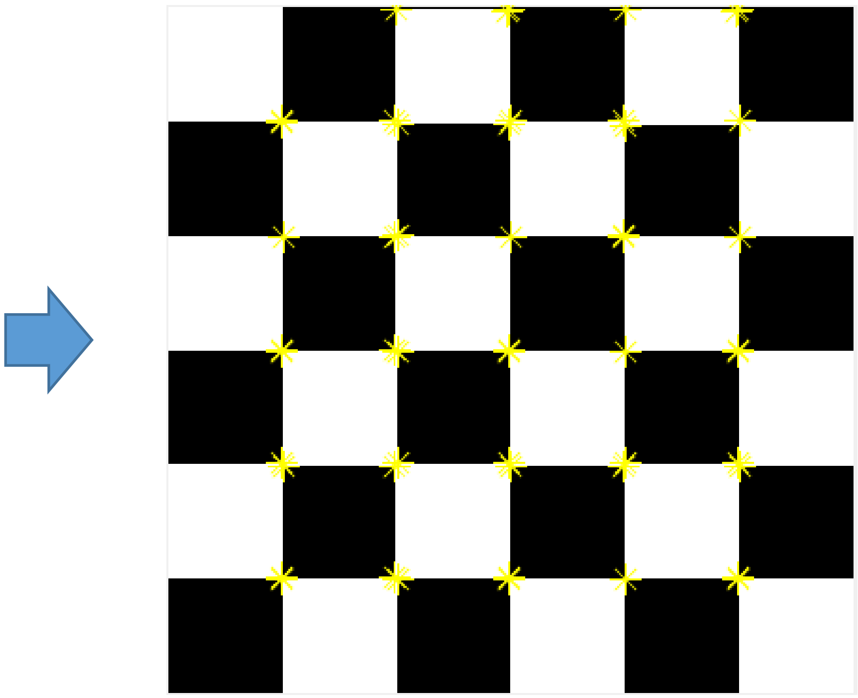


閾値処理によるコーナー特徴量の抽出

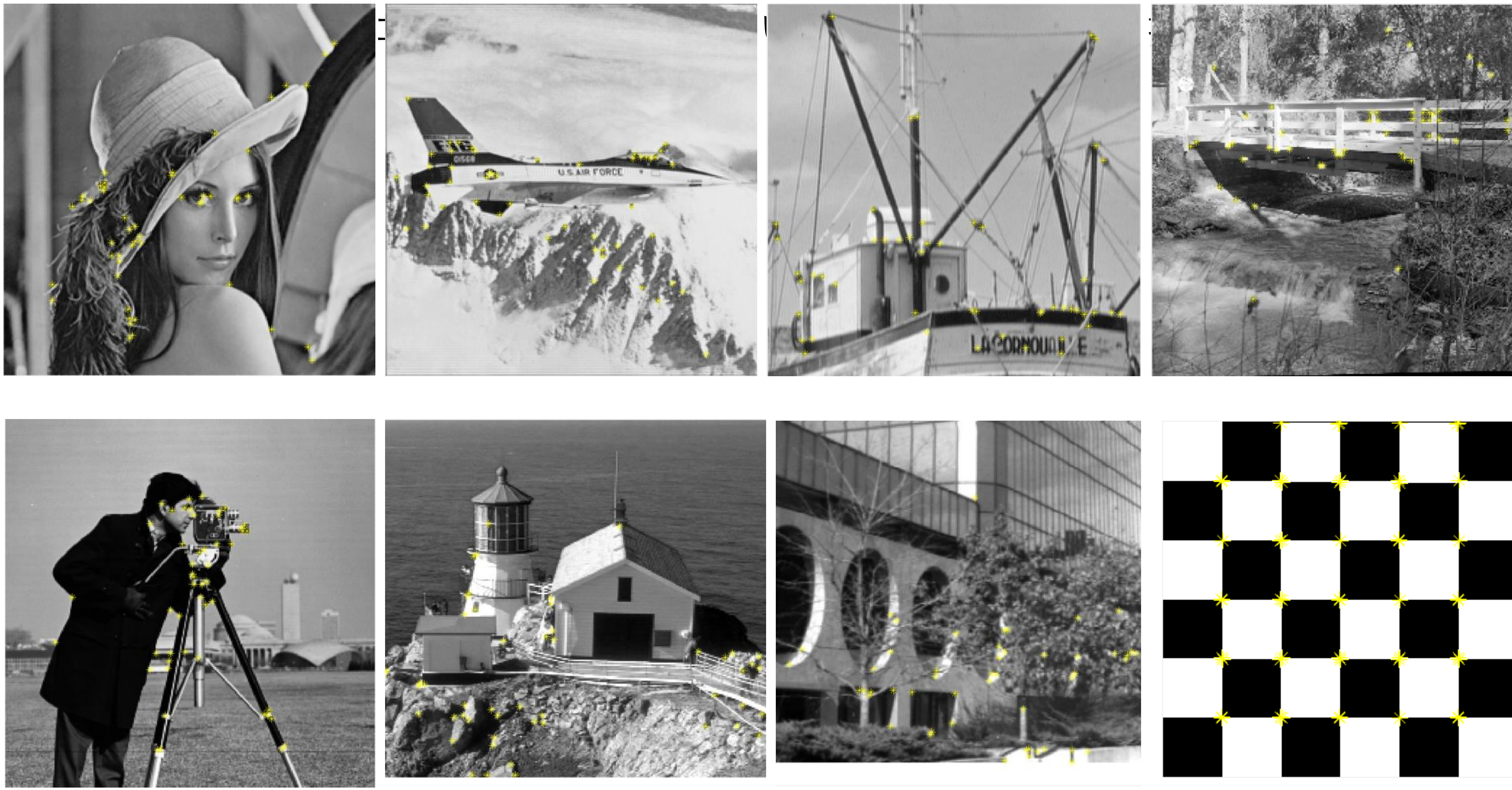
閾値処理もしくはコーナー関数値の高い順に既定数特徴点を抽出する.

下図はコーナー関数値の高い順に50個特徴点を抽出した結果





様々な画像でのコーナー特徴点抽出結果



練習問題11－１

画像

0	10	10	10
0	⑩	10	10
0	10	10	10
0	10	10	10

に対して、

$Ix = I(x+1, y) - I(x, y),\ Iy = I(x, y+1) - I(x, y)$として、

⑩の画素を中心とする3×3のウィンドウにおける行列

$$\boldsymbol{B} = \begin{bmatrix} \sum {I_x}^2 & \sum I_x I_y \\ \sum I_x I_y & \sum {I_y}^2 \end{bmatrix}$$

を求めよ。そしてこの行列と固有値と固有ベクトルを求めて、この点がコーナーか、エッジ点か、一様領域に属するかを判断せよ。もしエッジ点であれば、固有ベクトルを用いてエッジの方向を決めよ。

練習問題11－２

コーナー関数値R(-1,0), R(0,0), R(1,0), R(0,-1), R(0,1)が与えられており、それらに対して、２次関R(x,y)=ax^2+by^2+cxy+dx+ey+fを当てはめよ。ただし、c=0とする。そして、R(x,y)が最大になるxとyを求めよ。これを使って小数座標のコーナー位置を求めることができる理由を述べよ。