

PMR2560 – Visão Computacional

Detecção de bordas

Prof. Eduardo L. L. Cabral



Objetivos

- Processamento de imagens:
 - Características;
 - Detecção de bordas.

Características

- Tipos de características:
 - Bordas;
 - Cantos;
 - Linhas;
 - Cores;
 - Manchas coloridas (“blobs”);
 - Texturas;
 - Outras.

Tipos de características

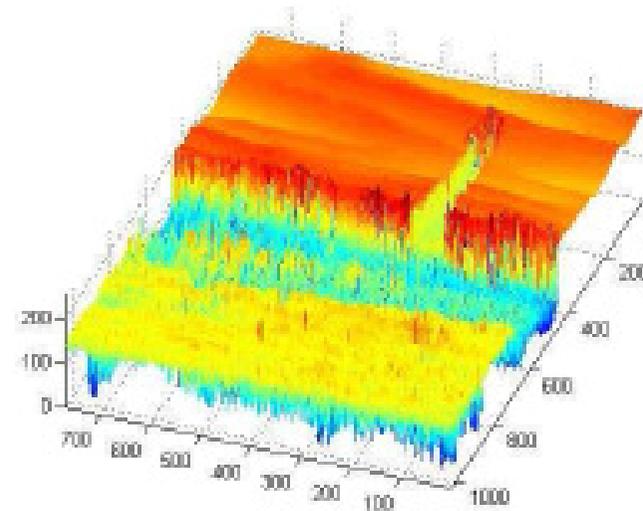
- Porque usar características?
 - Imagens contém muita informação e em geral a maior parte dessa informação é redundante e/ou desnecessária;
 - É necessário transformar os dados da imagem para uma forma possível de ser tratada em tempo real, principalmente no caso de robôs autônomos;
 - Obter um conjunto de características robustas para reconhecimento e localização de objetos;
 - Características diferentes fornecem informações diferentes e freqüentemente independentes sobre a imagem;
 - Reconhecimento e detecção de objetos é realizada usando-se características, tanto no caso de robôs como no caso das pessoas.

Bordas

- Borda é o tipo de característica mais importante presente em uma imagem e provavelmente a característica mais importante usada pelas pessoas.
- Bordas são independente da iluminação.
- Bordas são fáceis de detectar computacionalmente.
- Bordas são usadas para determinar características de nível e complexidade maiores (ex. linhas, curvas, cantos etc).

Bordas

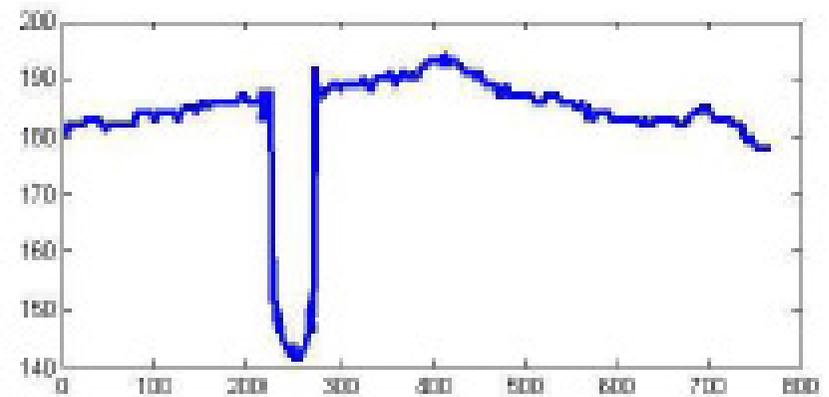
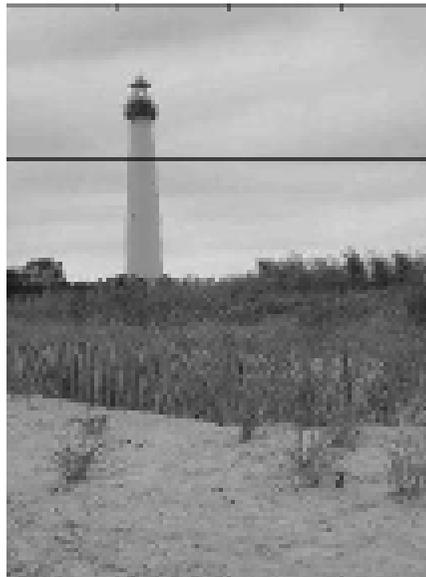
- Caracterização de bordas:
 - Lembrem-se que as imagens digitais são funções discretas que representam a intensidade de luz de cada ponto de uma cena.
 - O que ocorre em uma borda da imagem?



- Olhando somente uma linha da imagem.

Bordas

- Olhando somente uma linha da imagem.



Bordas

- Causas de bordas nas imagens:
 - Descontinuidade de profundidade;
 - Descontinuidade na orientação de uma superfície;
 - Descontinuidade em refletância (mudança nas propriedades da superfície do material);
 - Descontinuidade na iluminação (ex. Sombras).
- Portanto as bordas correspondem à descontinuidades presentes na imagem.
- Como fazer para detectar esse tipo de descontinuidade?
 - Usando o gradiente da imagem!!
 - O que é o gradiente de uma imagem?

Detecção de bordas

- O gradiente de uma imagem é um campo vetorial tal como em qualquer função de duas variáveis.
- Portanto, o gradiente é um vetor com magnitude nas direções x e y iguais às correspondentes derivadas parciais:

$$\nabla I(x, y) = \frac{\partial I}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\partial I}{\partial y} \mathbf{j}$$

- Como calcular as derivadas parciais de uma função discreta?
 - Usando aproximação em Série de Taylor.

Detecção de bordas

- Para funções discretas usa-se uma aproximação de 1ª ordem do gradiente:

$$\frac{df(x)}{dx} = \frac{f(x+h) - f(x-h)}{2h}$$

onde h corresponde ao incremento adotado na coordenada x .

- No caso de imagens, h corresponde a um pixel:

$$\frac{\partial I(x, y)}{\partial x} = \frac{I(x+1, y) - I(x-1, y)}{2};$$

$$\frac{\partial I(x, y)}{\partial y} = \frac{I(x, y+1) - I(x, y-1)}{2}$$

Detecção de bordas

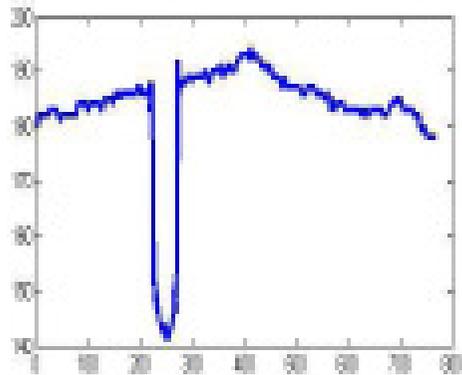
- Como fazer para calcular o gradiente de uma imagem de forma eficiente?
 - Usando a convolução da imagem com um filtro:

$$\frac{\partial I}{\partial x} = I \otimes \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

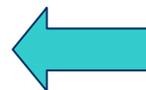
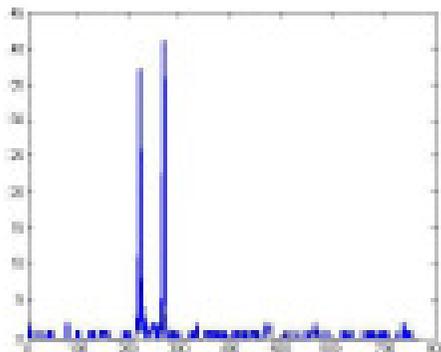
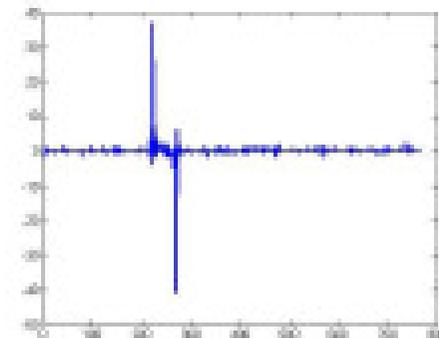
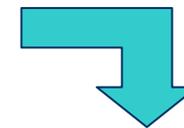
$$\frac{\partial I}{\partial y} = I \otimes \begin{bmatrix} -1 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}.$$

- Note que a divisão por 2 foi eliminada;
- Isso é feito para aumentar a velocidade de cálculo;
- Essa alteração somente altera a escala do gradiente.

Detecção de bordas



$[-1 \ 0 \ 1]$



Calculando o
módulo

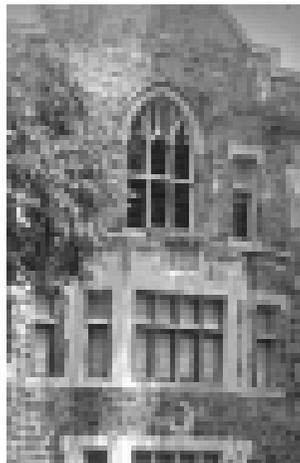


Detecção de bordas

- Etapas básicas do processo de detecção de bordas:
 - **Filtrar** \Rightarrow Suavizar a imagem;
 - **Ressaltar** \Rightarrow Calcular as derivadas parciais nas direções horizontal e vertical;
 - **Calcular magnitude do gradiente** \Rightarrow Calcular o módulo do vetor gradiente;
 - **Detectar** \Rightarrow Limiarizar a imagem ressaltada para achar a bordas mais fortes;
 - **Localizar/analisar** \Rightarrow Rejeitar bordas espúrias e incluir bordas fracas mas realmente justificáveis (nem todos os métodos têm essa etapa).

Detecção de bordas

- Passo 1 \Rightarrow Suavizar:
 - Cálculo de gradiente é muito suscetível a ruídos;
 - Suavização é importante para eliminar ruído que irá aparecer como pequenas bordas.

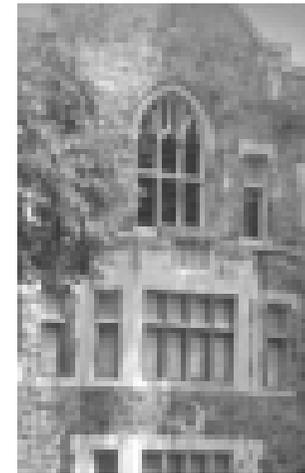


*Suavização da
imagem*



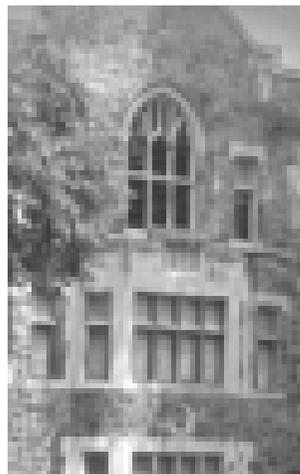
Máscara

$$\frac{1}{16} \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 2 & 4 & 2 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}$$



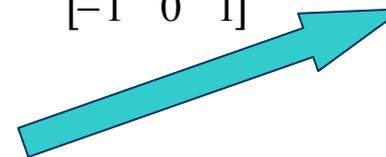
Detecção de bordas

- Passo 2 \Rightarrow Ressaltar:
 - Cálculo do gradiente (cálculo das derivadas parciais nas direções horizontal e vertical);
 - Ressalta altas freqüências (descontinuidades).

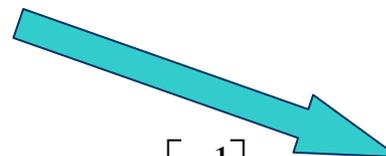


*Ressaltar
descontinuidades*

Horizontal
 $[-1 \ 0 \ 1]$



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



Detecção de bordas

- Passo 3 \Rightarrow Calcular o módulo do Gradiente:
 - No passo 2 foi calculado o gradiente nas direções x e y para cada ponto da imagem;
 - O gradiente é um vetor com componentes nas direções x e y;
 - O cálculo do módulo do gradiente para cada pixel da imagem é dado por:

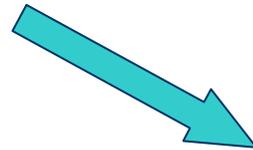
$$G(x, y) = \sqrt{\left(\frac{\partial I(x, y)}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial I(x, y)}{\partial y}\right)^2}$$

- Na prática, para diminuir o esforço computacional, calcula-se a soma dos valores absolutos das duas componentes do gradiente :

$$G(x, y) = \left| \frac{\partial I(x, y)}{\partial x} \right| + \left| \frac{\partial I(x, y)}{\partial y} \right|$$

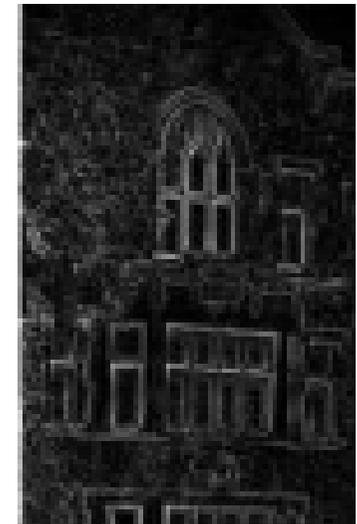
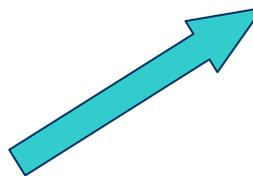
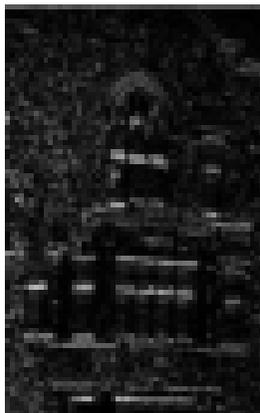
Detecção de bordas

- Passo 3 \Rightarrow Calcular o módulo do Gradiente:



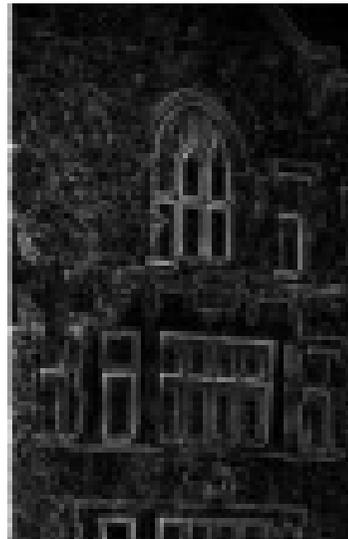
$$G(x, y) = \sqrt{\left(\frac{\partial I(x, y)}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial I(x, y)}{\partial y}\right)^2}$$

Módulo do gradiente

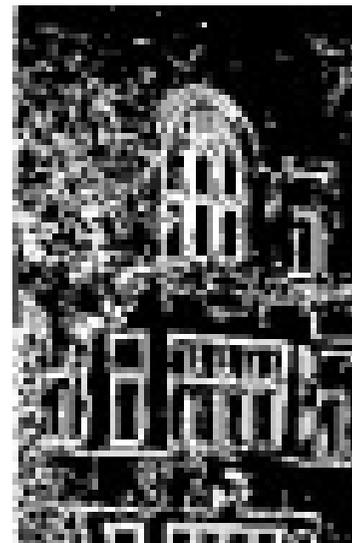


Detecção de bordas

- Passo 4 \Rightarrow Detectar bordas fortes:
 - Como identificar as bordas, ou como isolar as bordas do resto da imagem?
 - A resposta é utilizar limiarização.



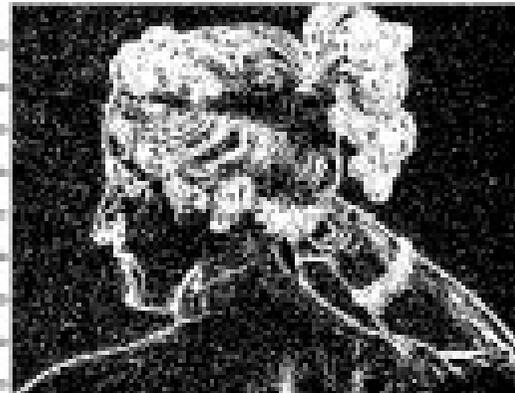
Limiarização



Detecção de bordas

- Passo 4 \Rightarrow Detectar bordas fortes:

Limiar = 20



Limiar = 50



Detecção de bordas

- Métodos usuais para detecção de bordas:
 - Sobel \Rightarrow provavelmente o mais utilizado;
 - Prewitt \Rightarrow similar ao método Sobel;
 - Roberts \Rightarrow um dos primeiros métodos desenvolvidos;
 - Canny \Rightarrow o melhor método, mas é o que exige maior esforço computacional.

Detecção de bordas

- Método de Sobel:
 - Utiliza os operados de Sobel:

$$\mathbf{S}_V = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 2 & 0 & -2 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad \mathbf{S}_H = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix}$$

- Fazendo a convolução dessas máscaras com a imagem gera-se os gradientes vertical e horizontal da imagem que depois são combinados como mostrado.
- Além de calcular o gradiente, essas máscaras tem também o efeito de suavização.
- Na prática ainda é necessário realizar a suavização da imagem para eliminar ruídos.

Detecção de bordas

- O método de Prewitt é similar ao método de Sobel, mas usa máscaras diferentes:
 - Não realiza a operação de suavização como o Sobel.

$$\mathbf{P}_V = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad \mathbf{P}_H = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix}$$

- Operadores de Roberts:

$$\mathbf{R}_V = \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \quad \mathbf{R}_H = \begin{bmatrix} -1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}$$

Detecção de bordas

- Método de Canny:
 - Os métodos vistos fornecem bordas com largura de vários pixels e não detectam bordas em regiões da imagem com menor contraste;
 - O método de Canny apresenta dois refinamentos adicionais:
 - Detecta bordas com largura de 1 único pixel;
 - Fornecer bordas fracas em regiões da imagem de menor contraste.
 - Processamento adicional:
 - Estimativa da direção da borda (E_d);
 - Estimativa do contraste da borda (E_s);
 - Remoção dos pixels extras na direção normal à da borda (E_d);
 - Limiarização com histerese.

Detecção de bordas

- (Canny) Passo 1: Suavização:



$$\otimes \frac{1}{256} \begin{bmatrix} 1 & 4 & 6 & 4 & 1 \\ 4 & 16 & 24 & 16 & 4 \\ 6 & 24 & 36 & 24 & 6 \\ 4 & 16 & 24 & 16 & 4 \\ 1 & 4 & 6 & 4 & 1 \end{bmatrix} =$$



Detecção de bordas

- (Canny) Passo 2: Contraste da Borda:
 - O gradiente de uma imagem é um vetor \Rightarrow portanto tem magnitude e direção;
 - O contraste da borda (E_s) é a magnitude do vetor gradiente, que é obtida dos gradientes vertical e horizontal da imagem, como nos outros métodos.



Detecção de bordas

- (Canny) Passo 3: Orientação da borda:
 - Dado que o gradiente da imagem é um vetor composto por:

$$\nabla I(x, y) = \frac{\partial I(x, y)}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\partial I(x, y)}{\partial y} \mathbf{j}$$

- A orientação do vetor gradiente em cada pixel é obtida por:

$$\theta(x, y) = \arctan \left(\frac{\frac{\partial I(x, y)}{\partial y}}{\frac{\partial I(x, y)}{\partial x}} \right)$$

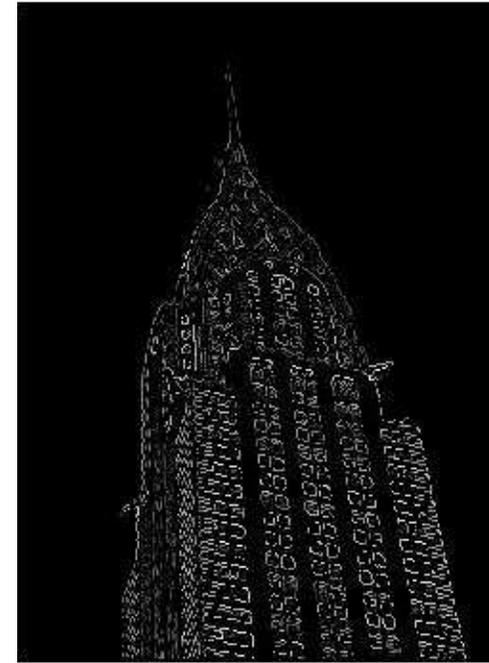
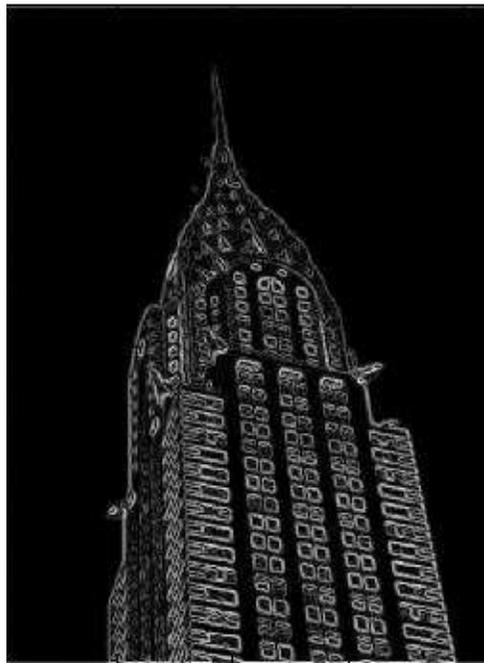
Detecção de bordas

- (Canny) Passo 4: Supressão não-máxima:
 - Para cada pixel calcula-se a direção que melhor se aproxima da direção do gradiente;
 - As direções são limitadas aos ângulos: 0° , 45° , 90° e 135° ;
 - Se o contraste de cada pixel, $\mathbf{E}_s(i, j)$, for menor do que o contraste de um dos seus vizinhos na direção do gradiente, então, define-se para o pixel (i, j) de uma nova imagem $\mathbf{I}_N(i, j) = 0$;

$$\mathbf{E}_s = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 100 & 200 \\ 0 & 1 & 100 & 200 & 10 \\ 1 & 110 & 190 & 11 & 0 \\ 110 & 185 & 15 & 0 & 0 \end{bmatrix} \rightarrow \mathbf{I}_N = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 100 & 200 \\ 0 & 0 & 100 & 200 & 0 \\ 0 & 110 & 190 & 0 & 0 \\ 110 & 185 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Detecção de bordas

- (Canny) Passo 4: Supressão não-máxima:

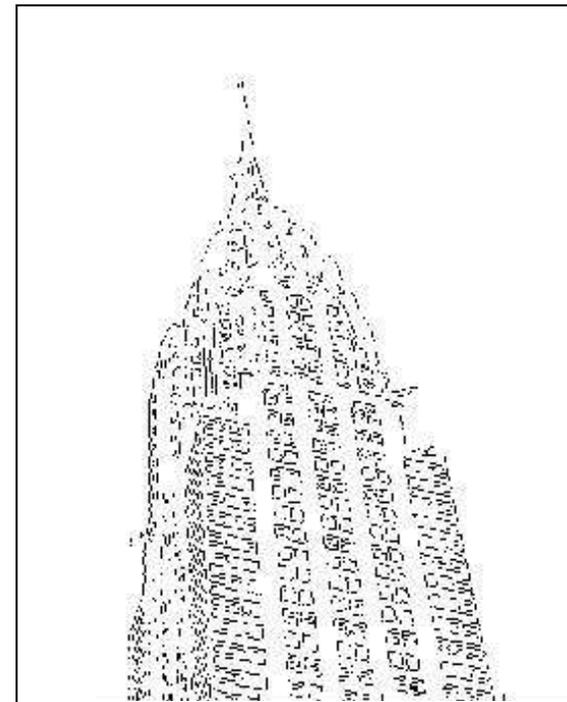
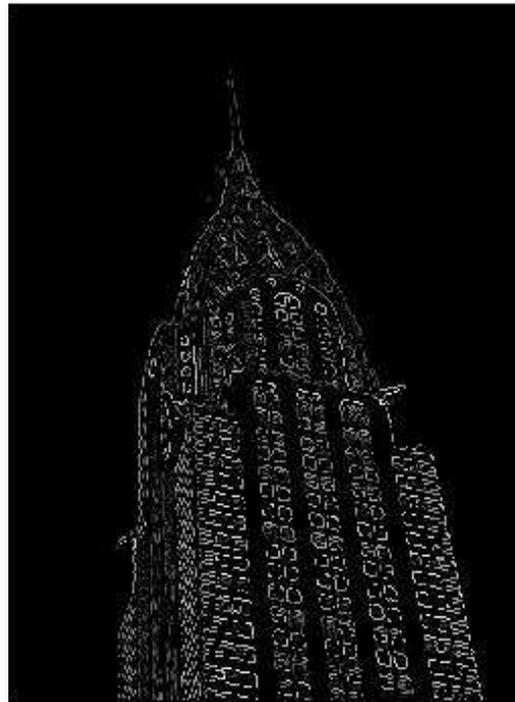


Detecção de bordas

- (Canny) Passo 5: Limiarização com histerese:
 - Dois problemas na limiarização padrão:
 - Não elimina ruídos de alta amplitude se o limiar for baixo;
 - Pode eliminar bordas reais se o limiar for muito alto.
 - Solução: Explorar o fato de que os pixels de bordas estão normalmente conectados entre si:
 1. Definir dois limiares: L_{baixo} , L_{alto} ;
 2. Se um pixel da imagem $I_N(i, j) \geq L_{alto}$, então marcar esse pixel como sendo uma borda;
 3. Checar seus vizinhos na direção perpendicular ao gradiente $\theta(i, j) \Rightarrow$ se eles forem maiores do que L_{baixo} , então marcá-los como sendo bordas.
 - Esse procedimento permite um limiar mais alto para eliminar ruídos ao mesmo tempo que não elimina bordas reais existentes na imagem.

Detecção de bordas

- (Canny) Passo 5: Limiarização com histerese:



Detecção de bordas coloridas

- Duas abordagens:
 - Detectar bordas em cada plano do espaço de cor
 - Detectar bordas diretamente no espaço vetorial de cores.
- Operadores de gradiente usados para imagens de tons de cinza não são definidos para grandezas vetoriais.
- Operadores de gradiente resultam em resultados falhos se aplicados individualmente em cada plano do espaço de cor e depois combinados.
- Abordagem usada em imagens de tons de cinza \Rightarrow pode ser usada somente para funções escalares (Hue e imagens de tons de cinza).

Detecção de bordas coloridas

➤ Abordagem vetorial:

- $\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k} \Rightarrow$ vetores unitários ao longo de R, G e B respectivamente.

$$\mathbf{u} = \frac{\partial r}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\partial g}{\partial x} \mathbf{j} + \frac{\partial b}{\partial x} \mathbf{k};$$

$$\mathbf{v} = \frac{\partial r}{\partial y} \mathbf{i} + \frac{\partial g}{\partial y} \mathbf{j} + \frac{\partial b}{\partial y} \mathbf{k}.$$

$$g_{xx} = \mathbf{u}^t \mathbf{u} = \left(\frac{\partial R}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial G}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial B}{\partial x} \right)^2$$

$$g_{yy} = \mathbf{v}^t \mathbf{v} = \left(\frac{\partial R}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial G}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial B}{\partial y} \right)^2$$

$$g_{xy} = \mathbf{u}^t \mathbf{v} = \frac{\partial R}{\partial x} \frac{\partial R}{\partial y} + \frac{\partial G}{\partial x} \frac{\partial G}{\partial y} + \frac{\partial B}{\partial x} \frac{\partial B}{\partial y}$$

Detecção de bordas coloridas

➤ Abordagem vetorial:

- Orientação do vetor gradiente de cor:

$$\theta = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left[\frac{2g_{xy}}{(g_{xx} - g_{yy})} \right]$$

- Magnitude do gradiente de cor:

$$F(\theta) = \sqrt{\frac{1}{2} \left[(g_{xx} + g_{yy}) - (g_{xx} - g_{yy}) \cos(2\theta) + 2g_{xy} \sin(2\theta) \right]}$$

- Com esse gradiente pode-se usar qualquer um dos métodos de detecção de bordas já estudados.

Detecção de bordas coloridas

- Exemplo de detecção de bordas:

Imagem original



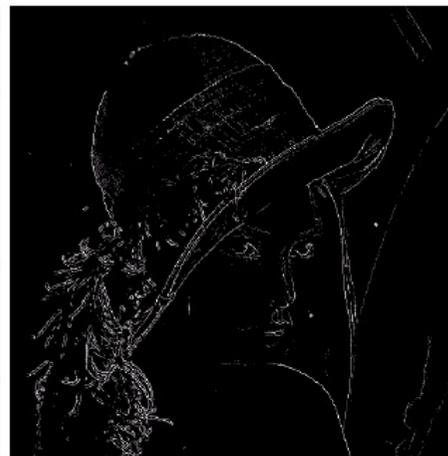
Bordas detectadas no espaço vetorial de cores



Bordas detectadas em cada plano de cor e depois somadas



Subtração das duas imagens de bordas



Exercícios

- Dada a imagem ao lado cuja matriz de cinza se encontra na página seguinte, pede-se:
 1. Detecte as bordas dessa imagem usando os seguintes métodos:
 - a) Método de Sobel.
 - b) Método de Prewitt.
 - c) Método de Canny.
 2. Qual dos três métodos gerou melhores resultados? Comente.



Exercícios

Dimensão da imagem 24X27

51	57	59	57	53	46	77	44	50	42	35	53	58	33	22	22	7	29	34	39	59	76	59	46	60	115	127
86	59	55	65	65	69	76	70	70	60	68	68	35	12	21	32	32	38	46	59	61	42	46	77	105	111	147
50	87	78	50	61	76	73	73	76	77	77	71	60	54	51	48	51	51	56	64	56	31	23	43	87	100	139
58	52	83	102	72	54	67	72	70	74	73	73	81	81	74	70	69	53	34	29	31	32	34	43	48	87	107
52	60	58	75	99	77	52	69	70	68	68	73	70	59	64	85	80	83	77	62	50	53	59	57	48	56	123
51	50	58	53	56	92	98	58	60	70	72	68	73	86	79	59	69	103	132	122	85	68	66	60	74	51	127
60	62	56	60	72	71	77	102	71	70	78	94	120	144	122	68	57	70	91	92	68	63	77	83	70	75	65
53	54	61	61	54	57	70	78	112	67	82	144	167	157	147	135	75	51	55	74	75	75	76	69	73	73	66
55	57	61	62	63	63	65	66	73	107	52	80	124	123	107	85	66	72	65	64	80	78	69	72	77	75	74
56	58	62	64	64	65	66	67	62	68	43	59	81	88	69	84	79	70	84	86	62	70	89	77	79	81	80
59	61	64	65	66	67	68	68	63	60	63	50	66	108	68	64	88	73	65	79	93	84	76	83	82	83	85
62	64	66	67	68	68	69	71	71	68	80	70	75	124	97	88	52	91	91	72	81	87	79	84	82	83	83
62	64	68	69	68	68	69	71	73	62	67	86	71	83	101	132	99	76	80	87	74	78	90	80	83	81	80
64	65	69	70	68	69	70	71	70	71	61	82	68	67	88	102	145	96	68	78	90	85	81	82	83	83	81
65	66	69	70	70	70	70	71	69	84	68	76	73	83	79	61	87	136	126	81	78	86	82	85	82	83	82
65	66	69	70	70	70	70	71	70	76	68	75	72	78	72	83	77	89	126	139	100	67	74	89	79	81	83
63	65	63	65	72	71	68	74	70	71	72	73	75	76	77	79	83	68	82	121	135	108	80	73	79	78	86
65	69	66	67	72	69	65	69	70	71	71	72	74	75	76	77	81	86	70	59	101	154	137	81	86	78	83
62	68	67	66	72	72	70	73	73	73	73	75	76	77	78	79	76	83	92	91	77	78	113	156	75	83	76
66	74	69	62	66	69	69	71	69	70	70	71	72	73	74	74	91	76	71	80	82	78	85	100	176	109	80
92	98	87	69	67	70	71	72	74	74	74	75	76	77	78	78	71	84	89	82	78	83	82	76	76	139	141
92	99	84	61	57	63	67	69	71	72	71	72	73	74	74	75	80	74	73	80	84	80	76	77	82	70	117
85	95	82	58	56	66	72	73	74	74	74	74	75	76	76	76	75	86	87	76	74	83	85	79	88	84	78
124	136	123	98	94	104	108	107	109	109	109	109	110	110	111	111	114	109	110	119	120	114	111	116	112	113	114