Capítulo 14

Realce de Imagens

Entende-se por **realce** de uma imagem, ou *image enhancements*, técnicas que conseguem acentuar algumas das suas características, relevantes para uma aplicação específica. Dentre as possíveis aplicações, podemos mencionar: melhorar a qualidade da imagem, aumentar o contraste da imagem, e facilitar processamentos adicionais, como detecção da borda das regiões na imagem.

As técnicas de realce podem ser classificadas em duas categorias: **espacias** e **espectrais**. As técnicas espaciais consideram as imagens no domínio espacial, ou seja, como funções de luminância/brilhância $I(u, v)$ de cada *pixel* (u, v). É comum o uso do histograma nestas técnicas para analisar a distribuição de ocorrências de níveis de cinza/cores numa imagem, como detalha a seção 14.1, e decidir os novos valores para cada *pixel*. As técnicas espectrais, por sua vez, supõem que as imagens são modeladas em termos da frequência (w_u, w_v) de variação das luminâncias/brilhâncias entre os *pixels* ao longo da linha u e ao longo da coluna v da imagem, isto é, $\mathsf{F}(I(u, v)) = \mathcal{I}(w_u, w_v)$. Na seção 14.2 mostramos que o fundamento destas técnicas espectrais é o teorema de convolução (Seção 9.4.2).

Observação 14.1 *Nos sítios* `http://www.prip.tuwien.ac.at/~hanbury/intro_ip/` *e* `http://www.mathworks.com/products/image/demos.html` *encontram-se alguns exemplos de realce de imagens.*

14.1 Técnicas Espaciais

As técnicas espaciais são também conhecidas por **processamentos pontuais**, ou *pixel* a *pixel*, pois elas são caracterizadas por processarem os pontos isoladamente.

Para muitas aplicações de realce, processamentos somente em cima da componente de luminância das cores são suficientes para obter os resultados desejados. Isso nos permite tratar as imagens em níveis de cinza e imagens coloridas indistintamente, desde que seja feita uma filtragem da crominância da imagem (Seção 7.4) antes de aplicar as técnicas de transformação de luminâncias.

As técnicas de realce podem ser, portanto, consideradas como funções de transferência T que relacionam os valores escalares r da imagem original para um outro conjunto de escalares s

$$s = T(r). \tag{14.1}$$

(Ver Fig. 4.2 do livro-texto de Gonzalez.)

Há várias formas de definir a função $T(r)$. Ela pode ser em função da posição dos *pixels* e ou somente em termos da luminância da imagem.

Os ajustes na luminância que **levam em conta as posições dos** *pixels* são muito utilizados para corrigir distorções ópticas que podem ocorrer durante a aquisição de imagens. Assim, para obter a imagem correta $g(u, v)$ a partir da imagem adquirida $f(u, v)$, podemos dividir a luminância de cada *pixel* (u, v) por um fator de correção $e(u, v)$, isto é

$$g(u, v) = \frac{f(u, v)}{e(u, v)}.$$

O fator de correção pode ser obtido a partir da comparação entre uma imagem de referência com a luminância conhecida e o resultado da sua aquisição pelo dispositivo.

Transformações que só consideram os atributos dos *pixels* são, por sua vez, amplamente utilizadas em **geração de negativos de imagens**, **aumento de contrastes**, **compressão da escala dinâmica** e **fatiamento de níveis de cinza**, variando somente na forma como a função $T(r)$ da Eq. 14.1 é definida.

função linear decrescente que produz negativos de imagens: $T(r) = M - r, \forall r$, onde M é a intensidade máxima.

(Ver Fig. 4.4 do livro-texto de Gonzalez.)

função de compressão da escala que reduz a faixa de valores $[r_1, r_2]$ logaritmicamente, procurando **comprimir** a faixa de valores muito claros: $T(r) = clog(1 + |r|), \forall r$. É aplicada em casos em que a faixa de valores representáveis/processáveis/exibíbeis é menor do que a faixa de valores original.

(Ver Fig. 4.6 do livro-texto de Gonzalez.)

função de fatiamento das luminâncias é definida, por parte, sobre o domínio $[r_1, r_2]$ fatiado em intervalos mutuamente exclusivos. É utilizada, usualmente, com o propósito de **enfatizar** um sub-intervalo de luminâncias $[r_A, r_B] \in [r_1, r_2]$ numa imagem.

(Ver Fig. 4.7 do livro-texto de Gonzalez.)

função de alargamento da faixa (de contraste) que modifica o conjunto de valores de luminâncias na imagem: Se $T(r) = r$, a transformação é uma identidade. $T(r)$ pode ser definida por parte. Por exemplo, podemos definir

$$T(r) = \begin{cases} 0, se r < r_A \\ r, \text{se} r_A \leq r \leq r_B \\ M, se r > r_B \end{cases}$$

que satura uma percentagem de valores em valor mínimo (0) e uma percentagem de valores em valor máximo (M). A principal aplicação desta função é o **aumento de contraste** na imagem. Quando $r_A = r_B$, dizemos que $T(r)$ é uma **função de limiarização** e $r_A = r_B$ é o **valor limiar** desta função. No Capítulo 13 vimos que o contra-domínio das funções de limiarização são imagens binárias.

(Ver Fig. 4.5 do livro-texto de Gonzalez.)

Exemplo 14.1 *No sítio* `http://www.mathworks.com/products/image/demos.html?file=/products/demos/shipping/images/ipexcontrast.html` *encontra-se dois exemplos de aumento de contraste: um para imagens em níveis de cinza e o outro, para imagens coloridas.*

Exercício 14.1 *Dada uma imagem* 17×11 *em 256 níveis de cinza:*

171	162	180	178	162	171	178	165	171	163	162	160	175
117	70	97	106	76	93	120	110	108	111	105	118	105
137	138	101	124	129	120	113	118	129	132	134	136	141
131	127	112	134	118	107	134	157	122	123	130	135	117
126	122	147	134	145	124	163	118	142	141	133	126	101
122	129	126	122	125	143	116	129	132	139	137	131	107
122	112	107	136	171	175	156	174	165	176	207	138	189
154	181	179	187	166	159	173	171	154	223	220	167	191
244	221	170	187	154	149	157	20	114	122	108	140	127
149	114	110	135	134	150	130	167	113	162	120	145	115
131	120	209	175	173	145	70	50	142	156	108	130	134

1. *Obtenha o negativo da imagem, utilizando a transformação* $T(r) = 255 - r$.

2. *Derive uma função que alarga a faixa de contraste da imagem para 0 – 255. Mostre os valores da imagem transformada.*

3. *Derive uma função que destaque a parte da imagem que tiver o nível de cinza na faixa 100 – 150. Mostre os valores da imagem transformada.*

Os valores r_1, r_2, r_A e r_B que aparecem na definição das diferentes funções de transferência podem ser computadas dinâmicamente com uso do histograma da imagem, pois o histograma nos revela a distribuição das intensidades/níveis de cinza de uma imagem. Por exemplo, podemos utilizar o histograma para definir a luminância de maior ocorrência como o valor limiar r_1 da função de limiarização.

No caso do alargamento de contraste, métodos baseados em histograma são considerados os mais robustos. O mais conhecido é a técnica de **equalização do histograma** que consiste em transformar um histograma noutro que tem a máxima variância. A função de transferência $T(r)$ deve satisfazer as seguintes condições:

1. é **univariada** e **monotonicamente crescente**, e

2. $T(r) \in [0,1]$, $\forall r \in [0,1]$.

Exercício 14.2 *Determine o histograma da imagem do Exercício 14.1.*

Para entendermos o processo de equalização de histograma, vamos considerar que os níveis de cinza/intensidades r e s, respectivamente da imagem original e da imagem transformada, sejam variáveis contínuas no intervalo $[0,1]$ e a distribuição (aleatória) dessas intensidades são caracterizadas pelas **funções densidade de probabilidade** $p_r(r)$ e $p_s(s)$. De acordo com a teoria elementar das probabilidades, se $s = T(r)$ e que $T(r)$ é univariada e monotonicamente crescente, então $p_r(r)$ e $p_s(s)$ guardam entre si a seguinte relação

$$p_s(s) = p_r(r)\frac{dr}{ds}$$

Se a densidade $p_s(s) = 1$, dizemos que a imagem apresenta uma densidade uniforme. Neste caso,

$$\int_0^s 1ds = s = T(r) = \int_0^r p_r(r)dr, \tag{14.2}$$

ou seja, as intensidades da imagem transformada é uma **função de distribuição acumulada** de r. Dizemos que a imagem r é **equalizada** em s.

(Ver Figs. 4.12 do livro-texto de Gonzalez.)

Numa imagem discreta de $n \times m$ *pixels* com L níveis de cinza, a probabilidade de ocorrência de um *pixel* com o nível de cinza r_i, $i \in \{0, 1, 2 \cdots, (L-1)\}$, na imagem é

$$p_r(r_i) = \frac{n_i}{n \times m},$$

onde n_i é o número de *pixels* com valor r_i que ocorrem na imagem. Neste caso, $p_r(r_i)$ corresponde, de fato, ao histograma "normalizado em $[0, 1]$". Substituindo esse termo na forma discreta da Eq. 14.2, obtemos a seguinte função de transferência de r_i para s_i

$$s_i = T(r_i) = \sum_{j=0}^{i} p_r(r_j) = \sum_{j=0}^{i} \frac{n_i}{n \times m}. \tag{14.3}$$

Observe que a função de distribuição acumulada de s é linear em relação a s e que $s_i \in [0, 1]$. Para retornar o valor de s_i ao intervalo original $[L_{min}, L_{max}]$ de níveis de cinza, aplicamos ainda a seguinte transformação

$$s_i = (L_{max} - L_{min}) \sum_{j=0}^{i} \frac{n_i}{n \times m} + L_{min}.$$

Em termos de níveis de intensidades L, a expressão assume o seguinte aspecto

$$s_i = round\{L \sum_{j=0}^{i} \frac{n_i}{n \times m}\} - 1.$$

É comum considerar ainda que para $s_i < 0$, ele é "saturado" em 0, ou seja,

$$s_i = max\{0, round\{L \frac{\sum_{j=0}^{i} n_i}{n \times m}\} - 1\}. \tag{14.4}$$

Exercício 14.3 *Equalize o histograma da imagem do Exercício 14.1, seguindo os seguintes passos:*

1. *Determine o histograma original.*

2. *Determine os níveis de cinza L da imagem original.*

3. *Determine o número de ocorrências das intensidades menores que uma dada intensidade, para todas as possíveis intensidades qua aparecem na imagem.*

4. *Determine a corespondência entre as intensidades r e s.*

5. *Esboçe o histograma equalizado.*

6. *Quais são so valores dos pixels da imagem equalizada?*

Uma equalização pode ser ainda **global** ou **regional**. Na equalização global o processo leva em consideração todos os níveis de cinza que aparecem na imagem, enquanto na equalização regional, somente os níveis de cinza de uma sub-imagem, dentro de uma janela, são considerados e equalizados. A técnica de equalização global preserva as características globais da imagem, maximizando o contraste, e as técnicas de equalização regional realçam detalhes da imagem.

(Ver Figs. 4.13–4.15 do livro-texto de Gonzalez.)

Exemplo 14.2 *No sítio `http://www.di.ufpe.br/~if143/projetos/99_2/equali/Equalizacao.html` há vários exemplos de equalização.*

Observação 14.2 *A operação aritmética subtração é também muito utilizado para* **realçar** *as diferenças entre duas imagens, já que os pixels com valores iguais terão intesidade nula (escura) na imagem resultante.*

14.2 Técnicas Espectrais

No domínio de frequência o realce de uma imagem pode ser obtido com o produto da transformada Fourier $\mathcal{I}(w_u, w_v)$ da imagem com uma **função filtro de transferência** $\mathcal{H}(w_u, w_v)$. A transformada inversa do resultado seria a imagem transformada.

$$I_s(u,v) = \mathsf{F}^{-1}[\mathcal{H}(w_u, w_v)\mathcal{I}_r(w_u, w_v)]. \tag{14.5}$$

Vimos na Seção 9.4.2 que, no domínio espacial, este produto corresponde à convolução

$$I_s(u,v) = \mathsf{F}^{-1}[\mathcal{H}(w_u, w_v)] * \mathsf{F}^{-1}[\mathcal{I}_r(w_u, w_v)] = h(u,v) * I_r(u,v),$$

e diversos esforços foram feitos para implementar $h(u,v)$ no domínio espacial como **máscara de convolução**, pois o uso de tais máscaras é muito mais simples e eficiente sob o ponto de vista computacional. Na seção 11.3 apresentamos algumas máscaras espaciais que produzem efeitos visuais similares aos filtros passa-baixo.

(Ver Fig. 4.19 – 4.20 do livro-texto de Gonzalez)

Embora os filtros definidos no domínio de frequência sejam mais utilizados como filtros passa-baixo para atenuar as variações das intensidades, é de se esperar que ao aumentarmos a magnitude das altas frequências em relação às baixas frequências, teremos maiores contrastes na imagem (**filtragem passa-alta**). Com isso, podemos obter uma imagem que realça as regiões que tem um elevado gradiente/uma elevada variação de luminância/intensidade. Isso poderia facilitar, por exemplo, a detecção de borda. O **filtro de Butterworth** é um exemplo de filtro passa-alta, bastante popular, cuja função de transferência de ordem n com posição de **frequência de corte** a uma distância D_0, medida a partir da origem do plano de frequência, é

$$H(w_u, w_v) = \frac{1}{1 + (D_0/D(w_u, w_v))^{2n}}.$$

A função $D(w_u, w_v)$ é a distância do ponto (w_u, w_v) à origem do plano de frequência. Observe que quando $D(w_u, w_v) = D_0$, $H(w_u, w_v)$ se reduz à metade do seu valor máximo. Na teoria de sinais, convenciona-se que na frequência de corte o valor de $H(w_u, w_v)$ deve ser $\frac{1}{\sqrt{2}}$ do seu valor máximo. Portanto, um fator de escala é adicionado à expressão resultando na seguinte função de transferência

$$H(w_u, w_v) = \frac{1}{1 + (\sqrt{2} - 1)(D_0/D(w_u, w_v))^{2n}}. \tag{14.6}$$

(Ver Figs. 4.37 – 4.39 do livro-texto de Gonzalez)

Exercício 14.4 *Compute a transformada de Fourier da seguinte imagem* 7×6

137	138	101	124	129	120	113
131	127	112	34	18	107	134
126	122	47	34	45	124	163
122	129	26	22	25	143	116
122	112	107	36	71	175	156
154	181	179	187	166	159	173
244	221	170	187	154	149	157

1. *Esboce no plano de frequência os pontos em que* $D_0 = 3$.

2. *Determine a função de transferência para* $(w_u, w_v) = (1, 1)$ *e* $(w_u, w_v) = (4, 4)$.

No caso dos filtros de Butterworth, não existe ainda uma implementação espacial satisfatória. Portanto, é feito a filtragem no domínio de frequência. Para obter uma imagem filtrada, segue-se os seguintes passos:

1. transformar a imagem $I_r(u,v)$ para o domínio de frequências através da transformada de Fourier (Eq. 9.7).

2. multiplicar cada ponto $\mathcal{I}(w_u, w_v)$ da imagem no domínio de frequência pelo filtro de Butterworth $H(w_u, w_v)$

$$\begin{aligned}
\mathcal{HI}(w_u,w_v) &= H(w_u,w_v)\mathcal{I}(w_u,w_v) \\
&= H(w_u,w_v)(\frac{1}{NM}\sum_{u=0}^{N-1}\sum_{v=0}^{v=M-1} I(u,v)[\cos 2\pi(\frac{w_u u}{N}+\frac{w_v v}{M}) \\
&\quad -i\sin 2\pi(\frac{w_u u}{N}+\frac{w_v v}{M})]dudv) \\
&= H(w_u,w_v)(\frac{1}{NM}\sum_{u=0}^{N-1}\sum_{v=0}^{v=M-1} I(u,v)e^{-i2\pi(\frac{w_u u}{N}+\frac{w_v v}{M})}dudv)
\end{aligned} \quad (14.7)$$

3. re-transformar o resultado do produto para o domínio espacial utilizando a versão discreta da transformada de Fourier inversa

$$I_s(u,v) = \mathsf{F}^{-1}(\mathcal{HI}(w_u,w_v)) = \sum_{w_u=0}^{N-1}\sum_{w_v=0}^{M-1}\mathcal{HI}(w_u,w_v)e^{i2\pi(\frac{w_u u}{N}+\frac{w_v v}{M})}dudv),$$

Exercício 14.5 *Aplique o filtro de Butterworth na imagem dada no Exercício 14.4.*

Observação 14.3 *O cômputo da transformada de Fourier tem uma complexidade da ordem de n^2, onde n é o número de pixels. A* **propriedade de separabilidade** *nos permite determinar primeiro os valores nas linhas e depois nas colunas, através de*

$$F(w_u,w_v) = \frac{1}{N}\sum_{k=0}^{N-1} P(w_u,k)e^{-i2\pi\frac{kw_v}{N}},$$

onde

$$P(w_u,k) = \frac{1}{M}\sum_{j=0}^{M-1} P(j,k)e^{-i2\pi\frac{jw_u}{M}}.$$

Embora o número de operações tenha reduzido, a complexidade do algoritmo, tanto por linha como por coluna, continua quadrática. Somente com a **transformada rápida de Fourier** *foi possível reduzir esta complexidade para* $n \log_2 n$.