

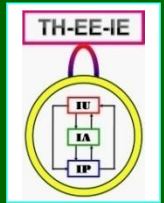
图象工程（上）

图 象 处 理

（第4版）

章毓晋

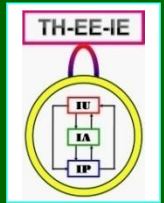
清华大学电子工程系 100084 北京



第1单元 图象增强

- 第2章 空域增强：点操作
- 第3章 空域增强：模板操作
- 第4章 频域图象增强

图象增强技术是最基本和最常用的一大类图象处理技术，也常用于其他图象技术应用的预处理阶段。图象增强的目的是通过对图象的特定加工，以将被处理的图象转化为对具体应用来说视觉质量和效果更“好”或更“有用”的图象



第3章 空域增强：模板操作

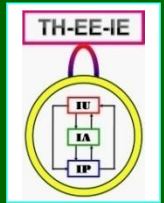
3.1 像素间联系

3.2 模板运算

3.3 线性滤波

3.4 非线性滤波

3.5 局部增强



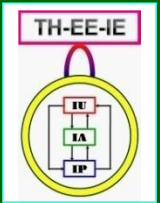
3.1 像素间联系

像素在图象空间是按某种规律排列的，互相之间有一定的联系

3.1.1 像素的邻域和邻接

3.1.2 像素间的连接和连通

3.1.3 像素间的距离



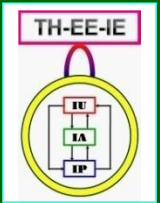
3.1.1 像素的邻域和邻接

像素的邻域

由一个像素周围与其关系最密切的近邻像素（邻近像素）组成的集合

像素的邻接

两个像素（互相）之间的一种空间关系，两个邻接的像素之间有接触。4-邻接：边接触；对角-邻接：顶点接触；8-邻接：边接触/顶点接触



3.1.2 像素间的连接和连通

像素间的连接

两个像素之间的一种空间和属性关系

两个像素是否连接：

- (1) 是否它们空间接触（邻接）
- (2) 是否它们的灰度值满足某个特定的相似准则（如它们灰度值相等，或同在一个灰度值集合中取值）

3.1.2 像素间的连接和连通

像素间的连接

(1) 4-连接:

2个像素 p 和 r 在 V 中取值且 r 在 $N_4(p)$ 中

(2) 8-连接:

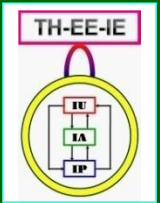
2个像素 p 和 r 在 V 中取值且 r 在 $N_8(p)$ 中

4-连接

0	1	0
0	1	0
0	0	1

0	1	0
0	1	0
0	0	1

8-连接



3.1.2 像素间的连接和连通

像素间的连通

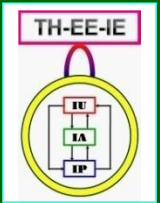
连通是连接的推广，连接是连通的特例

通路: 由一系列依次邻接的像素组成

从具有坐标 (x, y) 的像素 p 到具有坐标 (s, t) 的像素 q 的一条通路由一系列具有坐标 (x_0, y_0) , (x_1, y_1) , \dots , (x_n, y_n) 的独立像素组成

这里 $(x_0, y_0) = (x, y)$, $(x_n, y_n) = (s, t)$, 且 (x_i, y_i) 与 (x_{i-1}, y_{i-1}) 邻接, 其中 $1 \leq i \leq n$, n 为通路长度

4-邻接, 8-邻接 \Leftrightarrow 4-通路, 8-通路



3.1.2 像素间的连接和连通

像素间的连通

连通是连接的推广，连接是连通的特例

通路: 由一系列依次邻接的像素组成

通路建立了两个像素 p 和 q 之间的空间联系

如果这条通路上的所有像素的灰度值均满足某个特定的相似准则，即两两邻接的像素也是连接的，则可以说像素 p 和 q 是连通的

4-连通，8-连通 \Leftrightarrow 4-通路，8-通路

3.1.2 像素间的连接和连通

邻接、连接、连通、通路

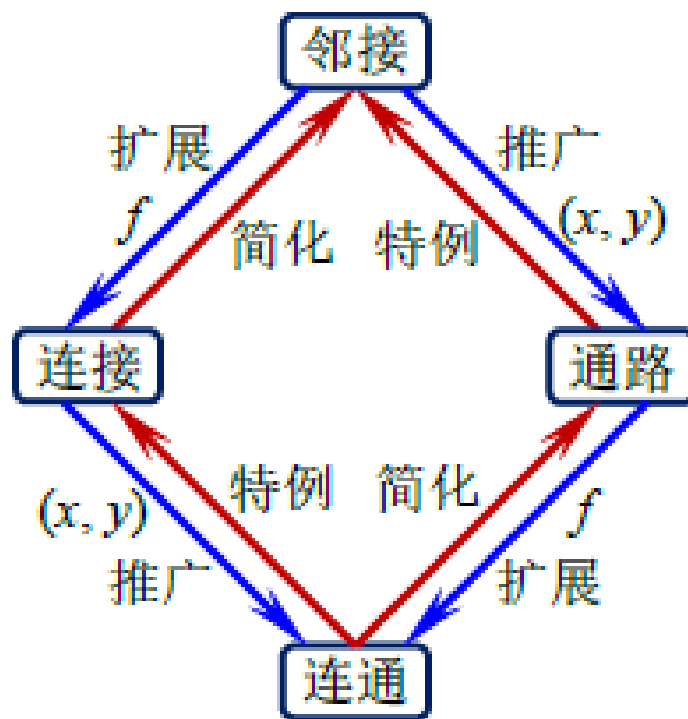
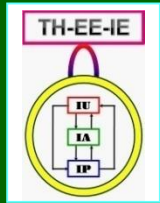


图 3.1.2 邻接、连接、通路、连通之间的关系



3.1.2 像素间的连接和连通

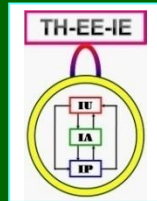
像素集合的连接和连通

子集：图象中的（部分）像素的集合

在一个图象子集中与同一个像素相连通的所有像素构成该图象子集中的一个**连通组元**

如果子集 S 中只有一个连通组元，即 S 中所有像素都互相连通，则称 S 是一个**连通集**

对两个图象子集 S 和 T 来说，如果 S 中的一个或一些像素与 T 中的一个或一些像素邻接，则可以说这两个图象子集是邻接的



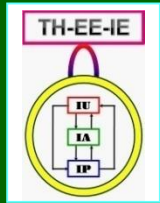
3.1.2 像素间的连接和连通

像素集合的连接和连通

对两个图象子集 S 和 T 来说，如果 S 中的一个或一些像素与 T 中的一个或一些像素连接，则可以说这两个图象子集是连接的

图象里的连通集构成该图象中的**区域**

区域的边界是该区域的一个子集，也称区域的**轮廓**（封闭的通路），它将该区域与其他区域分离开。组成一个区域的边界像素本身属于该区域而在其邻域中不属于该区域的像素



3.1.2 像素间的连接和连通

小结:

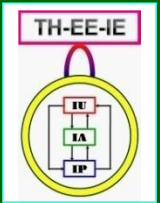
邻接: 仅考虑像素间的空间关系

连接: 还考虑像素的灰度值

通路: 仅借助邻接来定义

连通: 还考虑像素的连接情况

子集: 一般为满足连通条件的像素集合



3.1.3 像素间的距离

距离量度函数

2-D图象中常用距离有三种：

(1) 欧氏 (Euclidean) 距离

$$D_E(p, q) = [(x - s)^2 + (y - t)^2]^{1/2}$$

(2) 城区 (city-block) 距离

$$D_4(p, q) = |x - s| + |y - t|$$

(3) 棋盘 (chessboard) 距离

$$D_8(p, q) = \max(|x - s|, |y - t|)$$

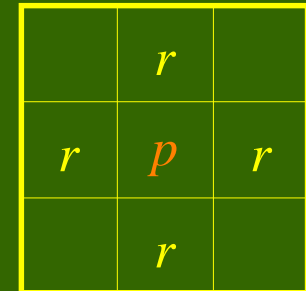
3.1.3 像素间的距离

用距离定义邻域

考虑在空间点 (x_p, y_p) 的像素 p

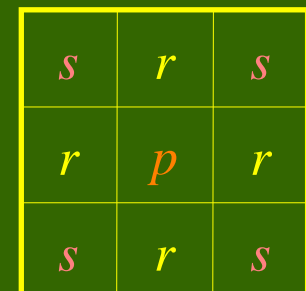
4-邻域—— $N_4(p)$

$$N_4(p) = \{ r \mid D_4(p, r) = 1 \}$$



8-邻域—— $N_8(p)$

$$N_8(p) = \{ r \mid D_8(p, r) = 1 \}$$



3.1.3 像素间的距离

范数和距离

函数 $f(x)$ 的范数 m

$$\|f\|_m = \left[\int |f(x)|^m dx \right]^{1/m}$$

两点间的Minkowski距离

$$D_m(p, q) = \left[|x - s|^m + |y - t|^m \right]^{1/m}$$

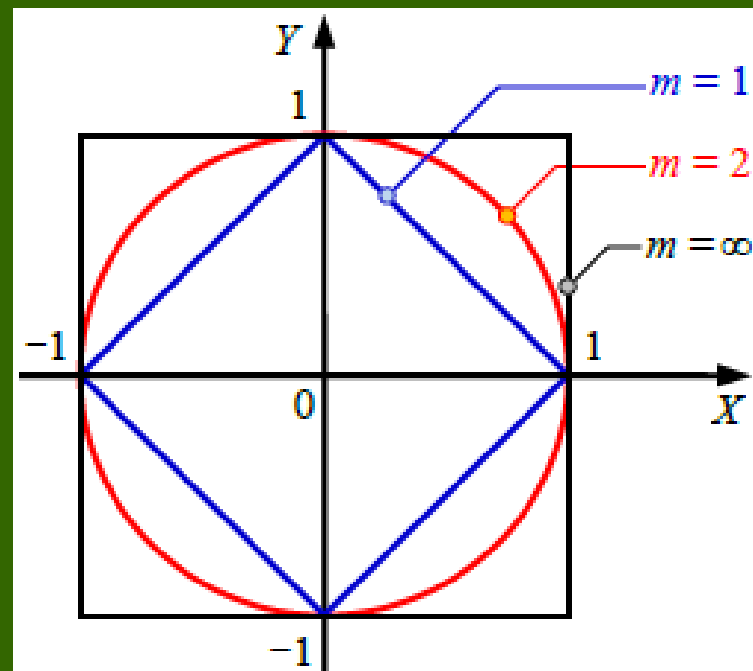


图 3.1.5 3 种范数和 3 种距离

3.2 模板运算

模板也称样板或窗 \Rightarrow 邻域运算

模板操作 $R = f(k_0, k_1, \dots, k_8, s_0, s_1, \dots, s_8)$

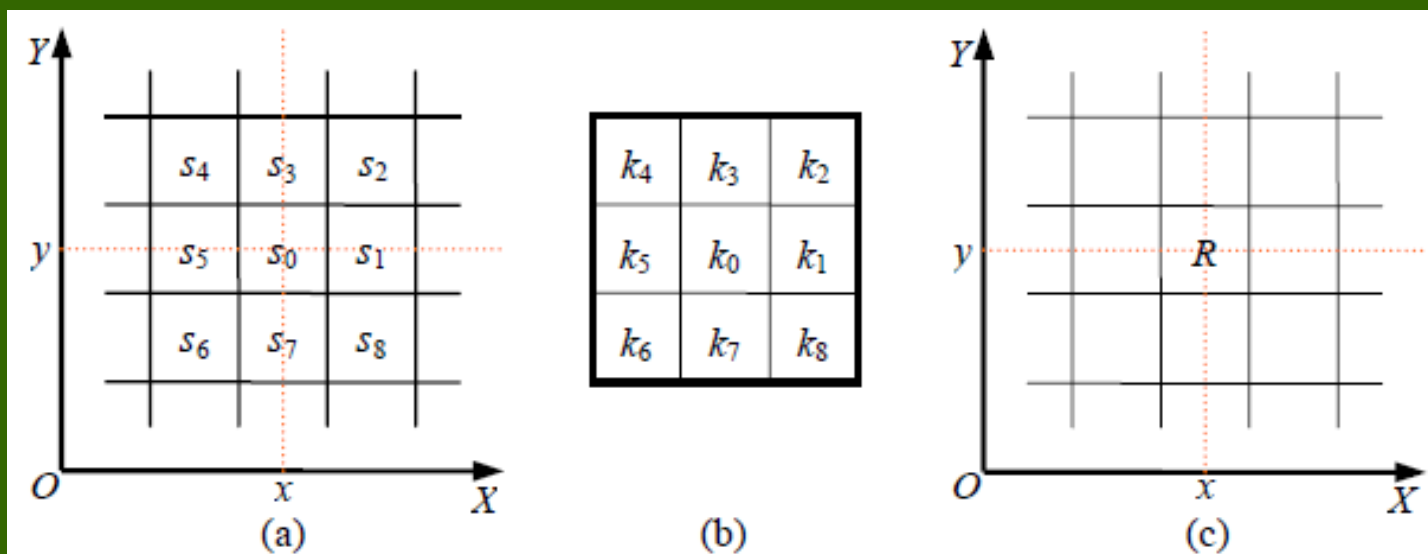
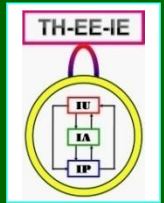


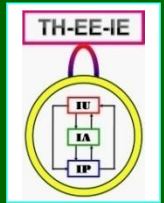
图 3.2.1 用 3×3 的模板进行模板操作的示意图



3.2 模板运算

模板卷积的主要步骤：

- (1) 将模板在输入图象中漫游，并将模板中心与图象中某个像素位置重合
- (2) 将模板上的各个系数与模板下各对应像素的灰度值相乘
- (3) 将所有乘积相加（为保持灰度范围，常将结果再除以模板系数之和）
- (4) 将上述结果（模板的输出响应）赋给输出图象中对应模板中心位置的像素



3.2 模板运算

模板**排序**的主要步骤：

- (1) 将模板在输入图象中漫游，并将模板中心与图象中某个象素位置重合
- (2) 读取模板下输入图象中各对应象素的灰度值
- (3) 将这些灰度值进行排序，一般将它们从小到大排成一行（单增）
- (4) 根据运算目的从排序结果中选一个序，取出该序象素的灰度值
- (5) 将取出的灰度值赋给输出图象中对应模板中心位置的象素

3.2 模板运算

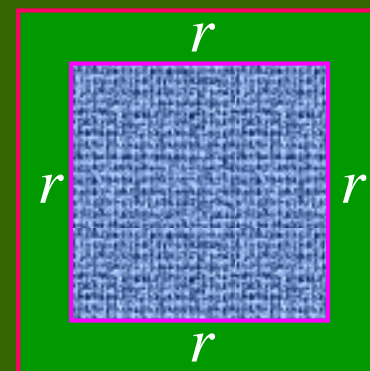
图象边界处的模板运算

当模板中心对应输入图象的边界像素时，其邻域范围可能扩展到输入图象的边界之外：

1、忽略这些边界处的像素

仅处理图象内部的像素

2、将输入图象进行扩展



如果用半径为 r 的模板进行模板运算，则在图象的四条边界外各增加/扩展一个 r 行或 r 列的带

{P58: 4种方法}

3.2 模板运算

模板运算功能分类

像素邻域

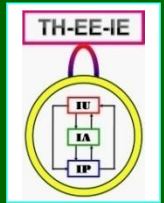
图像增强

$$g(x,y) = E_H [f(x,y), N(x,y)]$$

将模板运算用于图象空域增强一般称为空域滤波。选择不同系数可得到不同效果

表 3.2.1 空域滤波增强技术分类

功能 \ 特点	线性	非线性
平滑	线性平滑	非线性平滑
锐化	线性锐化	非线性锐化



3.3 线性滤波

线性滤波既可得到平滑的效果（图象反差减少），也可得到锐化的效果（图象反差增加）

3.3.1 线性平滑滤波

3.3.2 线性锐化滤波

3.3.1 线性平滑滤波

1. 邻域平均

模板系数都是正的（整数）

保持灰度值范围（所有系数之和为1）

卷积结果
除以总个数

$$g(x, y) = \frac{1}{n^2} \sum_{(s,t) \in N(x,y)} f(s,t)$$

{ 图3.3.1 }

例：3 × 3 模板

k_4	k_3	k_2
k_5	k_0	k_1
k_6	k_7	k_8

1	1	1
1	1	1
1	1	1

3.3.1 线性平滑滤波

2. 加权平均

离中心近的像素应对滤波结果有较大的贡献

$$g(x, y) = \frac{\sum_{(s,t) \in N(x,y)} w(s,t) f(s,t)}{\sum_{(s,t) \in N(x,y)} w(s,t)}$$

权

模板：中心系数大
周围系数小

➤ 要除以的系数？

1	2	1
2	4	2
1	2	1

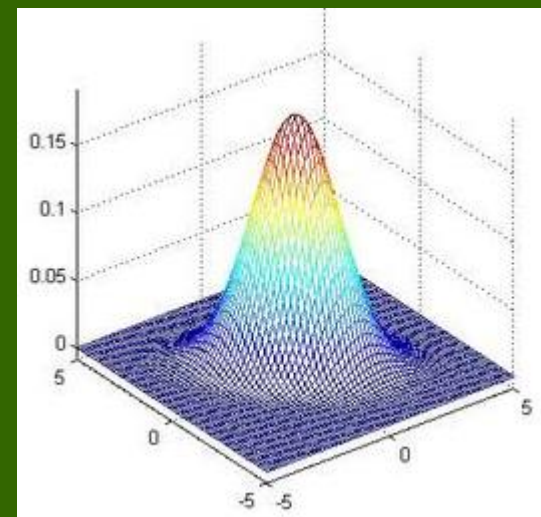
图 3.3.2 一个加权平均模板

3.3.1 线性平滑滤波

3. 高斯平滑

根据高斯分布确定模板系数

$$\frac{1}{273} \begin{bmatrix} 1 & 4 & 7 & 4 & 1 \\ 4 & 16 & 26 & 16 & 4 \\ 7 & 26 & 41 & 26 & 7 \\ 4 & 16 & 26 & 16 & 4 \\ 1 & 4 & 7 & 4 & 1 \end{bmatrix}$$



模板
分解

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

减少计算量
表3.3.1

3.3.1 线性平滑滤波

3. 高斯平均

对高斯函数在整数位置 $-n, \dots, 0, \dots, +n$ 采样

杨辉三角形

表 3.3.2 1-D 高斯模板系数

$g(i)$	σ
1	0
1 1	1/4
1 2 1	1/2
1 3 3 1	3/4
1 4 6 4 1	1
1 5 10 10 5 1	5/4

3.3.1 线性平滑滤波

4. 边缘保持平滑

为了避免局部平均会模糊不同区域之间的边缘，考虑选择只在不包含边缘的邻域中进行平均

取中心像素的8个不同邻域，对每个邻域都统计其像素的灰度方差，并将灰度方差最小（方差小的邻域中像素灰度级的变化小，包含边缘的概率也小）的那个邻域中的像素均值赋给中心像素

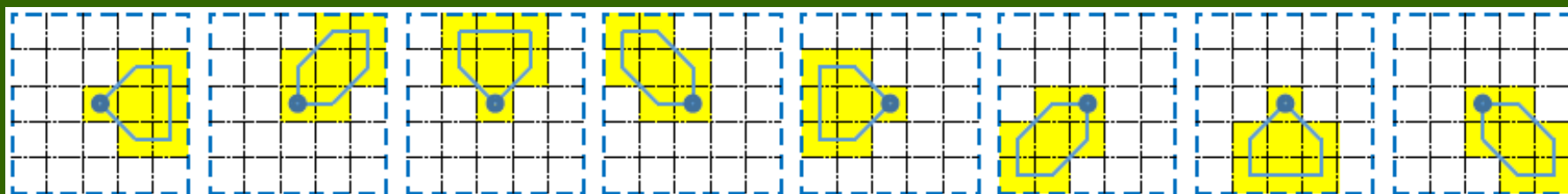


图 3.3.3 八个边缘保持平滑模板

3.3.2 线性锐化滤波

1. 拉普拉斯算子

积分可以平滑图象，微分可以锐化图象
模板系数在中心为正而周围远离中心处为负
拉普拉斯算子是各向同性的二阶微分算子

$$\nabla^2 f = \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2}$$

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

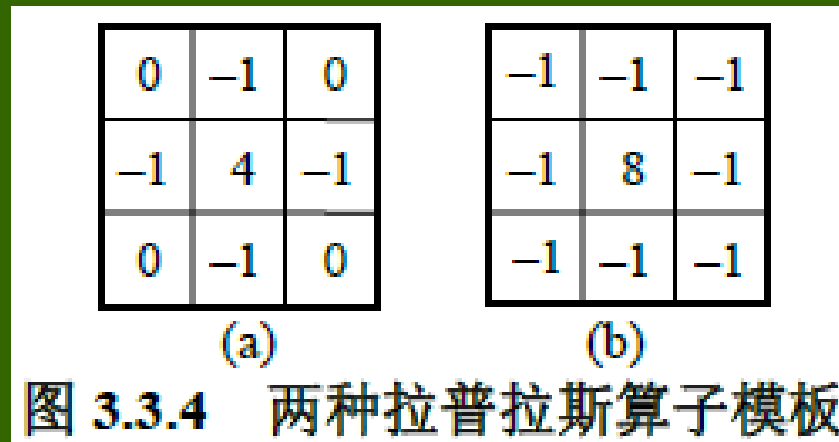
$$\frac{\partial^2 f}{\partial y^2} = 2f(x, y) - f(x, y+1) - f(x, y-1)$$

$$\nabla^2 f(x, y) = 4f(x, y) - f(x+1, y) - f(x-1, y) - f(x, y+1) - f(x, y-1)$$

3.3.2 线性锐化滤波

1. 拉普拉斯算子

既可考虑4-邻域，也可考虑8-邻域



✓ 系数之和均为零

✓ 尺度变换到 $[0, L-1]$

拉普拉斯算子可增强图象中的灰度不连续边缘，减弱灰度值缓慢变化区域的对比度，将结果叠加到原始图象上，就可以得到锐化后的图象

3.3.2 线性锐化滤波

2. 高频提升滤波

叠加图象微分结果 \Leftrightarrow 减去图象积分结果

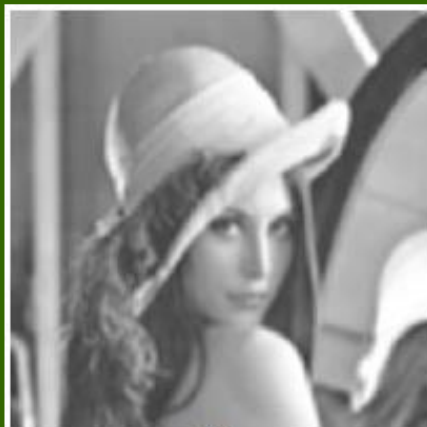
$$h_b(x, y) = A \times f(x, y) - g(x, y) = (A - 1) \times f(x, y) + h(x, y)$$

平滑

$f - g$

非锐化掩膜

$A=2$



(a)

模糊图象

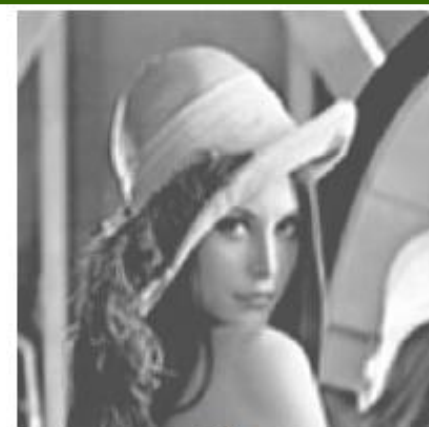


(b)

图 3.3.5 拉普拉斯算子与高频提升滤波的比较

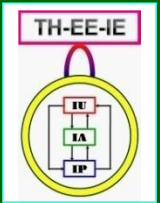


(c)



(d)

灰度映射



3.4 非线性滤波

非线性滤波可区分图象中有用的内容和无用的噪声。分为三种：基于集合的、基于形状的、基于排序的

3.4.1 非线性平滑滤波

3.4.2 非线性锐化滤波

3.4.3 线性和非线性混合滤波

3.4 非线性滤波

线性滤波常不能区分图象中有用的内容和无用的噪声

在1-D傅里叶空间对原始图象加上白噪声，两者的频谱直接叠加。线性滤波将两者的傅里叶变换相乘，结果在每个频率处信号和噪声的强度都由相同的因子所消弱。图象信噪比保持原值，并不增加

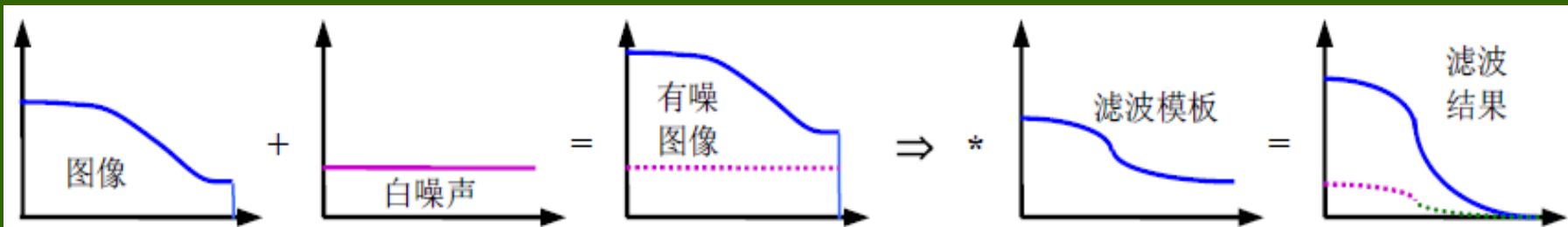


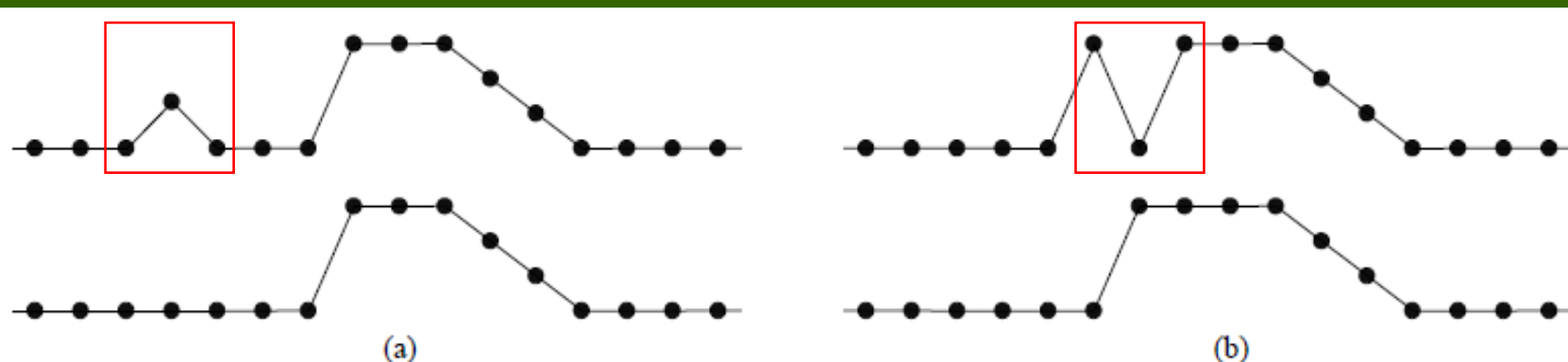
图 3.4.1 线性滤波不能区分图像中有用的特征和噪声

3.4.1 非线性平滑滤波

1. 中值滤波原理

设模板尺寸为 M , $M = 2r + 1$, r 为模板半径

$$g_j = \text{median}[f_{j-r}, f_{j-r+1}, \dots, f_j, \dots, f_{j+r}]$$



消除孤立的脉冲而
不对边缘产生影响

图 3.4.2 1-D 中值滤波示例

接近边缘的孤立脉
冲会使边缘偏移

3.4.1 非线性平滑滤波

2. 2-D中值滤波

$$g_{\text{median}}(x, y) = \text{median}_{(s, t) \in N(x, y)} [f(s, t)]$$

输出值大于模板中一半象素的值，又小于模板中另一半象素的值（序：50%）



图 3.4.3 邻域平均和中值滤波的比较

3.4.1 非线性平滑滤波

3. 中值滤波的模板

有实验表明，当使用超过包含9~13个像素的模板来消除图象中的噪声时，计算量的增加比消噪效果的改善更为明显，所以常可使用稀疏的5×5模板来减少运算量

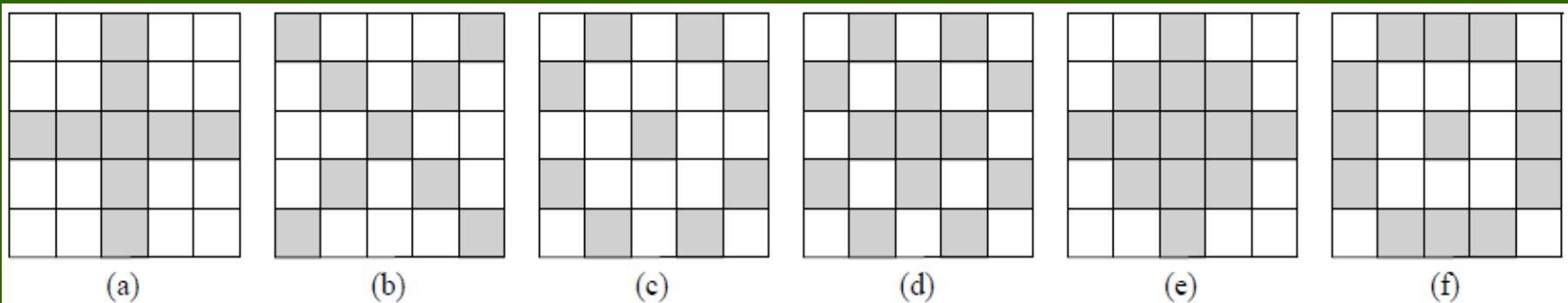


图 3.4.4 一些用于中值滤波的模板 {P.67}

3.4.1 非线性平滑滤波

4. 计算2-D中值

计算2-D中值的方法有3种:

- ① 直接使用2-D模板
- ② 先使用1×3模板再使用3×1模板
- ③ 先使用3×1模板再使用1×3模板

结果可能都不同

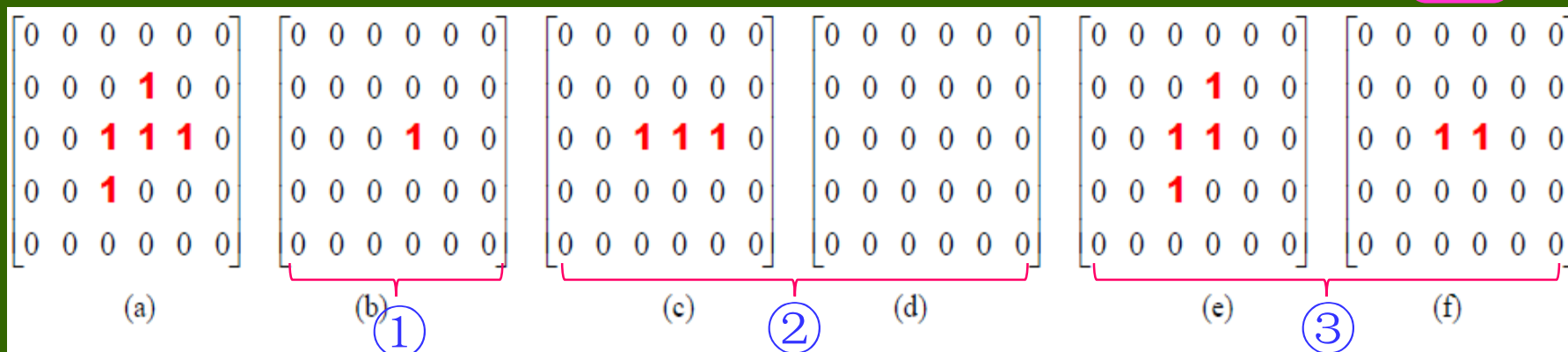
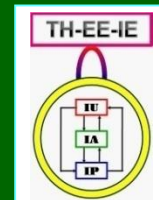


图 3.4.5 实现 2-D 中值滤波的 3 种方法的结果

例3.4.4



3.4.1 非线性平滑滤波

5. 序统计滤波

更广泛的滤波——百分比（percentile）滤波

最大值滤波

$$g_{\max}(x, y) = \max_{(s, t) \in N(x, y)} [f(s, t)]$$

最小值滤波

$$g_{\min}(x, y) = \min_{(s, t) \in N(x, y)} [f(s, t)]$$

中点滤波

$$g_{\text{mid}}(x, y) = \frac{1}{2} \left\{ \max_{(s, t) \in N(x, y)} [f(s, t)] + \min_{(s, t) \in N(x, y)} [f(s, t)] \right\} = \frac{1}{2} \{g_{\max}(x, y) + g_{\min}(x, y)\}$$

3.4.1 非线性平滑滤波

6. 最频值滤波

最频值 (mode) —— 分布中最有可能出现的值
使用最频值滤波不仅可以消除噪声 (尤其是脉冲噪声), 还可以锐化目标边缘

中值总比均值更接近最频值

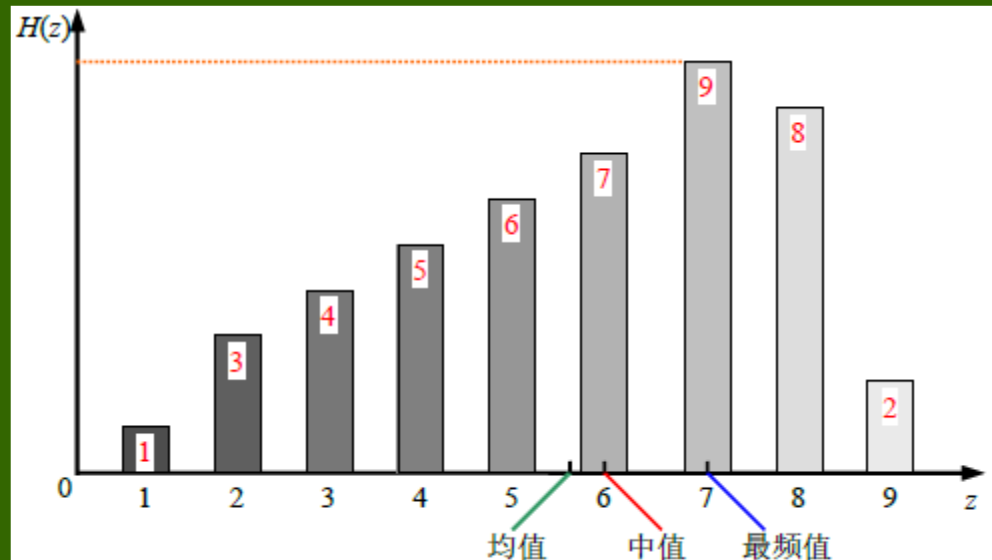


图 3.4.6 显示均值、中值和最频值位置关系的直方图

3.4.2 非线性锐化滤波

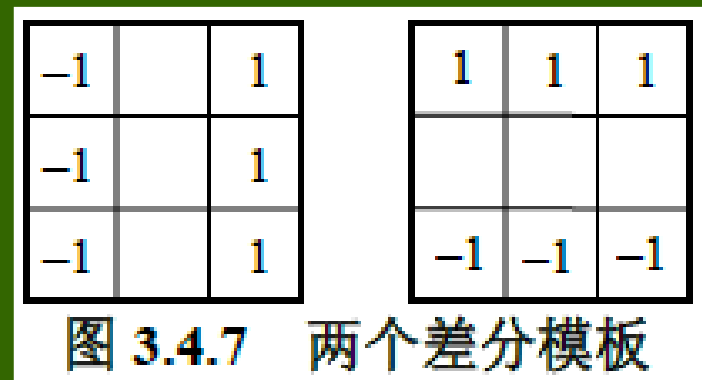
1. 基于梯度的锐化滤波

利用微分可以锐化图象（积分平滑图象）

梯度：对应一阶导数

最常用的微分矢量

$$\nabla f = \left[\frac{\partial f}{\partial x} \quad \frac{\partial f}{\partial y} \right]^T = [G_X \quad G_Y]^T$$



（需要用2个模板分别沿 X 和 Y 方向计算）

3.4.2 非线性锐化滤波

1. 基于梯度的锐化滤波

在实际滤波中，常常只使用梯度矢量的幅度（即矢量的模）

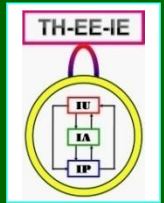
- 非线性组合模板输出值（矢量转标量）
幅度以2为范数/模计算（对应欧氏距离）

$$|\nabla f_{(2)}| = \text{mag}(\nabla f) = [G_X^2 + G_Y^2]^{1/2}$$

以1为范数（城区距离） 以 ∞ 为范数（棋盘距离）

$$|\nabla f_{(1)}| = |G_X| + |G_Y|$$

$$|\nabla f_{(\infty)}| = \max\{|G_X|, |G_Y|\}$$



3.4.2 非线性锐化滤波

2. 最大-最小锐化变换

最大值滤波和最小值滤波结合

将一个模板覆盖区域里的中心像素值与该区域里的最大值和最小值进行比较，然后将中心像素值用与其较接近的极值（最大或最小值）替换

$$S[f(x, y)] = \begin{cases} g_{\max}(x, y) & \text{如果 } g_{\max}(x, y) - f(x, y) \leq f(x, y) - g_{\min}(x, y) \\ g_{\min}(x, y) & \text{其他} \end{cases}$$

迭代进行: $S^{n+1}[f(x, y)] = S\{S^n[f(x, y)]\}$

3.4.3 线性和非线性混合滤波

将线性滤波运算和中值滤波运算混合串联起来, 先对较大的区域进行计算量较小的线性滤波操作, 然后再计算线性滤波输出的中值, 作为混合滤波的最终输出

$$g(i) = \text{MED}[H_L(f(i)), H_C(f(i)), H_R(f(i))]$$

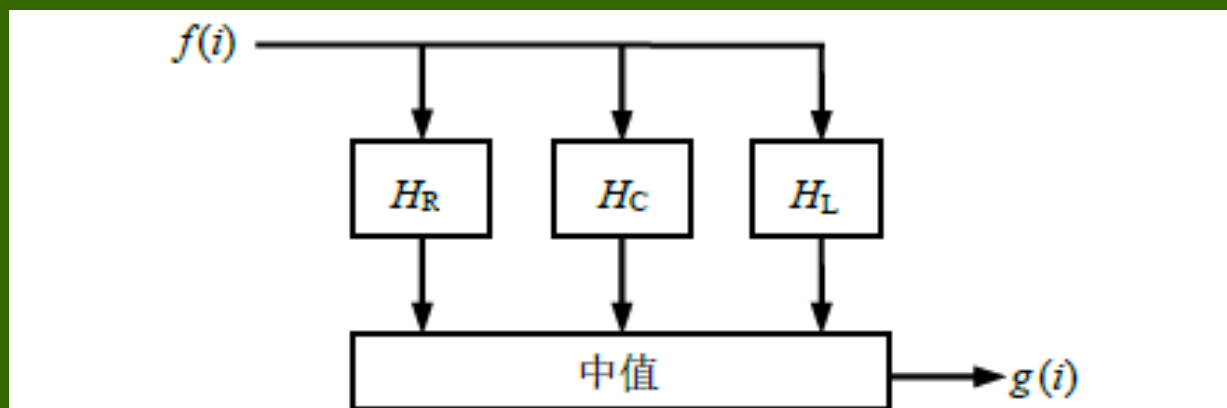


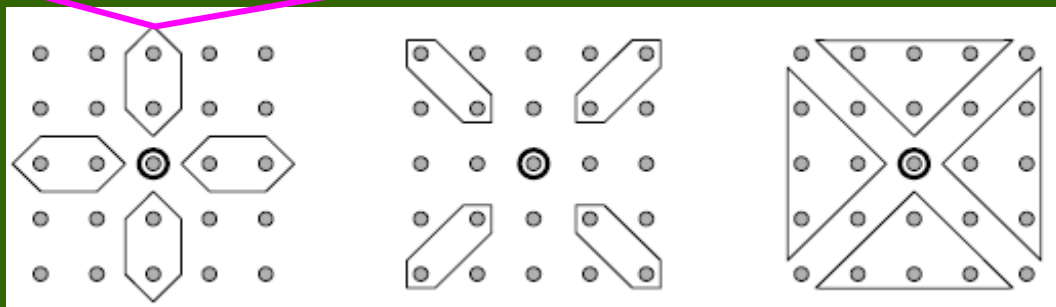
图 3.4.8 利用子滤波模板实现基本的线性和中值混合滤波

3.4.3 线性和非线性混合滤波

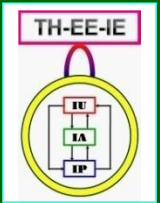
最简单的结构包括使用相同的平均滤波模板 H_L 和 H_R 以及直通的模板 $H_C[f(i)] = f(i)$

$$g(i) = \text{MED} \left[\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k f(i-k), f(i), \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k f(i+k) \right]$$

$$g(x, y) = \text{MED} \left\{ \frac{1}{2} [f(x, y-2) + f(x, y-1)], \frac{1}{2} [f(x, y+1) + f(x, y+2)], f(x, y), \frac{1}{2} [f(x+2, y) + f(x+1, y)], \frac{1}{2} [f(x-1, y) + f(x-2, y)] \right\}$$



后两个?



3.5 局部增强

- 全局增强：把一幅图象作为一个整体
- 局部增强：对图象某些局部区域的细节进行增强
- 用全局增强不能保证在所关心的局部区域得到所需要的增强效果
- 局部增强多了一个选择局部区域的步骤
- 直接利用局部信息以达到局部增强目的

3.5 局部增强

1. 直方图变换局部增强

先将图象分成一系列小区域（子图象）
对各子图象分别进行直方图变换



图 3.5.1 局部增强效果示例

3.5 局部增强

2. 基于均值和方差的局部增强

利用像素邻域内像素灰度的均值和方差

(1) 增强图象中灰度比较大但方差比较小的区域

选择相对于全图
比较亮的区域

选择相对于全图方
差比较小的区域

$$g(x,y) = \begin{cases} Ef(x,y) & M \leq km(x,y) \text{ 且 } \sigma(x,y) \leq ls \\ f(x,y) & \text{其他} \end{cases}$$

3.5 局部增强

2. 基于均值和方差的局部增强

利用像素邻域内像素灰度的均值和方差

(2) 增强变换

$$A(x, y) = k \frac{M}{\sigma(x, y)} \quad 0 < k < 1$$

对比度较小区域
得到较大增益

$$g(x, y) = A(x, y)[f(x, y) - m(x, y)] + m(x, y)$$

相乘放大图象
的局部变化

恢复原区域的
平均灰度值



联系信息

- ☞ 通信地址：北京清华大学电子工程系
- ☞ 邮政编码：100084
- ☞ 办公地址：清华大学，罗姆楼，6层305室
- ☞ 办公电话：(010) 62798540
- ☞ 传真号码：(010) 62770317
- ☞ 电子邮件：zhang-yj@tsinghua.edu.cn
- ☞ 个人主页：oa.ee.tsinghua.edu.cn/~zhangyujin/