



# 图像处理和分析技术

章毓晋

清华大学电子工程系 100084 北京



# 课程介绍

## ★ 教材和进度

- ◆ “图像处理和分析技术”
- ◆ 高等教育出版社, 2008
- ◆ 教学进度: 见下
- ◆ 进一步参考资料: 见下



# 课程介绍

## ★ 教学进度(1/2)

- ◆ 第1次课: 1.1, 1.2, 1.3, 1.4
- ◆ 第2次课: 1.5, 1.6, 1.7
- ◆ 第3次课: 2.1, 2.2, 2.3
- ◆ 第4次课: 2.4, 2.5, 2.6,
- ◆ 第5次课: 3.1, 3.2, 3.3, 3.4
- ◆ 第6次课: 3.5, 3.6, 3.7, 复习(1)
- ◆ 第7次课: 4.1, 4.2, 4.3, 4.4
- ◆ 第8次课: 4.5, 4.6, 4.7
- ◆ 第9次课: 5.1, 5.2, 5.3
- ◆ 第10次课: 5.4, 5.5, 小测验/期中考试



# 课程介绍

## ★ 进度(2/2)

- ◆ 第11次课: 6.1, 6.2, 6.3, 6.4
- ◆ 第12次课: 6.5, 6.6, 6.7, 6.8, 6.9
- ◆ 第13次课: 7.1, 7.2, 7.3, 7.4
- ◆ 第14次课: 7.5, 7.6, 7.7, 7.8, 7.9
- ◆ 第15次课: 8.1, 8.2, 8.3, 8.4
- ◆ 第16次课: 8.5, 8.6, 8.7, 8.8, 复习(2)
- ◆ 第17次课: 9.1, 9.2, 9.3
- ◆ 第18次课: 9.4, 9.5, 9.6, 9.7
- ◆ 第19次课: 10.1, 10.2, 10.3, 总复习(1)
- ◆ 第20次课: 10.4, 10.5, 10.6, 10.7, 总复习(2)



# 课程介绍



## 参考资料

- ◆ 章毓晋。图像工程(上册)——图像处理。  
北京：清华大学出版社，2006。
- ◆ 章毓晋。图像工程(中册)——图像分析。  
北京：清华大学出版社，2005。
- ◆ 章毓晋。图像工程(下册)——图像理解。  
北京：清华大学出版社，2007。



# 第1章 图像技术基础

- 1.1 图像和像素
- 1.2 像素间联系
- 1.3 图像坐标变换
- 1.4 图像显示
- 1.5 采样和量化
- 1.6 图像存储与格式
- 1.7 图像技术及分类



# 1.1 图像和像素

- ◆ 图像（狭义和广义）
- ◆ 数字图像
- ◆  $f(x, y)$  和  $I(r, c)$
- ◆ 例1.1.1
- ◆ 像素
- ◆ 图像的矩阵表示和矢量表示



# 1.1 图像和像素



图 1.1.1 数字图像示例



## 1.2 像素间联系

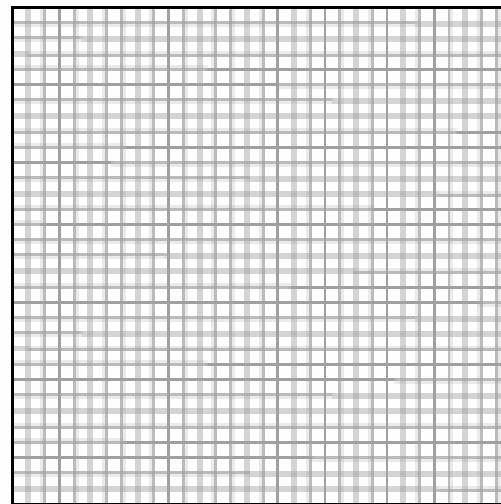
- ◆ 像素邻域
- ◆ 每个像素的由近邻像素组成的邻域
- ◆ 4-邻域 (4-neighborhood) , 记为 $N_4(p)$
- ◆ 4个对角近邻像素
- ◆ 8-邻域: 4个4-邻域近邻像素加上4个对角邻域像素合起来构成 $p$ 的



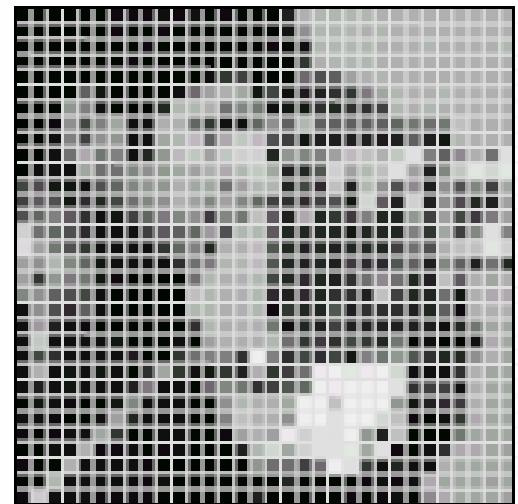
## 1.2 像素间联系



(a)



(b)



(c)

图 1.1.2 像素示例



## 1.2 像素间联系

- ◆ 像素间距离
- ◆ 欧氏 (Euclidean) 距离

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

- ◆ 城区 (city-block) 距离

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

- ◆ 棋盘 (chessboard) 距离

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



## 1.3 图像坐标变换

- ◆ 统一的矩阵表达形式
- ◆ 平移变换

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & x_0 \\ 0 & 1 & y_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

- ◆ 尺度（放缩）变换

$$S = \begin{bmatrix} S_x & 0 & 0 \\ 0 & S_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$



# 1.3 图像坐标变换

- ◆ 旋转变换

$$R = \begin{bmatrix} \cos \gamma & \sin \gamma & 0 \\ -\sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

- ◆ 级联

$$\mathbf{v}' = R[S(T\mathbf{v})] = A\mathbf{v}$$

- ◆ 例1.3.1



# 1.3 图像坐标变换

## ◆ 反变换

$$\mathbf{T}^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -x_0 \\ 0 & 1 & -y_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{S}^{-1} = \begin{bmatrix} 1/S_x & 0 & 0 \\ 0 & 1/S_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{R}^{-1} = \begin{bmatrix} \cos(-\gamma) & \sin(-\gamma) & 0 \\ -\sin(-\gamma) & \cos(-\gamma) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$



## 1.4 图像显示

- ◆ 半调输出

在两级灰度输出设备上输出灰度图像

例1.4.2

- ◆ 抖动技术

改善量化过粗图像的显示质量

例1.4.3



## 1.4 图像显示

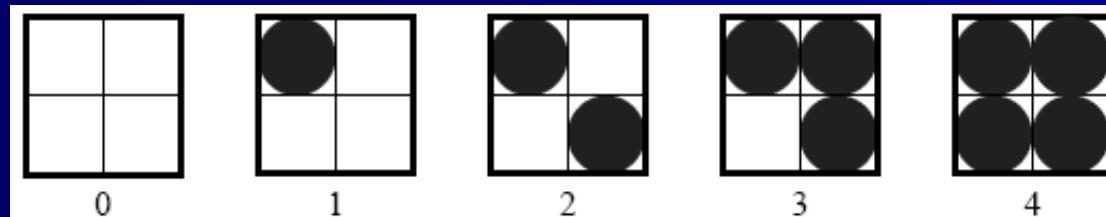


图 1.4.1 将一个区域分成  $2 \times 2$  个单元输出 5 种灰度

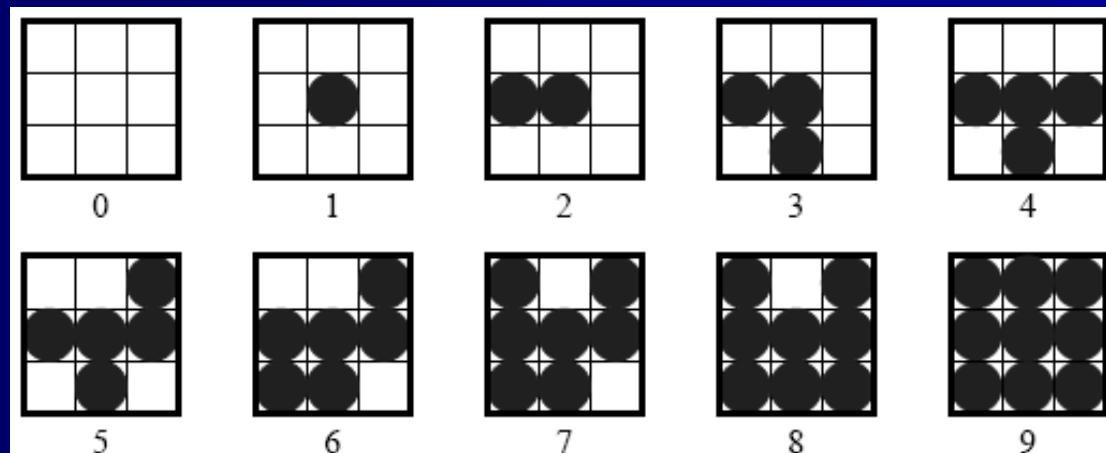


图 1.4.2 将一个区域分成  $3 \times 3$  个单元输出 10 种灰度



## 1.4 图像显示

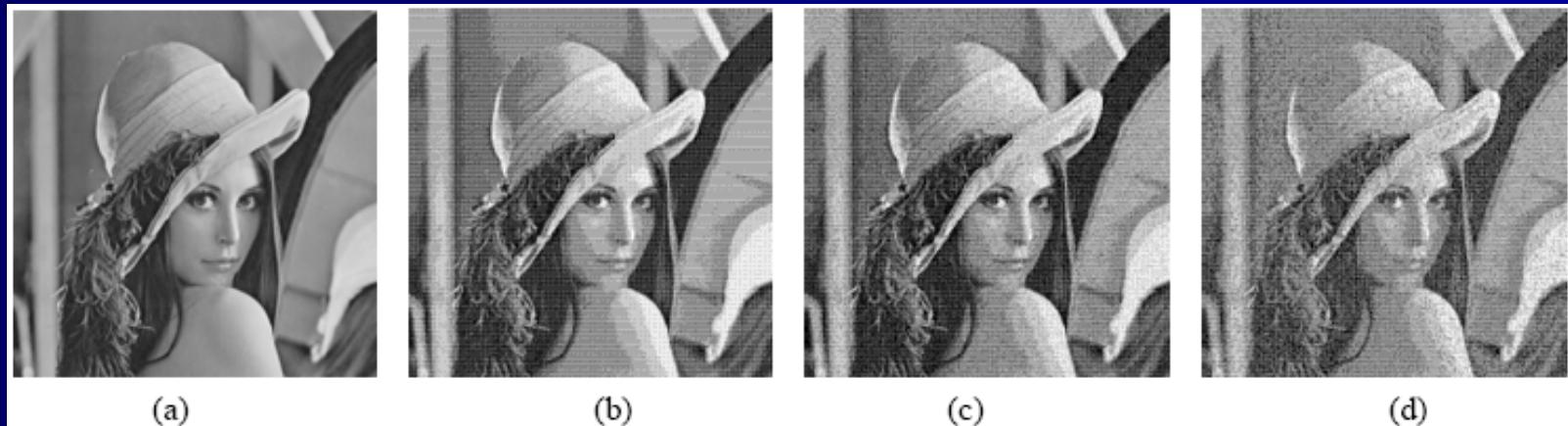


图 1.4.3 抖动实例图



# 1.5 采样和量化

## ◆ 图像数据量

$$f(x, y) = \begin{bmatrix} f(0,0) & f(0,1) & \cdots & f(0, M-1) \\ f(1,0) & f(1,1) & \cdots & f(1, M-1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f(N-1,0) & f(N-1,1) & \cdots & f(N-1, M-1) \end{bmatrix}$$

$$M = 2^m$$

$$N = 2^n$$

$$G = 2^k$$

$$b = N^2 k$$



# 1.5 采样和量化

- ◆ 图像质量与数据量

**例1.5.1** 图像空间分辨率变化所产生的效果

**例1.5.2** 图像幅度分辨率变化所产生的效果

**例1.5.3** 图像空间和幅度分辨率同时变化所产生的效果



# 1.5 采样和量化

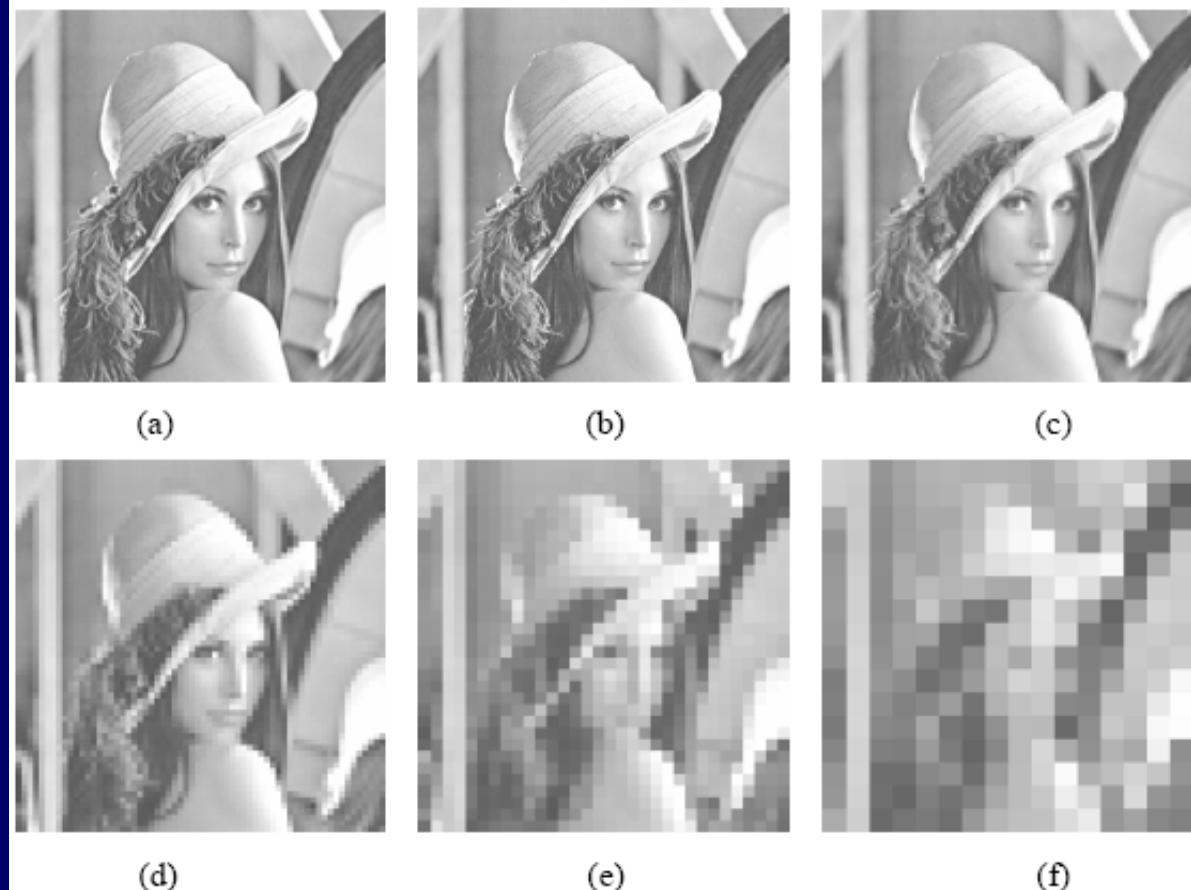


图 1.5.1 图像空间分辨率变化所产生的效果



# 1.5 采样和量化



图 1.5.2 图像幅度分辨率变化所产生的效果



# 1.5 采样和量化

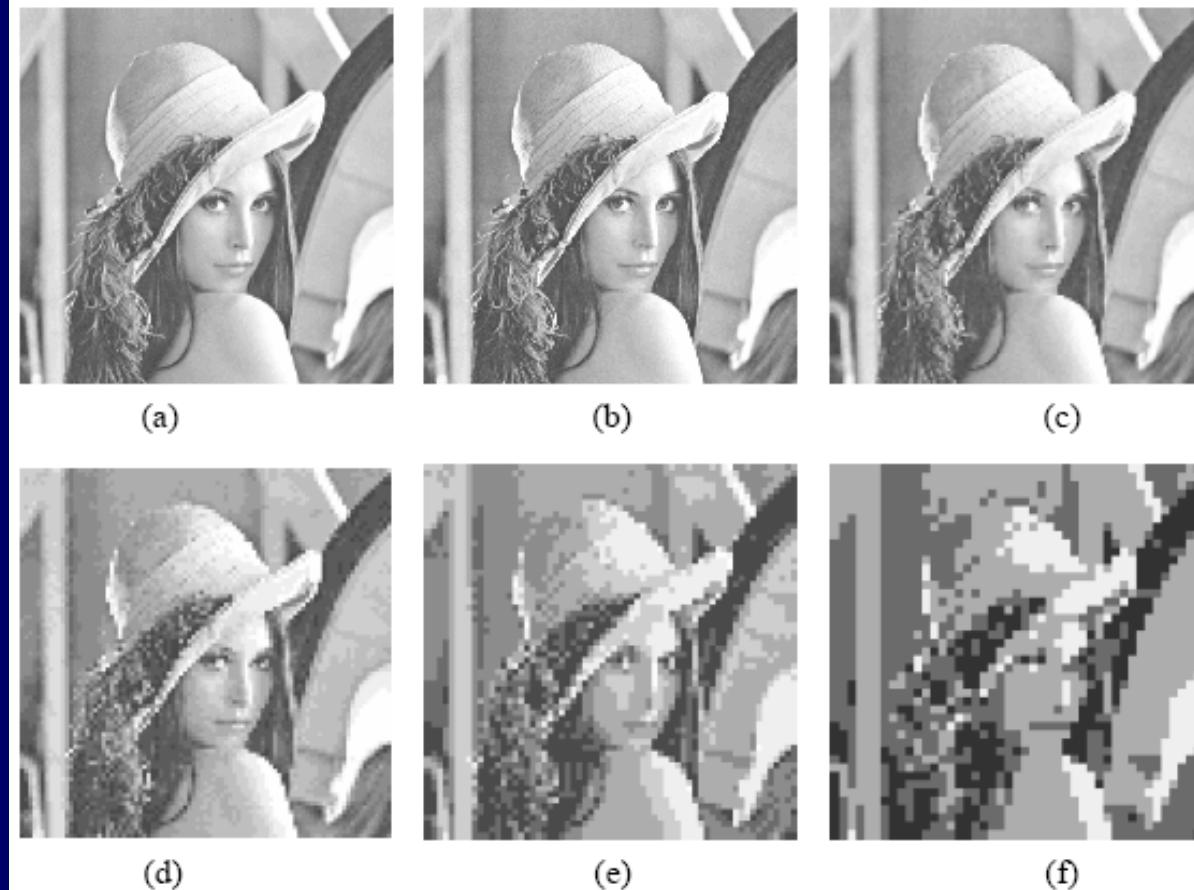


图 1.5.3 图像空间和幅度分辨率同时变化所产生的效果



# 1.6 图像存储与格式

- ◆ 图像存储器件
- ◆ 图像文件格式
  - (1) BMP (BitMaP) 格式
  - (2) GIF (Graphics Interchange Format) 格式
  - (3) TIFF (Tagged Image Format File) 格式
  - (4) JPEG (Joint Photographic Expert Group) 格式



# 1.7 图像技术及分类

- ◆ 图像工程

图1.7.1, 表1.7.1

图像处理, 图像分析, 图像理解

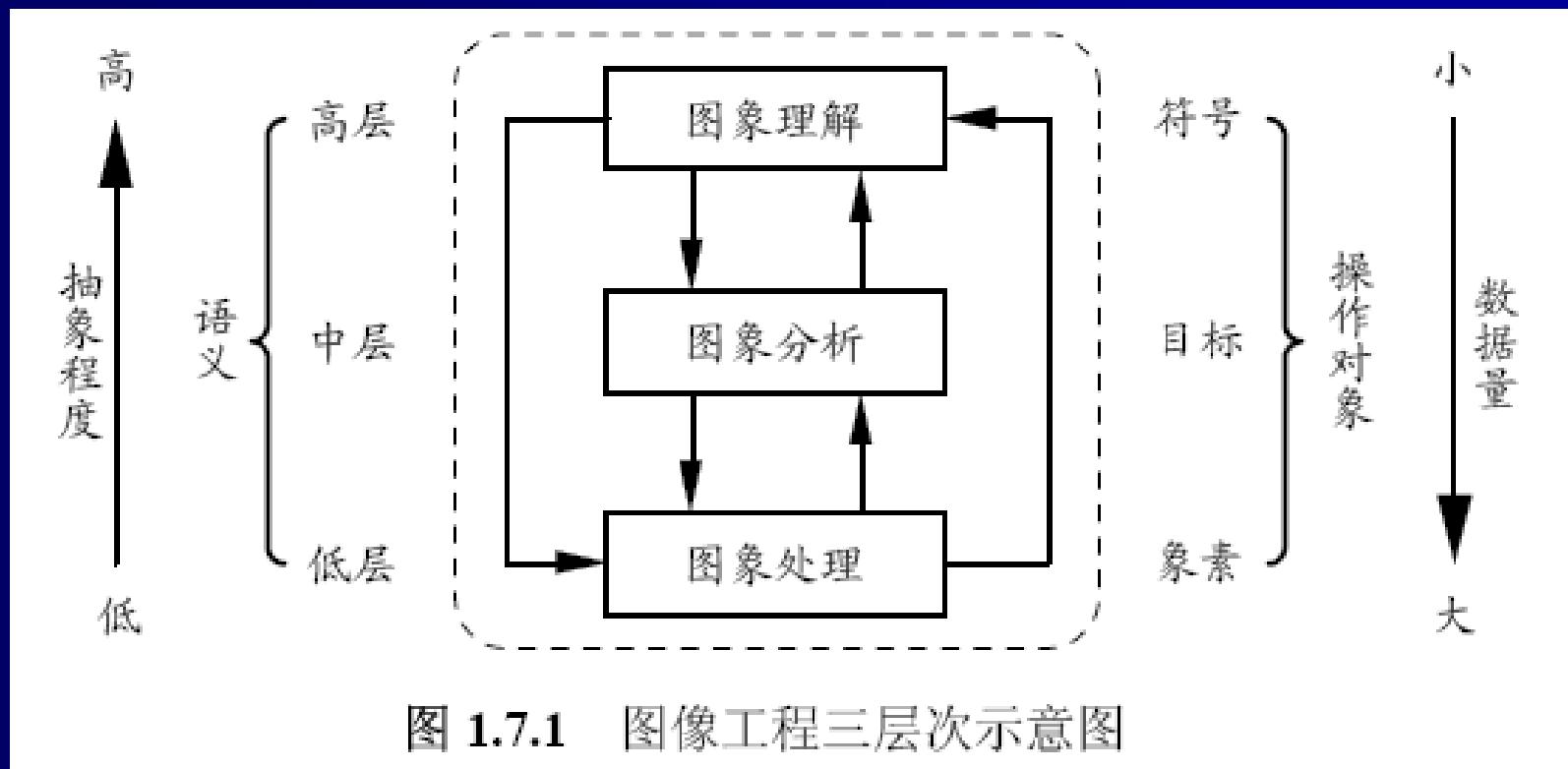
- ◆ 相关学科

计算机图形学, 模式识别, 计算机视觉

图1.7.2, 例1.7.2



# 1.7 图像技术及分类





# 1.7 图像技术及分类

表 1.7.1 当前图像处理、图像分析和图像理解三个层次中研究的图像技术

三个层次	图像技术分类和名称
图像处理	图像采集（包括各种成像方法、获取及存储、摄像机校正等）
	图像重建（从投影等重建图像）
	图像增强和恢复等（包括变换、滤波、复原、校正等）
	图像（视频）压缩编码（包括算法研究、国际标准实现等）
	图像数字水印和图像信息隐藏
图像分析	图像多分辨率处理（超分辨率重建、图像分解和插值、分辨率转换等）
	图像分割和边缘检测
	目标表达、描述、测量（包括二值图处理等）
	目标特性（颜色、形状、纹理、空间、运动等）的分析
图像理解	目标检测和识别（目标 2-D 定位、提取和分类等）
	人体生物特征提取和验证（包括人脸和器官的检测、定位与识别）
	图像匹配和融合等（包括序列、立体图的配准、镶嵌等）
	场景恢复（3-D 表达、建模、重构、重建等）
	图像感知和解释（包括语义描述、信息模型、专家系统，机器学习、推理等）
	基于内容的图像和视频检索
	时空技术（3-D 运动分析，姿态检测，对象跟踪，行为判断和理解）



# 1.7 图像技术及分类

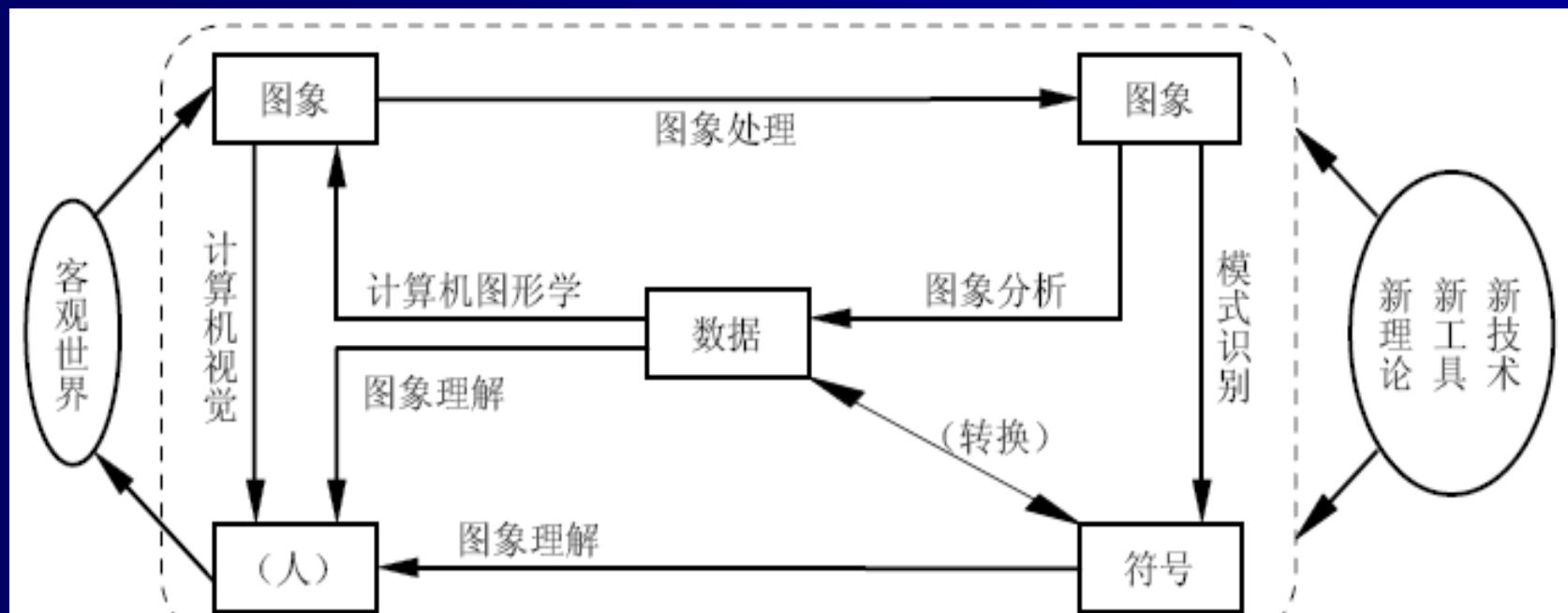


图 1.7.2 图像工程与相关学科和领域的联系和区别



# 本章要点

- 1.1节 有关图像和像素的基本概念
- 1.2节 像素邻域和像素间距离的概念
- 1.3节 基本的图像坐标变换公式
- 1.4节 图像显示设备和技术
- 1.5节 图像存储器和图像文件格式
- 1.6节 图像存储器和图像文件格式
- 1.7节 图像技术的三个层次：图像处理、图像分析和图像理解



# 作者联系信息

- 通信地址：北京清华大学电子工程系（100084）
- 办公地址：清华大学东主楼，9区307室
- 办公电话：(010) 62781430
- 传真号码：(010) 62770317
- 电子邮件：[zhangyj@ee.tsinghua.edu.cn](mailto:zhangyj@ee.tsinghua.edu.cn)
- 个人主页：



# 图像处理和分析技术

章毓晋

清华大学电子工程系 100084 北京



# 第2章 图像变换技术

2.1 傅里叶变换

2.2 傅里叶变换的性质

2.3 离散余弦变换

2.4 盖伯变换

2.5 小波变换基础

2.6 离散小波变换



## 2.1 傅里叶变换

### ◆ 1-D傅里叶变换

$$\mathcal{F}\{f(x)\} = F(u) = \frac{1}{N} \sum_{x=0}^{N-1} f(x) \exp[-j2\pi ux/N] \quad u = 0, 1, \dots, N-1$$

$$\mathcal{F}^{-1}\{F(u)\} = f(x) = \sum_{u=0}^{N-1} F(u) \exp[j2\pi ux/N] \quad x = 0, 1, \dots, N-1$$

$$F(u) = R(u) + j I(u)$$
$$F(u) = |F(u)| \exp[j\phi(u)]$$

$$|F(u)| = [R^2(u) + I^2(u)]^{1/2}$$
$$\phi(u) = \arctan[I(u)/R(u)]$$



## 2.1 傅里叶变换

### ◆ 2-D傅里叶变换

$$F(u, v) = \frac{1}{N} \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) \exp[-j2\pi(ux + vy)/N] \quad u, v = 0, 1, \dots, N-1$$

$$f(x, y) = \frac{1}{N} \sum_{u=0}^{N-1} \sum_{v=0}^{N-1} F(u, v) \exp[j2\pi(ux + vy)/N] \quad x, y = 0, 1, \dots, N-1$$

$$|F(u, v)| = [R^2(u, v) + I^2(u, v)]^{1/2}$$

$$\phi(u, v) = \arctan[I(u, v)/R(u, v)]$$

$$P(u, v) = |F(u, v)|^2 = R^2(u, v) + I^2(u, v)$$



## 2.1 傅里叶变换

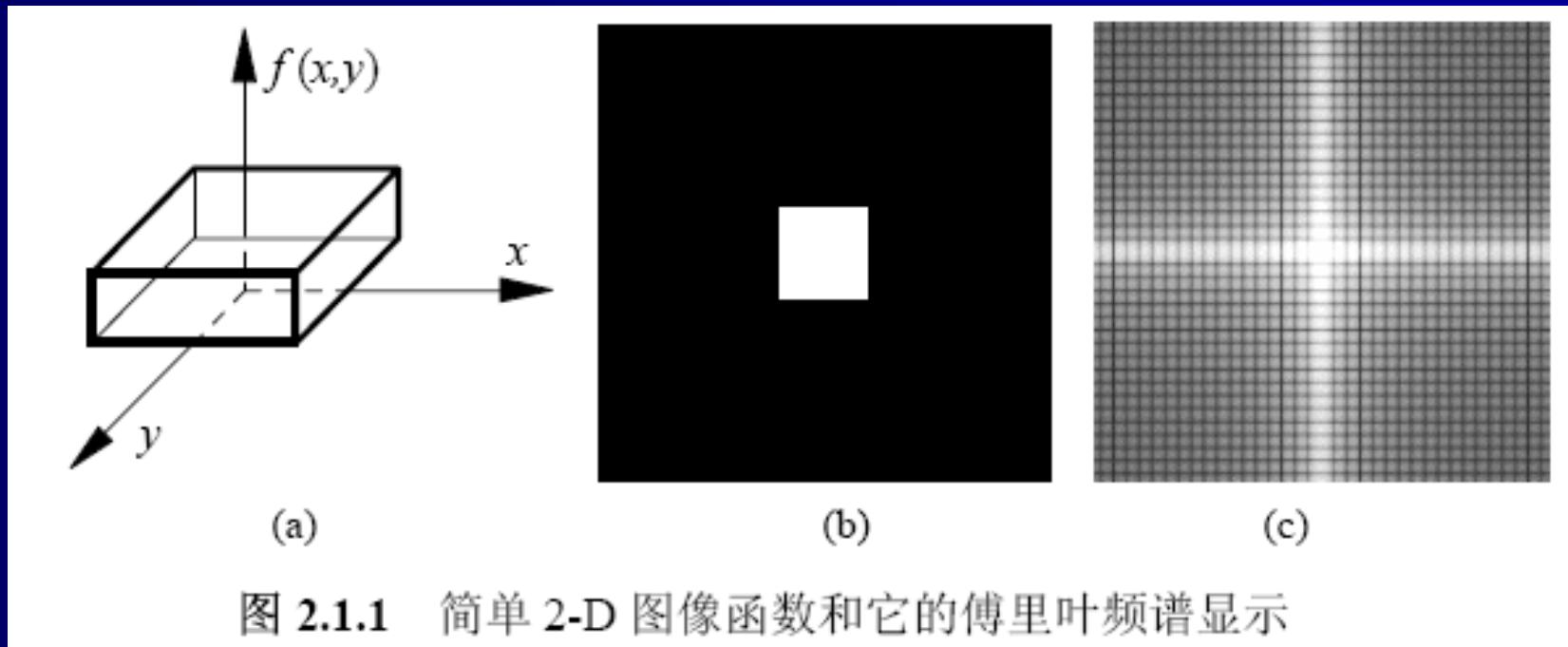


图 2.1.1 简单 2-D 图像函数和它的傅里叶频谱显示



## 2.2 傅里叶变换的性质

- ◆ 分离性
- ◆ 平移性质
- ◆ 周期性和共轭对称性
- ◆ 旋转性质
- ◆ 分配律
- ◆ 尺度变换（缩放）
- ◆ 平均值
- ◆ 卷积定理



## 2.2 傅里叶变换的性质

- ◆ 分离性

$$F(u, v) = \frac{1}{N} \sum_{x=0}^{N-1} \exp\left[-j2\pi ux\right] \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) \exp\left[-j2\pi vy\right]$$

$$f(x, y) = \frac{1}{N} \sum_{u=0}^{N-1} \exp\left[j2\pi ux\right] \sum_{v=0}^{N-1} F(u, v) \exp\left[j2\pi vy\right]$$

一个2-D傅里叶变换可由连续两次运用1-D傅里叶变换来实现



## 2.2 傅里叶变换的性质

- ◆ 分离性

$$F(x, v) = N \left[ \frac{1}{N} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) \exp[-j2\pi vy/N] \right]$$

$$F(u, v) = \frac{1}{N} \sum_{x=0}^{N-1} F(x, v) \exp[-j2\pi ux/N]$$

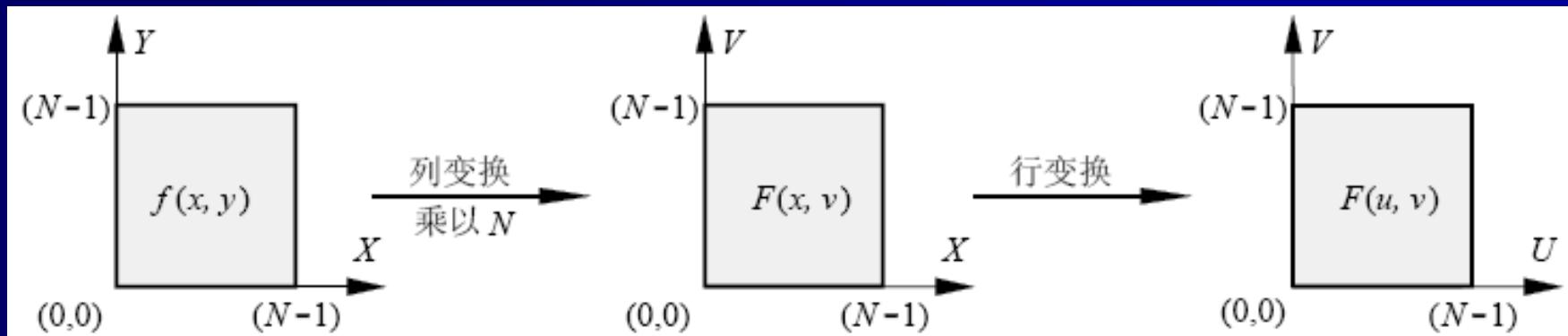


图 2.2.1 由 2 步 1-D 变换计算 2-D 变换



## 2.2 傅里叶变换的性质

- ◆ 平移性质

$$f(x, y) \exp[j2\pi(u_0x + v_0y)/N] \Leftrightarrow F(u - u_0, v - v_0)$$

$$f(x - x_0, y - y_0) \Leftrightarrow F(u, v) \exp[-j2\pi(ux_0 + vy_0)/N]$$

- ◆ 周期性和共轭对称性

$$F(u, v) = F(u + N, v) = F(u, v + N) = F(u + N, v + N)$$

$$F(u, v) = F^*(-u, -v)$$

$$|F(u, v)| = |F(-u, -v)|$$



## 2.2 傅里叶变换的性质

- ◆ 旋转性质  
借助极坐标变换

$$f(r, \theta + \theta_0) \Leftrightarrow F(w, \phi + \theta_0)$$

- ◆ 分配律

$$\begin{aligned} \mathcal{F}\{f_1(x, y) + f_2(x, y)\} &= \mathcal{F}\{f_1(x, y)\} + \mathcal{F}\{f_2(x, y)\} \\ \mathcal{F}\{f_1(x, y) \cdot f_2(x, y)\} &\neq \mathcal{F}\{f_1(x, y)\} \cdot \mathcal{F}\{f_2(x, y)\} \end{aligned}$$



## 2.2 傅里叶变换的性质

- ◆ 尺度变换（缩放）

$$af(x, y) \Leftrightarrow aF(u, v)$$

$$f(ax, by) \Leftrightarrow \frac{1}{|ab|} F\left(\frac{u}{a}, \frac{v}{b}\right)$$

- ◆ 平均值

$$\bar{f}(x, y) = \frac{1}{N^2} \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) \quad F(0, 0) = \frac{1}{N} \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y)$$

$$\bar{f}(x, y) = \frac{1}{N} F(0, 0)$$



## 2.2 傅里叶变换的性质

- ◆ 卷积定理

2个1-D函数的卷积

$$f(x) \otimes g(x) = \int_{-\infty}^{\infty} f(z)g(x-z)dz$$

卷积定理

$$\begin{aligned} f(x) \otimes g(x) &\Leftrightarrow F(u)G(u) \\ f(x)g(x) &\Leftrightarrow F(u) \otimes G(u) \end{aligned}$$



## 2.2 傅里叶变换的性质

### ◆ 卷积定理

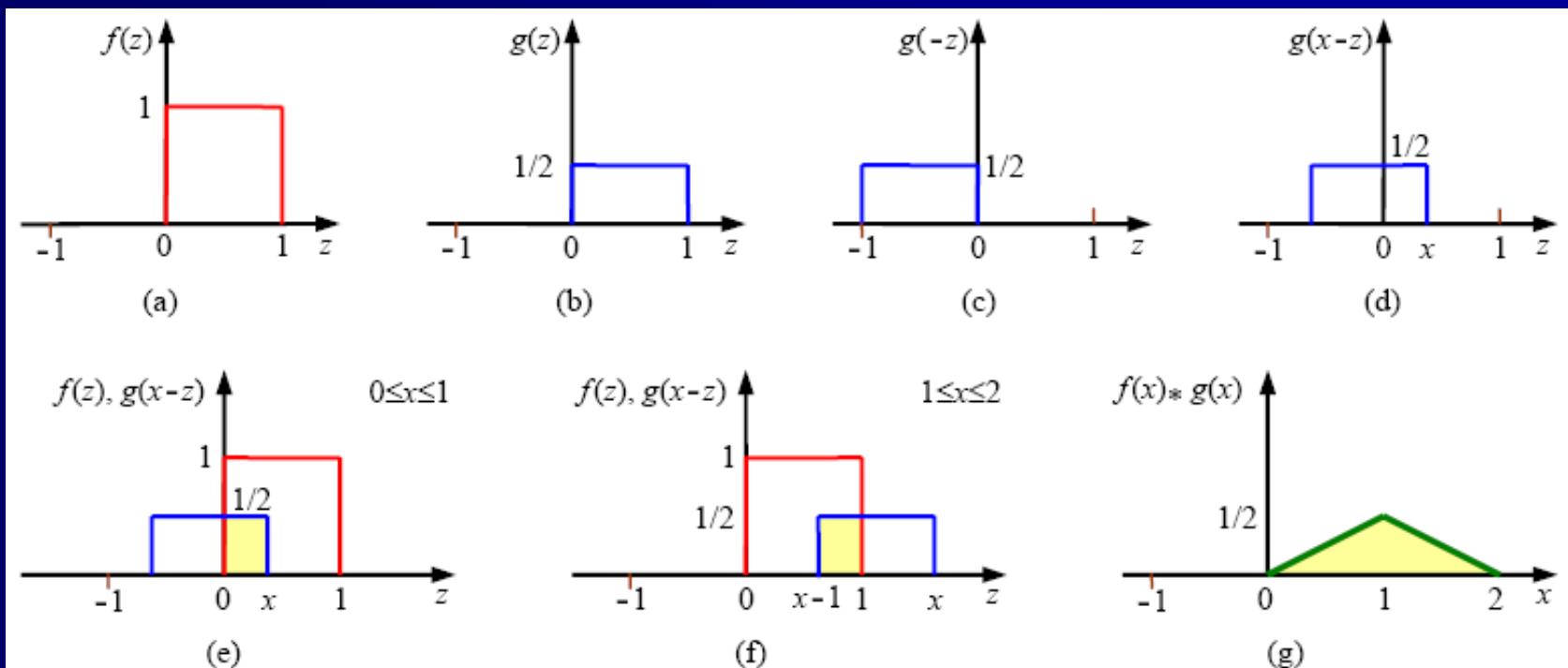


图 2.2.2 1-D 函数卷积示例



## 2.3 离散余弦变换

- ◆ 变换定义

$$C(u, v) = a(u)a(v) \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) \cos\left[\frac{(2x+1)u\pi}{2N}\right] \cos\left[\frac{(2y+1)v\pi}{2N}\right] \quad u, v = 0, 1, \dots, N-1$$

$$f(x, y) = \sum_{u=0}^{N-1} \sum_{v=0}^{N-1} a(u)a(v) C(u, v) \cos\left[\frac{(2x+1)u\pi}{2N}\right] \cos\left[\frac{(2y+1)v\pi}{2N}\right] \quad x, y = 0, 1, \dots, N-1$$

- ◆ 变换计算

$$C(u) = a(u) \{ \exp[-j\pi u/(2N)] F[g(x)] \} \quad u = 0, 1, \dots, N-1$$



## 2.3 离散余弦变换

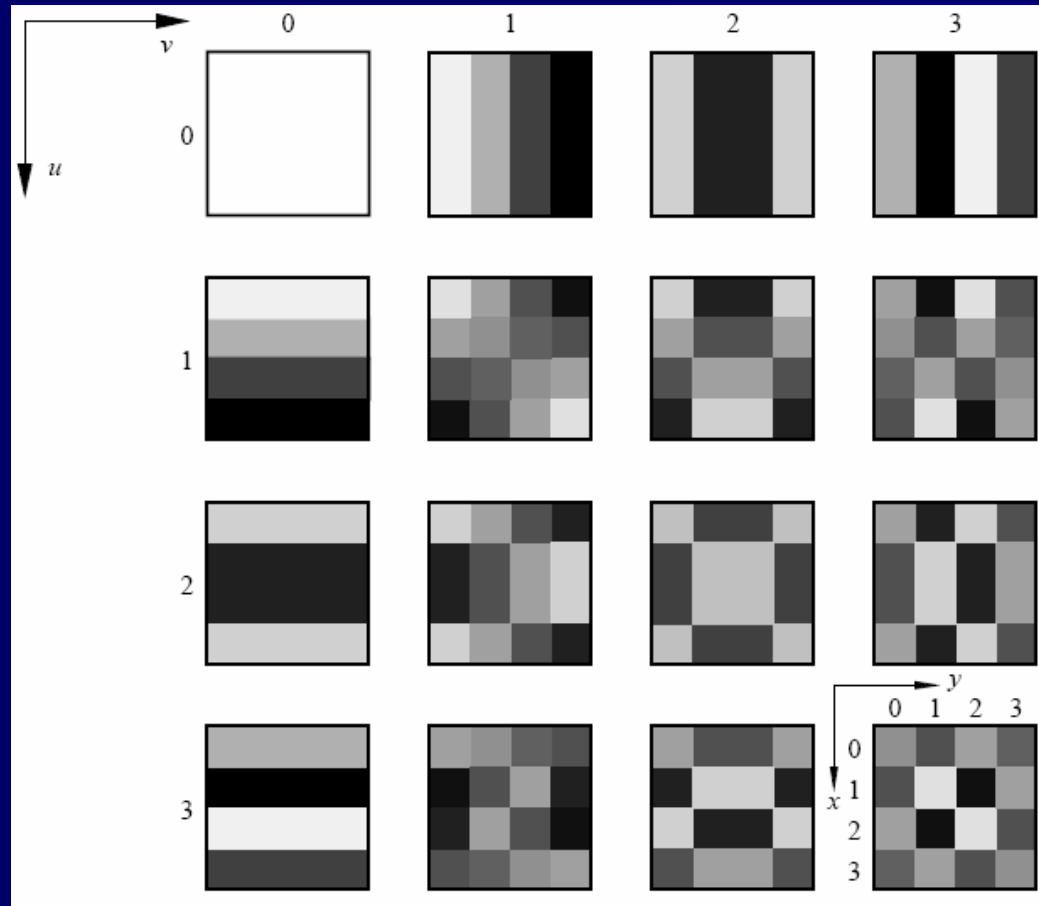
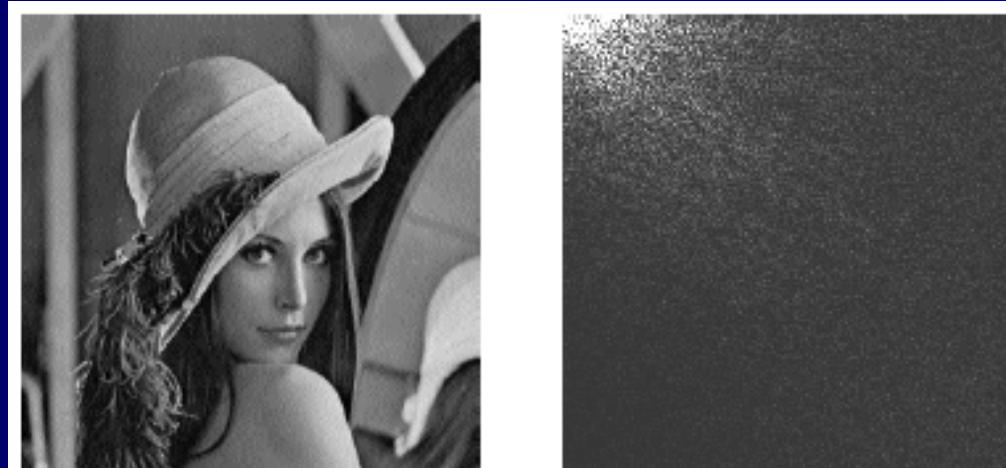


图 2.3.1  $N=4$  时的 DCT 基本函数的图示



## 2.3 离散余弦变换



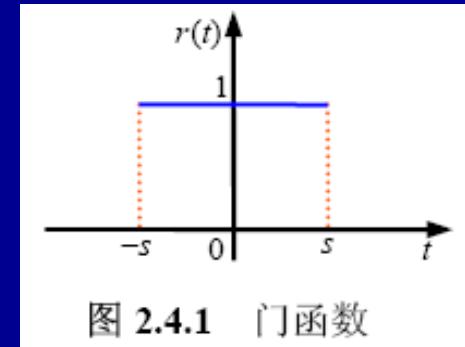
(a) (b)

图 2.3.2 离散余弦变换示例



## 2.4 盖伯变换

- ◆ 窗函数  
时域窗函数（图2.4.1）  
两个重要参数：中心和宽度
- ◆ 加窗傅里叶变换/短时傅里叶变换



$$G_r[f(b,v)] = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) r_{b,v}^*(t) dt$$

$$r_{b,v}(t) = r(t-b)e^{jvt}$$



## 2.4 盖伯变换

- ◆ 连续和离散盖伯变换  
用高斯函数作为窗函数

$$g(t) = \frac{1}{2\pi a} e^{-t^2/4a} \quad a > 0$$

$$G(w) = e^{-aw^2} \quad a > 0$$

- ◆ 不同时间-频率的盖伯变换窗尺寸相同  
(图2.4.2)



## 2.4 盖伯变换

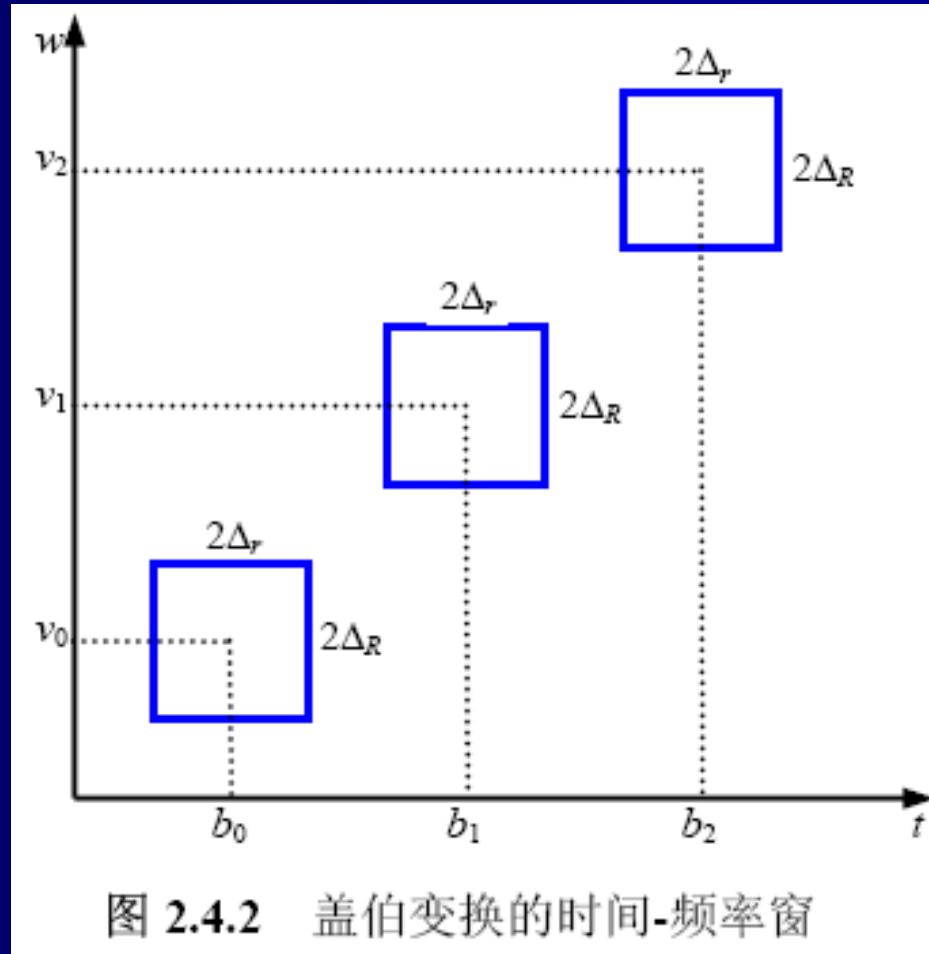


图 2.4.2 盖伯变换的时间-频率窗



## 2.5 小波变换基础

- ◆ 序列展开

$$f(x) = \sum_k a_k u_k(x)$$

$$a_k = \int u'_k(x) f(x) dx$$

- ◆ 缩放函数

$$u_{j,k}(x) = 2^{j/2} u(2^j x - k)$$

$$u(x) = \sum_k h_u(k) \sqrt{2} u(2x - k)$$



## 2.5 小波变换基础

- ◆ 小波函数

$$v_{j,k}(x) = 2^{j/2} v(2^j x - k)$$

$$f(x) = \sum_k a_k v_{j,k}(x)$$

- ◆ 缩放空间  $U_j$ ,  $U_{j+1}$  和小波空间  $V_j$  有如下关系

$$U_{j+1} = U_j \oplus V_j$$

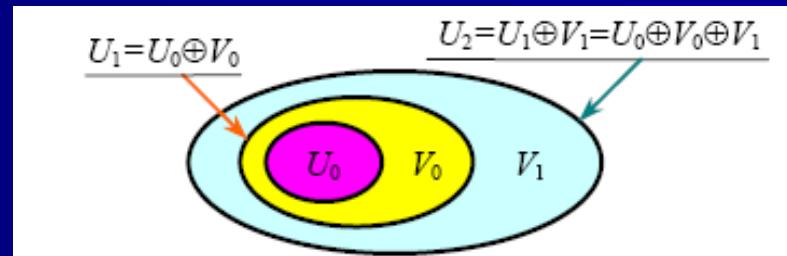


图 2.5.1 缩放空间和小波空间之间的联系



## 2.6 离散小波变换

### ◆ 1-D离散变换

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{M}} \sum_k W_u(0, k) u_{0,k}(x) + \frac{1}{\sqrt{M}} \sum_{j=0}^{\infty} \sum_k W_v(j, k) v_{j,k}(x)$$

$$W_u(0, k) = \frac{1}{\sqrt{M}} \sum_x f(x) u_{0,k}(x)$$

$$W_v(j, k) = \frac{1}{\sqrt{M}} \sum_x f(x) v_{j,k}(x)$$



## 2.6 离散小波变换

### ◆ 快速小波变换

$$W_v(j, k) = \sum_n h_v(n - 2k) W_u(j + 1, n)$$

$$W_u(j, k) = \sum_n h_u(n - 2k) W_u(j + 1, n)$$

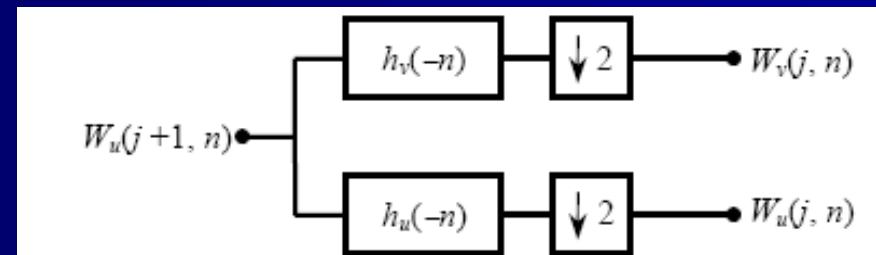


图 2.6.1 相邻尺度间离散小波变换系数的计算



## 2.6 离散小波变换

### ◆ 快速小波变换

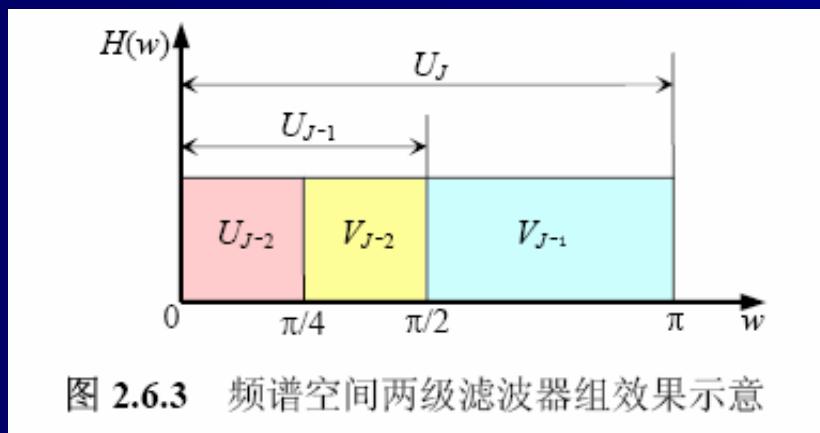


图 2.6.3 频谱空间两级滤波器组效果示意

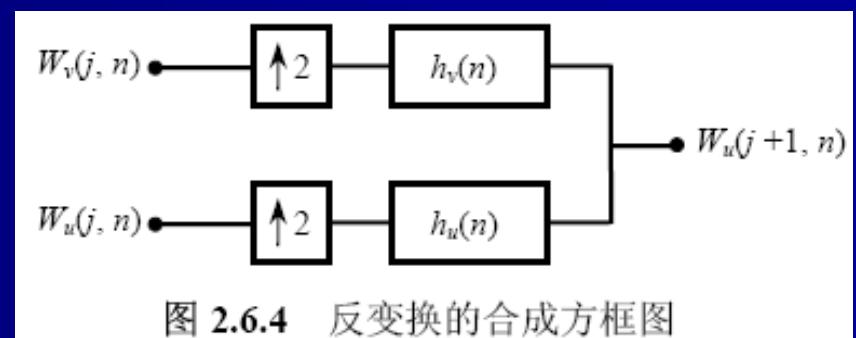


图 2.6.4 反变换的合成方框图



## 2.6 离散小波变换

### ◆ 2-D离散变换

需要一个2-D缩放函数 $u(x, y)$ 和三个2-D小波函数 $v^H(x, y)$ ,  $v^V(x, y)$ ,  $v^D(x, y)$  (其中上标H, V和D分别指示水平, 垂直和对角方向)

$$u(x, y) = u(x)u(y)$$

$$v^H(x, y) = v(x)u(y)$$

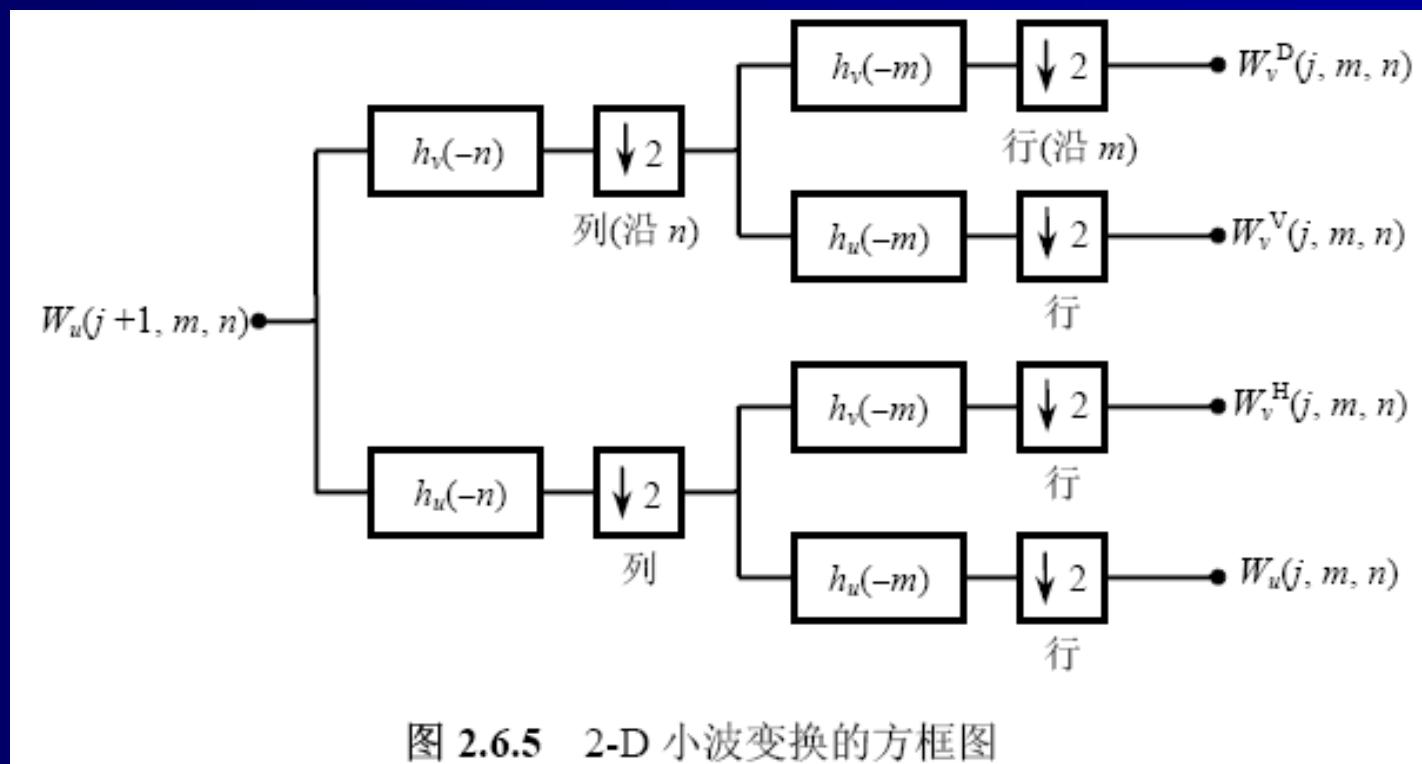
$$v^V(x, y) = u(x)v(y)$$

$$v^D(x, y) = v(x)v(y)$$



## 2.6 离散小波变换

### ◆ 2-D离散变换





## 2.6 离散小波变换

### ◆ 2-D离散变换

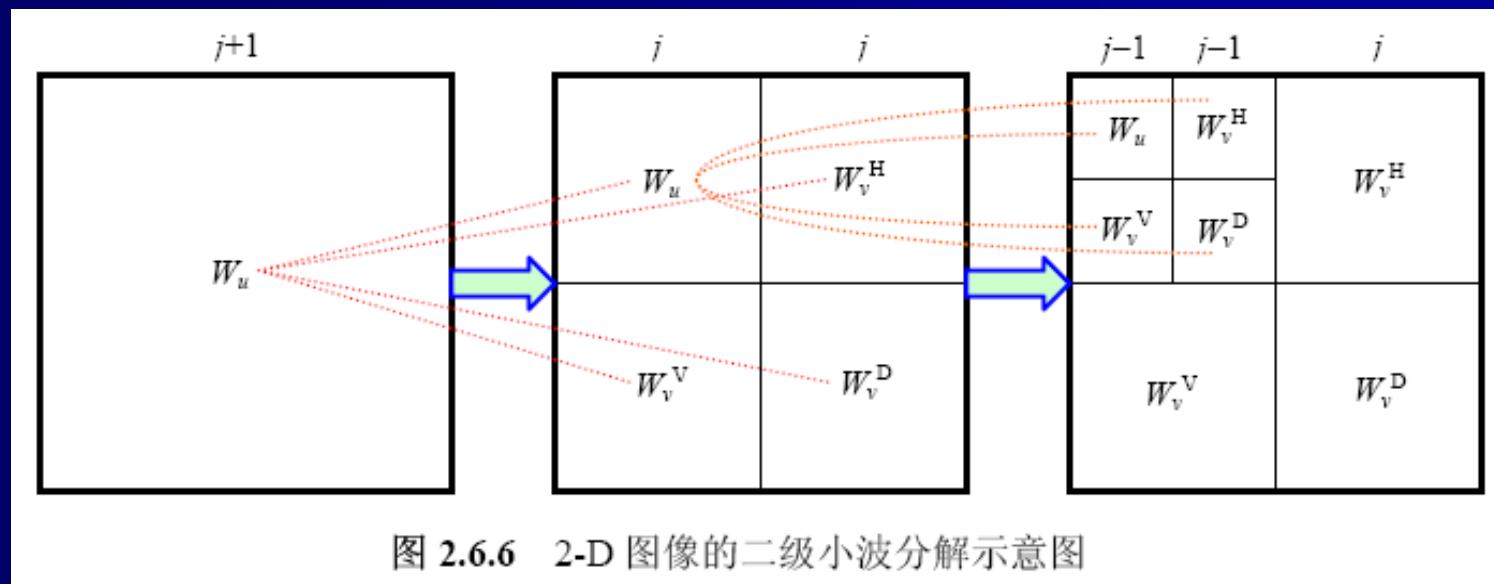


图 2.6.6 2-D 图像的二级小波分解示意图



# 本章要点

- 2.1节 傅里叶变换的定义和变换公式及频谱显示
- 2.2节 傅里叶变换的一些重要性质
- 2.3节 国际标准中得到广泛应用的离散余弦变换
- 2.4节 由傅里叶变换扩展出来的盖伯变换
- 2.5节 近年得到广泛重视的小波变换的基础知识
- 2.6节 离散小波变换的原理和快速小波变换的实现



# 作者联系信息

- 通信地址：北京清华大学电子工程系（100084）
- 办公地址：清华大学东主楼，9区307室
- 办公电话：(010) 62781430
- 传真号码：(010) 62770317
- 电子邮件：[zhangyj@ee.tsinghua.edu.cn](mailto:zhangyj@ee.tsinghua.edu.cn)
- 个人主页：



# 图像处理和分析技术

章毓晋

清华大学电子工程系 100084 北京



# 第3章 图像增强技术

- 3.1 图像灰度映射
- 3.2 直方图均衡化
- 3.3 直方图规定化
- 3.4 图像间算术和逻辑运算
- 3.5 空域卷积滤波
- 3.6 频域低通滤波
- 3.7 频域高通滤波



## 3.1 图像灰度映射

- ◆ 变换曲线：将 $(x, y)$ 处的灰度 $f$ 映射为 $g$
- ◆ 映射规则
  - 1. 图像求反  
将原图灰度值翻转
  - 2. 增强对比度  
增强原图各部分之间的反差
  - 3. 压缩动态范围  
对原图进行灰度压缩



## 3.1 图像灰度映射

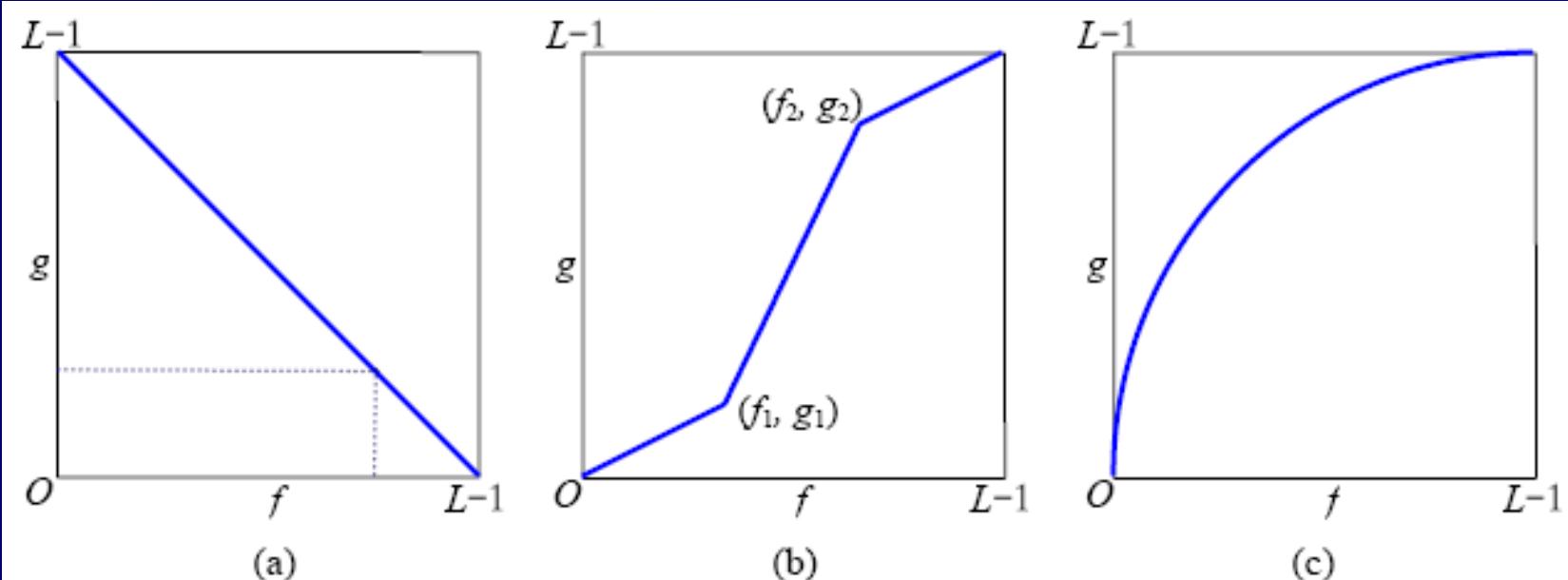


图 3.1.1 几种灰度映射的曲线



## 3.1 图像灰度映射

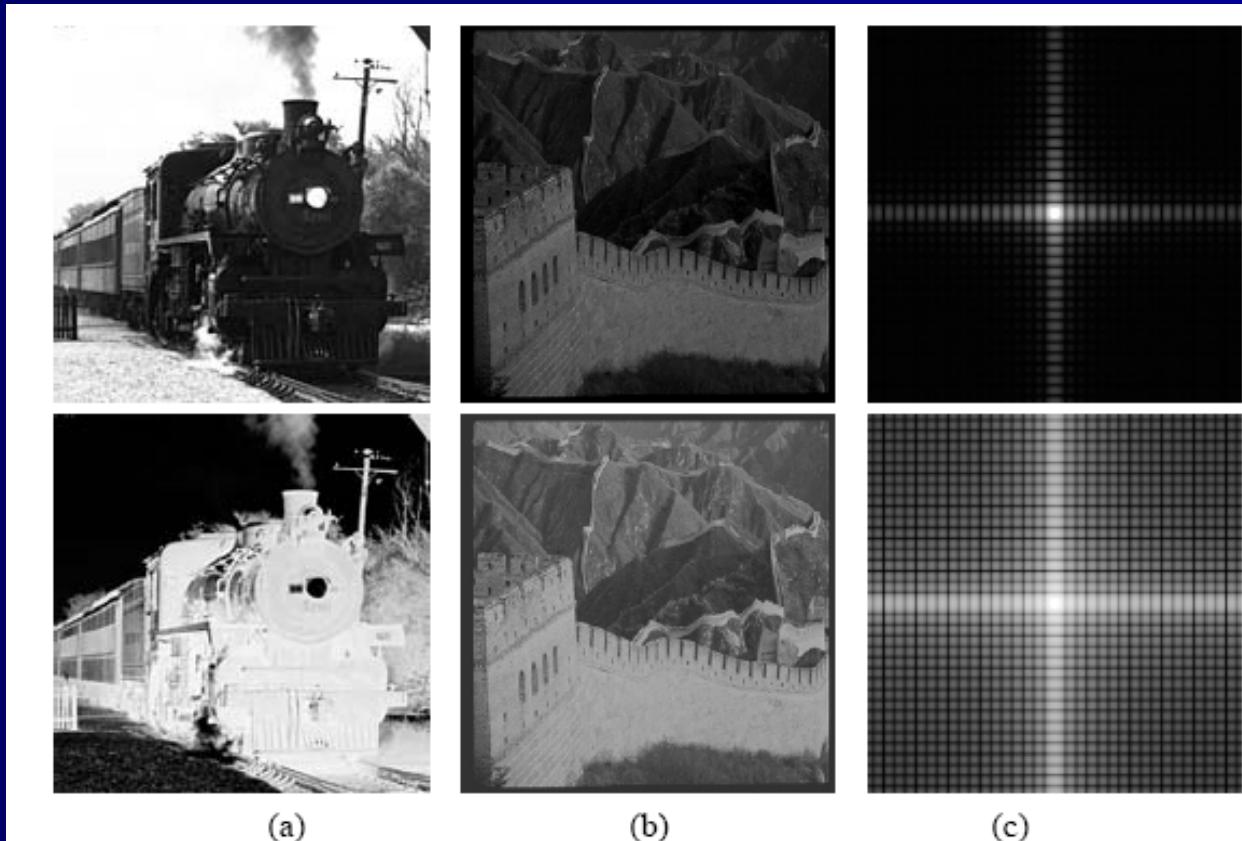


图 3.1.2 用直接灰度变换增强图像



## 3.2 直方图均衡化

- ◆ 统计直方图  
1个1-D的离散函数

$$p_f(f_k) = n_k / n \quad k = 0, 1, \dots, L-1$$

提供了原图的灰度值分布情况

- ◆ 例3.2.1  
不同类型图像和其直方图



## 3.2 直方图均衡化

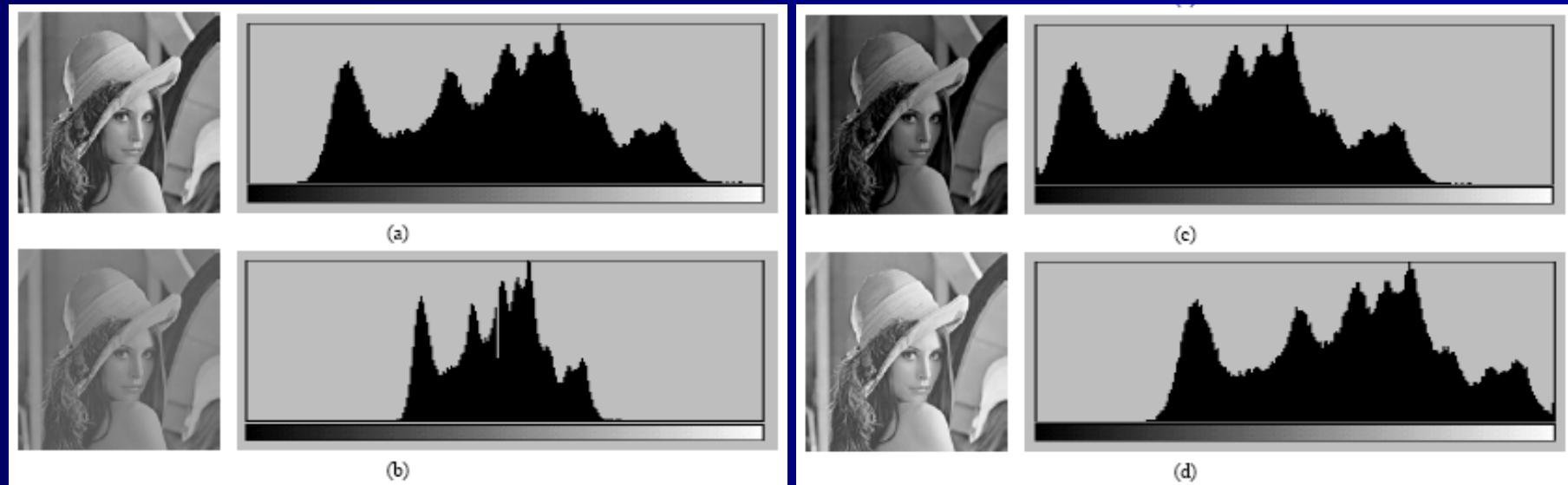


图 3.2.1 不同类型图像和其直方图示例



## 3.2 直方图均衡化

- ◆ 原理和步骤

增强函数需要满足2个条件：

- (1) 单值单增函数
  - (2) 保证变换前后灰度值动态范围一致性
- ◆ 累积直方图

$$g_k = \sum_{i=0}^k \frac{n_i}{n} = \sum_{i=0}^k p_f(f_i) \quad 0 \leq f_k \leq 1 \\ k = 0, 1, \dots, L-1$$



## 3.2 直方图均衡化

### ◆ 直方图均衡化计算

表 3.2.1 直方图均衡化计算列表

序号	运 算	步骤和结果							
		0	1	2	3	4	5	6	7
1	列出原始图灰度级 $f_k, k=0, 1, \dots, 7$	0	1	2	3	4	5	6	7
2	列出原始直方图	0.02	0.05	0.09	0.12	0.14	0.2	0.22	0.16
3	用式(3.2.2)计算原始累积直方图	0.02	0.07	0.16	0.28	0.42	0.62	0.84	1.00
4	取整 $g_k = \text{int}[(L-1)f_k+0.5]$	0	0	1	2	3	4	6	7
5	确定映射对应关系 ( $f_k \rightarrow g_k$ )	0, 1 → 0		2 → 1	3 → 2	4 → 3	5 → 4	6 → 6	7 → 7
6	计算新直方图	0.07	0.09	0.12	0.14	0.2	0	0.22	0.16



## 3.2 直方图均衡化

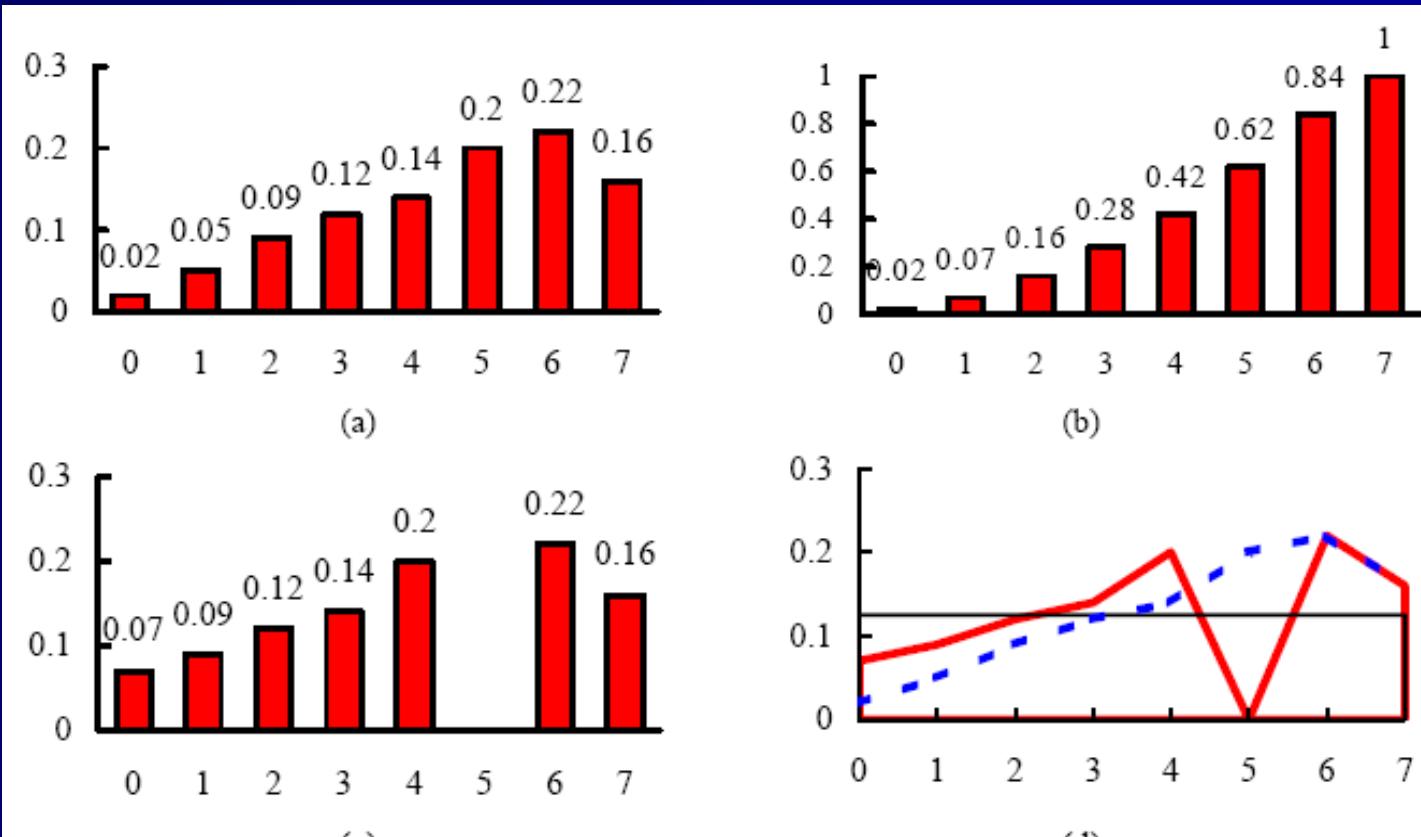


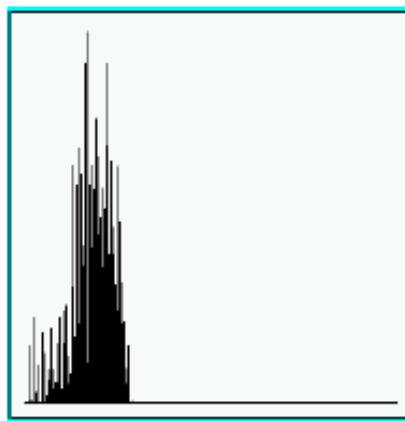
图 3.2.2 直方图均衡化



## 3.2 直方图均衡化



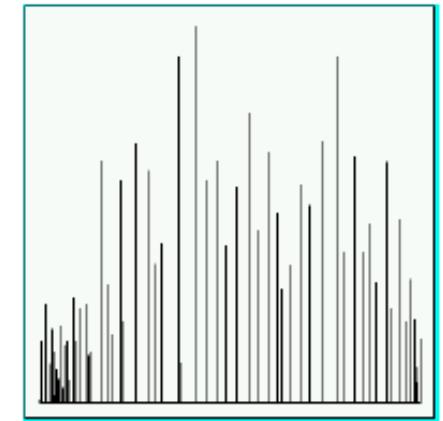
(a)



(b)



(c)



(d)

图 3.2.3 直方图均衡化实例



## 3.3 直方图规定化

将原始图直方图转换为期望直方图

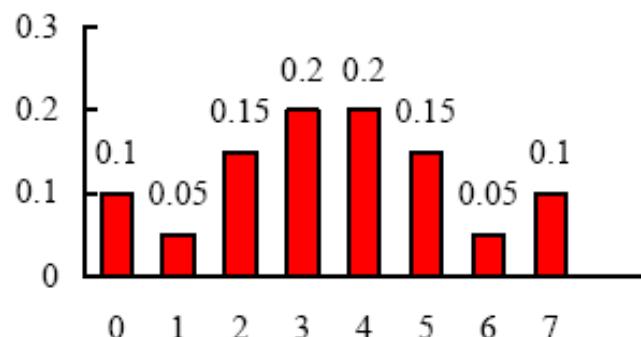
- ◆ 原理和步骤

1. 对原始图的直方图进行灰度均衡化
2. 计算能使规定的直方图均衡化的变换
3. 将原始直方图对应映射到规定直方图

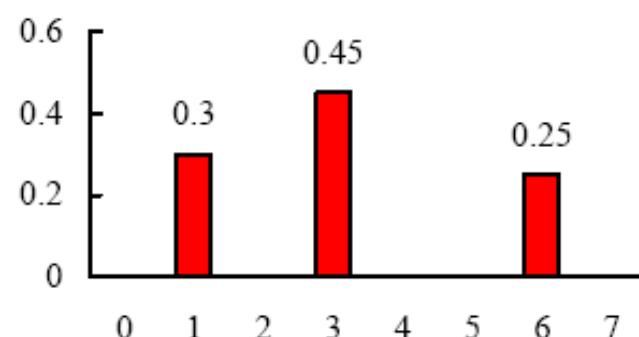
### 例3.3.1 直方图规定化效果示例



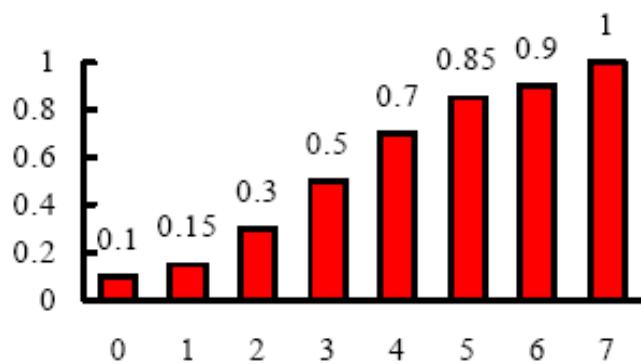
### 3.3 直方图规定化



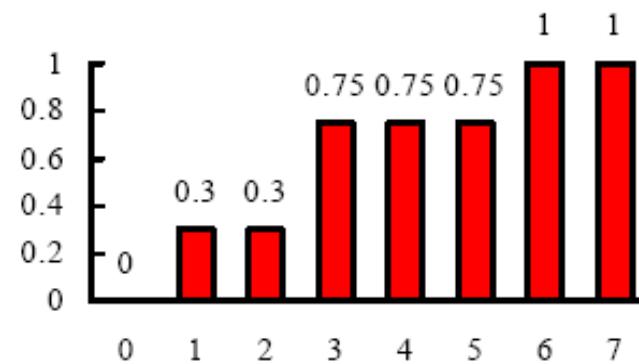
(a)



(b)



(c)



(d)

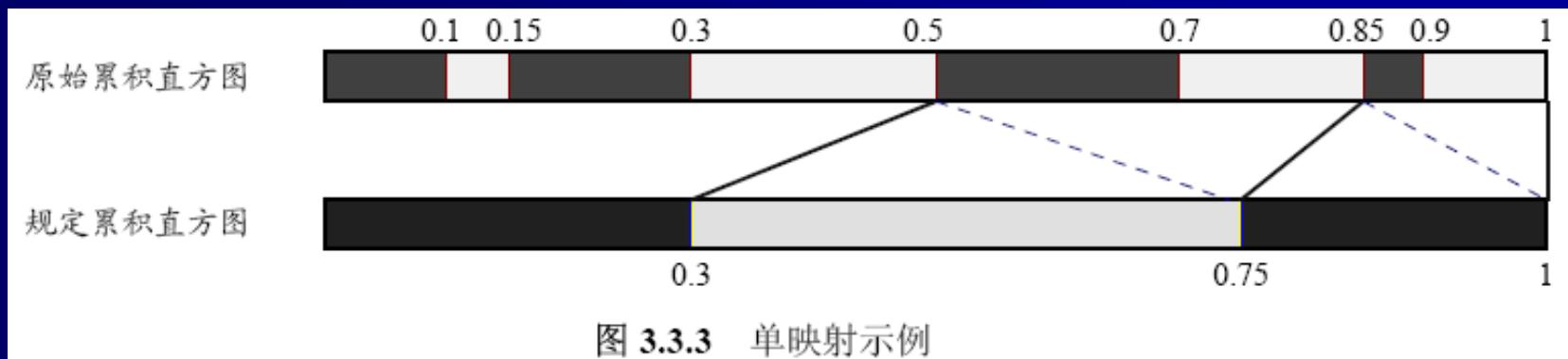
图 3.3.1 直方图规定化



## 3.3 直方图规定化

### ◆ 单映射规则

$$\left| \sum_{i=0}^k p_f(f_i) - \sum_{j=0}^l p_u(u_j) \right| \quad k = 0, 1, \dots, M-1 \\ l = 0, 1, \dots, N-1$$

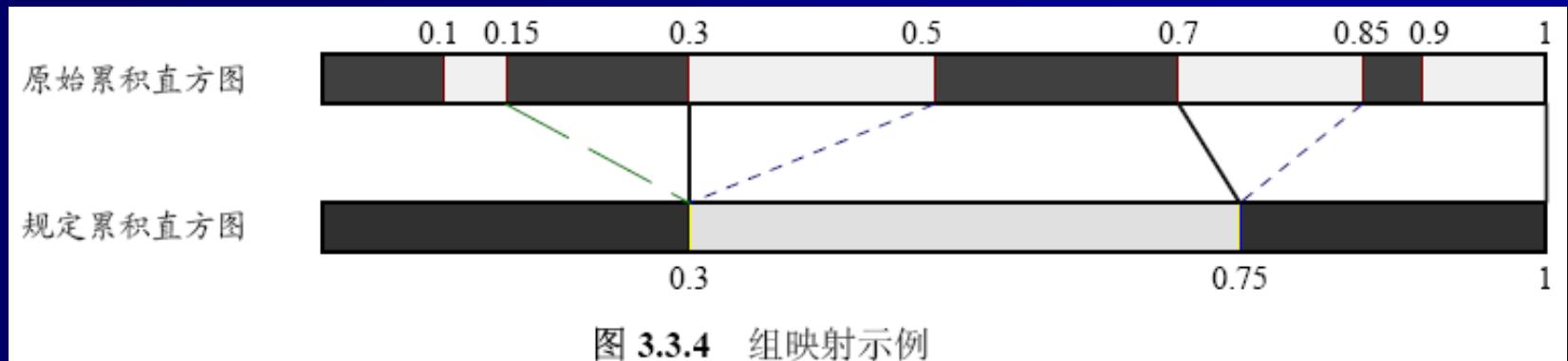




## 3.3 直方图规定化

### ◆ 多映射规则

$$\left| \sum_{i=0}^{I(l)} p_f(f_i) - \sum_{j=0}^l p_u(u_j) \right| \quad l = 0, 1, \dots, N-1$$





## 3.4 图像间算术和逻辑运算

### ◆ 算术运算

一般用于灰度图像

- (1) 加法: 记为  $p + q$
- (2) 减法: 记为  $p - q$
- (3) 乘法: 记为  $p \times q$   
(也可写为  $pq$  和  $p * q$ )
- (4) 除法: 记为  $p / q$



## 3.4 图像间算术和逻辑运算

### ◆ 逻辑运算

一般用于二值图像

- (1) 与 (AND) 运算: 记为  $p \text{ AND } q$   
(也可写为  $p \cdot q$ )
- (2) 或 (OR) 运算: 记为  $p \text{ OR } q$   
(也可写为  $p + q$ )
- (3) 补 (COMPLEMENT) 运算:  
记为  $\text{NOT } q$  (也可写为)



## 3.4 图像间算术和逻辑运算

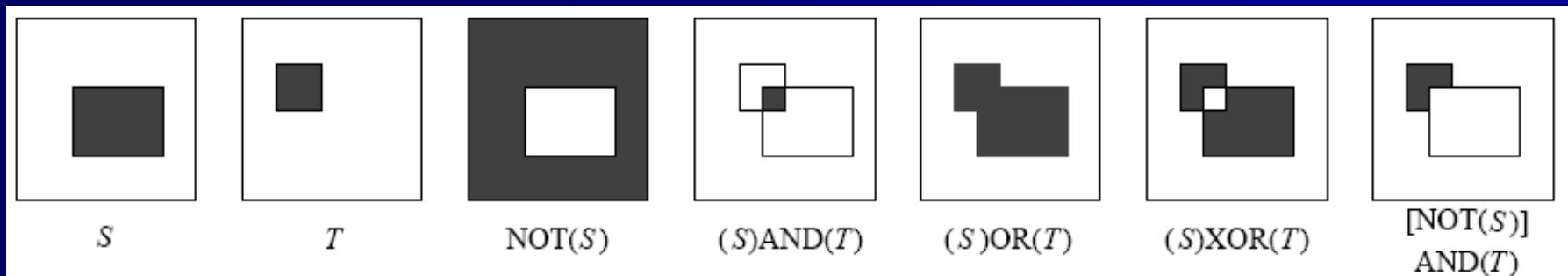


图 3.4.3 二值图像的逻辑运算



## 3.4 图像间算术和逻辑运算

### ◆ 邻域运算

算术和逻辑运算也可用于邻域运算

### 模板运算

$$z = \frac{1}{9}(z_1 + z_2 + \dots + z_9) = \frac{1}{9} \sum_{i=1}^9 z_i$$

图3.4.4

$$z = w_1 z_1 + w_2 z_2 + \dots + w_9 z_9 = \sum_{i=1}^9 w_i z_i$$



## 3.5 空域卷积滤波

- ◆ 在图像空间借助模板进行卷积操作

表 3.5.1 空域卷积滤波增强方法分类

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

平滑的目的可分为两种：

- (1) 模糊：目的是在提取较大的目标前去除太小的细节或将目标内的小间断连接起来
- (2) 消除噪声



## 3.5 空域卷积滤波

### ◆ 模板卷积主要步骤

- (1) 将模板在图中漫游，并将模板中心与图中某个像素位置重合
- (2) 将模板上系数与模板下对应像素相乘
- (3) 将所有乘积相加
- (4) 将和（模板的输出响应）赋给图中对应模板中心位置的像素



## 3.5 空域卷积滤波

- ◆ 线性平滑滤波

模板的所有系数都是正的

邻域平均：所有系数都为1

- ◆ 非线性平滑滤波

- 中值滤波器

既消除噪声又保持图像的细节

可以消除孤立的噪声点



## 3.5 空域卷积滤波

### ◆ 中值滤波器工作步骤

- (1) 将模板在图中漫游，并将模板中心与图中某个像素位置重合
- (2) 读取模板下各对应像素的灰度值
- (3) 将这些灰度值从小到大排成1列
- (4) 找出这些值里排在中间的1个
- (5) 将这个中间值赋给对应模板中心位置的像素



## 3.5 空域卷积滤波



图 3.5.4 邻域平均和中值滤波的比较



## 3.5 空域卷积滤波

- ◆ 线性锐化滤波
  - 中心系数应为正而周围系数应为负
- ◆ 高频提升滤波器
  - 把原始图乘以1个放大系数 $A$ 再减去平滑图

$$H_b(x,y) = A \times f(x,y) - L(x,y) = (A-1) \times f(x,y) + H(x,y)$$

例3.5.4 线性锐化滤波与高频提升滤波比较



## 3.5 空域卷积滤波



图 3.5.5 线性锐化滤波与高频提升滤波比较



## 3.5 空域卷积滤波

### ◆ 非线性锐化滤波

梯度是1个矢量由（用2个模板）分别沿x和y方向计算微分的结果构成

$$\nabla f = \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial x} & \frac{\partial f}{\partial y} \end{bmatrix}^T$$

$$|\nabla f_{(2)}| = \text{mag}(\nabla f) = \left[ \left( \frac{\partial f}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial f}{\partial y} \right)^2 \right]^{1/2}$$

$$|\nabla f_{(1)}| = \left| \frac{\partial f}{\partial x} \right| + \left| \frac{\partial f}{\partial y} \right|$$

$$|\nabla f_{(\infty)}| = \max \left\{ \left| \frac{\partial f}{\partial x} \right|, \left| \frac{\partial f}{\partial y} \right| \right\}$$



## 3.6 频域低通滤波

- 卷积理论是频域技术的基础

$$G(u, v) = H(u, v)F(u, v)$$

$$g(x, y) = \mathcal{F}^{-1}[H(u, v)F(u, v)]$$

- 频率域中增强的主要步骤
  - (1) 计算需增强图的傅里叶变换
  - (2) 将其与1个（根据需要设计的）转移函数相乘
  - (3) 再将结果傅里叶反变换以得到增强的图



## 3.6 频域低通滤波

- ◆ 理想低通滤波器

$$H(u, v) = \begin{cases} 1 & \text{如 } D(u, v) \leq D_0 \\ 0 & \text{如 } D(u, v) > D_0 \end{cases}$$

- ◆ 巴特沃斯低通滤波器

$$H(u, v) = \frac{1}{1 + [D(u, v) / D_0]^{2n}}$$

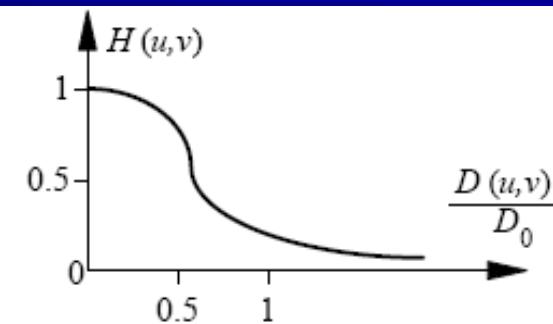


图 3.6.4 巴特沃斯低通滤波器转移函数的剖面示意图



## 3.7 频域高通滤波

- ◆ 理想高通滤波器

$$H(u,v) = \begin{cases} 0 & \text{如 } D(u,v) \leq D_0 \\ 1 & \text{如 } D(u,v) > D_0 \end{cases}$$

- ◆ 巴特沃斯高通滤波器

$$H(u,v) = \frac{1}{1 + [D_0/D(u,v)]^{2n}}$$

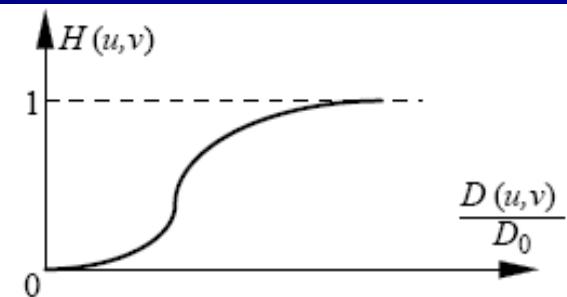


图 3.7.2 巴特沃斯高通滤波器转移函数的剖面图



# 本章要点

- 3.1节 图像增强的基本概念和利用灰度映射进行增强的方法
- 3.2节 图像直方图的计算和利用累积直方图进行增强的方法
- 3.3节 直方图规定化技术的原理和利用组映射规则进行增强的优点
- 3.4节 在图像间可进行的一些算术运算和逻辑运算
- 3.5节 空域卷积滤波的原理和模板卷积的方法
- 3.6节 频域滤波的原理和频域低通滤波的方式方法
- 3.7节 频域高通滤波的方式方法



# 作者联系信息

- 通信地址：北京清华大学电子工程系（100084）
- 办公地址：清华大学东主楼，9区307室
- 办公电话：(010) 62781430
- 传真号码：(010) 62770317
- 电子邮件：[zhangyj@ee.tsinghua.edu.cn](mailto:zhangyj@ee.tsinghua.edu.cn)
- 个人主页：



# 图像处理和分析技术

章毓晋

清华大学电子工程系 100084 北京



# 第4章 图像恢复技术

- 4.1 图像退化及模型
- 4.2 噪声及其描述
- 4.3 空域噪声滤波器
- 4.4 组合滤波器
- 4.5 频域周期噪声滤波器
- 4.6 逆滤波
- 4.7 维纳滤波



## 4.1 图像退化及模型

- ◆ 图像恢复：图像处理中的一大类技术  
认为图像质量是在某种情况/条件下退化或恶化了，需要根据相应的退化模型和知识重建或恢复原始的图像
- ◆ 图像退化：由场景得到的图像没能完全地反映场景的真实内容，产生了失真等问题
- ◆ 模糊：在图像采集过程中产生的退化
- ◆ 噪声：在图像记录过程中产生的退化



## 4.1 图像退化及模型

### ◆ 图像退化模型

图像退化过程被模型化为一个作用在输入图像  $f(x, y)$  上的系统  $H$ 。它与一个加性随机噪声  $n(x, y)$  的联合作用导致产生退化图像  $g(x, y)$

$$g(x, y) = H[f(x, y)] + n(x, y)$$

根据这个模型恢复图像就是要在给定  $g(x, y)$  和代表退化的  $H$  的基础上得到对  $f(x, y)$  的某个近似的过程。这里假设已知  $n(x, y)$  的统计特性



## 4.1 图像退化及模型

- ◆ 图像退化模型性质

(1) 线性:

$$H[k_1f_1(x, y) + k_2f_2(x, y)] = k_1H[f_1(x, y)] + k_2H[f_2(x, y)]$$

(2) 相加性:

$$H[f_1(x, y) + f_2(x, y)] = H[f_1(x, y)] + H[f_2(x, y)]$$

(3) 一致性:  $H[k_1f_1(x, y)] = k_1H[f_1(x, y)]$

(4) 位置 (空间) 不变性:

$$H[f(x - a, y - b)] = g(x - a, y - b)$$



## 4.1 图像退化及模型

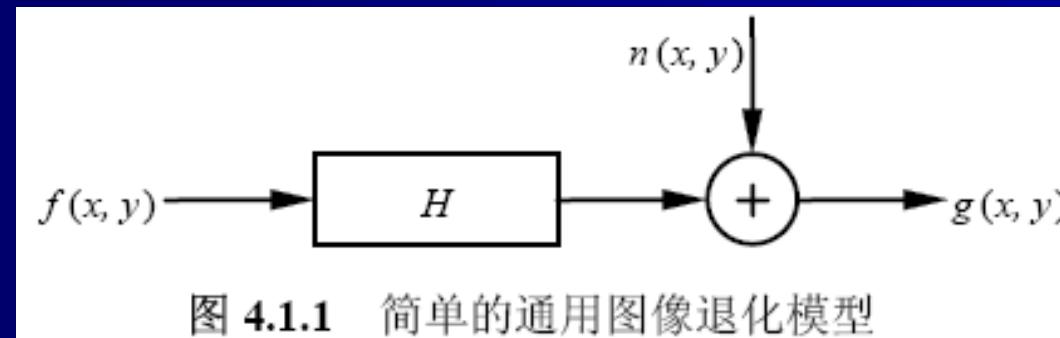


图 4.1.1 简单的通用图像退化模型

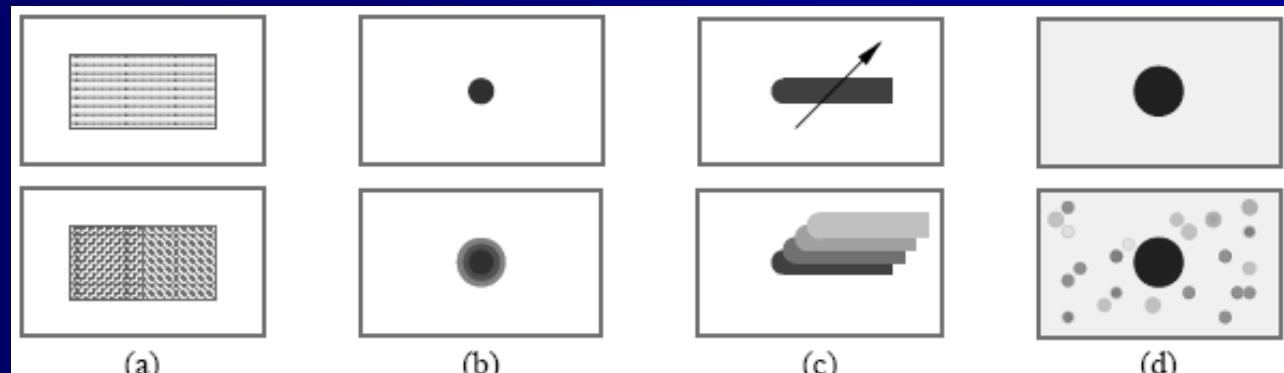


图 4.1.2 四种常见的具体退化模型



## 4.2 噪声及其描述

最常见的图像退化因素之一

- ◆ 噪声示例：

- (1) 热噪声
- (2) 闪烁噪声
- (3) 发射噪声
- (4) 有色噪声



## 4.2 噪声及其描述

### ◆ 噪声概率密度函数

噪声本身的灰度可看作随机变量，其分布可用概率密度函数（PDF）来刻画

(1) 高斯噪声

$$p(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(z-\mu)^2}{2\sigma^2}\right]$$

(2) 均匀噪声

$$p(z) = \begin{cases} 1/(b-a) & \text{如果 } a \leq z \leq b \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

(3) 脉冲（椒盐）噪声

$$p(z) = \begin{cases} P_a & \text{如果 } z = a \\ P_b & \text{如果 } z = b \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$



## 4.3 空域噪声滤波器

- ◆ 均值滤波器

- (1) 算术均值滤波器

$$\hat{f}(x, y) = \frac{1}{mn} \sum_{(p, q) \in W} g(p, q)$$

- (2) 几何均值滤波器

$$\hat{f}(x, y) = \left[ \prod_{(p, q) \in W} g(p, q) \right]^{\frac{1}{mn}}$$



## 4.3 空域噪声滤波器

- ◆ 均值滤波器

### (3) 谐波均值滤波器

$$\hat{f}(x, y) = \frac{mn}{\sum_{(p,q) \in W} \frac{1}{g(p, q)}}$$

### (4) 逆谐波均值滤波器

$$\hat{f}(x, y) = \frac{\sum_{(p,q) \in W} g(p, q)^{k+1}}{\sum_{(p,q) \in W} g(p, q)^k}$$



## 4.3 空域噪声滤波器

- ◆ 均值滤波器
- (5) 非线性均值滤波器

$$g = f(x_1, x_2, \dots, x_N) = h^{-1} \left( \frac{\sum_{i=1}^N w_i h(x_i)}{\sum_{i=1}^N w_i} \right)$$

如果权是常数，非线性均值滤波器就简化为同态滤波器



## 4.3 空域噪声滤波器

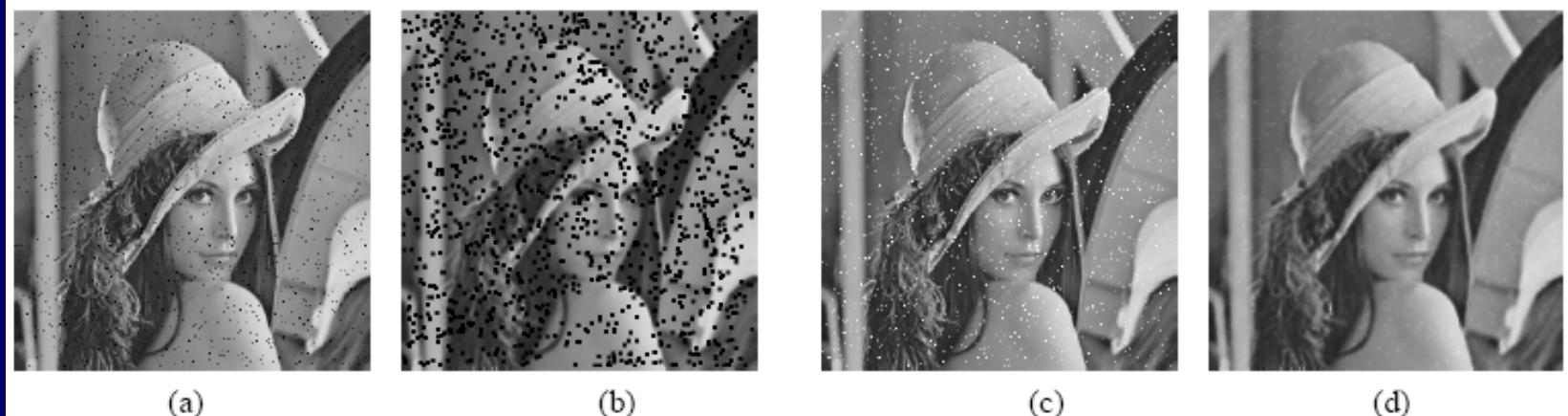


图 4.3.3 谐波均值滤波器滤除椒噪声和盐噪声的不同效果



## 4.3 空域噪声滤波器

- ◆ 排序统计滤波器

- (1) 中值滤波器

$$\hat{f}(x, y) = \underset{(p, q) \in W}{\text{median}} \{g(p, q)\}$$

- (2) 最大值和最小值滤波器

$$\hat{f}(x, y) = \underset{(p, q) \in W}{\max} \{g(p, q)\}$$

$$\hat{f}(x, y) = \underset{(p, q) \in W}{\min} \{g(p, q)\}$$



## 4.3 空域噪声滤波器

- ◆ 自适应滤波器

### (1) 自适应局部噪声滤波器

$$\hat{f}(x, y) = g(x, y) - \frac{\sigma_N^2}{\sigma_W^2} [g(x, y) - m_W]$$

### (2) 自适应中值滤波器

滤除脉冲噪声，平滑非脉冲噪声，减少对目标边界过度细化或粗化而产生的失真



## 4.4 组合滤波器

- ◆ 混合滤波器

将快速的滤波器（特别是线性滤波器）和排序统计滤波器混合使用

- ◆ 线性中值混合滤波

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

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



## 4.4 组合滤波器

- ◆ 线性中值混合滤波

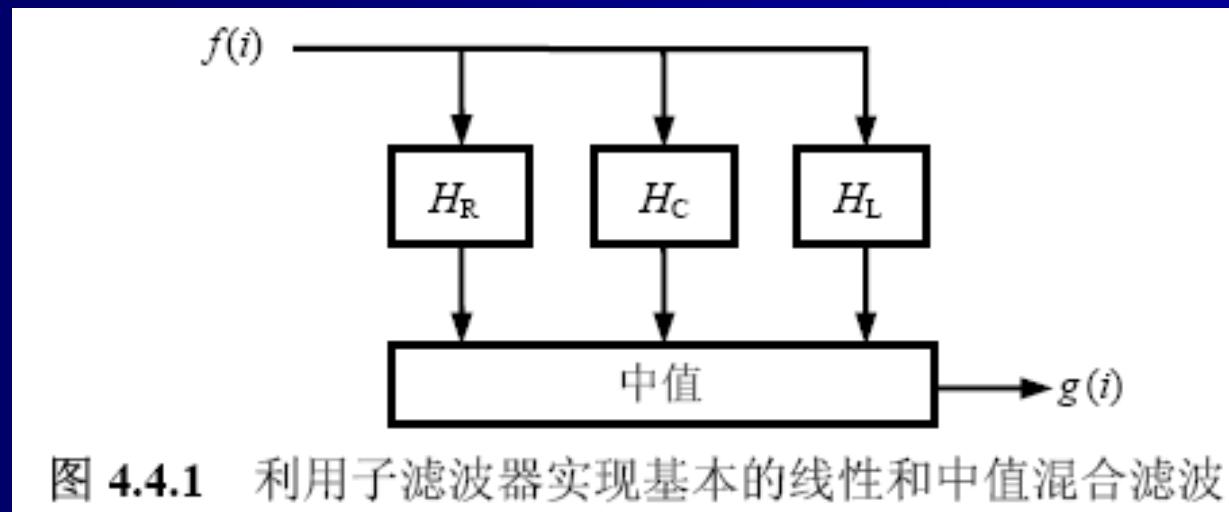


图 4.4.1 利用子滤波器实现基本的线性和中值混合滤波



## 4.4 组合滤波器

### ◆ 选择性滤波器

当图像同时受到不同噪声影响时，可以采用选择滤波的方式，在受到不同噪声影响的位置选择不同的滤波器进行滤除，以发挥不同滤波器的各自特点，取得好的综合效果

在消除各种混合比例的混合噪声时使用选择性滤波器的效果比单独使用任何一个滤波器的效果都要好



## 4.4 组合滤波器

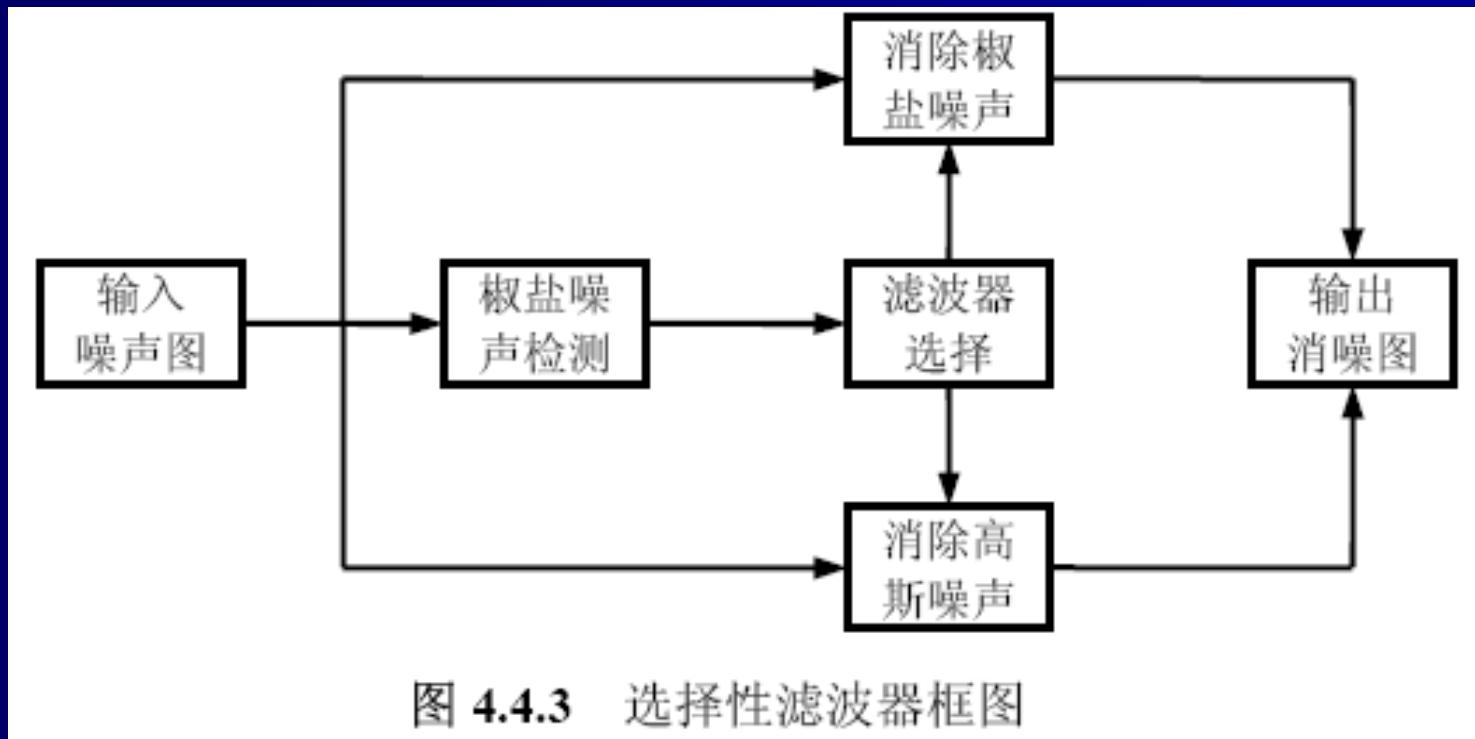


图 4.4.3 选择性滤波器框图



## 4.5 频域周期噪声滤波器

- ◆ 带阻滤波器

$$H(u, v) = \begin{cases} 1 & \text{如 } D(u, v) < D_0 - W/2 \\ 0 & \text{如 } D_0 - W/2 \leq D(u, v) \leq D_0 + W/2 \\ 1 & \text{如 } D(u, v) > D_0 + W/2 \end{cases}$$

- ◆ 高斯带阻滤波器

$$H(u, v) = 1 - \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[ \frac{D^2(u, v) - D_0^2}{D(u, v)W} \right]^2 \right\}$$



## 4.5 频域周期噪声滤波器

### ◆ 带通滤波器

$$H_P(u, v) = -[H_R(u, v) - 1] = 1 - H_R(u, v)$$

低通滤波器和高通滤波器都可看作带通滤波器的特例



## 4.5 频域周期噪声滤波器

### ◆ 带通滤波器

$$H_P(u, v) = -[H_R(u, v) - 1] = 1 - H_R(u, v)$$

### 例4.5.2

低通滤波器和高通滤波器都可看作带通滤波器的特例



## 4.5 频域周期噪声滤波器

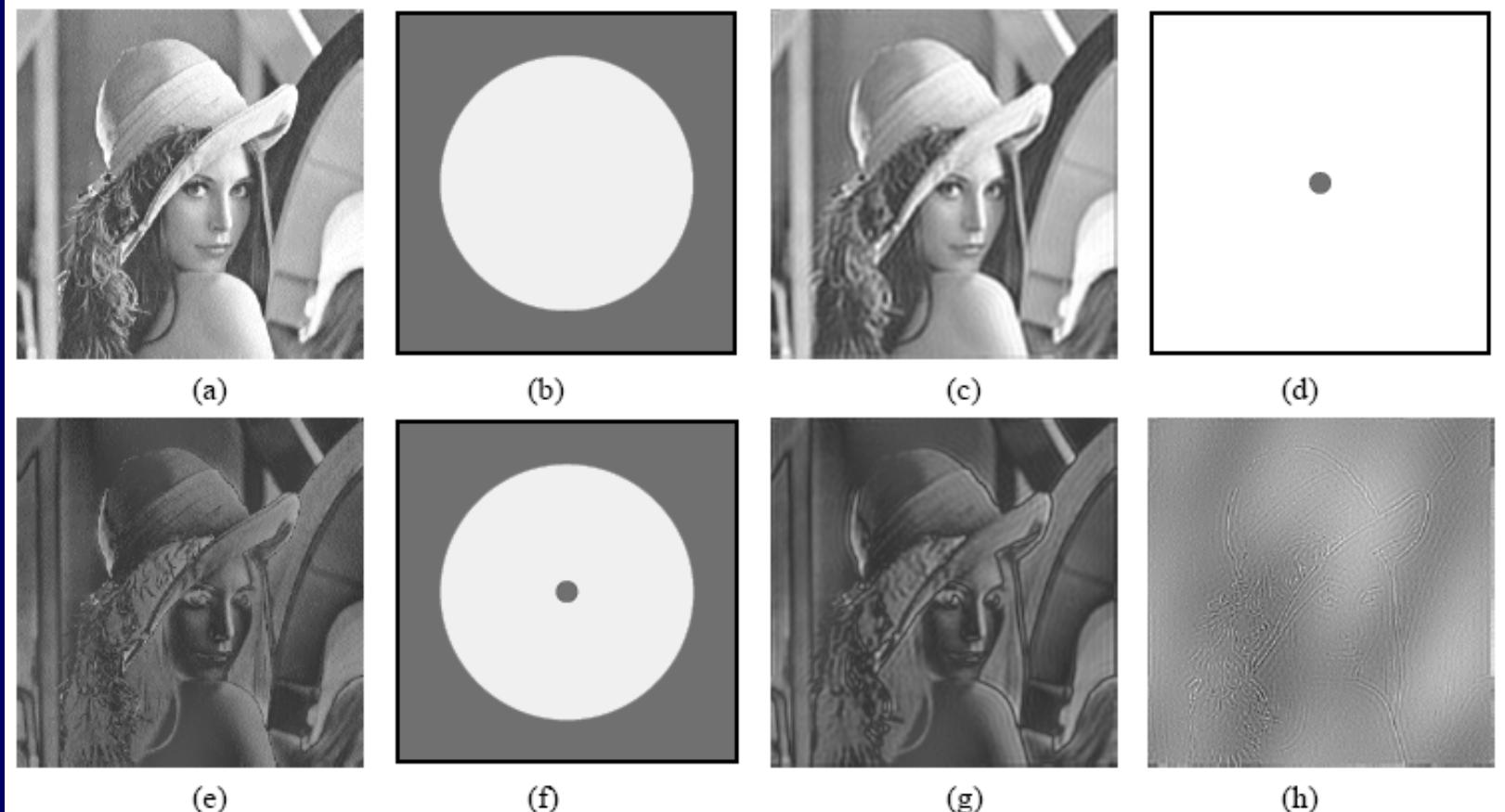


图 4.5.3 不同带通滤波示例



## 4.5 频域周期噪声滤波器

### ◆ 陷波滤波器

$$H(u,v) = \begin{cases} 0 & \text{如 } D(u,v) \leq D_0 \\ 1 & \text{如 } D(u,v) > D_0 \end{cases}$$

$$D(u,v) = \left[ (u - u_0)^2 + (v - v_0)^2 \right]^{1/2}$$

$$H(u,v) = \begin{cases} 0 & \text{如 } D_1(u,v) \leq D_0 \quad \text{或} \quad D_2(u,v) \leq D_0 \\ 1 & \text{其他} \end{cases}$$

$$D_1(u,v) = \left[ (u - u_0)^2 + (v - v_0)^2 \right]^{1/2}$$

$$D_2(u,v) = \left[ (u + u_0)^2 + (v + v_0)^2 \right]^{1/2}$$



## 4.6 逆滤波

### ◆ 无约束恢复

仅将图像看作一个数字矩阵，从数学角度进行处理而不考虑恢复后图像应受到的物理约束

$$\mathbf{n} = \mathbf{g} - \mathbf{Hf}$$

$$\|\mathbf{n}\|^2 = \mathbf{n}^T \mathbf{n} = \|\mathbf{g} - \hat{\mathbf{H}}\hat{\mathbf{f}}\|^2 = (\mathbf{g} - \hat{\mathbf{H}}\hat{\mathbf{f}})^T (\mathbf{g} - \hat{\mathbf{H}}\hat{\mathbf{f}})$$

$$L(\hat{\mathbf{f}}) = \|\mathbf{g} - \hat{\mathbf{H}}\hat{\mathbf{f}}\|^2$$

$$\hat{\mathbf{f}} = (\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{g} = \mathbf{H}^{-1} (\mathbf{H}^T)^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{g} = \mathbf{H}^{-1} \mathbf{g}$$



## 4.6 逆滤波

### ◆ 逆滤波模型

$$\hat{F}(u, v) = \frac{G(u, v)}{H(u, v)}$$

$$\hat{f}(x, y) = \mathcal{F}^{-1}[\hat{F}(u, v)] = \mathcal{F}^{-1}\left[\frac{G(u, v)}{H(u, v)}\right]$$

恢复只能在与原点较近的范围内进行

$$M(u, v) = \begin{cases} k & \text{如 } H(u, v) \leq d \\ 1/H(u, v) & \text{其他} \end{cases}$$



## 4.6 逆滤波

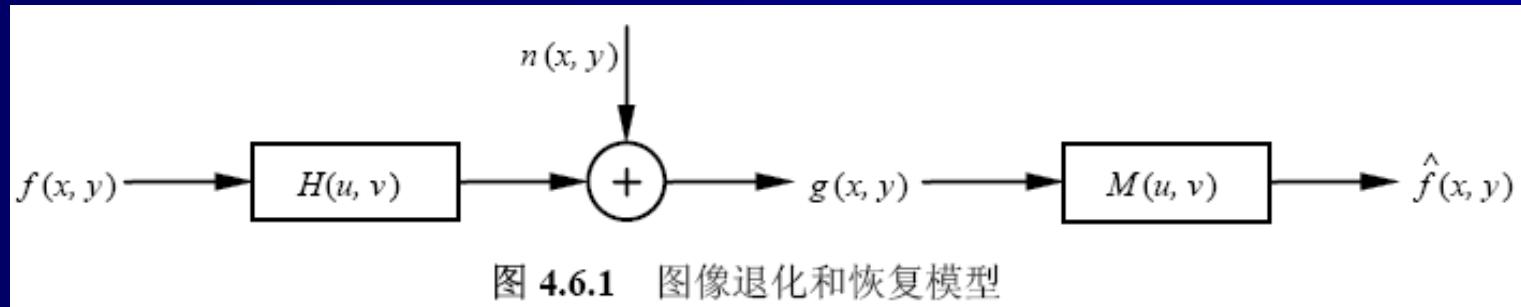


图 4.6.1 图像退化和恢复模型

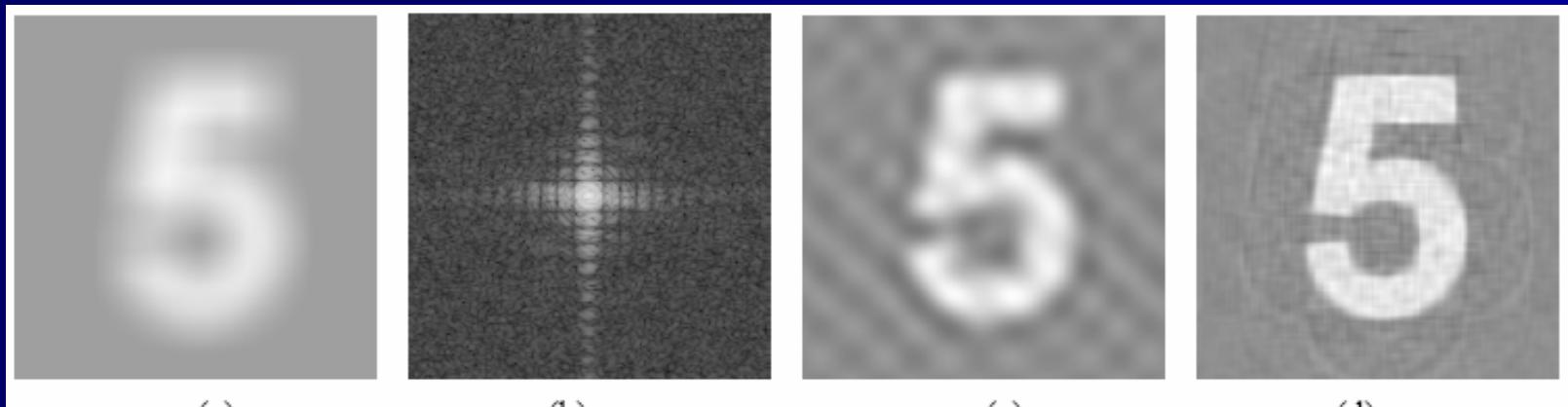


图 4.6.2 逆滤波图像恢复示例



## 4.7 维纳滤波

### ◆ 有约束恢复

考虑恢复后的图像应该受到一定的物理约束  
有约束恢复考虑选取的一个线性操作符  $Q$   
(变换矩阵)，使得  $\|Q\hat{f}\|^2$  最小

$$L(\hat{f}) = \|\hat{Qf}\|^2 + l \left( \|\mathbf{g} - H\hat{f}\|^2 - \|\mathbf{n}\|^2 \right)$$
$$\hat{f} = [H^T H + s Q^T Q]^{-1} H^T g$$



## 4.7 维纳滤波

### ◆ 维纳滤波器

一种最小均方误差滤波器

$$\hat{F}(u, v) = \left[ \frac{1}{H(u, v)} \times \frac{|H(u, v)|^2}{|H(u, v)|^2 + s[S_n(u, v)/S_f(u, v)]} \right] G(u, v)$$

- (1) 如果  $s = 1$ , 大方括号中的项就是维纳滤波器
- (2) 如果  $s$  是变量, 就称为参数维纳滤波器
- (3) 当没有噪声时,  $S_n(u, v) = 0$ , 维纳滤波器退化成理想逆滤波器



# 本章要点

- 4.1节 一种基本的图像退化模型及其退化系统的性质
- 4.2节 一些典型的噪声和对它们的表示描述
- 4.3节 一些常用的空域噪声滤波器
- 4.4节 将不同的空域噪声滤波器结合的示例
- 4.5节 在频域中滤除图像里周期噪声的方法
- 4.6节 简单直接的无约束图像恢复方法——逆滤波
- 4.7节 一种基本的有约束图像恢复方法——维纳滤波



# 作者联系信息

- 通信地址：北京清华大学电子工程系（100084）
- 办公地址：清华大学东主楼，9区307室
- 办公电话：(010) 62781430
- 传真号码：(010) 62770317
- 电子邮件：[zhangyj@ee.tsinghua.edu.cn](mailto:zhangyj@ee.tsinghua.edu.cn)
- 个人主页：



# 图像处理和分析技术

章毓晋

清华大学电子工程系 100084 北京



# 第5章 投影重建技术

5.1 投影重建方式

5.2 投影重建原理

5.3 傅里叶反变换重建

5.4 卷积逆投影重建

5.5 级数展开重建



## 5.1 投影重建方式

- ◆ 投影重建一般指从一个物体的多个（轴向）投影图重建目标图像的过程，其目的是根据对场景的投影数据来获取场景中物质分布的信息
- ◆ 透射断层成像  
从发射源射出的射线穿透物体到达接受器

$$I = I_0 \exp\left\{-\int_L k(s)ds\right\}$$
$$I = I_0 \exp\{-kL\}$$



## 5.1 投影重建方式

- ◆ **发射断层成像**

发射源在物体内部，从物体外检测其放射出来的量

- PET：检测由一对正负电子产生的两个光子

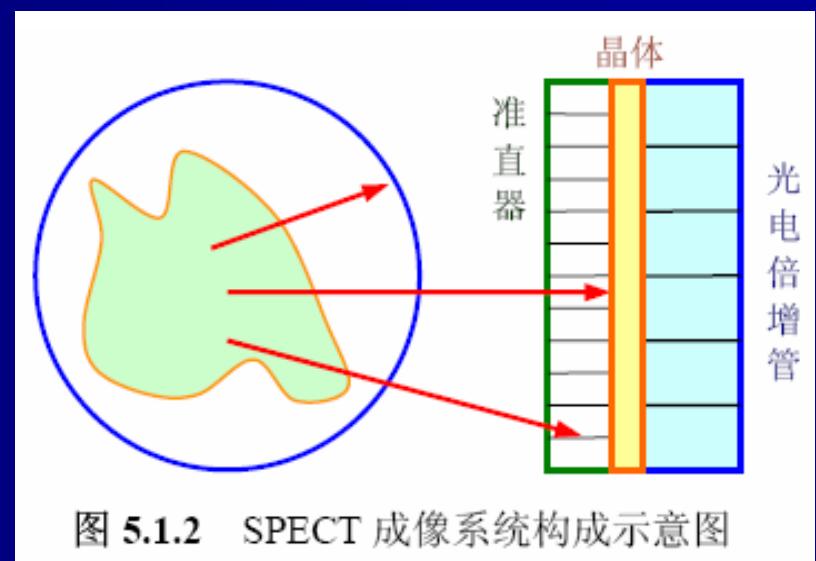
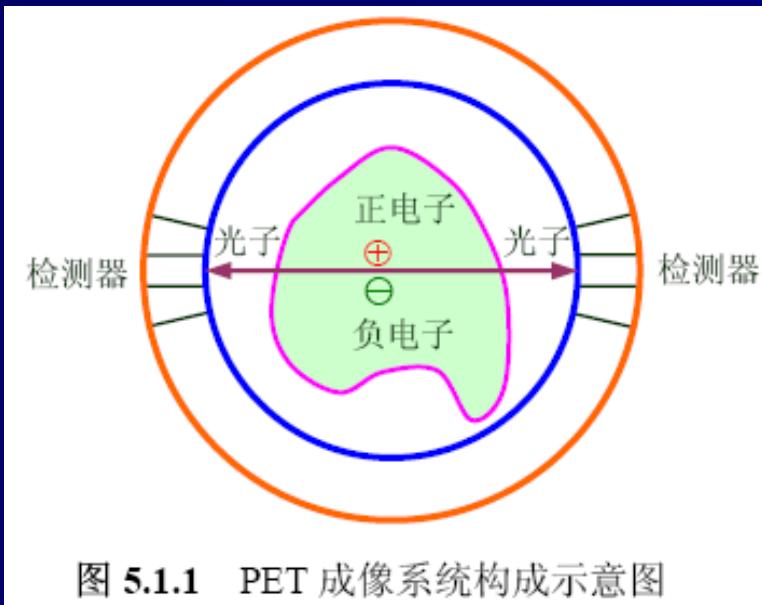
$$P = \exp(-\int k(s)ds) \int f(s)ds$$

- SPECT：检测  $\gamma$  射线光子

结合核医学成像和断层重建的成像技术



## 5.1 投影重建方式





## 5.1 投影重建方式

### ◆ 反射断层成像

雷达接受器在特定角度所接受到的回波强度是地面反射量在一个扫描阶段中的积分

### ● 非聚焦合成孔径雷达

$$E(d) = \int_{-T/2}^{T/2} \exp\left[-\frac{j4\pi}{2R\lambda}(vt-d)^2\right] dt$$

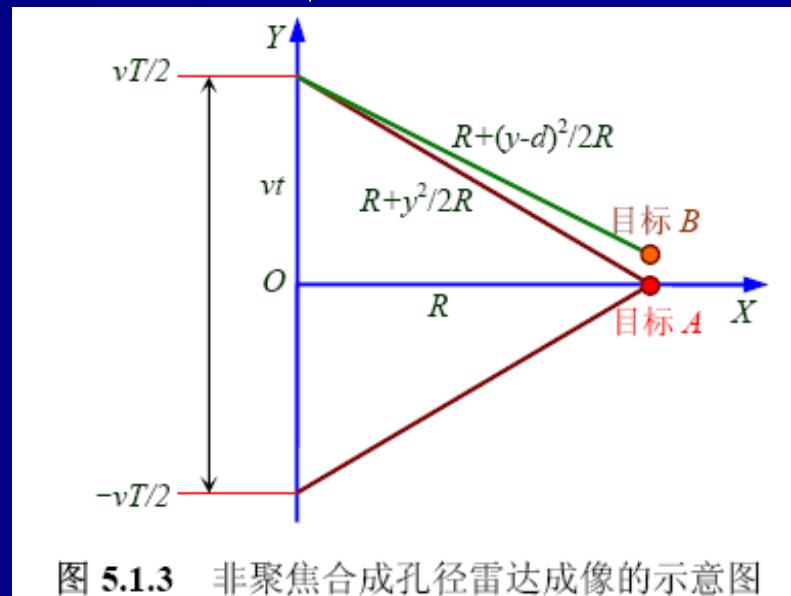


图 5.1.3 非聚焦合成孔径雷达成像的示意图



## 5.1 投影重建方式

- ◆ 磁共振成像

$$S(t) = \iiint_V R(x, y, z) f(x, y, z) \exp\left[j\theta \int_0^t w(x, y, z, \tau) d\tau\right] dx dy dz$$

- 电阻抗断层成像

- 采用交流电场对物体进行激励检测

- 采用图像重建算法就可以重建出物体内部区域的电导和电抗的分布或变化的图像



## 5.2 投影重建原理

### ◆ 基本模型

图5.2.1

$$g(s, \theta) = \int_{(s, \theta)} f(x, y) dt = \int_{(s, \theta)} f(s \cos \theta - t \sin \theta, s \sin \theta + t \cos \theta) dt$$

$$t(s) = \sqrt{1 - s^2} \quad |s| \leq 1$$

$$g(s, \theta) = 0 \quad |s| > 1$$

用 $f(x, y)$ 表示需要被重建的目标，由 $(s, \theta)$ 确定的积分路线对应一条从发射源到接受器的射线



## 5.2 投影重建原理

- ◆ 基本模型

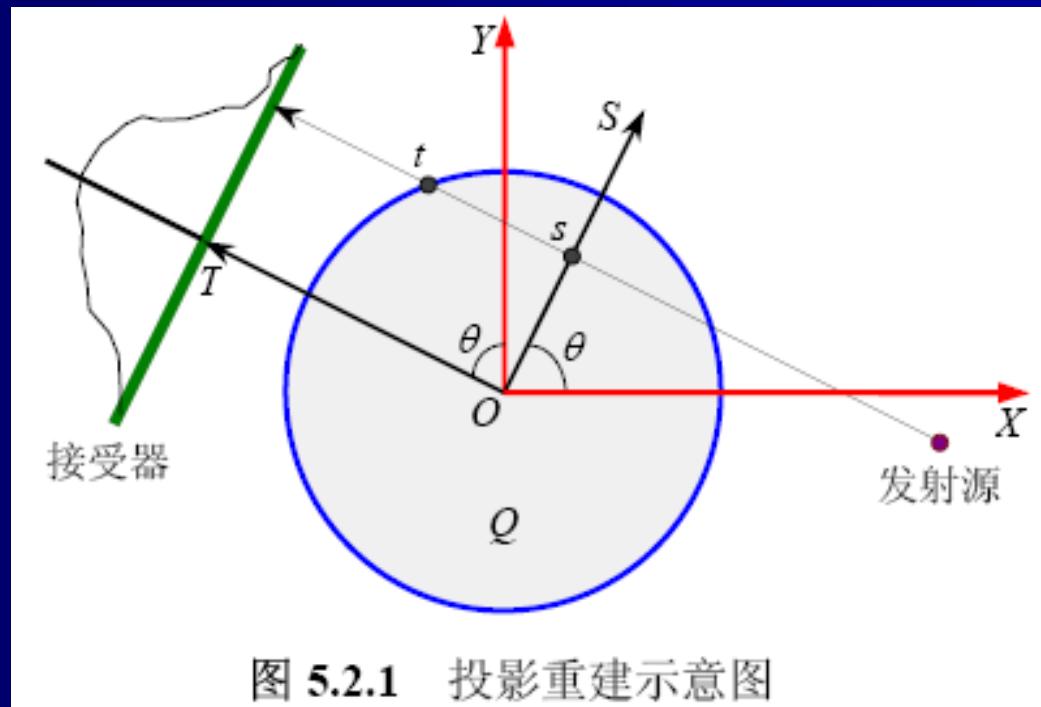


图 5.2.1 投影重建示意图



## 5.2 投影重建原理

### ◆ Radon变换

对 $f(x, y)$ 的Radon变换 $Rf(p, q)$ 定义为沿由 $p$ 和 $\theta$ 定义的直线 $l$ （点 $(x, y)$ 在该直线上）的线积分

$$R_f(p, \theta) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) \delta(p - x \cos \theta - y \sin \theta) dx dy$$

$$R_f(p, \theta) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) dl$$

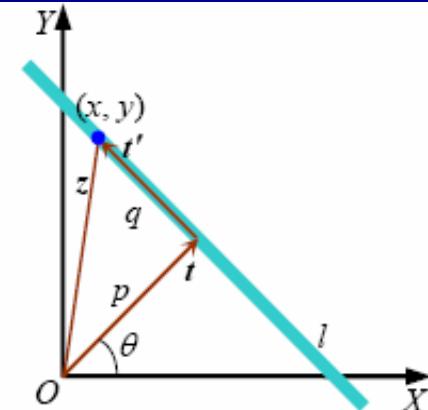


图 5.2.2 用于定义 Radon 变换的坐标系统



## 5.2 投影重建原理

### ◆ Radon变换

$$\mathcal{F}_{(1)}\{\mathcal{R}[f(x, y)]\} = \mathcal{F}_{(1)}\{R_f(p, \theta)\} = \mathcal{F}_{(2)}[f(x, y)] = F(u, v)$$

$$F(u, v) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) \exp(-j2\pi s) \delta(s - ux - vy) ds dx dy$$

$$F(u, v) = q \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) \exp(-j2\pi qp) \delta(qp - ux - vy) dx dy dp$$

$$F(u, v) = \int_{-\infty}^{\infty} \exp(-j2\pi qp) \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) \delta(p - x \cos \theta - y \sin \theta) dx dy dp$$



## 5.2 投影重建原理

- ◆ Radon变换

### 投影层定理

对  $f(x, y)$  沿固定角度  $\theta = Q$  的投影的 1-D 傅里叶变换就是对  $f(x, y)$  的 2-D 傅里叶变换中的一层

$$F(q \cos \theta, q \sin \theta) = \int_{-\infty}^{\infty} F(p, \theta) \exp(-j2\pi qp) dp$$

$$F(q, 0) = \int_{-\infty}^{\infty} F(p, 0) \exp(-j2\pi qp) dp$$



## 5.3 傅里叶反变换重建

### ◆ 基本步骤和定义

傅里叶反变换重建法是一种变换重建方法。变换重建方法主要包括以下3个步骤：

- (1) 建立数学模型，其中已知量和未知量都是连续实数的函数
- (2) 利用反变换公式解未知量
- (3) 调节反变换公式以适应离散、有噪声应用的需求



## 5.3 傅里叶反变换重建

- ◆ 傅里叶反变换重建公式

傅里叶变换投影定理:

$$G(R, \theta) = \int_{(s, \theta)} g(s, \theta) \exp[-j2\pi Rs] ds$$

$$F(X, Y) = \iint_{\mathcal{Q}} f(x, y) \exp[-j2\pi(xX + yY)] dx dy$$

$$G(R, \theta) = F(R \cos \theta, R \sin \theta)$$



## 5.3 傅里叶反变换重建

- ◆ 傅里叶反变换重建公式

$$f(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} G\left[\sqrt{X^2 + Y^2}, \arctan\left(\frac{Y}{X}\right)\right] \exp[j2\pi(xX + yY)] dXdY$$
$$f_W(x, y) = \iint_Q G\left[\sqrt{X^2 + Y^2}, \arctan\left(\frac{Y}{X}\right)\right] W\left[\sqrt{X^2 + Y^2}\right] \exp[j2\pi(xX + yY)] dXdY$$

$$f_W(k \Delta x, l \Delta y) \approx \Delta X \Delta Y \sum_{u=U^-}^{U^+} \sum_{v=V^-}^{V^+} F_W(u \Delta x, v \Delta y) \exp\left\{j2\pi\left[\frac{ku}{U} + \frac{lv}{V}\right]\right\}$$



## 5.3 傅里叶反变换重建

- ◆ 模型重建



图 5.3.3 改进的 Shepp-Logan 头部模型图

### 例5.3.1 傅里叶反变换重建示例



## 5.4 卷积逆投影重建

### ◆ 连续公式推导

$$\begin{aligned}f_W(x, y) &= \int_0^{\pi} \int_{-1/(2\Delta s)}^{1/(2\Delta s)} G(R, \theta) W(R) \exp[j2\pi R(x \cos \theta + y \sin \theta)] |R| dR d\theta \\&= \int_0^{\pi} \int_{-1}^1 g(s, \theta) h(x \cos \theta + y \sin \theta - s) ds d\theta\end{aligned}$$

$$g'(s, \theta) = \int_{-1}^1 g(s, \theta) h(s' - s) ds$$

$$f_W(x, y) = \int_0^{\pi} g'(x \cos \theta + y \sin \theta, \theta) d\theta$$



## 5.4 卷积逆投影重建

### ◆ 离散计算

$$f_W(k\Delta x, l\Delta y) \approx \Delta\theta \sum_{n=1}^N g'(k\Delta x \cos\theta_n + l\Delta y \sin\theta_n, \theta_n)$$

$$g'_C(m' \Delta s, \theta_n) \approx \Delta s \sum_{m=M^-}^{M^+} g(m \Delta s, \theta_n) h[(m' - m) \Delta s]$$

$$g'_I(s', \theta_n) \approx \Delta s \sum_{n=1}^N g'_C(m \Delta s, \theta_n) I(s' - m \Delta s)$$



## 5.4 卷积逆投影重建

### ◆ 扇束投影重建

使用一个发射器和一组接受器，这样就可同时获得多条投影线

$$f_W(r \cos \phi, r \sin \phi) = \frac{D}{2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\delta}^{\delta} \int_{-\alpha}^{2\pi-\alpha} p(\alpha, \beta) \cos \alpha \exp[j2\pi RU \sin(\psi - \alpha)] W(R) |R| d\beta d\alpha dR$$

$$p(\psi, \beta) = \int_{-\delta}^{\delta} p(\alpha, \beta) h[U \sin(\psi - \alpha)] \cos \alpha d\alpha$$

$$f_W(r \cos \phi, r \sin \phi) = \frac{D}{2} \int_0^{2\pi} p(\psi, \beta) d\beta$$



## 5.4 卷积逆投影重建

### ◆ 扇束投影重建

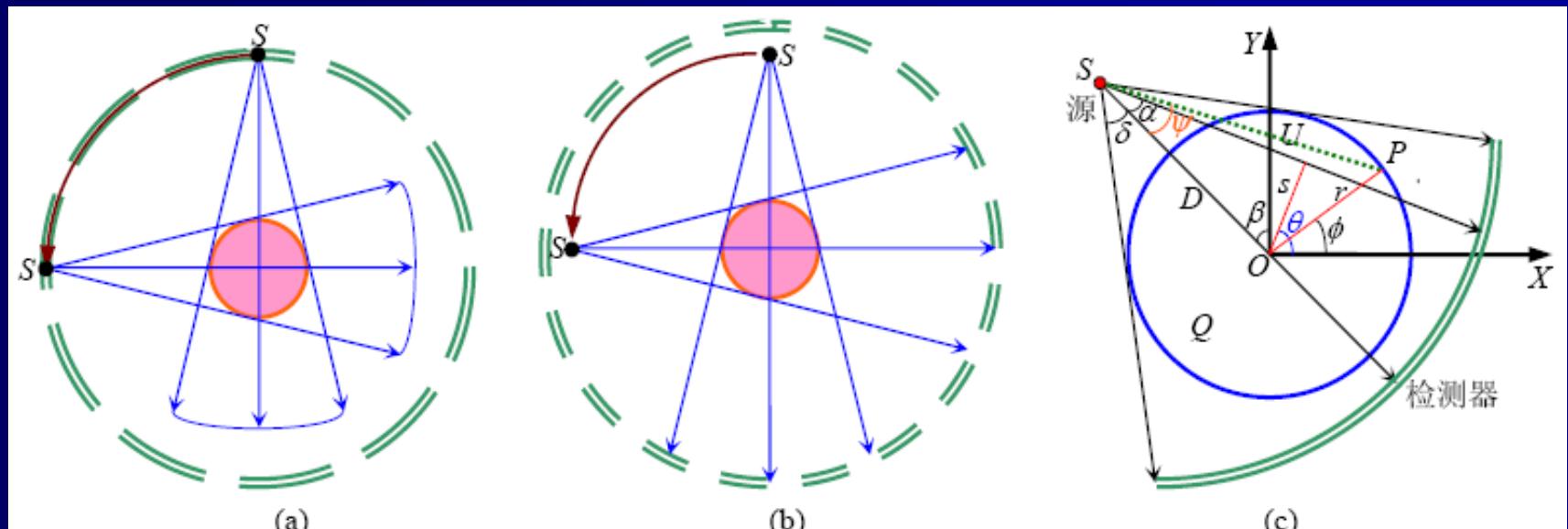


图 5.4.2 扇束投影



## 5.5 级数展开重建

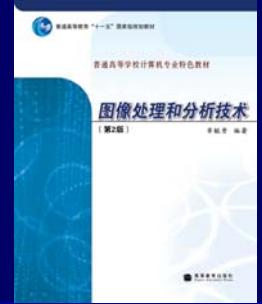
- ◆ 模型

$$y_i \approx \sum_{j=1}^N x_j a_{ij} \quad i = 1, 2, \dots, M$$

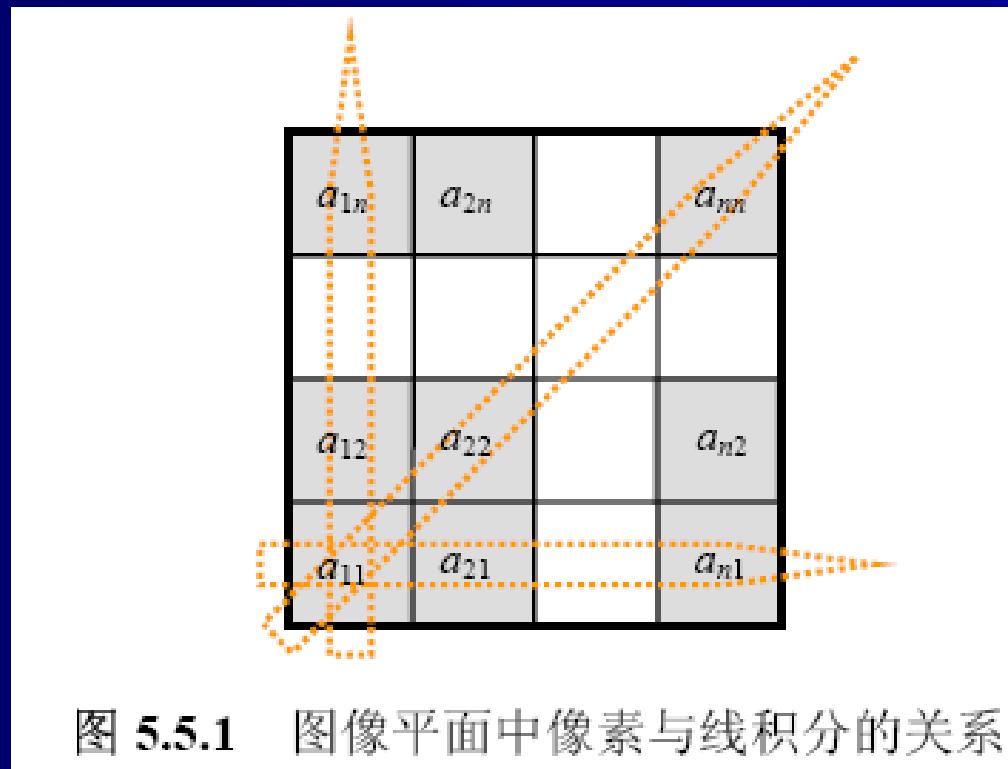
- ◆ 代数重建技术

$$\mathbf{x}^{(k+1)} = \mathbf{x}^{(k)} + \frac{y_i - \mathbf{a}^i \cdot \mathbf{x}^{(k)}}{\|\mathbf{a}^i\|^2} \mathbf{a}^i$$

$$\mathbf{x}^{(k+1)} = \mathbf{x}^{(k)} + \frac{y_i - (\mathbf{a}^i)^r \cdot \mathbf{x}^{(k)}}{\|\mathbf{a}^i\|^2} \mathbf{a}^i$$

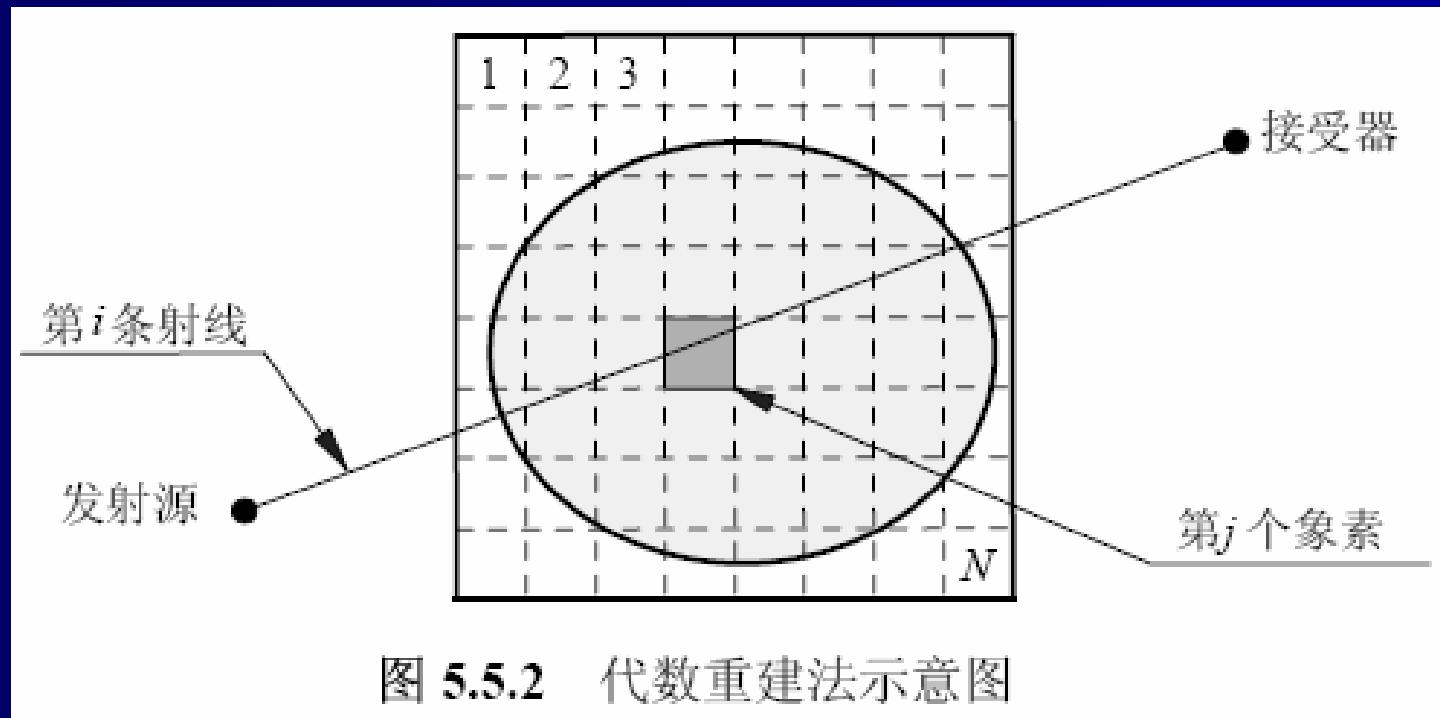


## 5.5 级数展开重建





## 5.5 级数展开重建





# 本章要点

- 5. 1节 各种利用投影重建方式工作的系统
- 5. 2节 从投影重建图像的基本原理
- 5. 3节 利用傅里叶变换的重建方法
- 5. 4节 利用卷积逆投影的重建方法
- 5. 5节 利用级数展开进行重建的方法



# 作者联系信息

- 通信地址：北京清华大学电子工程系（100084）
- 办公地址：清华大学东主楼，9区307室
- 办公电话：(010) 62781430
- 传真号码：(010) 62770317
- 电子邮件：[zhangyj@ee.tsinghua.edu.cn](mailto:zhangyj@ee.tsinghua.edu.cn)
- 个人主页：



# 图像处理和分析技术

章毓晋

清华大学电子工程系 100084 北京



# 第6章 图像编码技术

- 6.1 数据冗余和压缩
- 6.2 图像保真度
- 6.3 无失真编码定理
- 6.4 哈夫曼编码
- 6.5 算术编码
- 6.6 位平面编码
- 6.7 无损预测编码
- 6.8 有损预测编码
- 6.9 变换编码



## 6.1 数据冗余和压缩

- ◆ 对给定量的信息，设法减少表达这些信息的数据量称为数据压缩
- ◆ 冗余数据指那些代表了无用的信息，或者重复地表示了其它数据已表示信息的数据
- ◆ 压缩数据量的重要方法是消除冗余
- ◆ 压缩率  $C_R = n_1/n_2$



## 6.1 数据冗余和压缩

- ◆ 像素相关冗余

与像素间相关性直接联系着的数据冗余

映射：一种减少像素间冗余的转换

- ◆ 编码冗余

图像编码：用符号根据一定规则来表达图像

平均比特数：

$$L_{\text{avg}} = \sum_{k=0}^{L-1} l(s_k) p_s(s_k)$$



# 6.1 数据冗余和压缩

## ◆ 编码冗余 (续)

用较少的比特数表示出现概率较大的灰度级

用较多的比特数表示出现概率较小的灰度级

## ◆ 心理视觉冗余

眼睛并不是对所有视觉信息有相同的敏感度

人也不是对所有视觉信息有相同的关心程度

与实在的视觉信息联系 → 定量信息的损失



## 6.2 图像保真度

- ◆ 客观保真度准则

所损失的信息量可用编码输入图与解码输出图的某个确定函数表示

均方根 (rms) 误差:

$$e(x, y) = \hat{f}(x, y) - f(x, y)$$

$$e_{\text{rms}} = \left[ \frac{1}{MN} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} [\hat{f}(x, y) - f(x, y)]^2 \right]^{1/2}$$



## 6.2 图像保真度

### ◆ 客观保真度准则

压缩—解压缩图的均方信噪比（signal-to-noise ratio, SNR）：

$$SNR_{ms} = \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} \hat{f}(x, y)^2 \left/ \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} [\hat{f}(x, y) - f(x, y)]^2 \right.$$

$$SNR = 10 \lg \left[ \frac{\sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} [f(x, y) - \bar{f}]^2}{\sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} [\hat{f}(x, y) - f(x, y)]^2} \right]$$



## 6.2 图像保真度

### ◆ 主观保真度准则

表 6.2.1 电视图像质量评价尺度

评分	评价	说 明
1	优秀	图像质量非常好，如同人能想象出的最好质量。
2	良好	图像质量高，观看舒服，有干扰但不影响观看。
3	可用	图像质量可接受，有干扰但不太影响观看。
4	刚可看	图像质量差，干扰有些妨碍观看，观察者希望改进。
5	差	图像质量很差，妨碍观看的干扰始终存在，几乎无法观看。
6	不能用	图像质量极差，不能使用。



## 6.3 无失真编码定理

- ◆ 信息和信源

自信息

$$I(E) = \log \frac{1}{P(E)} = -\log P(E)$$

用 $(B, u)$ 可以完全描述信源

信源符号集  $B = \{b_1, b_2, \dots, b_J\}$

概率矢量  $u = [P(b_1) \ P(b_2) \ \dots \ P(b_J)]^T$

$$H(u) = -\sum_{j=1}^J P(b_j) \log P(b_j)$$



## 6.3 无失真编码定理

- ◆ 无失真编码定理

确定了对零记忆信源的每个信源符号编码可达到的最小平均码字长度

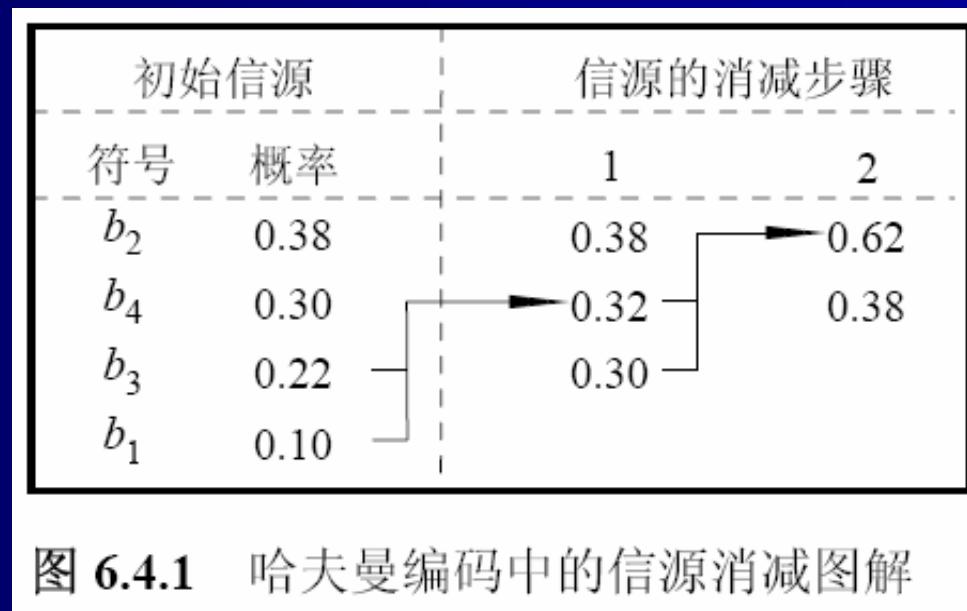
$$\lim_{n \rightarrow \infty} \left[ \frac{L'_{\text{avg}}}{n} \right] = H(u)$$
$$\eta = n \frac{H(u)}{L'_{\text{avg}}}$$



## 6.4 哈夫曼编码

### ◆ 哈夫曼编码

步骤：第1步消减信源符号数量





## 6.4 哈夫曼编码

### ◆ 哈夫曼编码

步骤：第2步对每个信源符号赋值

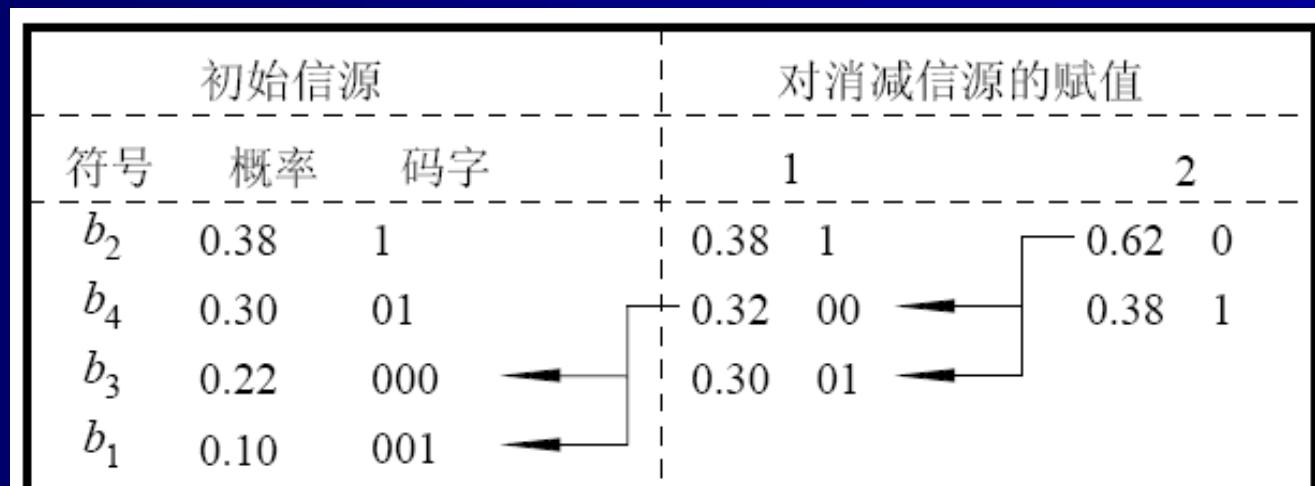


图 6.4.2 哈夫曼编码中的信源赋值过程图解



## 6.4 哈夫曼编码

### ◆ 哈夫曼编码

表 6.4.2 哈夫曼码与其改型的比较

块号	信源符号	概率	截断哈夫曼码		平移哈夫曼码		哈夫曼码
第 1 块	$b_1$	0.25	01	01	01	01	01
	$b_2$	0.21	10	10	10	10	10
	$b_3$	0.19	000	11	000	11	11
	$b_4$	0.16	001	001	001	001	001
第 2 块	$b_5$	0.08	11 00	000 00	11 01	000 01	0001
	$b_6$	0.06	11 01	000 01	11 10	000 10	00000
	$b_7$	0.03	11 10	000 10	11 000	000 11	000010
	$b_8$	0.02	11 11	000 11	11 011	000 001	000011
熵		2.65					
平均长度			2.73		2.78	2.75	2.7



## 6.5 算术编码

- ◆ 算术编码

1种从整个符号序列出发，采用递推形式连续编码的方法

不存在源符号和码字间的一一对应关系

1个算术码字要赋给整个信源符号序列，而每个码字本身确定了0和1之间的1个实数区间

算术编码过程只需用到加法和移位运算



## 6.5 算术编码

### ◆ 算术编码步骤

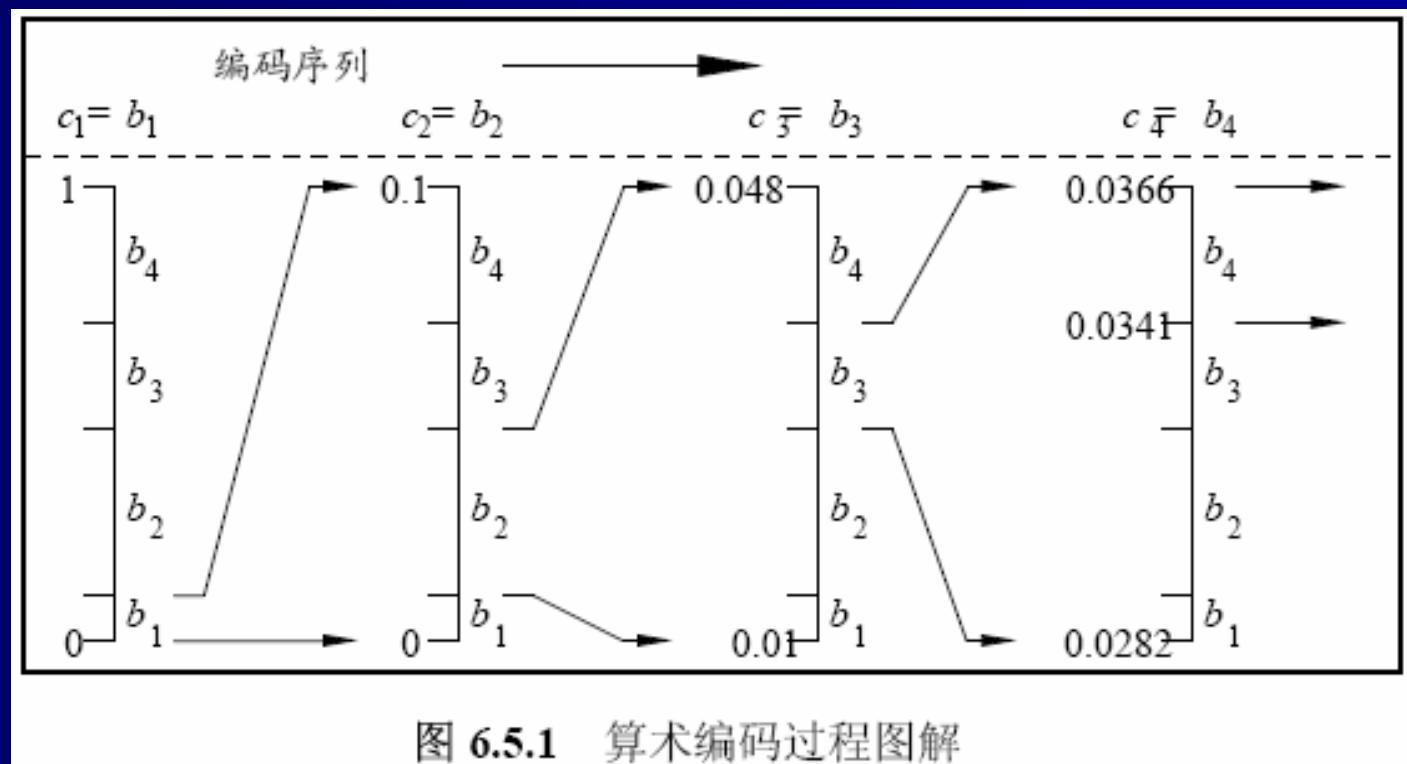


图 6.5.1 算术编码过程图解



## 6.5 算术编码

- ◆ 算术编码

**例6.5.1** 二元序列的二进制算术编码

解码具有唯一性

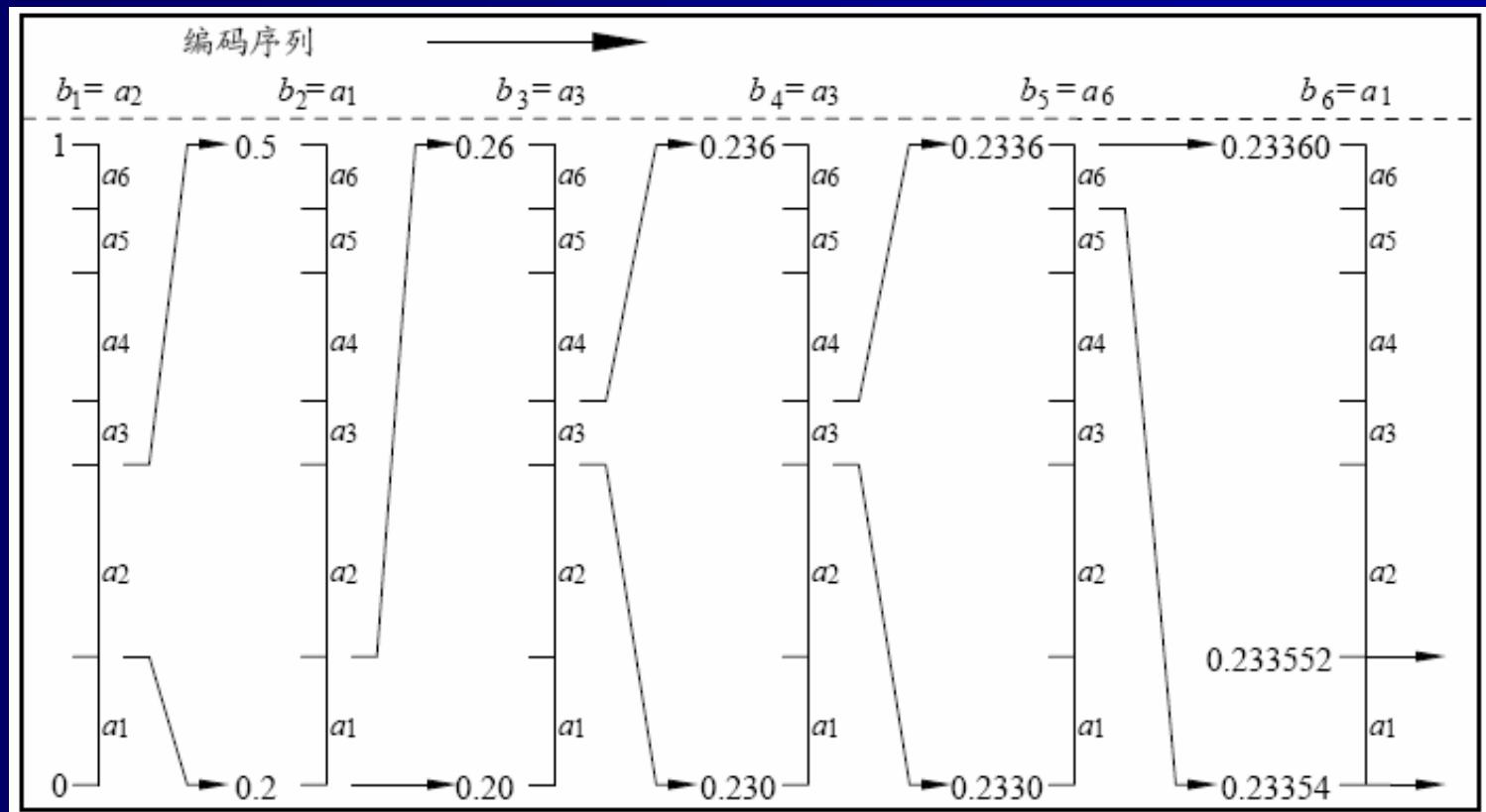
**例6.5.2** 哈夫曼编码和算术编码的比较示例

哈夫曼编码的效率比算术编码的效率低



# 6.5 算术编码

## ◆ 算术解码





## 6.6 位平面编码

- ◆ 位平面分解

将一幅具有 $m$  bit灰度级的图像分解成 $m$ 幅1 bit的二值图像

$$a_{m-1}2^{m-1} + a_{m-2}2^{m-2} + \cdots + a_12^1 + a_02^0$$

### 灰度码

$$g_i = \begin{cases} a_i \oplus a_{i+1} & 0 \leq i \leq m-2 \\ a_i & i = m-1 \end{cases}$$

灰度值的微小变化不会对位平面的复杂度产生较明显的影响



## 6.6 位平面编码

- ◆ 位平面编码
- 1-D游程编码

用一系列描述0或1像素游程（连续的0或1像素段）的长度值来表示位平面中的每1行

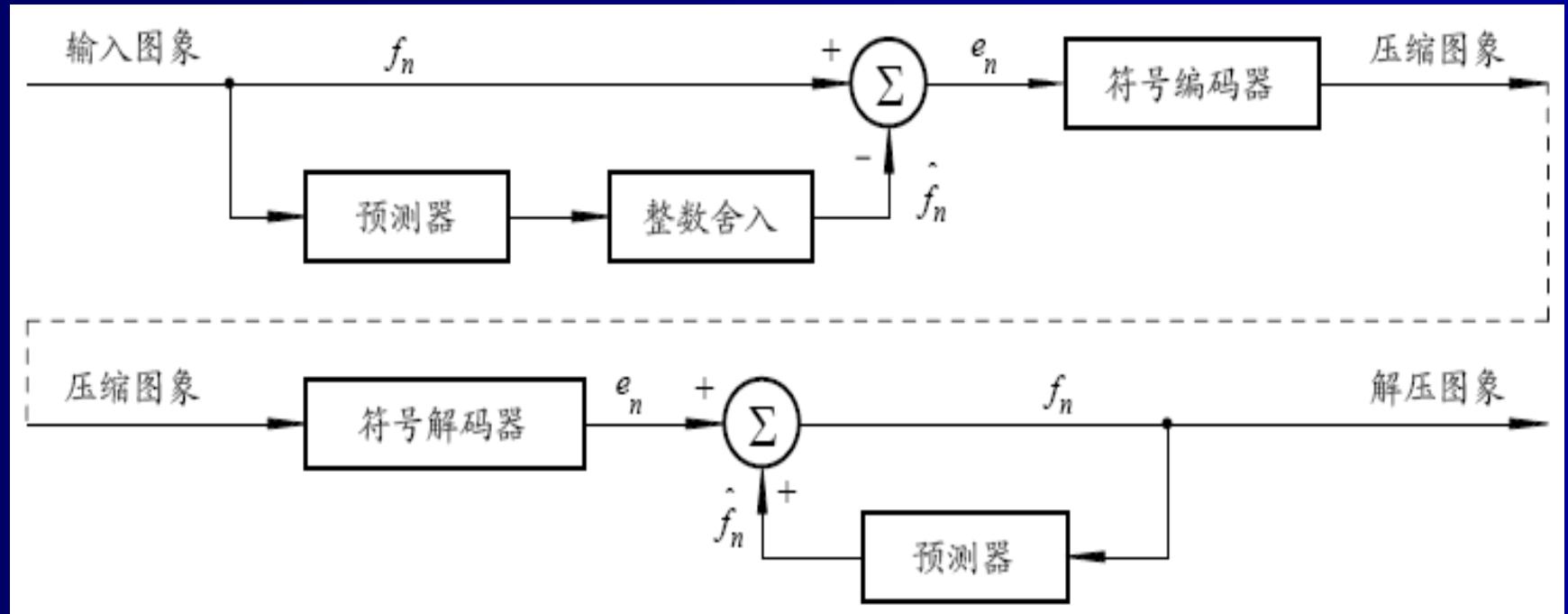
当游程较长时，其压缩效率会很高

进一步，通过用变长码对游程的长度编码还有可能取得更高的压缩率



## 6.7 无损预测编码

### ◆ 无损预测编码系统





## 6.7 无损预测编码

- ◆ 无损预测编码系统

预测误差

$$e_n = f_n - \hat{f}_n$$

解压图像的像素序列

$$f_n = e_n + \hat{f}_n$$

借助预测器可将原来对原始图像序列的编码  
转换成对预测误差的编码

预测误差的动态范围会远小于原始图像序列  
的动态范围



## 6.7 无损预测编码

- ◆ 线性预测器

$$\hat{f}_n = \text{round} \left[ \sum_{i=1}^m a_i f_{n-i} \right]$$

1-D线性预测器

$$\hat{f}_n(x, y) = \text{round} \left[ \sum_{i=1}^m a_i f(x - i, y) \right]$$

一阶1-D线性预测器

$$\hat{f}_n(x, y) = \text{round} [af(x - 1, y)]$$



## 6.8 有损预测编码

### ◆ 有损预测编码系统

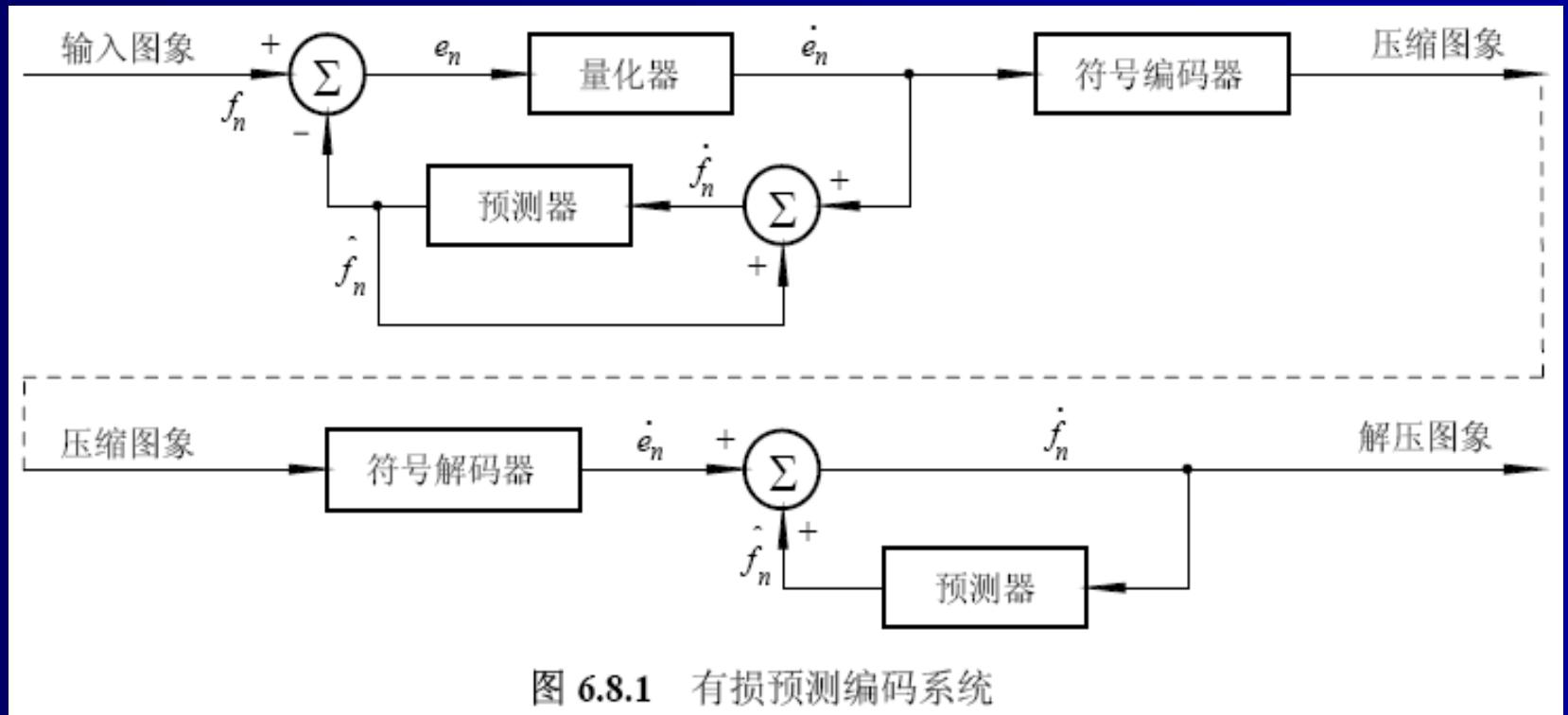


图 6.8.1 有损预测编码系统



## 6.8 有损预测编码

- ◆ DM编码

预测器

$$\hat{f}_n = a \dot{f}_{n-1}$$

量化器

$$\dot{e}_n = \begin{cases} +c & \text{对 } e_n > 0 \\ -c & \text{其它} \end{cases}$$

$a$ 是预测系数（一般小于等于1）， $c$ 是1个正的常数

由DM方法得到的码率是1比特/像素



## 6.8 有损预测编码

- ◆ DM编码

预测器

$$\hat{f}_n = a \dot{f}_{n-1}$$

量化器

$$\dot{e}_n = \begin{cases} +c & \text{对 } e_n > 0 \\ -c & \text{其它} \end{cases}$$

$a$ 是预测系数（一般小于等于1）， $c$ 是1个正的常数

由DM方法得到的码率是1比特/像素



## 6.8 有损预测编码

### ◆ 最优预测器

$$\hat{f}(x, y) = a_1 f(x, y-1) + a_2 f(x-1, y-1) + a_3 f(x-1, y) + a_4 f(x+1, y-1)$$

$$\hat{f}_1(x, y) = 0.97 f(x, y-1)$$

$$\hat{f}_2(x, y) = 0.5 f(x, y-1) + 0.5 f(x-1, y)$$

$$\hat{f}_3(x, y) = 0.75 f(x, y-1) + 0.75 f(x-1, y) - 0.5 f(x-1, y-1)$$

### 自适应预测器

$$\hat{f}_4(x, y) = \begin{cases} 0.97 f(x, y-1) & \text{如 } |f(x-1, y) - f(x-1, y-1)| \leq |f(x, y-1) - f(x-1, y-1)| \\ 0.97 f(x-1, y) & \text{其它} \end{cases}$$



## 6.8 有损预测编码

### ◆ 最优量化函数

最小误差条件

$$\int_{s_{i-1}}^{s_i} (s - t_i) p(s) ds = 0 \quad i = 1, 2, \dots, L/2$$
$$s_i = \begin{cases} 0 & i = 0 \\ (t_i + t_{i+1})/2 & i = 1, 2, \dots, L/2 - 1 \\ \infty & i = L/2 \end{cases}$$
$$s_i = -s_{-i} \quad t_i = -t_{-i}$$



## 6.9 变换编码

- ◆ 基于DCT的变换编码

图6.9.1 典型的变换编码系统框图

在DFT和DCT以及WHT和KL变换中，信息集中能力从大到小依次为KLT，DCT，DFT和WHT；但所需计算量从大到小也依次为KLT，DCT，DFT和WHT

结合考虑压缩效率和计算复杂度，DCT比其他几种变换要优越



## 6.9 变换编码

- ◆ 基于DCT的变换编码
- ◆ 保留系数根据下列2个准则之一来确定：
  - ① 最大方差准则，称为分区编码
  - ② 最大幅度准则，称为阈值编码
- ◆ 3种对变换子图像取阈值的方法：
  - (1) 对所有子图像用1个全局阈值
  - (2) 对各个子图像分别用不同的阈值
  - (3) 根据子图像中各系数的位置选取阈值



## 6.9 变换编码

- ◆ 基于DWT的变换编码
- ◆ 小波变换编解码系统中没有图像分块的模块
  - ① 小波变换的计算效率很高
  - ② 本质上具有局部性
- ◆ 小波变换编码中需考虑的几个影响因素：
  - (1) 小波选择
  - (2) 分解层数选择
  - (3) 量化设计



# 本章要点

- 6.1节 数据冗余的概念和图像压缩的原理
- 6.2节 图像保真度的概念和主客观保真度准则
- 6.3节 信息量和熵的概念以及基本编码定理——  
无失真编码定理
- 6.4节 哈夫曼编码的方法步骤和其简化方式
- 6.5节 算术编解码的原理方法和与哈夫曼编码比较
- 6.6节 位平面的概念和基于位平面的编码方法
- 6.7节 预测编码的原理和预测方法
- 6.8节 有损预测编码的方法和会产生的问题
- 6.9节 变换编码的原理和方法



# 作者联系信息

- 通信地址：北京清华大学电子工程系（100084）
- 办公地址：清华大学东主楼，9区307室
- 办公电话：(010) 62781430
- 传真号码：(010) 62770317
- 电子邮件：[zhangyj@ee.tsinghua.edu.cn](mailto:zhangyj@ee.tsinghua.edu.cn)
- 个人主页：



# 图像处理和分析技术

章毓晋

清华大学电子工程系 100084 北京



# 第7章 图像分割技术

- 7.1 分割定义和方法分类
- 7.2 边缘检测
- 7.3 轮廓跟踪和图搜索
- 7.4 哈夫变换
- 7.5 阈值分割
- 7.6 基于变换直方图的阈值
- 7.7 基于过渡区的阈值
- 7.8 空间聚类
- 7.9 区域生长



## 7.1 分割定义和方法分类

- ◆ 目标或前景（其它部分称为背景）
- ◆ 图像分割：把图像分成各具特性的区域  
并提取出感兴趣目标的技术和过程

表 7.1.1 对图像分割文献的一个统计

分类 \ 年度	2000	2001	2002	2003	2004	小计
边缘检测, 图像分割	52	49	56	63	70	290
文献总数	464	481	545	577	632	2699
百分比	11.2%	10.2%	10.3%	10.9%	11.1%	10.7%



## 7.1 分割定义和方法分类

- ◆ 图像分割定义

$$(1) \quad \bigcup_{i=1}^n R_i = R$$

(2) 对所有的*i*和*j*, , 有  $R_i \cap R_j = \emptyset$

(3) 对  $i = 1, 2, \dots, n$ , 有  $P(R_i) = \text{TRUE}$

(4) 对, 有  $P(R_i \cup R_j) = \text{FALSE}$

(5) 对  $i = 1, 2, \dots, n$ ,  $R_i$  是连通的区域



# 7.1 分割定义和方法分类

## ◆ 图像分割算法分类

根据2个准则分成4类

表 7.1.2 分割算法分类表

分类	边界 (不连续性)	区域 (相似性)
并行处理	并行边界类	并行区域类
串行处理	串行边界类	串行区域类



## 7.2 边缘检测

### ◆ 边缘检测原理

边缘是灰度值不连续的结果

利用求导数检测不连续

一般常用一阶和二阶导数

3种边缘剖面：

- ① 阶梯状； ② 脉冲状； ③ 屋顶状



## 7.2 边缘检测

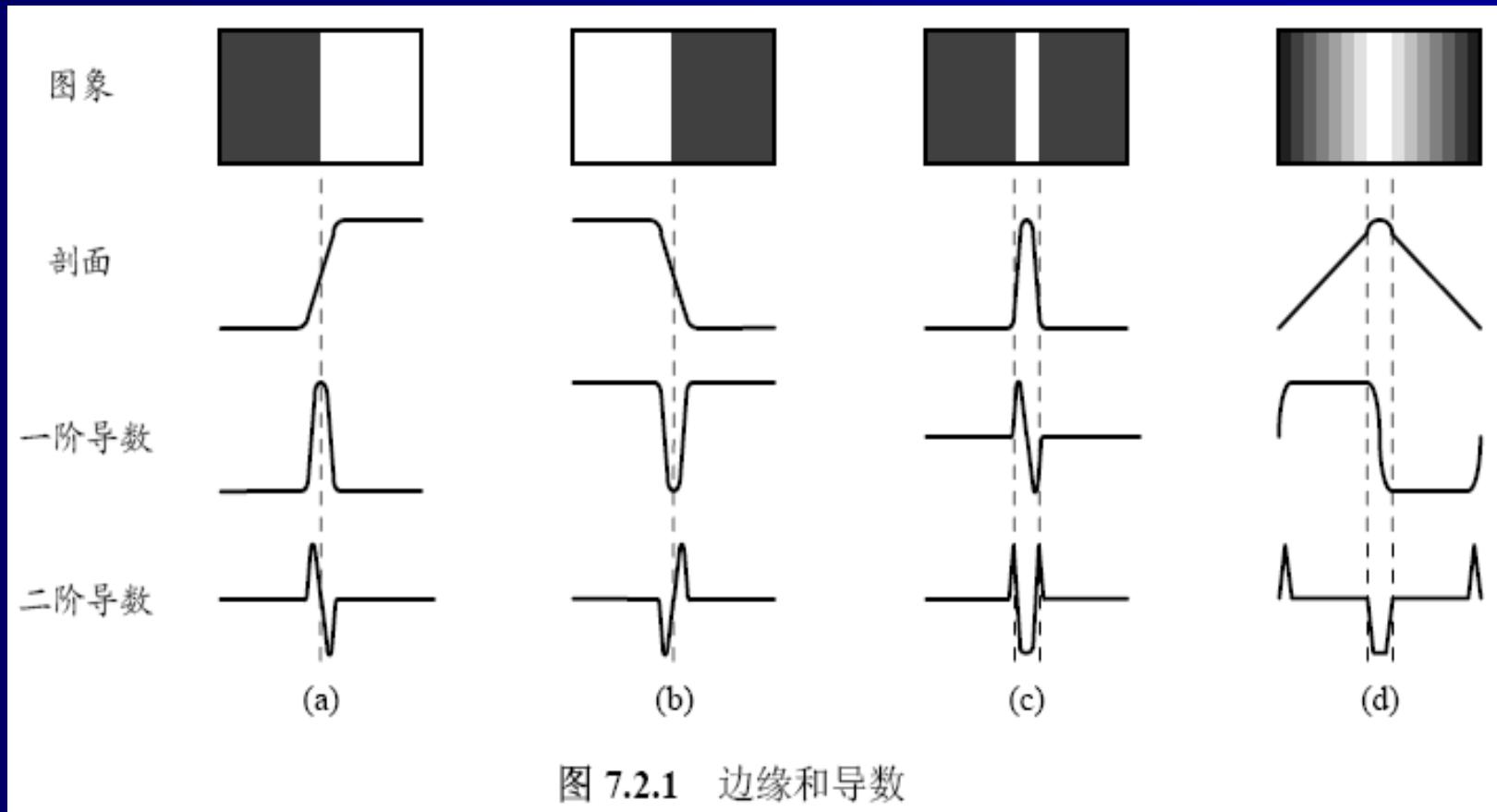


图 7.2.1 边缘和导数



## 7.2 边缘检测

- ◆ 梯度算子

一阶导数算子  $\Leftrightarrow$  矢量

$$\nabla f(x, y) = \begin{bmatrix} G_x & G_y \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial x} & \frac{\partial f}{\partial y} \end{bmatrix}^T$$

$$\text{mag}(\nabla f) = \left[ G_x^2 + G_y^2 \right]^{1/2}$$

$$\phi(x, y) = \arctan(G_y / G_x)$$



## 7.2 边缘检测

### ◆ 梯度算子模板

用模板卷积来近似计算偏导数

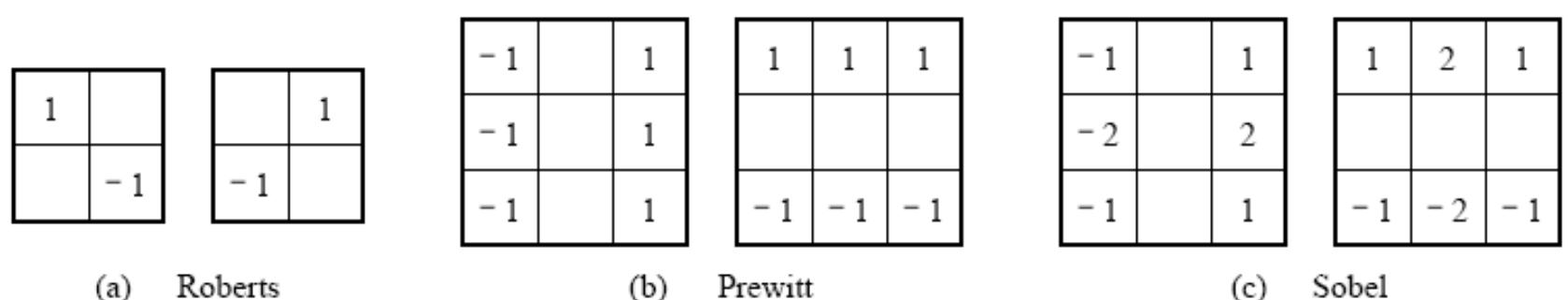


图 7.2.2 几种常用梯度算子的模板



## 7.2 边缘检测

- ◆ 拉普拉斯算子

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

0	-1	0
-1	4	-1
0	-1	0

(a)

-1	-1	-1
-1	8	-1
-1	-1	-1

(b)

图 7.2.5 拉普拉斯算子的模板



## 7.3 轮廓跟踪和图搜索

### ◆ 轮廓跟踪

(1) 确定作为搜索起点的边缘点，起点的选择很重要，整个算法对此的依赖很大

(2) 确定和采取一种合适的数据结构和搜索机理，在已发现的轮廓点基础上确定新的轮廓点，这里要注意研究先前的结果对选择下一个检测像素和下一个结果的影响

(3) 确定搜索终结的准则或终止条件，并在满足条件时停止进程，结束搜索



## 7.3 轮廓跟踪和图搜索

- ◆ 图搜索

将轮廓点和轮廓段用图结构表示

1个图可表示为  $G = \{N, A\}$

对任1段弧( $n_i, n_j$ )都可定义1个代价函数

$$C = \sum_{i=2}^K c(n_{i-1}, n_i)$$

在图中进行搜索对应最小代价的通道



## 7.3 轮廓跟踪和图搜索

### ◆ 图搜索

边缘元素是2个互为4-近邻的像素间的边缘

$$c(p, q) = H - [f(p) - f(q)]$$

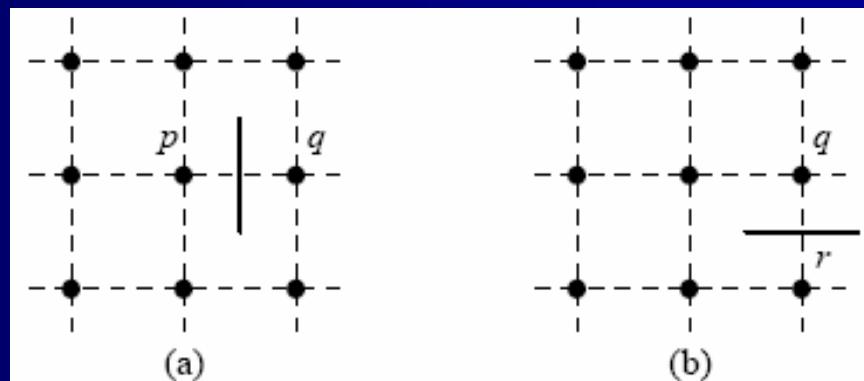


图 7.3.2 边缘元素示例

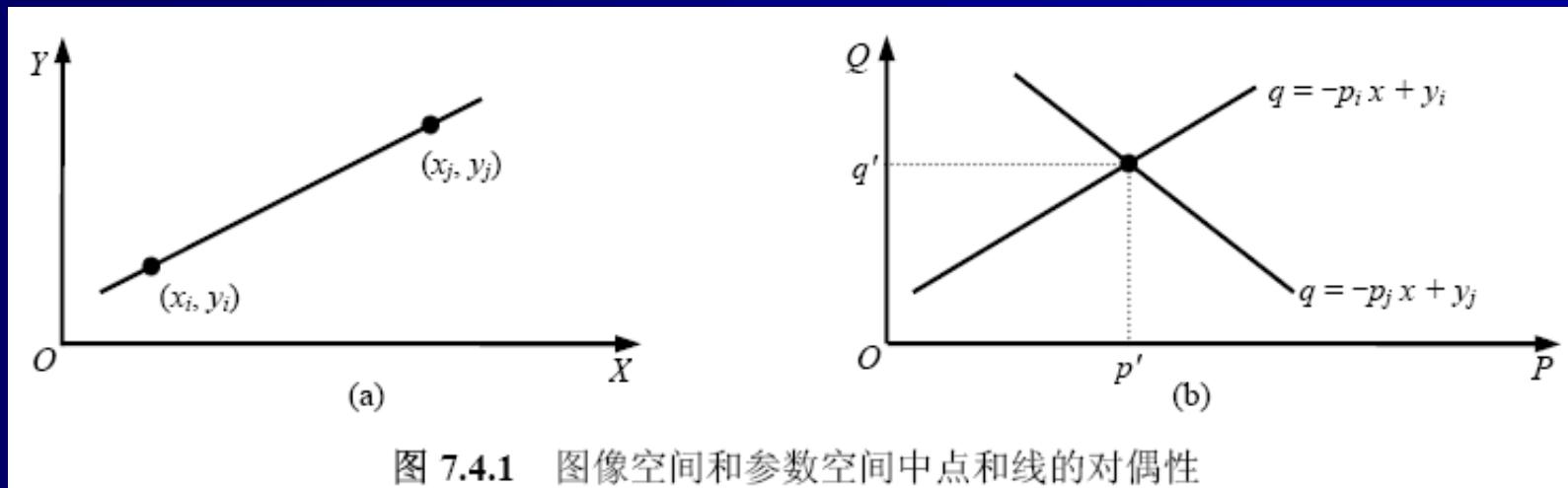


## 7.4 哈夫变换

- ◆ 点-线对偶性

$$y = px + q$$

$$q = -px + y$$





## 7.4 哈夫变换

### ◆ 计算步骤

(1) 对参数空间中参数 $p$ 和 $q$ 的可能取值范围进行量化，根据量化结果构造一个累加数组 $A(p_{\min}: p_{\max}, q_{\min}: q_{\max})$ ，并初始化为零

(2) 对每个XY空间中的给定点让 $p$ 取遍所有可能值，计算出 $q$ ，根据 $p$ 和 $q$ 的值累加 $A$ :  $A(p, q) = A(p, q) + 1$

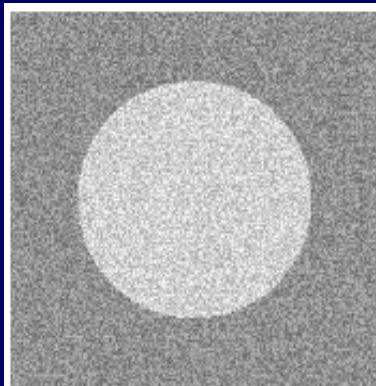
(3) 根据累加后 $A$ 中最大值所对应的 $p$ 和 $q$ ，定出XY中的一条直线， $A$ 中的最大值代表了在此直线上给定点的数目，满足直线方程的点就是共线的



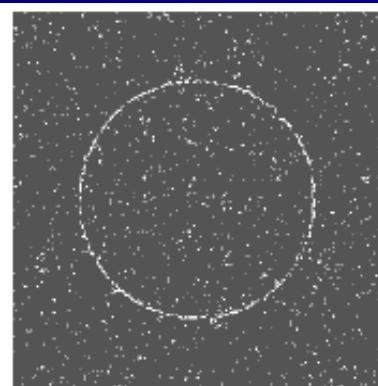
## 7.4 哈夫变换

- ◆ 检测圆周

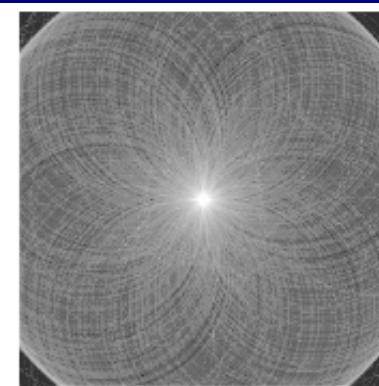
$$(x - a)^2 + (y - b)^2 = r^2$$



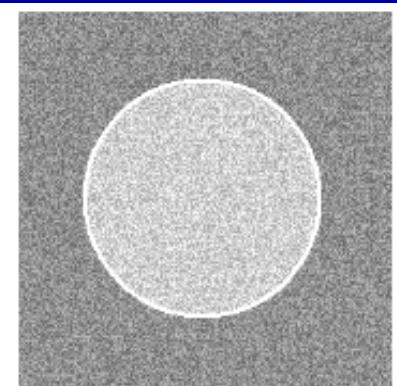
(a)



(b)



(c)



(d)

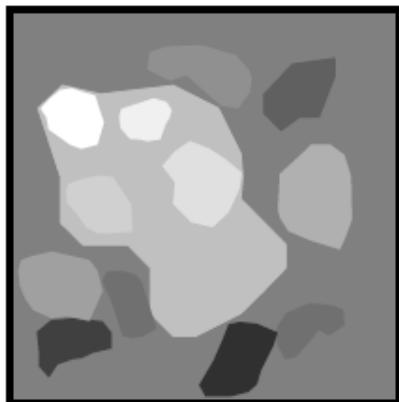
图 7.4.3 用哈夫变换检测圆周



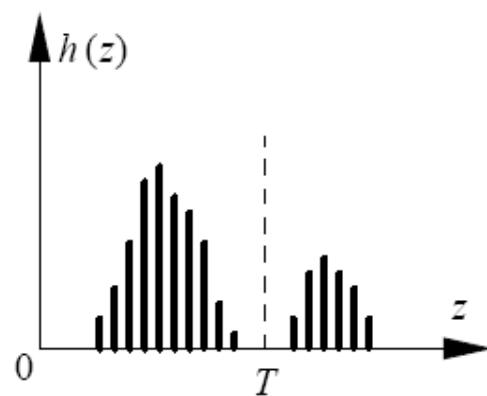
## 7.5 阈值分割

### ◆ 阈值分割

$$g(x,y) = \begin{cases} 1 & \text{如 } f(x,y) > T \\ 0 & \text{如 } f(x,y) \leq T \end{cases}$$



(a)



(b)



(c)

图 7.5.1 单阈值分割图示



## 7.5 阈值分割

- ◆ 极小值点阈值

$$\frac{\partial h(z)}{\partial z} = 0 \quad \text{和} \quad \frac{\partial^2 h(z)}{\partial z^2} > 0$$

- ◆ 最优阈值

混有加性高斯噪声的图像的混合概率密度

$$p(z) = P_1 p_1(z) + P_2 p_2(z) = \frac{P_1}{\sqrt{2\pi}\sigma_1} \exp\left[-\frac{(z-\mu_1)^2}{2\sigma_1^2}\right] + \frac{P_2}{\sqrt{2\pi}\sigma_2} \exp\left[-\frac{(z-\mu_2)^2}{2\sigma_2^2}\right]$$



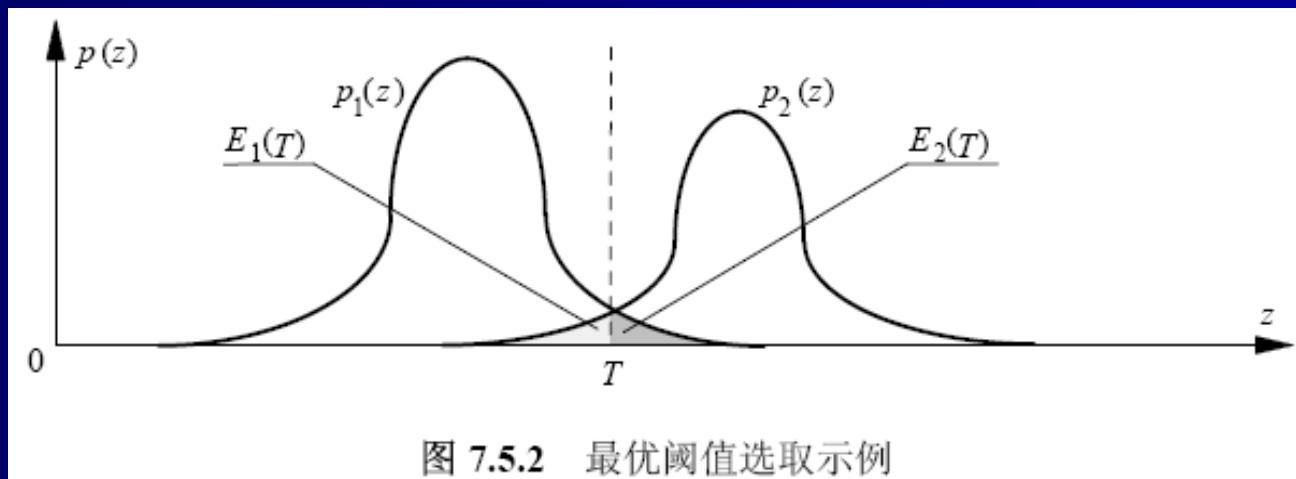
## 7.5 阈值分割

- ◆ 最优阈值

$$E_1(T) = \int_{-\infty}^T p_2(z) dz$$

$$E_2(T) = \int_T^{\infty} p_1(z) dz$$

$$E(T) = P_2 \times E_1(T) + P_1 \times E_2(T)$$





## 7.5 阈值分割

### ◆ 最优阈值

$$P_1 \times p_1(T) = P_2 \times p_2(T)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} A = \sigma_1^2 - \sigma_2^2 \\ B = 2(\mu_1 \sigma_2^2 - \mu_2 \sigma_1^2) \\ C = \sigma_1^2 \mu_2^2 - \sigma_2^2 \mu_1^2 + 2\sigma_1^2 \sigma_2^2 \ln(\sigma_2 P_1 / \sigma_1 P_2) \end{array} \right.$$

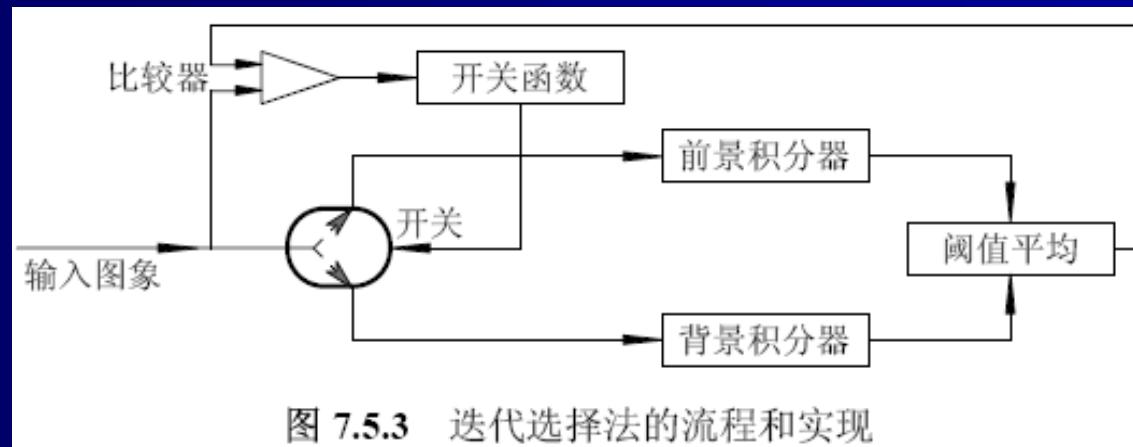
$$T_{\text{optimal}} = \frac{\mu_1 + \mu_2}{2} + \frac{\sigma^2}{\mu_1 - \mu_2} \ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right)$$



## 7.5 阈值分割

### ◆ 迭代阈值

$$T_{i+1} = \frac{1}{2} \left\{ \frac{\sum_{k=0}^{T_i} h_k \cdot k}{\sum_{k=0}^{T_i} h_k} + \frac{\sum_{k=T_i+1}^{L-1} h_k \cdot k}{\sum_{k=T_i+1}^{L-1} h_k} \right\}$$





## 7.6 基于变换直方图的阈值

- ◆ 直方图变换

- ① 具有低梯度值像素的直方图
- ② 具有高梯度值像素的直方图

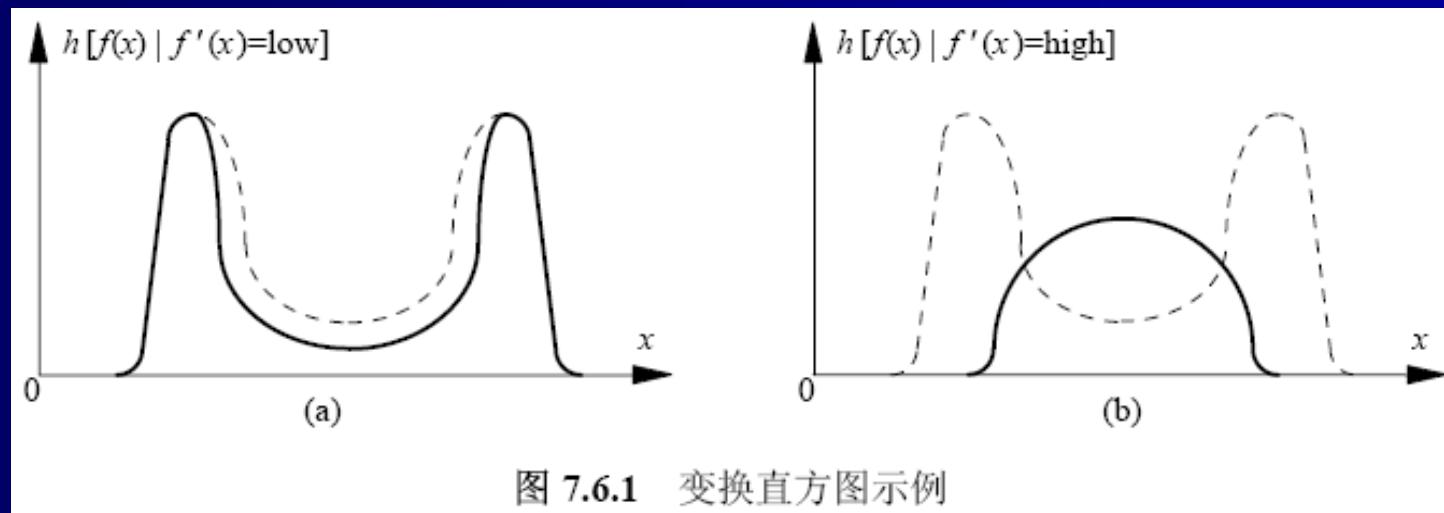


图 7.6.1 变换直方图示例



## 7.6 基于变换直方图的阈值

- ◆ 灰度-梯度散射图

2-D直方图，其中1个轴是灰度值轴，1个轴是梯度值轴

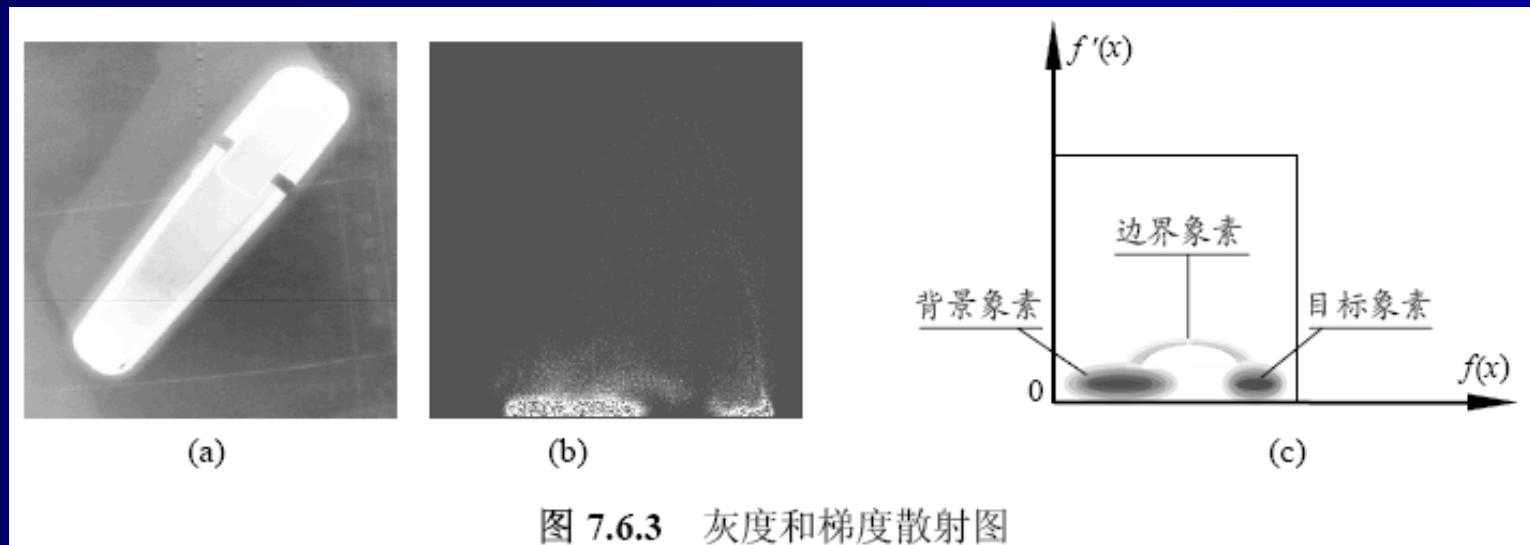


图 7.6.3 灰度和梯度散射图



## 7.7 基于过渡区的阈值

- ◆ 过渡区和有效平均梯度

有效平均梯度的计算

$$EAG = \frac{TG}{TP}$$

$$TG = \sum_{i,j \in Z} g(i,j)$$

$$TP = \sum_{i,j \in Z} p(i,j)$$

$$p(i,j) = \begin{cases} 1 & \text{当 } g(i,j) > 0 \\ 0 & \text{当 } g(i,j) = 0 \end{cases}$$



## 7.7 基于过渡区的阈值

- ◆ 过渡区和有效平均梯度

剪切变换的计算

$$f_{\text{high}}(i, j) = \begin{cases} L & \text{当 } f(i, j) \geq L \\ f(i, j) & \text{当 } f(i, j) < L \end{cases}$$

$$f_{\text{low}}(i, j) = \begin{cases} f(i, j) & \text{当 } f(i, j) > L \\ L & \text{当 } f(i, j) \leq L \end{cases}$$

对应高端和低端剪切的EAG( $L$ )可分别写成  
 $EAG_{\text{high}}(L)$ 和 $EAG_{\text{low}}(L)$



## 7.7 基于过渡区的阈值

- 有效平均梯度的极值点和过渡区边界

设EAG<sub>high</sub>(L)和EAG<sub>low</sub>(L)曲线的极值点分别为L<sub>high</sub>和L<sub>low</sub>

$$L_{\text{high}} = \arg \left\{ \max_L [\text{EAG}_{\text{high}}(L)] \right\}$$

$$L_{\text{low}} = \arg \left\{ \max_L [\text{EAG}_{\text{low}}(L)] \right\}$$

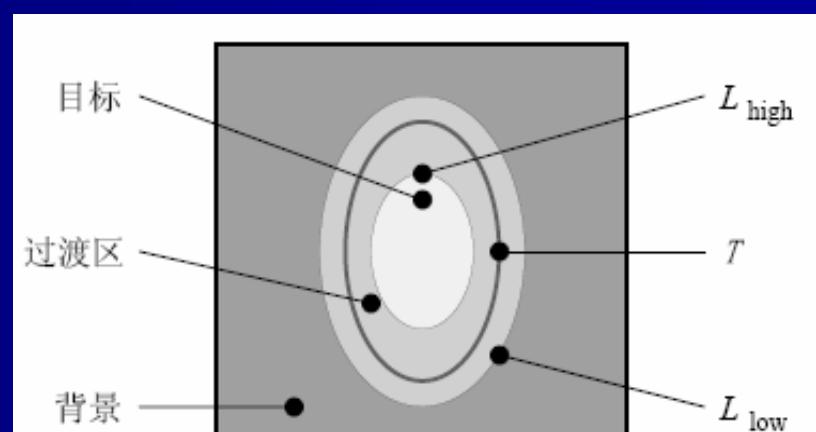


图 7.7.2 过渡区示例



## 7.8 空间聚类

聚类方法也是一种全局的方法，比仅基于边缘检测的方法更抗噪声

- ◆ **K-均值聚类**

最小化如下指标

$$E = \sum_{i=1}^K \sum_{x \in Q_j^{(i)}} \|g(x) - \mu_j^{(i+1)}\|^2$$

运用K-均值法时，理论上并未设类的数目已知，实际中常使用试探法来确定K



## 7.8 空间聚类

### ◆ ISODATA聚类

- (1) 设定 $N$ 个聚类中心位置的初始值
- (2) 对每个特征点求取离其最近的聚类中心位置，通过赋值把特征空间分成 $N$ 个区域
- (3) 分别计算属于各聚类模式的平均值
- (4) 将最初的聚类中心位置与步骤(3)得到的新平均值进行比较，如果相同则停止，如果不相同则返回步骤(2)继续进行



## 7.9 区域生长

- ◆ 区域生长
- ◆ 一种从单个像素出发，逐渐合并以形成所需分割区域的基于区域的串行分割技术

需解决三个问题：

- (1) 选择或确定一组能正确代表所需区域的种子像素
- (2) 确定在生长过程中能将相邻像素包括进来的准则
- (3) 制定让生长过程停止的条件或规则



## 7.9 区域生长

- ◆ 区域生长

选择合适的生长或相似准则

$$T = 3$$

$$T = 2$$

$$T = 7$$

1	0	4	7	5
1	0	4	7	7
0	1	5	5	5
2	0	5	6	5
2	2	5	6	4

(a)

1	1	5	5	5
1	1	5	5	5
1	1	5	5	5
1	1	5	5	5
1	1	5	5	5

(b)

1	1	5	7	5
1	1	5	7	7
1	1	5	5	5
2	1	5	5	5
2	2	5	5	5

(c)

1	1	1	1	1
1	1	1	1	1
1	1	1	1	1
1	1	1	1	1
1	1	1	1	1

(d)

图 7.9.1 区域生长示例



# 本章要点

- 7.1节 图像分割的定义和方法分类
- 7.2节 边缘检测的原理和方法
- 7.3节 轮廓跟踪的原理和图搜索的方法
- 7.4节 将边缘点在变换空间结合起来直接检测目标轮廓的哈夫变换
- 7.5节 阈值分割的原理和基于直方图选取阈值的方法
- 7.6节 通过直方图变换改进阈值选取的原理和方法
- 7.7节 过渡区的概念和基于过渡区的阈值选取
- 7.8节 在特征空间聚类分割的原理和方法
- 7.9节 区域生长分割方法的原理



# 作者联系信息

- 通信地址：北京清华大学电子工程系（100084）
- 办公地址：清华大学东主楼，9区307室
- 办公电话：(010) 62781430
- 传真号码：(010) 62770317
- 电子邮件：[zhangyj@ee.tsinghua.edu.cn](mailto:zhangyj@ee.tsinghua.edu.cn)
- 个人主页：



# 图像处理和分析技术

章毓晋

清华大学电子工程系 100084 北京



# 第8章 目标表达和描述技术

- 8.1 轮廓的链码表达
- 8.2 轮廓线段的近似表达
- 8.3 边界标记
- 8.4 目标的层次表达
- 8.5 目标的骨架表达
- 8.6 运动表达
- 8.7 目标轮廓的傅里叶描述
- 8.8 目标轮廓的小波描述



## 8.1 轮廓的链码表达

- ◆ 链码表达

对区域轮廓点的1种编码表示方法

利用一系列具有特定长度和方向的相连的直线段来表示目标的轮廓

每个线段的长度固定而方向数目取为有限

轮廓的起点需用（绝对）坐标表示，其余点都可只用接续方向来代表偏移量



# 8.1 轮廓的链码表达

- ◆ 链码表达

4-方向和8-方向链码

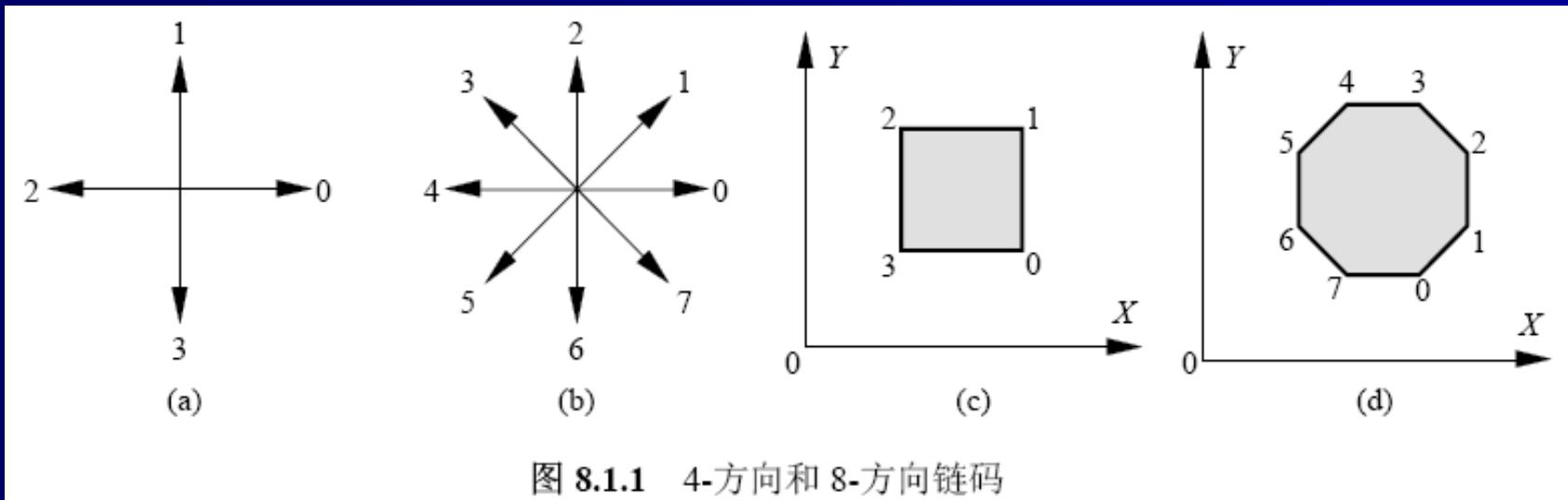


图 8.1.1 4-方向和 8-方向链码



## 8.1 轮廓的链码表达

### ◆ 链码归一化

起点归一化：把链码看作由方向数构成的自然数，将这些方向数循环以使它们所构成的自然数的值最小

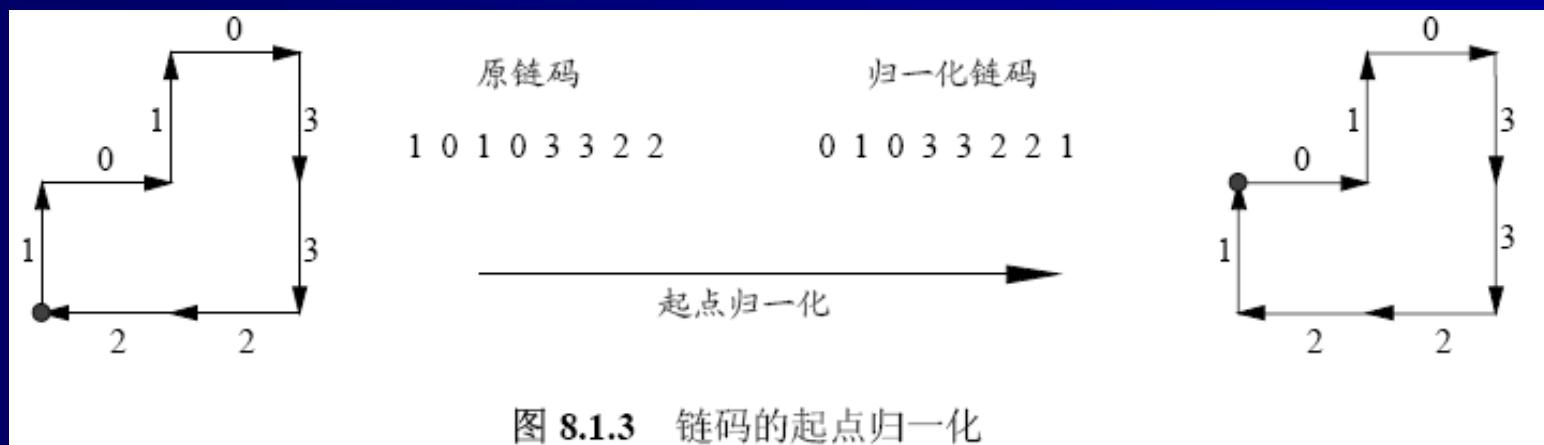


图 8.1.3 链码的起点归一化



## 8.1 轮廓的链码表达

### ◆ 链码归一化

旋转归一化：利用链码的一阶差分来重新构造1个序列，这个差分可用相邻2个方向数（按反方向）相减得到

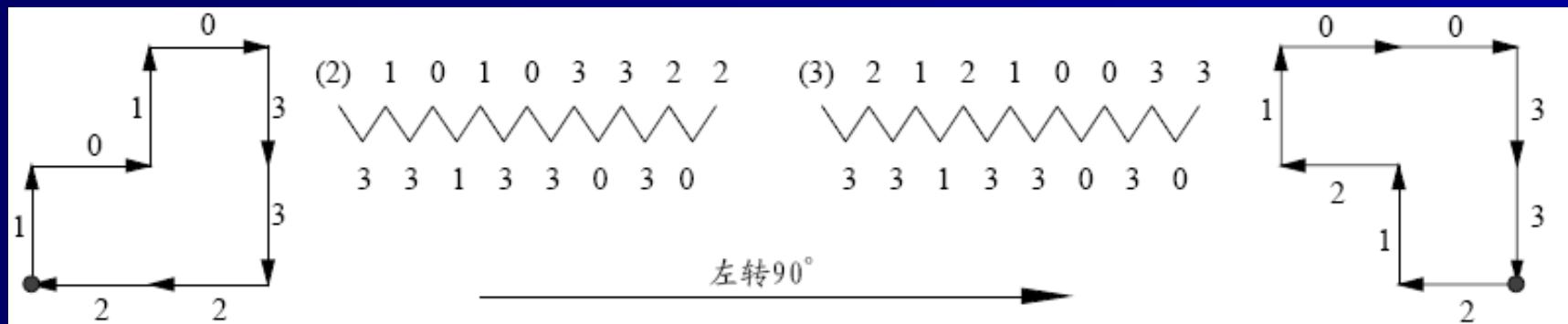


图 8.1.4 链码的旋转归一化（利用一阶差分）



## 8.2 轮廓线段的近似表达

多边形是一系列线段的封闭集合，它可用来逼近大多数实用的曲线到任意的精度

- ◆ 最小周长多边形

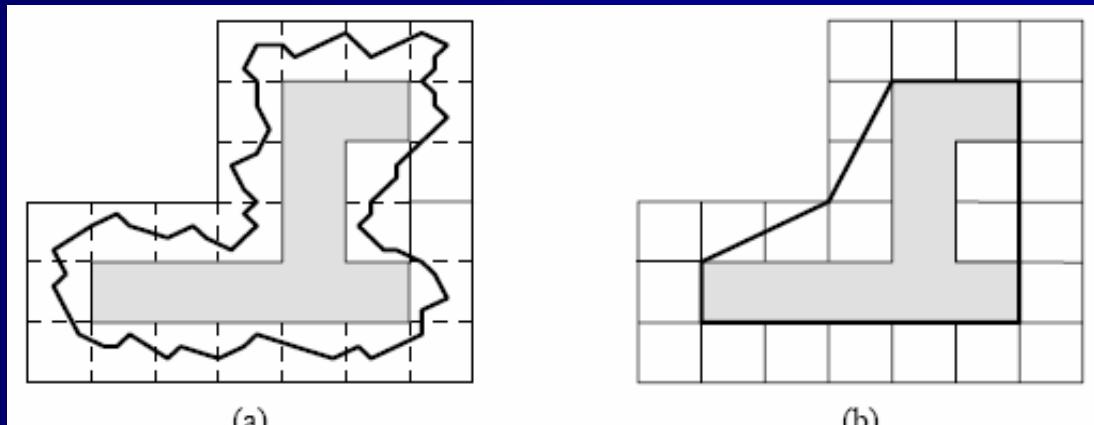


图 8.2.1 最小周长多边形法



## 8.2 轮廓线段的近似表达

- ◆ 聚合逼近多边形

沿轮廓依次连接像素

先从点 $a$ 出发，依次做  
直线 $ab, ac, ad, ae$ 等

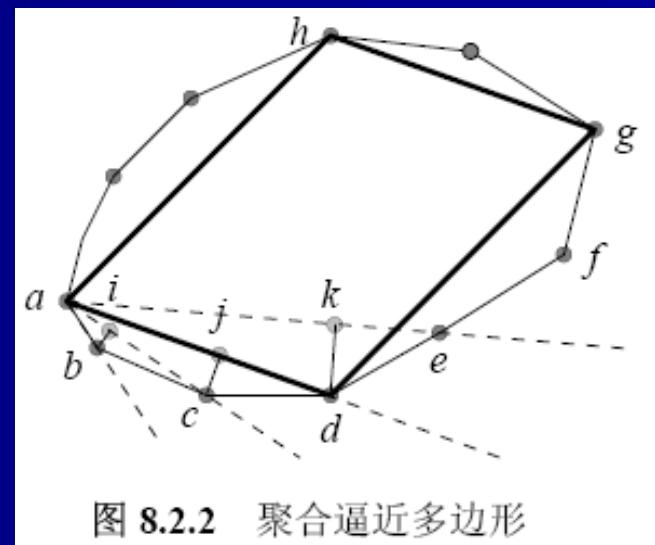


图 8.2.2 聚合逼近多边形



## 8.2 轮廓线段的近似表达

- ◆ 分裂逼近多边形

将轮廓依次分段

第一步先做 $ag$ , 计算 $di$ 和 $hj$ 。进一步计算 $b, c, e, f$ 等各轮廓点与各相应直线的距离

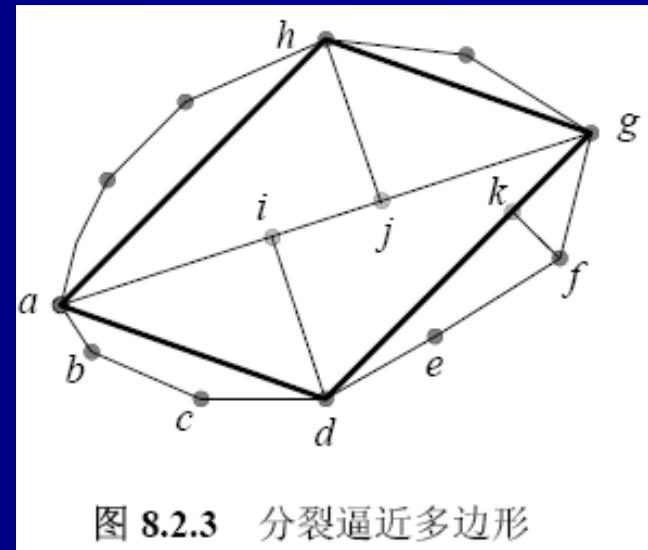


图 8.2.3 分裂逼近多边形



## 8.3 边界标记

把2-D的边界用1-D的较易描述的函数形式来表达

- ◆ 距离为角度的函数

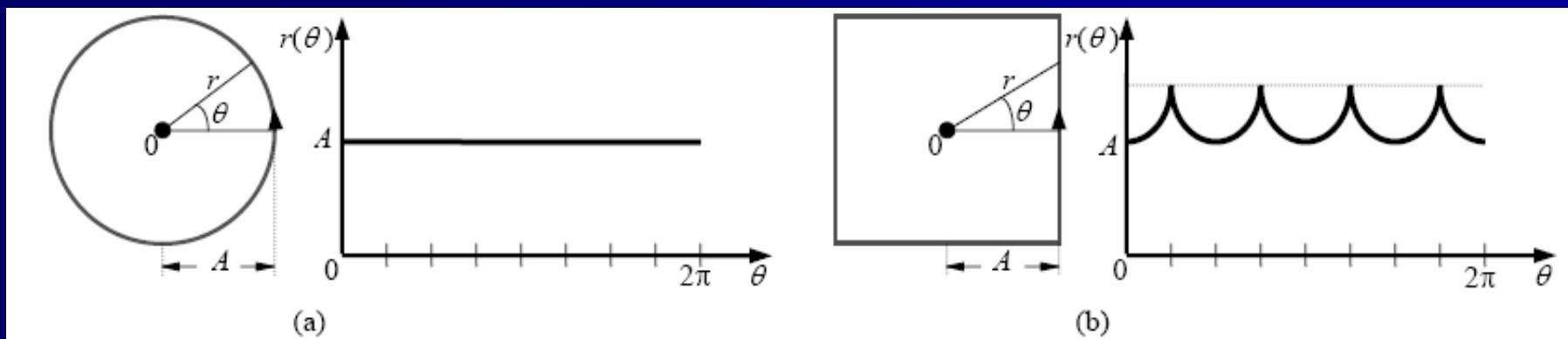


图 8.3.1 两个距离为角度函数的标记



## 8.3 边界标记

- ◆  $y-s$  曲线

切线角为弧长的函数

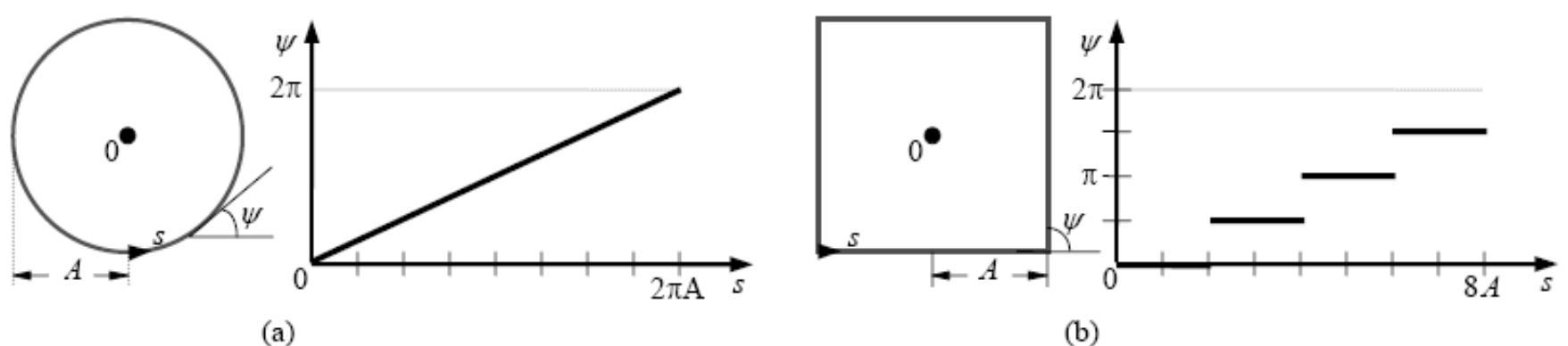


图 8.3.2 两个切线角为弧长函数的标记



## 8.3 边界标记

- ◆ 斜率密度曲线

可看作将 $y-s$ 曲线沿 $y$ 轴投影的结果

切线角的直方图 $h(q)$

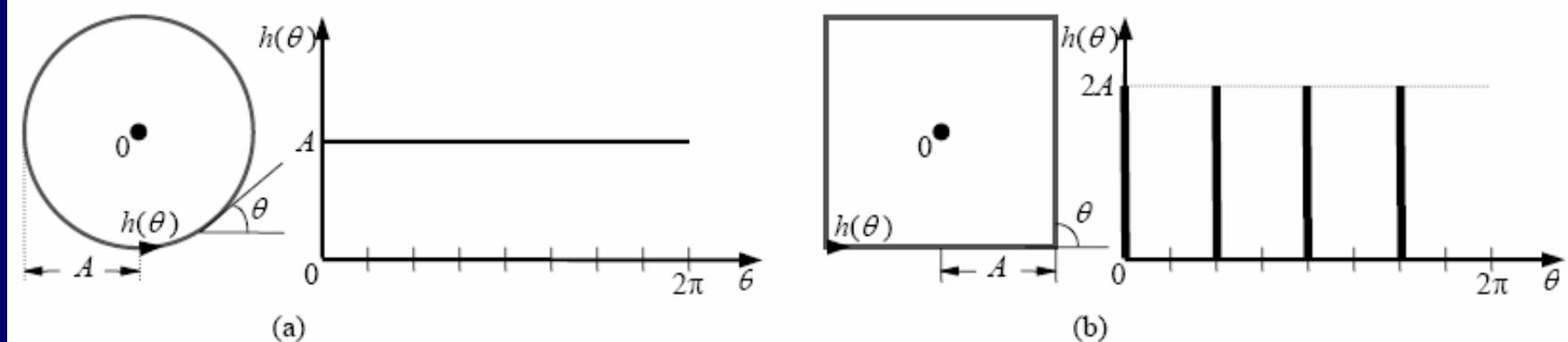


图 8.3.3 两个斜率密度函数的标记



## 8.3 边界标记

- ◆ 距离为弧长的函数

一种通过从一个点开始沿边界围绕目标逐渐而做出来的基于边界的标记

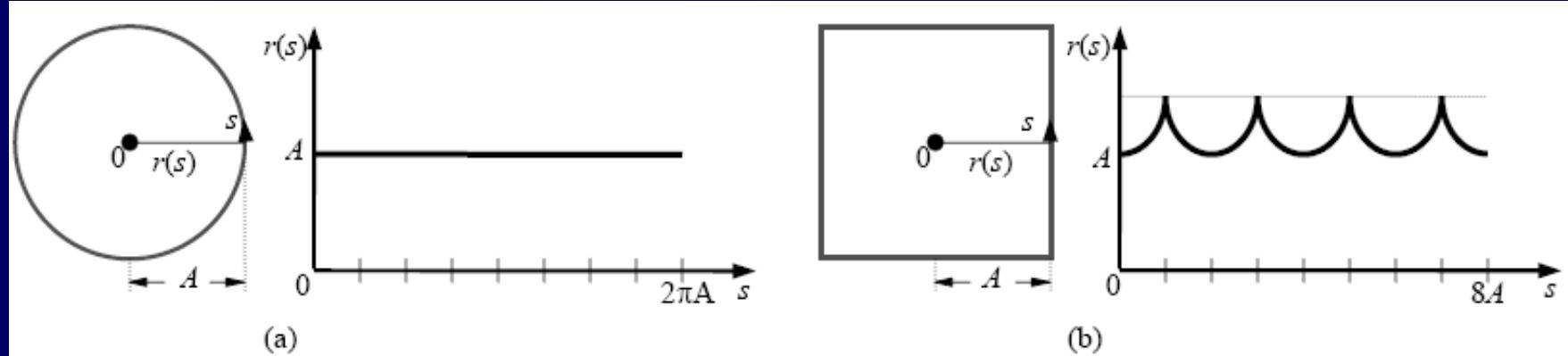


图 8.3.4 两个距离为弧长函数的标记



## 8.4 目标的层次表达

- ◆ 四叉树表达法

在分解时每次将图像一分为四

$$N = \sum_{k=0}^n 4^k = \frac{4^{n+1} - 1}{3} \approx \frac{4}{3} 4^n$$

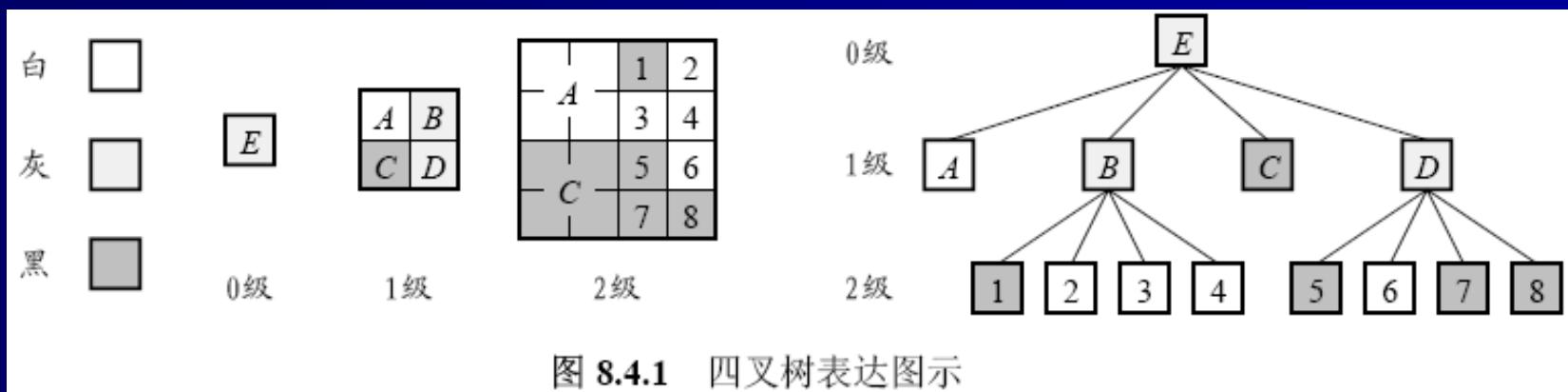


图 8.4.1 四叉树表达图示



## 8.4 目标的层次表达

- ◆ 二叉树表达法  
在分解时  
每次将图像  
一分为二

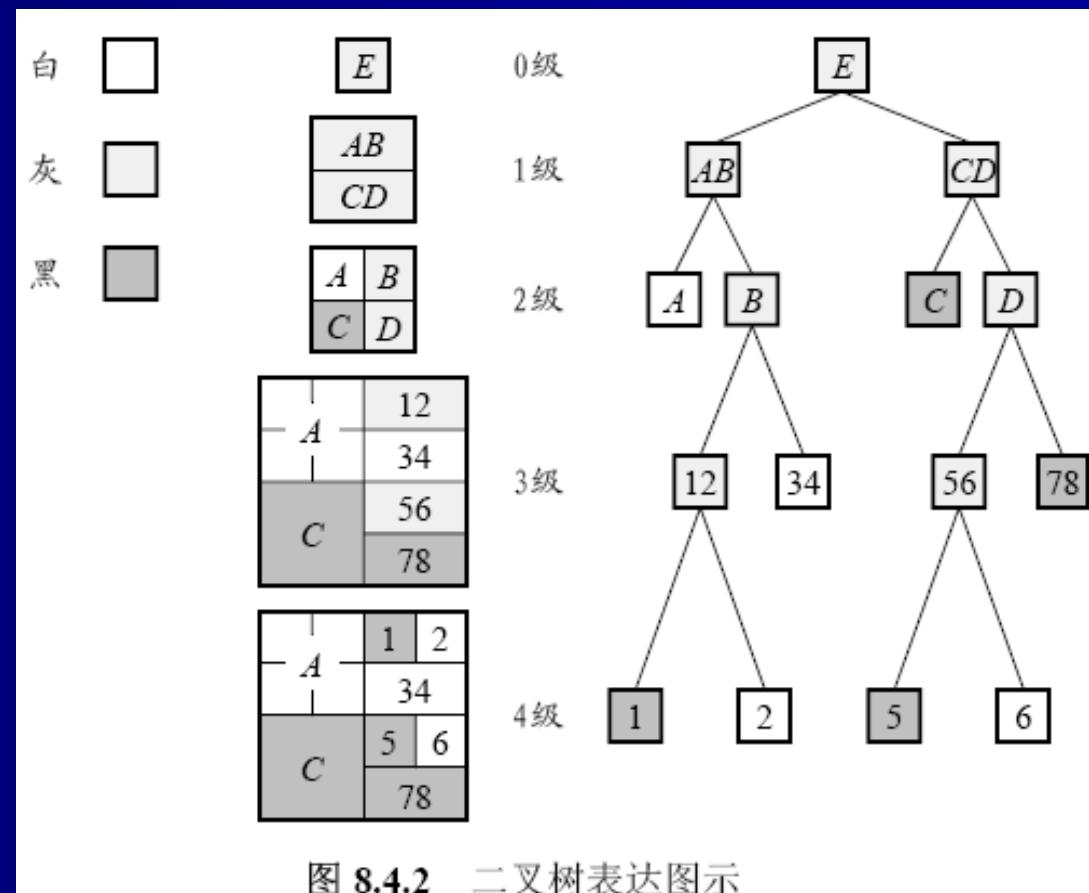


图 8.4.2 二叉树表达图示



## 8.5 目标的骨架表达

- ◆ 骨架和骨架点

一种简化的目标区域表达方法

骨架点保持了其与轮廓点距离最小的性质  
是用1个点与1个点集的最小距离来定义的

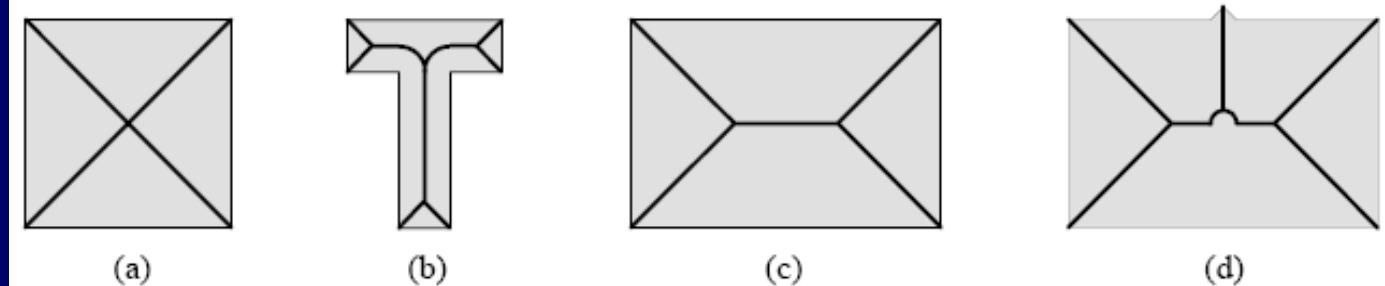


图 8.5.1 用欧氏距离算出的一些骨架的示例



## 8.5 目标的骨架表达

### ◆ 骨架算法

- (1) 考虑以轮廓点为中心的8-邻域，记中心点为 $p_1$ ，其邻域的8个点顺时针绕中心点分别记为 $p_2, p_3, \dots, p_9$ ，其中 $p_2$ 在 $p_1$ 上方

首先标记同时满足下列条件的轮廓点：

$$(1.1) \quad 2 \leq N(p_1) \leq 6$$

$$(1.2) \quad S(p_1) = 1$$

$$(1.3) \quad p_2 \bullet p_4 \bullet p_6 = 0$$

$$(1.4) \quad p_4 \bullet p_6 \bullet p_8 = 0$$

$p_9$	$p_2$	$p_3$
$p_8$	$p_1$	$p_4$
$p_7$	$p_6$	$p_5$

(a)



## 8.5 目标的骨架表达

- ◆ 骨架算法

(2) 同第(1)步，仅改两个条件

$$(2.3) \quad p_2 \cdot p_4 \cdot p_8 = 0$$

$$(2.4) \quad p_2 \cdot p_6 \cdot p_8 = 0$$

1	1	1
1	1	1
0	0	0

(b)

0	1	0
0	1	0
0	0	0

(c)

1	1	1
1	1	1
1	0	1

(d)

0	0	0
0	1	1
0	1	1

(e)

1	1	0
1	1	0
0	0	0

(f)

图 8.5.2 二值目标区域骨架的计算



## 8.6 运动表达

- ◆ 运动分类

区分前景运动和背景运动

前景运动：目标在场景中的自身运动，又称为局部运动，整体性强、比较规律

背景运动：主要是由进行拍摄的摄像机的运动所造成的帧图像内所有点的整体移动，又称为全局运动或摄像机运动，常比较复杂



## 8.6 运动表达

- 全局运动

由摄像机的运动而产生

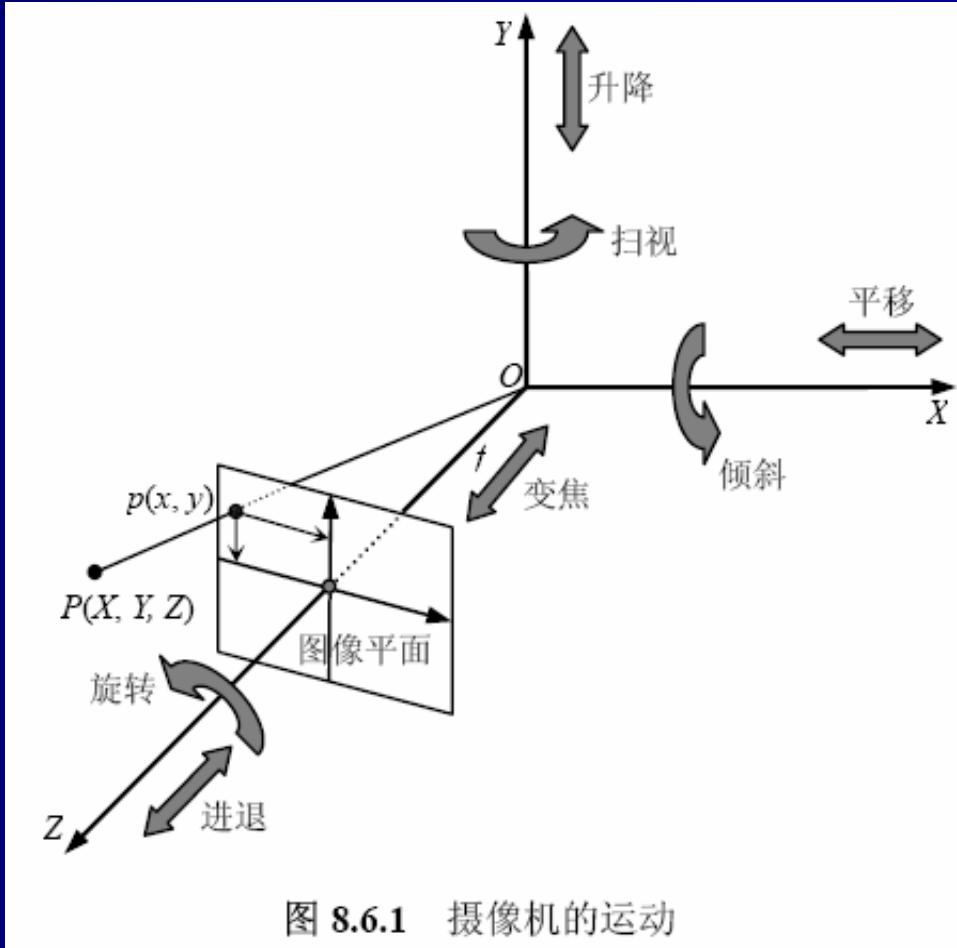


图 8.6.1 摄像机的运动



## 8.6 运动表达

- ◆ 全局运动

常采用参数模型的方法来描述

6参数仿射模型

$$\begin{cases} u = k_0x + k_1y + k_2 \\ v = k_3x + k_4y + k_5 \end{cases}$$

运动矢量场表示



图 8.6.2 全局运动矢量叠加在原图上



## 8.6 运动表达

- ◆ 局部运动

常对应场景中目标的运动

比较复杂多样，可采用紧凑表达方式

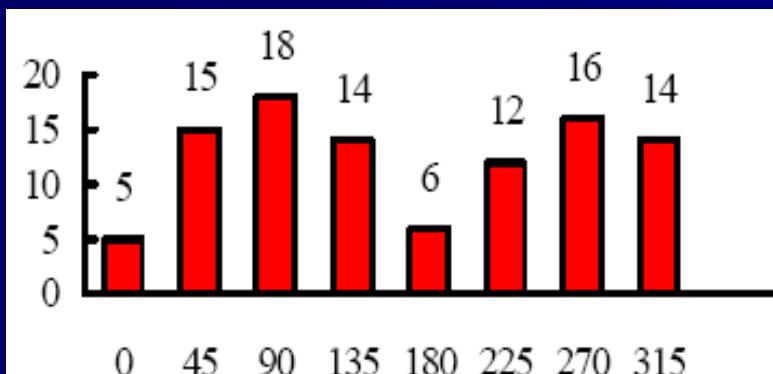


图 8.6.4 运动矢量方向直方图

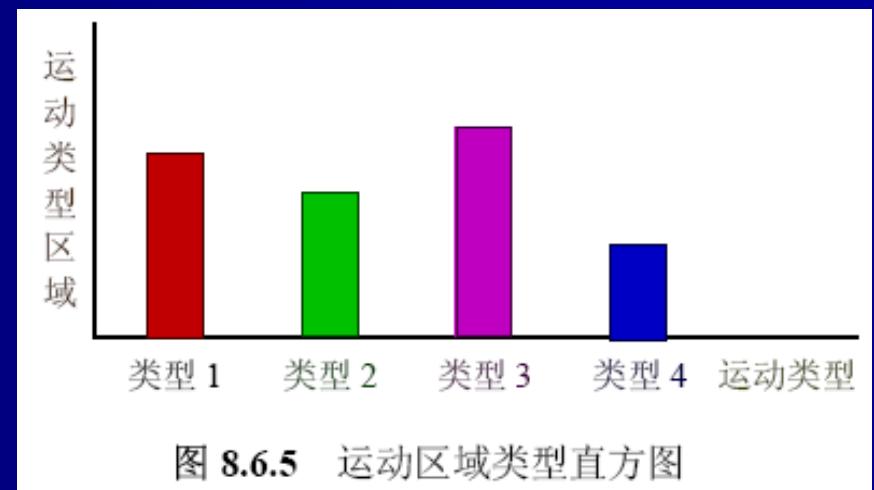


图 8.6.5 运动区域类型直方图



## 8.7 目标轮廓的傅里叶描述

- ◆ 轮廓的傅里叶描述

将2-D的问题简化为1-D的问题

两种表示：

在空间平面XY上

在复平面UV上

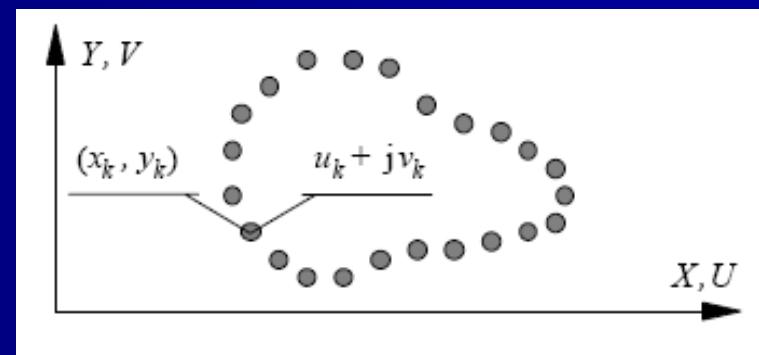


图 8.7.1 轮廓点的 2 种表示方法

$$s(k) = u(k) + jv(k) \quad k = 0, 1, \dots, N-1$$

$$S(w) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} s(k) \exp[-j2\pi w k / N] \quad w = 0, 1, \dots, N-1$$



## 8.7 目标轮廓的傅里叶描述

- ◆ 轮廓的傅里叶描述

轮廓傅里叶描述的傅里叶反变换

$$s(k) = \sum_{w=0}^{N-1} S(w) \exp[j2\pi w k / N] \quad k = 0, 1, \dots, N-1$$

只利用  $S(w)$  的前  $M$  个系数

$$\hat{s}(k) = \sum_{w=0}^{M-1} S(w) \exp[j2\pi w k / N] \quad k = 0, 1, \dots, N-1$$

为重建轮廓点所用的频率项少了



## 8.7 目标轮廓的傅里叶描述

- ◆ 傅里叶描述随轮廓的变化

参考傅里叶变换的性质

表 8.7.1 傅里叶描述受轮廓平移、旋转、尺度变化以及计算起点的影响

变 换	轮 廓	傅里叶描述
平移( $\Delta x, \Delta y$ )	$s_t(k) = s(k) + \Delta xy$	$S_t(w) = S(w) + \Delta xy \cdot \delta(w)$
旋转( $\theta$ )	$S_r(k) = s(k) \exp(j\theta)$	$S_r(w) = S(w) \exp(j\theta)$
尺度( $C$ )	$S_c(k) = C \cdot s(k)$	$S_c(w) = C \cdot S(w)$
起点( $k_0$ )	$s_p(k) = s(k - k_0)$	$S_p(w) = S(w) \exp(-j2\pi k_0 w/N)$

注:  $\Delta xy = \Delta x + j\Delta y$



## 8.8 目标轮廓的小波描述

- ◆ 小波轮廓描述符

基于小波变换的轮廓描述符

小波函数族

$$\psi_{m,n}(t) = \frac{1}{\sqrt{2^m}} \psi\left(\frac{t - n2^m}{2^m}\right) = 2^{-m/2} \psi(2^{-m}t - n)$$

小波变换系数

$$D_{m,n} = \langle f, \psi_{m,n} \rangle \equiv \int f(t) \overline{\psi}_{m,n}(t) dt$$



## 8.8 目标轮廓的小波描述

- ◆ 与傅里叶轮廓描述符对比

小波描述符在局部的波动对应原始轮廓的局部变化；而傅里叶描述符局部的波动对应原始轮廓全局不规则的畸变

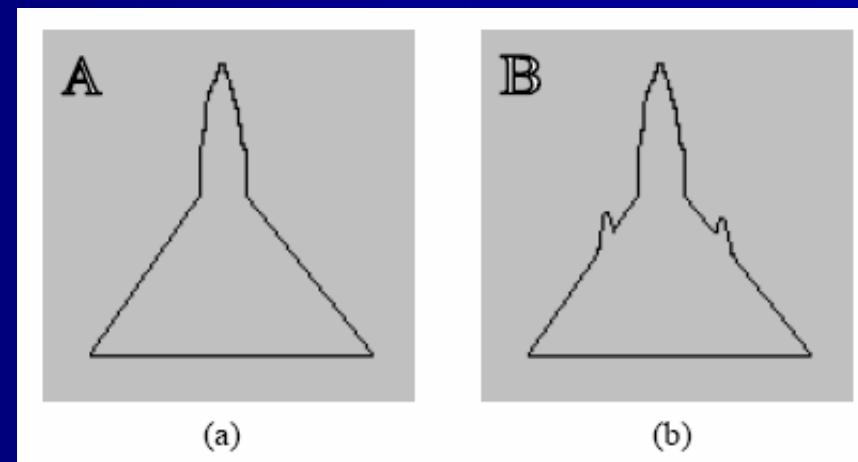


图 8.8.1 具有局部差异的两幅轮廓图像



## 8.8 目标轮廓的小波描述

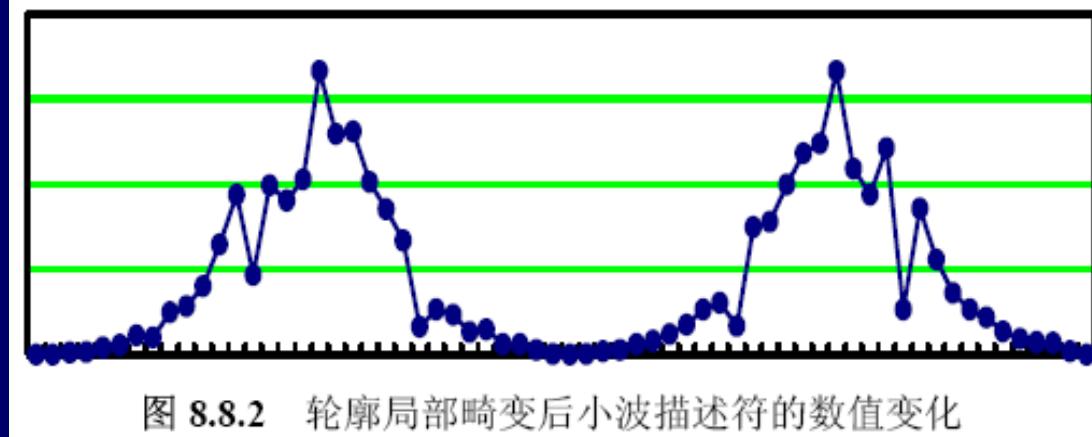


图 8.8.2 轮廓局部畸变后小波描述符的数值变化

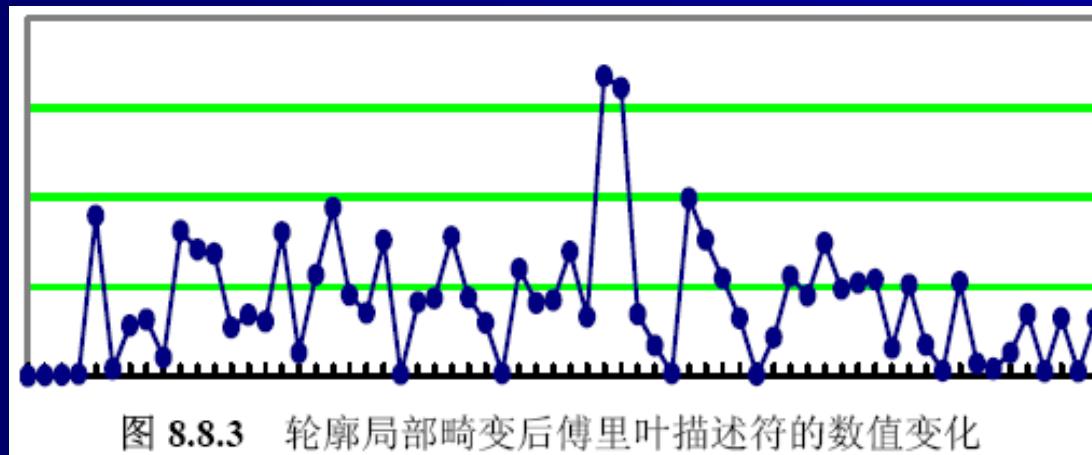


图 8.8.3 轮廓局部畸变后傅里叶描述符的数值变化



# 本章要点

- 8.1节 对轮廓的链码表达方式和对链码归一化的方法
- 8.2节 对轮廓的多边形表达方式和获取多边形的方法
- 8.3节 一类特殊的轮廓表达方法——标记
- 8.4节 对目标区域的层次表达原理和常见方法
- 8.5节 对目标区域的骨架表达方式和求取方法
- 8.6节 对全局运动和局部运动的表达方法
- 8.7节 对目标轮廓的傅里叶描述方法
- 8.8节 对目标轮廓的小波描述方法及与傅里叶描述方法的比较



# 作者联系信息

- 通信地址：北京清华大学电子工程系（100084）
- 办公地址：清华大学东主楼，9区307室
- 办公电话：(010) 62781430
- 传真号码：(010) 62770317
- 电子邮件：[zhangyj@ee.tsinghua.edu.cn](mailto:zhangyj@ee.tsinghua.edu.cn)
- 个人主页：



# 图像处理和分析技术

章毓晋

清华大学电子工程系 100084 北京



# 第9章 特征测量技术

- 9.1 轮廓基本参数及测量
- 9.2 区域基本参数及测量
- 9.3 区域形状参数及测量
- 9.4 区域纹理参数及测量
- 9.5 轮廓矩和区域矩
- 9.6 运动检测及测量
- 9.7 特征测量的精确度



# 9.1 轮廓基本参数及测量

## ◆ 轮廓的长度

所包围区域的周长

区域轮廓点（即边界点）：

- ①  $P$ 本身属于区域 $R$
- ②  $P$ 的邻域中有像素不属于区域 $R$

4-方向连通轮廓 $B_4$ 和8-方向连通轮廓 $B_8$

$$B_4 = \{(x, y) \in R \mid N_8(x, y) - R \neq 0\}$$

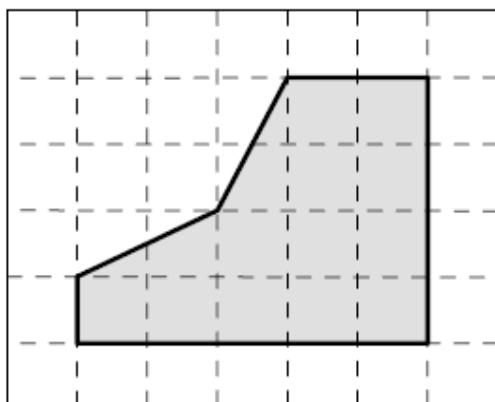
$$B_8 = \{(x, y) \in R \mid N_4(x, y) - R \neq 0\}$$



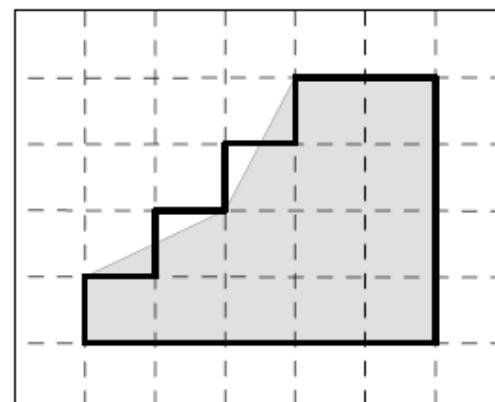
# 9.1 轮廓基本参数及测量

- ◆ 轮廓的长度

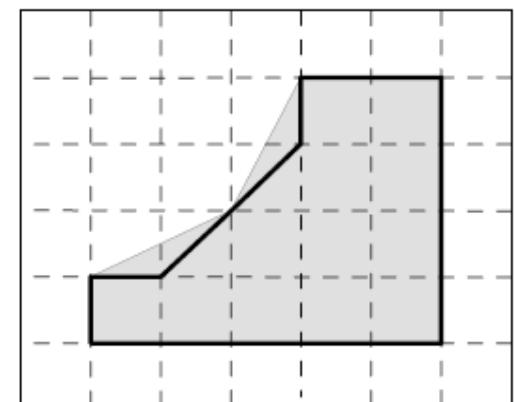
$$\|B\| = \#\{k \mid (x_{k+1}, y_{k+1}) \in N_4(x_k, y_k)\} + \sqrt{2} \#\{k \mid (x_{k+1}, y_{k+1}) \in N_D(x_k, y_k)\}$$



(a)



(b)



(c)

图 9.1.1 轮廓长度的计算



# 9.1 轮廓基本参数及测量

- ◆ 轮廓的直径

轮廓上相隔最远的2点之间的距离

$$Dia_d(B) = \max_{i,j}[D_d(b_i, b_j)] \quad b_i \in B, \quad b_j \in B$$

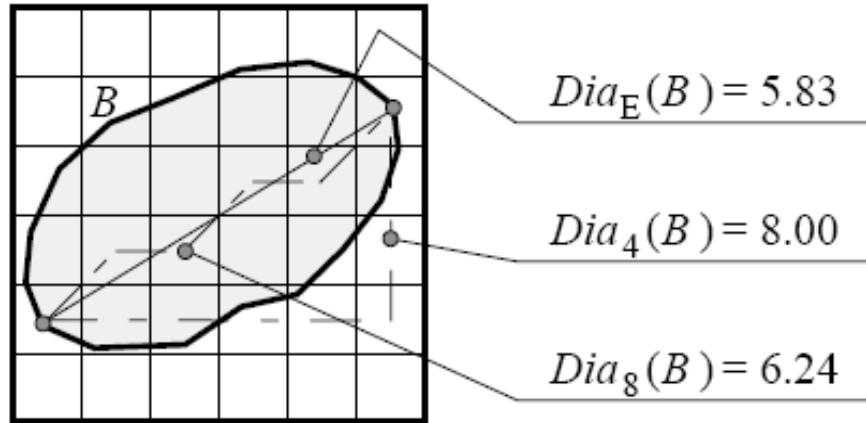


图 9.1.2 轮廓直径的计算



# 9.1 轮廓基本参数及测量

- ◆ 斜率，曲率和角点

斜率能表示轮廓上各点的指向

曲率是斜率的改变率，它描述了轮廓上各点沿轮廓方向变化的情况。当在1个点的曲率大于零则该点属于凸段的一部分，否则为凹段的一部分

曲率的局部极值点称为角点，它在一定程度上反映了轮廓的复杂性

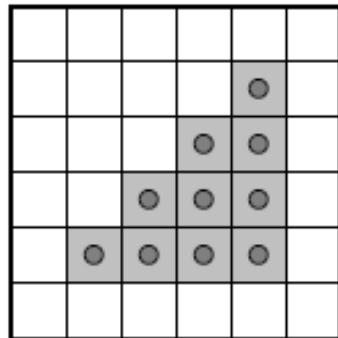


## 9.2 区域基本参数及测量

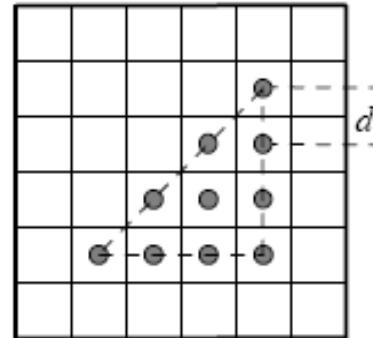
### ◆ 区域面积

对属于区域的像素个数进行计数

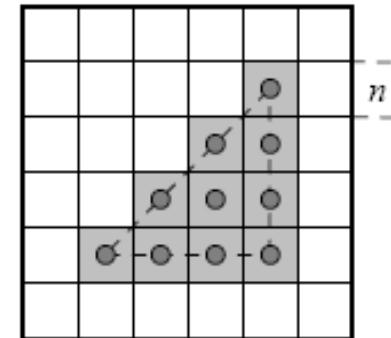
$$A = \sum_{(x,y) \in R} 1$$



(a)



(b)



(c)

图 9.2.1 几种面积计算方法举例



## 9.2 区域基本参数及测量

- ◆ 区域重心

区域对区域的1种全局描述符  
重心点的坐标是根据所有属于区域的点计算出来的：

$$\bar{x} = \frac{1}{A} \sum_{(x,y) \in R} x$$

$$\bar{y} = \frac{1}{A} \sum_{(x,y) \in R} y$$



## 9.2 区域基本参数及测量

- ◆ 区域灰度特性

要结合原始灰度图和分割图来得到

(1) 透射率

$$T = \text{穿透目标的光} / \text{入射的光}$$

(2) 光密度

$$OD = \lg(1/T) = -\lg T$$

(3) 积分光密度

$$IOD = \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y)$$

$$IOD = \sum_{k=0}^{G-1} kH(k)$$



## 9.2 区域基本参数及测量

- ◆ 拓扑描述符和欧拉数

拓扑学研究图形不受畸变变形（不包括撕裂或粘贴）影响的性质

欧拉数是1种区域的拓扑描述符，描述的是区域的连通性

区域内的连通组元（其中任2点可用完全在内部的曲线相连接的点集合）的个数 $C$ 和区域内的孔（被连通组元包围的点集合）的个数 $H$ 都是常用的拓扑性质

$$E = C - H$$



## 9.3 区域形状参数及测量

### ◆ 形状参数

在一定程度上描述了区域的紧凑性

$$F = \frac{\|B\|^2}{4\pi A}$$

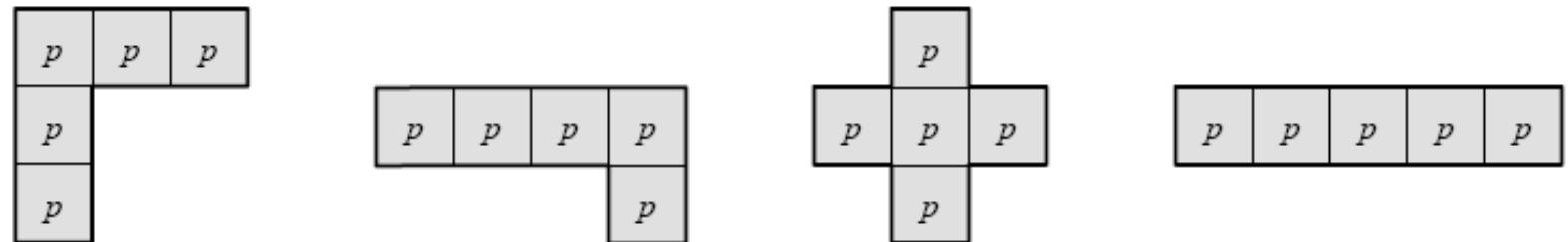


图 9.3.1 形状参数相同但形状不同的例子



## 9.3 区域形状参数及测量

- ◆ 偏心率

在一定程度上描述了区域的紧凑性  
利用整个区域的所有像素来计算

$$p = \sqrt{2 / \left[ (A + B) - \sqrt{(A - B)^2 + 4C^2} \right]}$$

$$q = \sqrt{2 / \left[ (A + B) + \sqrt{(A - B)^2 + 4C^2} \right]}$$

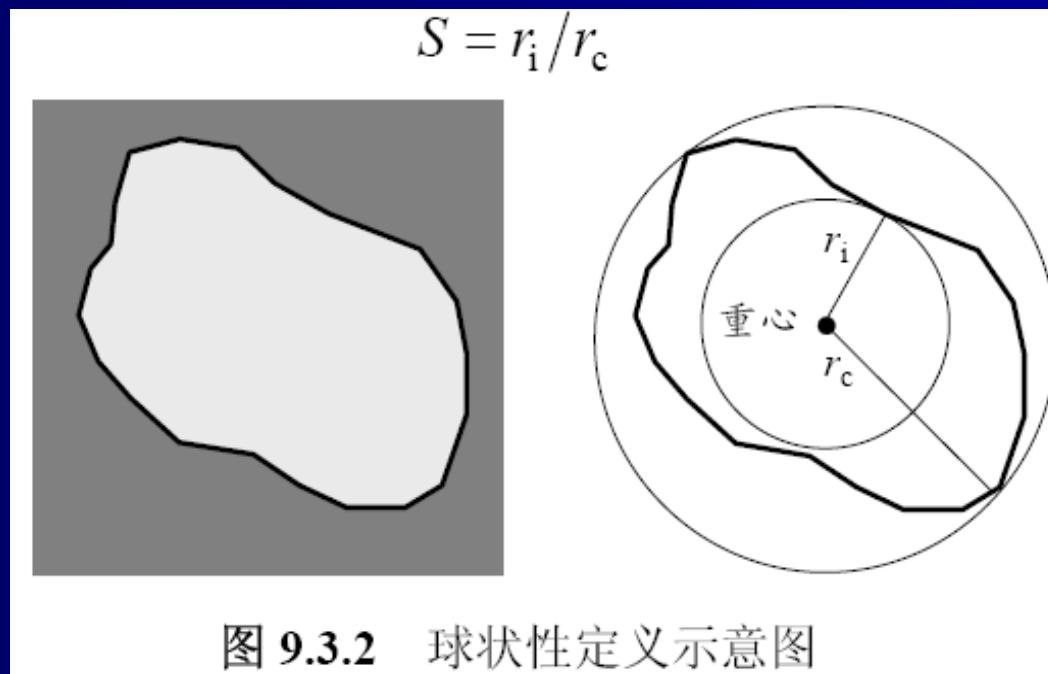
区域的偏心率可由 $p$ 和 $q$ 的比值得到



## 9.3 区域形状参数及测量

- ◆ 球状性

一种描述2-D目标形状的参数





## 9.3 区域形状参数及测量

- ◆ 圆形性

用区域 $R$ 的所有轮廓点定义的特征量

$$C = \frac{\mu_R}{\sigma_R}$$

$$\mu_R = \frac{1}{K} \sum_{k=0}^{K-1} \| (x_k, y_k) - (\bar{x}, \bar{y}) \|$$

$$\sigma_R^2 = \frac{1}{K} \sum_{k=0}^{K-1} [ \| (x_k, y_k) - (\bar{x}, \bar{y}) \| - \mu_R ]^2$$



## 9.4 区域纹理参数及测量

- ◆ 共生矩阵

纹理是图像分析中常用的概念，可以认为是由许多相互接近的、互相编织的元素构成，它们常富有周期性

常用的3种纹理描述方法是：① 统计法；  
② 结构法；③ 频谱法

### 共生矩阵

$$P(g_1, g_2) = \frac{\#\{(x_1, y_1), (x_2, y_2)] \in S \mid f(x_1, y_1) = g_1 \& f(x_2, y_2) = g_2\}}{\#S}$$



## 9.4 区域纹理参数及测量

- ◆ 基于共生矩阵的纹理描述符

14个

纹理描述符

$$\text{设 } P_x(i) = \sum_{j=1}^N P(i, j) \quad i = 1, 2, \dots, N$$

$$P_y(j) = \sum_{i=1}^N P(i, j) \quad j = 1, 2, \dots, N$$

$$P_{x+y}(k) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N P(i, j) \quad k = i + j = 2, 3, \dots, 2N$$

$$P_{x-y}(k) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N P(i, j) \quad k = |i - j| = 0, 1, \dots, N-1$$



## 9.5 轮廓矩和区域矩

- ◆ 轮廓矩

轮廓可看作由一系列曲线线段连接组成

把曲线线段集合 表示成1个1-D函数 $f(r)$

$f(r)$ 的均值

$$m = \sum_{i=1}^L r_i f(r_i)$$

$f(r)$ 对均值的 $n$ 阶矩

$$\mu_n(r) = \sum_{i=1}^L (r_i - m)^n f(r_i)$$



## 9.5 轮廓矩和区域矩

### ◆ 区域矩

用所有属于图像区域 $f(x, y)$ 内的点计算出来

$$f(x, y) \text{ 的 } p+q \text{ 阶矩} \quad m_{pq} = \sum_x \sum_y x^p y^q f(x, y)$$

$f(x, y)$  的  $p + q$  阶中心矩

$$\mu_{pq} = \sum_x \sum_y (x - \bar{x})^p (y - \bar{y})^q f(x, y)$$

$f(x, y)$  的归一化中心矩

$$\eta_{pq} = \frac{\mu_{pq}}{\mu_{00}^\gamma}$$



## 9.5 轮廓矩和区域矩

$$\phi_1 = \eta_{20} + \eta_{02}$$

$$\phi_2 = (\eta_{20} - \eta_{02})^2 + 4\eta_{11}^2$$

$$\phi_3 = (\eta_{30} - 3\eta_{12})^2 + (3\eta_{21} - \eta_{03})^2$$

$$\phi_4 = (\eta_{30} + \eta_{12})^2 + (\eta_{21} + \eta_{03})^2$$

$$\begin{aligned}\phi_5 &= (\eta_{30} - 3\eta_{12})(\eta_{30} + \eta_{12})[(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - 3(\eta_{21} + \eta_{03})^2] \\ &\quad + (3\eta_{21} - \eta_{03})(\eta_{21} + \eta_{03})[3(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - (\eta_{21} + \eta_{03})^2]\end{aligned}$$

$$\phi_6 = (\eta_{20} - \eta_{02})[(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - (\eta_{21} + \eta_{03})^2] + 4\eta_{11}(\eta_{30} + \eta_{12})(\eta_{21} + \eta_{03})$$

$$\begin{aligned}\phi_7 &= (3\eta_{21} - \eta_{03})(\eta_{30} + \eta_{12})[(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - 3(\eta_{21} + \eta_{03})^2] \\ &\quad + (3\eta_{12} - \eta_{30})(\eta_{21} + \eta_{03})[3(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - (\eta_{21} + \eta_{03})^2]\end{aligned}$$



## 9.6 运动检测及测量

- ◆ 差图像的计算

对时间上相邻的两幅图像求差就可以将图像中运动目标的位置和形状变化突现出来

设在时刻  $t_i$  和  $t_j$  采集到两幅图像  $f(x, y, t_i)$  和  $f(x, y, t_j)$ ，则据此可得到差图像：

$$d_{ij}(x, y) = \begin{cases} 1 & \text{如果 } |f(x, y, t_i) - f(x, y, t_j)| > T_g \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$



## 9.6 运动检测及测量

- ◆ 累积差图像的计算

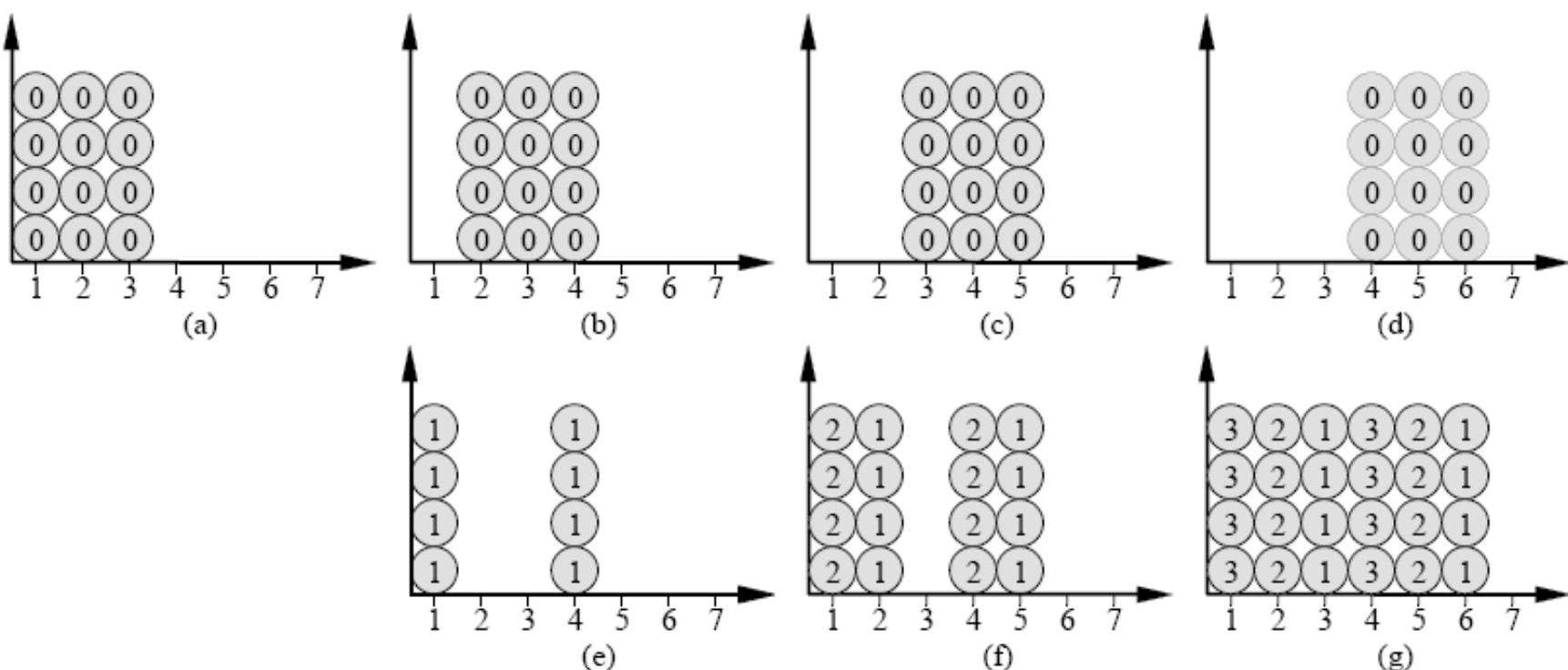


图 9.6.2 利用累积差图像确定目标移动



## 9.6 运动检测及测量

- ◆ 累积差图像ADI有三个功能：
  - (1) ADI中相邻像素数值间的梯度关系可用  
来估计目标移动的速度矢量，这里梯度的方向就  
是速度的方向，梯度的大小与速度成正比
  - (2) ADI中像素的数值可帮助确定运动目标  
的尺寸和移动的距离
  - (3) ADI中包含了目标运动的全部历史资  
料，有助于检测慢运动和尺寸较小目标的运动



## 9.7 特征测量的精确度

- ◆ 影响测量精确度的因素

- (1) 客观物体本身参数或特征的自然变化
- (2) 图像量化过程（从连续到离散）的影响，又可分为空间采样和灰度量化的影响
- (3) 不同的图像处理和分析手段（例如增强，编码，分割）
- (4) 不同的测量方法和计算公式
- (5) 图像处理和分析过程中噪声等干扰的影响



## 9.7 特征测量的精确度

- ◆ 影响测量精确度的因素

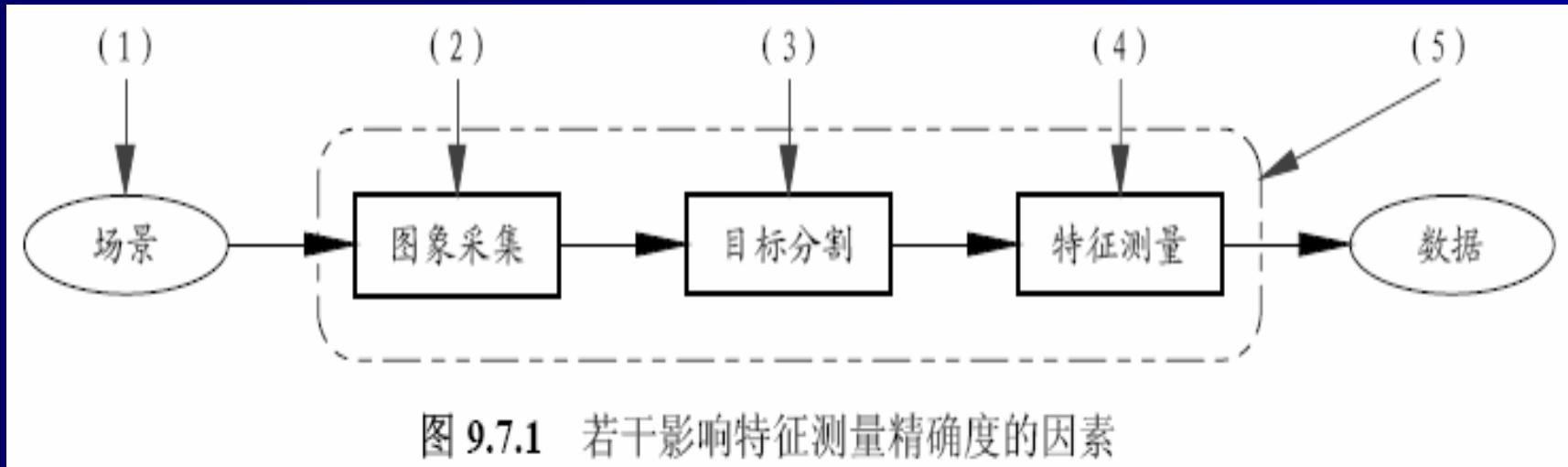


图 9.7.1 若干影响特征测量精确度的因素



## 9.7 特征测量的精确度

- ◆ 影响测量精确度的因素

测量的精确度和测量的准确度

无偏估计和一致估计

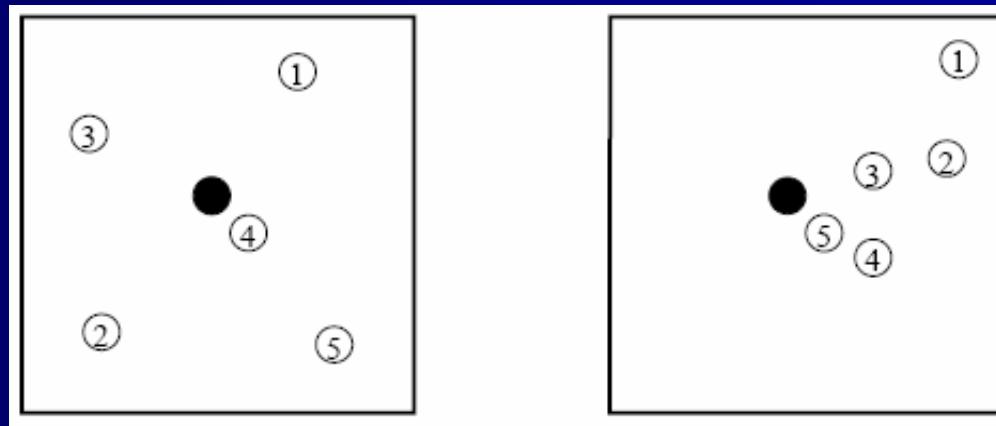


图 9.7.2 无偏估计和一致估计



## 9.7 特征测量的精确度

- ◆ 直线长度测量

设图像中的2点间有1条数字直线，并已用8-方向链码来表示。如设 $N_e$ 为偶数链码的个数， $N_o$ 为奇数链码的个数， $N_c$ 为角点（即链码方向发生变化的点）个数，则整个链码的长度 $L$ 可由下列通式计算：

$$L = A \times N_e + B \times N_o + C \times N_c$$



## 9.7 特征测量的精确度

### ◆ 直线长度测量

表 9.7.1 多种直线长度计算公式

$L$	$A$	$B$	$C$	$E$	备注
$L_1$	1	1	0	16(%)	有偏估计, 总偏短
$L_2$	1.110 7	1.110 7	0	11(%)	无偏估计
$L_3$	1	1.414	0	6.6(%)	有偏估计, 总偏长
$L_4$	0.948	1.343	0	2.6(%)	线段越长误差越小
$L_5$	0.980	1.406	-0.091	0.8(%)	$N=1\,000$ 时成为无偏估计

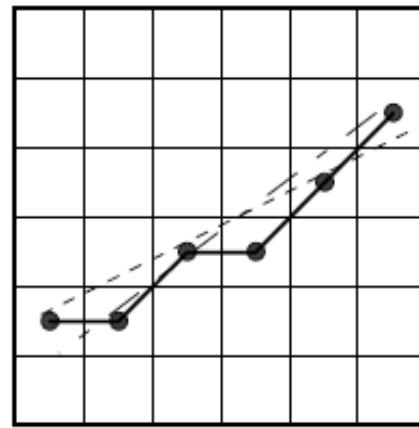


## 9.7 特征测量的精确度

- ◆ 直线长度测量

$$\varepsilon = \frac{|L_i - L_5|}{L_5} \times 100\% \quad i = 1, 2, 3, 4, 5$$

以 $L_5$ 为参考标准



$$L_1 = 5.000 \quad (15.326\%)$$

$$L_2 = 5.554 \quad (5.956\%)$$

$$L^3 = 6.242 \quad (5.718\%)$$

$$L_4 = 5.925 \quad (0.339\%)$$

$$L_5 = 5.905 \quad (0.0\%)$$

图 9.7.3 用不同公式计算同一链码长度的例子



# 本章要点

- 9.1节 轮廓的一些基本参数和测量公式
- 9.2节 区域的一些基本参数和测量公式
- 9.3节 有关区域形状的一些描述参数和测量公式
- 9.4节 区域纹理的一些描述参数和测量公式
- 9.5节 利用矩描述轮廓和区域的方法和特点
- 9.6节 对图像中运动信息和目标的检测及对运动程度的测量
- 9.7节 影响特征测量精确度的因素和比较不同线段长度的计算公式



# 作者联系信息

- 通信地址：北京清华大学电子工程系（100084）
- 办公地址：清华大学东主楼，9区307室
- 办公电话：(010) 62781430
- 传真号码：(010) 62770317
- 电子邮件：[zhangyj@ee.tsinghua.edu.cn](mailto:zhangyj@ee.tsinghua.edu.cn)
- 个人主页：



# 图像处理和分析技术

章毓晋

清华大学电子工程系 100084 北京



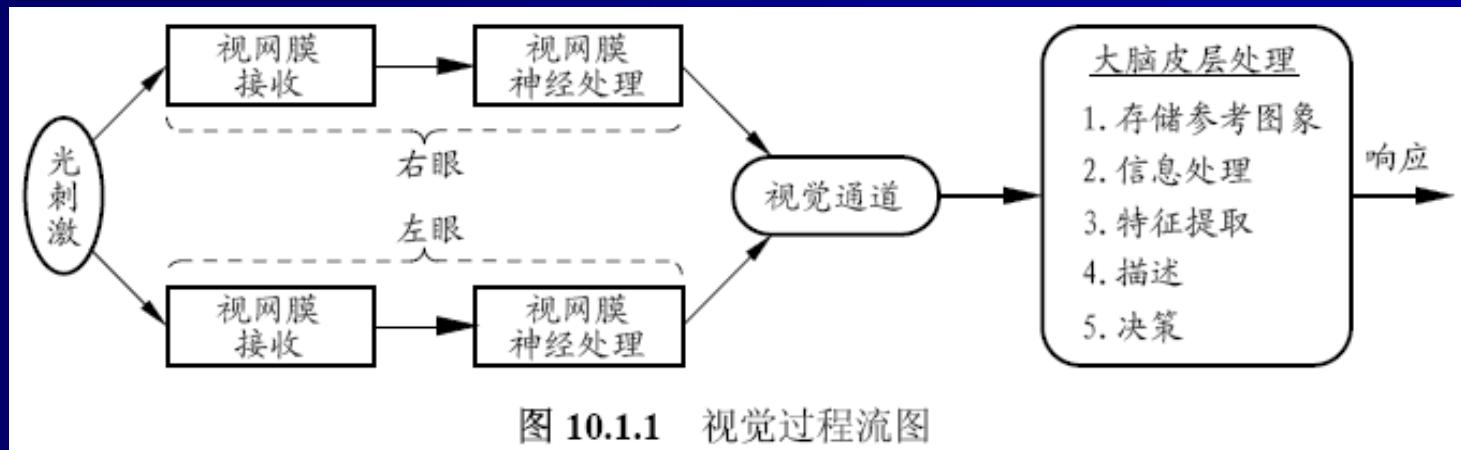
# 第10章 彩色图像处理和分析技术

- 10.1 视觉基础
- 10.2 颜色视觉和色度图
- 10.3 颜色模型
- 10.4 伪彩色图像增强
- 10.5 真彩色图像增强
- 10.6 彩色图像分割
- 10.7 基于颜色的图像检索



# 10.1 视觉基础

- ◆ 视觉过程
  - (1) 光学过程
  - (2) 化学过程
  - (3) 神经处理过程





# 10.1 视觉基础

- ◆ 亮度视觉

人的视觉系统有很大的亮度适应范围

人的视觉系统并不能同时在很大范围工作，  
它是靠改变它的具体敏感度来实现亮度适应的

人的视觉系统所感知的亮度，也称主观亮度  
与光源亮度是不同的，而且在一定范围内与人眼  
所得到的照度基本成对数关系



## 10.2 颜色视觉和色度图

- ◆ 三基色

根据人眼结构，所有颜色都可看作是3个基本颜色——红（R），绿（G）和蓝（B）——的不同组合。 $R: 700\text{nm}$ ,  $G: 546.1\text{nm}$ ,  $B: 435.8\text{nm}$

颜色可分为无彩色和有彩色两大类

无彩色指白色、黑色和各种深浅程度不同的灰色

彩色则指除去上述黑白系列以外的各种颜色



## 10.2 颜色视觉和色度图

- ◆ 三基色

人们区分颜色常用3种基本特性量：亮度、色调和饱和度

亮度与物体的反射率成正比，如果无彩色就只有亮度1个自由度的变化。

色调是与混合光谱中主要光波长相联系的

饱和度与一定色调的纯度有关，纯光谱色是完全饱和的，随着白光的加入饱和度逐渐减少



## 10.2 颜色视觉和色度图

### ◆ 色度图

横轴对应红色的色系数  $r$ , 纵轴对应绿色的色系数  $g$ , 蓝色的色系数可由式 (10.2.2) 求得, 它在与纸面垂直的方向上

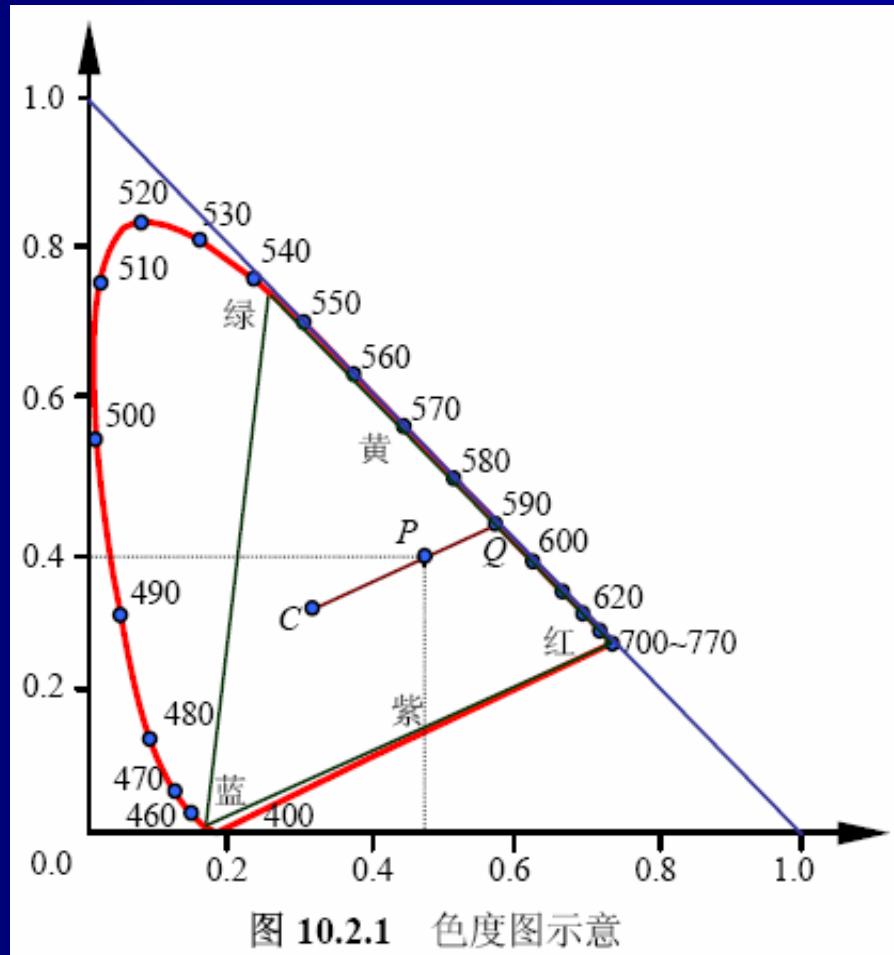


图 10.2.1 色度图示意



## 10.2 颜色视觉和色度图

### ◆ 色度图

- (1) 在色度图中每点都对应一种可见的颜色，任何可见的颜色都在色度图中占据确定的位置
- (2) 在色度图中边界上的点代表纯颜色，移向中心表示混合的白光增加而纯度减少
- (3) 在色度图中连接任2端点的直线上的各点表示将这2端点所代表的颜色相加可组成的一种颜色



## 10.3 颜色模型

- ◆ RGB模型

可表示在笛卡尔坐标系统中

3个轴分别为  $R$ ,  $G$ ,  $B$ 。

原点对应黑色，离原点最远的顶点对应白色

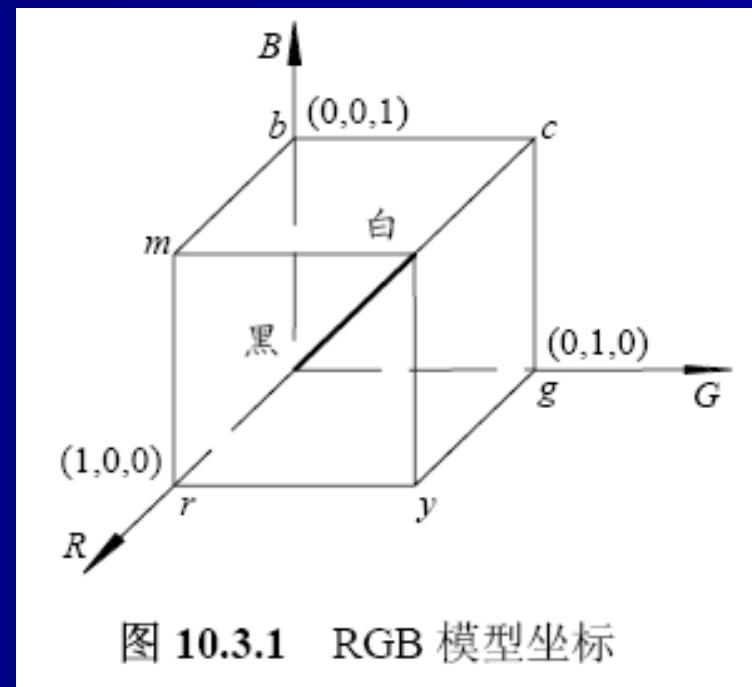


图 10.3.1 RGB 模型坐标



## 10.3 颜色模型

- ◆ HSI模型

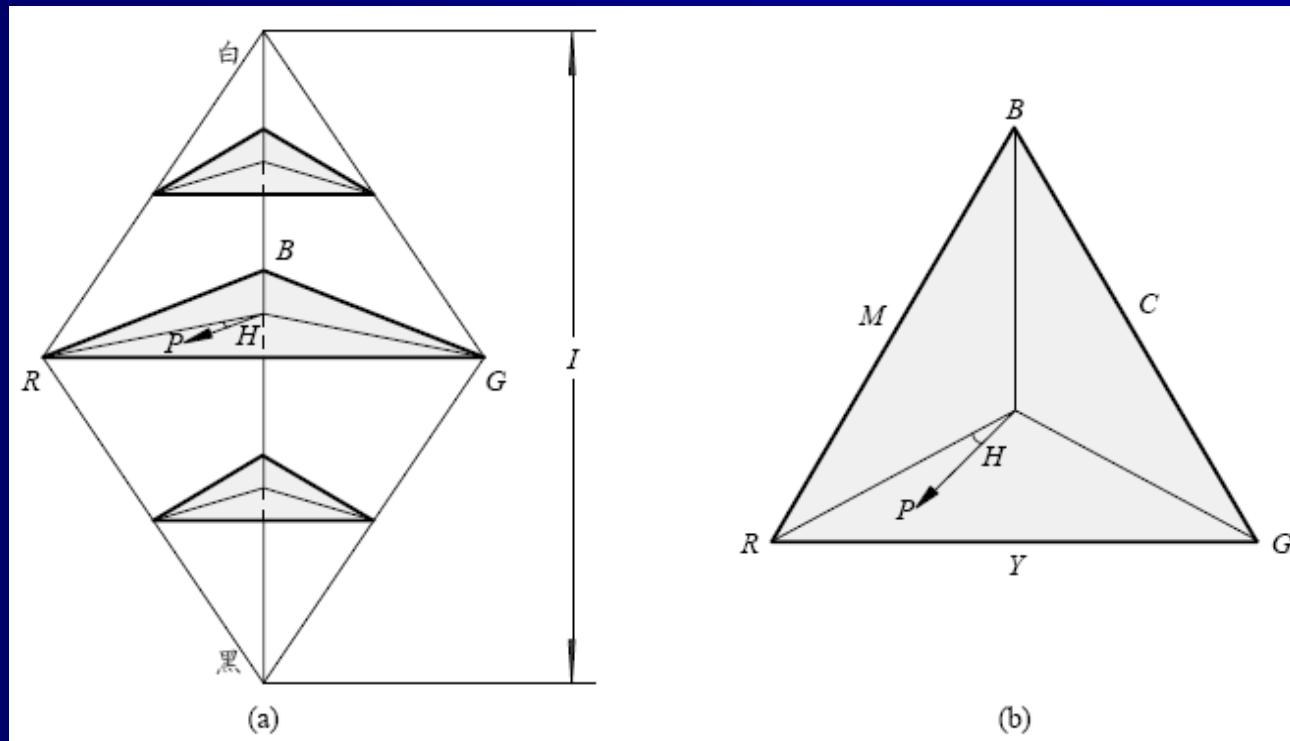


图 10.3.2 HSI 模型坐标



## 10.3 颜色模型

- ◆ HSI模型

对其中的任1个色点 $P$ , 其 $H$ 的值对应指向该点的矢量与 $R$ 轴的夹角。这个点的 $S$ 与指向该点的矢量长成正比, 越长越饱和。 $I$ 的值是沿1根通过三角形中心并垂直于三角形平面的直线来测量的。从纸面出来越多越白, 进入纸面越多越黑

该模型有两个特点: 其一,  $I$ 分量与图像的彩色信息无关; 其二,  $H$ 和 $S$ 分量与人感受颜色的方式紧密相连



## 10.3 颜色模型

- ◆ 从RGB转换到HSI

$$I = \frac{1}{3}(R + G + B)$$

$$S = 1 - \frac{3}{(R + G + B)} [\min(R, G, B)]$$

$$H = \arccos \left\{ \frac{[(R - G) + (R - B)] / 2}{[(R - G)^2 + (R - B)(G - B)]^{1/2}} \right\}$$



## 10.3 颜色模型

- ◆ 从HSI转换到RGB

设 $S, I$ 的值在 $[0, 1]$ 之间， $R, G, B$ 的值也在 $[0, 1]$ 之间

根据对称性分三段

当 $H$ 在 $[0^\circ, 120^\circ]$ 之间

$$B = I(1 - S)$$

$$R = I \left[ 1 + \frac{S \cos H}{\cos(60^\circ - H)} \right]$$

$$G = 3I - (B + R)$$



## 10.4 伪彩色图像增强

伪彩色增强方法通过对原来灰度图像中不同灰度值的区域赋予不同的颜色以更明显地区分它们

- ◆ 亮度切割

用1个平行于图像坐标平面的平面去切割图像亮度函数，从而把亮度函数分成2个灰度值区间

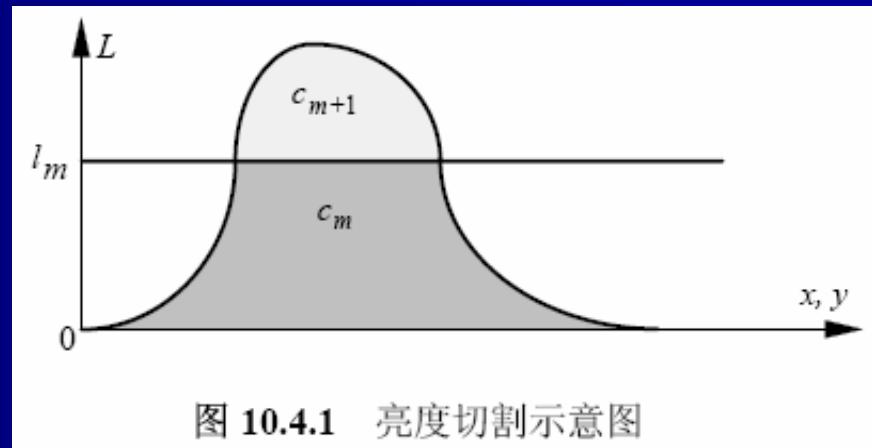


图 10.4.1 亮度切割示意图



## 10.4 伪彩色图像增强

- ◆ 从灰度到彩色的变换

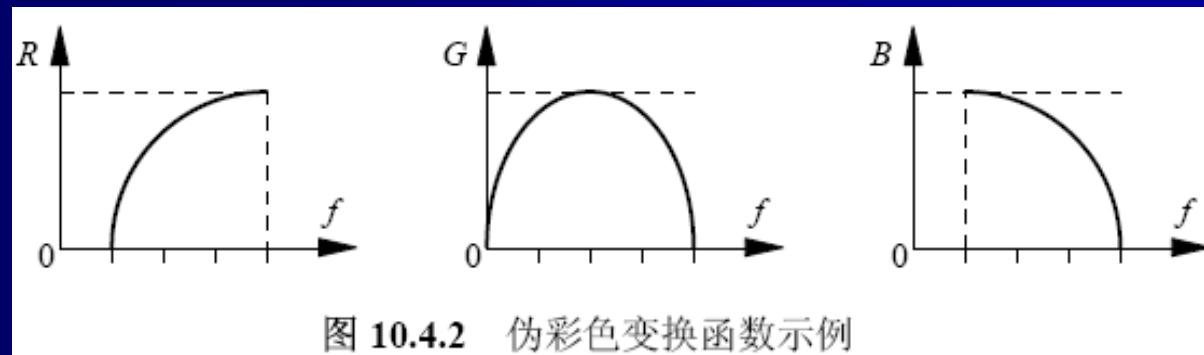


图 10.4.2 伪彩色变换函数示例

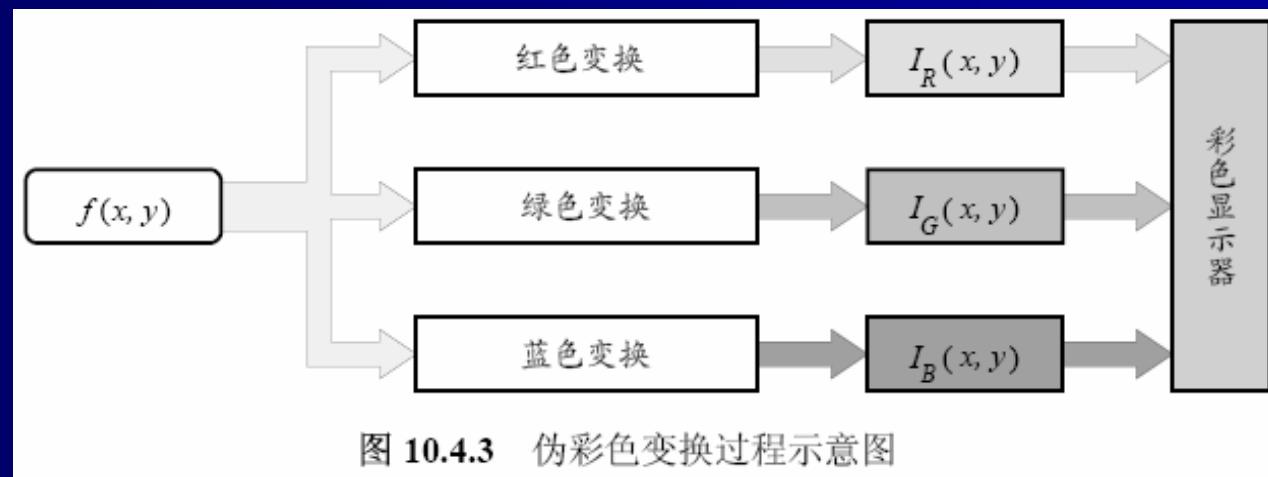


图 10.4.3 伪彩色变换过程示意图



## 10.4 伪彩色图像增强

- ◆ 频域滤波

输入图像的傅里叶变换通过3个不同的滤波器（常用带通或带阻滤波器）被分成不同频率分量

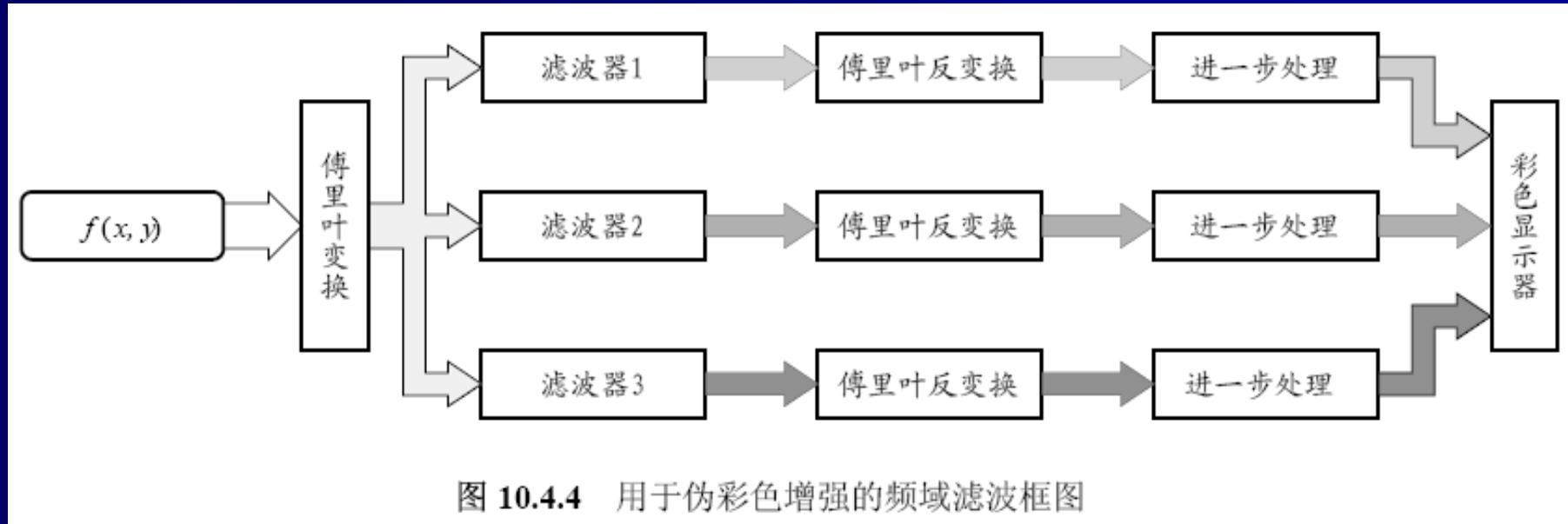


图 10.4.4 用于伪彩色增强的频域滤波框图



## 10.5 真彩色图像增强

对真彩色图像的处理策略可分为两种：

一种是将一幅彩色图像看作三幅分量图像的组合体，在处理过程中先对每幅图像（按照对灰度图像处理的方法）单独处理，再将处理结果合成为彩色图像

另一种是将一幅彩色图像中的每个像素看作具有三个属性值，即属性现在为一个矢量，需利用对矢量的表达方法进行处理



## 10.5 真彩色图像增强

- ◆ 单分量真彩色增强

将RGB图转化为HSI图，可以对各分量分别使用对灰度图的增强方法。基本步骤为：

- (1) 将原始彩色图的 $R$ ,  $G$ ,  $B$ 分量图转化为 $H$ ,  $S$ ,  $I$ 分量图
- (2) 利用对灰度图增强的方法增强其中的某个分量图
- (3) 再将结果转换为 $R$ ,  $G$ ,  $B$ 分量图以用彩色显示器显示



# 10.5 真彩色图像增强

- ◆ 全彩色增强

- (1) 彩色切割增强

先计算各分量的平均值  
然后确定各个彩色分量  
的分布宽度 $d_R$ ,  $d_G$ ,  $d_B$   
最后确定对应区域W的彩  
色空间中的彩色包围矩形

$$m_R = \frac{1}{\#W} \sum_{(x,y) \in W} R_W(x, y)$$

$$m_G = \frac{1}{\#W} \sum_{(x,y) \in W} G_W(x, y)$$

$$m_B = \frac{1}{\#W} \sum_{(x,y) \in W} B_W(x, y)$$



## 10.5 真彩色图像增强

- ◆ 全彩色增强

- (2) 彩色滤波增强

对矢量的平均结果可由对其各个分量用相同方法  
进行平均  
再结合起  
来得到

$$C_{\text{ave}}(x, y) = \frac{1}{\#W} \sum_{(x, y) \in W} C(x, y) = \frac{1}{\#W} \left[ \begin{array}{l} \sum_{(x, y) \in W} R(x, y) \\ \sum_{(x, y) \in W} G(x, y) \\ \sum_{(x, y) \in W} B(x, y) \end{array} \right]$$



## 10.6 彩色图像分割

- ◆ 分割所用的彩色空间

红绿蓝（RGB）空间：最常见

CMY空间：与RGB空间互补

$I_1, I_2, I_3$ 空间：三个正交彩色特征

$$I_1 = (R + G + B)/3$$

$$I_2 = (R - B)/2 \quad \text{或} \quad I_2 = (B - R)/2$$

$$I_3 = (2G - R - B)/4$$

HSI空间：比较接近人眼的视觉生理特性



# 10.6 彩色图像分割

## ◆ 分割策略

- (1) 利用  $S$  来区分高饱和区和低饱和区
- (2) 利用  $H$  对高饱和区进行分割
- (3) 利用  $I$  对低饱和区进行分割

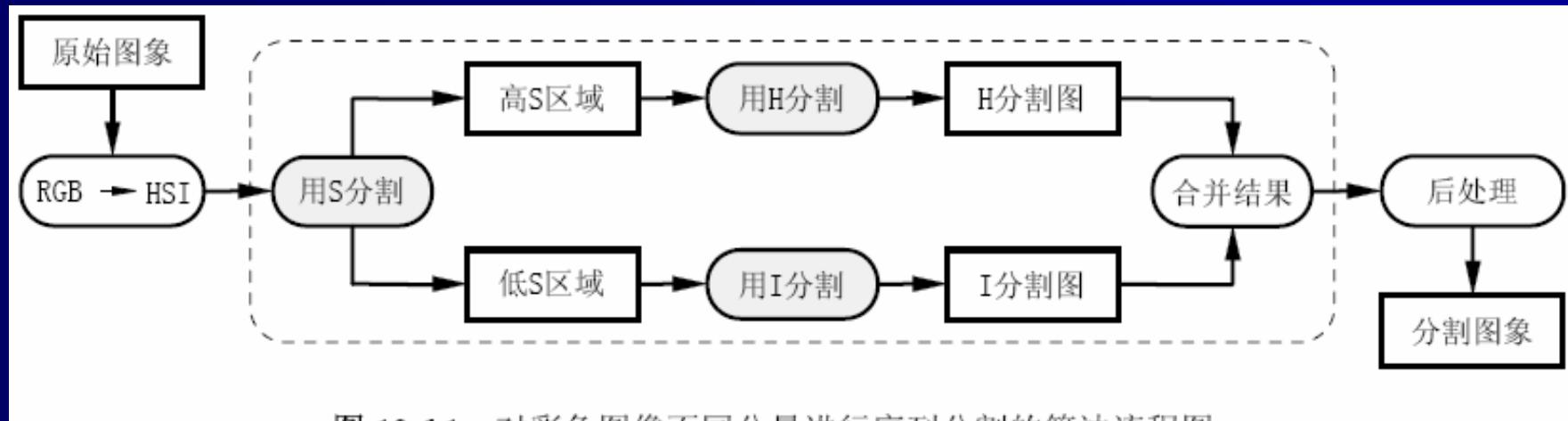


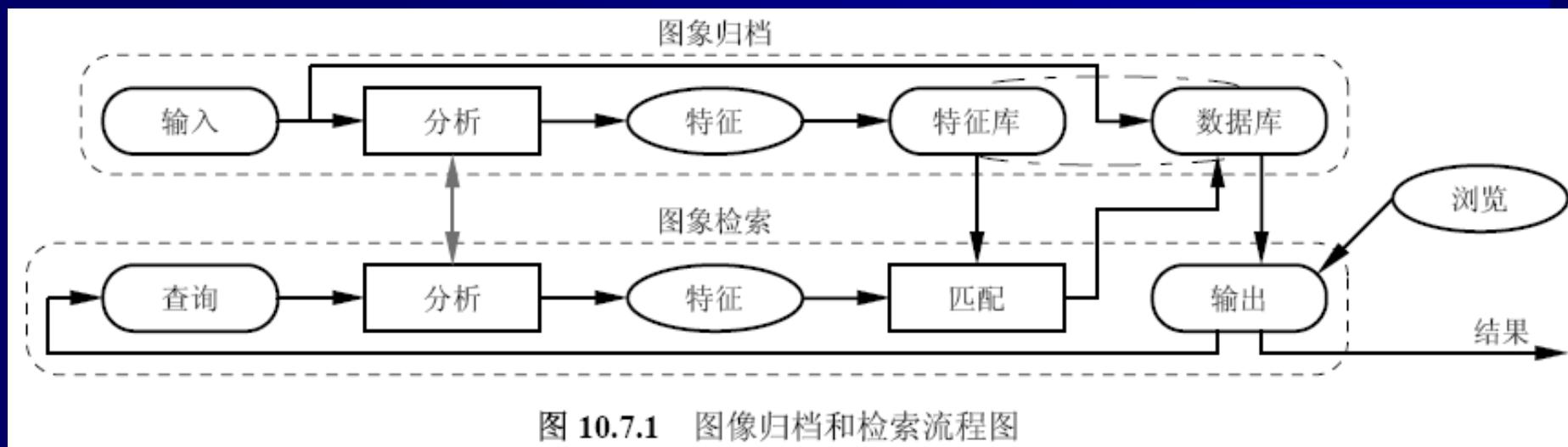
图 10.6.1 对彩色图像不同分量进行序列分割的算法流程图



# 10.7 基于颜色的图像检索

- ◆ 检索原理

快速地搜索到需要的图像  
借助一些视觉特征来进行





## 10.7 基于颜色的图像检索

- ◆ 颜色特征的表达

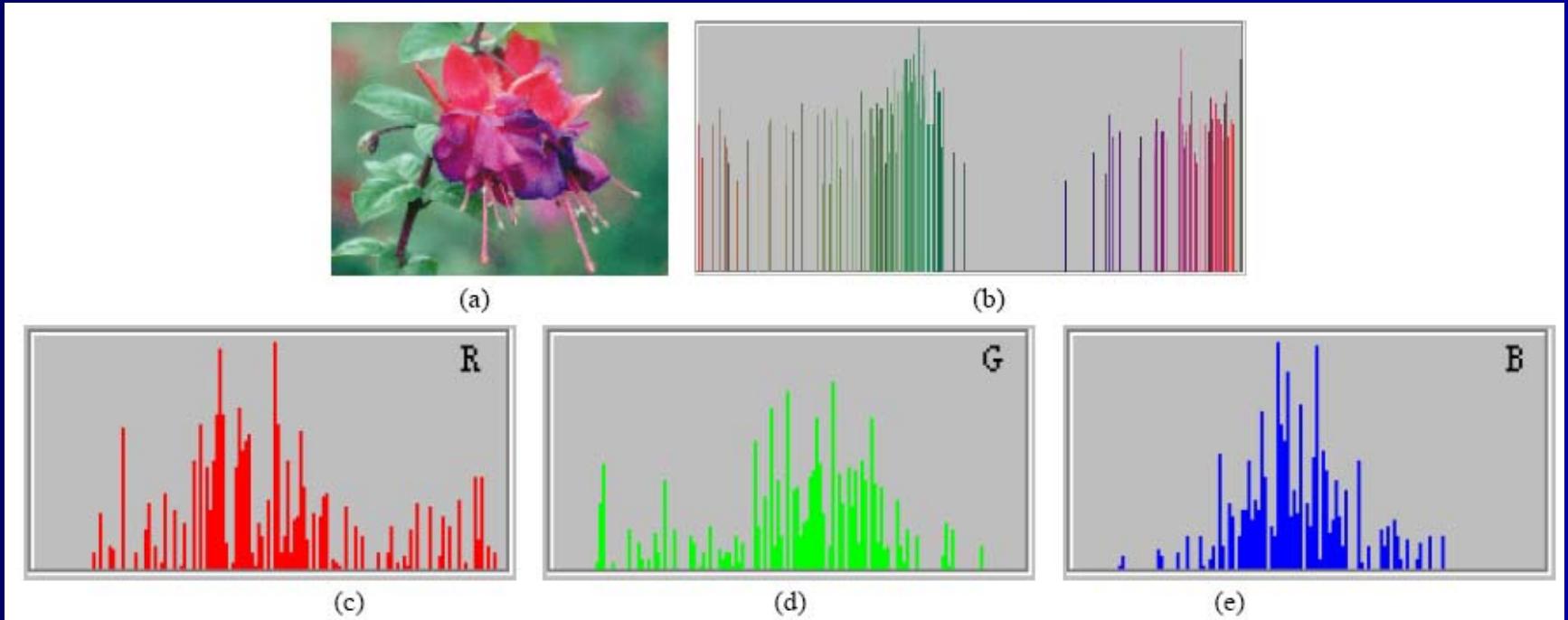


图 10.7.2 不同直方图实例



# 10.7 基于颜色的图像检索

- ◆ 颜色匹配算法

- (1) 直方图相交法

$$P(Q, D) = \frac{\sum_{k=0}^{L-1} \min[H_Q(k), H_D(k)]}{\sum_{k=0}^{L-1} H_Q(k)}$$

- (2) 直方图匹配法

$$M_E(Q, D) = \sqrt{\sum_{i=1}^L [H_Q(i) - H_D(i)]^2}$$



# 10.7 基于颜色的图像检索

- ◆ 颜色匹配算法

## (3) 直方图距离法

$$\begin{aligned} \mathbf{f} &= [\mu_R \quad \mu_G \quad \mu_B]^T \\ P(Q, D) &= \sqrt{(\mathbf{f}_Q - \mathbf{f}_D)^2} = \sqrt{\sum_{R,G,B} (\mu_Q - \mu_D)^2} \end{aligned}$$

## (4) 直方图中心矩法

$$M_1 = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L H(i) \quad M_2 = \left[ \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L (H(i) - M_1)^2 \right]^{1/2} \quad M_3 = \left[ \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L (H(i) - M_1)^3 \right]^{1/3}$$



# 10.7 基于颜色的图像检索

- ◆ 颜色匹配算法

## (5) 参考颜色表法

参考色的数量要比原图的少

$$\mathbf{f} = [r_1 \quad r_2 \quad \cdots \quad r_N]^T$$

$$P(Q, D) = W \sqrt{(\mathbf{f}_Q - \mathbf{f}_D)^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^N W_i (r_{i,Q} - r_{i,D})^2}$$

$$W_i = \begin{cases} r_{i,Q} & \text{如果 } r_{i,Q} > 0 \text{ 且 } r_{i,D} > 0 \\ 1 & \text{如果 } r_{i,Q} = 0 \text{ 或 } r_{i,D} = 0 \end{cases}$$



# 本章要点

- 10.1节 视觉基础和亮度知觉
- 10.2节 颜色视觉和色度学
- 10.3节 两种基本的颜色模型
- 10.4节 对灰度图像进行伪彩色增强的方式方法
- 10.5节 对彩色图像进行真彩色增强的方式方法
- 10.6节 彩色图像分割的原理
- 10.7节 基于彩色特征的图像检索原理和典型方法



# 作者联系信息

- 通信地址：北京清华大学电子工程系（100084）
- 办公地址：清华大学东主楼，9区307室
- 办公电话：(010) 62781430
- 传真号码：(010) 62770317
- 电子邮件：[zhangyj@ee.tsinghua.edu.cn](mailto:zhangyj@ee.tsinghua.edu.cn)
- 个人主页：