

图象工程（中）

图 象 分 析

（第4版）

章毓晋

清华大学电子工程系 100084 北京

第1单元 图象分割

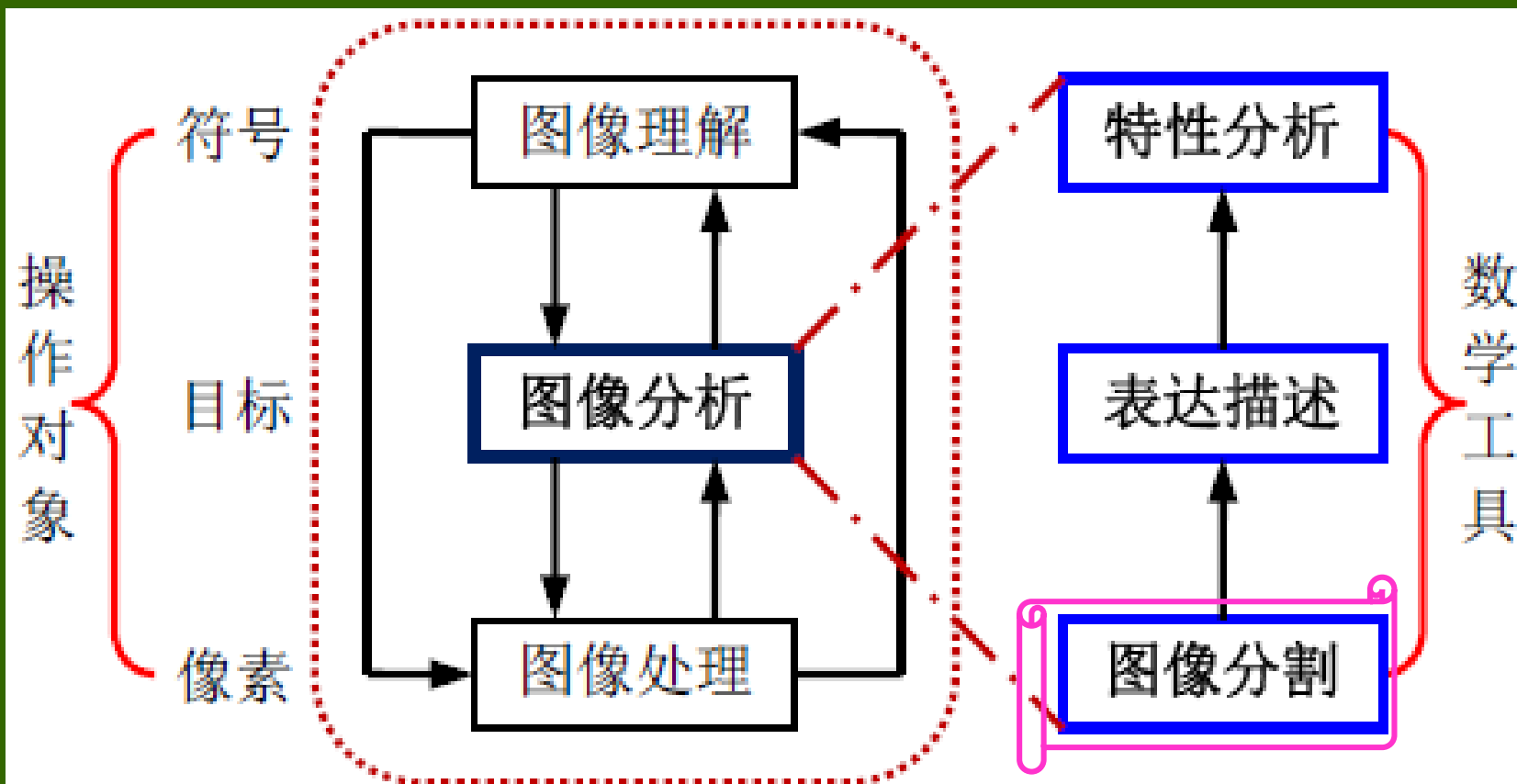
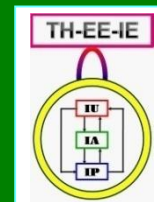


图 1.2.2 图像分析主要功能模块

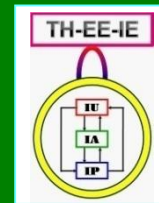


第1单元 图象分割

- 第2章 图象分割基础
- 第3章 典型分割算法
- 第4章 分割技术扩展
- 第5章 分割评价比较

图象分割是由图象处理进到图象分析的关键步骤

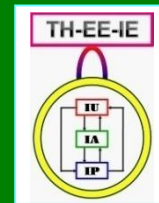
很多时候关注的仅是图象中的目标或前景（其他部分称为背景），它们一般对应图象中特定的、具有独特性质的区域



第4章 分割技术扩展

图象分割的扩展

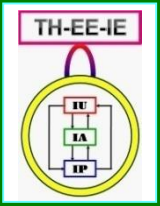
- 特定图象目标 → 更广泛图象目标
- 像素级分割精度 → 亚像素级分割精度
- 2-D 图象 → 3-D 图象 (→ 4-D 图象)
- 灰度图象 → 彩色图象
 - 特殊 (其它属性) 图象
- 单幅静止图象 → 多幅序列 (运动) 图象



第4章 分割技术扩展

一些典型的方法

- 4.1 从像素单元到目标单元
- 4.2 从哈夫变换到广义哈夫变换
- 4.3 从像素精度到亚像素精度
- 4.4 从2-D图象到3-D图象
- 4.5 从灰度图象到彩色图象



4.1 从像素单元到目标单元

操作的基本单元：像素、像素邻域、像素集合体（纹理分割），目标部件（结构信息）、目标区域（目标检测）

4.1.1 像素和目标之间的单元

4.1.2 椭圆目标检测

4.1.1 像素和目标之间的单元

1. 超像素

包含一定数量像素的连通集合

超像素分割

分割结果在较粗尺度上保留了图象结构信息和图象局部特征

{4个特点, P.87}



图 4.1.1 一幅图像和对它进行超像素分割的结果

4.1.1 像素和目标之间的单元

2. 图象片

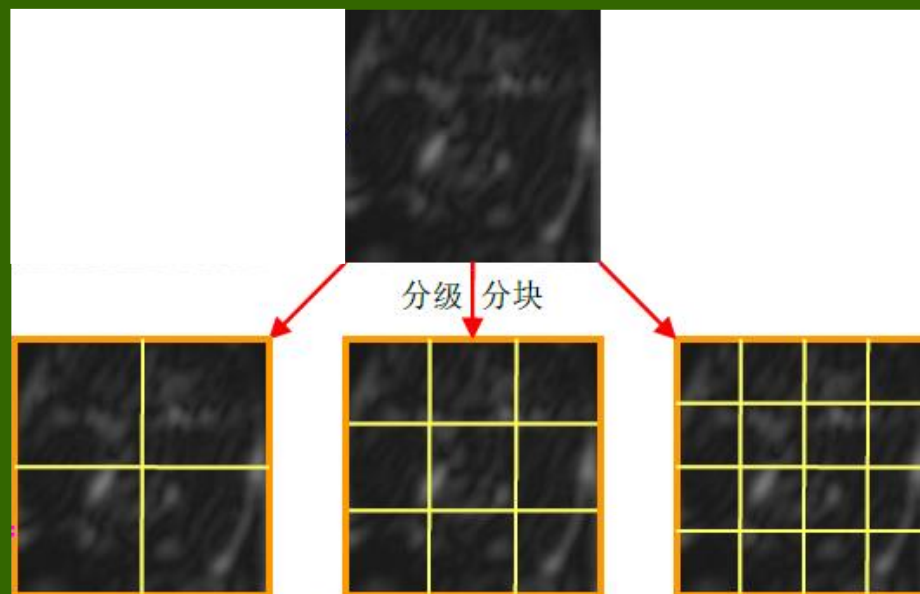
包含一定数量像素的连通集合

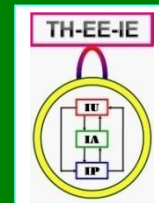
图象片可以按一定规律将图象分解得到

形状比较规则

的图象片也常称为

图象块





4.1.1 像素和目标之间的单元

3. 部件

相对于整体的集合，根据结构分解

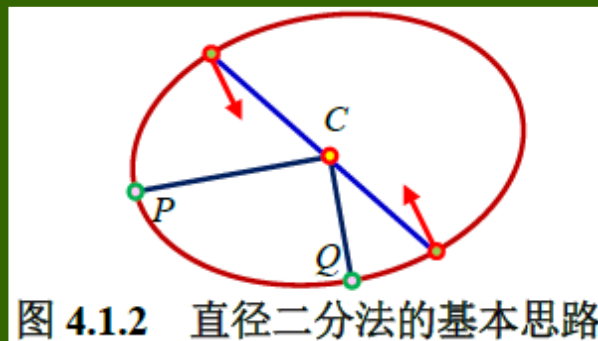
- (1) 车牌识别：将各个字符作为部件进行检测、匹配、识别
- (2) 人脸检测：将人脸分解为额头、左眼、右眼、鼻子及嘴巴等面部器官区域
- (3) 人体姿态判断：将人体分为头部、躯干、左右上臂、左右前臂、左右大腿和左右小腿共10个相互关联的部件

4.1.2 椭圆目标检测

1. 直径二分法

一种确定各种尺寸椭圆中心的方法

两个边缘方向反向平行的边缘点的中点应是椭圆中心的候选点



该方法对定位很多对称的形状（如圆、正方形、矩形等）都有用，所以可用于检测多种目标

4.1.2 椭圆目标检测

2. 弦-切线法

一种确定各种尺寸椭圆中心的方法

在图象中检测成对的边缘点 P_1 和 P_2 ，过这两个点的切线相交于 T 点，而这两个点的连线的中点是 B 点，椭圆中心 C 点和 T 点在 B 点的两边，椭圆中心 C 点在 B 点和 D 点之间

将直线上 BD 区间的点在参数空间中累加，最后用峰值检测就可确定 C 点

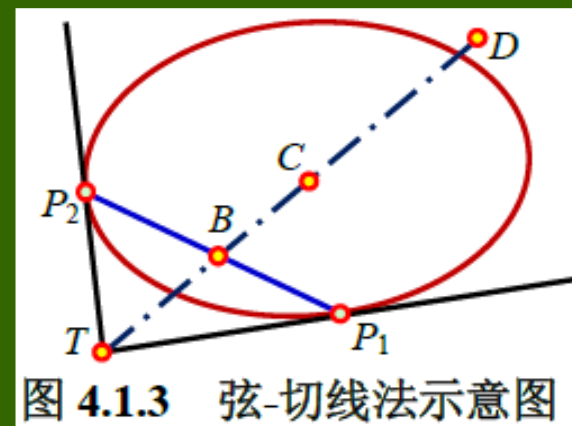
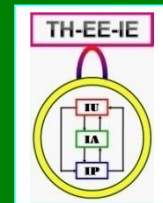


图 4.1.3 弦-切线法示意图



4.2 从哈夫变换到广义哈夫变换

哈夫 (Hough) 变换

图象空间和参数空间之间的一种变换

4.2.1 哈夫变换

4.2.2 广义哈夫变换原理

4.2.3 完整广义哈夫变换

4.2.1 哈夫变换

1. 点-线的对偶性

$y = px + q$ 图象空间 XY 里所有过点 (x, y) 的直线

$q = -px + y$ 参数空间 PQ 中过点 (p, q) 的1条直线

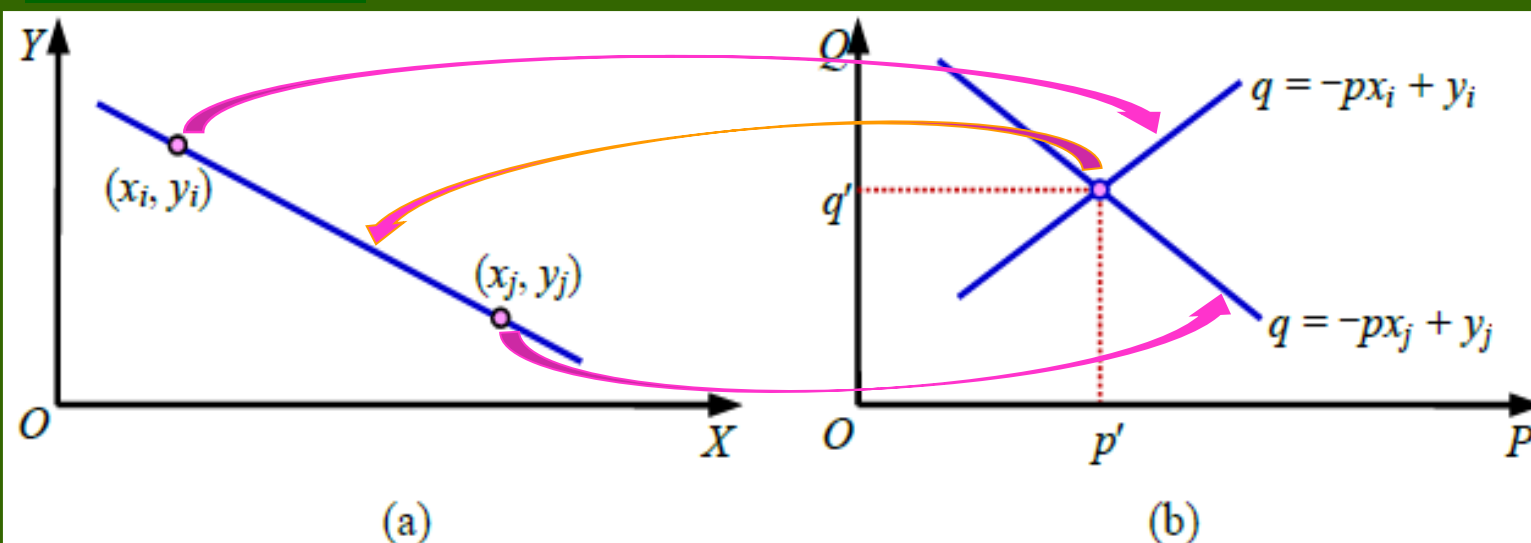
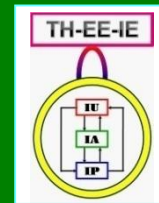


图 4.2.1 图像空间和参数空间中点和线的对偶性



4.2.1 哈夫变换

1. 点-线的对偶性

图象空间中共线的点 \Leftrightarrow 参数空间里相交的线
参数空间中相交于同一个点的（每条）直线
 \Leftrightarrow 图象空间里共线的一个点

哈夫变换的原理

把在图象空间中（共线）的检测问题转换到参数空间里，通过在参数空间里进行简单的共点累加，统计完成检测任务

4.2.1 哈夫变换

2. 计算步骤

在参数空间 PQ 里建立一个2-D的累加数组

$$A(p, q)$$

$$p \in [p_{\min}, p_{\max}]$$

$$q \in [q_{\min}, q_{\max}]$$

$$A(p, q) = A(p, q) + 1$$

$A(p, q)$ 值: 共线点数

(p, q) 值: 直线方程参数

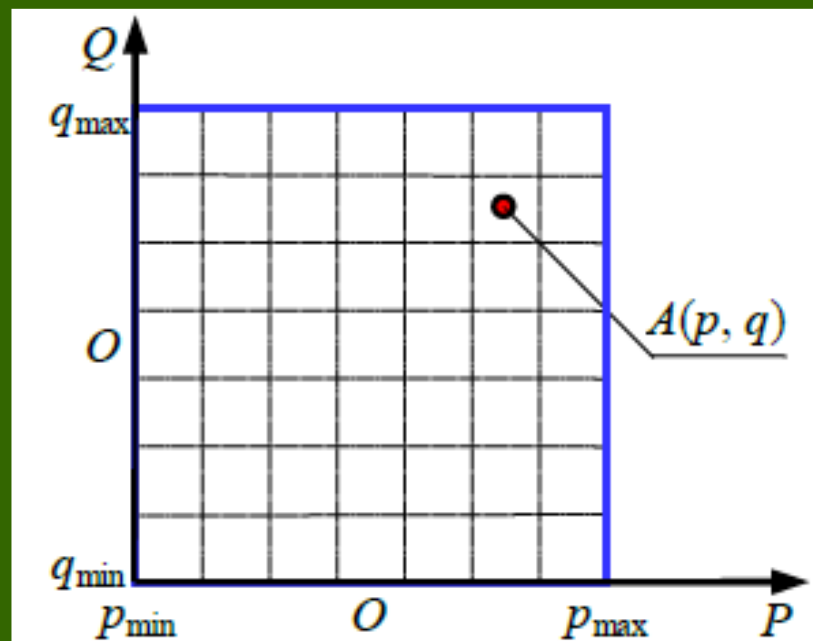
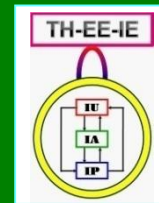


图 4.2.2 参数空间里的累加数组



4.2.1 哈夫变换

哈夫变换的功能

检测满足解析式 $f(\mathbf{x}, \mathbf{c}) = 0$ 形式的各类曲线并
把曲线上的点连接起来

获得（已知形状）目标的轮廓

检测圆周

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

有三个参数 a , b , r , 所以需要在参数空间里
建立一个3-D累加数组 A , 其元素可写为 $A(a, b, r)$

4.2.1 哈夫变换

3. 极坐标方程

$$\lambda = x \cos \theta + y \sin \theta$$

- 减少检测接近竖直方向直线的计算量
- 点—正弦曲线对偶性

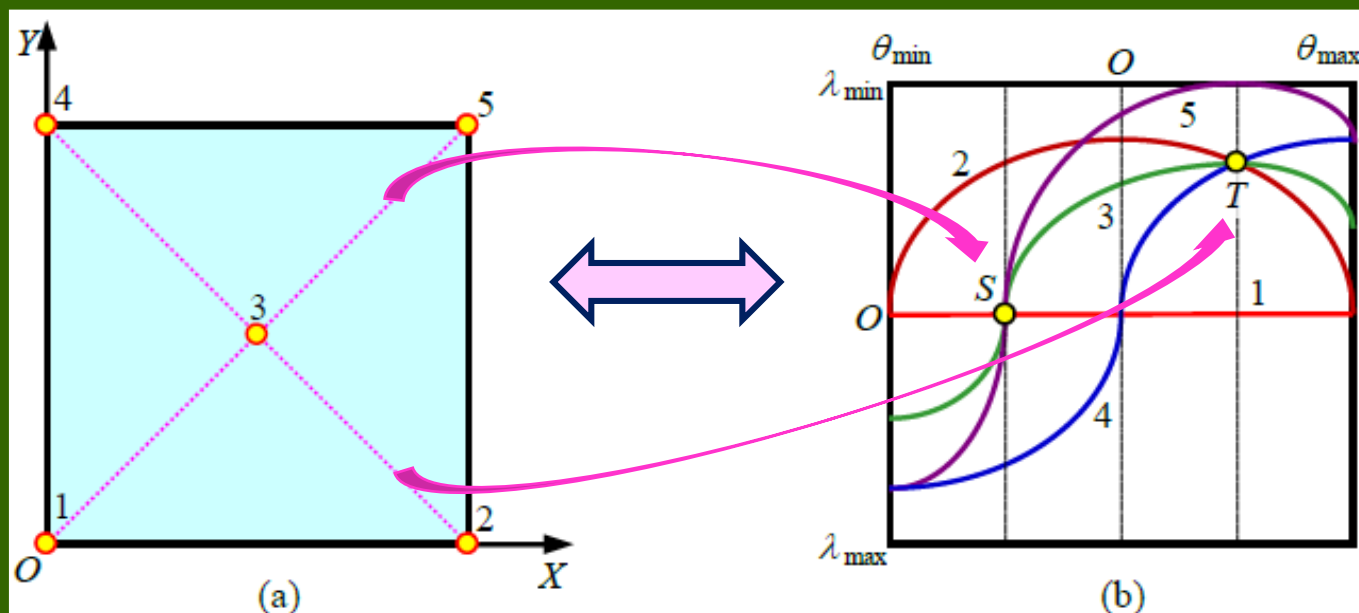


图 4.2.4 图像空间中的点和其在参数空间里对应的正弦曲线

4.2.1 哈夫变换

3. 极坐标方程

$$\lambda = x \cos \theta + y \sin \theta$$

➤ 法线足哈夫变换

使用 (ρ, q) 来表示参数空间。设 (ρ, q) 表示的直线与需检测直线的交点坐标为 (x_f, y_f)

$$g_y/g_x = y_f/x_f$$

$$(x - x_f)x_f + (y - y_f)y_f = 0$$

$$x_f = g_x \times (xg_x + yg_y)/(g_x^2 + g_y^2)$$

$$y_f = g_y \times (xg_x + yg_y)/(g_x^2 + g_y^2)$$

~~反正切函数~~ ~~平方根~~

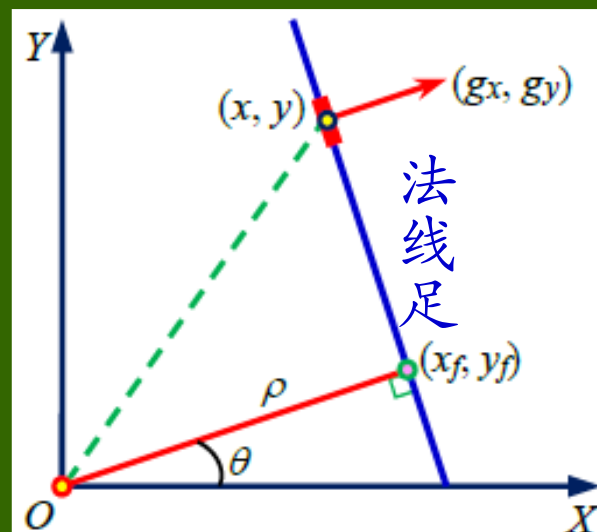


图 4.2.5 法线足哈夫变换

4.2.2 广义哈夫变换原理

在所需检测的曲线或目标轮廓没有或不易用解析式表达时，可以利用表格来建立曲线或轮廓点与参考点间的关系，从而可继续利用哈夫变换进行检测

建立参考点与轮廓点的联系

$$p = x + r(\theta) \cos[\phi(\theta)]$$

$$q = y + r(\theta) \sin[\phi(\theta)]$$

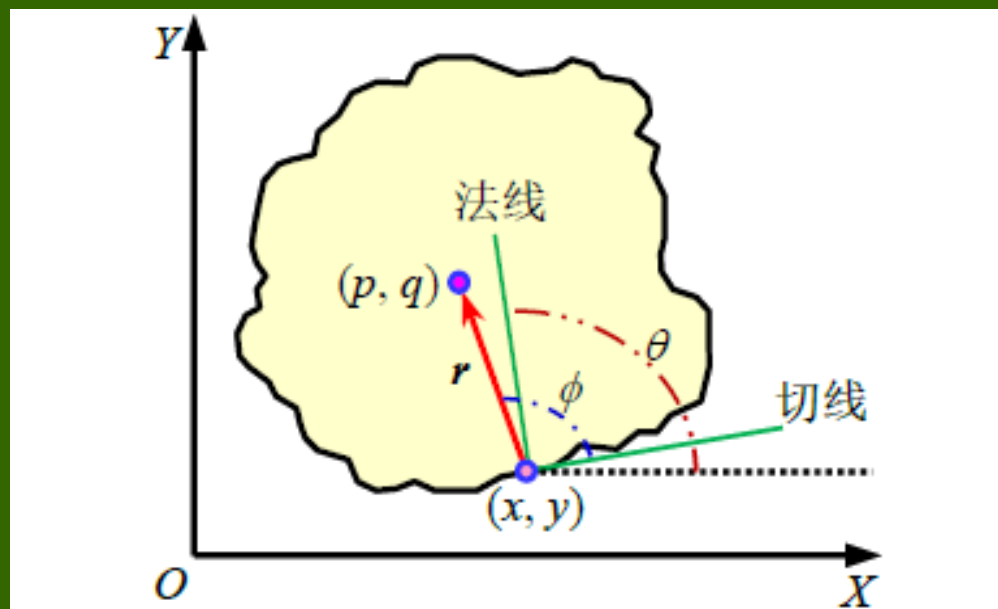
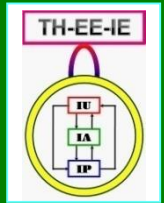


图 4.2.6 建立参考点和轮廓点的对应关系

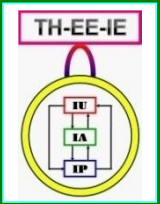


4.2.2 广义哈夫变换原理

- 已知轮廓形状、朝向和尺度而只需检测位置信息
- 根据 r , ϕ 与 θ 的函数关系作出参考表—— R 表
- 给定一个 θ , 就可以确定一个可能的参考点位置

• 一个 θ
可能对
应多个
轮廓点

梯度角 θ	矢径 $r(\theta)$	矢角 $\phi(\theta)$
θ_1	$r_1^1, r_1^2, \dots, r_1^{N_1}$	$\phi_1^1, \phi_1^2, \dots, \phi_1^{N_1}$
θ_2	$r_2^1, r_2^2, \dots, r_2^{N_2}$	$\phi_2^1, \phi_2^2, \dots, \phi_2^{N_2}$
...
θ_M	$r_M^1, r_M^2, \dots, r_M^{N_M}$	$\phi_M^1, \phi_M^2, \dots, \phi_M^{N_M}$



4.2.3 完整广义哈夫变换

- 轮廓的平移 + 轮廓旋转、放缩
 朝向 尺度

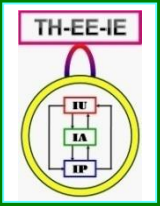
累加数组 (2-D \Rightarrow 4-D) :

$$A(p_{\min}:p_{\max}, q_{\min}:q_{\max}, \beta_{\min}:\beta_{\max}, S_{\min}:S_{\max})$$

$$p = x + S \times r(\theta) \times \cos[\phi(\theta) + \beta]$$

$$q = y + S \times r(\theta) \times \sin[\phi(\theta) + \beta]$$

数组累加: $A(p, q, \beta, S) = A(p, q, \beta, S) + 1$



4.3 从像素精度到亚像素精度

实际应用中常需要将边缘的检测精度提高到像素内部，即亚像素级

4.3.1 基于矩保持的技术

4.3.2 利用一阶微分期望值的技术

4.3.3 借助切线信息的技术

4.3.1 基于矩保持的技术

边缘模型

一个理想边缘可以认为由一系列具有灰度 b 的像素与一系列具有灰度 o 的像素相接而构成

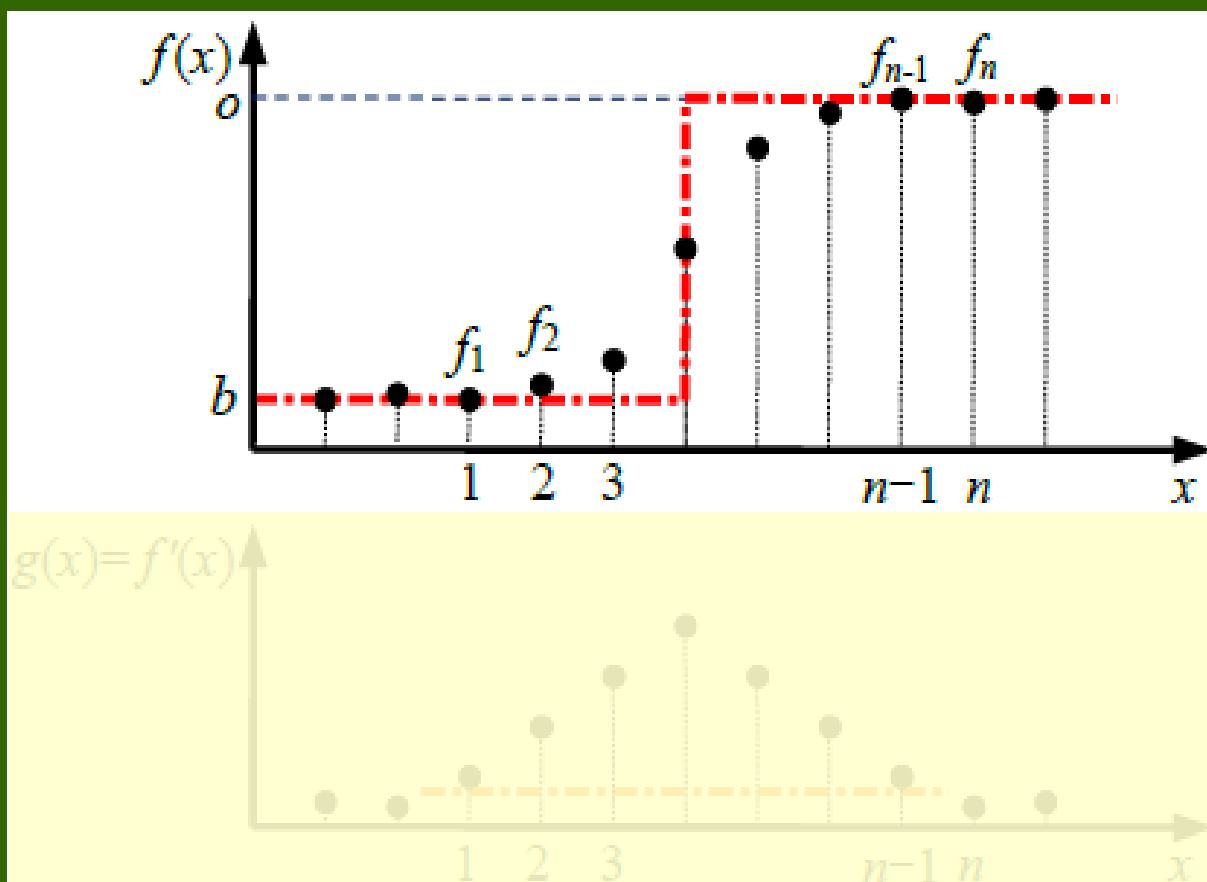
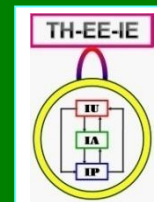


图 4.3.1 1-D 灰度和梯度图



4.3.1 基于矩保持的技术

计算公式

保持两个边缘的前三阶矩相等，也等价于解下列方程：

$$m_p = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [f_i(x)]^p$$

用 t 表示理想边缘中灰度为 b 的像素的个数

$$m_p = \frac{t}{n} b^p + \frac{n-t}{n} o^p \quad p=1, 2, 3$$

消去 b 和 o ，得到

$$t = \frac{n}{2} \left[1 + s \sqrt{\frac{1}{4 + s^2}} \right]$$

$$s = \frac{m_3 + 2m_1^3 - 3m_1m_2}{\sigma^3} \quad \sigma^2 = m_2 - m_1^2$$

4.3.2 利用一阶微分期望值的技术

- (1) 计算一阶微分
- (2) 确定边缘区间
- (3) 计算概率函数
- (4) 计算期望值

$$p_k = \frac{g_k}{\sum_{i=1}^n g_i} \quad k = 1, 2, \dots, n$$

$$E = \sum_{k=1}^n k p_k = \sum_{k=1}^n \left(k g_k / \sum_{i=1}^n g_i \right)$$

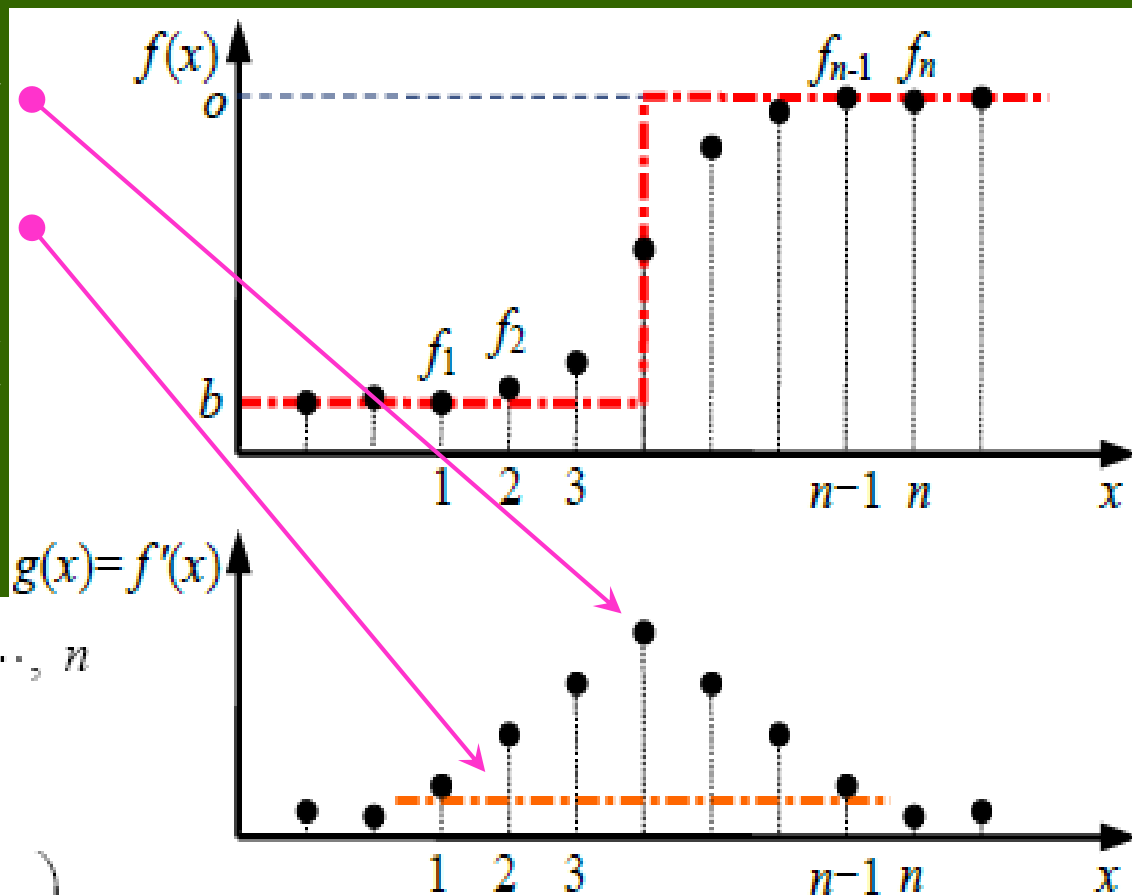


图 4.3.1 1-D 灰度和梯度图

4.3.3 借助切线信息的技术

先检测出像素级边界，再借助像素级边界沿切线方向的信息将其修正到亚像素量级

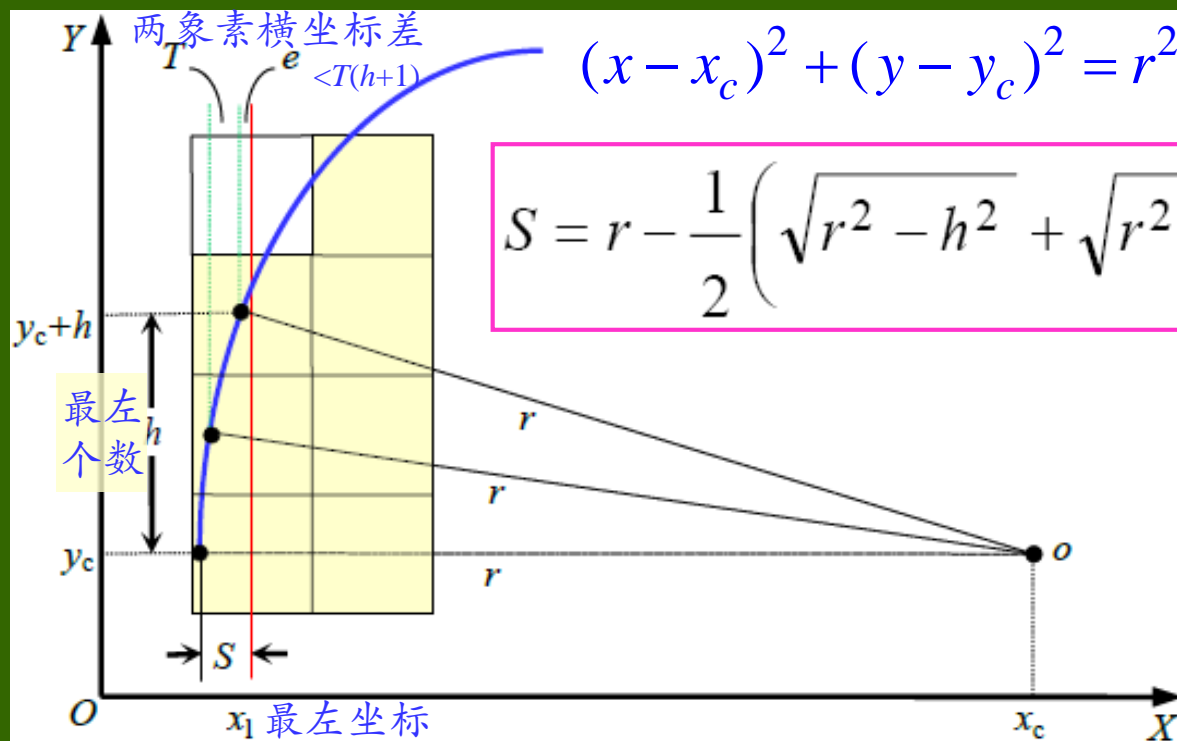
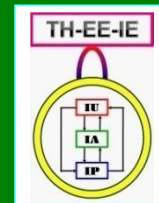


图 4.3.2 圆边界切线方向的示意图



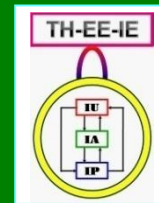
4.4 从2-D图象到3-D图象

3-D图象: $f(x, y, z)$, $f(x, y, t)$

将3-D图象作为一个整体进行分割

➤ (至少) 三个方面的问题需要考虑:

- (1) 分割对象由2-D变为3-D带来的数据结构和表达等问题
- (2) 同一类算法共有的分割方法问题
- (3) 各个算法本身特有的一些具体问题



4.4 从2-D图象到3-D图象

以两类（①和③）方法为例

4.4.1 3-D边缘检测

4.4.2 3-D图象阈值化

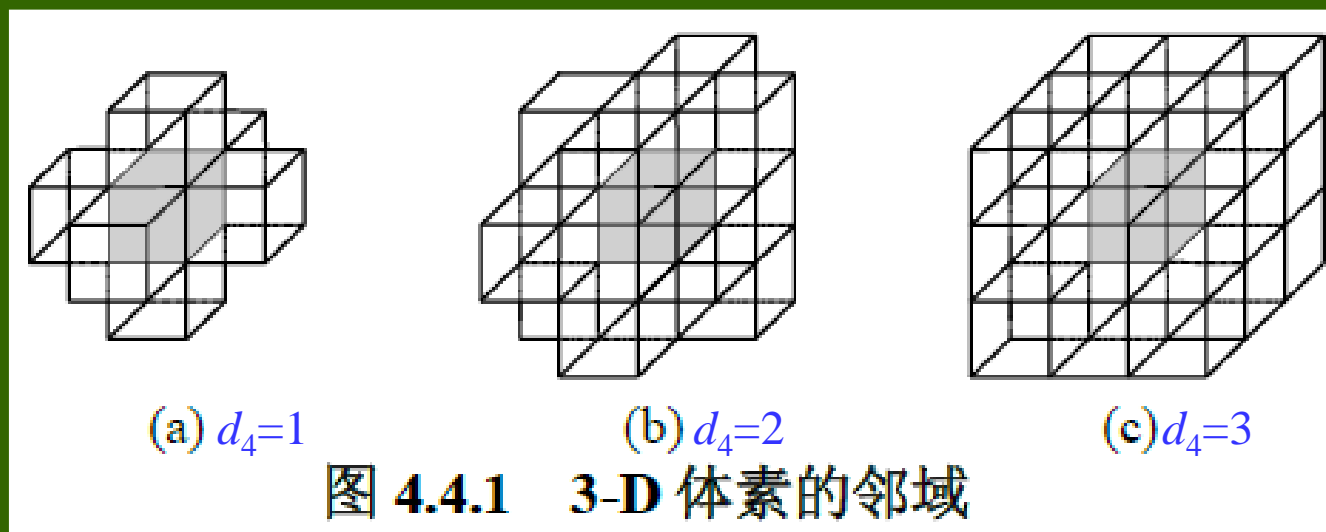
3-D边缘检测，这是①类和②类技术的基础
④类技术在向3-D推广时主要涉及的是数据
结构问题

4.4.1 3-D边缘检测

1. 算子模板的推广

以一个体素为中心的 $3 \times 3 \times 3$ 的邻域中可以有多种邻域体素个数，最常见的是：

(a) 6个、(b) 18个、或(c) 26个邻域体素



4.4.1 3-D边缘检测

2. 3-D边缘模型和数字化模型

无穷大阶跃边缘平面

$$x \cos \alpha + y \cos \beta + z \cos \gamma - \rho = 0$$

ρ 是从原点到边缘面的
直线距离（偏移量），

α , β , γ 分别是平面法线
与 X , Y , Z 轴的方向夹角

$$\cos^2 \alpha + \cos^2 \beta + \cos^2 \gamma = 1$$

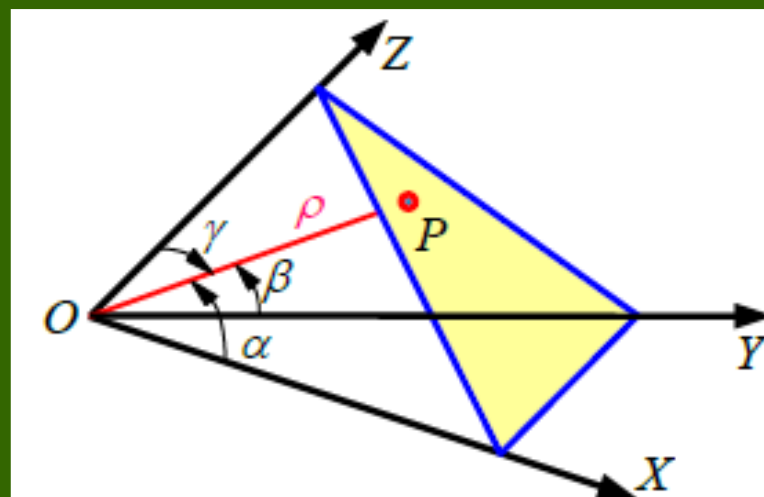
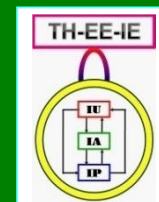


图 4.4.5 阶跃边缘平面示意图



4.4.1 3-D边缘检测

3-D数字化模型

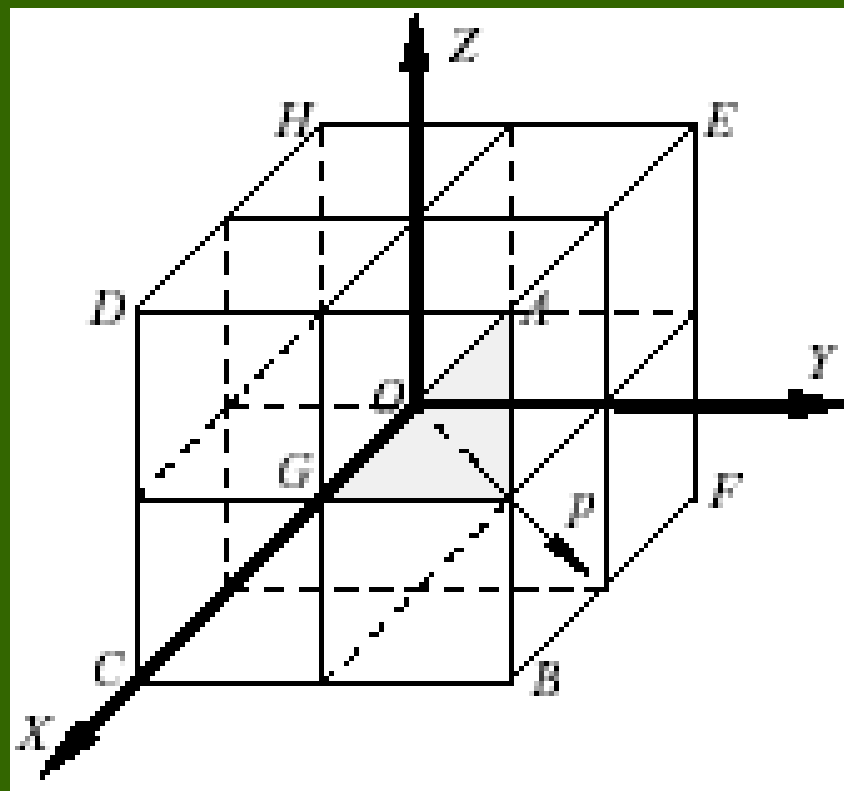
边缘平面

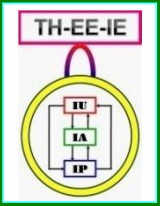
一面密度为零

另一面为单位密度

体素响应值

体积积分密度





4.4.1 3-D边缘检测

{P.104}

体素积
分密度

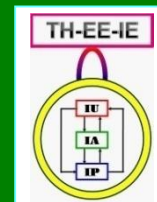
$$I(\alpha, \beta, \gamma, \rho) =$$

$$a = \cos \alpha$$

$$b = \cos \beta$$

$$c = \cos \gamma$$

$$I(\alpha, \beta, \gamma, \rho) = \begin{cases} 1 - I(\alpha, \beta, \gamma, \rho) & \rho \leq 0 \\ 0 & \rho > (a + b + c) / 2 \\ \left(\begin{aligned} & \frac{-\rho^3}{6abc} + \frac{\rho^2}{4} \left(\frac{1}{ab} + \frac{1}{ac} + \frac{1}{bc} \right) + \frac{-\rho}{8} \left(\frac{c}{ab} + \frac{b}{ac} + \frac{a}{bc} - \frac{2}{a} - \frac{2}{b} - \frac{2}{c} \right) \\ & + \frac{1}{48} \left(\frac{c^2}{ab} + \frac{b^2}{ac} + \frac{c^2}{bc} \right) + \frac{1}{16} \left(\frac{b+c}{a} + \frac{a+c}{b} + \frac{a+b}{c} \right) + \frac{1}{8} \end{aligned} \right) & \begin{aligned} & \rho \leq (a + b + c) / 2 \\ & \rho > (a + b - c) / 2 \end{aligned} \\ \left(\begin{aligned} & \frac{\rho^2}{2ab} + \frac{-\rho}{2} \left(\frac{1}{a} + \frac{1}{b} \right) + \frac{c^2}{24ab} + \frac{1}{8} \left(\frac{b}{a} + \frac{a}{b} \right) + \frac{1}{4} \end{aligned} \right) & \begin{aligned} & \rho \leq (a + b - c) / 2 \\ & \rho > (a - b + c) / 2 \end{aligned} \\ \left(\begin{aligned} & \frac{\rho^3}{6abc} + \frac{\rho^2}{4} \left(\frac{1}{ab} + \frac{1}{ac} + \frac{1}{bc} \right) + \frac{\rho}{8} \left(\frac{c}{ab} + \frac{b}{ac} + \frac{a}{bc} - \frac{6}{a} - \frac{2}{b} - \frac{2}{c} \right) \\ & + \frac{1}{48} \left(\frac{c^2}{ab} + \frac{b^2}{ac} + \frac{c^2}{bc} \right) + \frac{1}{16} \left(\frac{b+c}{a} + \frac{a-c}{b} + \frac{a-b}{c} \right) + \frac{3}{8} \end{aligned} \right) & \begin{aligned} & \rho \leq (a - b + c) / 2 \\ & \rho > (a - b - c) / 2 \\ & \rho > (-a + b + c) / 2 \end{aligned} \\ -\frac{\rho}{a} + \frac{1}{2} & \rho \leq (a - b - c) / 2 \\ \frac{\rho^3}{3abc} + \frac{\rho}{4} \left(\frac{c}{ab} + \frac{b}{ac} + \frac{a}{bc} - \frac{2}{a} - \frac{2}{b} - \frac{2}{c} \right) + \frac{1}{2} & \rho \leq (-a + b + c) / 2 \end{cases}$$



4.4.1 3-D边缘检测

模
板
响
应

$$I_n(\alpha, \beta, \gamma, \rho, \Delta x, \Delta y, \Delta z) = I(\alpha, \beta, \gamma, \rho - a\Delta x - b\Delta y - c\Delta z)$$

$$I_x = \sum_{n \in Xmask} I_n W_{xn}$$

$$I_y = \sum_{n \in Ymask} I_n W_{yn}$$

$$I_z = \sum_{n \in Zmask} I_n W_{zn}$$

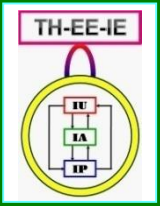
$$M_2 = \sqrt{I_x^2 + I_y^2 + I_z^2}$$

$$\hat{\alpha} = \arccos \frac{I_x}{\sqrt{I_x^2 + I_y^2 + I_z^2}}$$

$$\hat{\beta} = \arccos \frac{I_y}{\sqrt{I_x^2 + I_y^2 + I_z^2}}$$

$$\hat{\gamma} = \arccos \frac{I_z}{\sqrt{I_x^2 + I_y^2 + I_z^2}}$$

$$\cos \varepsilon = \cos \alpha \cos \hat{\alpha} + \cos \beta \cos \hat{\beta} + \cos \gamma \cos \hat{\gamma}$$



4.4.2 3-D图象阈值化

取阈值分割 (2-D \Rightarrow 3-D)

关键：选取阈值

(1) 计算量的增加

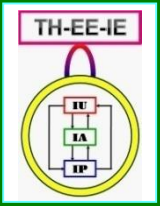
3-D图象数据量有明显增加

(2) 局域运算

局域的概念、种类和尺寸都有扩展

(3) 各向异性

体素可能不是正方形的，体素间距离变化



4.4.2 3-D图象阈值化

1. 推广基于像素的阈值选取方法

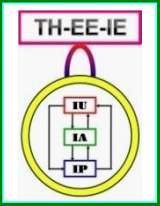
用体素代替像素，直接利用体素性质

(1) 计算量的增加

3-D图象中体素数量大于2-D图象中像素数量

(2) 局域运算（一般不需考虑）

(3) 各向异性（没有什么影响）



4.4.2 3-D图象阈值化

2. 推广基于区域的阈值选取方法

(1) 计算量的增加

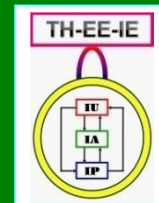
模板尺寸增加 ($2\text{-D} \Rightarrow 3\text{-D}$)

(2) 局域运算 (复杂, 如前)

每个模板所覆盖邻域的大小和形状有多种

(3) 各向异性 (不确定)

局部联系的复杂性



4.4.2 3-D图象阈值化

3. 推广基于坐标的阈值选取方法

(1) 计算量的增加

3-D图象数据量的增加会导致3-D子图象数量和各个子图象数据量的增加。计算量会从 $O(N^2/n^2)$ 增到 $O(N^3/n^3)$

(2) 局域运算（同上，模板多样化）

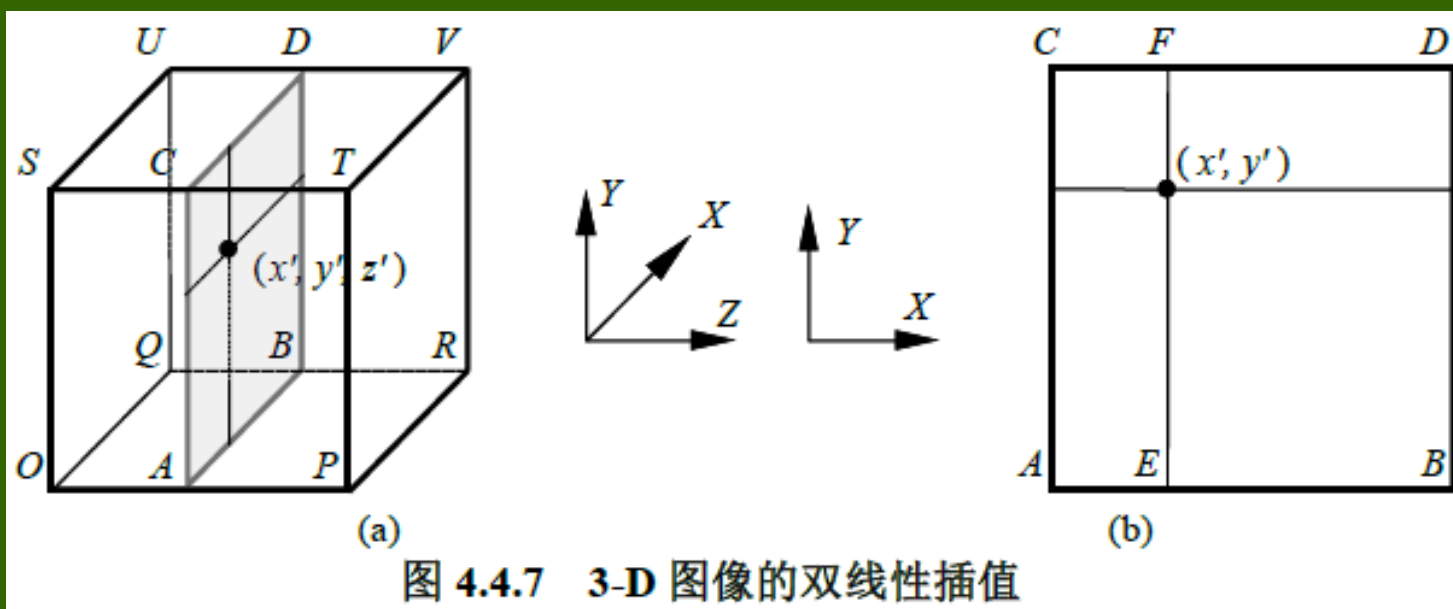
(3) 各向异性（复杂）

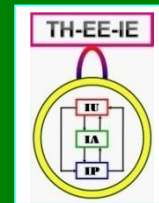
插值算法会受影响

4.4.2 3-D图像阈值化

3-D双线性插值

利用 (x', y', z') 点的八个最近邻像素 O 、 P 、 Q 、 R 、 S 、 T 、 U 、 V 插出 A 、 B 、 C 、 D (2-D平面)





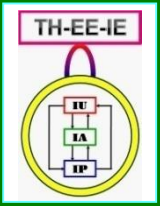
4.5 从灰度图象到彩色图象

标量图象 $f(x, y) \Rightarrow$ 矢量图象 $f(x, y)$

还可推广到更高维

4.5.1 彩色空间的选择

4.5.2 彩色图象分割策略



4.5.1 彩色空间的选择

彩色空间

{上册13.2节}

- 面向硬设备的彩色模型 RGB模型
- 面向视觉感知的彩色模型

HSI模型 (HSV/HSB)

- (1) I 分量与图象的彩色信息无关
- (2) H 和 S 分量与人感受颜色的方式是紧密相连的 (颜色和浓淡)

HSI三分量之间的相关性比RGB三分量之间要小得多

4.5.2 彩色图像分割策略

分割策略

由于 H , S , I 三个分量是相互独立的，所以有可能将一个3-D搜索问题转化为三个1-D搜索

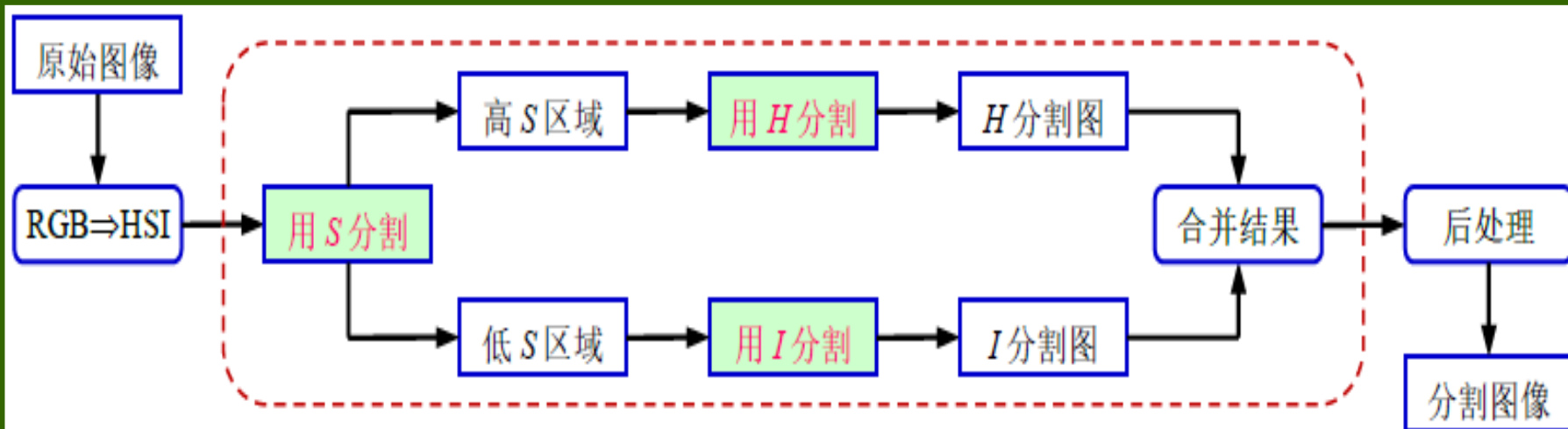


图 4.5.1 对彩色图像不同分量进行序列分割的算法流程图



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/