

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2单元 表达描述

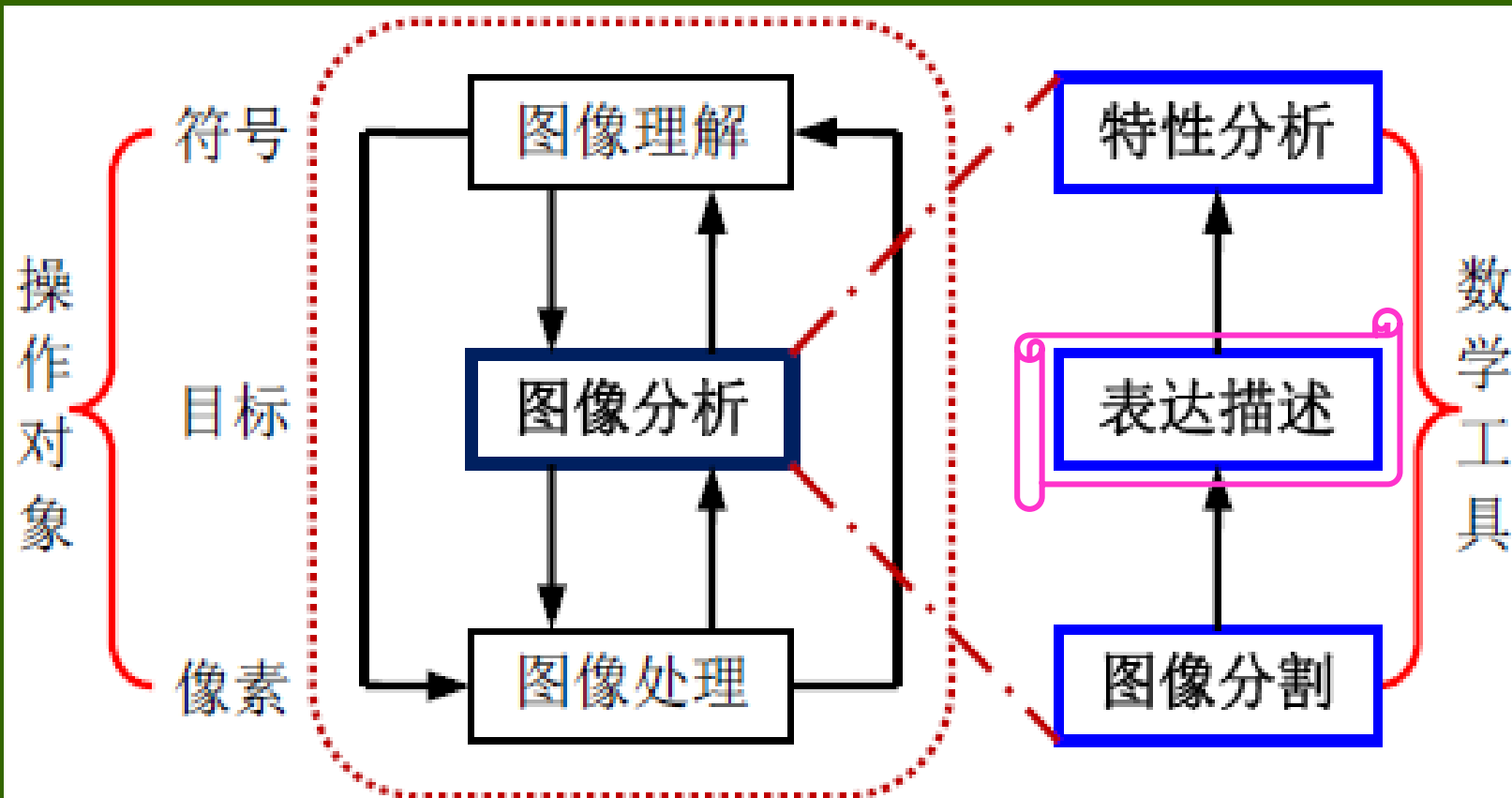
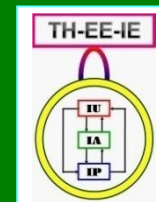


图 1.2.2 图像分析主要功能模块

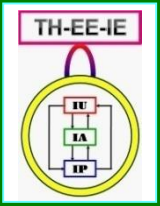


第2单元 表达描述

- 第6章 目标表达
- 第7章 目标描述
- 第8章 测量和误差分析

通过图象分割得到了图象中感兴趣的区域，即目标

为有效地刻画目标，需要对它们采取合适的数据结构进行表达，采用恰当的形式描述它们的特性，并在此基础上进行特征**测量**，从目标获得一些定量的数值以进行分析



第8章 测量和误差分析

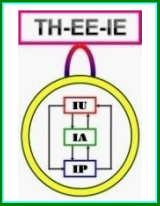
（特征）测量

对目标特征的测量从根本上来说是要从数字化的数据中精确地估计出产生这些数据的模拟量的性质，因为这是一个估计过程，所以误差是不可避免的

$$\text{误差} = | \text{测量数据} - \text{真实数据} |$$

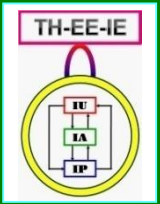
误差可分为系统误差和统计误差

描述误差可用准确度和精确度



第8章 测量和误差分析

- 8.1 直接测度和间接测度
- 8.2 需区别的术语
- 8.3 影响测量误差的因素
- 8.4 误差分析



8.1 直接测度和间接测度

直接测度 (direct measurements)

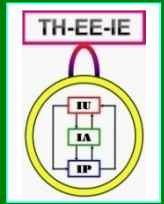
指直接对特征测量的指标

(1) 场测度 (field measurements)

(视) 场数目, 场面积, 目标数量, ...

(2) 特定目标的测度 (feature-specific measurements)

目标的面积, 直径, 孔数量, 内切位置, 切线数量, ...



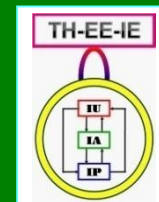
8.1 直接测度和间接测度

推导出的测度（derived measurements）

借助其他已测出的测度而获得的新测度

可以有无穷个（数量可以没有限制）！

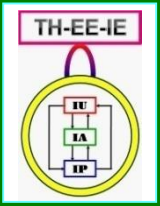
特征测度	英文（缩写）	定义 {表8.1.1}
最长尺度	Longest dimension (L)	长轴长度
宽度	Breadth (B)	短轴长度
平均直径	Average diameter (D)	轴平均长度
面积等价直径	Area equivalent diameter (AD)	$(4A/\pi)^{1/2}$ （对圆就是直径）



8.1 直接测度和间接测度

测度组合

- 测度的和: $d = d_1 + d_2$ ($N=2, \gamma=1, \beta=0$)
- 测度乘实数: $d = \beta d_1$ ($N=1, \gamma_1=0, \beta_1=1/\beta$)
- 测度的倒数: $d = \frac{d_1}{\gamma + d_1}$ ($N=1, \gamma_1=\gamma, \beta_1=1$)
- 通式: $d = \sum_{n=1}^N \frac{d_n}{\gamma_n + \beta_n d_n}$



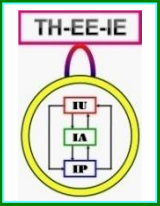
8.2 需区别的术语

几组相关而不相同，类似而不一致的术语或概念

8.2.1 准确性和精确性

8.2.2 模型假设和实际观察

8.2.3 4-连通和8-连通



8.2.1 准确性和精确性

1. 准确性和精确性的定义

- 准确性或准确度 (accuracy)

实际测量值和作为 (参考) 真值的客观标准值之间的接近程度: $E\{\tilde{A}\} = A$

- 精确性或精确度 (precision)

根据重复性来定义, 这里重复性指测量过程能重复进行并得到相同测量结果的能力

一致估计 $\hat{A} \xrightarrow{N \rightarrow \infty} A$ (基于 N 个样本)

8.2.1 准确性和精确性

2. 准确性和精确性的关系

估计中间图里黑十字的位置（圆点为均值）

左：估计不一致（分布无规律/不精确）但无偏

右：估计相当一致但不准确，有偏

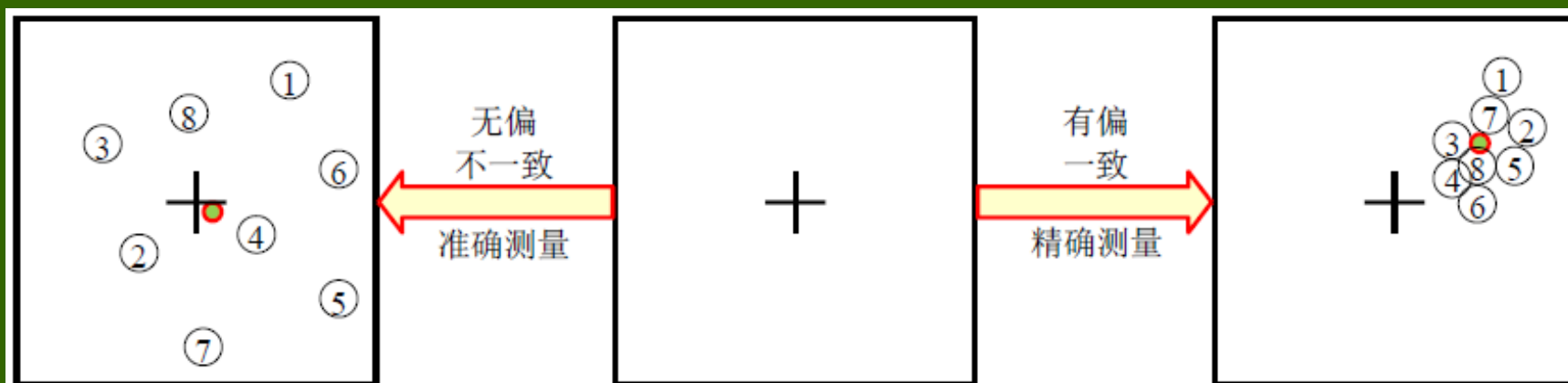
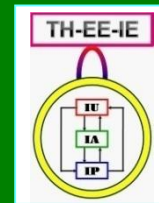


图 8.2.1 解释准确性和精确性的示例



8.2.1 准确性和精确性

3. 系统误差和统计误差

- ✓ 系统误差反映（参考）真值和测量数据的平均值之间的差别（ \Leftrightarrow 准确性）
- ✓ 统计误差描述重复测量所得到的测量数据（相对于重心值）的散射程度（ \Leftrightarrow 精确性）
- 统计误差大但系统误差小时，每个测量值都与真值差别大但它们的均值可能接近真值
- 统计误差小但系统误差大时就会得到高精确性（一致性强）但低准确性（有偏）的结果

8.2.2 模型假设和实际观察

模型本身只能在一定的准确性和正确程度上来描述客观场景，例如（与系统误差有关）：

(1) 实际观察的结果与模型假设完全一致，但这并不能保证模型假设的正确性

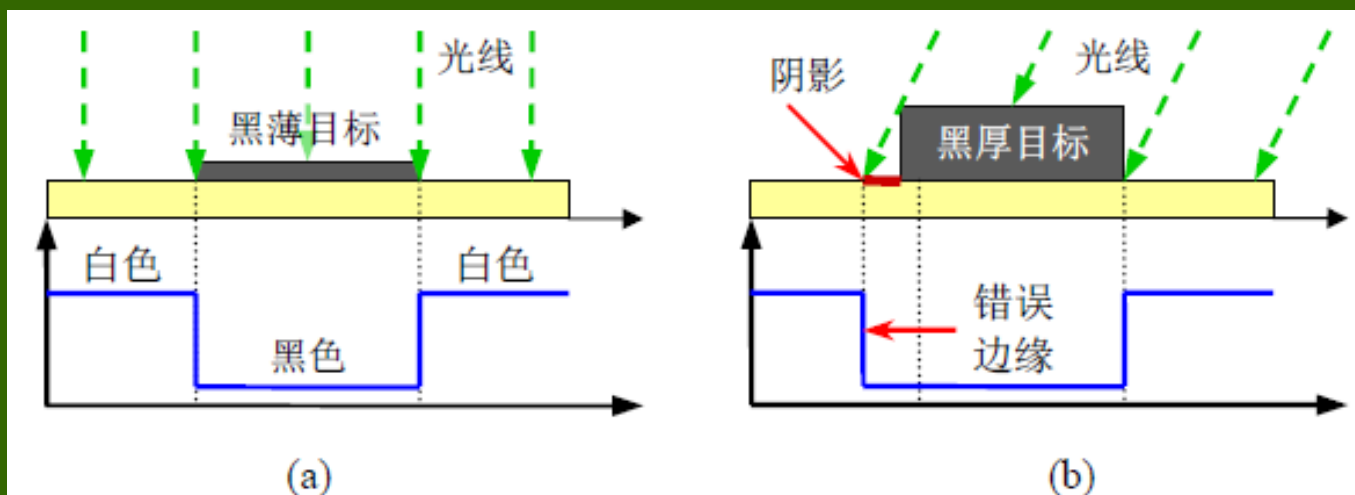


图 8.2.2 从感知的图像中看不出系统误差的示例

8.2.2 模型假设和实际观察

(2) 模型假设有问题，但实际观察却发现不了
这并不能说任何双峰直方图都源于这样一幅
图象，也不能安全地做出黑色目标在白色背景
上，或反过来白色目标在黑色背景上的结论

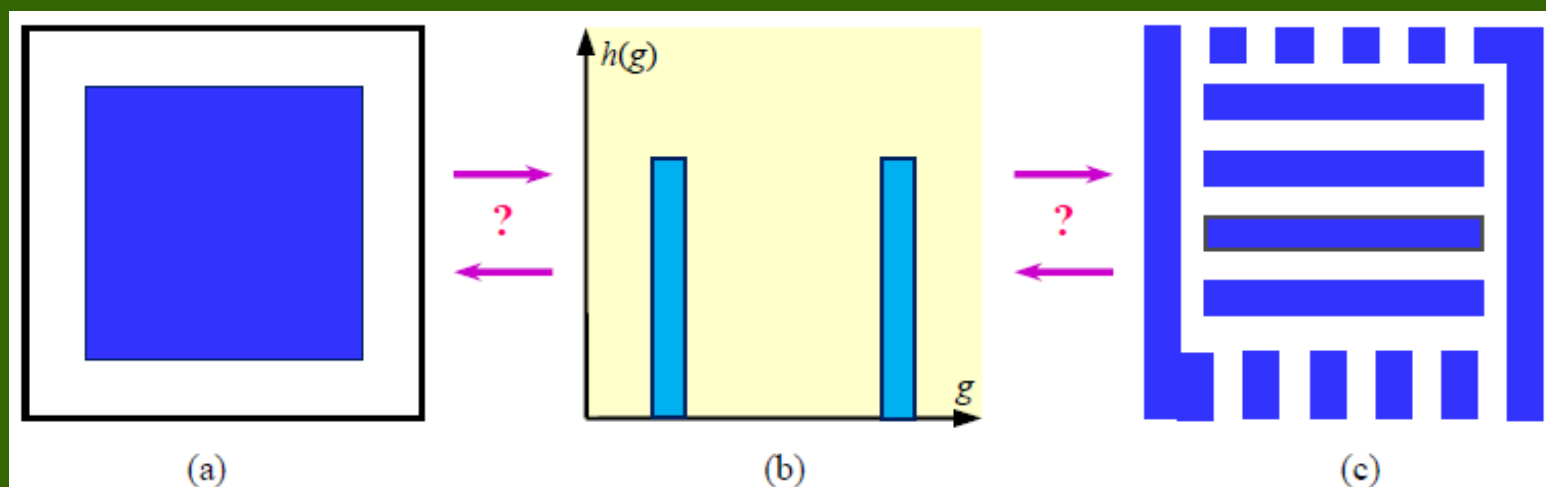
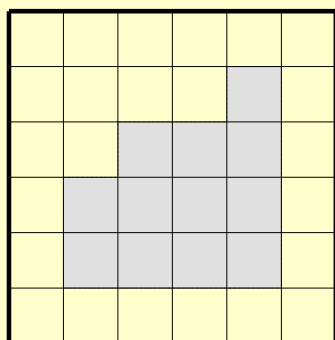


图 8.2.3 从图像直方图不能推出模型假设的示例

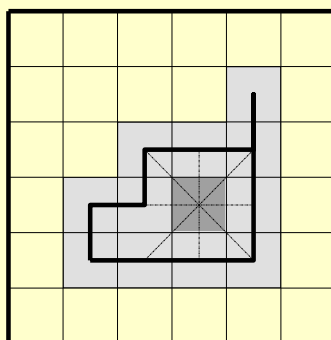
8.2.3 4-连通和8-连通

1. 边界点和内部点

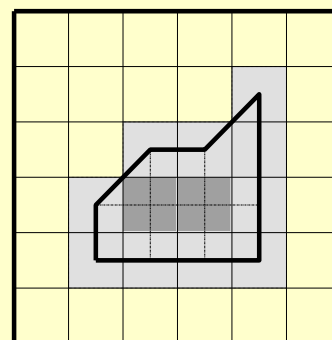
➤ 连通悖论



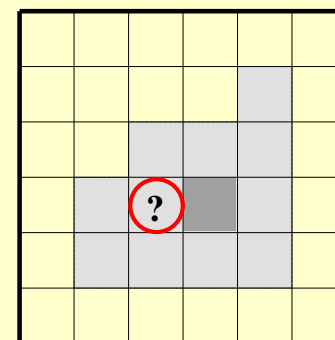
(a)



(b)



(c)



(d)

(a) 其中的浅阴影像素点组成1个目标区域

(b) 8-连通内部点（1个），4-连通边界点

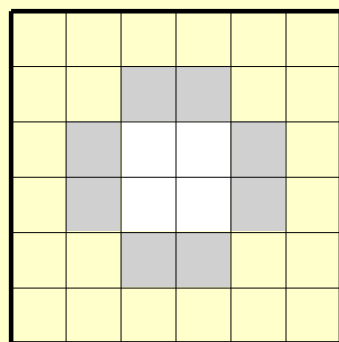
(c) 4-连通内部点（2个），8-连通边界点

(d) 内部点和边界点： 均4-连通？ 均8-连通？

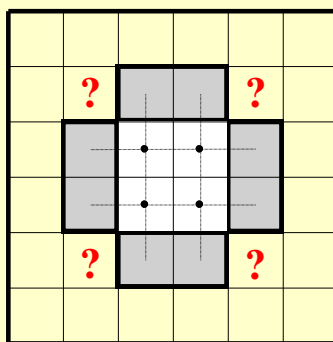
8.2.3 4-连通和8-连通

2. 目标点和背景点

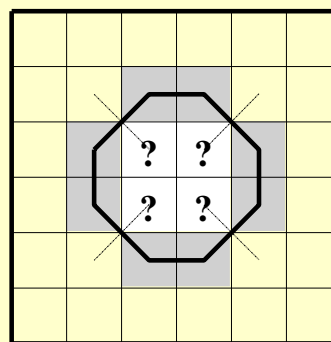
➤ 连通悖论



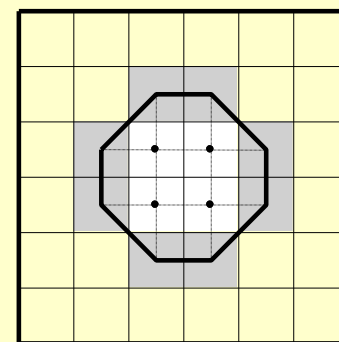
(a)



(b)



(c)



(d)

- (a) 有一个带孔的黑色目标（环状）处在白色背景中
- (b) 使用4-连通性来确定目标和背景（目标不连通）
- (c) 使用8-连通性来确定目标和背景（孔与背景连通）
- (d) 使用4-连通性来确定孔，8-连通性来确定目标

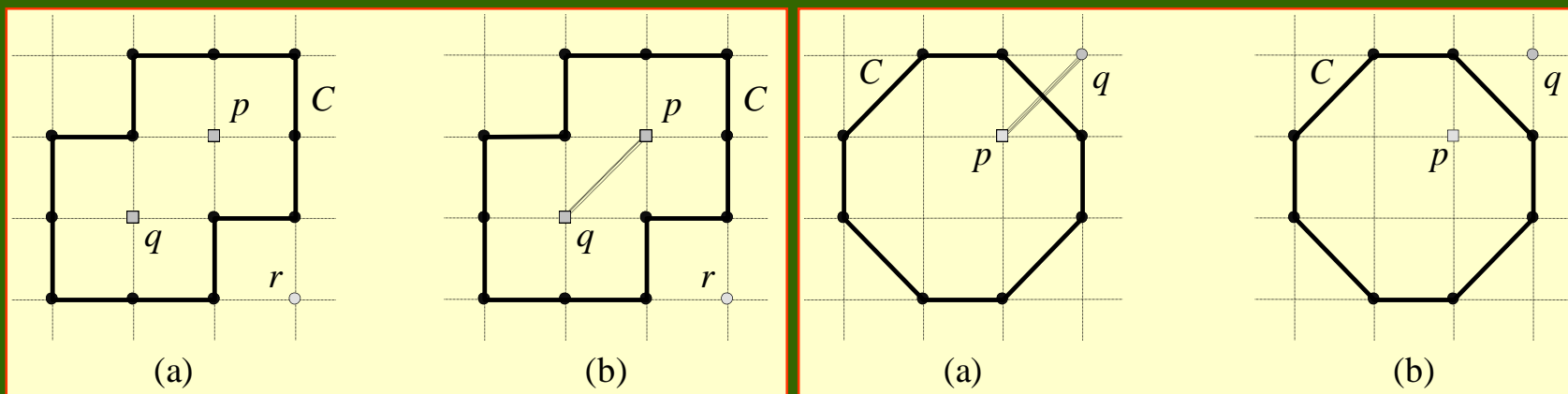
8.2.3 4-连通和8-连通

3. 连通组元的分离

➤ 连通悖论

左：一个4-连通的轮廓能分开三个4-连通的组元

右：一个8-连通的轮廓分不开两个8-连通的组元



解决方法：使用对偶的连通性

8.2.3 4-连通和8-连通

4. 开集和闭集目标

➤ 连通悖论

区域闭集（包括边界点），区域开集（不包括边界点）

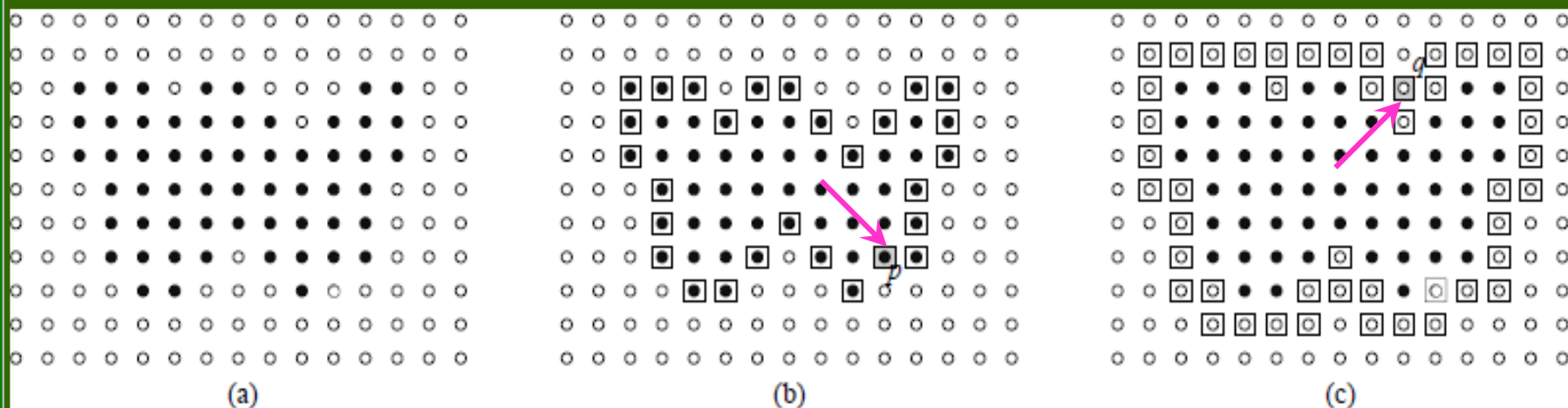


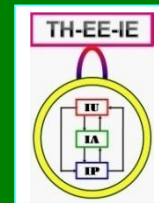
图 8.2.8 二值图的轮廓

(a) 黑点代表8-连通的目标点，白点代表4-连通的背景点

(b) 将目标考虑成闭集， p 在 B 中有三个8-邻域点

(c) 将目标考虑成开集， q 在 B 中有三个4-邻域点

B 不是封闭的数字曲线



8.3 影响测量误差的因素

8.3.1 误差来源

8.3.2 光学镜头分辨率

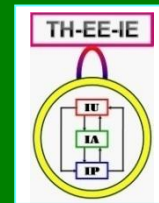
8.3.3 采样密度

8.3.4 分割算法

8.3.5 特征计算公式

8.3.6 综合影响

8.3.7 随机样本共识



8.3.1 误差来源

(数字) 测量

从数字化的数据出发，精确地估计产生这些数据的原始模拟量的性质

导致测量产生误差的因素：

- (1) 客观物体本身参数或特征的自然变化
不同物体（可能随时间进程）有不同的
颜色、尺寸、形状、表面特性、.....
- (2) 图象采集过程
光学镜头分辨率
从连续到离散：空间采样和灰度量化

8.3.1 误差来源

- (3) 不同的图象处理和分析手段
例如编码，分割等导致丢失信息，改变形态等
- (4) 不同的特征测量方法和计算公式
- (5) 图象加工过程中噪声等干扰的影响
与设备、传输线路、加工算法等有关

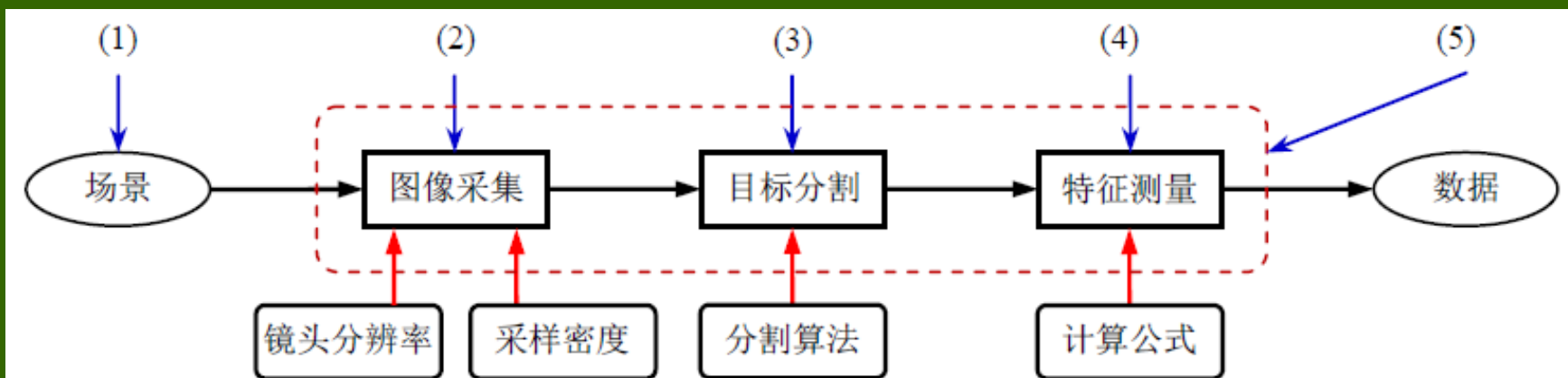
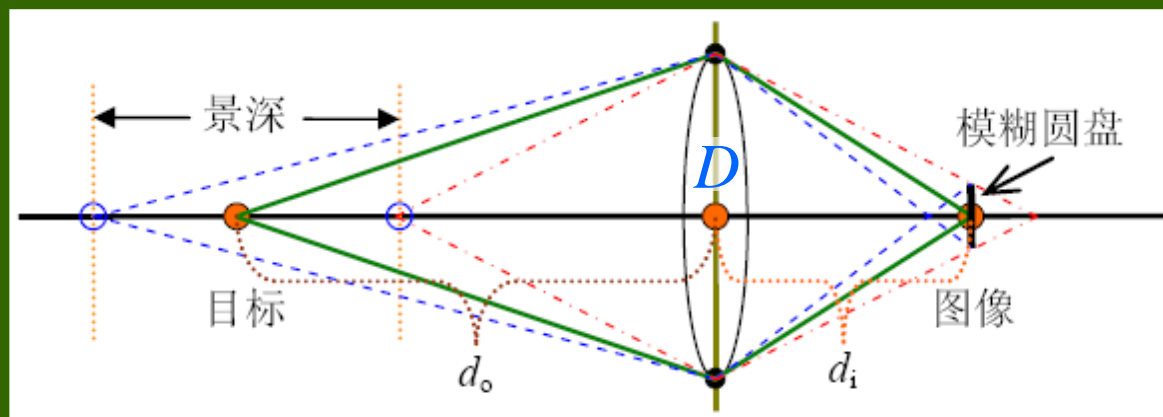


图 8.3.1 图像分析的几个关键步骤和若干影响测量准确度和精确度的因素

8.3.2 光学镜头分辨率

- ✓ 一个有限散射的光学镜头，其点扩散函数在成象平面的第1个零点对应半径为

$$r = \frac{1.22 \cdot \lambda}{D} d_i$$

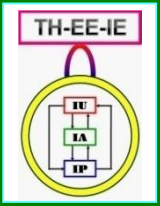


λ 是光的波长（对自然光常取 $\lambda = 0.55 \mu\text{m}$ ）

d_i 是镜头到成象平面的距离， D 是镜头直径

瑞利分辨率准则：

⇒ 可以区分开两个距离为 r 的点源图象



8.3.2 光学镜头分辨率

(1) 普通照相机

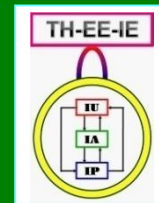
一般拍照时有 $d_o \gg d_i \approx f$

设镜头的 f -因数（光圈F值）为 $n_f = f/D$

$$r = \frac{1.22 \cdot \lambda}{D} d_i \approx 1.22 \cdot \lambda \frac{f}{D} = 1.22 \cdot \lambda \cdot n_f$$

(2) 望远镜

景物的图象尺寸小于第1个零点所对应的半径
望远镜点扩散函数的尺寸决定了分辨率



8.3.2 光学镜头分辨率

(3) 显微镜

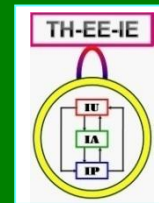
- 放大倍数大于10倍时，有 $d_i \gg d_o = f$
- 数值孔径

$$NA \approx \frac{D}{2f}$$

$$r = \frac{1.22 \cdot \lambda}{2 \cdot NA} = 0.61 \cdot \lambda / NA$$

与光的波长成正比，与镜头的光圈数成反比

- 现代显微镜视场的直径是22 mm (0.9 in.)，而先前的显微镜视场的直径是20 mm (0.8 in.)



8.3.3 采样密度

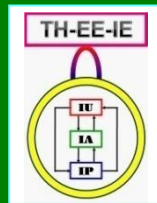
- 分析中不能只从采样定理出发来选取采样率

1. 采样定理的适用性

如果信号 $f(x)$ 中的最高频率分量为 w_0 ，要从采样完全恢复信号，则采样频率必须满足 $w_s > 2w_0$ 。

采样过程： $w_s = 2\pi/x_s$ (x_s : 采样间隔)

$$\hat{f}(x) = \sum_{n=-\infty}^{n=+\infty} f(x)\delta(x - nx_s) = \sum_{n=-\infty}^{n=+\infty} f(nx_s)\delta(x - nx_s)$$



8.3.3 采样密度

1. 采样定理的适用性

采样集合：

$$\{f_n\} = \{f(nx_s) | n = -\infty, \dots, -1, 0, 1, \dots, +\infty\}$$

为完全表示带限信号 $f(x)$ ，需要无穷个采样

如果限制信号在有限区间，信号不是带限的

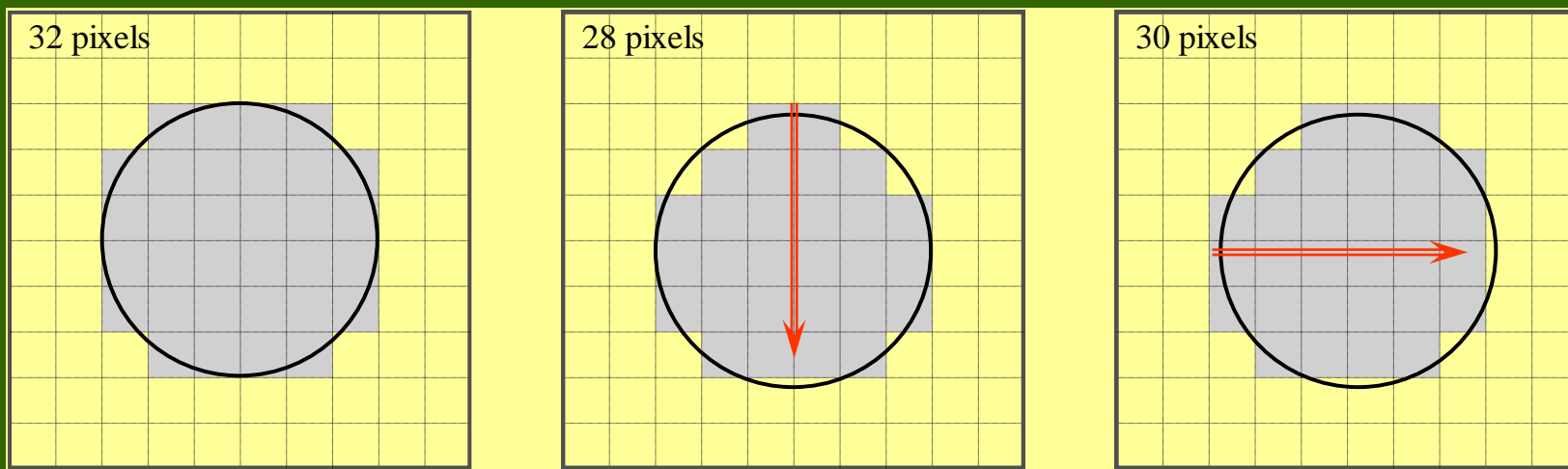
对任一个信号 $f(x)$ 和与其对应的频谱 $F(\omega)$ ，或者是 $f(x)$ 在空域有限，或者是 $F(\omega)$ 在频域有限，但不能同时有限（ \therefore 此时：采样定理不合用）

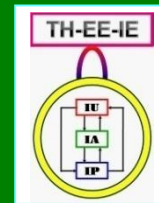
8.3.3 采样密度

2. 采样对目标特征测量的影响

对给定尺寸的目标，采样密度增加，属于目标的像素数量增加。一般来说，一个目标中的像素越多，测量目标特征时应该越准确

采样密度不够，测量不够准确





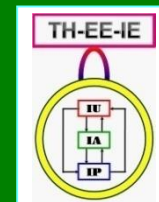
8.3.3 采样密度

2. 采样对目标特征测量的影响

- 利用采样定理来指导对采样率的选择并不可靠
- 不可能写出在有限步骤（或有限时间）内能从采样数据中获得准确测量值的算法

$$f(x) = \sum_{n=-\infty}^{n=+\infty} f(nx_0)h(x-nx_0) = \sum_{n=-\infty}^{n=+\infty} f(nx_0) \frac{\sin[\omega_s(x-nx_0)]}{\omega_s(x-nx_0)}$$

- 准确测量的公式：需要用到无穷个采样
需要计算无穷个sinc函数

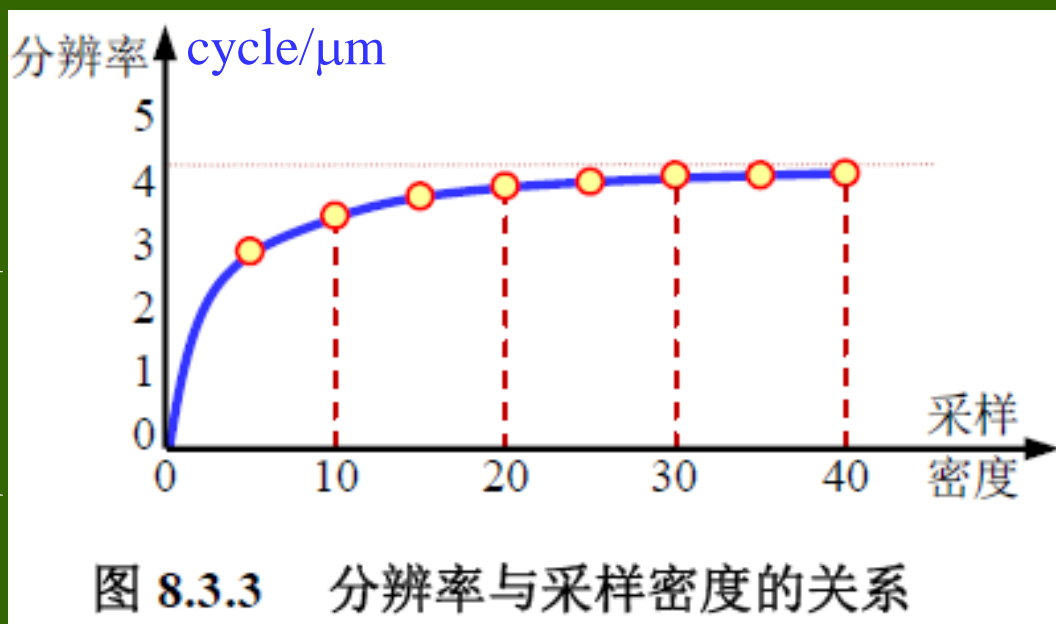


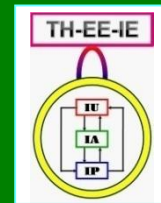
8.3.3 采样密度

3. 采样密度的选择

图象分辨率与采样密度的关系（实验结果）

- (1) 4 ~ 6 pixel/ μm
确定目标位置
- (2) 15 ~ 30 pixel/ μm
观察结构细节
- (3) 30 ~ 40 pixel/ μm
内容基本不变





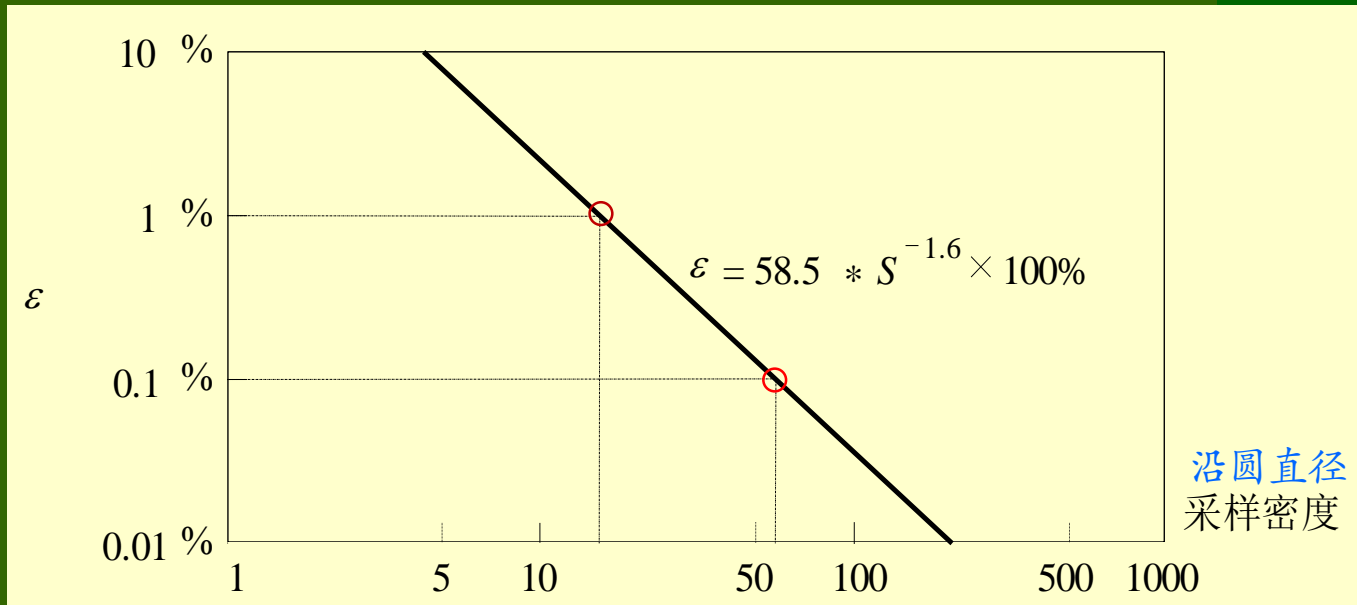
8.3.3 采样密度

3. 采样密度的选择

采样密度与要测量目标尺寸的关系

对圆形物体求面积

$$\varepsilon = \frac{|A_E - A_T|}{A_T} \times 100\%$$



进行高准确度的测量常需要相当大的过采样

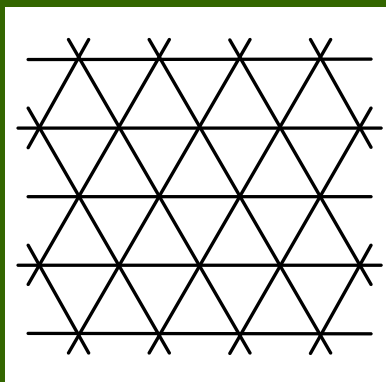
8.3.3 采样密度

4. 采样模式的影响

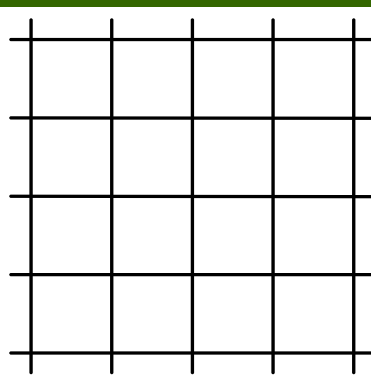
图象采集：用一个离散的模式采样

三种规则的形式（采样模式）：

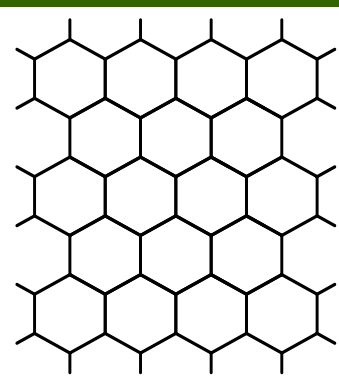
三角形



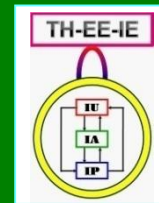
正方形



六边形



模式应有固定的规格并可以无缝地覆盖2-D平面



8.3.3 采样密度

4. 采样模式的影响

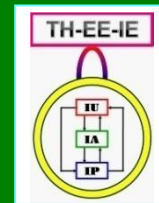
设可以用正 n 边形将一个平面覆盖，则此正 n 边形的内角大小应该为 $[(n-2) \times 180^\circ]/n$

要把一个平面完全覆盖，则整数个内角和应为 360° 。设此整数为 m ，则有：

$$m[(n-2) \times 180^\circ]/n = 360^\circ$$

因为 m 和 n 都是整数，所以只有三组解：

- (1) $n = 3$, $m = 6$, 对应三角形覆盖
- (2) $n = 4$, $m = 4$, 对应正方形覆盖
- (3) $n = 6$, $m = 3$, 对应六边形覆盖



8.3.3 采样密度

4. 采样模式的影响

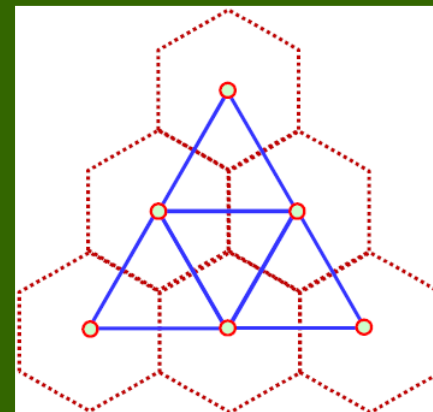
网格：将图象平面分解成小单元的集合
图象网格与采样模式互补

三角形模式 \Leftrightarrow 六边形网格

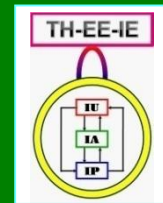
正方形模式 \Leftrightarrow 正方形网格

六边形模式 \Leftrightarrow 三角形网格

六边形模式

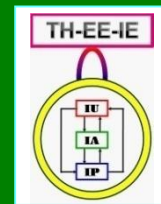


没有“连通悖论”（8.2.3小节）问题
有较高的采样效率



8.3.4 分割算法

- 采用不同的分割算法或同一算法中的参数选取不同时都会导致分割结果的变化
- 分割结果的变化直接影响各特征量的测量结果
- 当分割结果发生相同变化时，不同特征量的测量结果所受到的影响也不同
- {参见5.3.3小节例5.3.1}对一些目标特征在若干影响因素变化情况下的特征量测量精度受图象分割的影响进行了研究

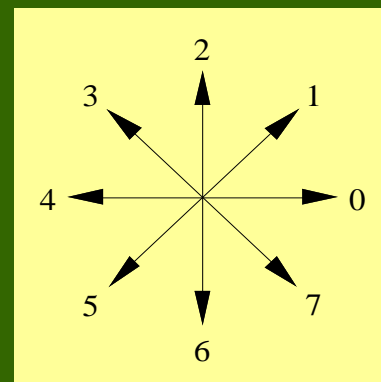


8.3.5 特征计算公式

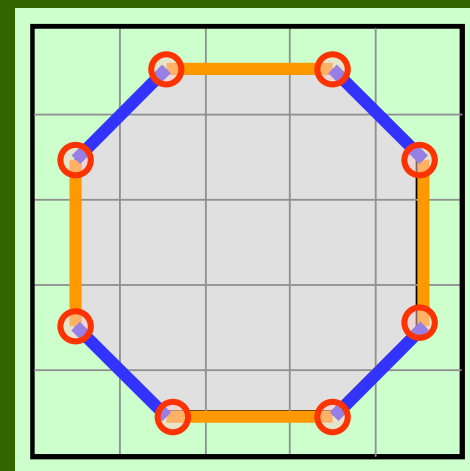
1. 基于链码的距离测量

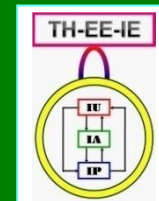
链码长度的计算通式

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



- N_e : 偶数链码的个数
- N_o : 奇数链码的个数
- N_c : 角点（即链码方向发生变化的点）个数





8.3.5 特征计算公式

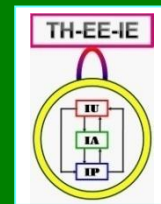
1. 基于链码的距离测量

链码长度的不同计算公式

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

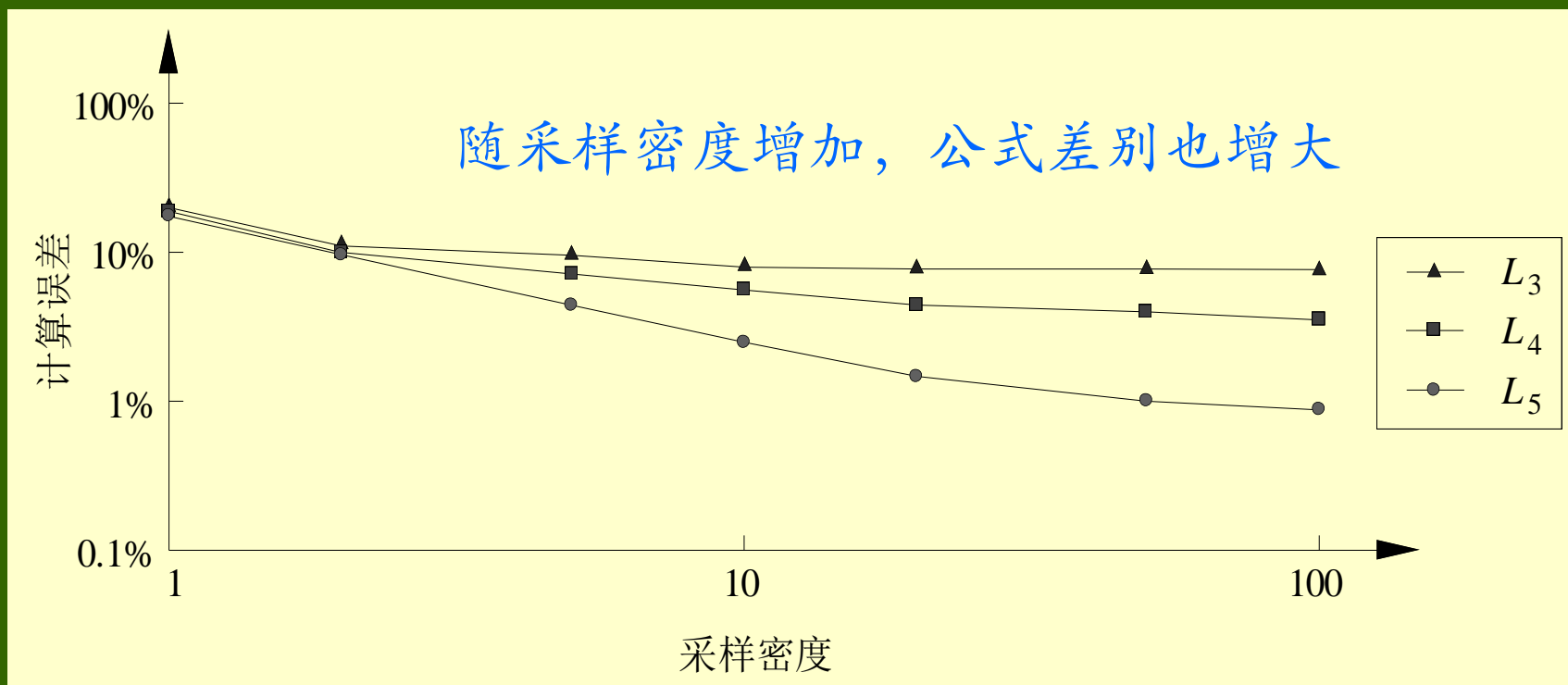
相对均方
根误差

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

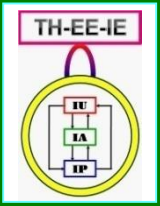


8.3.6 综合影响

不同长度计算公式的误差随采样密度变化



这些公式的误差都有不随采样率改变的下限



8.3.7 随机样本共识

RANSAC是一种通用的、从存在野点的数据中拟合出模型的方法

选择一个最小子集来拟合模型，选择出具有最多内点数的子集和内点来计算需要的模型

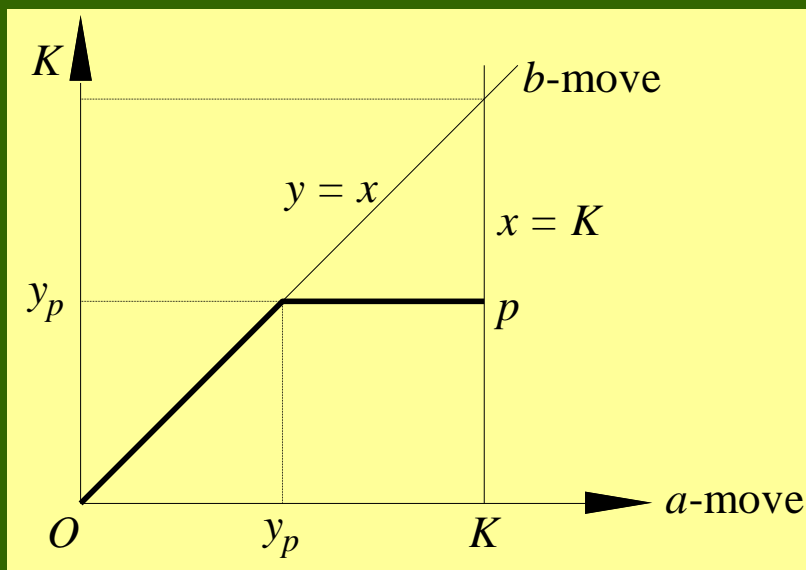
- (1) 随机选择一个最小的数据子集
- (2) 使用这个最小子集估计模型参数
- (3) 计算该模型拟合后的内点数
- (4) 按照事先确定的次数重复进行前3个步骤
- (5) 根据最好的拟合结果中的所有内点来重新估计参数

8.4 误差分析

➤ 用离散距离代替欧氏距离所产生的误差

相对误差 $E_D(O, p) = \frac{(1/s)d_D(O, p) - d_E(O, p)}{d_E(O, p)} = \frac{1}{s} \left[\frac{d_D(O, p)}{d_E(O, p)} \right] - 1$

使用斜面距离， s 的典型值为 $s = a$ （即 a -move的长度）



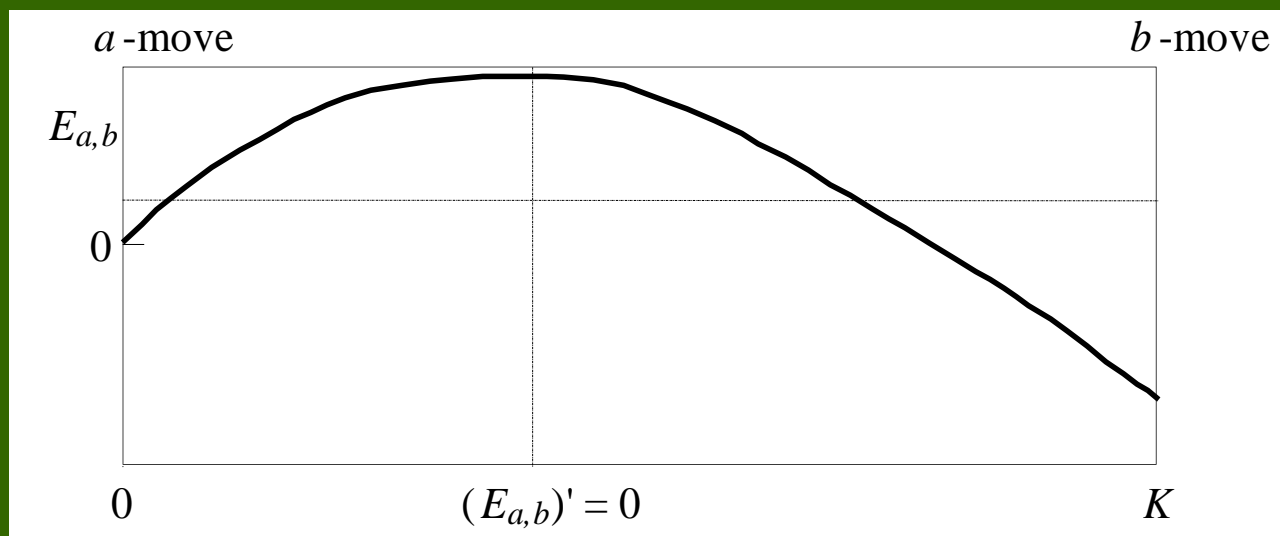
考虑第1卦限的点 p

$$d_{a,b}(O, p) = (x_p - y_p)a + y_pb$$

$$E_{a,b}(O, p) = \frac{(K - y_p)a + y_pb}{s\sqrt{K^2 + y_p^2}} - 1$$

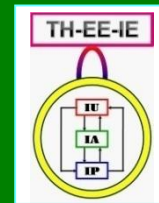
8.4 误差分析

- 用离散距离代替欧氏距离所产生的误差
对 $y_p \in [0, K]$, 典型的 $E_{a,b}(O, p)$ 的函数曲线



由 $\partial E_{a,b} / \partial y = 0$ 可解得 p 的坐标为 $[K, (b-a)K/a]$

$$E_{a,b}(O, p) = [a^2 + (b-a)^2]^{1/2} / s - 1$$



8.4 误差分析

➤ 用离散距离代替欧氏距离所产生的误差

最大相对误差

$$E_{\max} = \max \{|E_{a,b}(O, p)|; x_p = K; 0 \leq y_p \leq K\}$$

或者在局部极值处取得，或者在 $y_p \in [0, K]$ 的边界取得

$$E_{\max}(O, p) = \max \left\{ \left| \frac{a}{s} - 1 \right|, \left| \frac{\sqrt{a^2 + (b-a)^2}}{s} - 1 \right|, \left| \frac{b}{\sqrt{2}s} - 1 \right| \right\}$$

- E_{\max} 的数值并不依赖于 K



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/