数字图象处理

中国科学技术大学

电子工程与信息科学系

主讲教师：李厚强 (lihq@ustc.edu.cn)

周文罡 (zhwg@ustc.edu.cn)

李　礼 (lil1@ustc.edu.cn)

助　　教：刘为顺 (liuws@mail.ustc.edu.cn)

景卓然 (j1810188947@mail.ustc.edu.cn)

课程主页：https://ustc-dip.github.io/

第2章　数字图像基础

2.1　视觉感知要素

2.2　光和电磁波谱

2.3　图像感知和获取

2.4　图像取样和量化

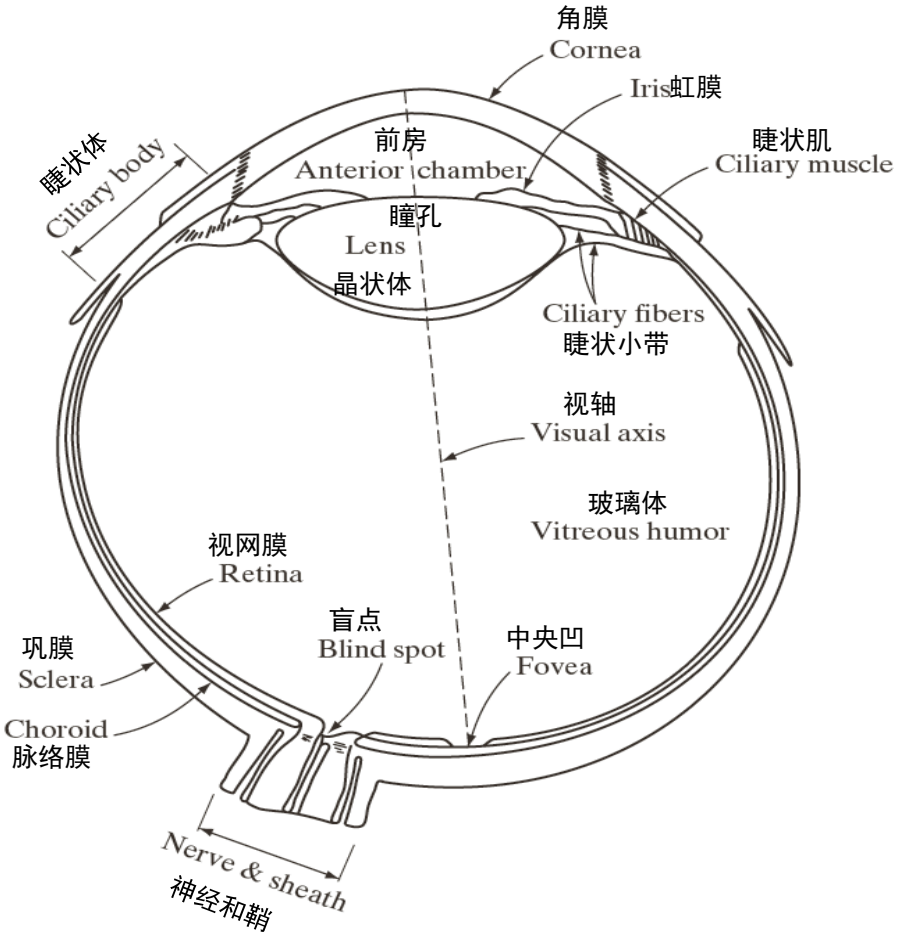
2.5　像素间的基本关系

2.6　常用数学工具

2.1 视觉感知要素

◆ 人眼的剖面简图

视网膜有两类感光器：**锥状体**和**杆状体**



锥状体：白昼视觉或亮视觉（600-700万）

对颜色高度敏感，而且每个锥状体都连接到自身的神经末梢，人可以充分地分辨图像细节

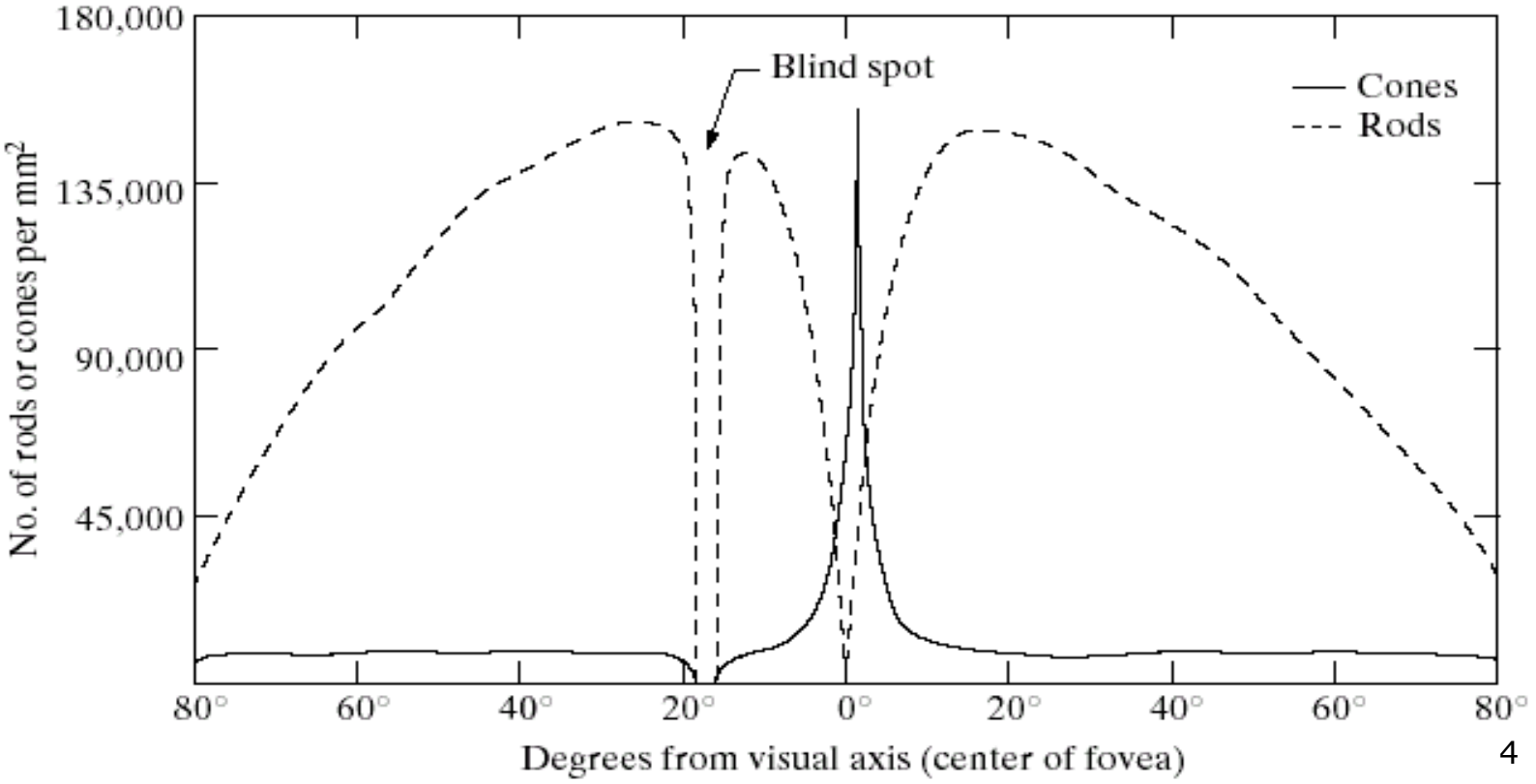
杆状体：暗视觉或微光视觉（7500-15000万）

它们没有色彩感觉，而对低照明度敏感。几个杆状体才连到一个神经末梢，所以不感知事物的细节，只感知一般的总体图像。

2.1 视觉感知要素

视网膜上杆状体 (Rods) 与锥状体 (Cones) 的密度分布

下图横坐标：离开视轴的度数



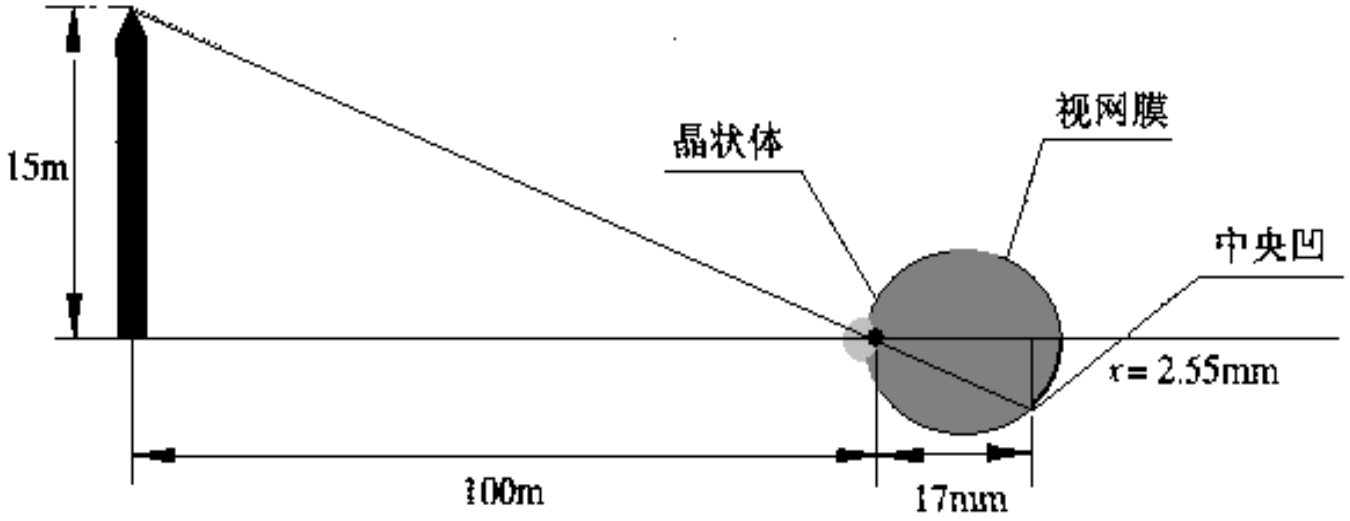
2.1 视觉感知要素

- 感受器的分布基本是关于中央凹对称的。**锥状体**在视网膜的中心也就是中央凹的中心区域最密。
- 从该中心向外到偏离视轴大约20度，**杆状体**的密度逐渐增大，然后向外到视网膜的极限边缘处，密度逐渐下降。
- 中央凹本身是视网膜中直径约为1.5mm的圆形凹坑。可以把中央凹看成是大小为1.5mm*1.5mm的方形传感器阵列。

2.1 视觉感知要素

◆ 眼睛中图像的形成

- 球体前端为晶状体，相当于**镜头**，内壁为视网膜，相当于**胶片**。
- 眼睛实现正确聚焦的焦距是通过**改变晶状体的形状**来得到的。
- 与相机成像不同：相机通过改变镜头和成像平面的间距实现聚焦



2.1 视觉感知要素

- 亮度适应和辨别
  - 主观亮度是进入人眼的光强的对数函数

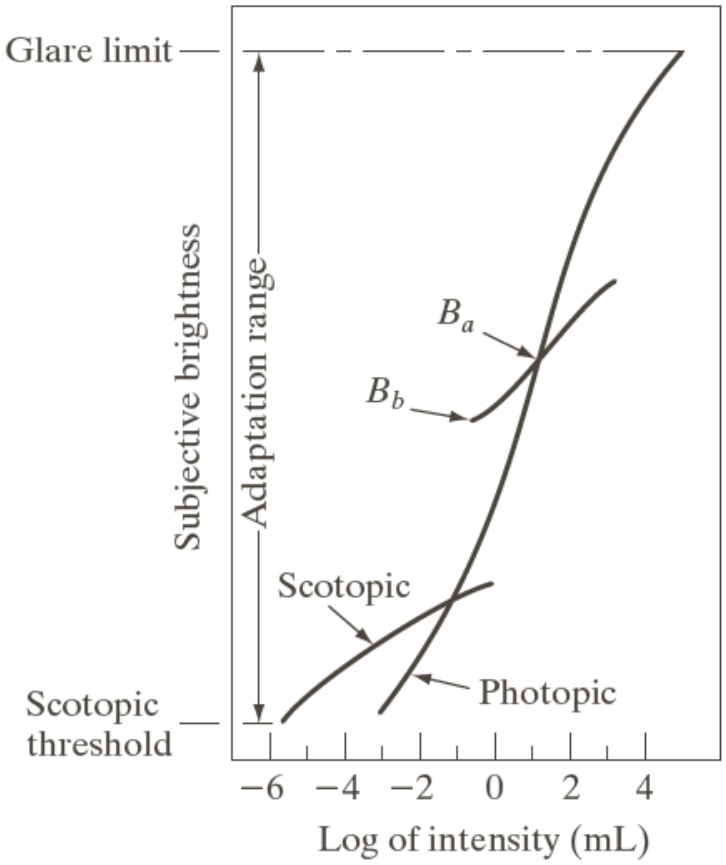


FIGURE 2.4 Range of subjective brightness sensations showing a particular adaptation level.

- Scotopic：暗视觉
- Photopic：亮视觉
- 亮度适应级别：视觉系统的当前灵敏度级别
- 单位mL：郎伯

2.1 视觉感知要素

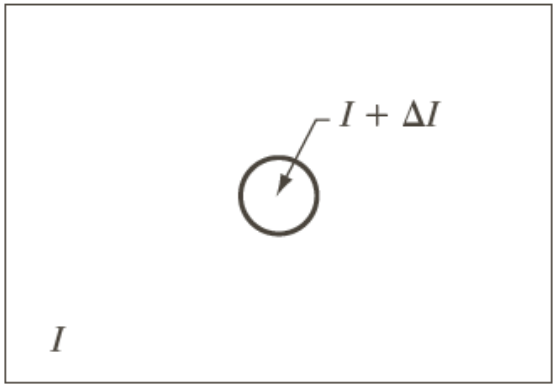
- 亮度适应和辨别

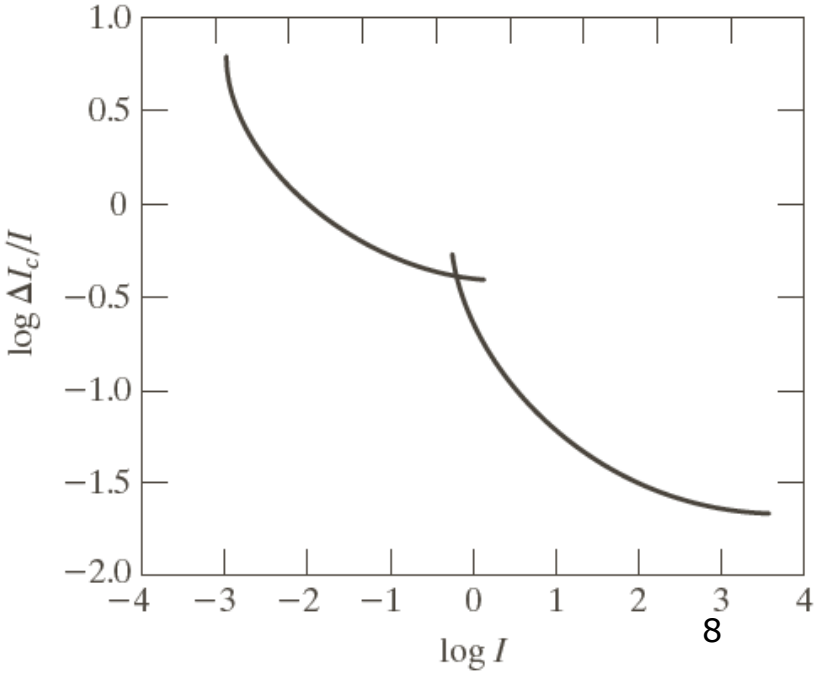
ΔI_c：可辨别照明增量的50%

韦伯比： $\Delta I_c / I$

曲线表明，在低照明级别，亮度辨别较差，但会随着背景照明的增加而明显改善。

原因：在低照明水平下，视觉有杆状体执行，在高照明水平下，视觉由锥状体执行。



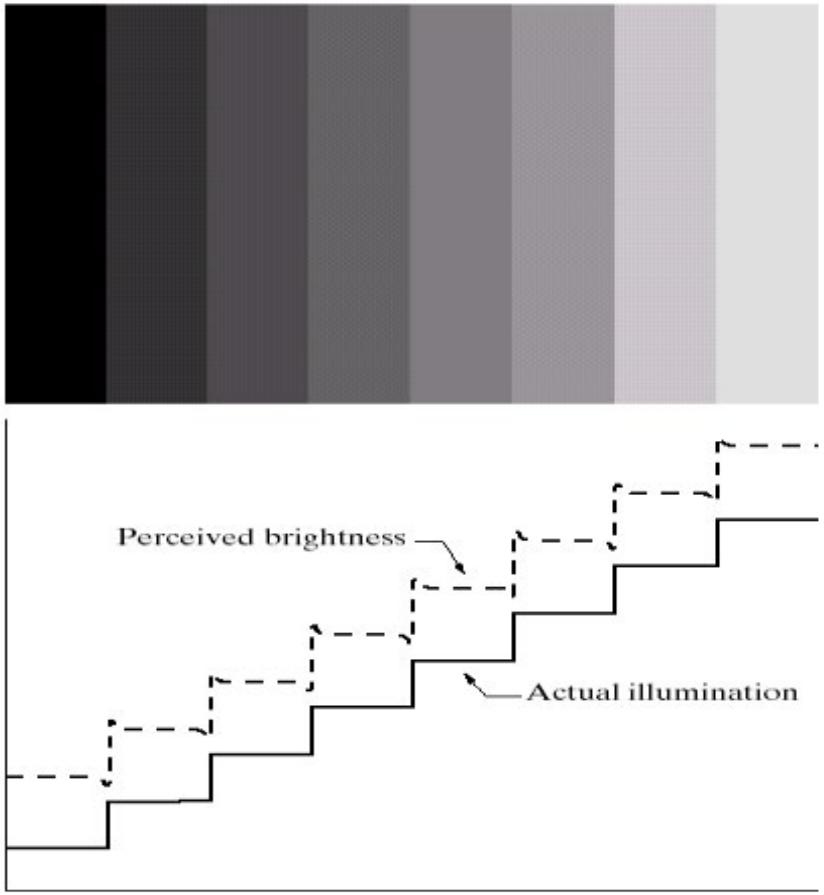


2.1 视觉感知要素

马赫带效应

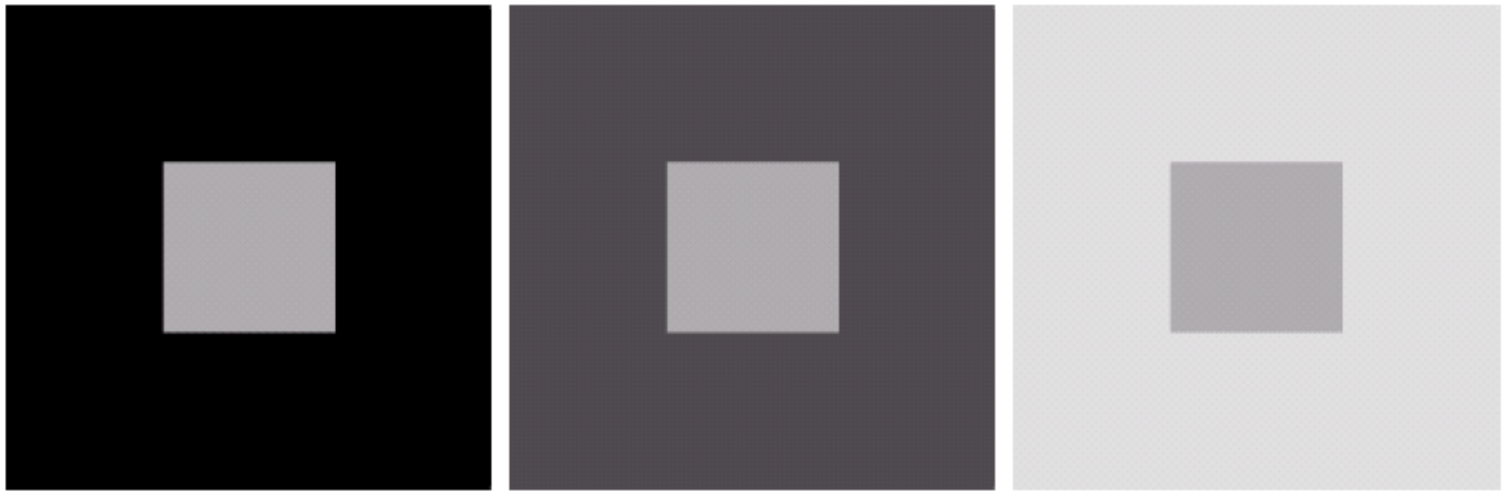
马赫带：马赫于1865年首先描述视觉系统倾向不同强度区域边界周围的”欠调”或”过调”。

证明了**感觉亮度**不是简单的强度函数。



2.1 视觉感知要素

同时对比现象



所有的中心方块有同样的亮度，但当背景变亮时，感觉它们就逐渐变暗。

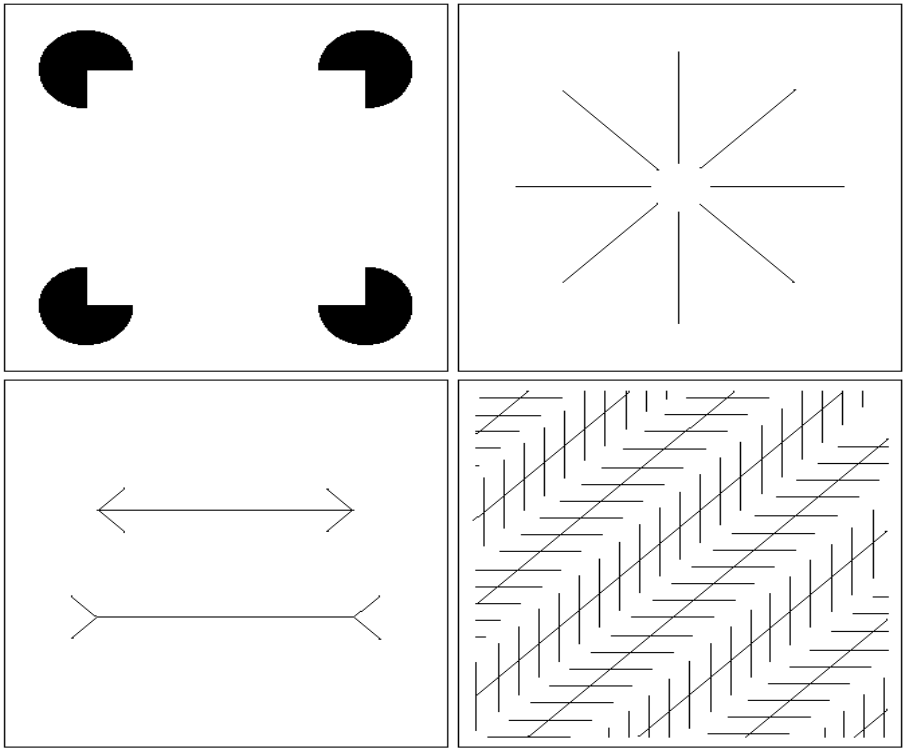
即感知区域的亮度并不简单地取决于其绝对强度。**同样证明了感觉亮度不是简单的强度函数。**

2.1 视觉感知要素

视觉错觉

眼睛填充了不存在的信息或者错误地感知了物体的几何特点。

错觉是人类视觉系统的一种特性，这一特性尚未被人类完全了解。



左上：正方形轮廓；右上：圆轮廓；

左下：长度错觉；右下：平行线错觉

第2章　数字图像基础

2.1　视觉感知要素

2.2　光和电磁波谱

2.3　图像感知和获取

2.4　图像取样和量化

2.5　像素间的基本关系

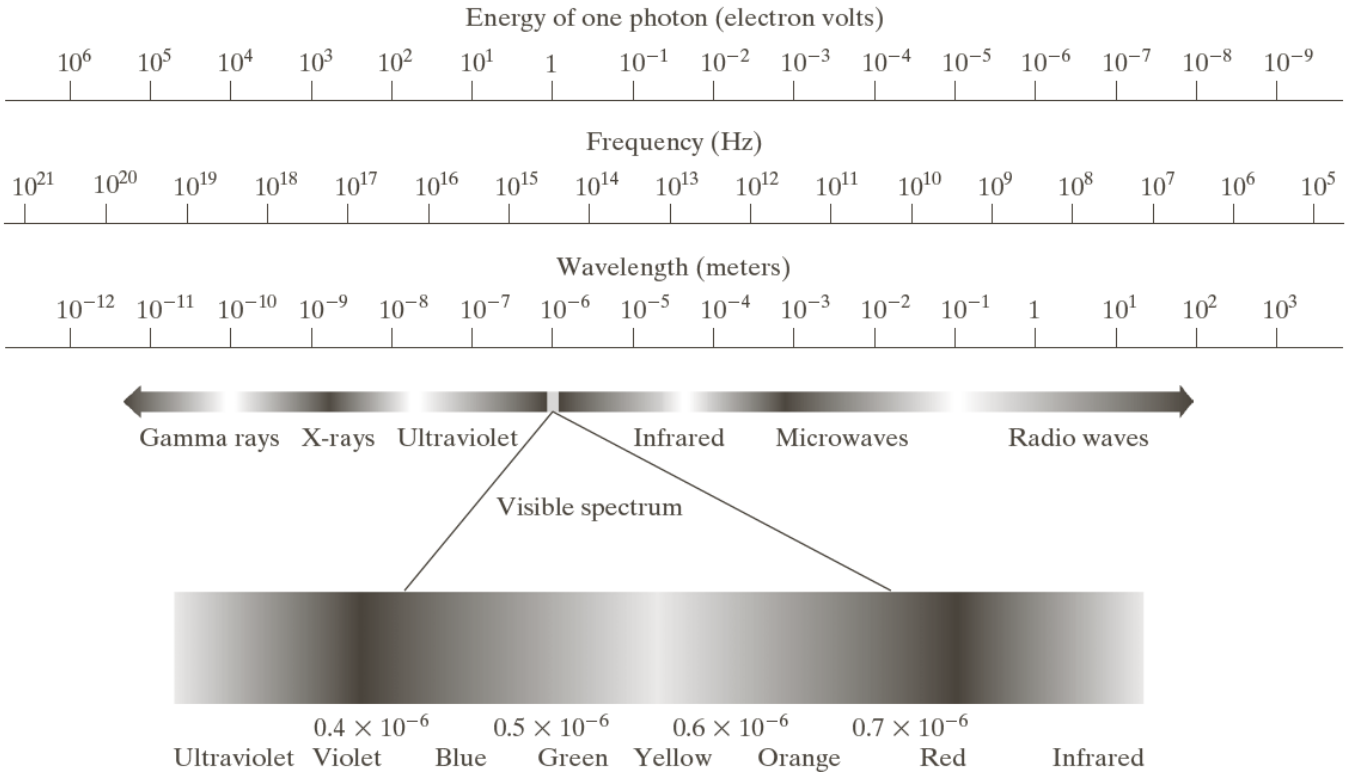
2.6　常用数学工具

2.2 光和电磁波谱

电磁波谱

普朗克常数

$E = hv$



v

$\lambda = \frac{c}{v}$

2.2 光和电磁波谱

◆ 可见光

- **可见光是一种特殊的电磁辐射**，它可以被人眼感知；可见光波段范围：0.43μm(紫色)~0.79μm(红色)
- 彩色谱分6个区域：红、橙、黄、绿、蓝、紫
  - ✓ 颜色之间是**混合平滑过渡**的。
- 人感知物体的颜色由物体**反射光**的特性决定。
  - ✓ 如果一个物体以所有可见波长相对平衡地**反射光**，那么这个物体对观察者而言是白色。
  - ✓ 如果一个物体在可见光谱的有限范围内反射时，会呈现各种颜色色调。例如，绿色物体的反射波是范围为500~570nm的光，而吸收其他波长的大部分能量。
- 没有颜色的光称为单色光或无色光，其唯一属性是强度。常用灰度级表示表的强度。

2.2 光和电磁波谱

◆ 电磁波

- 电磁波可以看成是以波长 λ 传播的正弦波，每个粒子以波的模式以光速传播和移动。
- 根据能量公式：E = h ν，(h为普朗克常数)，能量与频率成正比。
  - ✓ 无线电波有低能量光子，而伽马射线的能量最高，这就是伽马射线对活体组织危害大的原因。
- 伽马辐射对医学和天文学成像很重要；
- 红外线波段会辐射热，这使得它在依靠“热特性”成像的应用非常有用。
- 虽然成像主要以电磁波发射的能量为基础，但并不是唯一成像方法，例如用物体反射的声波也可用于形成超声波图像。

第2章　数字图像基础

2.1　视觉感知要素

2.2　光和电磁波谱

2.3　图像感知和获取

2.4　图像取样和量化

2.5　像素间的基本关系

2.6　常用数学工具

2.3 图像感知和获取

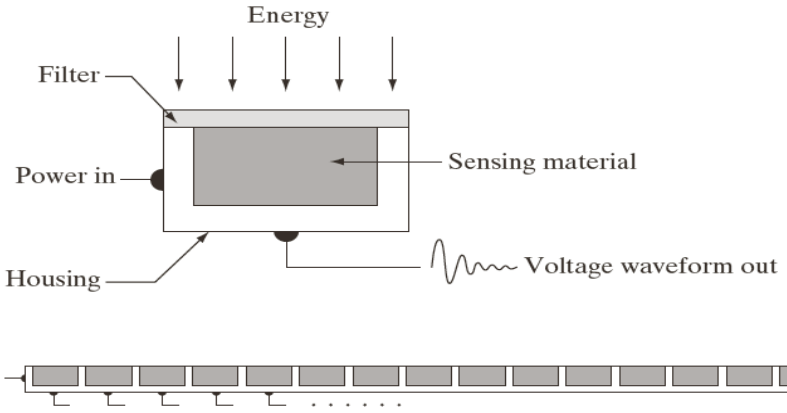
- 我们感兴趣的多数图像都是由**“照射”**源和形成图像的**“场景”元素**对光能的**反射**或**吸收**而产生的。
  - **“照射”源：**
    - ✓ 电磁源，如雷达、红外线或X射线系统
    - ✓ 非传统光源，如超声波
  - **“场景”元素：**
    - ✓ 物体、分子、沉积岩或人类大脑
- 依赖光源的特性，照射被物体反射或透射
  - 从平坦表面反射，或X射线透过病人的身体
- 在某些应用中，反射能或透射能可聚焦到一个**光转换器**上（如荧光屏），光转换器再把能量转换为可见光。

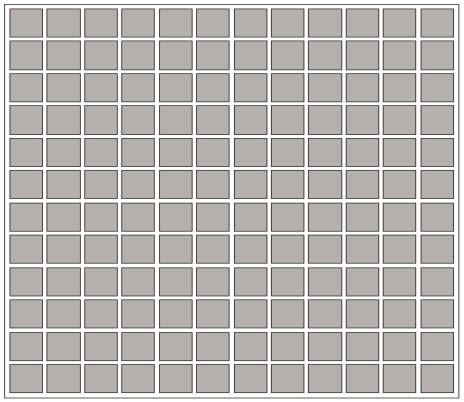
2.3 图像感知和获取

成像原理

通过将输入电能和**对特殊类型检测能源敏感的传感器材料**相组合，把输入能量转变为电压。

输出连续的电压波形，这些波形的幅度和空间特性都与感知的物理现象有关。



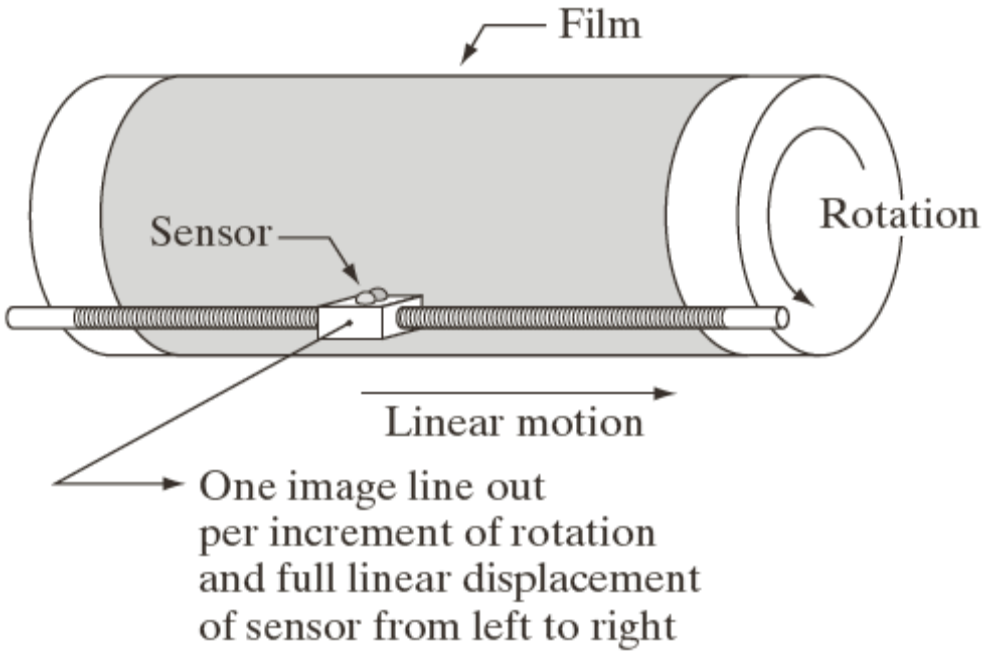


左上：单个成像传感器；左下：条带传感器；右：阵列传感器

2.3 图像感知和获取

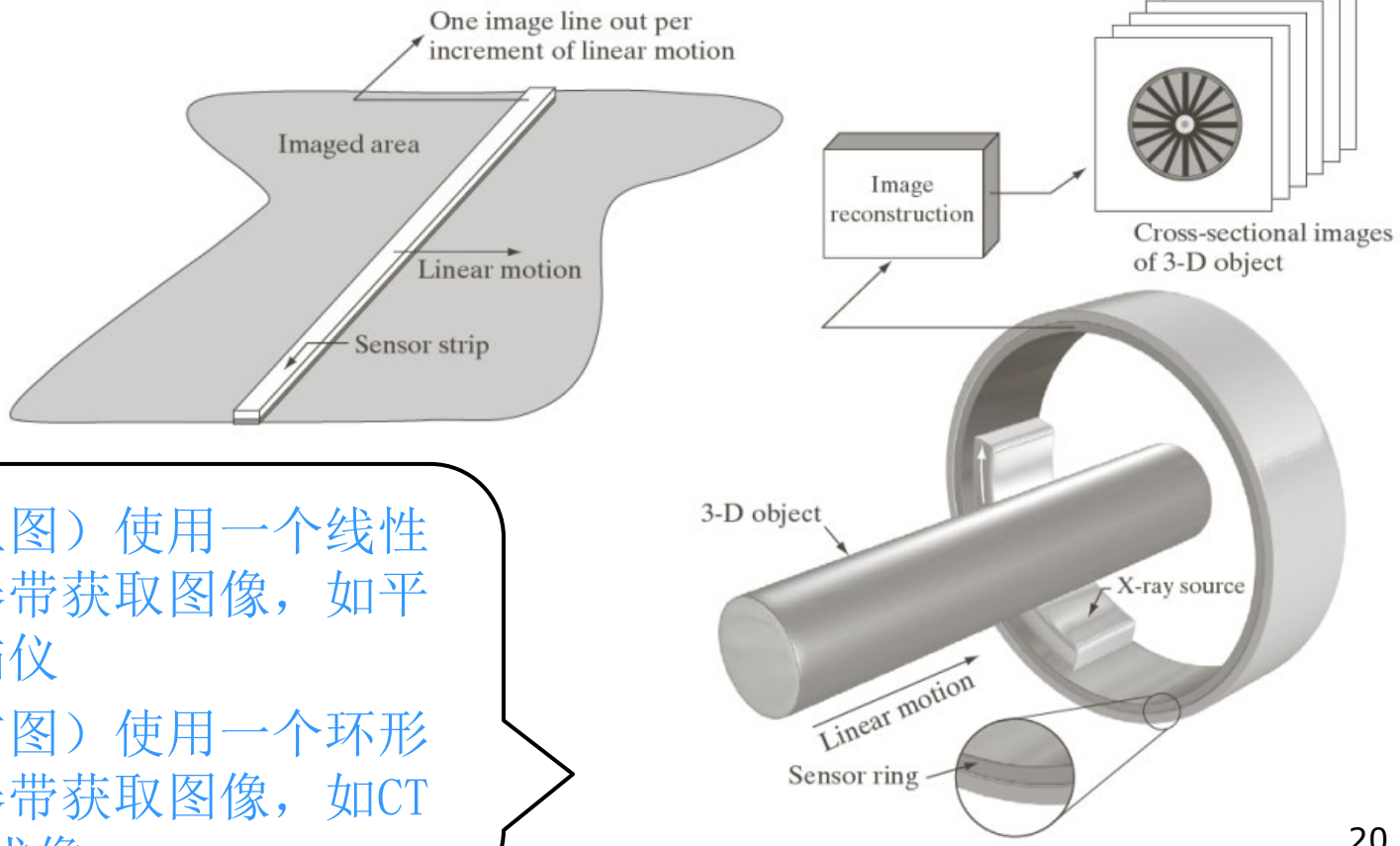
- 单个传感器通过运动来生成二维图像
  - ✓ 典型传感器：光二极管，由硅材料构成，并且其输出电压波形与入射光成正比
  - ✓ 传感器前面用一个滤光器改善选择性

胶片每旋转一个增量且传感器完整地从左到右线性移动一次，输出图像的一行。



2.3 图像感知和获取

- 使用条带传感器获取图像
  - 扫描仪，航空成像，医学成像



1.（上图）使用一个线性传感器带获取图像，如平板扫描仪

2.（右图）使用一个环形传感器带获取图像，如CT和MRI成像

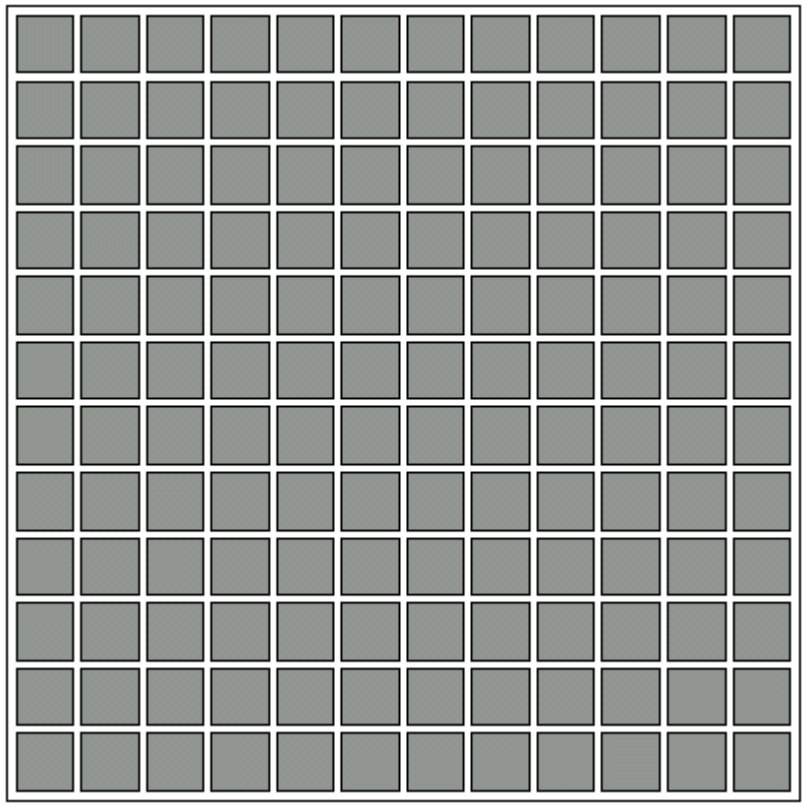
2.3 图像感知和获取

- 阵列成像传感器

CCD

英文全称：Charge-coupled Device

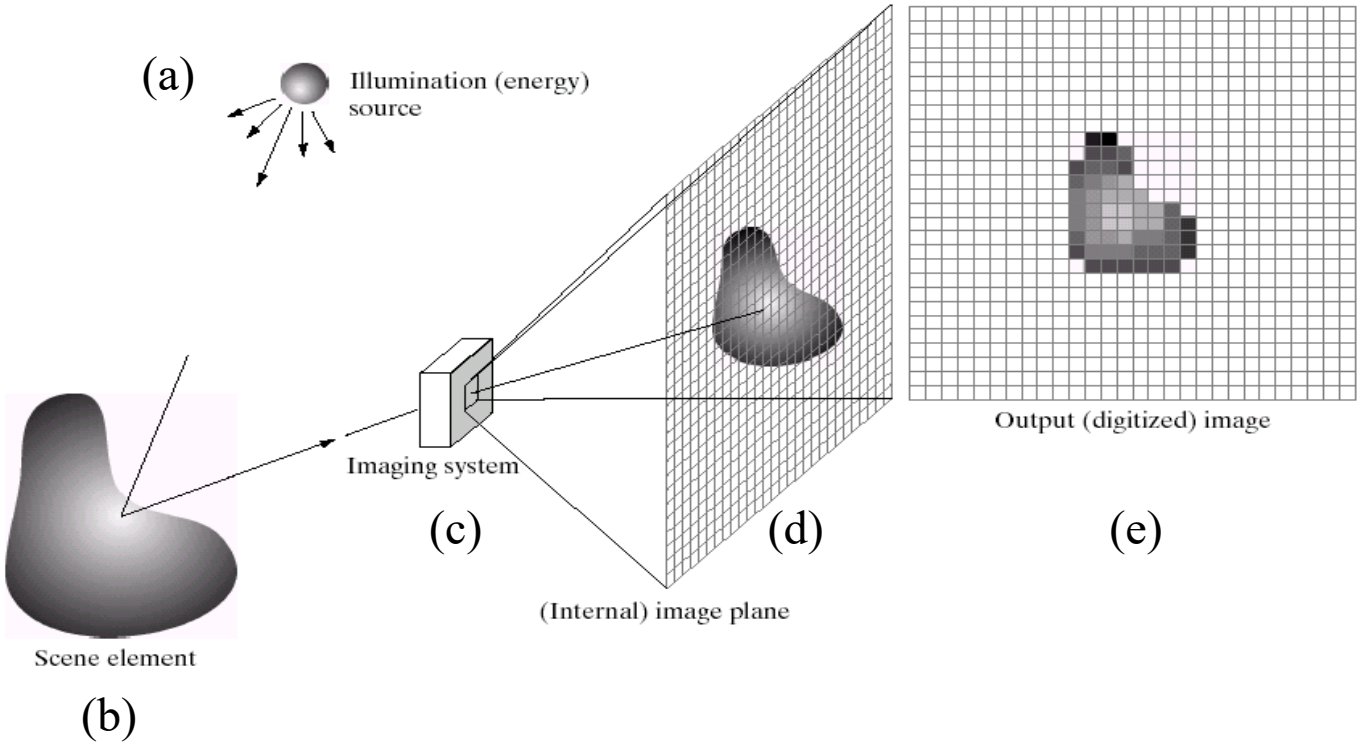
中文全称：电荷耦合元件。



不需要扫描，就能形成二维图像。

2.3 图像感知和获取

数字图像获取过程的一个例子



(a) 能量源；(b) 场景元素；(c) 成像系统；(d) 场景到图像平面的投影；(e) 数字化后的图像

2.3 图像感知和获取

简单的图像形成模型

$$f(x,y)=i(x,y)\bullet r(x,y)$$

其中：

$f(x,y)$是图像幅度分布

$i(x,y)$是入射场分布，取决于照射源特性

$r(x,y)$是反射系数分布,取决于成像物体的特性

$0<i(x,y)<\infty$

$0<r(x,y)<1$

黑天鹅绒：0.01；

不锈钢：0.65；

白墙平面：0.80；

镀银器皿：0.90；

白雪：0.93

第2章　数字图像基础

2.1　视觉感知要素

2.2　光和电磁波谱

2.3　图像感知和获取

2.4　图像取样和量化

2.5　像素间的基本关系

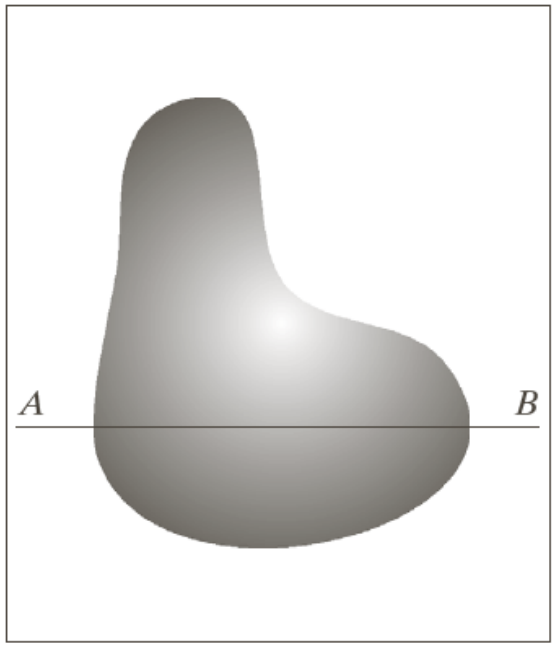
2.6　常用数学工具

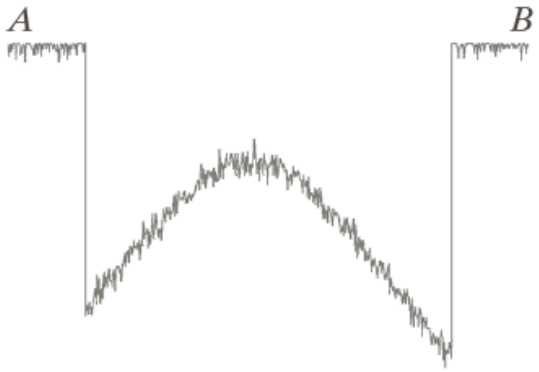
2.4 图像取样和量化

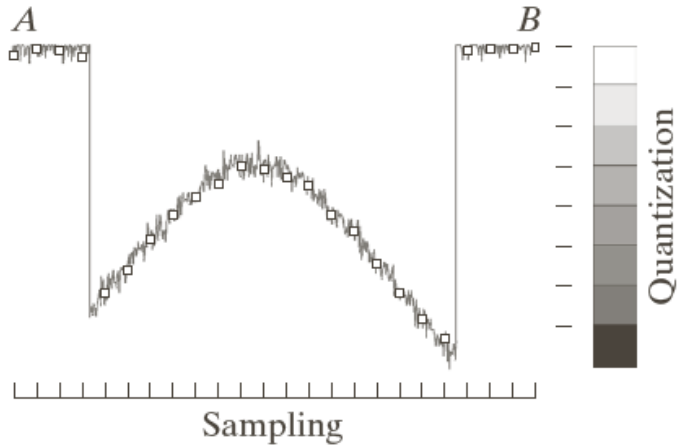
◆ 基本概念

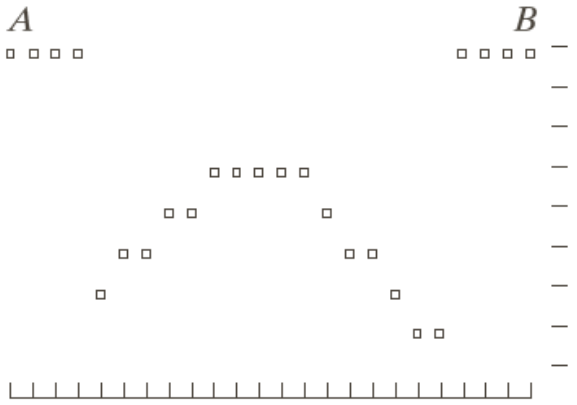
1. **图像数字化**：将模拟图像经过**离散化**之后，得到用数字表示的图像。图像的数字化包括取样和量化两个过程。
2. **取样**：是将在空间上连续的图像转换成离散的采样点（即像素）集的操作。即：**空间坐标**的离散化。
3. **量化**：把取样后所得的各像素的灰度值从模拟量到离散量的转换称为图像灰度的量化。即：**灰度**的离散化。

2.4 图像取样和量化



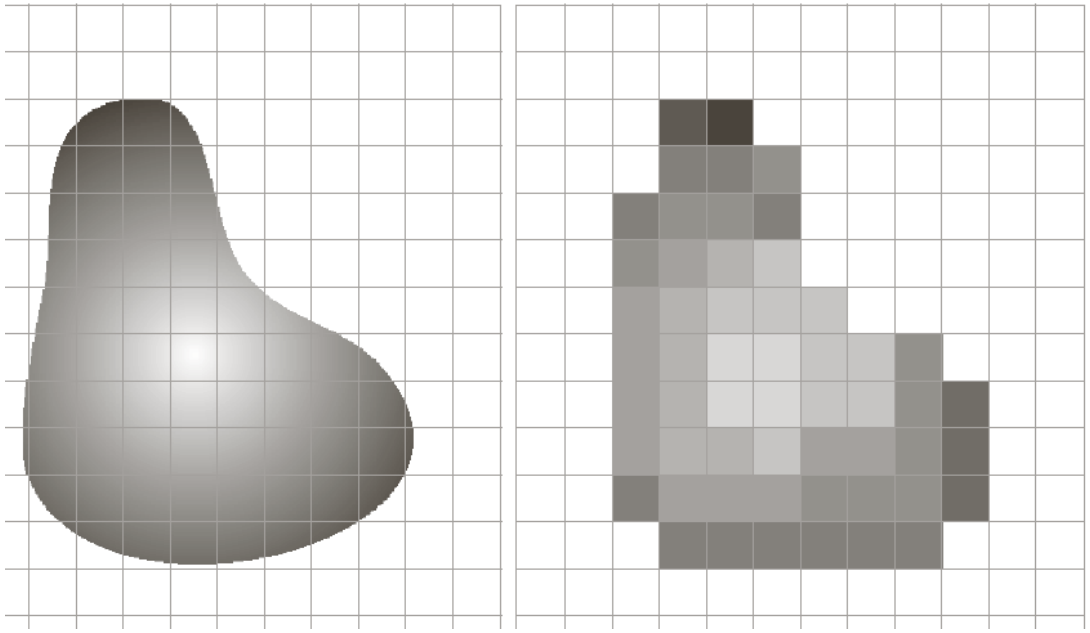






2.4 图像取样和量化

数字图像的性质在很大程度上取决于取样和量化中所用的**样本数**和**灰度级**。



(a) (b)

(a) 连续图像；(b) 取样和量化后的结果

2.4 图像取样和量化

◆ 数字图像表示

1. 矩阵表示

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

2. 传统表示形式，更为方便

$$A=\begin{bmatrix} a_{0,0} & a_{0,1} & \cdots & a_{0,N-1} \\ a_{1,0} & a_{1,1} & \cdots & a_{1,N-1} \\ \vdots & & & \vdots \\ a_{M-1,0} & a_{M-1,1} & \cdots & a_{M-1,N-1} \end{bmatrix}$$

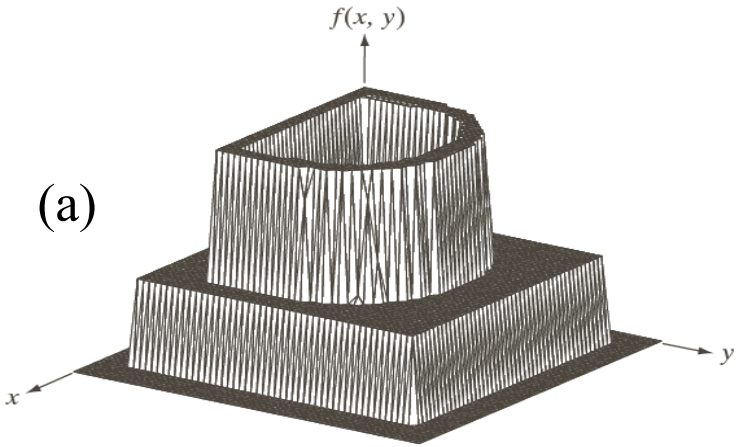
2.4 图像取样和量化

(a) 表面图形的图像；

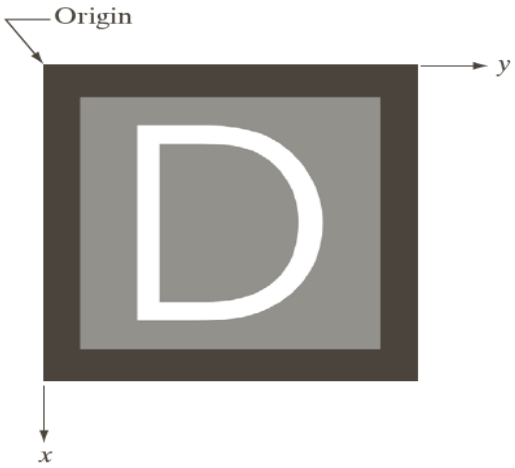
(b) 可视灰度阵列图像；

(c) 二维数值阵列图像

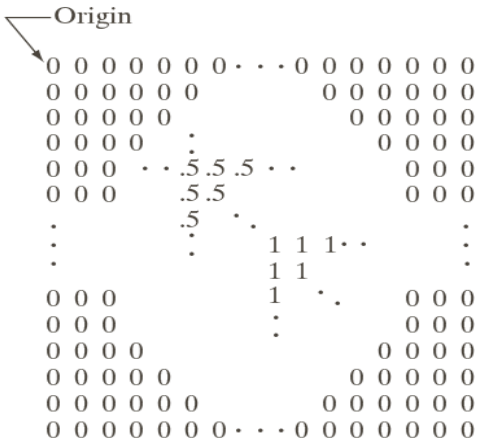
（0, 0. 5和1分别表示黑色、灰色和白色）



(a)



(b)



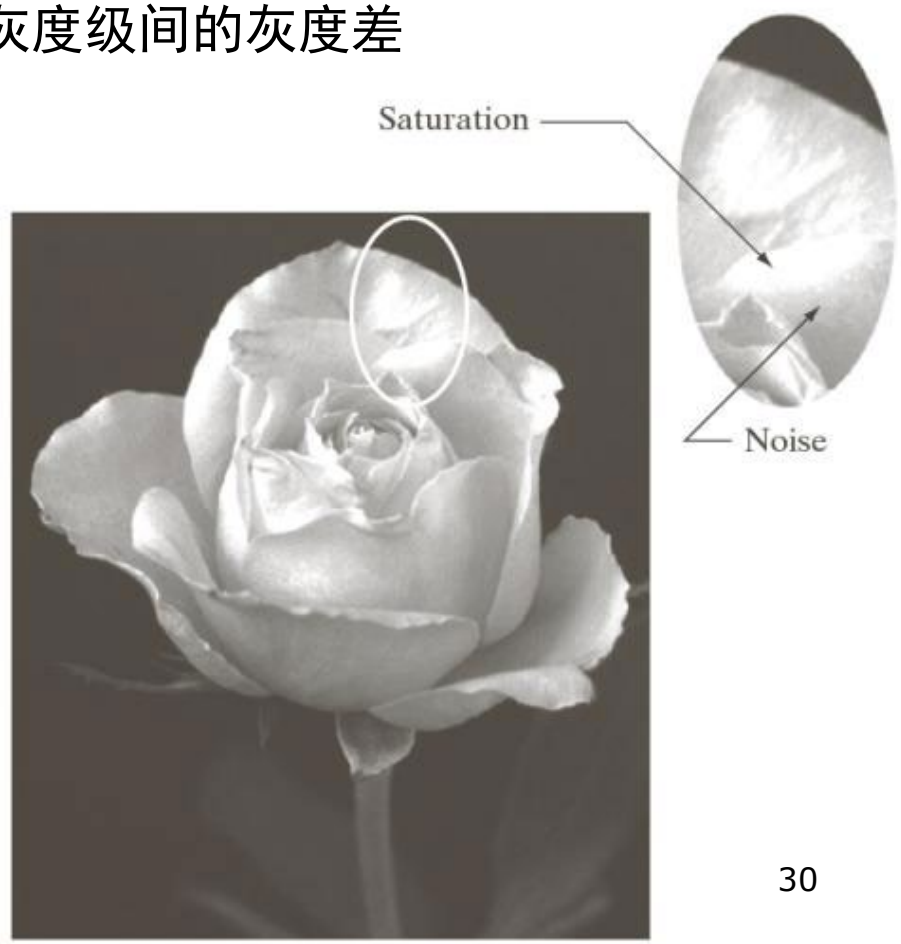
(c)

2.4 图像取样和量化

- 从存储和量化硬件的角度，灰度级数通常取2的整数次幂
  - 动态范围：最大可度量灰度与最小可检测灰度之比
  - 图像对比度：最高和最低灰度级间的灰度差

饱和度指的是一个最大值。

超过这个值的灰度级将被剪切掉。



2.4 图像取样和量化

储存数字图像所需的比特数b为：

$$b = M \times N \times k$$

当 M = N 时，该式变为：

$$b = N^2 k$$

N/k	1 ($L = 2$)	2 ($L = 4$)	3 ($L = 8$)	4 ($L = 16$)	5 ($L = 32$)	6 ($L = 64$)	7 ($L = 128$)	8 ($L = 256$)
32	1,024	2,048	3,072	4,096	5,120	6,144	7,168	8,192
64	4,096	8,192	12,288	16,384	20,480	24,576	28,672	32,768
128	16,384	32,768	49,152	65,536	81,920	98,304	114,688	131,072
256	65,536	131,072	196,608	262,144	327,680	393,216	458,752	524,288
512	262,144	524,288	786,432	1,048,576	1,310,720	1,572,864	1,835,008	2,097,152
1024	1,048,576	2,097,152	3,145,728	4,194,304	5,242,880	6,291,456	7,340,032	8,388,608
2048	4,194,304	8,388,608	12,582,912	16,777,216	20,971,520	25,165,824	29,369,128	33,554,432
4096	16,777,216	33,554,432	50,331,648	67,108,864	83,886,080	100,663,296	117,440,512	134,217,728
8192	67,108,864	134,217,728	201,326,592	268,435,456	335,544,320	402,653,184	469,762,048	536,870,912

N和k取不同值时存储所需的比特数

2.4 图像取样和量化

◆ 空间和灰度分辨率

- **空间分辨率**：图像空间中可分辨的最小细节。一般用单位长度上采样的像素数目或单位长度上的线对数目表示。
  - dpi：每英寸点数
  - 例如，报纸用75dpi的分辨率来印刷，杂志是133dpi，光鲜的小册子是175dpi
- **空间分辨率的度量必须针对空间单位来规定才有意义。**

2.4 图像取样和量化

- **空间分辨率与图像质量的关系：**

空间分辨率越高，图像质量越好；空间分辨率越低，图像质量越差，会出现棋盘模式。

图像分别以1250dpi，300dpi，150dpi，72dpi来显示。



2.4 图像取样和量化

- 图像空间分辨率变化所产生的效果 (512x512~16x16)

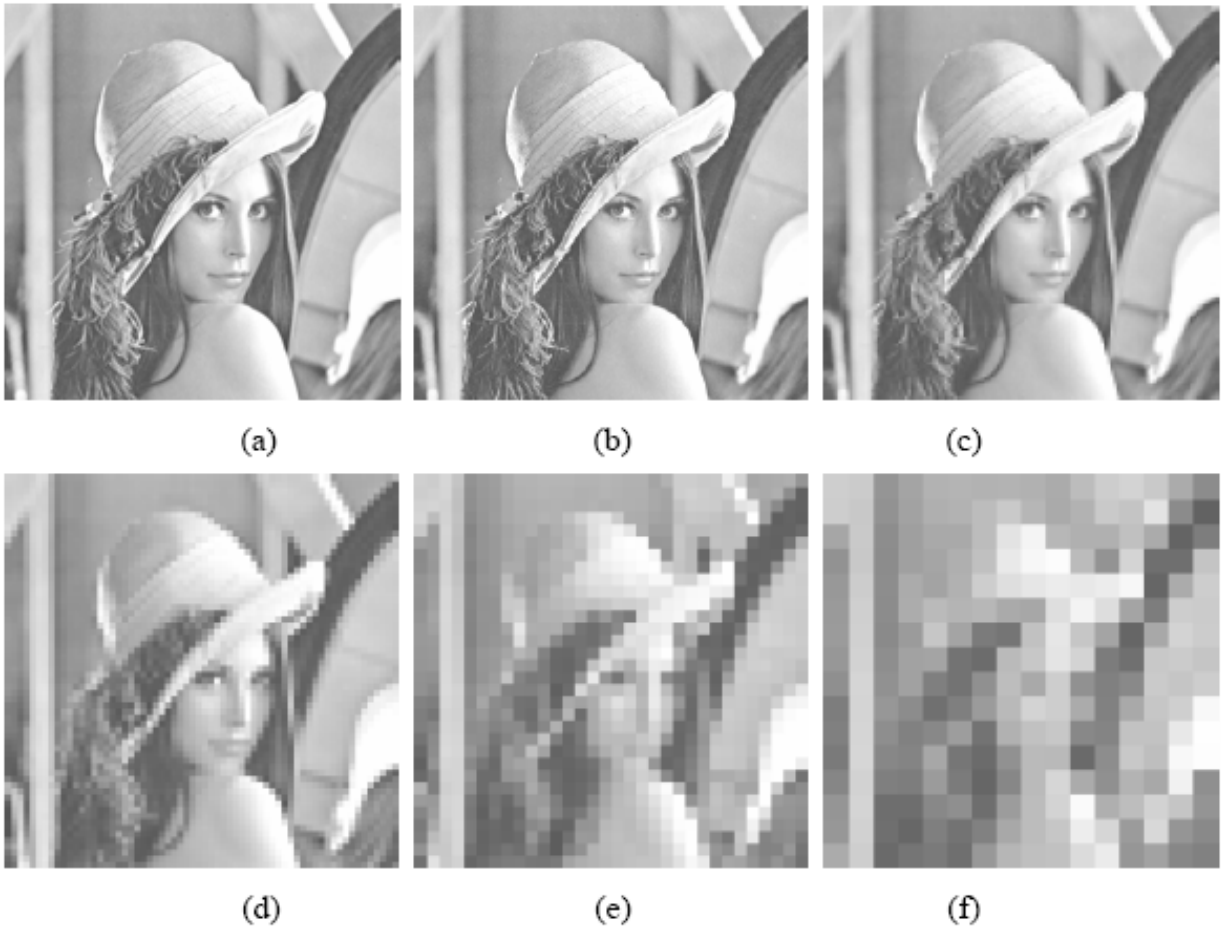


图 2.4.2 图像空间分辨率变化所产生的效果

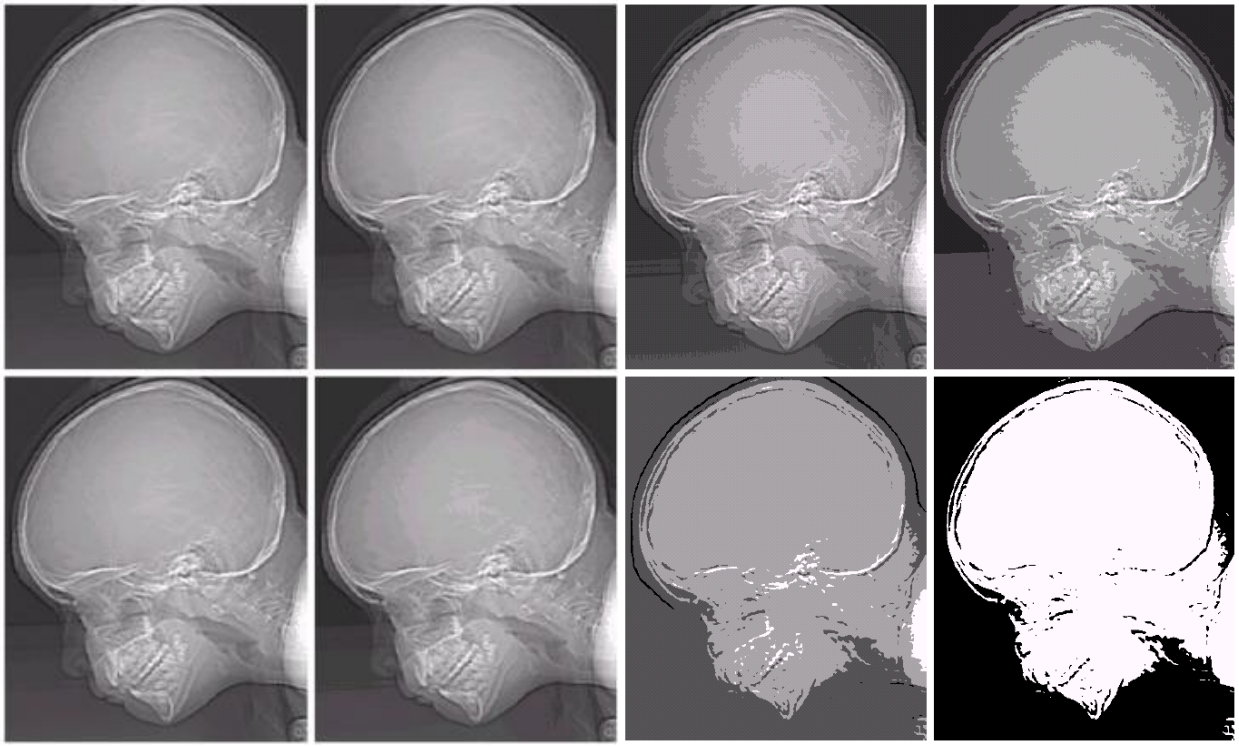
2.4 图像取样和量化

- **灰度分辨率：**
  - 图像灰度级中可分辨的最小变化。一般用灰度级或比特数表示。
  - 灰度级数通常是2的整数次幂。
  - 最通用的是8比特。通常说一幅被量化为256级的图像有8比特的灰度分辨率。

2.4 图像取样和量化

灰度分辨率与图像质量的关系：

- 灰度分辨率越高，图像质量越好；灰度分辨率越低，图像质量越差，会出现虚假轮廓。



图像大小为452×374，分别以256, 128, 64, 32, 16, 8, 4, 2的灰度级递减

2.4 图像取样和量化

- 图像幅度分辨率变化所产生的效果 (256, 64, 16, 8, 4, 2)



图 2.4.3 图像幅度分辨率变化所产生的效果

2.4 图像取样和量化

- **空间分辨率和灰度分辨率同时变化，对图像质量的影响：**

  图像细节含量由少到多，同时改变空间分辨率和量化级，要求观察者按照主观质量进行排序。



(a) 少量细节图像



(b) 中等程度细节图像



(c) 大量细节图像

2.4 图像取样和量化

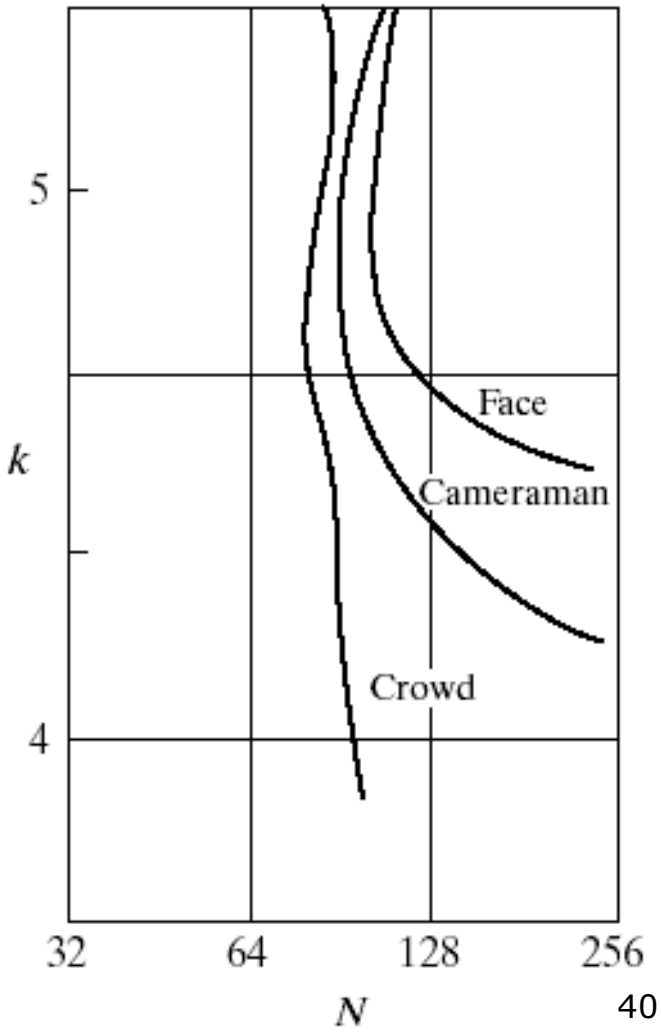
等偏爱曲线

(Isopreferen cecurve):

在N-k平面内对应于**主观感觉质量**相等的曲线；

实验结果：

当图像中细节增加时，等偏爱曲线趋于更接近N-k平面内的垂直线。



2.4 图像取样和量化

- 空间和幅度分辨率同时变化所产生的效果



256x256,128;
181x181,64;
128x128,32;
90x90,16;
64x64,8;
45x45,4

图 2.4.4　图像空间和幅度分辨率同时变化所产生的效果

2.4 图像取样和量化

- 总结：

A. 图像质量一般随N和k的增加而增加。在极少数情况下对固定的N，减小k能改进质量。最有可能的原因是减小k常能可增加图像的视觉反差。

B. 对具有大量细节的图像只需很少的灰度级数就可较好地表示。

C. N×k为常数的图像主观看起来可以有较大的差异。

2.4 图像取样和量化

图像内插

- 内插是用已知数据来估计未知位置的数值的处理。

➢ 最邻近内插

➢ 双线性内插

$$v(x, y) = ax + by + cxy + d$$

➢ 双三次内插

$$v(x, y) = \sum_{i=0}^{3}\sum_{j=0}^{3} a_{xy} x^{i} y^{j}$$

第2章　数字图像基础

2.1　视觉感知要素

2.2　光和电磁波谱

2.3　图像感知和获取

2.4　图像取样和量化

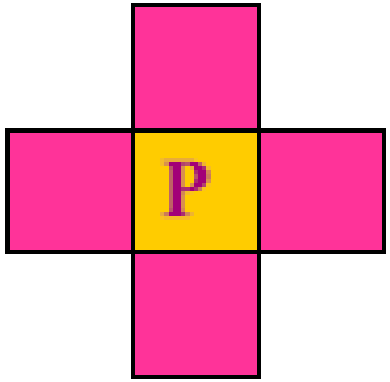
2.5　像素间的基本关系

2.6　常用数学工具

2.5 像素间的基本关系

- **相邻像素：**只考虑像素的位置关系
  - 4邻域

坐标为 (x,y) 的像素p有4个水平和垂直的相邻像素，坐标分别为: (x+1, y), (x-1, y), (x, y+1), (x, y-1)，这个像素集称为p的4邻域，用$N_4(p)$表示。



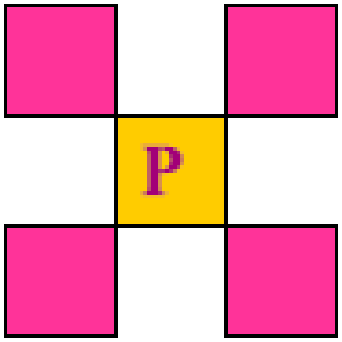
2.5 像素间的基本关系

- 对角邻域

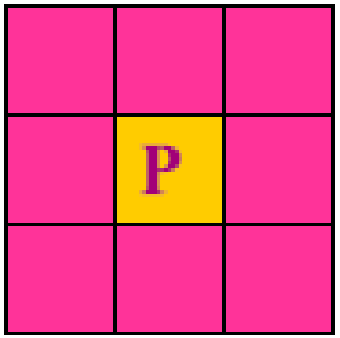
  坐标分别为: (x+1, y+1), (x-1, y-1), (x-1, y+1), (x-1, y-1)，用$N_D(p)$表示。

- 8邻域

  $N_4(p) \cup N_D(p)$



(a) 对角邻域



(b) 8邻域

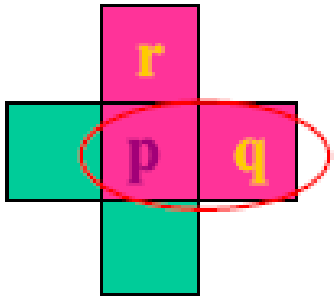
2.5 像素间的基本关系

邻接性、连通性、区域和边界

- 邻接性：同时考虑像素的灰度和位置关系

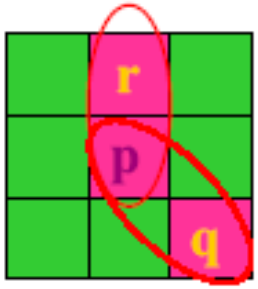
  令V是具有特定**相似性准则**的灰度值集合。

  1）4邻接：如果q在$N_4(p)$中，且$I(p)\in V$、$I(q)\in V$，那么像素p和q是4邻接的。



2.5 像素间的基本关系

2）8邻接：如果q在$N_8(p)$中，且$I(p)\in V$、$I(q)\in V$，那么像素p和q是8邻接的。



2.5 像素间的基本关系

3）m邻接（混合邻接）：

如果q在$N_4(p)$中，或者q在$N_D(p)$中且集合$N_4(p) \cap N_4(q)$没有V值的像素，且$I(p) \in V$、$I(q) \in V$，则像素p和q是m邻接的。

m邻接的引入是为了消除采用8邻接常常发生的二义性。

满足下面两个条件之一即可：
1. q在p的4邻域中；
2. q在p的对角领域中，并且q的4邻域与p的4领域相交为空集（交集无点属于V）。

0	1	1
0	1	0
0	0	1

0	1	1
0	1	0
0	0	1

2.5 像素间的基本关系

- 连通性
  - 从具有坐标(x, y)的象素p到具有坐标(s, t)的象素q的一条通路由一系列具有坐标(x_0, y_0)，(x_1, y_1)，…，(x_n, y_n)的独立象素组成。这里$(x_0, y_0) = (x, y)$，$(x_n, y_n) = (s, t)$，且(x_i, y_i)与(x_{i-1}, y_{i-1})邻接，其中$1 \le i \le n$，n为通路长度。
  - 邻接是连通的一种特例，连通是由一系列依次邻接的象素组成。

2.5 像素间的基本关系

- 区域
  - 连通分量：S是图像中的一个子集，对S中任何一个像素p，连通到该像素的像素集称为S的连通分量。
  - 如果S仅有一个连通分量，则称为连通集，也称作一个区域。

2.5 像素间的基本关系

- 边界
  - 邻接区域：两个区域联合起来形成一个连通集。
  - 不连接区域：非邻接区域。
  - 背景：一幅图像的K个不连接区域的并集的补集。
  - 边界：一个区域的边界，是指该区域中至少有一个背景邻点的像素集。

2.5 像素间的基本关系

距离度量

- 距离度量函数的定义
  - 给定3个像素$\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}$，坐标分别为$(x_1, x_2), (y_1, y_2), (z_1, z_2)$，如果下列条件满足，则 D是距离度量函数：
    ① $D(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \geq 0$ ($D(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = 0$, 当且仅当 $\mathbf{x} = \mathbf{y}$)
    ② $D(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = D(\mathbf{y}, \mathbf{x})$
    ③ $D(\mathbf{x}, \mathbf{z}) \leq D(\mathbf{x}, \mathbf{y}) + D(\mathbf{y}, \mathbf{z})$
- L_p范数(norm)及其诱导出的距离度量：对于k维向量$\mathbf{u}=[u_1, u_2, \cdots, u_k]^T$
  - L_p范数：$\|\boldsymbol{u}\|_p = \left(\sum_{i=1}^{k}|u_i|^p\right)^{\frac{1}{p}}$
  - L_p范数诱导的距离度量：$D(\mathbf{u}, \mathbf{v}) = \|\mathbf{u} - \mathbf{v}\|_p = \left(\sum_{i=1}^{k}|u_i - v_i|^p\right)^{\frac{1}{p}}$

2.5 像素间的基本关系

- 欧氏(Euclidean)距离：模为2的距离
  - 根据这个距离量度，与(x_1, x_2)的距离小于或等于某个值d的象素都包括在以(x_1, x_2)为中心以d为半径的圆。

$$D_e(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = [(x_1 - y_1)^2 + (x_2 - y_2)^2]^{\frac{1}{2}}$$

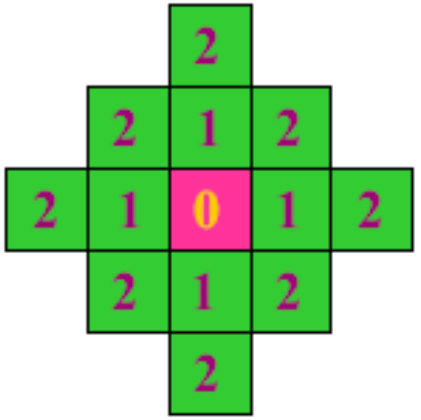
  - 欧式距离等价于L_2距离（以L_p范数（$p = 2$）诱导的距离度量）

2.5 像素间的基本关系

- 城区(city-block)距离：模为1的距离或D_4距离
  - 根据这个距离量度，与(x_1, x_2)的距离小于或等于某个值d的象素组成以(x_1, x_2)为中心的菱形。

$$D_4\,(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = |x_1 - x_2| + |y_1 - y_2|$$

  - 城区(city-block)距离等价于L_1距离（以L_p范数（$p = 1$）诱导的距离度量）

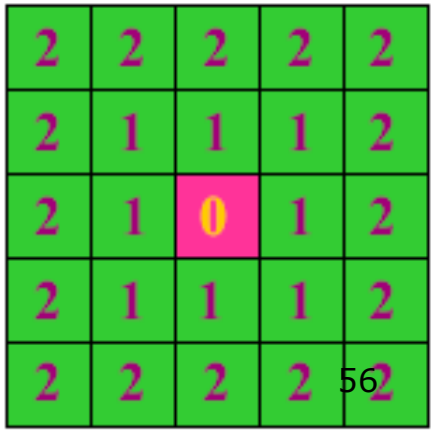


2.5 像素间的基本关系

- 棋盘(chessboard)距离：模为∞的距离或D_8距离
  - 根据这个距离量度，与(x_1, x_2)的距离小于或等于某个值d的象素组成以(x_1, x_2)为中心的正方形。

$$D_8(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \max(|x_1 - x_2|, |y_1 - y_2|)$$

  - 棋盘(chessboard)距离等价于L_∞ 距离（以L_p范数$(p = \infty)$诱导的距离度量）
    - ✓ （请证明该结论）



第2章　数字图像基础

2.1　视觉感知要素

2.2　光和电磁波谱

2.3　图像感知和获取

2.4　图像取样和量化

2.5　像素间的基本关系

2.6　常用数学工具

2.6.1 线性操作与非线性操作

- 线性操作
  - 满足**齐次性**和**可加性**
    - ✓ 对于线性算子H：

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

满足：

$$H\left[a_i \times f_i(x,y) + a_j \times f_j(x,y)\right] = a_i \times H\left[f_i(x,y)\right] + a_j \times H\left[f_j(x,y)\right]$$

- 非线性操作
  - 不满足齐次性和可加性
    - ✓ 例如：最大值操作

2.6.2 阵列操作

- 阵列操作
  - 图象可以等效视为矩阵，但图象间的操作常采用阵列操作，逐个像素执行
    - ✓ 两幅图象的阵列相乘：对应位置的像素灰度值相乘
    - ✓ 两幅图象相除：对应位置的像素灰度值相除
    - ✓ 对一副图象求幂：对每个像素进行求幂操作

- 算术操作是一类阵列操作
  - 参与算术操作的图象的大小是相同的
  - 加、减、乘、除四类算术操作

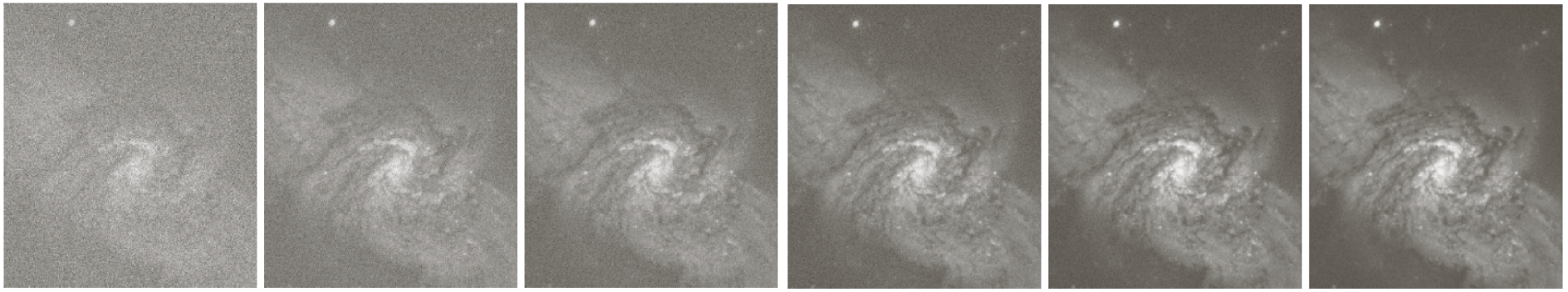
$$s(x,y) = f(x,y) + g(x,y)$$
$$s(x,y) = f(x,y) - g(x,y)$$
$$s(x,y) = f(x,y) \times g(x,y)$$
$$s(x,y) = f(x,y) \div g(x,y)$$

2.6.3 算术操作：应用-I

- 图象降噪：对多幅含噪图象相加
  - 假设观测图象$g(x,y)$含加性噪声$\eta(x,y)$

$$g(x,y)=f(x,y)+\eta(x,y)$$

  - 若对同一场景可重复成像，可通过对这些成像图象求平均，从而减小信号标准差，实现降噪

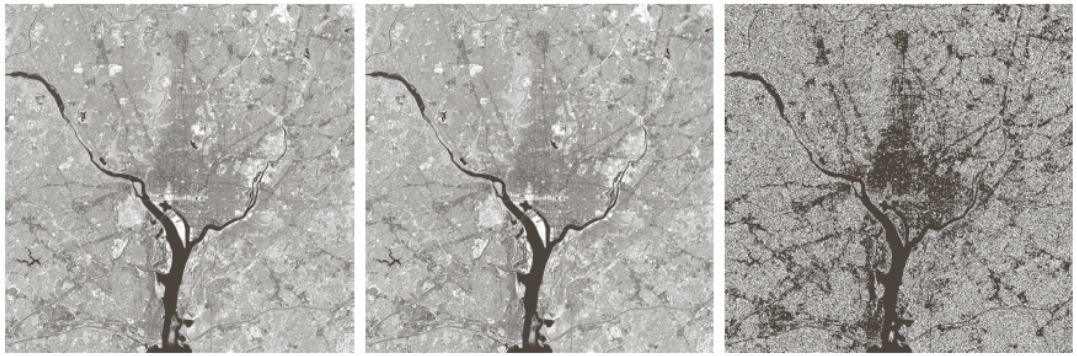


a b c d e f **FIGURE 2.26** (a) Image of Galaxy Pair NGC 3314 corrupted by additive Gaussian noise. (b)–(f) Results of averaging 5, 10, 20, 50, and 100 noisy images, respectively. (Original image courtesy of NASA.)

2.6.3 算术操作：应用-II

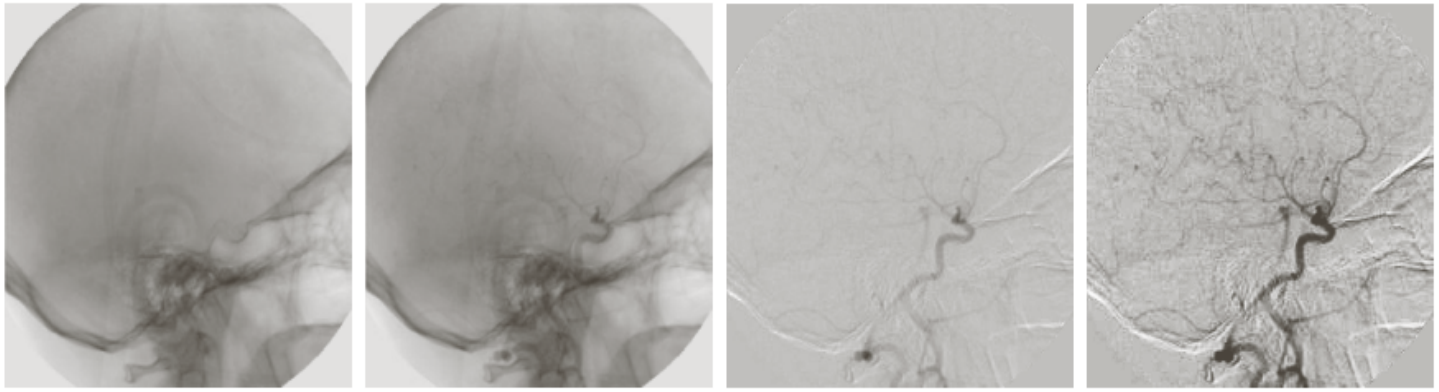
- 图象差异增强：图象相减

$$g(x,y)=f(x,y)-h(x,y)$$



a b c

FIGURE 2.27 (a) Infrared image of the Washington, D.C. area. (b) Image obtained by setting to zero the least significant bit of every pixel in (a). (c) Difference of the two images, scaled to the range [0, 255] for clarity.



a b c d

FIGURE 2.28 Digital subtraction angiography. (a) Mask image. (b) A live image. (c) Difference between (a) and (b). (d) Enhanced difference image. (Figures (a) and (b) courtesy of The Image Sciences Institute, University Medical Center, Utrecht, The Netherlands.)

2.6.3 算术操作：应用-III

- 图象阴影矫正：图象相除



a b c

FIGURE 2.29 Shading correction. (a) Shaded SEM image of a tungsten filament and support, magnified approximately 130 times. (b) The shading pattern. (c) Product of (a) by the reciprocal of (b). (Original image courtesy of Mr. Michael Shaffer, Department of Geological Sciences, University of Oregon, Eugene.)

2.6.3 算术操作：应用-IV

- 图象ROI提取：图象相乘
  - 定义一副模板图象，指定感兴趣区域（ROI）
    - ✓ 模板图像中，ROI区域内的像素值为1，其他像素值为0
  - 将模板图象与给定图象相乘，提取感兴趣区域

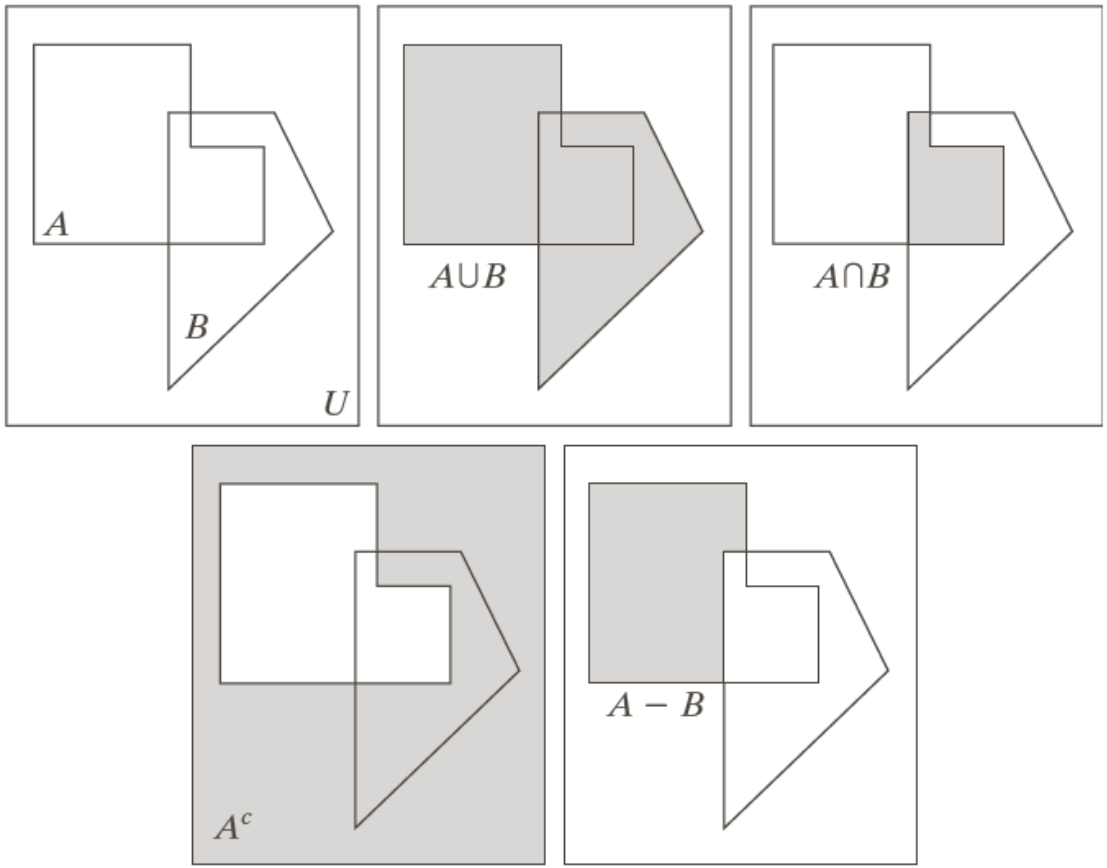


a b c

FIGURE 2.30 (a) Digital dental X-ray image. (b) ROI mask for isolating teeth with fillings (white corresponds to 1 and black corresponds to 0). (c) Product of (a) and (b).

2.6.4 集合与逻辑操作

- 基本集合操作
  - 并、交、补、差



a b c
d e

FIGURE 2.31
(a) Two sets of coordinates, A and B, in 2-D space. (b) The union of A and B. (c) The intersection of A and B. (d) The complement of A. (e) The difference between A and B. In (b)–(e) the shaded areas represent the member of the set operation indicated.

2.6.5 空间操作-I

- 空间操作：直接在图象中指定空间位置的像素上执行
  - 单像素操作
    - ✓ 对所有像素执行相同的灰度操作
    - ✓ 如何编程实现？

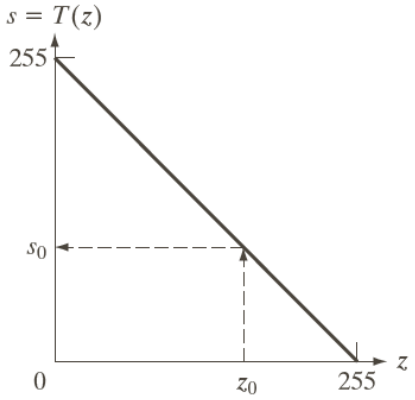


FIGURE 2.34 Intensity transformation function used to obtain the negative of an 8-bit image. The dashed arrows show transformation of an arbitrary input intensity value z_0 into its corresponding output value s_0.

  - 邻域操作
    - ✓ 均值滤波（邻域平均）：

$$g(x,y) = \frac{1}{mn} \sum_{(r,c)\in S_{xy}} f(r,c)$$

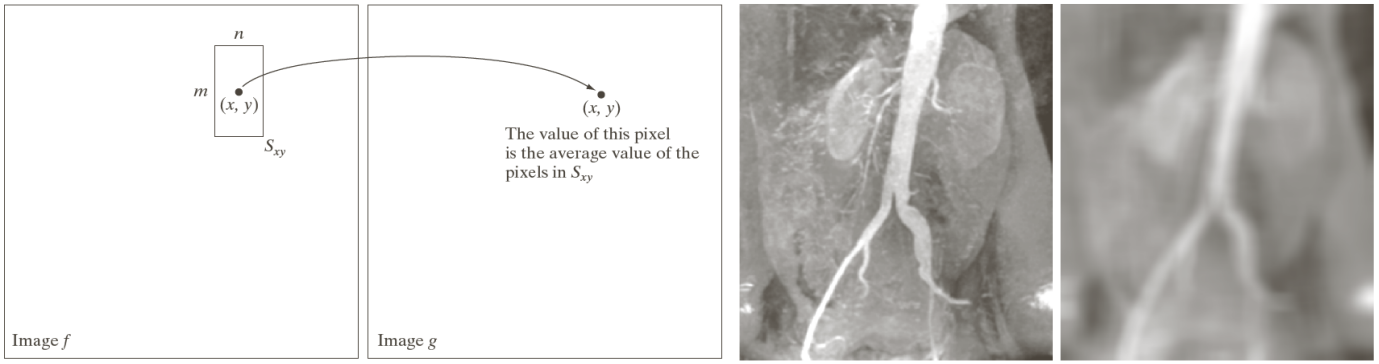
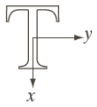
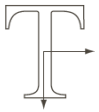


FIGURE 2.35 Local averaging using neighborhood processing. The procedure is illustrated in (a) and (b) for a rectangular neighborhood. (c) The aortic angiogram discussed in Section 1.3.2. (d) The result of using Eq. (2.6-21) with $m = n = 41$. The images are of size 790 × 686 pixels.

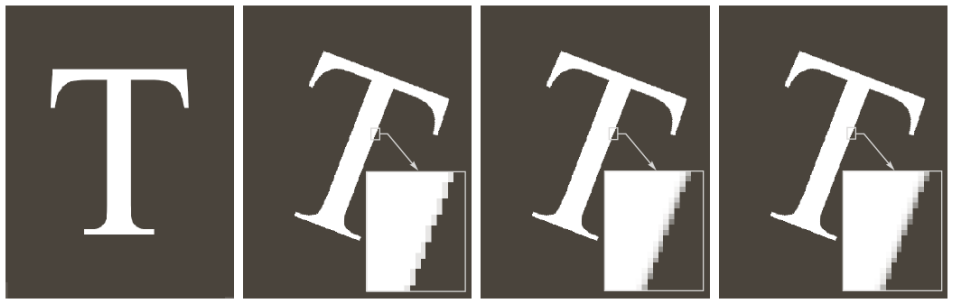
2.6.5 空间操作-II

- 空间操作：直接在图象中指定空间位置的像素上执行
  - 几何空间变换：包含两个基本操作
    - ✓ 1. 坐标空间变换
    - ✓ 2. 灰度内插，即对空间变换后的像素赋予灰度值

TABLE 2.2
Affine transformations based on Eq. (2.6.–23).

Transformation Name	Affine Matrix, T	Coordinate Equations	Example
Identity	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$x = v$ $y = w$	
Scaling	$\begin{bmatrix} c_x & 0 & 0 \\ 0 & c_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$x = c_x v$ $y = c_y w$	
Rotation	$\begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$x = v\cos\theta - w\sin\theta$ $y = v\cos\theta + w\sin\theta$	
Translation	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ t_x & t_y & 1 \end{bmatrix}$	$x = v + t_x$ $y = w + t_y$	
Shear (vertical)	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ s_v & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$x = v + s_v w$ $y = w$	
Shear (horizontal)	$\begin{bmatrix} 1 & s_h & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$x = v$ $y = s_h v + w$	

$$[x, y, 1] = [v, w, 1]\boldsymbol{T} = [v, w, 1]\begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} & 0 \\ t_{21} & t_{22} & 0 \\ t_{31} & t_{32} & 1 \end{bmatrix}$$



a b c d

FIGURE 2.36 (a) A 300 dpi image of the letter T. (b) Image rotated 21° clockwise using nearest neighbor interpolation to assign intensity values to the spatially transformed pixels. (c) Image rotated 21° using bilinear interpolation. (d) Image rotated 21° using bicubic interpolation. The enlarged sections show edge detail for the three interpolation approaches.

2.6.5 空间操作-III

- 空间操作：直接在图象中指定空间位置的像素上执行
  - 图象配准（image registration）
    - ✓ 用于对齐两幅或多幅相同场景的图象
    - ✓ 常用方法：在两幅图象上选取若干对应位置的像素点作为控制点，指导建模图象间的几何变换
      - ➢ 例如：八参数的双线性建模

$$x = c_1u + c_2v + c_3uv + c_4$$
$$y = c_5u + c_6v + c_7uv + c_8$$

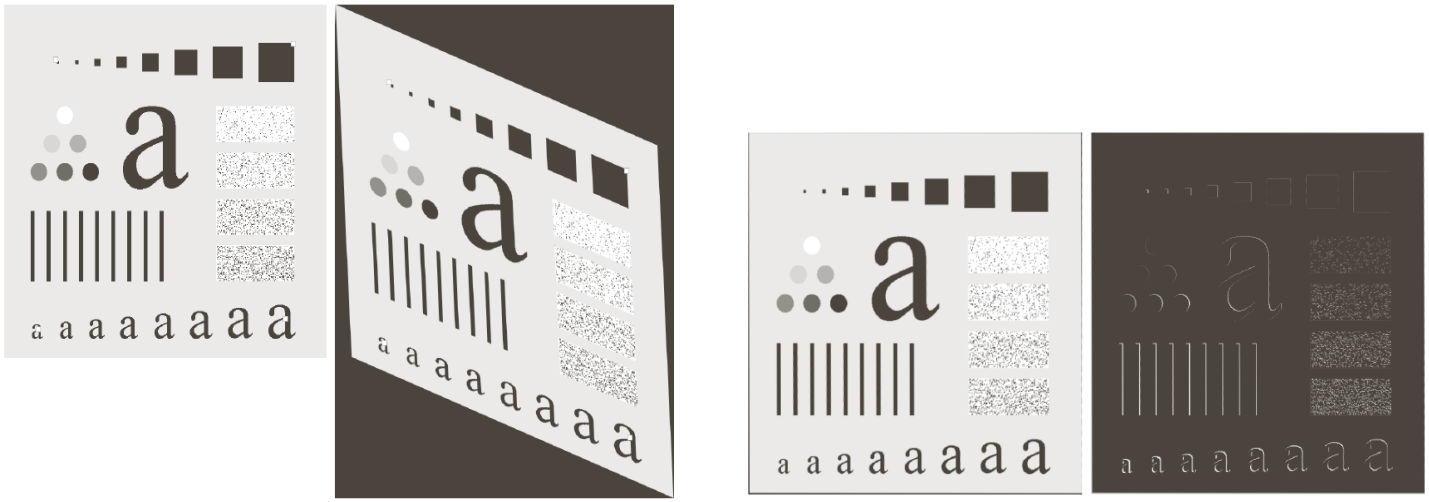
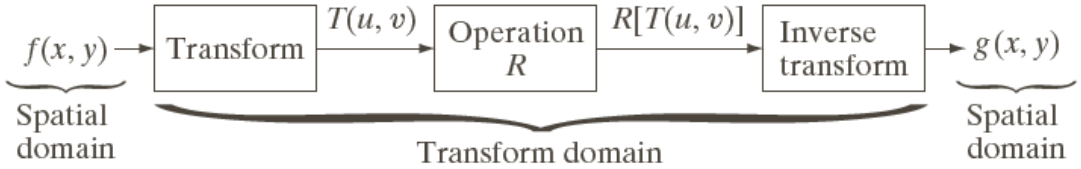
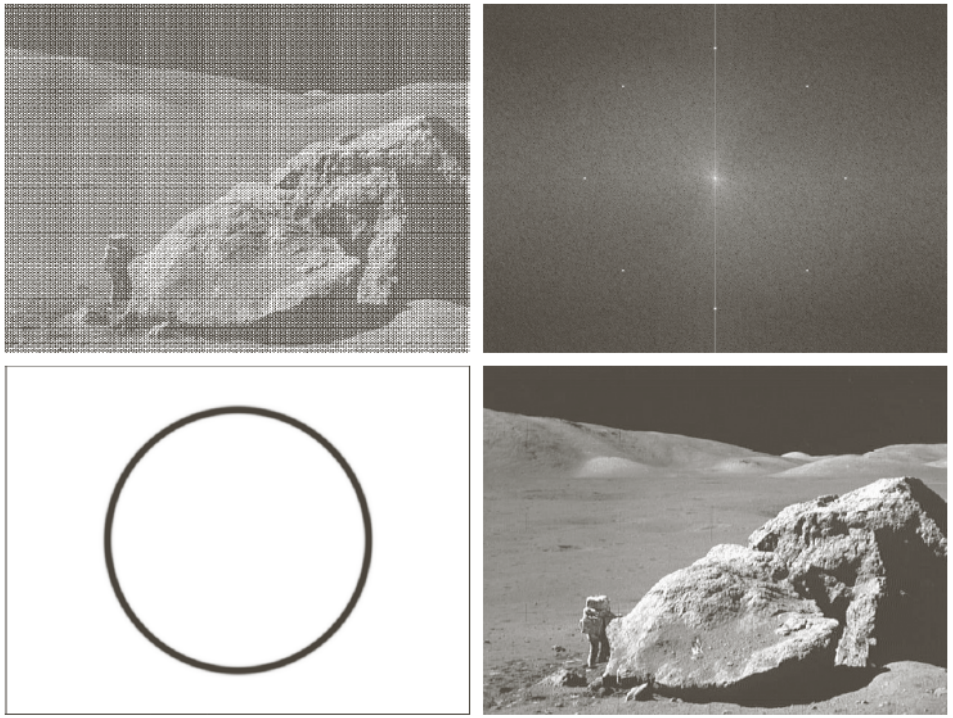


FIGURE 2.37 Image registration. (a) Reference image. (b) Input (geometrically distorted image). Corresponding tie points are shown as small white squares near the corners. (c) Registered image (note the errors in the borders). (d) Difference between (a) and (c), showing more registration errors.

2.6.6 图象变换

- 图象变换
  - 通过变换图象来表达图象处理任务，在变换域执行指定的任务



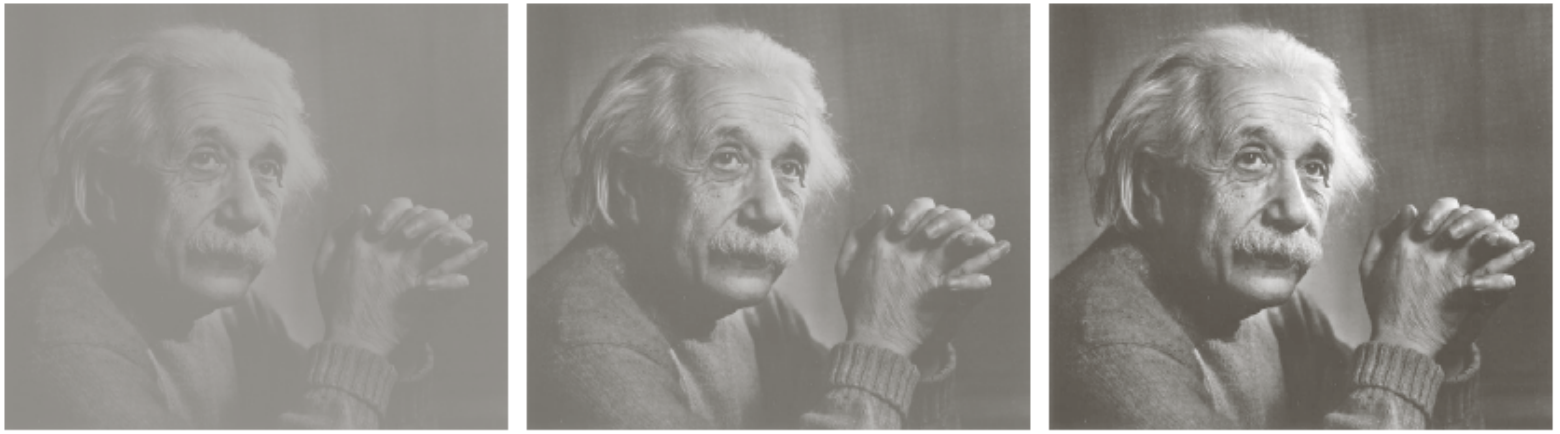


a b
c d

FIGURE 2.40
(a) Image corrupted by sinusoidal interference. (b) Magnitude of the Fourier transform showing the bursts of energy responsible for the interference. (c) Mask used to eliminate the energy bursts. (d) Result of computing the inverse of the modified Fourier transform. (Original image courtesy of NASA.)

2.6.7 概率方法

- 将图象像素的灰度级视为随机变量，可统计各随机变换（灰度级）在一副图象中出现的概率
- 基于灰度级概率，可进一步计算图象的灰度均值、方差、高阶矩
  - 方差越大，图象灰度对比度越高



a b c

FIGURE 2.41 Images exhibiting (a) low contrast, (b) medium contrast, and (c) high contrast.

像素灰度的标准差分别是14.3、31.6和49.2个灰度级