

## 2 数字图像基础

要想成功，就必须弄清楚基础问题。

——亚里士多德

# 本章主要内容

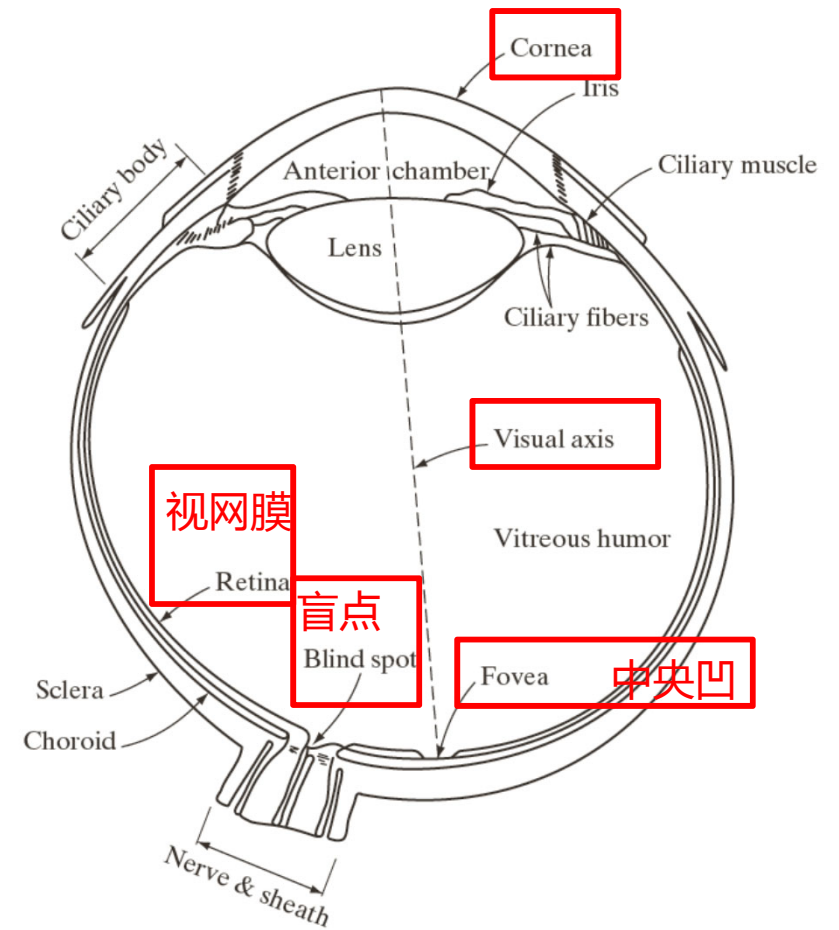
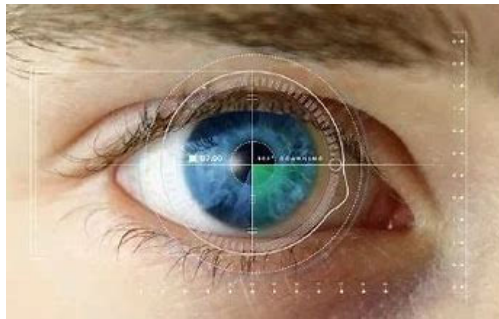
- 视觉感知要素
- 光和电磁波谱
- 图像感知和获取
- 图像采样和量化
- 像素间的基本关系
- 数字图像处理所用基本数学工具

# 为什么要先了解人的视觉感知要素？

- 人的**直觉**和**分析**在数字图像处理和计算机视觉等算法设计中起到重要作用；
- 基本了解人的视觉的形成与感知图像的机理和参数，便于和电子成像设备**对比**，明确努力方向；
- 实现并**超越人类视觉**的能力，这也是当今计算机视觉、人工智能努力的方向
- 从计算机视觉角度来说，借鉴人类视觉工作原理，开展**类脑视觉**计算，是一个重要的发展方向

# 人眼剖面结构

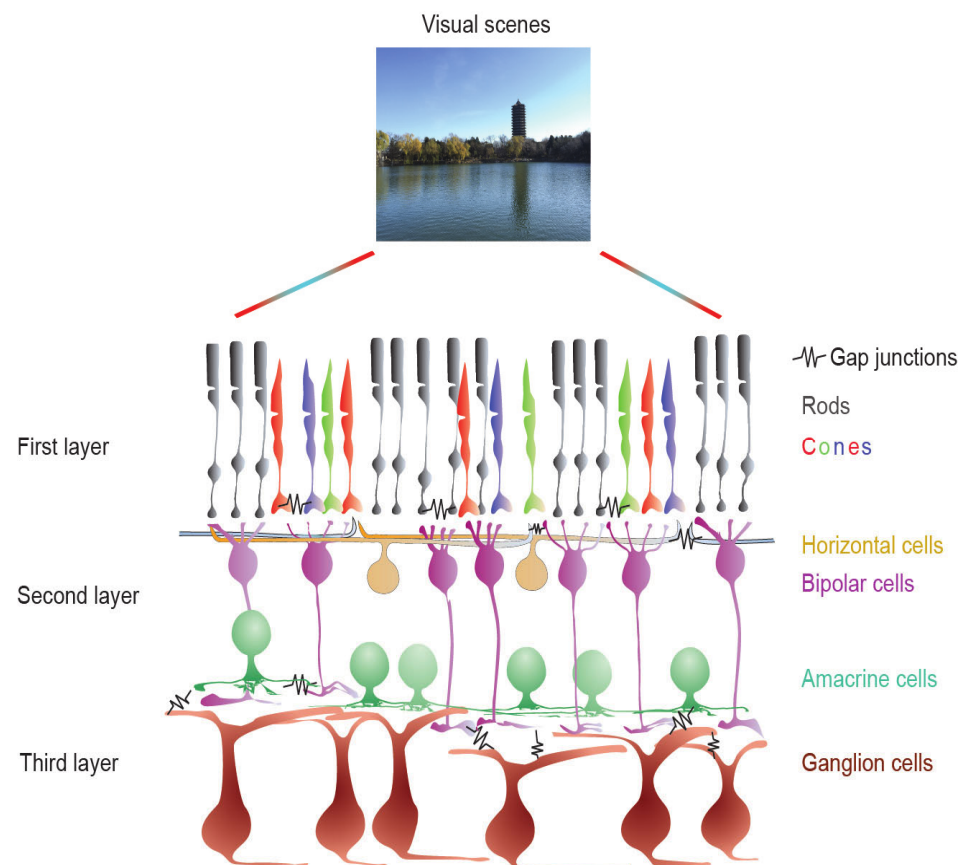
- 从外向内，有三层薄膜：
  - 角膜与巩膜外壳，脉络膜和视网膜
- 虹膜中间的开口为瞳孔
  - 直径2~8mm可变
- 中央凹
- 盲点



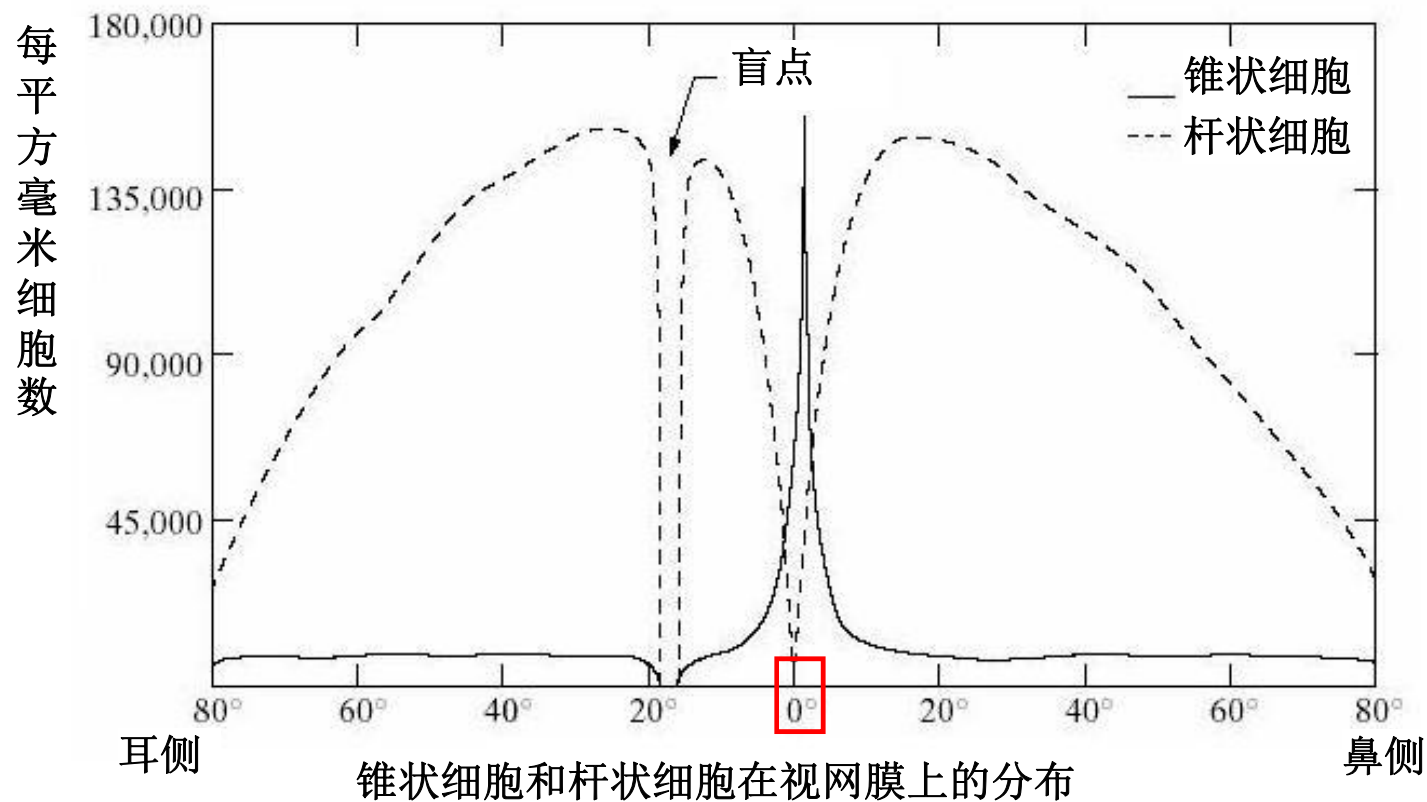
# 视觉感知要素（1）

- 视网膜

- 视网膜是眼睛的感觉神经层
- 杆状体和锥状体是感光器件
- 杆状体在低照度下提供视觉响应，且对形状敏感，暗视觉
- 锥状体只在高照度下提供视觉，称为亮视觉



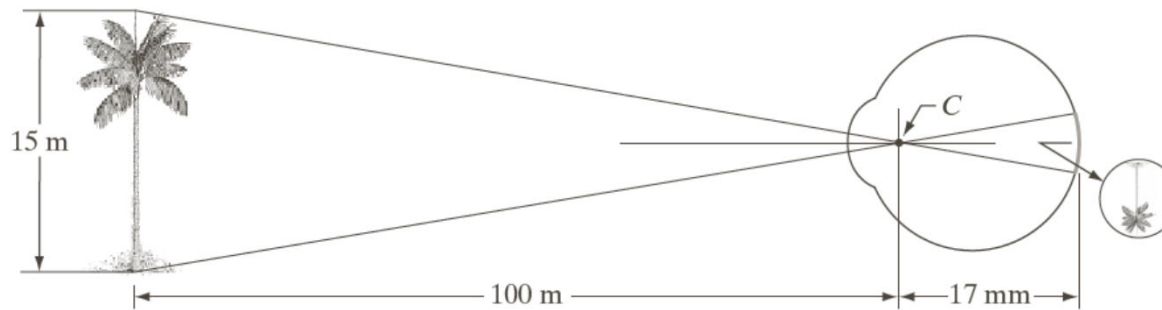
# 锥状细胞和杆状细胞在视网膜上的分布



**中央凹**，直径约1.5mm的圆形凹坑。锥状体数量近似为33万个，与640\*480分辨率的相机靶面有些相当

# 眼睛中图像的形成

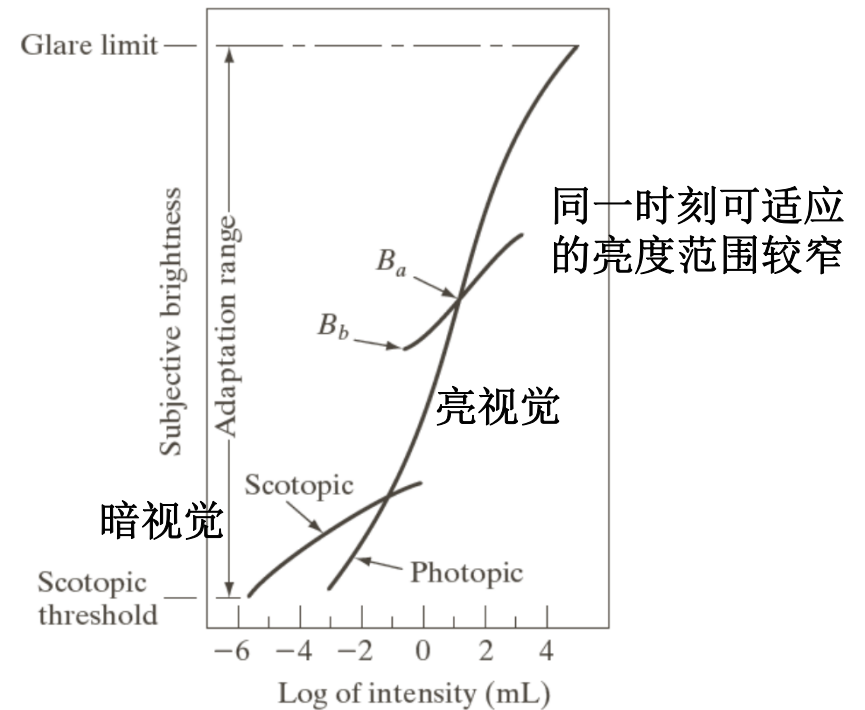
- 人眼焦距约为14~17mm



**FIGURE 2.3**  
Graphical representation of the eye looking at a palm tree. Point *C* is the optical center of the lens.

# 亮度适应和辨别

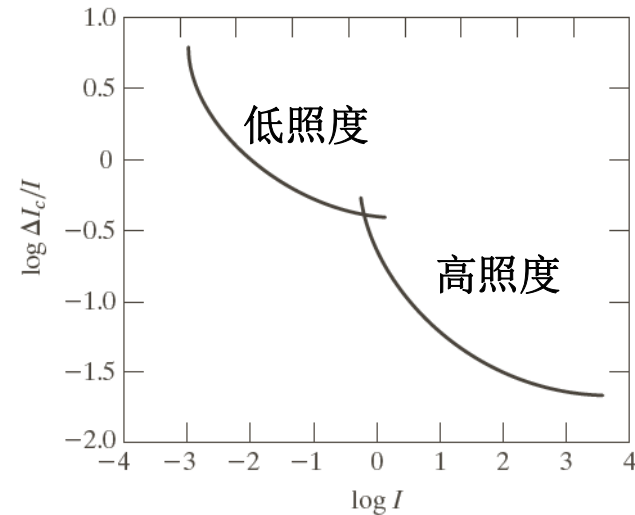
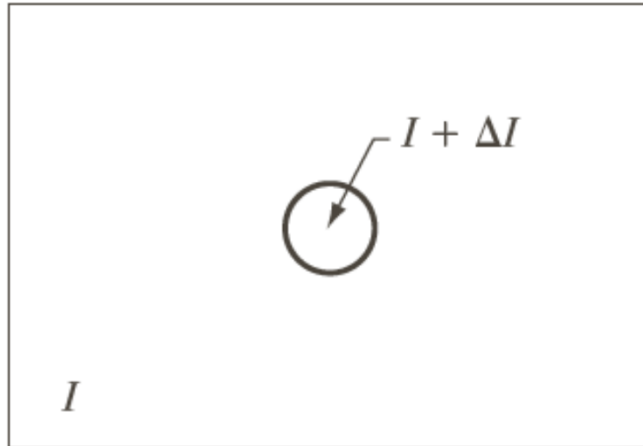
- 人的视觉系统能够适应的光强度级别很宽，从暗到亮阈值约有 $10^{10}$ 个量级。但**同一时刻，可适应的亮度范围较窄**。
- **主观亮度**是进入人眼的光强的对数函数
- 视觉系统的当前灵敏度级别
  - **亮度适应级别**，如图中 $B_a$





# 亮度适应和辨别

- 在任何特定的实验级别上，人眼辨别光强变化的能力。
- 韦伯比  $\Delta I_c / I$
- 低照度下，韦伯比较大，高照度下，韦伯比小，有更好辨别能力



**FIGURE 2.6**  
Typical Weber  
ratio as a function  
of intensity.

# 亮度适应和辨别

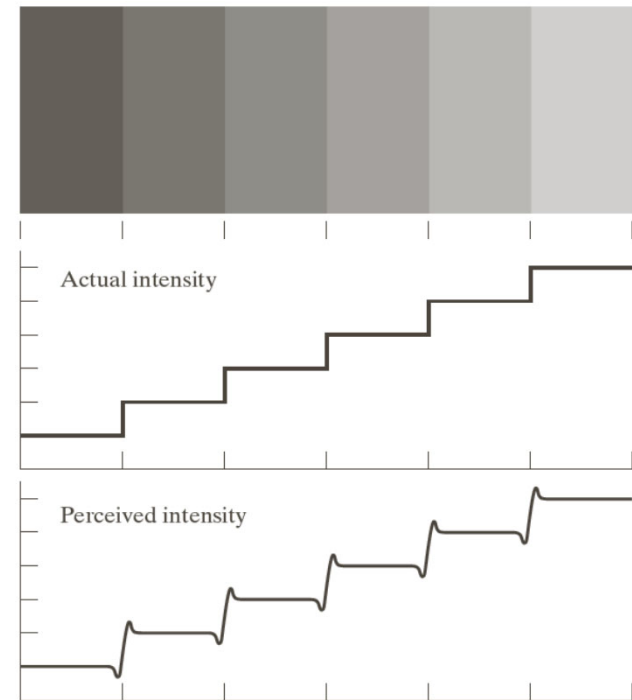
- 有两种现象表明，人眼感知亮度不是简单的强度的函数。
  - 1. 马赫带
  - 2. 同时对比



a b c

**FIGURE 2.8** Examples of simultaneous contrast. All the inner squares have the same intensity, but they appear progressively darker as the background becomes lighter.

随着背景变亮，中心块亮度感觉变暗



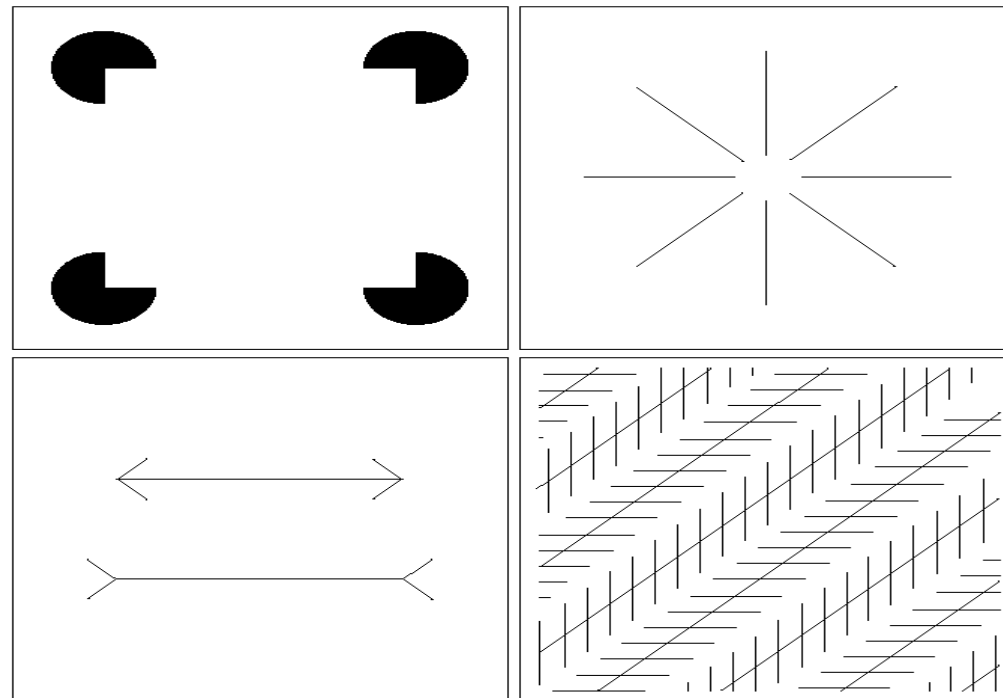
在观察均匀黑区域和均匀白区域形成的边界时，会感觉到边界附近暗区更暗，亮区更亮

# 人眼感知的错觉

- 人眼感知的另外一个现象——错觉

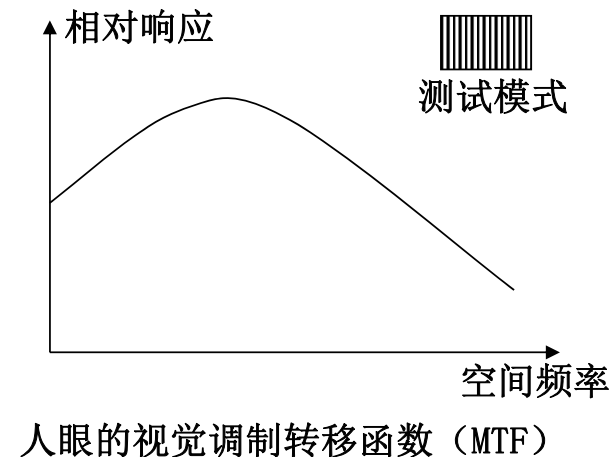
a b  
c d

**FIGURE 2.9** Some well-known optical illusions.

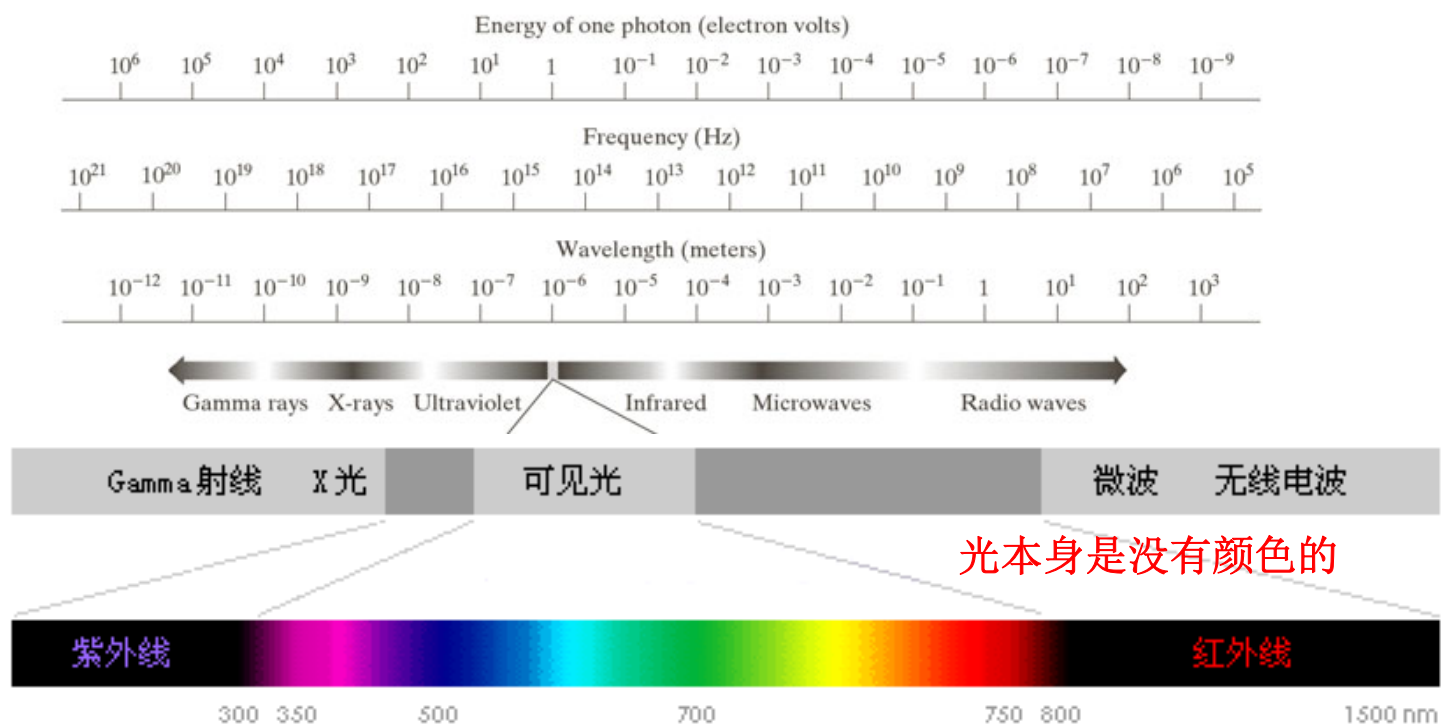


# 亮度适应和辨别

- 空间分辨率
  - 视野 :向左或右侧约 $100^\circ$  , 向上约 $65^\circ$  , 向下约 $75^\circ$
  - 空间分辨率:空间上二相邻的视觉信号, 人眼所刚能鉴别出二者存在的能力
  - 中央凹附近约 $1.5 \times 1.5 \text{ mm}^2$ 的面积上, 约有33万椎状体细胞, 与中等分辨率CCD相当
  - 亮度分辨力与照度有关



## 2.2 光和电磁波谱

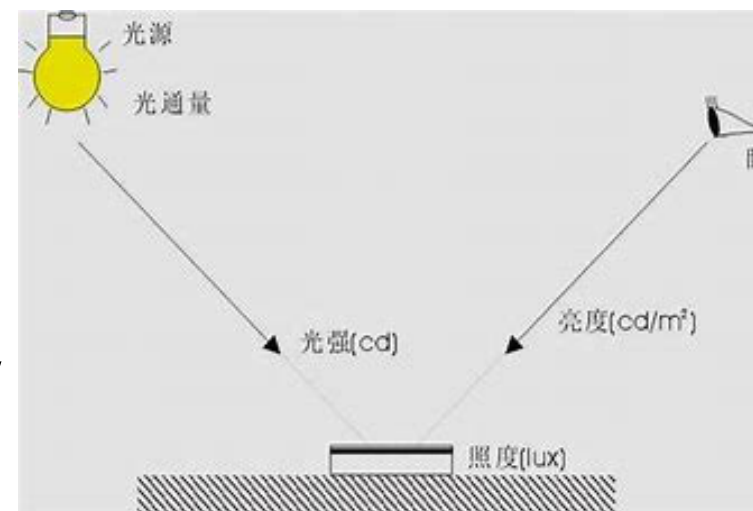


光本身是没有颜色的

可见光: 430nm~790nm

## 2.2 光和电磁波谱

- 除了频率以外，有三个基本量用于描述彩色光源的质量：辐射，光通量和亮度。
- 辐射是从光源流出的能量的总量，通常用瓦特来度量；
- 光通量用流明数来度量（单位：流明数，lm），给出观察者从光源感受到的（可见光）能量。如，远红外光光源发送出的光具有实际能量，但观察者很难感受到，光通量几乎是零。
- 亮度是人眼的光感知度量。
- 没有颜色的光称为单色光，唯一属性是强度或者灰度级的主观描绘子。



光强用于表示光源给定方向上单位立体角内光通量。

# 照度

- **照度**：照射在单位面积上的光通量：
  - 照度单位用lx(或lux,勒[克斯])， $1\text{lx}=1\text{lm}/\text{m}^2$ 。

一些典型场所的光照情况：

室内：

仓库 **20—75 Lux**

紧急通道 **30—75 Lux**

楼梯走廊 **75—200 Lux**

商店 **75—300 Lux**

办公室及接待室 **300—500 Lux**

银行 **200—1000 Lux**

会议厅 **300—1000 Lux**

室外：

**晴天 10000—1000000 Lux**

阴天 **100—10000 Lux**

黎明黄昏 **1—10 Lux**

满月之夜 **0.1—1 Lux**

多云之夜 **0.01—0.1 Lux**

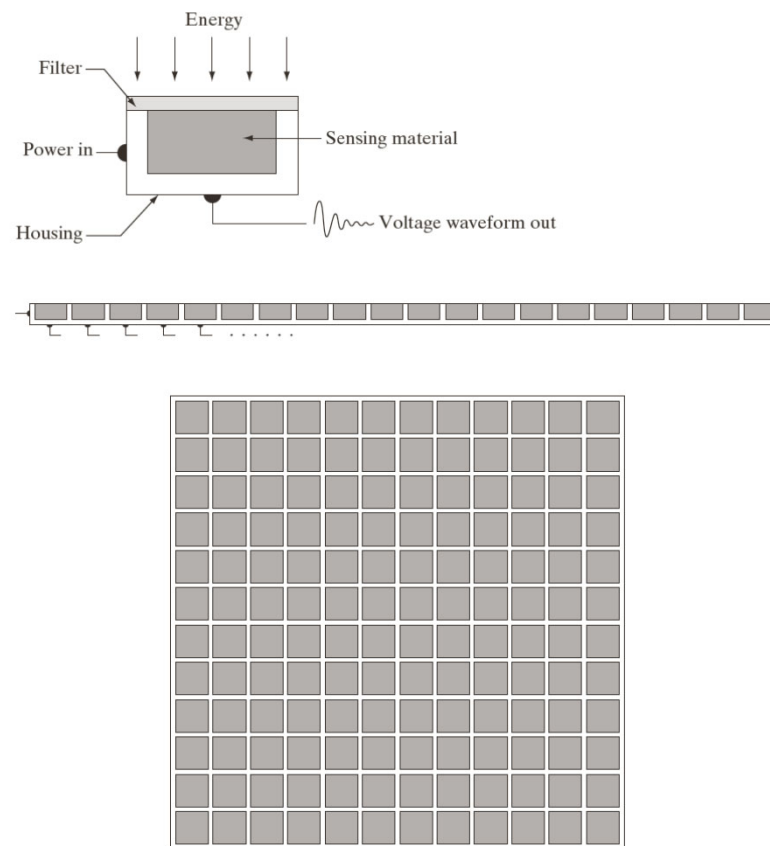
**晴天时星光下 0.001—0.01 Lux**

阴天时星光下 **0.0001—0.001 Lux**



## 2.3 图像感知和获取

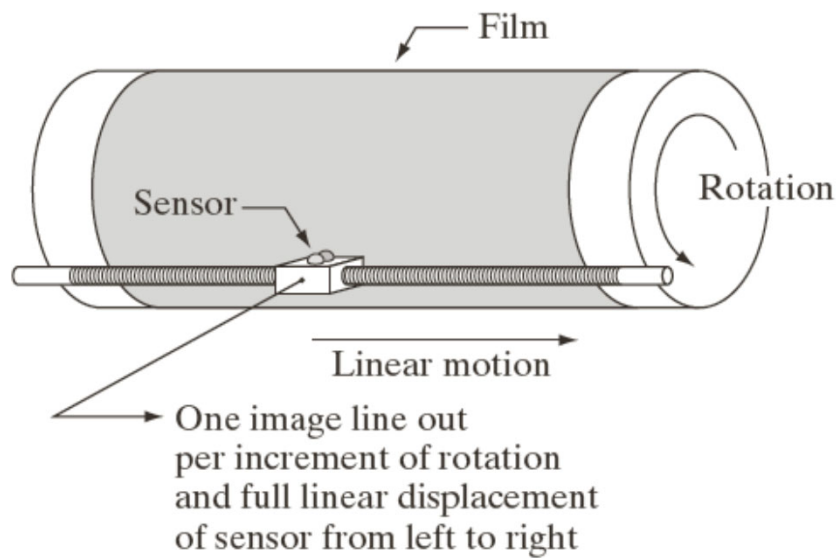
- 多数图像都是有“照射”源和形成图像的“场景”对光能的反射或者吸收产生的。
- 成像传感器配置，从点-线-面阵列。





# 图像感知和获取

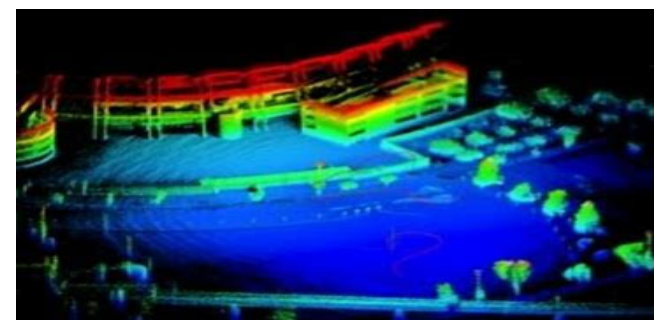
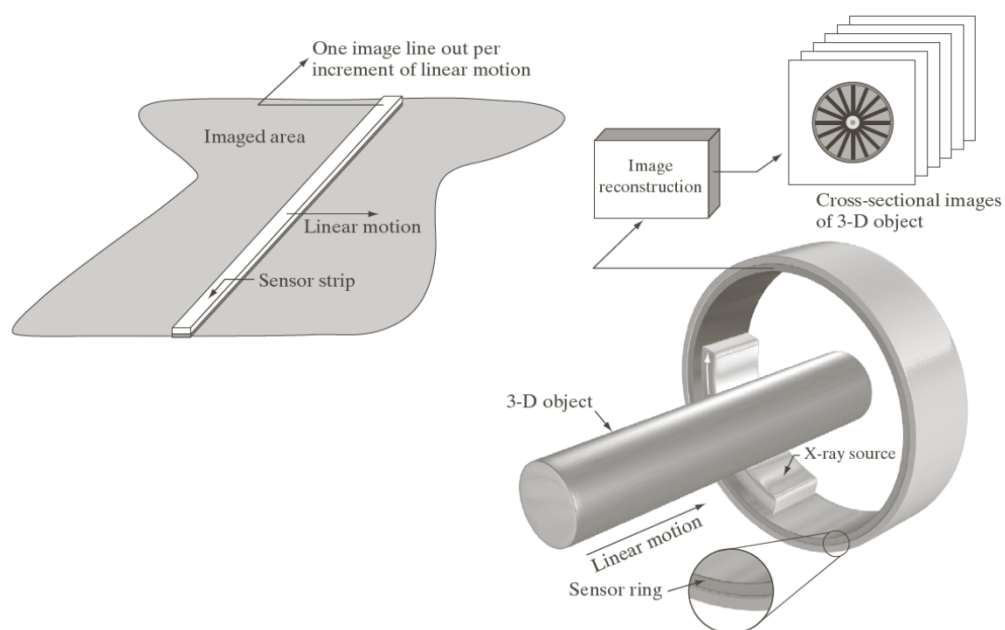
- 使用单个传感器获取图像



另一个例子：单线激光雷达

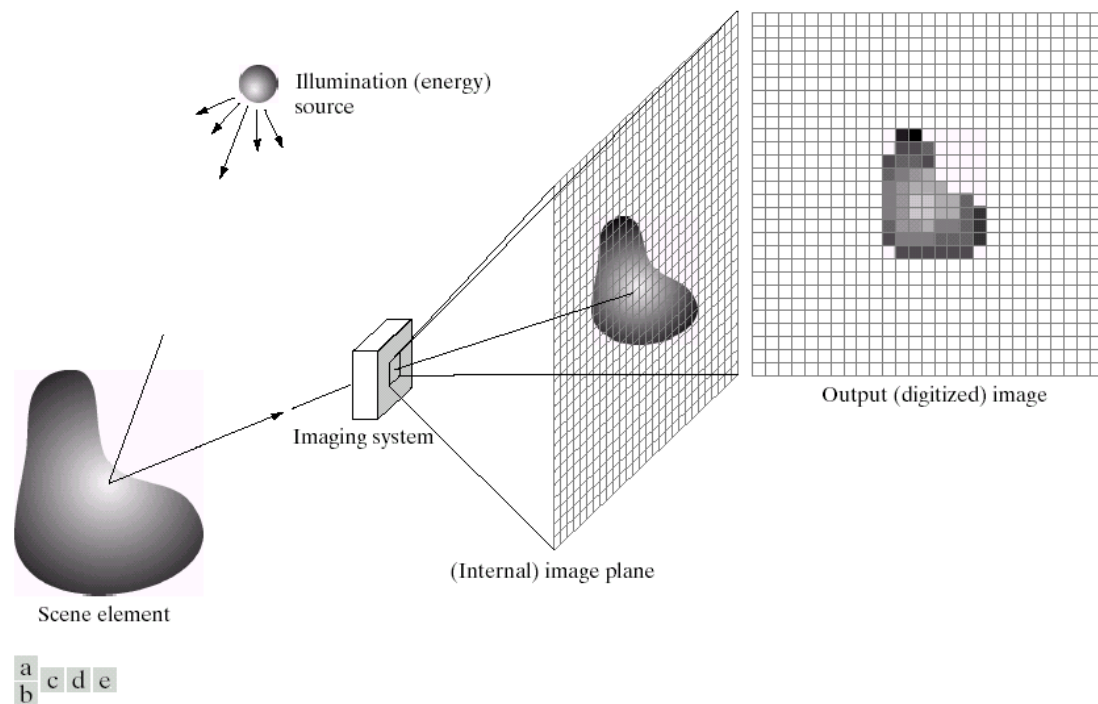
# 图像感知和获取

- 使用条带传感器获取图像
- 例子：平板扫描仪，磁共振成像（圆环扫描），多线激光雷达



# 图像感知和获取

- 使用传感器阵列获取图像（光被物体反射或者透射成像，不需要运动）



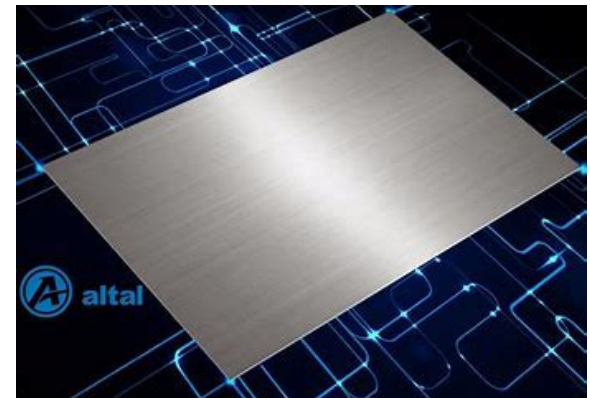
**FIGURE 2.15** An example of the digital image acquisition process. (a) Energy (“illumination”) source. (b) An element of a scene. (c) Imaging system. (d) Projection of the scene onto the image plane. (e) Digitized image.

## 2.3 图像感知和获取

- 简单的图像形成模型
- 用一个二维亮度函数 $f(x,y)$ 表示图像，  
则 $0 < f(x,y) < \infty$
- 对自身不发光的景物：  
 $f(x,y) = i(x,y)r(x,y)$ 
  - $i(x,y)$ 是入射分量或者照度， $0 < i(x,y) < \infty$
  - $r(x,y)$ 为反射系数， $0 < r(x,y) < 1$
  - $r(x,y)$ 的典型值：黑天鹅绒0.01，不锈钢0.65，白墙0.8，雪0.93.



黑天鹅绒



不锈钢

# 成像几何

- 三维空间中的一点  $(X, Y, Z)$ ，在像平面上成像为点  $(X', Y')$ ，相机焦距为  $f$

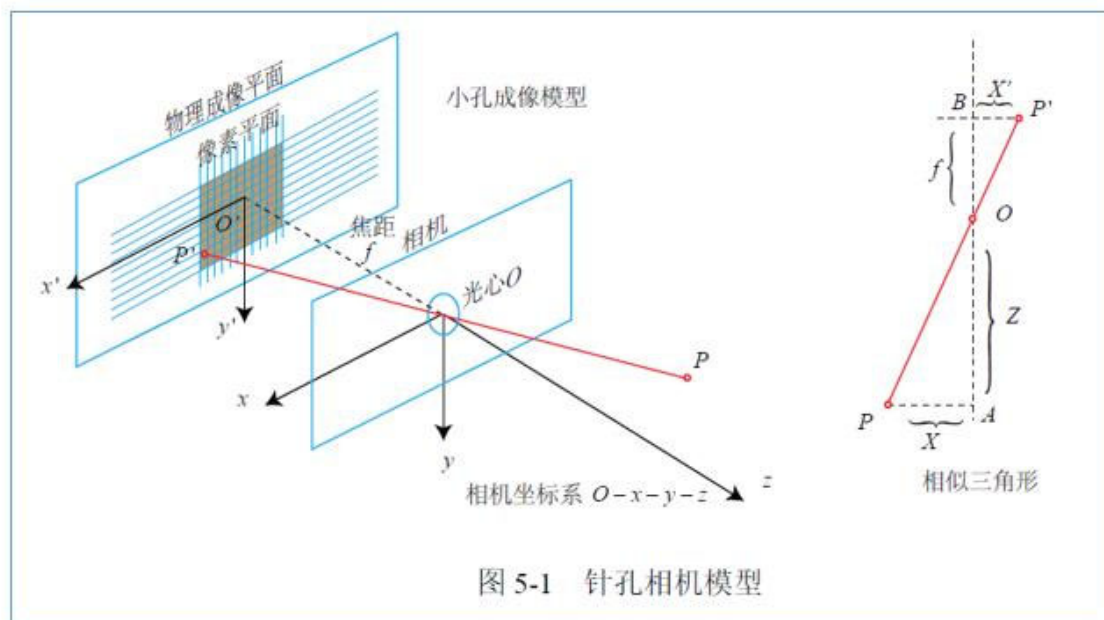
- 小孔成像模型

原始形式  $\frac{Z}{f} = -\frac{X}{X'} = -\frac{Y}{Y'}$

翻转在前面  $\frac{Z}{f} = \frac{X}{X'} = \frac{Y}{Y'}$

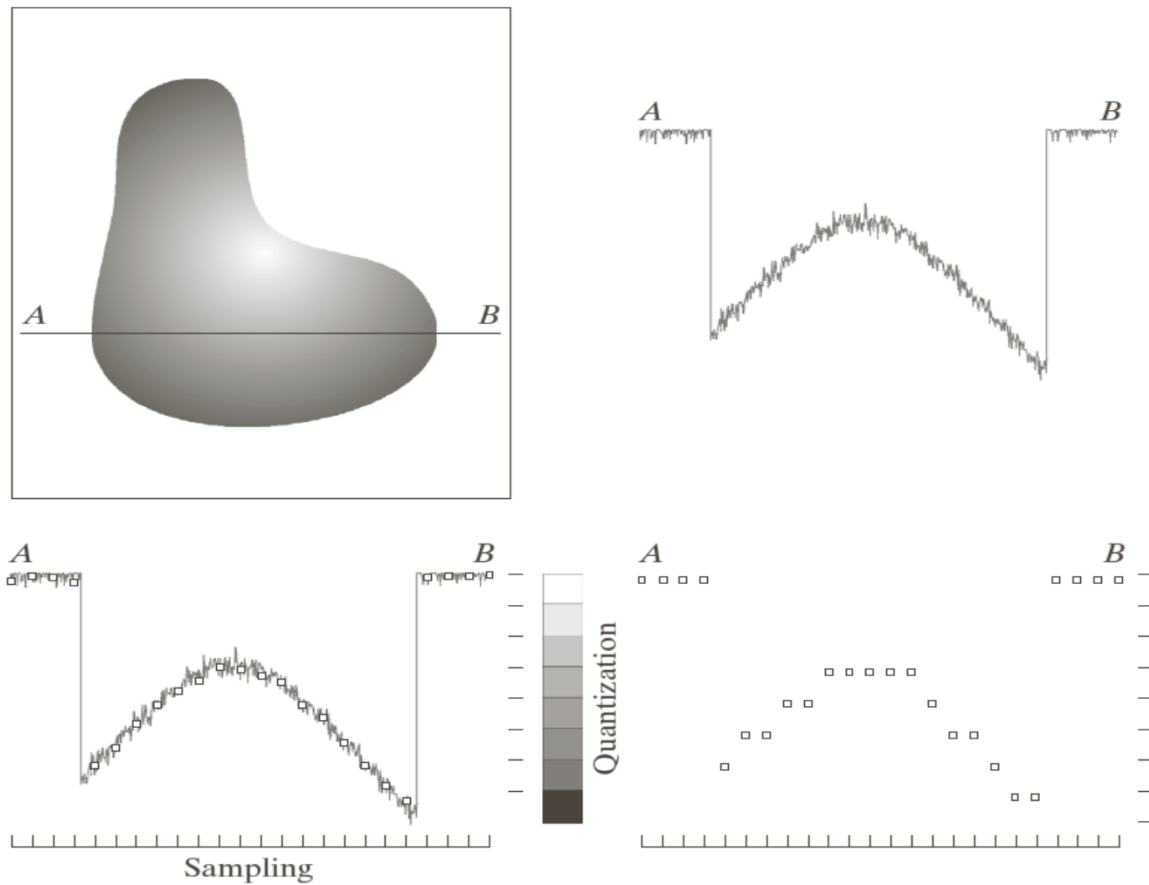
整理之：

$$\begin{aligned} X' &= f \frac{X}{Z} \\ Y' &= f \frac{Y}{Z} \end{aligned}$$



## 2.4 图像取样和量化

- 基本概念

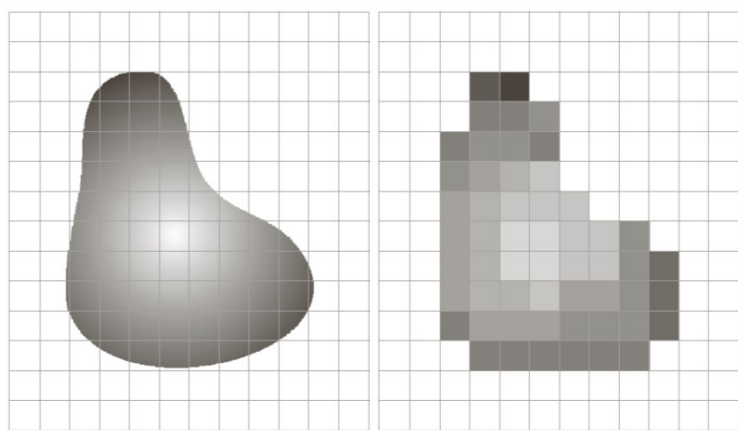


a b  
c d

**FIGURE 2.16**  
Generating a digital image.  
(a) Continuous image. (b) A scan line from *A* to *B* in the continuous image, used to illustrate the concepts of sampling and quantization. (c) Sampling and quantization. (d) Digital scan line.

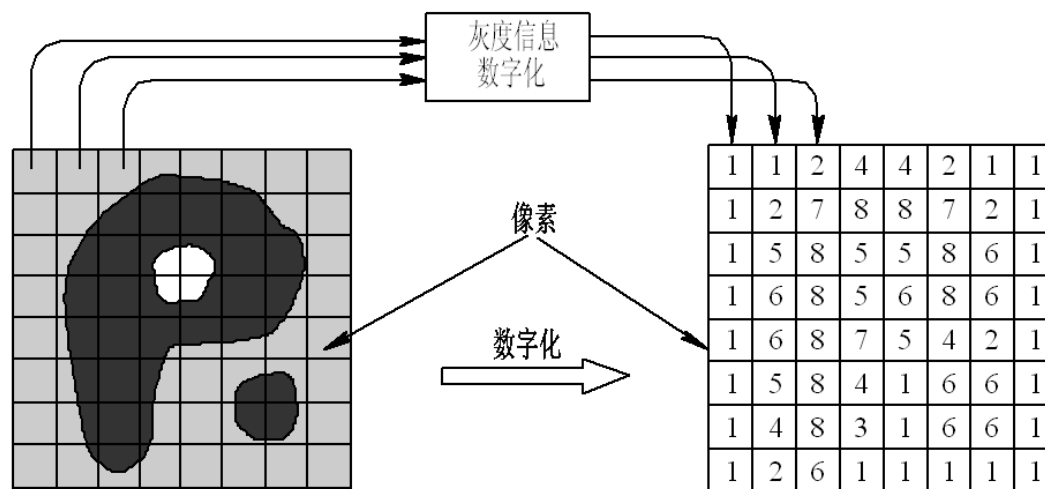
## 2.4 图像取样和量化

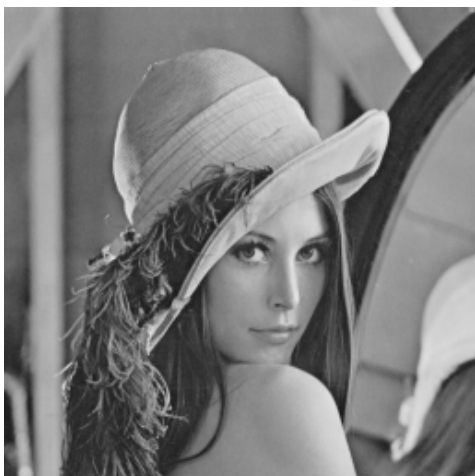
- 数字图像的质量在很大程度上取决于取样和量化中所用的**样本数**和**灰度级**。



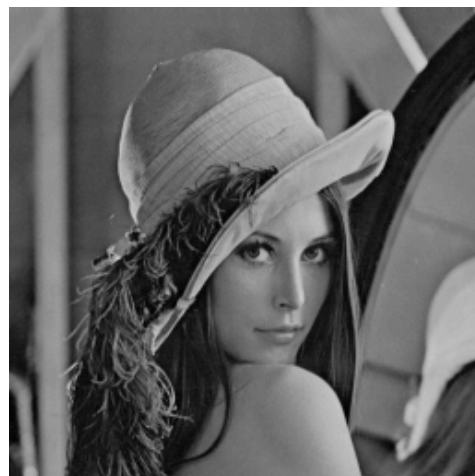
a b

FIGURE 2.17 (a) Continuous image projected onto a sensor array. (b) Result of image sampling and quantization.





**256级**



**64级**



**16级**



**8级**



**4级**



**2级**



# 量化误差峰值信噪比

- 信噪比：信号峰峰值平方与误差的均方值之比
- 对于量化误差 $\Delta$ ，如果量化间隔足够小，可近似认为量化误差在 $[-0.5\Delta, +0.5\Delta]$ 之间均匀分布，则量化噪声的方差为

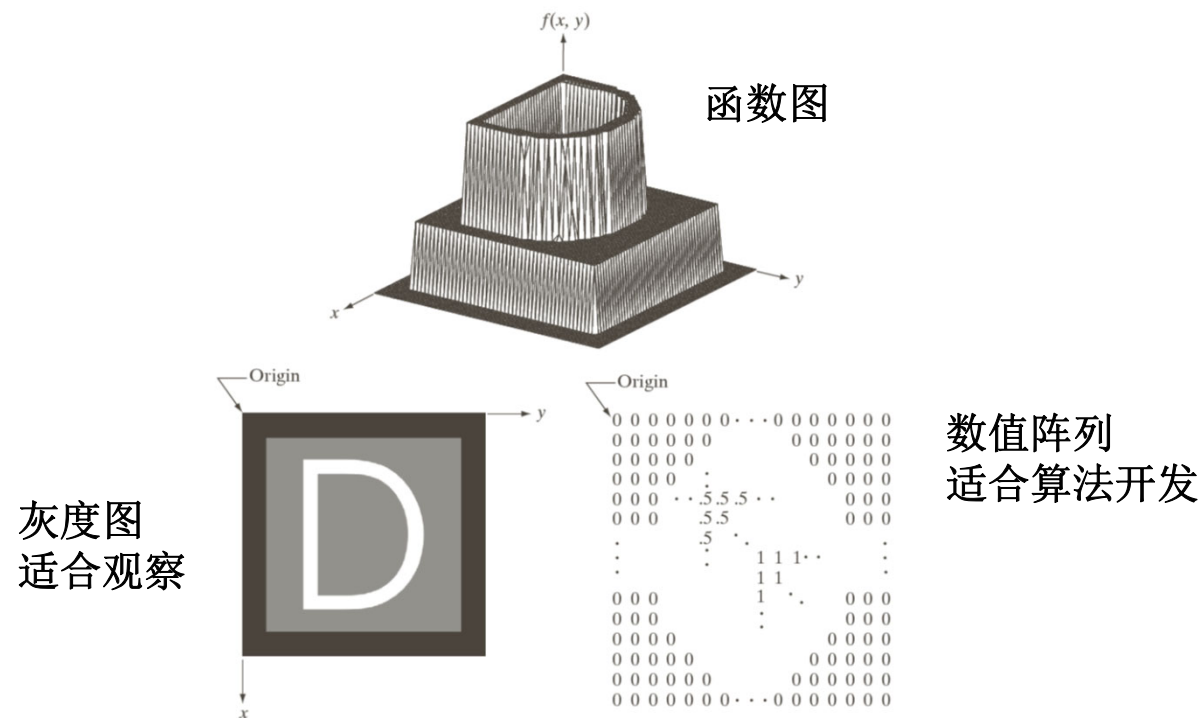
$$\sigma_n^2 = \frac{\Delta^2}{12} = \frac{2^{-2n} A^2}{12},$$

$$SNR = 10 \log_{10} \left( \frac{A^2}{\sigma_n^2} \right) = 10 \log_{10} (12 \times 2^{2n}) = 6.02n + 10.8 \text{ dB}$$

量化位数每增加1位，信噪比提升6db。

# 数字图像表示

- 数字图像的三种表示形式，后两种最有用。



# 数字图像表示

## ■ 矩阵表示

$$f(x, y) = \begin{bmatrix} f_{00} & f_{01} & \cdots & f_{0,N-1} \\ f_{10} & f_{11} & \cdots & f_{1,N-1} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ f_{M-1,0} & f_{M-1,1} & \cdots & f_{M-1,N-1} \end{bmatrix}$$

$f_{ik}$ 是图像的像元（或叫像素，像点），数字化图像量化为一个坐标和幅值都是整数的二维函数。

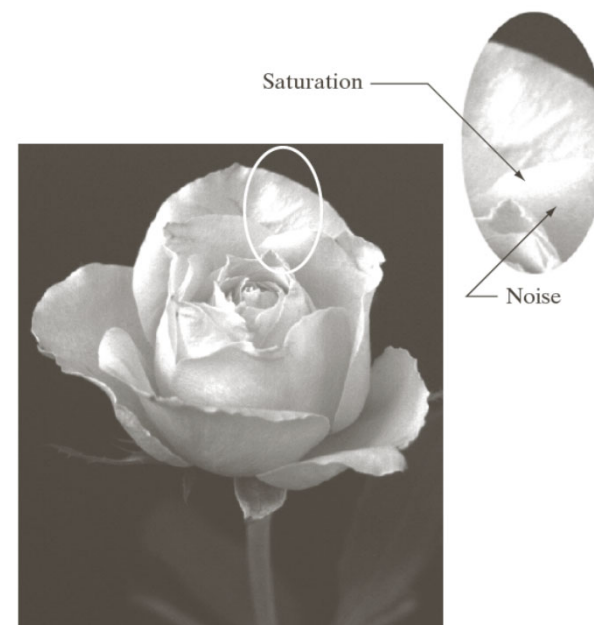
## ■ 像素值有非负性和有界性

## ■ 图像的能量也是有界的：

$$E = \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^N f_{ik}^2 < \text{上限值}$$

# 数字图像表示

- 灰度级一般取为2的整数次幂， $L=2^k$
- 图像系统的**动态范围**定义为系统中最大可度量灰度与最小可检测灰度之比。
- 实际中，上限取决于饱和度，下限取决于噪声。
- 图像的对比度：
  - 最高和最低灰度级之间的灰度差



- 不同分辨率和量化技术对应的存储图像的比特数。  
若方形图像，比特数 $b=N^2k$

**TABLE 2.1**

Number of storage bits for various values of  $N$  and  $k$ .

$N/k$	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