



# 数字图像处理 (Digital Image Processing)

王正

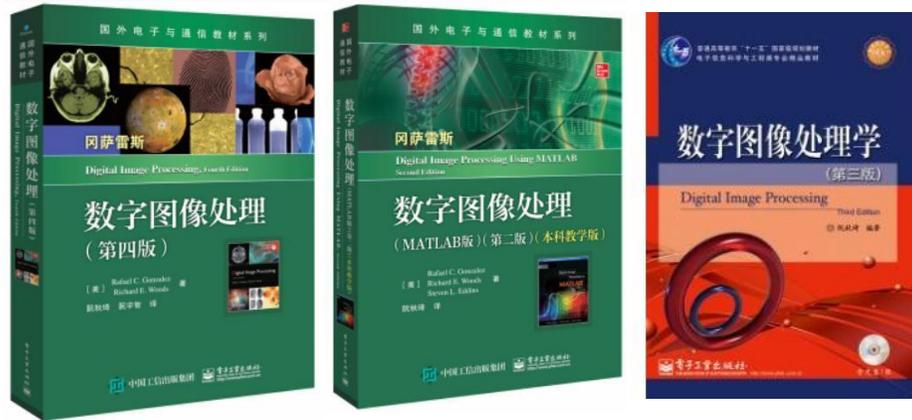
Email: [zheng\\_wang@seu.edu.cn](mailto:zheng_wang@seu.edu.cn)  
办公室: 无线谷A5415

**Image  
Processing  
Project Ideas**  
*Beginners*



- 课程设置：32学时（研讨），专业选修课，大三课程
- 课程设计原则：图文结合，侧重基础知识理解
- 考试70%，平时成绩占30%

◆ 参考书





# 第1章 绪论

---

1. 什么是数字图像处理
  2. 数字图像处理的起源
  3. 数字图像处理应用领域
  4. 数字图像处理的基本步骤
  5. 图像处理系统的组成
  6. 数字图像处理应用举例
-

# 1.1 什么是数字图像处理

## ◆ 图像

用各种观测系统以不同形式和手段观测客观世界而获得的，可以直接或间接作用于人眼并进而产生视知觉的实体。



## ◆ 图像和信息

人类从外界（客观世界）获得的信息约有75%来自视觉系统。





# 1.1 什么是数字图像处理

## ◆ 图像表示

2-D数组  $f(x, y)$

$x, y$ : 2-D空间 $XY$ 中坐标点的位置

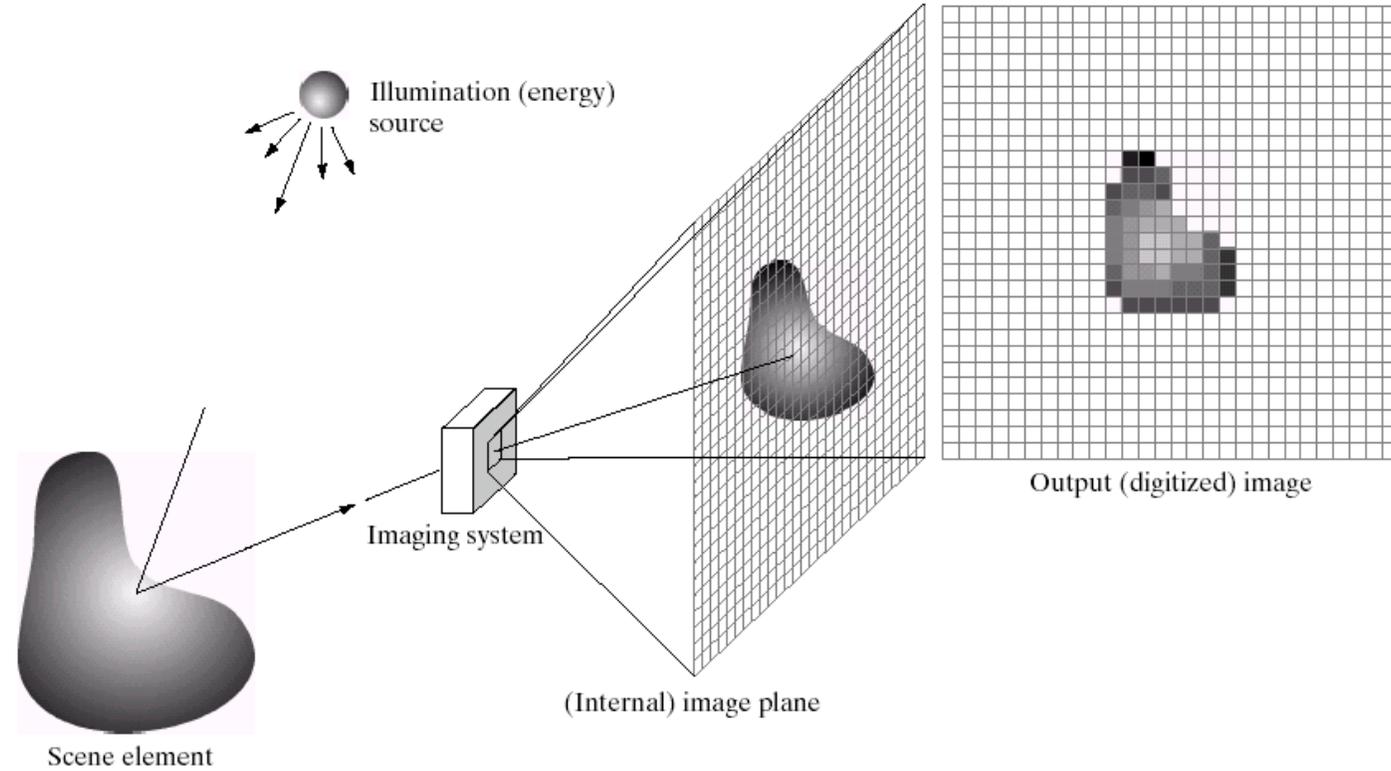
$f$ : 代表图像在 $(x, y)$ 的性质 $F$ 的数值

$f, x, y$ 的值可以是任意实数

性质 $F$ : 可对应不同物理量

灰度图象里用灰度表示

# 1.1 什么是数字图像处理



# 1.1 什么是数字图像处理



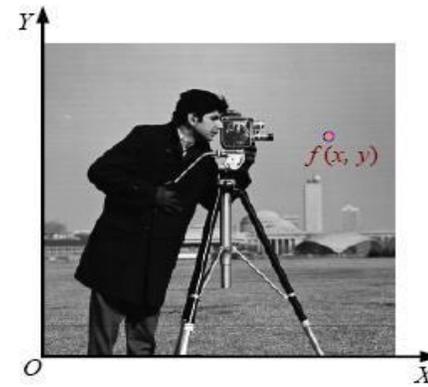
600×600



4800×1200



(a)



(b)

# 1.1 什么是数字图像处理

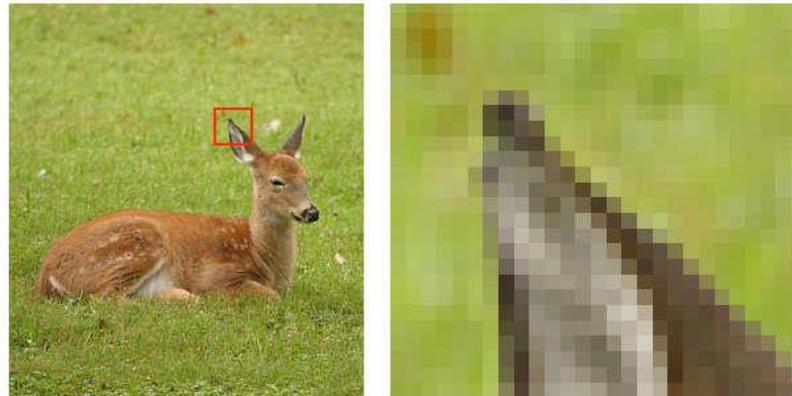
## ◆ 图像单元

一幅图像是许多图像单元的集合体

2-D图象： 像素 (picture element) 常用pixel表示

3-D图象： 体素 (volume element) 常用voxel表示

$$f(x, y) \rightarrow f(x, y, z), f(x, y, t)$$

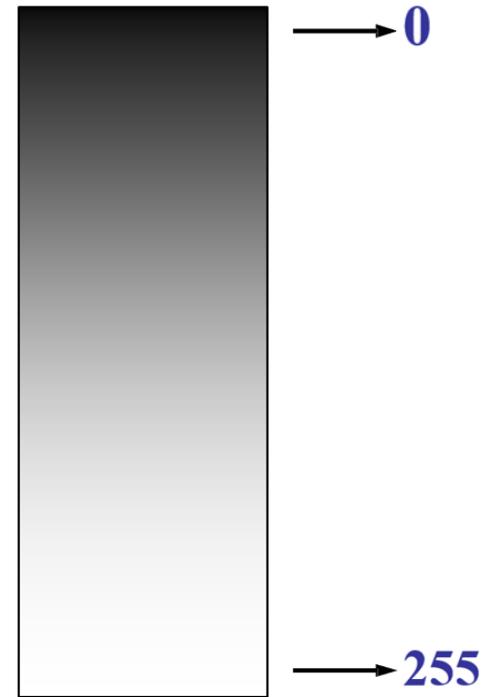
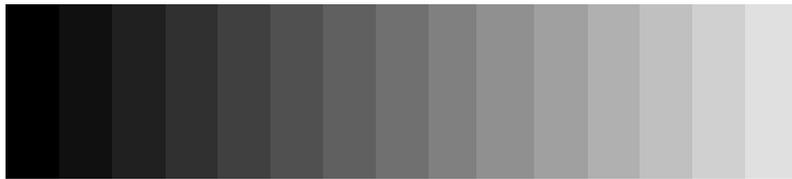


灰度——表示图像像素明暗程度的数值

256级灰度



16级灰度



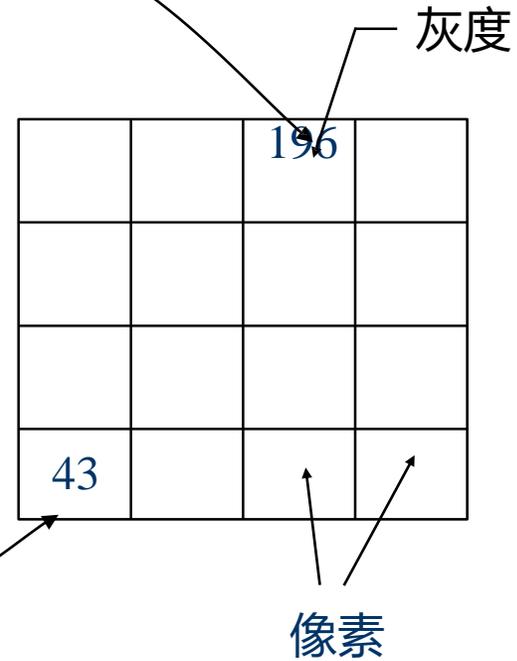
图像数据的实际灰度级越多，图像视觉效果越好

# 1.1 什么是数字图像处理

## ◆ 数字图像表示



(a) 物理图像



(b) 数字图像

# 1.1 什么是数字图像处理

◆ 像素值一般表示灰度、颜色、高度、透明度等



```

125, 153, 158, 157, 127,
70, 103, 120, 129, 144, 144, 150, 150, 147, 150, 160, 165, 160, 164, 165, 167, 175, 17
5, 166, 133, 60,
133, 154, 158, 100, 116, 120, 97, 74, 54,
74, 118, 146, 148, 150, 145, 157, 164, 157, 158, 162, 165, 171, 155, 115, 88, 49,
155, 163, 95, 112, 123, 101, 137, 108, 81, 71, 63,
81, 137, 142, 146, 152, 159, 161, 159, 154, 138, 81, 78, 84, 114, 95,
167, 69, 85, 59, 65, 43, 85, 34, 69,
    
```

每像素1个样值 (B&W or Grayscale)

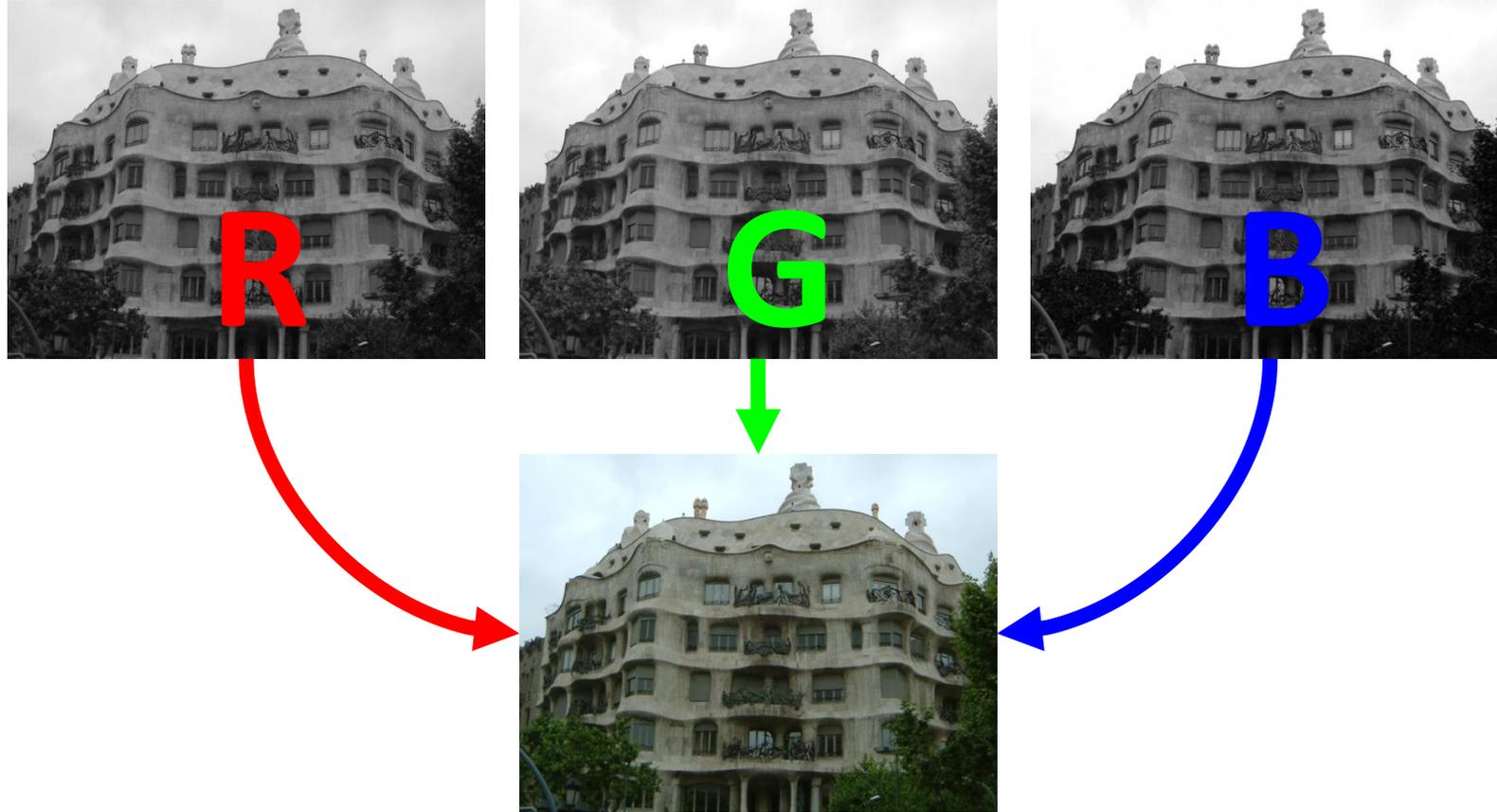


```

(207, 137, 130) (220, 179, 163) (215, 169, 161) (210, 179, 172) (210, 179, 172)
(207, 154, 146) (217, 124, 121) (226, 144, 133) (226, 144, 133) (224, 137, 124)
(227, 151, 136) (227, 151, 136) (226, 159, 142) (227, 151, 136) (230, 170, 154)
(231, 178, 163) (231, 178, 163) (231, 178, 163) (236, 187, 171) (236, 187, 171)
(239, 195, 176) (239, 195, 176) (240, 205, 187) (239, 195, 176) (231, 138, 123)
(217, 124, 121) (215, 169, 161) (216, 179, 170) (216, 179, 170) (207, 137, 120)
(159, 51, 71) (189, 89, 101) (216, 111, 110) (217, 124, 121) (227, 151, 136)
(227, 151, 136) (226, 159, 142) (226, 159, 142) (237, 159, 135) (237, 159, 135)
    
```

每像素3个样值 (Red, Green, and Blue)

# 1.1 什么是数字图像处理



# 1.1 什么是数字图像处理

## ◆ 数字图像处理的定义

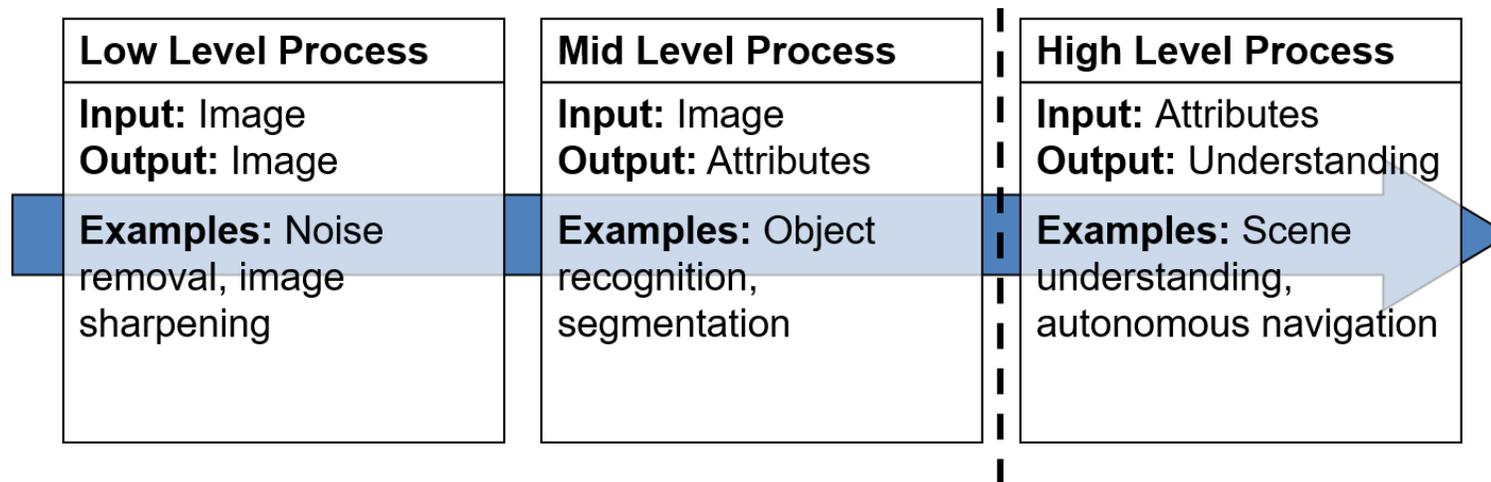
从图像处理到计算机视觉是一个连续的统一体

图像处理（图像  图像）

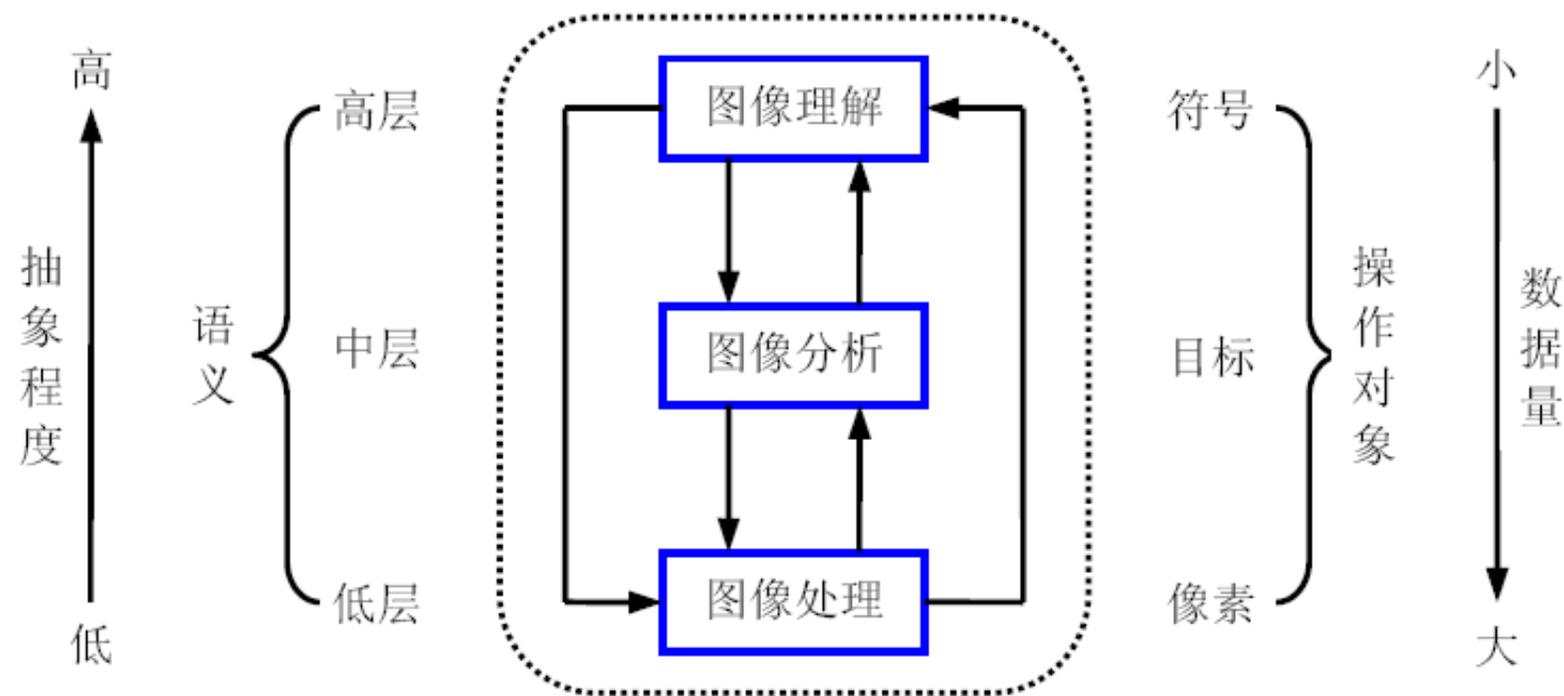
图像分析（图像  数据）

图像理解（图像  解释）

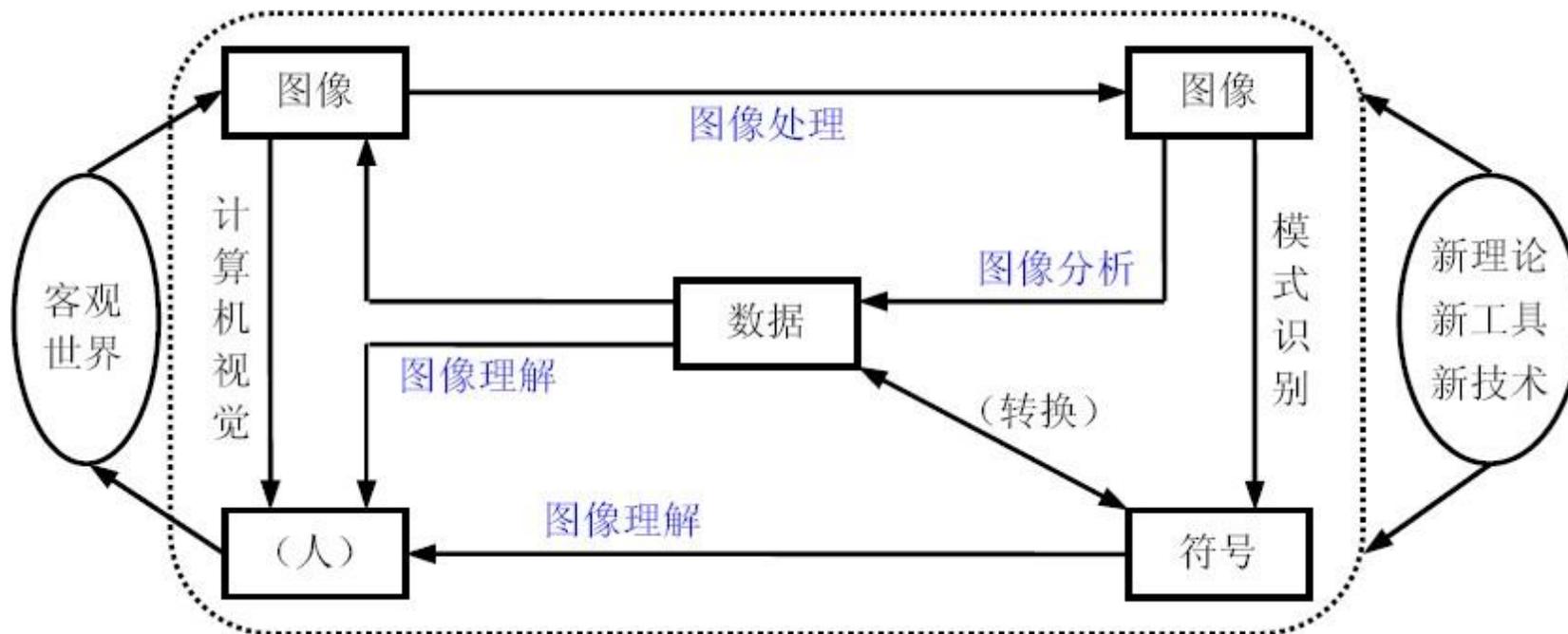
我们将数字图像处理界定为其**输入**和**输出**都是图像的处理



# 1.1 什么是数字图像处理

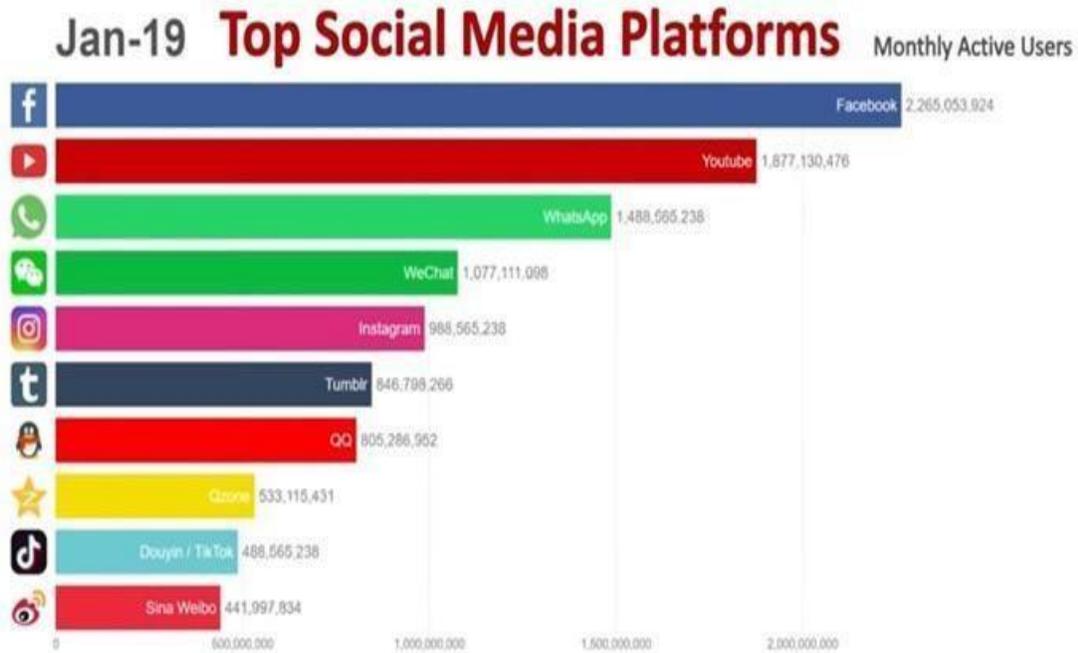


# 1.1 什么是数字图像处理



# 1.1 什么是数字图像处理

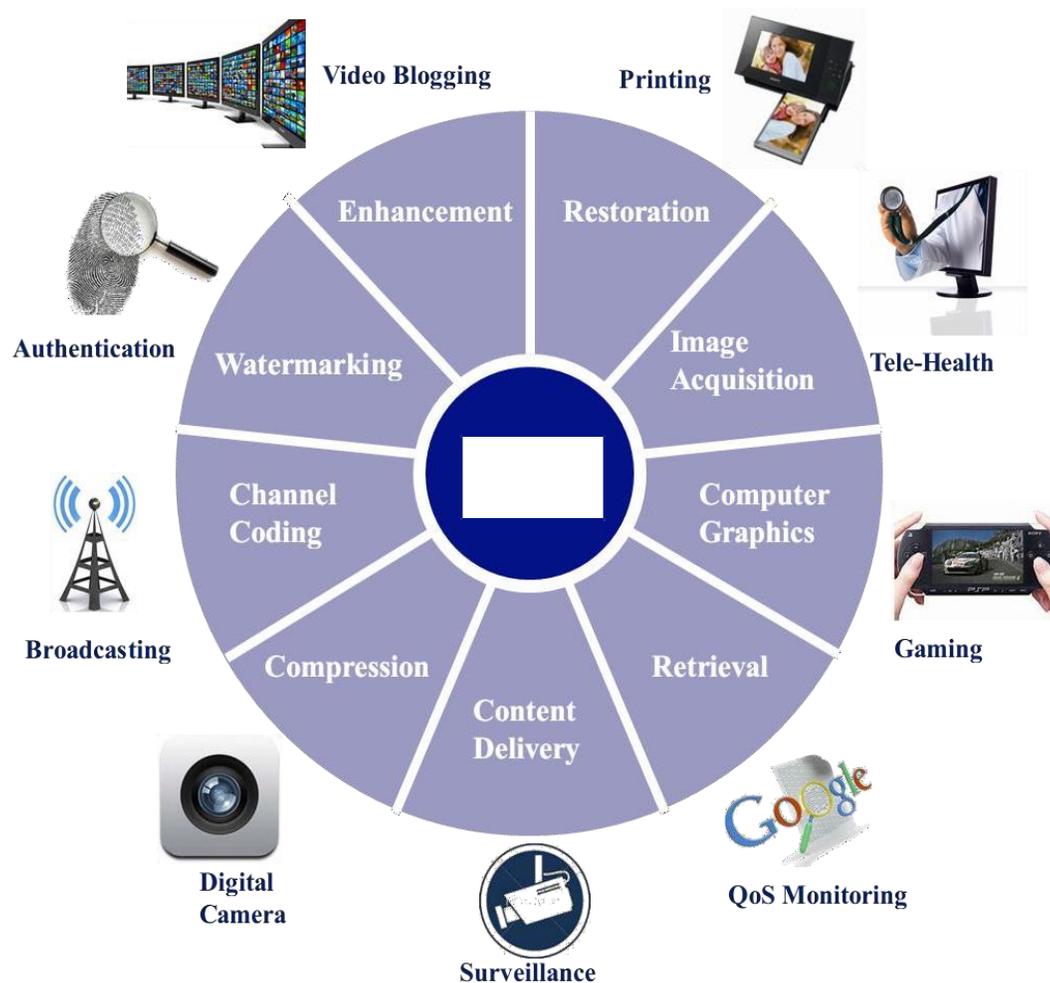
- 视觉信息（图像、视频等）数据极具增长
  - 设备：相机、手机、平板电脑 ...
  - 应用：社交网站、APP、直播、视频娱乐、 ...



# 1.1 什么是数字图像处理

## • 应用领域

- 安防监控
- 图像搜索
- 工业视觉
- 人机交互
- 视觉导航
- 虚拟现实
- 生物医学
- 遥感测绘
- ...



# 1.1 什么是数字图像处理

## ◆ 图像让我们的生活变得越来越美好

- 1.提高图像的视感质量， 以达到赏心悦目的目的
- 2.提取图像中所包含的某些特征或特殊信息， 便于计算机分析
- 3.对图像数据进行变换、编码和压缩， 便于图像的存储和传输





# 第1章 绪论

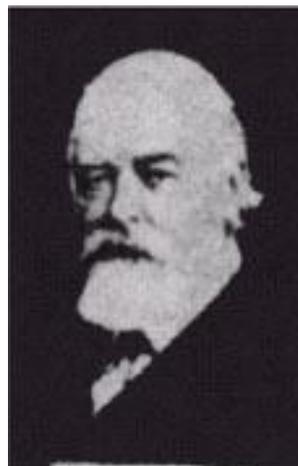
---

1. 什么是数字图像处理
  2. 数字图像处理的起源
  3. 数字图像处理应用领域
  4. 数字图像处理的基本步骤
  5. 图像处理系统的组成
  6. 数字图像处理应用举例
-

## 1.2 数字图像处理的起源

### 巴特兰(Bartlane) 电缆图片传输系统

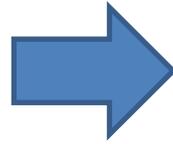
**1921年**电报打印机采用特殊字符在编码纸带打印。输出设备从通用到专用



**1922年**两次穿越大西洋，穿孔纸得到图像检测误差。图像通信系统  
信源编码和信道编码

**1929年**从伦敦到纽约从早期**5**个灰度到**15**个通过电缆传输





➤ 早在20世纪20年代，P图技术就已经存在

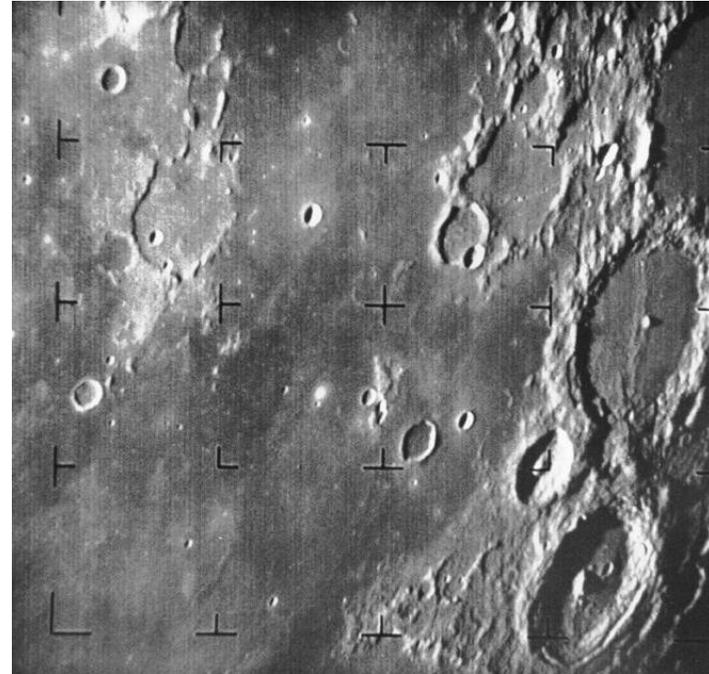


## 1.2 数字图像处理的起源

第一台功能强大到足以执行有意义的图像处理任务的大型计算机，出现于20世纪60年代初

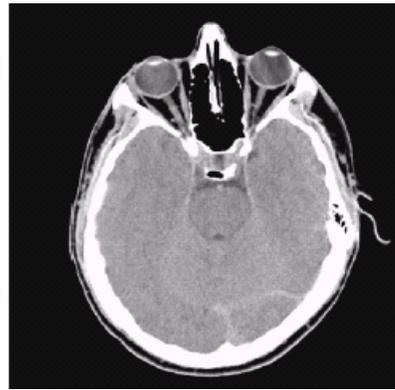
处理卫星图像：校正航天器上电视摄像机中各种类型的图像畸变

“徘徊者7号”撞击月球表面前拍摄的第一张月球图像



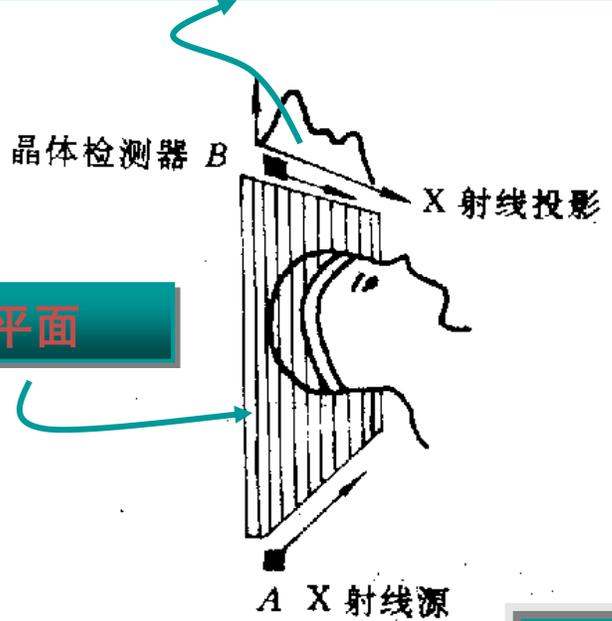
## 1.2 数字图像处理的起源

- 20世纪60年代末和70年代，数字图像处理技术开始用于医学成像、地球资源遥感监测和天文学领域。
- 1975年Godfrey N. Hounsfield和Allan M. Cormack发明了计算机断层技术（CT），获1979年诺贝尔医学奖。
- 从20世纪60年代至今，数字图像处理技术除了用于上述领域，在地理学、考古学、生物学、国防和工业领域中也广泛的应用。



整个二维 $N \times N$ 图像  
(横截面)的投影  
(一维 $N$ 个信息)

成像平面



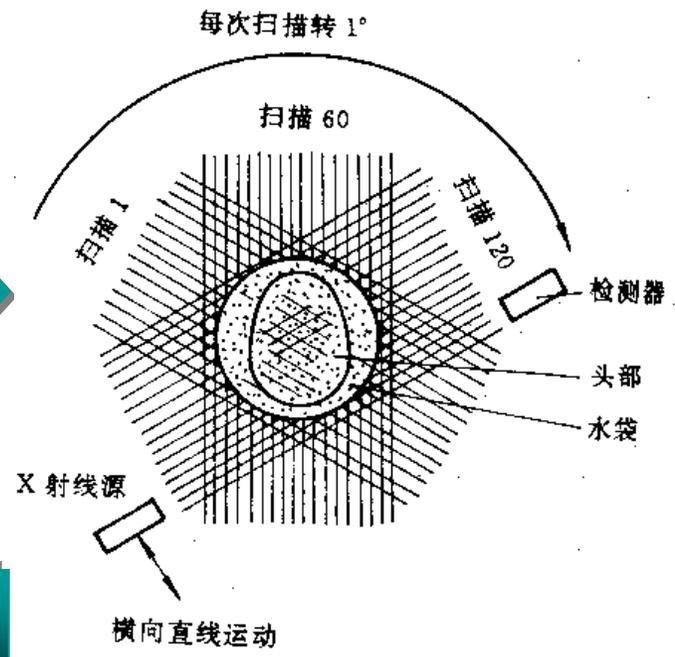
人体或  
A、B

旋转

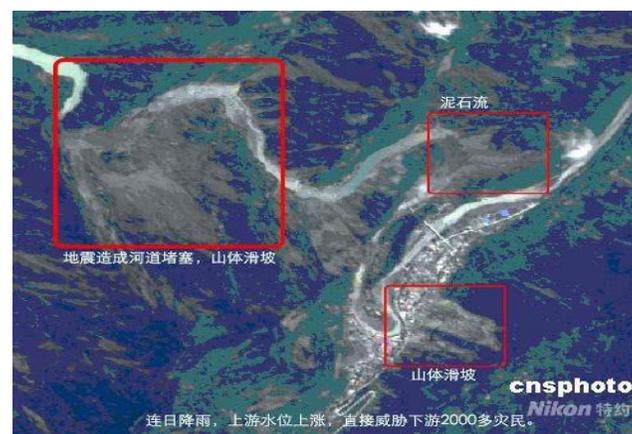
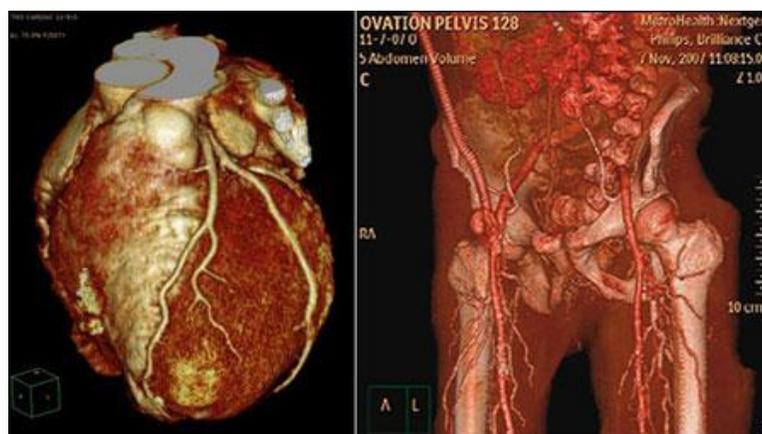
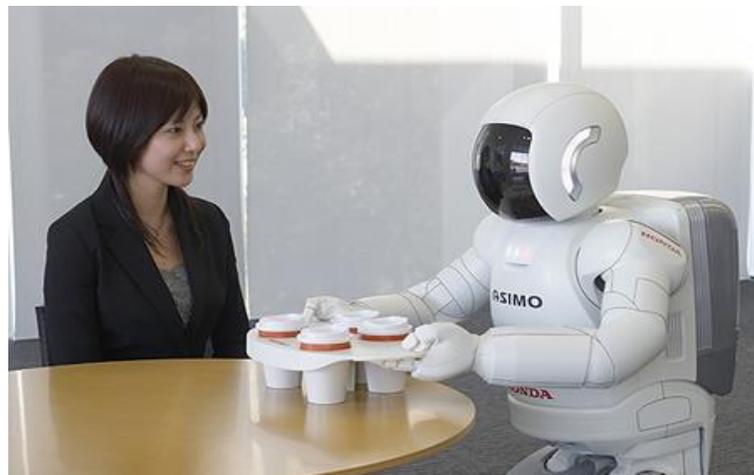
横向断层术

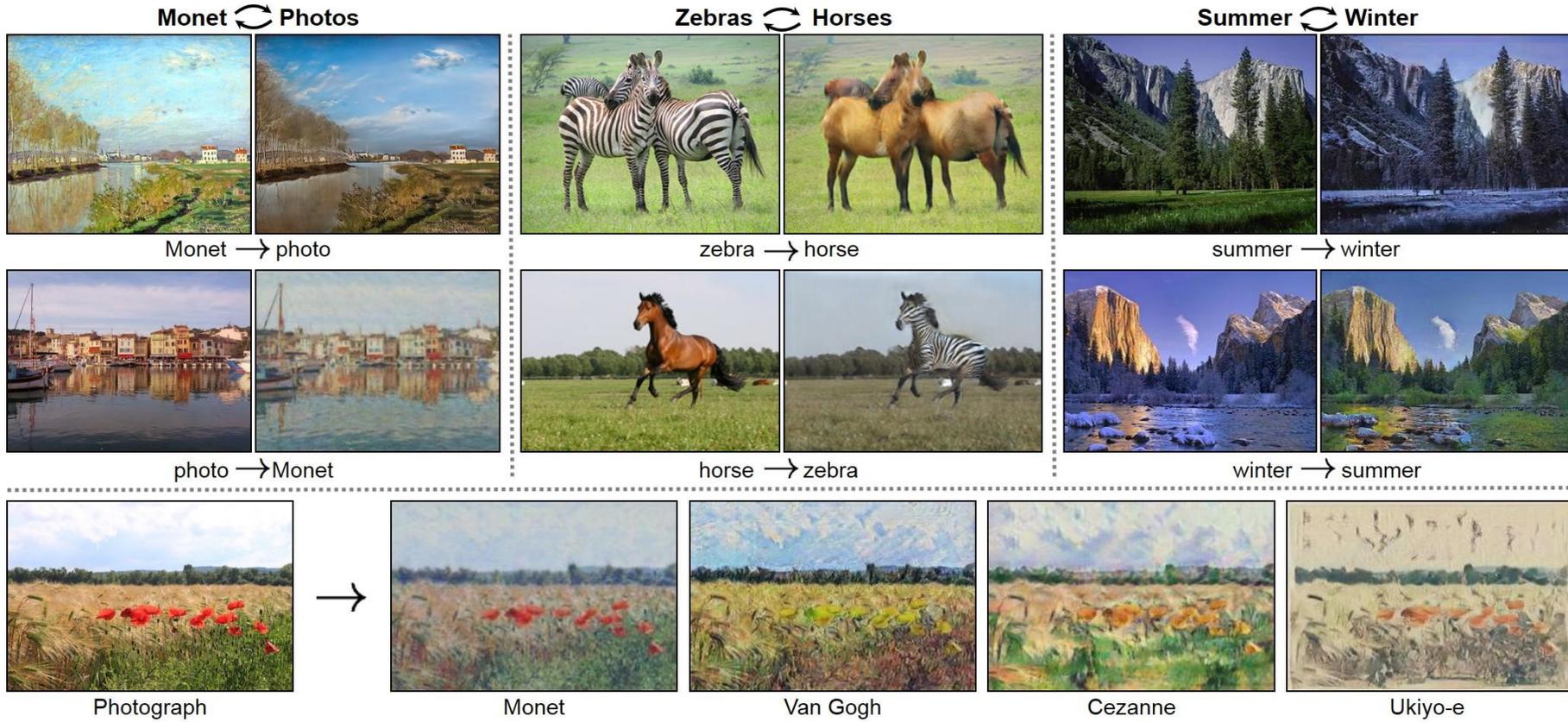
图像重建

180 $\times$  $N$ 个信息



◆ 图像今天，几乎不存在与数字图像处理无关的技术领域





# 中国“天网”系统



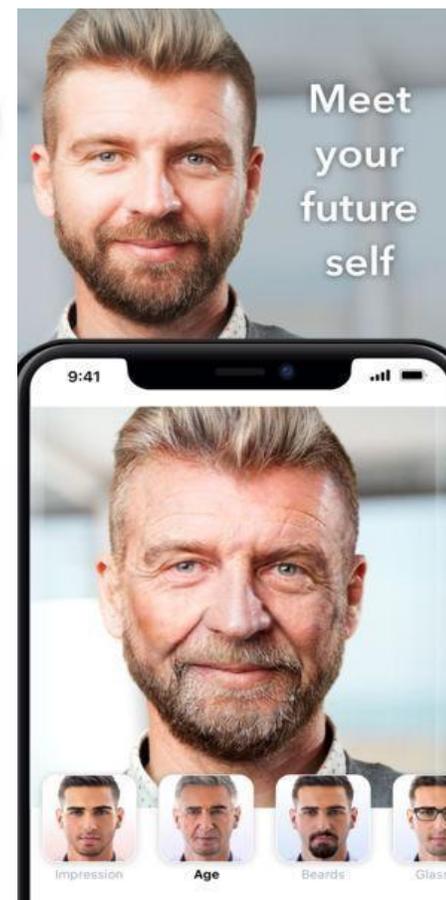


## ZAO - 逢脸造戏

仅需一张照片，出演天下好戏

★★★★☆ 410

获取



Source Actor



Real-time Reenactment



Target Actor



Reenactment Result



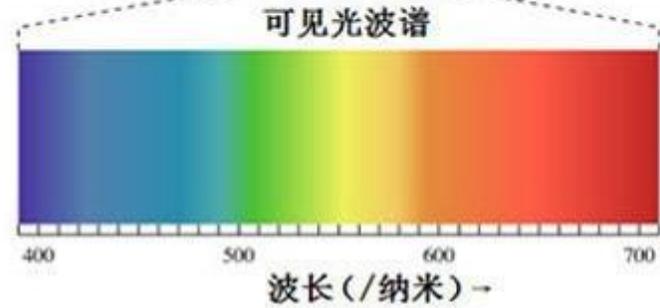
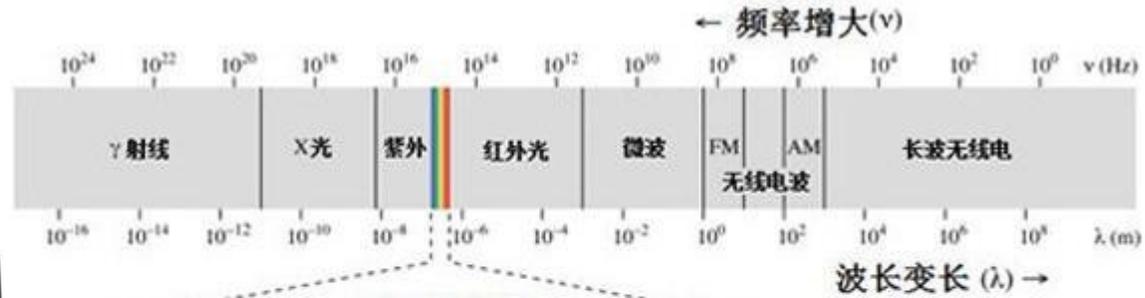
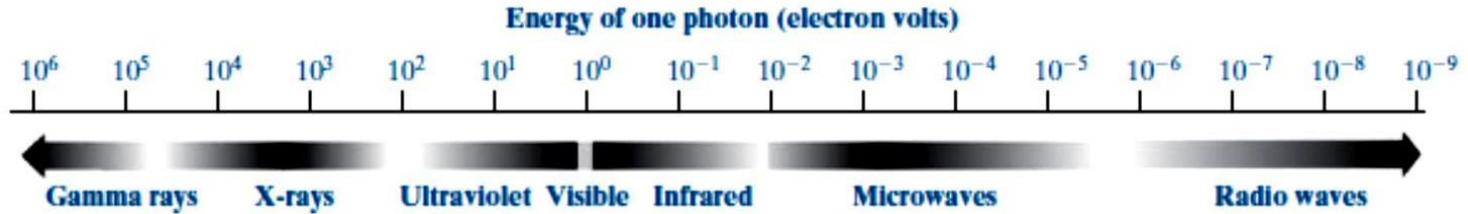


# 第1章 绪论

---

1. 什么是数字图像处理
  2. 数字图像处理的起源
  3. **数字图像处理应用领域**
  4. 数字图像处理的基本步骤
  5. 图像处理系统的组成
  6. 数字图像处理应用举例
-

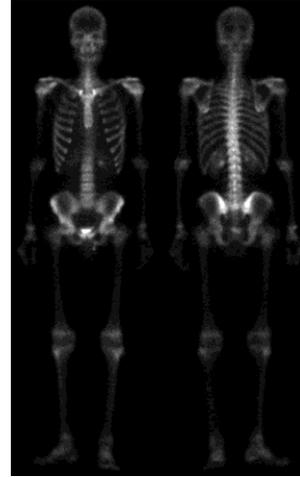
# 1.3 数字图像处理应用领域



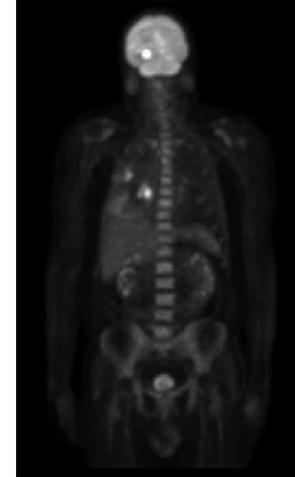
# 1.3 数字图像处理应用领域

## ◆ 伽马射线成像

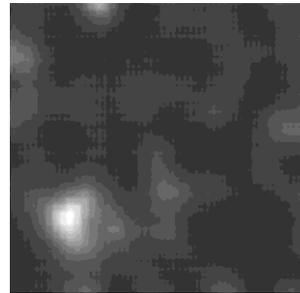
- (a) 骨骼扫描图像
- (b) PET图像
- (c) 天鹅星座环图像
- (d) 来自反应堆真空管的伽马辐射 (亮点)



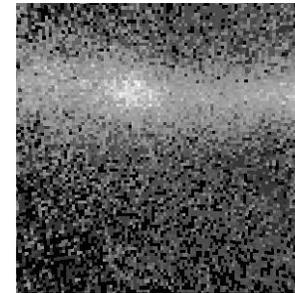
(a)



(b)



(c)



(d)

# 1.3 数字图像处理应用领域

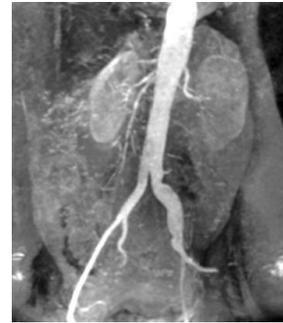
## ◆ X射线成像

(a) 胸部X射线图像



(a)

(b) 主动脉造影图像



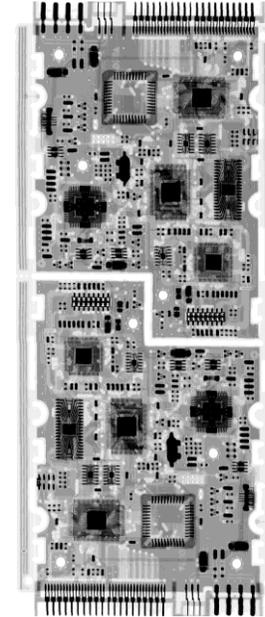
(b)

(c) 头部CT图像



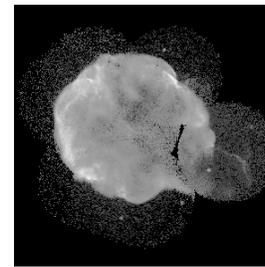
(c)

(d) 电路板图像



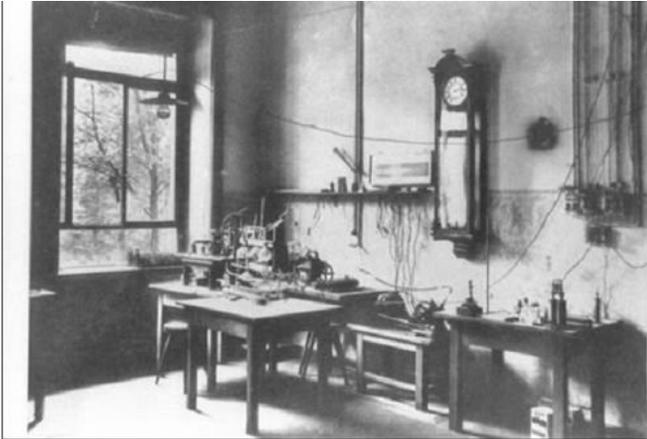
(d)

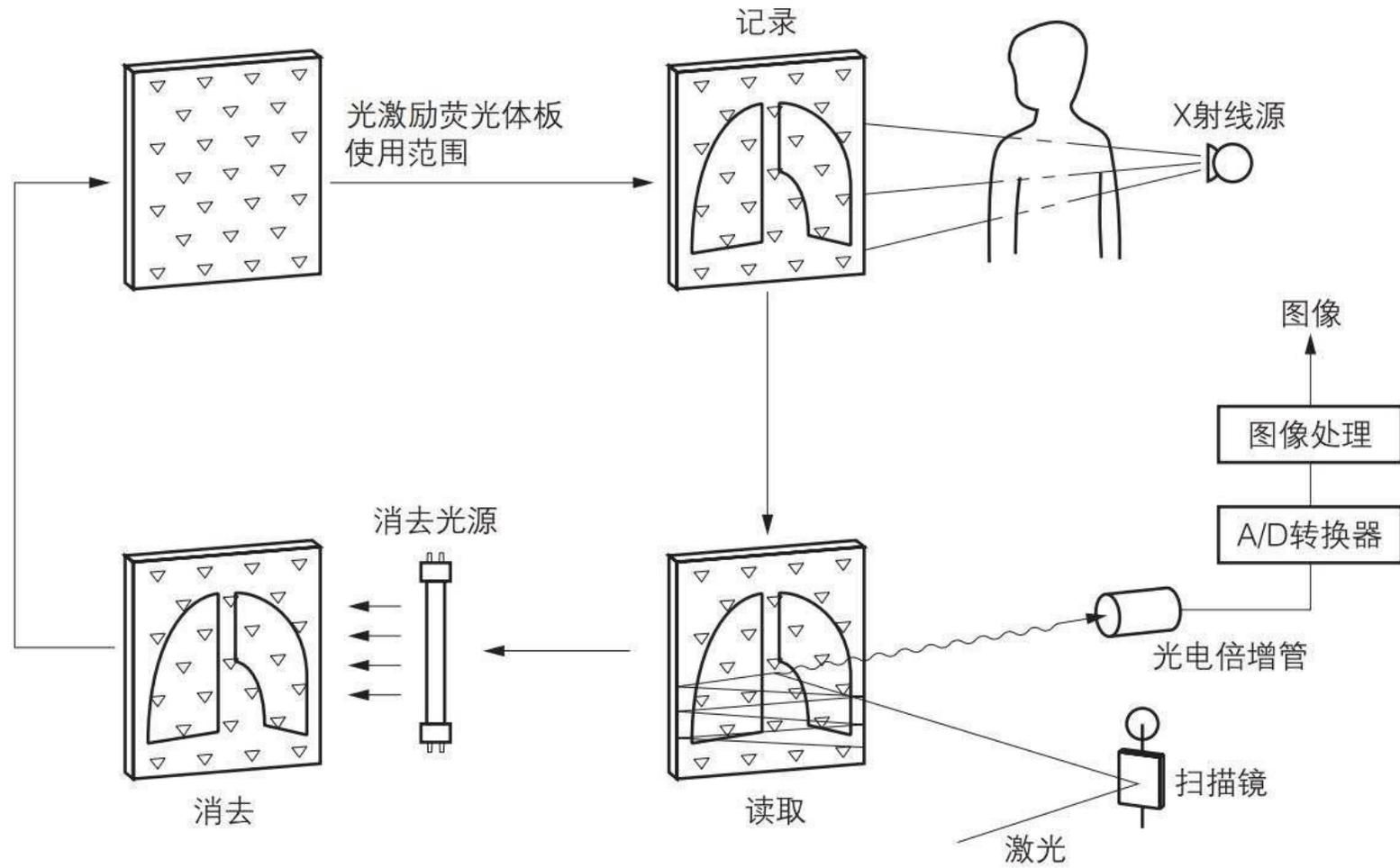
(e) 天鹅星座环图像



(e)

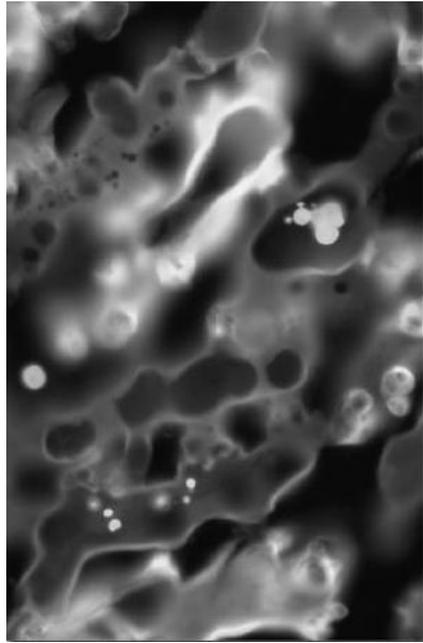
**X**射线是最早用于成像的电磁辐射源之一



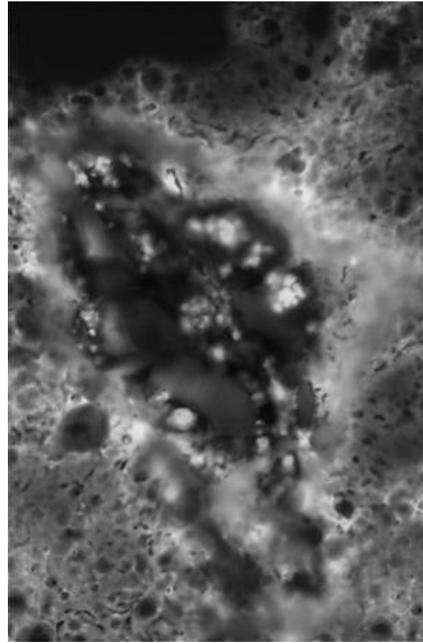


# 1.3 数字图像处理应用领域

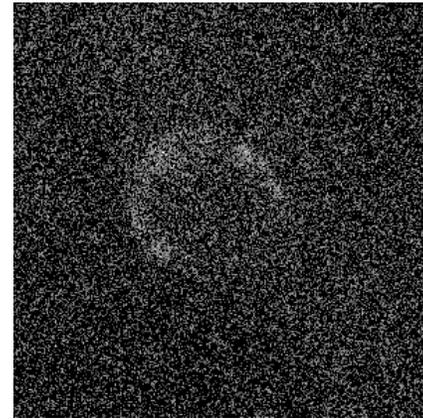
## ◆ 紫外波段成像



(a)

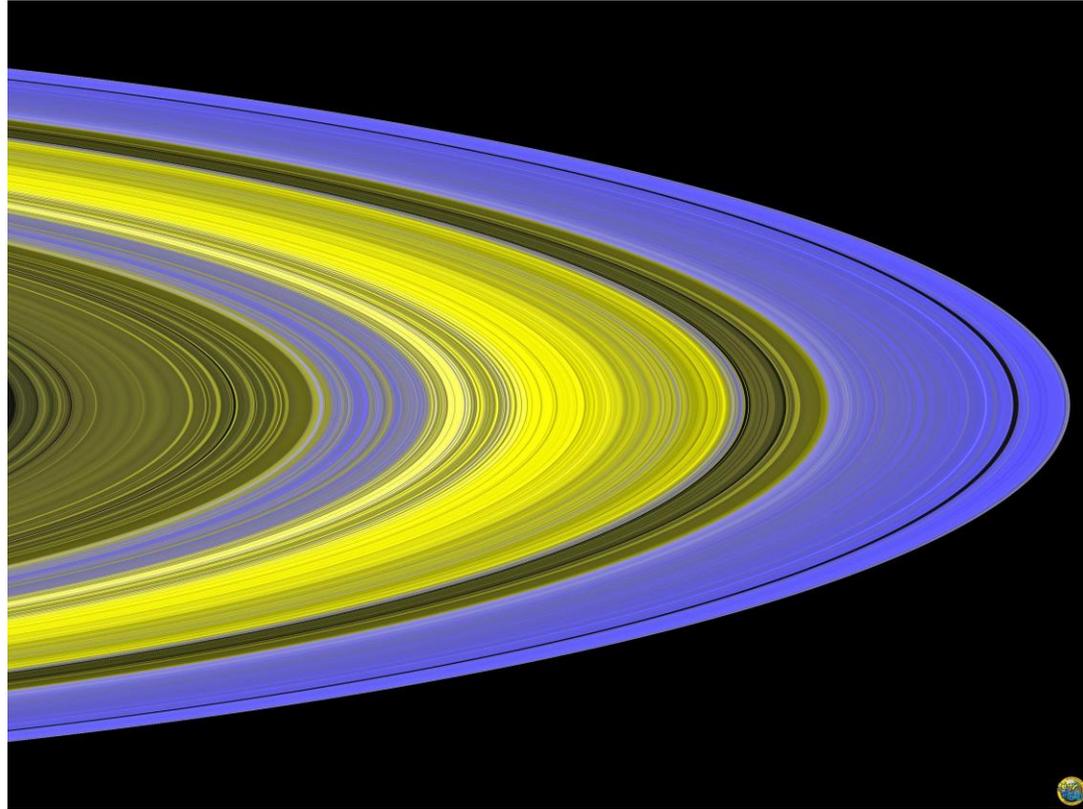


(b)



(c)

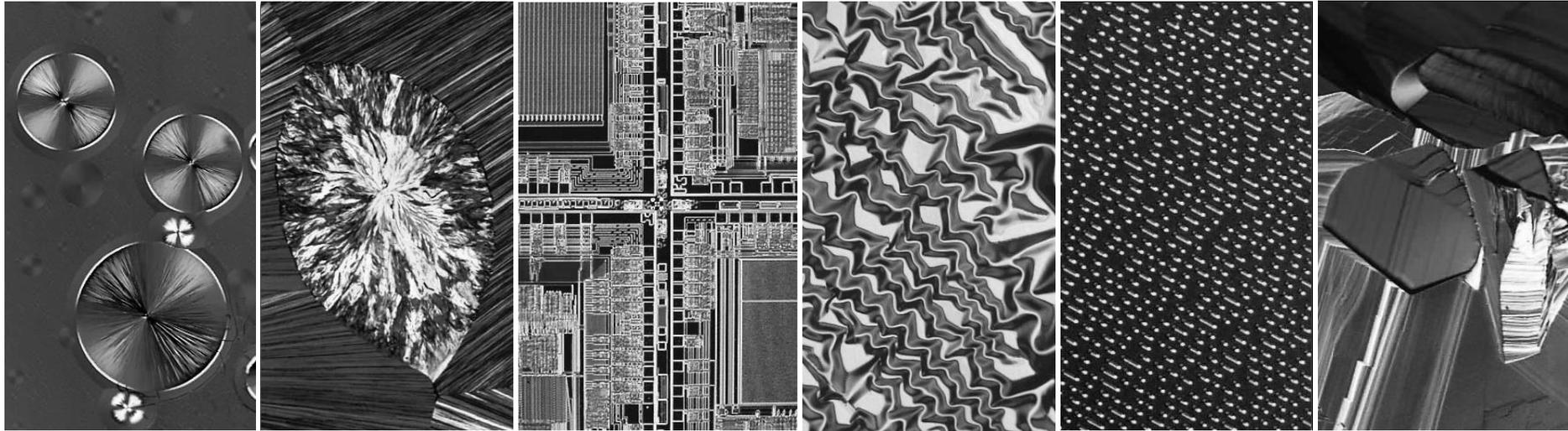
(a) 普通玉米图像；(b) 患黑穗病的玉米图像；(c) 天鹅星座环图像



卡西尼号紫外线成像光谱仪拍摄的土星光环

# 1.3 数字图像处理应用领域

## ◆ 可见光与红外波段成像-光显微镜图像

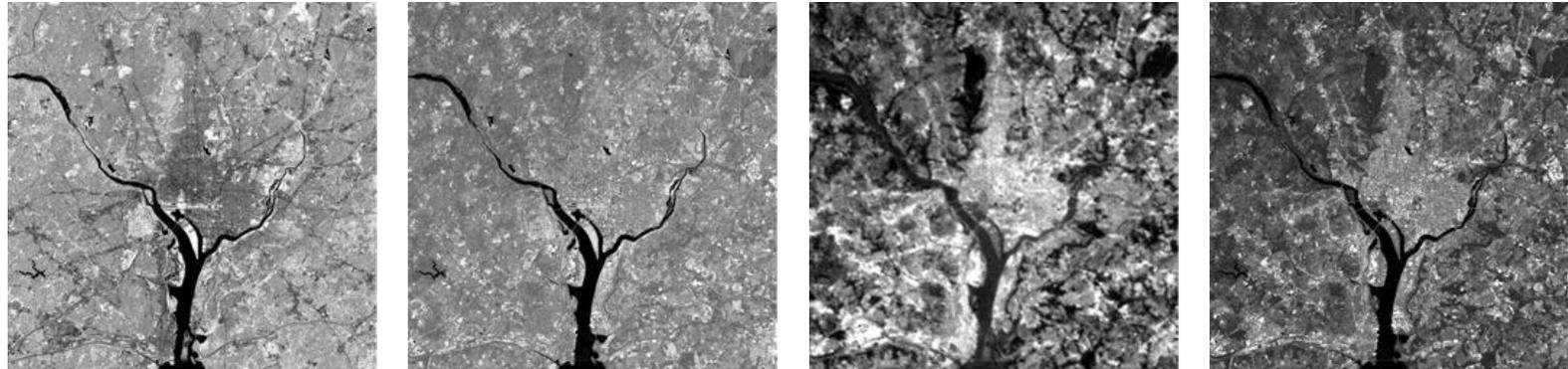


(a) (b) (c) (d) (e) (f)

(a)放大250倍的紫衫酚（抗癌剂）；(b)放大40倍的胆固醇；(c)已放大60倍微处理器；(d)已放大600倍的镍氧化物胶片；(e)已放大1750倍的音频CD表面；(f)已放大450倍的有机超导体

# 1.3 数字图像处理应用领域

## ◆ 可见光与红外波段成像-多光谱遥感图像分析



# 1.3 数字图像处理应用领域

## ◆ 可见光与红外波段成像-多光谱遥感图像分析

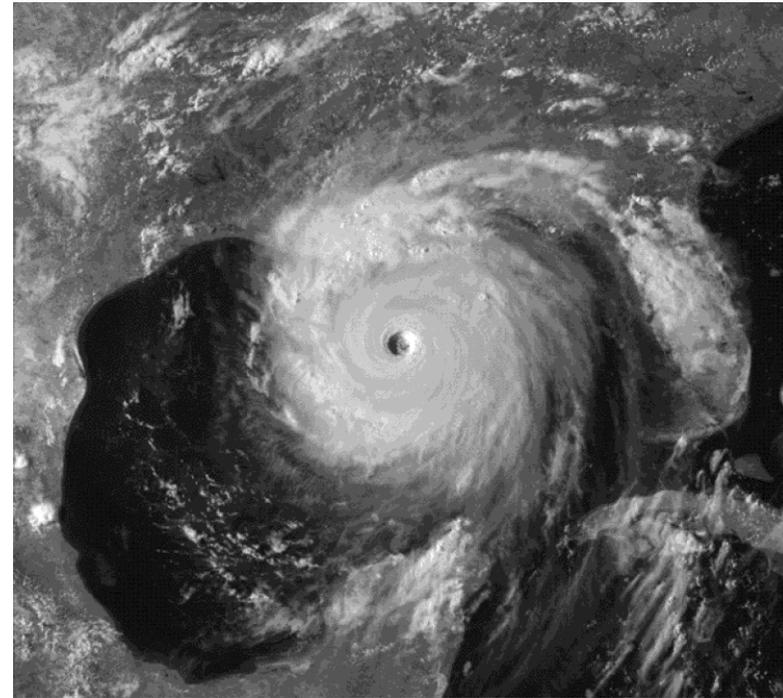
表 1.1 NASA 的 LANDSAT 卫星的主要波段

波段号	名称	波长( $\mu\text{m}$ )	特征和用途
1	可见蓝光	0.45~0.52	对水体有最大的穿透性
2	可见绿光	0.52~0.60	适用于度量植物活力
3	可见红光	0.63~0.69	植被辨别
4	近红外光	0.76~0.90	生物团和海岸线测绘
5	中红外光	1.55~1.75	土壤和植被含水量
6	热红外光	10.4~12.5	土壤温度, 热量测绘
7	中红外光	2.08~2.35	矿物测绘

## 1.3 数字图像处理应用领域

### ◆ 可见光与红外波段成像-天气观测与预报

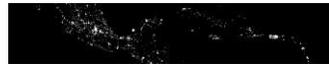
(a)2005年8月29日拍摄的“卡特琳娜”飓风的卫星图像



(a)

# 1.3 数字图像处理应用领域

## ◆ 可见光与红外波段成像-红外成像系统

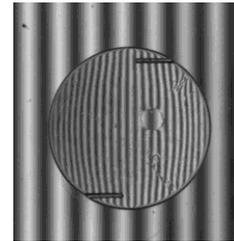
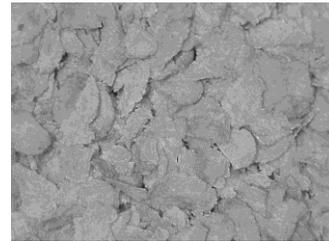
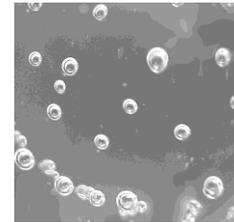
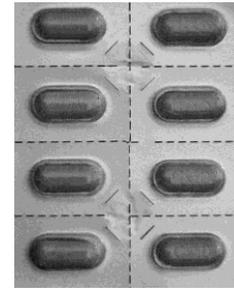
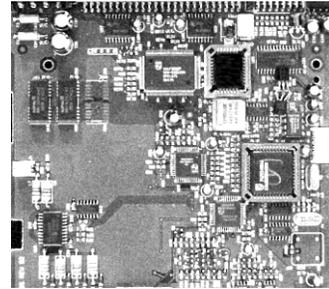


左：美洲红外卫星图像  
右：实际地形参考图像

# 1.3 数字图像处理应用领域

## ◆ 可见光与红外波段成像-工业检测

可见光谱中一个  
主要成像领域是  
生产产品的自动  
视觉检测



# 1.3 数字图像处理应用领域

## ◆ 可见光与红外波段成像-其他例子

(a)



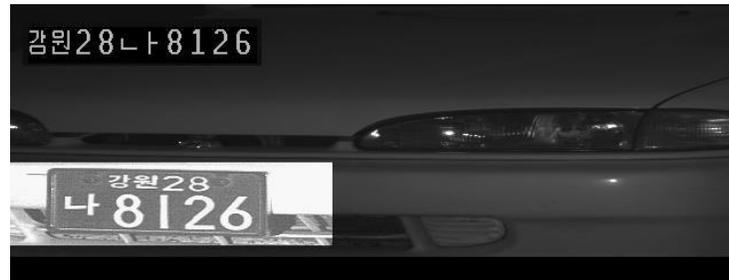
(a) 拇指指纹图像

(b)



(b) 纸币图像

(c) ~ (d) 车牌图像识别



(c)



(d)

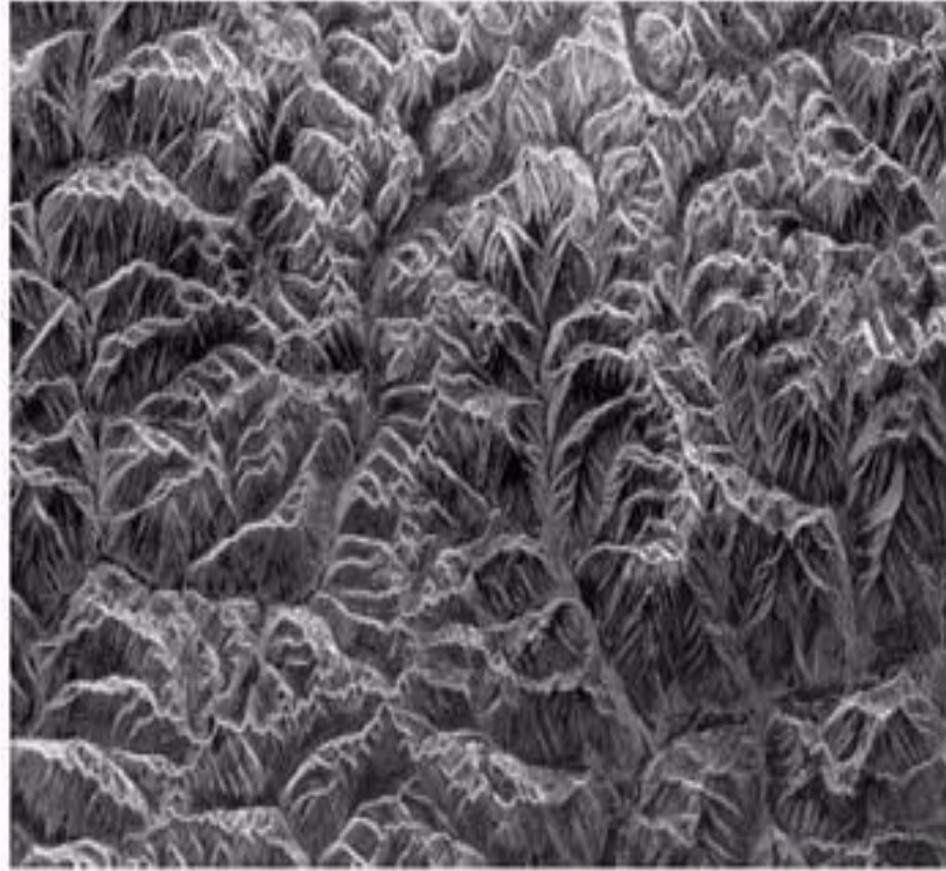
◆ 可见光与红外波段成像-其他例子



# 1.3 数字图像处理应用领域

## ◆ 微波波段成像

航天器拍摄的  
西藏东南山区  
雷达图像



# 1.3 数字图像处理应用领域

## ◆ 无线电波段成像



(a)

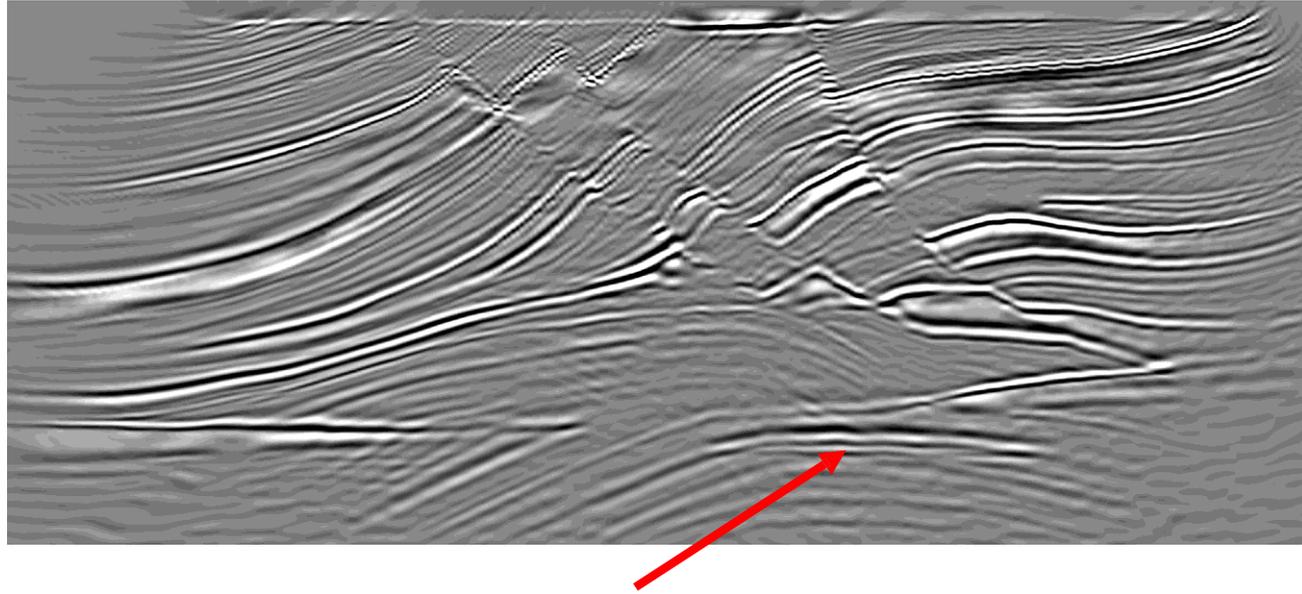


(b)

人的磁共振(MRI)图像：(a) 膝盖图像；(b) 脊椎图像

## 1.3 数字图像处理应用领域

### ◆ 使用其他成像方式的例子-低端声波成像



地震模型的剖面图像。箭头指向碳氢化合物（油或气）的油气阱

# 1.3 数字图像处理应用领域

## ◆ 使用其他成像方式的例子-超声成像

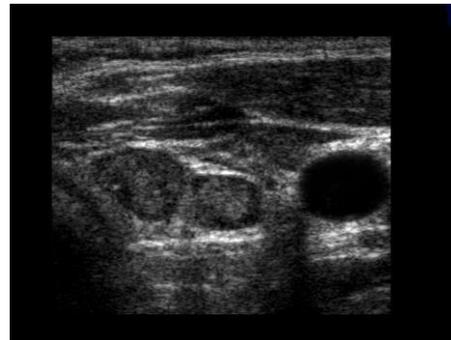
(a) 胎儿图像



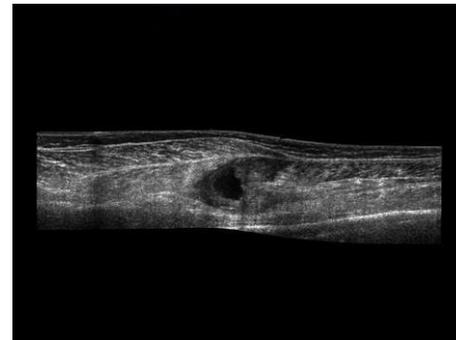
(b) 胎儿的另一幅图像



(c) 甲状腺图像



(d) 有损伤的肌肉层图像



(c)

(d)

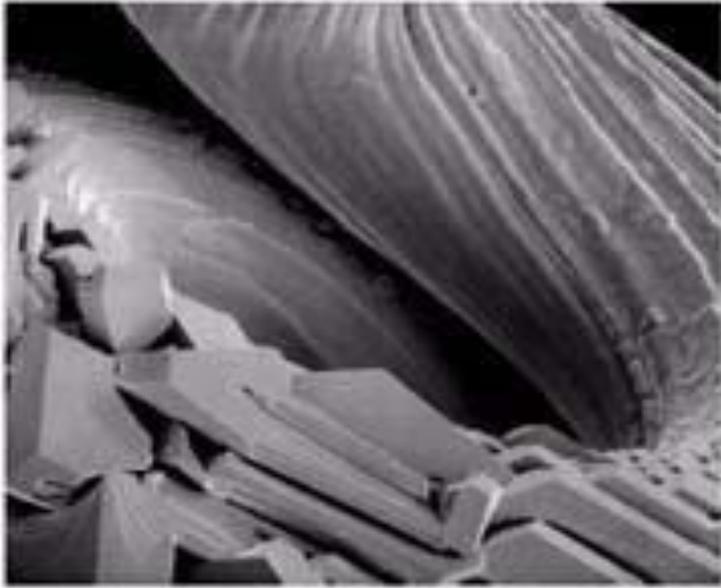
# 1.3 数字图像处理应用领域

## ◆ 使用其他成像方式的例子-超声成像

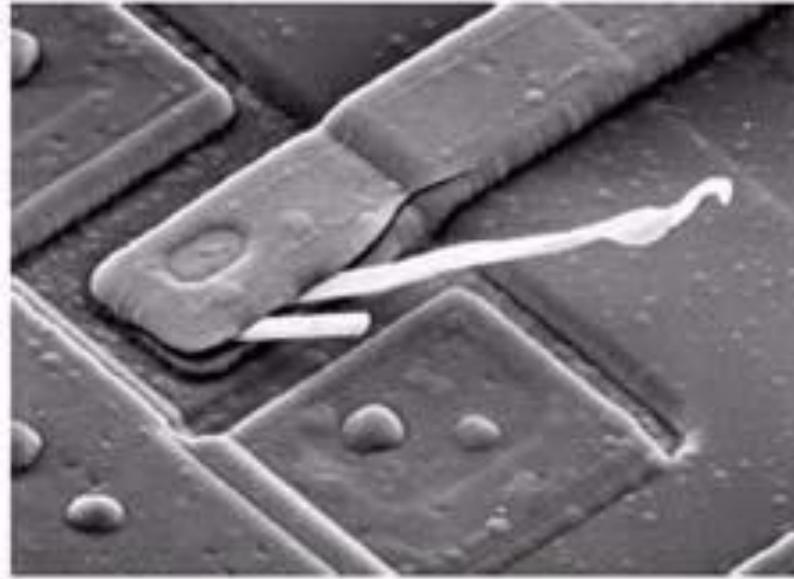


## 1.3 数字图像处理应用领域

### ◆ 使用其他成像方式的例子-电子显微镜成像



(a) 过热损坏的钨丝 (250倍)

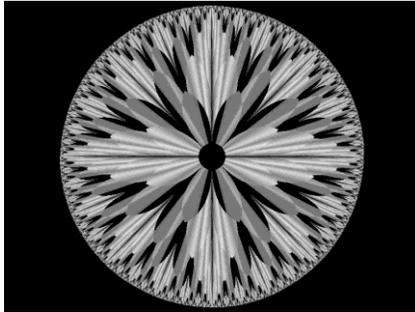


(b) 损坏的IC电路 (2500倍)

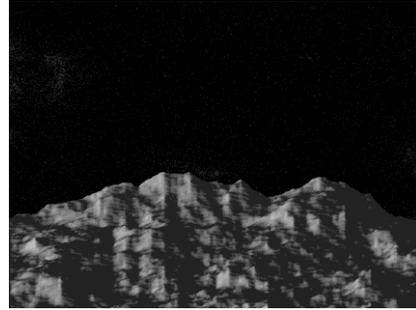
扫描式电子显微镜图像(SEM)

# 1.3 数字图像处理应用领域

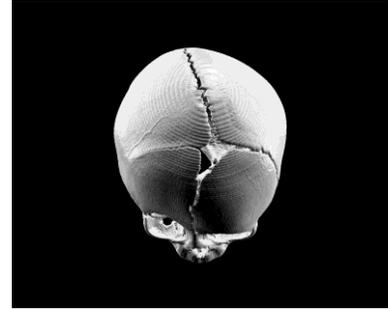
## ◆ 计算机生成的图像



(a)



(b)



(c)

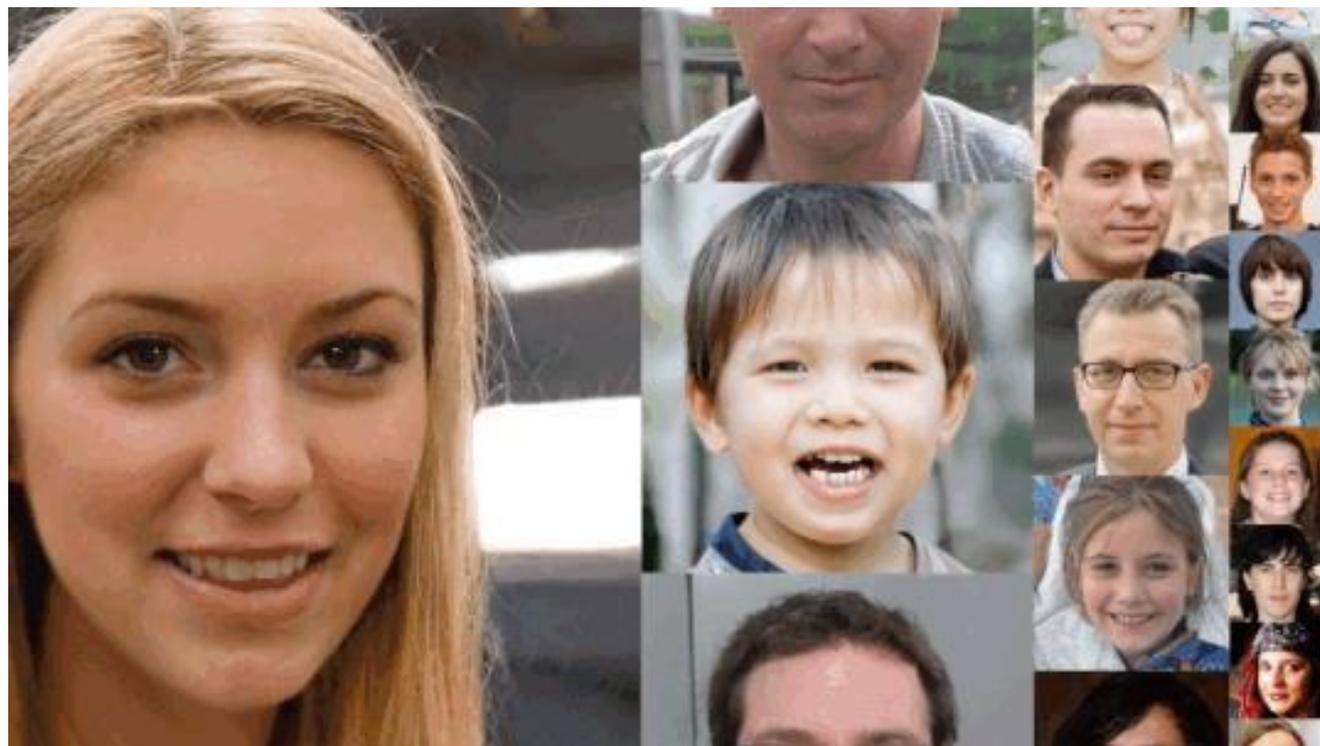


(d)

(a) ~ (b) 分形图像; (c) ~ (d) 所示物体的三维计算机模型生成的图像

## 1.3 数字图像处理应用领域

### ◆ 计算机生成的图像-基于生成对抗网络(GAN)



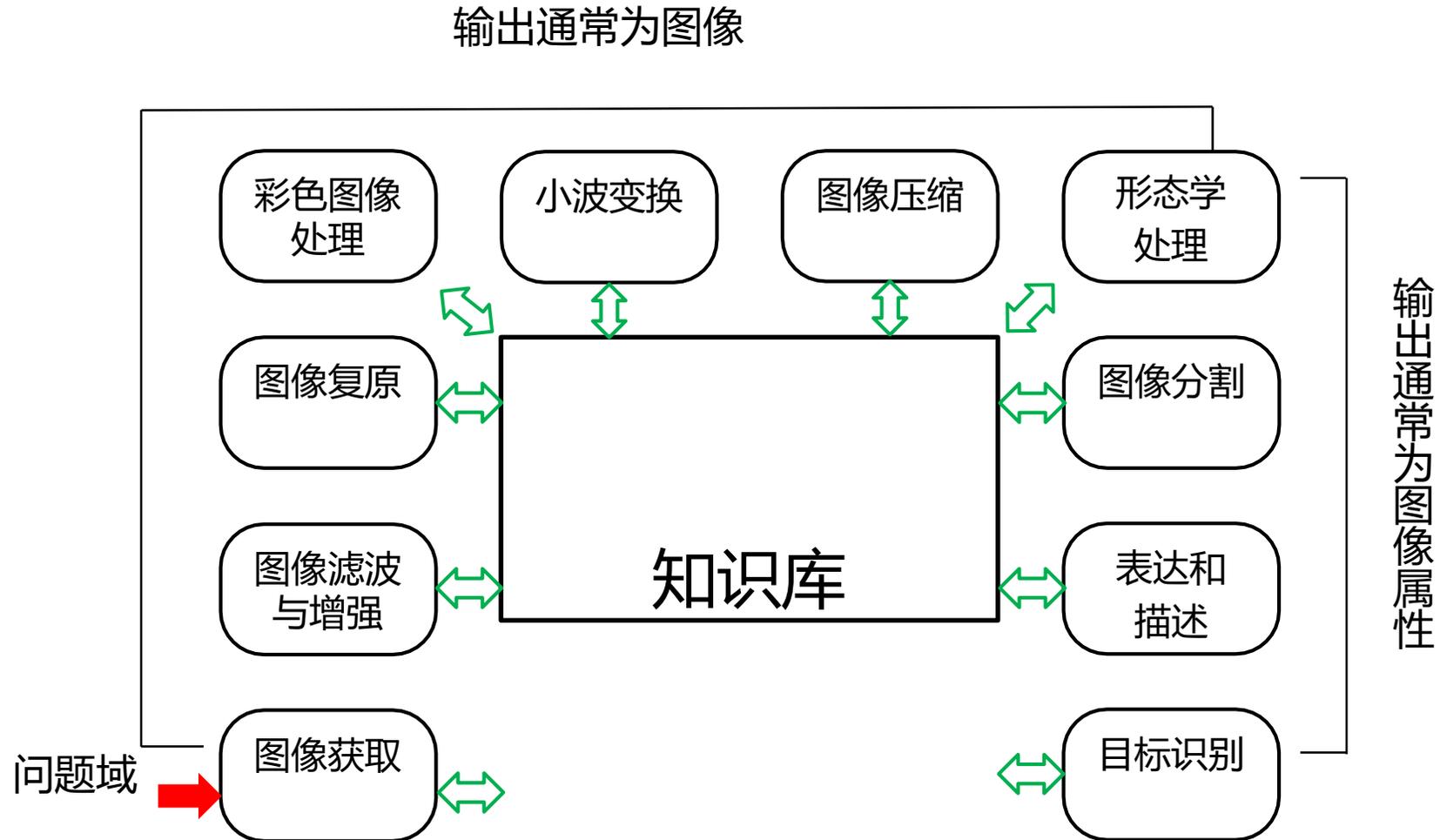


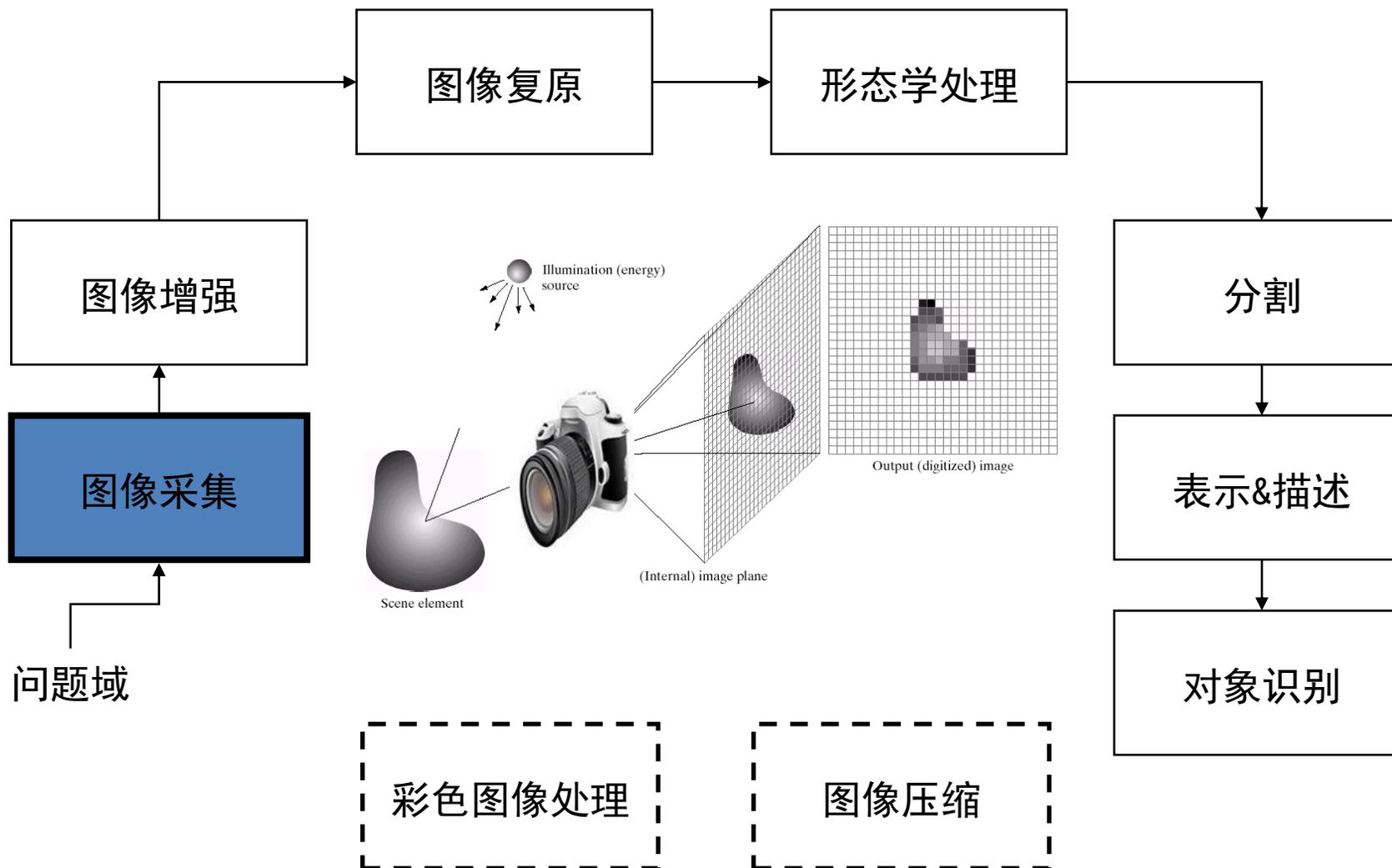
# 第1章 绪论

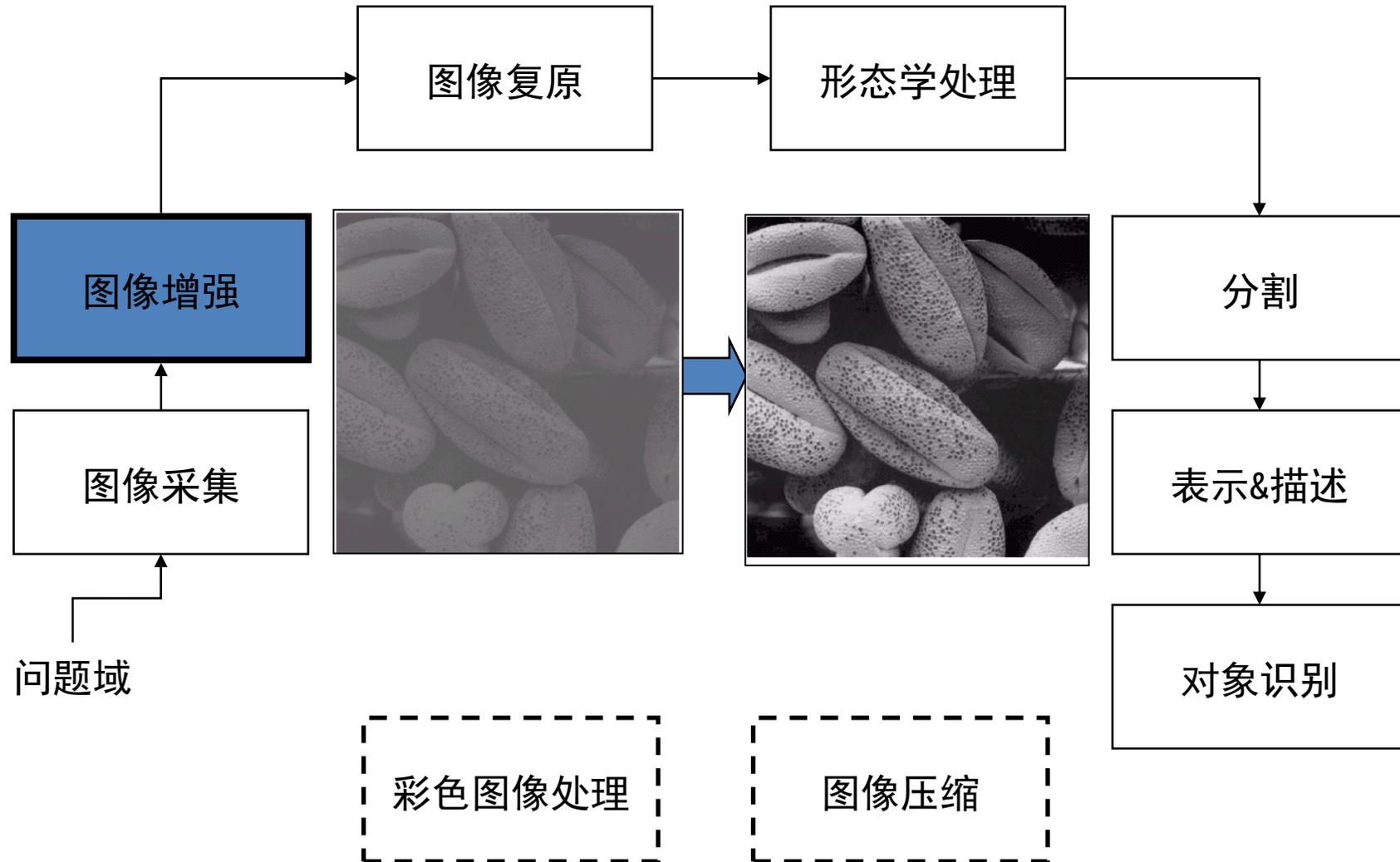
---

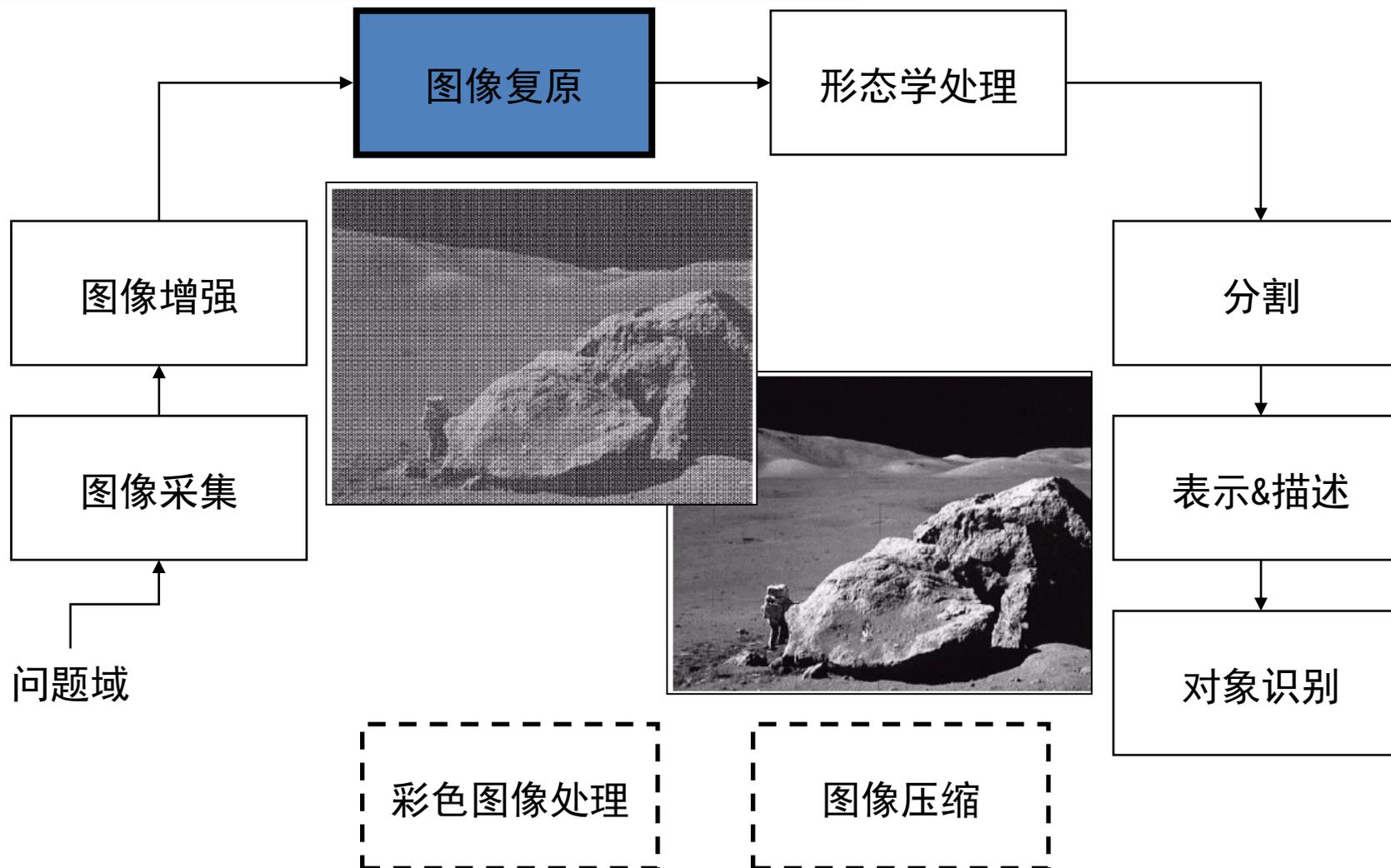
1. 什么是数字图像处理
  2. 数字图像处理的起源
  3. 数字图像处理应用领域
  4. 数字图像处理的基本步骤
  5. 图像处理系统的组成
  6. 数字图像处理应用举例
-

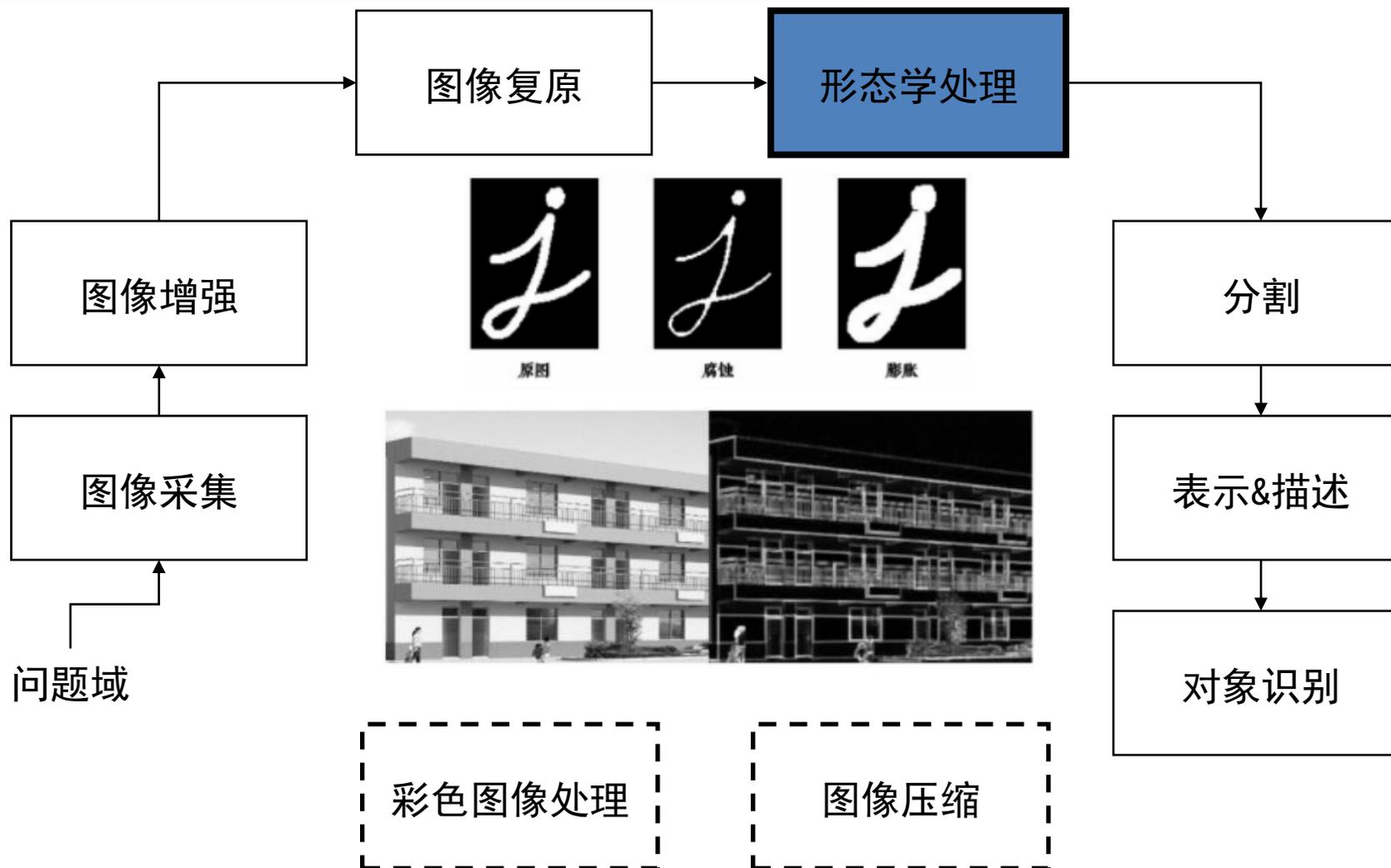
# 1.4 数字图像处理的基本步骤





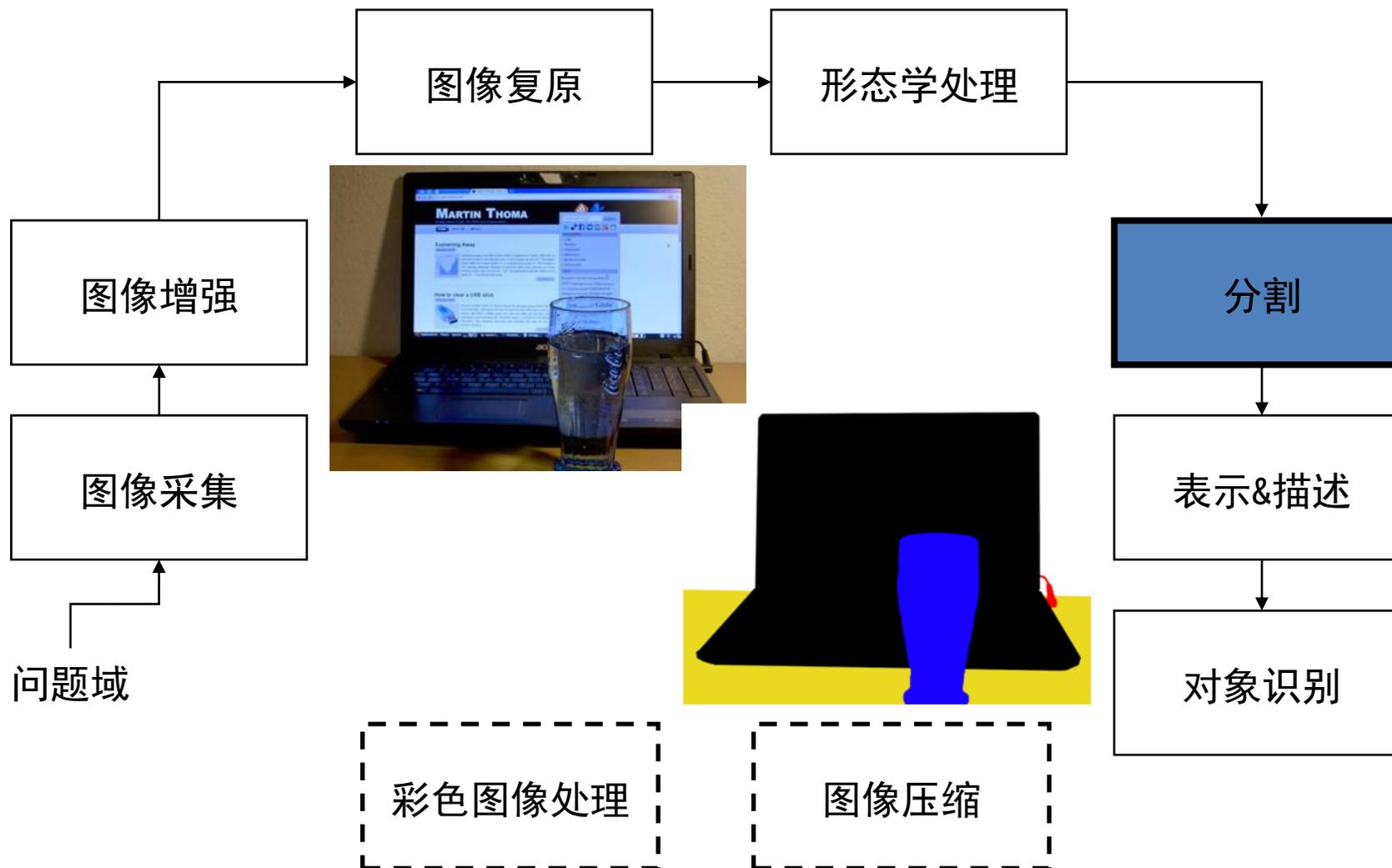


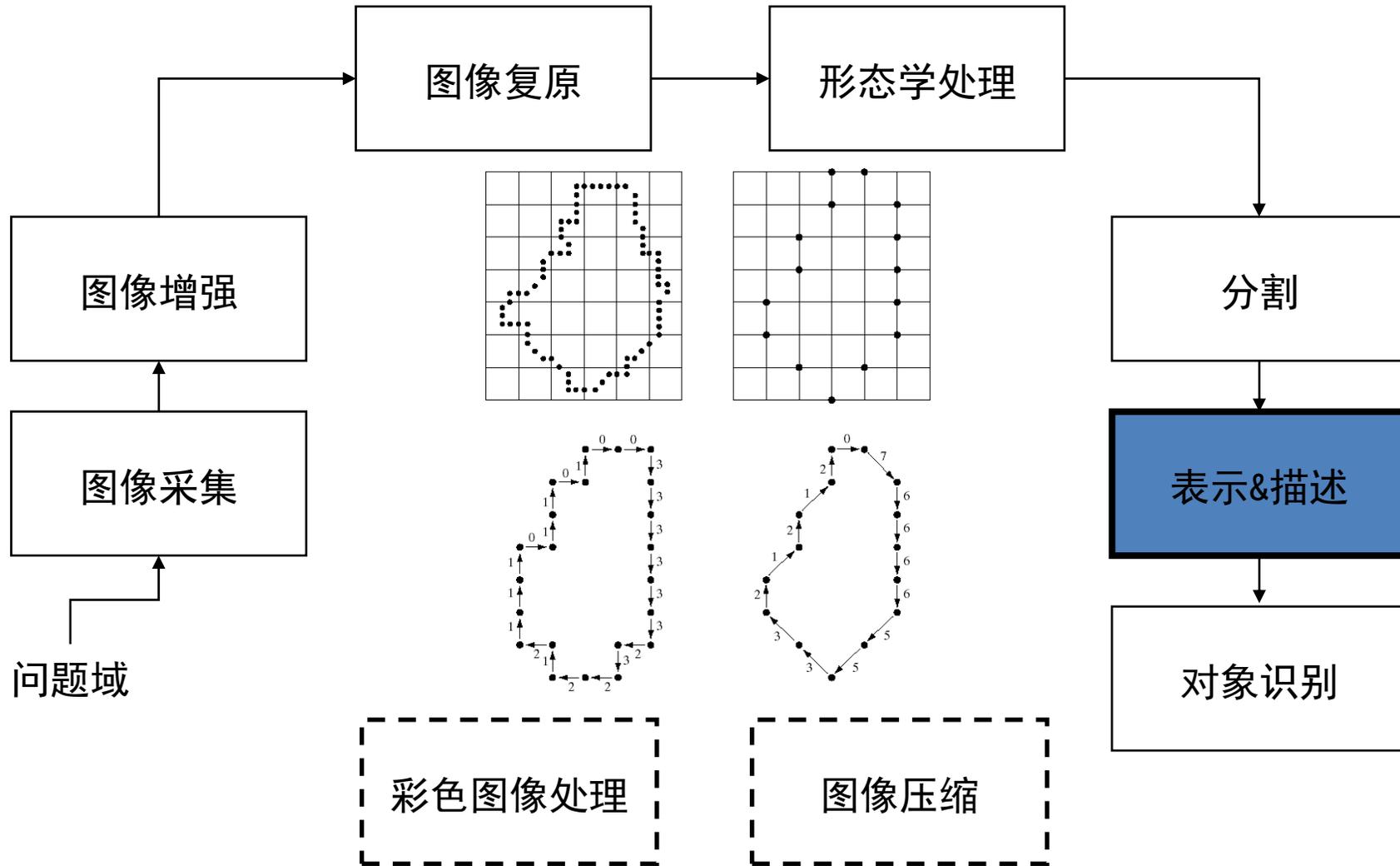


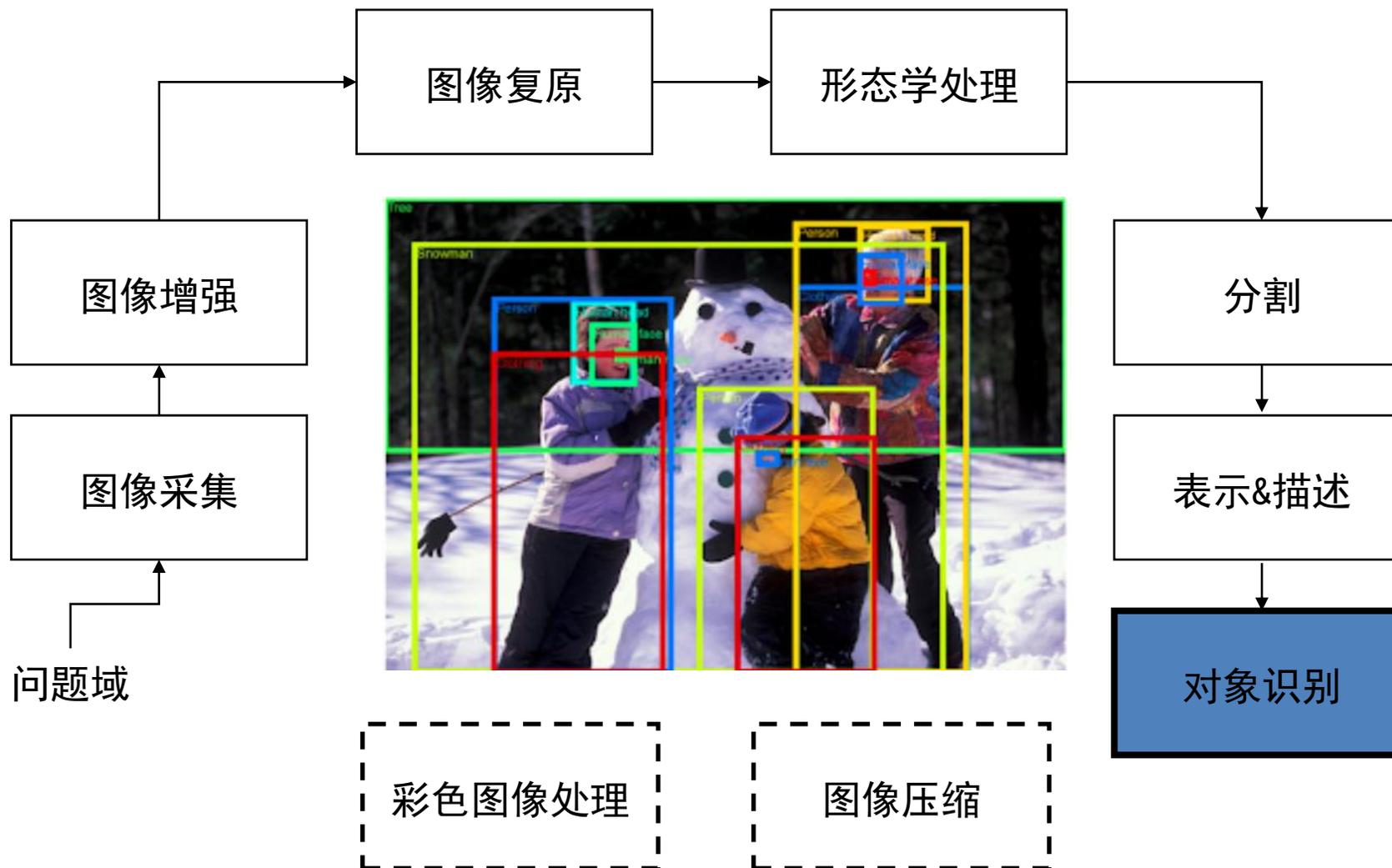


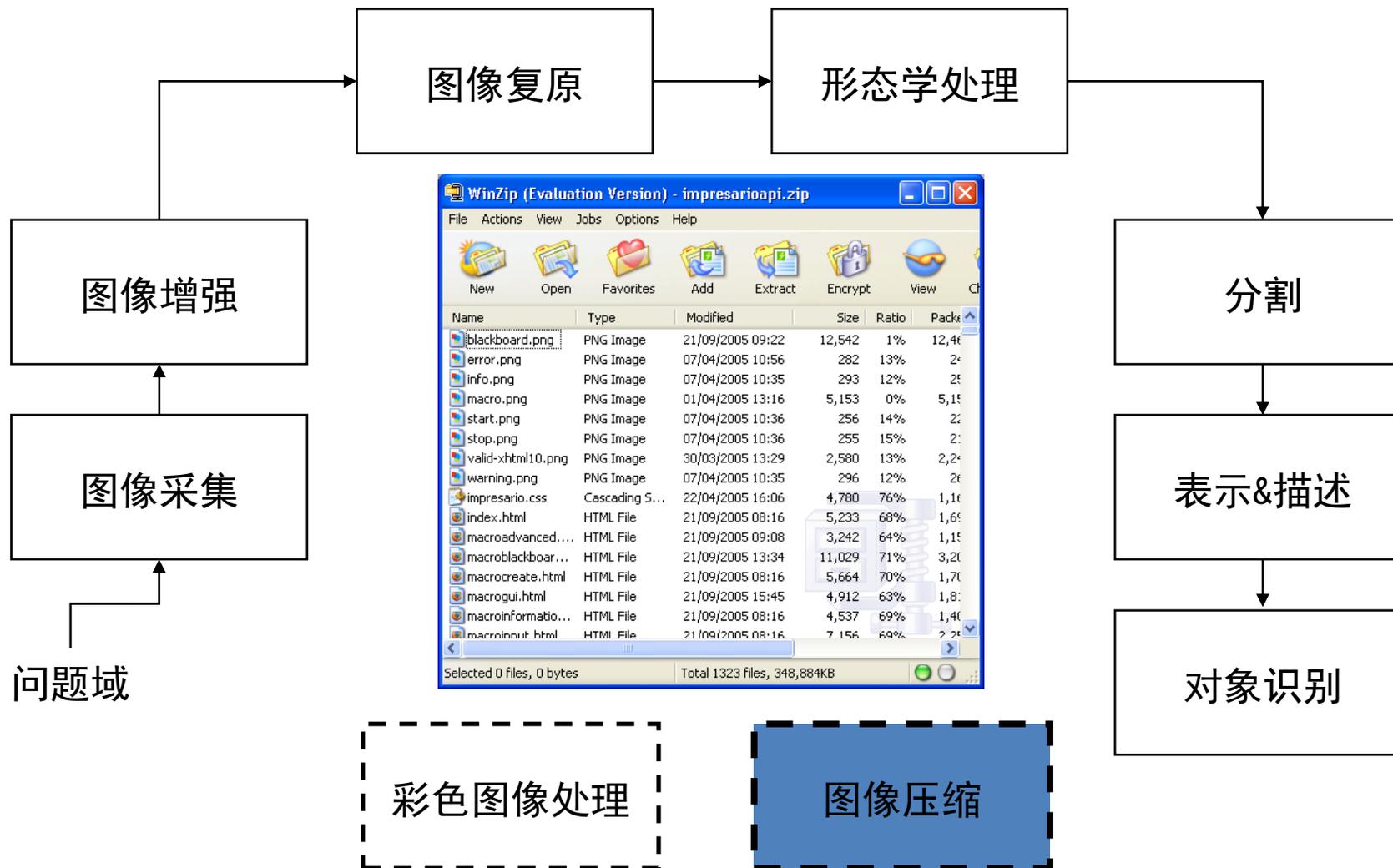
彩色图像处理

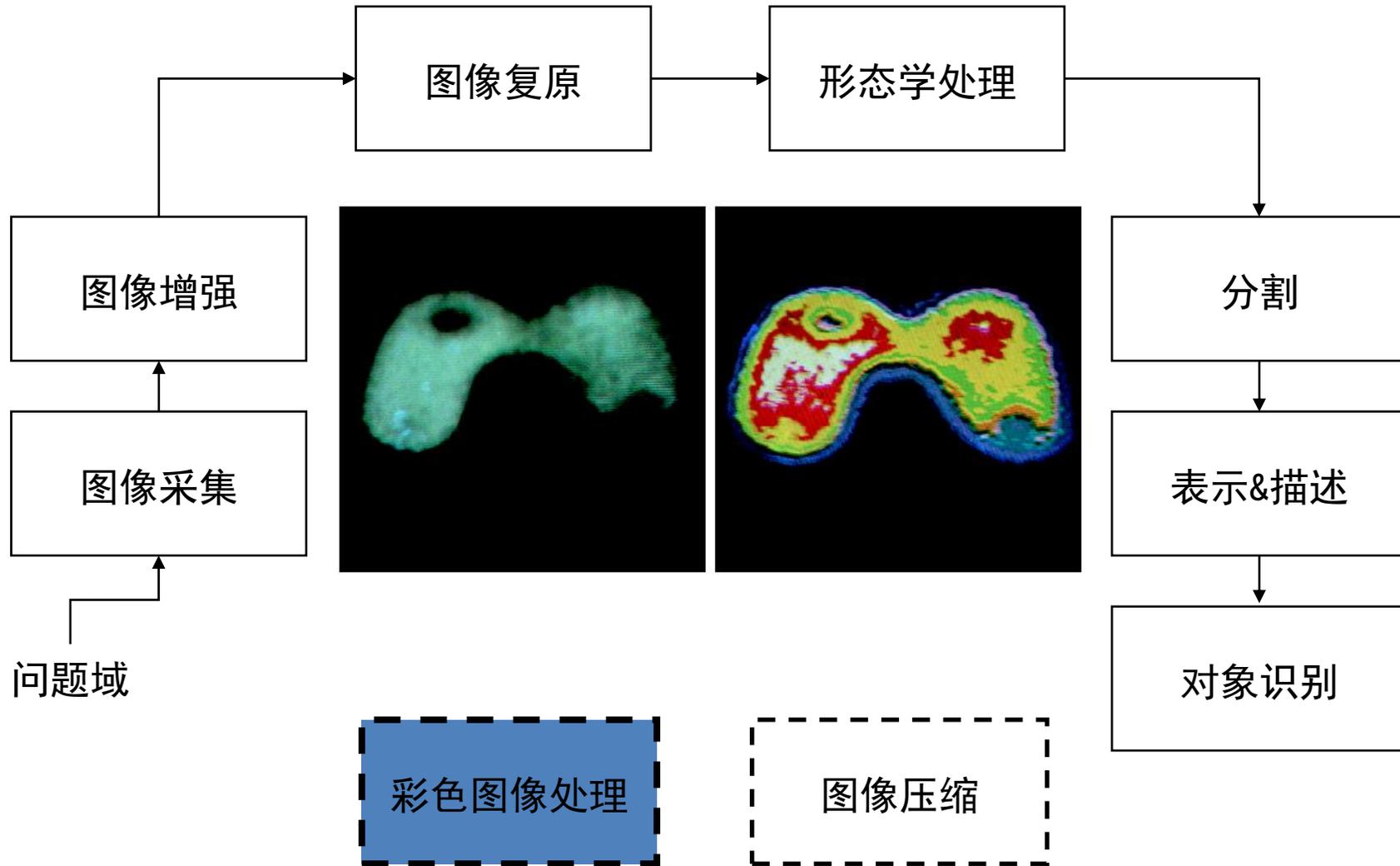
图像压缩



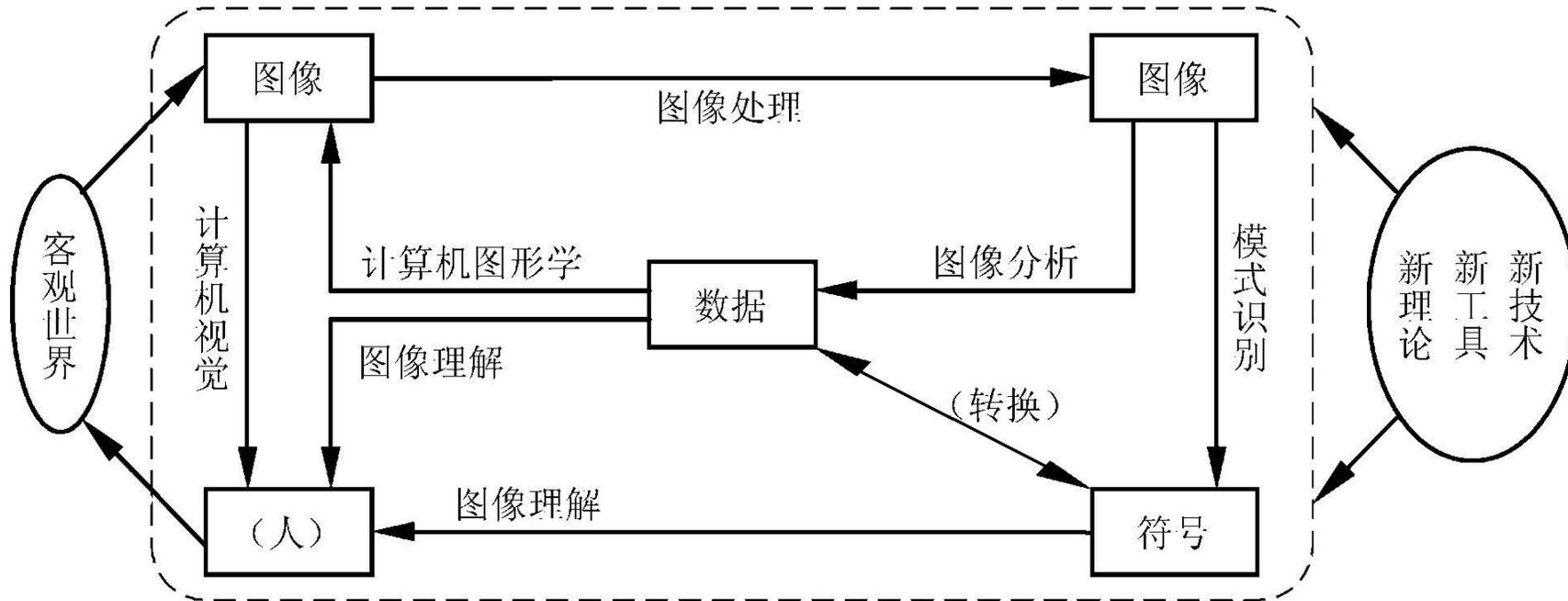








- 与计算机图形学、模式识别、计算机视觉等学科密切相关



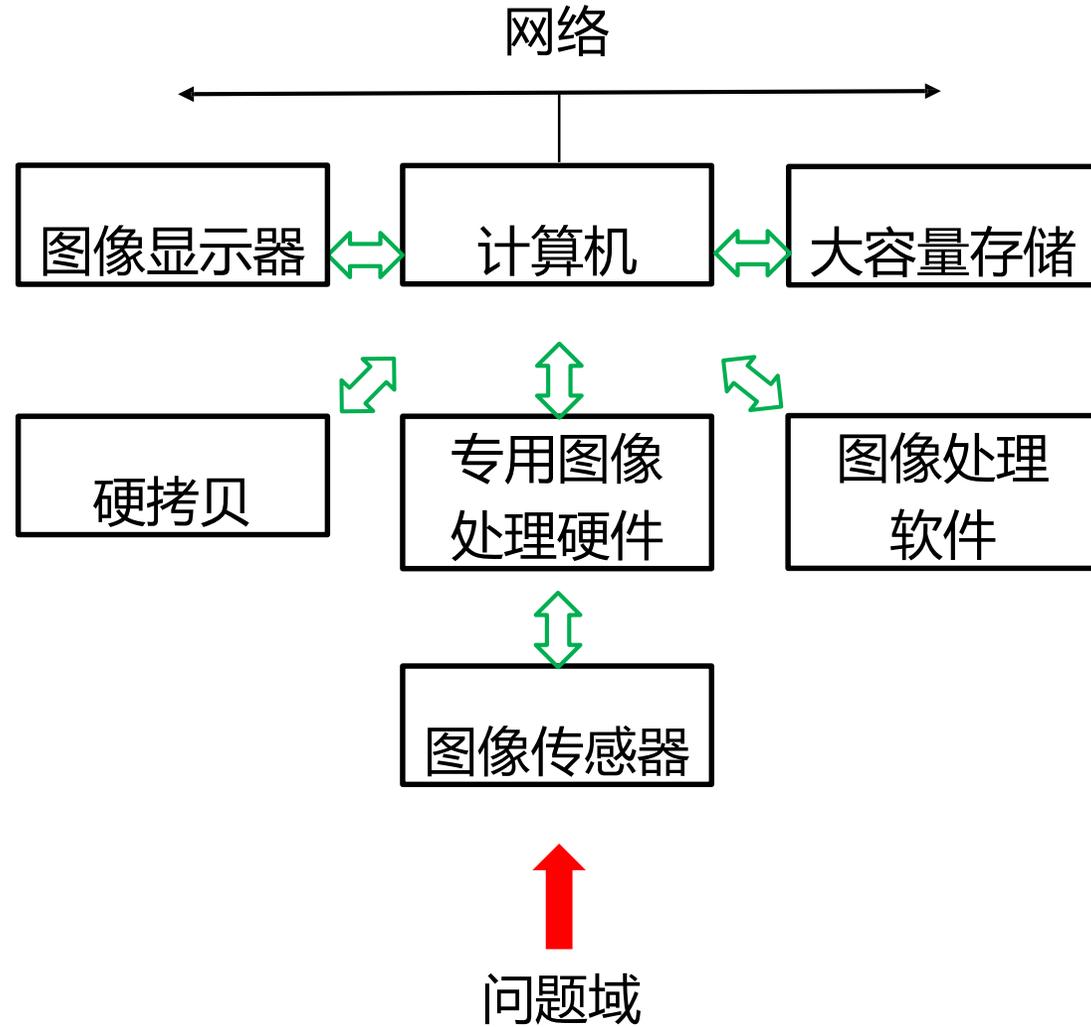


# 第1章 绪论

---

1. 什么是数字图像处理
  2. 数字图像处理的起源
  3. 数字图像处理应用领域
  4. 数字图像处理的基本步骤
  5. 图像处理系统的组成
  6. 数字图像处理应用举例
-

# 1.5 图像处理系统的组成





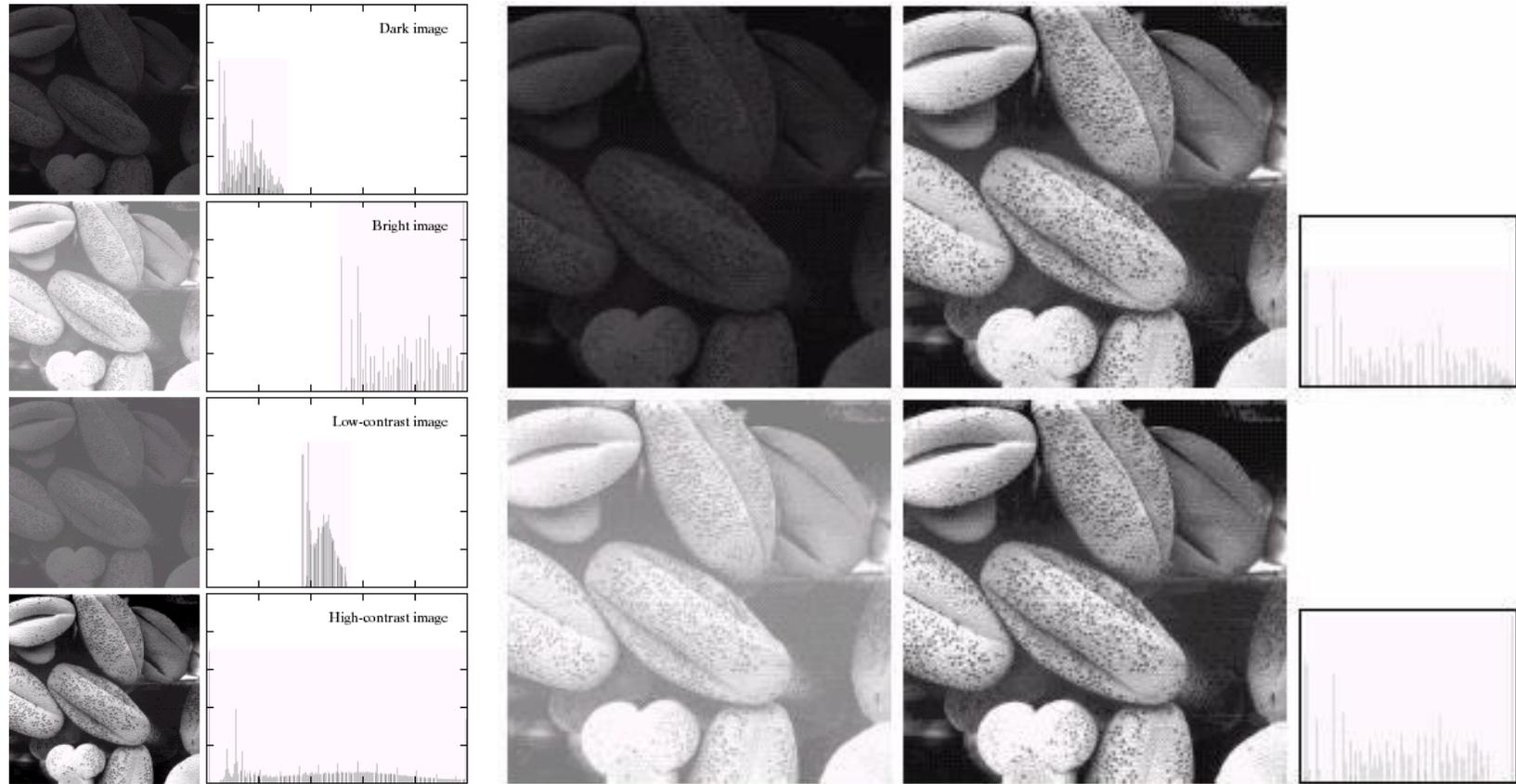
# 第1章 绪论

---

1. 什么是数字图像处理
  2. 数字图像处理的起源
  3. 数字图像处理应用领域
  4. 数字图像处理的基本步骤
  5. 图像处理系统的组成
  6. 数字图像处理应用举例
-

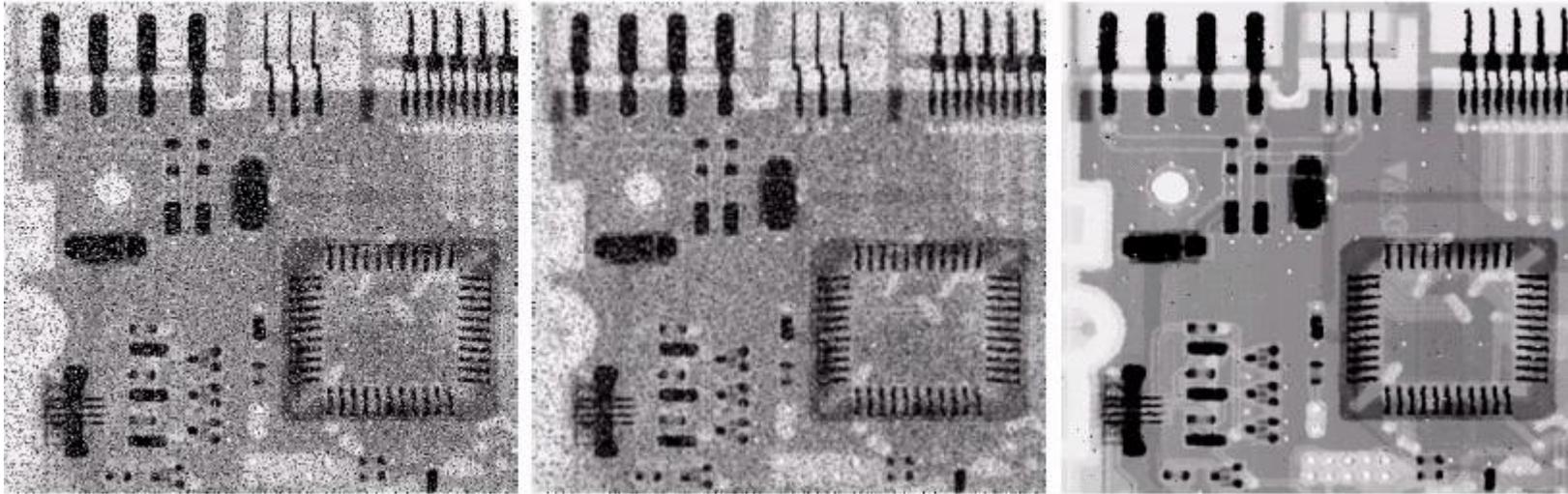
# 1.6 数字图像处理应用举例

## ➤ 直方图均衡



# 1.6 数字图像处理应用举例

## ➤ 空域滤波



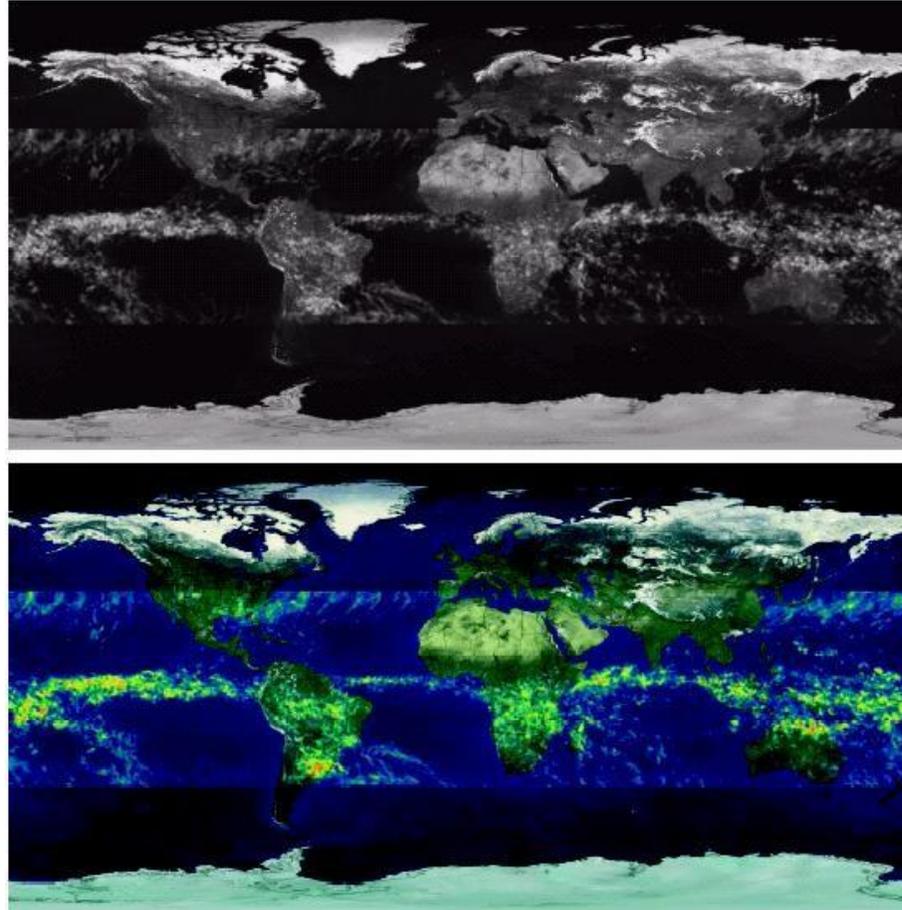
(a) 椒盐噪声图像

(b) 均值滤波

(c) 中值滤波

# 1.6 数字图像处理应用举例

## ▶ 伪彩色变换



# 1.6 数字图像处理应用举例

## ▶ 颜色迁移 (Color Transfer)



(a) 目标图像



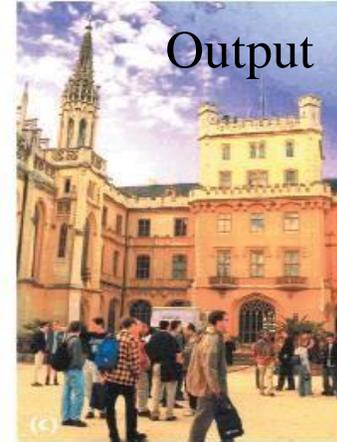
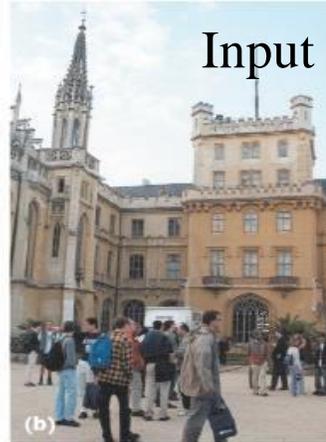
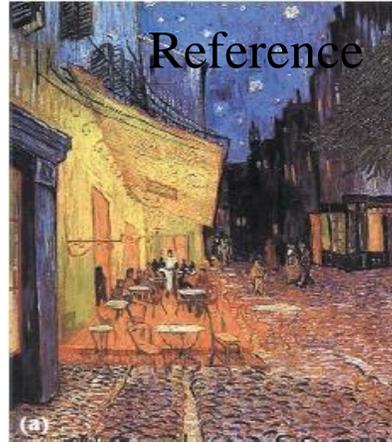
(b) 参考图像



(c) 迁移结果

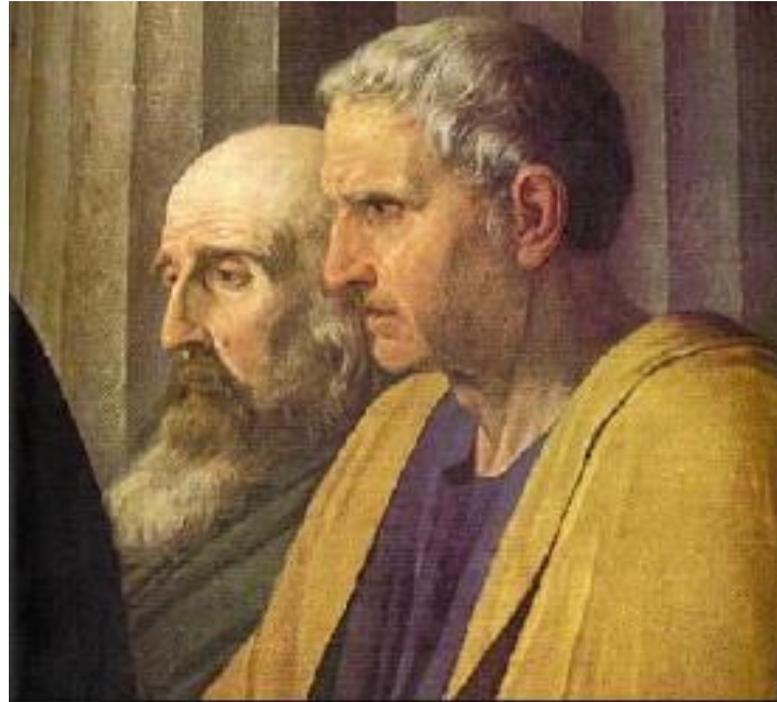
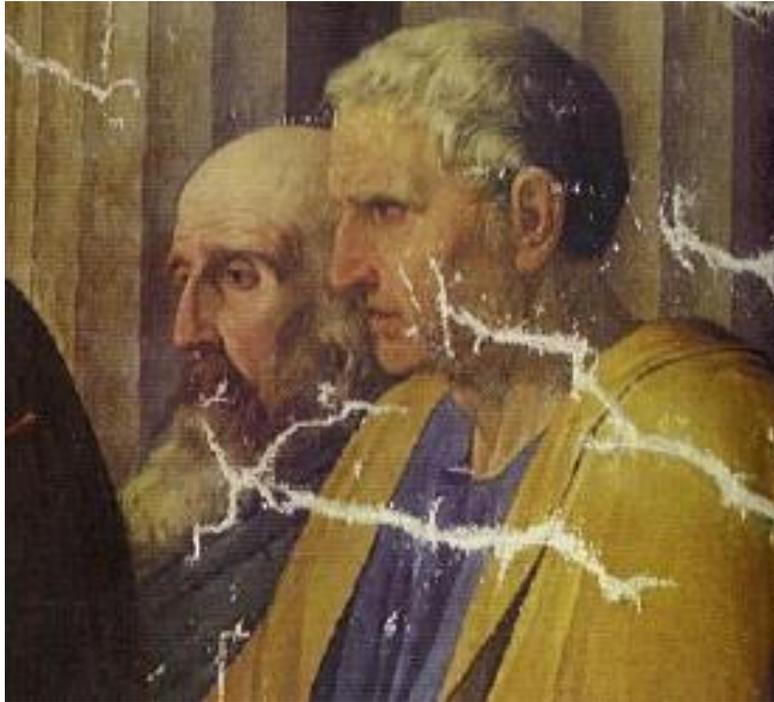
# 1.6 数字图像处理应用举例

## ➤ 颜色迁移 (Color Transfer)



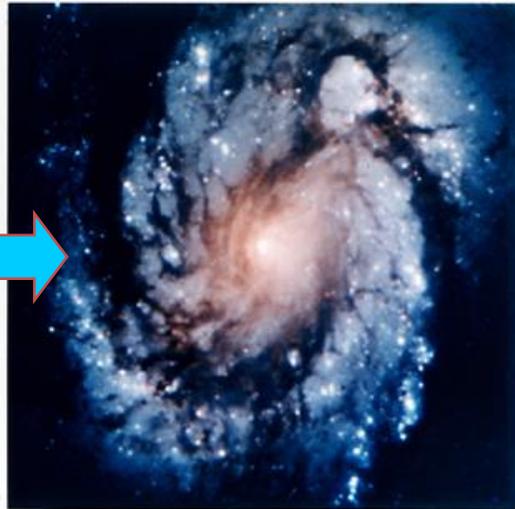
# 1.6 数字图像处理应用举例

## ▶ 图像修复



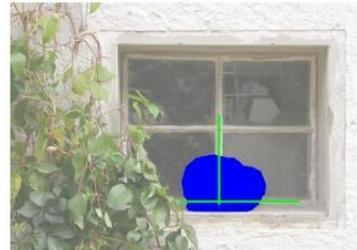
# 1.6 数字图像处理应用举例

## ▶ 图像修复



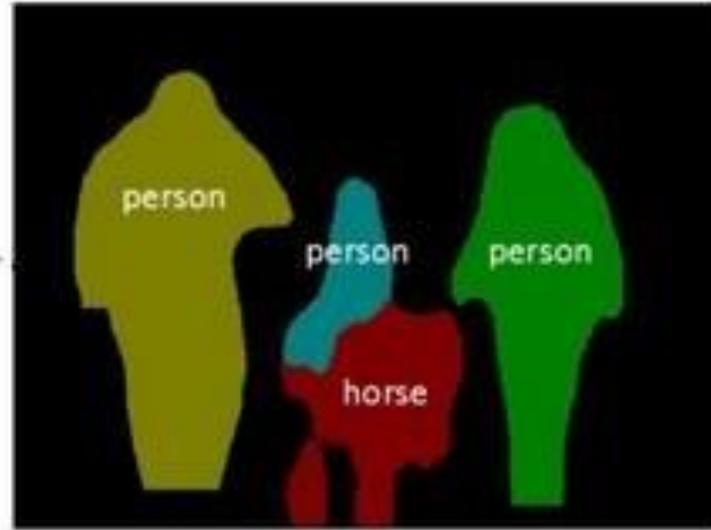
Wide Field Planetary Camera 1

Wide Field Planetary Camera 2



# 1.6 数字图像处理应用举例

## ➤ 图像分割



# 1.6 数字图像处理应用举例

## ➤ 航空遥感图像分析



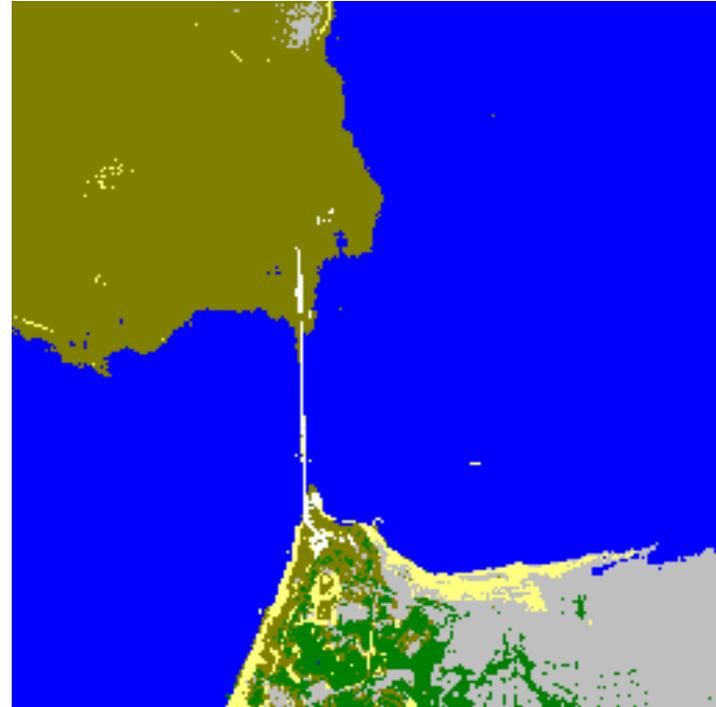
# 1.6 数字图像处理应用举例

## ➤ 卫星遥感图像分析



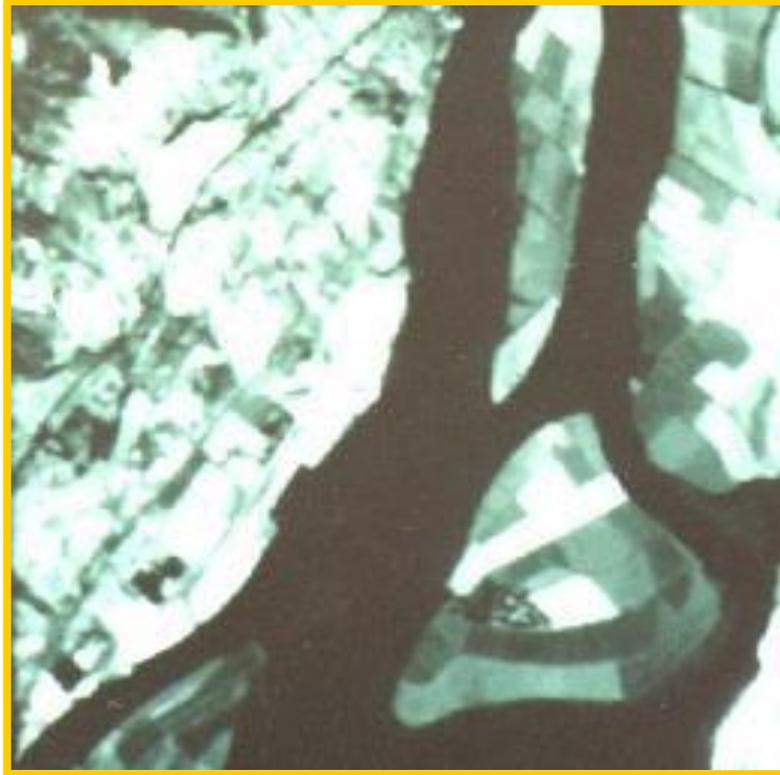
# 1.6 数字图像处理应用举例

## ➤ 遥感分类

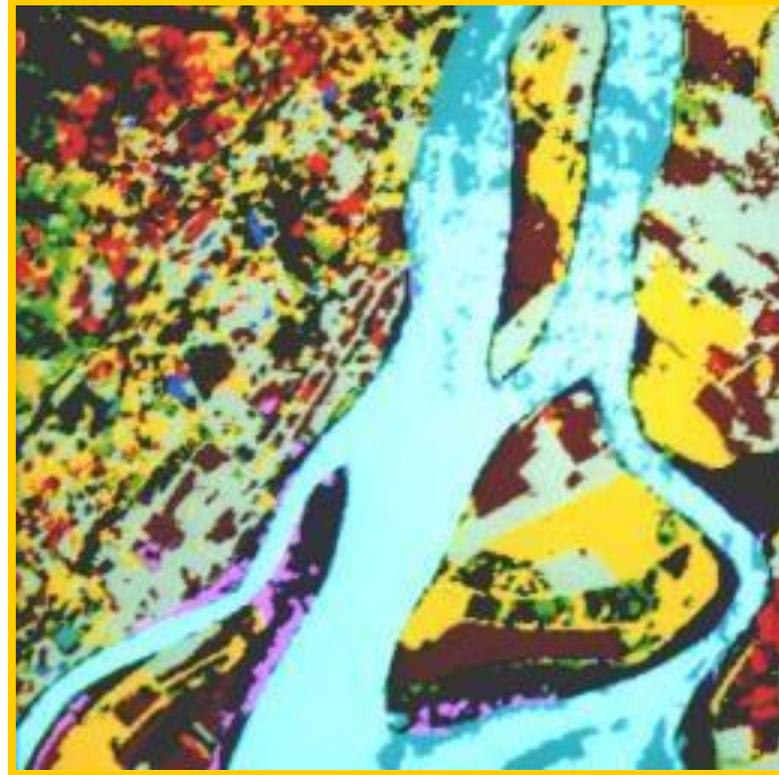


# 1.6 数字图像处理应用举例

## ➤ 遥感分类



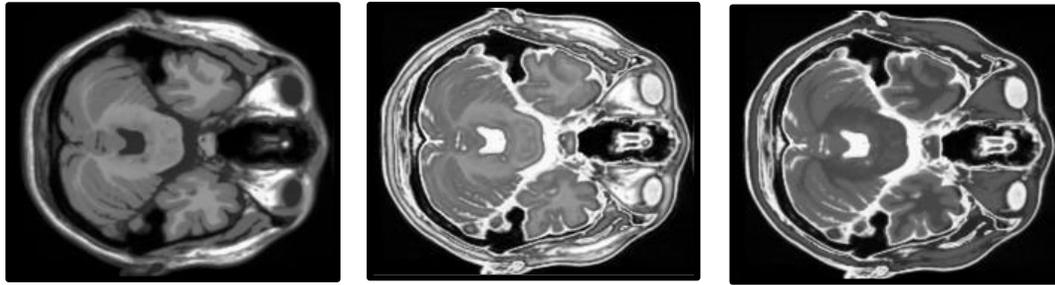
(a) 里斯本地区TM遥感图像（第六波段）



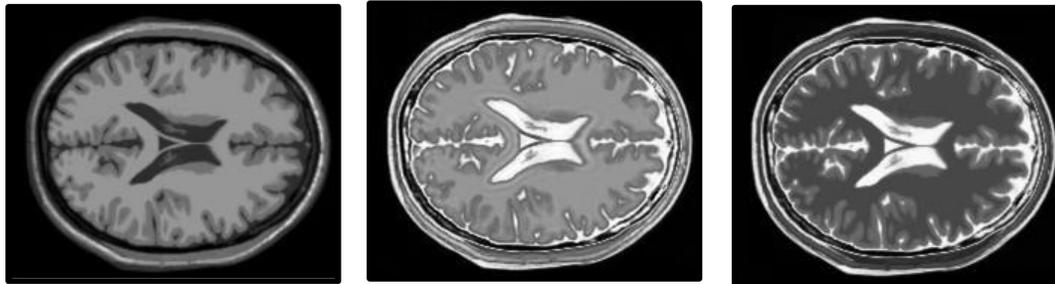
(b) 采用有监督分类的十五大类分类结果

# 1.6 数字图像处理应用举例

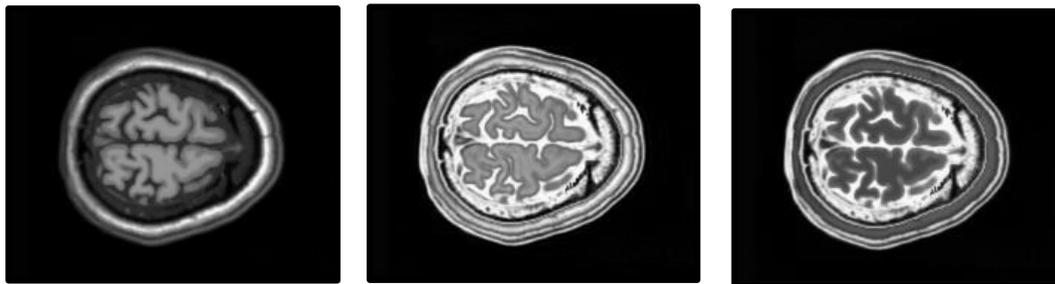
## ➤ 图像融合



(a) Result 1



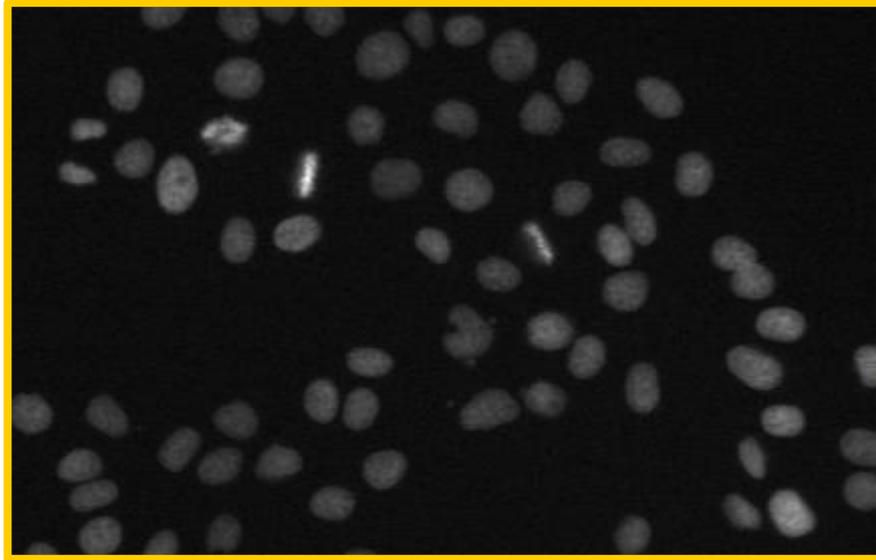
(b) Result 2



(c) Result 3

# 1.6 数字图像处理应用举例

## ➤ 辅助制药



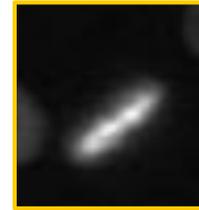
(a) 细胞显微荧光图像



(a) 分裂间期



(b) 分裂前期



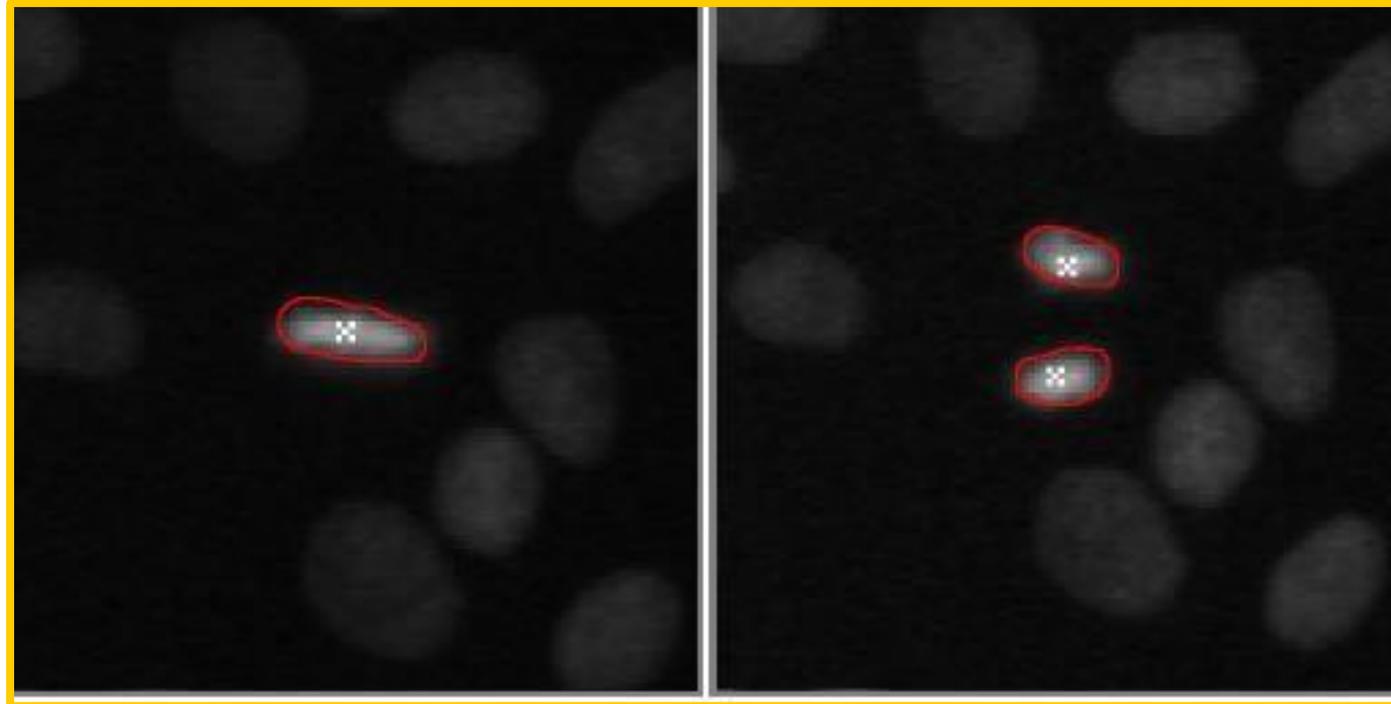
(c) 分裂中期



(d) 分裂后期

# 1.6 数字图像处理应用举例

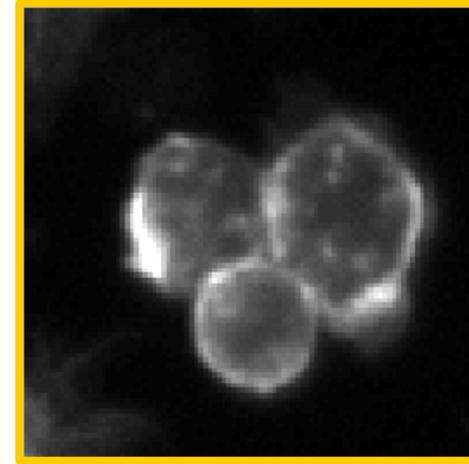
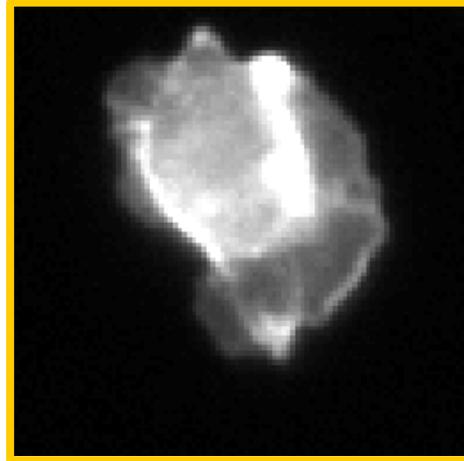
## ➤ 辅助制药



跟踪

# 1.6 数字图像处理应用举例

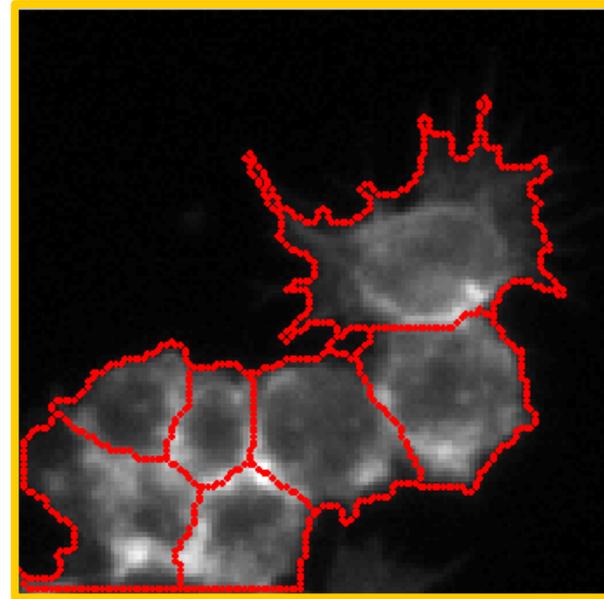
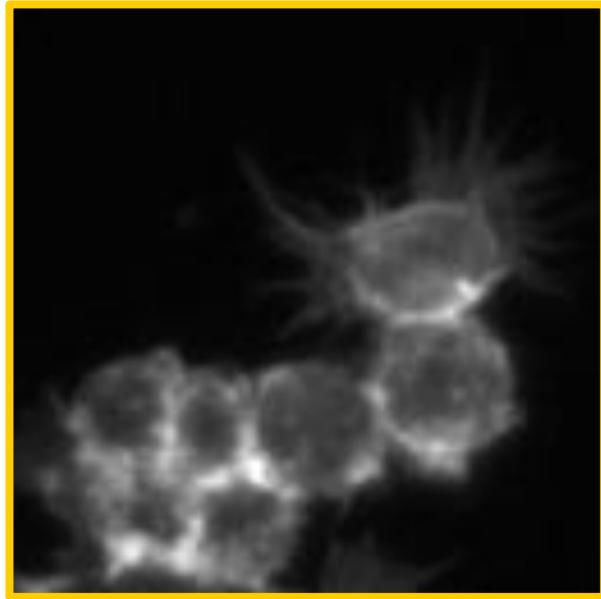
## ➤ 基于图像分析的生物学



RNAi Cell Image分割

## 1.6 数字图像处理应用举例

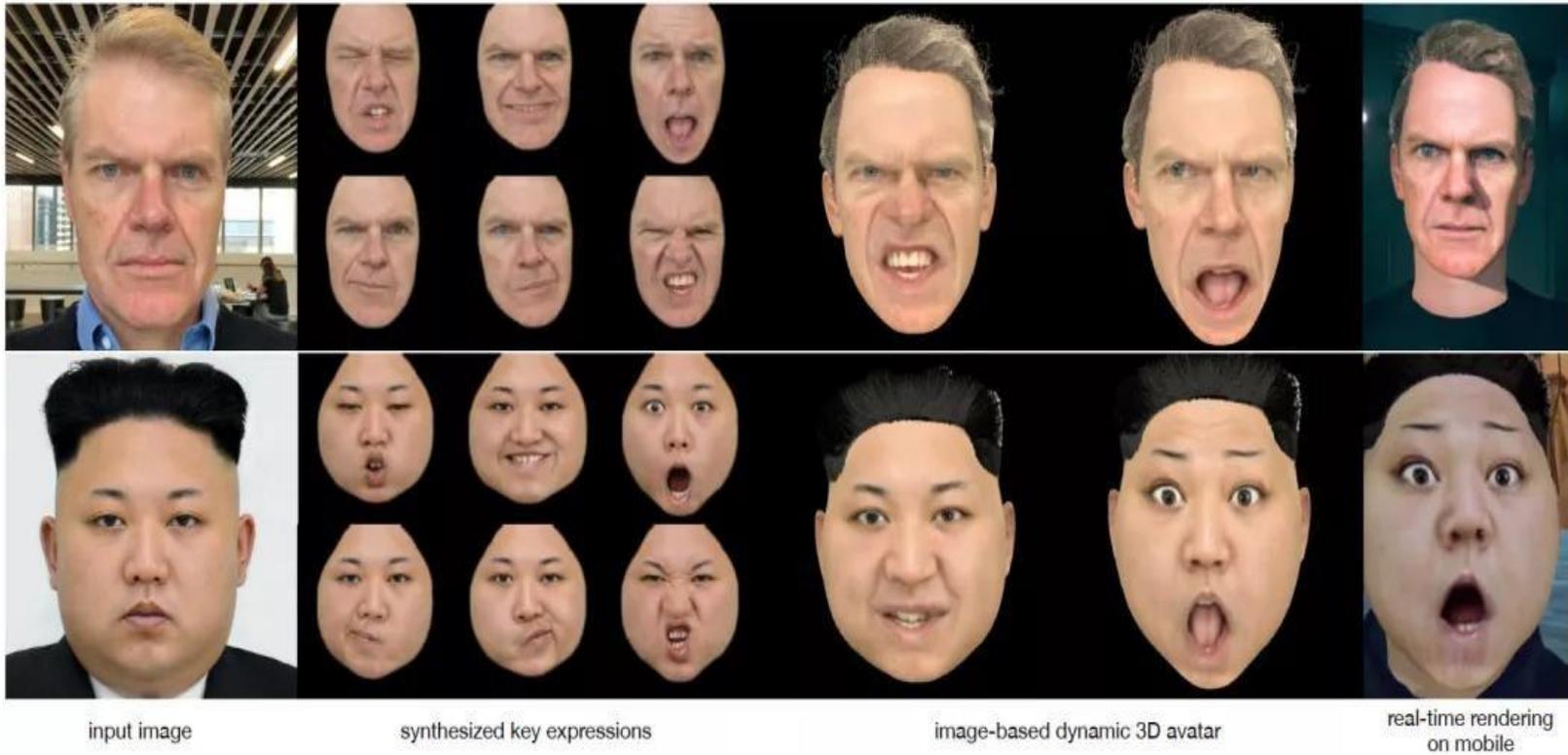
### ➤ 基于图像分析的生物学



RNAi Cell Image分割

# 1.6 数字图像处理应用举例

## ➤ 人脸整容



# 1.6 数字图像处理应用举例

➤ 图像检索 Database: thousands -> millions -> billions

- Retrieve identical images (√)
- Retrieve nearly duplicated images: cropped, edited, resized (√)



- Retrieve images containing similar objects (√)

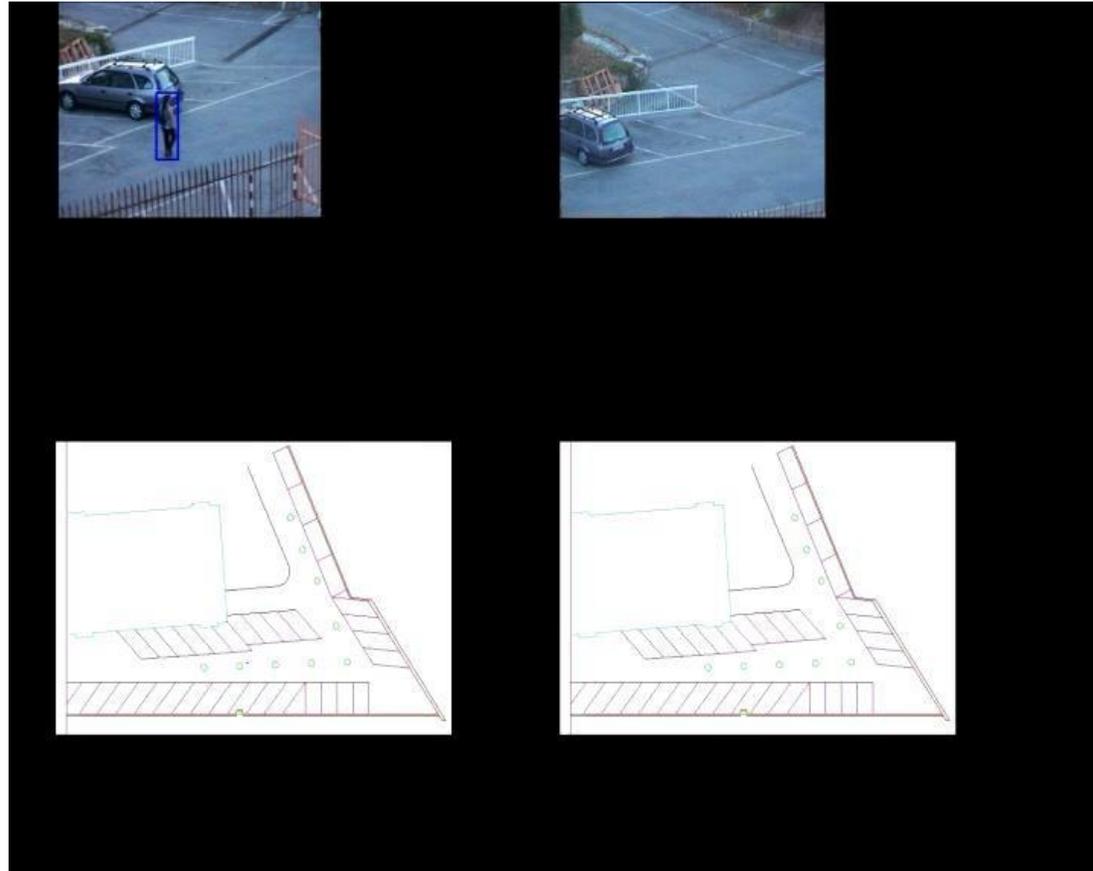


- Retrieve similar semantics (X)



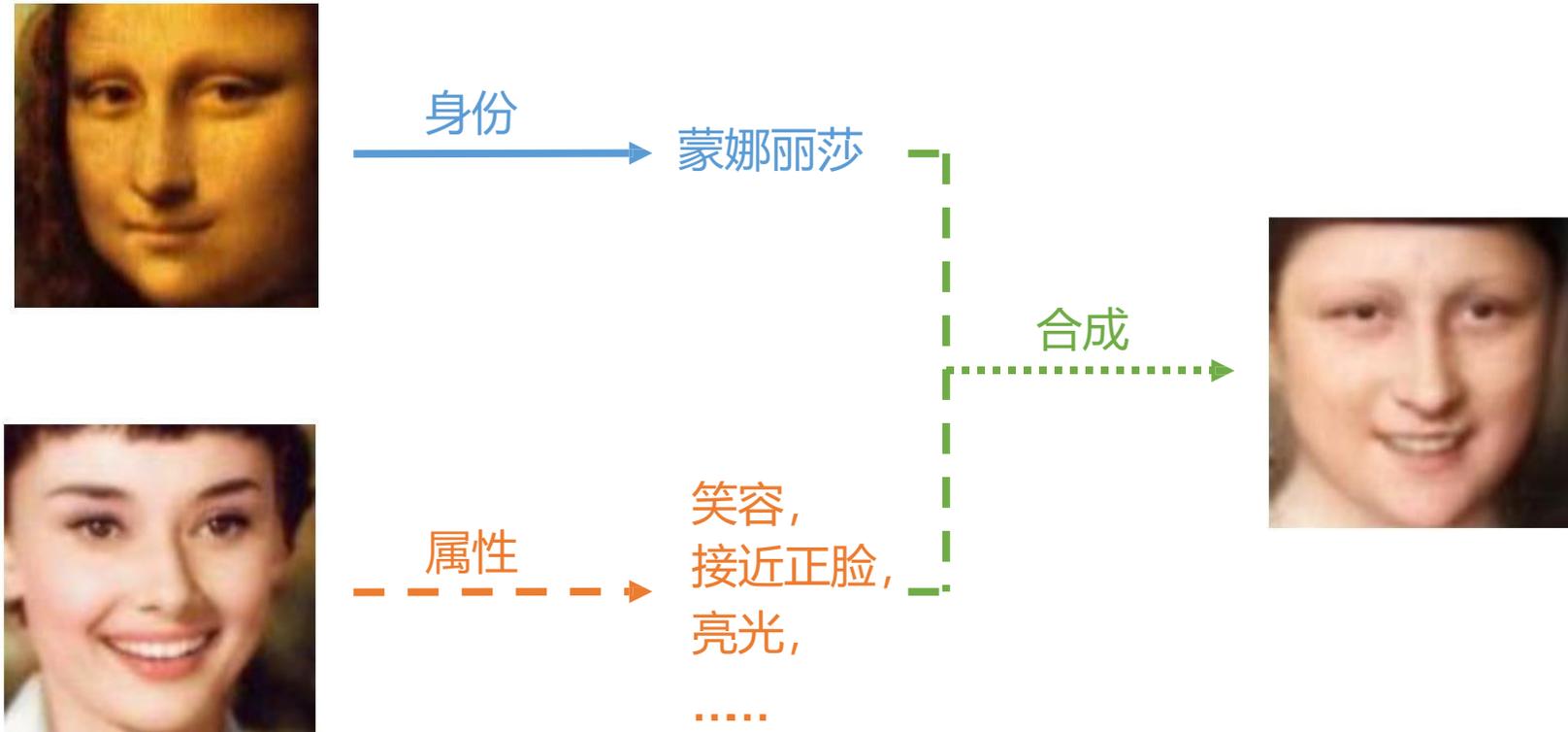
# 1.6 数字图像处理应用举例

## ➤ 视频分析：运动目标跟踪

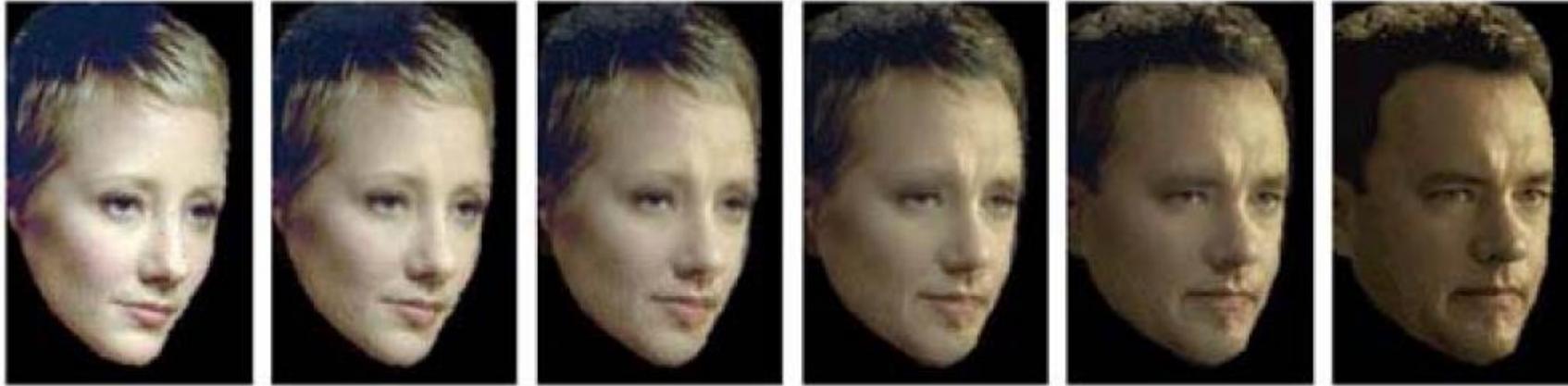


## 1.6 数字图像处理应用举例

- IP-GAN: 将来自不同人脸的身份信息与属性信息融合, 合成新的图片



# Face morphing



## ➤ 手写识别

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9

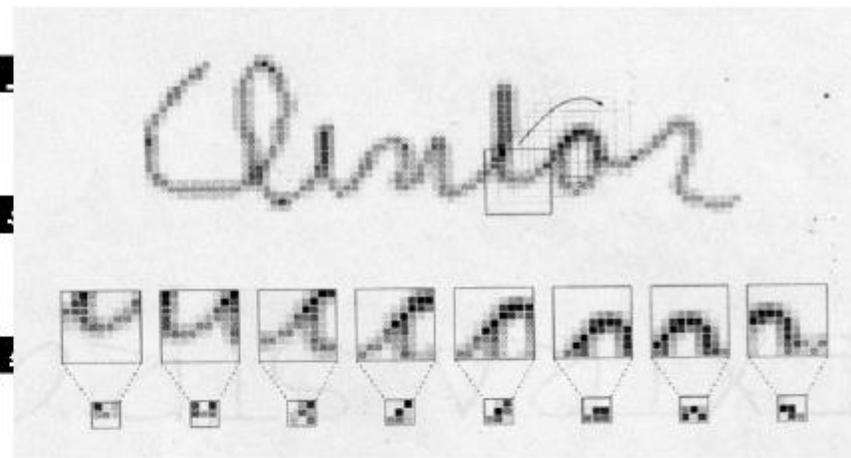
(a)

0 1 2 3 4

0 1 2 3 4

0 1 2 3 4

(b)



0 1 2 3 4 5 6 7 8 9

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9

(c)

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9

(d)

➤ 艺术效果



## 人物识别

腾讯优图  
腾讯天眼系统

2016年11月24日 周一上午 10:50

— 识别结果 —

	艾米	
	98%	
	李明	
	96%	
	William	
	94%	
	Jenny	
	99%	
	Davie	
	98%	
	Mark	
	99%	

— 实时抓拍 —

10:48:38	10:48:37	10:48:38	10:48:45	10:49:17	10:49:20	10:49:28	10:49:33	10:49:39	10:48:57



## ➤ 信息与通讯理论

- ✓ **Shannon“通信中的数学理论”（A Mathematical Theory of Communication）**的发表
- ✓ 图像信息论属于信息论科学中的一个分支
- ✓ 图像处理理论将通信理论中的一维问题推广到二维空间
- ✓ 通信理论研究一维时间的信息，图像理论则研究二维空间的信息
- ✓ 通信中的一维问题大都可以推广到二维，尽管有些地方还不是很贴切，但对于图像处理理论体系的新词句有极大的借鉴意义



THANK YOU



# 数字图像处理 (Digital Image Processing)

王正

Email: [zheng\\_wang@seu.edu.cn](mailto:zheng_wang@seu.edu.cn)  
办公室: 无线谷A5415

**Image  
Processing  
Project Ideas**  
*Beginners*





# 第2章 数字图像基础

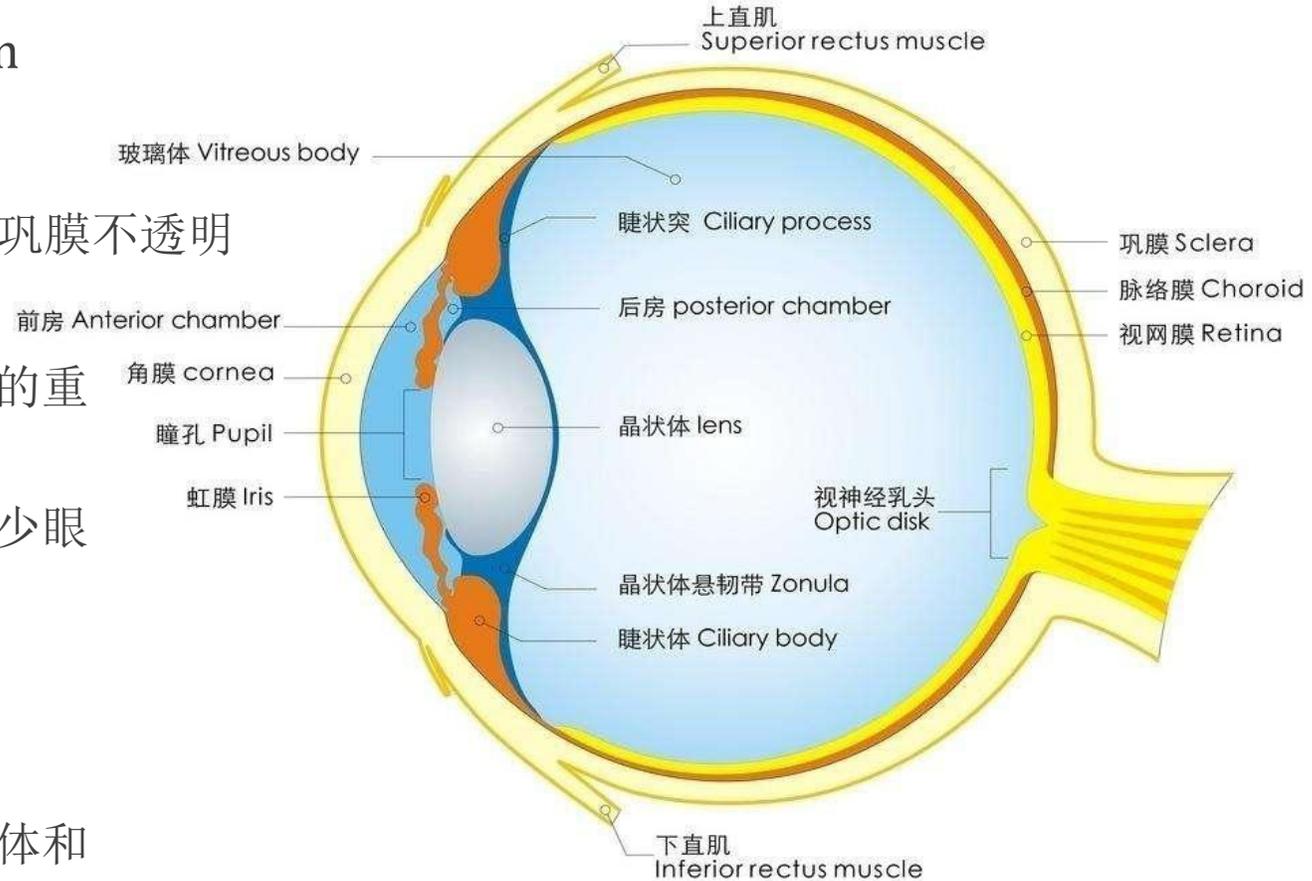
---

1. 视觉感知要素
  2. 图像感知和获取
  3. 图像取样和量化
  4. 像素间的基本关系
  5. 图像基本变换
-

# 2.1 视觉感知要素

## 人眼的结构

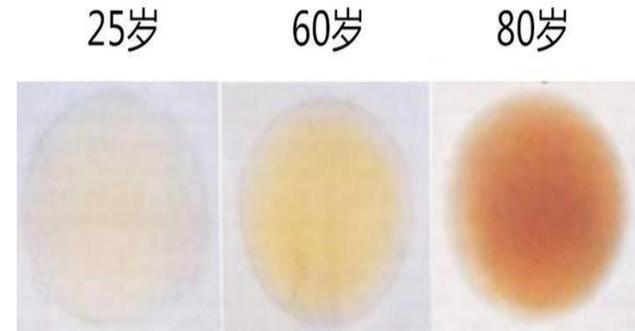
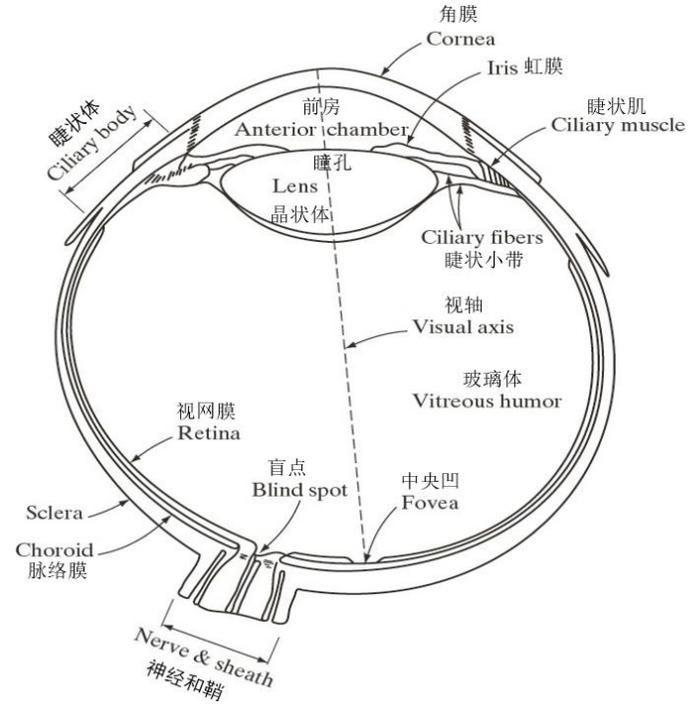
- 平均直径为 20mm
- 角膜与巩膜外壳：
  - 角膜硬而透明，巩膜不透明
- 脉络膜：
  - 有血管网，眼睛的重要滋养源；
  - 外壳着色重，减少眼内散射光的数量
- 视网膜：
  - 成像功能
  - 感受器包括锥状体和杆状体；



# 2.1 视觉感知要素

## • 人眼的结构

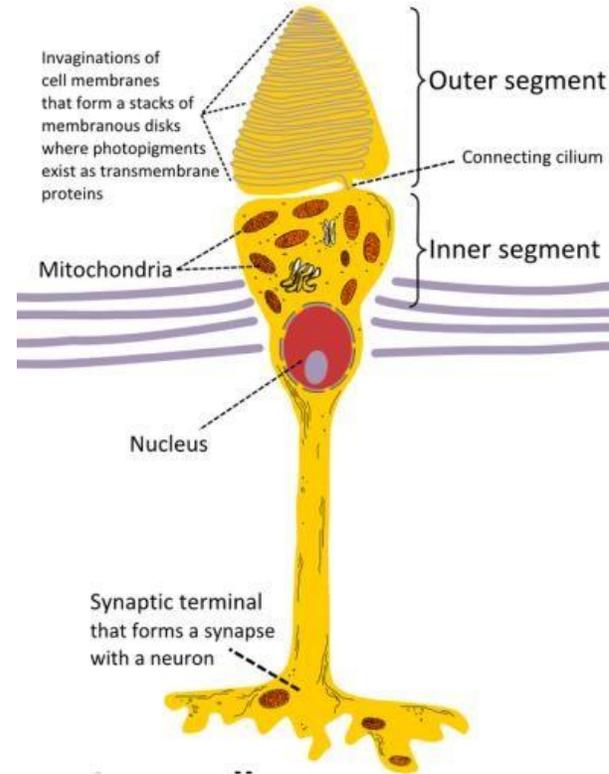
- 睫状体、虹膜、瞳孔：
  - 脉络膜最前端为睫状体和虹膜，
  - 虹膜的收缩控制进入眼睛的光亮；
- 瞳孔：
  - 虹膜中间开口（瞳孔）直径可变，范围为2-8mm。
- 晶状体：
  - 60%-70%水、6%脂肪、蛋白质构成；
  - 稍黄的色素着色，颜色随年龄递增；
  - 白内障等引起混浊，降低颜色辨别能力和视觉清晰度；
  - 吸收红外光和紫外光，过量时伤害眼睛



## 2.1 视觉感知要素

### • 2.1.1 人眼的结构

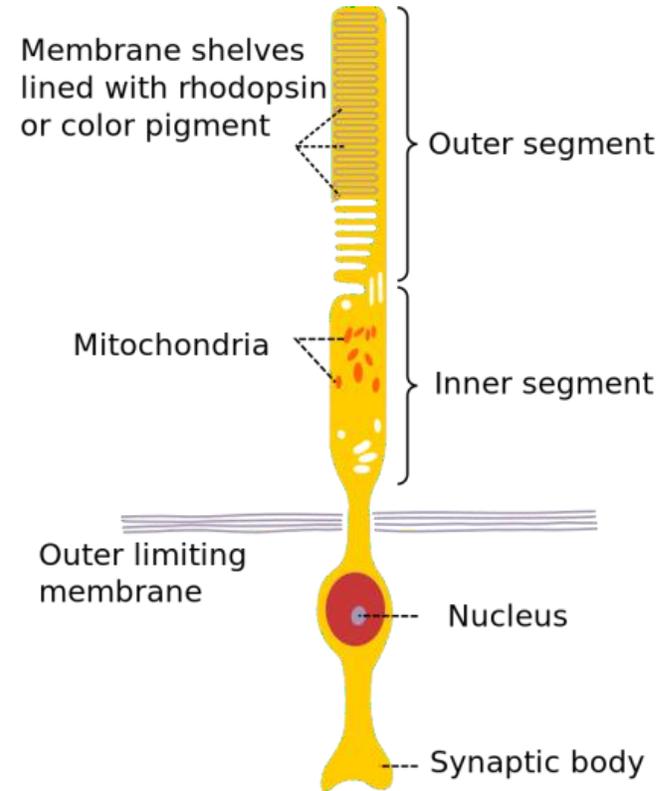
- 锥状体：
  - 600-700万
  - 在中央凹的中间部分
  - 对颜色敏感
  - 每个锥状体连接一个神经末梢，使人可以分辨图像细节
  - 锥状体视觉称为白昼视觉或亮视觉



(c) Cones (锥状细胞)

## 2.1 视觉感知要素

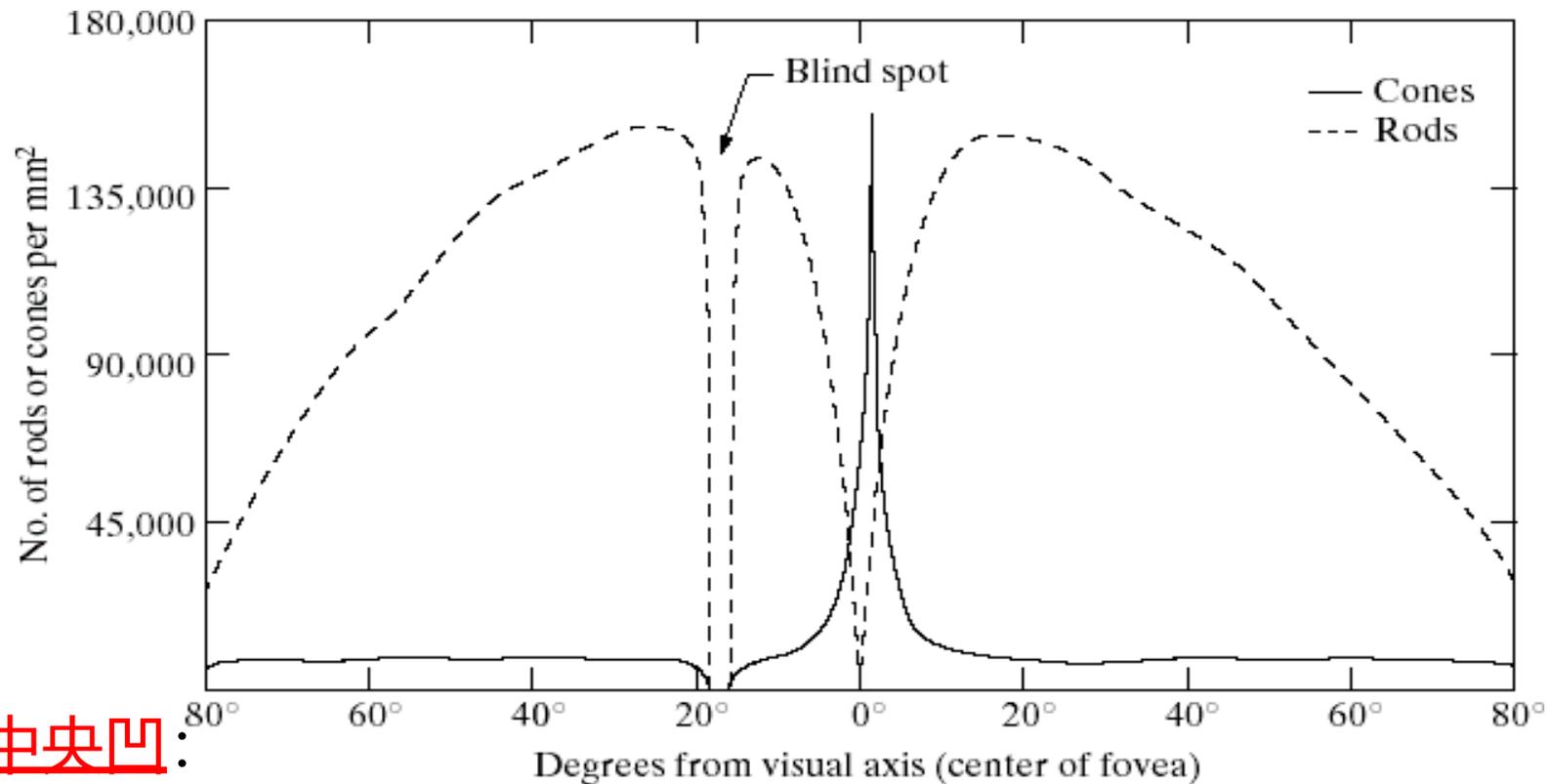
- 杆状体：
  - 7500-15000万
  - 分布面积大
  - 多个杆状体连接到一个神经末梢，降低了感知细节的能力
  - 没有颜色感觉，对低照明度敏感
    - 如白天色彩鲜艳的物体在月光下没有颜色
  - 称为暗视觉或微光视觉



(b) Rods(柱状细胞)

## 2.1 视觉感知要素

视网膜上杆状体 (Rods) 与锥状体 (Cones) 的分布



■ **中央凹**:

- 在注视点, 具有最高的视觉分辨率; 离开注视点, 视觉分辨率急剧下降



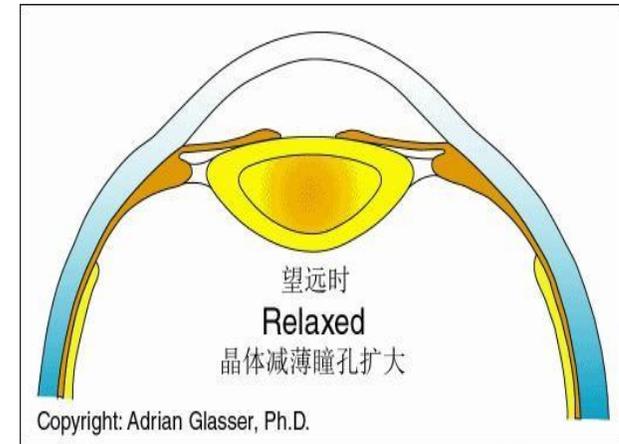
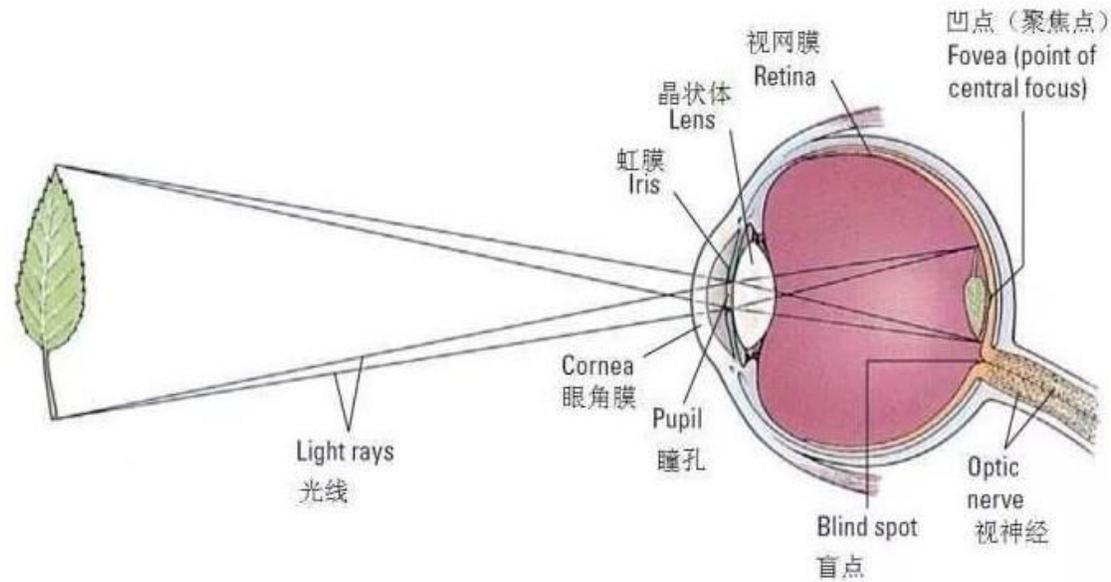
## 2.1 视觉感知要素

---

- 感受器的分布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。
-

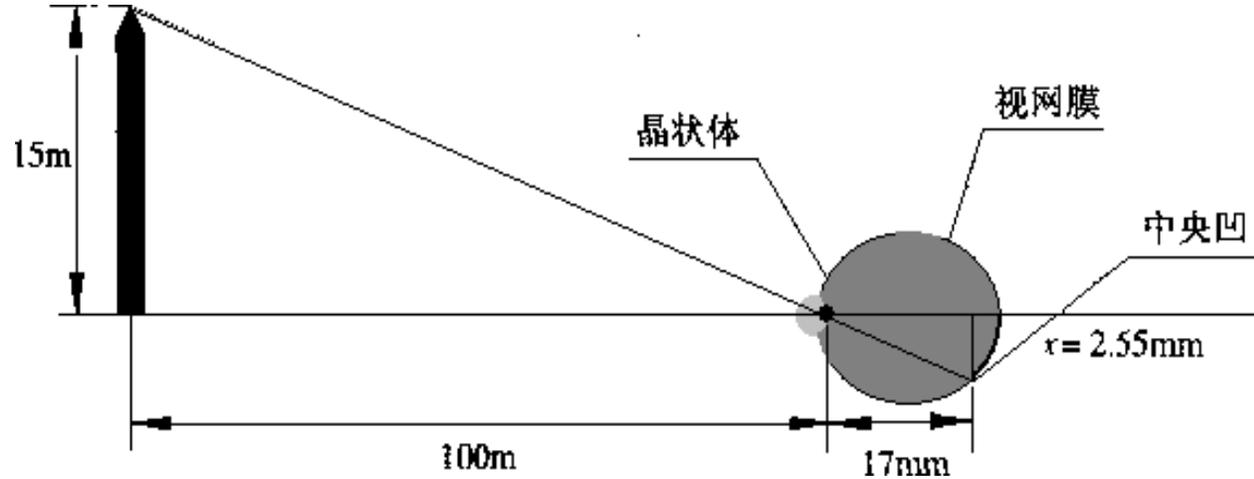
## 2.1 视觉感知要素

### ◆ 眼睛中图像的形成

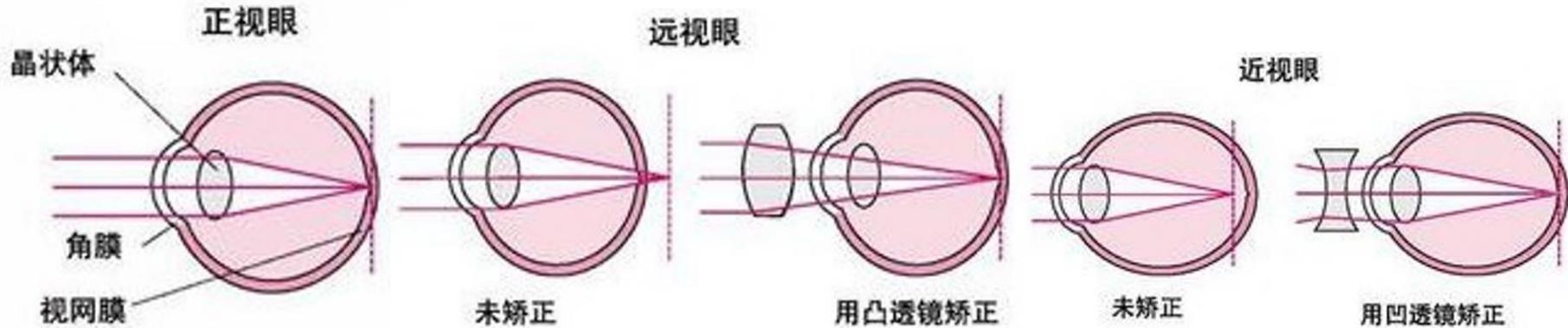


球体前端为晶状体，相当于镜头，内壁为视网膜，相当于胶片。眼睛实现正确聚焦的焦距是通过改变晶状体的形状来得到的。这点跟相机成像不同。

# 2.1 视觉感知要素



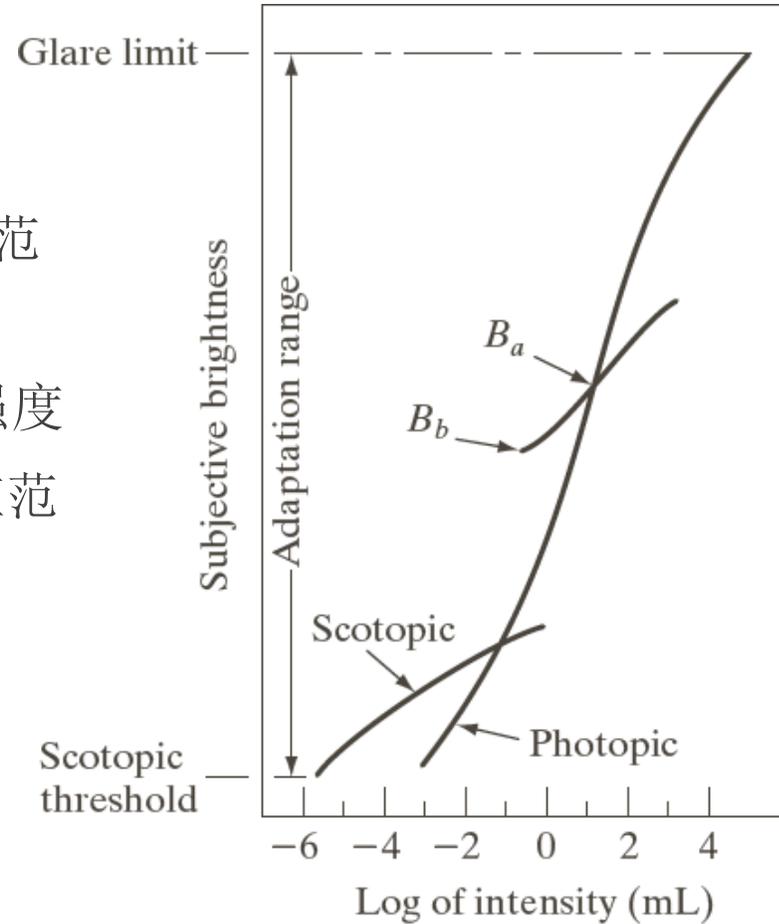
- 视网膜感受的颠倒信号，在通过视神经传导到大脑皮层的视觉中枢后，在视觉中枢实现自动翻转



## 2.1 视觉感知要素

### ◆ 亮度适应和辨别

- 亮度适应现象：
  - 视觉系统不能同时在一个范围内工作
  - 其可以同时辨别的不同强度级别的总范围与整个适应范围相比很小

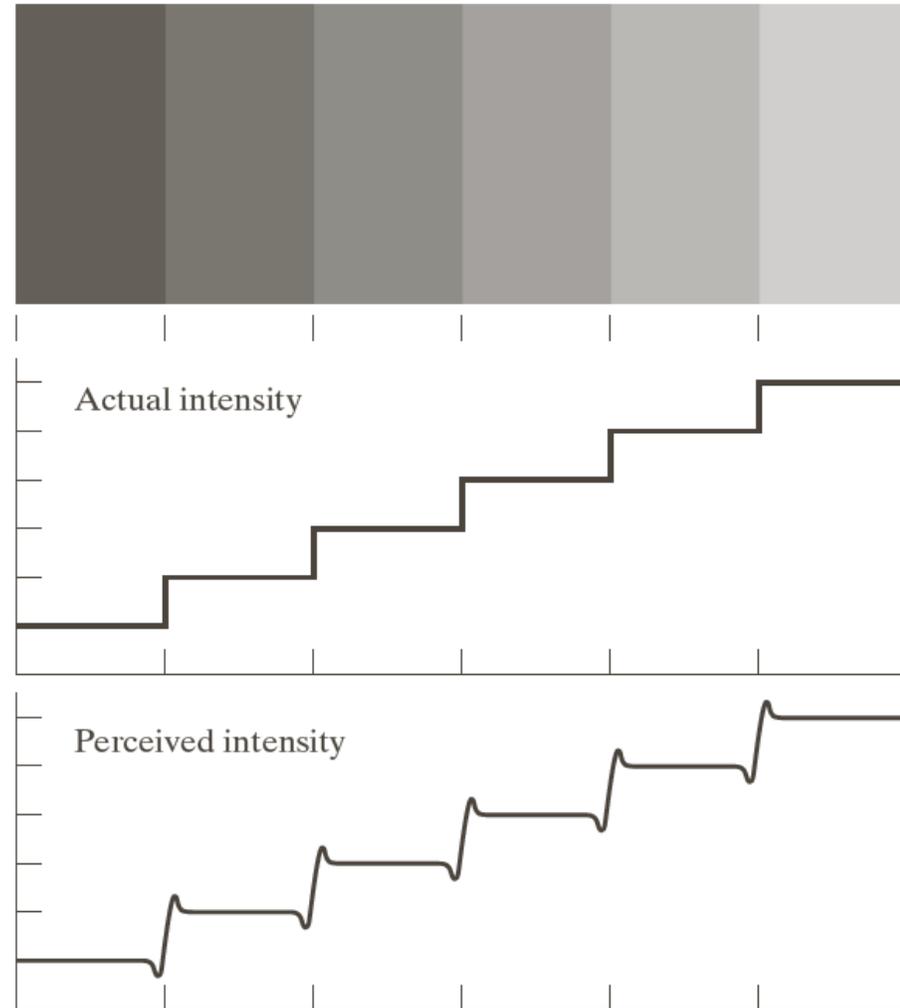


## 2.1 视觉感知要素

### 马赫带效应

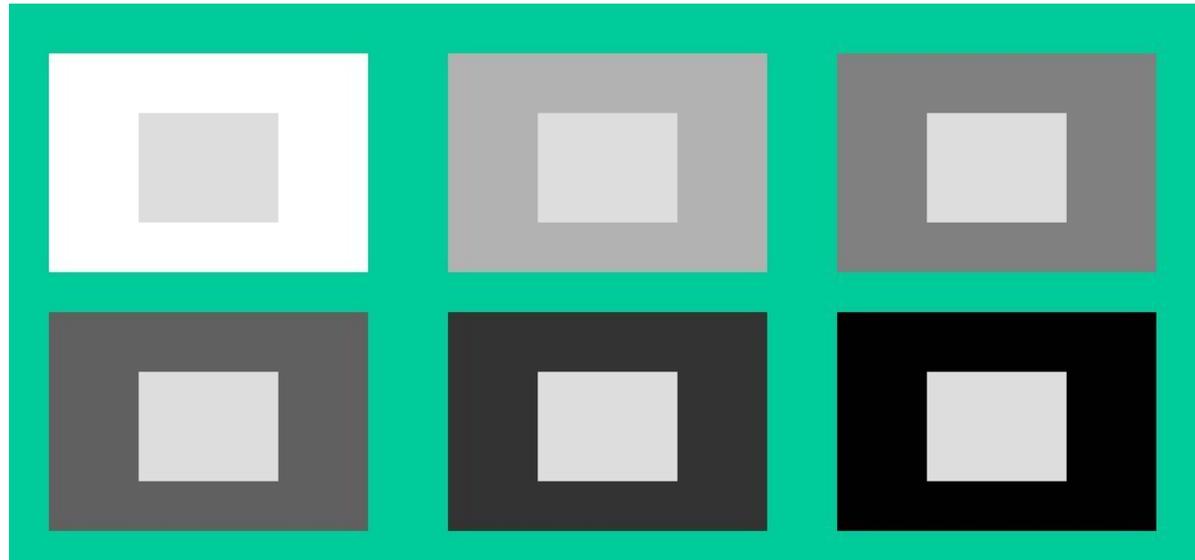
马赫带：1865年首先描述视觉系统倾向不同强度区域边界周围的”欠调”或”过调”。

证明了感觉亮度不是简单的强度函数。



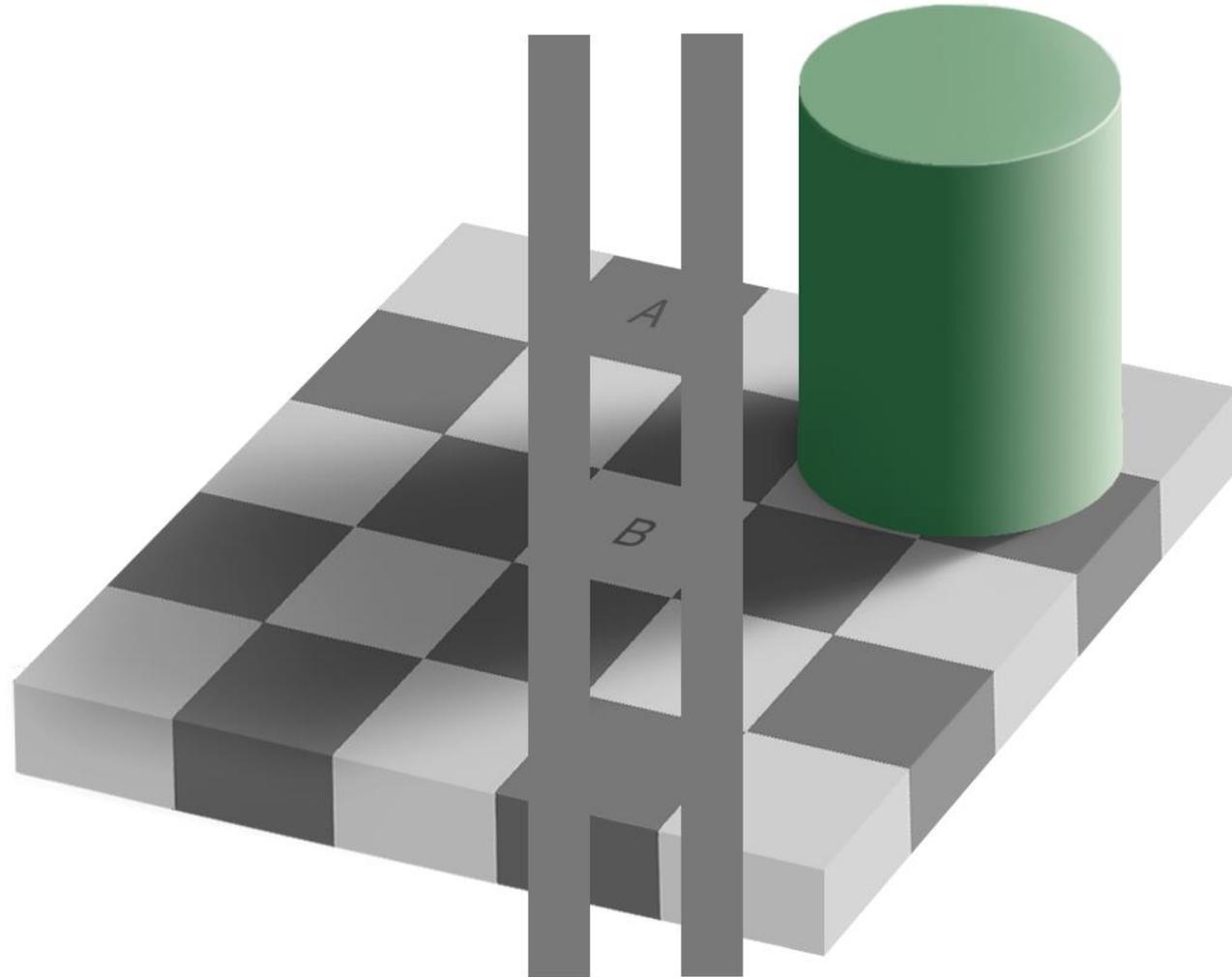
## 2.1 视觉感知要素

### 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

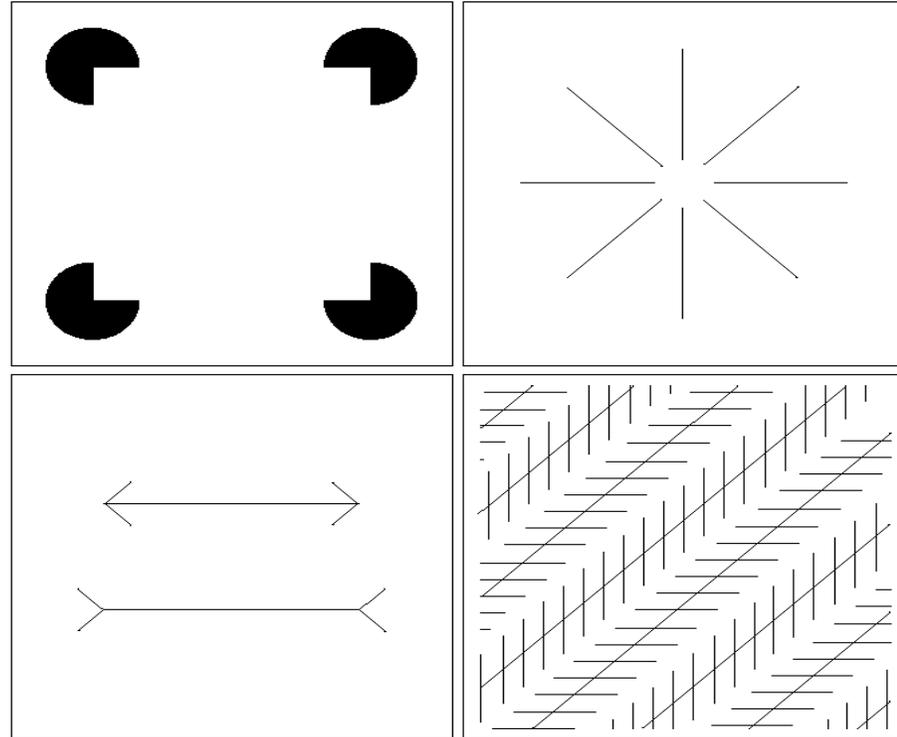


## 2.1 视觉感知要素

### 视觉错觉

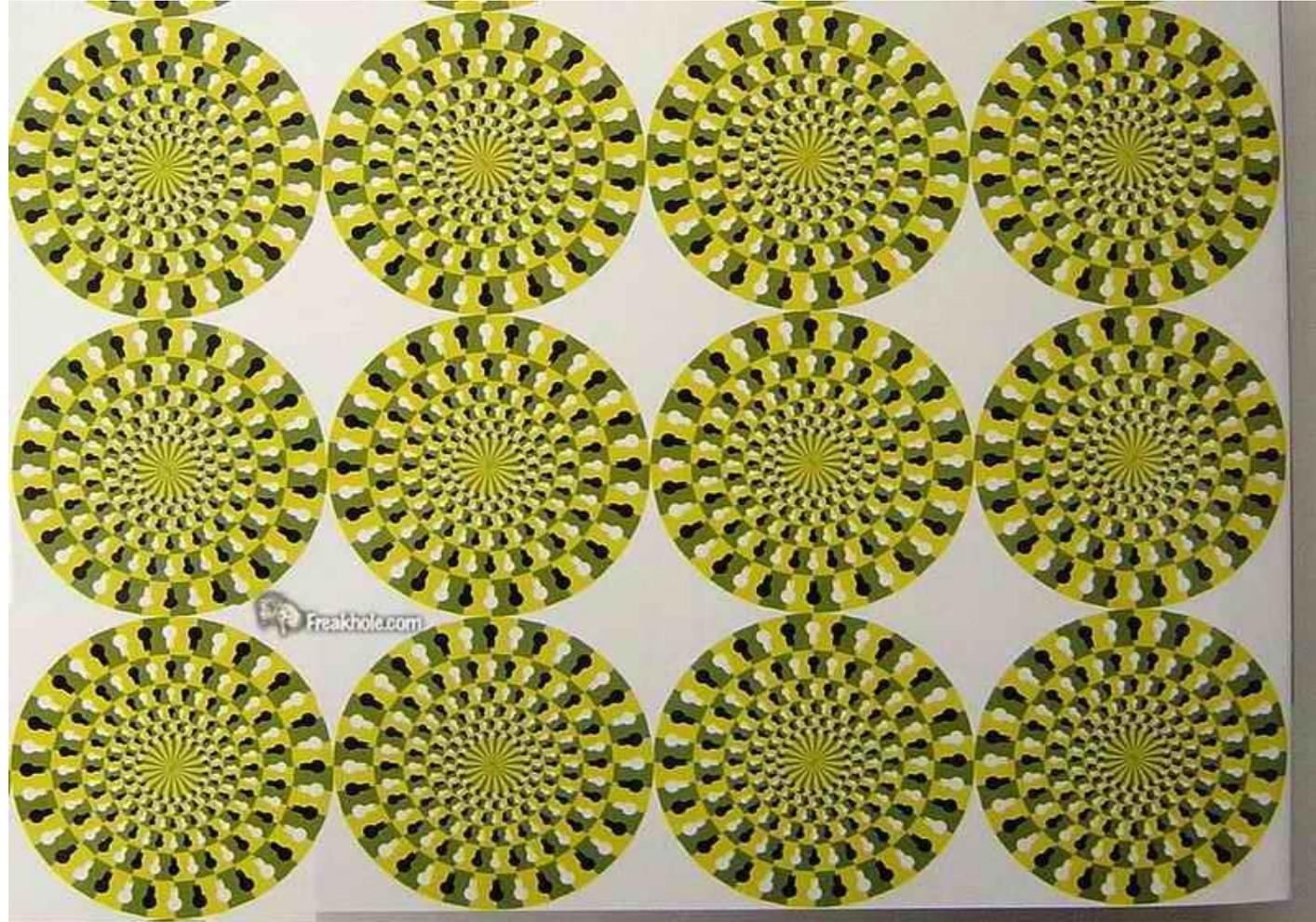
眼睛填充了不存在的信息或者错误地感知了物体的几何特点。

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。

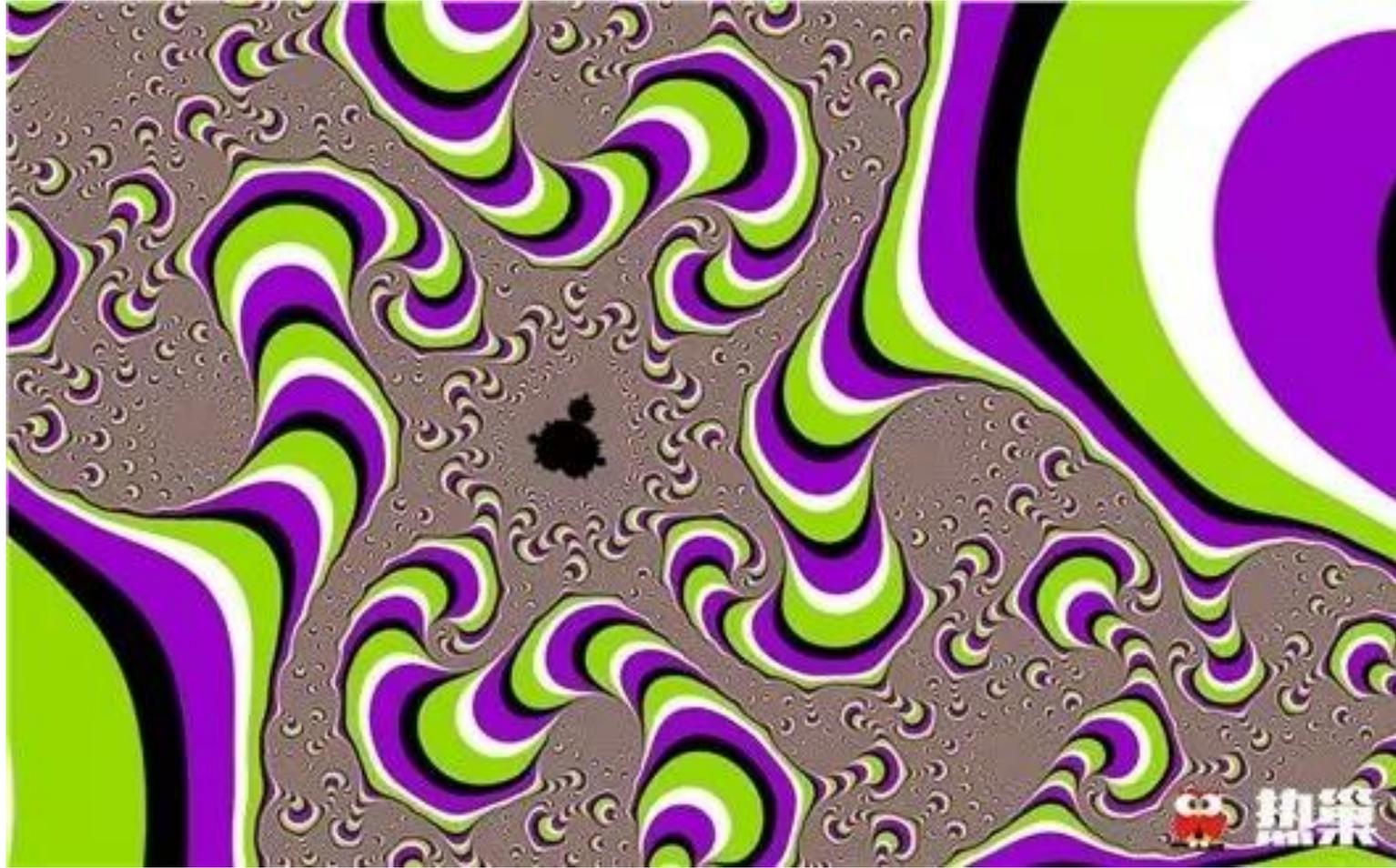


左上：正方形轮廓；右上：圆轮廓；  
左下：长度错觉；右下：平行线错觉

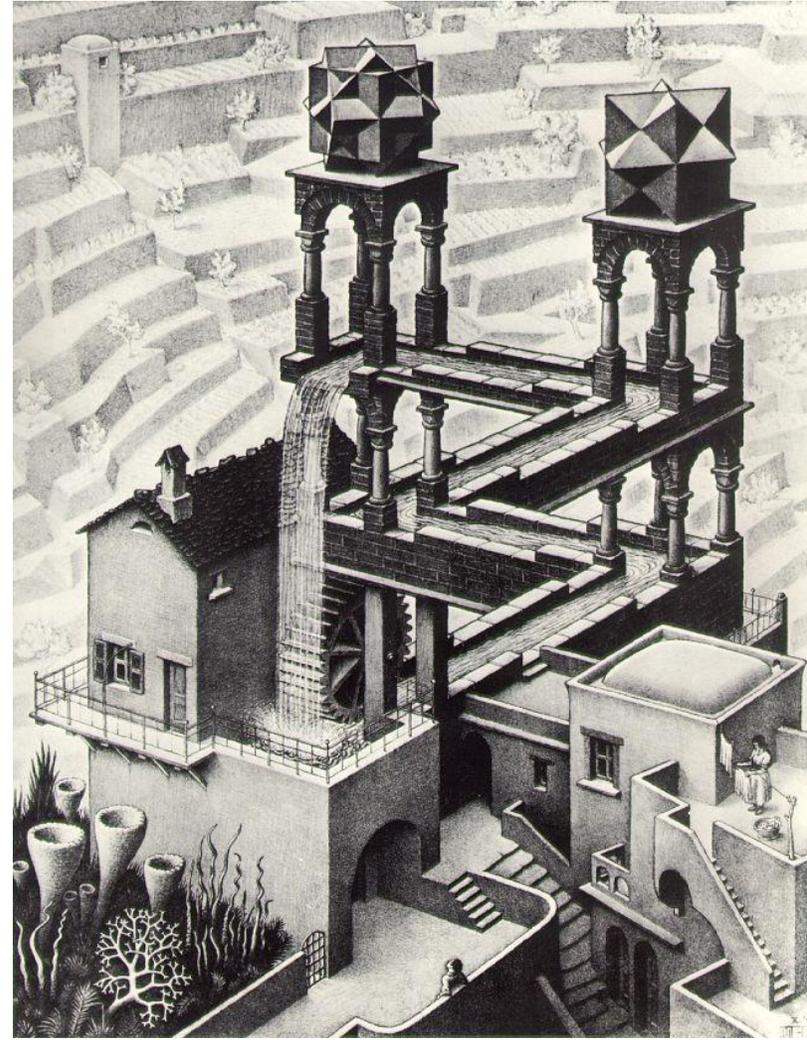
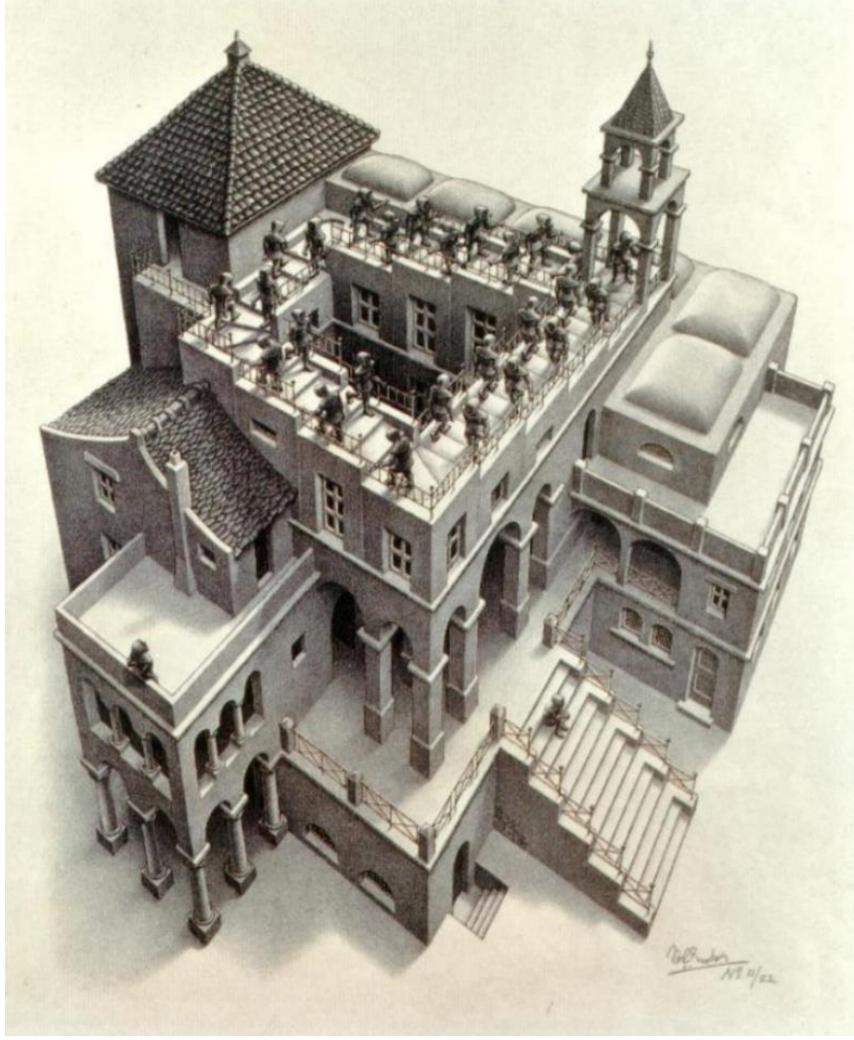
## 2.1 视觉感知要素



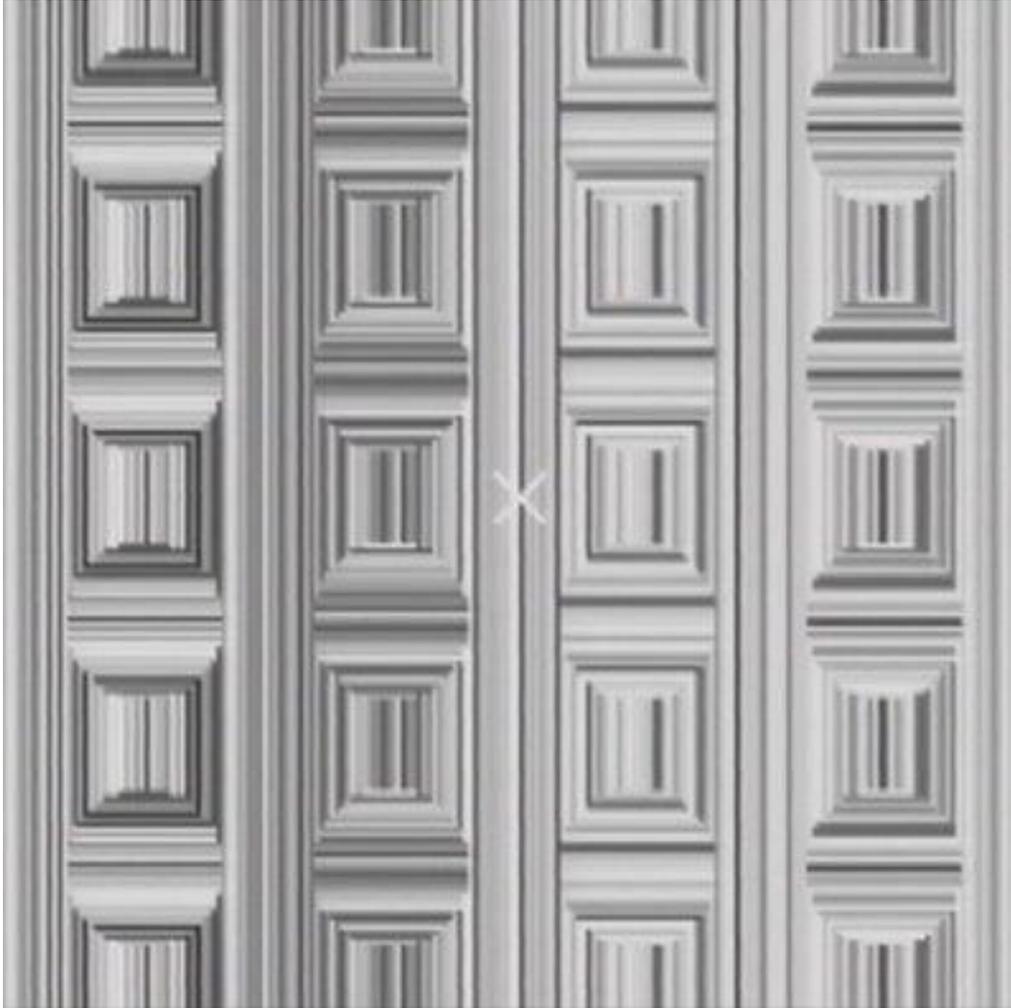
## 2.1 视觉感知要素



# 2.1 视觉感知要素

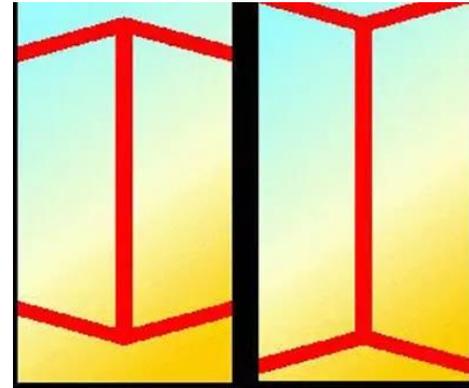
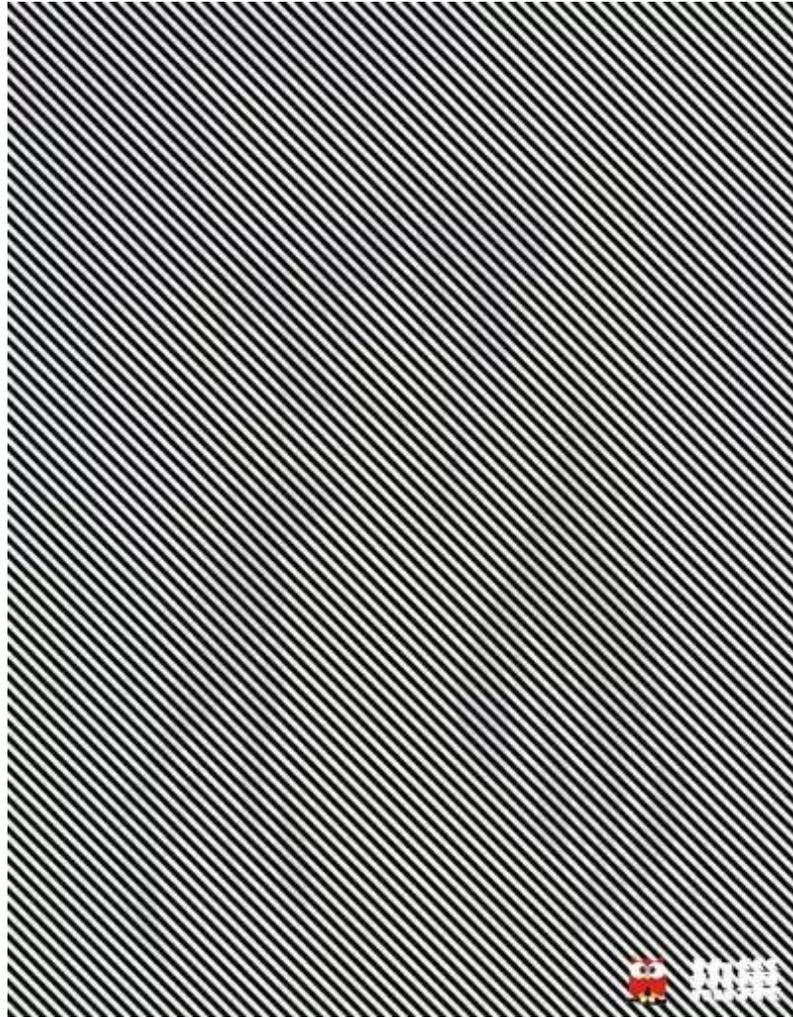


## 2.1 视觉感知要素

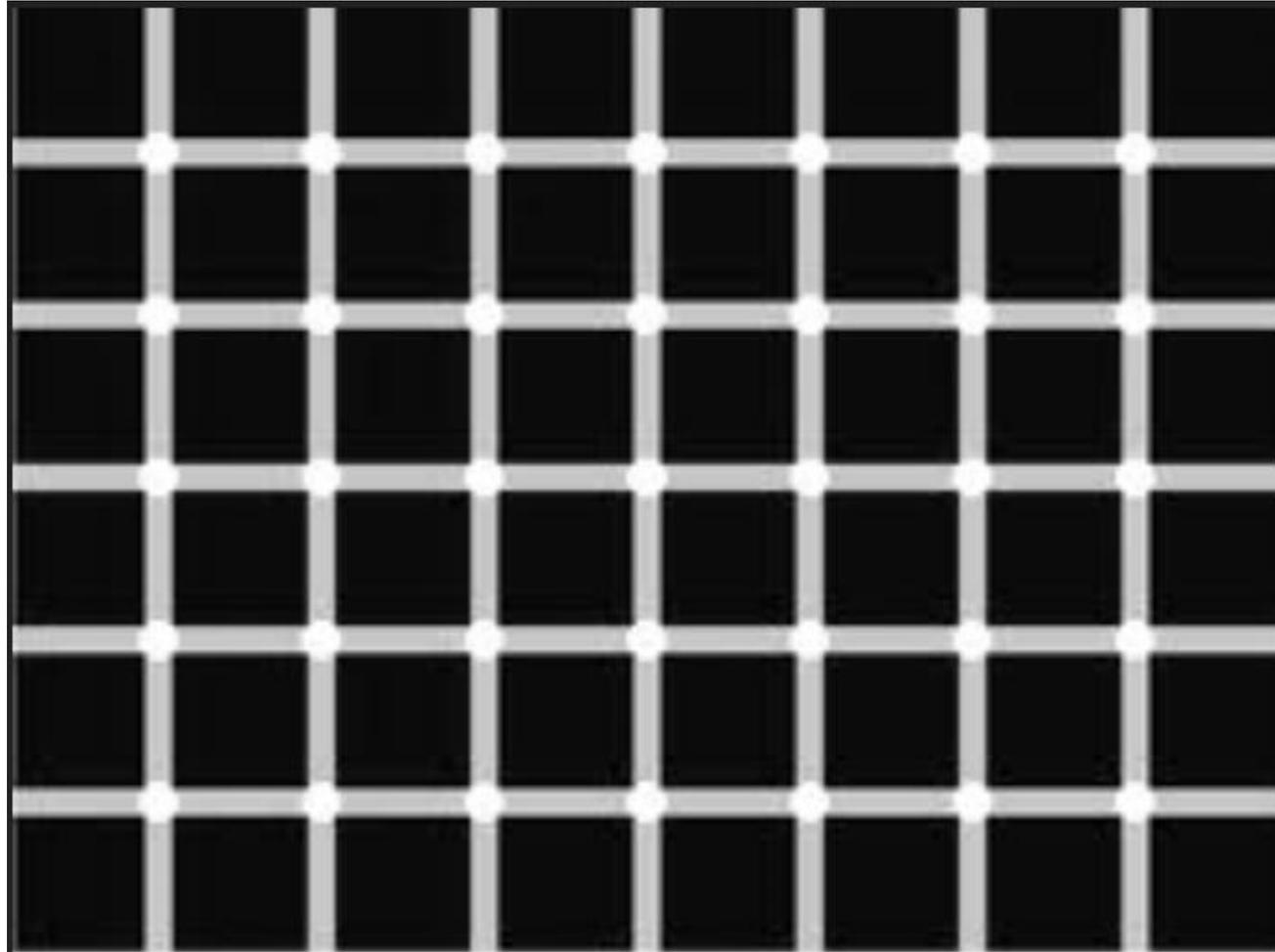


Stare at the  
cross in the  
middle of the  
image and think  
circles

# 2.1 视觉感知要素



## 2.1 视觉感知要素





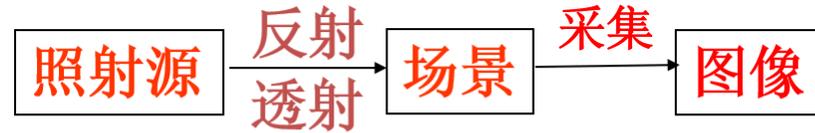
# 第2章 数字图像基础

---

1. 视觉感知要素
  2. 图像感知和获取
  3. 图像取样和量化
  4. 像素间的基本关系
  5. 图像基本变换
-

## 2.2 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。

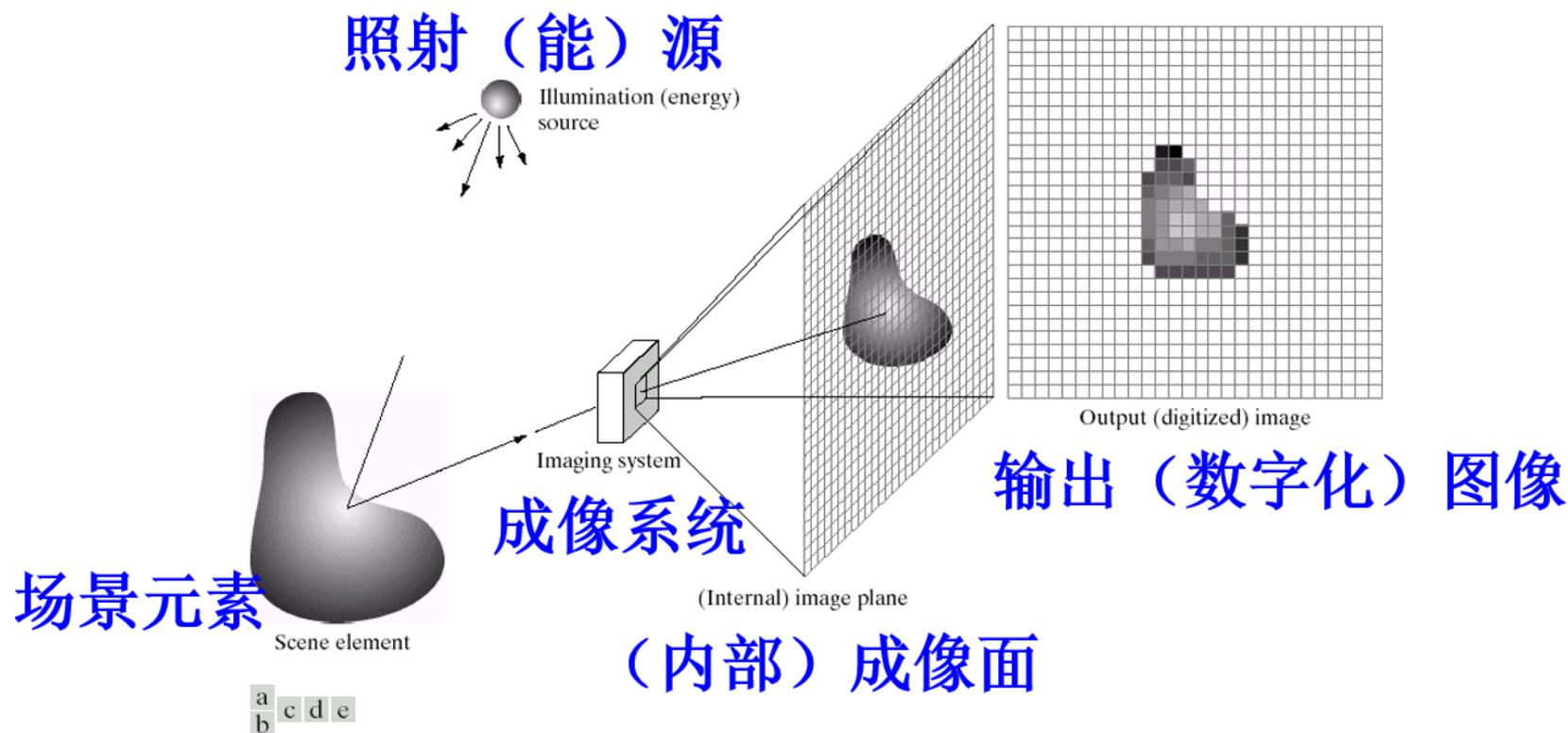


可见光  
雷达  
红外线  
X射线  
超声波

常见物体  
岩石  
发热物体  
分子  
光源

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。

## 2.2 图像感知和获取



**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.

### 数字图像的采集过程

## 2.2 图像感知和获取

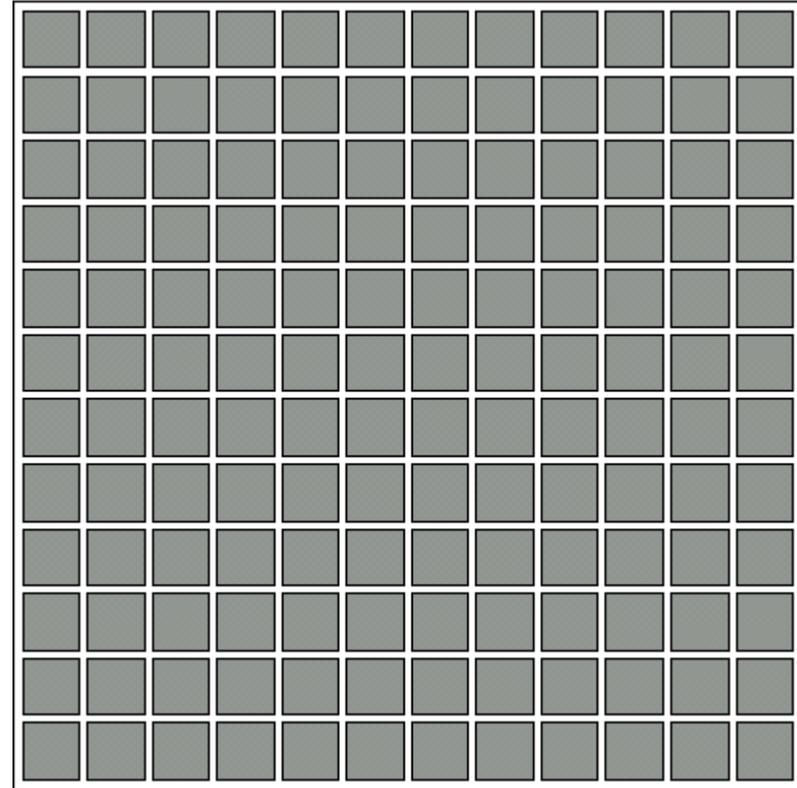
### ◆ 阵列成像传感器

#### 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。



## 2.2 图像感知和获取

简单的图像形成模型

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

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

黑天鹅绒: 0.01;

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

不锈钢: 0.65;

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

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

---

1. 视觉感知要素
  2. 图像感知和获取
  3. 图像取样和量化
  4. 像素间的基本关系
  5. 图像基本变换
-

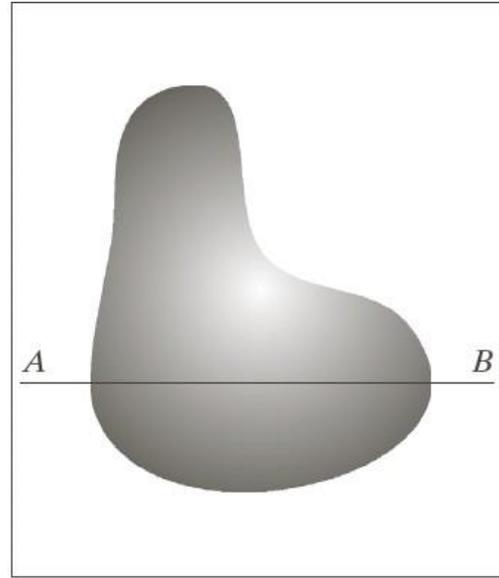


## 2.3 图像取样和量化

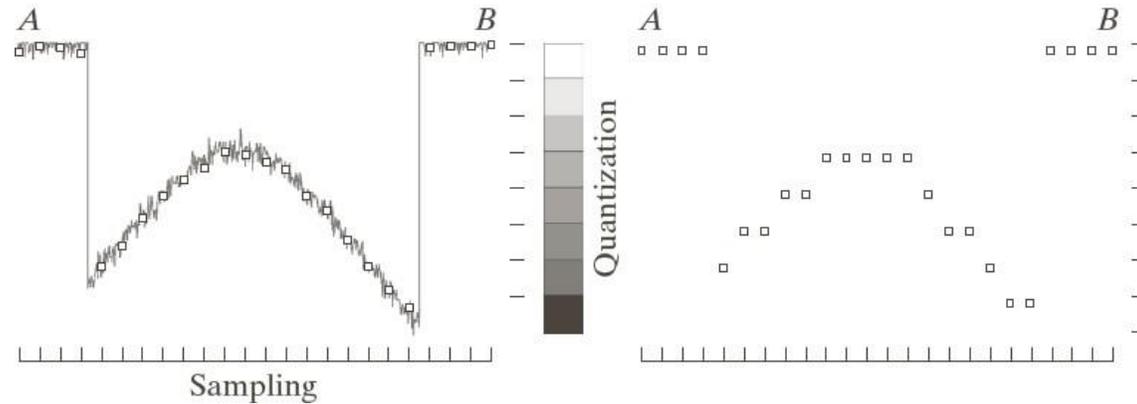
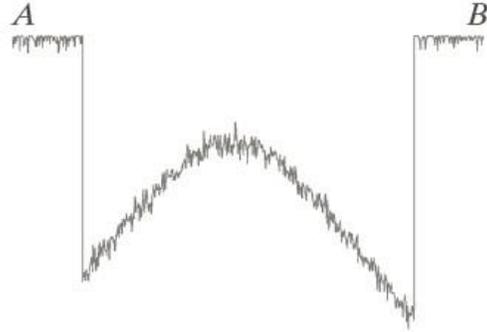
### ◆ 基本概念

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。

## 2.3 图像取样和量化

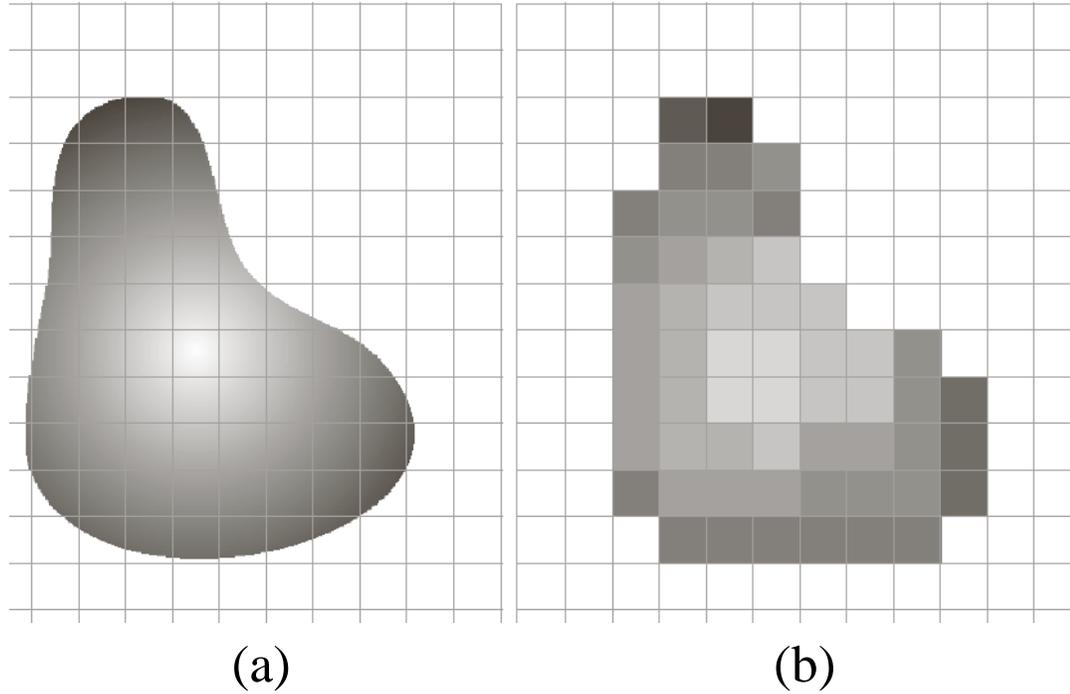


A → B 线扫描



## 2.3 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) 连续图像； (b) 取样和量化后的结果

## 2.3 图像取样和量化

### ◆ 数字图像表示

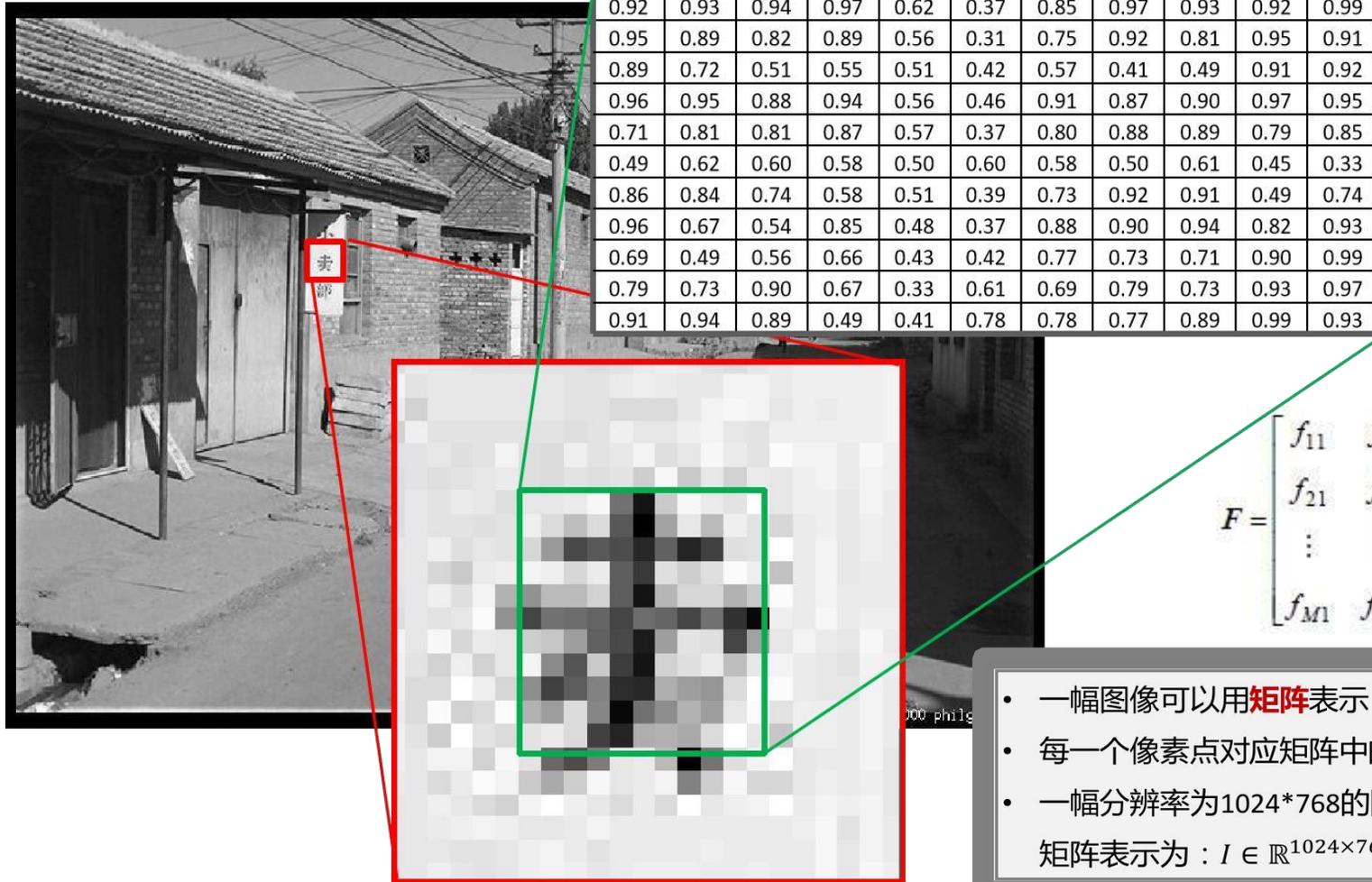
#### 1. 矩阵表示

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

#### 2. 传统表示形式

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

# 2.3 图像取样和量化



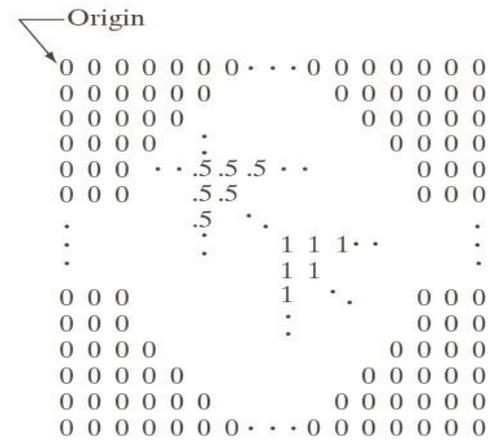
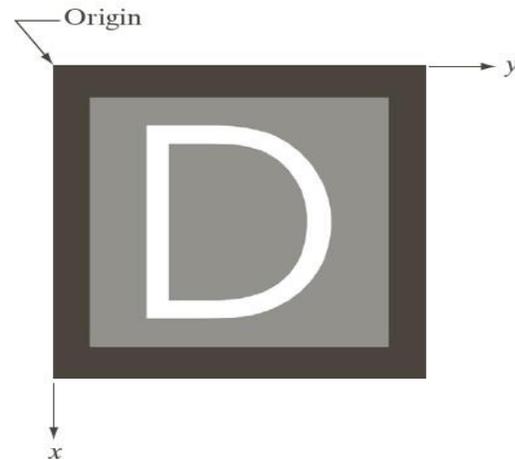
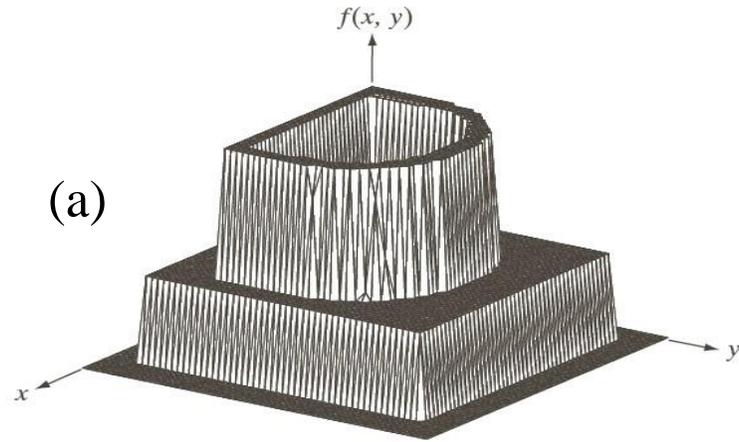
0.92	0.93	0.94	0.97	0.62	0.37	0.85	0.97	0.93	0.92	0.99
0.95	0.89	0.82	0.89	0.56	0.31	0.75	0.92	0.81	0.95	0.91
0.89	0.72	0.51	0.55	0.51	0.42	0.57	0.41	0.49	0.91	0.92
0.96	0.95	0.88	0.94	0.56	0.46	0.91	0.87	0.90	0.97	0.95
0.71	0.81	0.81	0.87	0.57	0.37	0.80	0.88	0.89	0.79	0.85
0.49	0.62	0.60	0.58	0.50	0.60	0.58	0.50	0.61	0.45	0.33
0.86	0.84	0.74	0.58	0.51	0.39	0.73	0.92	0.91	0.49	0.74
0.96	0.67	0.54	0.85	0.48	0.37	0.88	0.90	0.94	0.82	0.93
0.69	0.49	0.56	0.66	0.43	0.42	0.77	0.73	0.71	0.90	0.99
0.79	0.73	0.90	0.67	0.33	0.61	0.69	0.79	0.73	0.93	0.97
0.91	0.94	0.89	0.49	0.41	0.78	0.78	0.77	0.89	0.99	0.93

$$F = \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & \dots & f_{1N} \\ f_{21} & f_{22} & \dots & f_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f_{M1} & f_{M2} & \dots & f_{MN} \end{bmatrix}$$

- 一幅图像可以用**矩阵**表示；
- 每一个像素点对应矩阵中的一个元素。
- 一幅分辨率为1024\*768的图像，对应的矩阵表示为： $I \in \mathbb{R}^{1024 \times 768}$

# 2.3 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)

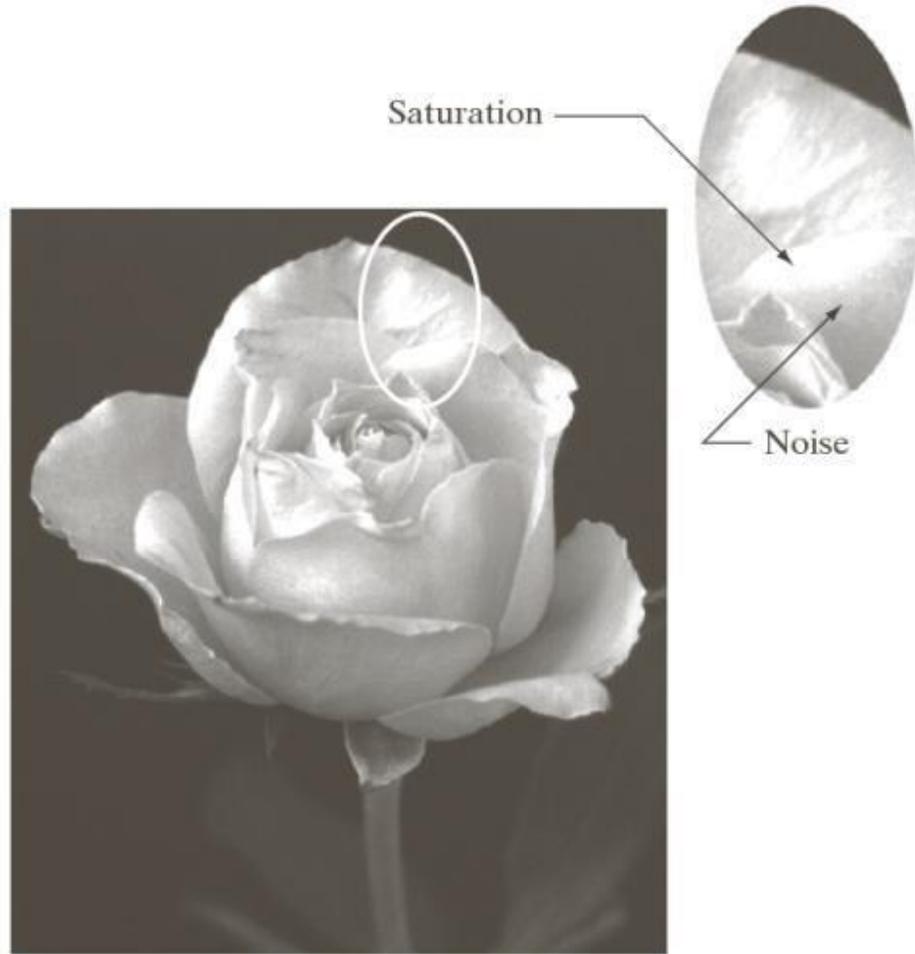


(b)

(c)

## 2.3 图像取样和量化

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。





## 2.3 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：

$$b = N^2k$$

$N/k$	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



## 2.3 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。例如，举一个质量概念，报纸用75dpi的分辨率来印刷，杂志是133dpi，光鲜的小册子是175dpi，您正在看的书是以2044dpi印刷的。空间分辨率的度量必须针对空间单位来规定才有意义。

## 2.3 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。



## 2.3 图像取样和量化

- 图像空间分辨率变化所产生的效果 (515x512~16x16)

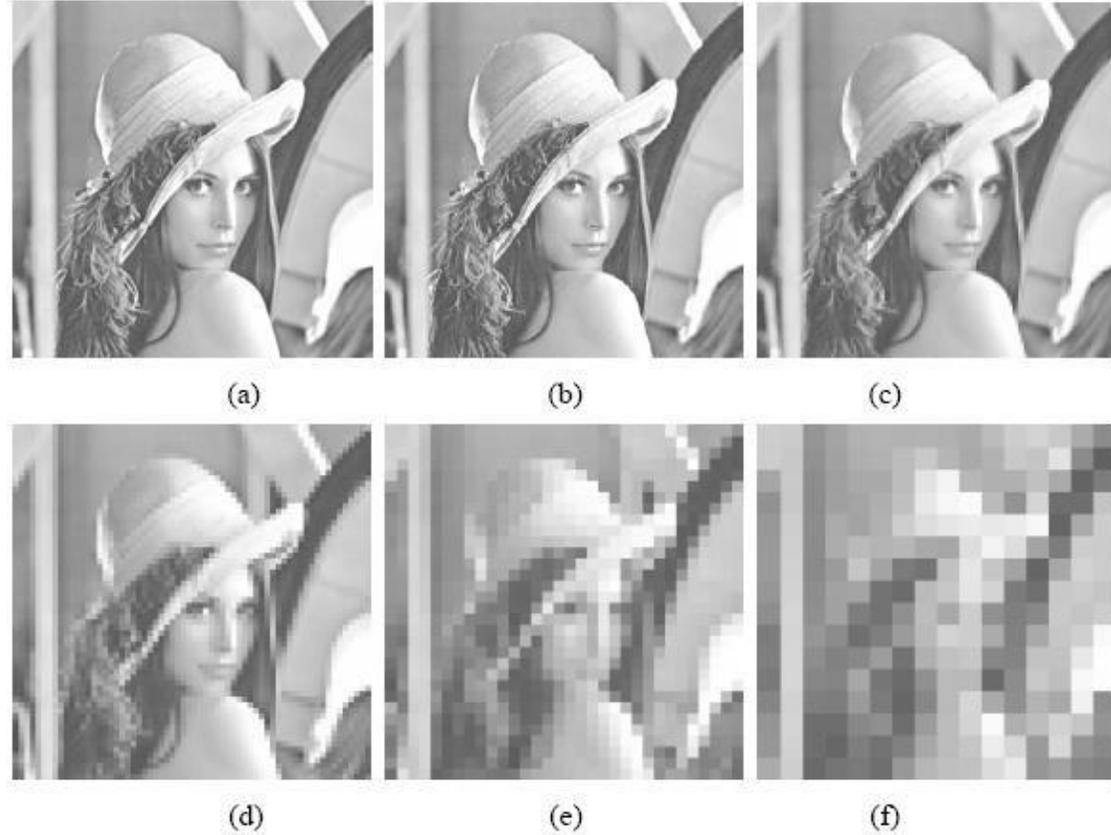


图 2.4.2 图像空间分辨率变化所产生的效果

## □ 视网膜分辨率



### | iPhone的“视网膜屏幕”

在iPhone 4发布时，苹果在3.5英寸屏幕上放置了960 x 640像素，该屏幕的像素密度达到330 PPI。

乔布斯说：“当你拿着离你10-12英寸远的东西时，只要像素密度达到300 PPI，你的视网膜就无法区分像素。这意味着在这种情况下，提高分辨率成为不必要的成本。

这是苹果最初对“视网膜屏”的定义，iPhone 4屏幕的像素密度也达到了326ppi。当时，Android手机厂商因为乔布斯的这个概念，被迫把所有不符合视网膜屏标准的720P都换成了1080P。随后，当苹果从LCD显示器转向OLED时，像素密度增加到450 PPI，这就是它直到今天使用的像素密度。

## 小米、华为、魅族纷纷放弃2k屏，2k屏真的没有未来吗？

原创 2016-02-03 10:54 · 雷科技

## 小米12放弃2k屏，放弃高像素，小米终于不再拼参数了！

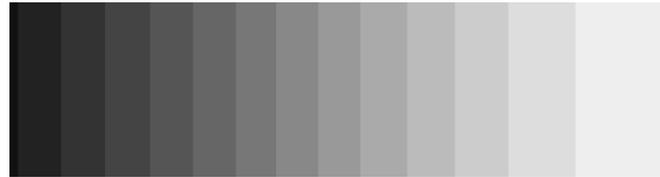
2021-12-25 17:33



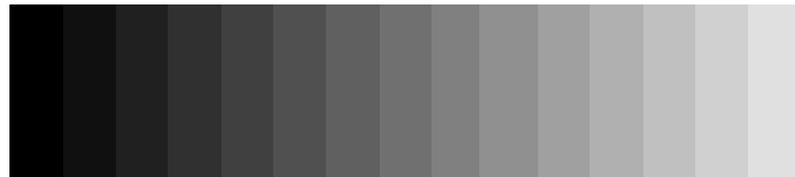
## 2.3 图像取样和量化

- 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。

**256级灰度**



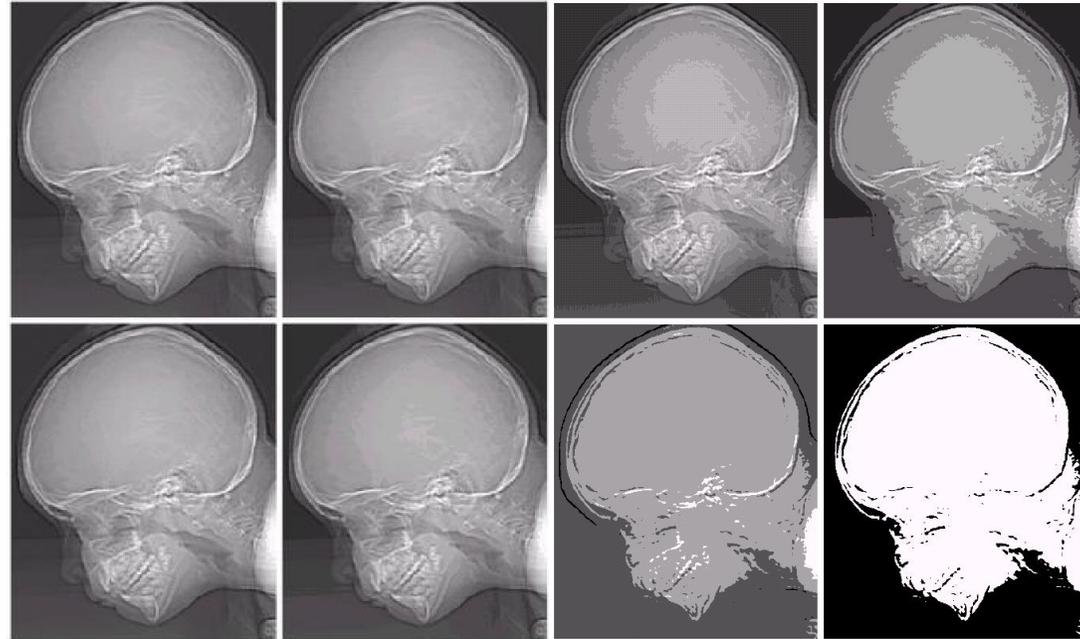
**16级灰度**



## 2.3 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 $452 \times 374$ ，分别以256, 128, 64, 32, 16, 8, 4, 2的灰度级递减

## 2.3 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

## 2.3 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

## 2.3 图像取样和量化

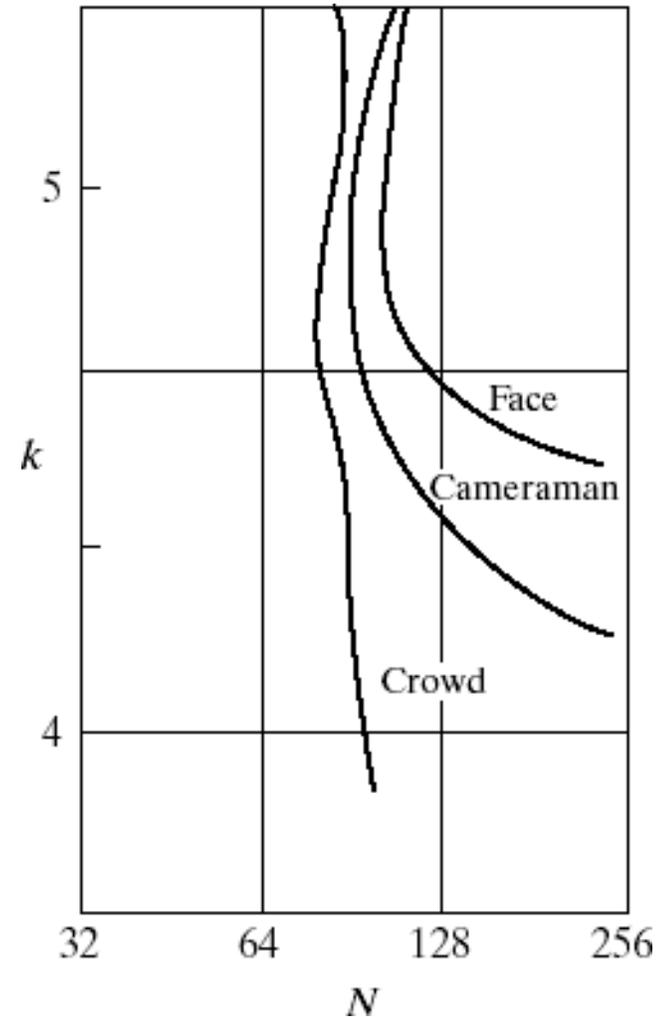
等偏爱曲线

(Isopreference curve):

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。



## 2.3 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



## 2.3 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.  $N \times k$ 为常数的图像主观看起来可以有较大的差异。

## 2.3 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。

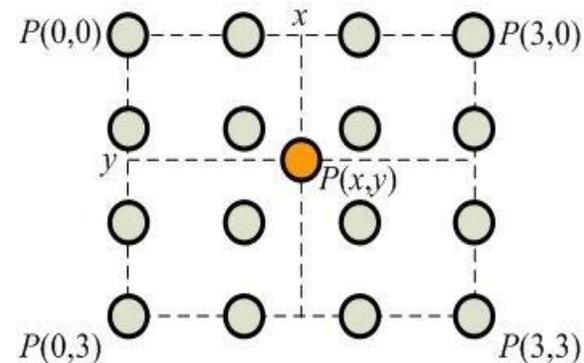
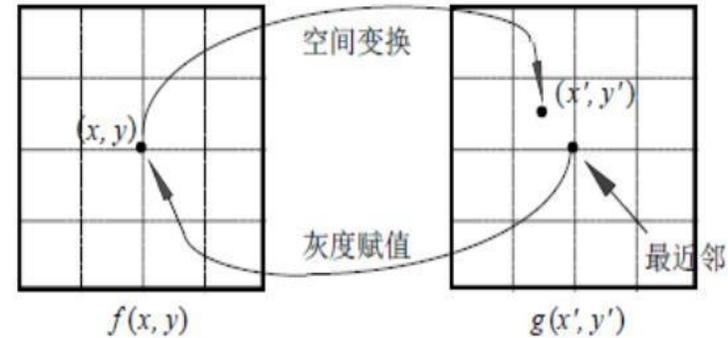
#### ➤ 最邻近内插

#### ➤ 双线性内插

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

#### ➤ 双三次内插

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



## 2.3 图像取样和量化

### 邻域内插法



a b c  
d e f

**FIGURE 2.25** Top row: images zoomed from  $128 \times 128$ ,  $64 \times 64$ , and  $32 \times 32$  pixels to  $1024 \times 1024$  pixels, using nearest neighbor gray-level interpolation. Bottom row: same sequence, but using bilinear interpolation.

### 双线性内插法

## 2.3 图像取样和量化

邻域内插法



双线性内插法





# 第2章 数字图像基础

---

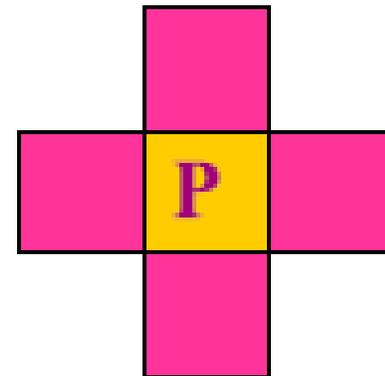
1. 视觉感知要素
  2. 光和电磁波谱
  3. 图像感知和获取
  4. 像素间的基本关系
  5. 图像基本变换
-

## 2.4 像素间的基本关系

### □ 相邻像素

#### ◆ 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。



## 2.4 像素间的基本关系

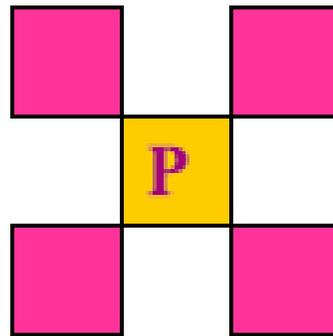
### ◆ 对角邻域

坐标分别为:  $(x+1, y+1)$ ,  $(x-1, y-1)$ ,  $(x-1, y+1)$ ,  $(x+1, y-1)$ ,

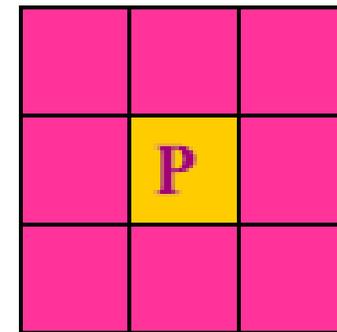
用 $N_D(p)$ 表示。

### ◆ 8邻域

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



(a) 对角邻域



(b) 8邻域



1. 视觉感知要素
2. 光和电磁波谱
3. 图像感知和获取
4. 像素间的基本关系
5. 图像基本变换

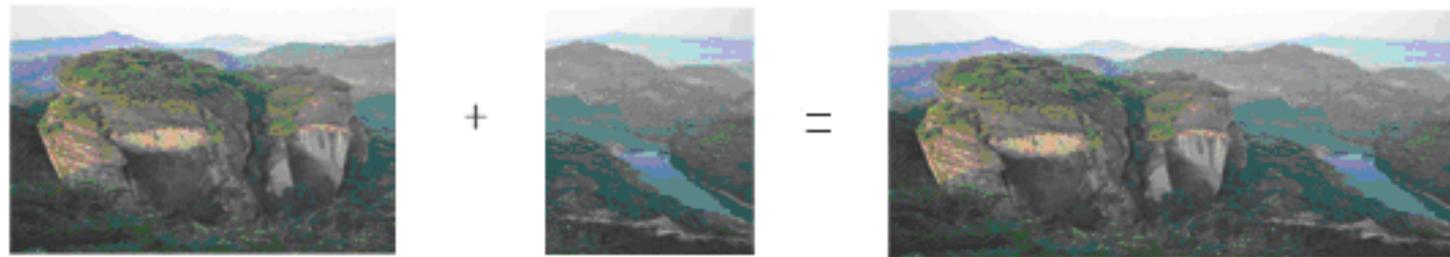
## 2.5 图像基本变换

- **数值运算**

- 加减乘除等
- 图像模糊、去噪等

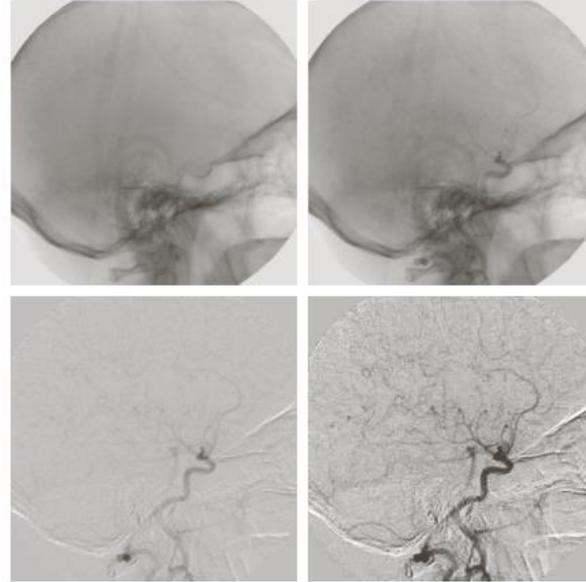
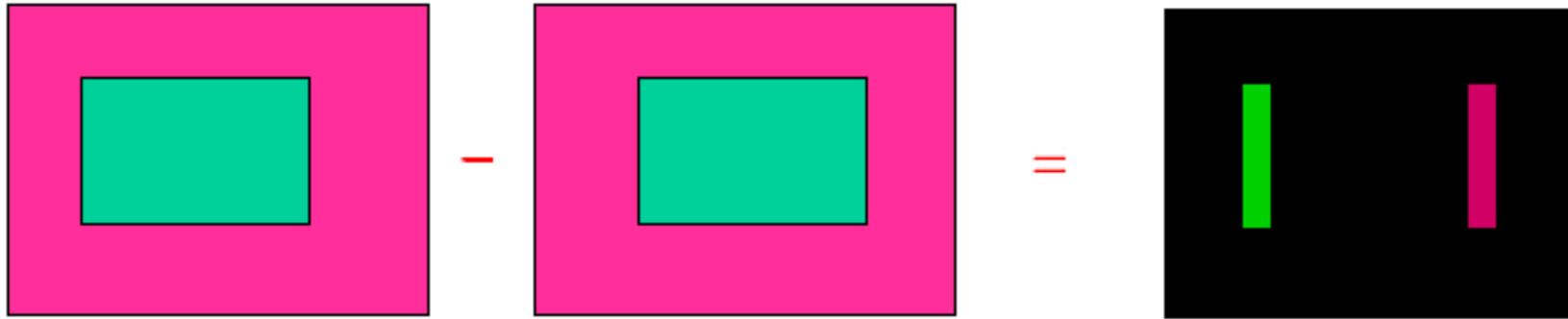
### Matlab Code

```
f = imread('1.jpg');  
g = imread('2.jpg');  
z = f + g;  
imwrite(z, 'res.jpg');  
imshow(z)
```



## 2.5 图像基本变换

减法



## 2.5 图像基本变换

### 乘法

乘法的定义： $C(x,y) = A(x,y) * B(x,y)$ 。

主要应用举例：图像的局部显示。用二值蒙板图像与原图像做乘法。此种图像处理操作常被称为“**抠图**”或“**蒙板**”操作。



×



=



图像的局部显示

## 2.5 图像基本变换



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.)

So mask is 0 (black) where we want to mask an image.



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).



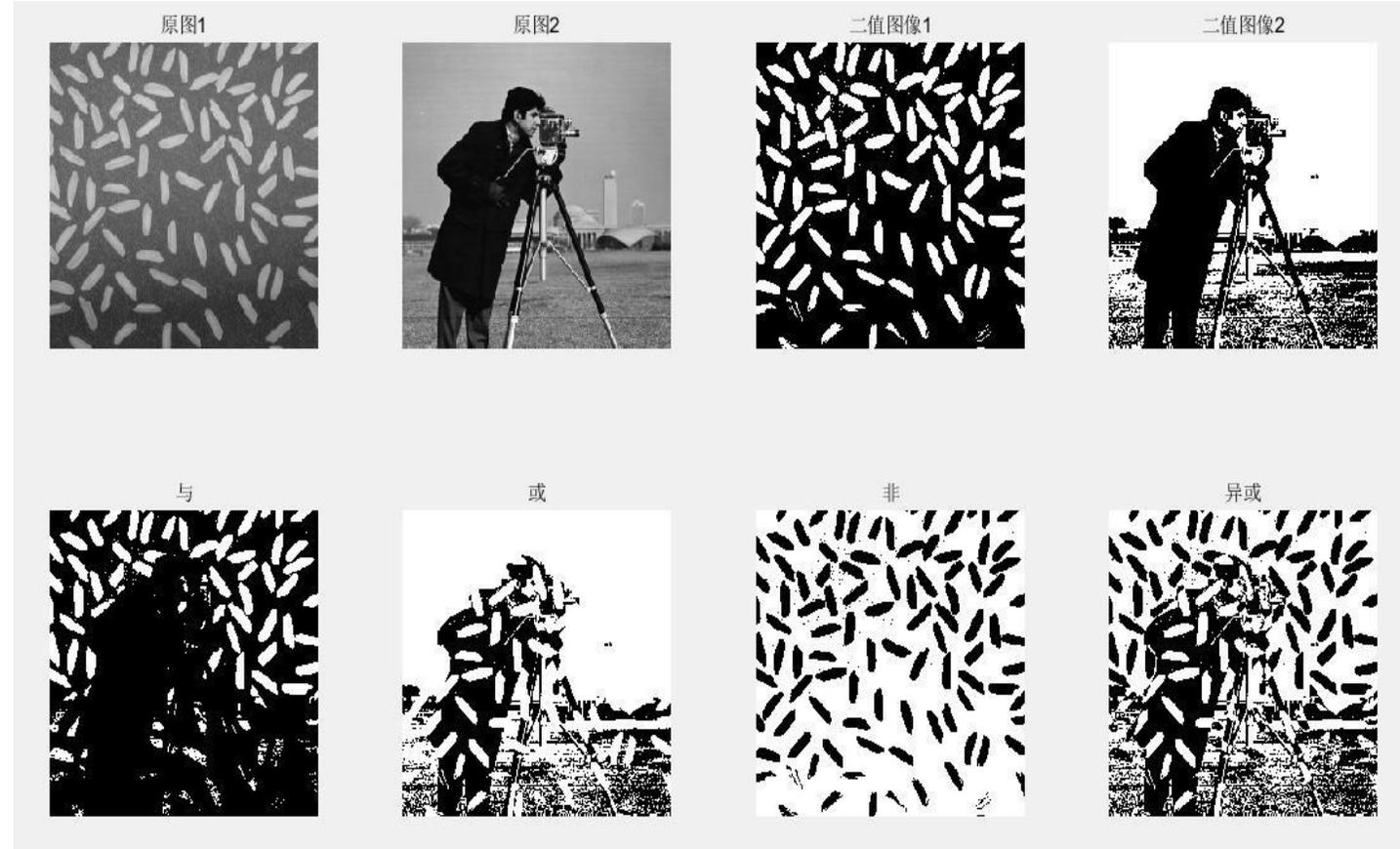
a b c

**FIGURE 2.33** Shading correction. (a) Shaded test pattern. (b) Estimated shading pattern. (c) Product of (a) by the reciprocal of (b). (See Section 3.5 for a discussion of how (b) was estimated.)

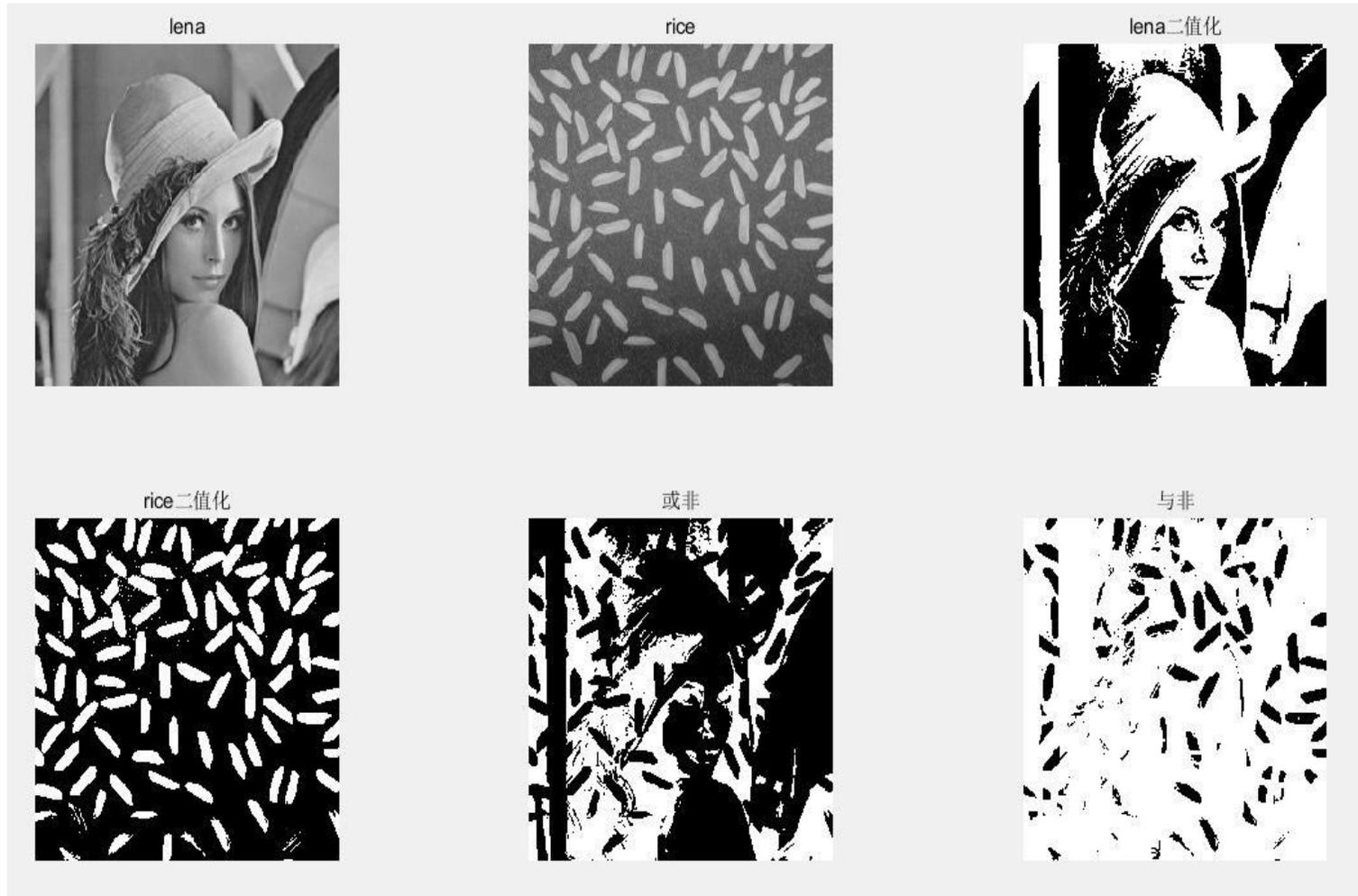
## 2.5 图像基本变换

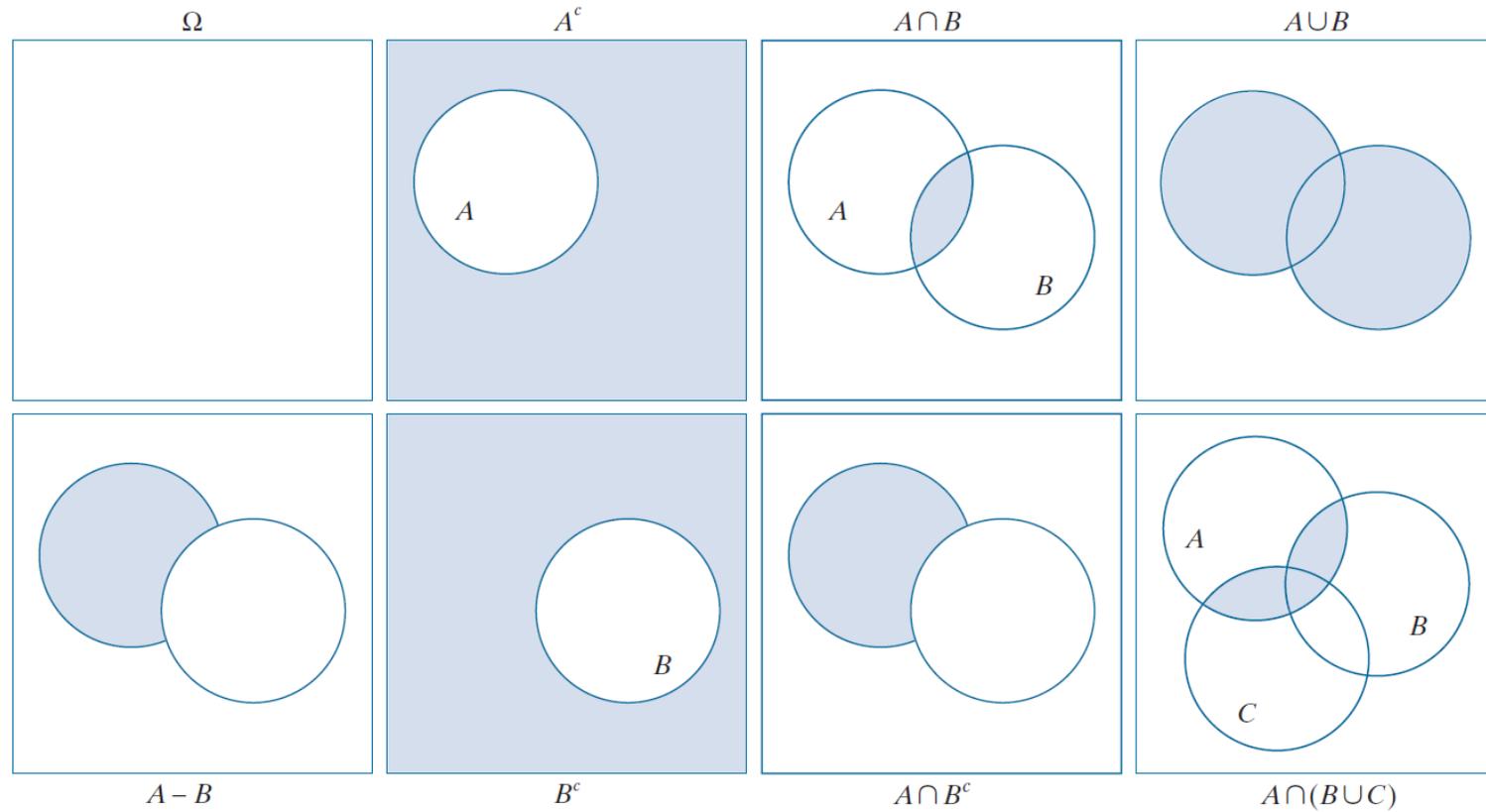
- 逻辑运算

- 与/交
- 或/并
- 非/补
- 或非
- 与非



## 2.5 图像基本变换





a	b	c	d
e	f	g	h

**FIGURE 2.35** Venn diagrams corresponding to some of the set operations in Table 2.1. The results of the operations, such as  $A^c$ , are shown shaded. Figures (e) and (g) are the same, proving via Venn diagrams that  $A - B = A \cap B^c$  [see Eq. (2-40)].

## 2.5 图像基本变换

### 求反

求反的定义： $g(x,y) = 255 - f(x,y)$ 。

主要应用举例：获得彩色图片的底片，对于黑白图像，还可获得区别于背景的、可恢复的图形。

255-



=

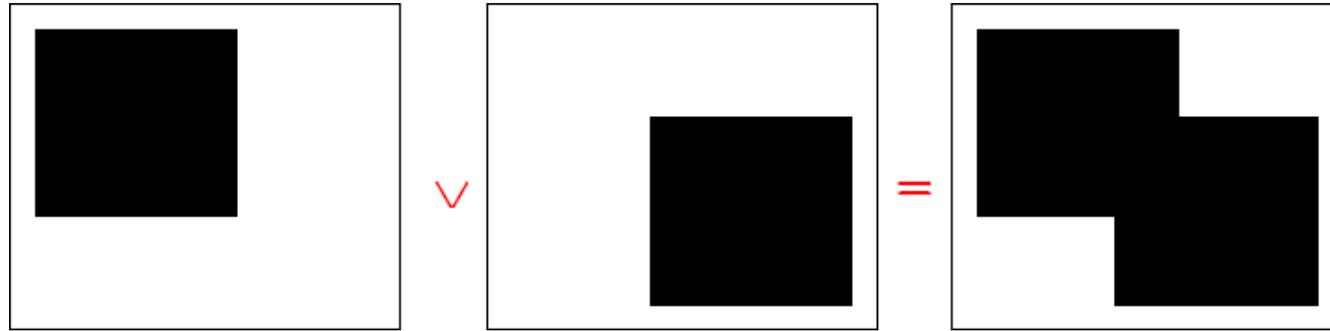


## 2.5 图像基本变换

或运算

或运算的定义:  $g(x,y) = f(x,y) \vee h(x,y)$ 。

主要应用举例: 合并子图像。



与运算

与运算的定义:  $g(x,y) = f(x,y) \wedge h(x,y)$ 。

主要应用举例: 求两个子图像的相交子图



## 2.5 图像基本变换

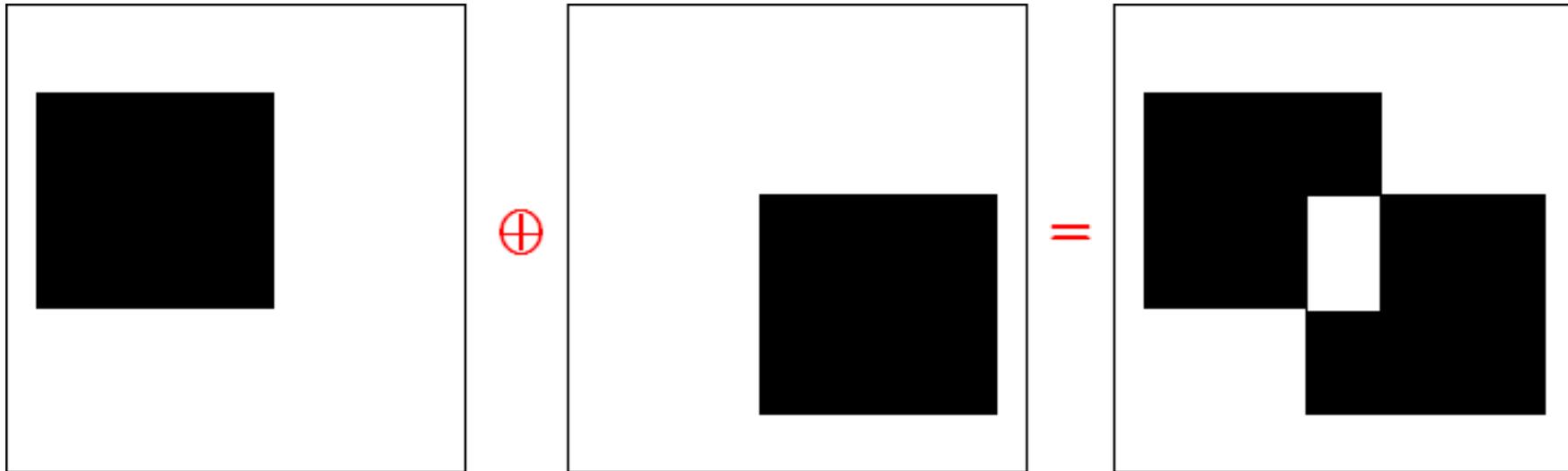
异或

$$1 + 1 = 1$$

$$0 + 1 = 0$$

$$0 + 0 = 1$$

主要应用举例：获得相交子图像,不显示两个图像重合的部分。



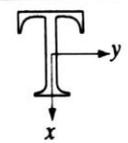
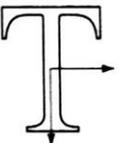
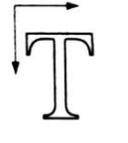
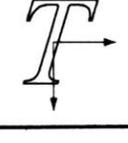
# 2.5 图像基本变换

## 基本坐标变换

- 坐标变换可借助矩阵写为：

$$\mathbf{v}' = \mathbf{T}\mathbf{v}$$

表 2.2 基于式(2.6-23)的仿射变换

变换名称	仿射矩阵 $T$	坐标公式	例子
恒等变换	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$x = v$ $y = w$	
尺度变换	$\begin{bmatrix} c_x & 0 & 0 \\ 0 & c_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$x = c_x v$ $y = c_y w$	
旋转变换	$\begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$x = v \cos \theta - w \sin \theta$ $y = v \sin \theta + w \cos \theta$	
平移变换	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ t_x & t_y & 1 \end{bmatrix}$	$x = v + t_x$ $y = w + t_y$	
(垂直) 偏移变换	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ s_v & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$x = v s_v + w$ $y = w$	
(水平) 偏移变换	$\begin{bmatrix} 1 & s_h & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$x = v$ $y = s_h v + w$	

# 2.5 图像基本变换

- 基本坐标变换

- 平移变换矩阵

平移变换的逆矩阵

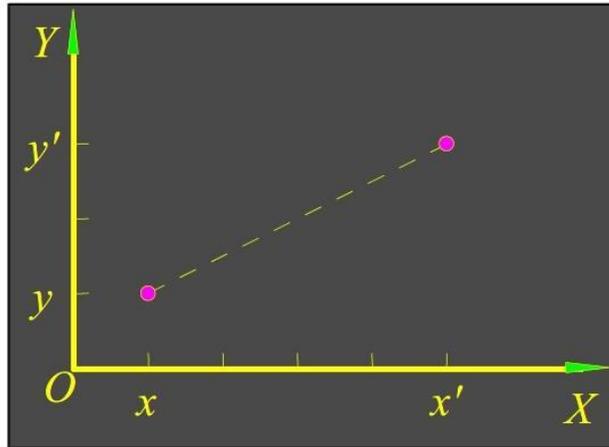
$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & t_x \\ 0 & 1 & t_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -t_x \\ 0 & 1 & -t_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$x' = x + t_x$$

$$y' = y + t_y$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 4 \\ 0 & 1 & 2 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 5 \\ 3 \\ 1 \end{bmatrix}$$



原图像



平移后



# 2.5 图像基本变换

- 基本坐标变换

- 尺度变换矩阵

尺度变换的逆矩阵

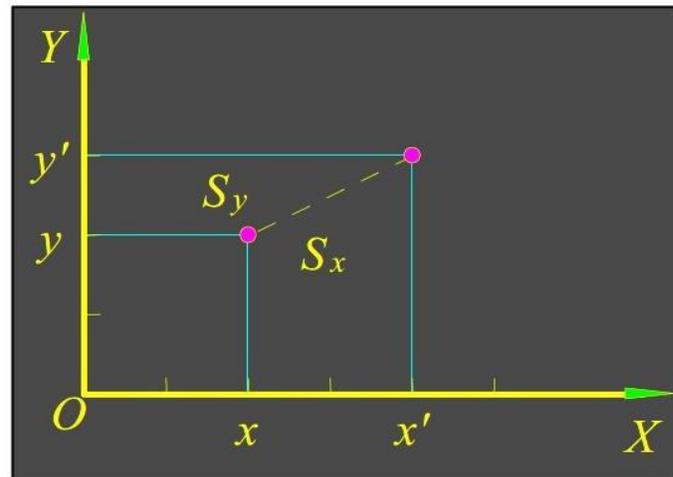
$$S = \begin{bmatrix} s_x & 0 & t_x \\ 0 & s_y & t_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$S^{-1} = \begin{bmatrix} 1/s_x & 0 & t_x \\ 0 & 1/s_y & t_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

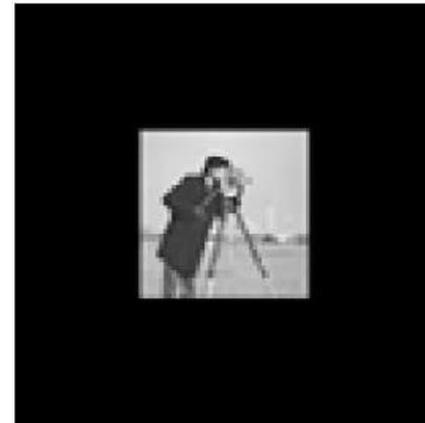
$$x' = c_x x$$

$$y' = c_y y$$

$$\begin{bmatrix} 2 & 0 & 0 \\ 0 & 1.5 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 2 \\ 2 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4 \\ 3 \\ 1 \end{bmatrix}$$



$$S = \begin{bmatrix} S_x & 0 & 0 \\ 0 & S_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/2 & 0 & 0 \\ 0 & 1/2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$



## 2.5 图像基本变换

- **图像镜像**

- 镜像变换又分为水平镜像和竖直镜像。
  - 水平镜像即将图像左半部分和右半部分以图像竖直中轴线为中心轴进行对换；
  - 竖直镜像则是将图像上半部分和下半部分以图像水平中轴线为中心轴进行对换。

原图像



水平镜像



竖直镜像



## 2.5 图像基本变换

### • 转置变换

- 图像转置是指将图像像素的x坐标和y坐标互换，图像的大小会随之改变：高度和宽度将互换

$$[x_1 \ y_1 \ 1] = [x_0 \ y_0 \ 1] \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = [y_0 \ x_0 \ 1]$$

显然，转置矩阵  $\begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$  的逆矩阵仍为其自身。

原图像



图像转置



# 2.5 图像基本变换

- 基本坐标变换

- 旋转变换矩阵

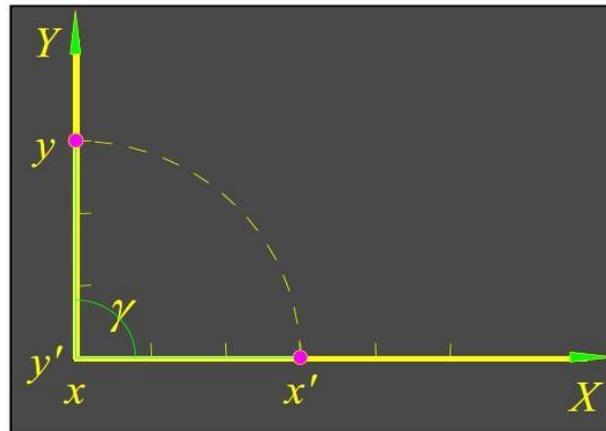
旋转变换的逆矩阵

$$R = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad R^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

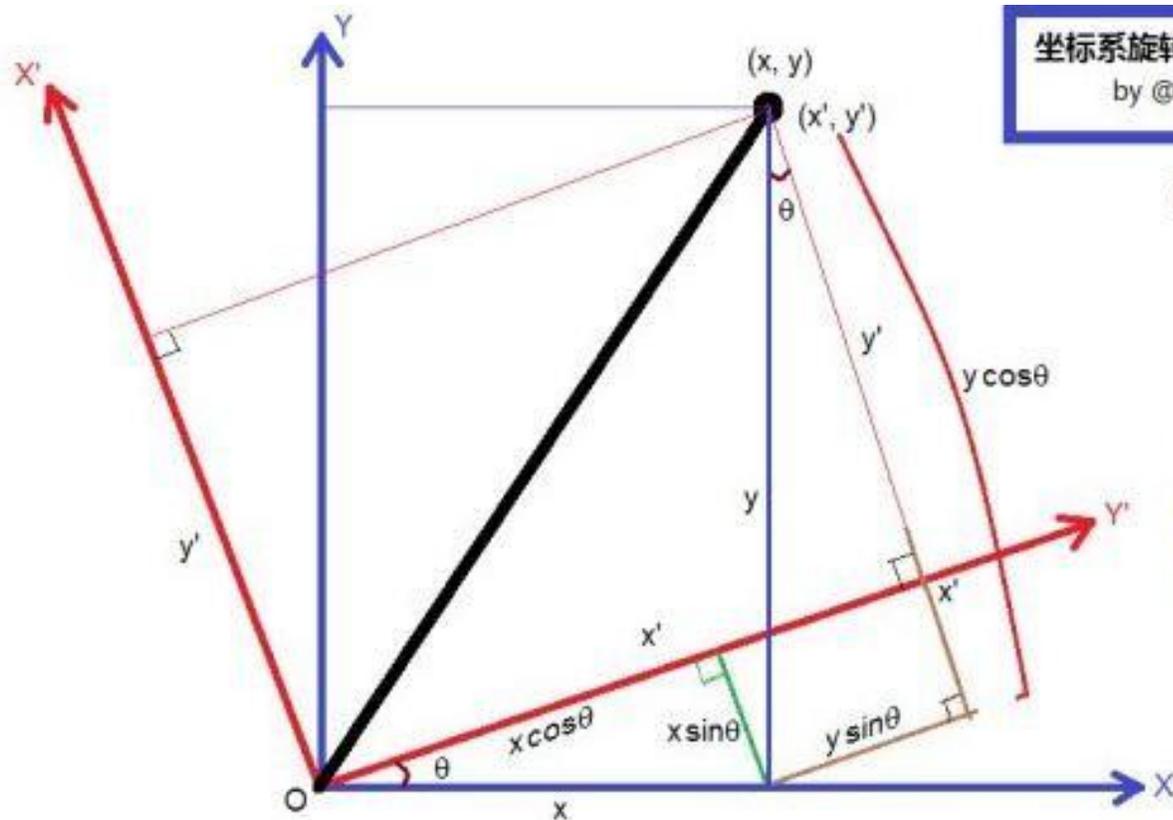
$$x' = x \cos \theta - y \sin \theta$$

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

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 3 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$



## 2.5 图像基本变换



### 坐标系旋转变换公式图解

by @abada张宏兵

直角坐标系旋转  $\theta$  角后，新旧坐标变换公式：

由图显然可知：

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

$$y' = y \cos \theta - x \sin \theta$$

这里的关键是用已知角做出直角三角形，并坚持用已知边（这里是  $x$  和  $y$ ）做斜边，可方便计算，一目了然。

（参见笔者“两角和的正弦和余弦公式的最简单图解”）

## 2.5 图像基本变换

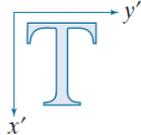
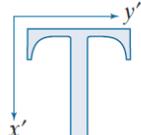
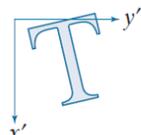
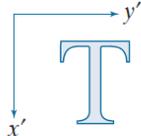
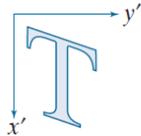
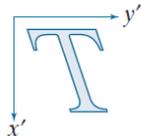
- 基本坐标变换：旋转变换

$$\gamma = -45^\circ$$

$$R = \begin{bmatrix} \sqrt{2}/2 & -\sqrt{2}/2 & 0 \\ \sqrt{2}/2 & \sqrt{2}/2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$



**TABLE 2.3**  
Affine  
transformations  
based on  
Eq. (2-45).

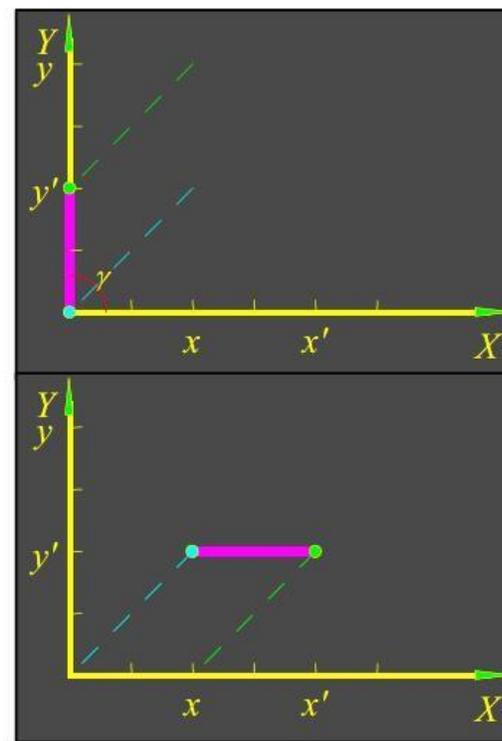
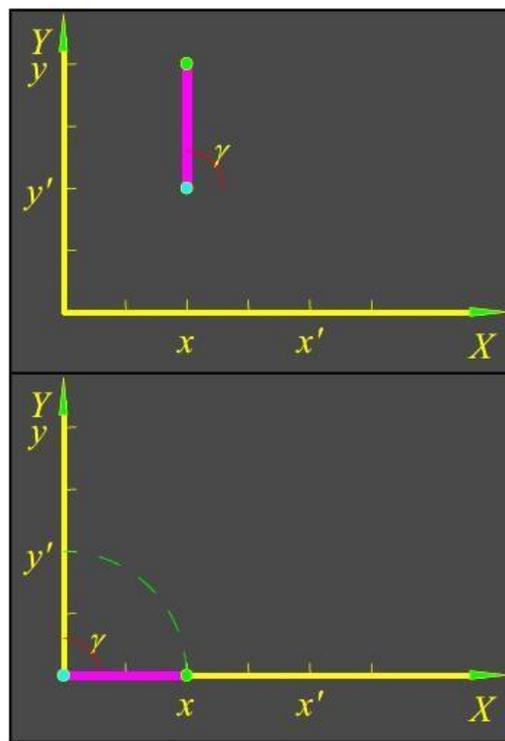
Transformation Name	Affine Matrix, A	Coordinate Equations	Example
Identity	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{aligned} x' &= x \\ y' &= y \end{aligned}$	
Scaling/Reflection (For reflection, set one scaling factor to -1 and the other to 0)	$\begin{bmatrix} c_x & 0 & 0 \\ 0 & c_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{aligned} x' &= c_x x \\ y' &= c_y y \end{aligned}$	
Rotation (about the origin)	$\begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{aligned} x' &= x \cos \theta - y \sin \theta \\ y' &= x \sin \theta + y \cos \theta \end{aligned}$	
Translation	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & t_x \\ 0 & 1 & t_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{aligned} x' &= x + t_x \\ y' &= y + t_y \end{aligned}$	
Shear (vertical)	$\begin{bmatrix} 1 & s_v & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{aligned} x' &= x + s_v y \\ y' &= y \end{aligned}$	
Shear (horizontal)	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ s_h & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{aligned} x' &= x \\ y' &= s_h x + y \end{aligned}$	

## 2.5 图像基本变换

- 基本坐标变换：旋转变换

旋转轴不在原点

绕非原点  
旋转  
=  
平移至原点  
+  
绕原点旋转  
+  
平移回去



## 2.5 图像基本变换

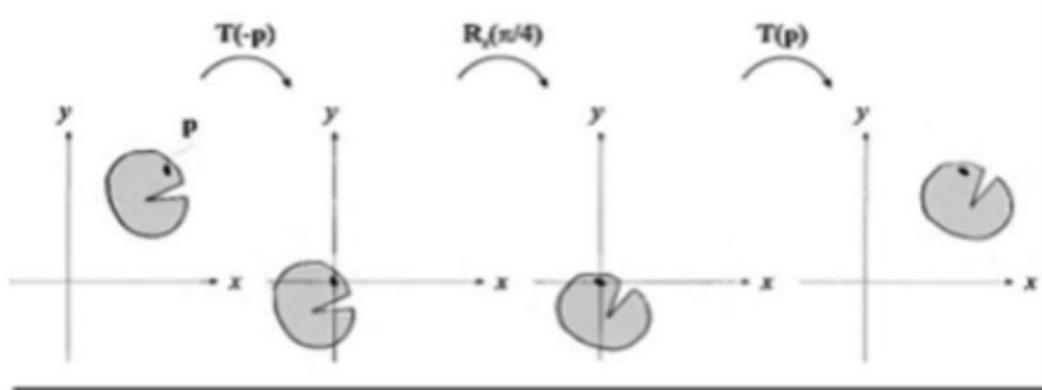
- 基本坐标变换：变换级联**

对一个坐标为 $\mathbf{v}$ 的点的平移、放缩、绕Z轴旋转变换（级联起来）可表示为：

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

等价于用单个变换矩阵 $\mathbf{A}$ 对点 $\mathbf{v}$ 进行变换

这些矩阵的运算次序一般不可互换



$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 2 \\ 0 & 1 & 4 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$S = \begin{bmatrix} 3 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{v} = [1 \ 2 \ 1]^T$$

$$\mathbf{v}'_{ST} = [9 \ 12 \ 1]^T$$

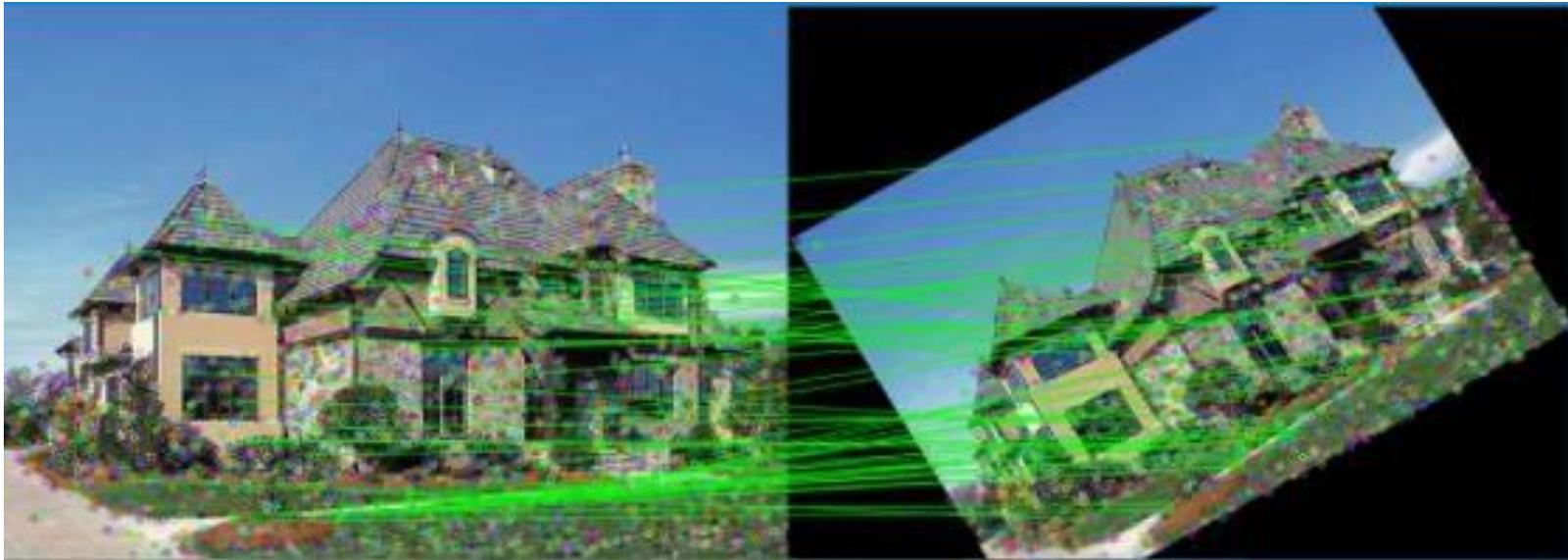
$$\mathbf{v}'_{TS} = [5 \ 8 \ 1]^T$$

先平移后放缩  $\neq$  先放缩后平移

图4.2 绕指定点P旋转的例子。

## 2.5 图像基本变换

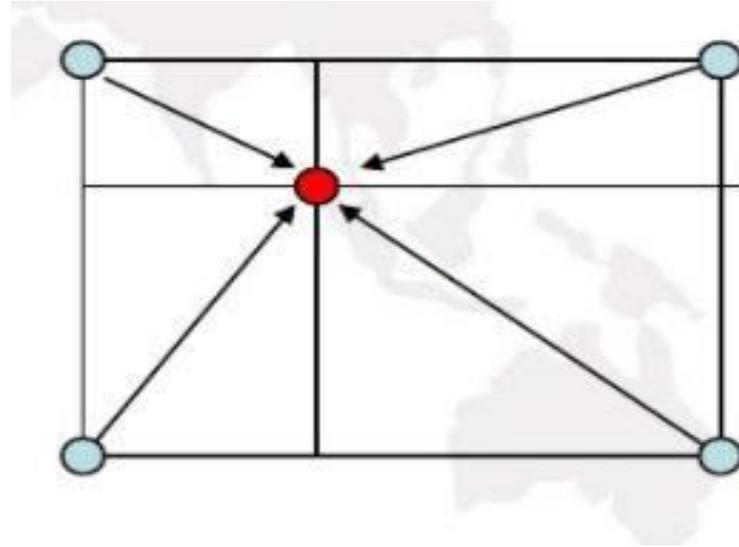
- 几何失真校正
- 两个步骤：
  - 计算空间变换函数
  - 插值填充
- 问题：变换矩阵未知，其参数通过若干已知的匹配对应点后求解得到



## 2.5 图像基本变换

- **问题：为什么需要插值填充？**

- 变换后的坐标  $(x',y')$  可能不是整数，如何取整？
  - 最近邻插值：使用离  $(x',y')$  最近的像素的值，不够精确
  - 双线性插值：使用  $(x',y')$  的4邻域的像素值插值计算



## 2.5 图像基本变换

- 几何失真校正

- 空间变换:** 对图像平面上的像素进行重新排列以恢复像素原空间关系

$$x' = s(x, y)$$

$$s(x, y) = k_1x + k_2y + k_3$$

$$y' = t(x, y)$$

$$t(x, y) = k_4x + k_5y + k_6$$

$$s(x, y) = k_1 + k_2x + k_3y + k_4x^2 + k_5xy + k_6y^2$$

$$t(x, y) = k_7 + k_8x + k_9y + k_{10}x^2 + k_{11}xy + k_{12}y^2$$

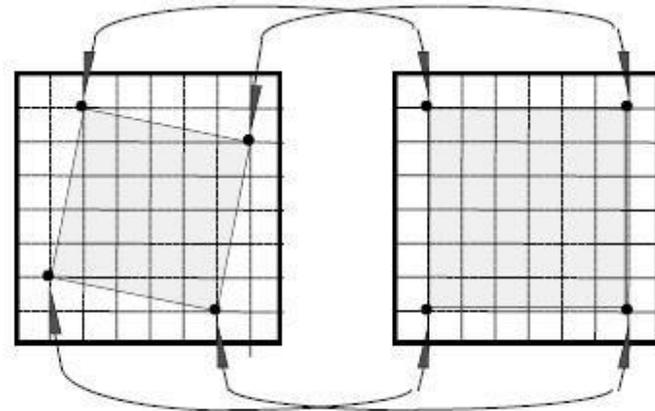


图 2.5.4 失真图和校正图的对应点

- 一个在失真图上的四边形区域和在校正图上与其对应的四边形区域的顶点可作为对应点

## 2.5 图像基本变换

- 几何失真校正

- **灰度插值（最近邻插值/零阶插值）**：对空间变换后的像素赋予相应的灰度值以恢复原位置的灰度值

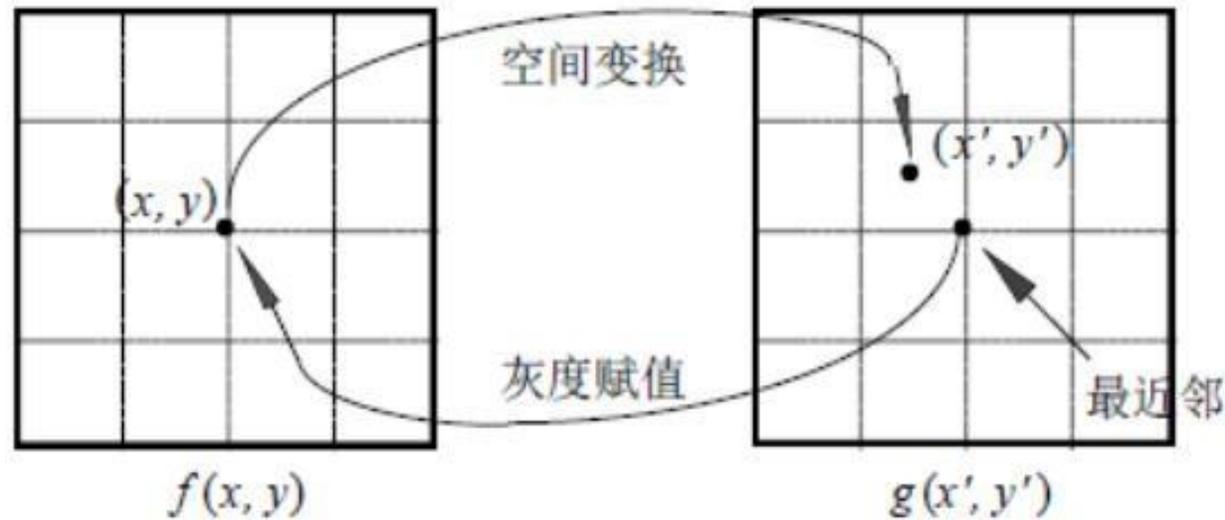


图 2.5.5 灰度插值示意图



THANK YOU



# 数字图像处理 (Digital Image Processing)

王正

Email: [zheng\\_wang@seu.edu.cn](mailto:zheng_wang@seu.edu.cn)  
办公室: 无线谷A5415

**Image  
Processing  
Project Ideas**  
*Beginners*



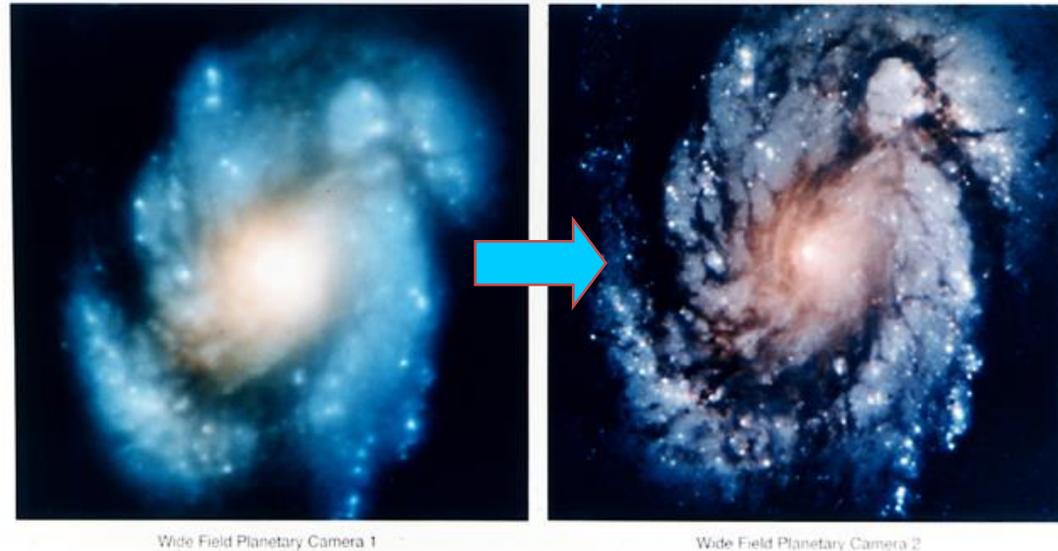
	图像增强	图像复原
技术特点	<ul style="list-style-type: none"> <li>* 不考虑图像降质的原因，只将图像中感兴趣的特征有选择地突出（增强），而衰减其不需要的特征。</li> <li>* 改善后的图像不一定要去逼近原图像。</li> <li>* 主观过程</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* 要考虑图像降质的原因，建立“<b>降质模型</b>”。</li> <li>* 要建立评价复原好坏的<b>客观标准</b>。</li> <li>* 客观过程</li> </ul>



## 改善降质的方法有两种：

根据降质的原因设法进行补偿，称为**图像复原**

不考虑降质的原因，凭借人的感觉和经验，将图像中感兴趣的特征尽量突出出来，而衰减抑制不需要的特征，称为**图像增强**。



图像增强方法从增强的作用域出发，可分为空间域增强和频率域增强两种

### 空间域增强方法

对图像像素进行直接处理

### 频域增强方法

将图像经频域变换后的频谱成分进行处理，然后逆变换获得所需的图像

\*图像增强的通用理论是不存在的

面向问题！





# 第3章 图像变换与空域滤波

---

1. 背景知识
  2. 基本灰度变换
  3. 直方图处理
  4. 空间滤波基础
  5. 空域平滑
  6. 空域锐化
-

# 灰度变换

- 空间域：包含图像像素的简单平面
- 空间域灰度变换

$$g(x, y) = T(f(x, y))$$

$f(x, y)$ ：输入图像

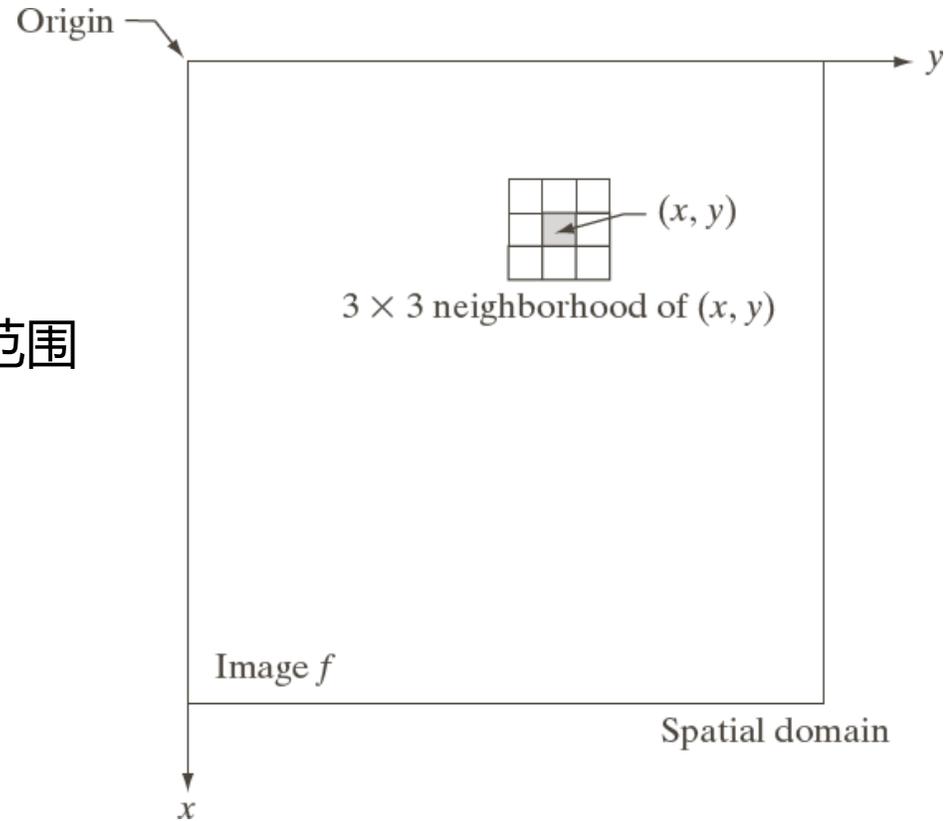
$g(x, y)$ ：输出图像

$T$ ：在点 $(x, y)$ 的邻域上定义的关于 $f$ 的一种算子



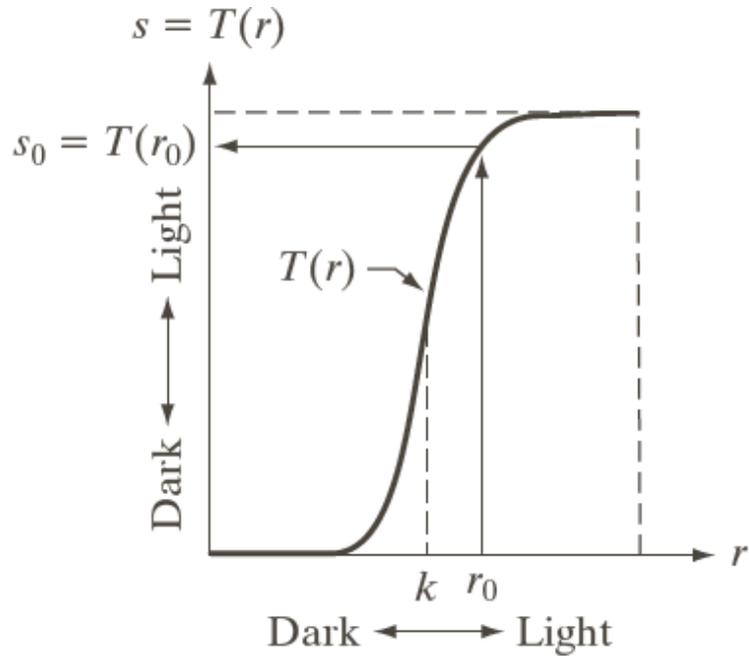
□ 空间滤波邻域

- 决定操作的图像局部范围
- 最小邻域:  $1 \times 1$

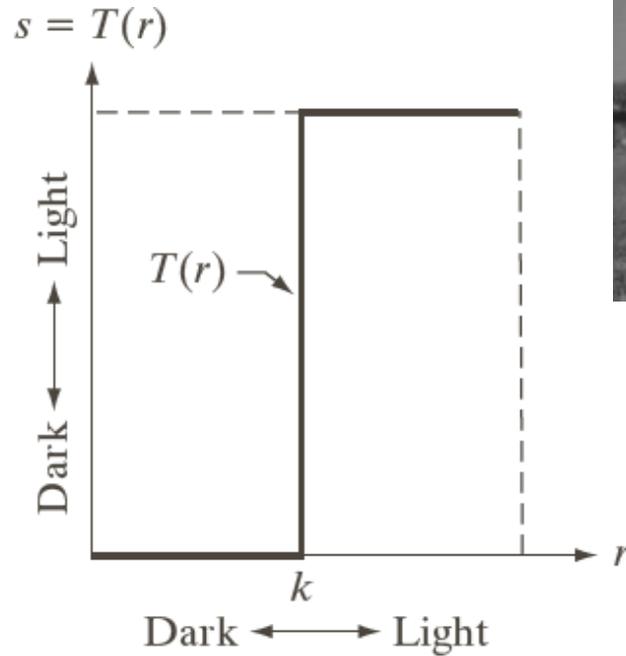


# 灰度变换

## □ 邻域为 $1 \times 1$ 时的灰度变换



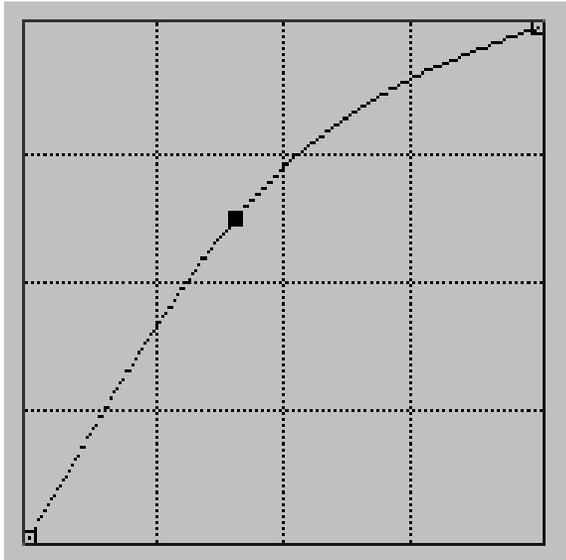
对比度拉伸函数



阈值处理函数



## ➤ 对比度拉伸





# 第3章 图像变换与空域滤波

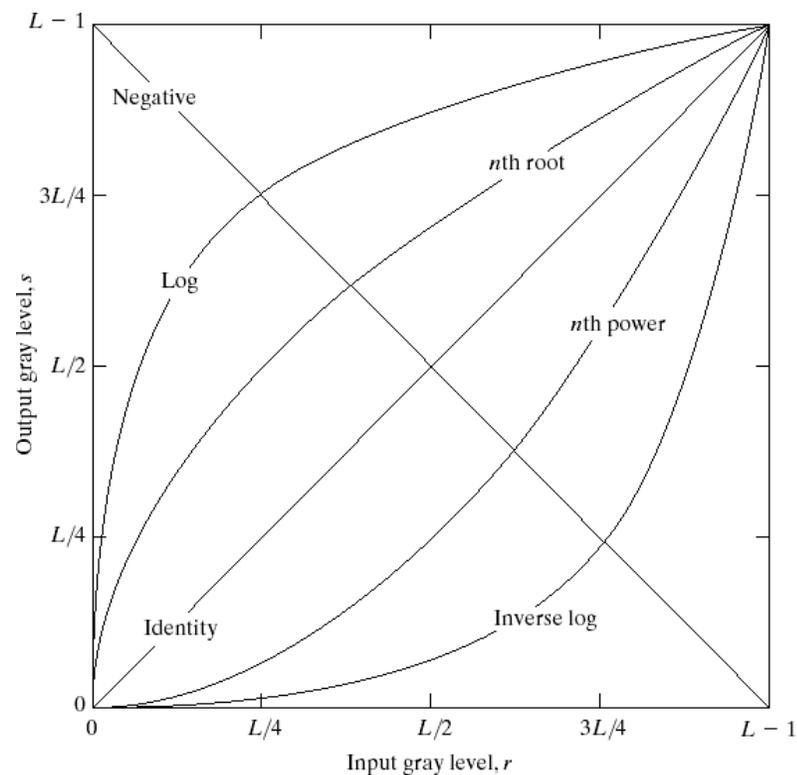
---

1. 背景知识
  2. 基本灰度变换
  3. 直方图处理
  4. 空间滤波基础
  5. 空域平滑
  6. 空域锐化
-

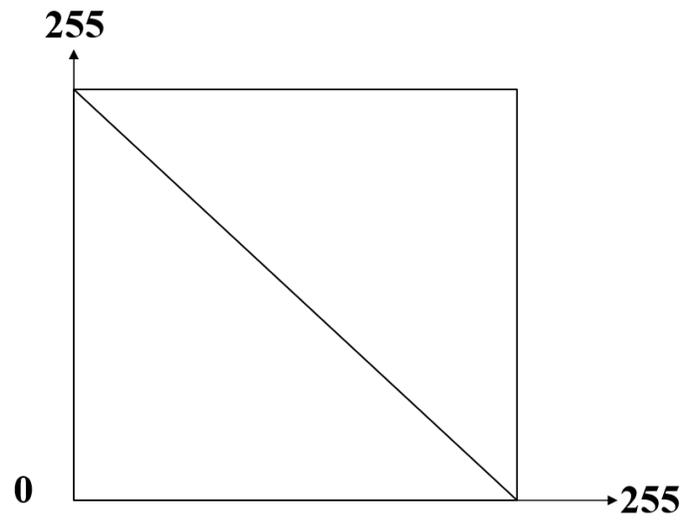
# 常见灰度变换

□ 灰度变换  $s = T(r)$

■  $r$  为数字量且取值有限, 该映射可通过查找表实现

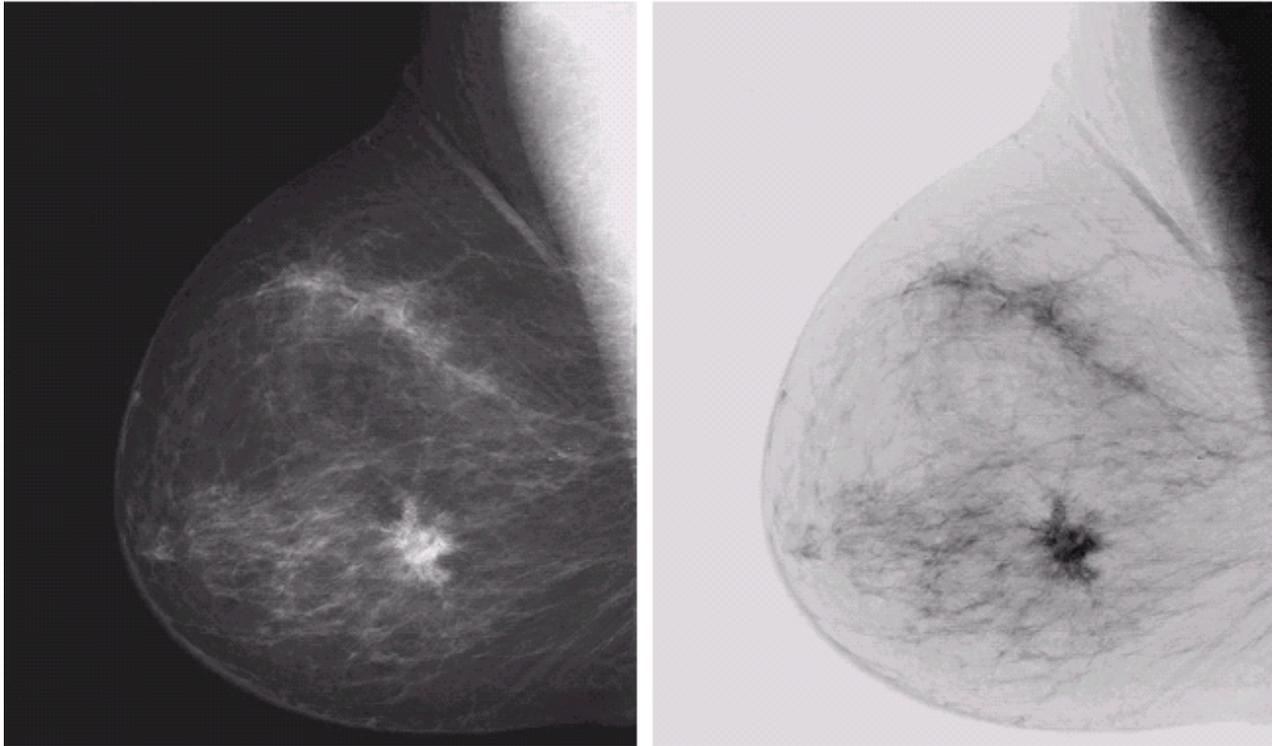


## ➤ 图像求反



# 图象求反

- 灰度变换函数:  $s = L - 1 - r$ 
  - 适用于增强嵌入图像暗色区域中的白色或灰色细节



a b

**FIGURE 3.4**

(a) Original digital mammogram.  
(b) Negative image obtained using the negative transformation in Eq. (3.2-1).  
(Courtesy of G.E. Medical Systems.)

# 对数变换

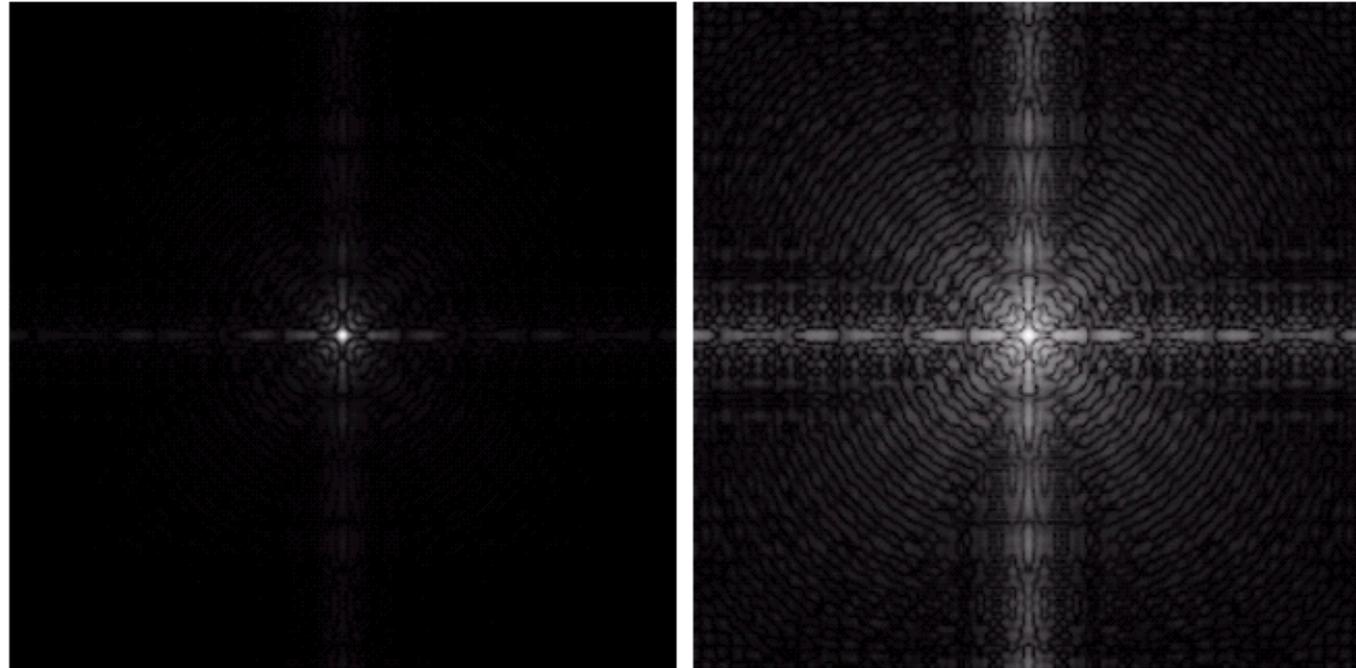
- 灰度变换函数:  $s = c \cdot \log(1 + r)$

a b

**FIGURE 3.5**

(a) Fourier spectrum.

(b) Result of applying the log transformation given in Eq. (3.2-2) with  $c = 1$ .

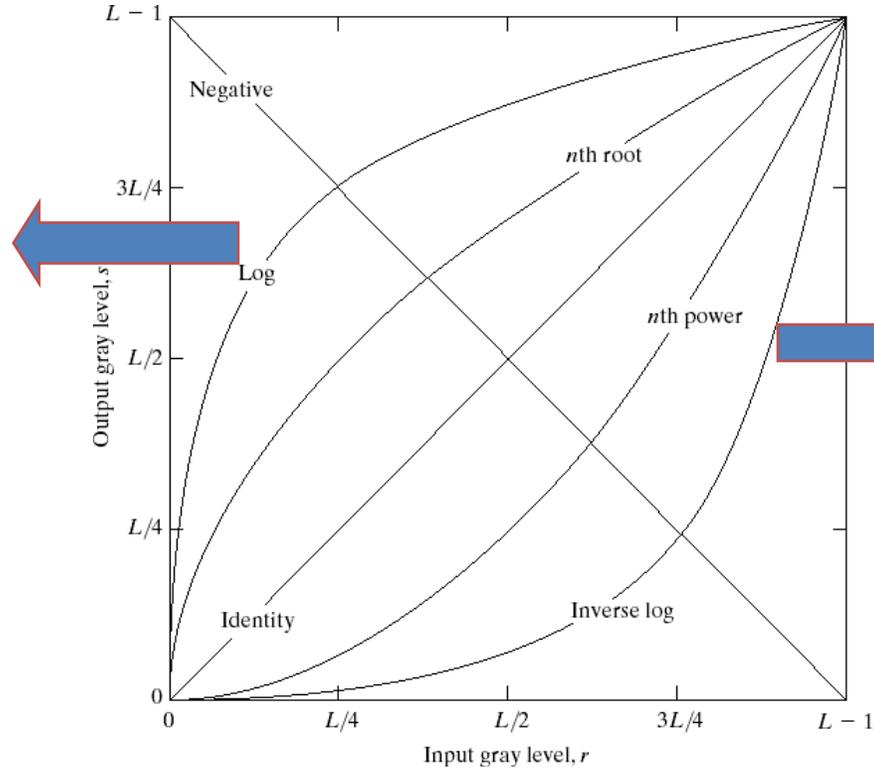


# 对数变换

□ 灰度变换函数:  $s = c \cdot \log(1 + r)$

将输入范围较窄  
的低灰度值映射  
为输出中范围较  
宽的灰度级

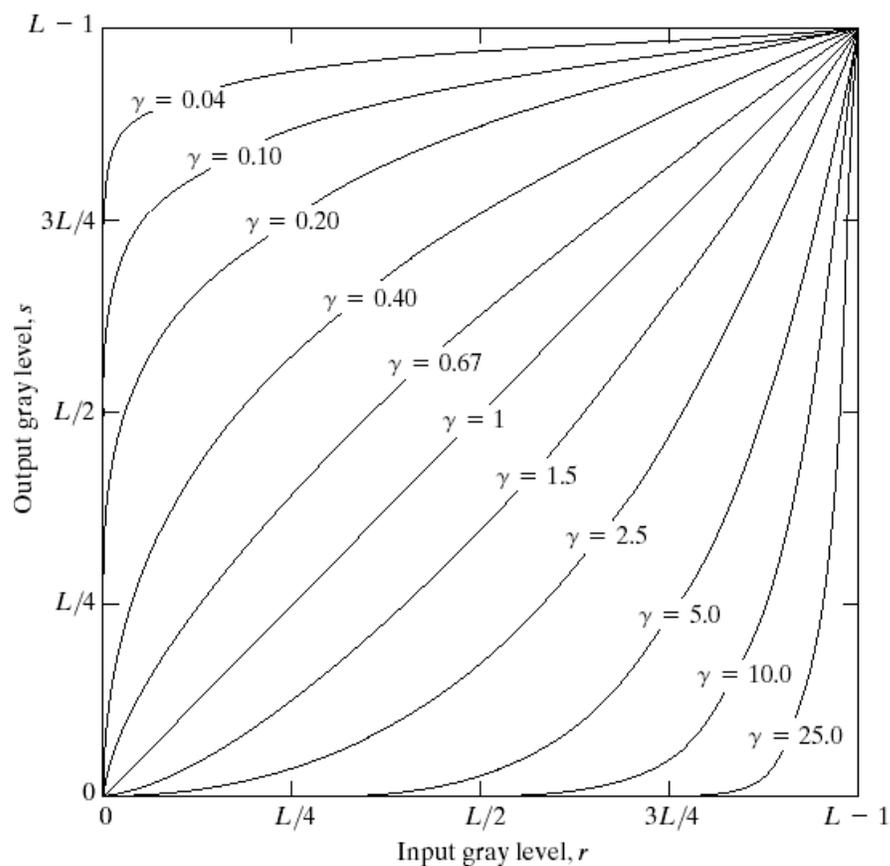
将输入范围较宽  
的中高灰度值映  
射为输出中范围  
较窄的灰度级



反向操作

# 常见灰度变换 - 指数变换

灰度变换函数:  $s = cr^\gamma$



**FIGURE 3.6** Plots of the equation  $s = cr^\gamma$  for various values of  $\gamma$  ( $c = 1$  in all cases).

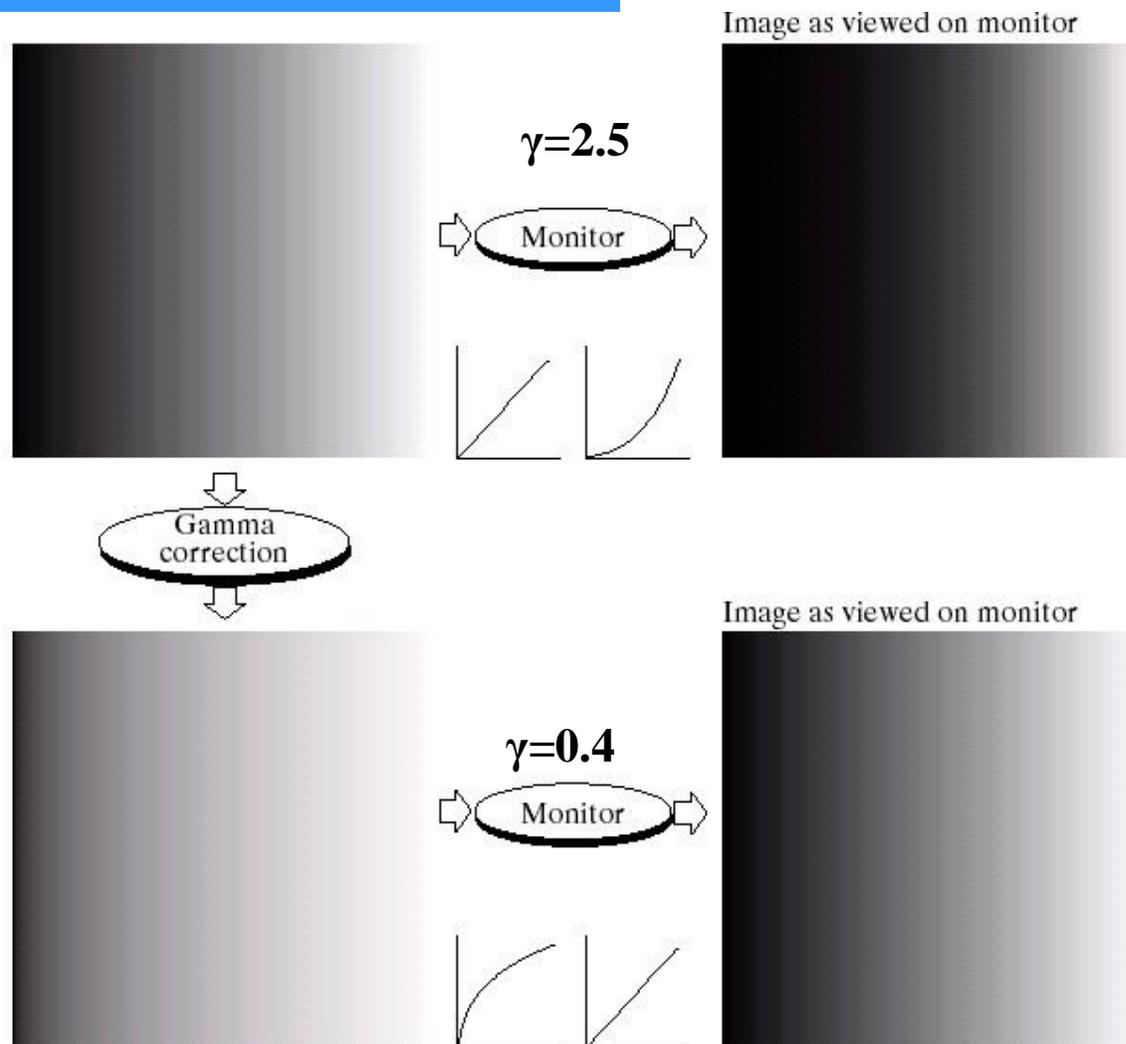
越来越暗

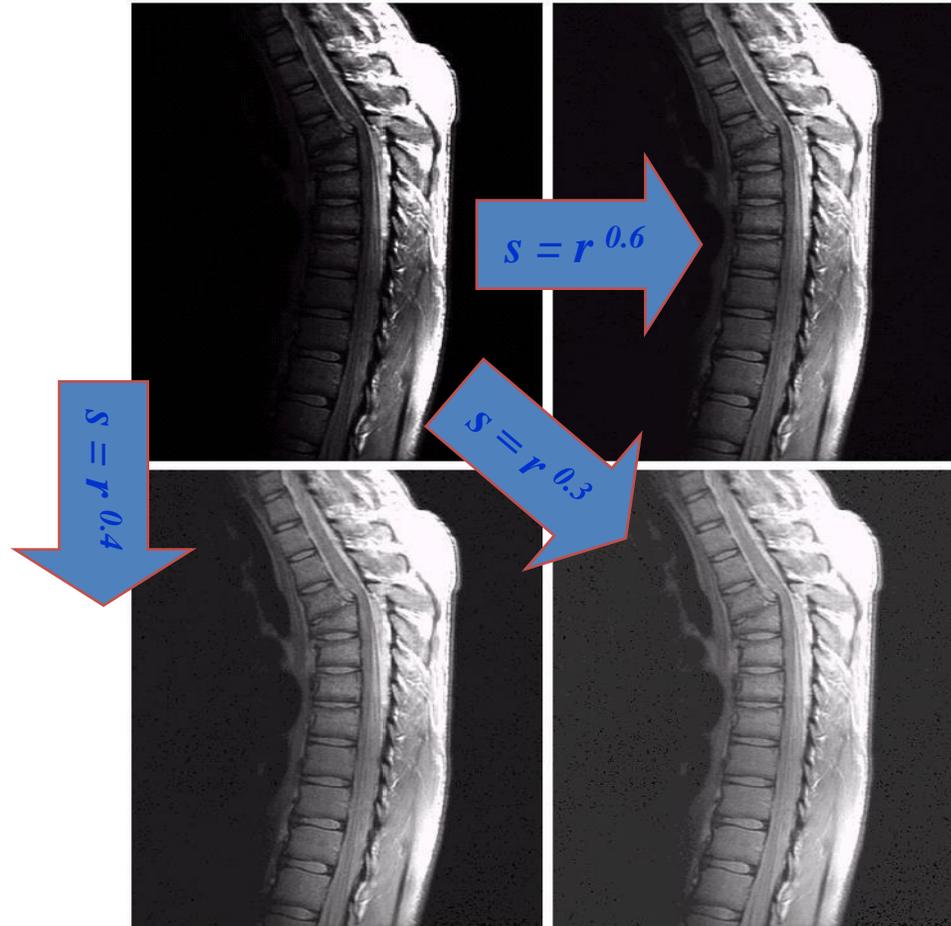
# 伽马校正

a b  
c d

**FIGURE 3.7**

(a) Linear-wedge gray-scale image.  
 (b) Response of monitor to linear wedge.  
 (c) Gamma-corrected wedge.  
 (d) Output of monitor.





a b  
c d

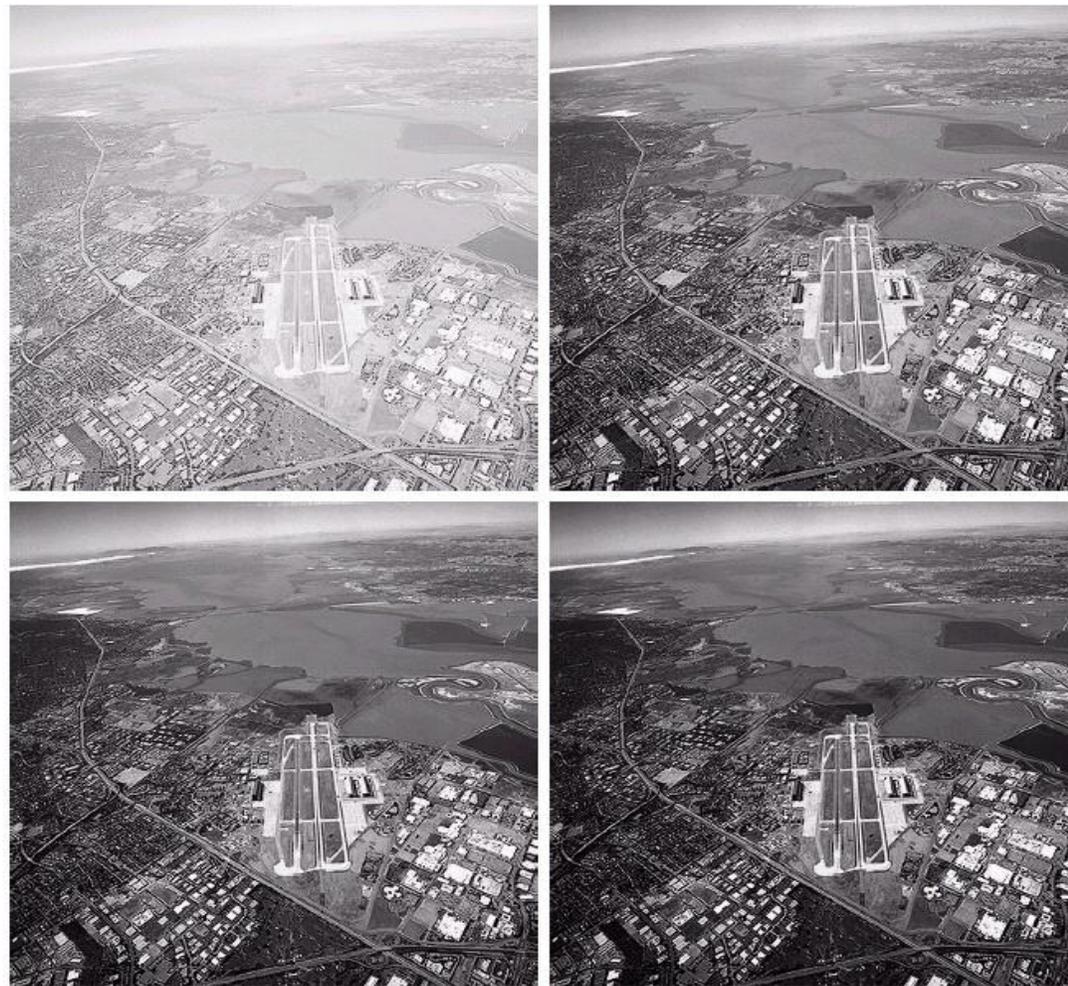
**FIGURE 3.8**

(a) Magnetic resonance (MR) image of a fractured human spine. (b)–(d) Results of applying the transformation in Eq. (3.2-3) with  $c = 1$  and  $\gamma = 0.6, 0.4,$  and  $0.3,$  respectively. (Original image for this example courtesy of Dr. David R. Pickens, Department of Radiology and Radiological Sciences, Vanderbilt University Medical Center.)

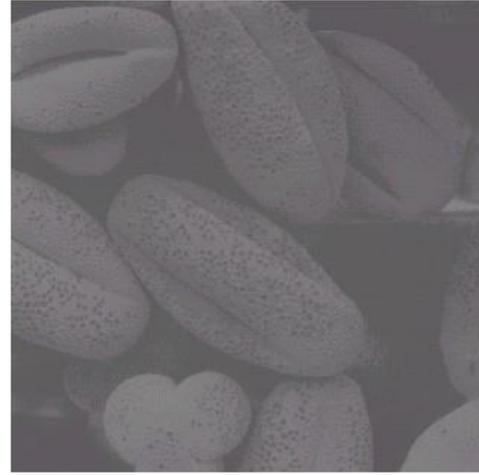
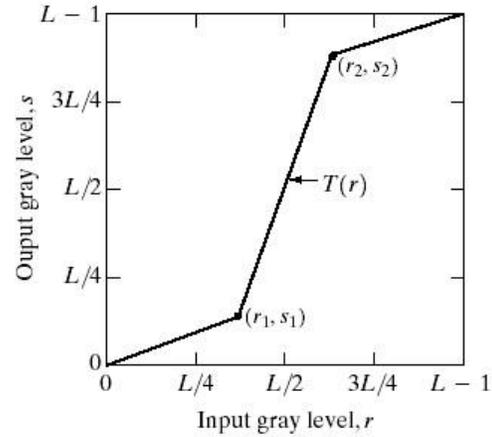
a b  
c d

**FIGURE 3.9**

(a) Aerial image.  
(b)–(d) Results of applying the transformation in Eq. (3.2-3) with  $c = 1$  and  $\gamma = 3.0, 4.0,$  and  $5.0,$  respectively. (Original image for this example courtesy of NASA.)



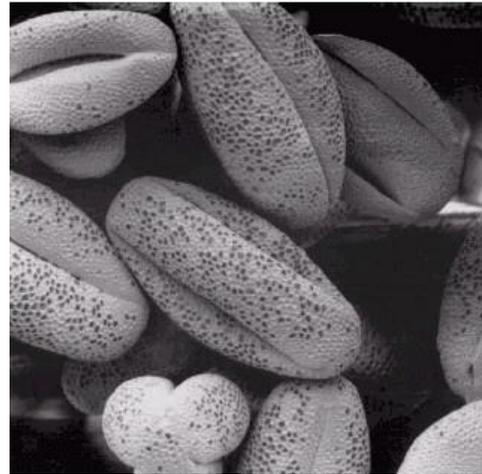
# 分段线性变换函数 - 对比度拉伸



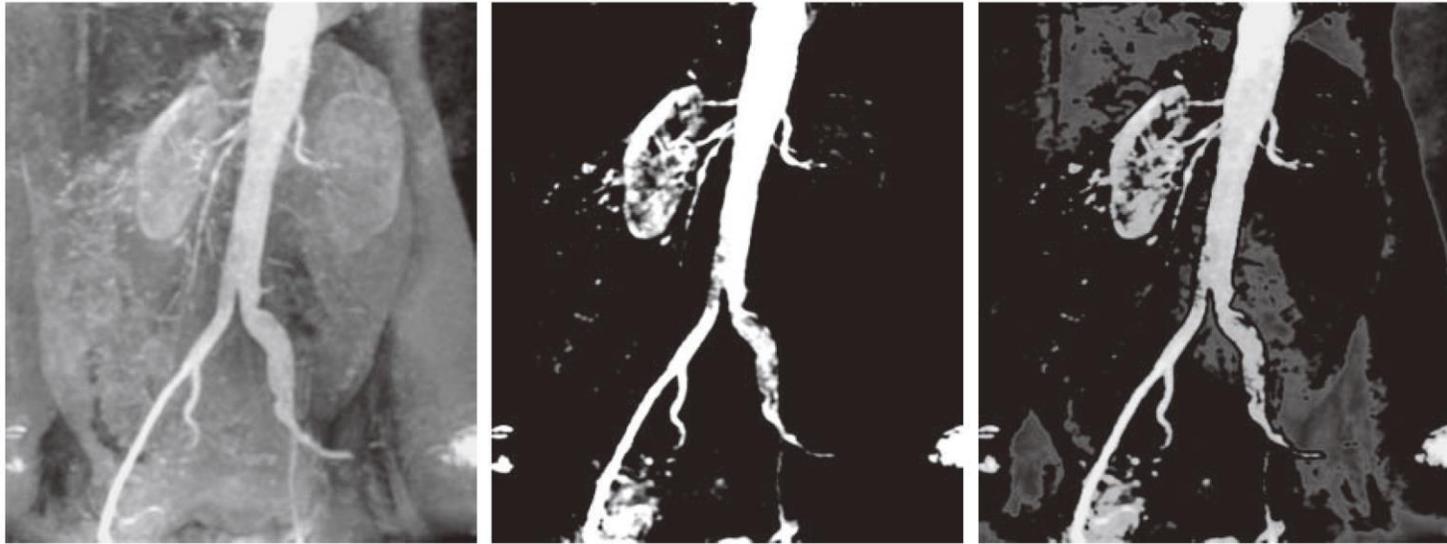
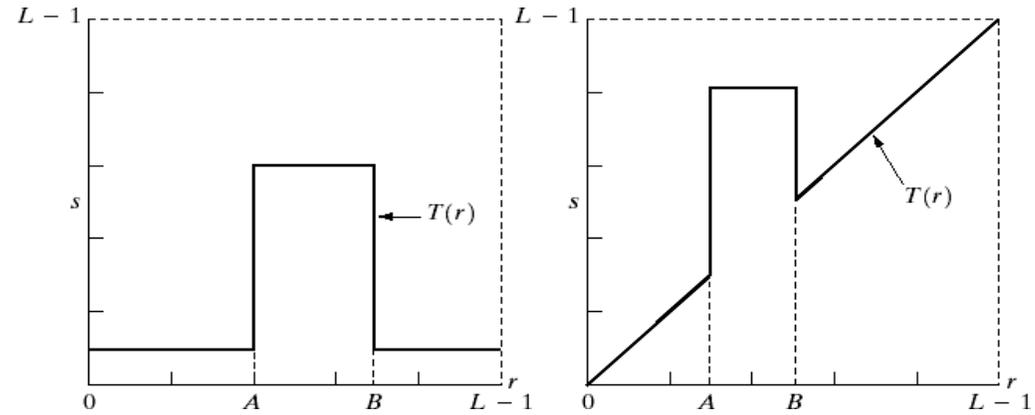
a b  
c d

**FIGURE 3.10**

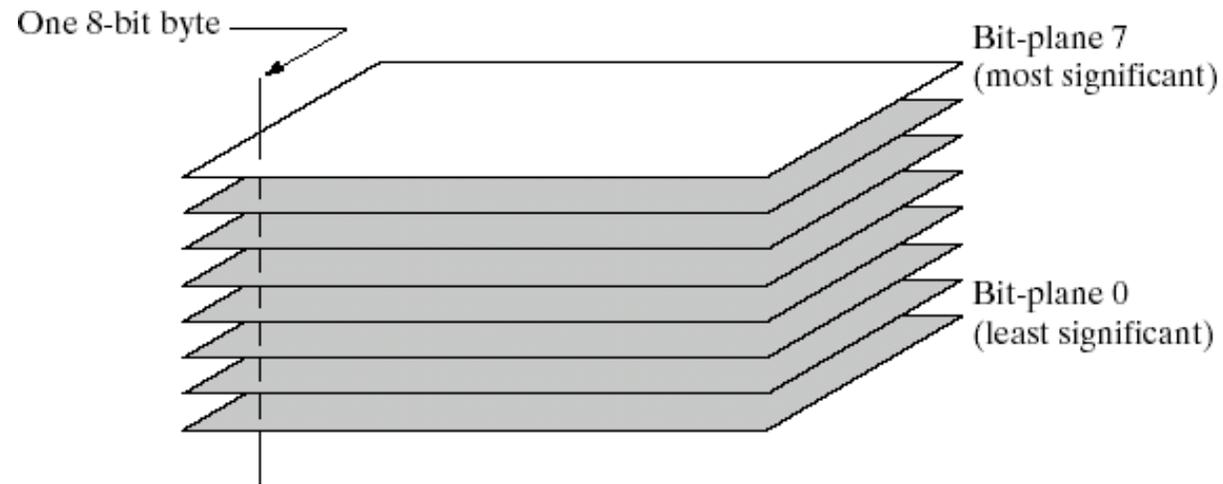
Contrast stretching. (a) Form of transformation function. (b) A low-contrast image. (c) Result of contrast stretching. (d) Result of thresholding. (Original image courtesy of Dr. Roger Heady, Research School of Biological Sciences, Australian National University, Canberra, Australia.)



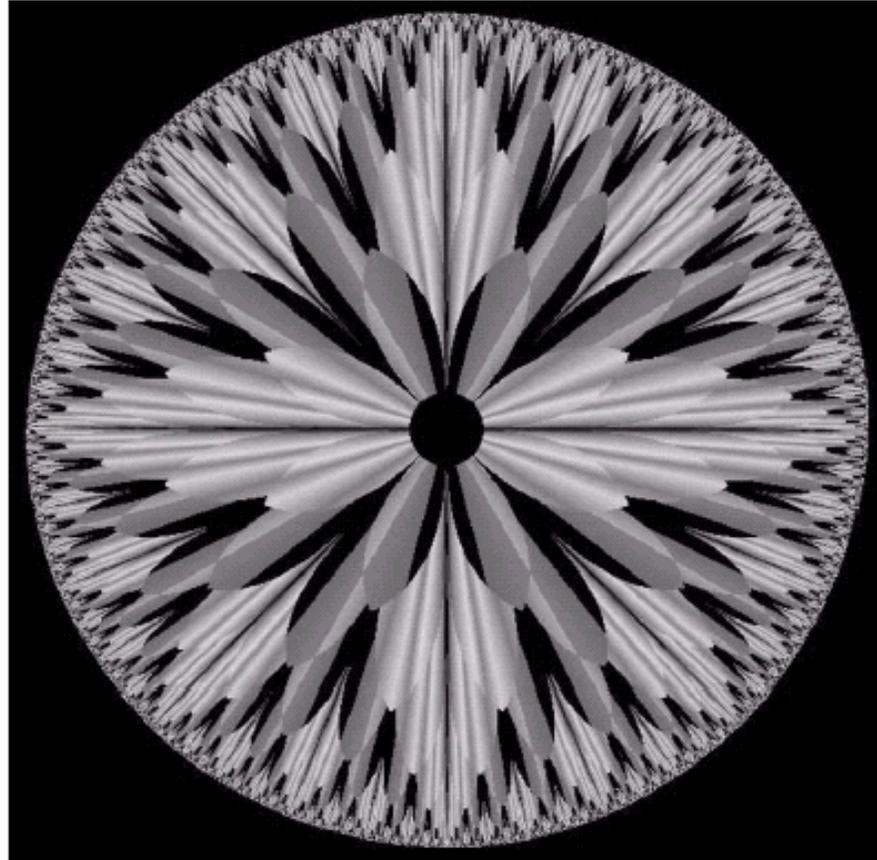
# 分段线性变换函数 - 灰度级切分



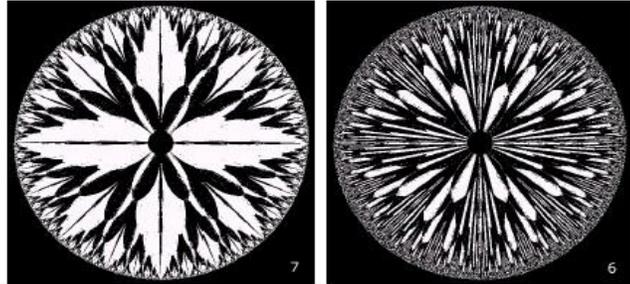
# 比特面分割



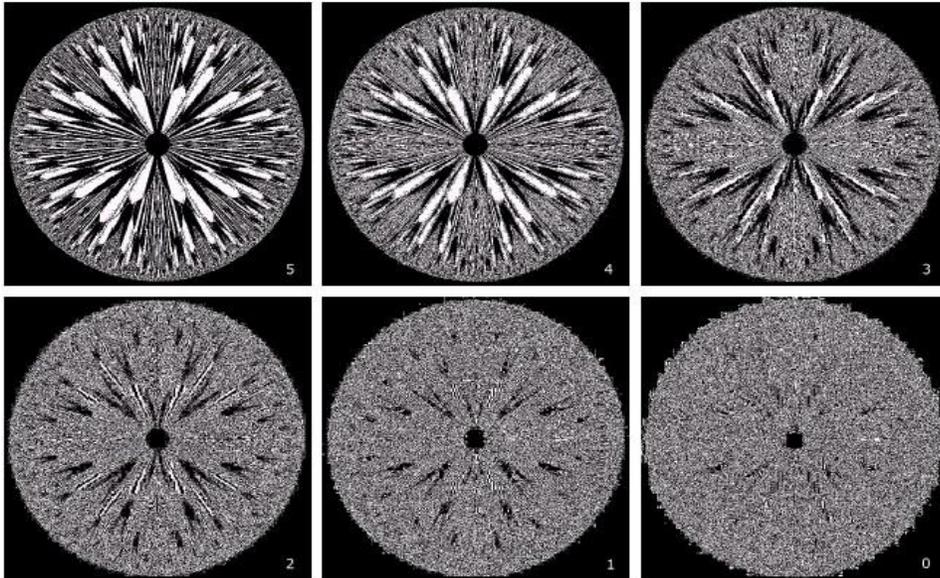
**FIGURE 3.12**  
Bit-plane  
representation of  
an 8-bit image.



**FIGURE 3.13** An 8-bit fractal image. (A fractal is an image generated from mathematical expressions). (Courtesy of Ms. Melissa D. Binde, Swarthmore College, Swarthmore, PA.)



□ 每个比特平面都是一副二值图像



第8个比特平面

将0-127之间的灰度值映射为0

将128-255之间的灰度值置为1

第7个比特平面

将0-63,128-191之间的灰度值映射为0

将64-127,192-255之间的灰度值置为1

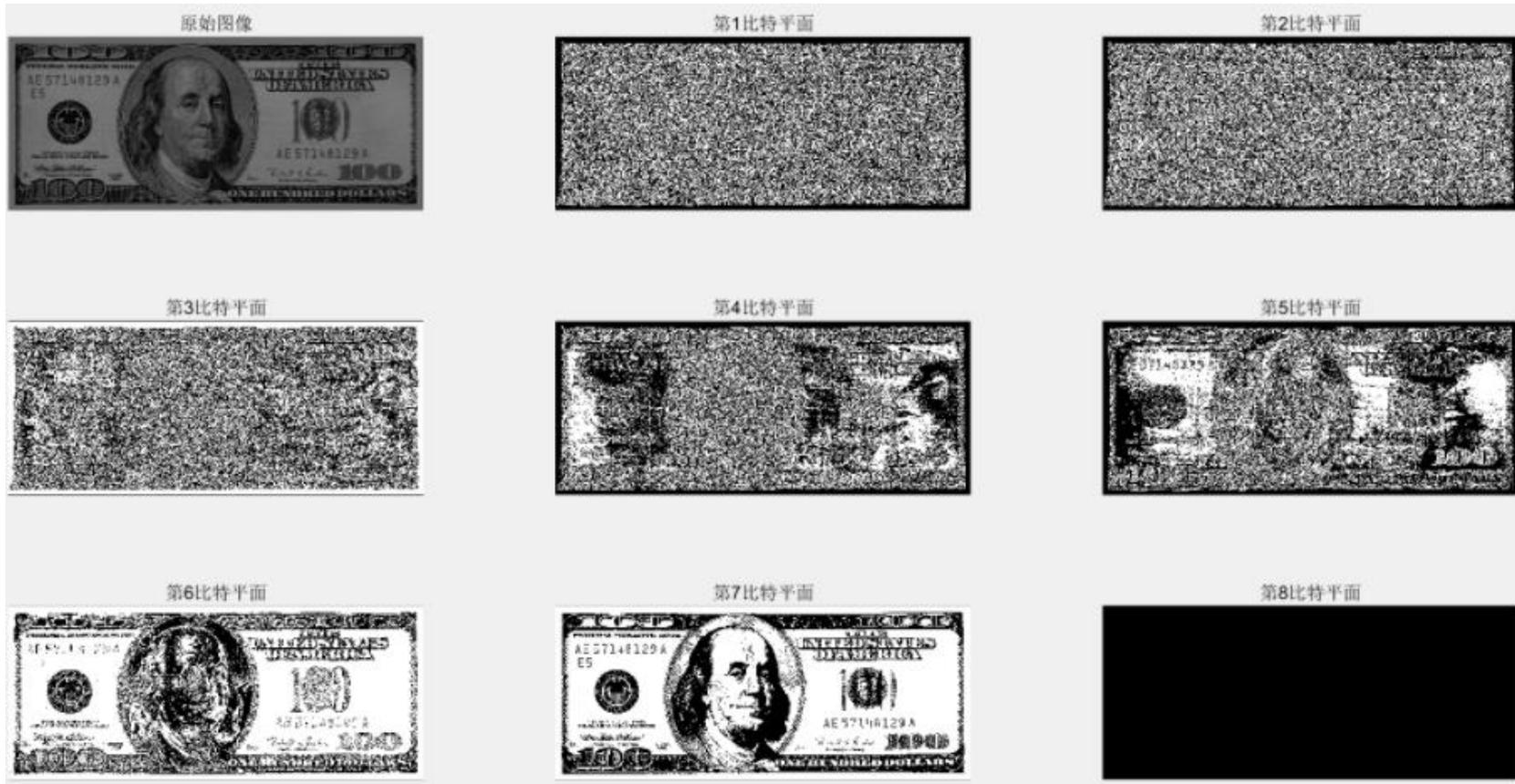
.....

第1个比特平面

将0,2,4,6...254的灰度值映射为0

将1,3,5,7...255的灰度值置为1

FIGURE 3.14 The eight bit planes of the image in Fig. 3.13. The number at the bottom, right of each image identifies the bit plane.



□ 存储4个最高有效比特平面，就能以可接受的细节和色调重建图像，且只需要50%的存储容量

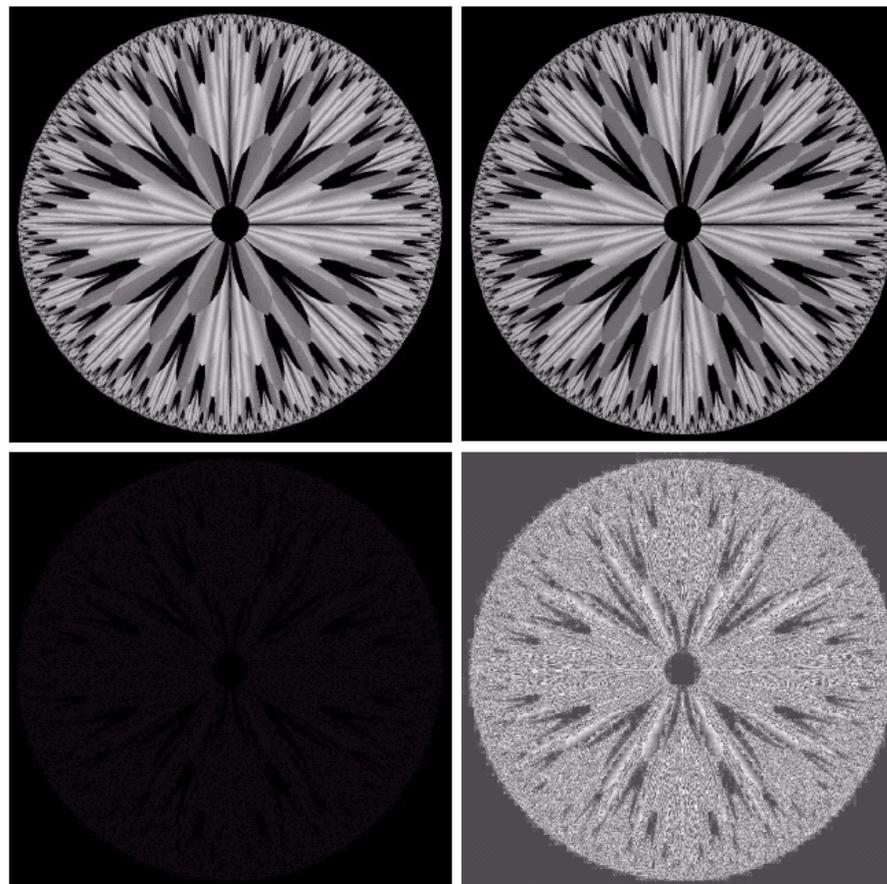
原始分  
形图像

差值  
图像

a b  
c d

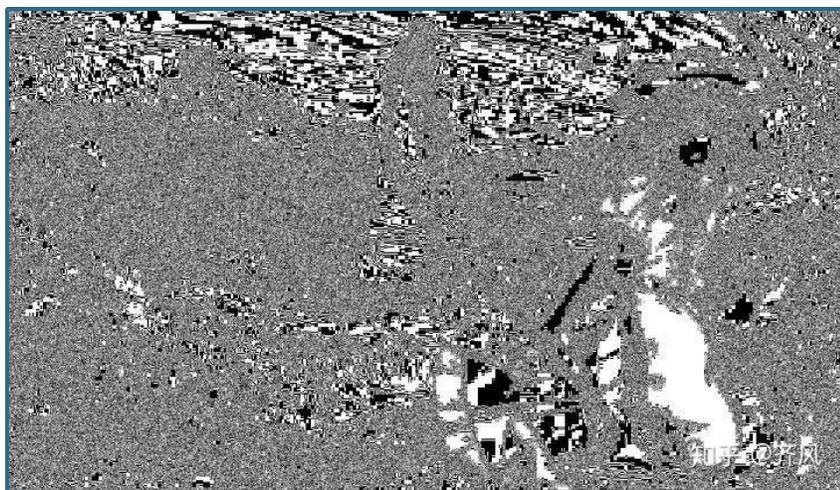
**FIGURE 3.28**

(a) Original fractal image.  
(b) Result of setting the four lower-order bit planes to zero.  
(c) Difference between (a) and (b).  
(d) Histogram-equalized difference image. (Original image courtesy of Ms. Melissa D. Binde, Swarthmore College, Swarthmore, PA).



4个低阶  
比特面置  
零后图

直方图  
均衡化  
后图像



比特平面1



比特平面8

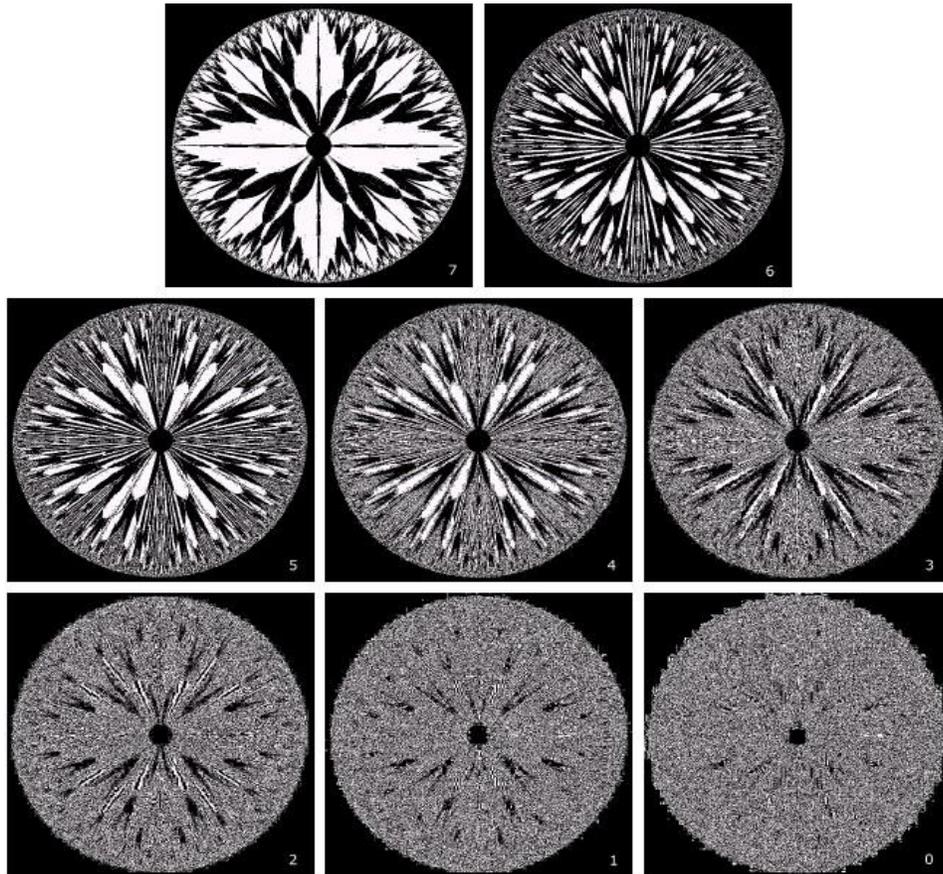


FIGURE 3.14 The eight bit planes of the image in Fig. 3.13. The number at the bottom, right of each image identifies the bit plane.

## □ 合成完整图

第8个比特平面的二值图像  
x128

+

第7个比特平面的二值图像  
x64

+

.....

+

第1个比特平面的二值图像



# 第3章 图像变换与空域滤波

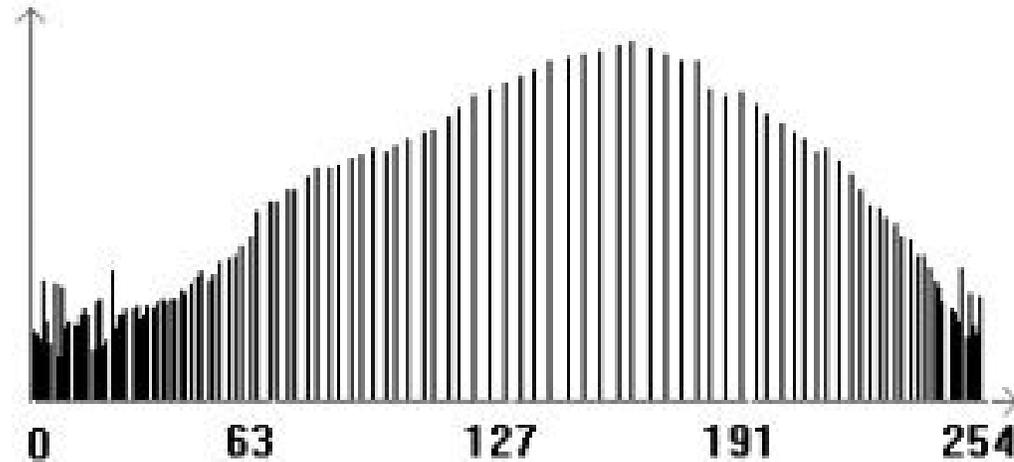
---

1. 背景知识
  2. 基本灰度变换
  3. 直方图处理
  4. 空间滤波基础
  5. 空域平滑
  6. 空域锐化
-

# 灰度直方图

## □ 灰度直方图

- 是一种灰度级的函数，它表示数字图象中每一灰度级与该灰度出现的频数之间的对应关系。
- 一幅特定的图有唯一的直方图，但反之不成立。
- 直方图在一定程度上可以反映图像的状况，例如：有时可以根据直方图确定分割物体和背景的边界。



- 直方图归一化  $P(r_k) = n_k / n$

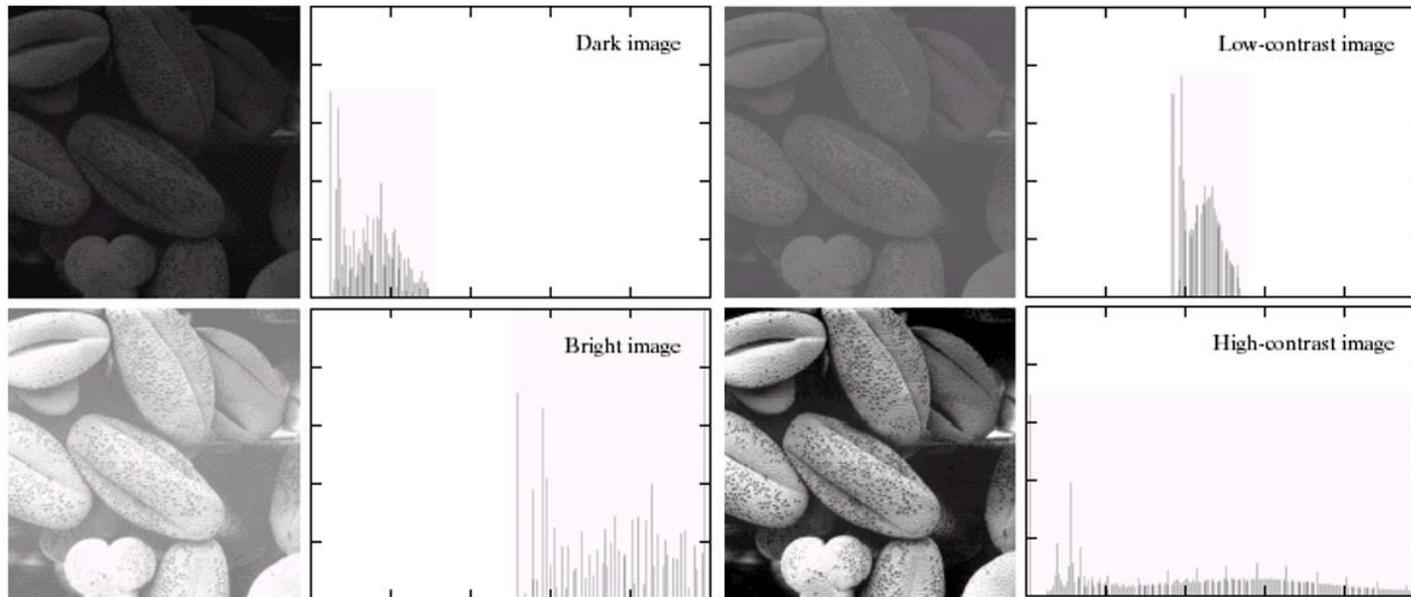
这里  $k=0,1,2,\dots,L-1$ 。  $P(r_k)$  给出了灰度级为  $r_k$  发生的概率估计值，  $n$  为图像像素的总数。

- 一个归一化的直方图其所有部分之和等于1。

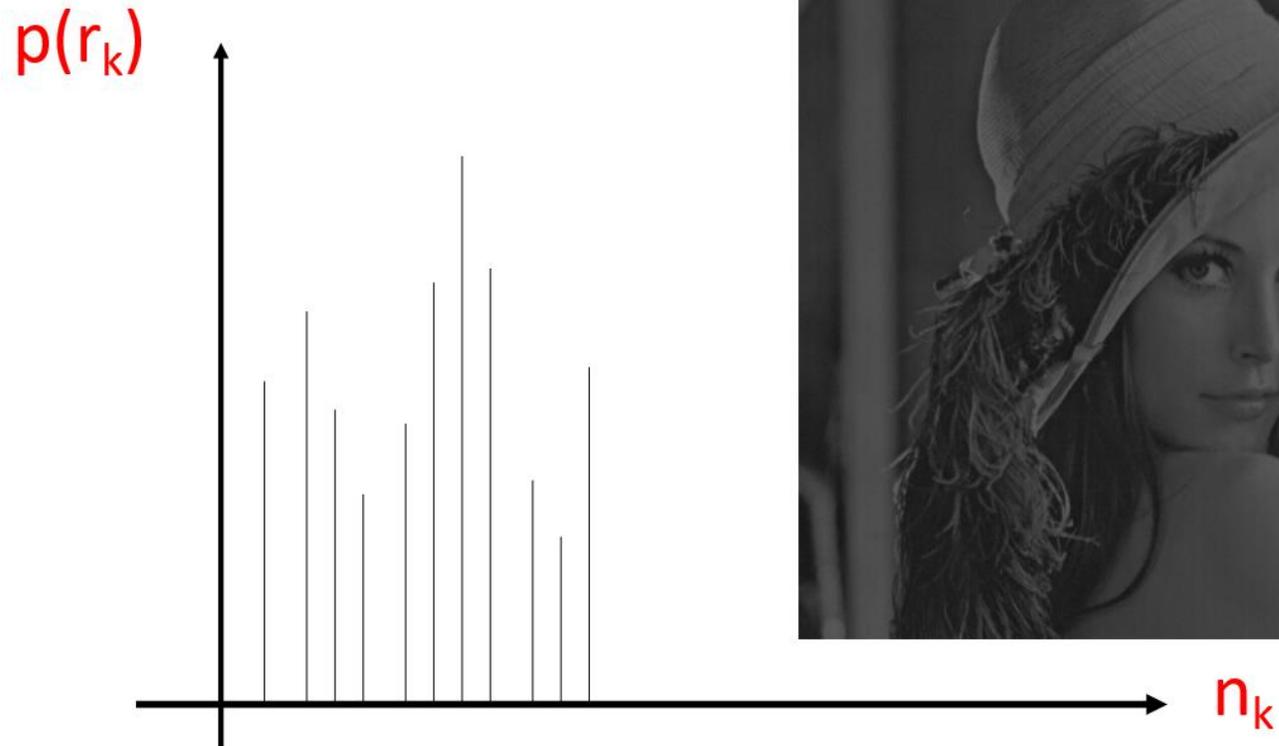
$$\sum_0^{L-1} P(r_k) = 1$$

- 直方图是多种空间域处理技术的基础，直方图操作能有效地用于图像增强。

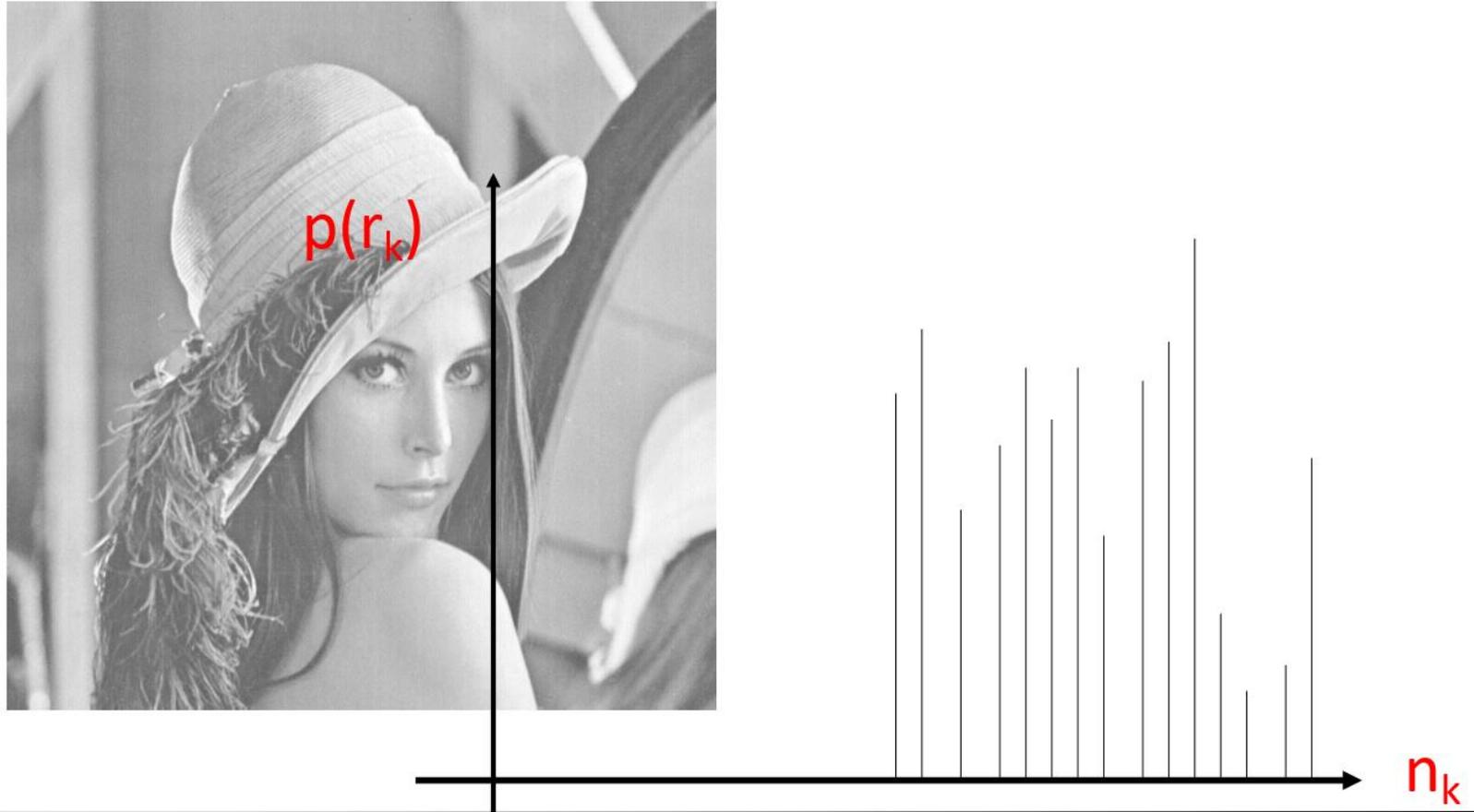
- 低对比度图像的灰度级较窄
- 高对比度图像中直方图分量覆盖了很宽的灰度级范围



- 较暗图像的直方图



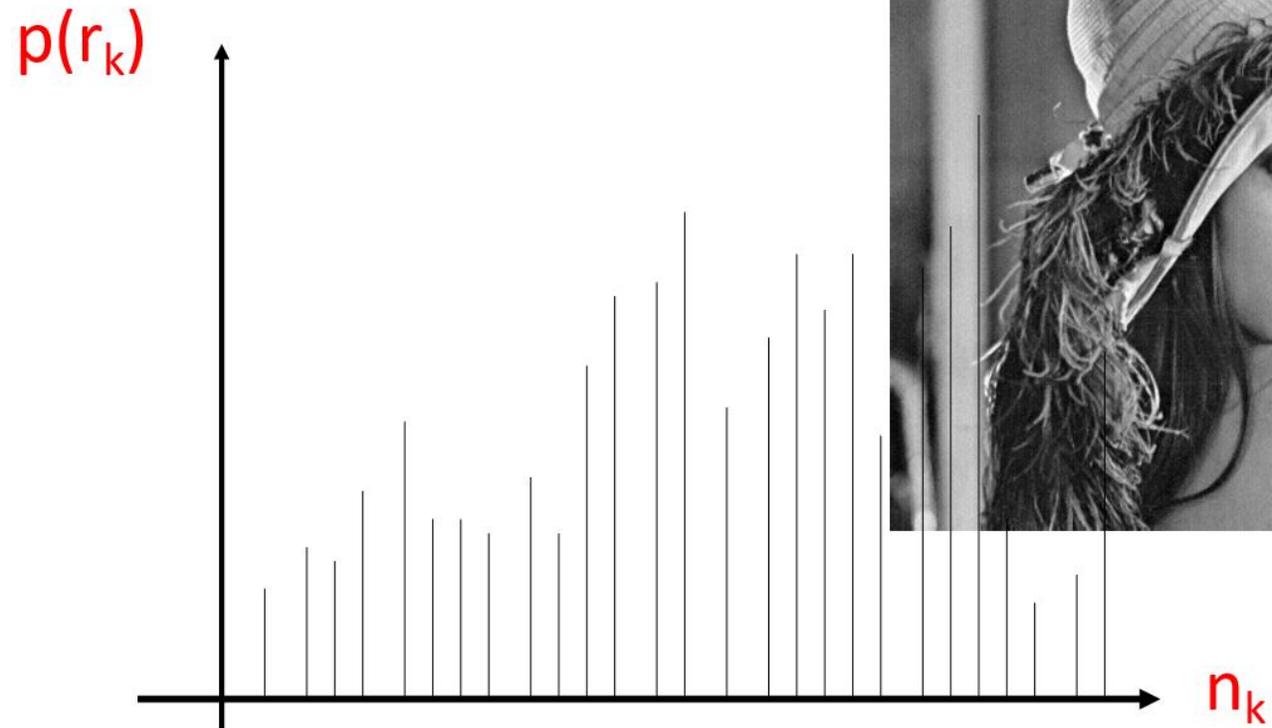
## ■ 较亮图像的直方图



- 对比度较低图像的直方图

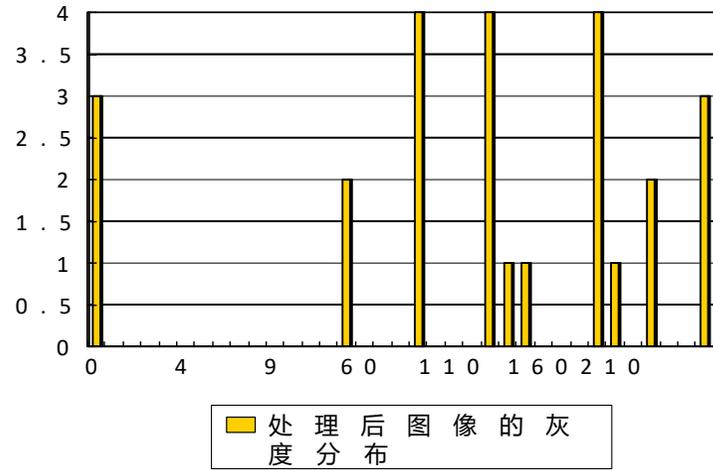
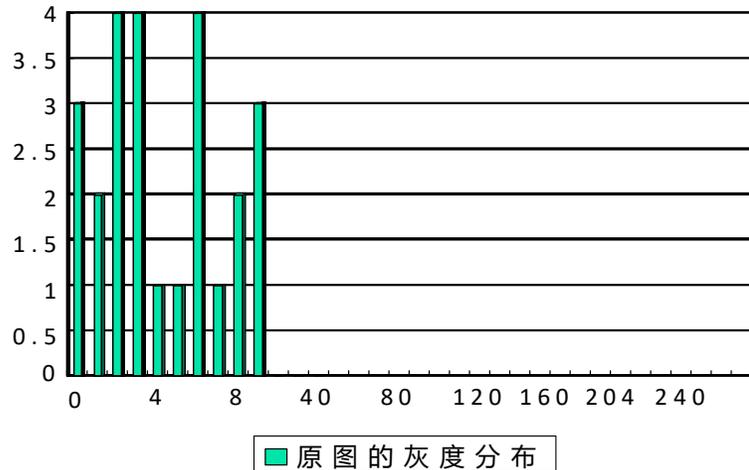


- 对比度较高图像的直方图

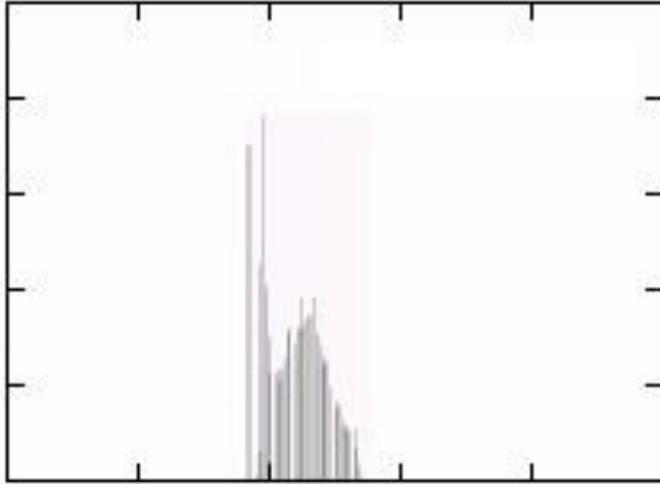
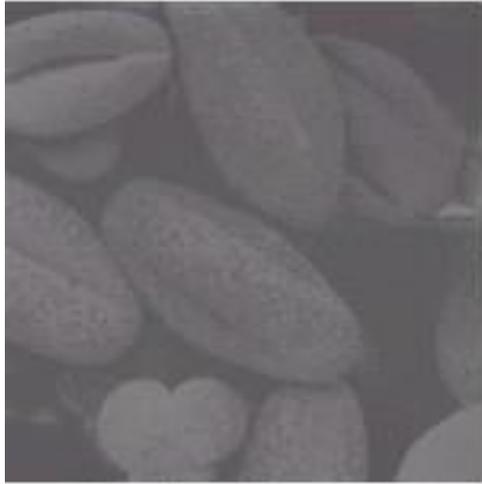


# 灰度直方图

- 基于直方图的灰度变换
  - 不改变像素的位置，只改变像素的灰度值。
- 通过修改直方图可以达到增强图象的对比度、使感兴趣的部分看得更清楚。
- 常用的有一维灰度特征直方图，也有其他特征直方图，还有多维直方图。



# 直方图修正



低对比度



高对比度

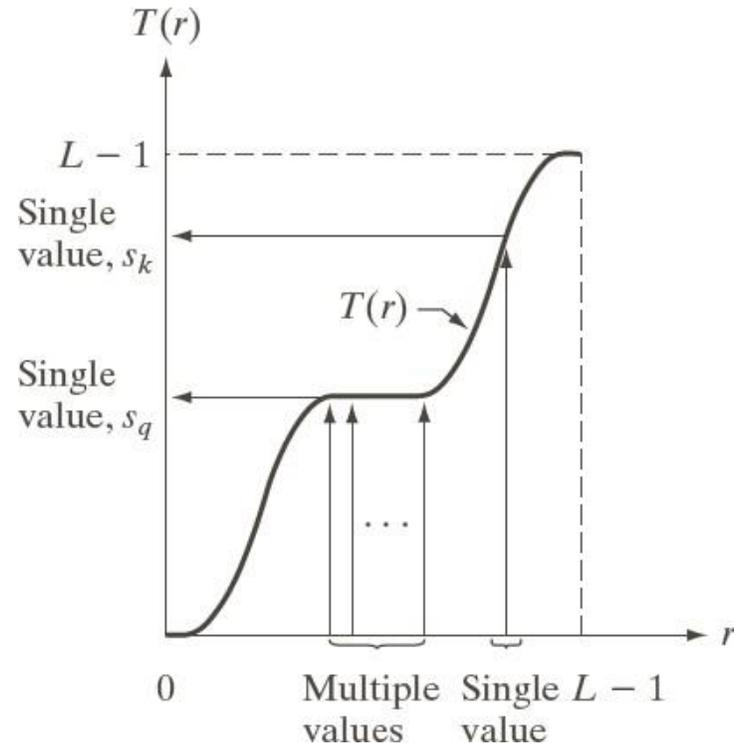
考虑连续函数并让变量 $r$ 代表增强图像的灰度级。假设 $r$ 被归一化到区间 $[0,1]$ 。对于任一个满足上述条件的 $r$ ,我们注意以下变换形式

$$s = T(r) \quad 0 \leq r \leq 1$$

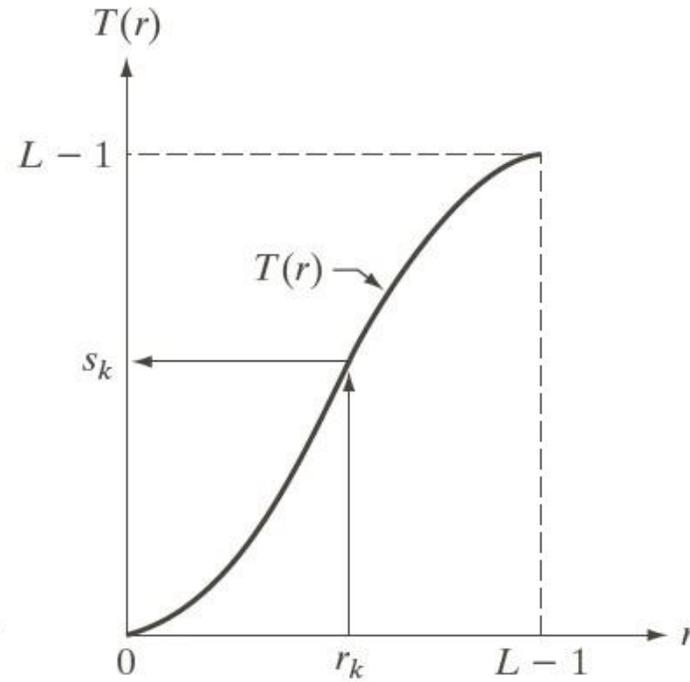
在原始图像中,对于每一个像素值 $r$ 产生一个灰度值 $s$ 。显然可以假设变换函数 $T(r)$ 满足以下条件:

- 1)  $T(r)$ 在区间 $[0,1]$ 中为单值且单调递增。
- 2) 当  $0 \leq r \leq 1$  时,  $0 \leq T(r) \leq 1$  。

# 灰度变换函数



非单调递增函数

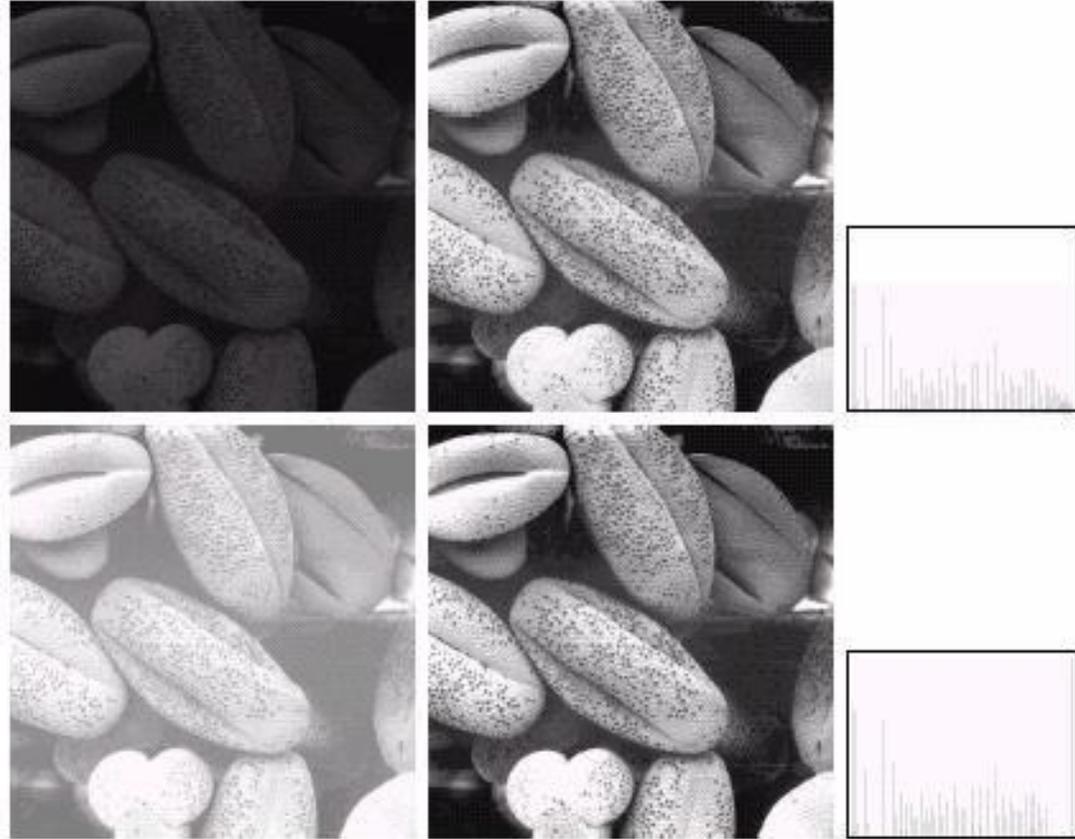


严格单调递增函数

# 直方图均衡

- 是基于直方图的灰度变换中常用的一种处理方法。
- 通常，用直方图拉伸来执行直方图均衡处理。

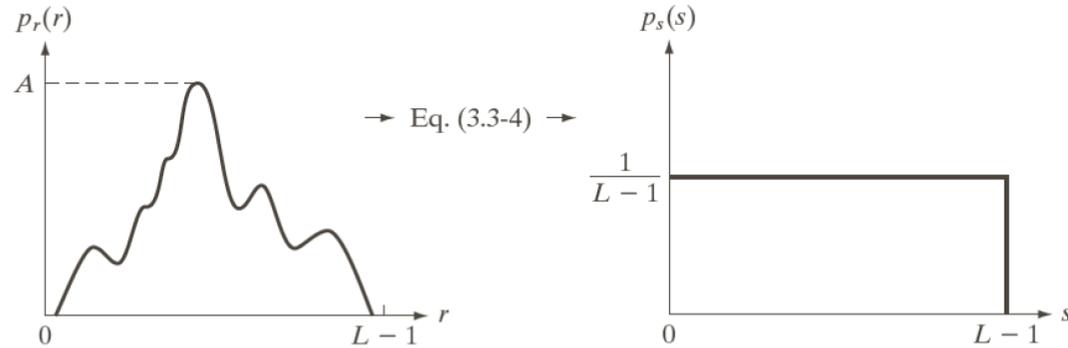
$$s = T(r) = (L - 1) \int_0^r p_r(w) dw$$



$$s = T(r) = (L - 1) \int_0^r p_r(w) dw \quad \Rightarrow \quad \frac{ds}{dr} = (L - 1) p_r(r)$$

由莱布尼茨准则,

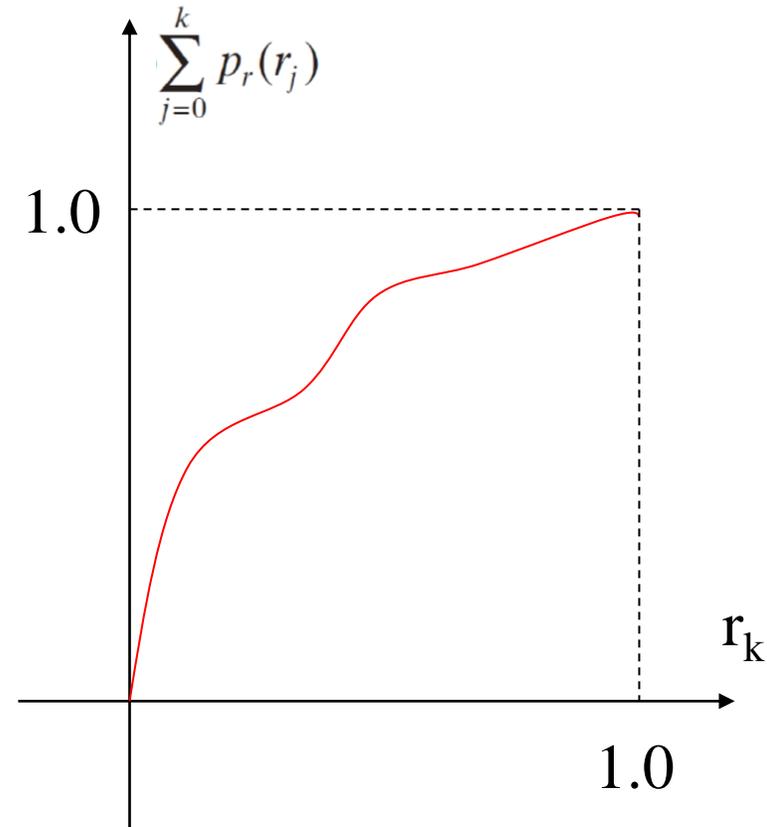
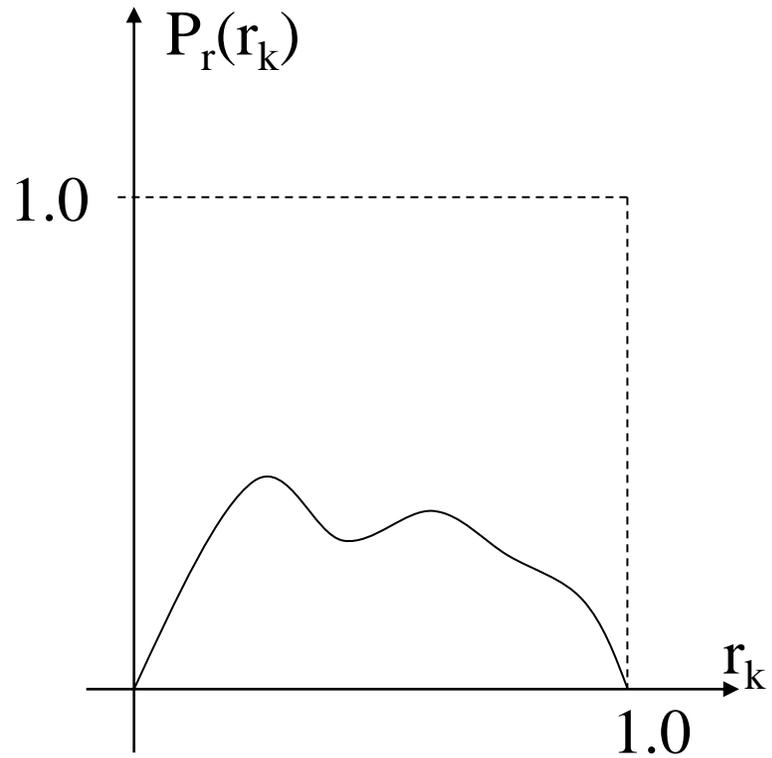
$$p_s(s) = p_r(r) \left| \frac{dr}{ds} \right| = p_r(r) \left| \frac{1}{(L - 1) p_r(r)} \right| = \frac{1}{L - 1}, \quad 0 \leq s \leq L - 1$$



得到的pdf总是均匀的，与输入形状无关

直方图均衡离散化形式:  $s_k = T(r_k) = (L - 1) \sum_{j=0}^k p_r(r_j) \quad k = 0, 1, 2, \dots, L - 1$

上式表明，均衡后各像素的灰度值  $s_k$  可直接由原图像的直方图算出。



**概率密度函数**的函数值 $y$ 表示落在 $x$ 点上的概率为 $y$ ;

**累积分布函数**当概率密度函数存在, 分布函数是一个定积分, 变量 $X$ 对于取值 $x$ 的分布函数是 $X$ 所在总体概率密度函数从负无穷到 $x$ 的定积分。

**例:**假定有一幅总像素为 $n=64 \times 64$ 的图像，灰度级数为8，各灰度级分布列于表中。对其均衡化计算过程如下：

$r_k$	$n_k$	$p_r(r_k) = n_k/MN$
$r_0 = 0$	790	0.19
$r_1 = 1$	1023	0.25
$r_2 = 2$	850	0.21
$r_3 = 3$	656	0.16
$r_4 = 4$	329	0.08
$r_5 = 5$	245	0.06
$r_6 = 6$	122	0.03
$r_7 = 7$	81	0.02

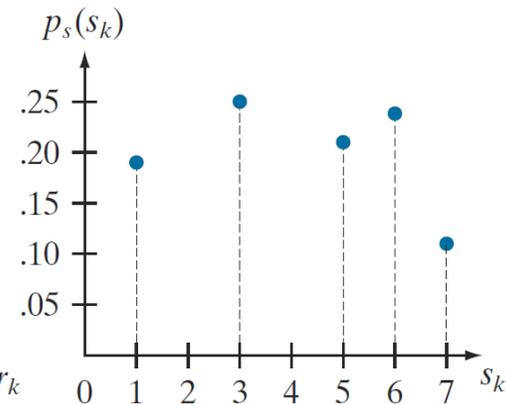
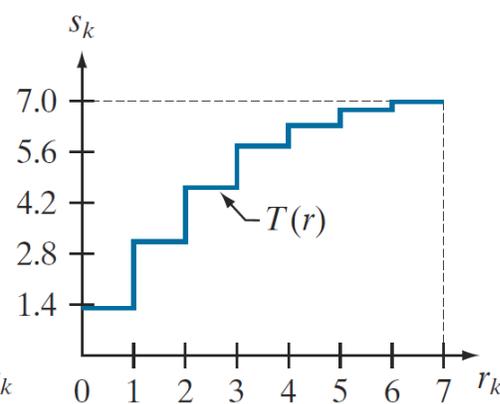
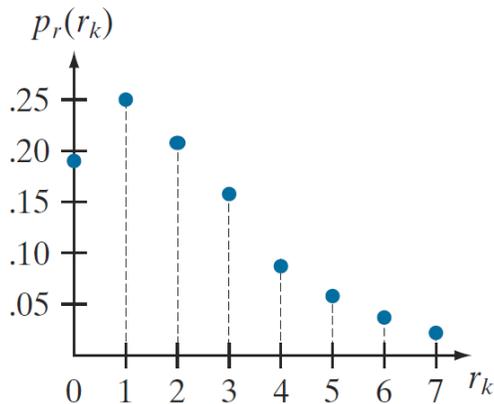
$$s_k = T(r_k) = (L - 1) \sum_{j=0}^k p_r(r_j) \quad k = 0, 1, 2, \dots, L - 1$$

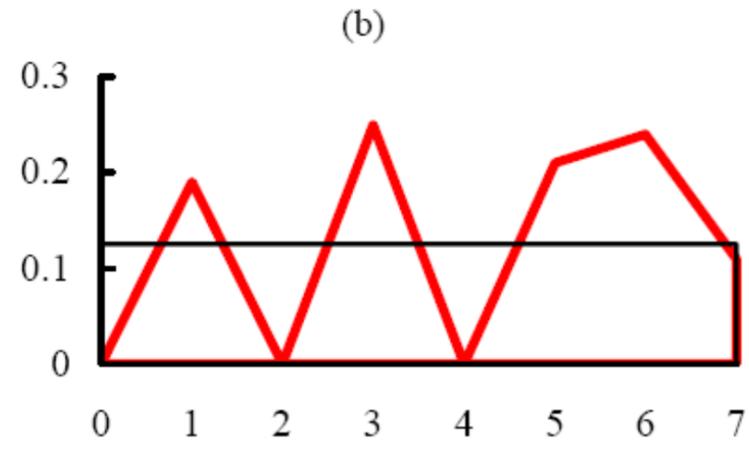
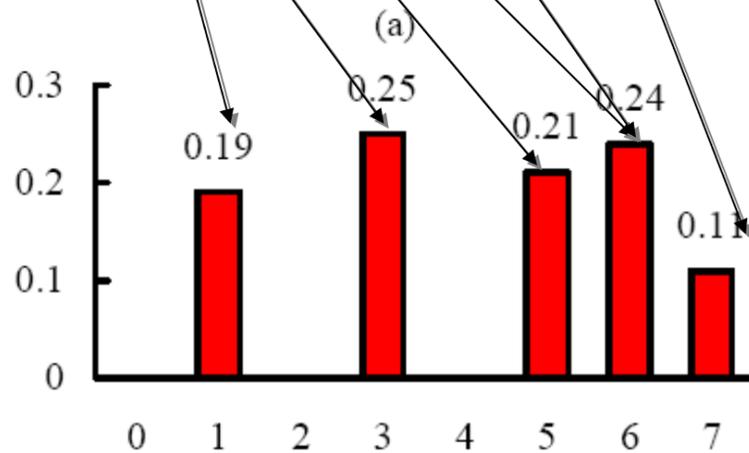
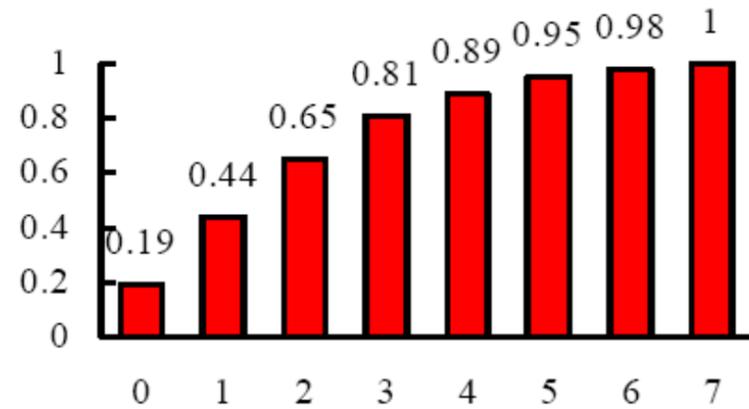
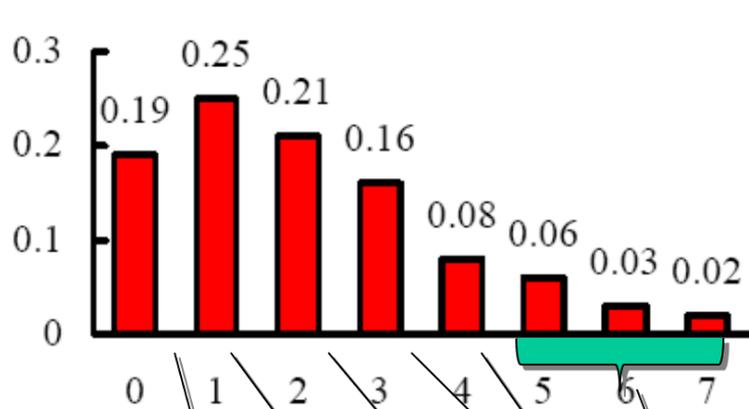
$$s_0 = T(r_0) = 7 \sum_{j=0}^0 p_r(r_j) = 7 p_r(r_0) = 1.33$$

$$s_1 = T(r_1) = 3.08, s_2 = 4.55, s_3 = 5.67, s_4 = 6.23, s_5 = 6.65, s_6 = 6.86, \text{ and } s_7 = 7.00.$$

$$s_0 = 1.33 \rightarrow 1 \quad s_2 = 4.55 \rightarrow 5 \quad s_4 = 6.23 \rightarrow 6 \quad s_6 = 6.86 \rightarrow 7$$

$$s_1 = 3.08 \rightarrow 3 \quad s_3 = 5.67 \rightarrow 6 \quad s_5 = 6.65 \rightarrow 7 \quad s_7 = 7.00 \rightarrow 7$$





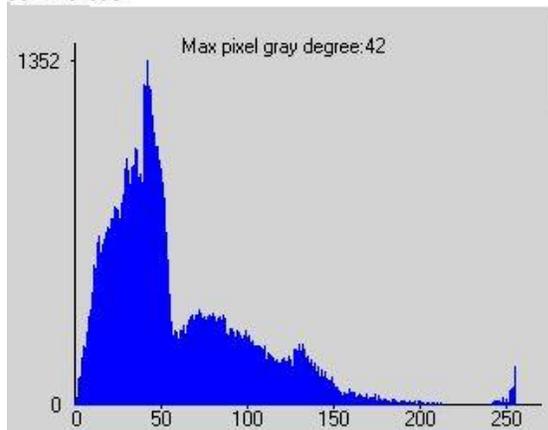
(c)

(d)

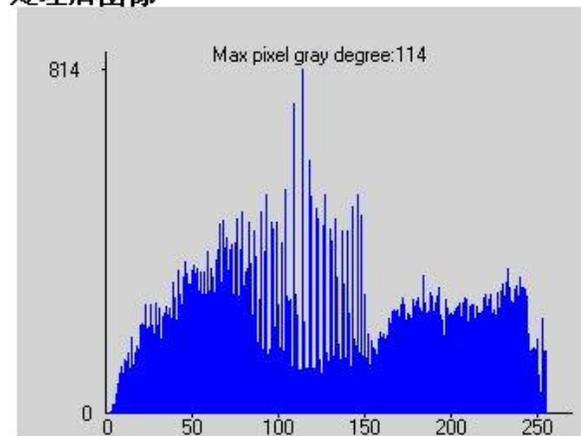
直方图是PDF的近似，不允许产生新的灰度级，也很少出现完全平坦的直方图



原始图像

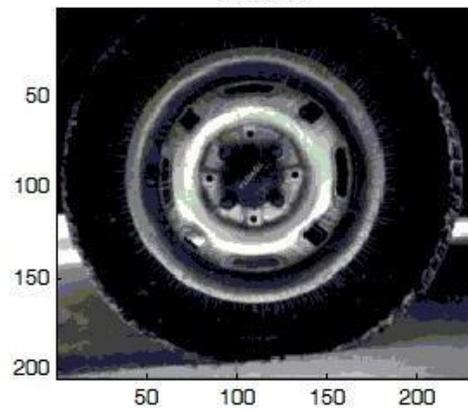


处理后图像

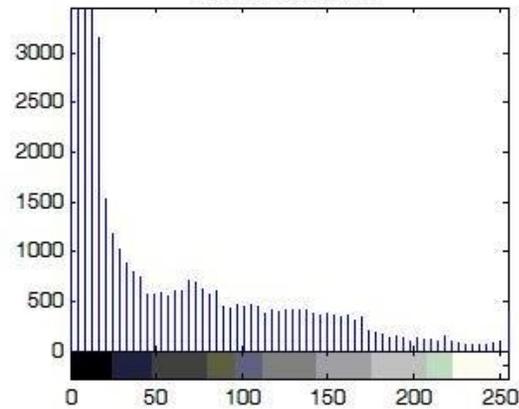


## 对动态范围偏小的图像进行增强

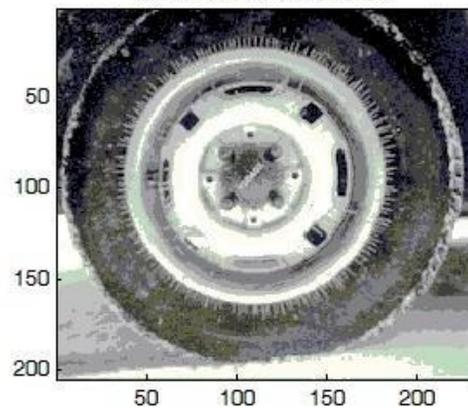
原图像



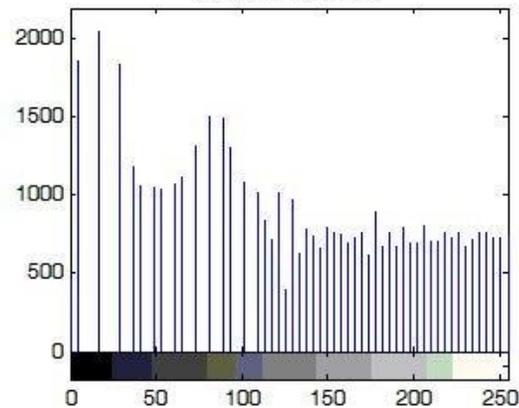
原图像的直方图



均衡化处理后的图像

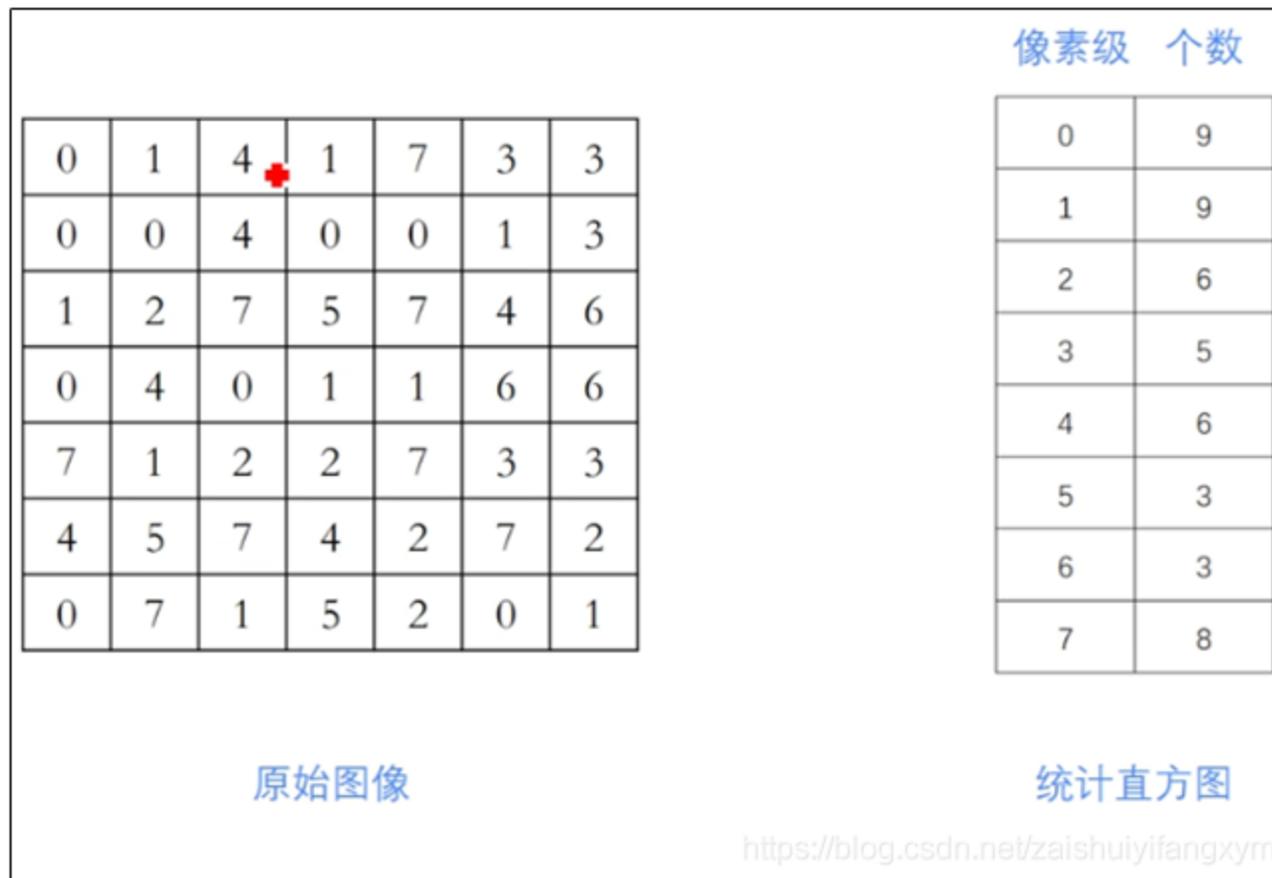


均衡后的直方图

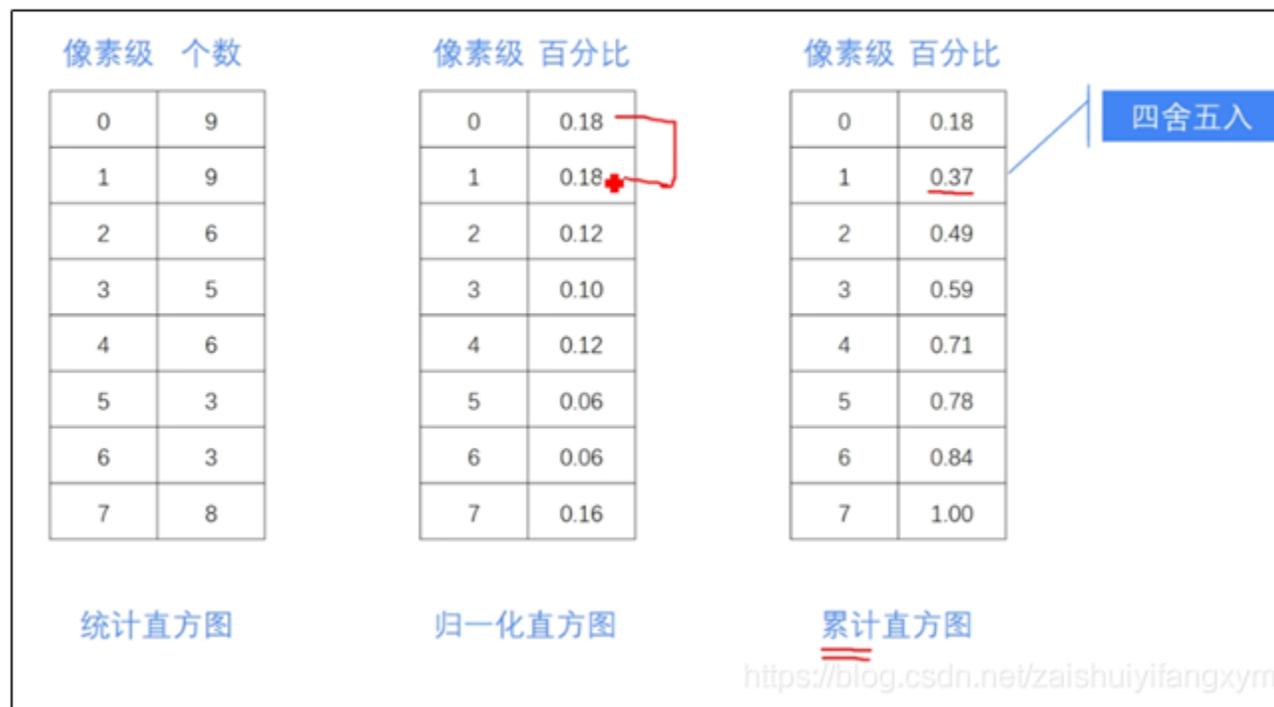


# 例题

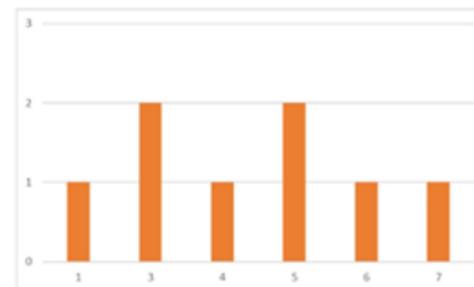
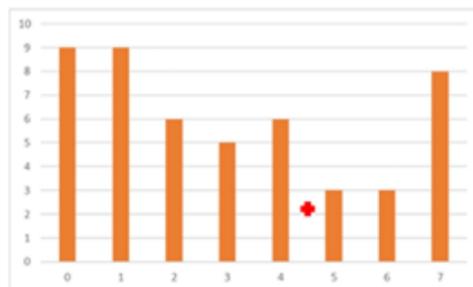
如下图所示，已知一幅图像的像素分布为  $7 \times 7$ ，根据像素值，则可以计算出统计直方图



根据统计直方图，可以算出归一化直方图和累计直方图，如下图所示：



将累计直方图进行区间转换，如下图所示：





# 直方图匹配（直方图规定化）

在某些情况下，并不一定需要具有均匀直方图的图像，有时需要具有特定的直方图的图像，以便能够增强图像中某些灰度级。**直方图规定化方法（直方图匹配）**就是针对上述思想提出来的。直方图规定化是使原图像灰度直方图变成规定形状的直方图而对图像作修正的增强方法。

可见，它是对直方图均衡化处理的一种有效的扩展。直方图均衡化处理是直方图规定化的一个特例。

ShapingForm

原始图像

匹配图像

匹配后图像

打开

匹配

确定

取消

Max pixel gray degree:154

Max pixel gray degree:187

Max pixel gray degree:188

2774

4905

8498

0 50 100 150 200 250

0 50 100 150 200 250

0 50 100 150 200 250

Detailed description: The image shows a software interface titled 'ShapingForm' with three rows of image and histogram pairs. The first row, labeled '原始图像' (Original Image), shows a woman in a hat and a histogram with a maximum pixel gray degree of 154 and a y-axis value of 2774. The second row, labeled '匹配图像' (Matched Image), shows a brick building and a histogram with a maximum pixel gray degree of 187 and a y-axis value of 4905. The third row, labeled '匹配后图像' (Matched Image), shows the woman in a hat with a color mapping from the brick building and a histogram with a maximum pixel gray degree of 188 and a y-axis value of 8498. On the left side, there are buttons for '打开' (Open), '匹配' (Match), '确定' (OK), and '取消' (Cancel).

# 直方图匹配（直方图规定化）

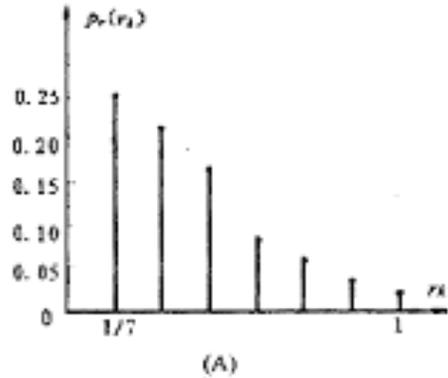
- 借助直方图变换实现规定/特定的灰度映射
- 三个步骤
  1. 对原始直方图进行灰度均衡化
  2. 规定需要的直方图，计算能使规定直方图均衡化的变换
  3. 将原始直方图对应映射到规定直方图

$$p_r(r) \longrightarrow p_z(z)$$

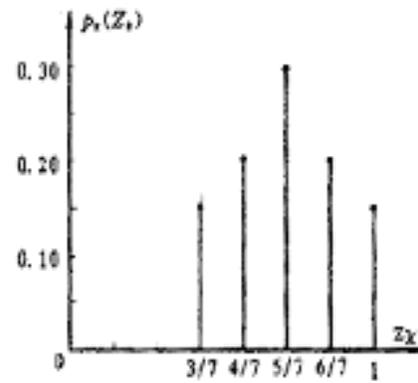
$$s = T(r) = (L - 1) \int_0^r p_r(w) dw$$

$$G(z) = (L - 1) \int_0^z p_z(v) dv = s$$

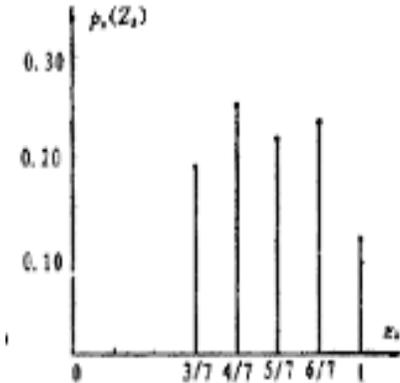
$$z = G^{-1}(s) = G^{-1}[T(r)]$$



原图像的直方图

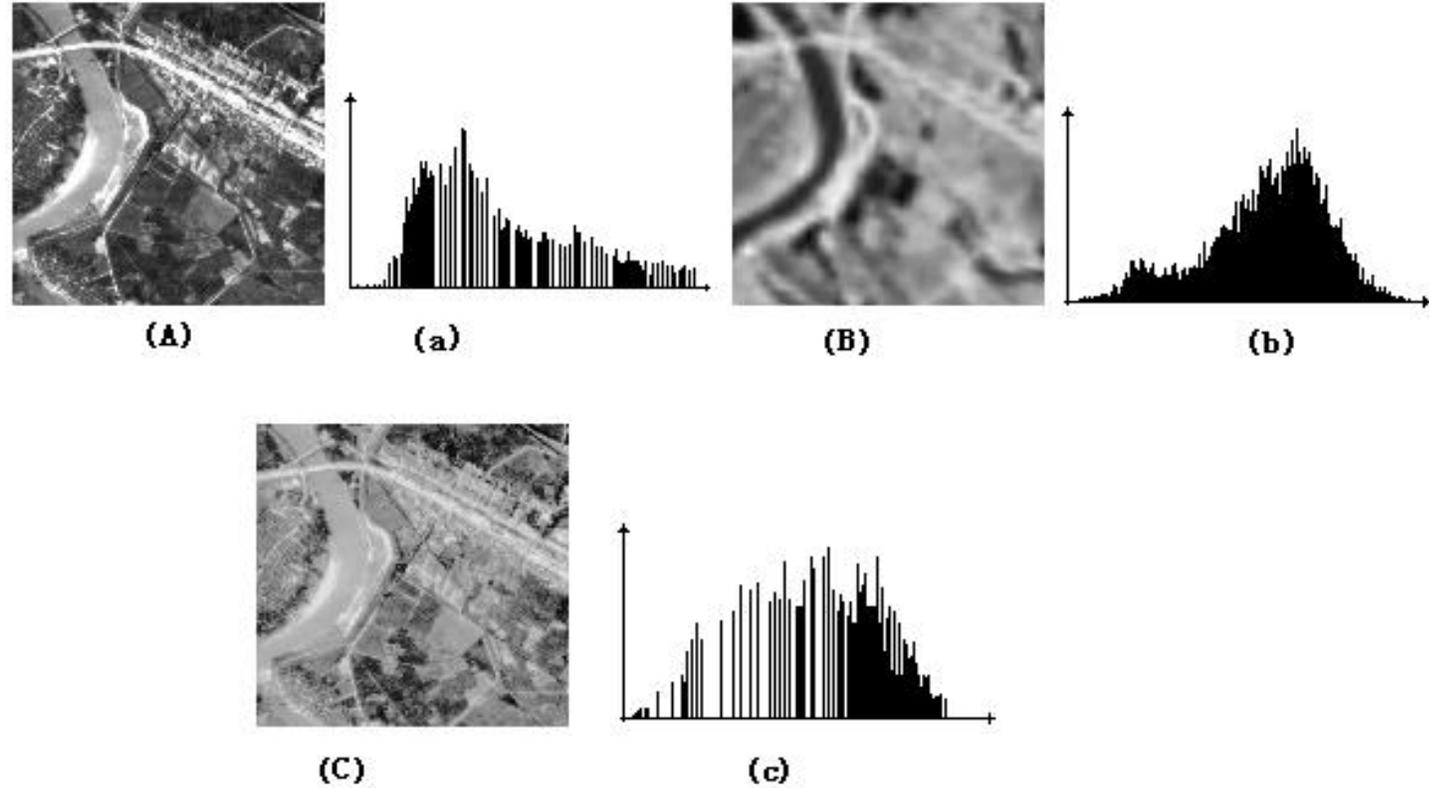


规定的直方图



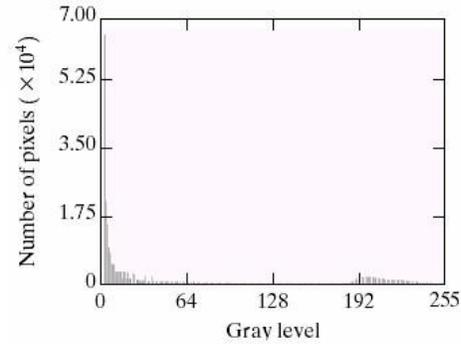
规定化后图像的直方图

利用直方图规定化方法进行图像增强的主要困难在于要构成有意义的直方图。图像经直方图规定化，其增强效果要有利于人的视觉判读或便于机器识别。



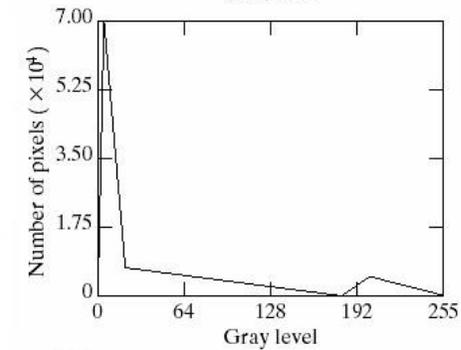
图(C)、(c)是将图像(A)按图(b)的直方图进行规定化得到的结果及其直方图。通过对比可以看出图(C)的对比度同图(B)接近一致，对应的直方图形状差异也不大。这样有利于影像融合处理，保证融合影像光谱特性变化小。

# 直方图匹配



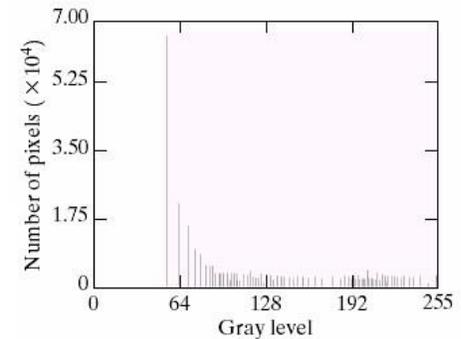
原图

原图直  
方图



处理后  
图像

匹配目  
标直方  
图



处理后  
直方图



# 直方图均衡vs. 直方图匹配

- 直方图均衡：
  - 自动增强
  - 效果不易控制
  - 总得到全图增强的结果
- 直方图匹配：
  - 有选择地增强
  - 须给定需要的直方图
  - 可特定增强的结果
- 直方图均衡可以看作是匹配直方图为均匀分布的直方图匹配





# 数字图像处理 (Digital Image Processing)

王正

Email: [zheng\\_wang@seu.edu.cn](mailto:zheng_wang@seu.edu.cn)  
办公室: 无线谷A5415

**Image  
Processing  
Project Ideas**  
*Beginners*



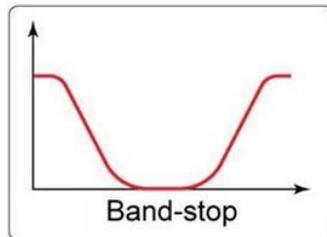
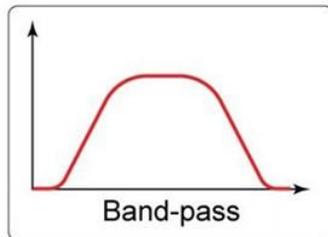
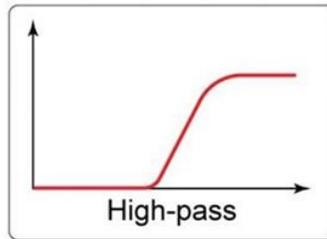
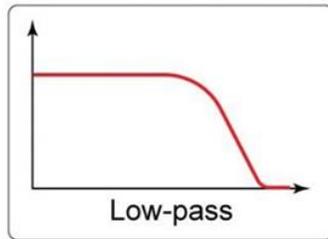


# 第3章 图像变换与空域滤波

---

1. 背景知识
  2. 基本灰度变换
  3. 直方图处理
  4. 空间滤波基础
  5. 空域平滑
  6. 空域锐化
-

图像的平滑、锐化都是利用掩模操作来完成的。通过**掩模操作**实现一种邻域运算,待处理像素点的结果由邻域的图像像素以及相应的与邻域有相同维数的子图像得到。这些子图像被称为**滤波器、掩模、核、模板或窗口**。  
(可能出现在不同文献中的不同名称)  
掩模运算的数学含义是互相关(或卷积)运算。



滤波是指通过、修改或抑制图像的规定频率分量

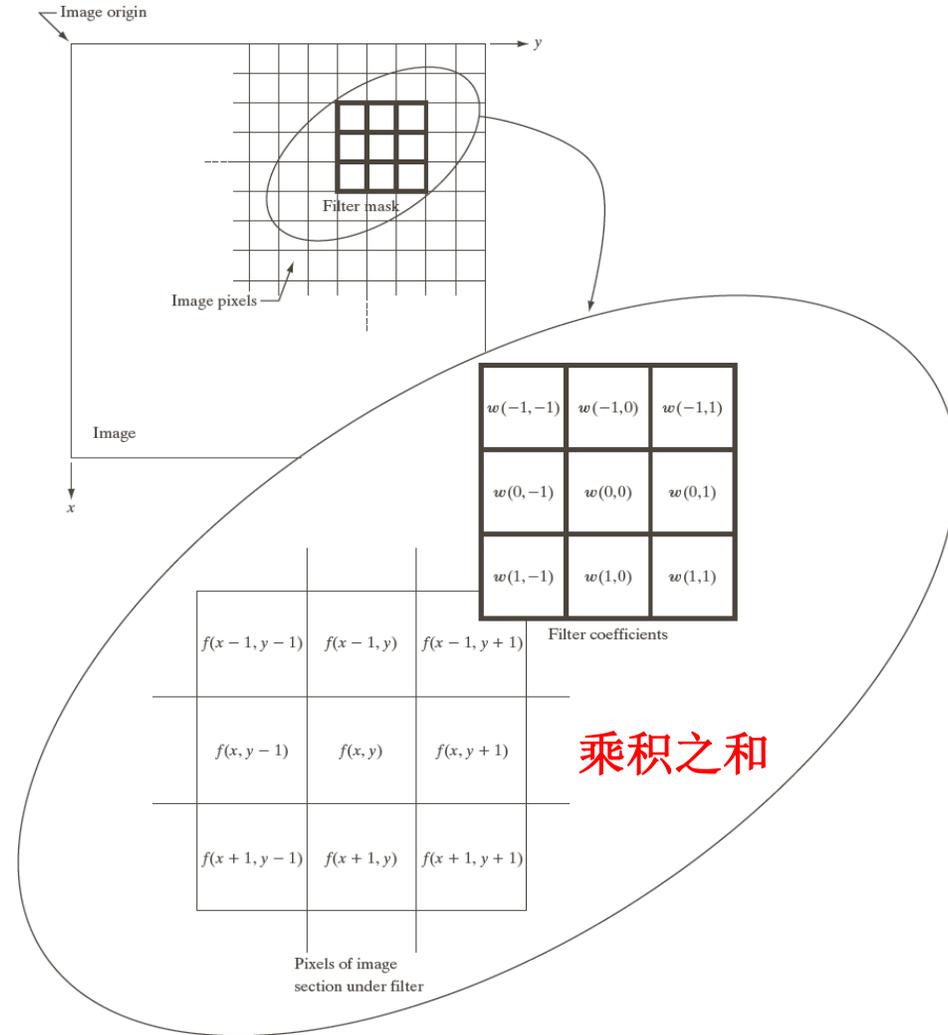
# 空域滤波机制

$$g(x, y) = \sum_{s=-a}^a \sum_{t=-b}^b w(s, t) f(x + s, y + t)$$

原图像 ↑  
↓ 滤波核

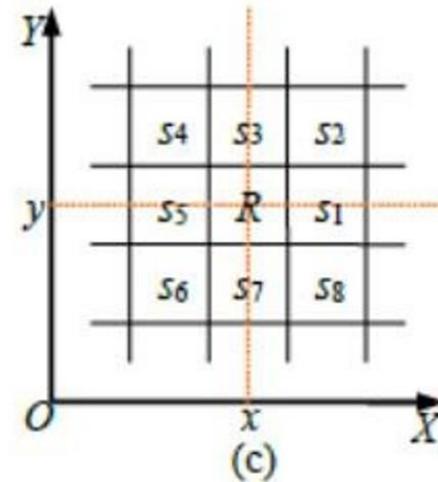
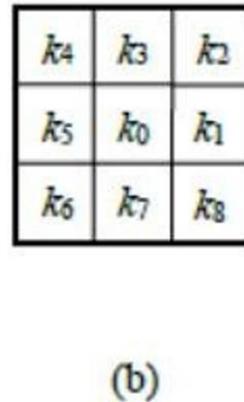
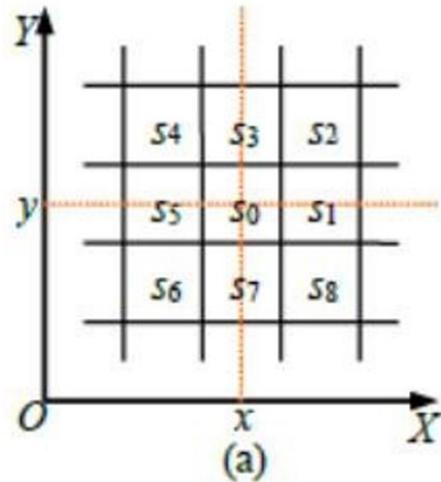
滤波核是一个**阵列**，其**大小**定义了运算的邻域，其**系数**决定了滤波器的性质。

**相关vs. 卷积**：卷积运算需要对卷积核进行反转操作，而相关不需要。

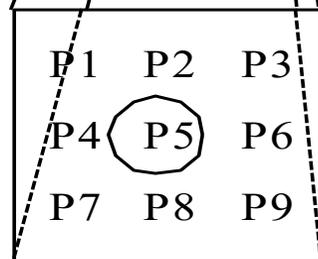
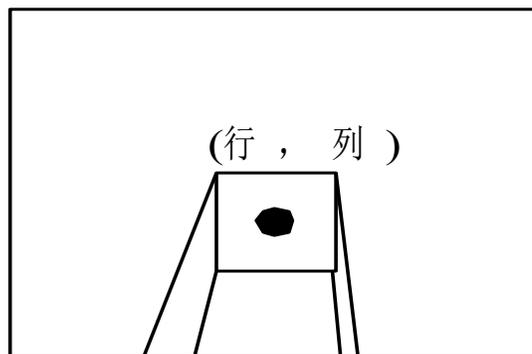


点(x,y)处的响应R为:

$$\begin{aligned}
 R = & w(-1, -1) f(x - 1, y - 1) + \\
 & w(-1, 0) f(x - 1, y) + \dots \\
 & + w(0, 0) f(x, y) + \dots + \\
 & w(1, 0) f(x + 1, y) + w(1, 1) f(x + 1, y + 1)
 \end{aligned}$$

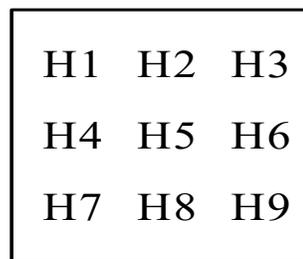


输入图像



3×3 邻域

\*



3×3 卷积核

加权和计算

$$\begin{aligned}
 &H1 \cdot P1 + \\
 &H2 \cdot P2 + \\
 &H3 \cdot P3 + \\
 &H4 \cdot P4 + \\
 &H5 \cdot P5 + \\
 &H6 \cdot P6 + \\
 &H7 \cdot P7 + \\
 &H8 \cdot P8 + \\
 &H9 \cdot P9 +
 \end{aligned}$$

---

P5的新值

卷积：模板  
旋转180度

## 互相关运算示意图





一般来说，在 $M \times N$ 的图像 $f$ 上，用 $m \times n$ 大小的滤波器掩模进行线性滤波由下式给出：

$$g(x, y) = \sum_{s=-a}^a \sum_{t=-b}^b w(s, t) f(x - s, y - t)$$

**其中  $a=(m-1)/2$ 且 $b=(n-1)/2$ ,处理的掩模长与宽一般为奇数。**

为得到一幅经过完整的经过滤波处理的图像，必须对 $x=0, 1, 2, \dots, M-1$ 和 $y=0, 1, 2, \dots, N-1$ 依次应用公式。

简化表达形式：
$$R = w_1 z_1 + w_2 z_2 + \dots + w_{mn} z_{mn} = \sum_{i=1}^{mn} w_i z_i$$

3×3的掩模：
$$R = w_1 z_1 + w_2 z_2 + \dots + w_9 z_9 = \sum_{i=1}^9 w_i z_i$$

$w_1$	$w_2$	$w_3$
$w_4$	$w_5$	$w_6$
$w_7$	$w_8$	$w_9$

3×3的滤波掩模

# 滤波器的向量表示与模板生成

- 当关注相关或卷积的响应特性时，可以将响应写为乘积的求和形式

$$R = w_1 z_1 + w_2 z_2 + \dots + w_{MN} z_{MN} = \mathbf{w}^T \mathbf{z}$$

- 等价于将二维滤波器按一维进行编号

- 空间滤波器的模板生成

- 滤波器的系数根据其支持怎么样的操作来选择

- **线性滤波**的作用是实现乘积求和操作：加权求和

1 <small>x<sub>1</sub></small>	1 <small>x<sub>0</sub></small>	1 <small>x<sub>1</sub></small>	0	0
0 <small>x<sub>0</sub></small>	1 <small>x<sub>1</sub></small>	1 <small>x<sub>0</sub></small>	1	0
0 <small>x<sub>1</sub></small>	0 <small>x<sub>0</sub></small>	1 <small>x<sub>1</sub></small>	1	1
0	0	1	1	0
0	1	1	0	0

Image

4		

Convolved Feature

$$w_{mn} = \frac{1}{MN} \quad w_{mn} = \exp\left(-\frac{\left(m - \left\lfloor \frac{M}{2} \right\rfloor\right)^2 + \left(n - \left\lfloor \frac{N}{2} \right\rfloor\right)^2}{2\sigma}\right)$$

- **非线性滤波**要求确定领域大小，以及对包含在领域内的图像像素执行的操作(如中值滤波)

- 练习题：利用填充，保持尺寸不变，计算卷积结果

1	1	2	2	2
1	1	2	2	2
3	3	3	4	4
3	3	3	4	4
3	3	3	4	4



1	0	-1
1	0	-1
1	0	-1



1	1	1
0	0	0
-1	-1	-1



## SEPARABLE FILTER KERNELS

As noted in Section 2.6, a 2-D function  $G(x, y)$  is said to be *separable* if it can be written as the product of two 1-D functions,  $G_1(x)$  and  $G_2(x)$ ; that is,  $G(x, y) = G_1(x)G_2(y)$ . A spatial filter kernel is a matrix, and a separable kernel is a matrix that can be expressed as the outer product of two vectors. For example, the  $2 \times 3$  kernel

$$w = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

is separable because it can be expressed as the outer product of the vectors

$$\mathbf{c} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad \text{and} \quad \mathbf{r} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

That is,

$$\mathbf{c} \mathbf{r}^T = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} = w$$

Property	Convolution	Correlation
Commutative	$f \star g = g \star f$	—
Associative	$f \star (g \star h) = (f \star g) \star h$	—
Distributive	$f \star (g + h) = (f \star g) + (f \star h)$	$f \star (g + h) = (f \star g) + (f \star h)$

The importance of separable kernels lies in the computational advantages that result from the associative property of convolution. If we have a kernel  $w$  that can be decomposed into two simpler kernels, such that  $w = w_1 \star w_2$ , then it follows from the commutative and associative properties in Table 3.5 that

$$w \star f = (w_1 \star w_2) \star f = (w_2 \star w_1) \star f = w_2 \star (w_1 \star f) = (w_1 \star f) \star w_2 \quad (3-43)$$

This equation says that convolving a separable kernel with an image is the same as convolving  $w_1$  with  $f$  first, and then convolving the result with  $w_2$ .

$$C = \frac{MNmn}{MN(m+n)} = \frac{mn}{m+n}$$

对于11x11大小  
的核优势为  
5.5



# 第3章 图像变换与空域滤波

---

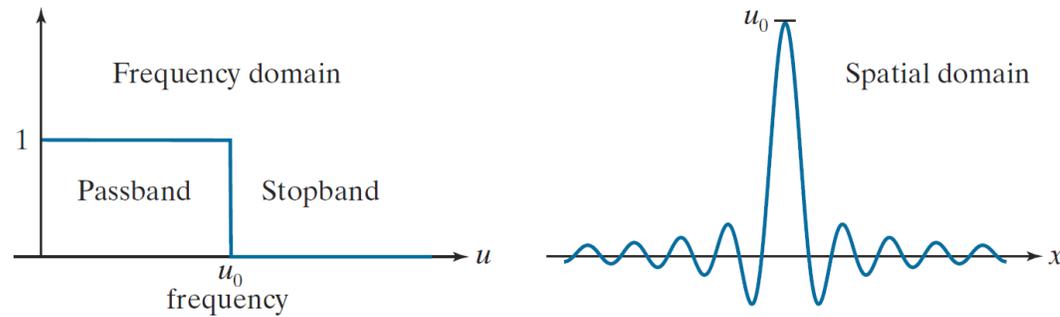
1. 背景知识
  2. 基本灰度变换
  3. 直方图处理
  4. 空间滤波基础
  5. 空域平滑
  6. 空域锐化
-

The tie between spatial- and frequency-domain processing is the *Fourier transform*. We use the Fourier transform to go from the spatial to the frequency domain; to return to the spatial domain we use the *inverse Fourier transform*.

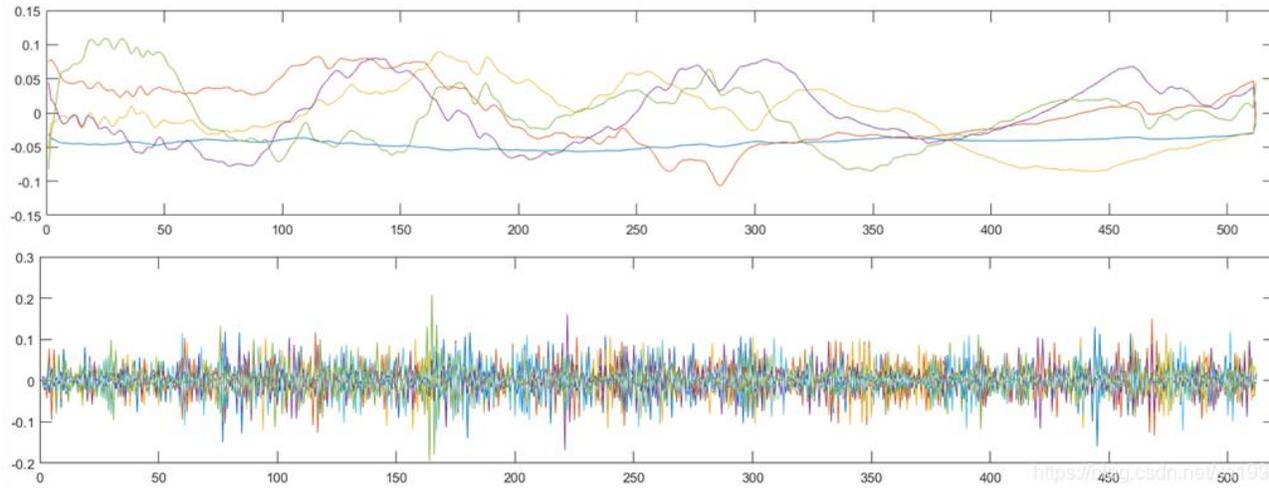
a b

**FIGURE 3.32**

(a) Ideal 1-D low-pass filter transfer function in the frequency domain.  
 (b) Corresponding filter kernel in the spatial domain.



1. Convolution, which is the basis for filtering in the spatial domain, is equivalent to multiplication in the frequency domain, and vice versa.
2. An impulse of strength  $A$  in the spatial domain is a constant of value  $A$  in the frequency domain, and vice versa.



低频信息，变换幅度小，主要包含图像轮廓

高频信息，变换幅度大，主要包含图像细节，噪声等

■ 图像奇异值分解后奇异向量矩阵前5列和后5列

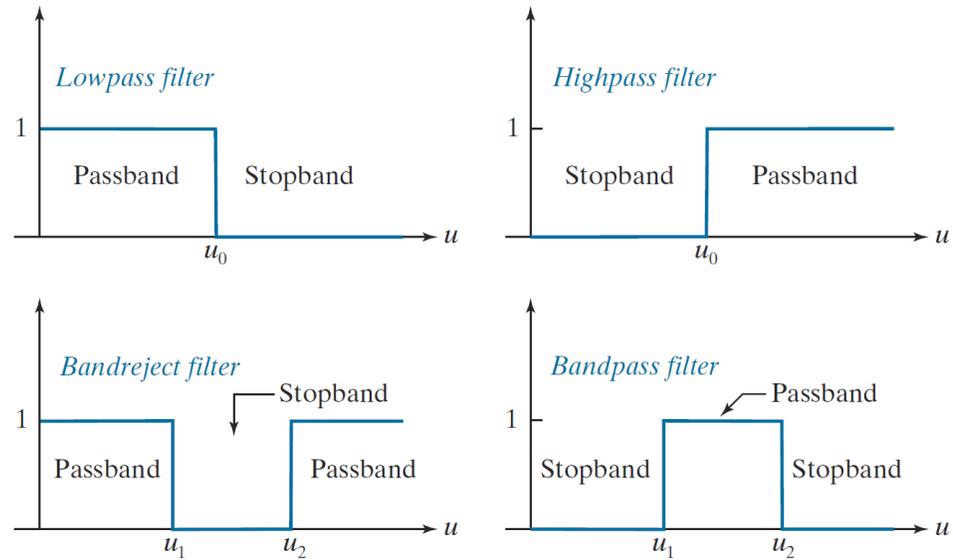


**低频**就是颜色缓慢变化，也就是灰度缓慢地变化，就代表着那是连续渐变的一块区域，这部分就是低频。对于一副图像来说，除去高频就是低频了，也就是边缘以内的内容为低频，而边缘内的内容就是图像的大部分信息，即图像的大致概貌和轮廓，是图像的近似信息。

**高频**即频率变化快的区域。就是相邻区域之间灰度相差很大，这就是变化快。图像中，一个影像与背景的边缘部分，通常会有明显的差别，也就是说变化在边缘处，灰度变化很快，也即是变化频率高的部位。因此，图像边缘的灰度值变化快，就对应着频率高，即高频显示图像边缘。图像的细节处也就是属于灰度值急剧变化的区域，正是因为灰度值的急剧变化，才会出现细节。

一幅图象，你戴上眼镜，盯紧了一个地方看到的是高频分量。  
摘掉眼镜，眯起眼睛，模模糊糊看到的就是低频分量。

# 低通、高通、带阻、带通



Filter type	Spatial kernel in terms of lowpass kernel, $lp$
Lowpass	$lp(x, y)$
Highpass	$hp(x, y) = \delta(x, y) - lp(x, y)$
Bandreject	$br(x, y) = lp_1(x, y) + hp_2(x, y)$ $= lp_1(x, y) + [\delta(x, y) - lp_2(x, y)]$
Bandpass	$bp(x, y) = \delta(x, y) - br(x, y)$ $= \delta(x, y) - [lp_1(x, y) + [\delta(x, y) - lp_2(x, y)]]$

# 空域平滑

平滑滤波器用于**模糊处理和减少噪声**。

模糊处理经常用于预处理，例如，在提取大的目标之前去除图像中一些琐碎的细节、桥接直线或曲线的缝隙。通过线性滤波器和非线性滤波器的模糊处理可以减小噪声。



# 平滑滤波器

## 局部平均法

局部平均法是用某象素邻域内的各点灰度的平均值来代替该象素原来的灰度值。

$$g(x, y) = \frac{\sum_{s=-a}^a \sum_{t=-b}^b w(s, t) f(x + s, y + t)}{\sum_{s=-a}^a \sum_{t=-b}^b w(s, t)}$$

box filter

 $\frac{1}{9} \times$ 

1	1	1
1	1	1
1	1	1

所有系数都相等的空间均值滤波器也叫盒滤波器

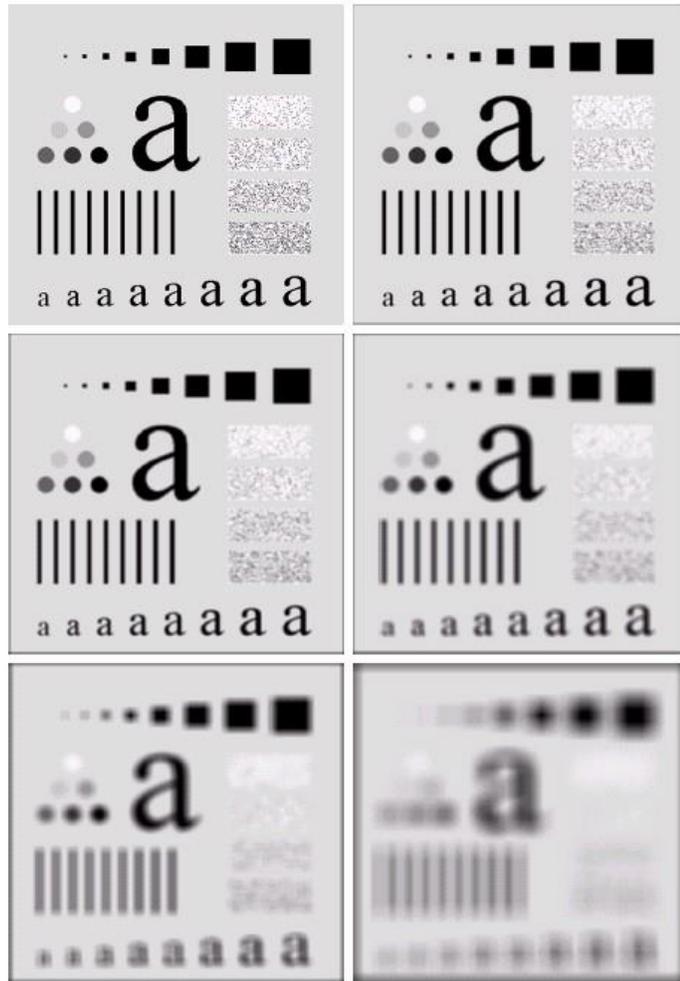
weighted average

 $\frac{1}{16} \times$ 

1	2	1
2	4	2
1	2	1

中心像素权重较大，边缘权重较小

# 图像平滑



原图	n=3方形均值滤波
n=5方形均值滤波	n=9方形均值滤波
n=15方形均值滤波	n=35方形均值滤波

模板尺寸的选择影响图像平滑的效果，尺寸越大，图像越模糊



Man City's Richard Edgill tackles Newcastle's David Ginola at St James Park. City lost the match 3-1. Picture: REUTERS

- 5x5 模板



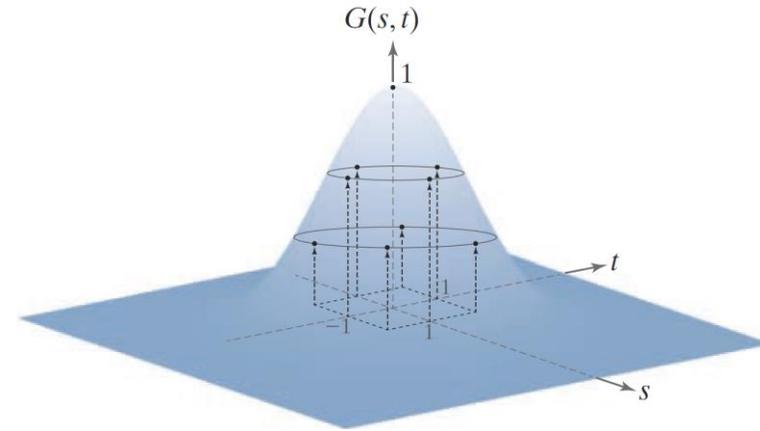
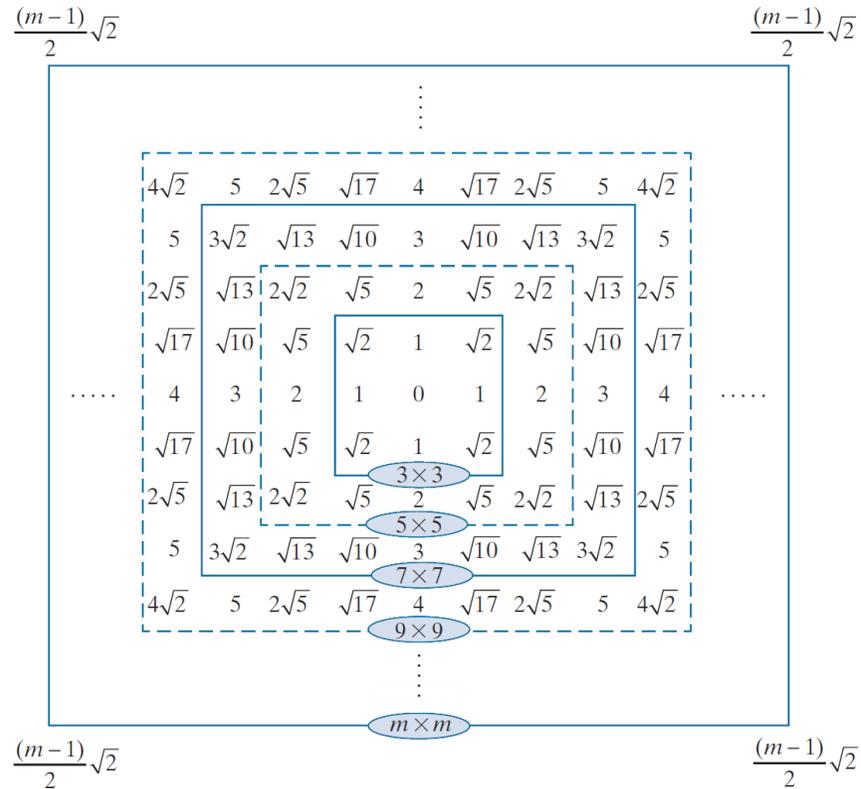
Man City's Richard Edgill tackles Newcastle's David Ginola at St James Park. City lost the match 3-1. Picture: REUTERS

- 9x9 模板

# LOWPASS GAUSSIAN FILTER KERNELS

$$w(s, t) = G(s, t) = Ke^{-\frac{s^2 + t^2}{2\sigma^2}}$$

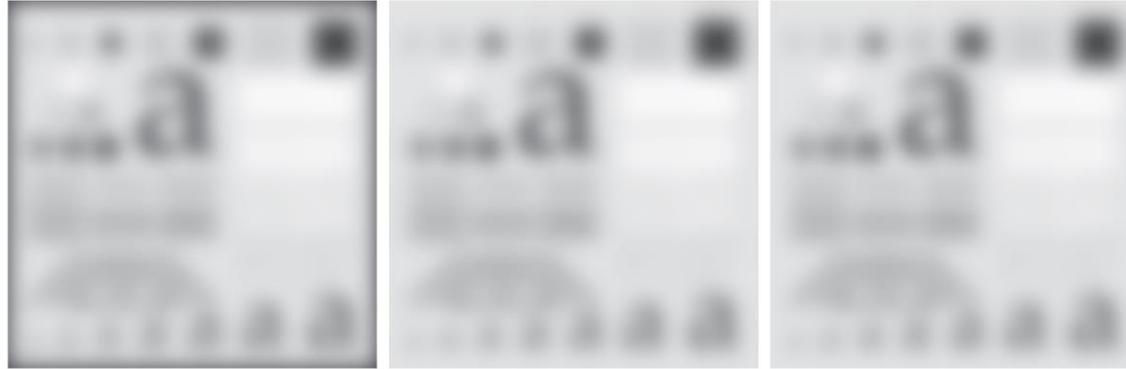
唯一可分离的圆对称核



$$\frac{1}{4.8976} \times$$

0.3679	0.6065	0.3679
0.6065	1.0000	0.6065
0.3679	0.6065	0.3679

1024x1024



三种不同的补零  
方式比较

a b c

**FIGURE 3.39** Result of filtering the test pattern in Fig. 3.36(a) using (a) zero padding, (b) mirror padding, and (c) replicate padding. A Gaussian kernel of size  $187 \times 187$ , with  $K = 1$  and  $\sigma = 31$  was used in all three cases.

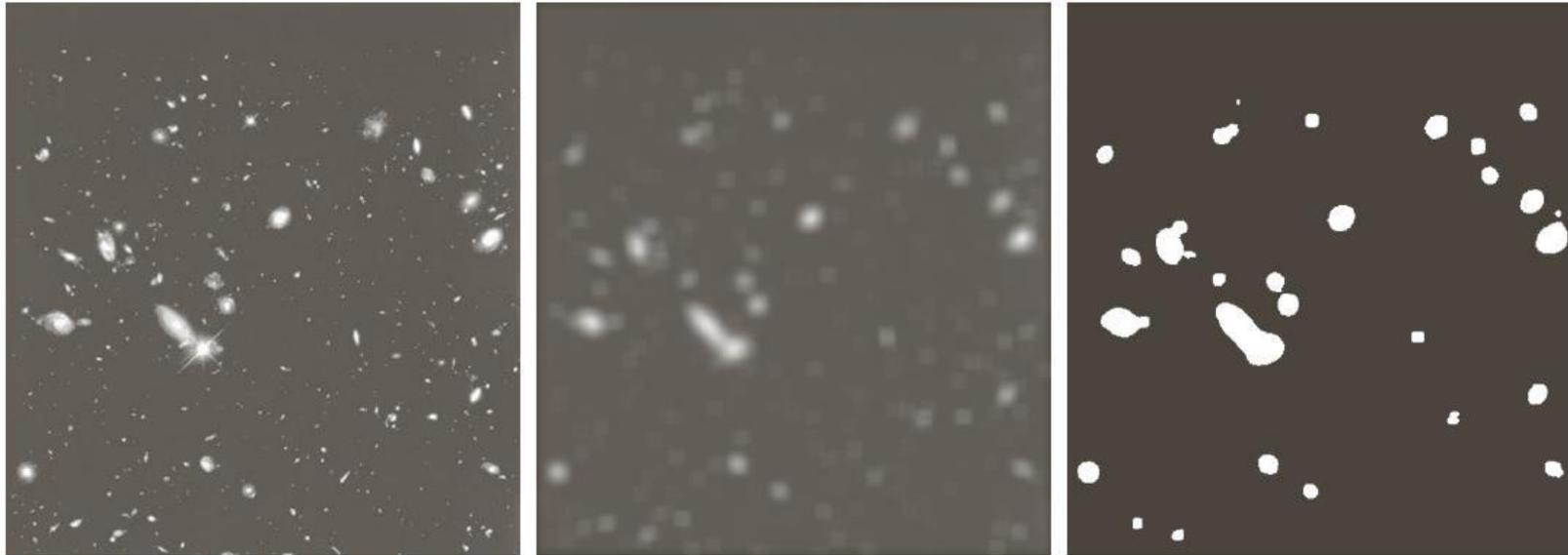


给定大小的平滑  
核产生的相对模  
糊量取决于  
图像大小

a b c

**FIGURE 3.40** (a) Test pattern of size  $4096 \times 4096$  pixels. (b) Result of filtering the test pattern with the same Gaussian kernel used in Fig. 3.39. (c) Result of filtering the pattern using a Gaussian kernel of size  $745 \times 745$  elements, with  $K = 1$  and  $\sigma = 124$ . Mirror padding was used throughout.

# 图像平滑



a b c

**FIGURE 3.34** (a) Image of size  $528 \times 485$  pixels from the Hubble Space Telescope. (b) Image filtered with a  $15 \times 15$  averaging mask. (c) Result of thresholding (b). (Original image courtesy of NASA.)

平滑掉细节图像，较大物体变的像斑点而易于检测



# 统计排序滤波器

## □ 中值滤波 • 非线性平滑滤波器

- 用局部邻域（窗口）里的中值来代替上述局部平均法中的局部平均值。即将以该点为中心的某个窗口框住的各象素的中间值作为处理后图象中该点象素的值。
- 二维中值滤波的概念是一维的推广。
- 以一维为例：
  - 奇数窗口中五点的值为 88、95、230、110、120，按大小重排这五个值得 88、95、110、120、230，其位于中间位置上的“中值”是110。
  - 实际应用：美国家庭收入统计（中位数）

## □ 其他统计排序滤波器

- 最大值滤波器，最小值滤波器



统计排序滤波器是一种非线性的空间滤波器，他的响应基于图像区域中像素的**排序**。

50%-> **中值滤波**：处理脉冲噪声非常有效，还可以保护边缘。

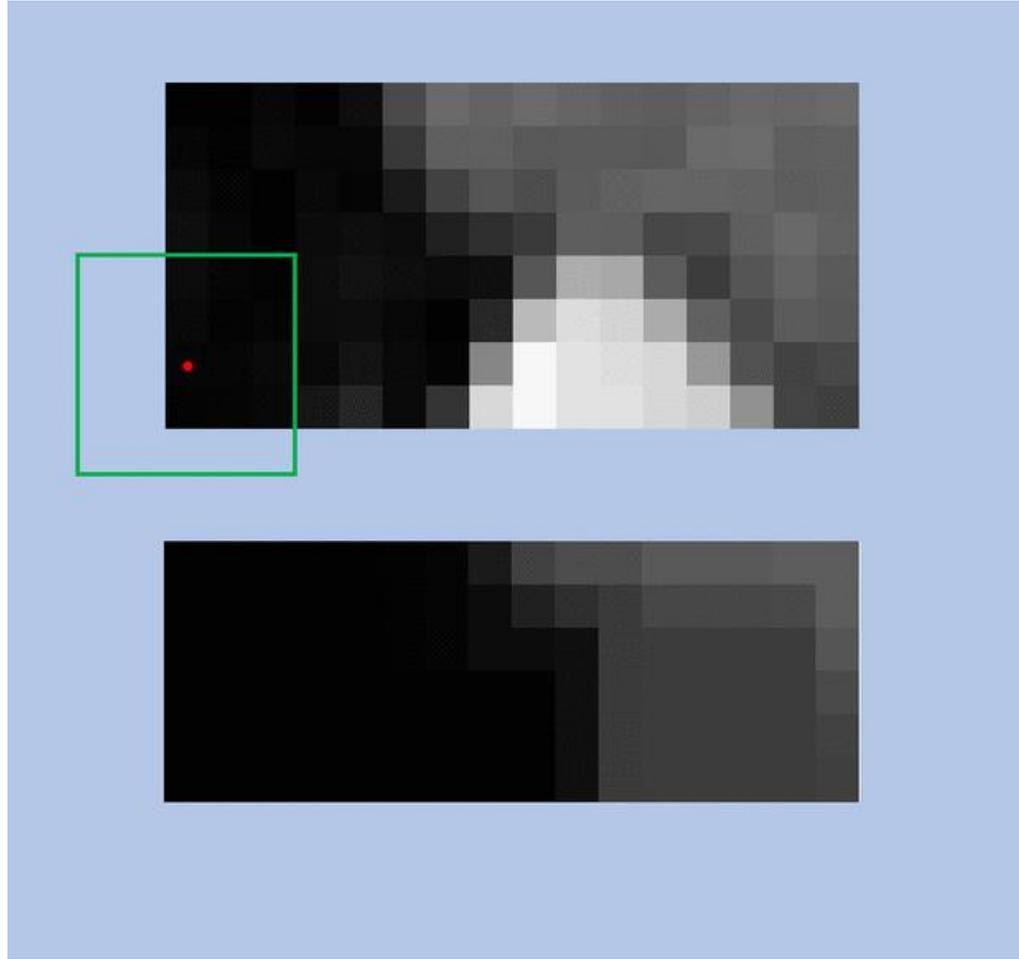
7, 7, 7, 8, 8, 8, 8, 9, 9, 11, 15

100%-> **最大值滤波**，寻找图像中最大点

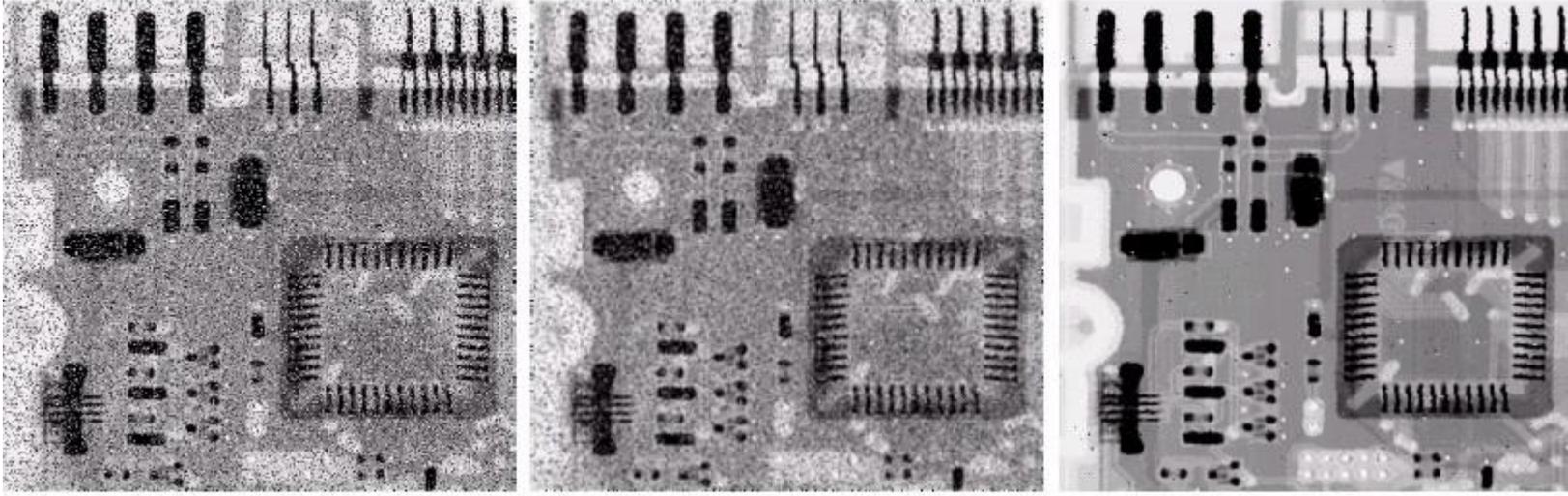
7, 7, 7, 8, 8, 8, 8, 9, 9, 11, 15

0%-> **最小值滤波**

7, 7, 7, 8, 8, 8, 8, 9, 9, 11, 15



# 例



从左到右依次分别为  
椒盐噪声污染的电路板X光图像  
用 $3 \times 3$ 均值掩模去除噪声  
用 $3 \times 3$ 中值滤波器去除噪声

去除椒盐噪声使用自适应中值滤波器的效果会更好一些



# 第3章 图像变换与空域滤波

---

1. 背景知识
  2. 基本灰度变换
  3. 直方图处理
  4. 空间滤波基础
  5. 空域平滑
  6. 空域锐化
-



# 空域锐化

锐化处理的主要目的是**突出图像中的细节**或者增强被模糊了的细节，这种模糊不是由于错误操作，就是特殊图像获取方法的固有影响。

前面讲**平滑**使用的是邻域平均法，均值处理与**积分**类似，而**锐化**处理则可用空间**微分**来完成。微分算子的响应强度与图像在该点的突变程度有关。这样一来，图像微分增强了边缘和其它突变，削弱了灰度变化缓慢的区域。



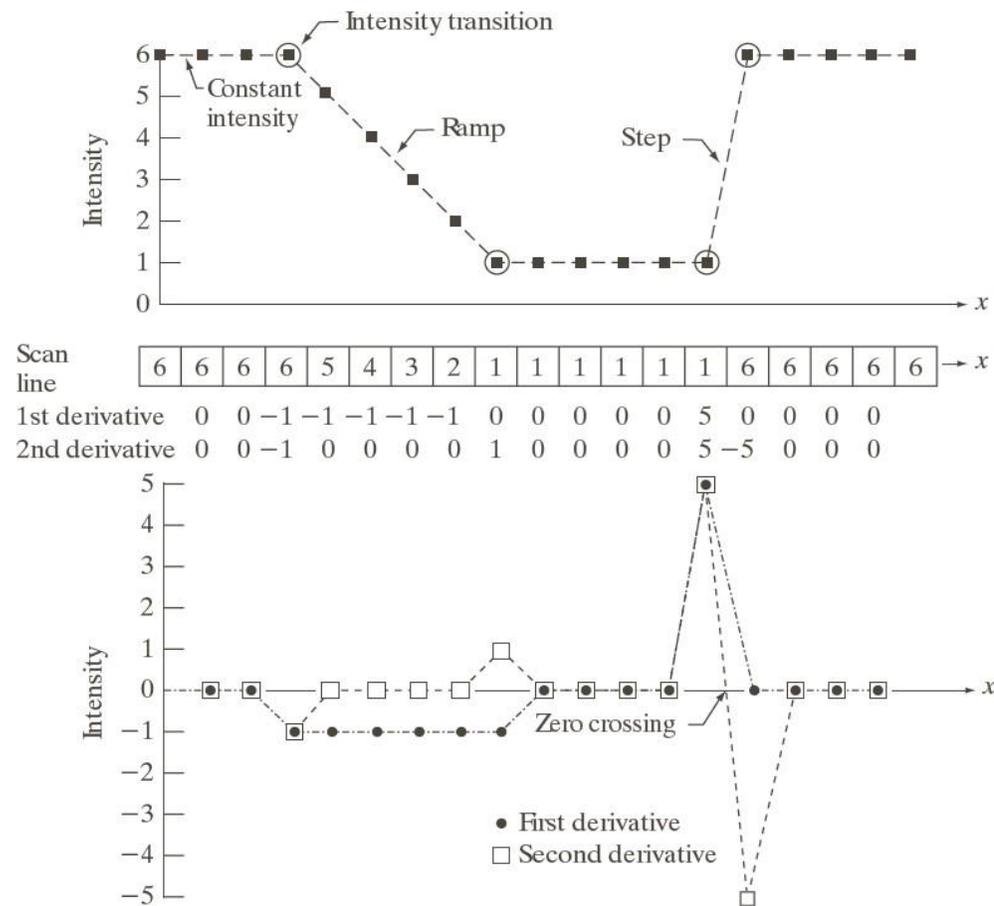
# 空域锐化

- 图象锐化针对常见的图像模糊、边缘不清晰所采取的处理方法，它能加强图象的轮廓，使图象看起来比较清楚。
- 锐化处理的主要目的：突出灰度的过渡部分
  - 常用一阶微分和二阶微分的锐化滤波器

$$\frac{\partial f}{\partial x} = f(x + 1) - f(x)$$

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} = f(x + 1) + f(x - 1) - 2f(x)$$

# 空域锐化



a  
b  
c

**FIGURE 3.36**  
Illustration of the first and second derivatives of a 1-D digital function representing a section of a horizontal intensity profile from an image. In (a) and (c) data points are joined by dashed lines as a visualization aid.



# 一阶微分锐化图像

---

- 分析表明微分可以突出高频成分，从而使图象轮廓清晰。因此在空间域可用微分法锐化图象。
  - 图象处理中常用的微分方法是“梯度法”，即用梯度作为锐化图象的度量。对于数字图象，则用差分来表示梯度。
  - 实际应用中，为了获得各向同性的度量，用梯度的模代替梯度。
-

# 一阶微分锐化图像

- 典型的差分运算，可表示为：

$$G[f(x, y)] \approx |f(x, y) - f(x - 1, y)| + |f(x, y) - f(x, y - 1)|$$

0	0
-1	1

0	-1
0	1

直接差分算子

# 梯度算子

## □ Roberts算子

-1	0
0	1

0	-1
1	0

## □ Sobel算子

-1	-2	-1
0	0	0
1	2	1

-1	0	1
-2	0	2
-1	0	1

## □ Prewitt算子

-1	-1	-1
0	0	0
1	1	1

-1	0	1
-1	0	1
-1	0	1

## □ Kirsch算子

5	5	5
-3	0	-3
-3	-3	-3

-3	5	5
-3	0	5
-3	-3	-3

# 梯度算子

原图



$|G_y|$

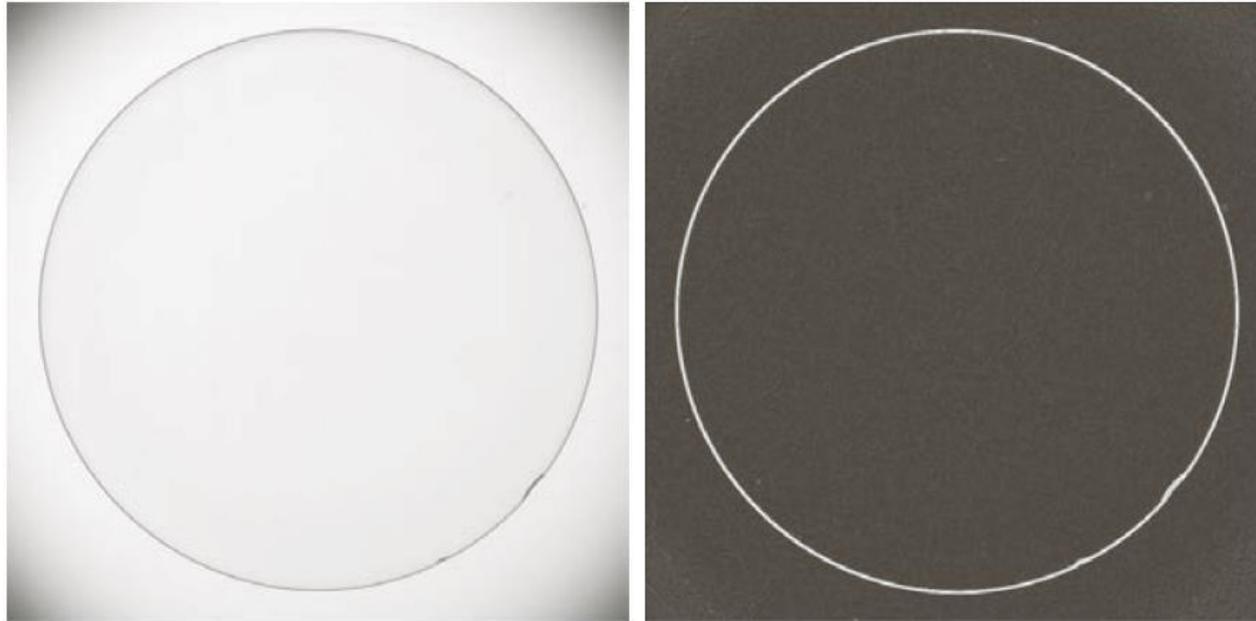
$|G_x|$



$|G_x|$

+  
 $|G_y|$

# 一阶微分锐化图像



a b

**FIGURE 3.42**

(a) Optical image of contact lens (note defects on the boundary at 4 and 5 o'clock).  
(b) Sobel gradient.  
(Original image courtesy of Pete Sites, Perceptics Corporation.)

# 拉普拉斯算子

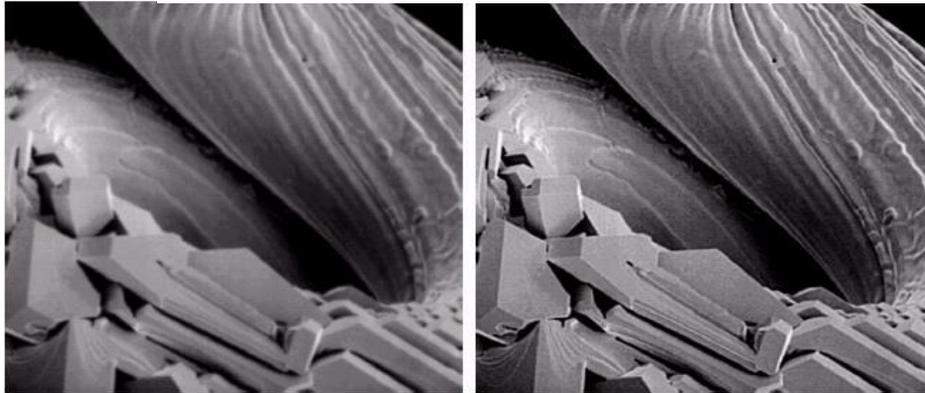
一个二元图像函数 $f(x, y)$ 的拉普拉斯变换定义为

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

几种常用的拉普拉斯算子:

0	1	0	1	1	1	0	-1	0	-1	-1	-1
1	-4	1	1	-8	1	-1	4	-1	-1	8	-1
0	1	0	1	1	1	0	-1	0	-1	-1	-1

a b c d  
FIGURE 3.45



$$g(x, y) = \begin{cases} f(x, y) - \nabla^2 f(x, y) \\ f(x, y) + \nabla^2 f(x, y) \end{cases}$$

# 钝化掩蔽和高提升滤波

## UNSHARP MASKING AND HIGHBOOST FILTERING

1. Blur the original image.
2. Subtract the blurred image from the original (the resulting difference is called the *mask*.)
3. Add the mask to the original.

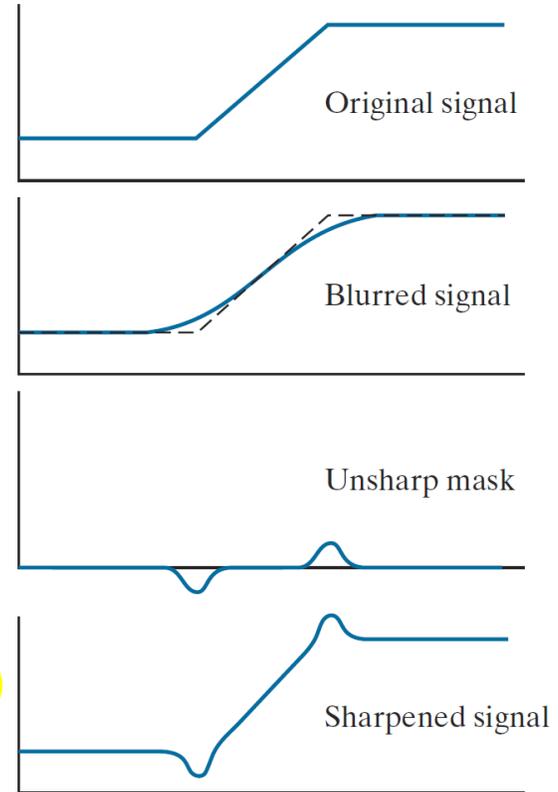
Letting  $\bar{f}(x, y)$  denote the blurred image, the mask in equation form is given by:

$$g_{\text{mask}}(x, y) = f(x, y) - \bar{f}(x, y) \quad (3-55)$$

Then we add a weighted portion of the mask back to the original image:

$$g(x, y) = f(x, y) + k g_{\text{mask}}(x, y) \quad (3-56)$$

where we included a weight,  $k$  ( $k \geq 0$ ), for generality. When  $k = 1$  we have unsharp masking, as defined above. When  $k > 1$ , the process is referred to as **highboost filtering**. Choosing  $k < 1$  reduces the contribution of the unsharp mask.



# 使用拉普拉斯算子进行图像增强

拉普拉斯微分算子强调图像中灰度的突变,弱化灰度慢变化的区域



a	b
c	d

**FIGURE 3.46**

(a) Blurred image of the North Pole of the moon.

(b) Laplacian image obtained using the kernel in Fig. 3.45(a).

(c) Image sharpened using Eq. (3-54) with  $c = -1$ .

(d) Image sharpened using the same procedure, but with the kernel in Fig. 3.45(b).

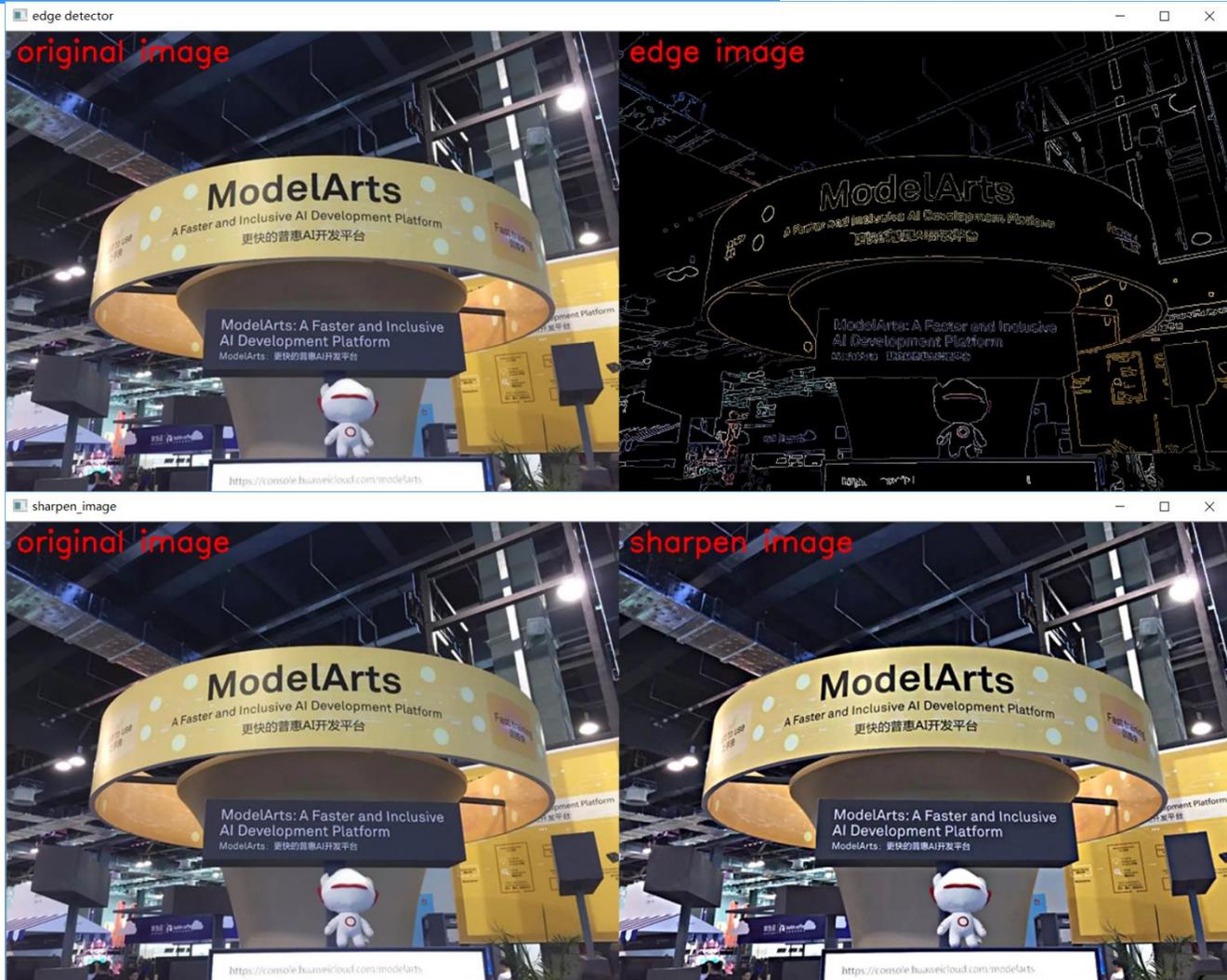
(Original image courtesy of NASA.)



a b c  
d e

**FIGURE 3.49** (a) Original image of size  $600 \times 259$  pixels. (b) Image blurred using a  $31 \times 31$  Gaussian lowpass filter with  $\sigma = 5$ . (c) Mask. (d) Result of unsharp masking using Eq. (3-56) with  $k = 1$ . (e) Result of highboost filtering with  $k = 4.5$ .

larger than the minimum value in the original signal. Negative values cause dark halos around edges that can become objectionable if  $k$  is too large.





(a) The original image

(b) The blurred image of (a)

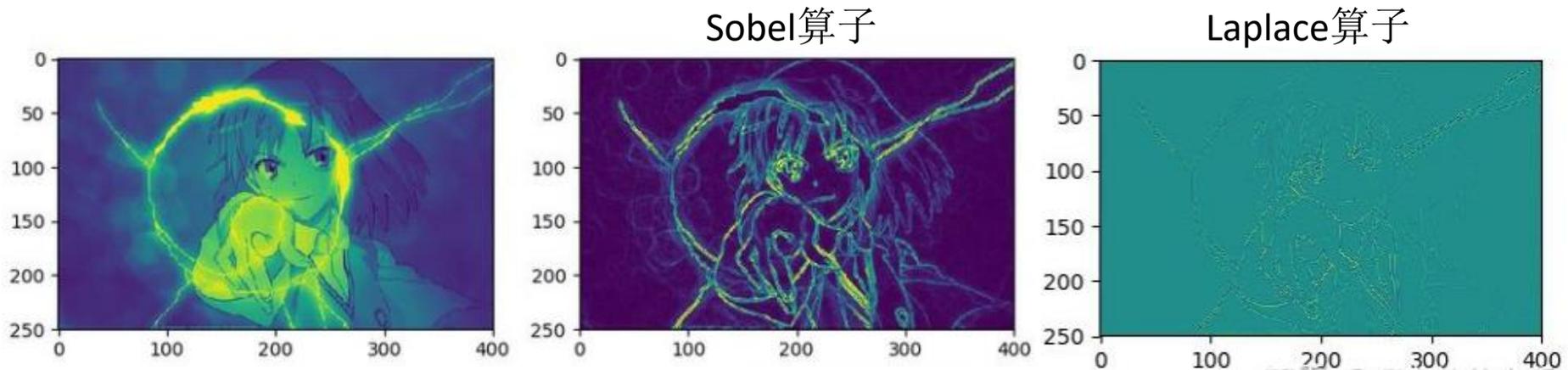
(c) The result of (a) subtracted by (b)



## 一阶微分和二阶微分的区别:

- (1) 一阶微分处理通常会产生较宽的边缘
- (2) 二阶微分处理对细节有较强的响应,如细线和孤立点

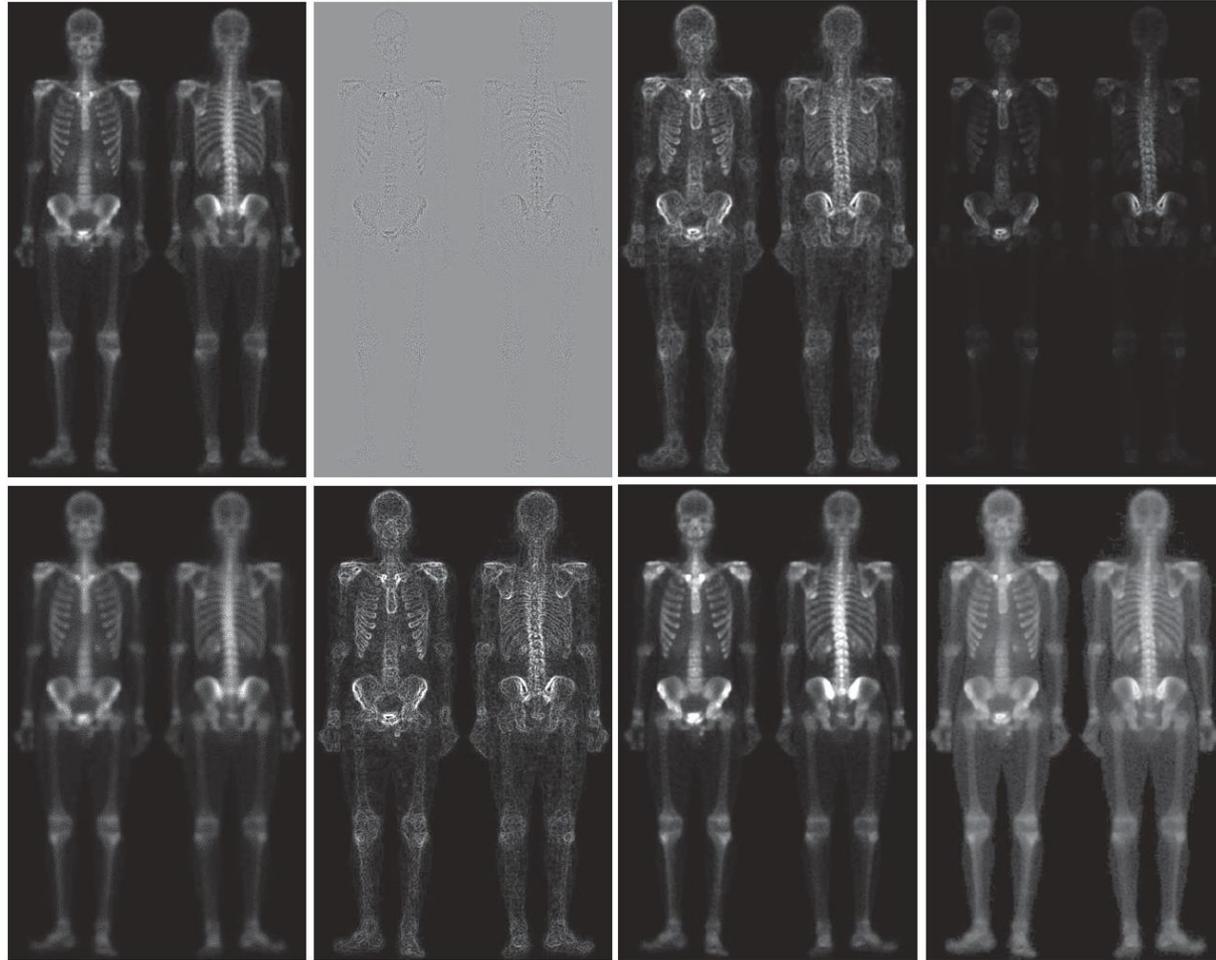
大多数应用中,对图像增强来说.二阶微分处理比一阶微分好,因为形成细节的能力强. 而一阶微分处理主要用于提取边缘.



用拉普拉斯来突出细节，用梯度来增强突出的边缘

a	b
c	d

**FIGURE 3.57**  
 (a) Image of whole body bone scan.  
 (b) Laplacian of (a).  
 (c) Sharpened image obtained by adding (a) and (b).  
 (d) Sobel gradient of image (a). (Original image courtesy of G.E. Medical Systems.)



e	f
g	h

**FIGURE 3.57**  
 (Continued)  
 (e) Sobel image smoothed with a  $5 \times 5$  box filter.  
 (f) Mask image formed by the product of (b) and (e).  
 (g) Sharpened image obtained by the adding images (a) and (f).  
 (h) Final result obtained by applying a power-law transformation to (g). Compare images (g) and (h) with (a). (Original image courtesy of G.E. Medical Systems.)





# 数字图像处理 (Digital Image Processing)

王正

Email: [zheng\\_wang@seu.edu.cn](mailto:zheng_wang@seu.edu.cn)

办公室: 无线谷A5415

**Image  
Processing  
Project Ideas**  
*Beginners*





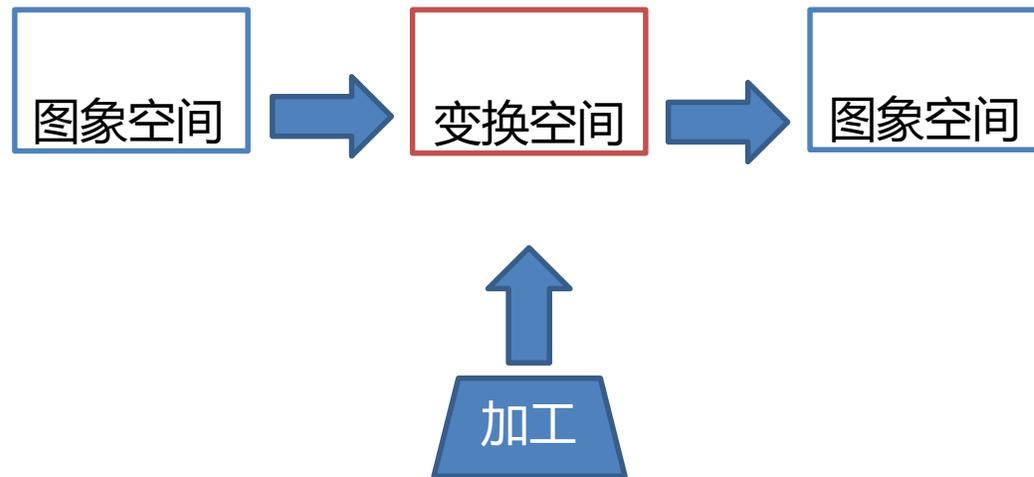
# 第4章 频率域滤波

---

1. 离散傅立叶变换(DFT)
  2. 频率域滤波基础
  3. 频率域滤波器平滑图像
  4. 频率域滤波器锐化图像
  5. 选择性滤波
  6. 其它变换(离散余弦变换)
  7. 小波变换
-

## 第4章 频率域滤波：图像变换

**动机：**为了有效和快速地对图象进行处理，常常需要将原定义在图象空间的图象以某种形式转换到另外一些空间（频率域空间）并加工，最后再转换回图象空间以得到所需的效果。





# 图像通过频域进行变换的意义

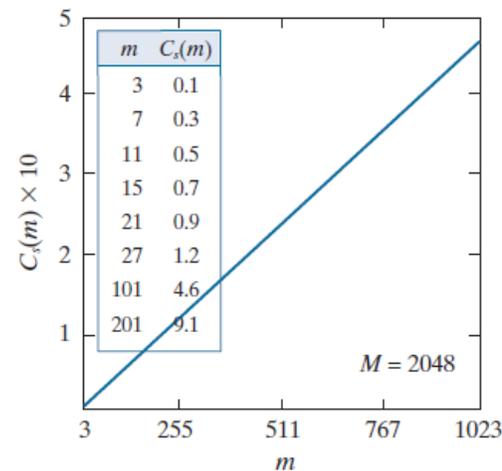
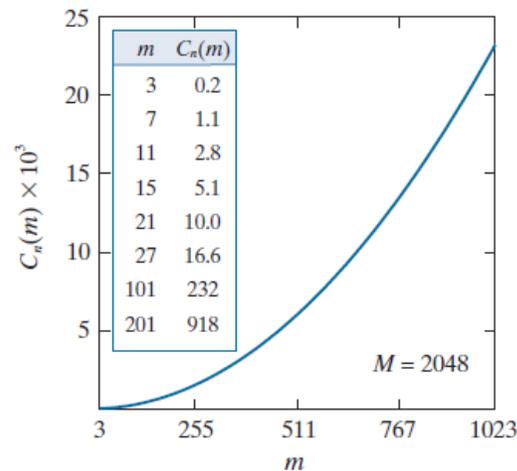
- 图像在空域上具有很强的相关性，借助于正交变换可在空域的复杂计算转换到频域后得到简化
  - 图像的变换过程类比于数学上去相关处理，在空域相互交叉难以描述的特征，在频域往往得到更为直观的表达、集中或分离
  
- 借助于频域特性的分析，将更有利于获得图像的各种特性和进行特殊处理
  - 利用频率成分和图像外表之间的对应关系，一些在空间域表述困难的增强任务，在频率域中变得非常普通
  
- 理论上可以在频率域指定滤波器，通过反变换，以其空域响应作为构建空间滤波器的指导

As you learned in Section 3.4, it takes on the order of  $MNmn$  operations (multiplications and additions) to filter an  $M \times N$  image with a kernel of size  $m \times n$  elements. If the kernel is separable, the number of operations is reduced to  $MN(m+n)$ . In Section 4.11, you will learn that it takes on the order of  $2MN \log_2 MN$  operations to perform the equivalent filtering process in the frequency domain, where the 2 in front arises from the fact that we have to compute a forward and an inverse FFT.

a b

FIGURE 4.2

(a) Computational advantage of the FFT over non-separable spatial kernels.  
 (b) Advantage over separable kernels. The numbers for  $C(m)$  in the inset tables are not to be multiplied by the factors of 10 shown for the curves.



$$C_n(m) = \frac{M^2 m^2}{2M^2 \log_2 M^2} = \frac{m^2}{4 \log_2 M}$$

$$C_s(m) = \frac{2M^2 m}{2M^2 \log_2 M^2} = \frac{m}{2 \log_2 M}$$



# 第4章 频率域滤波

1. 离散傅立叶变换(DFT)
2. 频率域滤波基础
3. 频率域滤波器平滑图像
4. 频率域滤波器锐化图像
5. 选择性滤波
6. 其它变换(离散余弦变换)
7. 小波变换

# 4.1 傅立叶变换基础

## • 吉恩·巴普提斯特·约瑟夫·傅里叶

- 1768-1830，男爵，法国数学家、物理学家
- 主要成就：热的传导理论、傅里叶级数
- 小行星10101号傅里叶星，名字被刻在埃菲尔铁塔
- 贡献：任何周期函数都可以表示为不同频率的正弦和/或余弦之和的形式，每一项都乘以不同的系数（该和即为傅里叶级数）

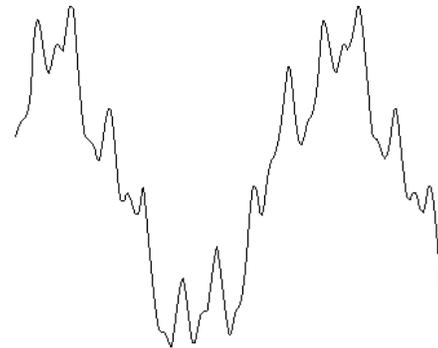
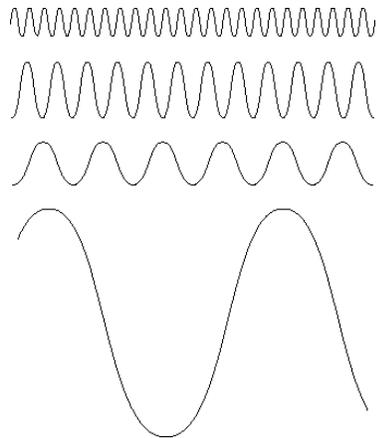


$$X_k = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{i2\pi k \frac{n}{N}}$$

To find the energy at a particular frequency, spin your signal around a circle at that frequency, and average a bunch of points along that path.

# 4.1 傅立叶变换基础

- 傅里叶级数 (FS)
  - 任何**周期函数**都可以表示为不同频率的正弦或余弦之和的形式, 每个正弦项和余弦项都乘以不同的系数
- 傅里叶变换 (FT)
  - 任何**非周期函数** (其曲线下的面积是有限的, 即绝对可积) 可以表示为正弦和/或余弦乘以加权函数的积分来表示



**FIGURE 4.1** The function at the bottom is the sum of the four functions above it. Fourier's idea in 1807 that periodic functions could be represented as a weighted sum of sines and cosines was met with skepticism.