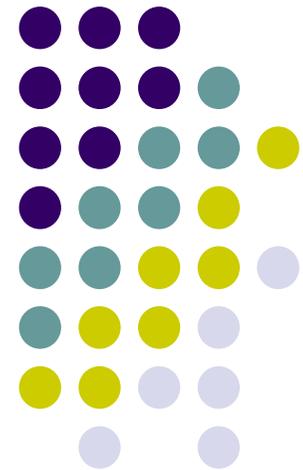


数字图像处理

第十一讲

彩色图像处理 (I)



提纲

- 彩色基础
- 彩色模型
- 伪彩色图像处理
- 全彩色图像处理



引言

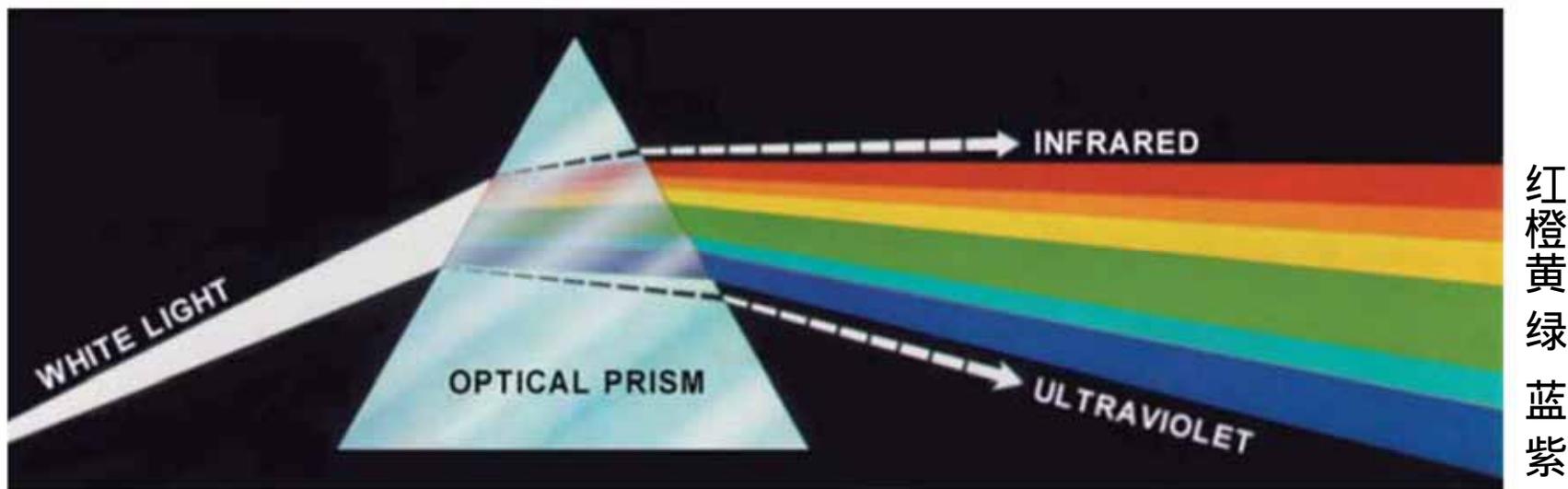


- 彩色的优势
 - 简化场景中识别和提取目标
 - 人类可以辨别几千种彩色
 - 只能辨别几十种灰度
 - 人工图像分析需要彩色图片
- 全彩色
 - 用全彩色传感器获取的真实彩色
- 伪彩色
 - 为特定灰度或灰度范围赋予颜色



基本概念

- 大脑感知和理解颜色
 - 尚没有完全了解
- 颜色的物理特性
 - 实验和理论分析

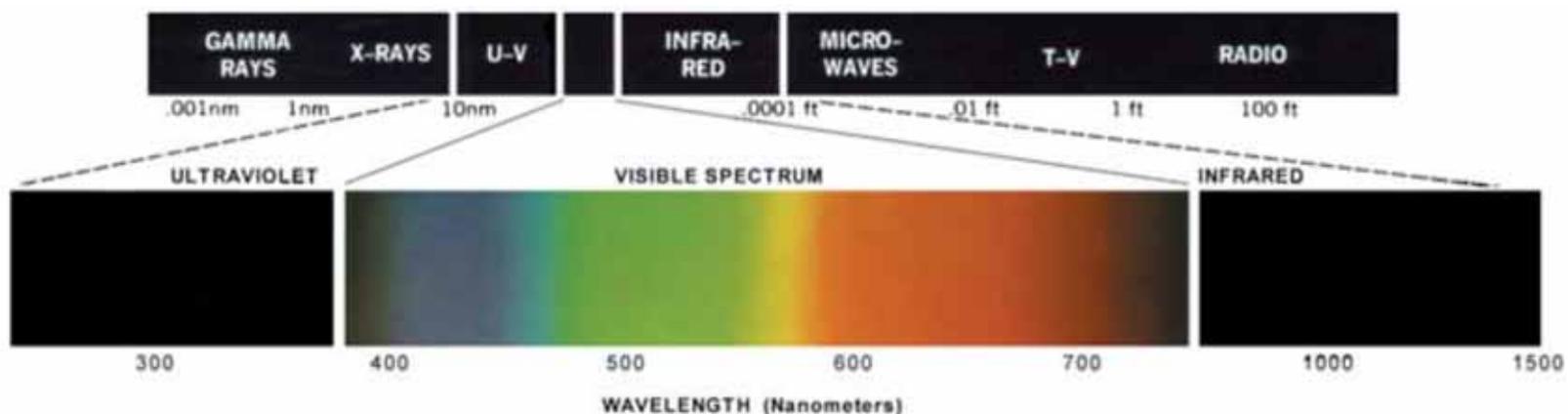


色谱

基本概念



- 可见光的电磁波段



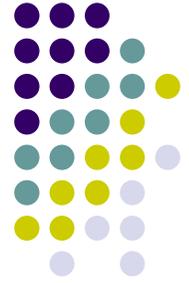
- 颜色是平滑过渡的
- 物体颜色由其反射性质决定的
 - 均匀反射→白色
 - 反射特定光谱→特定颜色

基本概念



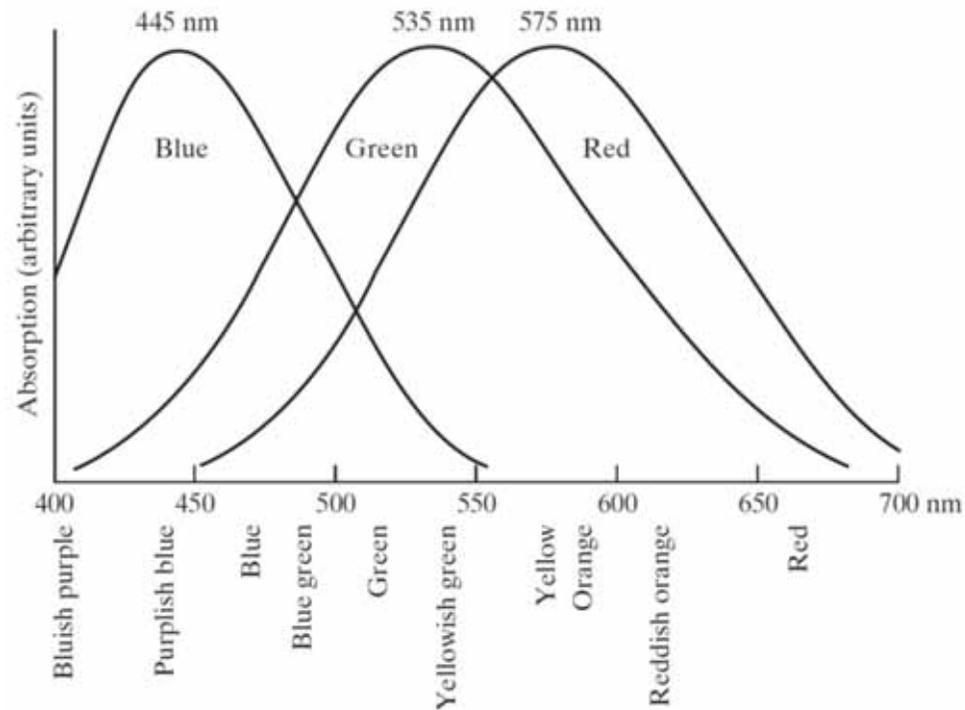
- 无色光
 - 黑白电视、黑白照片
 - 属性：强度（intensity）
 - 灰度级（gray level）：表示强度的数值
- 彩色光
 - 约为400-700纳米电磁波
 1. 辐射（radiance）：能量（瓦特）
 2. 光强（luminance）：感知的能量（流明）
 3. 亮度（brightness）：主观描绘

基础知识



- 锥状细胞
 - 600-700万个
 - 红色（65%）、绿色（33%）、蓝色（2%）

锥状细胞对光的吸收曲线

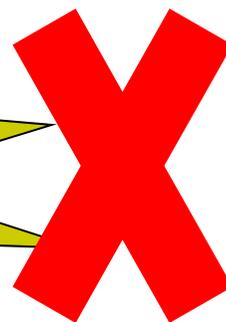




基础知识

- 主颜色 (primary colors)
 - 红色 (R)、绿色 (G)、蓝色 (B)
- 1931年国际照明委员会
 - 700纳米、546.1纳米、435.8纳米
 - 与前面的实验 (1965年) 并不完全吻合

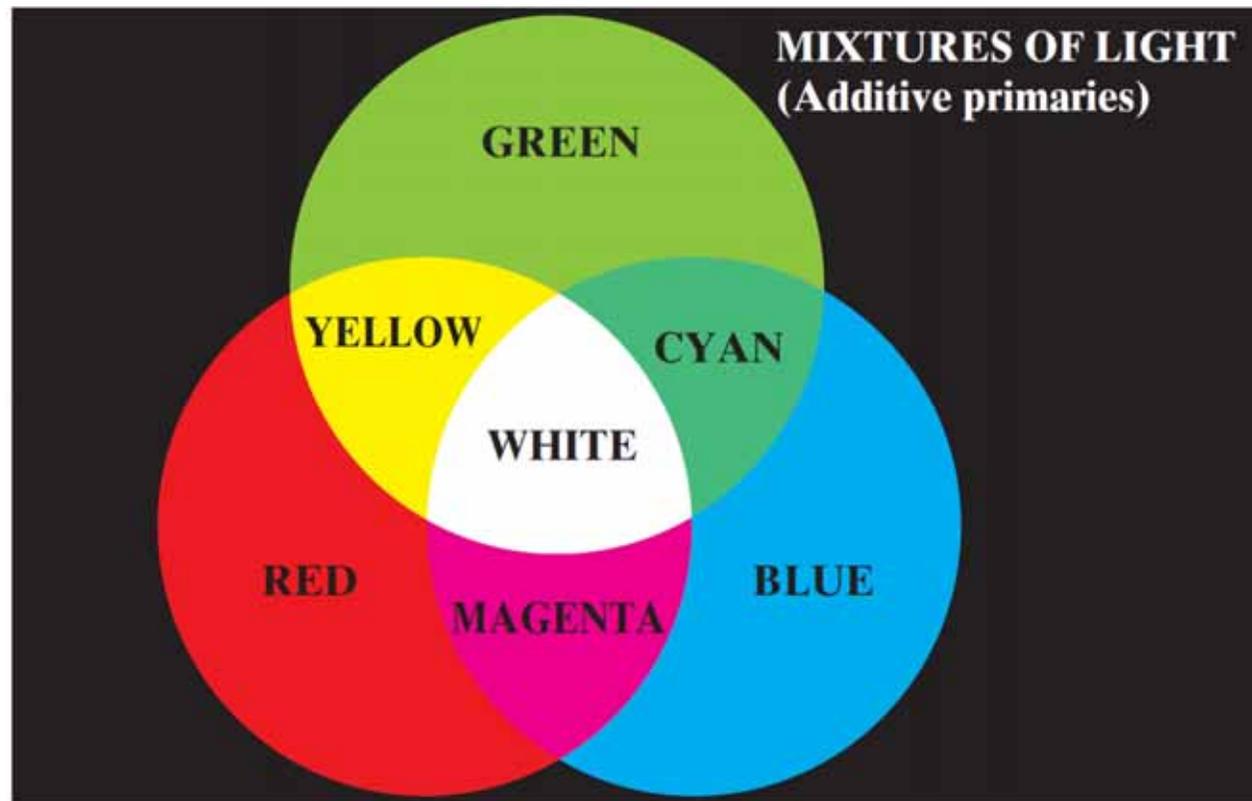
三个主颜色的混合，
能够产生所有的颜色！



基础知识

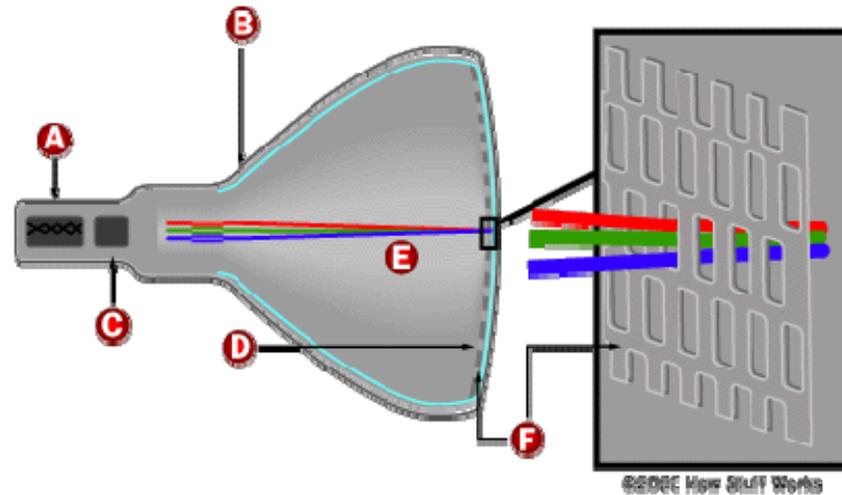


- 次生色 (secondary colors)
 - 主颜色叠加



举例

- CRT显示器



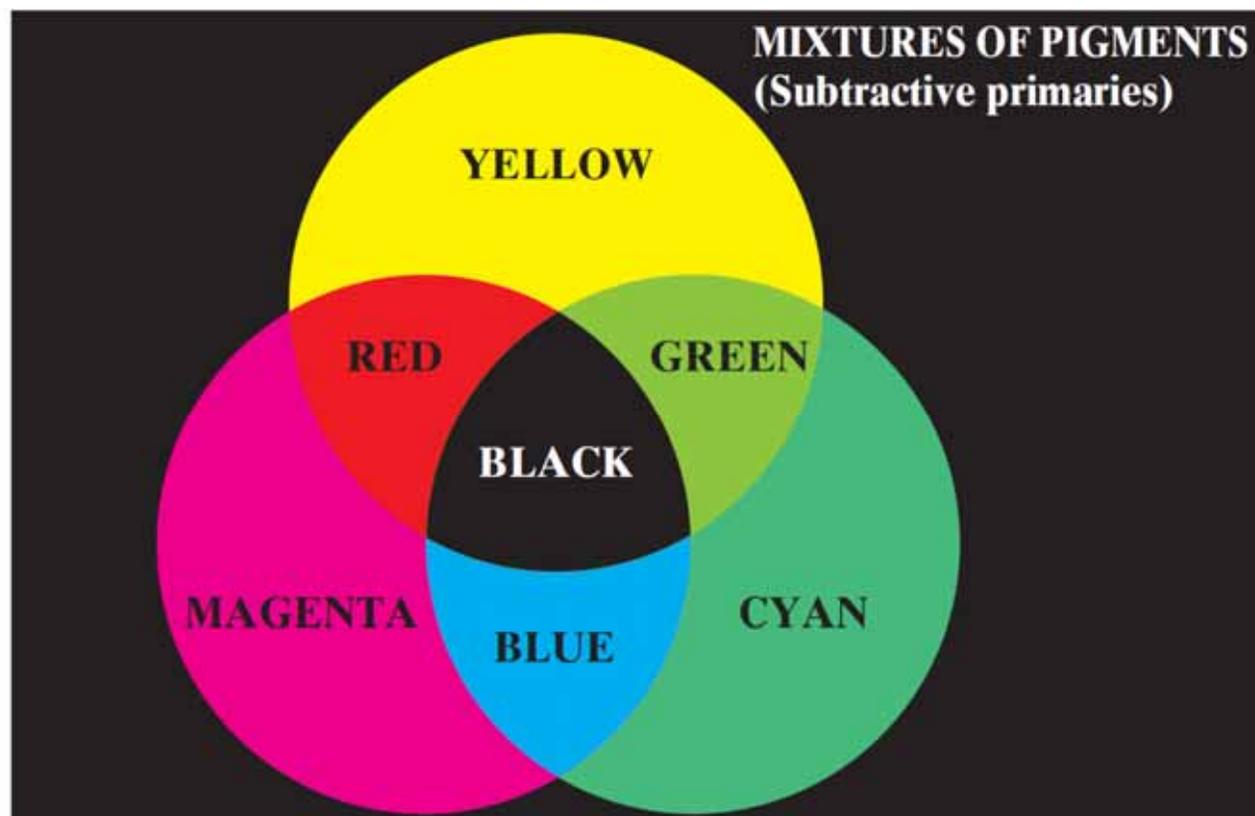
A Cathode
B Conductive coating
C Anode

D Phosphor-coated screen
E Electron beams
F Shadow mask

基础知识



- 颜料的主颜色
 - 吸收光的主颜色

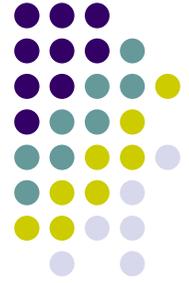


基础知识



● 区分颜色

1. 亮度 (brightness)
 - 主观描绘，类似于无色光的强度
 2. 色调 (hue)
 - 主波长，也就是感知到的颜色
 3. 饱和度 (saturation)
 - 反应白光的比例，白光越多越不饱和
 - 红色+白色=粉红色、紫色+白色=淡紫色
- 色度 (chromaticity)
 - 色调、饱和度



基础知识

- 三色值 (tristimulus values)
 - 红色 X 、绿色 Y 、蓝色 Z
- 三系数 (trichromatic coefficients)

$$x = \frac{X}{X + Y + Z}$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z}$$

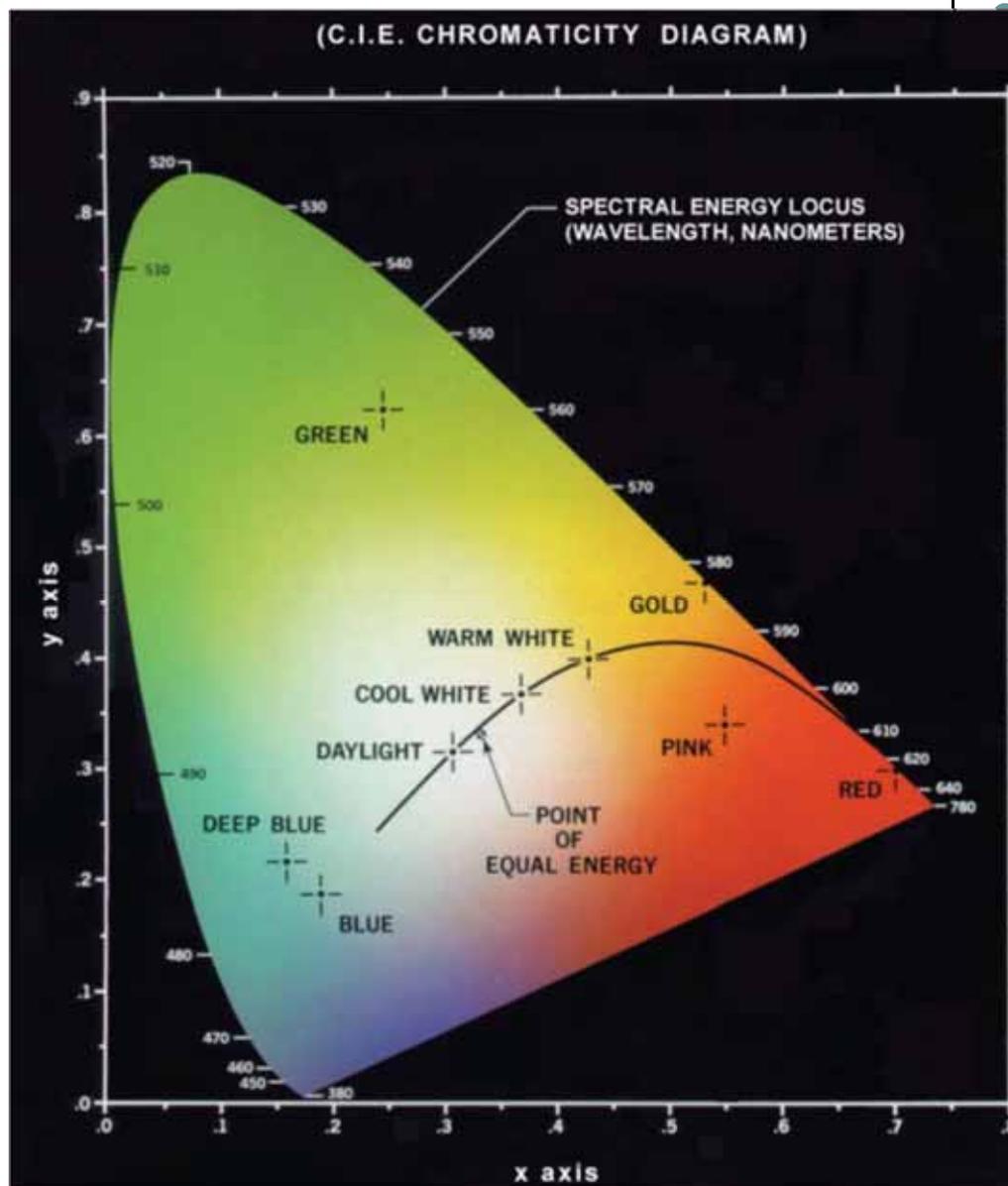
$$z = \frac{Z}{X + Y + Z}$$

- 显然

$$x + y + z = 1$$

基础知识

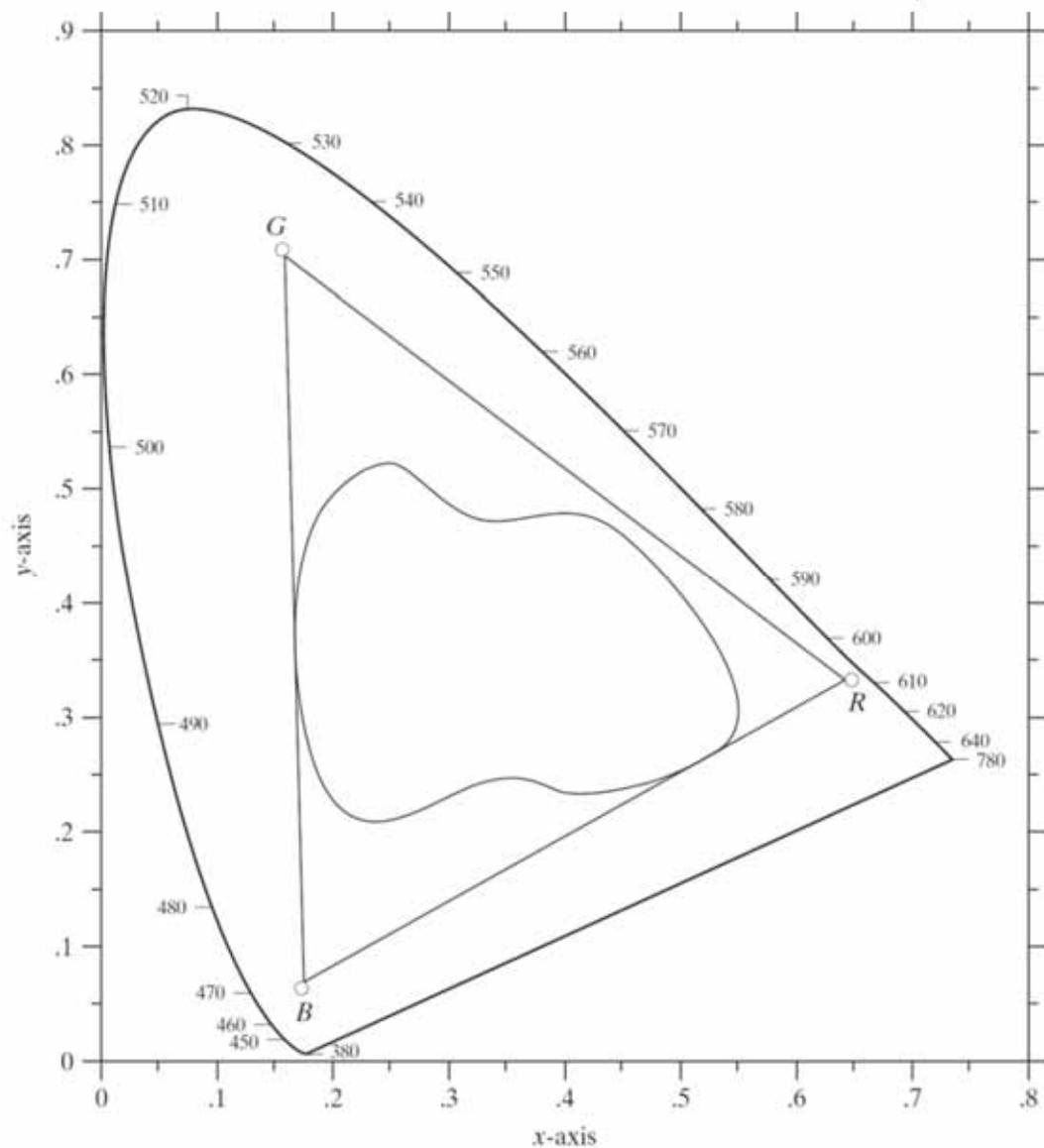
- CIE色彩图
- 两点间连线
 - 所有可能的加性组合
- 三个点连线
 - 三角形
 - 无法全覆盖



基础知识



- 彩色域
 - RGB显示器
 - 彩色打印机



提纲

- 彩色基础
- 彩色模型
- 伪彩色图像处理
- 全彩色图像处理

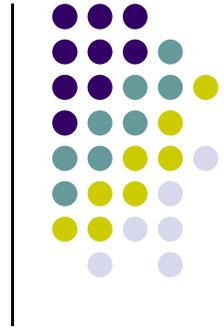


彩色模型

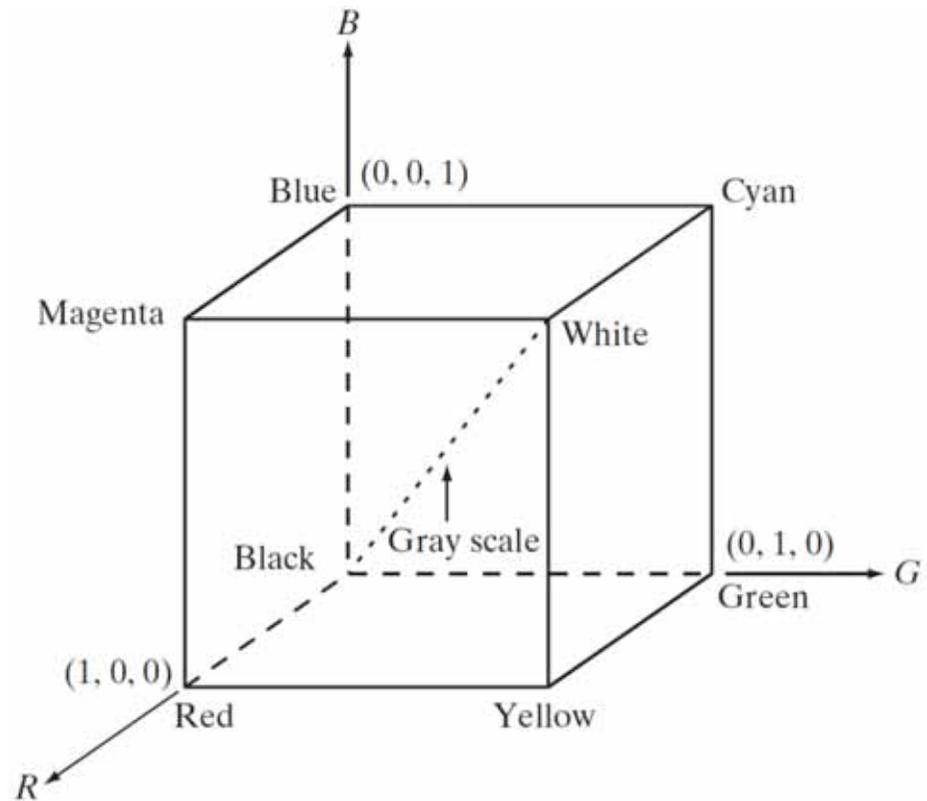


- 坐标系+子空间
 - 每种颜色是其中一个点
- 1. RGB彩色模型
 - 面向彩色显示器
- 2. CYM彩色模型
 - 面向彩色打印机
- 3. HSI彩色模型
 - 符合人的认知

RGB彩色模型



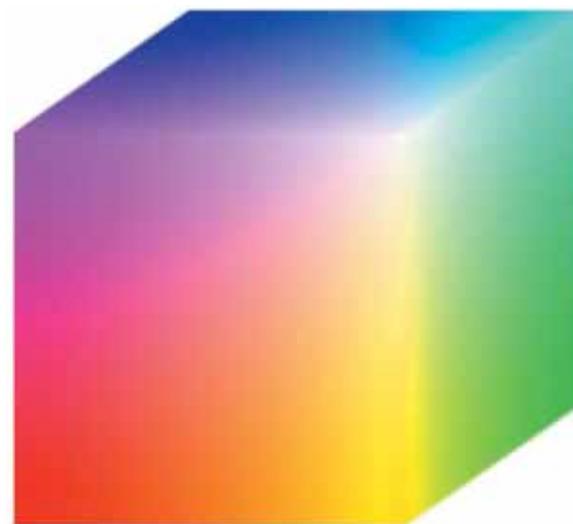
- 笛卡尔坐标系
 - 红绿蓝在三个角
 - 黑色在 origin
 - 白色在最远的角
 - 中间虚线是灰色
 - 正则化
 - 属于 $[0,1]$



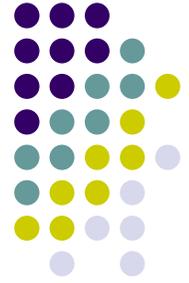
RGB彩色模型



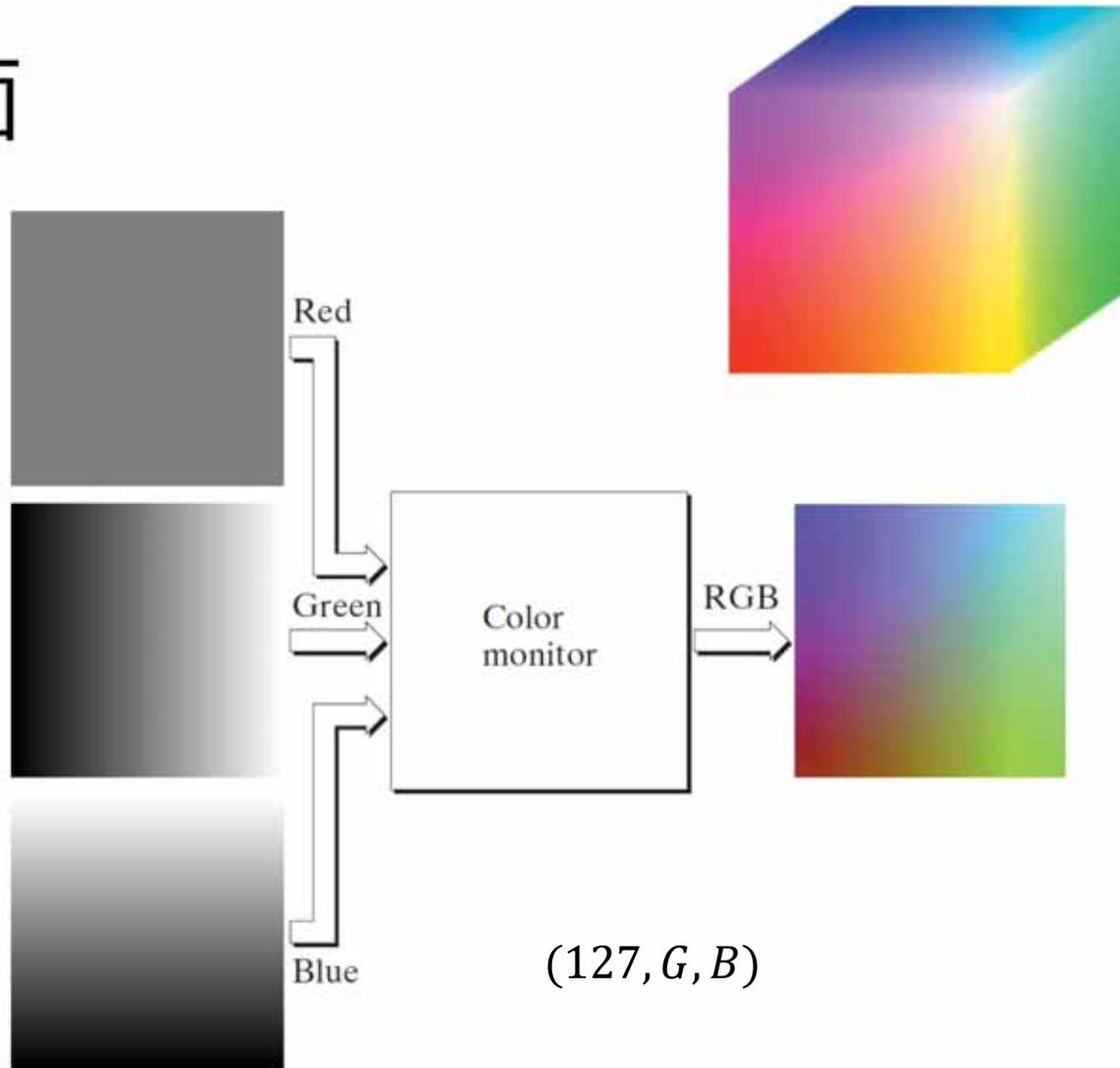
- 3幅分量图像
 - 每种主颜色对应一幅图像
 - 叠加在一起合成一幅彩色图像
- 像素深度 (pixel depth)
 - 表示每个像素的比特数
- 全彩色图像
 - 24比特的RGB图像
 - 颜色数目 $2^{24} = 16777216$



RGB彩色模型



- 剖面



RGB彩色模型

- 3个隐藏侧面



$(R = 0)$



$(G = 0)$



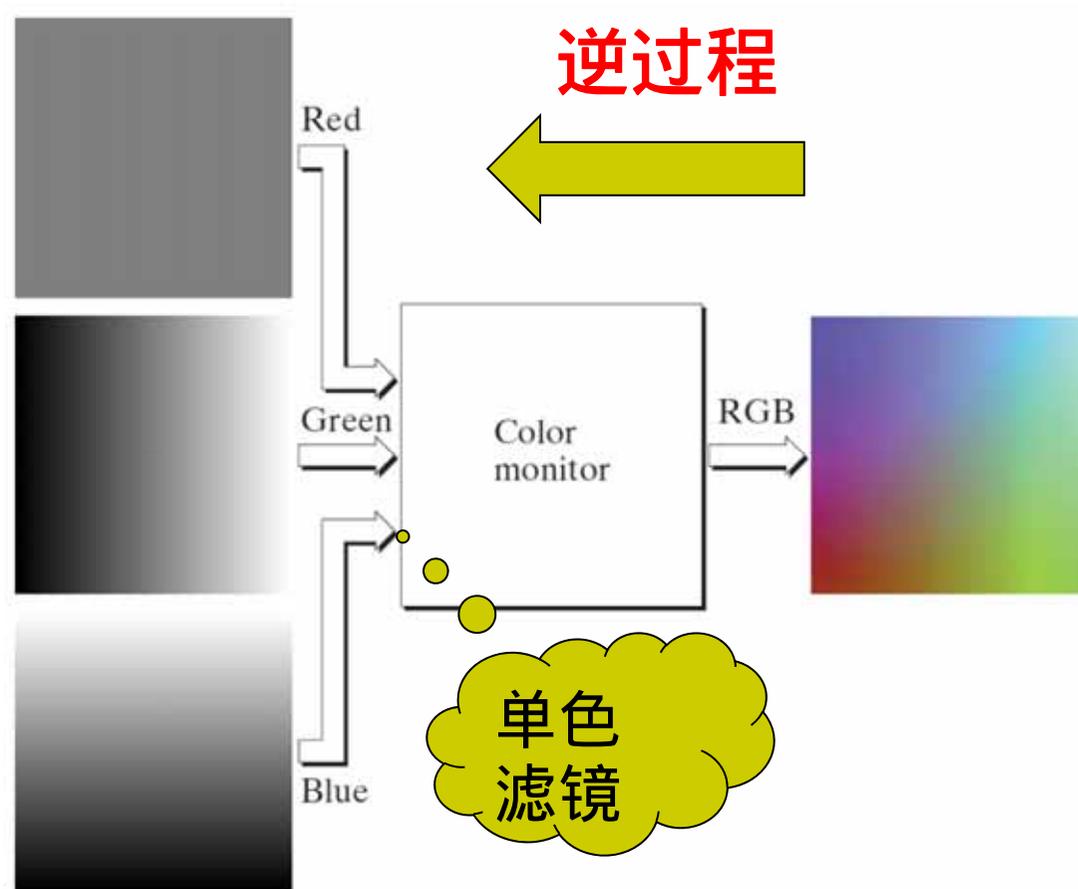
$(B = 0)$



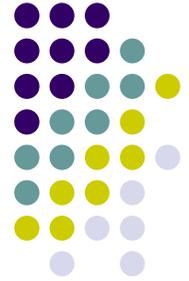
RGB彩色模型



- 图像获取

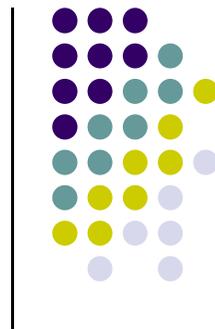


RGB彩色模型



- 高端显卡或显示器
 - 支持24比特的RGB图像
- 低端设备
 - 通常只能显示256种彩色
 - 更多的颜色有时没有意义
- 稳定RGB色 (safe RGB colors)
 - 真实展现、与硬件无关
 - 互联网：稳定Web色
 - 通常包括216颜色

216种稳定颜色

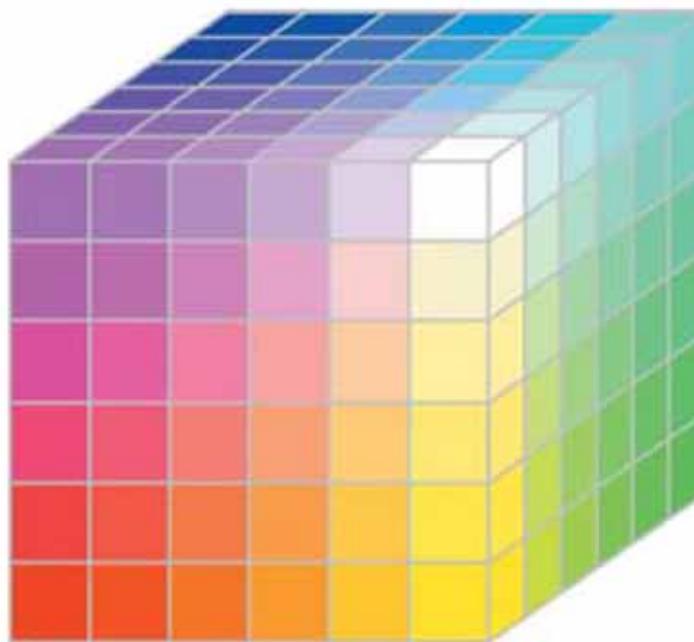


- 每个RGB只有六种取值

Hex	00	33	66	99	CC	FF
Decimal	0	51	102	153	204	255

- 共计 $6^3 = 216$ 种

- 空心





CMY颜色模型

- 青色 (C)、洋红 (M)、黄色 (Y)
 - 彩色打印机
- 转换公式

$$\begin{bmatrix} C \\ M \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}$$

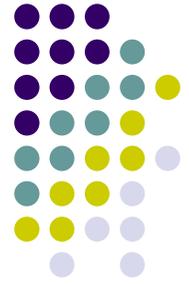
- CMYK颜色模型
 - CMY的混合产生的黑色不纯
 - 添加了黑色 (K)

HSI颜色模型

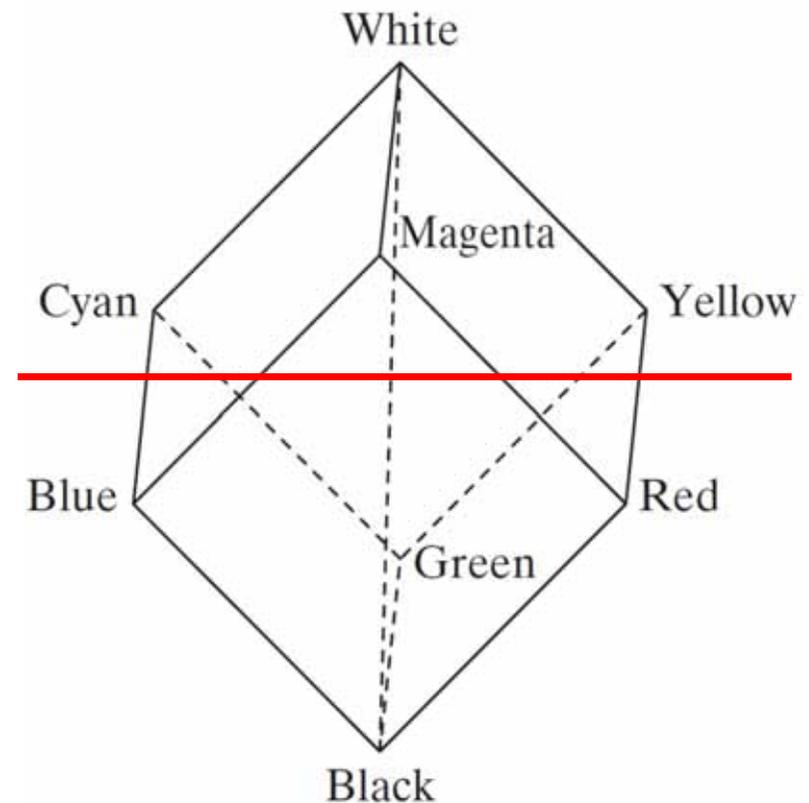


- RGB/CMY颜色模型不够直观
 - 人不会直接用这些数字来描述颜色
- 1. 色调 (hue)
 - 主波长，也就是感知到的颜色
- 2. 饱和度 (saturation)
 - 反应白光的比例，白光越多越不饱和
- 3. 亮度 (brightness)
 - 主观描绘，类似于无色光的强度 (intensity)

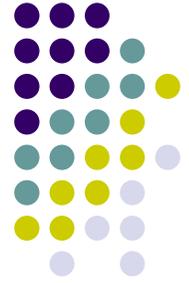
HSI颜色模型



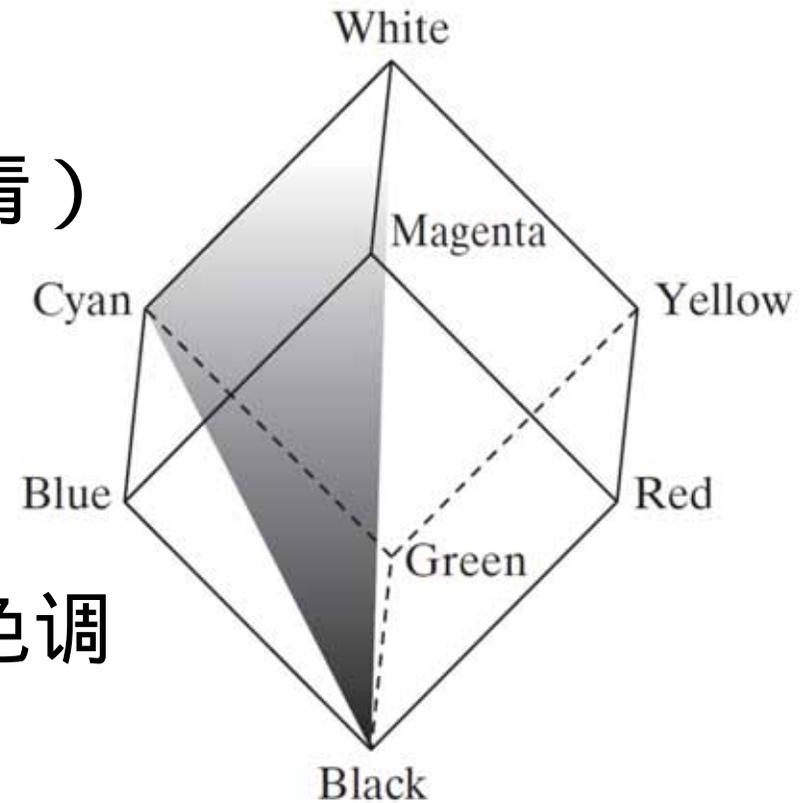
- HSI模型将亮度和颜色相关的信息解耦合
 - 颜色相关的信息：色调、饱和度
 - 对人而言更直观
- 强度（intensity）
 - 平行面与强度轴的交点
- 饱和度（saturation）
 - 与强度轴的距离相反
 - 强度轴上的饱和度为0



HSI颜色模型



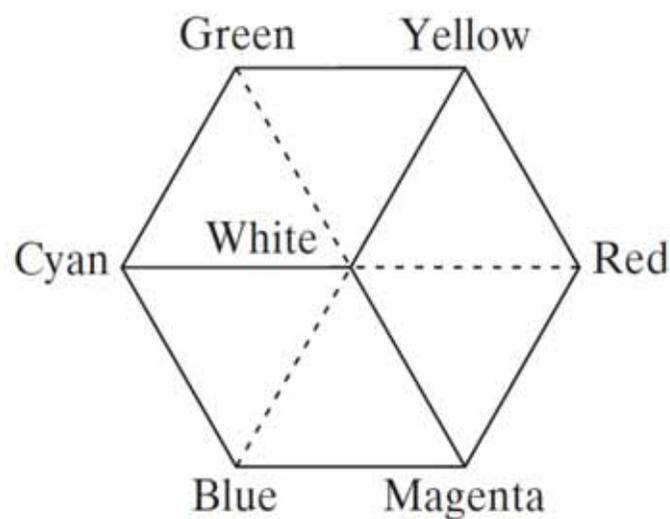
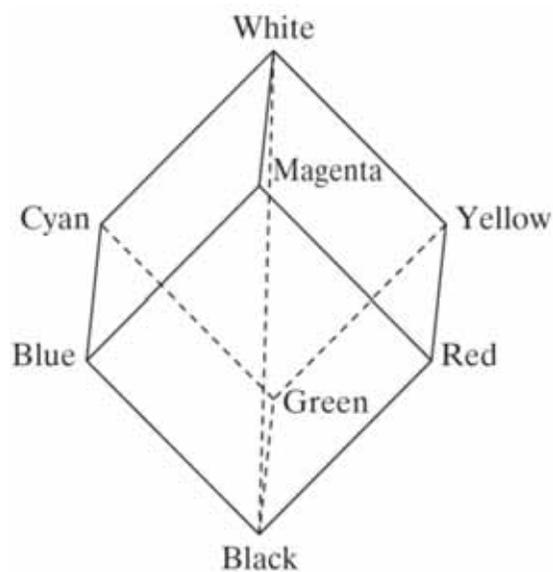
- 色调 (hue)
 - 截面包含黑、白、青
 - 截面包含强度轴
 - 截面内色调相同 (青)
 - 黑、白不改变色调
- 旋转截面得到所有色调



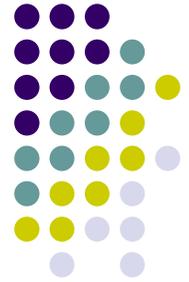
计算HSI的数值



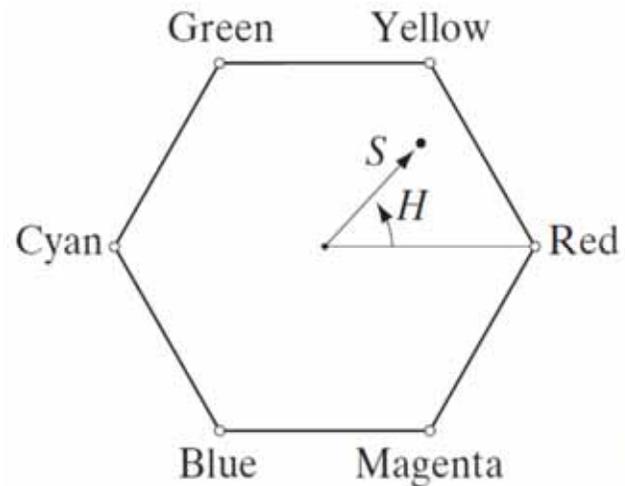
- 沿着强度轴移动平面
 - 得到强度 (I)
 - 截面为三角形、六边形



计算HSI的数值



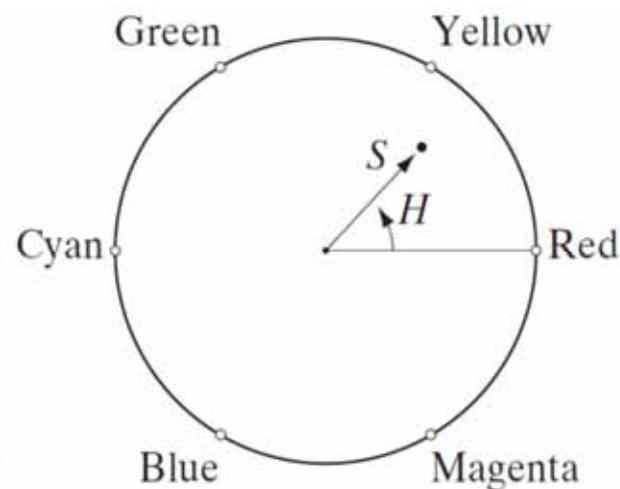
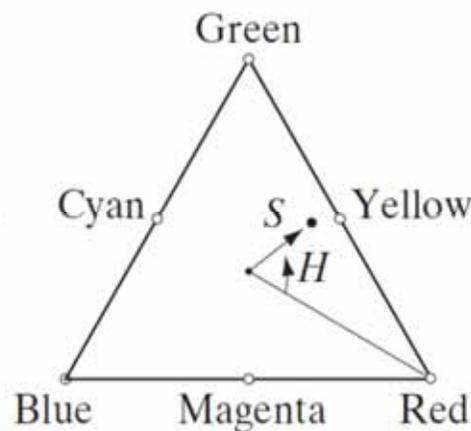
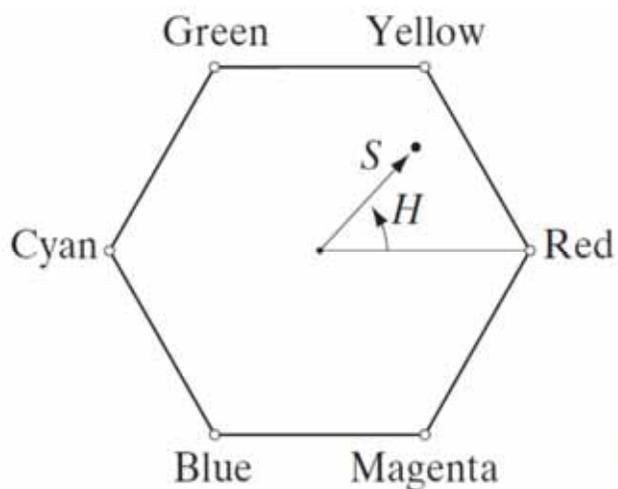
- 色调 (H)
 - 与红色轴的夹角
- 饱和度 (S)
 - 与强度轴的距离



计算HSI的数值



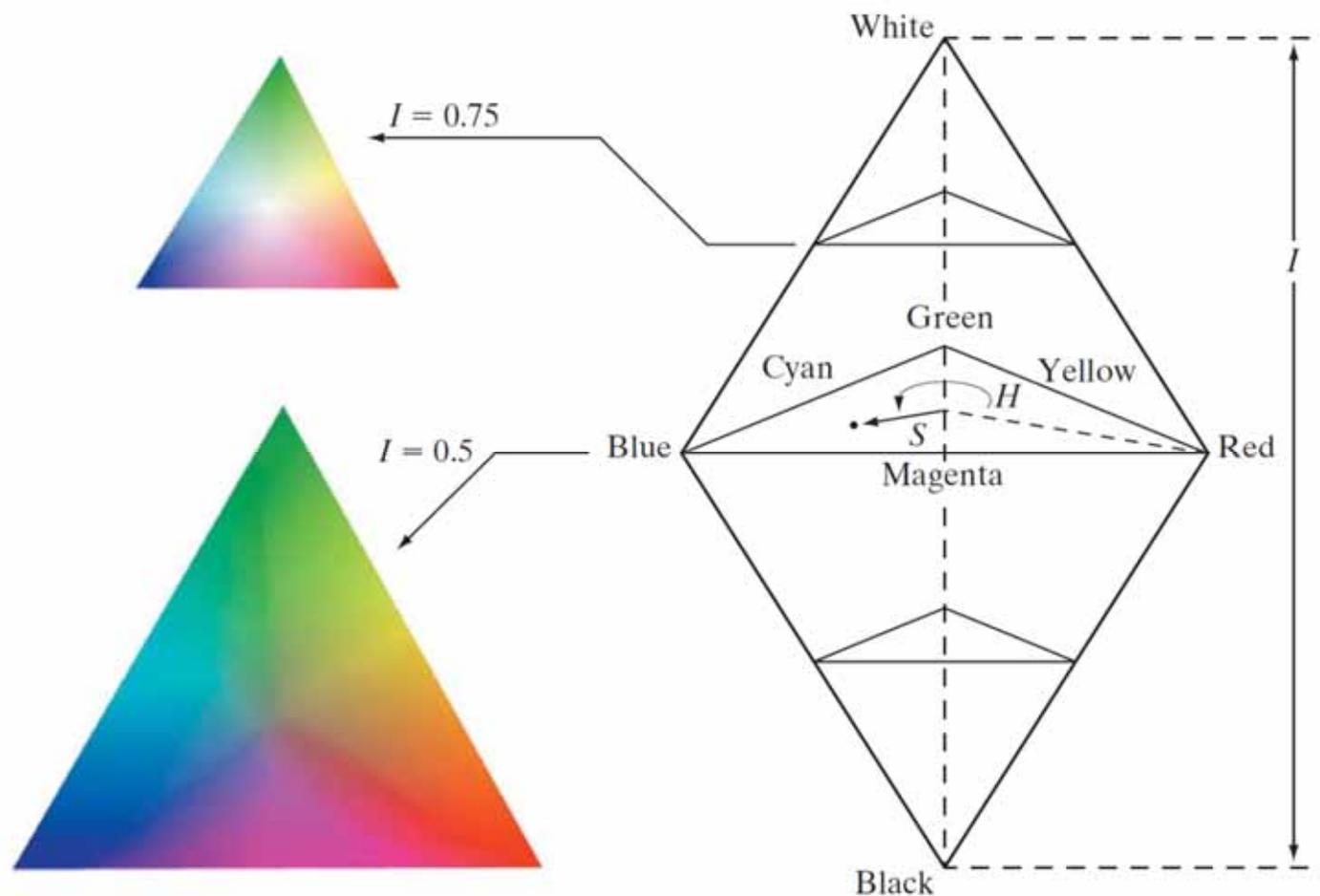
- 色调 (H)
 - 与红色轴的夹角
- 饱和度 (S)
 - 与强度轴的距离



HSI颜色模型



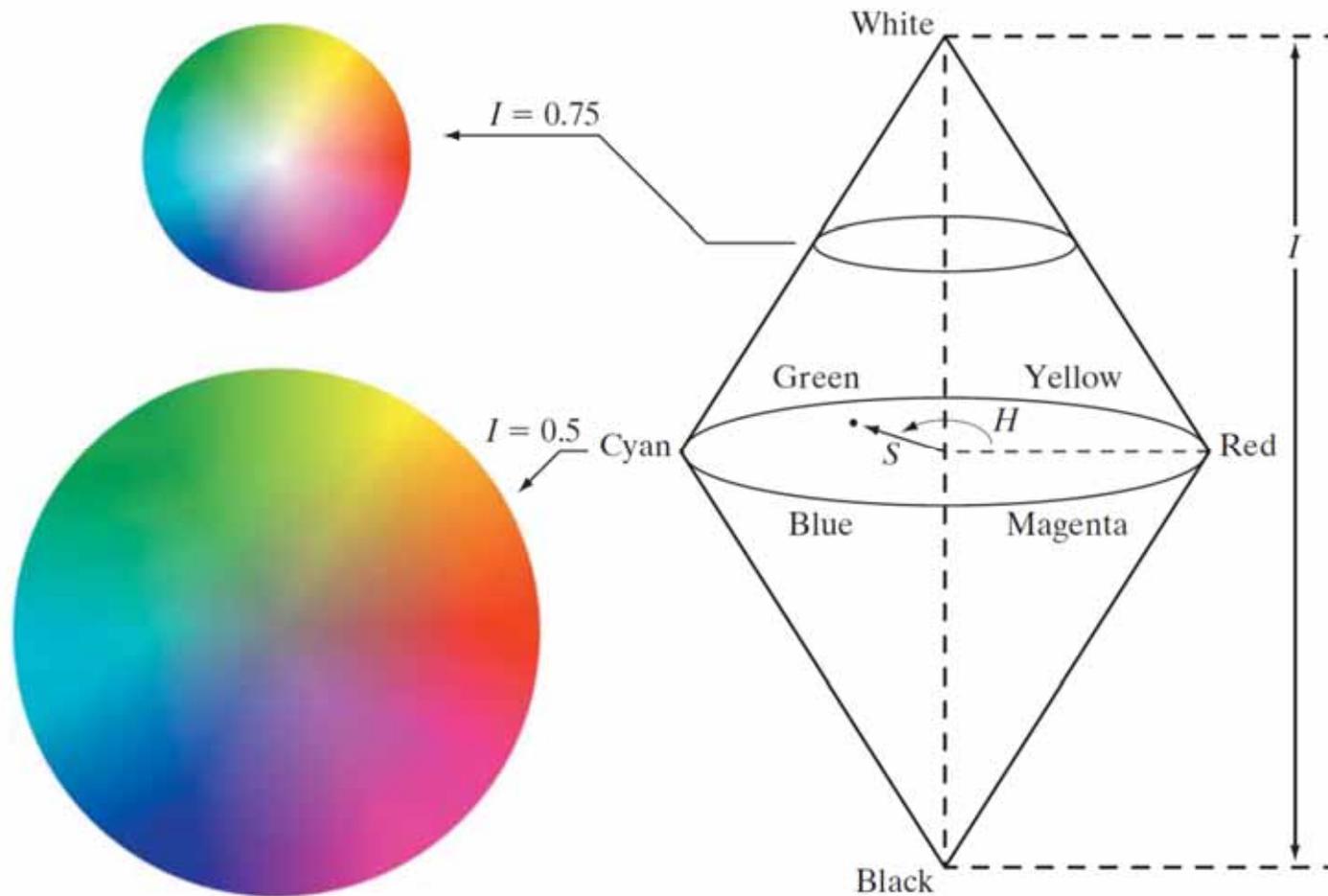
- 基于三角形



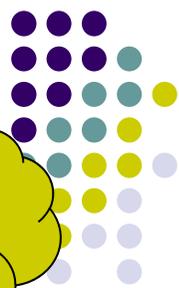
HSI颜色模型



- 基于圆形



从RGB模型到HSI模型



归一化
到[0,1]

- 色调 (H)
$$H = \begin{cases} \theta & \text{if } B \leq G \\ 360 - \theta & \text{if } B > G \end{cases}$$

- 其中

$$\theta = \cos^{-1} \left\{ \frac{\frac{1}{2}[(R - G) + (R - B)]}{[(R - G)^2 + (R - B)(G - B)]^{1/2}} \right\}$$

- 饱和度 (S)

$$S = 1 - \frac{3}{(R + G + B)} [\min(R, G, B)]$$

- 强度 (I)

$$I = \frac{1}{3}(R + G + B)$$

从HSI模型到RGB模型



- RG扇区($0^\circ \leq H \leq 120^\circ$)

$$B = I(1 - S)$$

$$R = I \left[1 + \frac{S \cos H}{\cos(60^\circ - H)} \right]$$

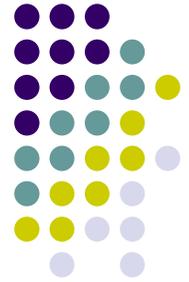
$$G = 3I - (R + B)$$

- RG扇区($120^\circ \leq H \leq 240^\circ$)

$$H = H - 120^\circ \quad R = I(1 - S)$$

$$B = 3I - (R + G) \quad G = I \left[1 + \frac{S \cos H}{\cos(60^\circ - H)} \right]$$

从HSI模型到RGB模型



- RG扇区($240^\circ \leq H \leq 360^\circ$)

$$H = H - 240^\circ$$

$$G = I(1 - S)$$

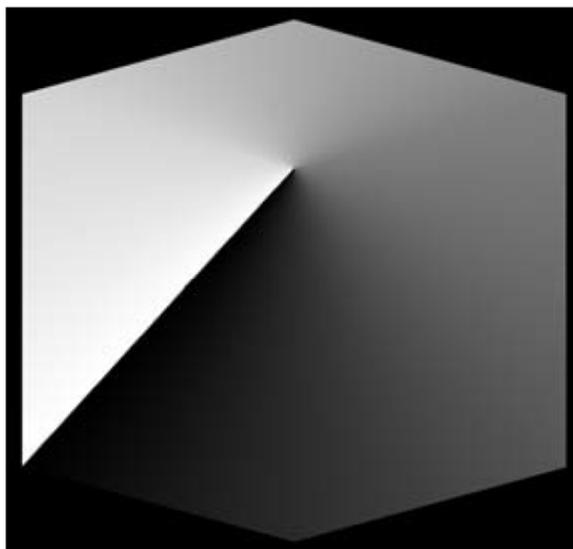
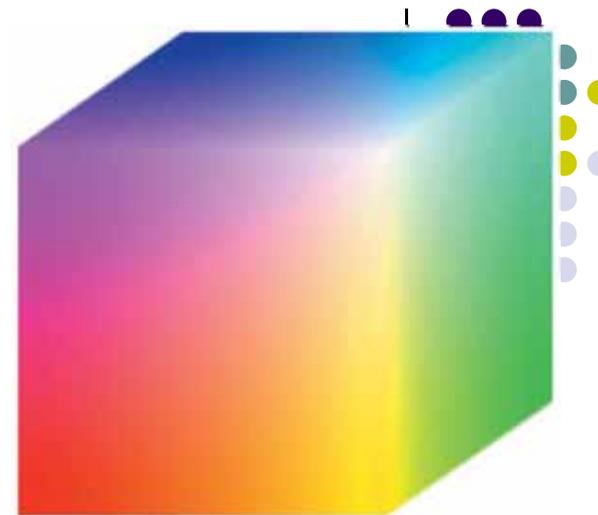
$$B = I \left[1 + \frac{S \cos H}{\cos(60^\circ - H)} \right]$$

$$R = 3I - (G + B)$$

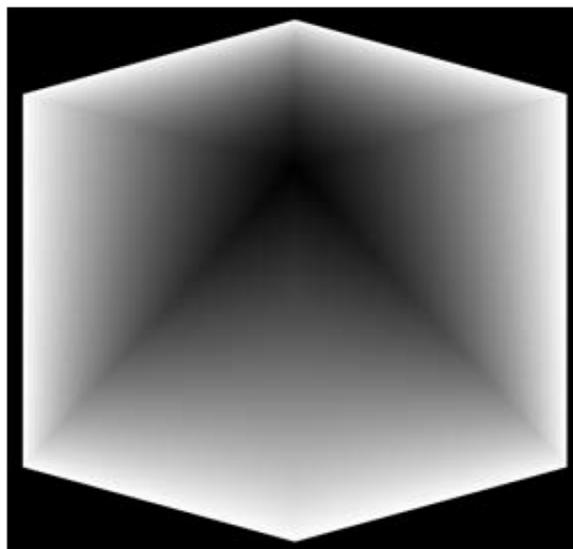
举例

- HSI表示

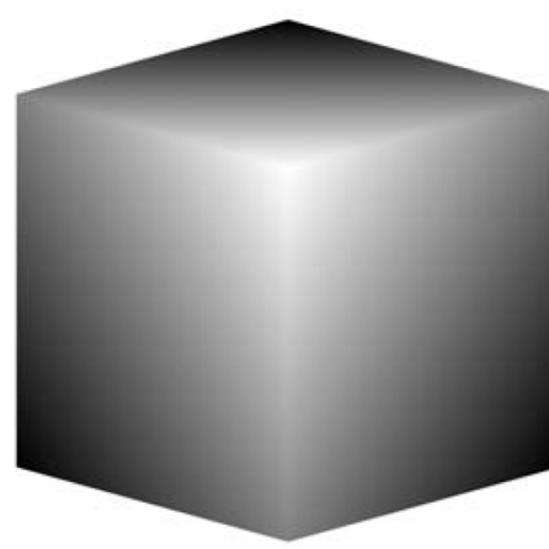
色调的不连续现象！



色调 (H)



饱和度 (S)

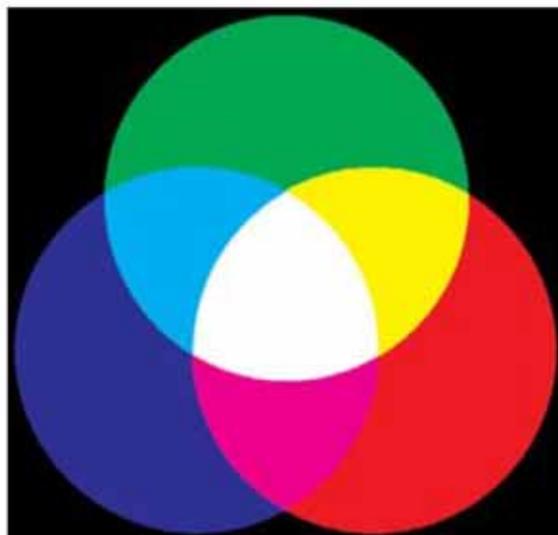


强度 (I)

举例



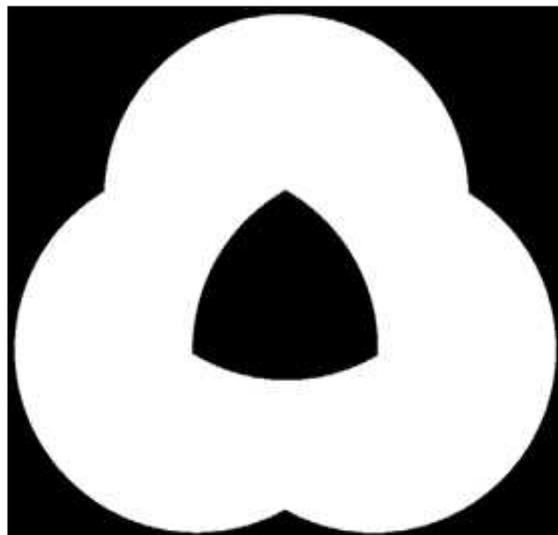
RGB图像



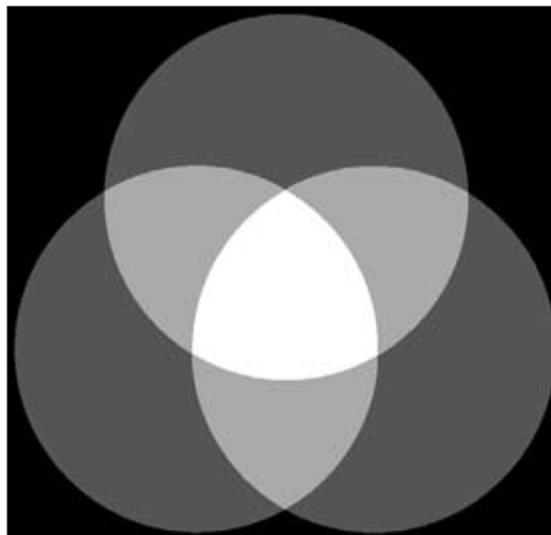
色调 (H)



饱和度 (S)



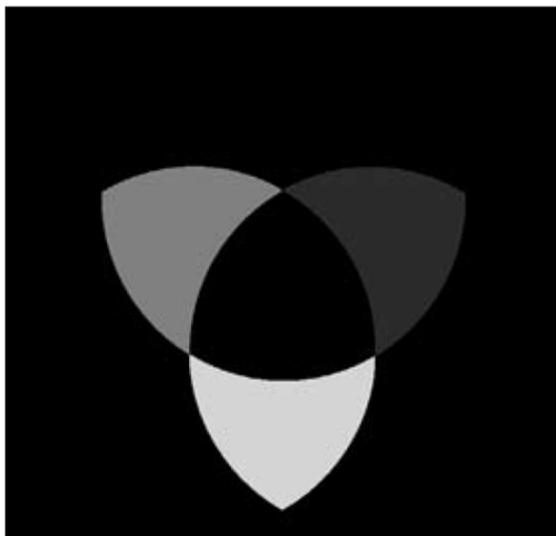
强度 (I)



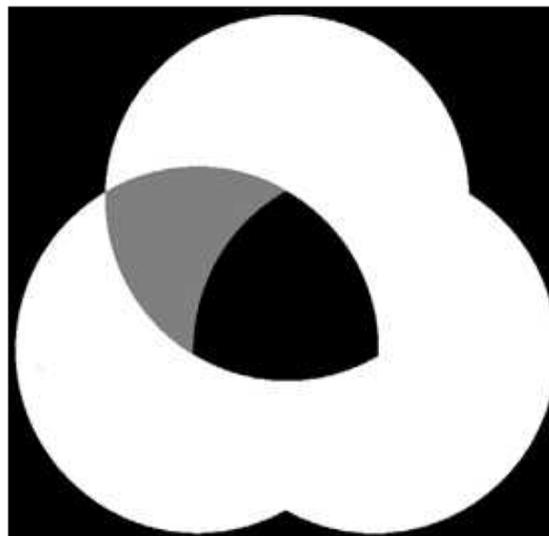
举例



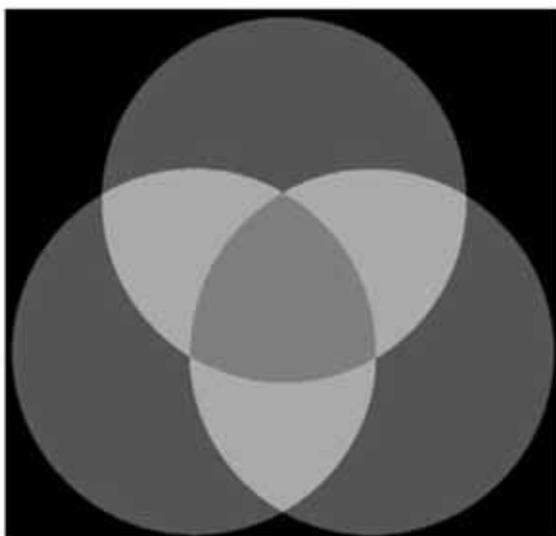
色调 (H)



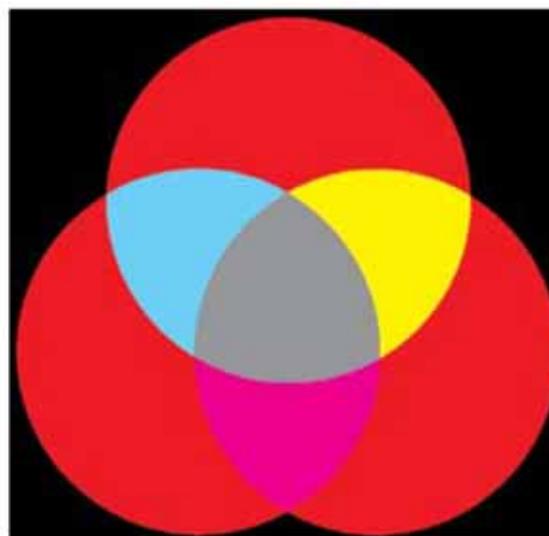
饱和度 (S)



强度 (I)



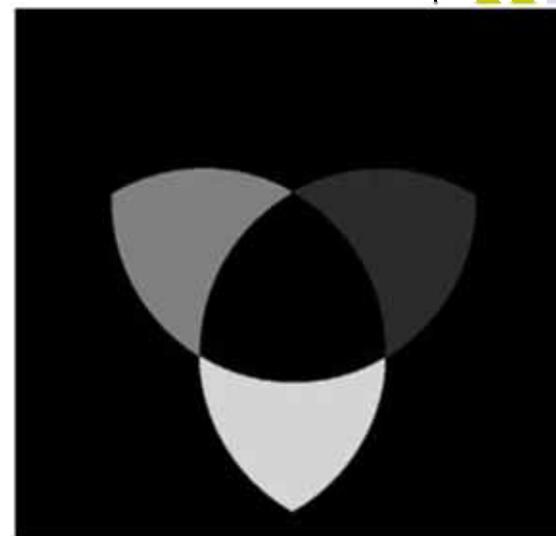
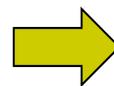
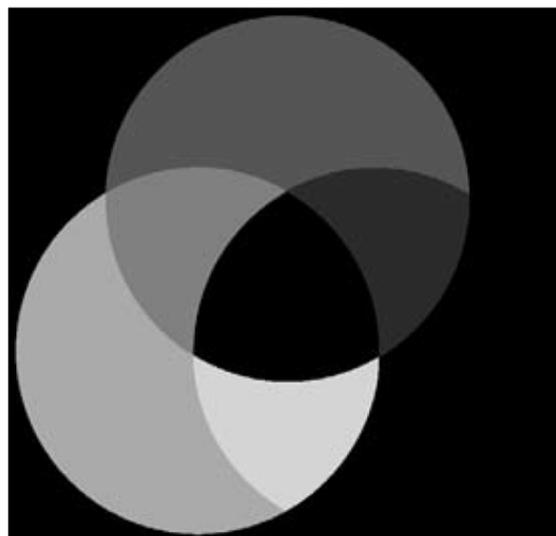
RGB图像



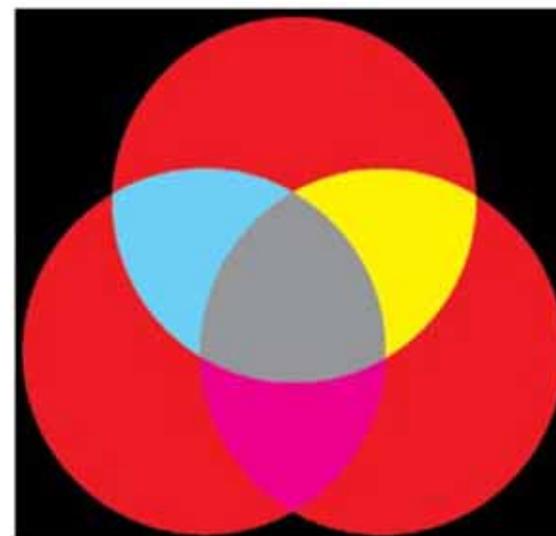
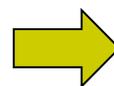
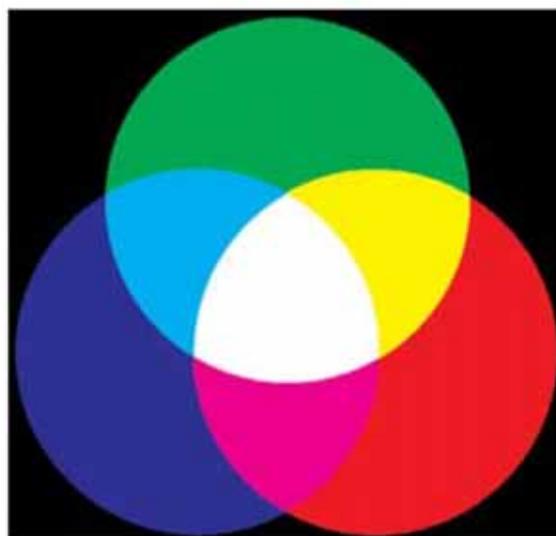
举例

- 对比

色调 (H)



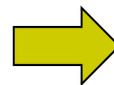
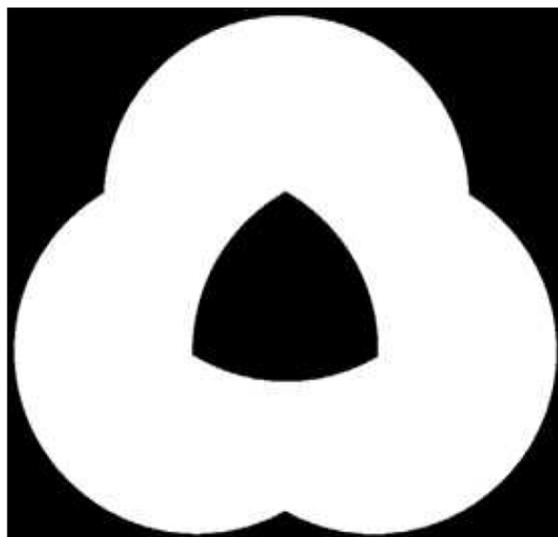
RGB图像



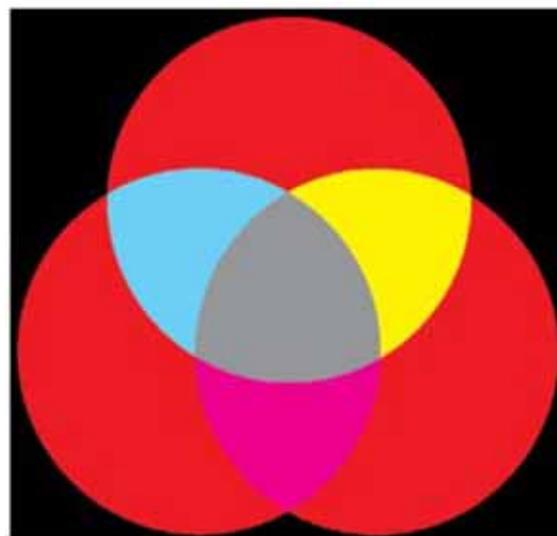
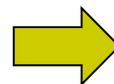
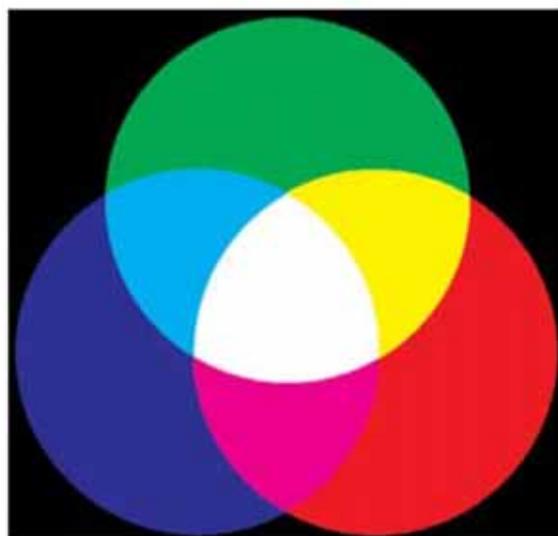
举例

- 对比

饱和度 (S)



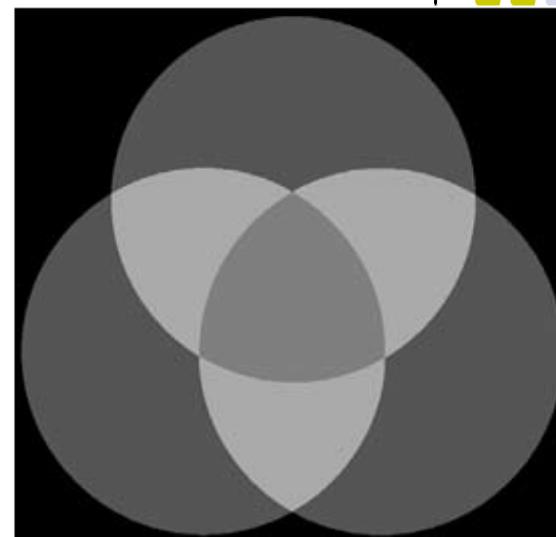
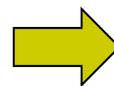
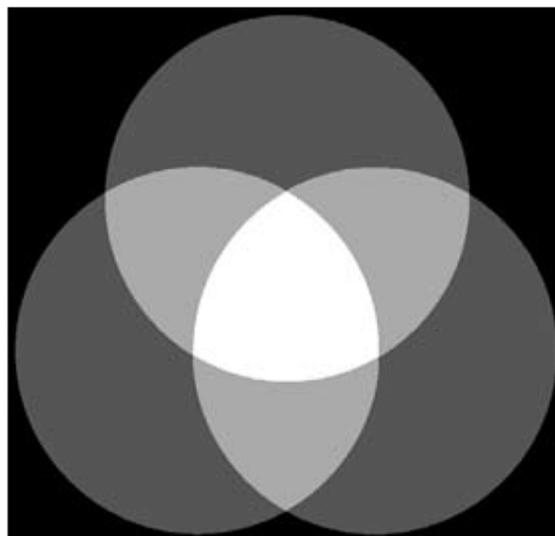
RGB图像



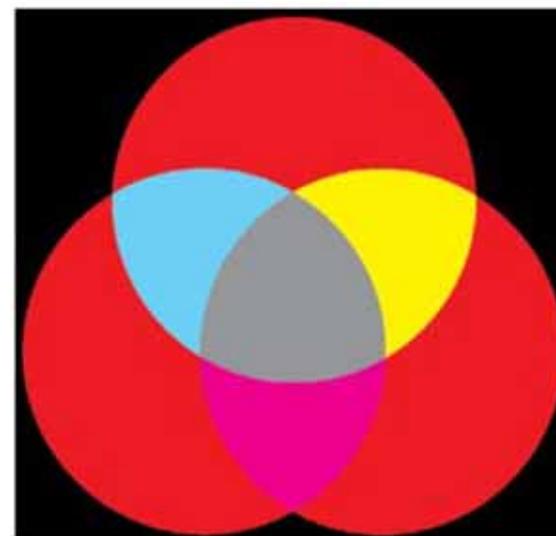
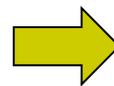
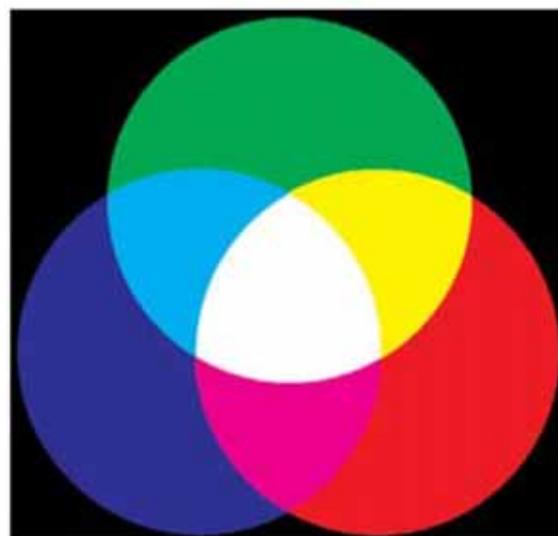
举例

- 对比

强度 (I)

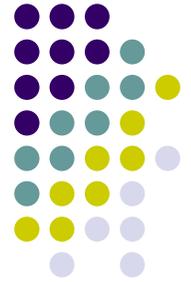


RGB图像



提纲

- 彩色基础
- 彩色模型
- 伪彩色图像处理
- 全彩色图像处理

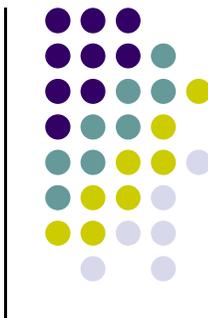


背景

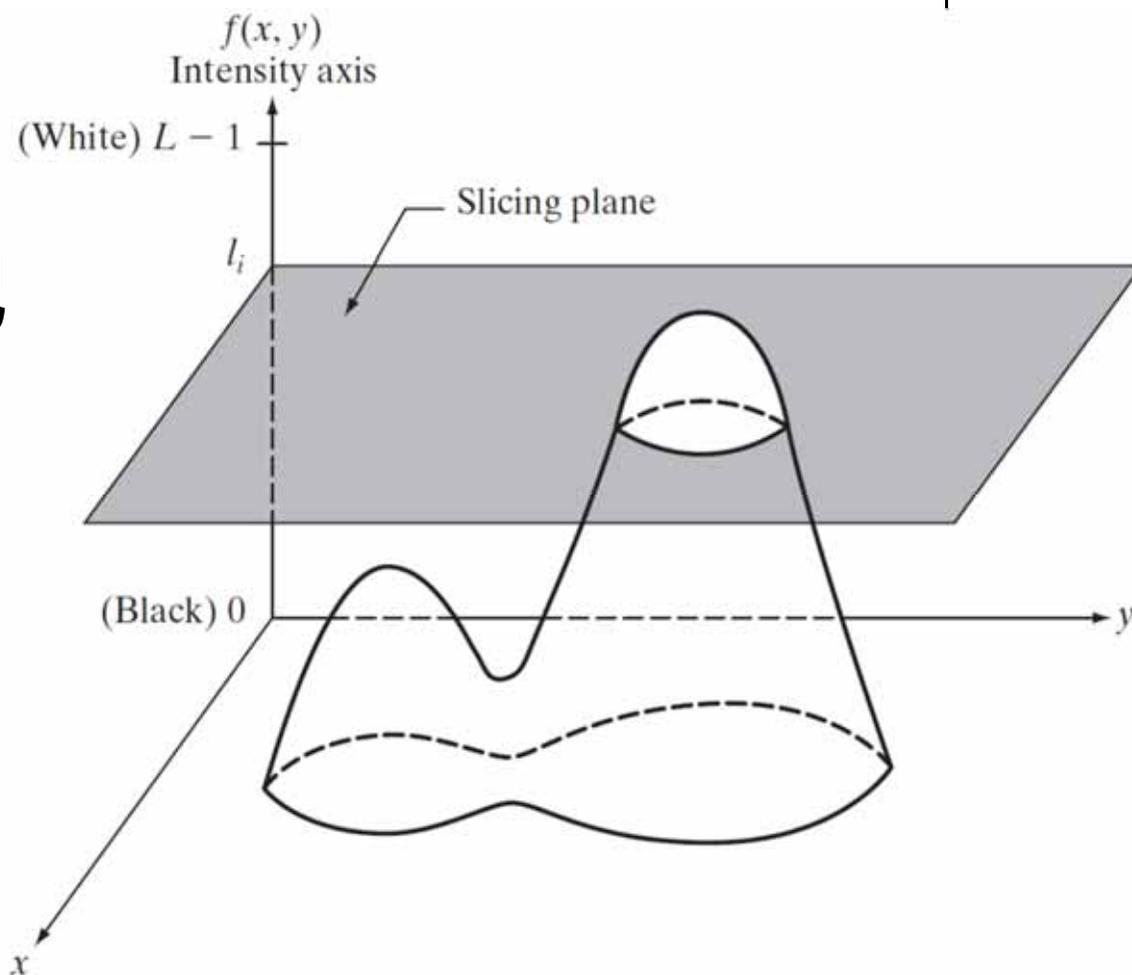


- 人类可以辨别几千种彩色
 - 只能辨别几十种灰度
- 伪彩色图像处理
 - 按照特定规则对灰度值赋颜色
- 便于可视化和理解灰度事件

灰度分层

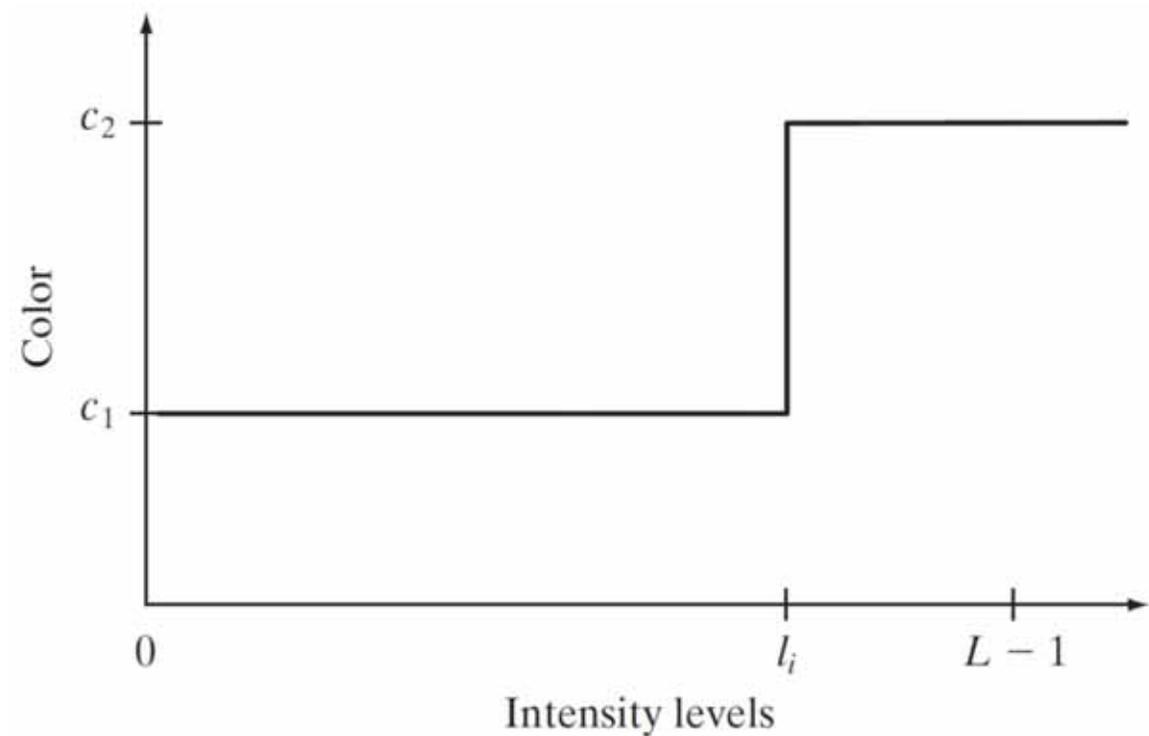
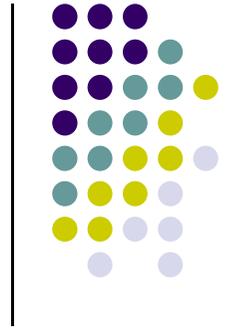


- 几何解释
- 根据截面分配两种颜色



灰度分层

- 几何解释
- 根据截面分配两种颜色





灰度分层

- 令 $[0, L - 1]$ 表示灰度级
- l_0 表示黑色, l_{L-1} 表示白色
- 依据下面的灰度值构造 P 个平面

$$l_1, l_2, \dots, l_P$$

- P 个平面将灰度值分为 $P + 1$ 个区间

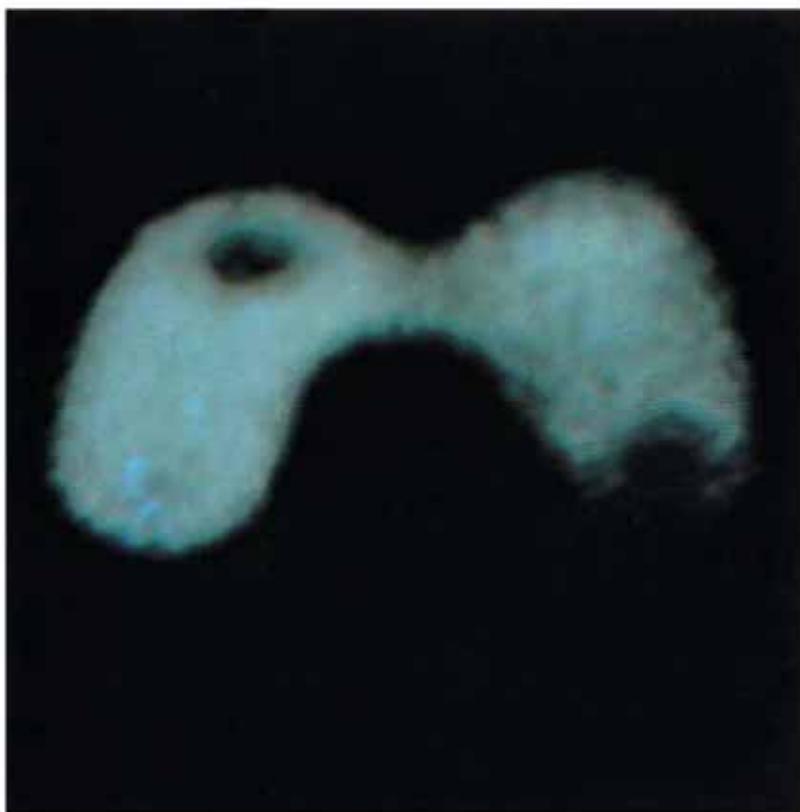
$$V_1, V_2, \dots, V_{P+1}$$

- 为每个区间赋一种颜色

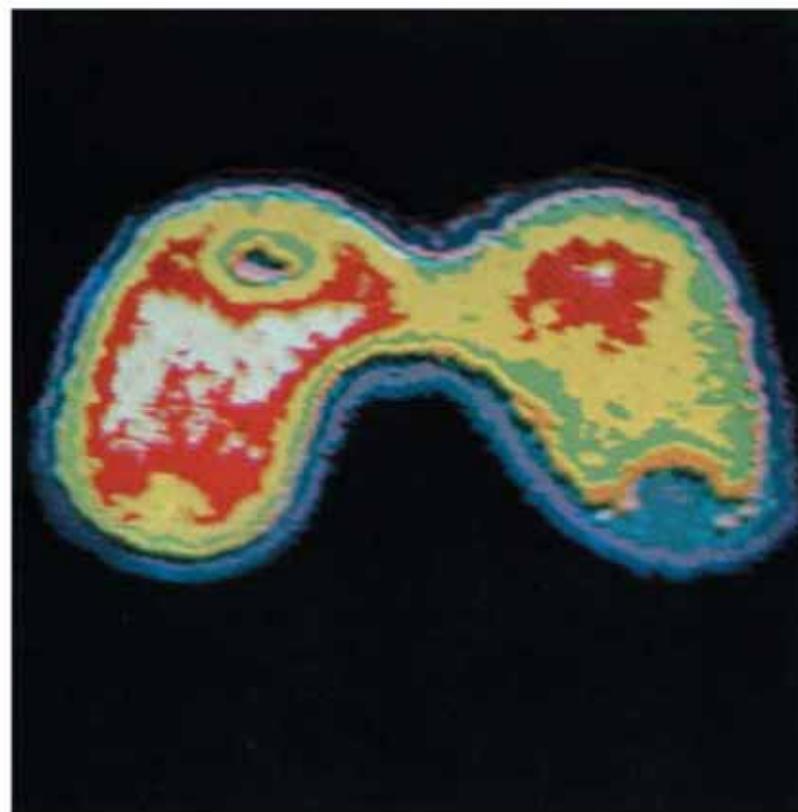
$$f(x, y) = c_k \quad \text{if } f(x, y) \in V_k$$

举例

- 甲状腺图片



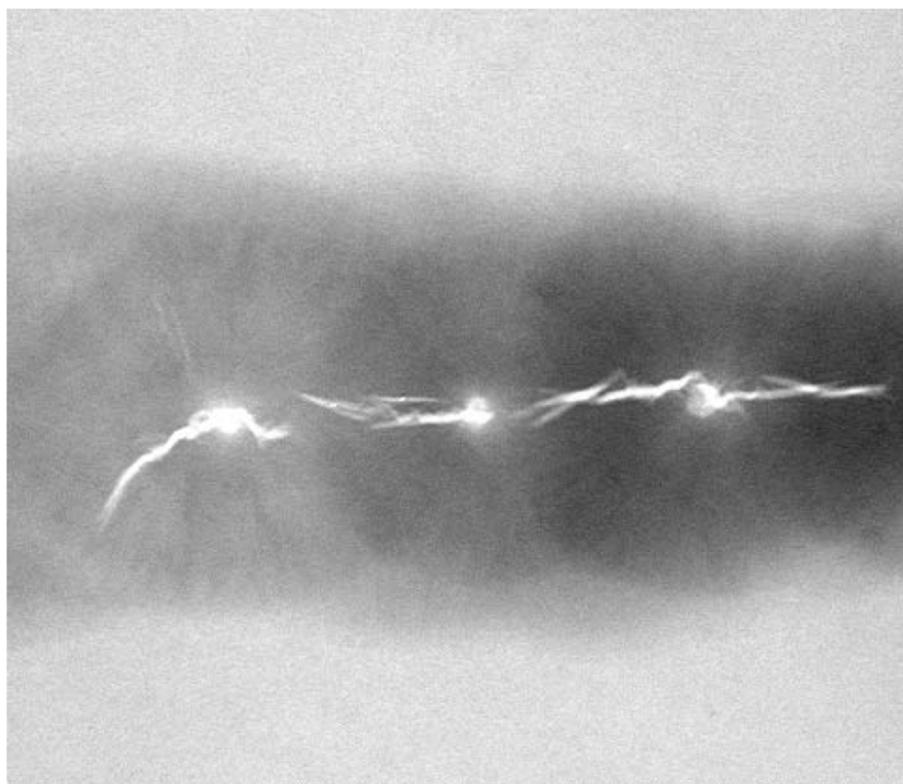
灰度图



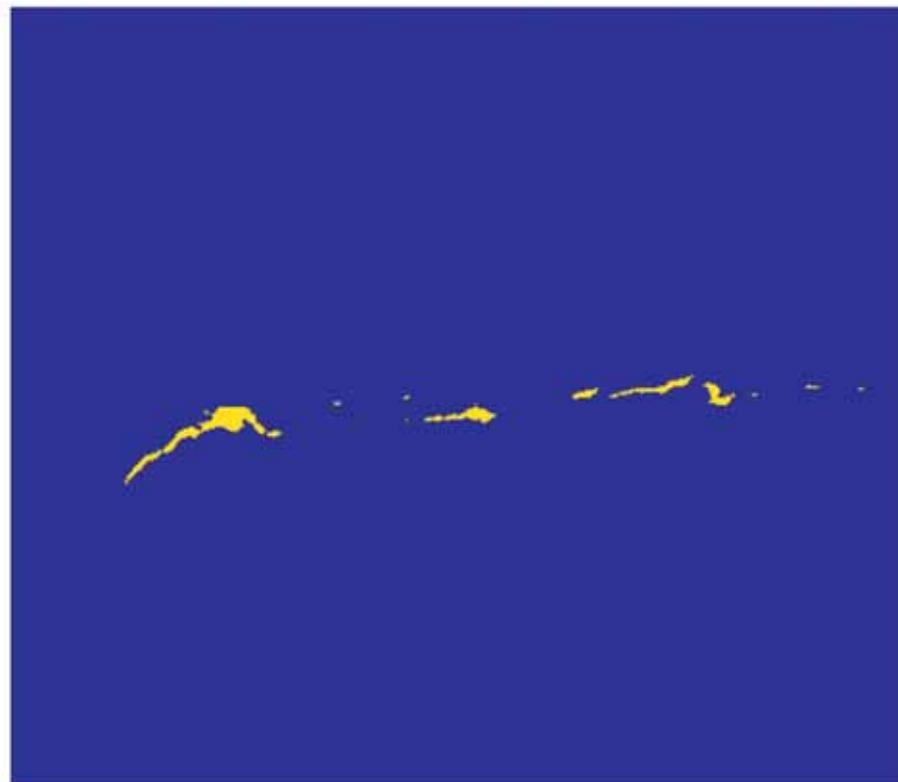
8种彩色

举例

- 焊接物X光
 - 根据实际需求确定灰度级



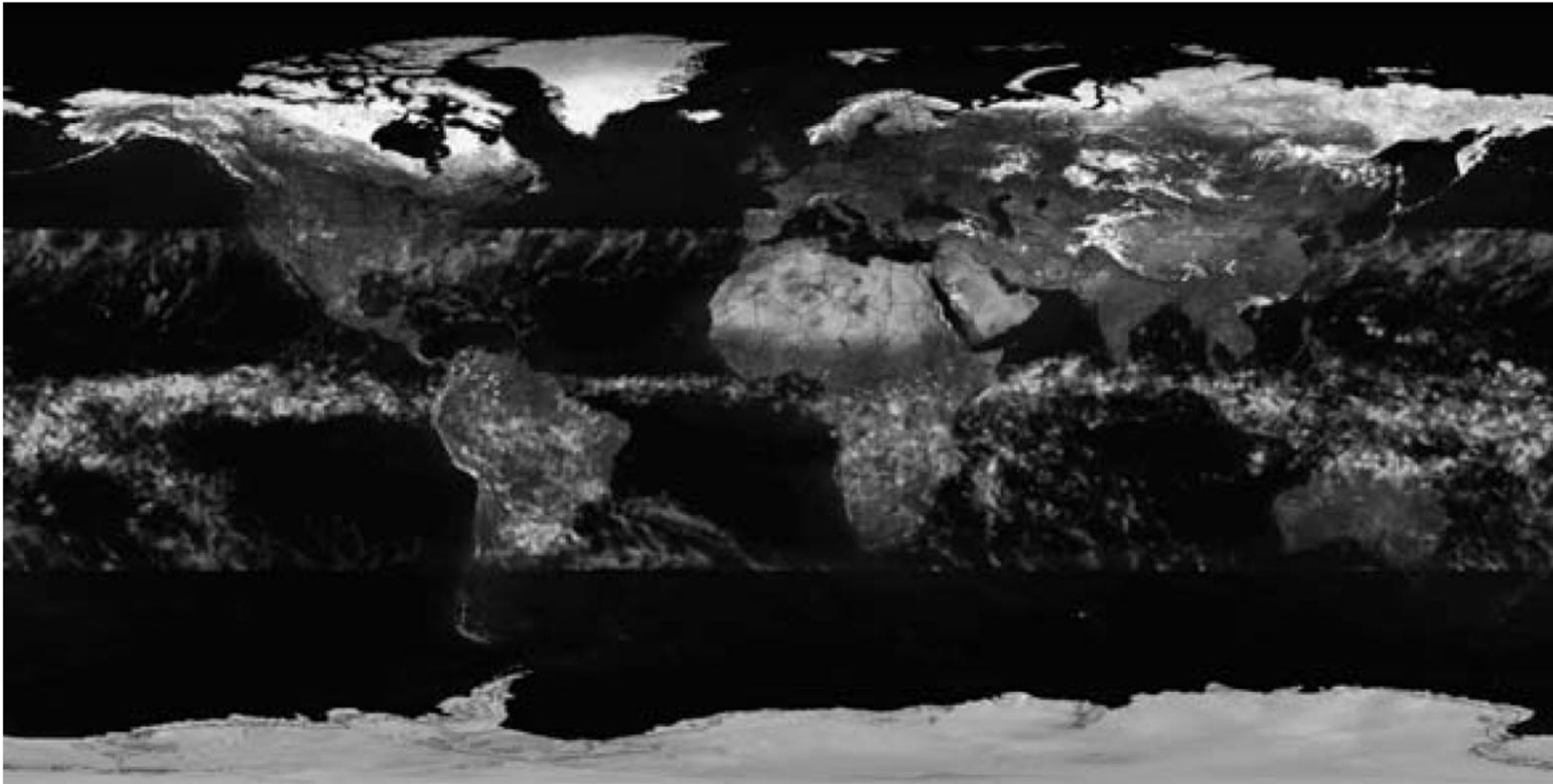
灰度图



2种彩色

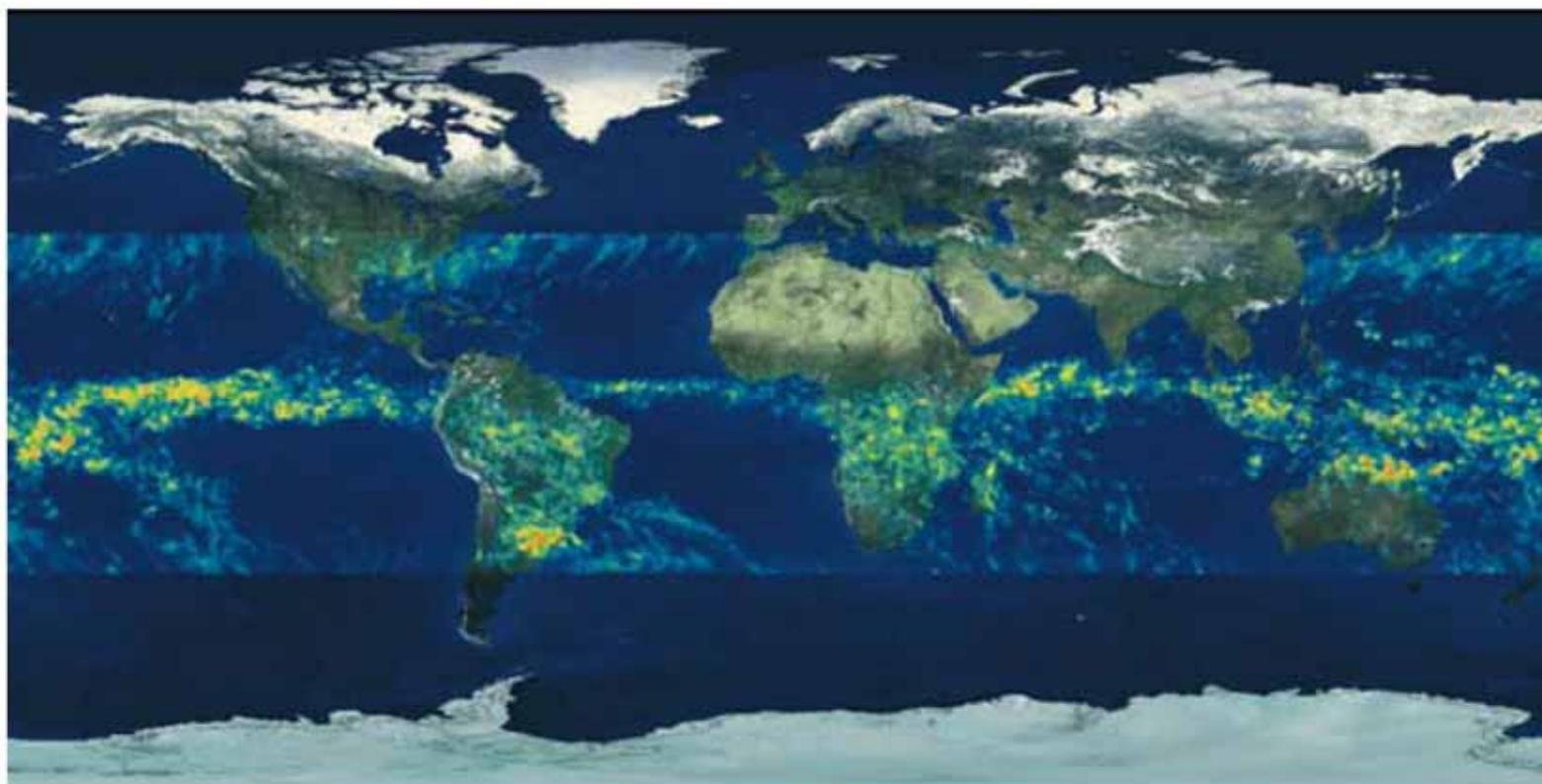
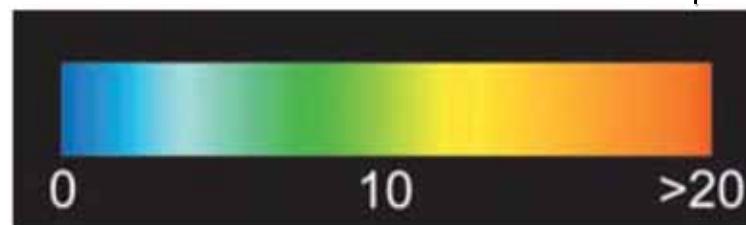
举例

- 地球上降雨量
 - 通过卫星估计



举例

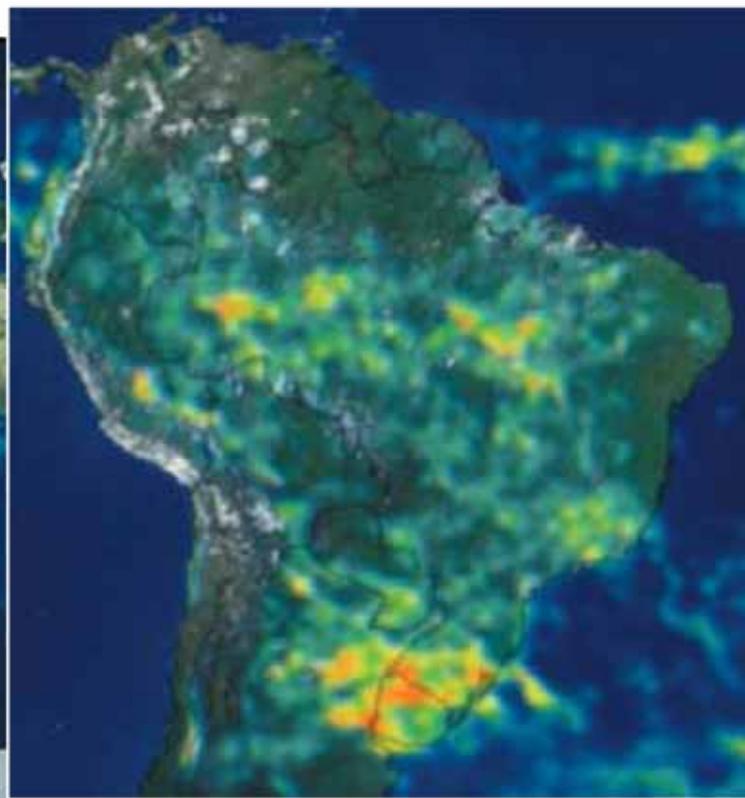
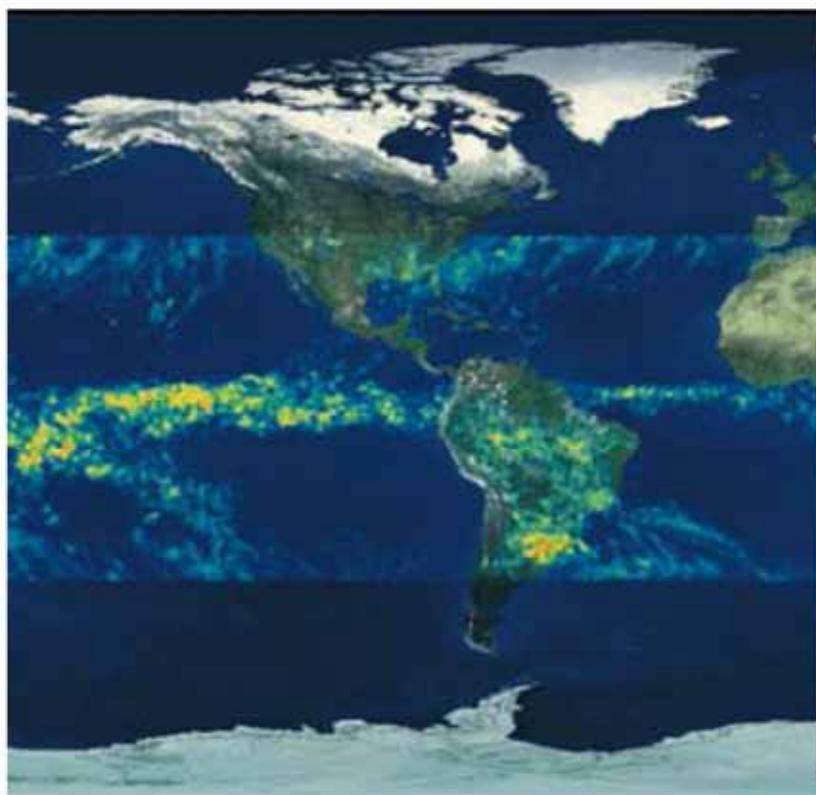
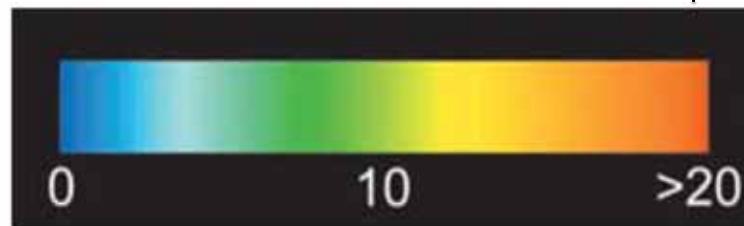
- 地球上降雨量
 - 伪彩色图像



举例



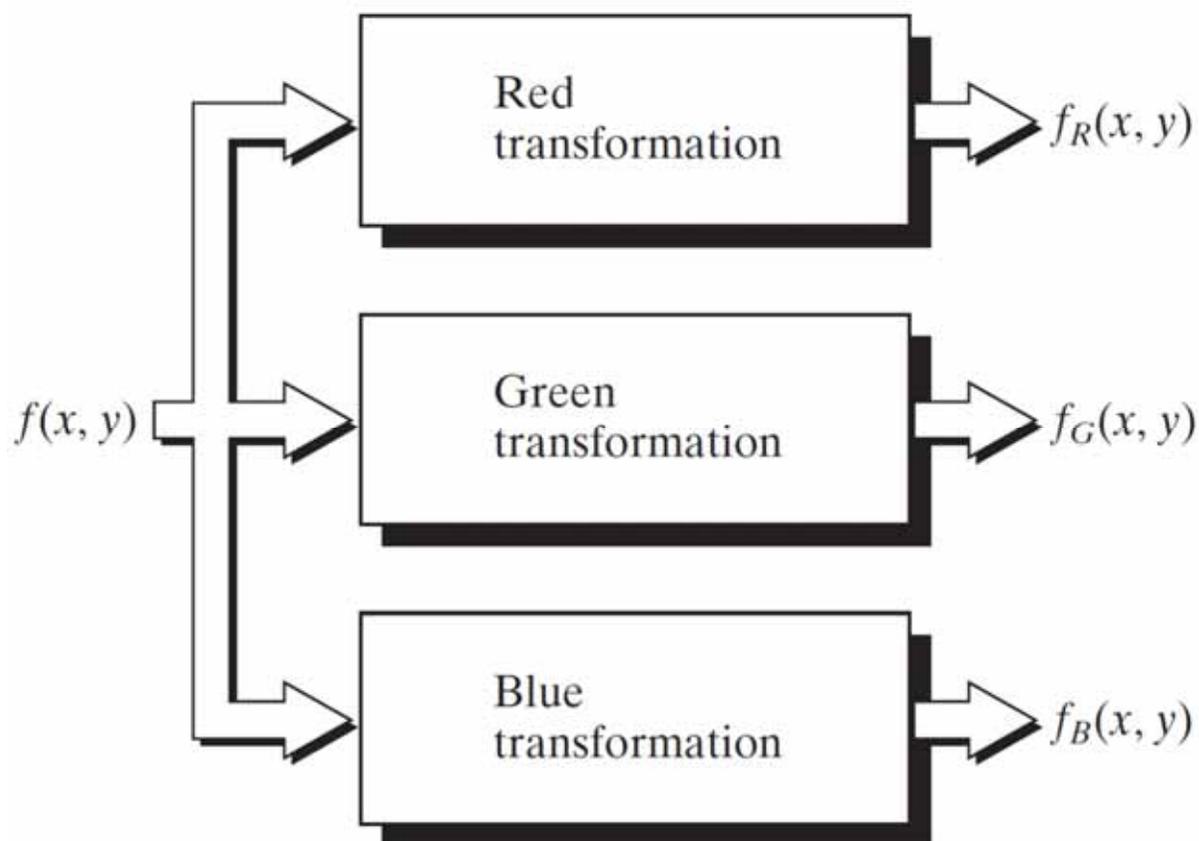
- 地球上降雨量
 - 伪彩色图像



灰度到彩色的变换



- 独立变换3次（单图像）

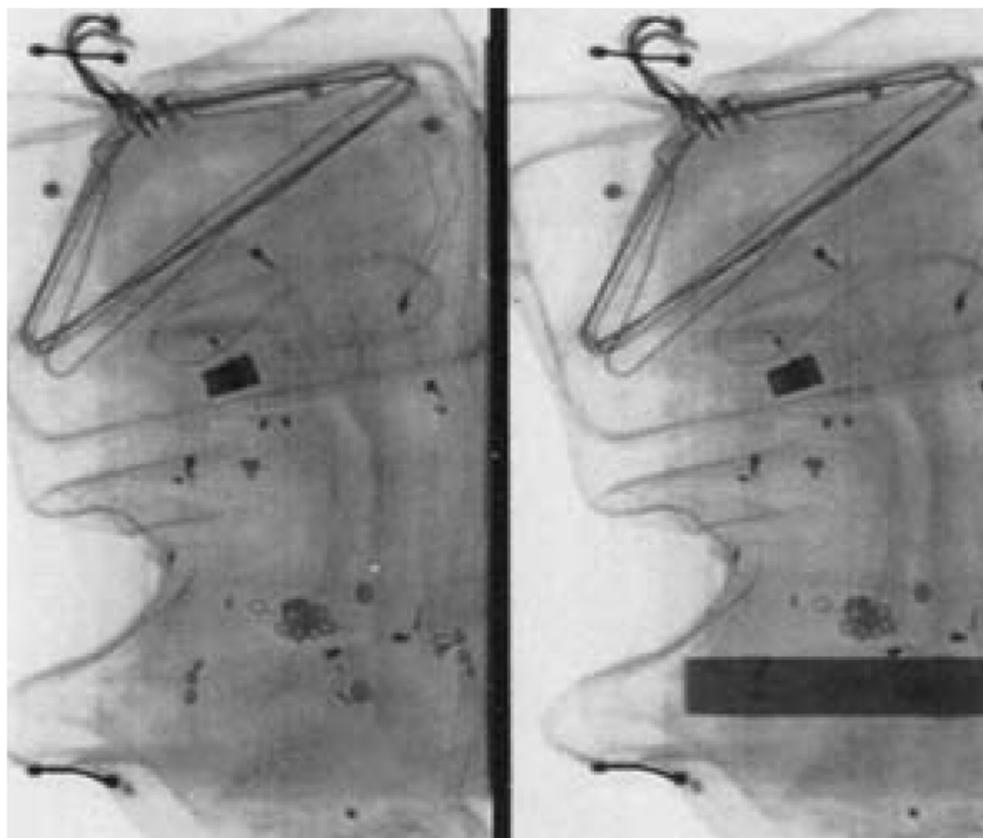


举例

- 机场X射线检查图片



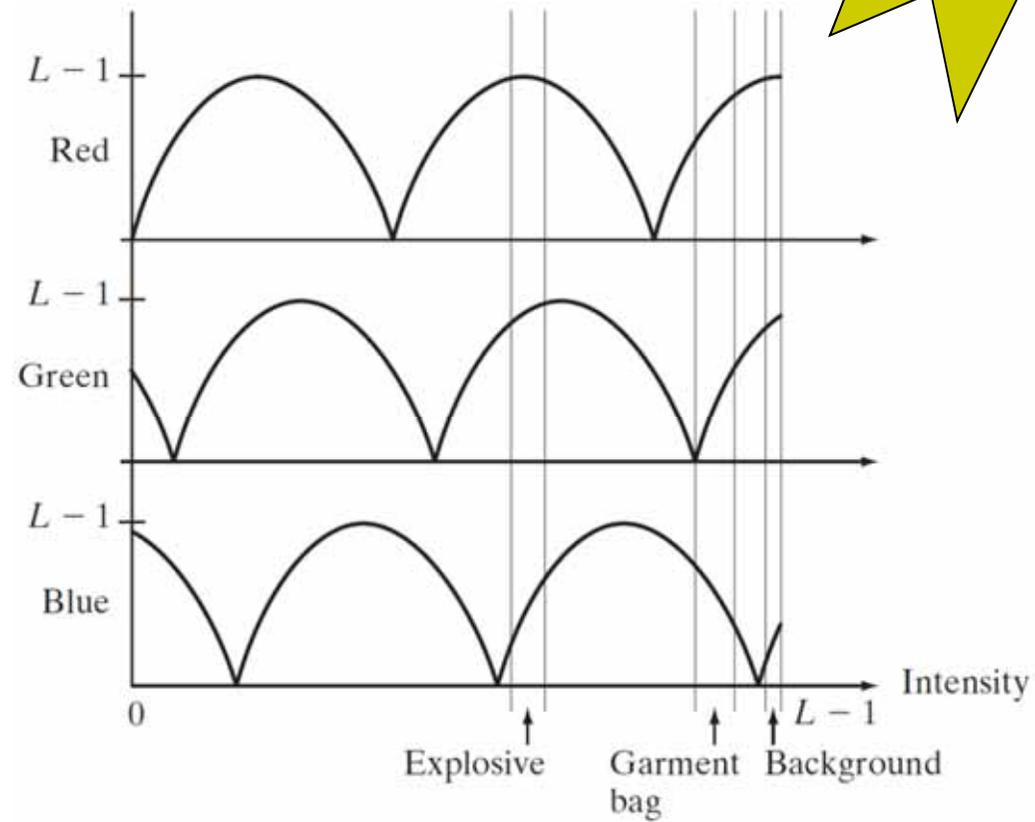
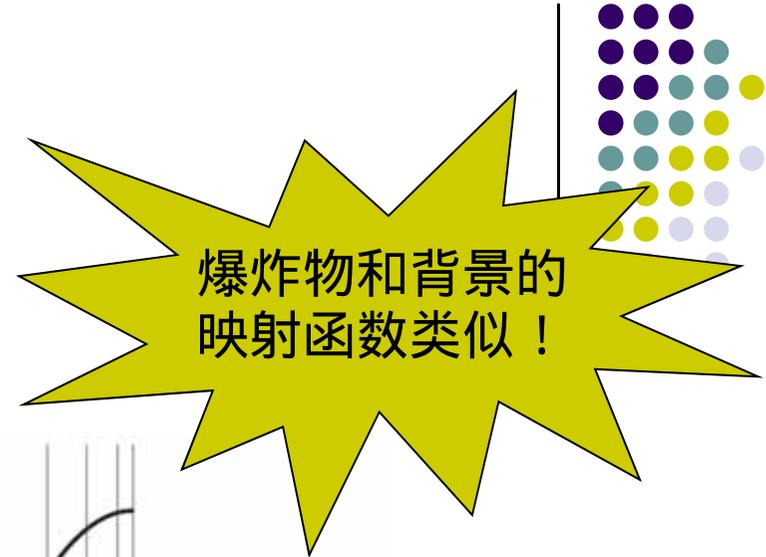
正常
行李箱



有爆炸物
行李箱

举例

- 机场X射线检查图片



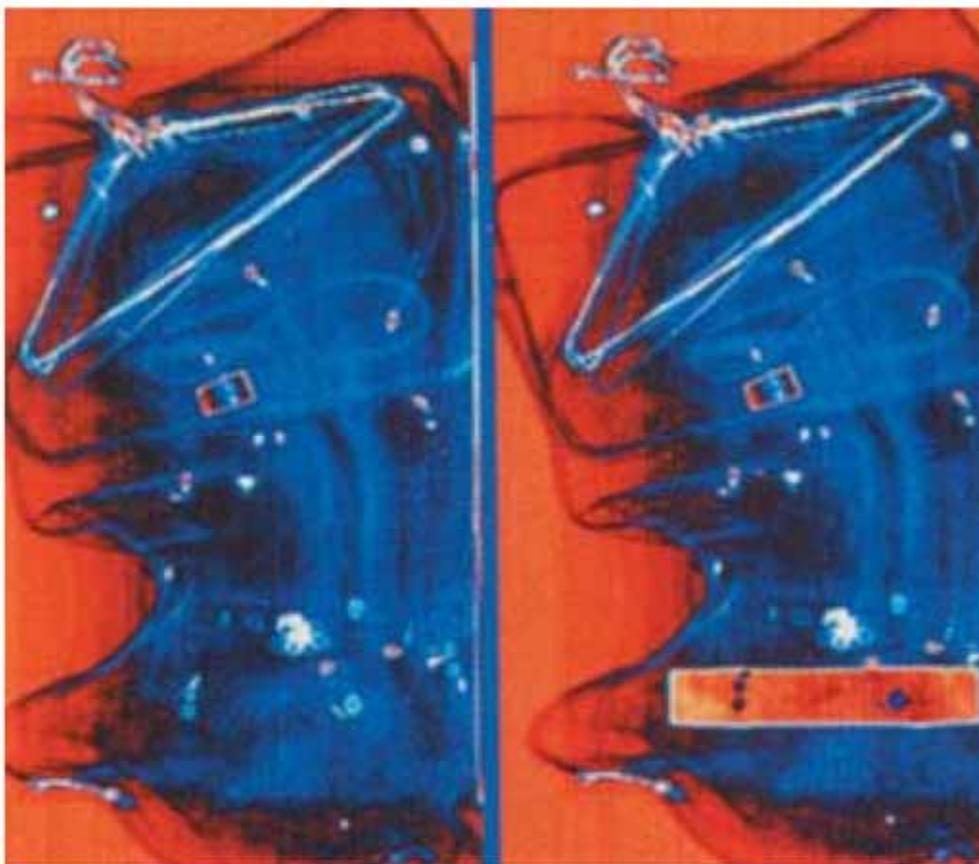
转换函数

举例

- 机场X射线检查图片



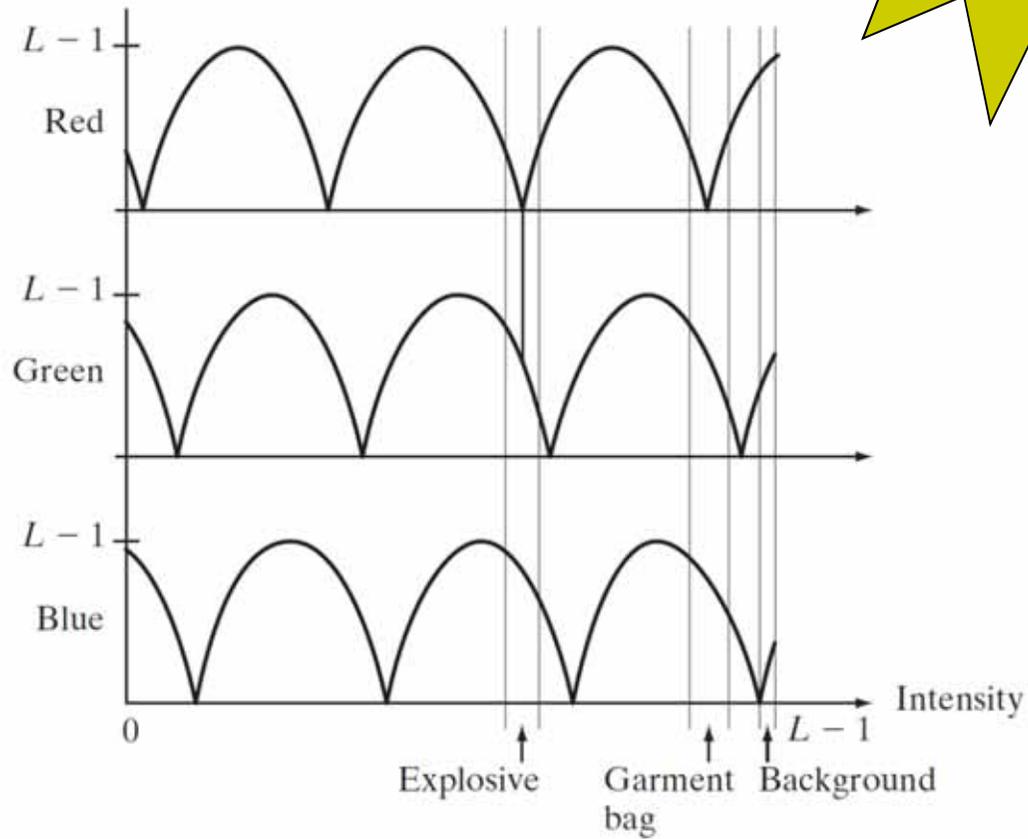
正常
行李箱



有爆炸物
行李箱

举例

- 机场X射线检查图片



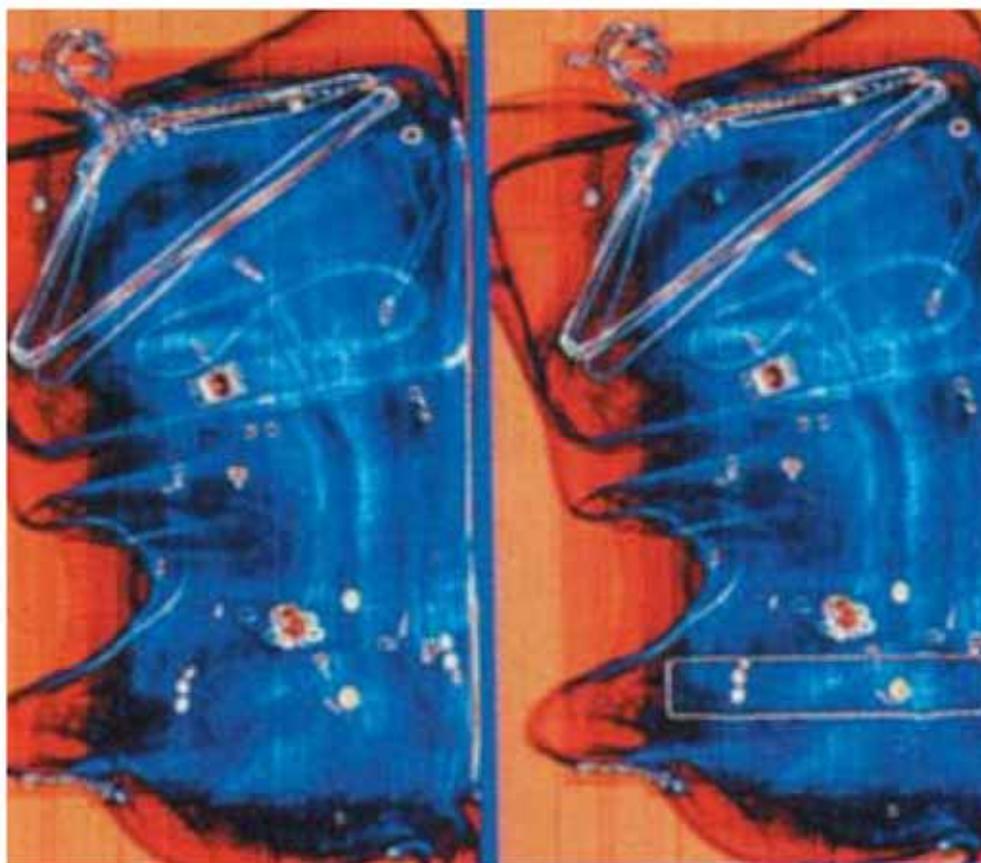
转换函数

举例

- 机场X射线检查图片



正常
行李箱

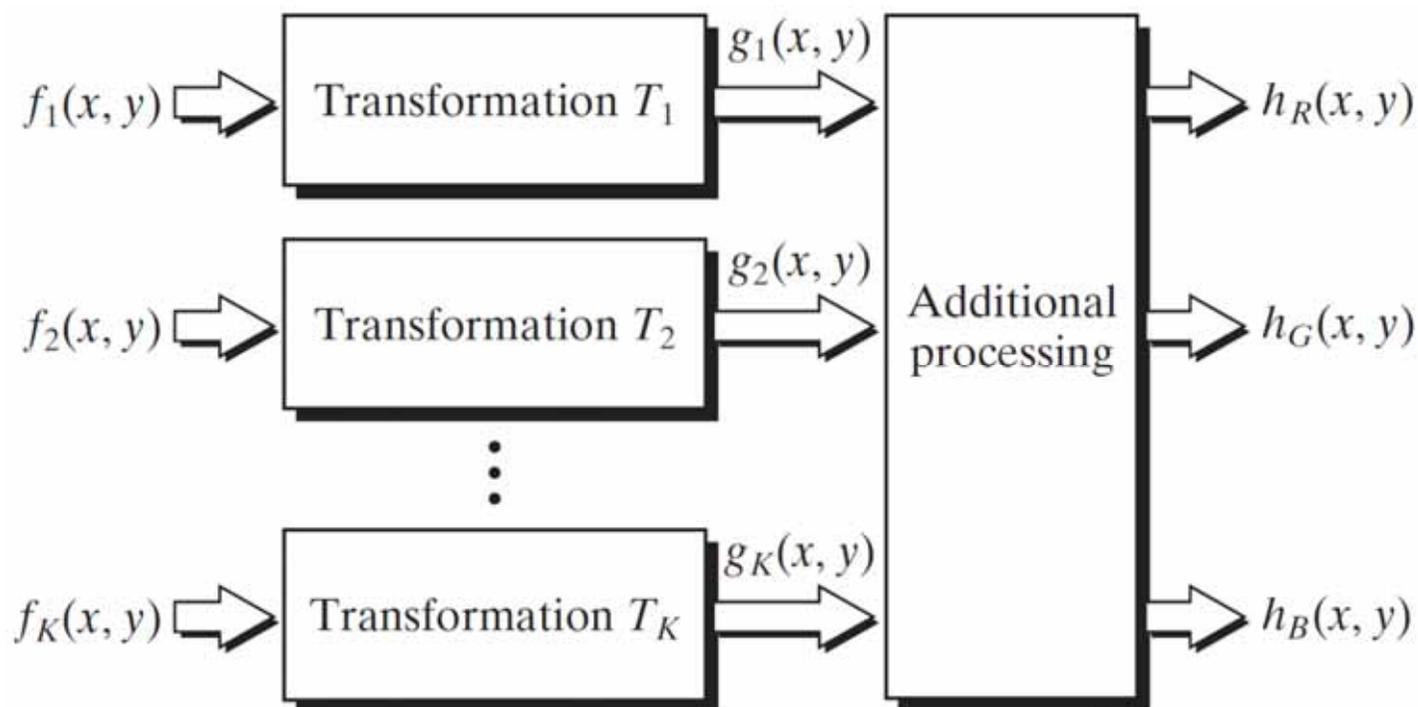


有爆炸物
行李箱

灰度到彩色的变换



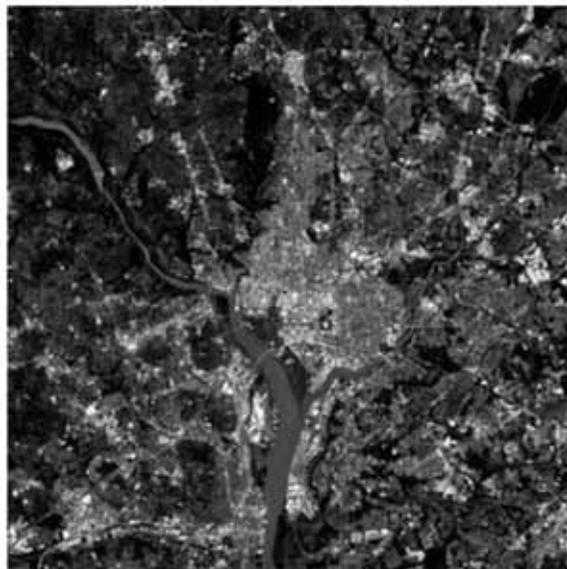
- 多图像变换
 - 多光谱图像处理



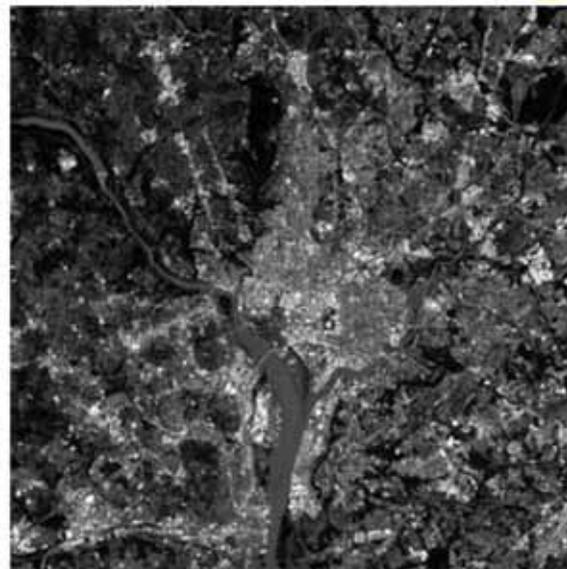
举例

- 卫星图片

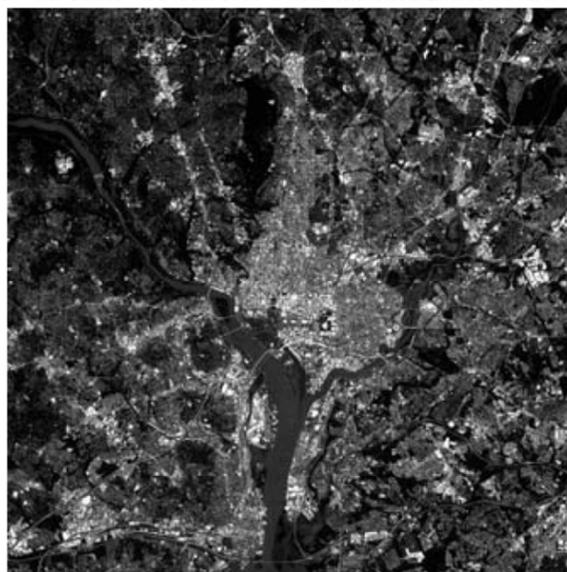
红



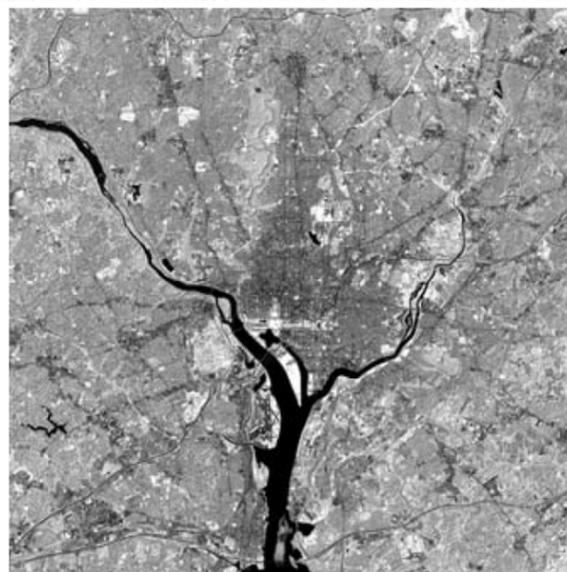
绿



蓝



近
红外



举例

- 卫星图片

密集区域
难以分辨



红、绿、蓝组合



举例

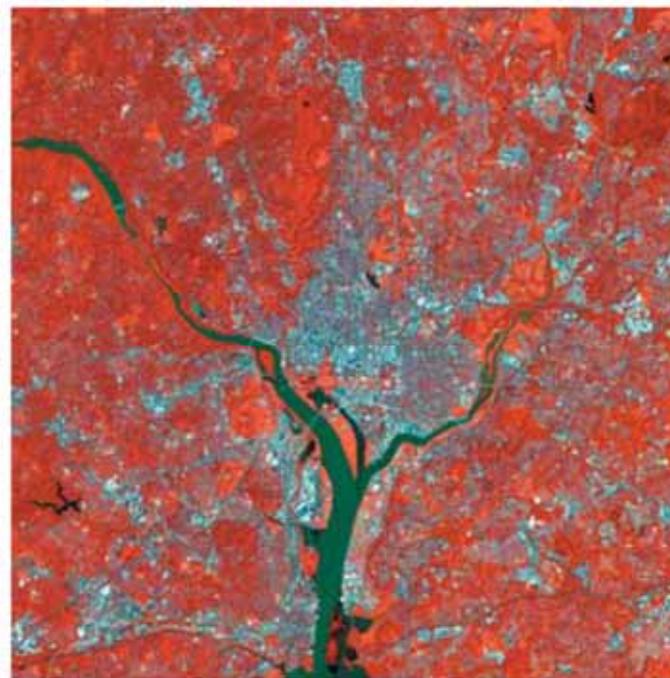
- 卫星图片

密集区域
难以分辨

红色：生物
浅蓝色：人造物



红、绿、蓝组合



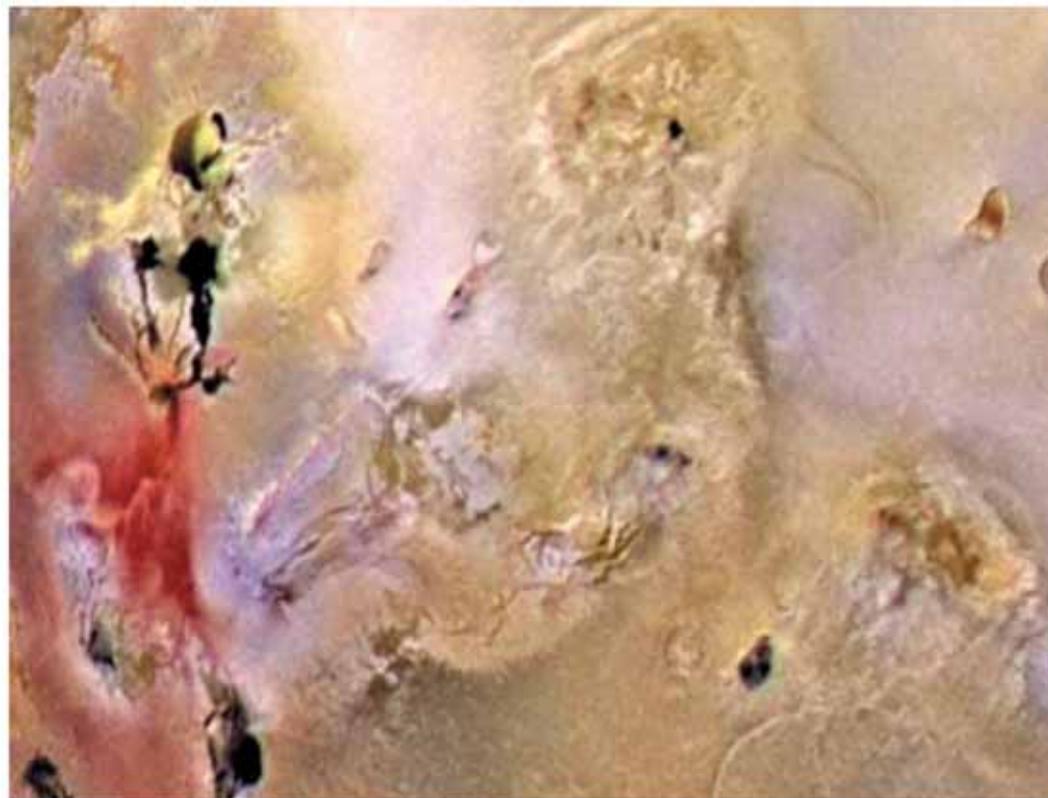
近红外、绿、蓝组合



举例

- 土星的卫星Io
 - 多幅不同频谱的图像合成

红色：火山最近喷出的物质
黄色：陈旧的硫沉积物



提纲

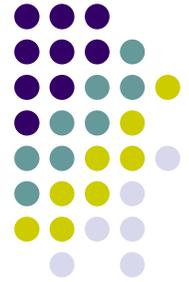
- 彩色基础
- 彩色模型
- 伪彩色图像处理
- 全彩色图像处理



全彩色图像处理

- 基础
- 彩色变换
- 补色
- 彩色分层
- 色调和色彩校正
- 直方图处理





全彩色图像处理基础

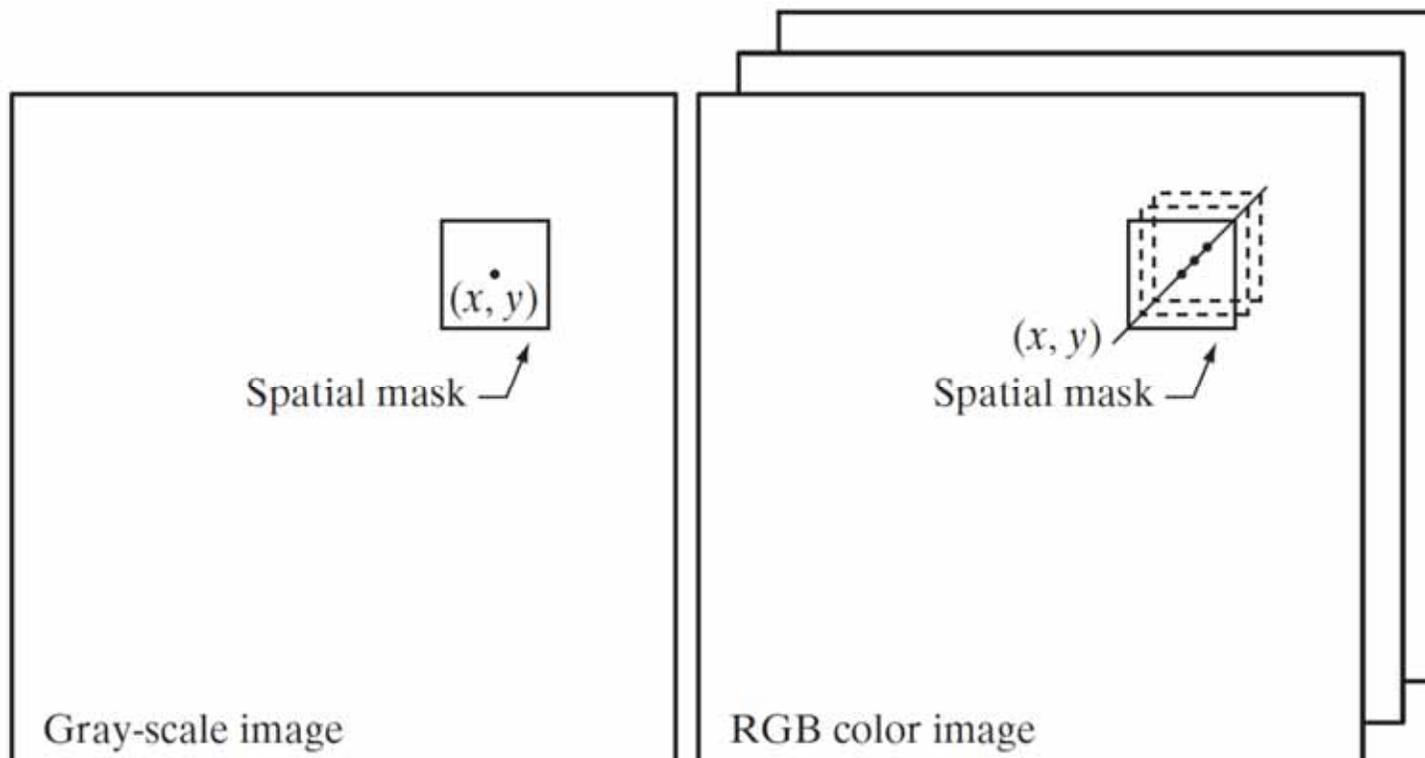
1. 分别处理每一幅分量图像
 - 然后再合成一幅完整的彩色图像
2. 直接处理彩色像素
 - 每一个像素是一个向量

$$\mathbf{c}(x, y) = \begin{bmatrix} c_R(x, y) \\ c_G(x, y) \\ c_B(x, y) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R(x, y) \\ G(x, y) \\ B(x, y) \end{bmatrix}$$

- 两种处理方式等价的前提
 - 处理方法适用于向量和标量
 - 对向量的每个成分独立操作

举例

- 邻域内求平均





彩色变换

- 变换公式

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

- $f(x, y)$ 是彩色输入图像
- $g(x, y)$ 是彩色输出图像
- 假设存在 n 个彩色分量

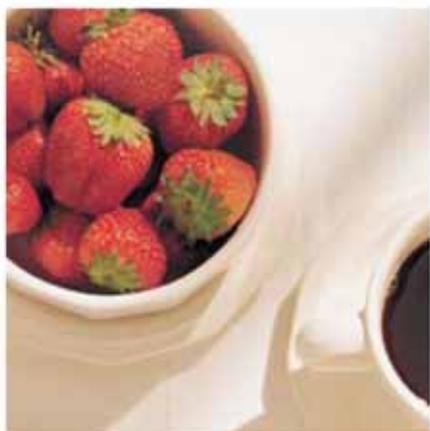
$$s_i = T_i(r_1, r_2, \dots, r_n), \quad i = 1, 2, \dots, n$$

- r_i 是 $f(x, y)$ 的第 i 个彩色分量
- s_i 是 $g(x, y)$ 的第 i 个彩色分量
- 共有 n 个映射函数 T_1, \dots, T_n

举例



彩色原图



草莓主要由洋红、黄色组成

黑色主要用来表示咖啡和阴影



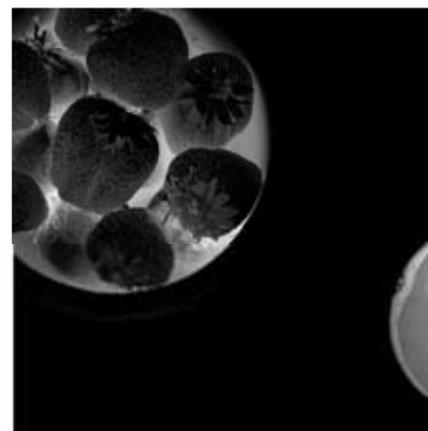
Cyan



Magenta



Yellow



Black

举例



彩色原图



草莓主要由
红色组成



Red



Green



Blue

举例



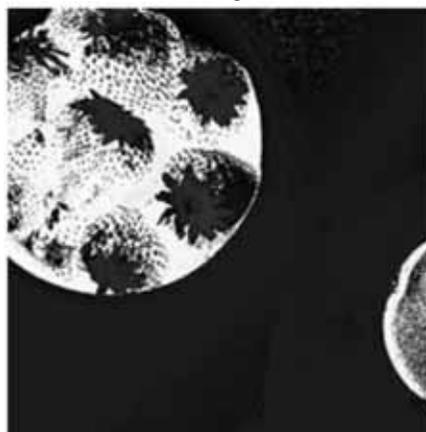
彩色原图



红色草莓的色调不连续

草莓的颜色纯净、饱和度高

强度分量类似于原图的灰度表示



Hue



Saturation



Intensity

彩色变换

- 改变图像强度

$$g(x, y) = kf(x, y)$$

1. 对于HSI模型

$$s_1 = r_1, s_2 = r_2, s_3 = kr_3$$

2. 对于RGB模型

$$s_i = kr_i \quad i = 1, 2, 3$$

3. 对于CMY模型

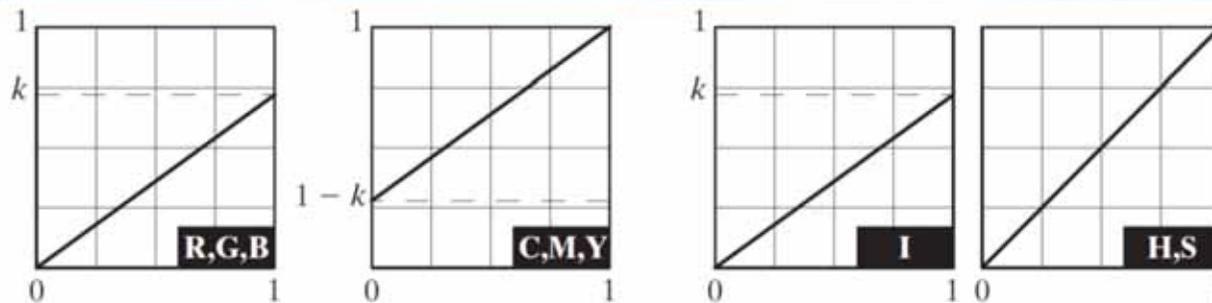
$$s_i = kr_i + (1 - k) \quad i = 1, 2, 3$$



1、HSI模型实现最简单
2、转换到HSI模型并不容易

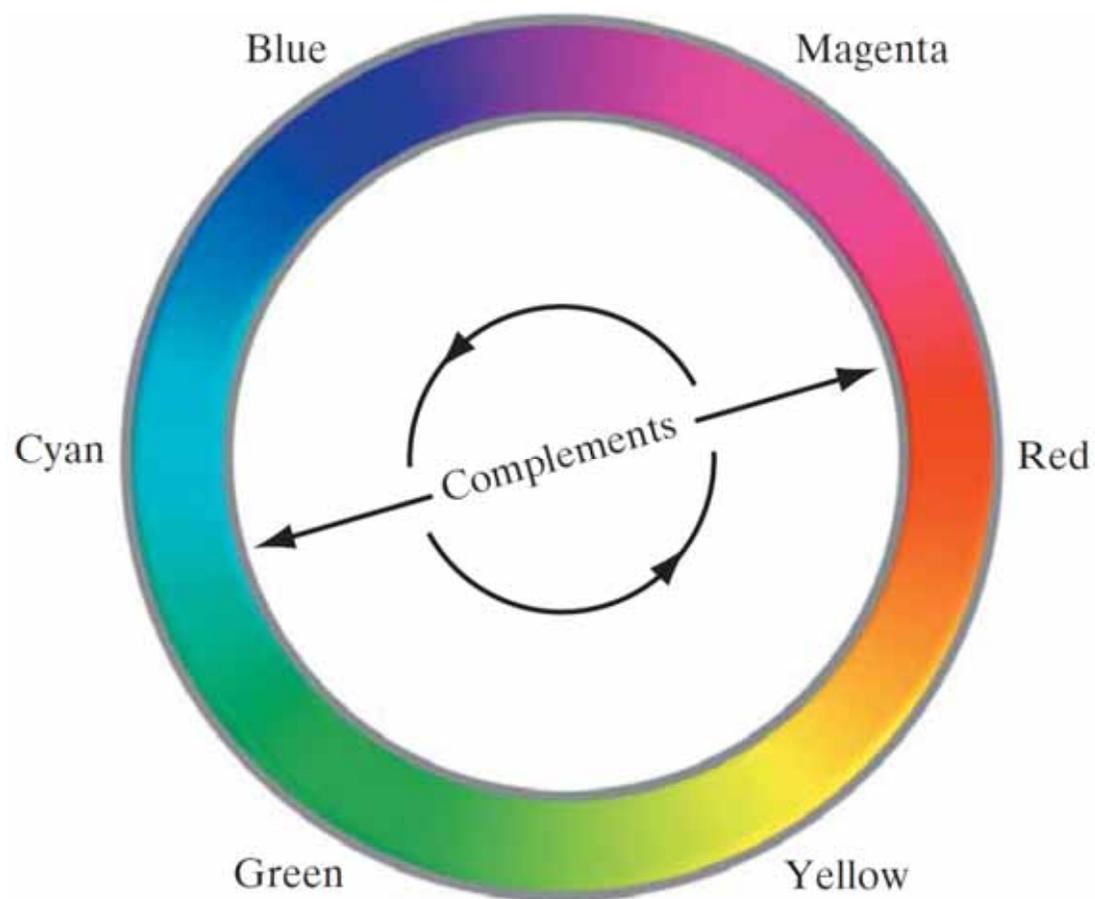
举例

- $k = 0.7$



补色

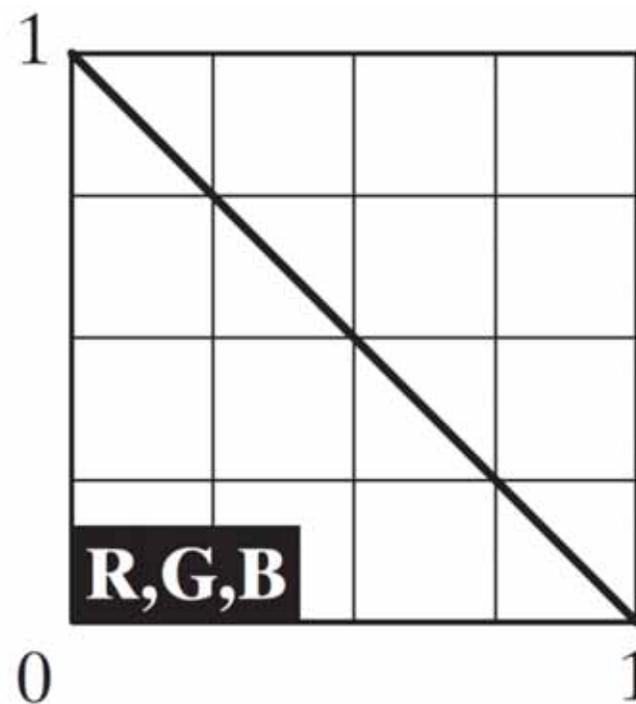
- 彩色环上相对的颜色





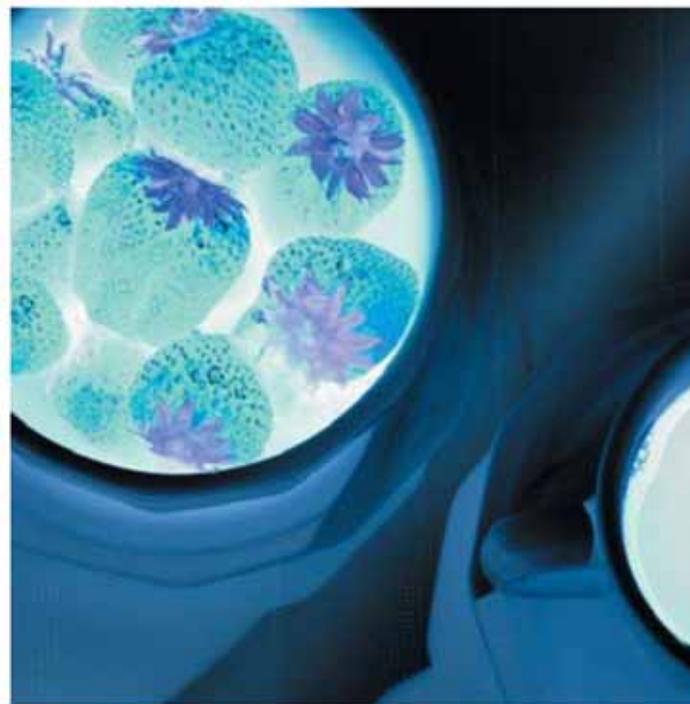
举例

- 彩色图像的补色
 - 基于RGB



举例

- 彩色图像的补色
 - 基于RGB



类似于彩色底片

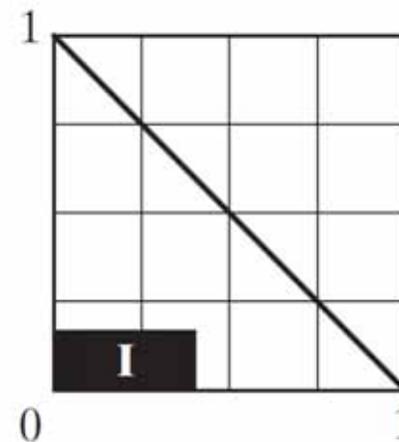
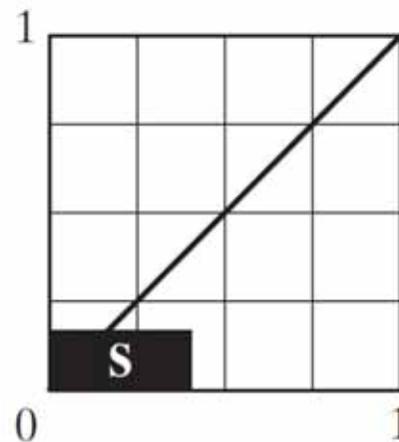
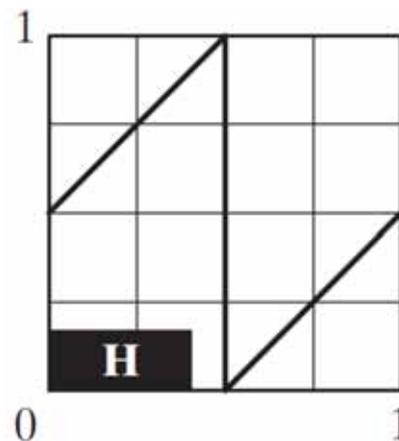


举例

- 彩色图像的补色
 - 基于HSI

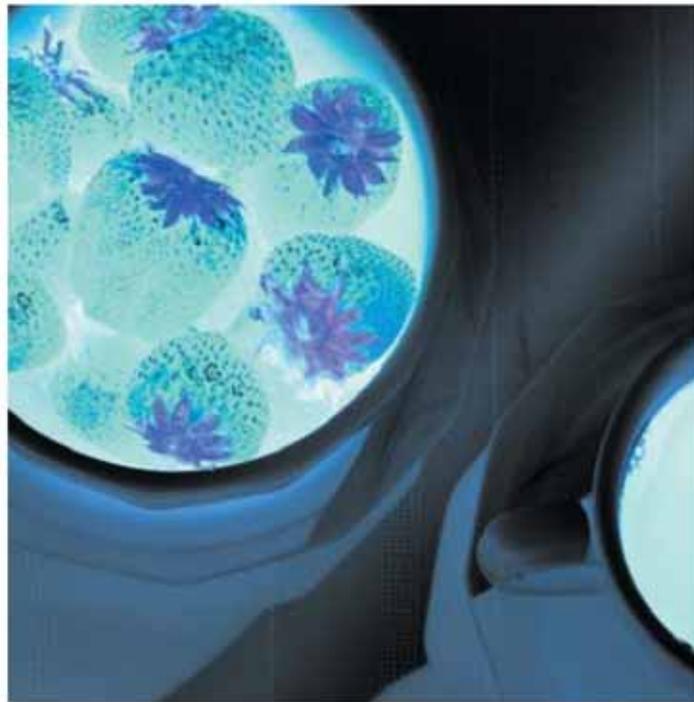


- 1、对饱和度 (S) 的操作很复杂
- 2、下面只是一个近似实现



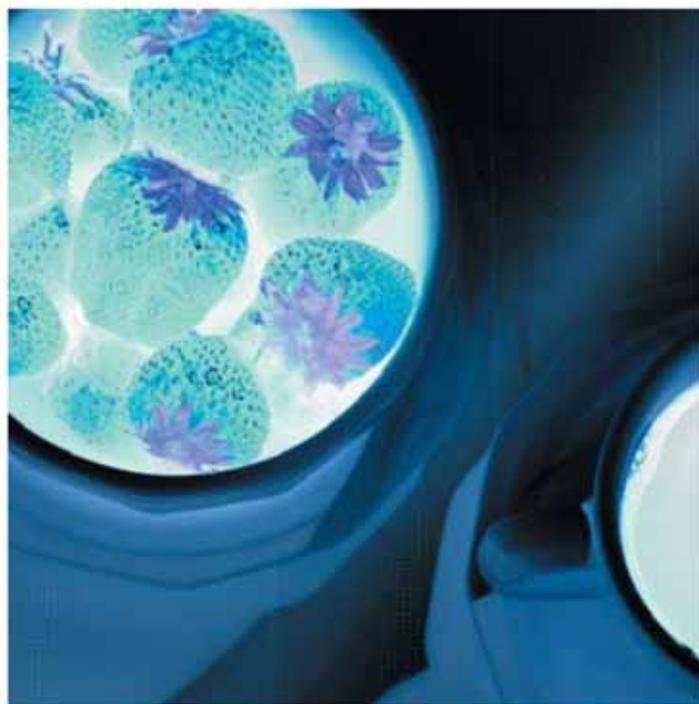
举例

- 彩色图像的补色
 - 基于HSI

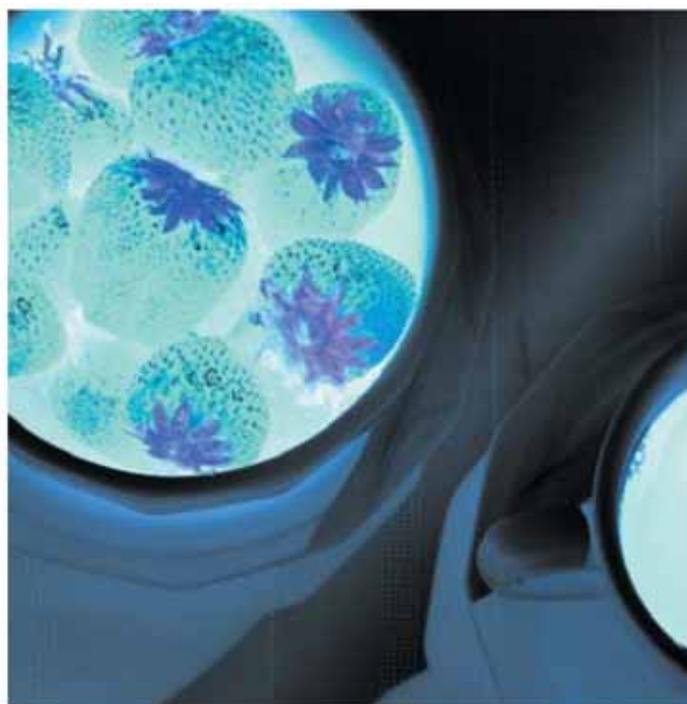


举例

- 彩色图像的补色



基于RGB



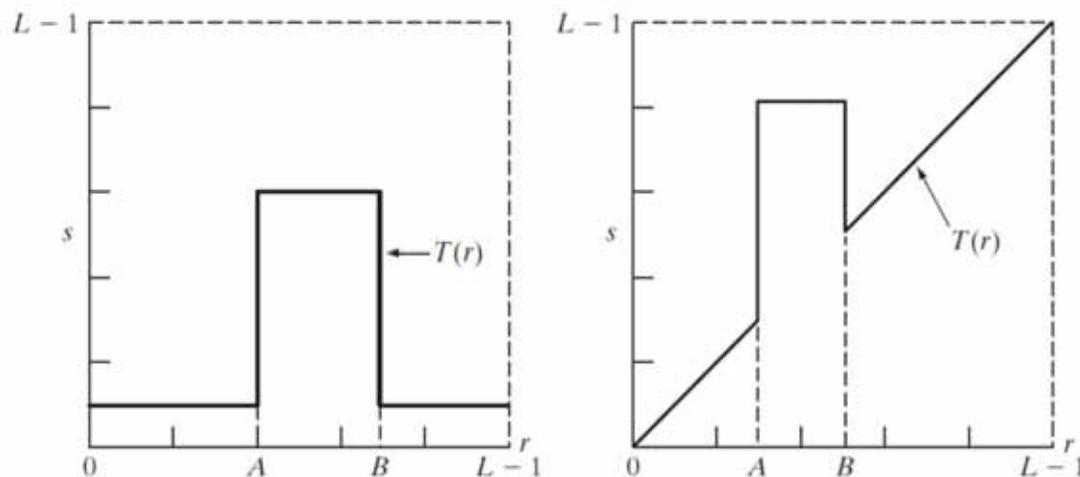
基于HSI



彩色分层

- 突出图像中某个彩色区域
 1. 突出显示感兴趣的颜色
 2. 像模板一样使用彩色区域
- 变换函数更加复杂
 - 函数涉及到 n 个彩色分量

灰度分层
相对容易



将不感兴趣的颜色设为中性



- 用立方体定义感兴趣的区域

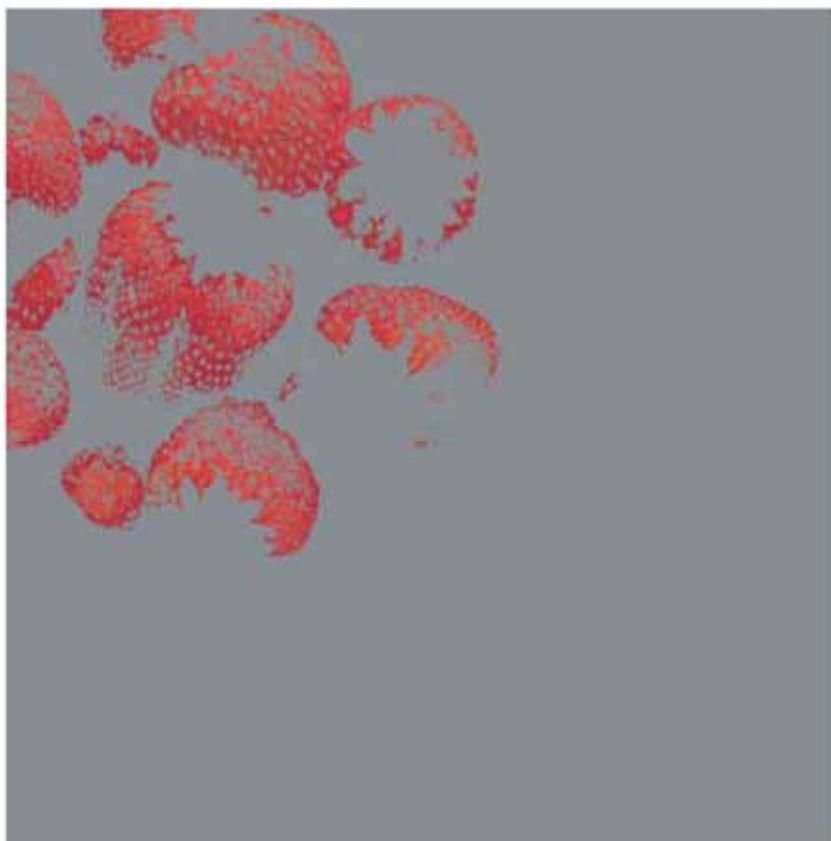
$$s_i = \begin{cases} 0.5 & \text{if } \left[|r_j - a_j| > \frac{W}{2} \right]_{\text{any } 1 \leq j \leq n} \\ r_i & \text{otherwise} \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, n$$

- 中心颜色为 (a_1, \dots, a_n)
- 区域宽度为 W
- 用圆定义感兴趣的区域

$$s_i = \begin{cases} 0.5 & \text{if } \sum_{j=1}^n (r_j - a_j)^2 > R_0^2 \\ r_i & \text{otherwise} \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, n$$

举例

- 分离草莓



基于颜色立方体分割



基于颜色圆分割

色调和色彩校正



- CIE $L^*a^*b^*$ 模型

$$L^* = 116 \cdot h\left(\frac{Y}{Y_W}\right) - 16$$

$$a^* = 500 \left[h\left(\frac{X}{X_W}\right) - h\left(\frac{Y}{Y_W}\right) \right]$$

$$b^* = 200 \left[h\left(\frac{Y}{Y_W}\right) - h\left(\frac{Z}{Z_W}\right) \right]$$

- 其中

$$h(q) = \begin{cases} \sqrt[3]{q} & q > 0.008856 \\ 7.787q + 16/116 & q \leq 0.008856 \end{cases}$$

- X_W, Y_W, Z_W 表示标准白色

色调和色彩校正



- CIE $L^*a^*b^*$ 模型
 - 设备无关的颜色模型
 - 可以表示所有设备的颜色
 - 保持不同设备之间的颜色一致性
 - 不同设备映射到该模型
 - 将强度 (L^*) 和彩色 (a^*b^*) 进行分离
 - 允许独立校正色调和色彩不平衡
- 色调不平衡：强度分布不均匀
- 色彩不平衡：颜色过饱和、欠饱和

举例

- 色调校正

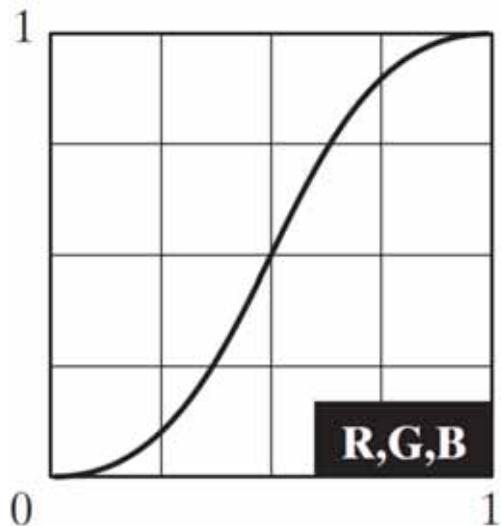


平淡图像



举例

- 色调校正



只改变强度，
不改变颜色



平淡图像



校正图像

举例

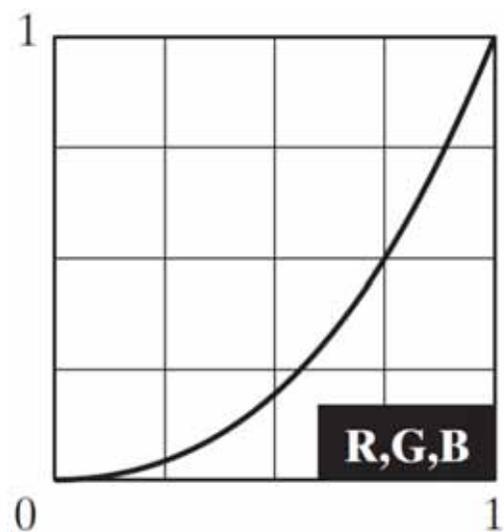
- 色调校正



较亮图像

举例

- 色调校正

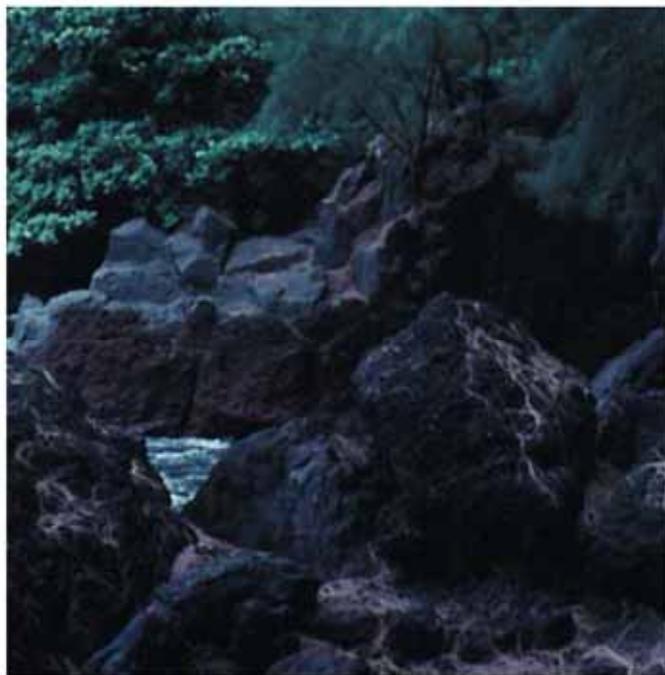


较亮图像

校正图像

举例

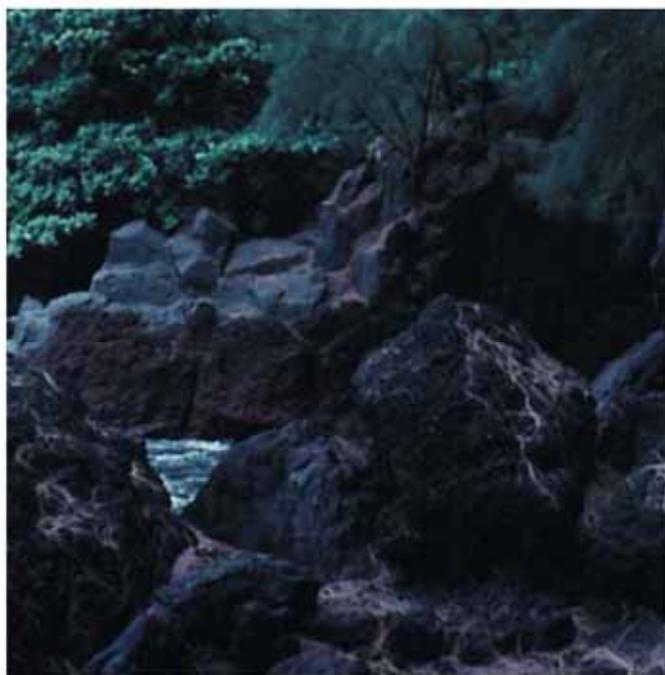
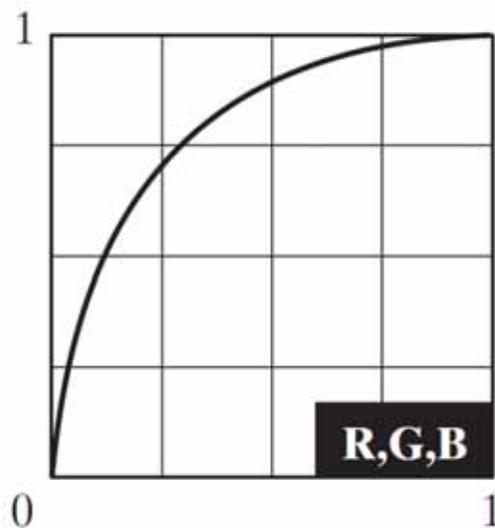
- 色调校正



较暗图像

举例

- 色调校正



较暗图像



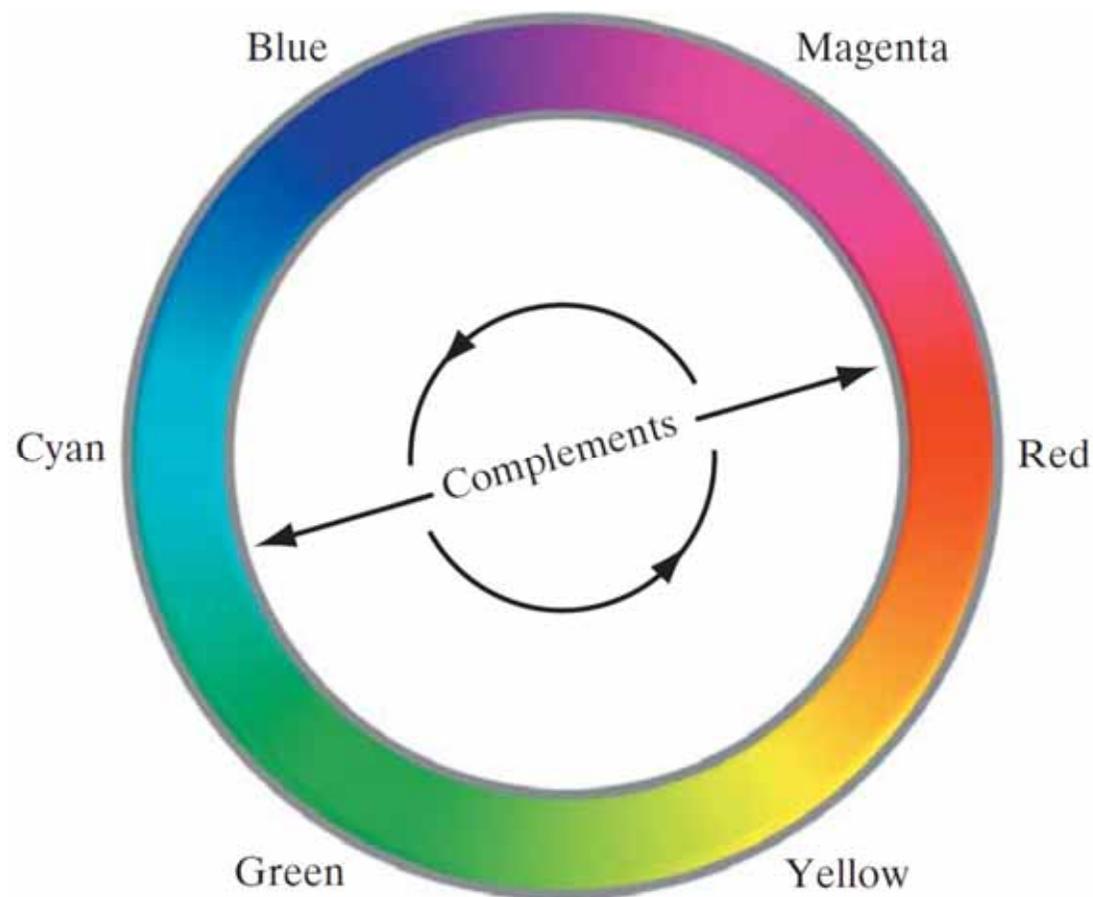
校正图像

色彩校正



- 可以参考彩色环

- 减少洋红
 - 减少蓝、红
 - 增多绿色



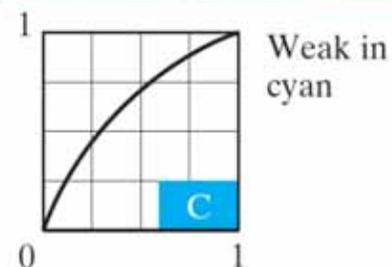
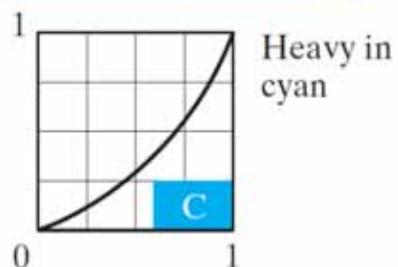
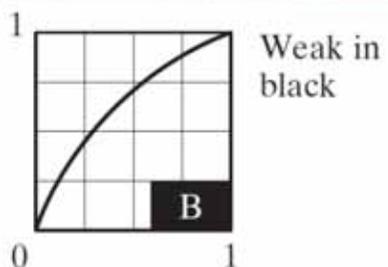
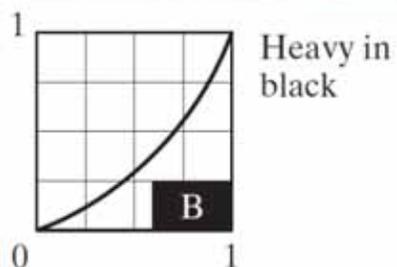
举例

● 色彩校正

校正后的图



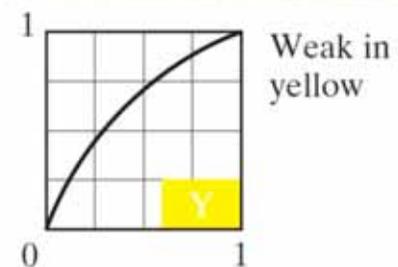
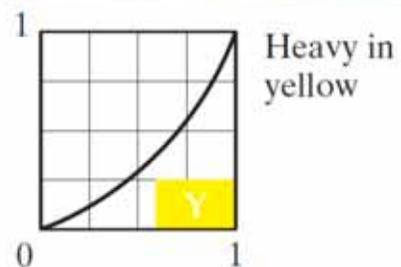
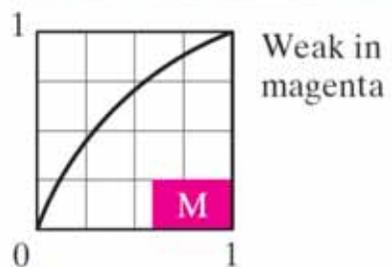
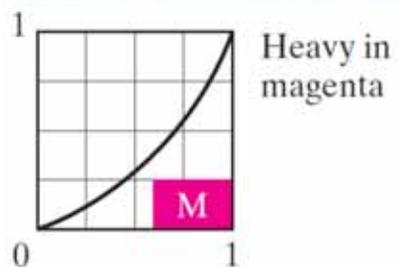
青色少，
导致偏红



举例

- 色彩校正

校正后的图





直方图处理

- 可以实现自动的图像处理
- 直方图均衡

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

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

- 利用HSI模型
 - 对强度 (I) 进行处理

举例

- 原图

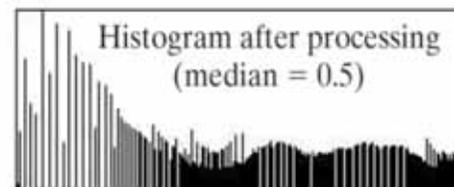
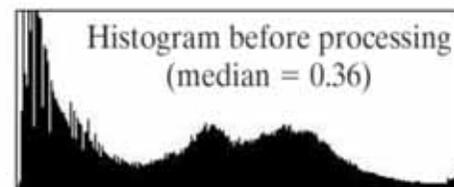
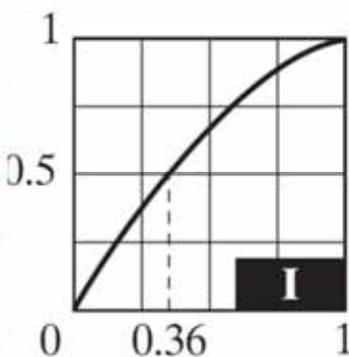


举例

- 直方图处理

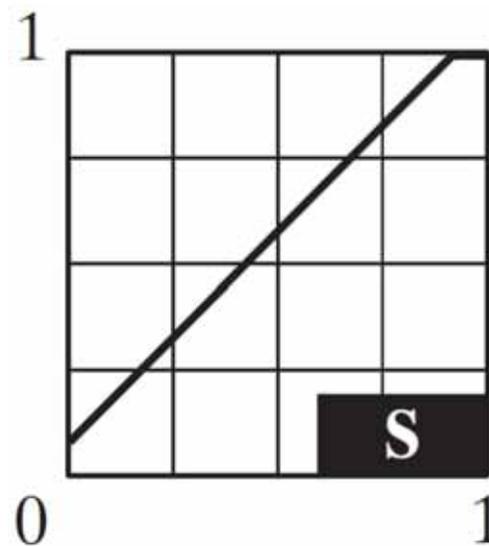
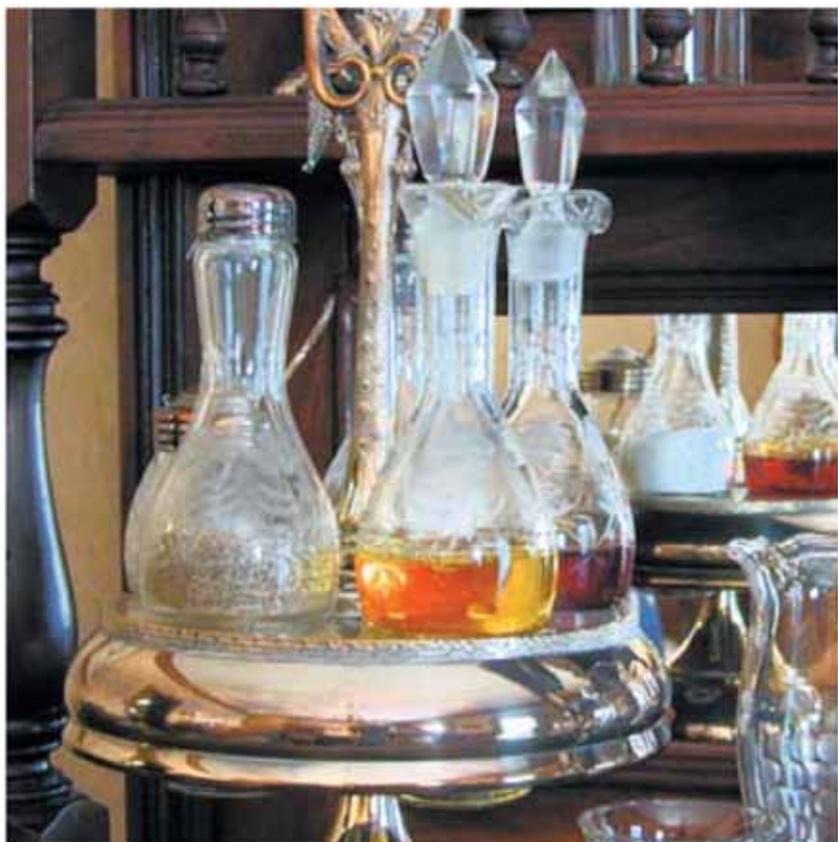
可以看到更多细节 (如, 木纹)

增强亮度会影响整体感受, 尤其是液体



举例

- 增强饱和度





下一讲

