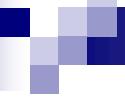


# Chapter 6

# Color Image Processing

第六章：彩色图像处理



# Notice

- Homework and projects please see the course website.

# **Preview**

**6.1 Color fundamentals**

**6.2 Color models**

**6.3 Pseudo-color image processing**

**6.4 Basics of full color image processing**

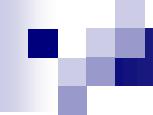
**6.5 Color transformations**

**6.6 Smoothing and sharpening**

**6.7 Color segmentation**

**6.8 Noise in color images**

**6.9 Color image compression**



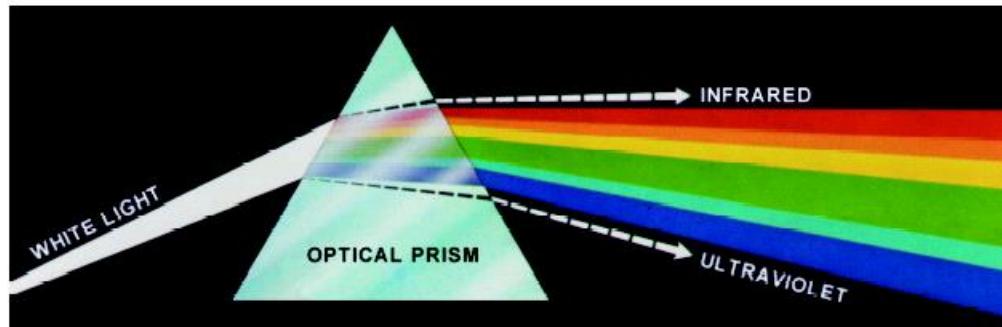
**For a long time I limited myself to one color——  
as a form of discipline.**

Pablo Picasso

- **Motivation of color image processing:** (1) Color is a powerful descriptor that often simplifies object identification and extraction from a scene. (2) Human can discern thousands of color shades and intensities, compared to about only two dozen shades of gray.
- **Two areas:** Full-color and pseudo-color.

## 6.1 Color Fundamentals

Classical prism phenomenon:

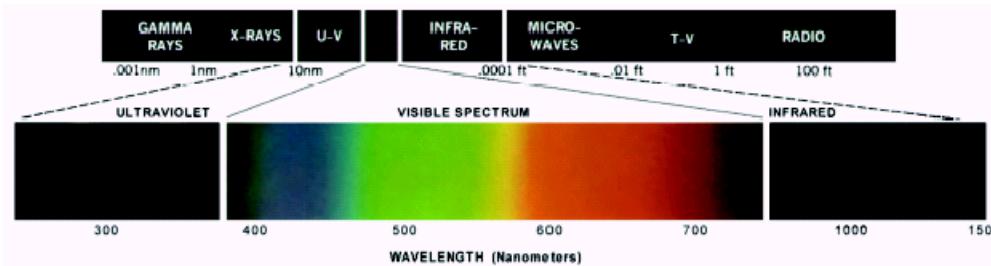


**FIGURE 6.1** Color spectrum seen by passing white light through a prism. (Courtesy of the General Electric Co., Lamp Business Division.)

1666, Sir Isaac Newton discovered that when a beam of sunlight passes through a glass prism, the emerging beam of light is not white but consists instead of a continuous spectrum of colors ranging from **violet** (紫色) at one end to **red** (红色) at the other.



**Visible (color) light:** electromagnetic spectrum from approximate 400 to 700nm. Color changes smoothly from one spectrum to another. (**Demo**)



**FIGURE 6.2** Wavelengths comprising the visible range of the electromagnetic spectrum.  
(Courtesy of the General Electric Co., Lamp Business Division.)

The colors that humans perceive in an object are determined by the nature of light reflected from the object. A body that reflects light and is relatively balanced in all visible wavelengths appears white to observer. However, a body that favors reflectance in a limited range of the visible spectrum exhibits some shades of color. For example, green color.

What do you see below?



**Key factors for color: illumination source, object, observer.**

# For fun



请看列表并且说出颜色而不是单词

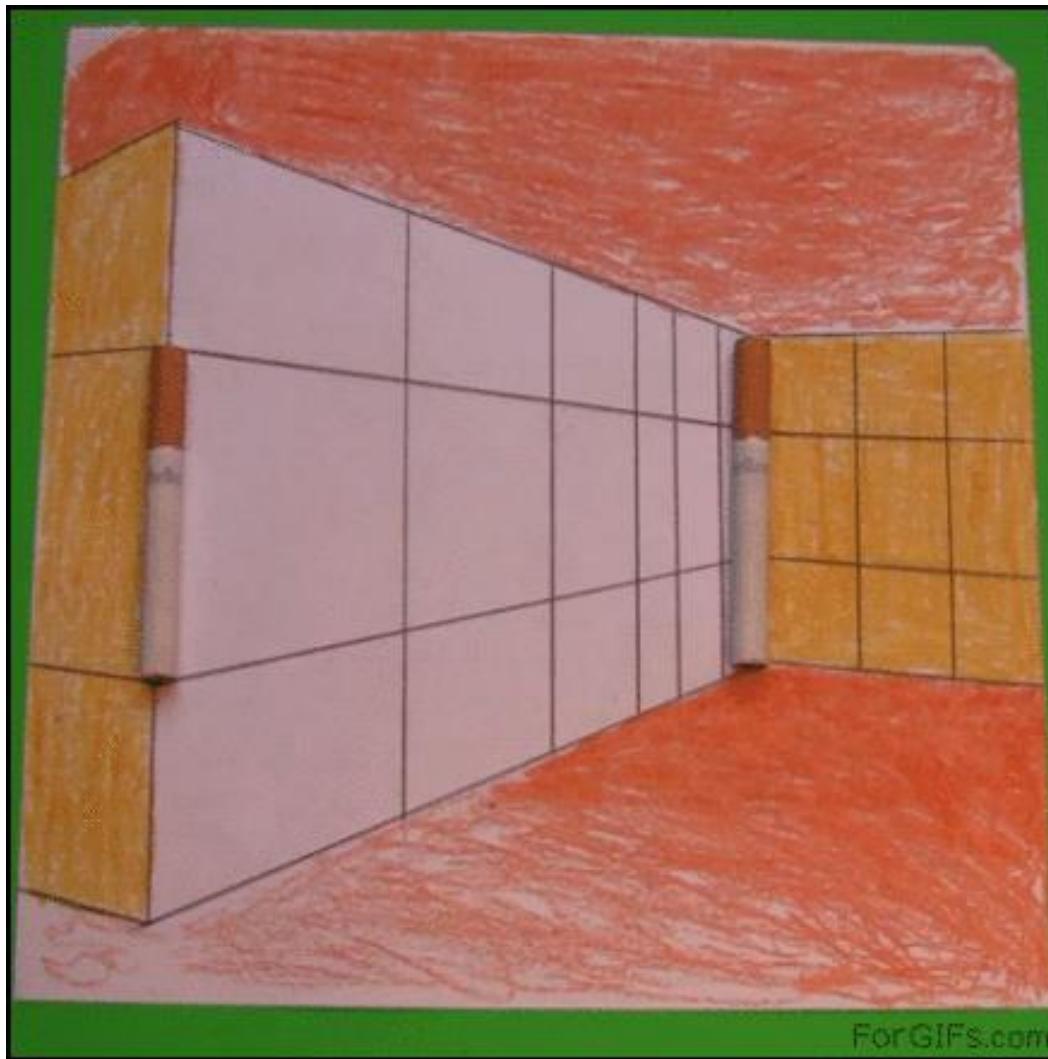
黄	蓝	橙
黑	红	绿
紫	黄	红
橙	绿	黑
蓝	红	紫
绿	蓝	橙

左右(脑)冲突  
你的右脑尝试着说出颜色,但是  
你的左脑坚持要阅读单词

下载蘑菇街客户端,逛街更方便

[weibo.com/mogujie](http://weibo.com/mogujie)

For fun



通常有三个基本量用于描绘彩色光源的质量：

- 光辐射强度Radiance：从光源流出的能量，用Watt为度量单位
- 光通量Luminance：观察者从光源感受的能量，Lumens为度量单位。例如：远红外光有实际的能量，但人眼感受不到，其光通量为零。
- 亮度Brightness：亮度是描绘光感受的主观描绘，它实际上不能测量，但却是彩色图像“强度”概念的具体体现，并且也是描述彩色感觉的参数之一。

人眼中约6-7百万个锥状细胞是负责彩色视觉的传感器。

65%——对红光敏感

33%——对绿光敏感

2%——对蓝光敏感（但蓝锥状细胞是最敏感的一群）

人眼看到的颜色是所谓的“原色”**红、绿、蓝**的各种组合。

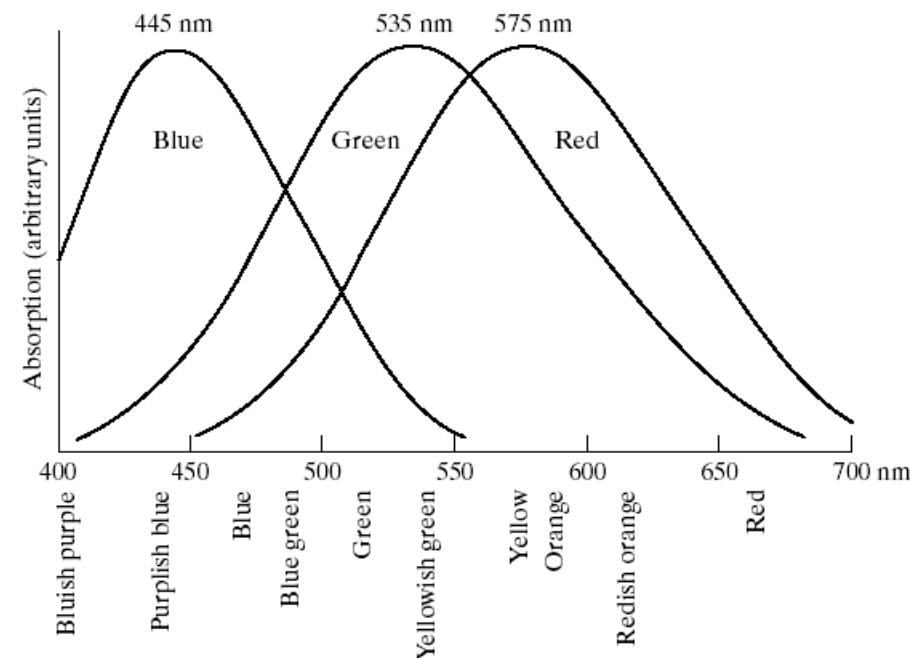
**Color should be defined:** CIE (国际照明委员会——the International Commission on Illumination) gave the definition of the primary colors in 1931 (但由于人眼吸收曲线的试验完成于1965年，现在看来只能是一个近似的结论)：

蓝——435.8 nm

绿——546.1 nm

红——700 nm

人眼看到的颜色是所谓的“原色”红、绿、蓝的各种组合。但没有单一的颜色可以称为绝对的红绿蓝。



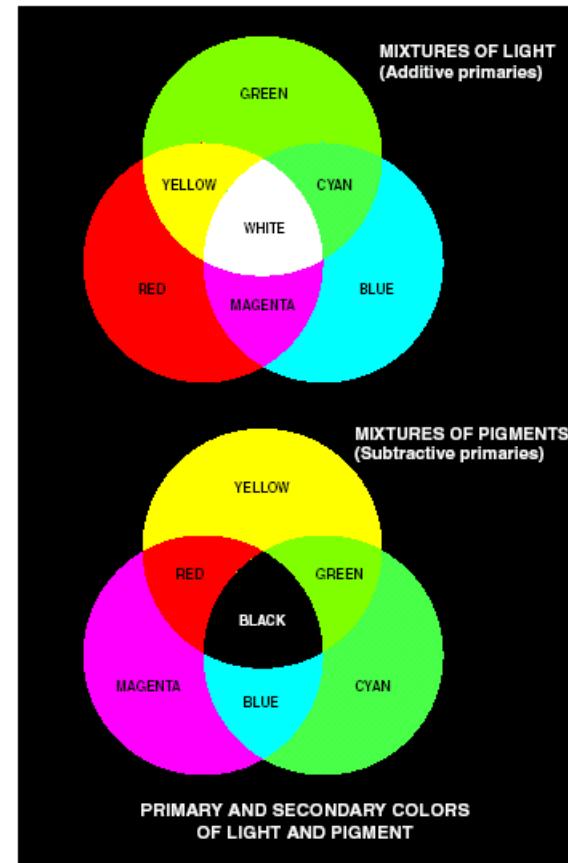
**FIGURE 6.3** Absorption of light by the red, green, and blue cones in the human eye as a function of wavelength.

## What are the primary colors (三原色)?

就是说三色中的任何一色，都不能用另外两种原色混合产生，而其他色可由这三色按一定的比例混合出来，这三种独立的颜色称之为三原色或三基色。

对“原色”一词的误解：“原色”指的是红黄蓝三种原色，不是某一个特定的颜色。例如：给定三个原色以各种比例混在一起时可以产生大多数可见的彩色，但不可能包含所有的彩色。如果需要得到所有的彩色，红黄蓝三色的波长还需要有变化。（下面提到的色度图也将说明这一点）

光原色与颜料原色之间的区别：  
颜料原色的定义为减去或吸收  
光的一种原色，并反射或传输  
另外两种原色。

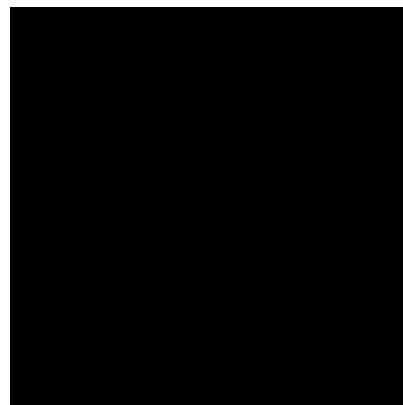


a  
b

**FIGURE 6.4** Primary and secondary colors of light and pigments. (Courtesy of the General Electric Co., Lamp Business Division.)

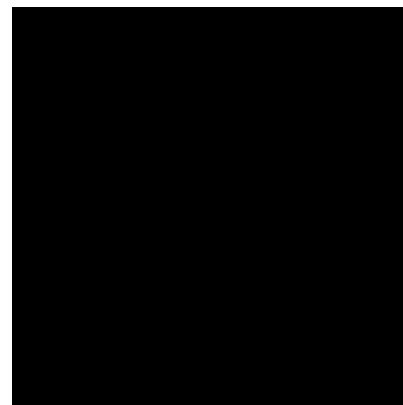
光原色是红●、绿●、蓝●。原色相加可产生二次色，如青色（Cyan）●（绿加蓝）、红紫色（Magenta）●（红加蓝）和黄色（Yellow）●（红加绿）。以合适的光强把三原色混合，或者把一种二次色和其相反的原色混合，可产生白光。

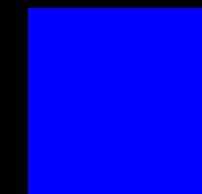
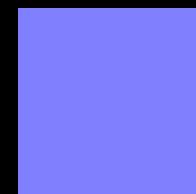
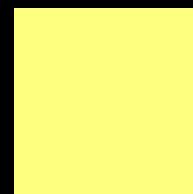
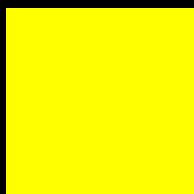
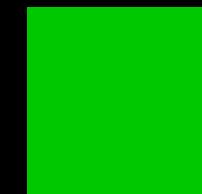
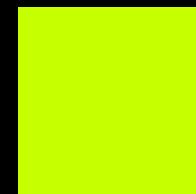
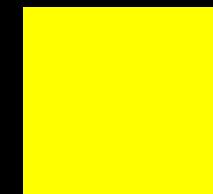
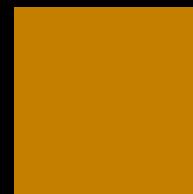
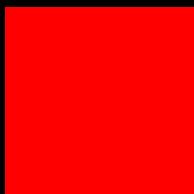
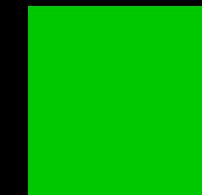
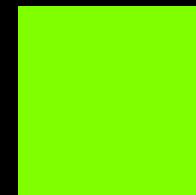
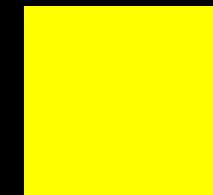
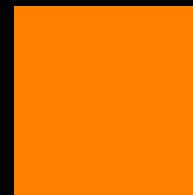
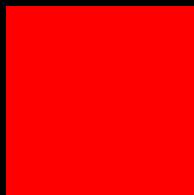
颜料的原色是青●（C）、红紫色●（M）、黄色●（Y）。颜料原色的二次色是红●（红紫加黄）、绿●（青加黄）、蓝●（青加红）。三种颜料原色以合适的比例组合，或者一种二次色和相应的补色组合，产生黑色。由于黑色是三种颜料原色的组合，所以通常彩色打印机为了得到纯正的黑色和节省颜料，都会加上一个黑色的颜料管，就是所谓的CMYK彩色系统。而光的三原色基于黑色的背景，则不再需要多加颜色。



一种形象的理解：光的三原色RGB是在黑的背景下往上加颜色，通过 $aR+bG+cB$ 可组成任何颜色（大多数），通常用于显示，如计算机屏幕电视等。而CMY是从白的背景下往下减颜色（因此RGB和CMY互补），用于印刷等（比如你穿一个红衣服，并非你的衣服发红光，而是它把其他颜色吸收掉（减掉）了，而把红的反射出来到你的眼睛里）。这样当然有个黑颜色最好（而RGB的背底本来就是黑）。这样用起来技术上就很不一样了。也就好理解为什么计算机屏幕或照相机的显示上的颜色（通过RGB）与打印出来的不一样（通过CMY）。

小问题：为什么是RGB、CMY而不是其他顺序？





相反色：亮——暗， 红      绿    蓝      黄

把一种颜色和另一种颜色区分开来的特性有三个：亮度（**Brightness**）、色调（**Hue**）、饱和度（**Saturation**）。

**亮度**——色彩明亮度的概念，即使在暗光下物体没有色彩的感觉，也有亮度的感觉（和视觉特性有关）

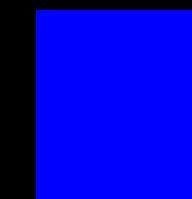
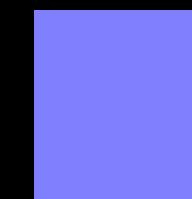
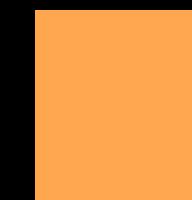
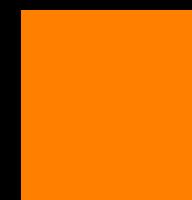
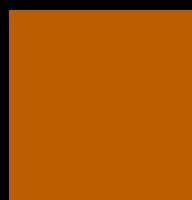
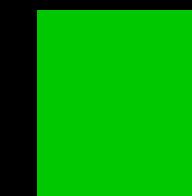
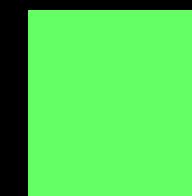
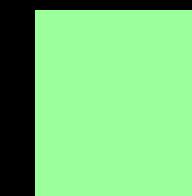
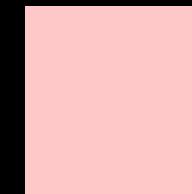
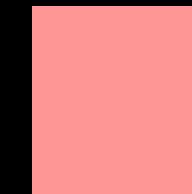
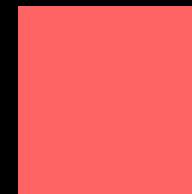
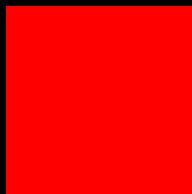
**色调**——光波混合中与**主波长**有关的属性，表示观察者接受的主要颜色。（**演示？**）一种比较实用的色调定义是：它是颜色感觉的一个基本特征，通过这个颜色特征可以给出颜色的基本名称，如红、黄、紫、橙等。

**饱和度**——饱和度表示的是颜色的纯度，或者是与中性灰的差别。**纯谱色**是全饱和的。但粉红色（红加白）、淡紫色（紫加白）是欠饱和的。饱和度与所加的白光成反比。**对数字图像，简单的说饱和色至少有一种原色的色阶为0。**

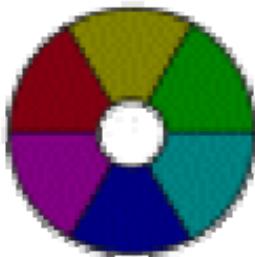
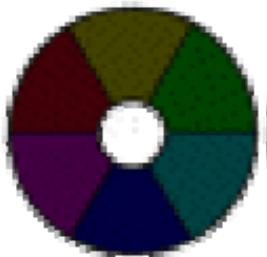
亮度是所有视觉的一个属性，但色调和饱和度仅属于彩色视觉。

色调与饱和度一起称为**色度**或彩色（chromaticity），**二维数据**。颜色（color）用色度和亮度来表征。

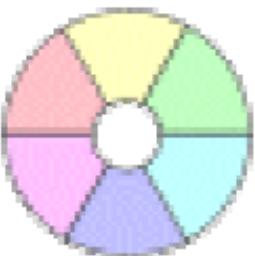
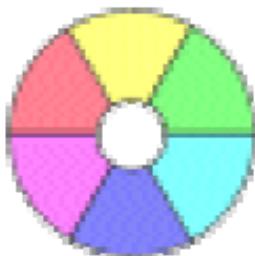
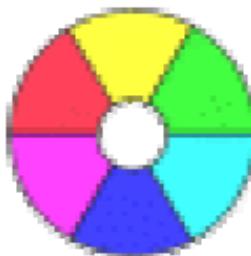
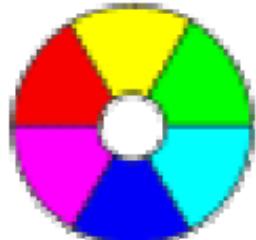
同色调彩色



## ● Hue, saturation and intensity

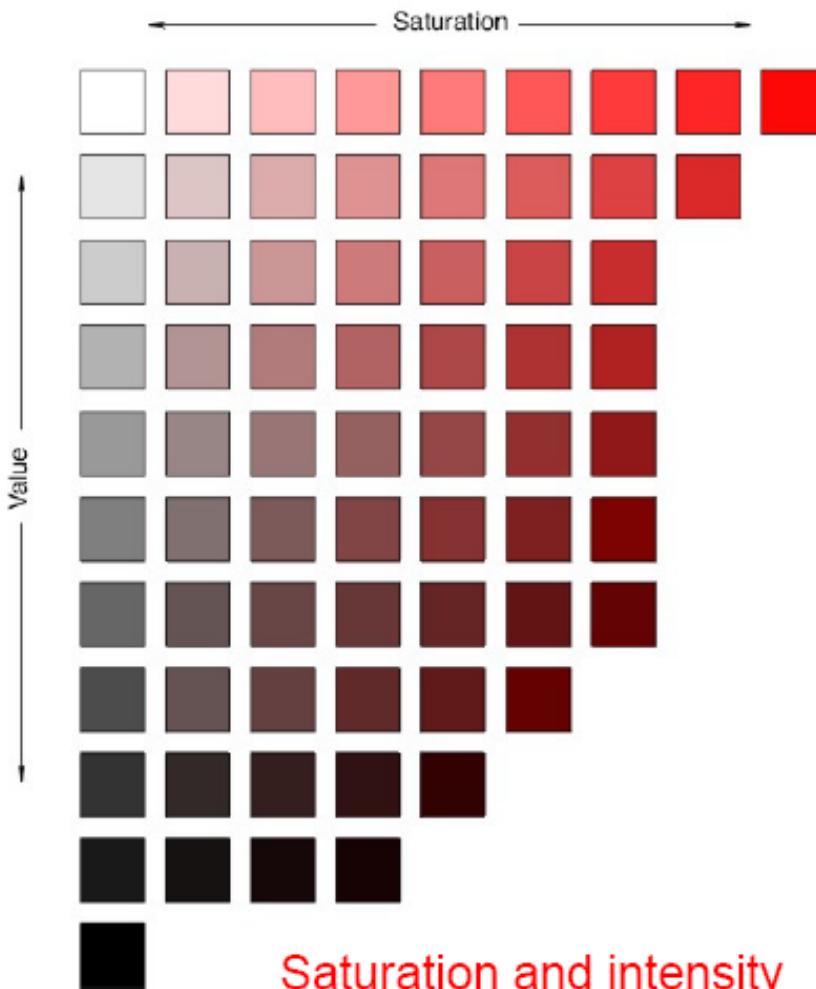


The right is  
pure color



Effect of saturation

饱和色测试：



**关于色度问题：**形成任何特殊颜色需要的红、绿、蓝的量称作三色值 (tristimulus values)，分别用  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  来表示（例如： $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  指的是某种颜色所需要的 R、G、B 的量）。因此，一种颜色由三原色系数确定，三原色系数 (色度坐标) 定义为：

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

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

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

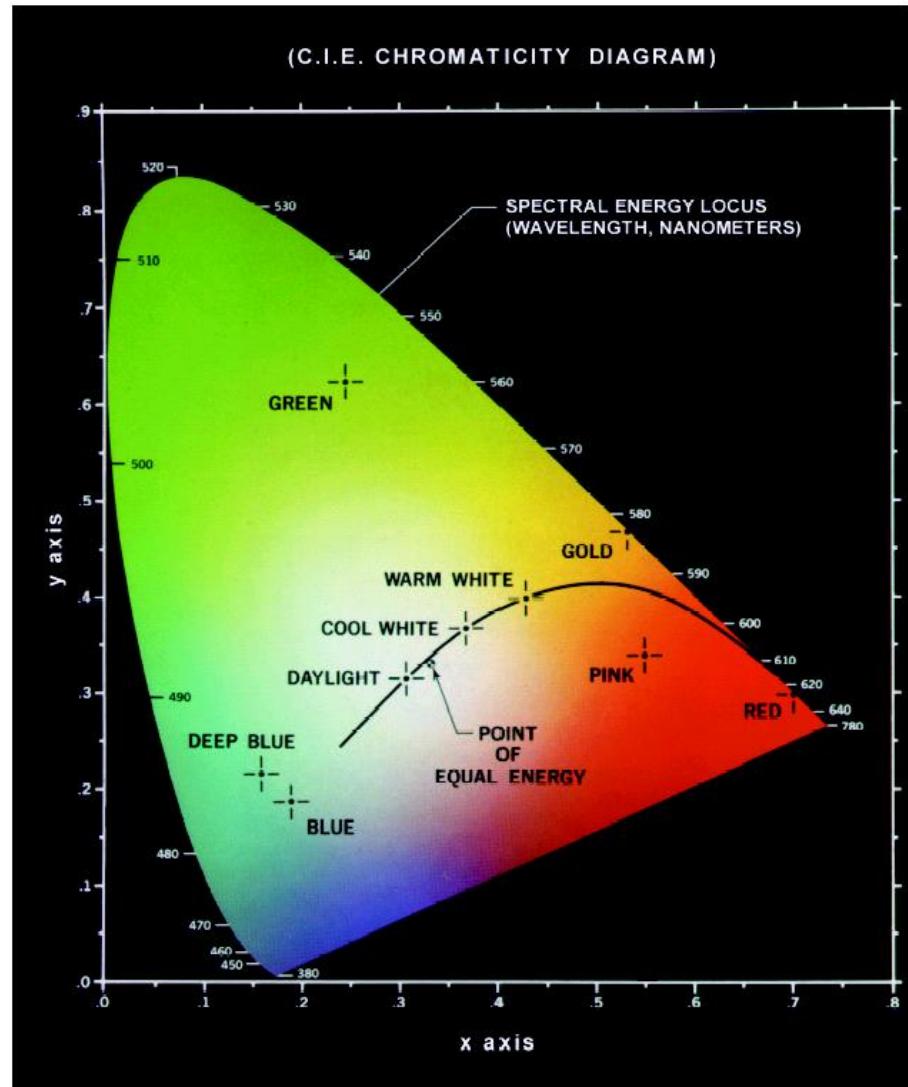
易见

$$x + y + z = 1$$

对于任一可见光谱内的光波长，其对应颜色的三色值可以直接从根据大量实验结果编制的表格和曲线中得到，也有不少文献可以参考（超出我们的学习范围）。

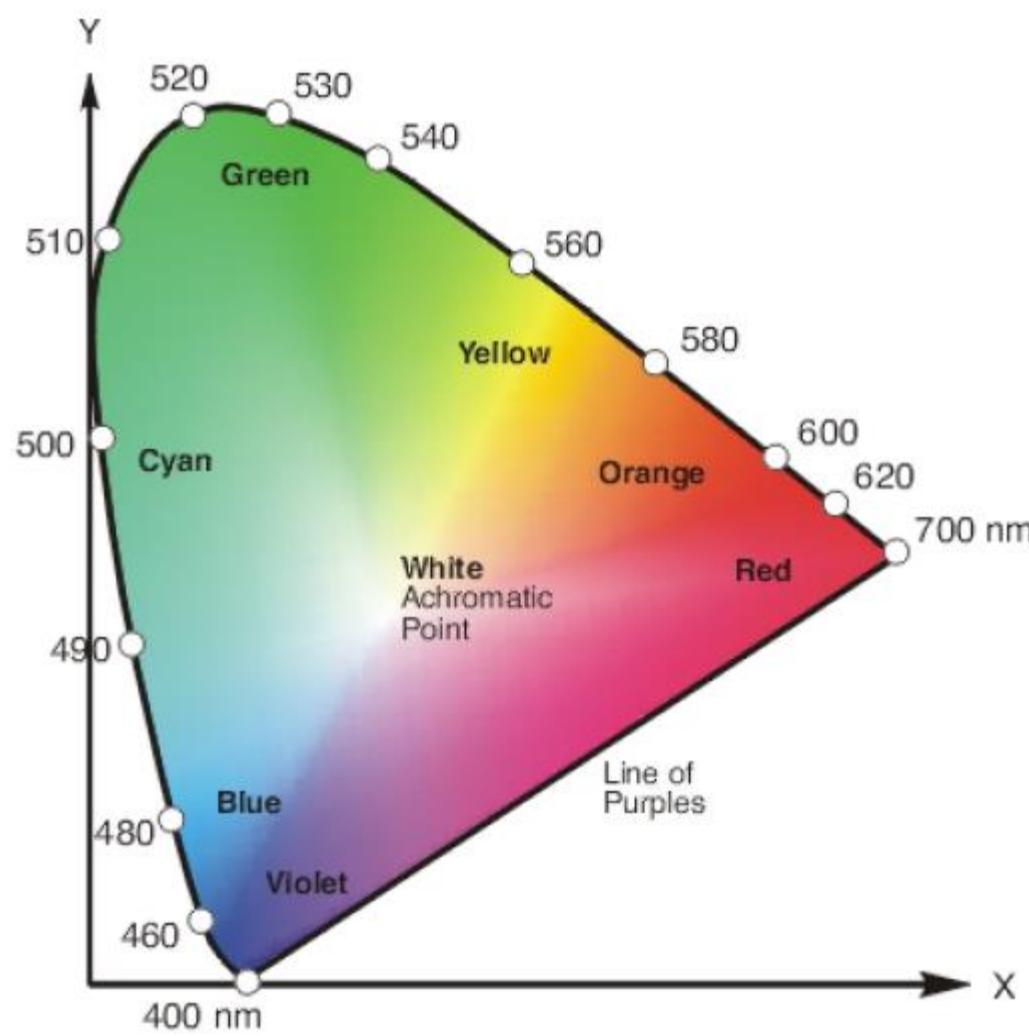
## CIE chromaticity diagram

- ◆ Hue and Saturation together are called ‘chromaticity’.
- ◆ Let the intensity of R, G, B be  $[0, 255]$ , and X, Y, Z denotes their intensity, respectively
- ◆ In chromaticity diagram  
x-axis is  $X/(X+Y+Z)$   
y-axis is  $Y/(X+Y+Z)$



另一种确定颜色色度坐标的方法是用CIE色度图（实验得到的）。

三个色度坐标 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 中有一个是不独立的，因而可以用 $x$ 、 $y$ 直角坐标系来表示各种色度，这样的平面图形就是CIE色度图。由图可见，所有的色谱（可见光谱中包含的一系列单色）都位于马蹄形曲线上，曲线上加注了毫微米标记，以便能根据它们的波长而辨别其单色。在马蹄形内部包含了用物理方法能实现的所有彩色。马蹄形的底部没有给予标记，因为那里是非谱色（各种紫红色，这些彩色不能作为单色出现在光谱上），对于这些非谱色，波长当然是没有意义的。

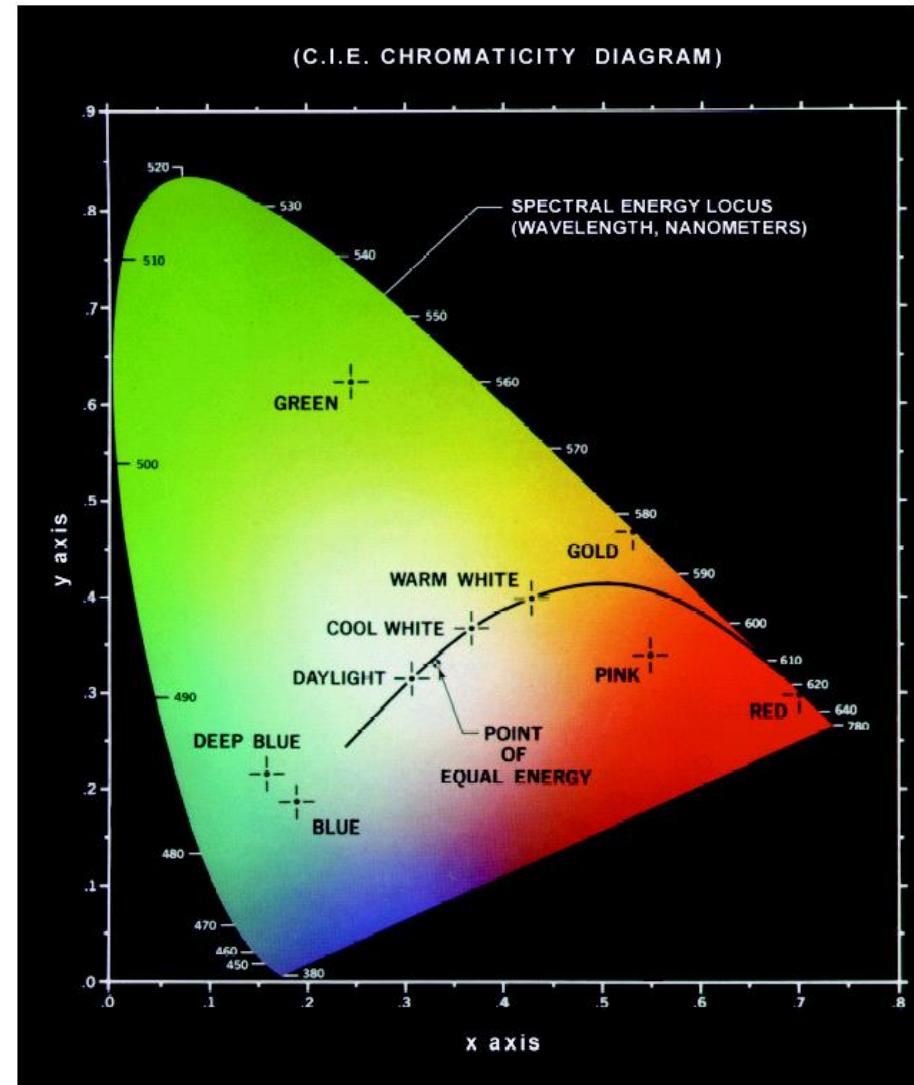


色度图可以用来做彩色混合。图中任意两点连线上的颜色变化，都可以用这两种颜色的相加得到。

从等能量点到位于色度图边界上的任一点画一线段，线段上的所有点都具有和特定谱色相同的色调，但具有不同的亮度和饱和度。

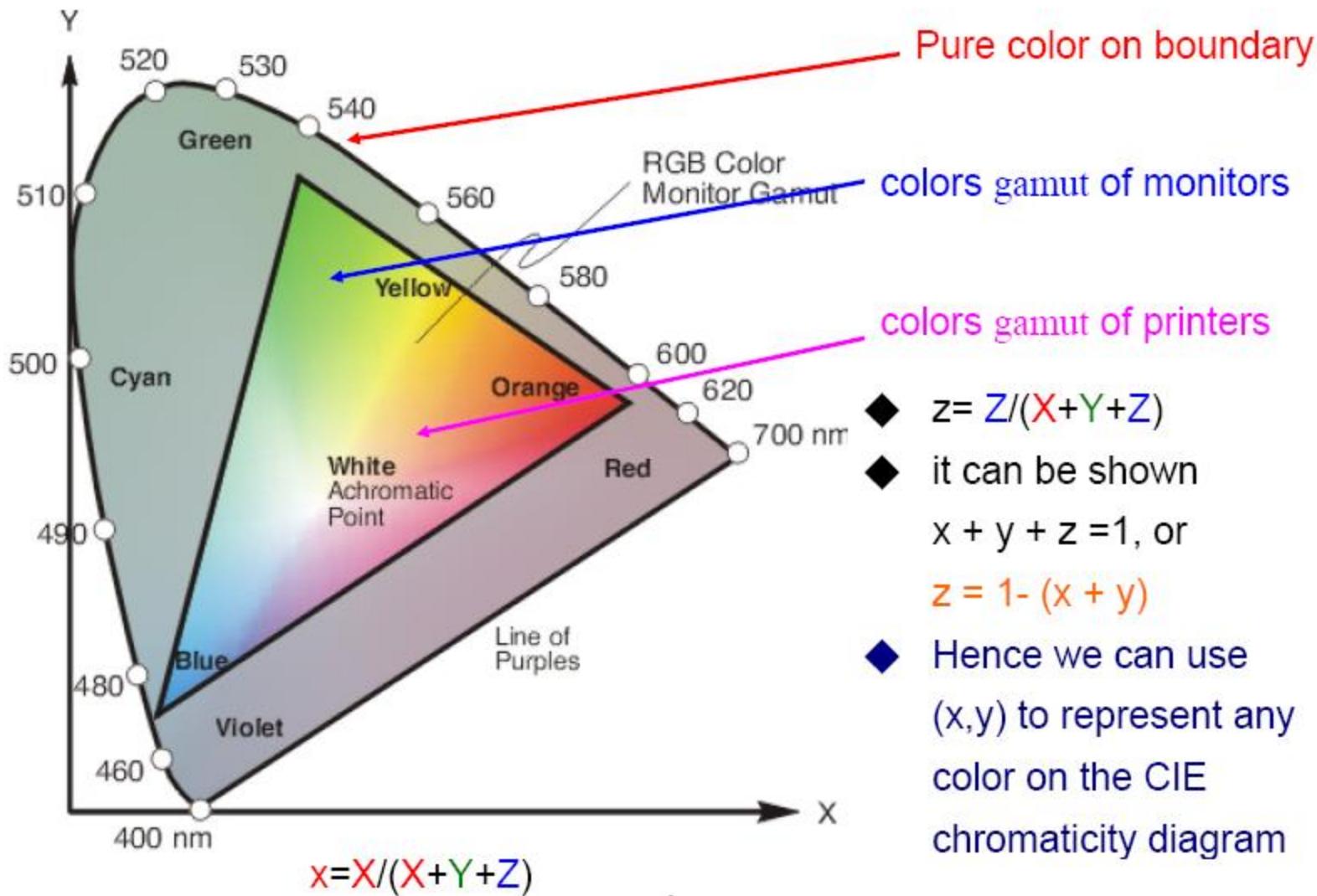
扩展到三种颜色的混合。色度图上的任意三点（三个点表示三种颜色）可画出一个三角形，三角形内的任何颜色都可以由三种颜色的不同混合得到。

任意三种颜色组成的三角形中不能包括色度图6.5中所有的颜色。

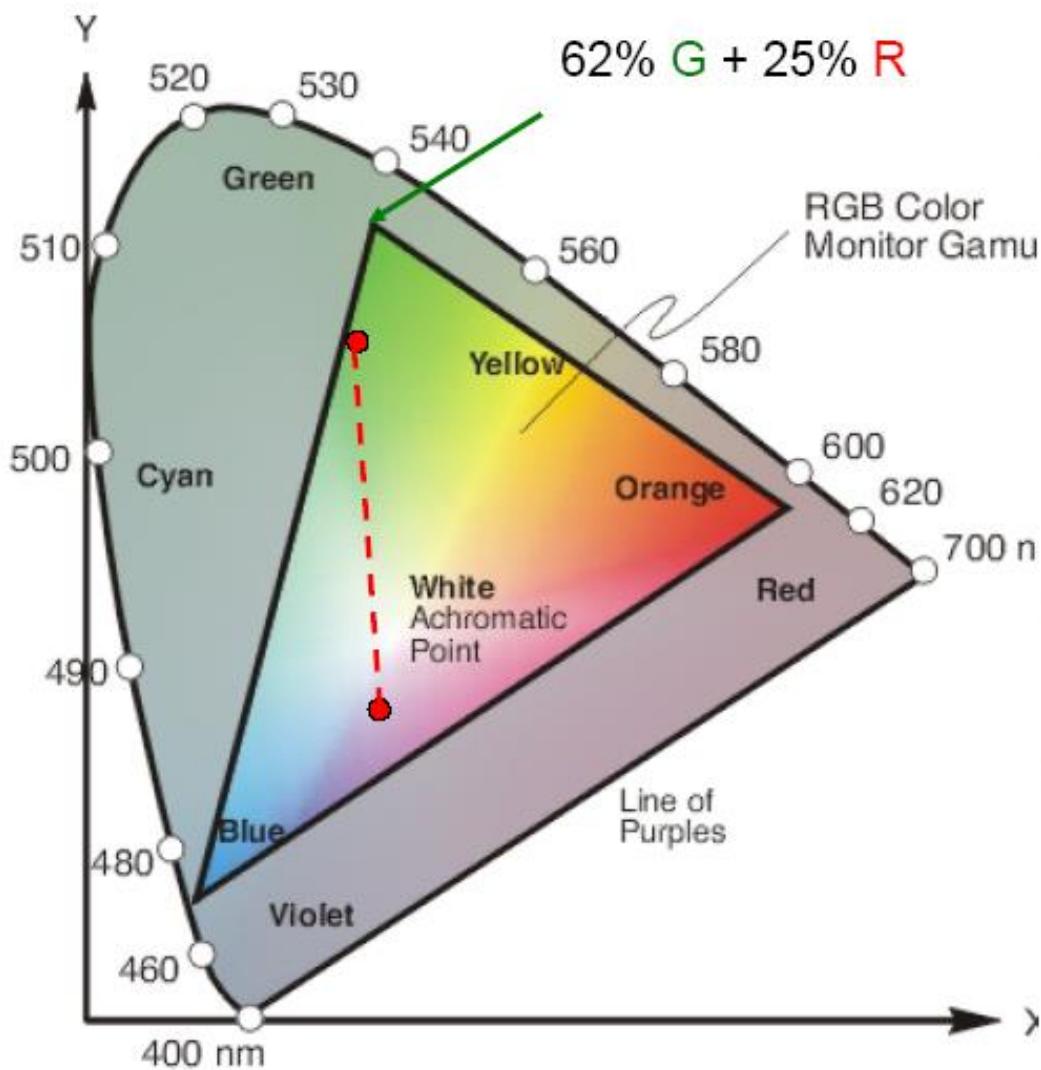


色差的概念：就是在色度图上两个点之间的距离差

$$y = Y/(X+Y+Z)$$



- ◆  $z = Z/(X+Y+Z)$
- ◆ it can be shown  
 $x + y + z = 1$ , or  
 $z = 1 - (x + y)$
- ◆ Hence we can use  $(x,y)$  to represent any color on the CIE chromaticity diagram



- ◆ Any color that can result from the mixture of two colors are on the line connecting these two colors.
- ◆ The R, G, B color in monitors are not pure
- ◆ All colors due to mixture of these three colors are in the triangle.

## 6.2 彩色模型

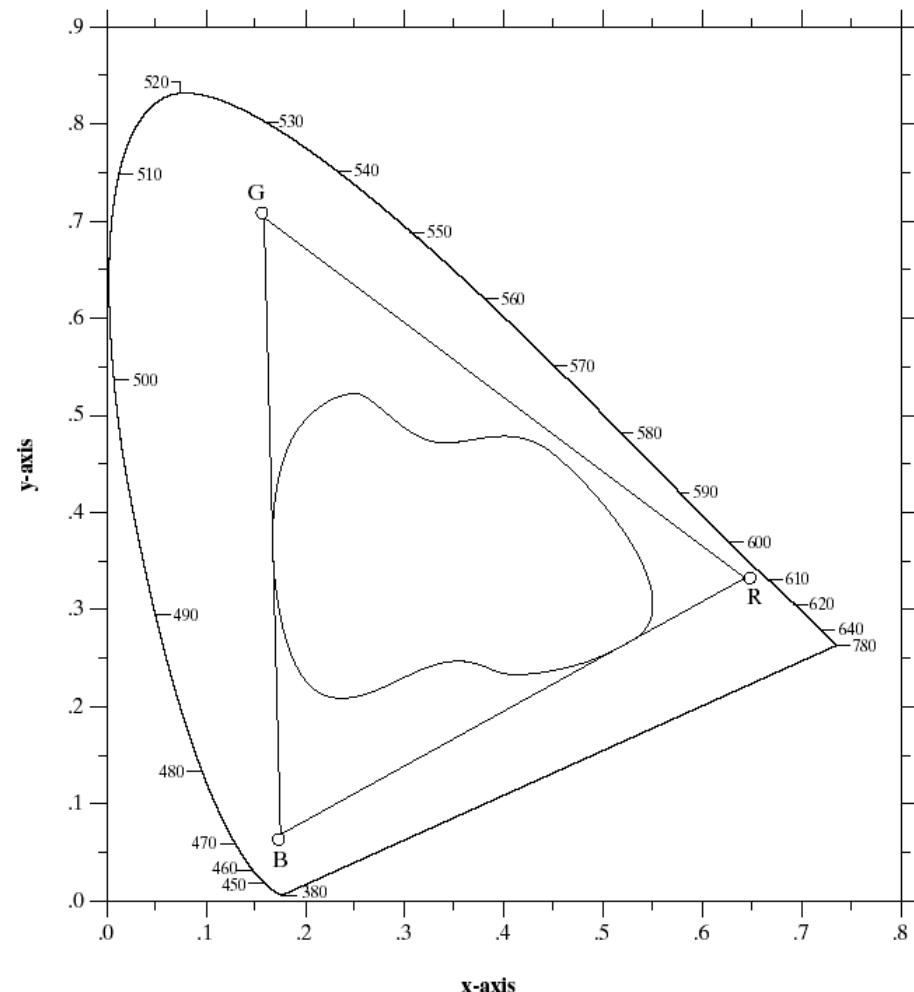
RGB模型——彩色监视器和大批的彩色视频摄像机  
多数硬件设备

CMY和CMYK模型——彩色打印机

HSI模型——应用于很多领域

注意右图中监视器和打印机的彩色区域的不一致

R、G、B的值给出了各个颜色平面的强度。（演示）



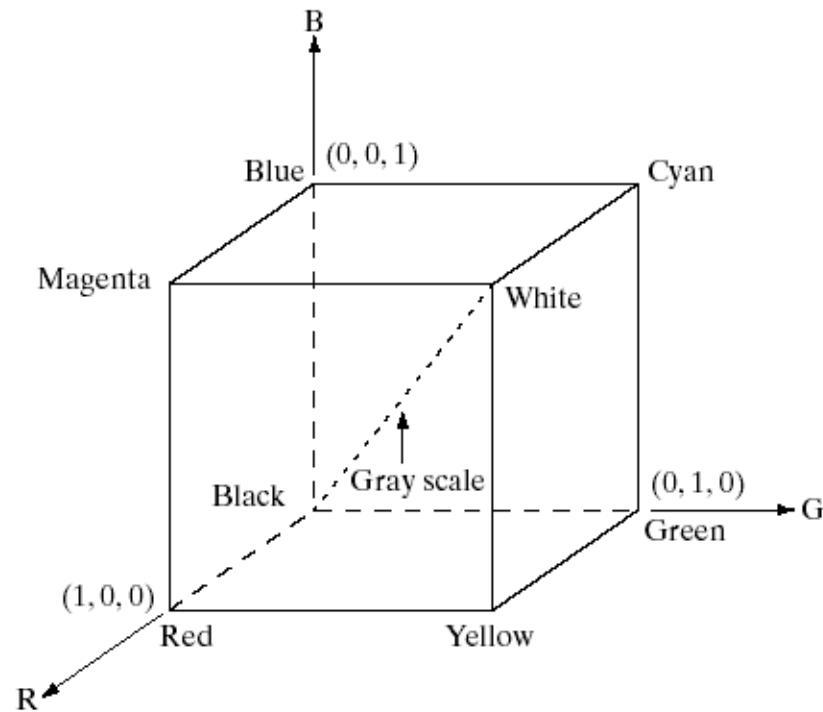
**FIGURE 6.6** Typical color gamut of color monitors (triangle) and color printing devices (irregular region).

## RGB彩色模型

常见的模型，以三原色为笛卡儿坐标系。整个彩色子空间可以用一个规范化的彩色立方体来表示。不同颜色处在立方体上或者立方体内部。

**FIGURE 6.7**

Schematic of the RGB color cube. Points along the main diagonal have gray values, from black at the origin to white at point  $(1, 1, 1)$ .



RGB模型中所表示的图像由三个图像分量组成，每一个分量图像都是一幅原色图（有时也叫做原色平面）。



Red image



green image



blue image

RGB空间用以表示每一像素的比特数叫做像素深度（Depth），通常每一幅红、绿、蓝原色图用8位来表示，故RGB图像的像素深度一般是24比特。下图是一个24比特的彩色立方体。

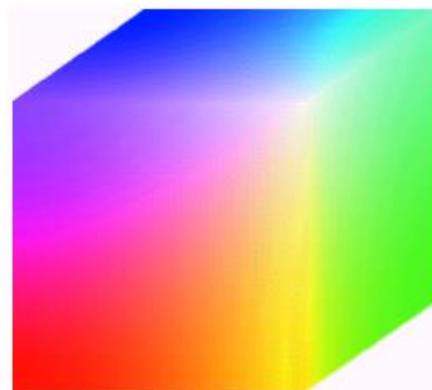


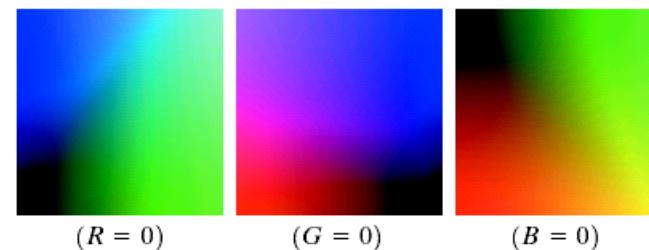
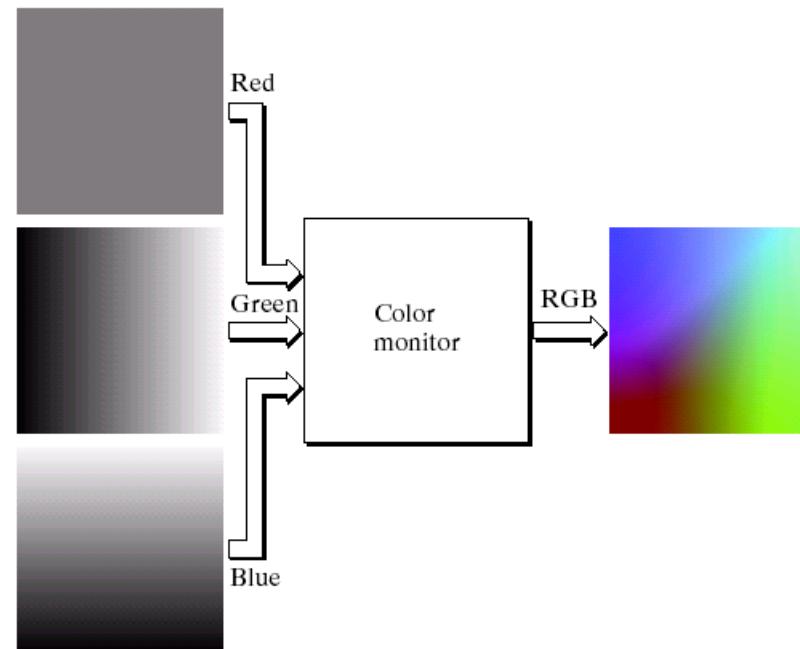
FIGURE 6.8 RGB 24-bit color cube.

**例6.1** 产生隐藏面和RGB彩色立方体的横截面。这个立方体共有 $(2^8)^3=16777216$ 种颜色，观察这些颜色的一个办法就是产生一个彩色平面（立方体的表面和横截面）。

a  
b

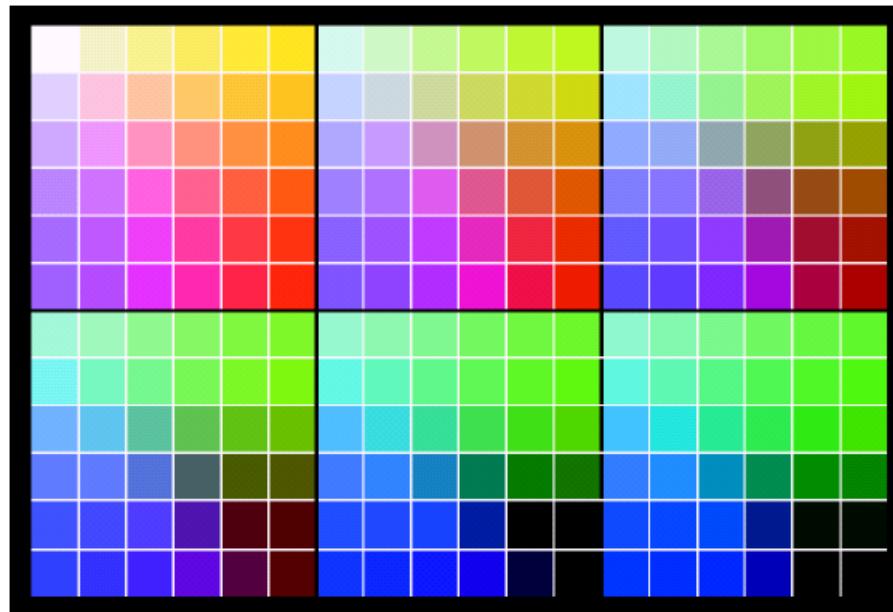
**FIGURE 6.9**

(a) Generating the RGB image of the cross-sectional color plane  $(127, G, B)$ .  
 (b) The three hidden surface planes in the color cube of Fig. 6.8.



- **safe colors in R-G-B system :** There are 216 ( $=6^3$ ) colors whose R, G, B values are limited to 0, 51, 102, 153, 204, 255. These colors are called ‘safe color’. A monitor is required to tune these colors so that they match the standard colors. 并不是所有8bit的灰度色都在安全色中。

Number System		Color Equivalents					
Hex	00	33	66	99	CC	FF	
Decimal	0	51	102	153	204	255	



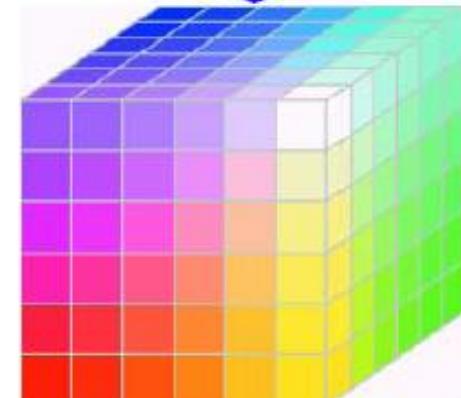
000000	111111	222222	333333	444444	555555	666666	777777	888888	999999	AAAAAA	BBBBBB	CCCCCC	DDDDDD	EEEEEE	FFFFFF
[Black]	[Dark Gray]	[Medium Gray]	[Light Gray]	[Very Light Gray]	[White]	[Very Light Gray]	[Light Gray]	[Medium Gray]	[Dark Gray]	[Black]	[Dark Gray]	[Medium Gray]	[Light Gray]	[Very Light Gray]	[White]

**TABLE 6.1**

Valid values of each RGB component in a safe color.

216 safe colors

Safe color cube



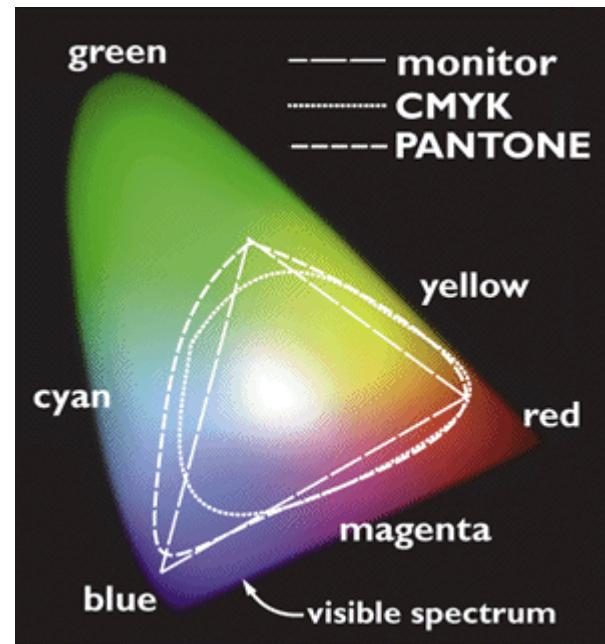
## ● CMY and CMYK color model (for mixture of pigments)

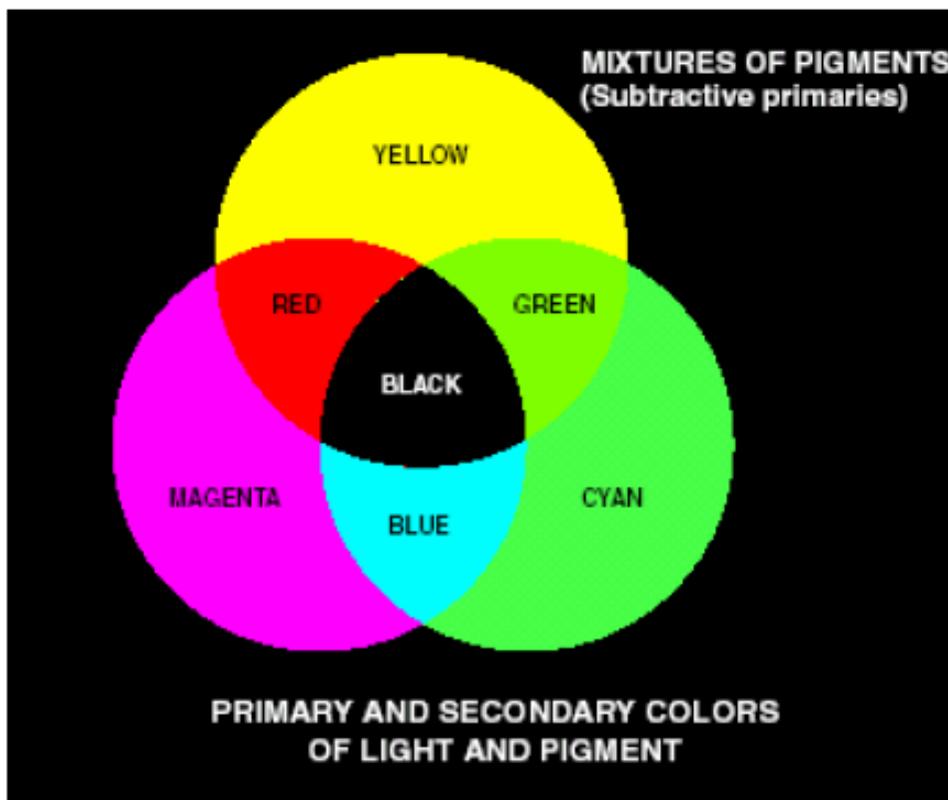
这种彩色模型多用于彩色打印机以及其他一些要在纸上或其他固体表面沉积彩色颜料的设备。前面说过，颜料原色和光原色之间有区别，所以这些设备使用的彩色模型也有相应的变化。

CMY表示青、紫红、黄三种颜色（颜料的原色）。RGB到CMY的转换

$$\begin{bmatrix} C \\ M \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad \text{or} \quad \begin{bmatrix} C \\ M \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 255 \\ 255 \\ 255 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}$$

虽然等量的青、紫红和黄色能产生黑色，但通常在实际中这种组合产生的黑色不纯。为了产生真正的黑色（打印中的主要颜色），在CMY模型中加入第四种颜色——黑色。这就是CMYK模型。在实际问题中，CMY系统和RGB系统能表示的颜色区域有一部分不同。





C: Cyan

M: Magenta

Y: Yellow

K: black

$$\begin{bmatrix} C \\ M \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 255 \\ 255 \\ 255 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}$$

All colors in [0, 255] scale

## ● HSI color model

顾名思义，这个模型是以彩色的色调（Hue）、饱和度（Saturation）以及强度（Intensity）为基础的。这个模型更适合人对颜色的解释。

色调——描述纯色的属性（如纯黄色、橘红或者红色）

饱和度——纯色被白光稀释程度的度量

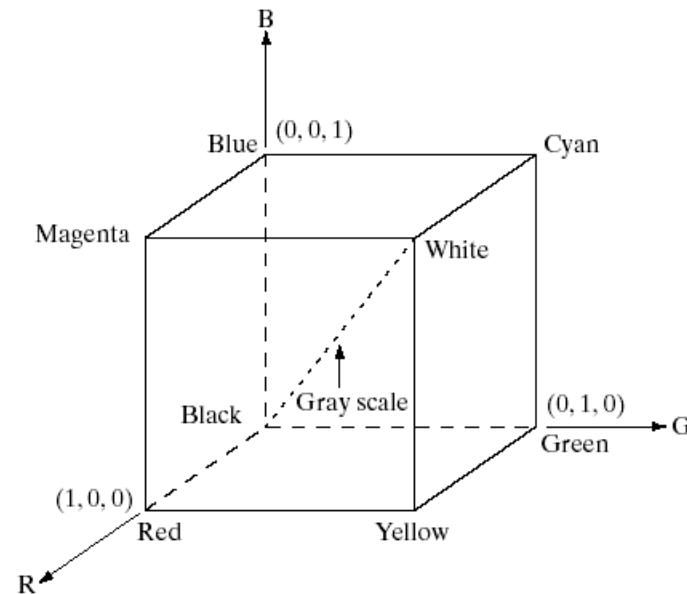
强度——亮度（Brightness）是观察者对颜色明亮程度的主观感受，通常不可测量。但亮度却是彩色图像“强度”概念的一种具体体现，也是描述彩色感觉的关键参数。我们已经知道强度（Intensity）、也就是灰度是描述单色图像的重要工具，而且这一量是可以测量的。

RGB彩色模型对显示和产生彩色是理想的模型，但HSI彩色模型对认识彩色更自然和直观，也更适合于描述彩色和开发图像处理的算法。

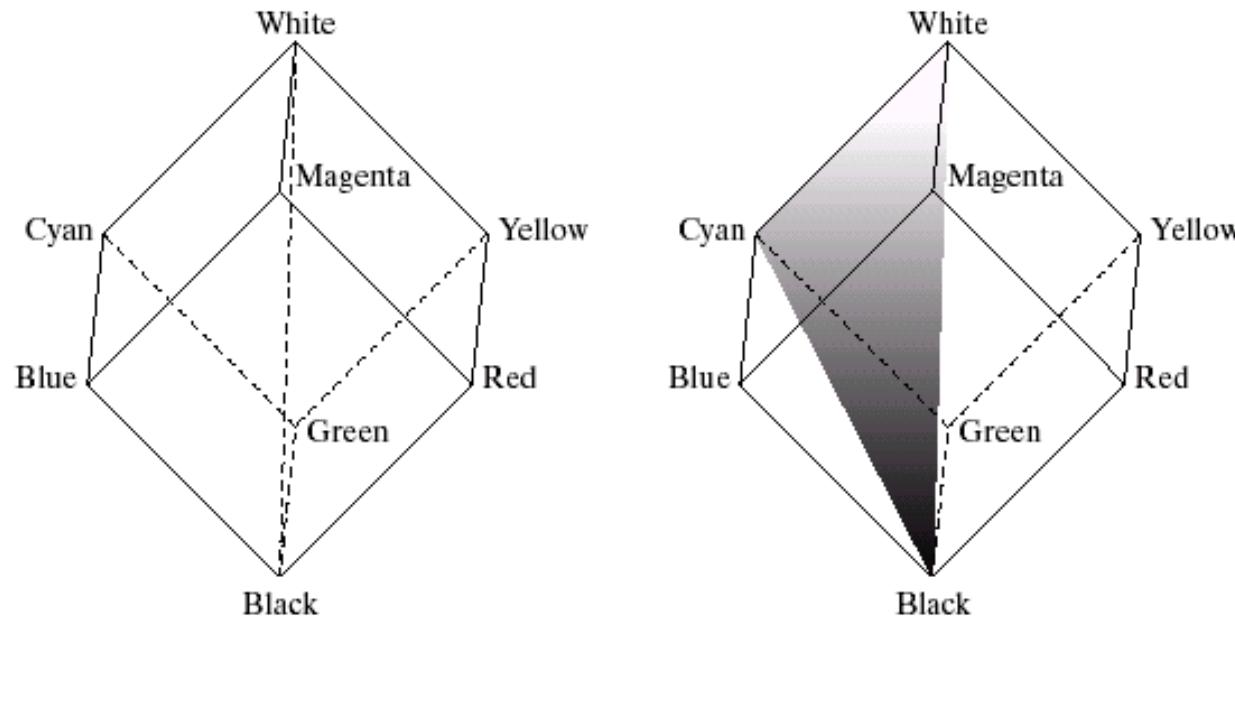
## 如何理解RGB和HSI系统中彩色分量之间的关系？

**强度（Intensity）：**立方体过原点的对角线称为彩色立方体的强度轴。任何一点颜色的灰度用一个过此点与强度轴垂直相交的平面即可得到，也就是交点到原点的距离（假设该轴的长度为1）。在实际计算中就是R、G、B的平均值。

**FIGURE 6.7**  
Schematic of the  
RGB color cube.  
Points along the  
main diagonal  
have gray values,  
from black at the  
origin to white at  
point  $(1, 1, 1)$ .

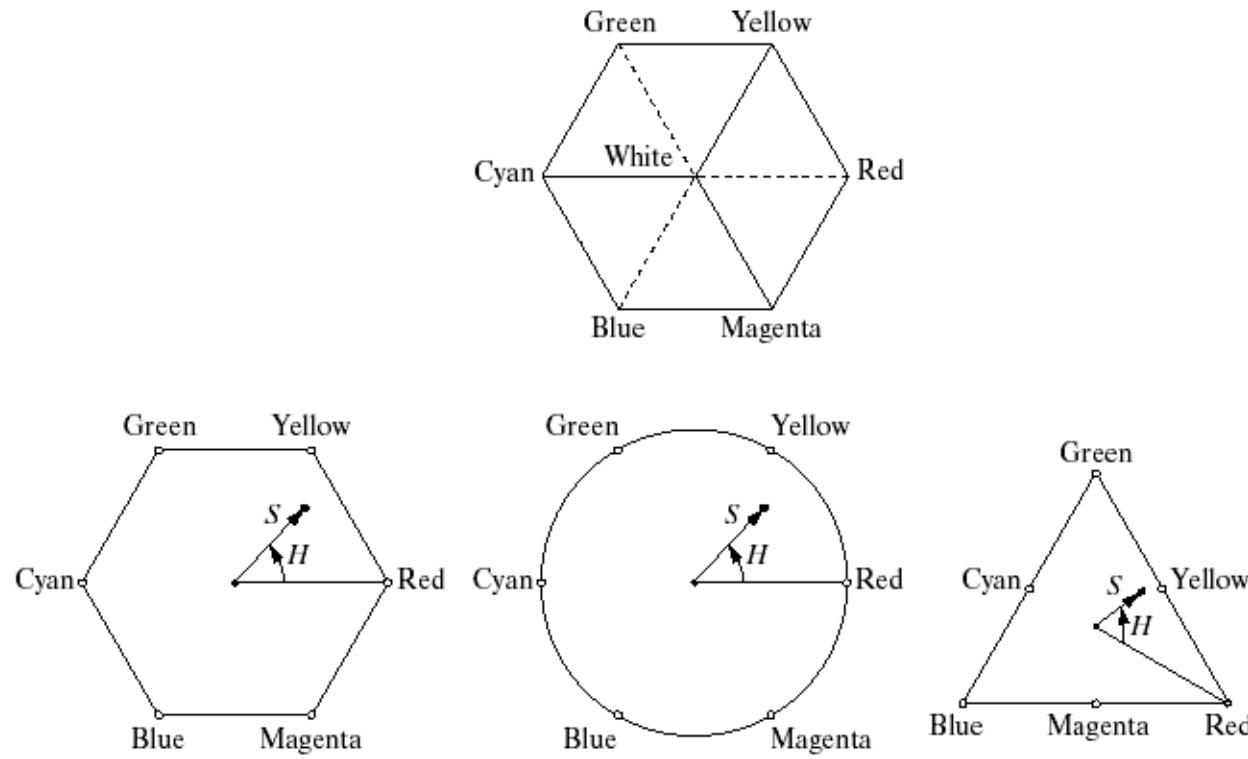


色调 (Hue)：任何一个彩色点加上黑白两点生成的平面上所有的点都具有相同的色调。沿着垂直强度轴旋转色调平面，可得到不同的色调。



**FIGURE 6.12** Conceptual relationships between the RGB and HSI color models.

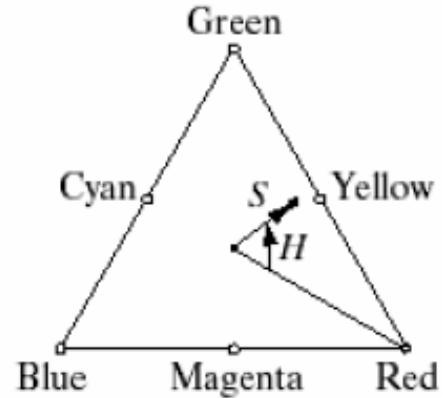
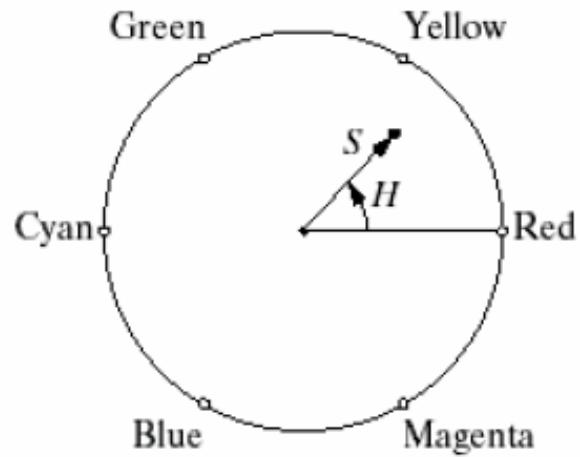
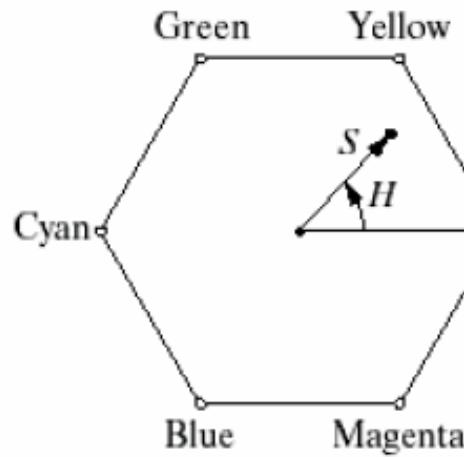
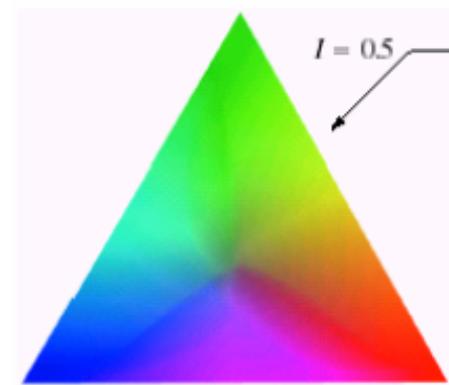
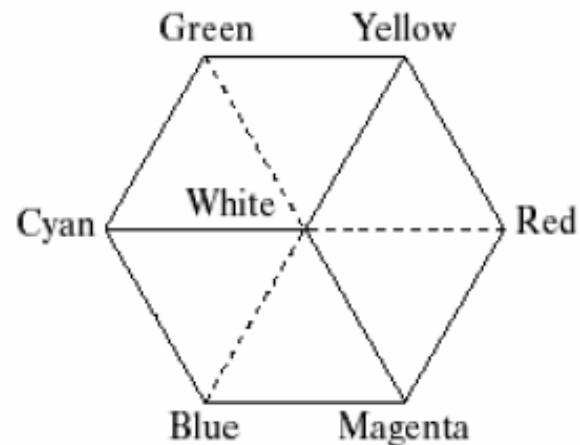
## 色调和饱和度 (Saturation) :



a
b
c
d

**FIGURE 6.13** Hue and saturation in the HSI color model. The dot is an arbitrary color point. The angle from the red axis gives the hue, and the length of the vector is the saturation. The intensity of all colors in any of these planes is given by the position of the plane on the vertical intensity axis.

In this system, intensity is an independent axis. For a given intensity, there is a color plane as is shown



## 从RGB到HSI的彩色转换

证明略，简单介绍

给定一幅RGB彩色格式的图像，相应于每一个RGB像素，其色调分量H为

$$H = \begin{cases} \theta & B \leq G \\ 360 - \theta & B > G \end{cases} \quad (6.2.2)$$

其中

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

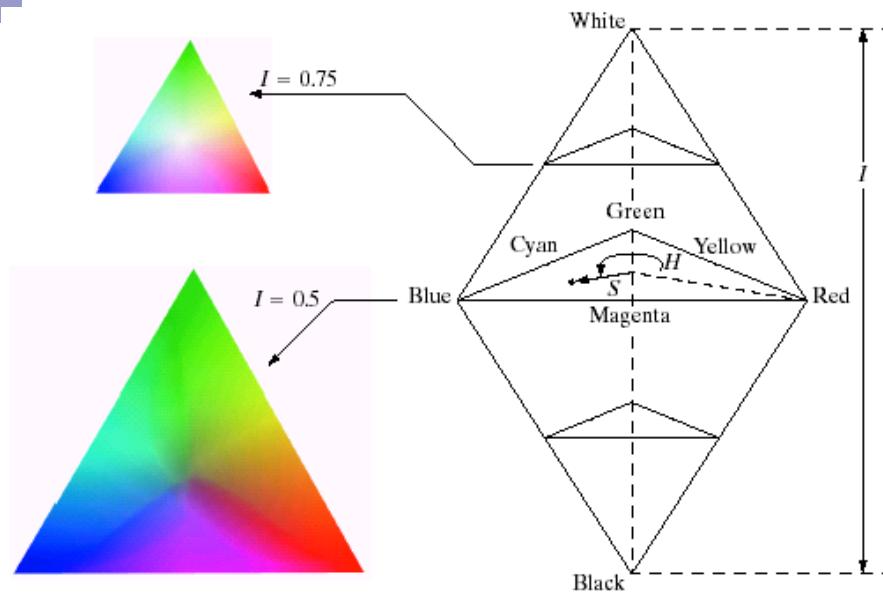
饱和度分量S为

$$S = 1 - \frac{3}{R+B+G} [\min(R, G, B)] \quad (6.2.3)$$

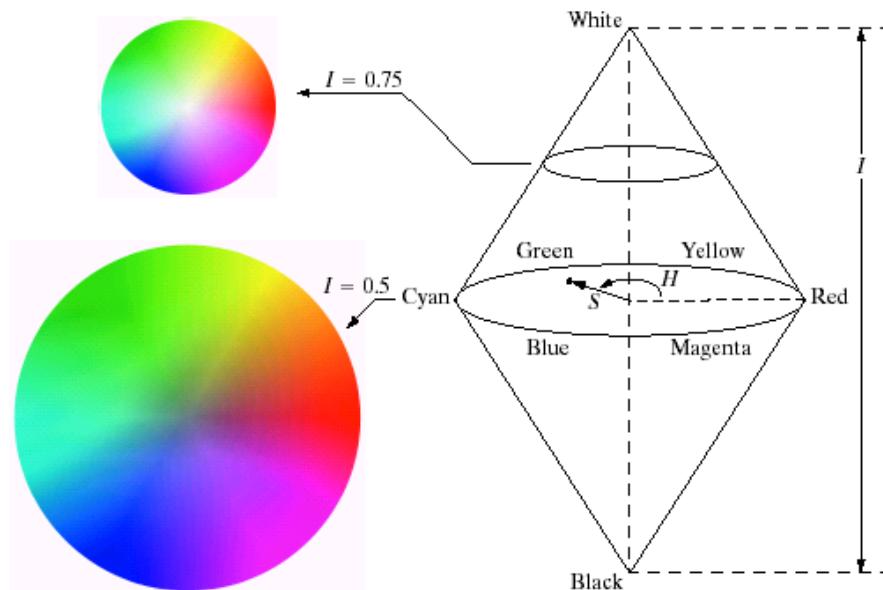
强度分量I为

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

注意色调H可以用(6.2.2)式的结果除以360，归一化到[0, 1]区间。如果RGB是归一化的，HSI模型中的其他分量也就归一化了。



**FIGURE 6.14** The HSI color model based on (a) triangular and (b) circular color planes. The triangles and circles are perpendicular to the vertical intensity axis.



## 从 HIS 到 RGB 的转换

注意在色度 S 的表达式中用到了对 R、G 和 B 三个分量求最小值的公式，那么反向变换就要考虑这三个分量分别为最小的区域。

**RG 扇形 ( $0^\circ \leq H < 120^\circ$ )**: 当 H 位于这一扇形时，RGB 分量中的 B 总是处于最小的地位，故有

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

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

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

↓

同理，对 **GB 扇形 ( $120^\circ \leq H < 240^\circ$ )** 和 **BR 扇形 ( $240^\circ \leq H < 360^\circ$ )**，有类似的结果 (p237) ↓

例6.2 考虑图6.8中立方体的色调、饱和度和强度

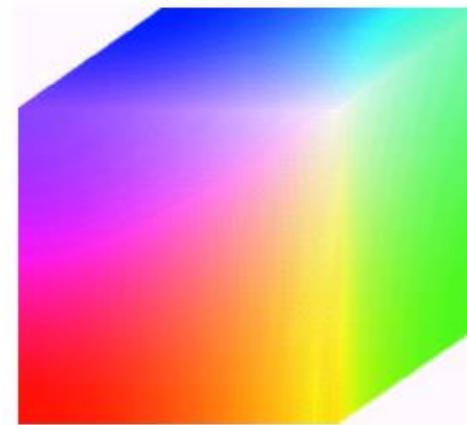
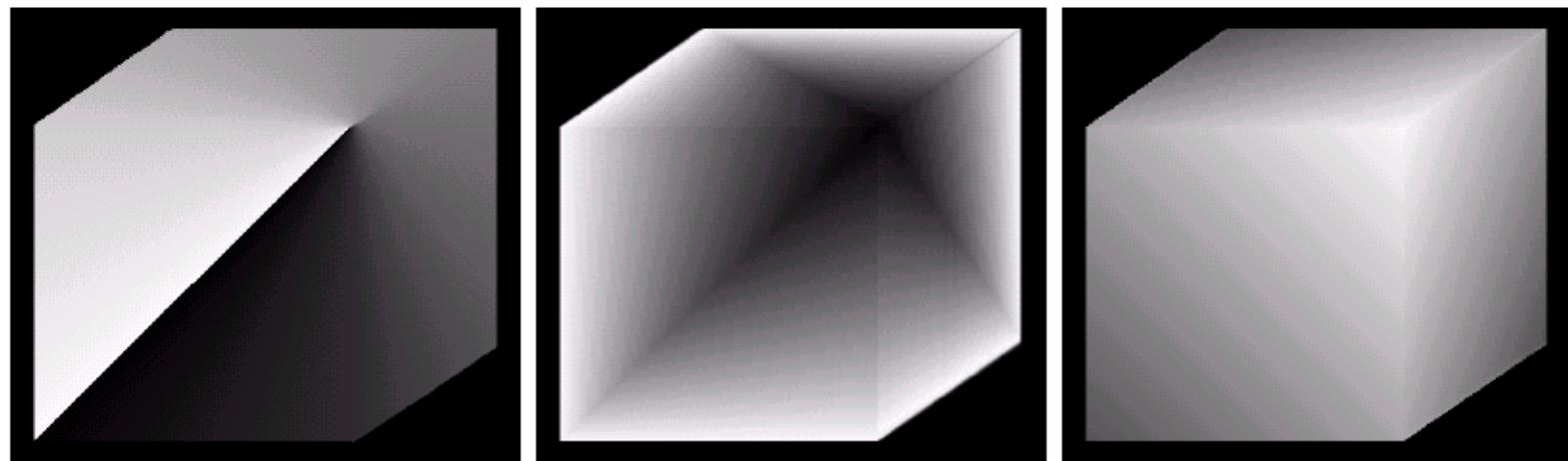


FIGURE 6.8 RGB 24-bit color cube.



a b c

FIGURE 6.15 HSI components of the image in Fig. 6.8. (a) Hue, (b) saturation, and (c) intensity images.



When the color image of a follower on the left is coded in the **HSI** system, the H-S-I maps are shown below



Hue



Saturation



Intensity



Red image

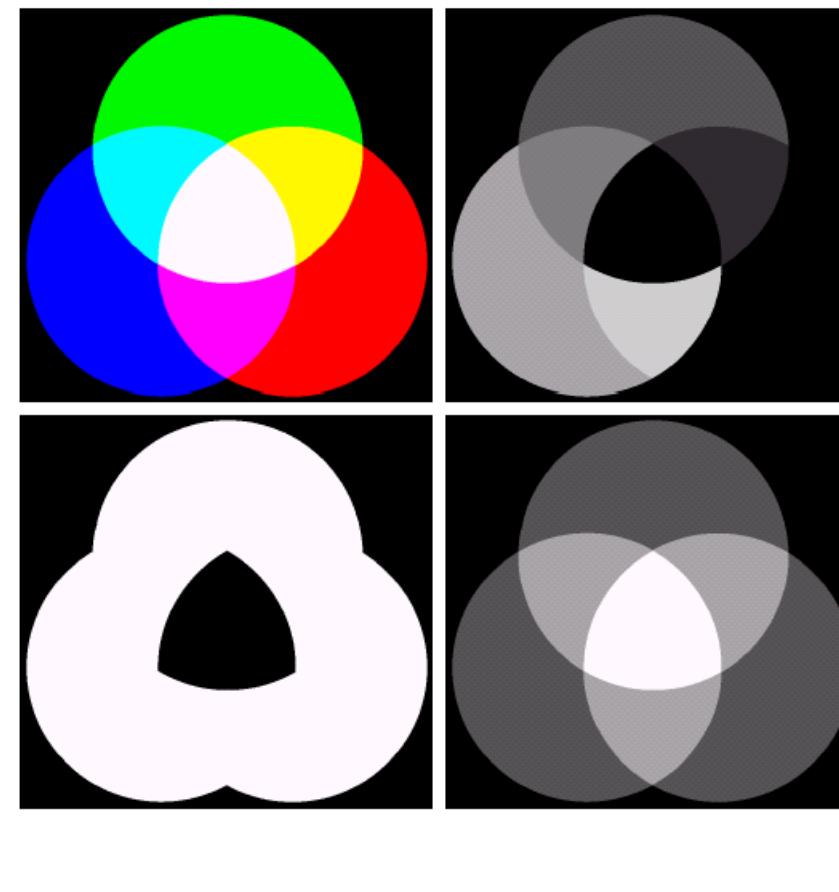


green image

blue image

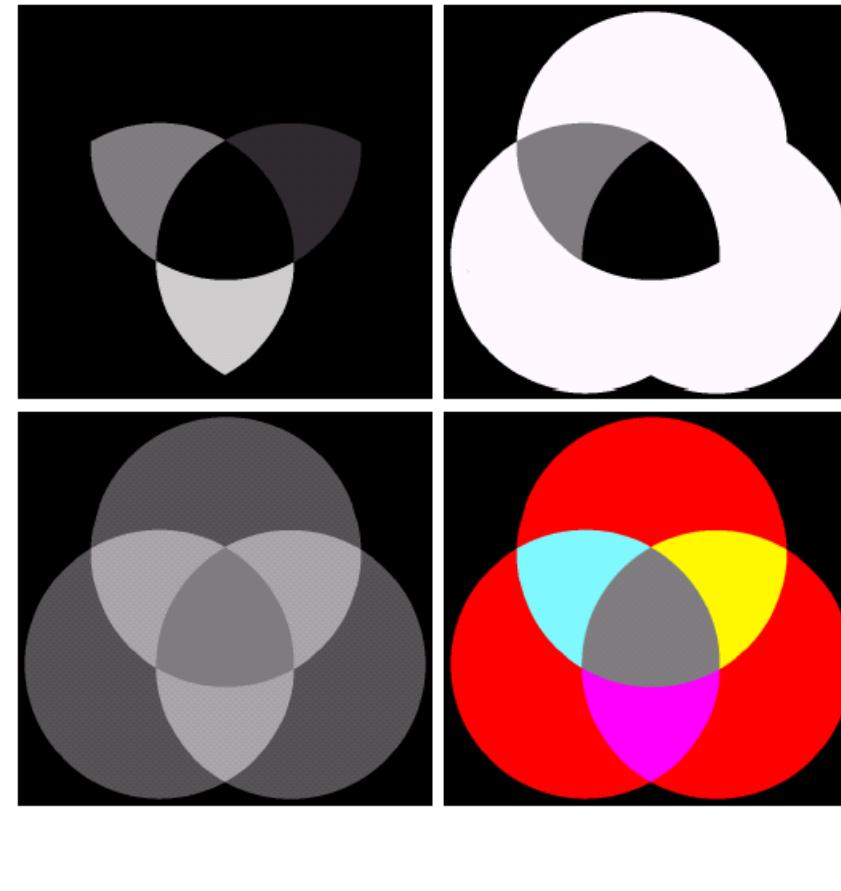
## 基于HSI分量的图像处理

请注意还有其他类型的图像模型，有不同方式的图像处理方法。以下面简单色彩图像的HSI分量图为例。先看HSI分量图：

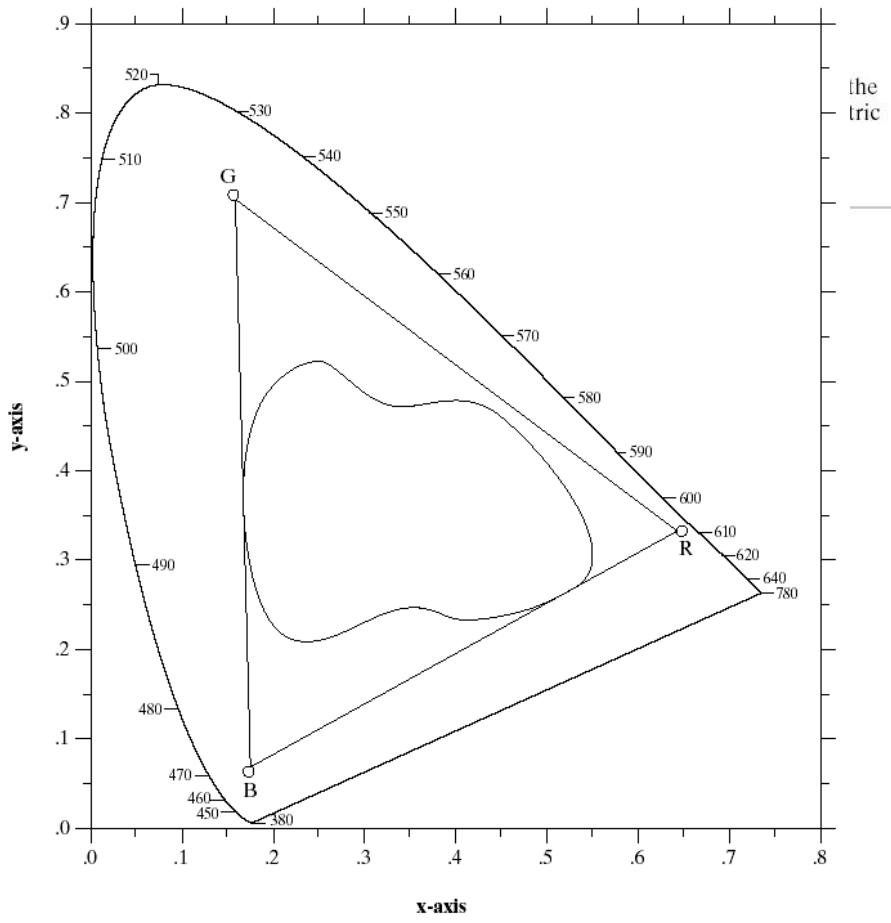


**FIGURE 6.16** (a) RGB image and the components of its corresponding HSI image:  
(b) hue, (c) saturation, and (d) intensity.

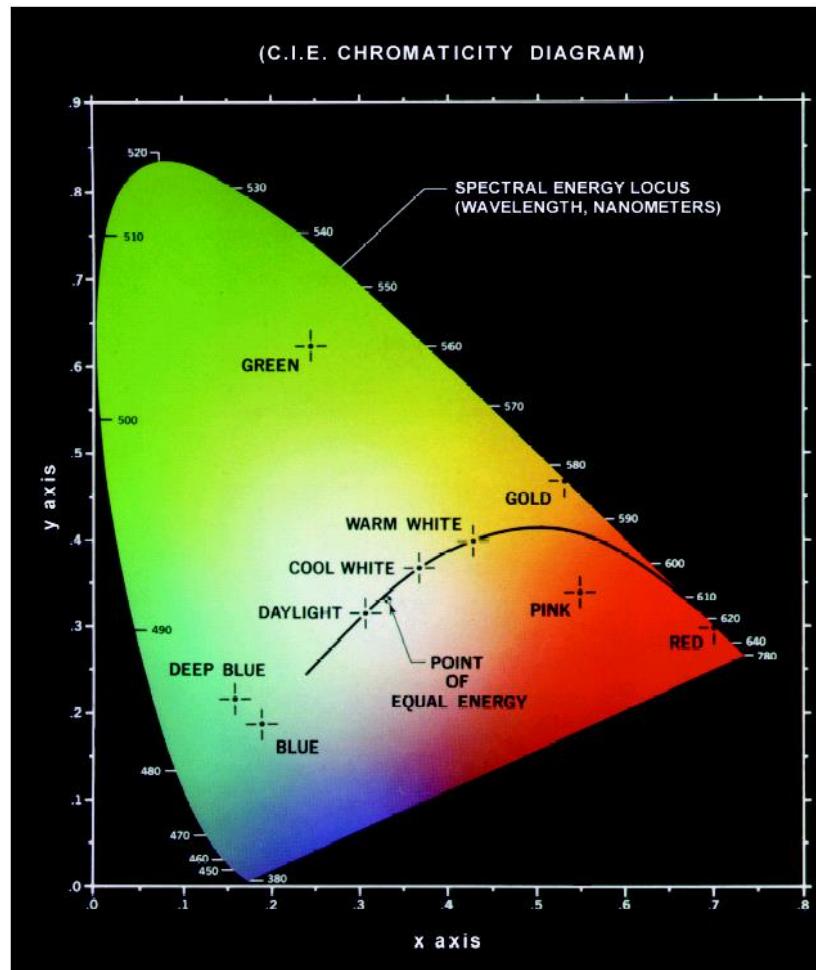
利用HSI分量图像实现对图像的某些处理：要改变原图中的某个颜色，可以通过改变色调分量图；若要改变图像的饱和度，修改饱和图分量图；强度的改变类似修改强度分量图即可。

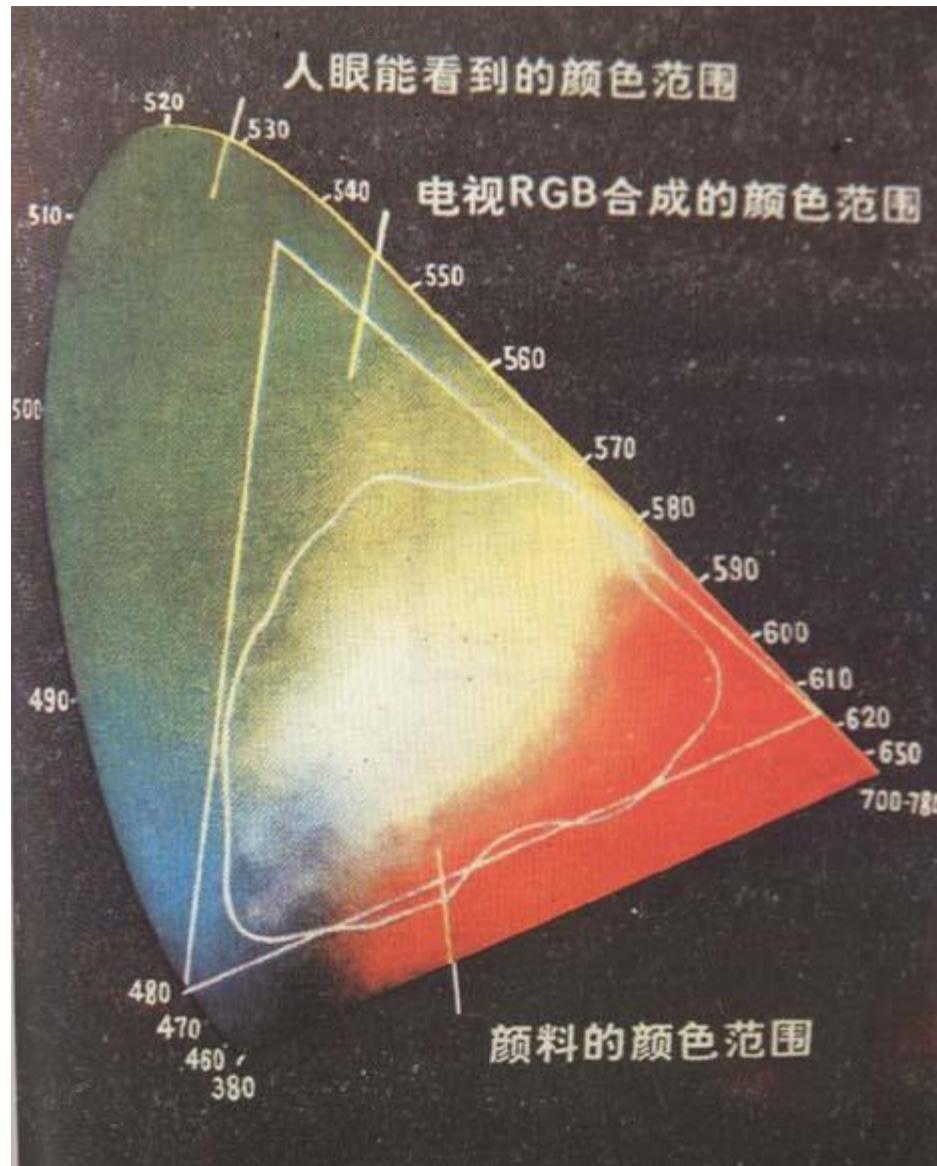


**FIGURE 6.17** (a)–(c) Modified HSI component images. (d) Resulting RGB image.  
(See Fig. 6.16 for the original HSI images.)



**FIGURE 6.6** Typical color gamut of color monitors (triangle) and color printing devices (irregular region).





## 6.3 伪彩色处理 (Pseudo-color Image Processing)

伪彩色（假彩色）处理指的是按一定的准则、人为的给灰度图赋上彩色，以便于人眼辨认和区分。有时也被称为可视化。（简介）

### Intensity Slicing (强度分层方法)

按图像强度的大小分为若干个区间，不同的区间赋予不同的彩色，以方便辨别所需要的目标。

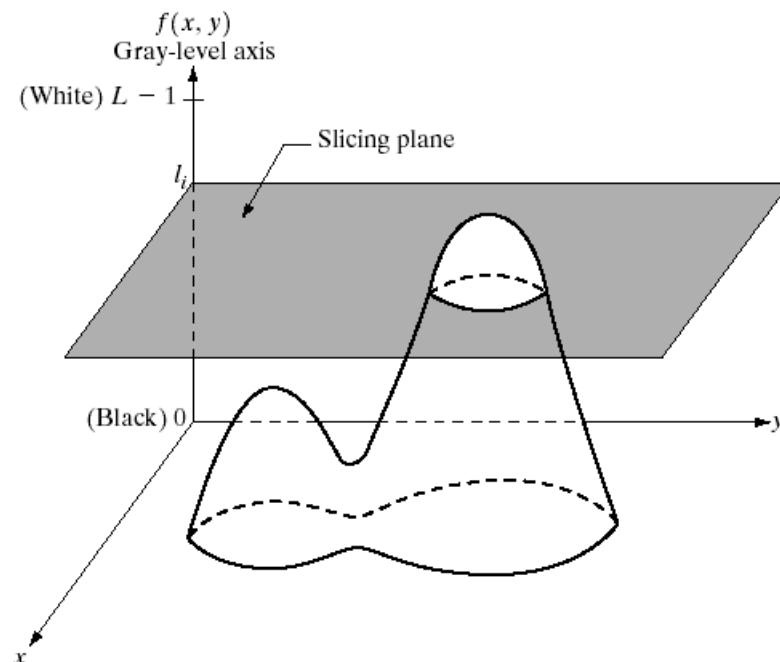
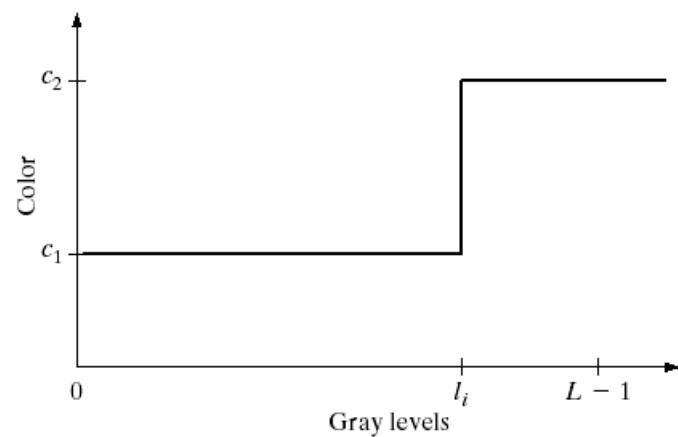


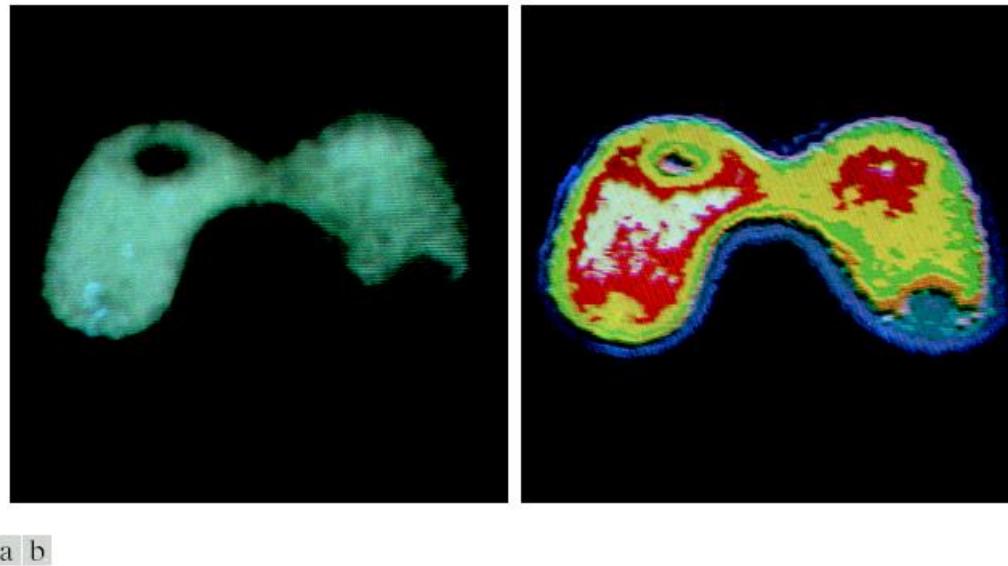
FIGURE 6.18 Geometric interpretation of the intensity-slicing technique.

另一种解释



**FIGURE 6.19** An alternative representation of the intensity-slicing technique.

### 例6.3 甲状腺模型单色图像的强度分层制作伪彩色



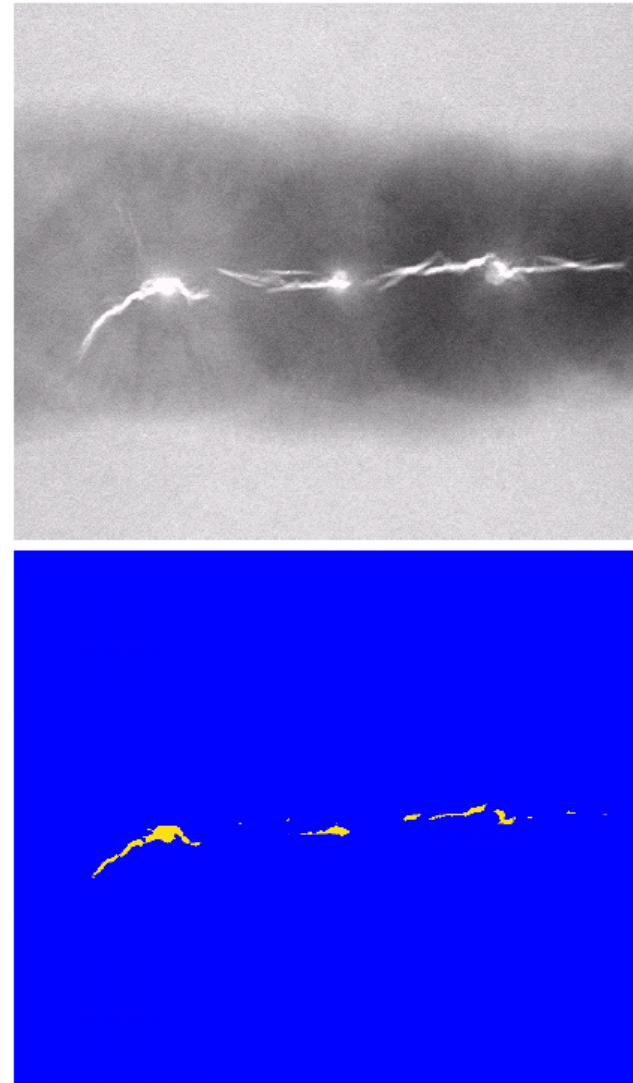
**FIGURE 6.20** (a) Monochrome image of the Picker Thyroid Phantom. (b) Result of density slicing into eight colors. (Courtesy of Dr. J. L. Blankenship, Instrumentation and Controls Division, Oak Ridge National Laboratory.)

## 含有裂纹和孔隙的焊接物X光图像

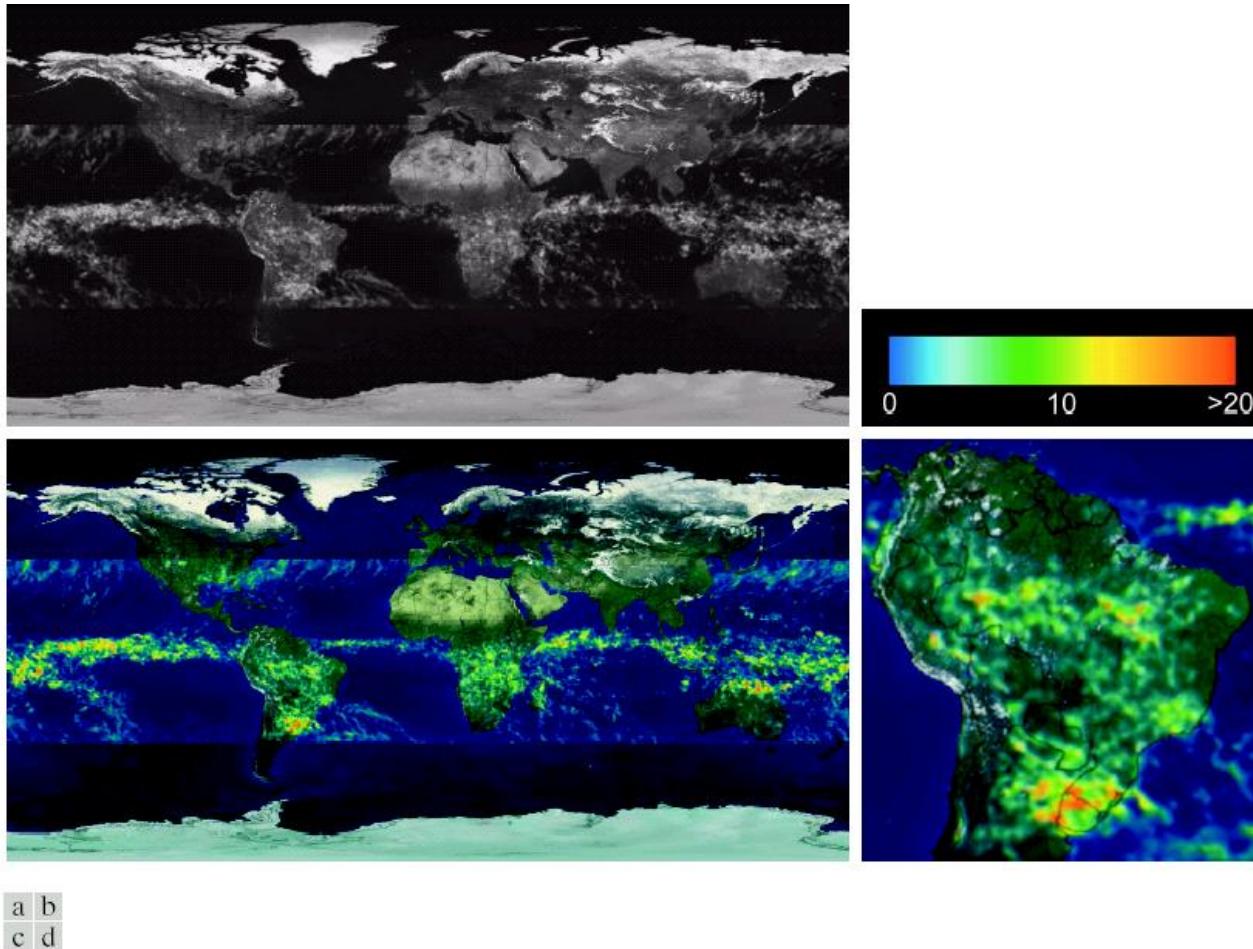
a  
b

**FIGURE 6.21**

(a) Monochrome X-ray image of a weld. (b) Result of color coding. (Original image courtesy of X-TEK Systems, Ltd.)

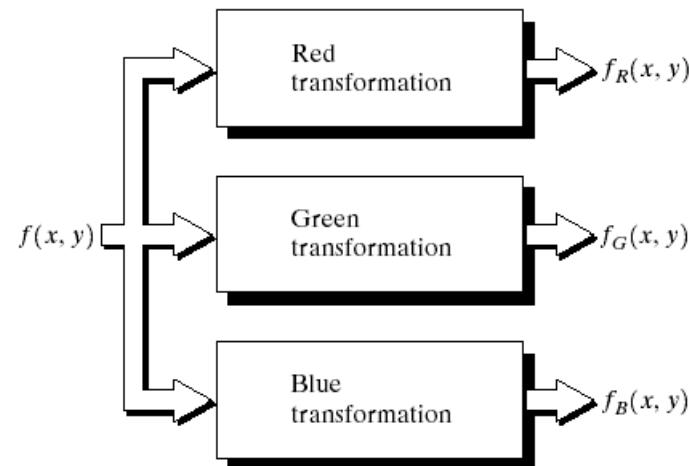


(a) 强度月平均降雨相对应的灰度图象；(b) 对强度值赋予的彩色；(c) 彩色编码图像；(d) 南美区域的放大图



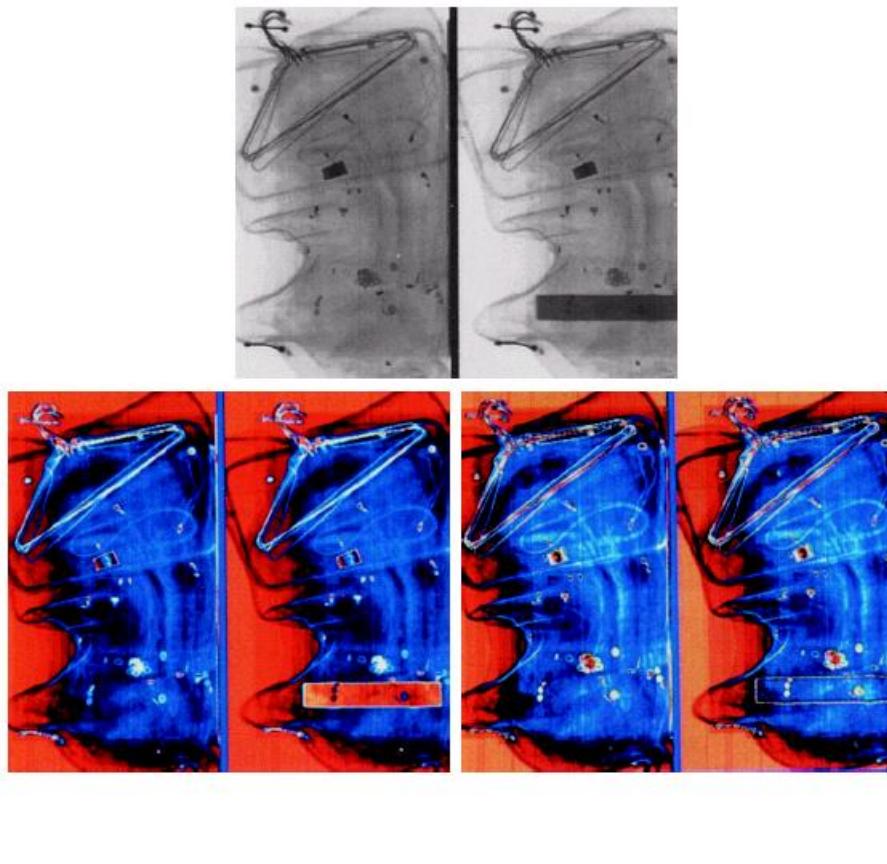
**FIGURE 6.22** (a) Gray-scale image in which intensity (in the lighter horizontal band shown) corresponds to average monthly rainfall. (b) Colors assigned to intensity values. (c) Color-coded image. (d) Zoom of the South America region. (Courtesy of NASA.)

## 灰度级到彩色的转换



**FIGURE 6.23** Functional block diagram for pseudocolor image processing.  $f_R$ ,  $f_G$ , and  $f_B$  are fed into the corresponding red, green, and blue inputs of an RGB color monitor.

对灰度级执行三个独立的变换，得到三个（红、绿、蓝）平面，然后再将这三个平面合成为一幅彩色图像



**FIGURE 6.24** Pseudocolor enhancement by using the gray-level to color transformations in Fig. 6.25. (Original image courtesy of Dr. Mike Hurwitz, Westinghouse.)

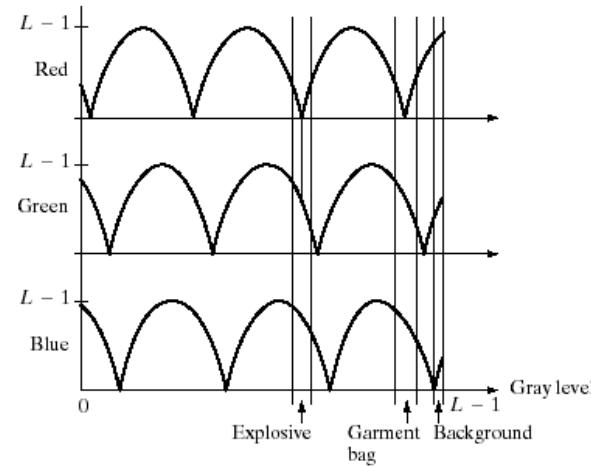
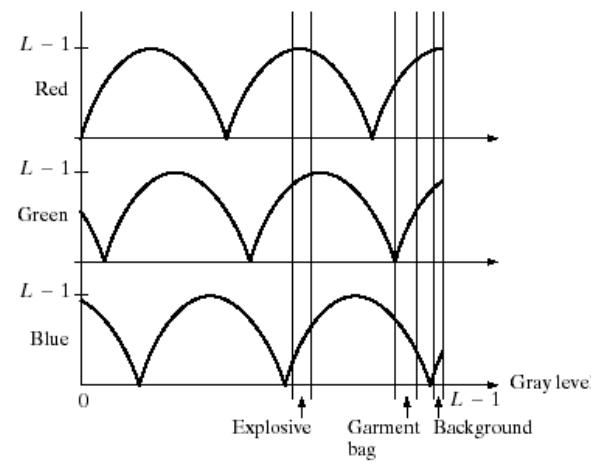
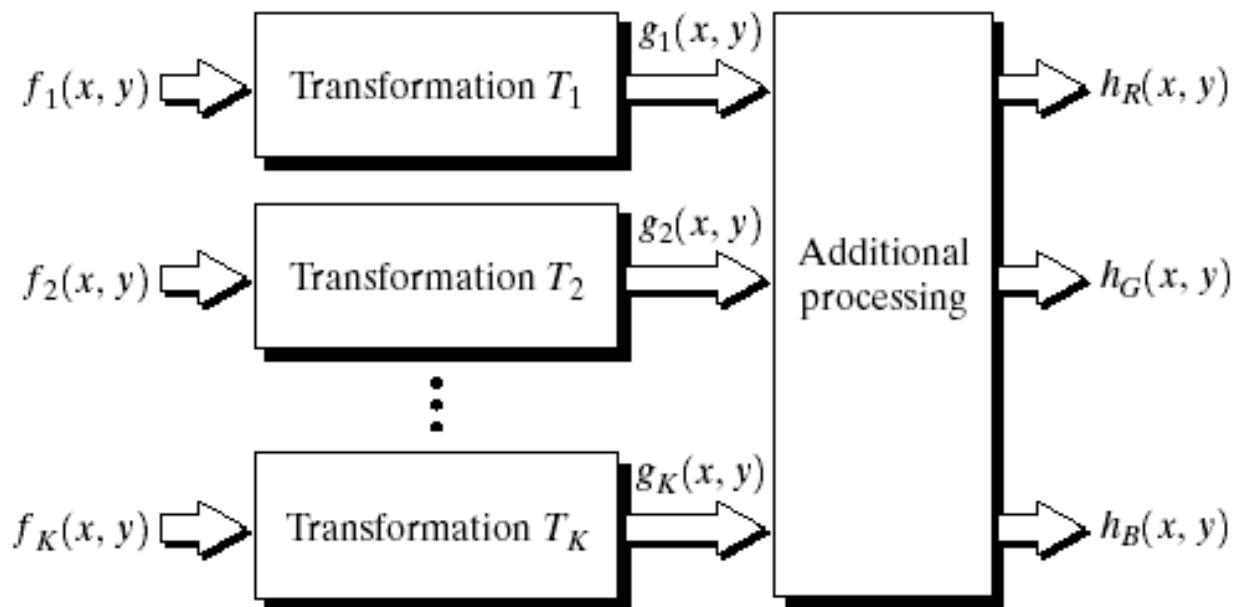


FIGURE 6.25 Transformation functions used to obtain the images in Fig. 6.24.

a  
b

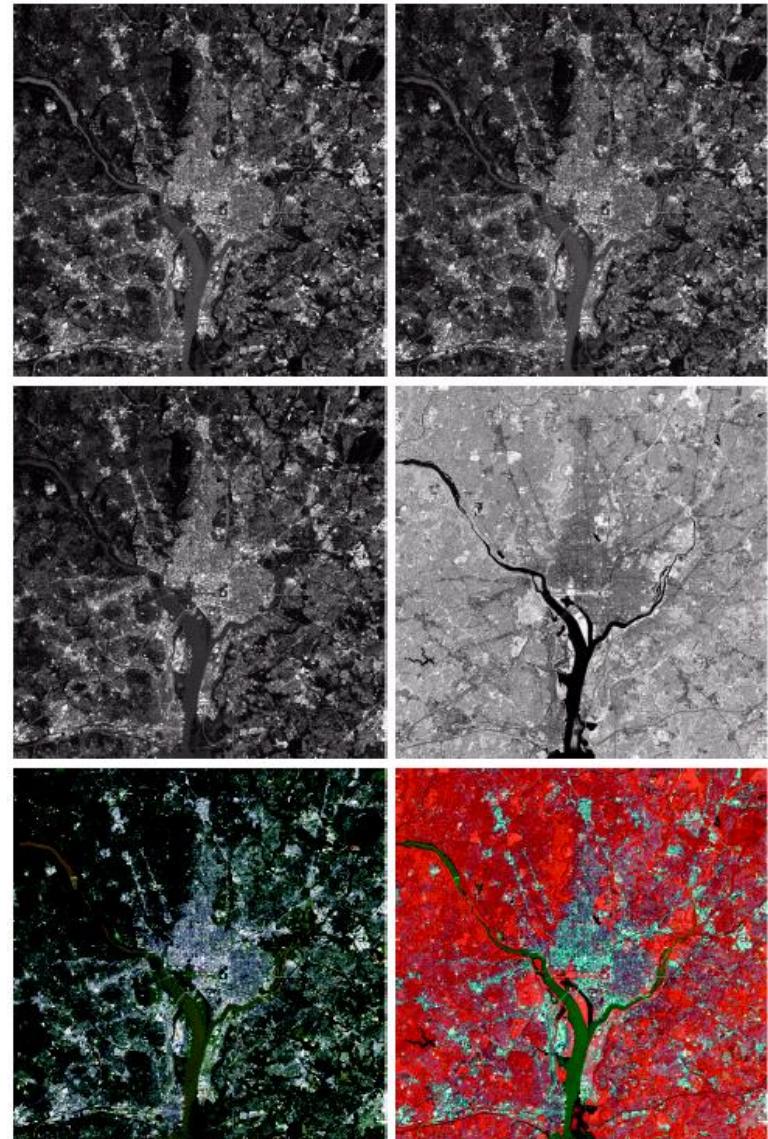


**FIGURE 6.26** A pseudocolor coding approach used when several monochrome images are available.

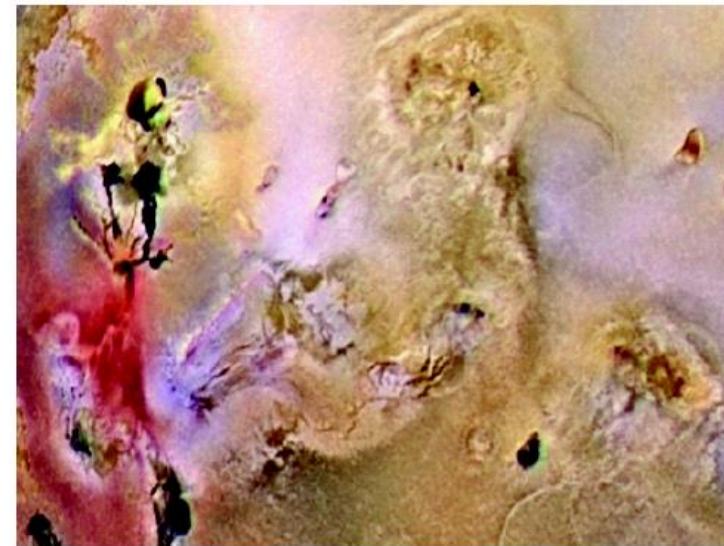
## 华盛顿地区光谱卫星图像

a b  
c d  
e f

**FIGURE 6.27** (a)–(d) Images in bands 1–4 in Fig. 1.10 (see Table 1.1). (e) Color composite image obtained by treating (a), (b), and (c) as the red, green, blue components of an RGB image. (f) Image obtained in the same manner, but using in the red channel the near-infrared image in (d). (Original multispectral images courtesy of NASA.)



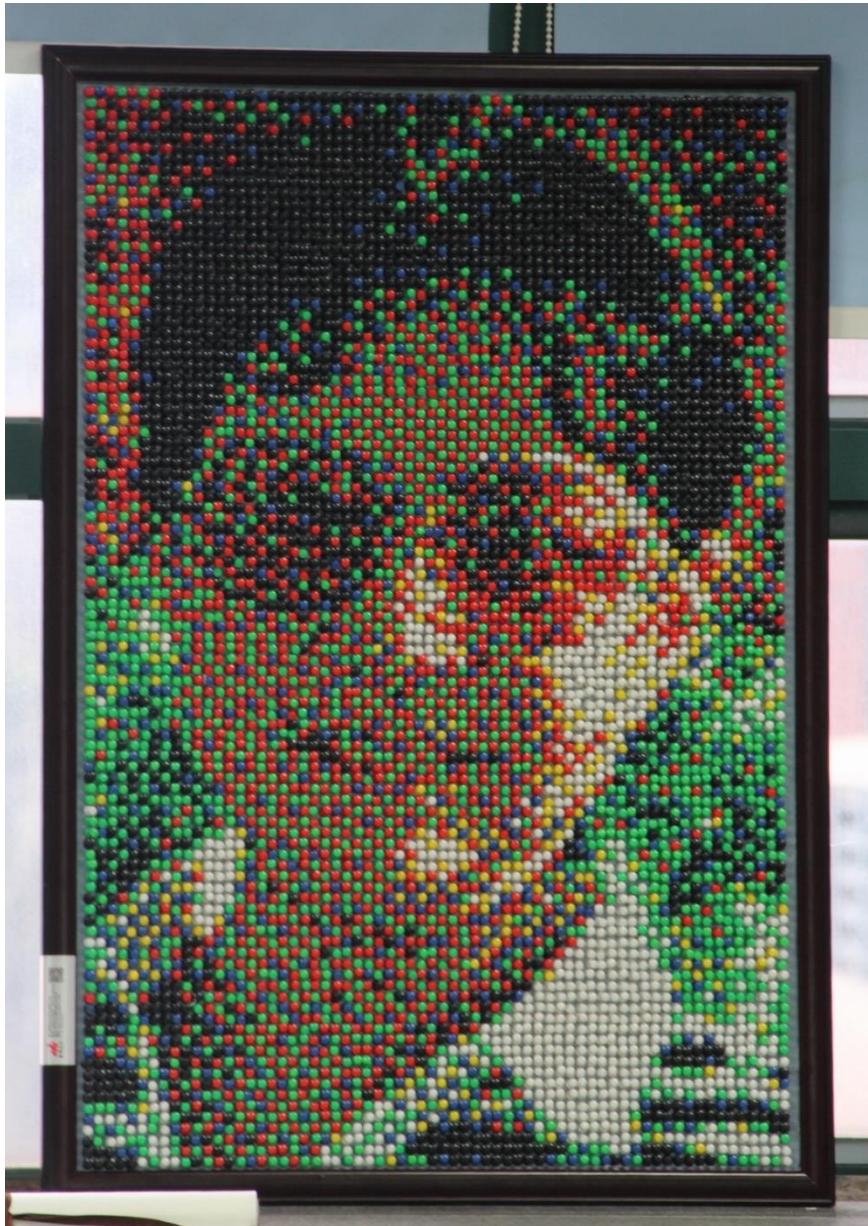
### 木星的伪彩色图像

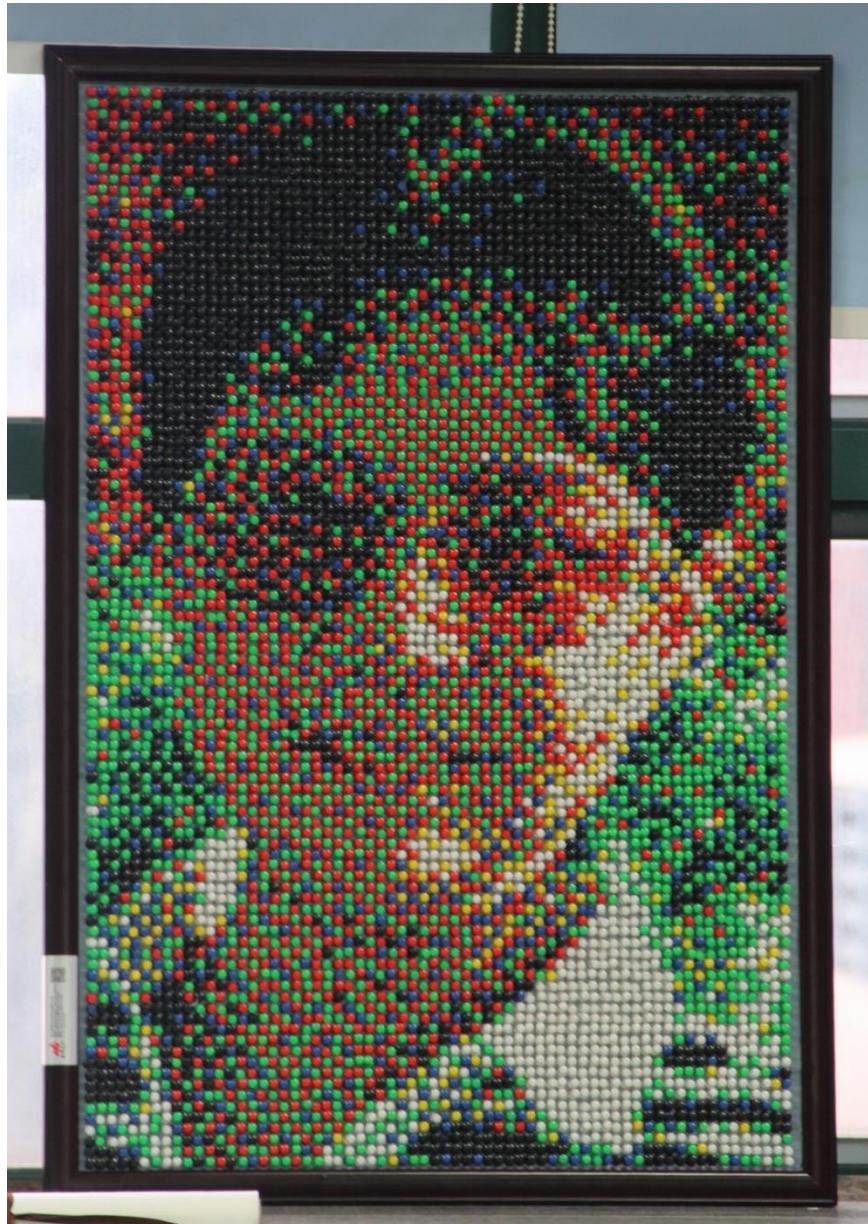


a  
b

**FIGURE 6.28**  
(a) Pseudocolor  
rendition of  
Jupiter Moon Io.  
(b) A close-up.  
(Courtesy of  
NASA.)

## 6.3 Pseudocolor Image Processing





6666颗 6 种颜色  
的彩色图钉钉出来的  
画像。

Question: How?

## 6.4 Basics of Full-Color Image Processing



Red image



green image



blue image

## 6.4 Basics of Full-Color Image Processing

Full color image means that the image contains  $(2^8)^3 = 16777216$  colors.

Color image — 3 dimensional vector matrix, each vector gives us the color components at each pixel (根据彩色模型的不同代表不同的物理量)。

A color  $c(x, y)$  at a pixel  $(x, y)$  of a color image is in fact a 3-D vector in the 3-D color space. When  $c(x, y)$  is in the RGB color space, it can be expressed as :

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

## 6.4 Basics of Full-Color Image Processing

### Color image

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

As a result, true color image processing is to be performed in the vector space, which is essentially different from processing of grey image. There exists two classes of color image processing:

- (1) **per-color-component processing:** To handle one color component each time (对各个颜色平面单独处理)
- (2) **Vector-based processing:** To directly process in the vector space (对色彩向量统一处理)

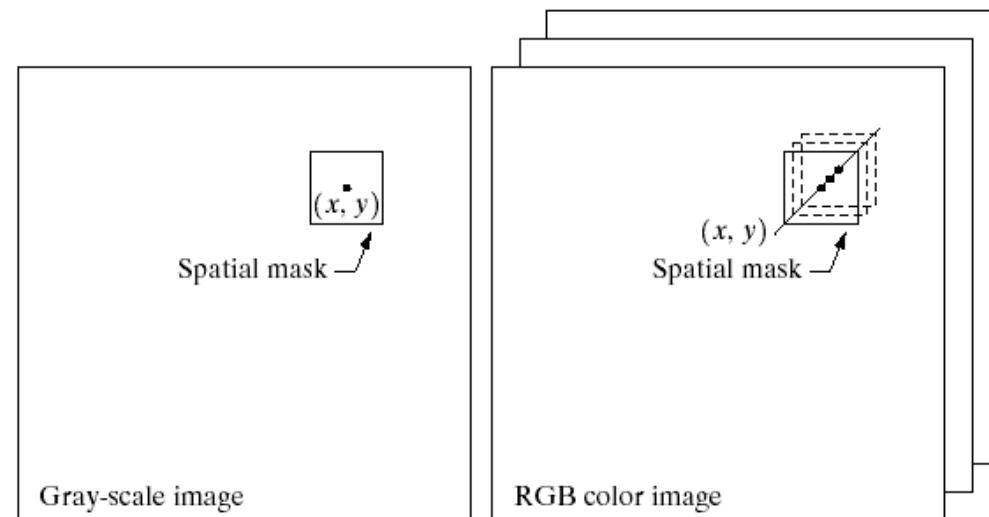
The computation effort of per-color-component processing is generally significantly less. However, the results of these approaches are sometimes equivalent but sometimes different.

For these two approaches to be equivalent, two conditions must be met:

- (1) The process has to be applicable to both vectors and scalars,
- (2) The operation on each component of a vector must be independent of the other components, though a technique meets this condition may not capture the true nature of a color image.

a b

**FIGURE 6.29**  
Spatial masks for  
gray-scale and  
RGB color  
images.



green image



Red image



blue image



When the color image of a follower on the left is coded in the HSI system, the H-S-I maps are shown below



Hue



Saturation



Intensity

## 6.5 Color transformation

基本公式：彩色图像的变换处理，可统一写成

$$g(x, y) = T[f(x, y)] \quad (6.5.1)$$

其中

$f(x, y)$ ——彩色输入图像，向量函数

$g(x, y)$ ——处理后的输出彩色图像，向量函数

更进一步，类似灰度图像的变换公式，我们可以有

$$s_i = T_i(r_1, r_2, \dots, r_n) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (6.5.2)$$

表示 (6.5.1) 中第  $i$  个分量的变换函数。n 是彩色模型分量的个数，RGB 彩色模型  $n=3$ ，CMYK 模型  $n=4$ 。

注意：如果希望 (6.5.1) 满足我们前面给出的要求，那么 (6.5.2) 也会有相应的限制。什么限制？

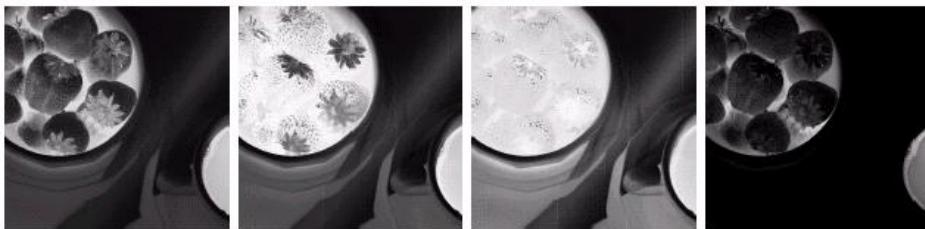
## ◆ Intensity reduction

For instance, if we want to decrease the intensity of an image by 30%





Full color

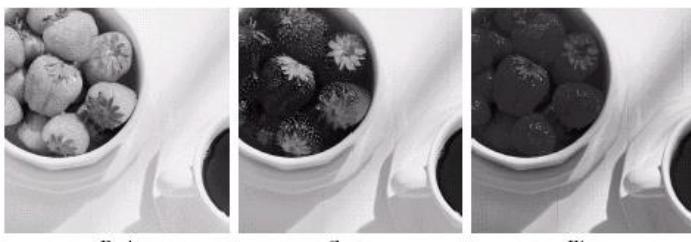


Cyan

Magenta

Yellow

Black



Red

Green

Blue



Hue

Saturation

Intensity

## 不同彩色模型下的分解

**注：**HSI表示中色度分量的两个问题：（1） $0^{\circ}$ 和 $360^{\circ}$ 相遇处有一个不连续点；（2）色调对于0饱和度没有定义（对白、黑和纯灰）

## Example1: Intensity reduction in different color spaces

For instance, if we want to decrease the intensity of an image by ( $k=$ )30%

**HSI model:** only the I component is reduced by 30%.

$$S_3 = kr_3$$

色调和饱和度分量保持不变。注意在RGB到HSI系统的变换公式中，有

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

**RGB model:** all components are reduced by 30% in value

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

**CMY model:** this system is based on color subtraction, so to reduce intensity we need to **increase** all color components by 30%.

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

(上式可从CMY空间的定义以及彩色空间变换公式(6.5.1)得来)

计算复杂性：单就改变亮度这一点，HSI空间的处理最简单，但是从RGB或者CMY空间变换到HSI空间的计算却非常复杂。

注意：第二版FIGURE 6.31有错（最后两幅图的标记应该反过来）

a	b	
c	d	e

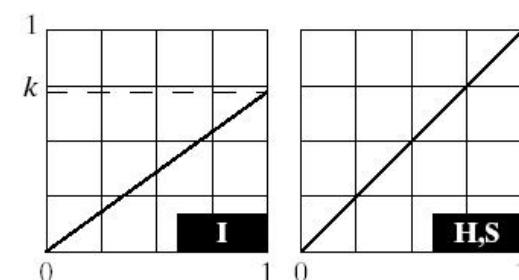
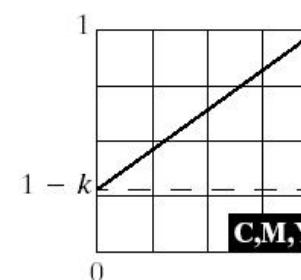
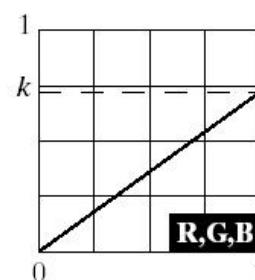
**FIGURE 6.31**

Adjusting the intensity of an image using color transformations.

(a) Original image. (b) Result of decreasing its intensity by 30% (i.e., letting  $k = 0.7$ ).

(c)–(e) The required RGB, CMY, and HSI transformation functions.

(Original image courtesy of MedData Interactive.)

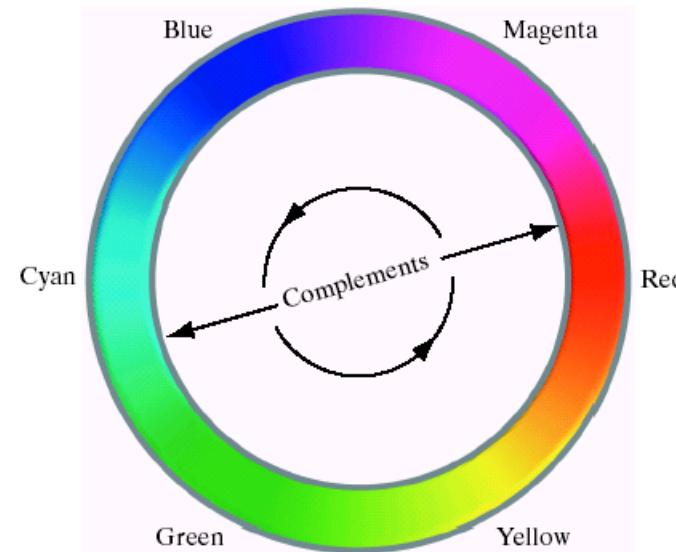


## Example2: Color complements(补色)

计算彩色图像的补色：彩色谱首尾相接形成彩色环

一种颜色的补色实际上就是从白光中去掉当前的颜色后得到的颜色。在彩色环上的任一种颜色，和环对面的颜色互为补色。在RGB和CMY彩色空间，补色很容易用公式算出，例如在RGB空间

$$\begin{bmatrix} R_c \\ G_c \\ B_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R_o \\ G_o \\ B_o \end{bmatrix}$$

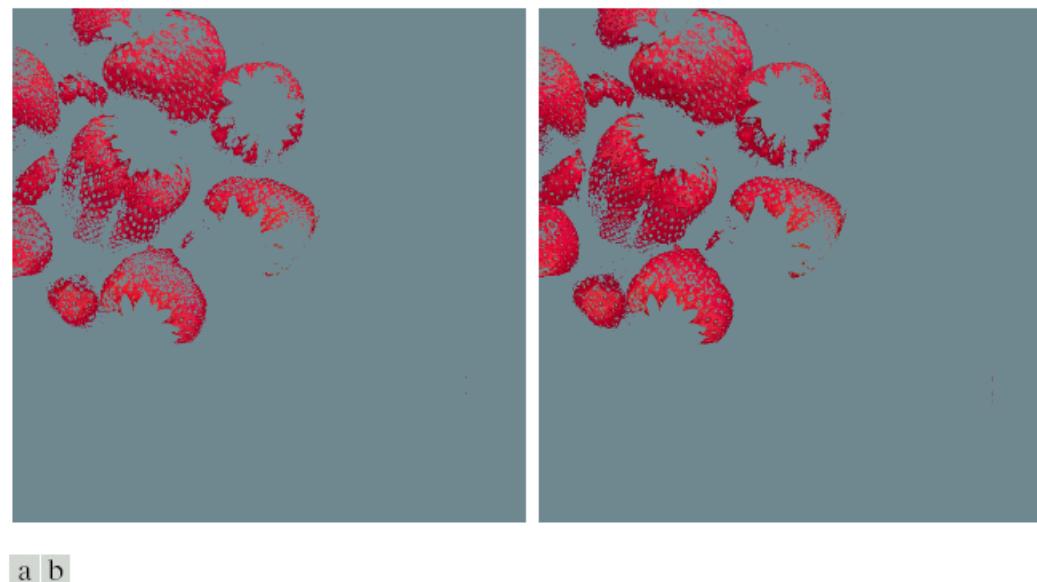


**FIGURE 6.32**  
Complements on  
the color circle.

左端的向量是右端向量的补色，反之亦然。此变换满足前面的两个要求，在分量上单独实施和在向量上同时实施等效。若使用HIS模型则不然。

### Example3: Color Slicing (彩色分层)

和灰度分层类似，目的是分离目标物体。但方法可以有很多，最简单的就是把不感兴趣的区域全部变成某种不显眼的自然色。



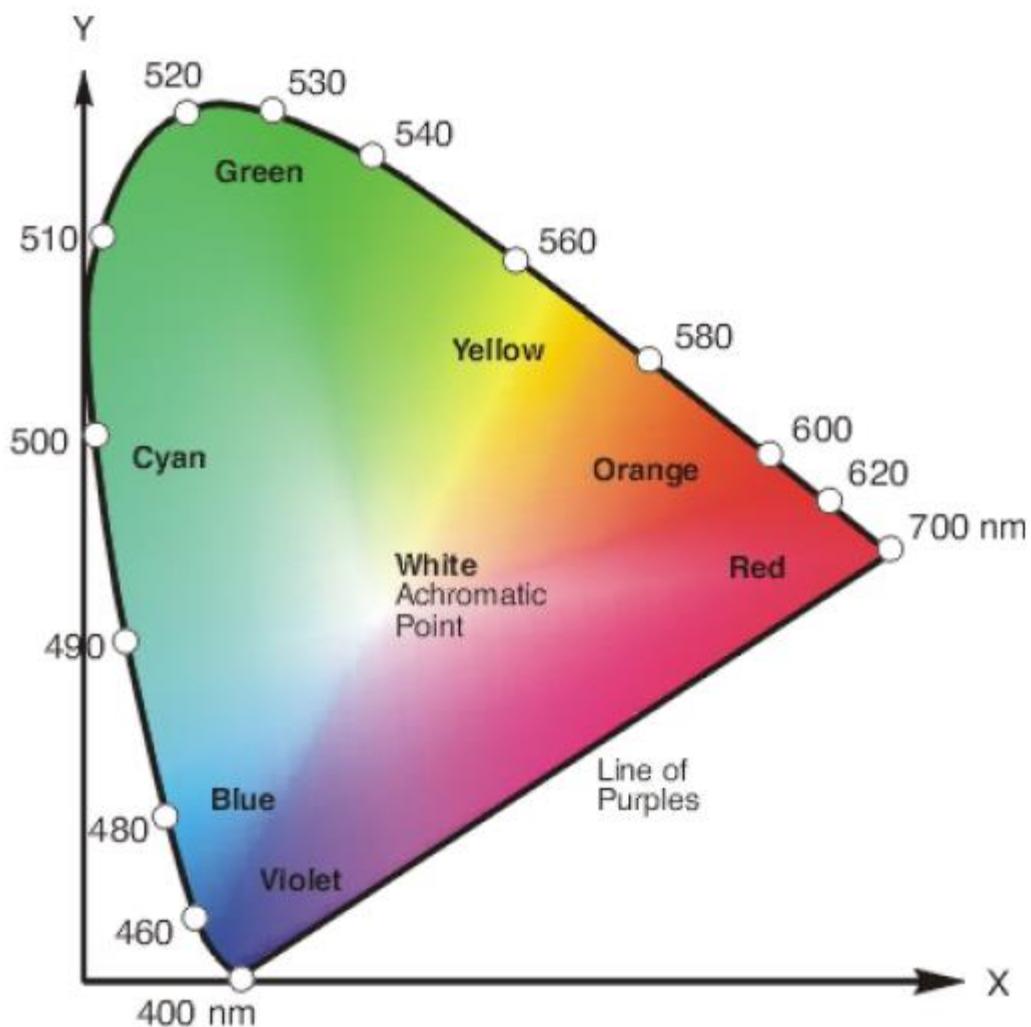
**FIGURE 6.34** Color slicing transformations that detect (a) reds within an RGB cube of width  $W = 0.2549$  centered at  $(0.6863, 0.1608, 0.1922)$ , and (b) reds within an RGB sphere of radius  $0.1765$  centered at the same point. Pixels outside the cube and sphere were replaced by color  $(0.5, 0.5, 0.5)$ .

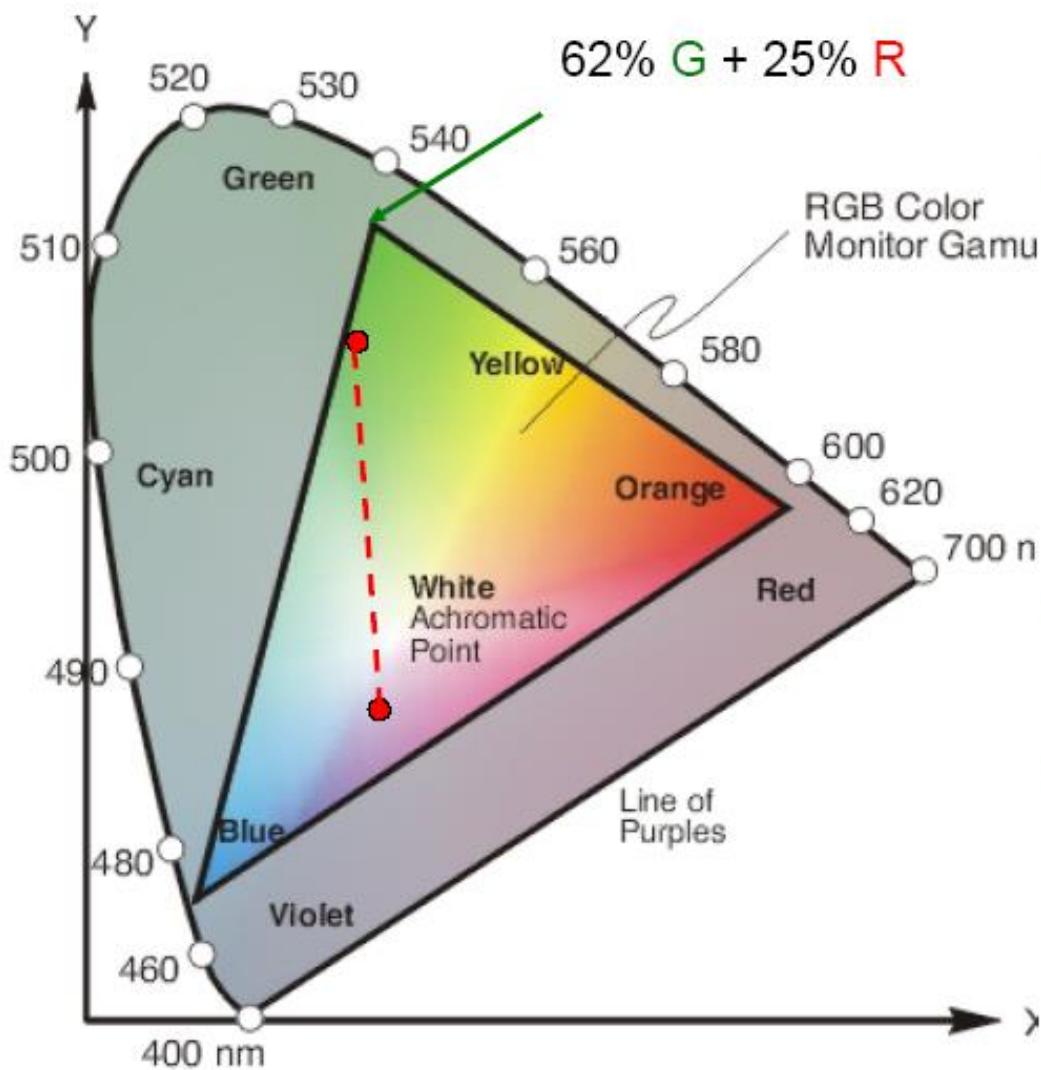
## 亮度和彩色校正 (Tone and color correction)

计算机、彩色打印机等设备可以组成“数码暗室”，对数码照片（或者扫描照片）作色彩和亮度校正，主要目的是照片增强和色彩重现。图像色彩的好坏最终要由打印设备输出的照片来确定，但由于所有的色彩变换和改进都是在监视器上判断的，所以保持监视器和输出设备之间色彩的高度一致是非常必要的（**色彩管理**）。为了保证这一点，可以在不同的设备中使用**独立于**设备的彩色系统来实现（注：前面已经介绍过RGB和CMY（CMYK）之间的不同）。

计算机显示色彩是需要对色彩编码，如  $(R, G, B) = (255, 128, 0)$  就是颜色■在RGB模型上的编码，但基于RGB模型编码的色彩依赖于设备。也就是说同一种颜色在不同的设备上可能具有不同的编码。

简单介绍一个在图像处理历史上很有名的彩色模型CIE的*L\*a\*b\**，也叫CIELAB模型。此模型常用于许多图像处理系统（CMS）。这个彩色空间的优点是colorimetric（与感觉颜色相同的用相同的编码）、perceptually uniform（在不同设备之间，对色调的差别在感觉上是一致的。即任何原色增加或减少相同的量，由此产生的颜色感觉也相同）、独立于设备的。





- ◆ Any color that can result from the mixture of two colors are on the line connecting these two colors.
- ◆ The R, G, B color in monitors are not pure
- ◆ All colors due to mixture of these three colors are in the triangle.

$L*a*b*$ 的彩色分量由下式确定：（不作要求）

$L$ 代表明度， $a^*$ 代表一个颜色中含有多少绿色和红色的感觉， $b^*$ 代表一个颜色中含有多少黄色和蓝色的感觉。

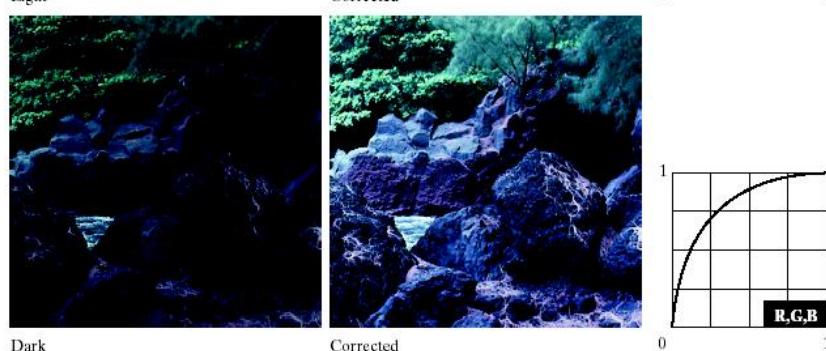
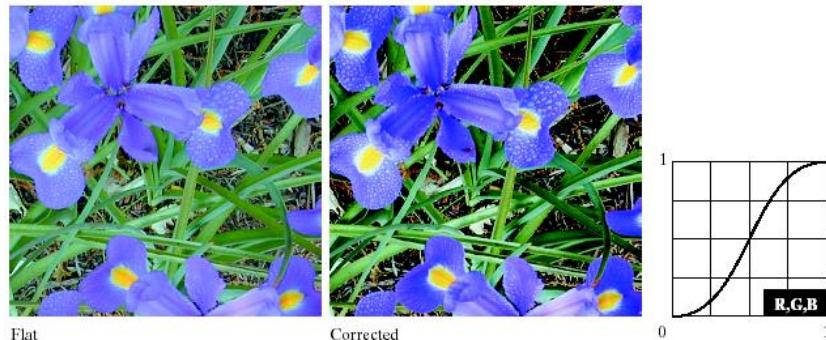
其中，

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

$X_w$ 、 $Y_w$ 和 $Z_w$ 是参考白色的三色值（在指定设备上的编码）：参考白色指得是在CIE标准D65（图6.5的CIE色度图中，由 $x=0.3127$ ,  $y=0.3290$ 定义）的照明下的完美反射白光。 $L*a*b*$ 彩色空间和HSI有类似之处，都能很好地将亮度和色彩分离开来（ $L^*$ 表示亮度， $a^*$ 表示色彩红减绿， $b^*$ 表示绿减蓝）。这种性质在图像处理（色调和对比度编辑）以及图像压缩方面有很大的优势。

$$\begin{aligned} L^* &= 116 \cdot h\left(\frac{Y}{Y_w}\right) - 16 \\ a^* &= 500 \left[ h\left(\frac{X}{X_w}\right) - h\left(\frac{Y}{Y_w}\right) \right] \\ b^* &= 200 \left[ h\left(\frac{Y}{Y_w}\right) - h\left(\frac{Z}{Z_w}\right) \right] \end{aligned}$$

**例6.9 调整强度（灰度）：**在RGB和CMY（K）空间，调整强度通常要对所有的彩色分量作相同的变换。在HSI或者 $L^*a^*b^*$ 系统，只需调整亮度（强度）分量



**FIGURE 6.35** Tonal corrections for flat, light (high key), and dark (low key) color images. Adjusting the red, green, and blue components equally does not alter the image hues.

## 例6.10 彩色平衡

进行图像彩色校正时有两个问题需要考虑：（1）如何判断当前图像的色彩是否平衡，以什么为基准？（2）当彩色不平衡存在时，如何校正？

判断彩色不平衡，可以以图中的白色区域为基准，也可以用图中人眼比较敏感部位的颜色作参考，例如皮肤。

校正不平衡的彩色，可以有很多方法。特别要注意的是，调整任何颜色，对其他颜色的感觉都会受影响。这是一个比较复杂的过程。校正色彩时可以利用彩色环，增减补色、调整相邻彩色的多少，等等。



Original/Corrected

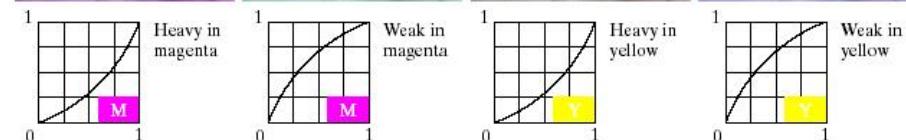
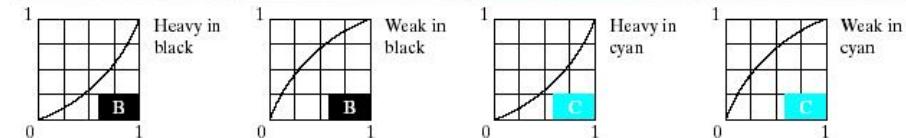
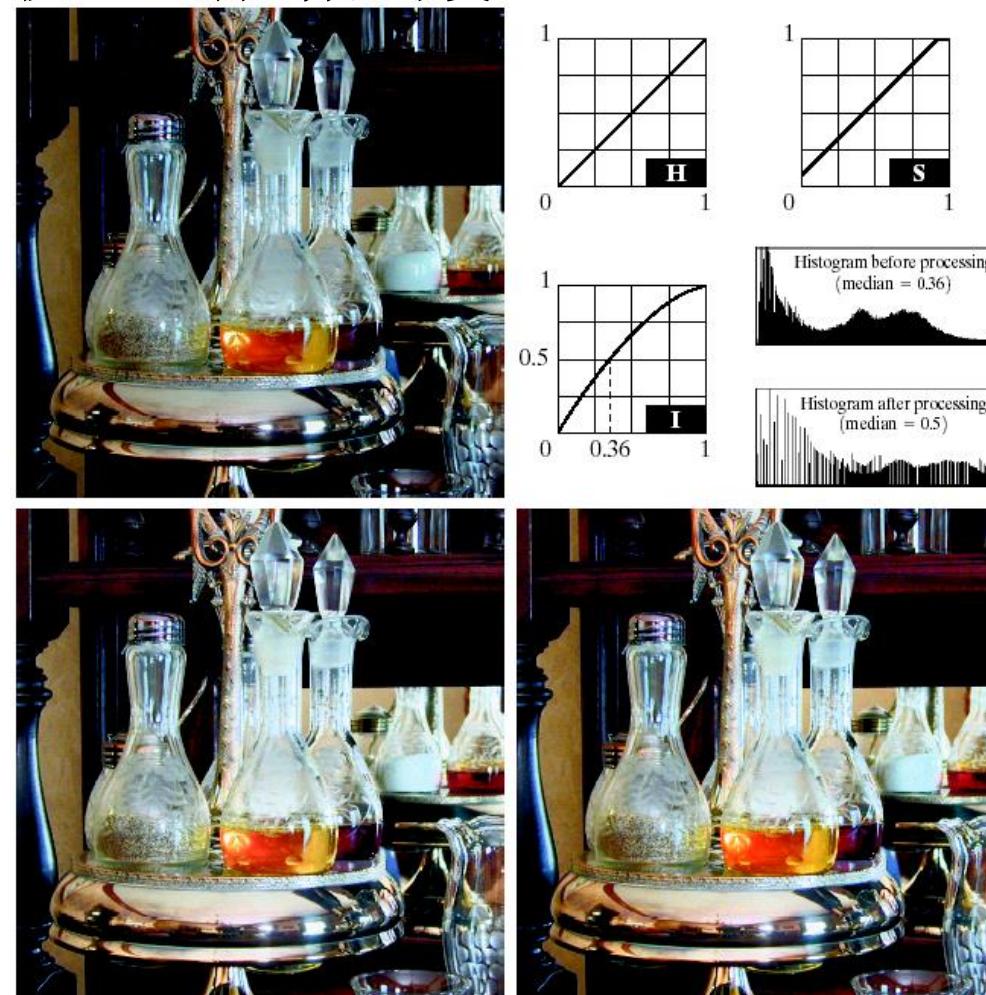


FIGURE 6.36 Color balancing corrections for CMYK color images.

## 直方图处理

单色灰度图的直方图处理有某种“自动”的功效，如何用于彩色图像？首先，独立的对每个彩色分量作直方图均衡化是不合适的，会产生不正确的颜色。所以比较适合的方式是在HSI或者类似的彩色空间，诸如 $L^*a^*b^*$ 等，对强度分量采用直方图的方法，保持彩色（色调）分量不变。

此例就是在HSI空间先调整强度分量使其中心强度由原来的0.36校正到0.5。然后又对饱和度作了适当的调整。



a  
b  
c  
d

**FIGURE 6.37**  
Histogram equalization (followed by saturation adjustment) in the HSI color space.

## 6.6 彩色图像的平滑和锐化

灰度图象中所有的平滑和锐化方法都可以使用，但应该注意的是在不同的彩色空间，这些方法产生的结果有所不同。

RGB分量



a  
b  
c  
d

**FIGURE 6.38**  
(a) RGB image.  
(b) Red  
component image.  
(c) Green  
component.  
(d) Blue  
component.

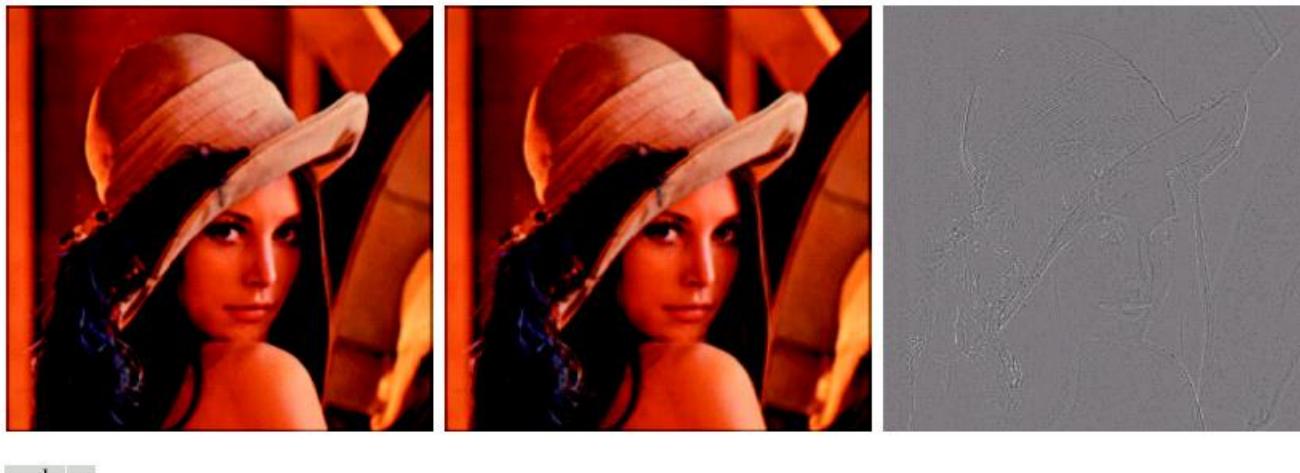
## HSI分量



a | b | c

**FIGURE 6.39** HSI components of the RGB color image in Fig. 6.38(a). (a) Hue. (b) Saturation. (c) Intensity.

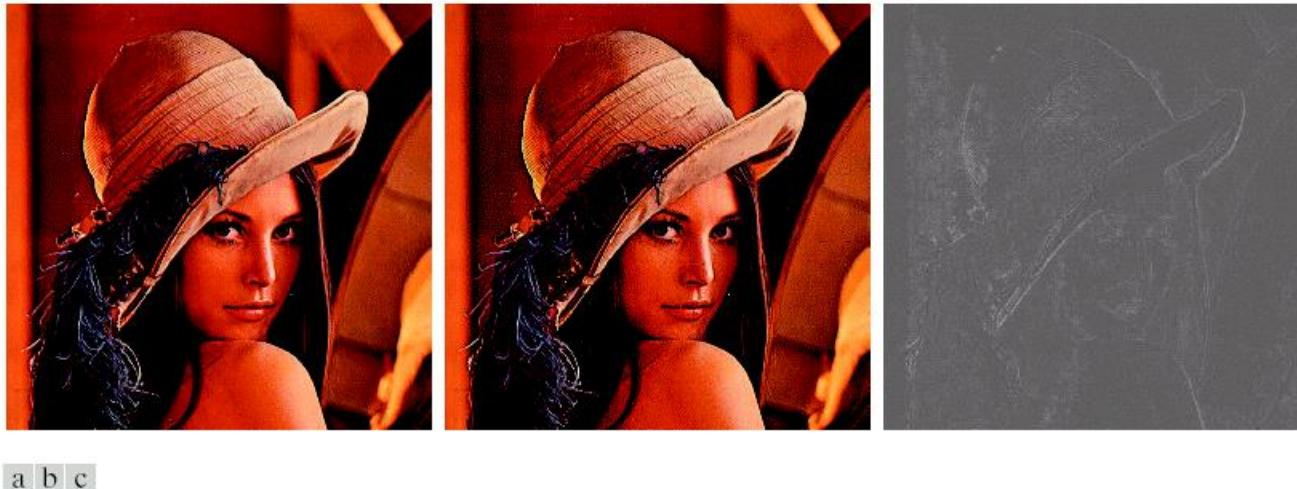
用 $5 \times 5$ 平滑滤波器平滑图像 (a) 处理RGB每一分量的结果;  
(b) 处理强度分量后的结果; (c) 两种结果之差



a b c

**FIGURE 6.40** Image smoothing with a  $5 \times 5$  averaging mask. (a) Result of processing each RGB component image. (b) Result of processing the intensity component of the HSI image and converting to RGB. (c) Difference between the two results.

用拉普拉斯锐化图像 (a) 处理RGB每一分量的结果; (b) 处理强度分量后的结果; (c) 两种结果之差



a b c

**FIGURE 6.41** Image sharpening with the Laplacian. (a) Result of processing each RGB channel. (b) Result of processing the intensity component and converting to RGB. (c) Difference between the two results.

## 6.7 彩色分割 (Color Segmentation)

这里所说的分割是将图像中感兴趣的区域提取出来，并集中于利用彩色的分割。其实利用彩色分割的应用有很多，其中一个就是人脸检测 (face detection)。

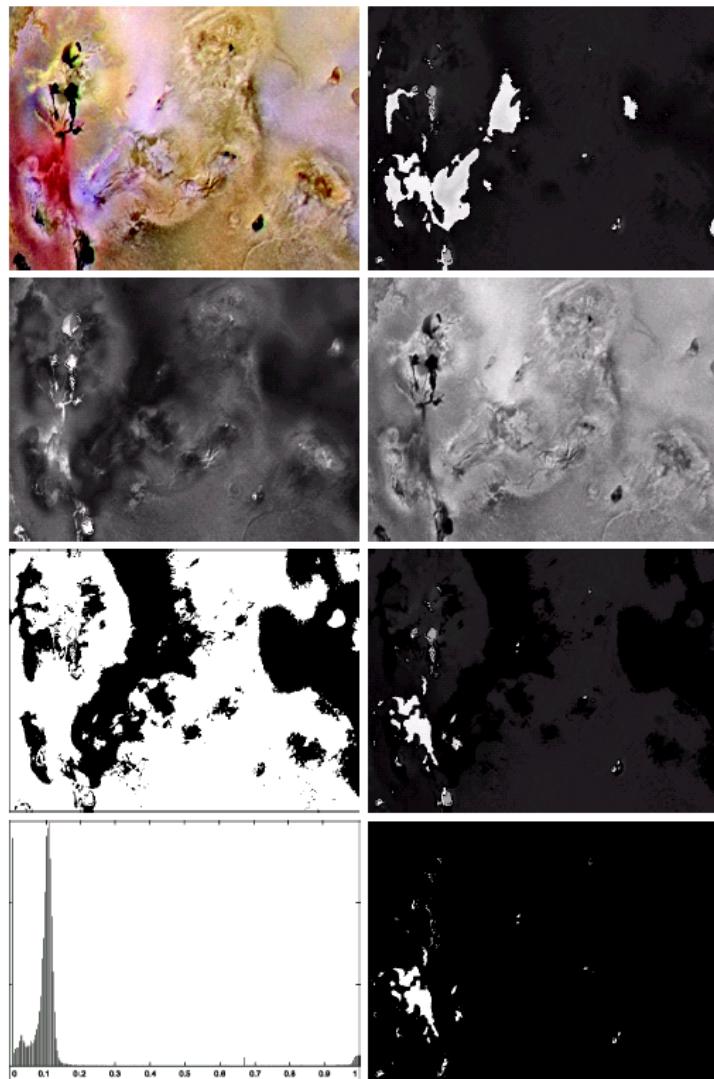
在不同的彩色空间上有不同的分割方法

基于HSI彩色空间的分割

HSI空间是彩色分割技术最自然的选择。通常的做法是利用色调分量分离感兴趣区域。而饱和度作为另一个模板，用于进一步分离出感兴趣的区域。

## 例6.14 HSI空间分割

目的：把图像(a)中微红色的区域分割出来。注意这里效果并不好。



(b)–(d)是HSI分量图。比较a和b，易见感兴趣的区域有较高的色调值，表示彩色在红色的蓝和深红一侧。(e)显示了门限产生的二值图像，该图像是这样得到的：在饱和度图像中门限值等于最大饱和度的10%，任何比门限大的赋1值（白），其他赋0值（黑）。图(f)是用色调图像和模板相乘；g是结果的直方图。h是以0.9为门限从f得到的结果。

a  
b  
c  
d  
e  
f  
g  
h

**FIGURE 6.42** Image segmentation in HSI space. (a) Original. (b) Hue. (c) Saturation. (d) Intensity. (e) Binary saturation mask (black = 0). (f) Product of (b) and (e). (g) Histogram of (f). (h) Segmentation of red components in (a).

## RGB向量空间分割

**目地：**在RGB图像中将具有某种颜色的物体分割出来。

**方法：**先在图像中采集一些能代表感兴趣颜色的样点，计算它们的“平均”彩色，用 $\mathbf{a}$ 来表示。以这个彩色为参照，将图像中的像素进行分类，一类是和这种颜色类似的像素，一类是不满足要求的像素。分类的方式是度量像素到我们感兴趣的“彩色”的“距离”。

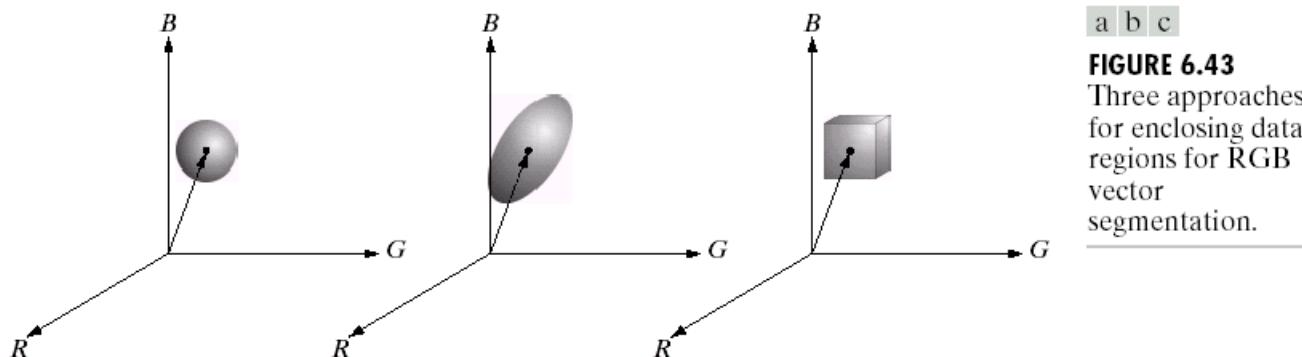
令 $\mathbf{z}$ 表示RGB空间上的任意一点，定义欧式距离

$$\begin{aligned} D(\mathbf{z}, \mathbf{a}) &= \|\mathbf{z} - \mathbf{a}\| = \left[ (\mathbf{z} - \mathbf{a})^T (\mathbf{z} - \mathbf{a}) \right]^{\frac{1}{2}} \\ &= \left[ (z_R - a_R)^2 + (z_G - a_G)^2 + (z_B - a_B)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \end{aligned}$$

那么，满足

$$D(\mathbf{z}, \mathbf{a}) \leq D_0$$

是半径为 $D_0$ 的实心球。球内的点符合我们的彩色标准，球外的不符合。按照这个准则将图像上的像素分成两类点集编码，就产生一幅二值分割图像。同样的方式还可以定义一个用于分类的椭球：

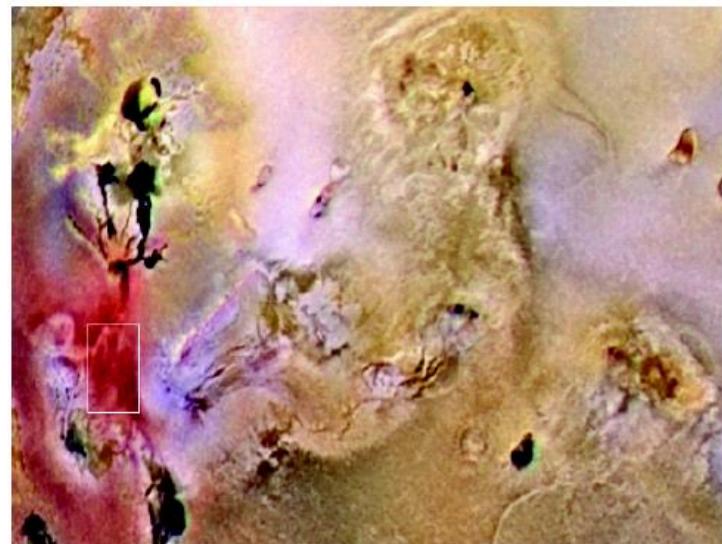


为了减少计算复杂性，还可以利用中心在a的方盒子来作分类，盒子的边长取一个和沿这个方向采样的标准差成比例的数。在下面的例子中，各边长取的是相应标准差的1.25倍。

简单的人脸检测也可以采用这种方法。

## 区域分割

目的：把图像(a)中微红色的区域分割出来。



a  
b

**FIGURE 6.44**  
Segmentation in  
RGB space.  
(a) Original image  
with colors of  
interest shown  
enclosed by a  
rectangle.  
(b) Result of  
segmentation in  
RGB vector  
space. Compare  
with Fig. 6.42(h).

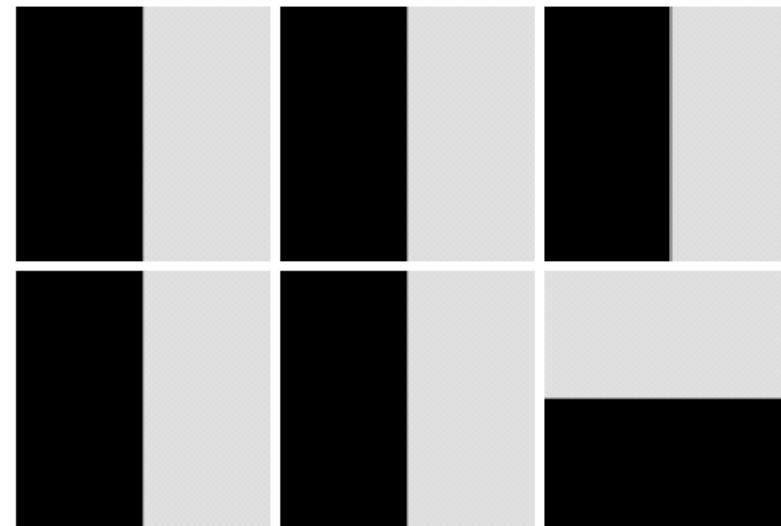
## 彩色边缘检测

先看第三章（3.6-10）给出的梯度和其模的定义和计算公式：

$$\nabla \mathbf{f} = \begin{bmatrix} G_x \\ G_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial x} \\ \frac{\partial f}{\partial y} \end{bmatrix}$$

$$\nabla f = \left[ G_x^2 + G_y^2 \right]^{1/2} = \left[ \left( \frac{\partial f}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial f}{\partial y} \right)^2 \right]^{1/2}$$

首先要说明的是独立处理彩色分量形成的合成梯度图像可能导致错误的结果。下图就是一例。用上式分别对RGB分量计算梯度的模，然后把它们加起来，则这个量对图像d和h来说在点 $[(M+1)/2, (M+1)/2]$ 是相同的。但直观上看，由于d图在这一点上三个彩色分量变化的方向相同，所以在这一点上的梯度应该较大。



a	b	c	d
e	f	g	h

FIGURE 6.45 (a)-(c)  $R$ ,  $G$ , and  $B$  component images and (d) resulting RGB color image.  
(f)-(g)  $R$ ,  $G$ , and  $B$  component images and (h) resulting RGB color image.

为了解决上述问题，考虑向量函数梯度的定义：

$$\mathbf{u} = \frac{\partial R}{\partial x} \mathbf{r} + \frac{\partial G}{\partial x} \mathbf{g} + \frac{\partial B}{\partial x} \mathbf{b} \quad \mathbf{v} = \frac{\partial R}{\partial y} \mathbf{r} + \frac{\partial G}{\partial y} \mathbf{g} + \frac{\partial B}{\partial y} \mathbf{b}$$

标量

$$g_{xx} = \mathbf{u} \cdot \mathbf{u} = \mathbf{u}^T \mathbf{u} = \left| \frac{\partial R}{\partial x} \right|^2 + \left| \frac{\partial G}{\partial x} \right|^2 + \left| \frac{\partial B}{\partial x} \right|^2$$

$$g_{yy} = \mathbf{v} \cdot \mathbf{v} = \mathbf{v}^T \mathbf{v} = \left| \frac{\partial R}{\partial y} \right|^2 + \left| \frac{\partial G}{\partial y} \right|^2 + \left| \frac{\partial B}{\partial y} \right|^2$$

$$g_{xy} = \mathbf{u} \cdot \mathbf{v} = \mathbf{u}^T \mathbf{v} = \frac{\partial R}{\partial x} \frac{\partial R}{\partial y} + \frac{\partial G}{\partial x} \frac{\partial G}{\partial y} + \frac{\partial B}{\partial x} \frac{\partial B}{\partial y}$$

图像在  $(x, y)$  处最大变化率方向由下式给出：

$$\theta = \frac{1}{2} \arctan \left[ \frac{2g_{xy}}{(g_{xx} - g_{yy})} \right]$$

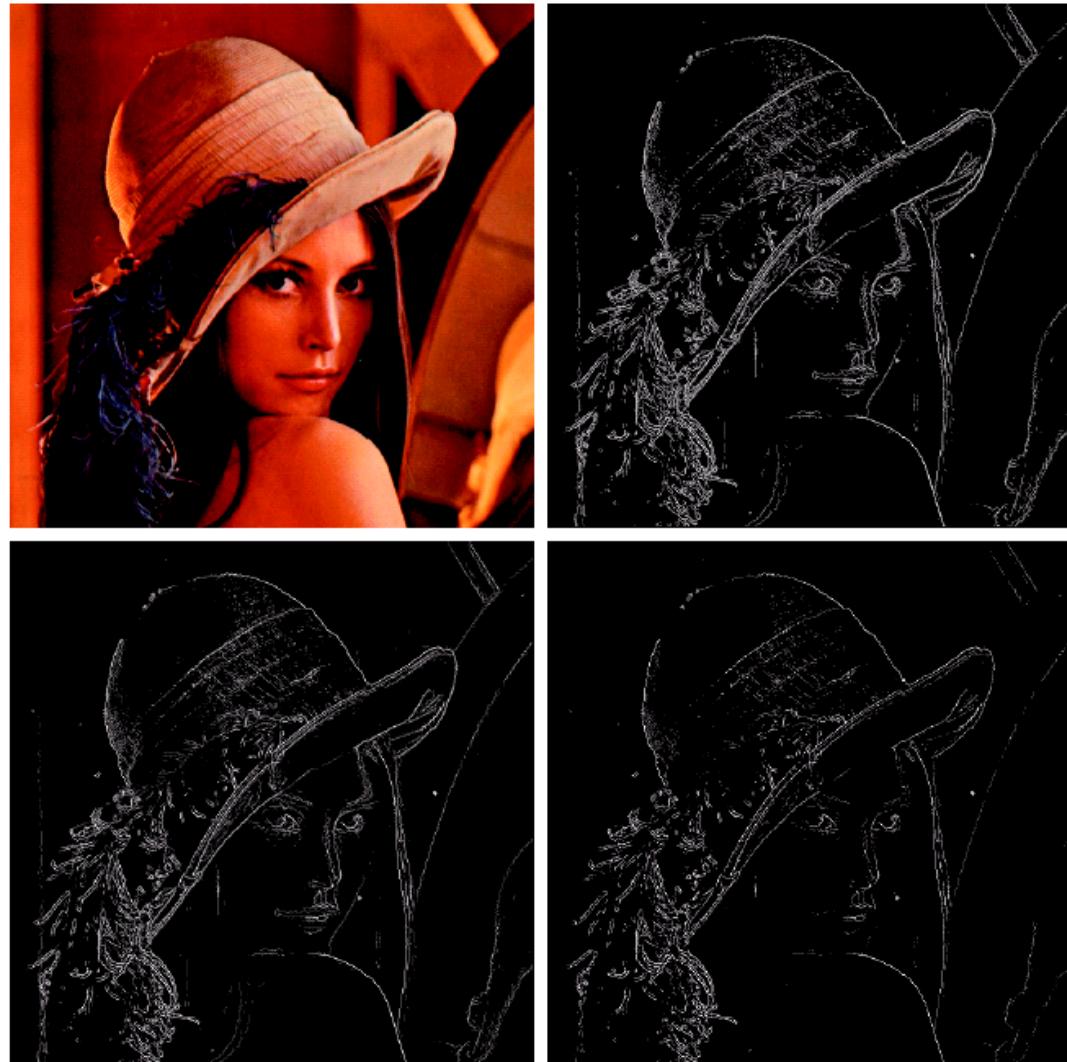
$$F_\theta(x, y) = \left\{ \frac{1}{2} \left[ (g_{xx} + g_{yy}) + (g_{xx} - g_{yy}) \cos 2\theta(x, y) + 2g_{xy} \sin 2\theta(x, y) \right] \right\}^{\frac{1}{2}}$$

比较：在RGB空间计算向量梯度与分别在分量图像上计算梯度后再相加

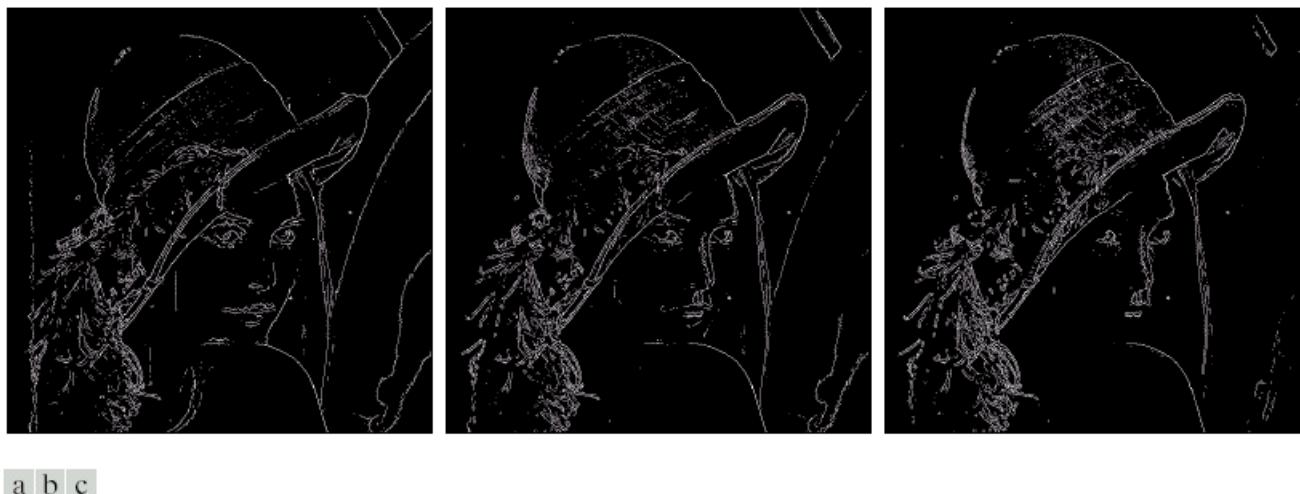
a	b
c	d

**FIGURE 6.46**

- (a) RGB image.
- (b) Gradient computed in RGB color vector space.
- (c) Gradients computed on a per-image basis and then added.
- (d) Difference between (b) and (c).



R、G、B、三个分量的梯度图像，三者相加后得到前面的图



**FIGURE 6.47** Component gradient images of the color image in Fig. 6.46. (a) Red component, (b) green component, and (c) blue component. These three images were added and scaled to produce the image in Fig. 6.46(c).

## 6.8 彩色图像的噪声

先看看图像彩色模型转换时噪声的传播情况。

a	b
c	d

**FIGURE 6.48**  
(a)–(c) Red,  
green, and blue  
component  
images corrupted  
by additive  
Gaussian noise of  
mean 0 and  
variance 800.  
(d) Resulting  
RGB image.  
[Compare (d)  
with Fig. 6.46(a).]



RGB三个通道存在  
加性高斯噪声



a b c

**FIGURE 6.49** HSI components of the noisy color image in Fig. 6.48(d). (a) Hue. (b) Saturation. (c) Intensity.

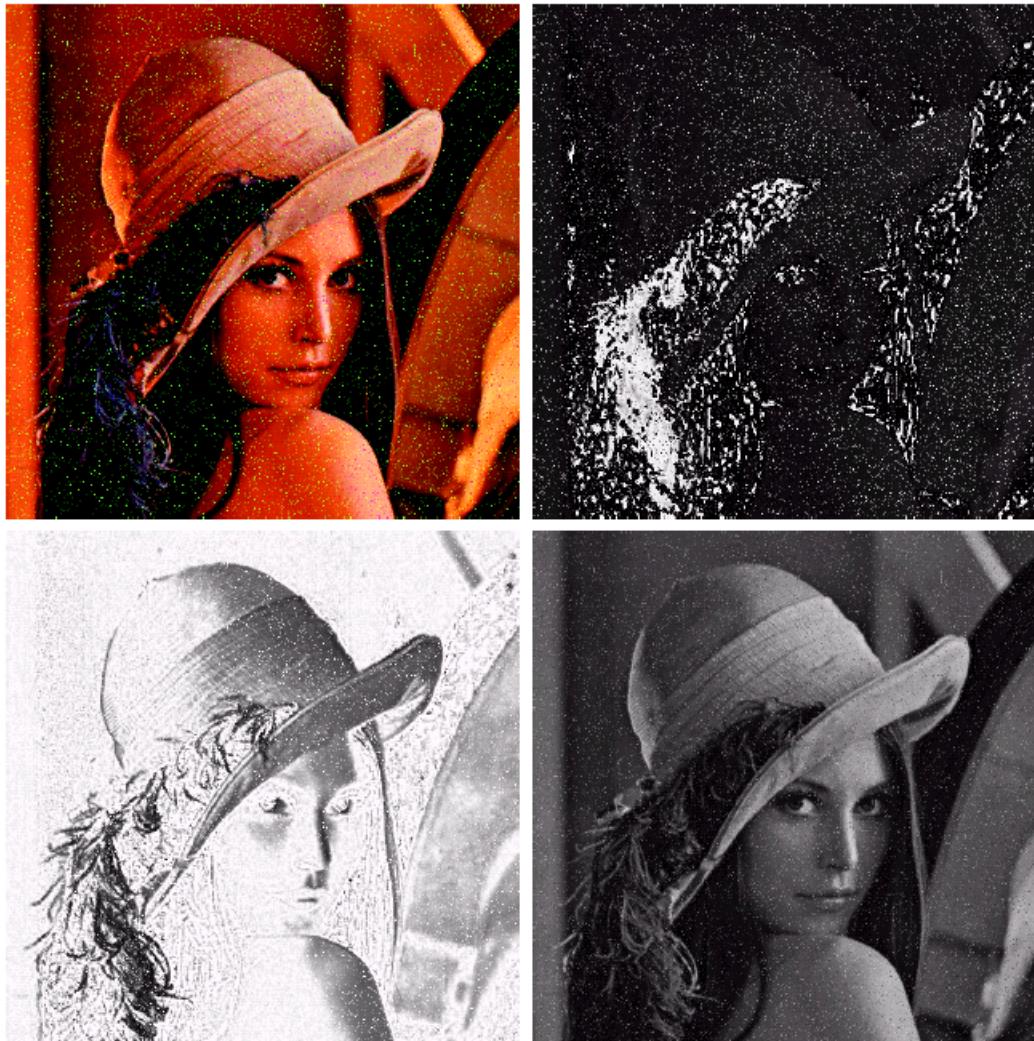
原图的HSI分量（几乎有天壤之别），注意色调和饱和度图像的质量大大降低。强度分量质量改善



a b c

**FIGURE 6.39** HSI components of the RGB color image in Fig. 6.38(a). (a) Hue. (b) Saturation. (c) Intensity.

## 绿平面受椒盐污染的RGB图像转换为HSI彩色空间



a b  
c d

**FIGURE 6.50**  
(a) RGB image with green plane corrupted by salt-and-pepper noise.  
(b) Hue component of HSI image.  
(c) Saturation component.  
(d) Intensity component.