

《数字图像处理》

Chapter 6

彩色图像处理

谢晓华

中山大学数据科学与计算机学院

《香蜜沉沉烬如霜》这部剧之中，锦觅为了求取玄穹之光，自愿交出了自己分辨颜色的能力……大家都显得很痛苦。

为什么看不到颜色会那么痛苦？



人可以辨别几千种彩色色调和亮度，
但是只能辨别几十种灰色色调。
(没色彩，眼里世界会小很多☹)

一. 彩色基础

光特性是颜色科学的核心 (太阳光包含红、橙、黄、绿、蓝、靛、紫.....)

描述彩色光的3个基本量:

辐射率: 从光源流出能量的总量, 用瓦特(W)度量

光强: 观察者从光源接收的能量总和, 用流明度量
红外的光强几乎为零。

亮度: 主观描绘子, 不可度量, 表达了无色的强度概念

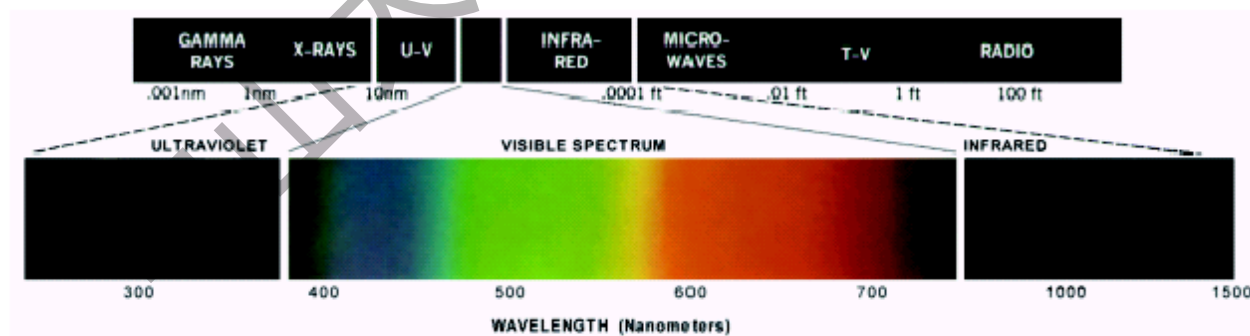


FIGURE 6.2 Wavelengths comprising the visible range of the electromagnetic spectrum. (Courtesy of the General Electric Co., Lamp Business Division.)

1.三基色(RGB)原理:

自然界常见的各种颜色光，都是由红(R)($\lambda=700\text{nm}$)、绿(G)($\lambda=546\text{nm}$)、蓝(B)($\lambda=435.8\text{nm}$)三种颜色光按不同比例相配而成，同样绝大多数颜色也可以分解成红、绿、蓝三种单色光，这就是色度学中最基本的原理——三基色原理。

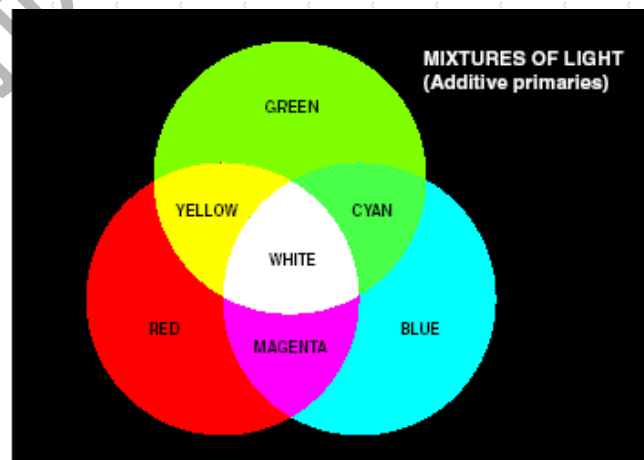
例如：

红色+绿色=黄色

红色+蓝色=品红

绿色+蓝色=青色

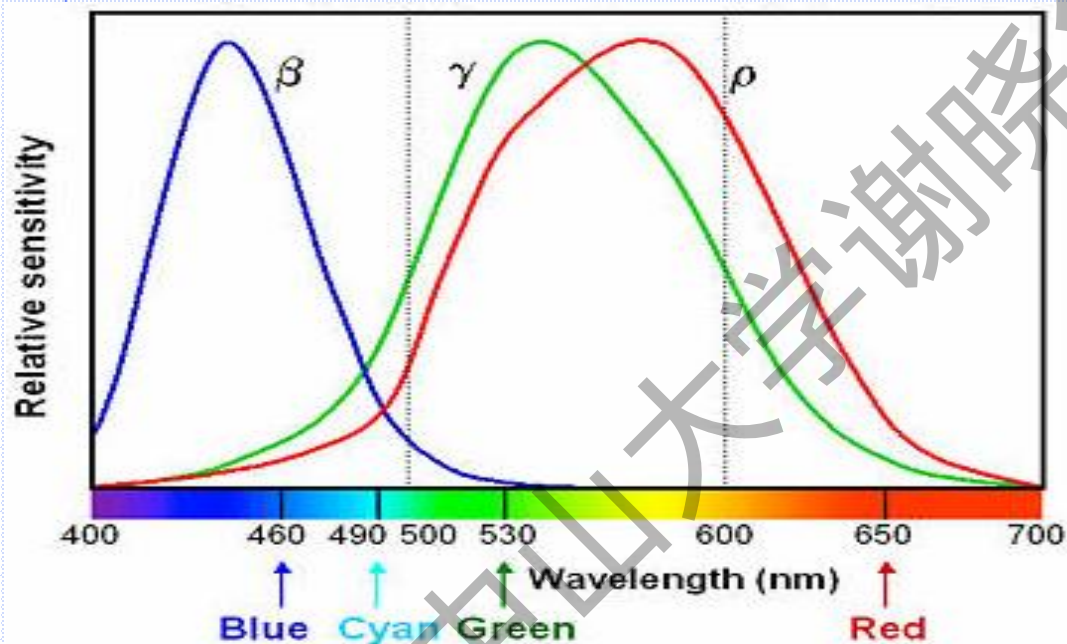
红色+绿色+蓝色=白色



由于人眼对这三种颜色最敏感，因此红、绿和蓝被选为三基色，组成RGB三维加性空间

1.三基色(RGB)原理:

没有单一的颜色可称为红色、绿色或蓝色!



以波长为函数，人眼中的红色、绿色和蓝色锥状对光的吸收曲线

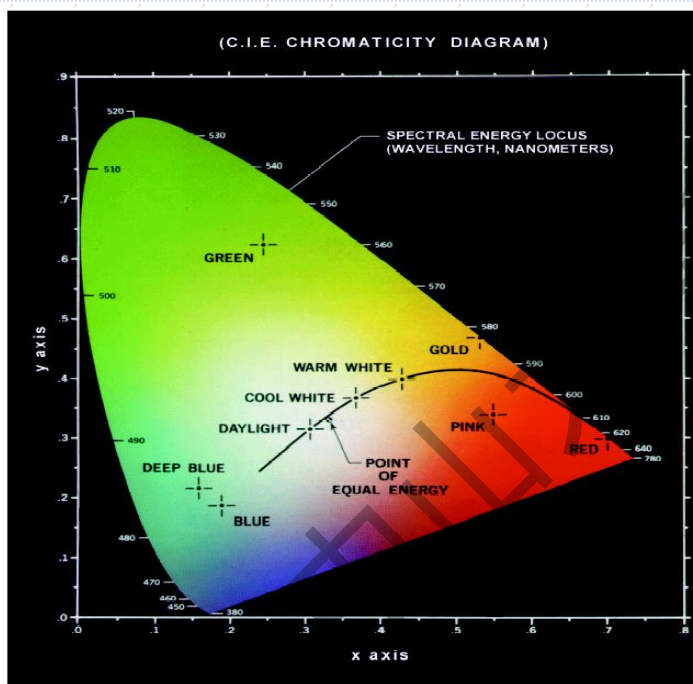
三个标准原色以各种强度比混合在一起的时候，可以产生所有的可见色彩。

2. 颜色的确定

区别颜色的特性：亮度（无色强度）、色调（主波长）和色饱和度（相对纯净度）。色调和饱和度统称为色度，颜色通常用亮度和色度表征。

确定颜色的另一种方法是CIE色度图（仅用红绿表示， $\text{红} + \text{绿} + \text{蓝} = 1$ ）

混合的白光越多，
饱和度越小



色度图

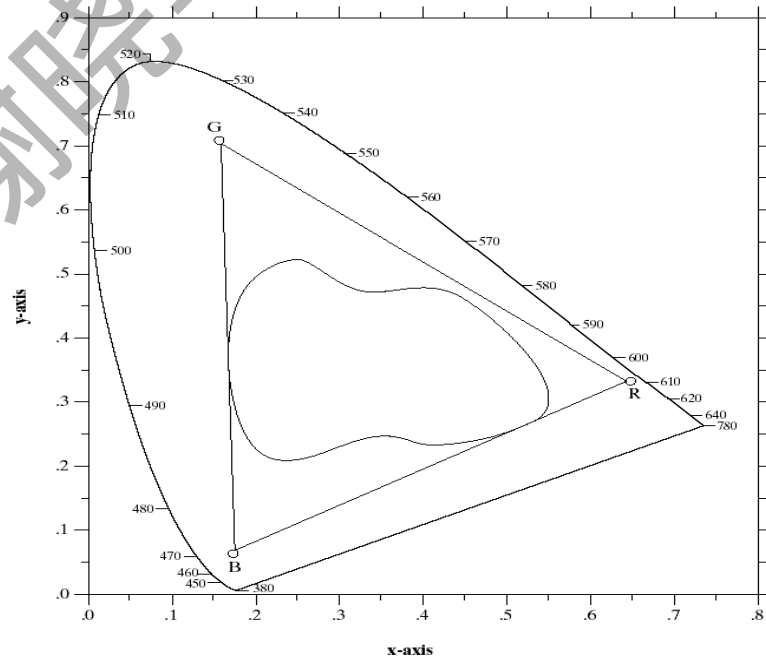


FIGURE 6.6 Typical color gamut of color monitors (triangle) and color printing devices (irregular region).

彩色监视器和彩色打印设备的彩色域

二.彩色模型

RGB CMY和CMYK HIS(HSB)

1.RGB彩色模型（面向设备）

表示每个像素的比特数称为像素深度。（每个通道为8比特， $2^8=256$ ，则该图像的像素深度为24比特，颜色总类有 $2^8 \times 3=16,777,216$ ）

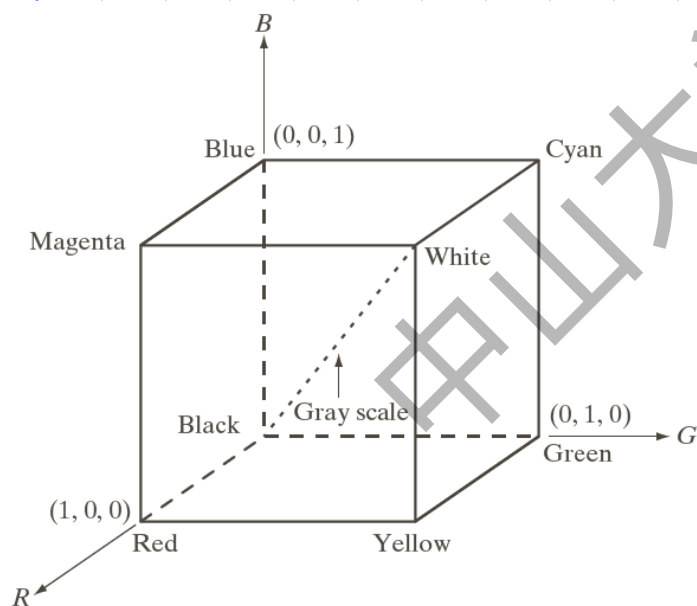


FIGURE 6.8 RGB 24-bit color cube.

二.彩色模型

RGB

CMY和CMYK

HIS(HSB)

R通道为纯色

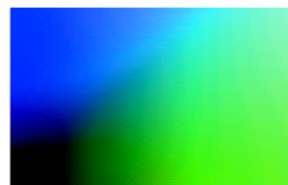
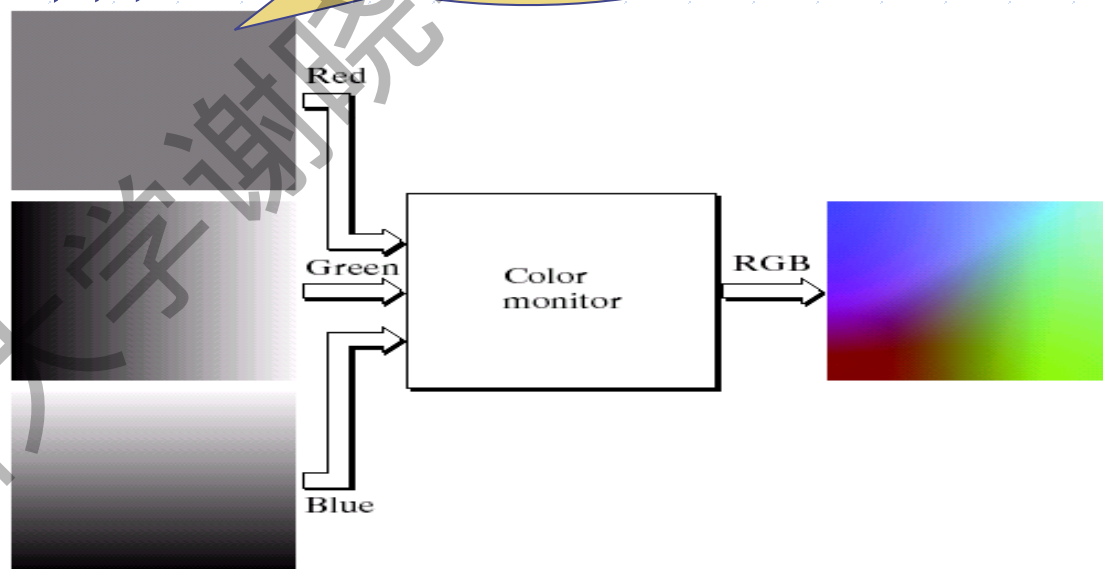
前面立方体的其中一个面

a
b

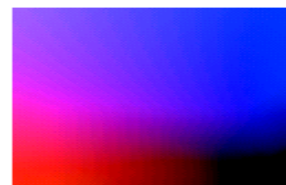
FIGURE 6.9

(a) Generating the RGB image of the cross-sectional color plane (127, G , B).

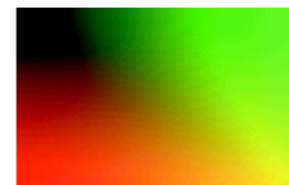
(b) The three hidden surface planes in the color cube of Fig. 6.8.



($R = 0$)



($G = 0$)

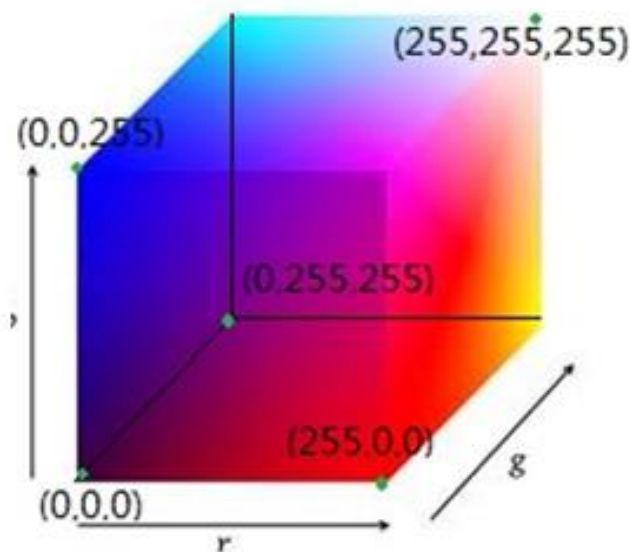
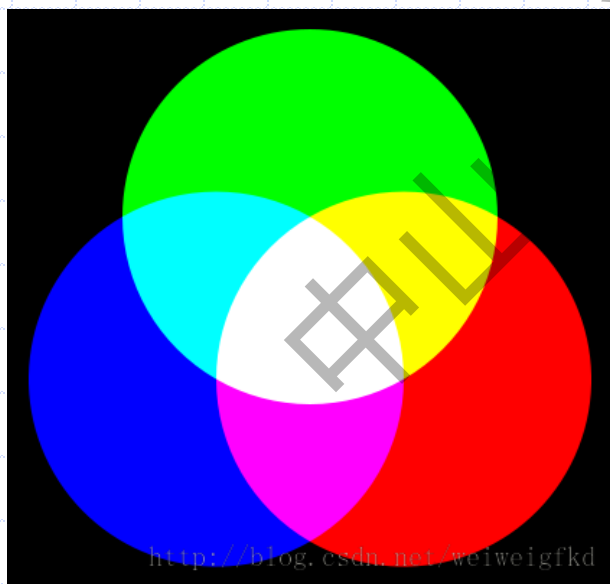


($B = 0$)

二.彩色模型

◆ RGB

- 基于物体发光定义（适合于显示设备）；
- 基于笛卡尔坐标系；
- RGB取值与所生成的颜色之间的联系并不直观；



2. CMY和CMYK模型(面向打印)

充满颜色时，为黑色；没有颜色时，为白色。

使用RGB的补色做基本色：青（Cyan）、品红（Magenta）和黄（Yellow）。

$C(\text{青}) = W(\text{白}) - R(\text{红})$

$M(\text{品红}) = W(\text{白}) - G(\text{绿})$

$Y(\text{黄}) = W(\text{白}) - B(\text{蓝})$

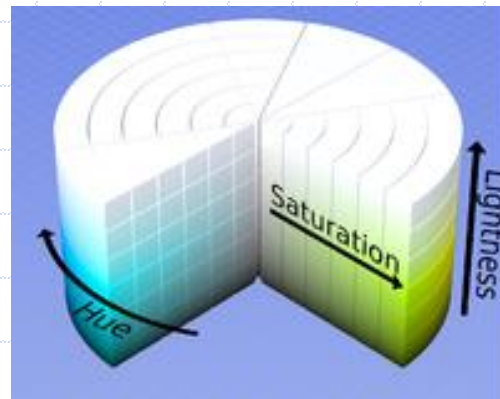
CMYK是印刷业的标准，在印刷时，用这种方法显示黑色时，油墨很少能将颜色都吸收掉，深色效果较差，故加入一种黑色K。

3.HSI彩色模型（更符合人类对颜色的理解）

H (Hue) 色调指光的颜色，如赤、橙、黄、绿、青、蓝、紫为基色调。它是以单一波长得到的成分。

S (Saturation) 饱和度指色彩纯度的程度，加入的白光越多就饱和度越低。

I (Intensity) 亮度指彩色光对人眼引起的光刺激强度，它与光的能量有关。



- 两个特点：
 - I分量与图像的彩色信息无关
 - H和S分量与人感受颜色的方式是紧密相连的
- 将亮度(I)与色调(H)和饱和度(S)分开,避免颜色收到光照明暗(I)等条件的干扰,仅仅分析反映色彩本质的色调和饱和度
- 广泛用于计算机视觉、图像检索和视频检索

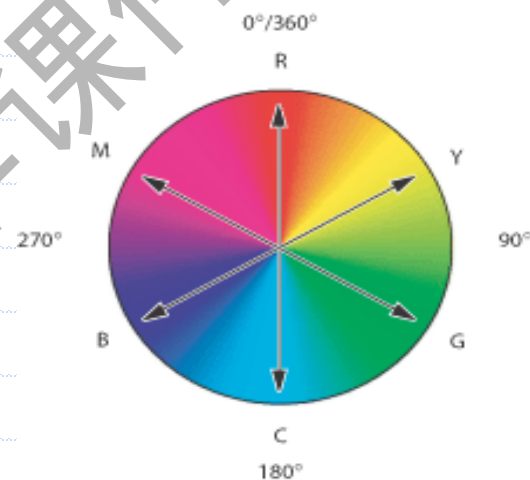
从RGB到HIS的彩色转换

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

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

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

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



色轮 R. 红 Y. 黄 G. 绿
C. 青 B. 蓝色 M. 洋红

从HSI到RGB的彩色转换

$$0^{\circ} \leq H < 120^{\circ}$$

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

$$120^{\circ} \leq H < 240^{\circ}$$

$$H = H - 120^{\circ}$$

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

$$240^{\circ} \leq H < 360^{\circ}$$

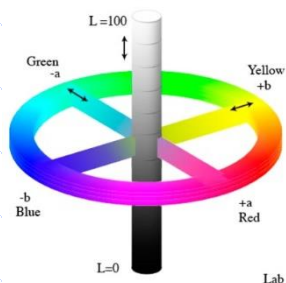
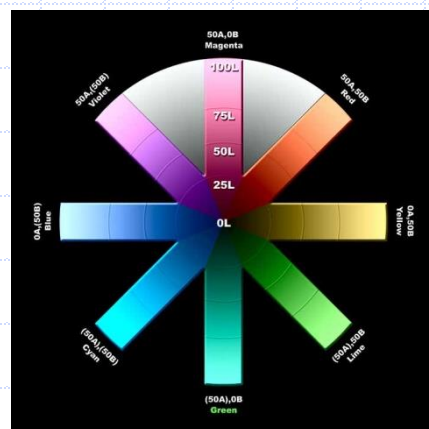
$$H = H - 240^{\circ}$$

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

颜色空间

◆ $L^*a^*b^*$

- L :亮度; a 的正数代表红色, 负端代表绿色; b 的正数代表黄色, 负端代表蓝色;
- 由CIE(国际照明委员会)制定;
- 可以表示自然界中任何色 (比RGB空间大);
- 常用于计算机色调调整和彩色校正;
- 独立于设备的彩色模型实现
- 在RGB与 $L^*a^*b^*$ 之间没有转换的简单公式(Why?)



三.伪彩色处理

什么叫伪彩色图像处理?

- ✓ 也叫假彩色图像处理
- ✓ 根据一定的准则对灰度值赋以彩色的处理
- ✓ 区分：伪彩色图像、真彩色图像、单色图像

为什么需要伪彩色图像处理?

- ✓ 人类可以辨别上千种颜色和强度
- ✓ 只能辨别二十几种灰度

1.强度分层

把一幅图像描述为三维函数 $(x, y, f(x, y))$

分层技术：放置平行于 (x, y) 坐标面的平面

每一个平面在相交区域切割图像函数

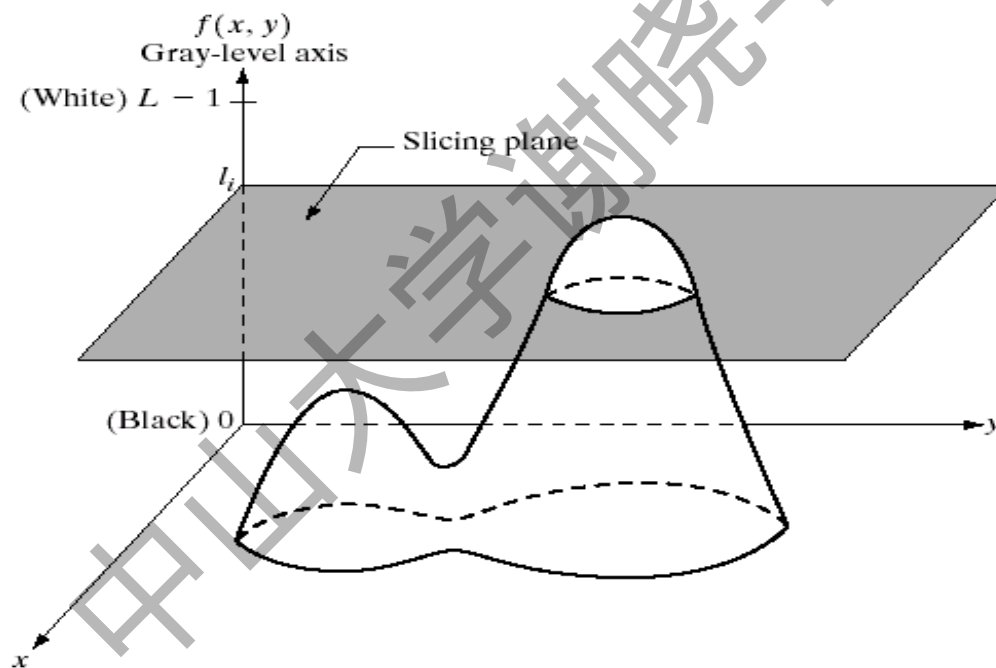


FIGURE 6.18 Geometric interpretation of the intensity-slicing technique.

2.强度分层技术

令 $[0, L-1]$ 表示灰度级，使 I_0 代表黑色 ($f(x, y)=0$)

I_{L-1} 代表白色 ($f(x, y)=L-1$)。假设垂直于强度轴的 P 个平面定义为量级 I_1, I_2, \dots, I_P 。 $0 < P < L-1$ ， P 个平面将灰度级分为 $P+1$ 个间隔， V_1, V_2, \dots, V_{P+1} ， 则灰度级到彩色的赋值关系：

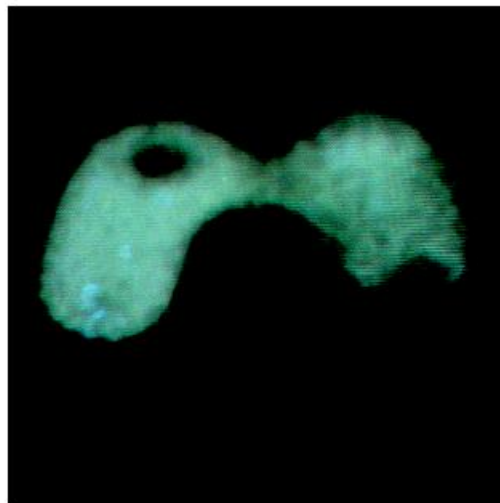
$$f(x, y) = c_k \quad f(x, y) \in V_k$$

c_k 是与强度间隔 V_k 第 k 级强度有关的颜色

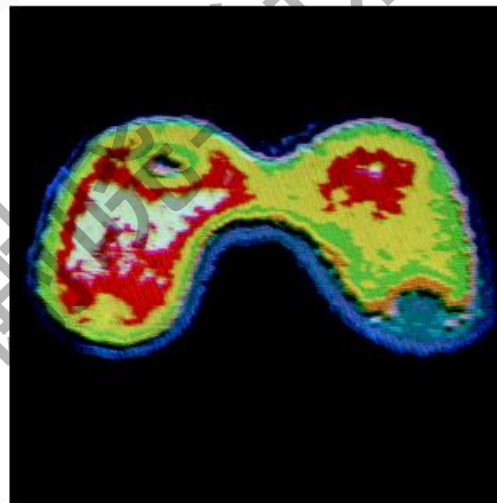
V_k 是由在 $I=k-1$ 和 $I=k$ 分割平面定义的

例：甲状腺模型

单色图像



强度分层结果，8个
彩色区域



a b

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.)

左图的恒定强度难以区分病变，右图强度分层结果，
清楚的显示恒定强度的不同区域

3. 灰度级到彩色转换

- 对任何输入像素的灰度级执行3个独立变换
- 3个变换结果分别送入彩色监视器的红、绿、蓝三个通道
- 产生一幅合成图像

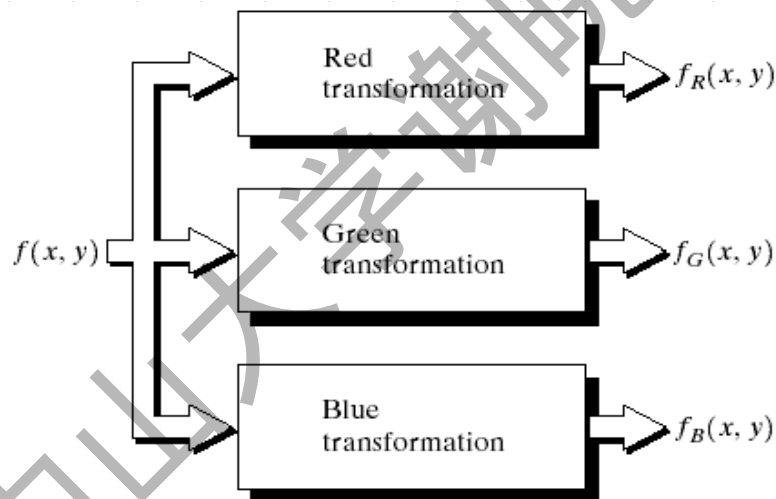


FIGURE 6.23 Functional block diagram for pseudocolor image processing. f_R , f_G , and f_B are fed into the corresponding red, green, and blue inputs of an RGB color monitor.

四.全彩色图像处理基础

全彩色图像处理研究分为两大类:

- ◆ 分别处理每一分量图像, 然后, 合成彩色图像
- ◆ 直接对彩色像素处理: 3个颜色分量表示像素向量。令 c 代表RGB彩色空间中的任意向量

$$c = \begin{bmatrix} c_R \\ c_G \\ c_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}$$

五.彩色变换

- 彩色变换函数

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

$f(x, y)$ 是彩色输入图像

$g(x, y)$ 是变换或处理过的彩色输出图像

T 是在空间领域 (x, y) 上对 f 的操作

1.彩色变换的简单形式

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

r_i 和 s_i 是 $f(x, y)$ 和 $g(x, y)$ 在任何点处彩色分量的变量 $\{T_1, T_2, \dots, T_n\}$ 是一个对 r_i 操作 s_i 产生的变换或彩色映射函数集选择的彩色空间决定 n 的值, 如 RGB 彩色空间, $n=3$, r_1, r_2 和 r_3 表示红、绿、蓝分量; CMYK, 则 $n=4$



Full color

草莓和咖啡杯的彩色图像



Cyan



Magenta



Yellow



Black

CMYK图像，可知草莓由深红和黄组成



Red



Green



Blue

RGB图像



Hue



Saturation



Intensity

HSI图像

2. 补色

补色：在如图所示的彩色环上，与一种色调直接相对立的另一色调称为补色。

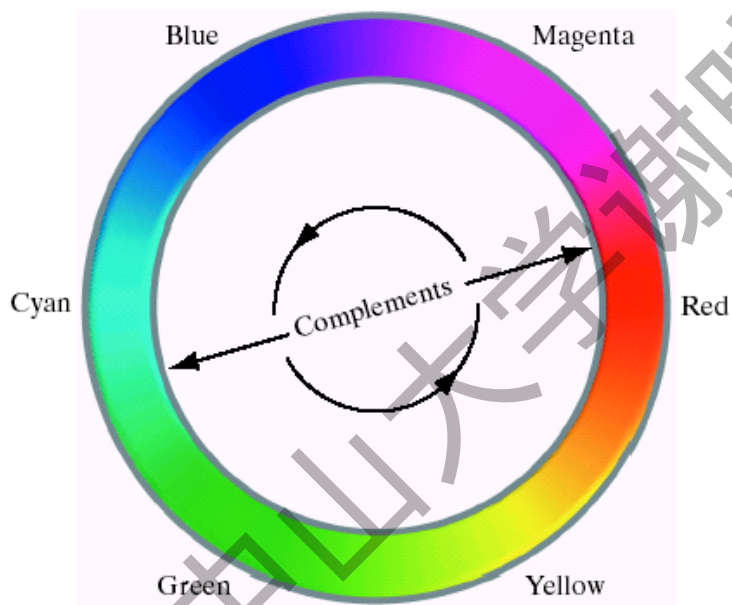
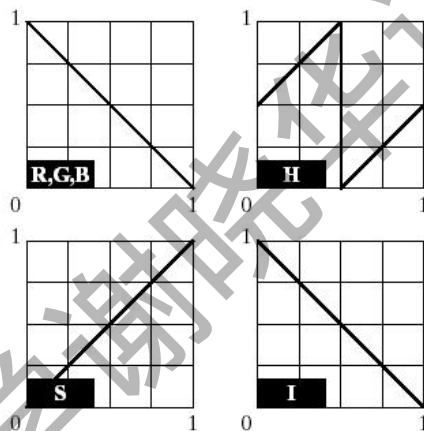


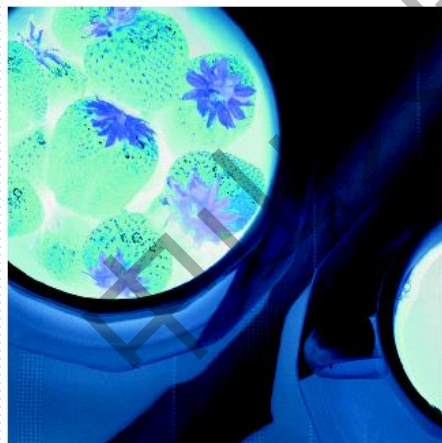
FIGURE 6.32
Complements on
the color circle.

作用：增强嵌在彩色图像暗区的细节

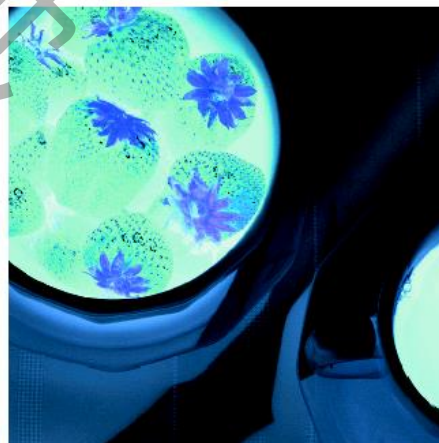
原图



RGB
补图



HSI
补图



灰度变换

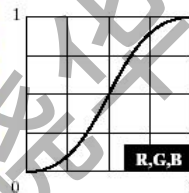
平淡



Flat



Corrected



增强对比度，
亮的更亮，暗的更暗

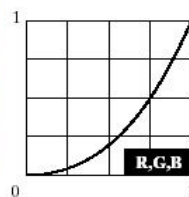
亮



Light

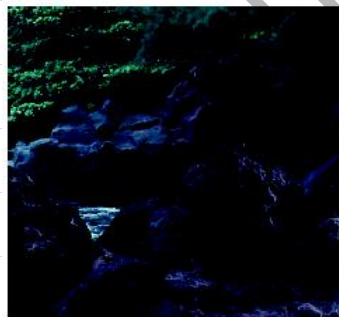


Corrected



变暗

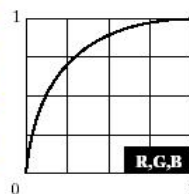
暗



Dark



Corrected



变亮

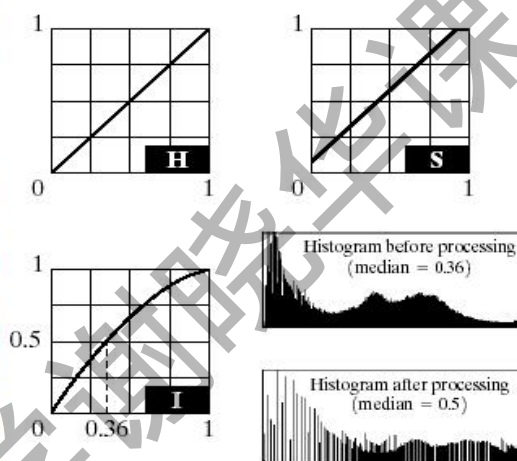
直方图均衡

单独对彩色图像的分量进行直方图均衡将产生不正确的彩色



转到HIS空间，
保持H不变

原图



a b
c d

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

直方图均衡



饱和度调整

六.平滑和尖锐化

1.彩色图像平滑

令 s_{xy} 表示在**RGB**彩色图像中定义一个中心在 (x, y) 的邻域的坐标集，在该邻域中**RGB**分量的平均值为

$$\bar{c}(x, y) = \frac{1}{K} \sum_{(x, y) \in s_{xy}} c(x, y)$$
$$\bar{c}(x, y) = \begin{bmatrix} \frac{1}{K} \sum_{(x, y) \in s_{xy}} R(x, y) \\ \frac{1}{K} \sum_{(x, y) \in s_{xy}} G(x, y) \\ \frac{1}{K} \sum_{(x, y) \in s_{xy}} B(x, y) \end{bmatrix}$$

例：LENA图片平滑效果（ 5×5 平均模板）

原始彩色图像



红分量图像



绿分量图像



蓝分量图像



RGB图像平滑结果

平滑亮度分量，并转换到RGB图像显示 (a)-(b)表两者不同

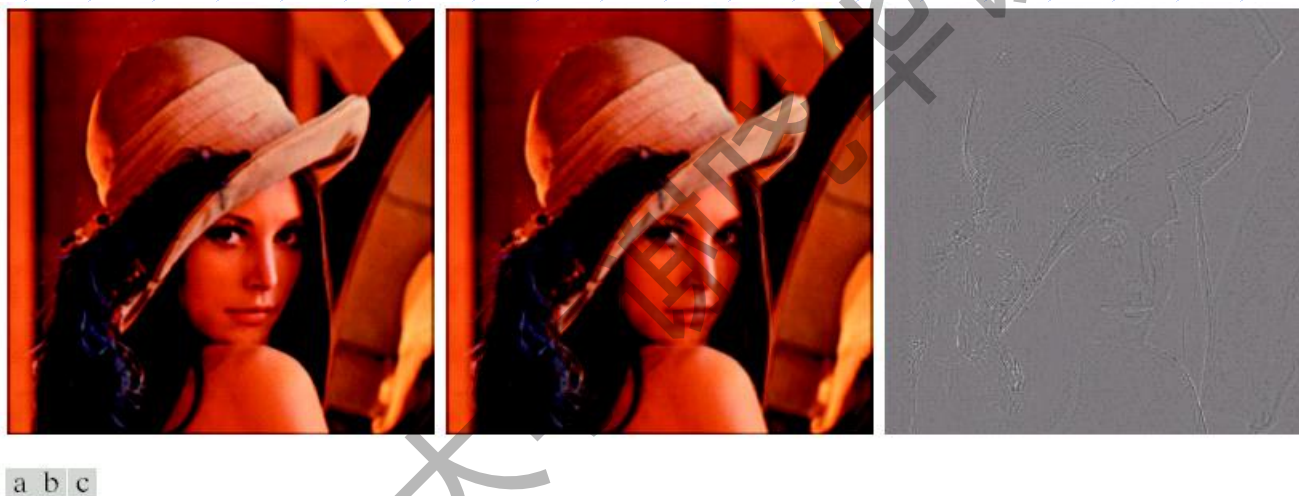


FIGURE 6.40 Image smoothing with a 5×5 averaging mask. (a) Result of processing each RGB component image. (b) Result of processing the intensity component of the HSI image and converting to RGB. (c) Difference between the two results.

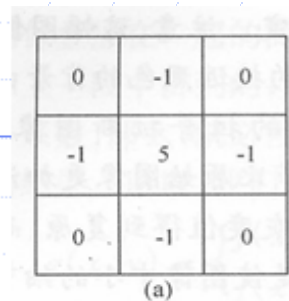
两者不同的原因：图a像素的平均是不同彩色的平均，而图b仅仅是亮度的平均，原彩色（色调H和饱和度S）保持不变

2.彩色图像的锐化

RGB彩色空间，分别计算每一分量图像的拉普拉斯变换，再合并

拉普拉斯算子的核

$$\nabla^2 [c(x, y)] = \begin{bmatrix} \nabla^2 R(x, y) \\ \nabla^2 G(x, y) \\ \nabla^2 B(x, y) \end{bmatrix}$$



0	-1	0
-1	5	-1
0	-1	0

(a)

$$\begin{aligned} g(x, y) &= f(x, y) - \nabla^2 f(x, y) \\ &= f(x, y) - [f(x+1, y) + f(x-1, y) + f(x, y+1) + f(x, y-1)] + 4f(x, y) \\ &= 5f(x, y) - [f(x+1, y) + f(x-1, y) + f(x, y+1) + f(x, y-1)] \end{aligned}$$

RGB锐化，造成
HS的改变

只对I处理，得到相似
的Sharp效果

(a)-(b)表两者不同的



a b c

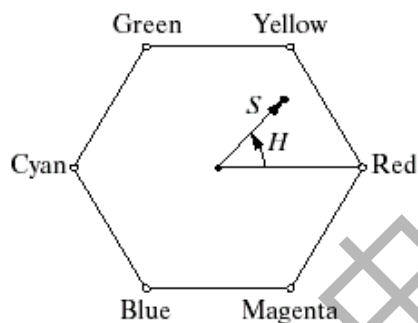
FIGURE 6.41 Image sharpening with the Laplacian. (a) Result of processing each RGB channel. (b) Result of processing the intensity component and converting to RGB. (c) Difference between the two results.

七.彩色分割

- HSI彩色空间分割——直观（专注于特定属性）
 - H色调图像方便描述彩色
 - S饱和度图像做模板分离感兴趣的特征区
 - I强度图像不携带彩色信息
- RGB彩色空间——直接（所见即所得），结果更好

1.HSI彩色空间分割

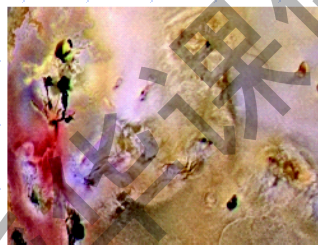
门限产生的二值图像：
饱和度图像中门限值等于
最大饱和度的10%，大于门
限的像素赋1，其它赋0



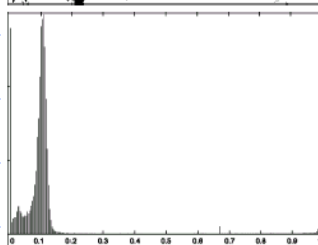
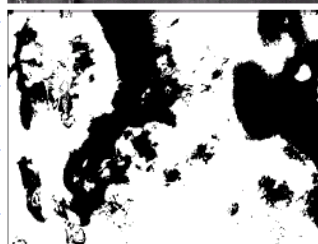
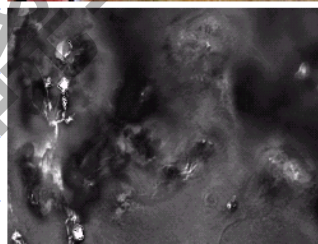
门限产生的二值图像

色调模板的直方图

原图



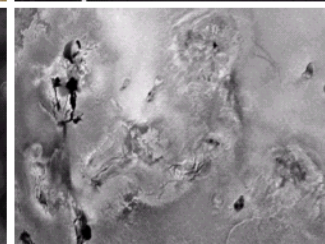
S图



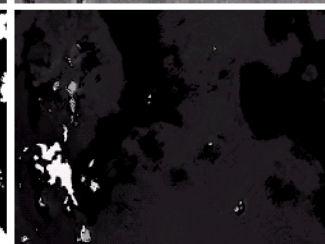
H图



I图



色调模板



原图分割



2.RGB彩色空间分割

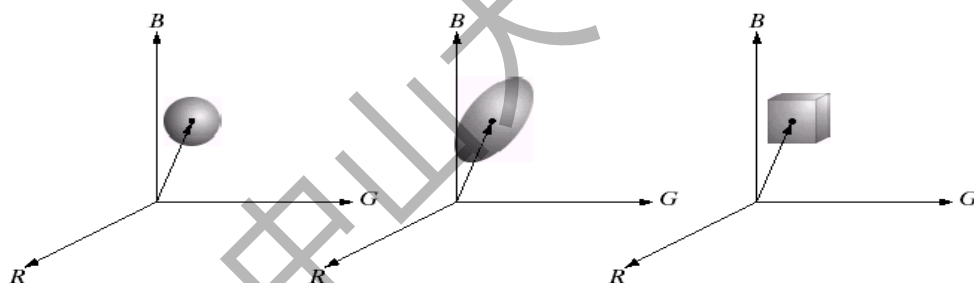
令 z 代表RGB空间中的任意一点， a 是分割颜色样本集的平均颜色向量

$$D(z, a) = \|z - a\| = \sqrt{(z_R - a_R)^2 + (z_G - a_G)^2 + (z_B - a_B)^2}$$

D_0 是距离（欧氏距离）阈值

如果 $D(z, a) \leq D_0$, 则 z 和 a 相似

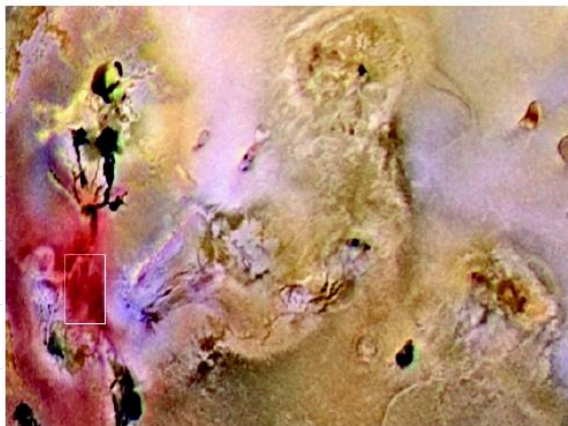
如果 $D(z, a) > D_0$ 则 z 和 a 不相似



a b c
FIGURE 6.43
Three approaches
for enclosing data
regions for RGB
vector
segmentation.

为了节省计算量采用边界盒的折中方案

例：RGB分割效果



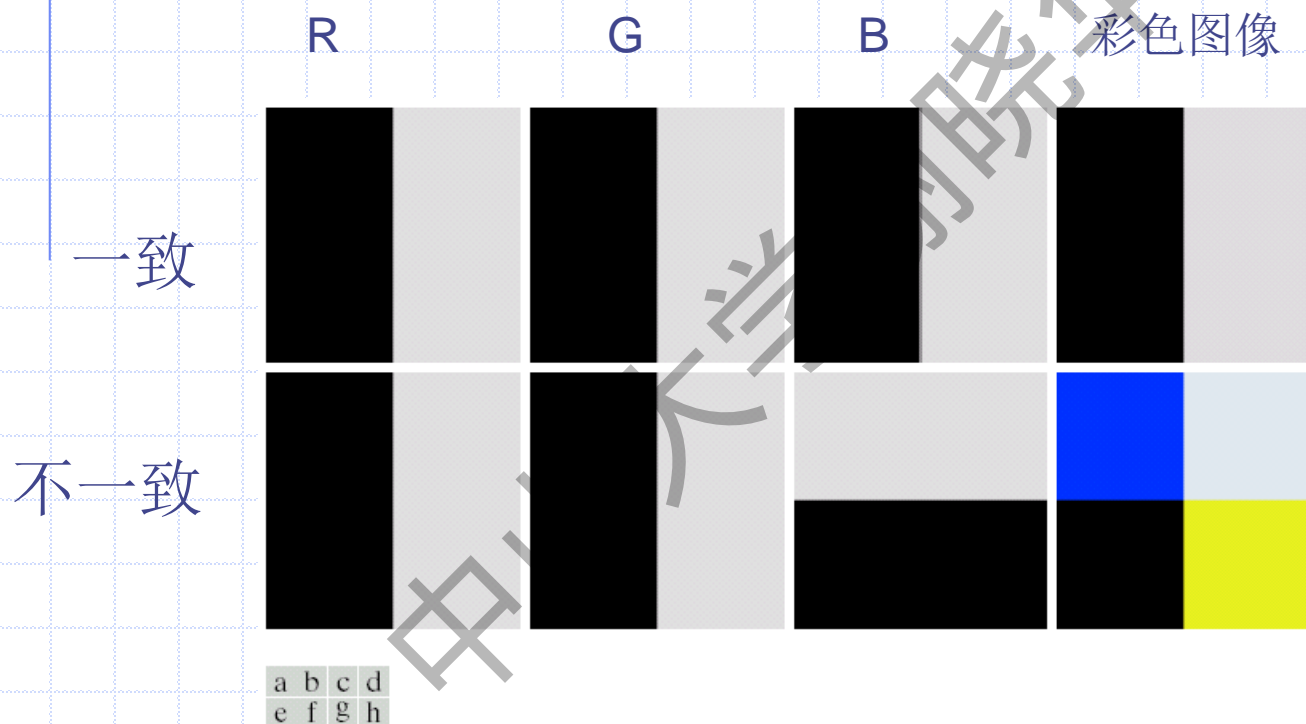
RGB分割效果



HSI分割效果

3.彩色边缘检测

处理3个独立平面形成的合成梯度图（交集）可导致错误的结果！



$$\text{黄} = R + G$$

Di Zenzo提出的直接在颜色空间（不分通道）计算梯度的处理方法

定义

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

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

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

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

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

$C(x,y)$ 的最大
变化率方向:

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

最大变化率: $F(\theta) = \left\{ \frac{1}{2} [(g_{xx} + g_{yy}) + (g_{xx} - g_{yy}) \cos 2\theta + 2g_{xy} \sin 2\theta] \right\}^{\frac{1}{2}}$