

# 第六章 彩色图像处理

## 6.1 彩色基础

- 人和某些其他动物感知物体是由物体反射光的性质决定的。物体反射的光若在所有可见光波长范围内是平衡的，那么对观察者来说显示为白色；当一个物体反射有限的可见光谱时，则呈现某种颜色。
- 光的特性是色彩学的核心，如果光是无色的，那么其属性仅是亮度和数值。它是迄今为止我们对图像处理的讨论的隐含分量；术语灰度级仅提供了一个亮度的标量度量，它的范围从黑色到灰色到白色。
- 彩色光大约覆盖电磁波谱中 400~700 nm 的范围，用来描述彩色光源质量的 3 个基本量是辐射、光强和亮度（这一点与前文描述的相同）。
- 人眼中的锥状细胞负责彩色视觉的传感器；试验表明，人体中的锥状细胞分为三个主要的感知类别，分别对应于红色、绿色和蓝色，分别占比 65%、33%、2%（但是蓝色锥状细胞最敏感）。
- CIE 制定了如下特定波长值为三原色（事实上为 CIE 基色，不是普遍认为的该颜色）：蓝色  $\lambda_b = 435.8\text{nm}$ ，绿色  $\lambda_g = 546.1\text{nm}$ ，红色  $\lambda_r = 700\text{nm}$ ；当然事实上，没有单一的颜色可称为红色、绿色或蓝色，如图 32 所示。另外，应记住为标准化目的而定的三个特定原色波长，并不意味着这三个固定的 RGB 分量作用就能产生所有谱。
- 原色学家可以产生二次色，光的原色与颜料或着色剂之间的区别很重要（如图 33 所示），后者的原色定义为减去或吸收光的一种原色，并反射或传输其他两种原色；因此颜料的原色是深红色（吸收绿色，反射传输红色+蓝色=深红色）、青色（吸收红色，反射传输绿色+蓝色）、黄色（吸收蓝色，反射传输红色+绿色），而二次色是红色、绿色和蓝色。适当混合三种颜料原色，或混合二次色与其对立的颜色，即可产生黑色。

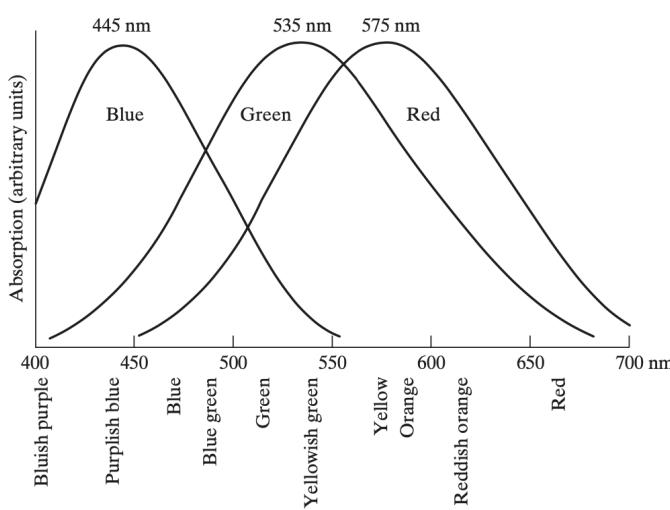


图 32

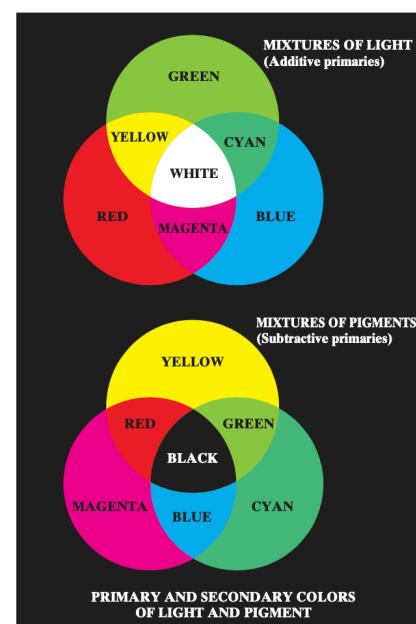


图 33

- 如图 33 所示，光的混合是原色相加，而色彩的混合是原色相减（由于混合后，吸收颜色变多）。
- 数字显示的基础是单个像素三色组坐标寻址能力（平面上二维坐标+三色组坐标）。
- 通常以区别不同颜色特性的是亮度、色调和饱和度。亮度具体表达了无色的强度概念；色调是光波

混合中与主波长有关的属性，表示观察者感知的主要颜色，我们说一个物体呈现“红色”时，描述的是其色调。饱和度指的是相对纯净度，或一个色调混合的白光量。纯谱色是全饱和的。如粉色（红加白）和淡紫色（紫加白）这样的色调是欠饱和的，饱和度与所加白光的数量成反比。

**色度：**色调与饱和度一起称为色度，因此，颜色可用其亮度和色度来表征。形成任何特殊彩色的红、绿、蓝的数量称为三色值，并分别表示为  $X, Y, Z$ 。这样，一种颜色就可由其三色值系数定义为：

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

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

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

容易发现， $x + y + z = 1$ 。对可见光谱内的光任何波长，用于产生对应于该波长颜色所需的三色值，可直接从大量试验结果编制的曲线或表中得到。确定颜色的另一种方法是用 CIE 色度图（如图 34 所示），该图以  $x$  和  $y$ （红，绿）的函数表示颜色的组成，对于  $x, y$  的任何值，相应的  $z$  值可由  $z = 1 - x - y$  得到。图 34 中标记为绿色的点大约有 62% 的绿色和 25% 的红色成分以及 13% 的蓝色成分。从 380 nm 的紫色到 780 nm 的红色的各种谱色的位置，标在舌形色度区域的边界上。这些都是具有固定波长的纯色。任何不在边界上而在色度图内部的点，都表示铺色的混合色。图 34 的等能量点与白光对应，即白光的 CIE 标准，饱和度为 0；因此，色度图边界上的任何点都是全饱和的；当一点离开边界并接近等能量点时，该颜色中就加入了更多的白光，就变成欠饱和的颜色。

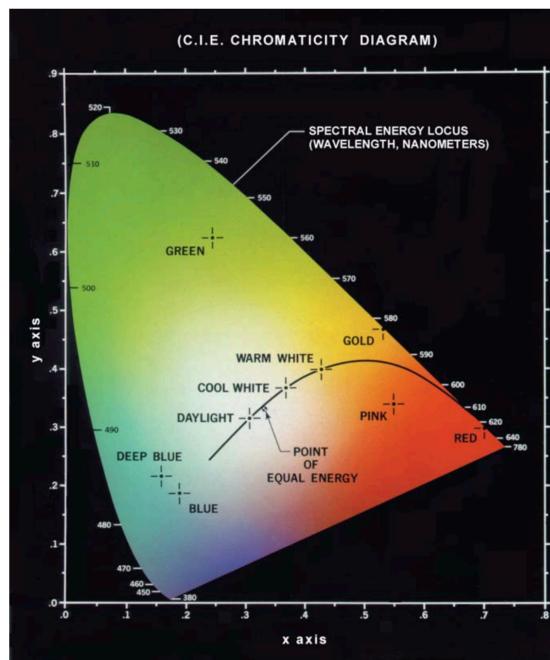


图 34

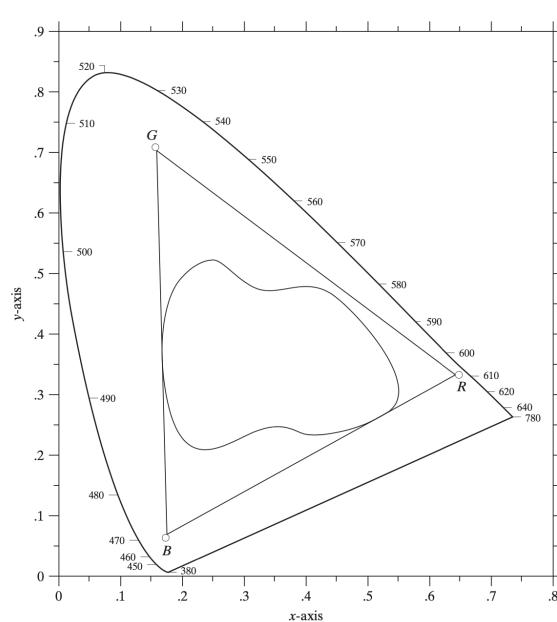


图 35

色度图对色彩混合非常有用，因为色度图中连接任意两点的直线段定义了所有可由这两种颜色加性组合得到的不同颜色的变化，这些颜色可以由这两种颜色的加性组合得到。容易把这一过程扩展到三种颜色，连接而成的三角形即为三种颜色加性组合得到的不同颜色的变化，因此以任意固定颜色为定点的三角形无法包围图 34 的舌形区域，也就是说三个单一、固定的原色无法得到所有原色。

**【注】理解：**波长并不满足加法条件，并且可能存在一些混合光包含许多波长，因此定义颜色空间来简化颜色表示，同时得到“连线定义加性组合的所有颜色”的结论。

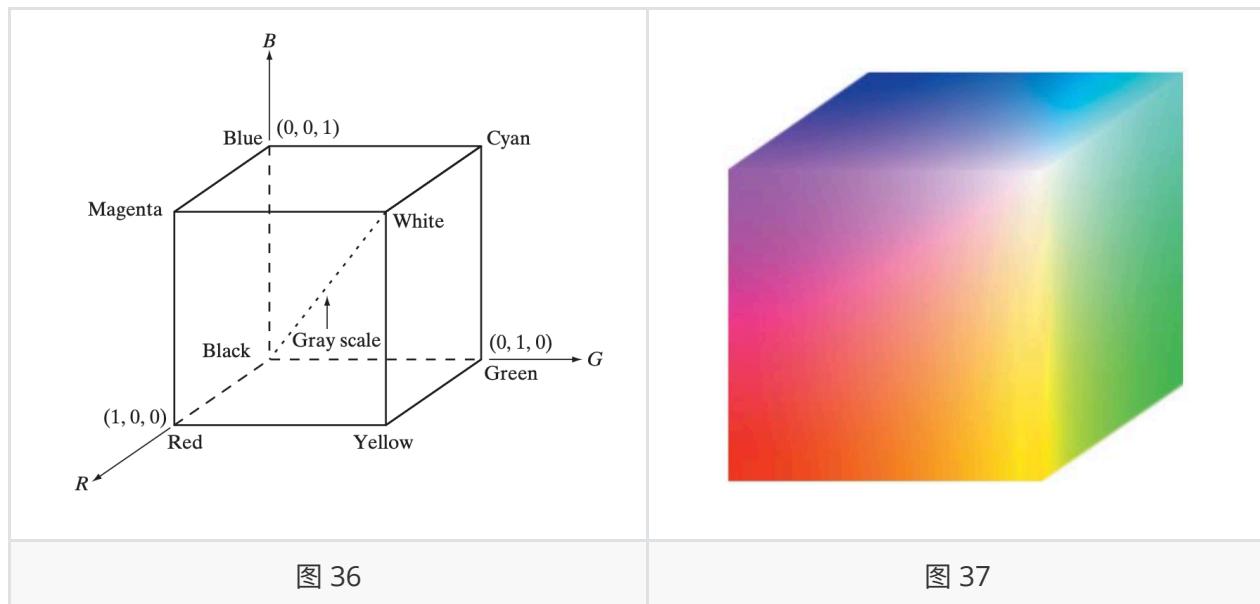
【注】图 34 的绿色并不是前文所说三原色中的绿色，前文的绿色在舌形区域边界上。

**彩色全域：**图 35 中的三角形显示了 RGB 监视器产生的典型颜色范围（这里的 RGB 与 CIE 三基色又不相同），称为彩色全域。三角形内的不规则区域是今天高质量彩色打印设备的代表性彩色域。彩色打印设备的彩色域的边界是不规则的，因为彩色打印为相加色彩与相减色彩的混合，与监视器上显示颜色相比，是一个更难以控制的过程（监视器是用三个高度可控的原色光相加而成）。

## 6.2 彩色模型

**彩色模型**（彩色空间，彩色系统）的目的是，在某些标准下用通常可以接受的方式方便地对彩色加以说明，本质上，彩色模型是坐标系统和子空间的说明，其中，位于系统中的每种颜色都由单个点表示。数字图像处理中，通用的模型有面向硬件的 RGB（红、绿、蓝）模型、用于彩色打印机的 CMY（青、深红、黄）和 CMYK 模型（青、深红、黄、黑），HSI 模型（色调、饱和度、亮度）。HSI 模型更符合人描述和解释颜色的方式，同时可以接触图像中颜色和灰度信息的联系，使其更适合本书中给出的许多灰度处理技术。

**RGB 彩色模型：**在 RGB 彩色模型中，每种颜色出现在红、绿、蓝的原色光谱成分中。该模型基于笛卡尔坐标系，所考虑的彩色子空间是图 36 所示的立方体。其中 RGB 原色值位于三个角上，二次值青、深红、黄位于另外三个角，黑色位于远点处，白色位于离远点最远的角上。灰度（RGB 值相等的点）沿着连接这两点的直线从黑色延伸到白色。该模型中不同颜色是位于立方体像姑娘的或立方体内部的点，且由自原点延伸的向量定义。为方便，所有颜色值均归一化，且 RGB 值限定在  $[0, 1]$  中。



- 在 RGB 彩色模型中表示的图像由 3 个分量图像组成，每个原色一幅分量图像。当送入 RGB 监视器时，3 幅图像在屏幕上混合生成一幅合成的彩色图像。在 RGB 空间中，表示每个像素的比特殊称为像素深度；考虑 RGB 图像其中每幅红、绿、蓝图像都是一幅 8 比特图像，在这种条件下，每个 RGB 彩色像素有 24 比特的深度。
- **全彩色图像：**表示一幅 24 比特的 RGB 彩色图像；24 比特彩色立方体如图 37 所示。
- **稳定 RGB 色集合：**虽然高端显示卡和监视器提供 24 比特 RGB 图像的合理彩色再现，但今天所用的许多系统（以及应用）仍限于 256 种颜色；此外一些应用中，使用更多颜色是没有意义的。考虑到当前应用的各种系统，获得一种有可能被如实再现，并且独立于观察器硬件性能的一个色彩子集是相当重要的，这种色彩子集被称为**稳定 RGB 色集合**，或**全系统稳定色集合**；在互联网应用中，称为**稳定 Web 色**或**稳定浏览器色**。

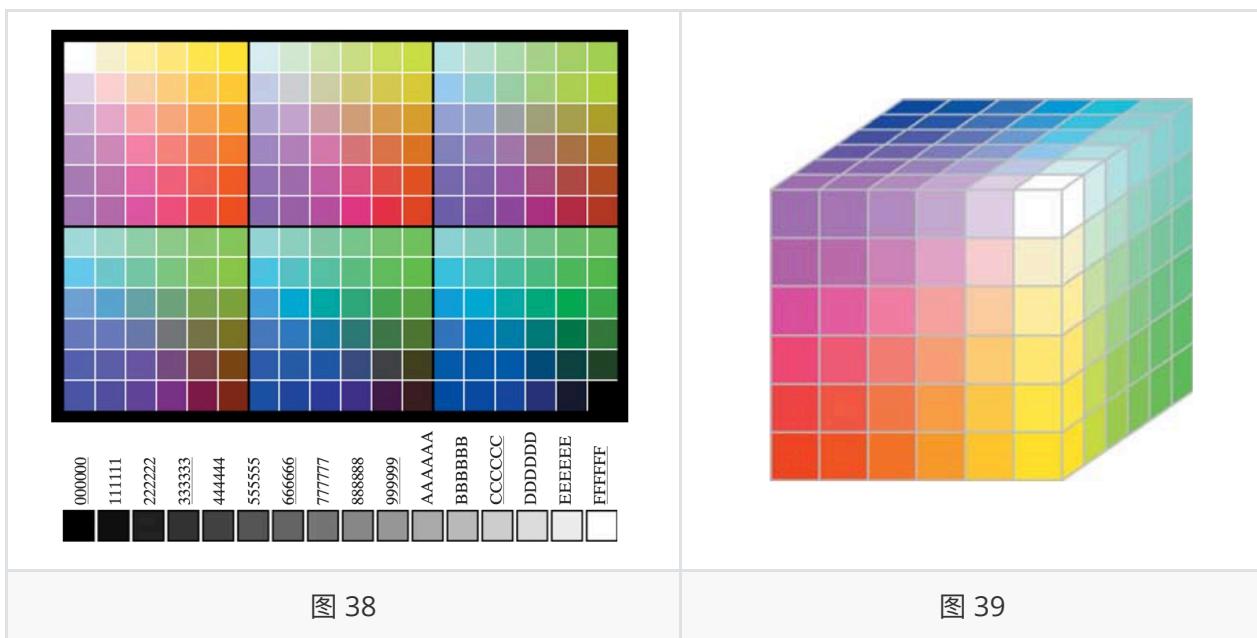
- 假设 256 种颜色是可以被任何能显示期望结果的系统如实再现的最小颜色数，那么使用公认的标准符号来表示这些颜色是很有用的。已知 256 种颜色中的 40 种颜色可被各操作系统进行处理，剩下 216 种颜色是多数系统通用的；这 216 种颜色已经成为稳定色的实际标准。这 216 种颜色中，每种都可以由 3 个 RGB 值形成，但每个值只能是 0, 51, 102, 153, 204 或 255。这样，RGB 三元组就能提供  $6^3 = 216$  种不同的颜色（上述所有值都能被 3 整除，且都是 51 的倍数）。以上 6 个数的 16 进制分别为 00, 33, 66, 99, CC, FF。所以我们可以采取 6 位 16 进制来表示该颜色。如：

FF0000 表示纯净的红色；

000000 表示黑色；

FFFFFF 表示白色。

- 图 38 显示了按 RGB 值降序排列的 216 种稳定色。第一个阵列第一行左上角方块值为 FFFFFF，然后为 FFFFCC 与 FFFF99，该阵列中最后一个方块为 FF0000（可能是最亮的红色）；然后第二个阵列从 CCFFFF 开始，以此类推。图 38 下方显示了 256 色 RGB 系统中所有可能灰色的 16 进制代码，这些值的一部分在稳定色集的外面，但可被多数显示系统（根据它们相对亮度）适当地表示，来自稳定色组的灰度用下划线表示。
- 图 39 显示了 RGB 稳定色立方体，相当于图 37 立方体被切分成  $6^3 = 216$  块。

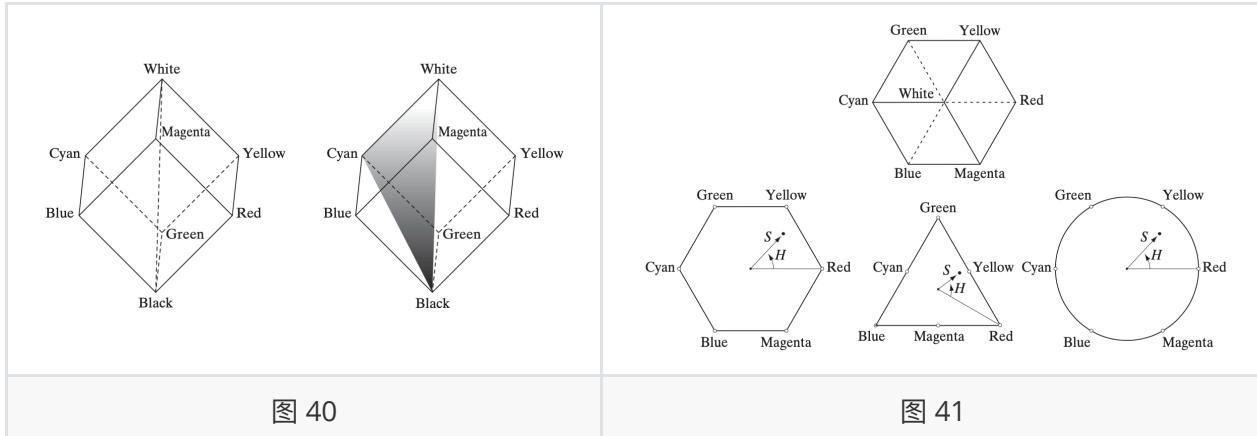


**CMY 和 CMYK 彩色模型：**由于青色、深红色、黄色是光的二次色，即颜料的原色，只吸收一种光；因此现在纸上沉积彩色颜料的设备，如彩色打印机和复印机，要求输入 CMY 数据或在内部进行 RGB 到 CMY 的转换。这一转换通过下面操作执行：

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

这里假设所有彩色值都归一化到了区间  $[0, 1]$  中；事实上，通过 1 减去 CMY 值也能很容易得从 CMY 得到 RGB 值；但是由于 CMY 一般用于产生硬拷贝输出，因此反向操作通常没有实际意义。等量的颜料原色（即深红色、青色和黄色）可以生成黑色，但事实上，为打印目的组合的这些颜色所产生的黑色是不纯的。因此，为了生成真正的黑色（打印中起作用的颜色），就加入了第 4 种颜色黑色，提出了 CMYK 彩色模型。出版商提到“四色打印”，指的就是彩色模型的三种原色加上黑色。

**HSI 彩色模型：**观察彩色物体时，我们用其色调、饱和度和亮度来描述这个物体。色调描述的是一种纯色的颜色属性，而饱和度是一种纯色被白光稀释程度的度量；亮度是主管描述量，无法度量，但是我们可以用强度（灰度级）来替代之，这个量是可度量的。于是我们提出色调、饱和度以及强度的 HSI 模型。HSI 模型是开发基于彩色描述的图像处理方法的理想工具。



- 强度分量：**找到一个垂直于强度轴（黑色-白色点的连线）并包含该彩色点的平面，则该平面与强度轴的交点的值即为  $[0, 1]$  内表转化的强度值，如图 40 所示。
- 色调分量：**包含在强度轴与立方体边界定义的平面段内的所有点，都有着相同的色调（在图 40 右图中为青色）。
- 饱和度分量：**HSI 空间由一个垂直强度轴和位于该轴垂直的平面内的彩色点轨迹表示。当平面沿强度轴上下移动时，由每个面与立方体的表面构成的横截面定义的边界不是三角形就是六边形。沿灰度轴往下看，可以看到原色按 120 度（二次色也按 120 度）分隔，如图 41 上图所示。通常（并非总是如此），与红轴的 0 度角指定为 0 色调，从这里开始色调逆时针增长，饱和度（距垂直轴间的距离）是从原点到该点的向量长度  $|\vec{S}|$ ；原点是由该彩色平面的横截面与垂直强度轴来定义的。
- HSI 彩色空间的重要分量是垂直强度轴（强度），到一个彩色点的向量长度（饱和度）以及该向量与红轴的夹角（色调）。HSI 平面可以以六边形、三角形、圆形出现，实际上选择什么形状无关紧要，因为其中任何一个都可以通过几何变换变为其他两种形状。

**RGB 到 HSI 的彩色转换：**首先，强度分量如下式给出。

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

色调分量如下式给出：

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

其中，

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

饱和度分量如下式给出：

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

这里嘉定了 RGB 值归一化道区间  $[0, 1]$  中，并且角度  $\theta$  根据红轴度量。色调可以用得到的结果除以 360 来归一化，其余两个分量已经自动归一化至  $[0, 1]$ 。

**HSI 到 RGB 的彩色转换：**先令  $H$  乘  $360^\circ$ ，色调回到原来区间  $[0^\circ, 360^\circ]$  之间。然后分类：

**1** RG 扇区 ( $0^\circ \leq H < 120^\circ$ )：RGB 分量由以下公式给出：

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

**2** GB 扇区 ( $120^\circ \leq H < 240^\circ$ )：RGB 分量由以下公式给出：

首先，令  $H = H - 120^\circ$ ，然后

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

**3** BR 扇区 ( $240^\circ \leq H < 360^\circ$ )：RGB 分量由以下公式给出：

首先，令  $H = H - 240^\circ$ ，然后

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

**处理 HSI 模式的图像：**可以在 HSI 空间内独立控制色调、饱和度和强度；对于一般图像，也可以先将其转换为 HSI 图像，再对相应分量进行变换，最后变换回 RGB 空间即可。

## 6.3 伪彩色图像处理

**伪彩色图像处理：**也称为假彩色图像处理包含根据特定标准对灰色值赋予颜色。术语伪彩色或假彩色用于区分对单色图像赋予彩色的处理与真彩色图像相关的处理。伪彩色的主要应用是对于担负图像或序列图像中灰度级时间的人类可视化和解释。

**灰度分层**（密度分层、灰度分割）：令  $[0, L - 1]$  表示灰度级，令  $l_0$  表示黑色  $f(x, y) = 0$ ，并令  $l_{L-1}$  表示白色  $f(x, y) = L - 1$ 。假定垂直于灰度轴的  $P$  个平面定义为灰度级  $l_1, l_2, \dots, l_P$ ；然后假定  $0 < P < L - 1$ ； $P$  个平面将灰度分为  $(P + 1)$  个区间  $V_1, V_2, \dots, V_{P+1}$ 。灰度级到彩色赋值根据如下关系进行：

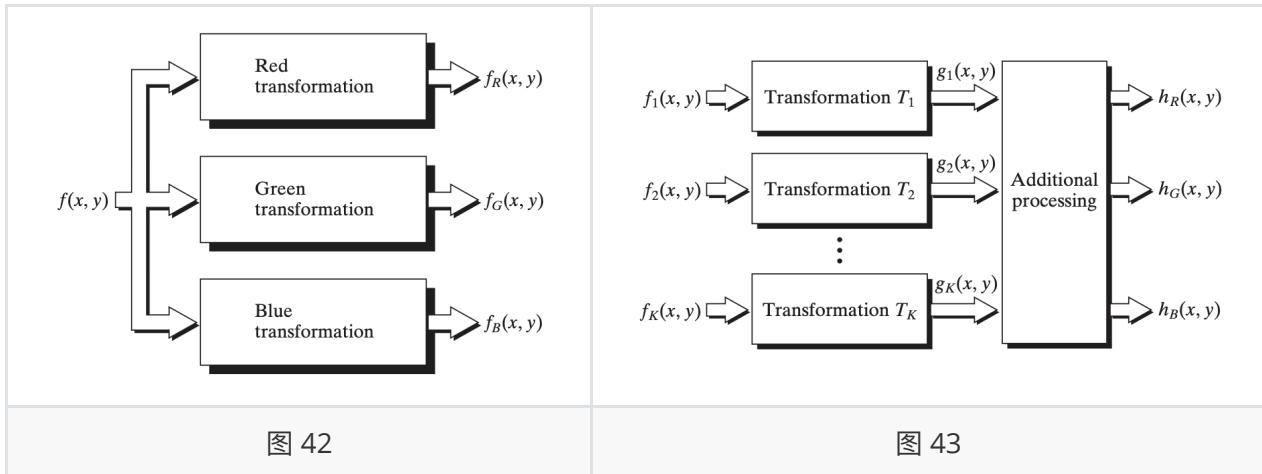
$$f(x, y) = c_k \quad \text{if } f(x, y) \in V_k$$

其中， $c_k$  为与第  $k$  个灰度区间有关的颜色， $V_k$  由位于  $l = k - 1$  和  $l = k$  处分割平面定义。

- 如果所寻找的确切灰度值或灰度值域是已知的，那么灰度分层在可视化方面是简单而有力的辅助手段，涉及大量图像时更是如此。

**灰度到彩色的变换：**对任何输入像素的灰度进行 3 个独立的变换，将 3 个变换的结果分别送入彩色监视器的红、绿、蓝通道。这种方法产生一幅合成图像，合成图像的彩色内容由变换函数的特性调制，如图 41 所示。注意，这些是在图像亮度值上进行的变换，而不是位置的函数。前一节讨论的方法是该技术的特殊情况，灰度级的分段线性函数用来产生颜色。本节讨论的方法是以平滑的非线性函数为基础，这就在技术上提供了较大的灵活性。

- 经常的方法可以将多幅单色图像组合为一幅彩色合成图像。这里，不同的传感器在不同的谱段产生独立的单色图像；附加处理可以是彩色平衡、混合或图像以及以产生图像的传感器响应特性的只是为基础来选择三幅用于显示的图像等技术，如图 43 所示。



- 该处理类型，在复杂图像中对感兴趣物体进行可视化处理的功能很强大，特别是当这些物体超出了我们的正常感知能力（但是能被传感器捕捉）时。

## 6.4 全彩色图像处理基础

**全彩色图像处理：**全彩色图像处理的方法分为两大类：

- 分别处理每一幅分量图像，然后由分别处理的分量图像来形成一幅处理过的合成彩色图像；
- 直接处理彩色像素（看成3个分量的向量）。

令  $\mathbf{c}$  表示 RGB 彩色空间的一个任意向量，即  $\mathbf{c} = [c_R \ c_G \ c_B]^T = [R \ G \ B]^T$ 。我们可以认为彩色分量是坐标  $(x, y)$  的函数，于是

$$\mathbf{c}(x, y) = [c_R(x, y) \ c_G(x, y) \ c_B(x, y)]^T = [R(x, y) \ G(x, y) \ B(x, y)]^T$$

对于大小为  $M \times N$  的图像，有  $MN$  个这样的向量。我们对以  $x$  和  $y$  的公式来表达图像处理技术感兴趣（因为这样可以避免混淆）。同时，每种彩色分量的处理要等同于基于向量的处理，必须满足两个条件：

1. 处理必须对向量和标量都可用；
2. 对向量的每个分量的操作对于其他分量必须是独立的。

## 6.5 彩色变换

**彩色变换：**我们用下式表达彩色变换作为模型。

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

其中， $f(x, y)$  是彩色输入图像， $g(x, y)$  是变换后或处理过的彩色输出图像， $T$  是在  $(x, y)$  的空间邻域上对  $f$  操作的一个算子。在基本变换中，我们仅考虑对单个像素的处理，即形如

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

其中， $r_i$  是彩色向量的分量，RGB 中  $n = 3$ ，CMY(K) 中  $n = 3$  或  $n = 4$ 。假设我们想要改进彩色图像的强度，那么在 HSI 彩色空间中，用如下简单变换即可完成：

$$s_3 = kr_3$$

其中， $s_1 = r_1, s_2 = r_2$ ；而在 RGB 彩色空间中，3 个分量都需要被替换，即

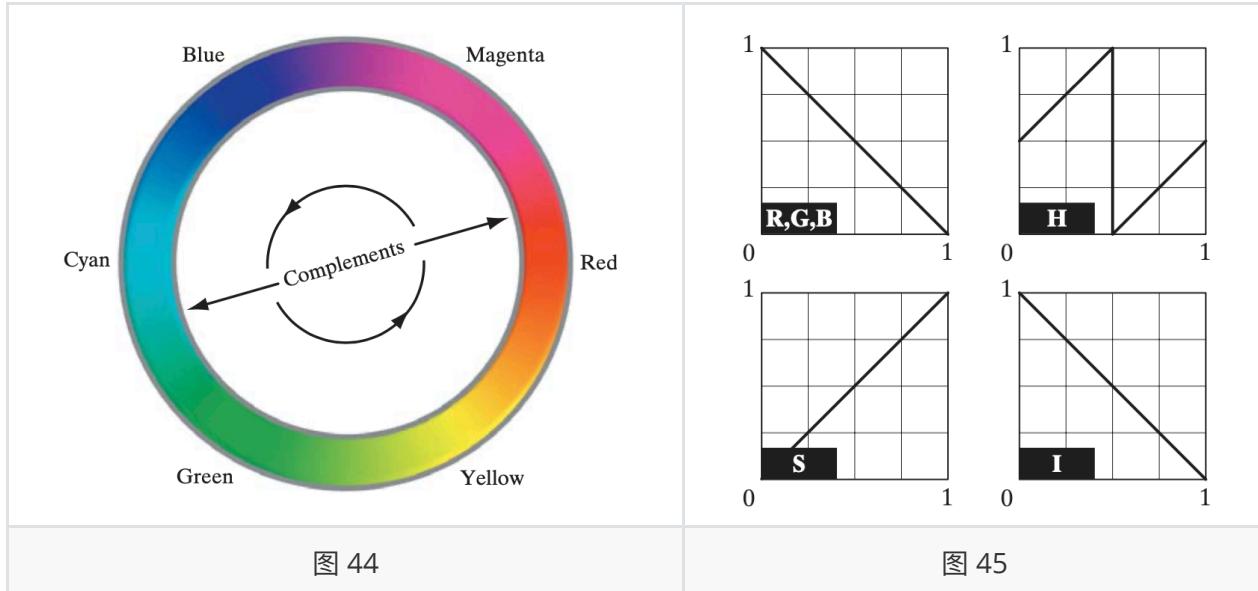
$$s_i = kr_i \quad i = 1, 2, 3$$

在 CMY 空间要求一组类似的线性变换集

$$s_i = kr_i + (1 - k)$$

虽然 HSI 空间操作最简明，但是将图像转为 HSI 空间花费的代价超过直接在当前空间进行计算的代价，因此并不是所有情况下都需要把图片转到 HSI 空间进行操作。上述变换是最简单的变换，只与彩色空间的一个分量相关，即红输出分量  $s_1$  独立于绿输入  $r_2$  和蓝输入  $r_3$ 。下面几种变换就不能以单独的彩色分量为基础进行变换。

**补色：**在如图 44 所示的彩色环上，与色调直接相对的另一端被称为补色。补色对于增强嵌在彩色图像暗区的细节很有用——特别是区域在大小上占优势时。在归一化 RGB 空间内，补色是简单的，只需要简单地令  $s_i = 1 - r_i$  即可，然而其在 HSI 空间中并没有直接等效量。图 45 是一种近似方法。



**彩色分层：**突出图像中某个特定彩色区域对从其周围分理出目标物体很有用。其基本思路有以下两种：

1. 显示感兴趣的颜色以便从背景中突出他们；
2. 像模板那样使用由彩色定义的区域，以便进一步处理。

因为彩色像素是一个  $n$  维参量，得到的彩色变换函数要比灰度变换函数复杂得多。这是因为所有彩色分层方法都要求每个像素变换后的彩色分量是所有  $n$  个原始像素的彩色分量的函数。

对彩色图像进行分层的简单方法之一是，把某些感兴趣区域之外的彩色映射为不突出的中性颜色。如果感兴趣的颜色由宽为  $W$ ，中心在原型（平均）颜色点并具有分量  $(a_1, a_2, \dots, a_n)$  的立方体（或  $n > 3$  时超立方体）所包围，则必要的一组变换为

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

这些变化通过强迫所有其他颜色变为参考彩色空间的中点来突出原型傻姑娘的颜色。例如，对于 RGB 彩色空间，合适的中性点为灰度或彩色的中点  $(0.5, 0.5, 0.5)$ 。如果用一个圆球体来制定感兴趣的颜

色，那么上式变为：

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

其中,  $R_0$  是封闭球形 (或  $n > 3$  时候超球形) 的半径,  $(a_1, a_2, \dots, a_n)$  为其中心分量的颜色, 即原型颜色。上述两个狮子的其他有用变换包括实现多个彩色原型和减小在感兴趣区域之外的颜色亮度, 而不是设为中性常量。

**L\*a\*b\* 模型:** 本节研究的变换效果要在打印效果中评价。因为这些变换是在监视器上研究、改进和评价的, 所以在所用监视器和最终输出设备之间保持色彩的高度一致性是必要的。事实上, 监视器的颜色应准确滴表示任何数字扫描的源图像和最后的打印输出。最好使用独立于设备的彩色模型来实现, 而彩色模型与监视器、输出设备以及所用其他设备的色域有关。这种方法把每个设备映射到模型及模型本身的色彩分布质量函数。许多彩色处理系统选择的模型是 CIE L\*a\*b\* 模型, 也称为 CIELAB, 彩色分量由如下公式给出:

$$L^* = 116 \cdot h\left(\frac{Y}{Y_W}\right) - 16, \quad a^* = 500 \left[ h\left(\frac{X}{X_W}\right) - h\left(\frac{Y}{Y_W}\right) \right], \quad b^* = 200 \left[ h\left(\frac{Y}{Y_W}\right) - h\left(\frac{Z}{Z_W}\right) \right]$$

其中,

$$h(q) = \begin{cases} q^{1/3} & q > 0.008856 \\ 7.787q + 16/116 & q \leq 0.008856 \end{cases}$$

且  $X_W, Y_W, Z_W$  是参考白色三色激励值, 即 CIE 标准 D65 照度下的一种完美的漫反射白色 (在 CIE 色度图中由  $x = 0.3127$  与  $y = 0.3290$  定义。L\*a\*b\* 的彩色空间是闭塞的 (即与感觉色相匹配的编码相同)、感觉一致的 (即在各种色调中颜色差别感觉上是一致的) 和独立于设备的。虽然没有可直接显示的格式, 但其色域包括整个可见光谱, 并可以准确地表示任何现实设备、打印设备或输入设备的颜色。类似 HSI 系统, L\*a\*b\* 系统是一种优秀的亮度 (由亮度  $L^*$  表示) 和彩色 ( $a^*$  表示红减绿;  $b^*$  表示绿减蓝) 分离器, 其在图像操作 (色调和对比度编辑) 和图像压缩方面很有用。

校准成像系统的主要意义是: 其允许交互地独立地调整色调与色彩的不平衡, 即按两个顺序操作。在解决诸如过饱和及欠饱和这样的色彩不规则问题之前, 先要校正图像的色调范围。一幅图像的色调范围 (也称为主调类型) 是指颜色强度的基本分布。高主调图像的多数信息集中在高亮度处, 低主调的多数颜色主要位于低亮度处, 中主调图像的颜色则位于两者之间。通常期望一幅彩色图像的强度均匀分布在高亮和阴影之间。

**图像色调的改善:** 改善图像色调的变换通常需要交互选择。想法是试验性地调整图像亮度和对比度, 以便在合适的灰度范围提供最多的细节。彩色本身并不改变, 在 RGB 和 CMYK 空间中, 这意味着使用相同的变换函数映射所有彩色分量; 在 HSI 彩色空间中, 则改进了亮度分量。

- 校正较为平淡的图像时, 采用 “S形曲线” 变换;
- 校正较亮图像时, 采用下凸曲线;
- 校正较暗图像时, 采用上凸曲线。

**图像的彩色平衡:** 正确建立一幅图像的色调特性后, 就可以进行彩色平衡工作; 对于视觉颜色评估, 皮肤色调是优秀的对象。存在彩色不平衡时, 校正的方法有很多。在校正一幅图像的彩色分量时, 需要注意到每个操作都会影响到图像的全部彩色平衡, 也就是说, 对一种颜色的感知会受到周围颜色的影响。可以使用彩色还来预测彩色分量是如何影响其他彩色分量的。任何颜色的比例都可以通过减小图像中相对色 (或补色) 的数量来增大; 提高两种直接邻接的比例, 或减小该补色邻接的两种颜色的百分比, 也

可以增加颜色的对比。如一幅 RGB 图像中有过多的深红色，可通过 (1) 移去红色和蓝色或 (2) 增加绿色的方法减少之。

**直方图处理：**由于彩色图像是由多个分量组成的，所以必须考虑适应多个分量（直方图）的灰度级技术。单独对彩色图像的分量进行直方图均衡通常是不明智的，将会产生不正确的彩色。更加呵护逻辑的方法是，均匀地展开这种彩色灰度，而保持彩色本身（色调）不变。因此，HSI 彩色空间是适合这类方法的理想空间。

## 6.6 平滑和锐化

在不涉及相邻像素的情况下，对彩色图像的每个像素变换后的下一步时，以周围像素特性为基础改进该像素的值。本节通过对彩色图像的平滑和锐化处理，说明这类邻域处理的基础。

**彩色图像平滑：**在一幅 RGB 彩色图像中，令  $S_{xy}$  表示中心位于  $(x, y)$  的邻域定义的一组坐标，在该邻域中，RGB 分量的向量平均值为

$$\bar{\mathbf{c}}(x, y) = \frac{1}{K} \sum_{(s,t) \in S_{xy}} \mathbf{c}(s, t) = \left[ \frac{1}{K} \sum_{(s,t) \in S_{xy}} R(s, t) \quad \frac{1}{K} \sum_{(s,t) \in S_{xy}} G(s, t) \quad \frac{1}{K} \sum_{(s,t) \in S_{xy}} B(s, t) \right]^T$$

我们将该向量的分量视为几幅标量图像，这些标量图像可通过传统的灰度级邻域处理，单独地平滑原 RGB 图像的每个平面得到，因此，邻域平均平滑可以在每个彩色平面的基础上执行，其结果与使用 RGB 彩色向量执行平均是相同的。

**彩色图像锐化：**利用拉普拉斯变换算法进行图像锐化处理。一个向量的拉普拉斯变换定义为一个向量，其分量等于输入向量的各个分量的拉普拉斯变换，在 RGB 颜色系统中，向量  $\mathbf{c}$  的拉普拉斯变换为：

$$\nabla^2 [\mathbf{c}(x, y)] = [\nabla^2 R(x, y) \quad \nabla^2 G(x, y) \quad \nabla^2 B(x, y)]^T$$

因此，我们可以通过分别计算每幅分量图像的拉普拉斯变换来计算全彩色图像的拉普拉斯变换，从而进行图像锐化。

**对 RGB 域与对 HSI 域处理的区别：**由于 HSI 彩色模型接触了强度和颜色信息的联系，因此我们仅对亮度分量进行平滑/锐化即可。将图像平滑后再转化为 RGB 图像，与原图像是不同的。在 HSI 域处理时，每个像素的色调和饱和度不受影响，因此像素的颜色无变化；而 RGB 直接对三个分量处理时，无法准确控制像素的色调和饱和度的变化。两种平滑方法间的差别会随着滤波器尺寸的增加而变得更为显著。

## 6.7 基于图像的彩色分割

**图像分割：**分割是把一幅图像分成多个区域的处理。

**HSI 彩色空间的分割：**如果我们希望以彩色为基础来分割一幅图像，并想在各个平面上执行这一处理，那么我们会很自然地首先想到 HSI 空间，因为在色调图像中描述彩色很方便。通常，为在色调图像中提取出更多感兴趣的区域，我们会把饱和度作为一幅掩模图像。在彩色图像分割时不常使用亮度图像，因为其不携带彩色信息。

- 我们首先用阈值处理饱和度图像得到二值掩模，然后将色调图像与该掩模相乘。
- 再用阈值对乘积图像进行二值化即可得到我们感兴趣的区域。

在 HSI 彩色空间内进行分割一般不能达到最好效果，可能还相去甚远。

**RGB 向量空间中的分割：**虽然在 HSI 空间工作更直观，但分割却使用 RGB 彩色向量能得到更好结果的领域。假如我们的目的是在一幅 RGB 图像中分割某个指定颜色区域的物体。给定一个感兴趣的有代表性彩色的彩色样点集，可得到我们希望分割的颜色的“平均”估计。令这个平均彩色用 RGB 向量  $\mathbf{a}$  表示。分割的目的是将给定图像中的每个 RGB 像素按照是否具有指定范围的颜色来划分，我们需要一个相似性度量，最简单的度量为欧式距离。令  $\mathbf{z}$  表示 RGB 空间任意一点，如果它们之间距离小于特定阈值  $D_0$ ，则称他们是相似的，即

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

满足  $D(\mathbf{z}, \mathbf{a}) \leq D_0$  点轨迹是半径  $D_0$  的实心球体。包含在球体内部和表面上的点满足指定颜色准则；球体之外的点则不满足制定的颜色准则；对这两组点编码即可得到二值分割图像。

事实上，一种更有用的推广形式是如下的距离度量：

$$D(\mathbf{z}, \mathbf{a}) = [(\mathbf{z} - \mathbf{a})^T \mathbf{C}^{-1} (\mathbf{z} - \mathbf{a})]^{\frac{1}{2}}$$

其中， $\mathbf{C}$  表示我们希望分割的有代表性颜色的样本的协方差矩阵。满足  $D(\mathbf{z}, \mathbf{a}) \leq D_0$  点轨迹描述了一个实心三维椭球体，该椭球体的最大特点是主轴面向最大数据扩展方向，当  $\mathbf{C} = \mathbf{I}$  时，即为单位矩阵， $D(\mathbf{z}, \mathbf{a})$  简化为欧式距离。

有时，计算平方（根）的代价很高，我们通常可以采用中心位于  $\mathbf{a}$  的边界盒作为折中方案。该方案的距离定义可以使用曼哈顿距离。同时，在该方法中，盒的中心在  $\mathbf{a}$  处，沿每个颜色轴选择的维数与沿每个轴的样本标准差成比例。标准差的计算只使用一次样本颜色数据。

前面讨论的方法实际上是彩色分层有关方法的推广。

**彩色边缘检测：**前面的梯度定义并不是对向量的定义。如果计算单幅图像的梯度，然后用得到的结果形成一幅彩色图像，将会得到错误的结果。如果准确度是重点，我们需要一个适用于向量的梯度的新定义。令  $\mathbf{r}, \mathbf{g}, \mathbf{b}$  是沿 RGB 彩色空间的 R,G,B 轴单位向量，并定义向量

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

那么，令  $g_{xx}, g_{yy}, g_{xy}$  表示这些向量的点积，我们有

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

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

$$g_{xy} = \frac{\partial R}{\partial x} \frac{\partial R}{\partial y} + \frac{\partial G}{\partial x} \frac{\partial G}{\partial y} + \frac{\partial B}{\partial x} \frac{\partial B}{\partial y}$$

需要注意的是，得到的  $g$  是  $x, y$  的函数。那么， $\mathbf{c}(x, y)$  的最大变化率方向可以由角度

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

给出，并且在角度  $\theta(x, y)$  方向上点  $(x, y)$  处的变化率的值由下式给出：

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

如果  $\theta_0$  是角度的一个解，那么  $\theta_0 \pm \frac{\pi}{2}$  也是一个解。我们仅需要对  $\theta$  在  $[0, \pi)$  中计算即可。该式在每个点  $(x, y)$  处设计两个正交方向，沿其一， $F$  最大，沿其他方向  $F$  最小。实现上述偏导数可以采用 Sobel 算子。

## 6.8 彩色图像中的噪声

全彩色图像的滤波可以在每幅图像分量上执行，也可以直接在彩色向量空间中执行。标量的滤波相对简单，但是要在彩色向量空间实现中值滤波，就要找到一种使得中值有意义的排序方案；因此处理向量的过程相对复杂，此处不再赘述。

## 6.9 彩色图像压缩

因为描述彩色所要求的比特数比灰度级所要求的大 3~4 倍，所以数据压缩在存储与传输彩色图像中起核心作用。对于 RGB、CMY(K)、HSI 图像，任何压缩对象的数据是每个彩色像素的分量；它们是传达彩色信息的方式，压缩是减小或消除冗余和/或不相干数据的处理。