



第6章 彩色图像处理

只有经过几年的准备之后，年轻的艺术才应接触颜色，不是用颜色描述，而是作为人的情感表达的手段。

——亨利·马蒂斯

作为一种训练形式，很长时间我限制自己面对一种颜色。

——巴布罗·毕加索

引言

在图像处理中，彩色的运用受两个主要因素的推动。第一，彩色是一个强有力的描绘子，它常常可简化从场景中提取和识别目标；第二，人可以辨别几千种彩色色调和亮度，但相比之下只能辨别几十种灰度色调。第二个因素在人工图像分析中特别重要。

彩色图像处理可分为两个主要领域：全彩色处理和伪彩色处理。在第一类中，通常要求图像用全彩色传感器获取，如彩色电视摄像机或彩色扫描仪。在第二类中，问题是对一种特定的单色灰度或灰度范围赋予一种颜色。到目前为止，多数数字彩色图像处理是在伪彩色层面完成的。然而，在过去的十年里，彩色传感器和用于处理彩色图像的硬件在合理的价格上变得更容易接受，导致现在的全彩色图像处理技术的应用日益广泛，包括出版、可视化和互联网应用。

在后续的讨论中，我们会看到前面几章介绍的一些灰度方法可直接用于彩色图像。其他方法则要求将灰度方法重新表达为与本章推导的彩色空间的性质保持一致。本书讨论的这些技术远未穷尽，仅是用于彩色图像处理的一些方法。

6.1 彩色基础

虽然人的大脑感知和理解颜色所遵循的过程还是未完全了解的一种生理和心理现象，但颜色的物理性质可由实验和理论结果支持的基本形式来表示。

在1666年，艾萨克·牛顿(Isaac Newton)发现了一种现象，当一束太阳光通过一个玻璃棱镜时，出现的光束不是白色的，而是由一端为紫色、另一端为红色的连续色谱组成。如图6.1所示，色谱可分为6个宽的区域：紫色、蓝色、绿色、黄色、橙色和红色。当观察全彩色时(见图6.2)，色谱末尾的颜色不是突变的，而是每种颜色混合平滑地过渡到下一种颜色的。

基本上，人类和某些其他动物感知一个物体颜色是由物体反射光的性质决定的。如图6.2所示，可见光由电磁波谱中相对较窄的频段组成。一个物体反射的光如果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。然而，一个物体反射有限的可见光谱，则物体呈现某种颜色。例如，绿色物体反射具有500~570 nm范围内主要波长的光，吸收其他波长的多数能量。

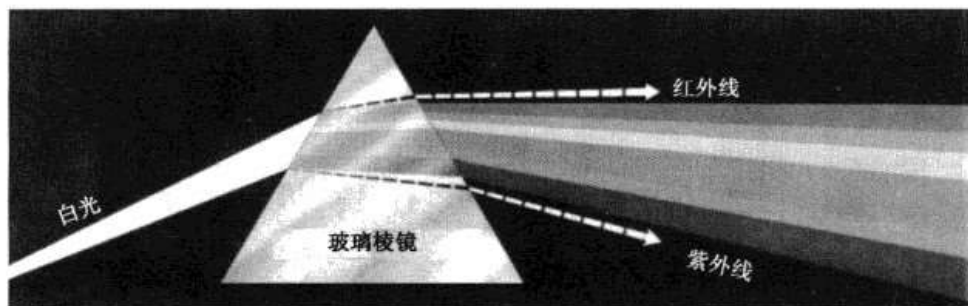


图 6.1 白光通过棱镜看到的色谱(原图像由 General Electric 公司的 Lamp Business 分公司提供)

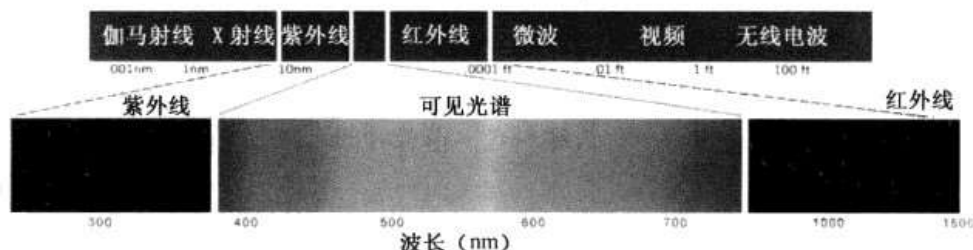


图 6.2 可见范围电磁波谱的波长组成(原图像由 General Electric 公司的 Lamp Business 分公司提供)

光的特性是彩色科学的核心。如果光是无色的(缺乏颜色),它的属性仅仅是亮度或者数值。无色光就是观察者在黑白电视机上看到的光,并且它是迄今为止我们对图像处理的讨论的隐含分量。正如第 2 章中定义并多次使用的那样,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最终到白色。

彩色光大约覆盖电磁波谱 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。辐射是从光源流出的能量的总量,通常用瓦特(W)来度量。光强用流明来度量,它给出了观察者从光源感知的能量总和的度量。例如,由远红外波谱范围的光源发出的光,可能具有很大的能量(辐射),但是观察者却很难感知到它;它的光强几乎是零。最后,亮度是一个主观描绘子,它实际上是不可能度量的。它体现了无色的强度的概念,并且是描述色彩感觉的一个关键因素。

正如 2.1.1 节中解释的那样,人眼中的锥状细胞是负责彩色视觉的传感器。详细的实验结果已经确定,人眼中的 600~700 万个锥状细胞可分为 3 个主要的感知类别,分别对应于红色、绿色和蓝色。大约 65%的锥状细胞对红光敏感,33%对绿光敏感,只有 2%对蓝光敏感(但蓝色锥状细胞对蓝光更敏感)。图 6.3 显示了人眼中的红色、绿色和蓝色锥状细胞吸收光的平均实验曲线。由于人眼的这些吸收特性,所看到的彩色是所谓的原色红(R)、绿(G)、蓝(B)的各种组合。为标准化起见,CIE(国际照明委员会)在 1931 年设计了下边的特定波长值为三原色:蓝色 = 435.8 nm,绿色 = 546.1 nm,红色 = 700 nm。这一标准在图 6.3 所示的详细实验曲线于 1965 年被采用之前就做了规定。因此 CIE 标准只是近似对应于实验数据。由图 6.2 和图 6.3 我们注意到,没有单一的颜色可称为红色、绿色或蓝色。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 分量单独作用就能产生所有谱,这一点很重要。“原色”一词的使用已被广泛误解为:三个标准原色以各种强度比混合在一起时,可以产生所有的可见彩色。正如您很快将会看到的那样,这一解释是不正确的,除非波长允许变化,而在这种情况下将不再有三个固定的标准原色了。

原色相加可以产生二次色,如深红色(红色加蓝色)、青色(绿色加蓝色)和黄色(红色加绿色)。以正确的亮度把三原色或把与二次色相对应的原色混合,即可产生白光。这一结果示于图 6.4(a),它还说明了三原色及其混合产生二次色。

光的原色与颜料或着色剂的原色之间的区别很重要。后者的原色被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。因此，颜料的原色是深红色、青色和黄色，而二次色是红色、绿色和蓝色。这些颜色示于图 6.4(b)。将三种颜料原色或与二次色对应的原色的适当混合，即可产生黑色。

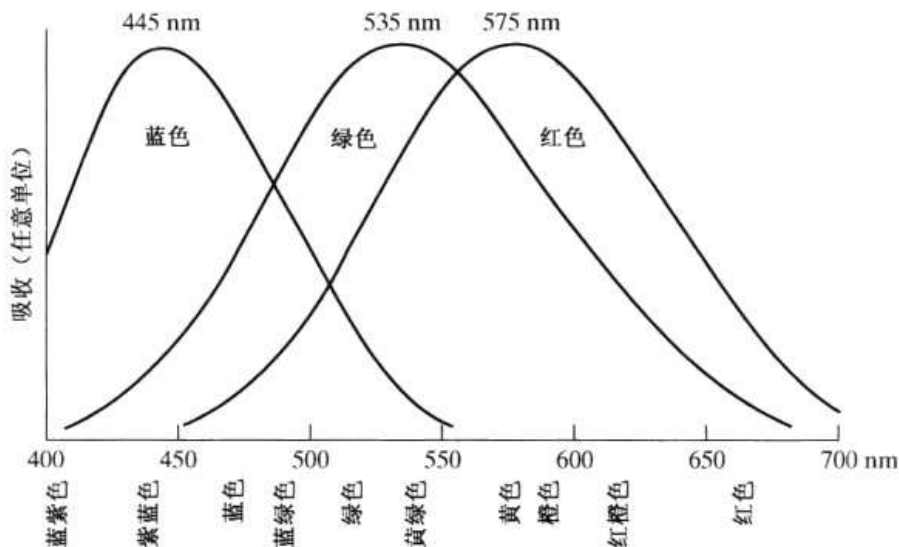


图 6.3 以波长为函数，人眼中的红色、绿色和蓝色锥状细胞对光的吸收曲线

彩色电视接收机是光的彩色相加性质的一个例子。许多彩色电视荧光屏(CRT, 阴极射线管)的内部是由电敏荧光粉按三角形点阵的模式组成的。当激发时，三色组中的每一点产生三原色中的一种光。发红光的荧光点的亮度由显像管内的电子枪调制，该电子枪产生的脉冲与电视摄像机看到的“红色能量”相对应。每个三色组中的绿色荧光点和蓝色荧光点以相同的方式调制。在电视接收机上观察到的效果是来自每个三色组的三原色被“加”在一起，并被人眼中的颜色敏感的锥状细胞以全彩色图像的方式接收。以所有这三种颜色每秒钟连续变化 30 幅图像，在荧光屏上即可完成连续图像的显示。

CRT 显示器正在被平板数字技术取代，譬如液晶显示器(LCD)和等离子设备。虽然它们的基本原理与 CRT 不同，在某种意义上，这些技术及类似的技术使用了一个相同的原理，即它们都要求三个子像素(红色、绿色和蓝色)去产生单个彩色像素。LCD 使用极化光的特性来阻止光或使光通过 LCD 屏幕，在有源矩阵显示技术的情况下，使用薄膜晶体管(TFT)提供适当的信号对屏幕上的每一个像素寻址。光滤波器用于在每个像素三色组位置上产生光的三原色。在等离子装置中，像素是用于产生三原色之一的涂有荧光粉的微小气体单元。各个小单元以类似于 LCD 的方式寻址。这种三像素组的同等寻址能力是数字显示的基础。

通常用以区别不同颜色特性的是亮度、色调和饱和度。正如本节前面所指出的那样，亮度具体

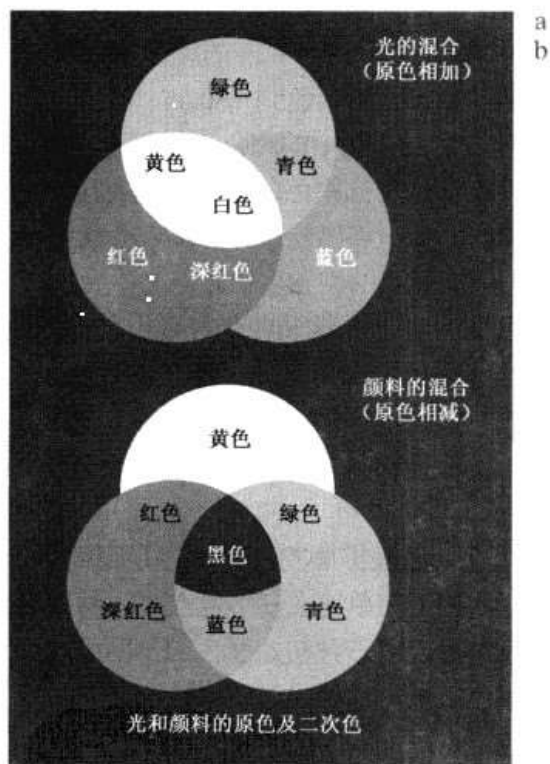


图 6.4 光和颜料的原色及二次色(原图像由 General Electric 公司的 Lamp Business 分公司提供)

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。色调表示观察者感知的主要颜色。这样,当我们说一个物体为红色、橙色或黄色时,指的是其色调。饱和度指的是相对的纯净度,或一种颜色混合白光的数量。纯谱色是全饱和的。如深红色(红加白)和淡紫色(紫加白)这样的彩色是欠饱和的,饱和度与所加白光的数量成反比。

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 和 Z 。这样,一种颜色就可由其三色值系数定义为

$$x = \frac{X}{X+Y+Z} \quad (6.1-1)$$

$$y = \frac{Y}{X+Y+Z} \quad (6.1-2)$$

和

$$z = \frac{Z}{X+Y+Z} \quad (6.1-3)$$

从以上公式可得^①

$$x + y + z = 1 \quad (6.1-4)$$

对可见光谱内光的任何波长,用于产生对应于该波长的颜色所需的三色值可直接从大量实验结果编制的曲线或表中得到(Poynton[1996]),也可参阅 Walsh[1958]和 Kiver[1965]的早期文献。

确定颜色的另一种方法是使用 CIE 色度图(见图 6.5),该图以 x (红)和 y (绿)的函数表示颜色的组成。对于 x 和 y 的任何值,相应的 z 值(蓝色)可由式(6.1-4)得到,注意 $z = 1 - (x + y)$ 。例如,图 6.5 中标记为绿色的点大约有 62%的绿色和 25%的红色成分。从式(6.1-4)可得到蓝色的成分约为 13%。

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图周围的边界上。这些都是示于图 6.2 的谱图中的纯色。任何不在边界上而在色度图内部的点都表示谱色的混合色。示于图 6.5 中的等能量点与三原色的百分比相对应,它表示白光的 CIE 标准。位于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,它就变成欠饱和的颜色了。等能量点的饱和度为零。

色度图对于色彩混合非常有用,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。例如,考虑图 6.5 中所示的从红点到绿点画的一条直线,如果红光多于绿光,则确切地表示新颜色的点将处在该线段上,但与绿点相比它更接近于红点。类似地,从等能量点到位于色度图边界上的任意一点画一线段,将定义那个特定谱色的所有色调。

把这一过程扩展到三种颜色是很简单的。为了决定从色度图中任何给定的三种颜色得到的颜色范围,我们可简单地在三个色点之间画出连接线,结果是一个三角形,三角形边界上或三角形内的任何颜色都可以由三种初始颜色的不同组合产生。以任意固定颜色为顶点的三角形无法包围图 6.5 中的整个颜色区域。这种观察结果从图解上支持了早期的评论,即用 3 个单一的、固定的原色无法得到所有颜色。

图 6.6 中的三角形显示了由 RGB 监视器产生的典型的颜色范围(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彩色域代表。彩色打印彩色域的边界是不规则的,因为彩色打印是相加色彩和相减色彩混合的组合,与在监视器上显示颜色(基于三种高度可控的原色光的相加)相比,这是一个更加难以控制的过程,监视器是以三个高度可控的原色光的相加为基础的。

^① 这段文字中使用的 x, y, z 遵循国际惯例。这些不应与书中其他小节用于表示空间坐标的 (x, y) 相混淆。

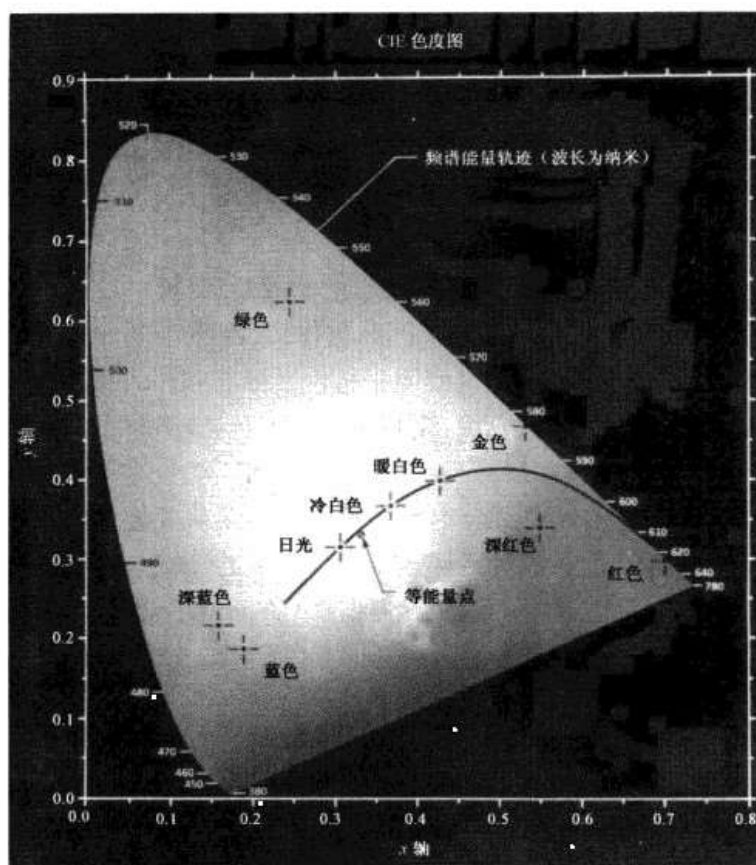


图 6.5 色度图(原图像由 General Electric 公司的 Lamp Business 分公司提供)

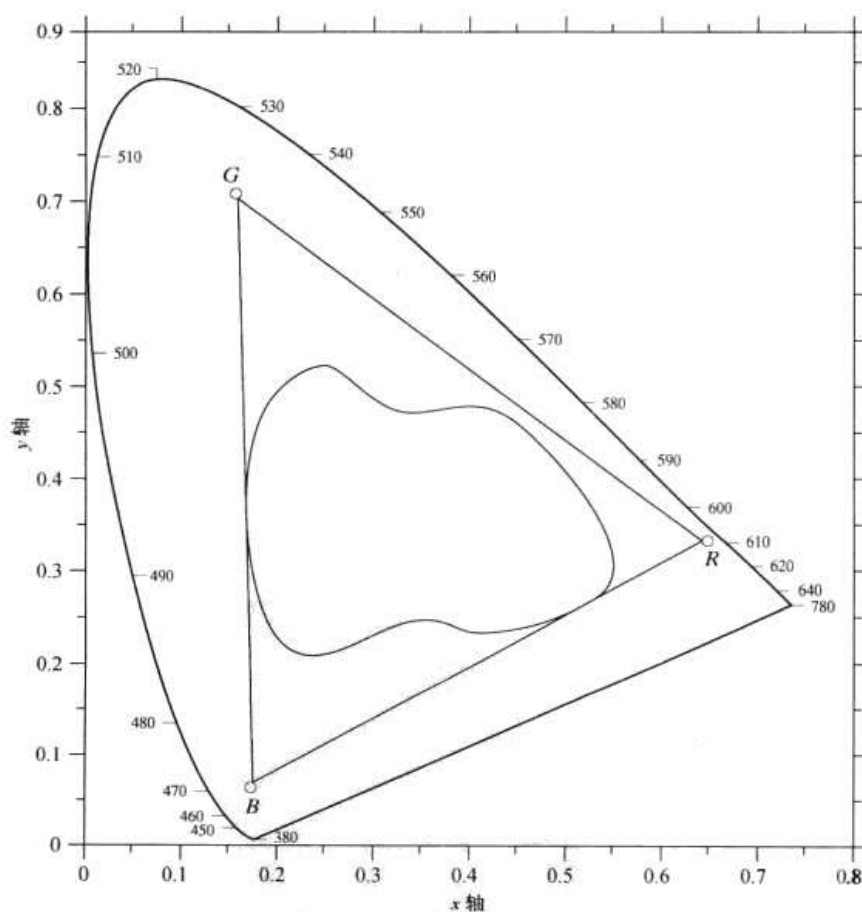


图 6.6 彩色监视器的典型彩色域(三角形区域)和彩色打印设备的典型彩色域(不规则区域)

6.2 彩色模型

彩色模型(也称为彩色空间或彩色系统)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来表示。

现在所用的大多数彩色模型不是面向硬件(如彩色监视器和打印机)的,就是面向应用的,在这里,彩色操作是一个目的(例如针对动画的彩色图形创作)。在数字图像处理中,实际中最通用的面向硬件的模型是 RGB(红、绿、蓝)模型,该模型用于彩色监视器和一大类彩色视频摄像机;CMY(青、粉红、黄)模型和 CMYK(青、粉红、黄、黑)模型是针对彩色打印机的;以及 HSI(色调、饱和度、亮度)模型,这种模型更符合人描述和解释颜色的方式。HSI 模型还有另一个优点,它可以解除图像中的颜色和灰度信息的联系,使其更适合本书中开发的许多灰度处理技术。现在使用的彩色模型还有很多,主要是由于彩色科学是一个包括许多应用的很宽的领域。这里试图详细研究其中的几个模型,因为这些模型更有意义且更有益。然而,根据现有的任务,本章讨论的模型是图像处理的主要模型。掌握了本章的内容后,理解今天使用的其他彩色模型,您将不会有困难。

6.2.1 RGB 彩色模型

在 RGB 模型中,每种颜色出现在红、绿、蓝的原色光谱分量中。该模型基于笛卡儿坐标系。所考虑的彩色子空间是图6.7所示的立方体,图中 RGB 原色值位于3个角上;二次色青色、深红色和黄色位于另外3个角上,黑色位于原点处,白色位于离原点最远的角上。在该模型中,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。在这一模型中的不同颜色是位于立方体上的或立方体内部的点,且由自原点延伸的向量来定义。为方便起见,假定所有的颜色值都归一化了,则图 6.7 所示的立方体是一个单位立方体,即 R, G 和 B 的所有值都假定在范围 $[0, 1]$ 内。

在 RGB 彩色模型中表示的图像由 3 个分量图像组成,每种原色一幅分量图像。当送入 RGB 监视器时,这 3 幅图像在屏幕上混合生成一幅合成的彩色图像,正如在 6.1 节所说明的那样。在 RGB 空间中,用于表示每个像素的比特数称为像素深度。考虑一幅 RGB 图像,其中每一幅红、绿、蓝图像都是一幅 8 比特图像,在这种条件下,可以说每个 RGB 彩色像素[即 (R, G, B) 值的三元组]有 24 比特的深度(3 个图像平面乘以每个平面的比特数)。术语全彩色图像通常用来表示一幅 24 比特的 RGB 彩色图像。在 24 比特 RGB 图像中,颜色总数是 $(2^8)^3 = 16777216$ 。图 6.8 显示了与图 6.7 对应的 24 比特彩色立方体。

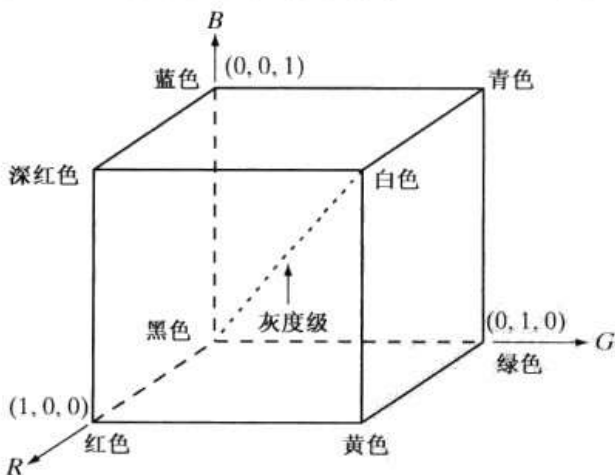


图 6.7 RGB 彩色立方体示意图。沿主对角线的点有从原点的黑色至点(1, 1, 1)的白色的灰度值

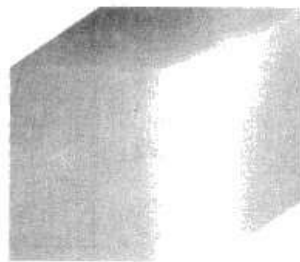


图 6.8 RGB 24 比特彩色立方体

例 6.1 生成 RGB 彩色立方体的隐藏面和剖面。

图6.8所示的立方体是实心的，它由前一段中提到的 $(2^8)^3 = 16\,777\,216$ 种颜色组成。观察这些颜色的一种简便方法是生成一个彩色平面(立方体的表面或剖面)。这是通过固定三种颜色中的一个并允许其他两种颜色变化来完成的。例如，在图 6.8 中，通过立方体中心并与 GB 平面平行的剖面是平面 $(127, G, B)$ ，其中 $G, B = 0, 1, 2, \dots, 255$ 。这里，我们使用了实际像素值，而不是为数学上的方便而在 $[0, 1]$ 范围内的归一化值，因为前者是在计算机中实际用来产生颜色的值。图 6.9(a)说明，通过简单地把三幅独立的分量图像送入彩色监视器来观察一幅横截面图像。在分量图像中，0 代表黑色，255 代表白色(注意这些是灰度级图像)。最后，图6.9(b)显示了以同样的方式生成的图 6.8 中立方体的 3 个隐藏面。

值得注意的是，获取一幅彩色图像基本上是图 6.9 所示的相反的过程。使用分别对红、绿、蓝敏感的 3 个滤色片可获取一幅彩色图像。当我们用配备有这些滤色片之一的单色摄像机观察彩色场景时，结果是一幅单色图像，其亮度与滤色片的响应成正比。用每个滤色片重复这一过程，可产生三幅单色图像，这些图像就是彩色场景的 RGB 分量图像(实际上，RGB 彩色图像传感器通常将这一过程集成在一个装置中)。很清楚，以图 6.9(a)所示的形式显示这 3 幅 RGB 分量图像，就会产生原始彩色场景的 RGB 彩色复现。

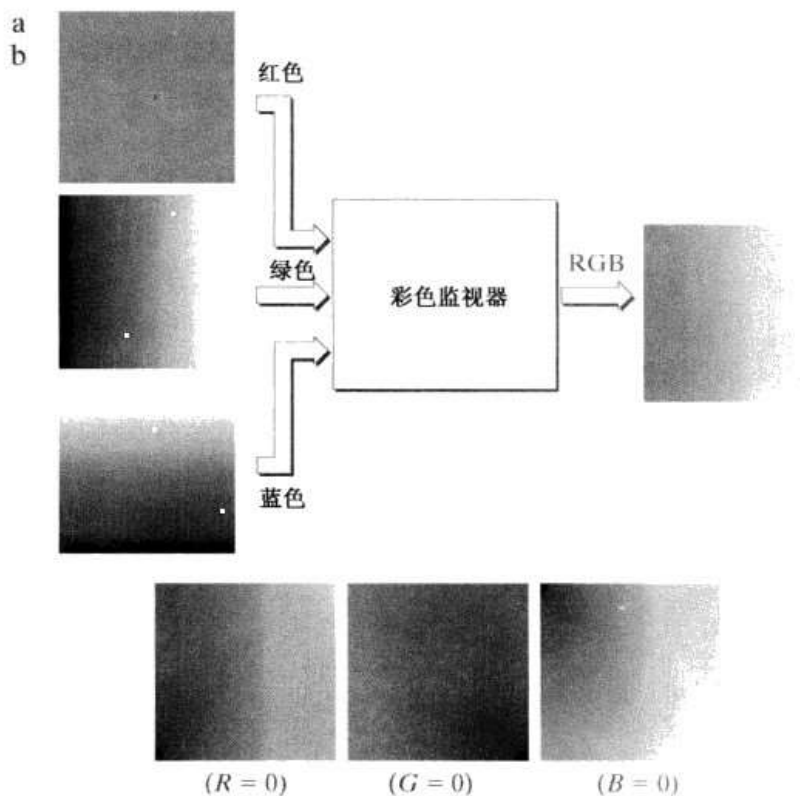


图 6.9 (a)生成彩色剖面 $(127, G, B)$ 的 RGB 图像；(b)图 6.8 所示彩色立方体的 3 个隐藏面

虽然高端显示卡和监视器提供 24 比特 RGB 图像的合理的彩色再现，但今天所用的许多系统仍限于 256 种颜色。另外，有许多应用，使用几百种以上的颜色没有意义，而有时只用几种颜色。6.3 节讨论的伪彩色图像处理技术就提供了这种情况的一个较好的例子。当前应用给定的各种系统中，有一种彩色子系统值得考虑，其合理且与观察者无关的硬件性能是很重要的。这种色彩子集称为稳定 RGB 色集合，或称为全系统稳定色集合。在互联网应用中，这种色彩子集称为稳定 Web 色或稳定浏览器色。

假定 256 种颜色是最小颜色数，这些颜色可用任何可以显示所希望的彩色的系统真实再现，那么使用可接受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 种颜色可被各种操作

系统进行不同的处理,仅留下 216 种颜色是多数系统通用的。这 216 种颜色已成为事实上的稳定色,特别是在互联网中的应用。无论在何时应用,希望大多数人观察到的颜色都一样。

如以前一样,216 种稳定色中的每一种都可以由 3 个 RGB 值形成,但每个值只能是 0, 51, 102, 153, 204 或 255。这样,这些 RGB 三元组数值就可提供 $(6)^3 = 216$ 种可能的值(注意所有值都可被 3 整除)。通常这些值可用十六进制数来表示,如表 6.1 所示。回顾一下,十六进制数 0, 1, 2, ..., 9, A, B, C, D, E, F 对应十进制数 0, 1, 2, ..., 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15。还可以表示为 $(0)_{16} = (0000)_2$ 和 $(F)_{16} = (1111)_2$, 例如, $(FF)_{16} = (255)_{10} = (11111111)_2$, 并且我们可以看到,两个十六进制数构成了一个 8 比特字节。

表 6.1 稳定色中每个 RGB 分量的有效值

数 制	等 效 颜 色					
十六进制	00	33	66	99	CC	FF
十进制	0	51	102	153	204	255

因为要取 3 个数来形成 RGB 彩色,每种稳定色由表 6.1 中的 3 个两位十六进制数形成。例如,最纯净的红色是 FF0000。值 000000 和 FFFFFFFF 分别表示黑色和白色。记住,使用更为熟悉的十进制表示可得到相同的结果。例如,以十进制表示的最亮红色为 $R = 255(FF)$ 和 $G = B = 0$ 。

图 6.10(a) 显示了以 RGB 的降序值组织的 216 种稳定色。第一行左上角方块的价值为 FFFFFFFF(白),其右侧方块的价值为 FFFFCC,第三个方块的价值为 FFFF99,等等。同一阵列第二行的值是 FFCCFF, FFCCCC, FFCC99, 等等。该阵列中最后一个方块的价值为 FF0000(可能是最亮的红色)。刚考察过的阵列右侧的第二个阵列的值由 CCFFFF 开始,并以相同的方式进行,其他剩下的 4 个阵列也同样进行。最后一个阵列的最后一个方块(右下方)的价值为 000000(黑)。注意,不是所有可能的 8 比特灰色都包含在 216 种稳定色中,这一点很重要。图 6.10(b) 显示了 256 色 RGB 系统中所有可能灰色的十六进制代码。这些值的一部分在稳定色集的外面,但可被多数显示系统(根据它们的相对亮度)适当地表示。来自稳定色组的灰度(KKKKKK)₁₆, $K = 0, 3, 6, 9, C, F$ 在图 6.10(b) 中以下画线形式显示。

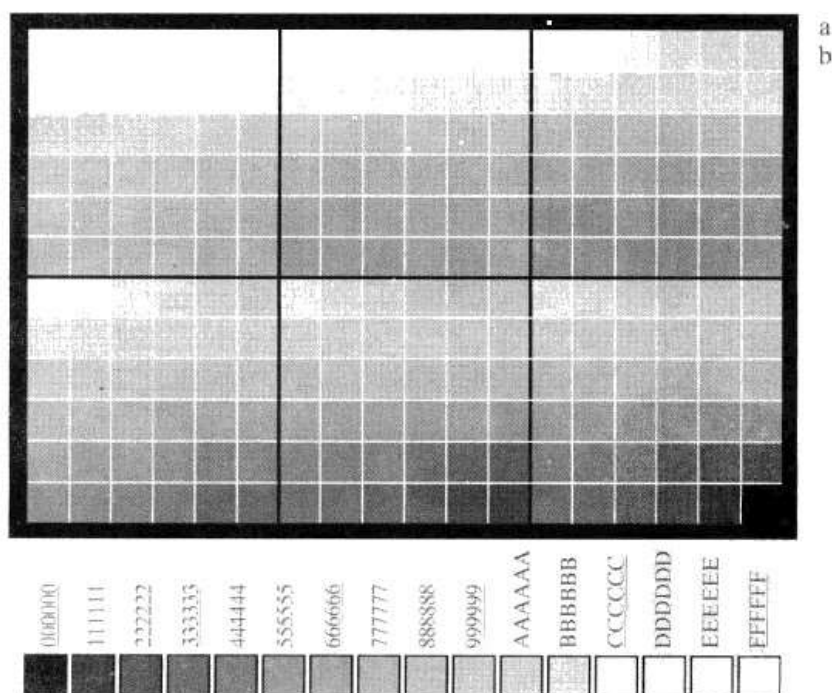


图 6.10 (a) 216 种稳定 RGB 色; (b) 256 色 RGB 系统中的所有灰度(部分稳定色组的灰度以下画线的形式显示)

图6.11显示了RGB稳定色立方体。与图6.8所示的实心全彩色立方体不同,图6.11中的立方体仅在表面有有效的颜色。正如图6.10(a)所示,每个平面都有36种颜色,所以稳定色立方体的整个表面被216种不同的颜色所覆盖,这正如所期望的那样。

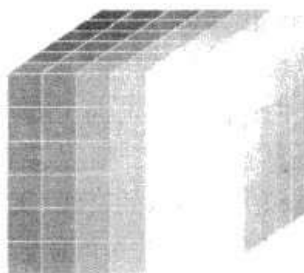


图 6.11 RGB 稳定色立方体

6.2.2 CMY 和 CMYK 彩色模型

正如 6.1 节中指出的那样,青色、深红色和黄色是光的二次色,换句话说,是颜料的原色。例如,当青色颜料涂覆的表面用白光照射时,该表面将不反射红光。也就是说,青色从反射的白光中减去红光,白光本身由等量的红光、绿光和蓝光组成。

大多数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。这一转换是使用下面这个简单的操作执行的:

$$\begin{bmatrix} C \\ M \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (6.2-1)$$

这里再次假设所有的彩色值都归一化到了范围[0, 1]内。式(6.2-1)表明涂有青色颜料的表面所反射的光中不包含红色(即公式中 $C = 1 - R$)。类似地,纯深红色不反射绿色,纯黄色不反射蓝色。式(6.2-1)还揭示 RGB 值可以很容易地通过 1 减去 CMY 值从 CMY 集中得到。正如早些时候指出的那样,在图像处理中,这种彩色模型主要用于产生硬拷贝输出,因此从 CMY 到 RGB 的反向操作通常没有实际意义。

根据图 6.4,等量的颜料原色,青色、深红色和黄色,可以生成黑色。实际上,为打印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(即在打印中起主要作用的颜色),加入了第 4 种颜色——黑色,提出了 CMYK 彩色模型。这样,当出版商提到“四色打印”时,指的就是 CMY 彩色模型的三种原色再加上黑色。

6.2.3 HSI 彩色模型

正如我们所见到的那样,在 RGB 模型和 CMY 模型中创建颜色并从一种模型转换到另一种模型是比较简单的过程。如上所述,这些彩色系统对于硬件实现很理想。另外,RGB 系统与人眼强烈感知红、绿、蓝三原色的事实能很好地匹配。遗憾的是,RGB 模型、CMY 模型和其他类似的彩色模型不能很好地适应实际上人解释的颜色。例如,通过用给定的组成其颜色的每一原色的百分比不能给出一辆汽车的颜色,此外,我们不认为彩色图像是由 3 幅原色图像混合形成的单幅图像。

当人观察一个彩色物体时,我们用其色调、饱和度和亮度来描述它。回顾 6.1 节的讨论,色调是描述一种纯色(纯黄色、纯橙色或纯红色)的颜色属性,然而,饱和度是一种纯色被白光稀释的程度的度量。亮度是一个主观的描述子,实际上它是不可度量的。它体现了无色的强度概念,并且是描述彩色感觉的关键因子之一。我们清楚地知道强度(灰度级)是单色图像最有用的描述子。很明确,这个量是可度量的,并很容易解释。我们即将提出的模型称为 HSI(色调、饱和度和强度)彩色模型,该模型可在彩色图像中从携带的彩色信息(色调和饱和度)中消去强度分量的影响。因此,HSI 模型是开发基于彩色描述的图像处理算法的理想工具,这种彩色描述对人来说是自然且直观的,毕竟人才是这些算法的开发者和使用者。因此,我们可以概括说明如下,可以说 RGB 对于图像颜色生成来说是理想的(如用彩色摄像机的图像获取,或在监视器屏幕上显示图像),但在用于颜色描述时则有许多的限制。下面的素材提供了一种这样做的有效方法。

正如例 6.1 中讨论的那样,一幅 RGB 彩色图像可被看成 3 幅单色亮度图像(表示红色、绿色和蓝色),因此,我们应能从一幅 RGB 图像中提取出强度并不奇怪。如果我们使用图 6.7 中的彩色立方体,让白色顶点(1, 1, 1)在黑色顶点(0, 0, 0)上方直接面对它,如图 6.12(a)所示,则这一点就更加清楚了。联系图 6.7 可知,强度(灰度级)是沿连接这两个顶点的直线分布的。如图 6.12 的排列所示,连接黑色顶点和白色顶点的直线(灰度轴)是垂直的。这样,如果我们要确定图 6.12 中任何彩色点的强度分量,可以简单地通过一个垂直于强度轴并包含该彩色点的平面,该平面与强度轴的交点就给出了范围[0, 1]内的强度值。稍微思考一下,我们还注意到,一种颜色的饱和度(纯度)以强度轴的距离为函数而增大。事实上,强度轴上点的饱和度为零,事实证明沿着这条轴线的所有点都是灰度。

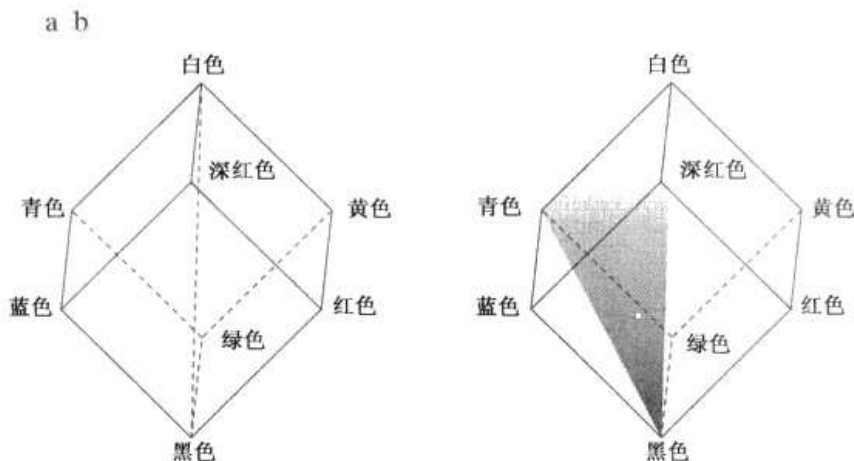


图 6.12 RGB 模型和 HSI 模型间的概念关系

为了解如何从给定的 RGB 点来确定色调,考虑图 6.12(b),图中显示了由 3 个点(黑、白和青)定义的一个平面。黑点和白点包含在平面内的事实告诉我们强度轴也包含在这个平面内。进一步,我们看到,包含在由强度轴和立方体边界定义的平面段内的所有点都有相同的色调(在这种情形下为青色)。回顾 6.1 节可得到相同的结论,即所有颜色都是由位于这些颜色定义的三角形中的 3 种颜色产生的。如果这些点中的两点是黑点和白点,第三点是一个彩色点,那么三角形上的所有点都有相同的色调,因为黑分量和白分量不能改变色调(当然,这个三角形中的点的强度和饱和度是不同的)。通过关于垂直强度轴旋转阴影平面,可得到不同的色调。从这些概念可以得出这样的结论:形成 HSI 空间所要求的色调、饱和度和强度值可由 RGB 彩色立方体得到。也就是说,通过计算前面讨论中描述和推导的几何公式,我们可将任何 RGB 点转换为相应的 HSI 彩色模型中的点。

关于图 6.12 中的立方体结构及其对应的 HSI 彩色空间,要记住的一个关键点是,HSI 空间由一个垂直强度轴和位于与该强度轴垂直的平面内的彩色点的轨迹表示。当平面沿强度轴上下移动时,由每个平面与立方体表面构成的横截面定义的边界不是三角形就是六边形。这种情况如图 6.13(a)所示,沿其灰度轴向下看,这一点就会清楚得多。在这个平面中,我们可以看到原色是按 120° 分隔的,二次色与原色相隔 60° ,这意味着二次色之间也相隔 120° 。图 6.13(b)显示了相同的六边形和任意一个彩色点(显示为一个点)。该点的色调由来自某参考点的一个角度决定。通常(并非总是如此),与红轴的 0° 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。注意,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、到一个彩色点的向量长度和该向量与红轴的夹角。因此,如图 6.13(c)和图 6.13(d)所示,HSI 平面以刚刚讨论的六边形、三角形,甚至一个圆形的形式出现也很常见。实际上选择什么形状无关紧要,因为这些形状中的任何一个都可以通过几何变换转换为其他两种形状。图 6.14 显示了基于彩色三角形和圆形的 HSI 模型。

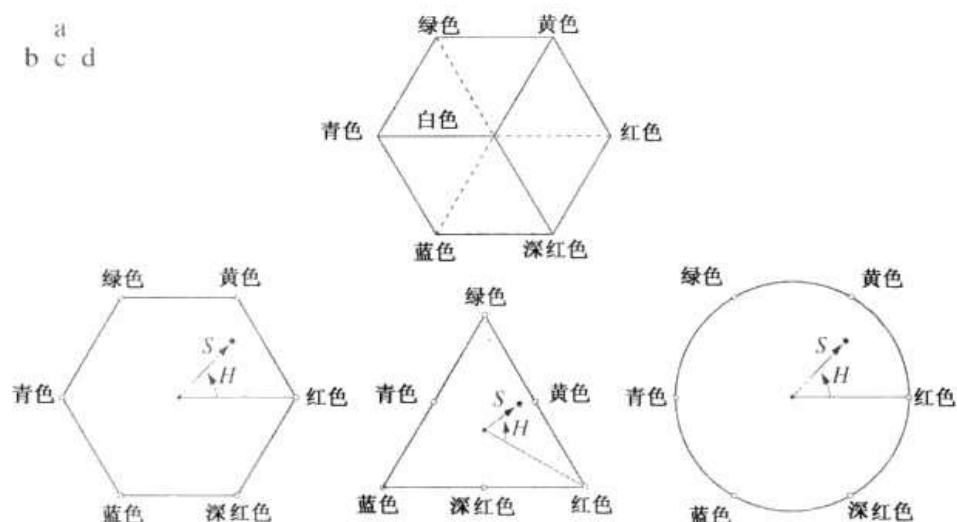


图 6.13 HSI 彩色模型中的色调和饱和度。黑点是一个任意彩色点。与红轴的夹角给出了色调，向量的长度是饱和度。这些平面中的所有彩色的强度由垂直强度轴上的平面的位置给出

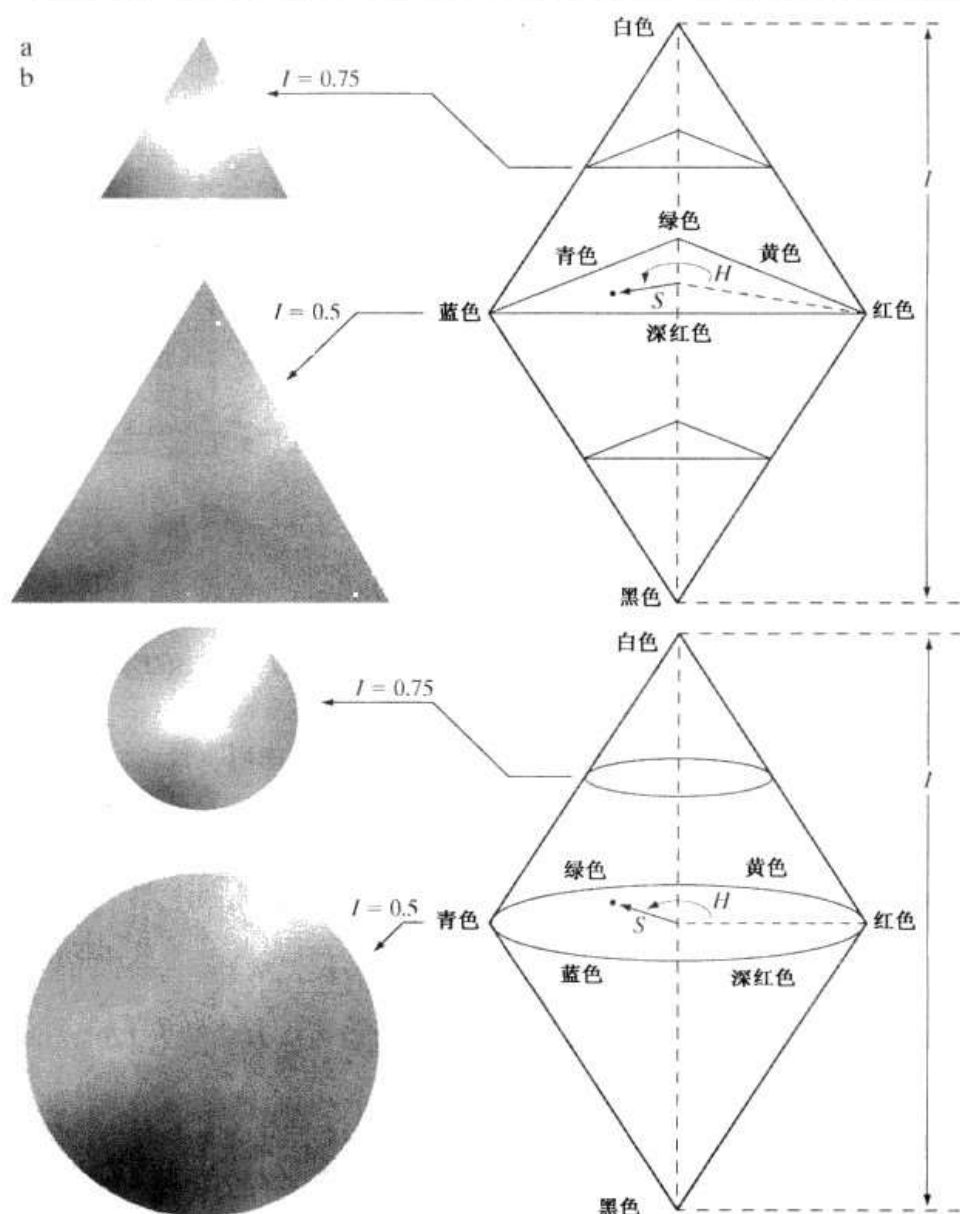


图 6.14 基于(a)三角形和(b)圆形彩色平面的 HSI 彩色模型。三角形和圆形平面垂直于垂强度轴

从 RGB 到 HSI 的彩色转换

给定一幅 RGB 彩色格式的图像, 每个 RGB 像素的 H 分量可用下式得到:

$$H = \begin{cases} \theta, & B \leq G \\ 360 - \theta, & B > G \end{cases} \quad (6.2-2)$$

其中^①,

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

饱和度分量由下式给出:

$$S = 1 - \frac{3}{(R+G+B)} [\min(R, G, B)] \quad (6.2-3)$$

最后, 强度分量由下式给出:

$$I = \frac{1}{3}(R+G+B) \quad (6.2-4)$$

如图6.13中指出的那样, 假定 RGB 值已归一化到区间[0, 1]内, 且角度 θ 根据 HSI 空间的红轴来度量。色调可以用式(6.2-2)得到的所有值除以 360° 归一化为[0, 1]范围内。如果给定的 RGB 值在区间[0, 1]内, 则其他两个 HSI 分量已经在区间[0, 1]内了。

式(6.2-2)到式(6.2-4)中的结果可由图6.12和图6.13所示的几何关系推得。这一推导很烦琐, 而且对现在的讨论没有太大意义。对这些公式的证明及对下面的 HSI 至 RGB 转换结果感兴趣的读者, 可以参考本书的参考文献或网站。

关于 RGB 和 HSI 之间及 HSI 和 RGB 之间的转换公式的详细推导过程, 请读者参阅本书网站上的 Tutorials 部分。

从 HSI 到 RGB 的彩色转换

在[0, 1]内给出 HSI 值, 现在我们要在相同的值域找到对应的 RGB 值。可用的公式取决于 H 的值。在原色分隔中有 3 个相隔 120° 的扇区(见图 6.13)。我们从 H 乘以 360° 开始, 这时的色调值回到原来的范围[0°, 360°]内。

RG 扇区($0^\circ \leq H < 120^\circ$): 当 H 的值在该扇区中时, RGB 分量由以下公式给出:

$$B = I(1 - S) \quad (6.2-5)$$

$$R = I \left[1 + \frac{S \cos H}{\cos(60^\circ - H)} \right] \quad (6.2-6)$$

$$G = 3I - (R + B) \quad (6.2-7)$$

GB 扇区($120^\circ \leq H < 240^\circ$): 如果给定的 H 值在该扇区中, 则首先从 H 中减去 120° , 即

$$H = H - 120^\circ \quad (6.2-8)$$

① 在该表达式中加一个较小的数可避免在 $R = G = B$ 时被零除的情形(即 θ 为 90° 的情形)。注意, 当所有的 RGB 分量相等时, 由式(6.2-3)可得出 $S = 0$ 。此外, 式(6.2-5)至式(6.2-7)中的由 HSI 至 RGB 的转换将给出 $R = G = B = I$, 这是我们期望的结果, 因为当 $R = G = B$ 时, 我们处理的图像是灰度级图像。

则 RGB 分量为

$$R = I(1 - S) \quad (6.2-9)$$

$$G = I \left[1 + \frac{S \cos H}{\cos(60^\circ - H)} \right] \quad (6.2-10)$$

$$B = 3I - (R + G) \quad (6.2-11)$$

BR 扇区($240^\circ \leq H < 360^\circ$): 最后, 如果 H 的值在该扇区中, 则从 H 中减去 240° , 即

$$H = H - 240^\circ \quad (6.2-12)$$

则 RGB 分量为

$$G = I(1 - S) \quad (6.2-13)$$

$$B = I \left[1 + \frac{S \cos H}{\cos(60^\circ - H)} \right] \quad (6.2-14)$$

$$R = 3I - (G + B) \quad (6.2-15)$$

这些公式在图像处理中的用法将在下面各节加以讨论。

例 6.2 对应于 RGB 彩色立方体图像的 HSI 值。

图6.15显示了图6.8中所示RGB值的色调、饱和度和强度图像。图6.15(a)是色调图像, 其最大的特点是立方体前(红)平面沿 45° 线的值是不连续的。为理解不连续的原因, 可参见图6.8, 从立方体的红色顶点到白色顶点画一条线, 并在这条线的中间选择一点。从该点开始, 向右环绕立方体一周直到回到开始点画一条轨迹。在该路径中出现的主要颜色是黄色、绿色、青色、蓝色、深红色、黑色直至红色。根据图6.13, 沿该路径的色调值应该从 0° 到 360° 增加(即从色调的最低可能值到最高可能值)。这正好如图6.15(a)所示的那样, 因为在灰度级中最低值代表黑色, 最高值代表白色。事实上, 这幅色调图像原本已被归一化到 $[0, 1]$ 范围内, 然后被缩放到8比特, 即在显示时转换到了 $[0, 255]$ 范围内。

图6.15(b)中, 饱和度图像显示出, 从暗值逐渐向 RGB 立方体的白顶点过渡, 颜色越来越少, 饱和度越来越低。最后, 图6.15(c)所示强度图像中的每个像素值是图6.8中相应像素处 RGB 值的平均。

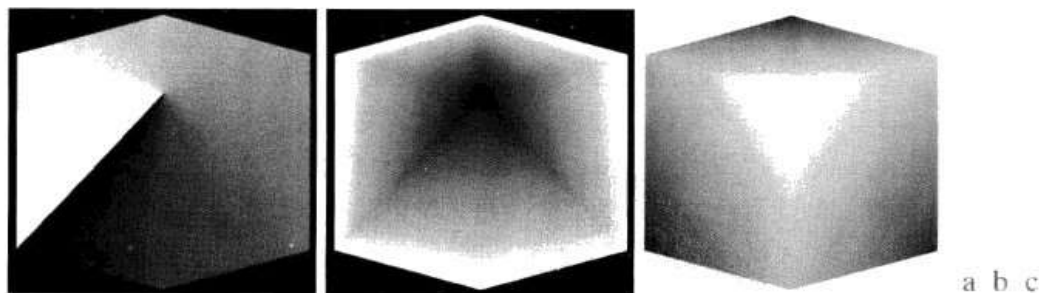


图 6.15 图 6.8 中图像的 HSI 分量: (a) 色调图像; (b) 饱和度图像; (c) 强度图像

处理 HSI 分量图像

在下面的讨论中, 我们考察处理 HSI 分量图像的几种简单技术, 以便帮助您熟悉这些分量并加深对 HSI 彩色模型的理解。图 6.16(a) 显示了一幅由 RGB 原色和二次色组成的图像。图 6.16(b) 到图 6.16(d) 显示了这幅图像的 H , S 和 I 分量图像, 这些图像是用式(6.2-2)到式(6.2-4)产生的。回顾一下本节早些时候的讨论, 图 6.16(b) 中的灰度值对应于角度; 例如, 因为红色对应于 0° , 所以图 6.16(a)

中的红区域被映射到色调图像中的一个黑色区域。类似地,图 6.16(c)中的灰度级对应于饱和度(为了显示,它们被放大到 $[0, 255]$),图 6.16(d)中的灰度级是平均强度。

为在 RGB 图像中更改任何区域的个别颜色,我们可以改变图 6.16(b)所示色调图像中相应区域的值。然后用式(6.2-5)到式(6.2-15)中说明的步骤,将新的 H 图像和没有变化的 S 图像与 I 图像一起变换回 RGB 图像。为了改变任何区域中颜色的饱和度(纯度),除了在 HSI 空间改变饱和度之外,可采用相同的步骤。类似的方法可用于更改任何区域的平均强度。当然,这些改变可同时进行。例如,图 6.17(a)中的图像是通过将对应于图 6.16(b)中的蓝色、绿色区域的像素变为 0 得到的。在图 6.17(b)中,我们将图 6.16(c)的分量图像 S 中的青色区域的饱和度减少一半。在图 6.17(c)中,我们把图 6.16(d)所示强度图像中心的白色区域的强度降低一半。把改进后的 HSI 图像转换回 RGB 彩色空间的结果显示在图 6.17(d)中。正如预期的那样,在这些图中我们看到,所有圆形的外部区域现在是红色的,青色区域的纯度降低了,中心区域变成了灰色而不再是白色。显然这些结果很简单,但却清楚地显示出了 HSI 模型独立控制色调、饱和度和强度的能力。当描述彩色时,我们会十分熟悉这些量。

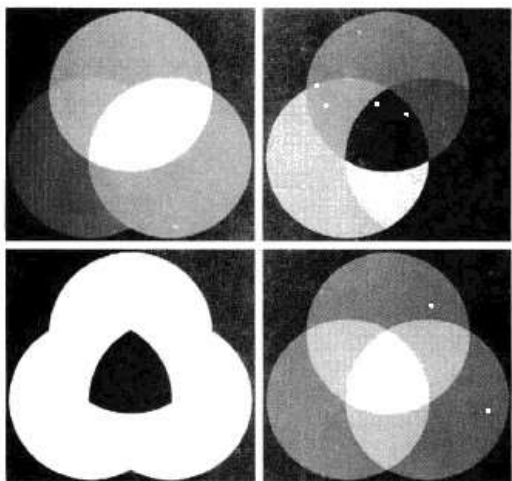


图 6.16 (a)RGB 图像及其对应的 HSI 图像的分量; (b)色调; (c)饱和度; (d)强度

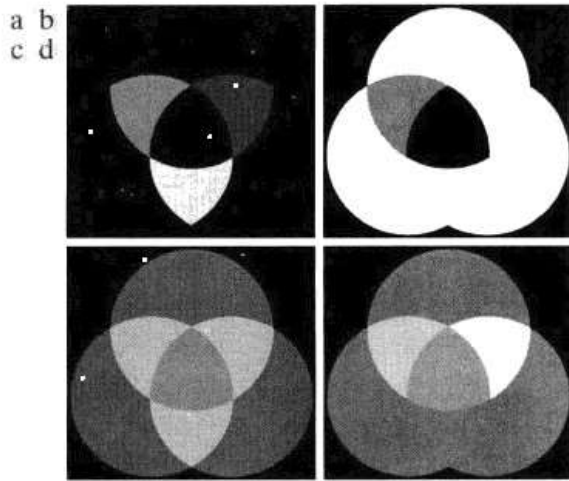


图 6.17 (a)~(c)修改后的 HSI 分量图像; (d)最终的 RGB 图像(原始的 HSI 图像见图 6.16)

6.3 伪彩色图像处理

伪彩色(也称为假彩色)图像处理是指基于一种指定的规则对灰度值赋以颜色的处理。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和与真彩色图像相关的处理,真彩色图像是在 6.4 节中开始讨论的主题。伪彩色的主要应用是人目视观察和解释单幅图像或序列图像中的灰度级事件。正如本章开始时指出的那样,利用彩色的主要动力之一是人类可以辨别几千种色调和强度,而相比之下只能辨别 20 多种灰度。

6.3.1 灰度分层^①

灰度分层(有时称为密度分层)和彩色编码技术是伪彩色图像处理的最简单的例子之一。如果一幅图像被描述为三维函数[见图 2.18(a)],则分层方法可以看成是放置一些平行于该图像的坐标平面的平面,然后,每个平面在相交的区域中“切割”图像函数。图 6.18 显示了使用位于 $f(x, y) = I_i$ 处的一个平面把该图像函数切割为两部分的一个例子。

^① 灰度分层在有些译著中也称为灰度分割——译者注。