

数字图像处理

第4章 图像增强

信息科学研究所

3.3.2 高通滤波法

因为图像中的边缘及急剧变化部分与高频分量有关，所以当利用高通滤波器衰减图像信号中的低频分量时就会相对地强调其高频分量，从而加强了图像中的边缘及急剧变化部分，达到图像尖锐化的目的。



线性滤波器处理框图

与低通滤波器相对应，常用的高通滤波器有理想高通滤波器、布特沃斯高通滤波器、指数高通滤波器和梯形高通滤波器等。

- 理想高通滤波器
- 布特沃斯（Butterworth）高通滤波器
- 指数高通滤波器
- 梯形高通滤波器

➤ 理想高通滤波器

一个理想的二维高通滤波器的传递函数由下式表示

$$H(u, v) = \begin{cases} 0 & D(u, v) \leq D_0 \\ 1 & D(u, v) > D_0 \end{cases} \quad (3-52)$$

式中 D_0 是从频域原点算起的截止频率(或距离), $D(u,v)$ 仍然由下式决定

$$D(u,v) = [u^2 + v^2]^{\frac{1}{2}} \quad (3-53)$$

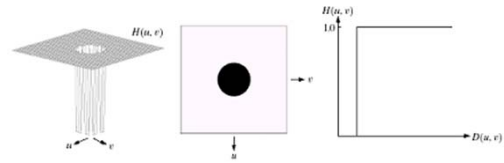


图3—28 理想高通滤波器传递函数径向剖面图

由图可见, 理想高通传递函数与理想低通正好相反。通过高通滤波正好把以 D_0 为半径的圆内的频率成分衰减掉, 对圆外的频率成分则无损地通过。与理想低通一样, 理想高通可以用计算机模拟实现, 但不可能用电子元件来实现。

➤ 布特沃斯 (Butterworth) 高通滤波器

截止频率为 D_0 的 n 阶布特沃斯高通滤波器的传递函数如下式表示

$$H(u,v) = \frac{1}{1 + \left[\frac{D_0}{D(u,v)} \right]^{2n}} \quad (3-54)$$

式中

$$D(u,v) = [u^2 + v^2]^{\frac{1}{2}}$$

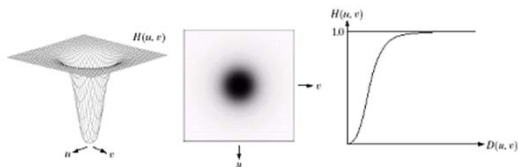


图3—29 布特沃斯高通滤波器传递函数径向剖面图 ($n=1$)

与低通滤波器一样, 定 $H(u,v)$ 下降到其最大值的 $1/2$ 处的 $D(u,v)$ 为截频点 D_0 。一般情况下, 高通滤波器的截频选择在使 $H(u,v)$ 下降到其最大值的 $\frac{1}{\sqrt{2}}$ 处, 满足这一条件的传递函数可修改成下式

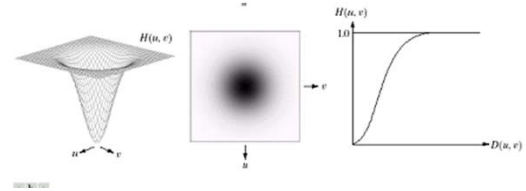
$$\begin{aligned} H(u,v) &= \frac{1}{1 + [\sqrt{2} - 1] \left[\frac{D_0}{D(u,v)} \right]^{2n}} \\ &= \frac{1}{1 + 0.414 \left[\frac{D_0}{D(u,v)} \right]^{2n}} \end{aligned}$$

➤ 指数高通滤波器

截频为 D_0 的指数高通滤波器的传递函数如下式表示

$$H(u, v) = e^{-\left[\frac{D_0}{D(u, v)}\right]^n} \quad (3-56)$$

式中 D_0 为截频, $D(u, v) = [u^2 + v^2]^{\frac{1}{2}}$, 参数 n 控制着 $H(u, v)$ 的增长率。指数高通滤波器的传递函数径向剖面图如图所示。



由式(4—60)可知, 当 $D(u, v) = D_0$ 时, $H(u, v) = 1/e$ 。如果仍然把 $H(u, v)$ 截止频率定在最大值的 $\frac{1}{\sqrt{2}}$ 时, 则其传递函数可修改为下面的形式:

$$\begin{aligned} H(u, v) &= e^{-\left[\frac{D_0}{D(u, v)}\right]^n} \\ &= e^{-0.347 \left[\frac{D_0}{D(u, v)}\right]^n} \end{aligned}$$

➤ 梯形高通滤波器

梯形高通滤波器的传递函数用下式表示

$$H(u, v) = \begin{cases} 0 & D(u, v) < D_0 \\ \frac{[D(u, v) - D_1]}{[D_0 - D_1]} & D_1 \leq D(u, v) \leq D_0 \\ 1 & D(u, v) > D_0 \end{cases} \quad (3-58)$$

同样, 式中 $D(u, v) = [u^2 + v^2]^{\frac{1}{2}}$ 。 D_0 和 D_1 为规定值, 并且 $D_0 > D_1$, 定义截频为 D_0 , D_1 是任选的, 只要满足 $D_0 > D_1$ 就可以了。梯形高通滤波器的传递函数径向剖面图如图3—31所示。

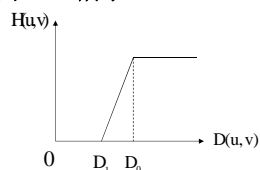


图3—31梯形高通滤波器传递函数径向剖面图

在图像尖锐化处理中也可以采用空域离散卷积的方法, 这种方法与高通滤波相比有类似的效果。

这种方法是首先确定掩模, 然后作卷积处理。式(3—59)、式(3—60)和式(3—61)列出了几种掩模, 式中的冲激响应阵列是高通形式的。

$$h = \begin{vmatrix} 0 & -1 & 0 \\ -1 & 5 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \end{vmatrix} \quad (3-59)$$

$$h = \begin{vmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & 9 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{vmatrix} \quad (3-60)$$

$$h = \begin{vmatrix} 1 & -2 & 1 \\ -2 & 5 & -2 \\ 1 & -2 & 1 \end{vmatrix} \quad (3-61)$$

$$g(s,t) = \sum_{m=1}^{m_1+m_2-1} \sum_{n=1}^{n_1+n_2-1} f(m,n)h(s-m+1,t-n+1)$$

$$1 \leq s \leq m_1+m_2-1, 1 \leq t \leq n_1+n_2-1$$

图片卷积滤波，该点的滤波值实际上是该点邻域右下角的卷积值（模板和邻域的卷积）。

对于一个3*3的模板和邻域，右下角的卷积值为：

$$g(3,3) = f(1,1)*h(3,3) + f(1,2)*h(3,2) + f(1,3)*h(3,1) + f(2,1)*h(2,3) + f(2,2)*h(2,2) + f(2,3)*h(2,1) + f(3,1)*h(1,3) + f(3,2)*h(1,2) + f(3,3)*h(1,1)$$

这正好是把模板h旋转180度（逆时针和顺时针都一样），然后和邻域f对应元素相乘再求和的结果。

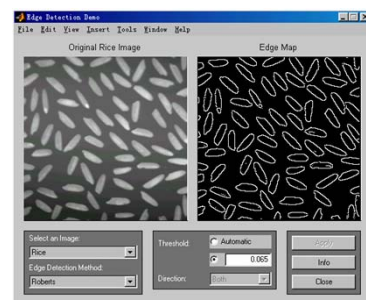
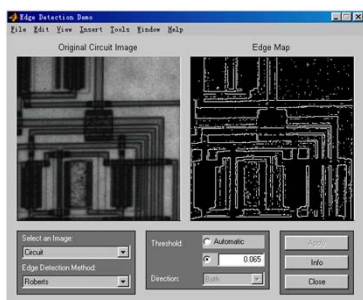
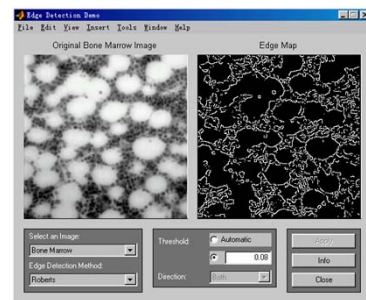
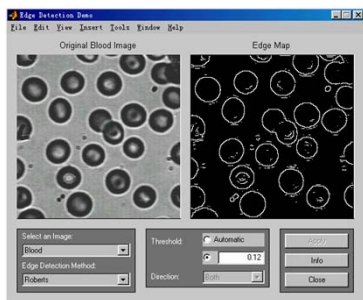
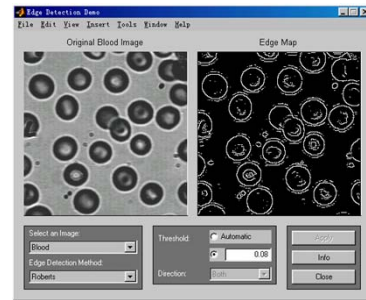
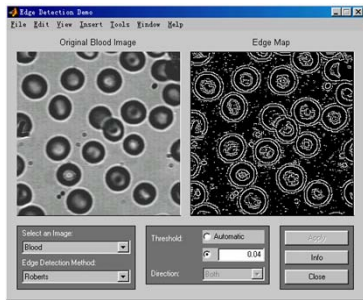
以上介绍的是图像尖锐化处理的方法。值得注意的是在尖锐化处理过程中，图像的边缘细节得到了加强，但图像中的噪声也同时被加重了，所以在实际处理中往往采用几种方法处理以便能得到更加满意的效果。



二阶导数：
Marr-
Hildreth边
缘



Canny算子



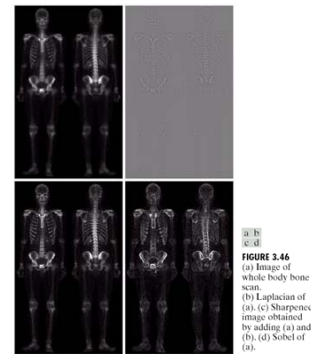
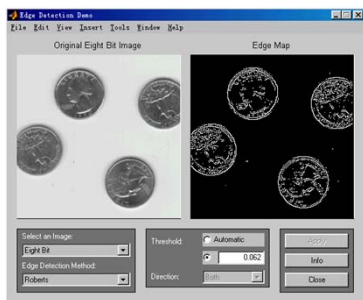
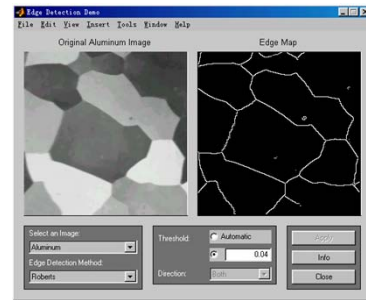
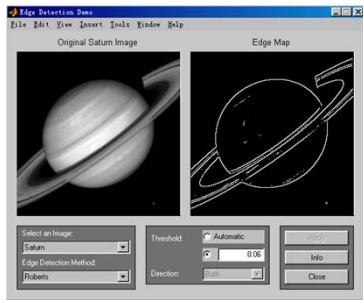


FIGURE 3.46
(a) Image of whole body bone scan. (b) Laplacian of (a). (c) Sharpened image obtained by adding (a) and (b). (d) Sobel of (a).

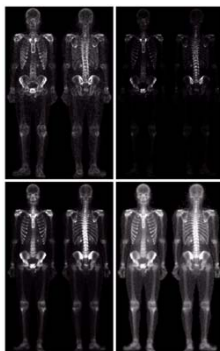


FIGURE 3.46
(Continued)
(e) Sobel image smoothed with a 5 x 5 averaging filter. (f) Mask image formed by the product of (c) and (e). (g) Sharpened image obtained by the sum of (a) and (f). (h) Final result obtained by applying a power-law transformation to (g). (Original image courtesy of G.E. Medical Systems.)

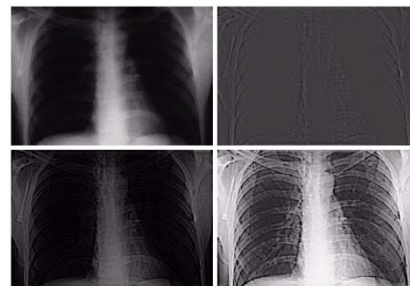


FIGURE 4.30
(a) A chest X-ray image. (b) Result of Butterworth highpass filtering. (c) Result of high-frequency emphasis filtering. (d) Result of performing histogram equalization on (c). (Original image courtesy Dr. Thomas R. Gest, Division of Anatomical Sciences, University of Michigan Medical School.)



3.4 利用同态系统进行增强处理

利用同态系统进行图像增强处理是把频率过滤和灰度变换结合起来的一种处理方法。它是把图像的照明反射模型作为频域处理的基础，利用压缩亮度范围和增强对比度来改善图像的一种处理技术。

一幅图像 $f(x, y)$ 可以用它的照射分量 $i(x, y)$ 及反射分量 $r(x, y)$ 来表示，即

$$f(x, y) = i(x, y) \cdot r(x, y) \quad (3-62)$$

因为傅立叶变换是线性变换，所以对于 (3—62) 中具有相乘关系的两个分量无法分开，

$$\mathcal{F}\{f(x, y)\} \neq \mathcal{F}\{i(x, y)\} \cdot \mathcal{F}\{r(x, y)\}$$

式中 \mathcal{F} 代表傅立叶变换。

如果首先把式 (3—62) 的两边取对数就可以把式中的乘性分量变成加性分量，而后再加以进一步处理，即

$$z(x, y) = \ln f(x, y) = \ln i(x, y) + \ln r(x, y) \quad (3-63)$$

此后，对式 (3—63) 两端再进行傅立叶变换，得

$$\begin{aligned} \mathcal{F}\{z(x, y)\} &= \mathcal{F}\{\ln f(x, y)\} \\ &= \mathcal{F}\{\ln i(x, y)\} + \mathcal{F}\{\ln r(x, y)\} \end{aligned} \quad (3-64)$$

$$\text{令: } Z(u, v) = \mathcal{F}\{z(x, y)\}$$

$$I(u, v) = \mathcal{F}\{\ln i(x, y)\}$$

$$R(u, v) = \mathcal{F}\{\ln r(x, y)\}$$

$$\text{则: } Z(u, v) = I(u, v) + R(u, v) \quad (3-65)$$

如果用一个传递函数为 $H(u, v)$ 的滤波器来处理 $Z(u, v)$ ，那么，如前面所讨论的那样，则：

$$\begin{aligned} S(u, v) &= H(u, v) \cdot Z(u, v) \\ &= H(u, v) \cdot I(u, v) + H(u, v) \cdot R(u, v) \end{aligned} \quad (3-66)$$

处理后，将式(3—66)再施以傅立叶反变换，则

$$\begin{aligned} s(x, y) &= \mathcal{F}^{-1}\{S(u, v)\} \\ &= \mathcal{F}^{-1}\{H(u, v) \cdot I(u, v)\} + \mathcal{F}^{-1}\{H(u, v) \cdot R(u, v)\} \end{aligned} \quad (3-67)$$

令：

$$\begin{aligned} i'(x, y) &= \mathcal{F}^{-1}\{H(u, v) \cdot I(u, v)\} \\ r'(x, y) &= \mathcal{F}^{-1}\{H(u, v) \cdot R(u, v)\} \end{aligned}$$

式(3—67)可写成如下式

$$s(x, y) = i'(x, y) + r'(x, y) \quad (3-68)$$

因为 $z(x, y)$ 是 $f(x, y)$ 的对数，为了得到所要求的增强图像 $g(x, y)$ 还要进行一次相反的运算，即

$$\begin{aligned} g(x, y) &= \exp\{s(x, y)\} \\ &= \exp\{i'(x, y) + r'(x, y)\} \\ &= \exp\{i'(x, y)\} \cdot \exp\{r'(x, y)\} \end{aligned} \quad (3-69)$$

$$\begin{aligned} \text{令: } i_0(x, y) &= \exp\{i'(x, y)\} \\ r_0(x, y) &= \exp\{r'(x, y)\} \end{aligned}$$

$$\text{则: } g(x, y) = i_0(x, y) \cdot r_0(x, y) \quad (3-70)$$

式中 $i_0(x, y)$ 是处理后的照射分量， $r_0(x, y)$ 是处理后的反射分量。

$$g(x, y) = i_0(x, y) \cdot r_0(x, y)$$

一幅图像的照射分量通常用慢变化来表征，而反射分量则倾向急剧变化。这个特征使人们有可能把一幅图像取对数后的傅立叶变换的低频分量和照射分量联系起来，而把反射分量与高频分量联系起来。这样的近似虽然是粗糙的，但是却可以收到有效的增强效果。

用同态滤波方法进行增强处理的流程框图如图3—32所示

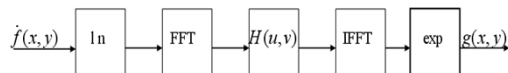


图3—32 同态滤波法增强处理流程框图

一般情况下：

照明决定了图像中像素灰度的**动态范围**，

对比度是图像中某些内容**反射特性**的函数。

用同态滤波器可以理想地控制这些分量。

适当地选择滤波器传递函数将会对傅立叶变换中的低频分量和高频分量产生不同的响应。处理结果会使像素灰度的动态范围或图像对比度得到增强。

当处理一幅由于照射光不均匀而产生黑斑暗影时（摄像机常常会有这种缺陷），想要去掉这些暗影又不失去图像的某些细节，则这种处理是很有效的。

3.5 彩色图像处理

前面几节讨论的都是对单色图像的处理技术。为了更有效地增强图像，在数字图像处理中广泛应用了彩色处理技术。

色彩的运用主要出于以下两个因素：

1. 在自动图像分析中色彩是一个有力的描绘子，它通常可使从一个场景中识别和抽取目标的处理得到简化。
2. 人们对图像进行分析时，人眼能区别的灰度层次大约只有二十几种，但却能够识别成千上万的色彩。

彩色图像处理被划分为三个主要领域，即：

真彩色 (True color processing)

假彩色 (False color processing)

伪彩色 (pseudo color processing)。

在真彩色处理中,被处理的图像一般从全彩色传感器中获得,例如彩色摄影机或彩色扫描仪;

假彩色处理是一种尽量逼近真实彩色的人工彩色处理技术;

伪彩色处理的问题是分配彩色给某种灰度(强度或强度范围),以增强辨识能力。

这种二十世纪八十年代取得重大进步的图像处理技术由于彩色传感器和彩色图像处理的硬件的成熟而使得彩色图像处理技术得到广泛应用。

一般情况下,把能真实反映自然物体本来颜色的图像叫真彩色图像。

例如,由彩色摄像机摄制,并由彩色监视器复原的彩色图像就近于真彩色。在计算机图像处理系统中进行真彩色图像处理的方法如图3—33所示。

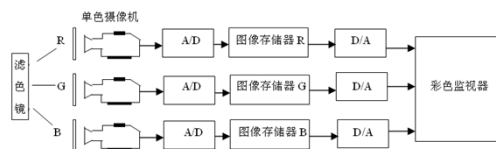


图3—33 真彩色图像处理框图

在处理过程中,首先用加有红色滤色片的摄像机(黑白摄像机)摄取彩色图像,图像信号经数字化送入一块图像存储板存起来,第二步用带有绿色滤色片的摄像机摄取图像,图像信号经数字化送入第二块图像存储板,最后用带有蓝色滤色片的摄像机摄取图像,图像数据存储在三块图像存储板内。

三幅图像数据准备好后就可以在系统的输出设备——彩色监视器上合成一幅真彩色图像。另外，利用彩色摄像机摄取彩色图像，然后利用解码电路解出红、绿、蓝三幅单色图像进行处理也是常用的彩色图像处理方法。其原理如图3—34所示。

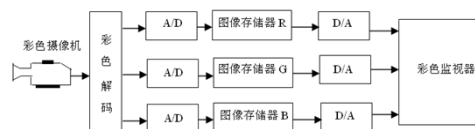


图3—34 另一种真彩色图像处理框图

假彩色图像处理与伪彩色图像处理这两个术语在有些文献中并没有加以严格区分。但从图像处理的角度来看，二者还是有差别的。例如人们常常把没有颜色的人物照片用人工着色的方法彩色化，并且其目的主要是在于使其颜色尽量接近于真实色彩，这种技术我们认为应归入假彩色技术。

W.K.普拉特提出的假彩色概念是这样的，将一幅由三基色描绘的彩色原图像或具有同一内容的一套多光谱图像，逐像素映射到由三激励值所确定的色度空间上去，这种映射可以是线性的也可以是非线性的。

伪彩色技术早期在遥感图片处理中应用，采用的方法是光学方法。这种方法固然有几何失真小的优点，但其处理速度是极慢的，而且处理一幅照片要较复杂的洗印技术，这样有时会限制它的应用范围。

一般情况下人为设计的各个目标物的颜色是不同的。如蓝色的天空可以映射为红色，绿色的草地也可以映射为蓝色等等。

主要目的在于使处理后的图像中的某些内容更加醒目，当然彩色的设计与人的视觉心理特性有很大关系。伪彩色技术也可以应用于线性彩色坐标变换，它可以由原图像基色转变为另一组新基色。

伪彩色数字图像处理是电处理方法。它可以实时处理，而且其精度可以做得很高。在处理结果需要保留时，可有多种方法制做硬拷贝。为什么伪彩色处理可以达到增强的效果呢？这主要是由于人眼对彩色的分辨能力远远大于对黑白灰度的分辨率。

对于一般的观察者来说，通常只能分辨十几级灰度。就是经过专门训练的人员（如X光透视医生）也只能分辨几十级灰度。而对于彩色来说，人的眼睛可分辨出上千种彩色的色调和强度。因此，在一幅黑白图像中检测不到的信息，经伪彩色增强后可较容易地被检测出来。

伪彩色处理也是一种彩色映射过程。主要目的是增强观察者对图像信息的检测能力。它的主要方法是将二维数据阵列转化到色平面上。这种映射可由式(3—71)来表示。

$$\left. \begin{aligned} R(x, y) &= \wp_R \{ f(x, y) \} \\ G(x, y) &= \wp_G \{ f(x, y) \} \\ B(x, y) &= \wp_B \{ f(x, y) \} \end{aligned} \right\} \quad (3-71)$$

式中 $R(x, y)$, $G(x, y)$, $B(x, y)$ 是彩色显示三激励值, \wp_R, \wp_G, \wp_B 是映射算子, 它们可以是线性的也可以是非线性的。

通过以上映射关系就可以确定出三维色空间的轨迹。这种映射关系如图3—35所示。当在色度空间里给定了一条伪彩色轨迹后还要选择数据面上的变量和轨迹上的距离增量之间的标度关系，一般将轨迹长度分为相等的增量距离。

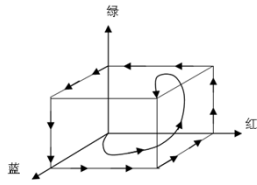
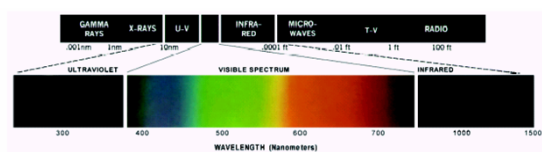
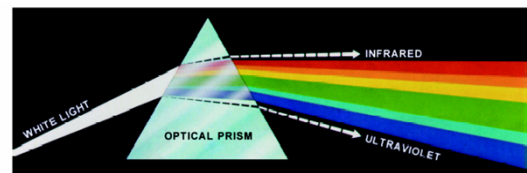


图3—35 伪彩色映射轨迹

3.5.1 颜色基本原理

尽管在获得色彩时人脑所进行的处理是一个仍未被完全理解的生理心理现象,但颜色的物理特性在实验和理论的基础上可完全地表达出来。

1666年,牛顿发现当一束太阳光穿过一个玻璃棱镜时,光束的边缘并不是白色的,而是一个连续的光谱,一端是紫色,另一端是红色。这条彩色光谱可分为6个宽域:紫色、蓝色、绿色、黄色、桔黄和红色。当用全彩色法观看,彩带中并没有哪种截然的颜色界限,而是每种彩条都平滑地变成另外一种。



如果物体的反射光在所有可见光波长中的成分相对平衡时,物体显示出白色。

如果物体只反射有限的可见频谱范围内的某些光波时,物体则显示不同的颜色。

例如：

物体反射光的波长主要是从500到570纳米,而吸收多数其它波长的能量时，物体则显示绿色。

光的特点是颜色科学的中心。如果光线没有颜色，它唯一的属性就是它的强度或灰度。无色光通常就是我们在黑白电视机中所看到的画面，而且它已成为图像处理中所讨论的主要对象。因此，**灰度**一词指的是强度的数量量度，即从黑到灰最后到白。

有色光的电磁能谱范围大约从400到700纳米。有三个基本参数可用来描述可见光源的特性，即：**辐射**、**灰度**和**亮度**。辐射是通过光源的能量总和，它通常用瓦特(W)衡量，**灰度**用流明(lm)来衡量，是观察者从光源获得的能量的量度。

例如，从工作于红外线区的光谱中发射的光线可能有很大的能量（乃至可用于取暖），但观察者几乎看不到它，因为它的灰度几乎是零。

三基色混色及色度表示原理

根据光的波动说，**单一波长的光称为单色光**。从人们可以区别种种不同颜色这样一个事实出发，似乎可以假设视网膜上也存在着许多不同类型的锥状体，每一类型的锥状体只“谐振”于某一特定的颜色。如果锥状体果真有这样的单色响应，那么某一彩色感觉只能由相应波长的电磁能引起。

然而，事实却不完全如此，照射到视网膜上的某一单色光并不是引起该彩色的唯一因素。例如，有几种单色黄光可以由射到视网膜上的红光和绿光配出来。**几乎所有的彩色都能由三种基本彩色混配出来。这三种彩色就叫做三基色。**

由三基色混配各种颜色的方法通常有两种：

相加混色：彩色电视机上的颜色是通过相加混色产生的。

相减混色：彩色电影和幻灯片等与**绘画原料**一样是通过相减混色产生各种颜色的。



相加混色和相减混色的主要区别：

第一，相加混色是由发光体发出的光相加而产生各种颜色，而相减混色是先有白色光，尔后从中减去某些成份（吸收）得到各种彩色。

第二，相加混色的三基色是**红、绿、蓝**，而相减混色的三基色是**黄、青、紫**（一般不确切地说成是**黄、蓝、红**）。也就是说相加混色的补色就是相减混色的基色。

第三，相加混色和相减混色有不同规律（指颜料相混）。

相加混色：

红 + 绿 = 黄

红 + 蓝 = 紫

蓝 + 绿 = 青

红 + 绿 + 蓝 = 白

相减混色：

黄 = 白 - 蓝

紫 = 白 - 绿

青 = 白 - 红

白 - 蓝 - 绿 - 红 = 黑



格拉斯曼定律 (Grassman Law) 包括如下四项内容:

- (1) 所有颜色都可以用互相独立的三基色混合得到;
- (2) 假如三基色的混合比相等, 则色调和色饱和度也相等;

- (3) 任意两种颜色相混合产生的新颜色与采用三基色分别合成这两种颜色的各自成分混合起来得到的结果相等;
- (4) 混合色的光亮度是原来各分量光亮度的总和。

这里**色调**、**色饱和度**及**亮度**是表示**色觉程度**的量。

色调——表示各种颜色的**种类**的术语;

色饱和度——表示颜色**深浅**(添加白光的多少)。

以三基色为基础的格拉斯曼定律可用下式表示

$$F \equiv R(R) + G(G) + B(B) \quad (3-72)$$

国际照明委员会 (CIE) 规定:

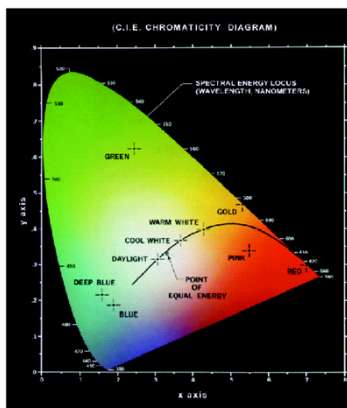
红色 (波长 $\lambda = 700.00\text{nm}$),

绿色 (波长 $\lambda = 546.1\text{nm}$)

蓝色 (波长 $\lambda = 438.8\text{nm}$)

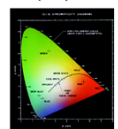
三种单色光作为表色系统的三基色。

这就是CIE的R、G、B颜色表示系统。



在数字图像处理中的终端显示通常用显像管 (CRT) 也就是用彩色监视器显示。由相加混色原理可知白光可由红、绿、蓝三种基色光相加得到。产生 1lm 的白光所需要的三基色的近似值可用下面的亮度方程来表示

$$1\text{ lm(白光)} = 0.30\text{ lm(红)} + 0.59\text{ lm(绿)} + 0.11\text{ lm(蓝)}$$



由上式可见，产生白光时三基色的比例关系是不等的，这显然给实际使用带来一些不方便。为了克服这一缺点，使用了三基色单位制。这就是所谓的T单位制。在使用T单位制时，认为白光是由等量的三基色组成。因此，表示的亮度方程可改写如下

$$1lm(W)=1T(R)+1T(G)+1T(B)$$

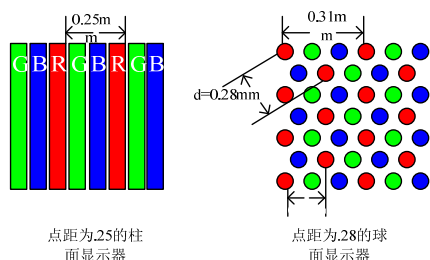
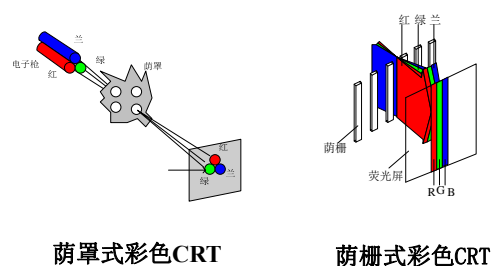
1T单位红光=0.30lm;

1T单位绿光=0.59lm;

1T单位蓝光=0.11lm。

由此可知T单位与流明数的关系，在需要的时候可以很容易地进行转换。由于T单位的采用就除掉了复杂数字带来的麻烦。

彩色电视机的颜色是采用相加混色。许多彩色电视显像管的内部结构由大量的荧光粉组合构成。红、绿、蓝三色点一般呈三角形或一字形按组排列。



柱面和球面显示器点距定义示意图

当显像时，一组中的每个点都产生一种基色。如发红光的像素点的强度由显像管的电子枪来调整，其强度正比于“红色脉冲”的能量。

每组中的绿色和蓝色像素点也以同样的方式来调整，显示在电视接收机上。这种效果就是来自每个像素点的三基色被加到一起并由眼中的锥状体接收，我们就感觉到了一幅全彩色图像。每秒钟刷新25（或30）帧就会产生连续图像。

通常用来区别一种颜色与另一种颜色的特征量有亮度、色度和饱和度。

亮度：用来表征颜色强度概念；

色度：是一种与波长有关的属性，色度表征了观察者所获得的主导颜色的感觉。当我们说一个物体是红色、桔黄或黄色时，也就确定了它的色度。

饱和度：是在颜色中掺杂白色光的数量多少的度量。纯谱颜色是完全饱和的。如紫色(红和白)和淡紫色(紫和白)这样的颜色是不饱和的。饱和的程度与添加白光的数量成比例。

色度和饱和度合在一起被称为彩色。因此，一种颜色可能是以它的亮度和彩色为特征，一种颜色可以由它的三原系数来确定，定义如下：

$$x = \frac{X}{X + Y + Z} \quad (3-74)$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z} \quad (3-75)$$

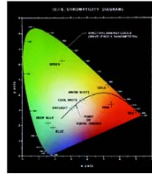
$$z = \frac{Z}{X + Y + Z} \quad (3-76)$$

$$x + y + z = 1 \quad (3-77)$$

一种表征颜色的途径是用色度图，它以 x （红）和 y （绿）的函数表示颜色组成。对任意 x 和 y 的值，相应的 z （蓝）的值可从公式(3—77)中获得，即： $z = 1 - (x + y)$ 。例如，某颜色有大约62%的绿色和25%的红色，那么，由公式(3—77)可知，蓝色的组成大约有13%。

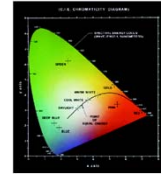
各种谱色的位置(从紫色的380纳米到红色的780纳米)标示在舌形色度图的边缘上。

这些是纯谱色。任何不在边缘上而在中间的点都代表一些谱色的混合色。



定位在图的边缘上的任意一点是完全饱和的。

当一点越离开边缘点接近等能量点, 加入的白光就越多, 它就越不饱和。等能量点的饱和度为零。



色度图对于颜色混合是非常有用的。因为图中连接任意两点的直线部分定义了所有不同颜色的变化, 这种变化可以通过另外合并这两种颜色来获得。

例如, 一条从红画到绿点的直线, 如果红光比绿光多, 代表新颜色的点将在该连线上, 但它离红点比离绿点要近。同样, 一条从等能量点画到图的边缘上任意点的直线将定义一个特定的谱色。

3.5.2 颜色模型

按通常的方式, 彩色模型化的目的是按某种标准利用基色表示颜色。实质上, 一种颜色模型是用一个3-D坐标系统及这个系统中的一个子空间来表示。在这个系统中每种颜色都由一个单点表示。

通常使用的多数彩色模型或者是面向硬件设备(例如彩色监视器或打印机), 或者是面向应用的。

在实际中, 通常使用的与硬件有关的模型有:

RGB 模型, 这种模型用在彩色监视器和彩色摄影机等领域。

CMY 模型用在彩色打印机上。

YIQ 模型用于彩色电视广播。该模型中, *Y* 相对于亮度,而*I* 和*Q*是被称为正交的两个颜色分量。

常用于彩色图像模拟的是*HSI*模型和*HSV* 模型。

在图像处理中常用的模型是*RGB*、*YIQ*和*HSI*模型。

下面我们将介绍这三种模型的基本特性,并且讨论它们的不同点和在数字图像处理中的应用。尽管*CMY*模型用于打印,而不是用于实际的图像处理,我们在这里也介绍一下,因为它在获得硬件拷贝输出上很重要。

➤ *RGB* 彩色模型

在 *RGB* 模型中,每种颜色的主要光谱中都有红、绿、蓝的成分。这种模型基于Cartesian (笛卡尔) 坐标系统。颜色子空间如图4—40的立方体所示,在图中, *RGB* 值在3个顶角上,蓝绿色、紫红色和黄色在另三个顶角上,黑色在原点,白色在离原点最远的角上。

在这个模型中,灰度级沿着黑白两点的连线从黑延伸到白,其他各种颜色由位于立方体内或立方体上的点来表示,同时由原点延伸的矢量决定。为了方便,假定所有的颜色值都被标准化,图4—40中的立方体就是单位立方体。也就是,所有 *R*、*G*、*B* 的值都被假定在[0, 1]范围内。

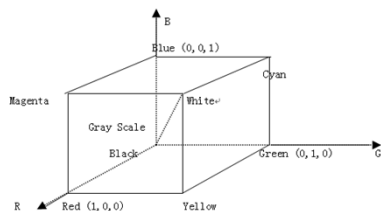


图3—40 *R*、*G*、*B* 彩色矩形

RGB 彩色模型中的图像由三个独立的图像平面构成,每个平面代表一种原色。当输入 *RGB* 监视器时,这三个图像在屏幕上组合产生了合成的彩色图像。

这样，当图像本身用3原色平面描述时，在图像处理中运用 *RGB* 模型就很有意义。相应地，大多数用来获取数字图像的彩色摄像机都使用 *RGB* 格式。目前，在图像处理中只使用这种重要模型。

RGB 模型应用的一个例子是航天和卫星多光谱图像数据的处理。图像是由工作于不同光谱范围的图像传感器获得的。例如，一帧LANDSAT陆地卫星图像由4幅数字图像组成。

每幅图像有相同的场景，但通过不同的光谱范围或窗口获得，两个窗口在可见光谱范围内，大致对应于绿和红，另两个窗口在光谱的红外线部分。这样每幅图像平面都有物理意义。

如果对人脸的彩色图像进行增强处理，部分图像隐藏在阴影中，直方图均衡是处理这类问题的理想工具。如果应用 *RGB* 模型，因为存在三种图像（红、绿、蓝），而直方图均衡仅根据强度值处理，很显然，如果把每幅图像单独地进行直方图均衡，

所有可能隐藏在阴影中的图像部分都将被增强。然而，所有三种图像的强度将不同地改变颜色性能(如色调)，显示在 *RGB* 监视器上时就不再是自然和谐的了。因此，*RGB* 模型对于这类处理就不太合适。

➤ *CMY* 彩色模型

如前所述，蓝绿色、红紫色和黄色都是光的合成色（或二次色）。例如，当用白光照蓝绿色的表面时没有红光从这个表面反射出来。也就是说，蓝绿色从反射的白光中除去红光，这白光本身由等量的红绿蓝光组成。

多数在纸上堆积颜色的设备，如彩色打印机、复印机，要求 *CMY* 数据输入或进行一次 *RGB* 到 *CMY* 的变换。这一变换可以用一简单的变换式表示：

$$\begin{bmatrix} C \\ M \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (3-78)$$

这里，假定所有的颜色值都被标准化到 $[0, 1]$ 范围内。

式 (3—78) 表明从一个纯蓝绿色表面反射的光线中不包括红色 (即 $C=1-R$)。

红紫色不反射绿色 ($M=1-G$)，

纯黄色不反射蓝色 ($Y=1-B$)，

式 (3—78) 揭示了 *CMY* 值可以很容易地用 1 减单个值的方法获得。

如前描述，*CMY* 模型在图像处理中用在产生硬拷贝输出上，因此，从 *CMY* 到 *RGB* 的反变换操作通常没有实际意义。

➤ *YIQ* 彩色模型

YIQ 彩色模型用于彩色电视广播。为了有效传输并与黑白电视兼容，*YIQ* 是 *RGB* 的一个编码。实际上，*YIQ* 系统中的 *Y* 分量提供了黑白电视机要求的所有影像信息。*RGB* 到 *YIQ* 的变换定义为：

$$\begin{bmatrix} Y \\ I \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.299 & 0.587 & 0.114 \\ 0.596 & -0.275 & -0.321 \\ 0.212 & -0.523 & 0.311 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (3-79)$$

为了从一组 RGB 值中获得 YIQ 值,我们可简单地进行矩阵变换。 YIQ 模型利用人的可视系统对亮度变化比对色调和饱和度变化更敏感而设计的。这样, YIQ 标准中用以表示 Y 时给予较大的带宽(是数字颜色时用比特),用以表示 I 、 Q 时赋予较小的带宽。

另外, 它成为普遍应用的标准是因为在图像处理中 YIQ 模型的主要优点是去掉了亮度(Y)和颜色信息(I 和 Q)间的紧密联系。亮度是与眼中获得的光的总量成比例的。去除这种联系的重要性在于处理图像的亮度成分时能在不影响颜色成分的情况下进行。

例如, 前面提到的 RGB 模型。我们可以采用直方图均衡技术对由 YIQ 格式的彩色图像进行处理, 即通过给它的 Y 成分进行直方图均衡处理, 图像中相关的颜色不受处理影响。

➤ HSI 彩色模型

回想一下前节中讨论的色调是描述纯色(纯黄、桔黄或红)的颜色属性。而饱和度提供了由白光冲淡纯色程度的量度。 HSI 颜色模型的重要性在于两方面, **第一**, 去掉强度成分(I)在图像中与颜色信息的联系;

第二, 色调和饱和度成分与人们获得颜色的方式密切相关。

这些特征使 HSI 模型成为一个理想的研究图像处理运算法则的工具, 这个法则基于人的视觉系统的一些颜色感觉特性。

很多实用系统都用到 HSI 模型, 如: 自动判断水果和蔬菜的成熟度的图像处理系统, 用颜色样本匹配或检测彩色产品品质的图像处理系统等。在这些相似的应用中, 关键是把系统操作建立在颜色特性上, 人们用这些特性完成特定的任务。

HSI 模型的颜色定义与归一化的红、绿、蓝值有关。这些值由 **RGB** 的三基色给出：

$$r = \frac{R}{(R + G + B)} \quad (3-80)$$

$$g = \frac{G}{(R + G + B)} \quad (3-81)$$

$$b = \frac{B}{(R + g + B)} \quad (3-82)$$

在此我们假定 R 、 G 、 B 已被归一化，其值在 $[0, 1]$ 之间。式 (3—80) — (3—82) 说明 r 、 g 、 b 的值也在 $[0, 1]$ 之间，而且

$$r + g + b = 1 \quad (3-83)$$

我们注意到，尽管 R 、 G 、 B 可同时为1，但归一化变量必须满足式 (3—83)。事实上，(3—83) 是包含 **HSI** 三角形的平面的等式。

对任意三个 $[0, 1]$ 范围内的 R 、 G 、 B 颜色分量，**HSI** 模型的亮度 I 可定义为

$$I = \frac{1}{3}(R + G + B) \quad (3-84)$$

上式得出一个 $[0, 1]$ 范围内的值。

接下来，要得到色调 H 和饱和度 S 。

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

(3—85)

$$s = 1 - \frac{3}{(R + G + B)} [\min(R, G, B)] \quad (3-86)$$

对 **HSI** 三角形内的任意点都是普遍适用的。

为了由 $[0, 1]$ 范围的 **RGB** 值得到同样在 $[0, 1]$ 范围内的 **HSI** 值，上述结论得出了以下几个表达式：

$$I = \frac{1}{3}(R + G + B) \quad (3-87)$$

$$S = 1 - \frac{3}{(R + G + B)}[\min(R, G, B)] \quad (3-88)$$

$$H = \cos^{-1} \left\{ \frac{\frac{1}{2}[(R - G) + (R - B)]}{[(R - G)^2 + (R - B)(G - B)]^{1/2}} \right\} \quad (3-89)$$

由 *HSI* 到 *RGB* 的转换

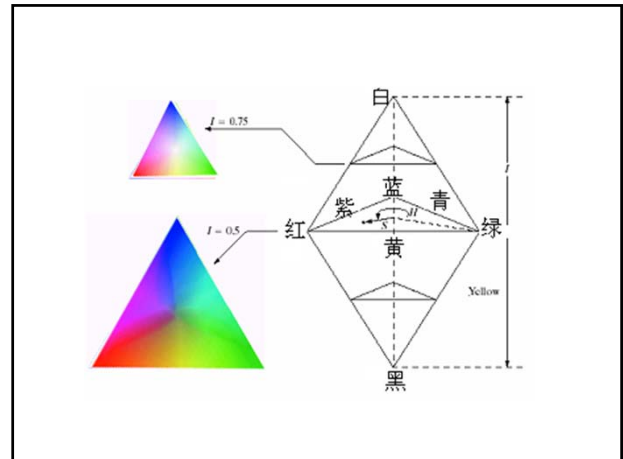
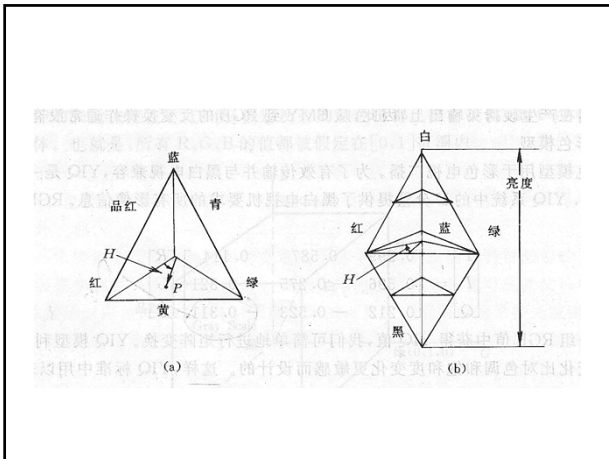
模型的颜色分量（色调（hue）和饱和度（saturation））的定义与图3—41(a)所示的彩色三角形有关）。在图3—41(a)中，我们注意到，颜色点的色调是该向量与红色轴的夹角。因此，当 $H=0^\circ$ 时，为红色， $H=60^\circ$ 时，为绿色等等。

色点的饱和度是指一种颜色被白色稀释的程度，它与点到三角形中心的距离成正比。点距三角形中心越远，这种颜色的饱和度越大。

模型中的亮度的测量与垂直于三角形并通过其中心的直线有关。沿着位于三角形下方的直线，亮度逐渐由暗到黑，相反，在三角形上方，亮度逐渐由明亮变到白。

在三维色空间中将色调、饱和度、亮度结合起来，就产生了如图3—41（b）所示的三面的、类似金字塔的结构。这个结构表面上的任意一点代表一种完全饱和的颜色。

也适用于结构内的点，唯一不同的是，随着它们逐渐接近纵轴，颜色的饱和度逐渐降低。这种颜色的色调由它与红色轴的夹角决定，亮度由该点与黑色点的垂直距离决定。类似的结论



已知 $[0, 1]$ 之间的 HSI 值，现在想得到同样范围内的相应的 RGB 值。我们以令 $H = 360(H)$ 开始，这使色调恢复到 $[0, 360^\circ]$ 的范围。在 RG 部分($0^\circ < H < 120^\circ$)，由式(4—97)

当 $0^\circ < H < 120^\circ$ 时，结论为

$$b = \frac{1}{3}(1 - S) \quad (3-90)$$

$$r = \frac{1}{3} \left[1 + \frac{S \cos H}{\cos(60^\circ - H)} \right] \quad (3-91)$$

$$g = 1 - (r + b) \quad (3-92)$$

由式 $r + g + b = 1$ 的定义，上面得到的颜色分量是归一化了的。我们可以恢复 RGB 分量

$$R = 3I_r$$

$$G = 3I_g$$

$$B = 3I_b$$

在 GB 部分 ($120^\circ < H < 240^\circ$)，类似的推导可得出

$$H = H - 120^\circ \quad (3-93)$$

$$r = 1/3(1 - S) \quad (3-94)$$

$$g = \frac{1}{3} \left[1 + \frac{S \cos H}{\cos(60^\circ - H)} \right] \quad (3-95)$$

$$b = 1 - (r + b) \quad (3-96)$$

根据前面的方法，可由 r 、 g 、 b 值得到 R 、 G 、 B 值。

在 BR 部分 ($240^\circ < H < 360^\circ$)

$$H = H - 240^\circ \quad (3-97)$$

$$g = 1/3(1 - S) \quad (3-98)$$

$$b = \frac{1}{3} \left[1 + \frac{S \cos H}{\cos(60^\circ - H)} \right] \quad (3-99)$$

$$r = 1 - (g + b) \quad (3-100)$$

如前所述, 可由 r 、 g 、 b 值得到 R 、 G 、 B 值。

4.5.1 颜色基本原理

4.5.2 颜色模型

4.5.3 伪彩色图像处理

4.5.4 关于彩色显示

4.5.5 实时伪彩色增强系统

► 等密度分层伪彩色技术

等密度分层伪彩色处理是应用较多的一种方法。这种处理可以用专用硬件来实现, 也可以用查表的方法来实现。密度分层是一个沿用术语, 它最初来源于照相技术, 因为一幅照片的浓淡层次是由照相底片上银粒的沉积度决定的, 所以照片的反差 (相当于电视画面的对比度) 直接与密度有关。

在图像处理技术中更为常用的术语是灰度一词, 因此密度分层就是灰度分层。

在这一节中, 我们将研究几种根据黑白图像的灰度级为之分配颜色的方法。

► 灰度分割 (Intensity slicing)

灰度分割和颜色编码是伪彩色图像处理的最简单的例子之一。如果一幅图像可被看作一个二维亮度函数, 这种方法可理解为用一些平行于图像坐标平面的平面, 每一平面在与函数相交处分割函数。图3-40展示了一个用平面 $f(x, y) = I_j$ 将函数分割为两部分的例子。

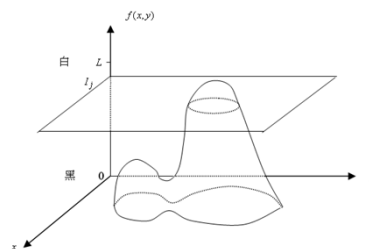


图3—40 密度分层技术示意图

如果在图3—40所示平面两侧分配不同颜色，那么，灰度级在平面以上的所有像素将用一种颜色编码，而灰度级在平面以下的所有像素将用另一种颜色编码，灰度级恰好位于平面本身的像素可任意分配两种颜色之一，结果是一个两色图像。将切割平面沿灰度级坐标上下移动可控制图像的外观。

多分层过程也类似图3—40所示的原理。具体过程可作如下解释，可作若干个平行于 xy 坐标面的平面，那么每个平面将与函数 $f(x,y)$ 相交，这种就把 $f(x,y)$ 表示的连续灰度分成若干级别，分层数可根据需要的精度加以任意设置。

例如，在所定的灰度级 L_1, L_2, \dots, L_M 处定义 M 个平面，这些平面是等间距的，这 M 个平面把灰度分成 $M+1$ 个区域，区域级别为 L_1, L_2, \dots, L_M 。

令 L_1 代表黑色 $[f(x,y)=0]$ ， L_M 代表白色 $[f(x,y)=L_M]$ 。那么，设 $0 < M < L$ ，这样就完成了等密度分层。然后，可根据下面的关系式分配颜色：

$$f(x, y) = C_k \quad f(x, y) \in R_k \quad (3-101)$$

这里， C_k 是与切割平面定义的第 K 个区间 R_K 相关的颜色。

分层过程也可由图4—41所示的电路来实现。首先通过分压器得到一组均匀间隔的基准电压，这个基准电压送入比较器作为比较标准。图像电信号加到比较器的另一端。

当信号的幅度超过比较器的基准电压时，比较器的输出端便输出一个脉冲。这样，不同的比较器的输出脉冲便代表一个不同的灰度层次，达到灰度分割的目的。

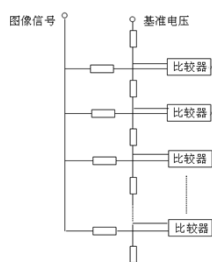


图 3—41 等密度分层电路原理

灰度—彩色变换的任务是给不同的灰度级赋予不同的颜色。它既可以结合软件用计算机来实现，也可以用硬件来实时实现。最后彩色显示都是将彩色编码送到彩色监视器的 RGB 电路上合成一幅彩色图像。

一种实时硬件编码方案如下，首先可以把灰度分割器作成16级分层，当然，这16级分层既可对整个图像信号的灰度范围，也可以行进行灰度窗口处理，对灰度整个动态范围内的某一局部范围进行分层。

通过编码器可以得到四位码，将这四位码分别加到监视器中的红、绿、蓝、亮度四个通道中即可得到16种不同的色调。彩色编码原理框图如图3—42所示。

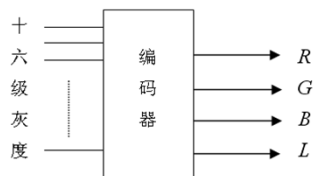


图3—42 硬件彩色编码原理

编码电路可以用门电路实现。

颜色与码的对应关系完全可以由人为控制来改变。
例如下列所示的对应关系：

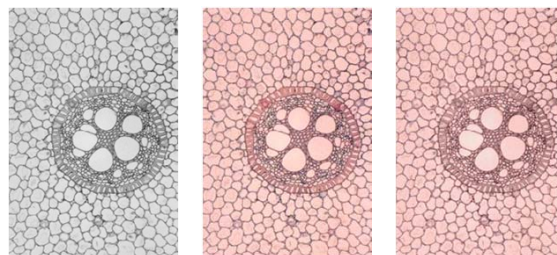
1 1 1 1	白色
1 1 1 0	深蓝色
1 1 0 1	青色
1 1 0 0	绿色
1 0 1 1	深绿色
1 0 1 0	浅绿色
1 0 0 1	黄色
1 0 0 0	浅黄色

0 1 1 1	咖啡色
0 1 1 0	黄绿色
0 1 0 1	浅咖啡色
0 1 0 0	红色
0 0 1 1	粉红色
0 0 1 0	品红色
0 0 0 1	紫色
0 0 0 0	黑色

当然，还可以控制加到三支枪上的信号的大小，各种色调的饱和度还可以连续调整，这样，彩色的变化就会相当丰富了。

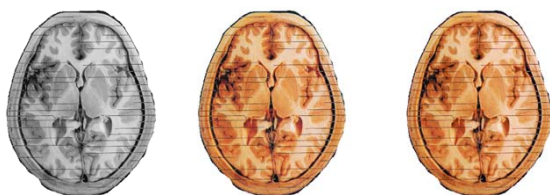
简单色调图片假彩色变换效果

灰度图片 参考图片 变换后的假彩色图片



简单色调图片假彩色变换效果(续)

灰度图片 参考图片 变换后的假彩色图片



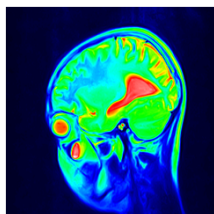
CT图片假彩色变换效果

CT图片 参考图片 变换后的假彩色图片

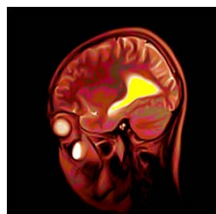


伪彩色和假彩色变换效果比较

伪彩色图片



假彩色图片



➤ 灰度级转换为彩色

另外几种转换方法比上一节讨论的分割技术更为普遍，因而也能更好的实现伪彩色的增强效果。其中特别吸引人的一种方法如图3—43所示。

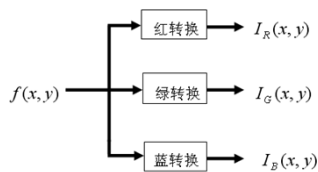


图 3—43 伪彩色图像处理框图

这种方法的基本思想是对输入像素的灰度级进行三个相互独立的转换，然后，这三个结果分别送到彩色电视监视器的红、绿、蓝的电子发射枪上。这种方法产生了一幅彩色图像，它的颜色内容由转换函数的性质决定。注意到，**这是对图像的灰度值的转换**，而不是位置的函数。

另外一种灰度—彩色变换方案可如图4—44所示。

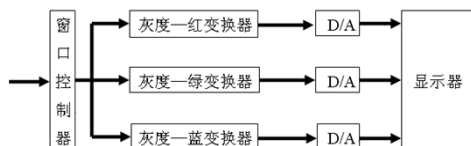


图3—44 另一种灰度—彩色变换方案

这种方法的基本概念是首先对灰度动态范围开窗，然后对窗口内的灰度进行三个独立的变换，变换的结果分别加到彩色监视器的R、G、B三个控制通道去，这样就可以在监视器上得到受变换函数控制的彩色合成图像。

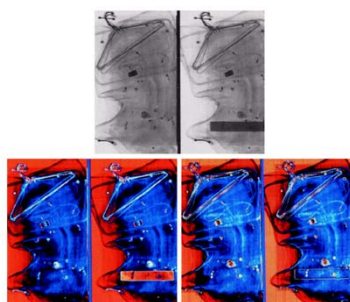


FIGURE 6.24 Pseudocolor enhancement by using the gray-level to color transformations in Fig. 6.25. (Original image courtesy of Dr. Mike Hurwitz, Westinghouse.)

图 3—45 示出了一种转换，如在机场中的安全检查X光监测仪，左边显示的是正常物体，右边显示的可能是塑胶炸药，当选择正确的分割点时，有可能两种物品用不同的颜色区分出来。

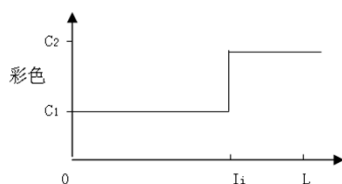


图 3—45 两种颜色的显示方法

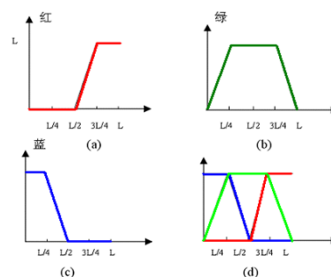


图 3—46 一组彩色变换函数

图3—46中的(a)是灰度—红色变换函数，在这个函数中将低于 $L/2$ 的所有灰度映射成最暗的红色，在 $L/2$ 到 $3L/4$ 之间的灰度映射为线性增加饱和度的红色，在 $3L/4$ 到 L 之间的灰度映射为最亮的红色。同样道理，绿色映射变换器如(b)所示，从0到 $L/4$ 绿色亮度线性增加，从 $L/4$ 到 $3L/4$ 是最亮的绿色，从 $3L/4$ 到 L 绿色亮度线性递减。

蓝色映射变换函数如(c)所示，从0到 $L/4$ 为最亮的蓝色，从 $L/4$ 到 $L/2$ 为线性递减特性，从 $L/2$ 到 L 映射为最暗的蓝色。三种变换函数的合成特性如(d)所示。从(d)中可以看到纯基色只在0、 $L/2$ 和 L 处出现，其他灰度将会合成多种不同的颜色。

根据以上原理及某些特定的需要还可以设计出更多的变换函数。上述变换函数比较适合医学图像处理，而图4—47所示的变换函数则更适合遥感图片处理。

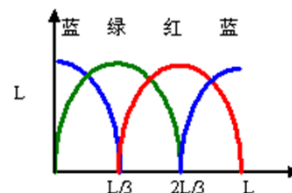


图 3—47 另一种灰度—彩色变换函数

➤ 一种滤波处理

上面介绍的是灰度—彩色变换方法。在实际应用中，根据需要也可以针对图像中的不同频率成分加以彩色增强，以便更有利于抽取频率信息。这就是基于频域运算的编码方案，原理如图3—48所示。

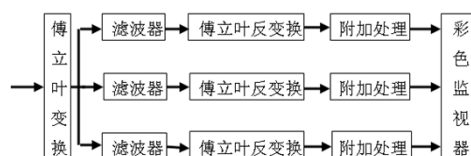


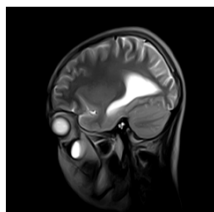
图 3—48 频率-彩色变换模型

这一方案与前面讨论过的基本滤波处理相同，除了一幅图像的傅立叶变换改为用三个独立的滤波函数以产生三个图像，以便送入彩色监视器的红、绿、蓝三个输入端。作为一个例子，下列步骤得到红色通道的图像。

用一个特定的滤波函数改变输入图像的傅立叶变换，然后，再用傅立叶反变换得到处理后的图像。这些处理步骤在图像被送入监视器的红色通道之前可加入一些附加的如直方图均衡等处理。类似的处理也可以用于图3—48的另两个通道。

伪彩色处理结果

CT图片



伪彩色映射结果

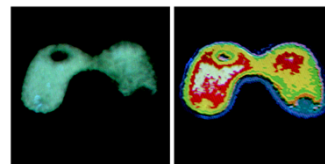
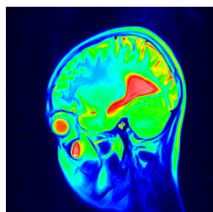


图 6.20 (a) Monochrome image of the Picker Thyroid Phantom. (b) Result of density slicing into eight colors. (Courtesy of Dr. J. L. Blenkinship, Instrumentation and Controls Division, Oak Ridge National Laboratory.)

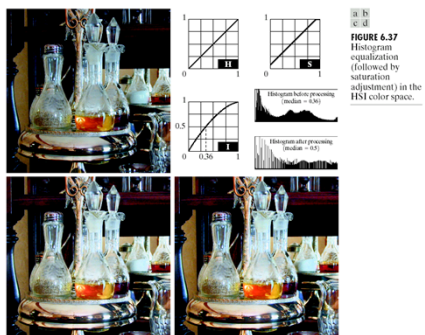


图 6.51 Color image compression. (a) Original RGB image. (b) Result of compressing and decompressing the image in (a).