

彩色空间和彩色距离

彩色是一种感知现象,而不是如长度或温度那样是一种物理维数,尽管可见光谱的电磁辐射可以按物理量来测量。观察者可以感受到两种总体相同或可测的不同的彩色感觉(见 2.2 节)。通过光谱数据来辨识彩色对标识彩色不太有用,正如在图像处理中,对彩色的生理学测量和评价大部分是用很少几个传感器进行的。需要一种合适的表达形式以存储、显式和处理彩色图像。这种表达必须要适合彩色图像处理算法的数学要求,满足摄像机、打印机或显示器的工艺条件,还要适合人类的彩色感知。这些不同的要求不能同时同等地得到满足。因为这个原因,在彩色图像处理中根据处理的目标使用了不同的表达。

彩色空间(color space)指**彩色坐标系统**(color coordinates system),其中表示了彩色图像的数值。在彩色空间中两个图像值的差称为**彩色距离**(color distance)。在对应彩色空间中描述不同彩色距离的数值与人所感知的彩色差别通常不一样。下面,将介绍由国际照明委员会 CIE(国际照明委员会(Commission Internationale de l'Eclairage))制订的标准彩色系统 XYZ。这个系统代表对彩色测量的国际参考系统。

3.1 标准彩色系统

当不同波长的光到达视网膜或图像传感器的同一个位置时, 可以使用加性彩色混合(additive color mixture)模型。不同的彩色刺激通过投影重合而合并成一种彩色。根据 Grassmann 关于加性彩色混合的第一定律, 任何一个彩色刺激都唯一地与一组特定的三种基色刺激相关联, 只要各个基色刺激独立。利用矢量表示, 基色的单位长度矢量可看作矢量空间的基(并不必须正交)。Grassmann 关于加性彩色混合的第一定律可以写成(利用矢量加法):

$$\mathbf{M} = \mathbf{R} \cdot \mathbf{R} + \mathbf{G} \cdot \mathbf{G} + \mathbf{B} \cdot \mathbf{B}$$

基色 $\mathbf{R}$ 、 $\mathbf{G}$ 、 $\mathbf{B}$ 在混合彩色 $\mathbf{M}$ 中的量由 R 、 G 、 B 给出。不过, 并不是所有彩色都能由单个集合的基色产生。这并不表明 Grassmann 关于加性彩色混合的第一定律有问题, 因为基色的量在彩色混合时可以是负的, 如:

$$\mathbf{M} + \mathbf{R} \cdot \mathbf{R} = \mathbf{G} \cdot \mathbf{G} + \mathbf{B} \cdot \mathbf{B}$$

上述彩色混合的原理对一组 n 个彩色也成立。下式成立:

$$\mathbf{M} = \{\mathbf{M}_i \mid i = 1, \dots, n\}$$

其中

$$\mathbf{M}_i = \mathbf{R}_i \cdot \mathbf{R} + \mathbf{G}_i \cdot \mathbf{G} + \mathbf{B}_i \cdot \mathbf{B}$$

$$\mathbf{M}_{1\dots n} = \mathbf{R} \cdot \sum_{i=1}^n R_i + \mathbf{G} \cdot \sum_{i=1}^n G_i + \mathbf{B} \cdot \sum_{i=1}^n B_i$$

把可见波长范围分成 n 个小间隔来分析, 每个小间隔近似构成一个特定彩色的彩色刺激。注意带宽一般在 2nm 到 10nm 间。如果过细, 光强会过低而测不到。如果上面各式中的 $\mathbf{M}_i$ 代表彩色间隔中的彩色值, 任何彩色刺激都可用对应光谱组成的 $\mathbf{M}$ 的一个子集的加性混合来描述。如果将带向原点平移, 那么就能产生

连续的彩色刺激 $M(\lambda)$:

$$M(\lambda) = R(\lambda) \cdot \mathbf{R} + G(\lambda) \cdot \mathbf{G} + B(\lambda) \cdot \mathbf{B}$$

为了标准化,国际照明委员会(CIE)在 1931 年设定了所使用的单基色和匹配公式来定义色度学的 2° CIE 标准观察者(2° CIE standard observer)。这里 2° 指示视场的尺寸,可以保证彩色感知而不需要模拟柱细胞。1964 年引入了 10° 的 CIE 标准观察者。表 3.1 给出了基色值的波长和相对谱功率。用 $S(\lambda)$ 标准化的彩色刺激产生光谱三刺激值(spectral tristimulus values) $\bar{r}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$, 和 $\bar{b}(\lambda)$ 。下式成立:

$$\bar{m}(\lambda) = \bar{r}(\lambda) \cdot \mathbf{R} + \bar{g}(\lambda) \cdot \mathbf{G} + \bar{b}(\lambda) \mathbf{B}$$

表 3.1 1931 年的 CIE 基色的波长和对应的相对谱功率 S

基色	$\lambda(\text{nm})$	S
R	700.0	72.09
G	546.1	1.379
B	435.8	1.000

在图 3.1 中,将光谱值拆分成覆盖可见波长的彩色匹配函数(color match function),其中坐标的单位是任意选取的。有关在某些彩色图像处理应用中扫描光谱值曲线的内容可见 [TruKul96]。

3.1.1 CIE 彩色匹配函数

为了获得能覆盖整个可见波长范围的彩色混合,CIE 定义了虚拟基色(即不对应任何物理光谱分布) X 、 Y 和 Z 。对 2° 的 CIE 标准观察者,从真实的光谱值曲线到正的、虚拟的彩色匹配函数 $\bar{r}(\lambda)$ 、 $\bar{g}(\lambda)$ 和 $\bar{b}(\lambda)$ 的转换可用线性变换来描述:

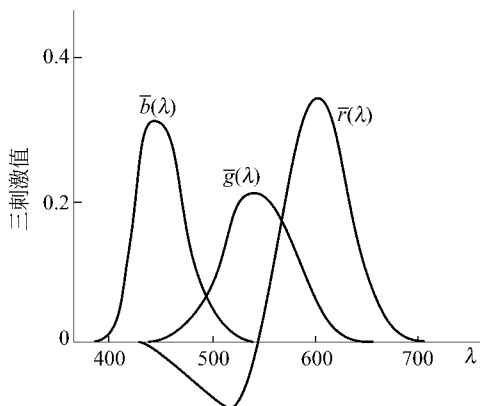


图 3.1 对应 2°CIE 标准观察者的 CIE 彩色匹配函数 $\bar{r}(\lambda)$ 、 $\bar{g}(\lambda)$ 和 $\bar{b}(\lambda)$ 的曲线

$$\begin{bmatrix} \bar{x}(\lambda) \\ \bar{y}(\lambda) \\ \bar{z}(\lambda) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.49000 & 0.31000 & 0.20000 \\ 0.17697 & 0.81240 & 0.01063 \\ 0.00000 & 0.01000 & 0.99000 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{r}(\lambda) \\ \bar{g}(\lambda) \\ \bar{b}(\lambda) \end{bmatrix}$$

赋值给新光谱值的彩色匹配函数可见图 3.2。

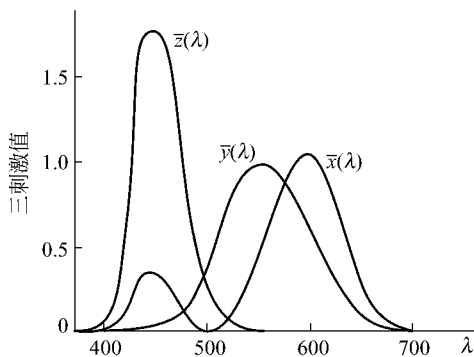


图 3.2 对应 2°CIE 标准观察者的 CIE 彩色匹配函数 $\bar{x}$ 、 $\bar{y}$ 和 $\bar{z}$

3.1.2 标准彩色值

在眼睛中引起彩色刺激的辐射可用彩色刺激函数 $\varphi(\lambda)$ 来指示。对发光物体,彩色刺激函数与光谱功率 $S(\lambda)$ 相等。作为对照,在体色中,彩色刺激函数是光谱功率 $S(\lambda)$ 与谱反射因子 $R(\lambda)$ 的乘积。观察荧光样本,荧光函数 $S_F(\lambda)$ 要加到体色的彩色刺激函数中。见下式:

$$\varphi(\lambda) = \begin{cases} S(\lambda) & \text{发光物体} \\ S(\lambda) \cdot R(\lambda) & \text{体色} \\ S(\lambda) \cdot R(\lambda) + S_F(\lambda) & \text{荧光样本} \end{cases}$$

由此,可得到表示**标准彩色值**(standard color values)的方程:

$$X = k \int \varphi(\lambda) \cdot \bar{x}(\lambda) d\lambda$$

$$Y = k \int \varphi(\lambda) \cdot \bar{y}(\lambda) d\lambda$$

$$Z = k \int \varphi(\lambda) \cdot \bar{z}(\lambda) d\lambda$$

其中

$$k = \frac{100}{\int S(\lambda) \cdot \bar{y}(\lambda) d\lambda}$$

对体色使用归一化因子 k 来使纯苍白的白体在任何类型的光照下的标准彩色值 $Y_{\text{white body}}$ 为 100。在实际中,积分换成一个对有限测量的求和。对非发光物体,需要考虑彩色测量依赖于测量几何。因此,对每个光谱信号要赋三个正的标准彩色值 X 、 Y 和 Z 。

3.1.3 色度图

利用二维图形表达来表示三维彩色空间的一个交面比较有利,该交面即**色度图**(chromaticity diagram)。因为所有其位置矢

量线性相关的彩色值只在亮度方面有区别,这里只是丢失了亮度信息。通过消除亮度信息而保留下来的彩色信息记为色度(chromaticity)。换句话说,色度由色调和饱和度(没有亮度)定义。在RGB立方体中用于构建色度图的交面是单位平面 $R+G+B=1$,即一个等边三角形(见图 3.3)。

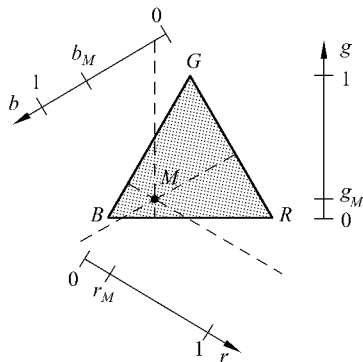


图 3.3 表示成色度图的马克斯维尔彩色三角形

这个三角形也称为马克斯维尔彩色三角形(Maxwell color triangle)。M 是观察到的彩色位置矢量和单位平面的交。使用牛顿的重心方程,对一种彩色 M 有下面的关系成立:

$$r_M = \frac{R}{R+G+B}, \quad g_M = \frac{G}{R+G+B} \quad \text{和} \quad b_M = \frac{B}{R+G+B}$$

其中 $r_M + g_M + b_M = 1$ 。不过,用 r 作为横坐标,用 g 作为纵坐标(蓝色落在原点)的笛卡尔表达使用得更普遍。上面的关系也不因此而改变。作为这种表达的示例,图 3.4 给出 2° CIE 标准观察者的色度图,其中有两个(源于三个) 2° 色度坐标(2° chromaticity coordinates),记为 x 和 y 。从 $400\text{nm} \sim 700\text{nm}$ 的光谱彩色位置列为光谱彩色传输(spectral color transmission)。

端点间的连线称为紫色边界(purple boundary)。所有真实的

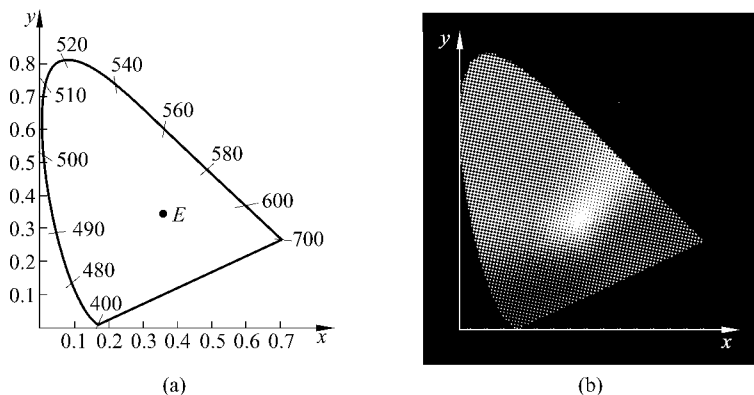


图 3.4 2° CIE 标准观察者的色度图

(a) 数值表示; (b) 彩色编码图

色度都落在中间。表示相等能量光谱($x=y=z=1/3$)的点记为 E。CIE 的色度图也可用来定义色阶(color gamut),它表示了彩色的相加。通过对任意两种彩色(如图 3.5 中的 I 和 J)的相加(两种彩色的相对比例不同),各种彩色都可在它们的连线上产生出来。借助对第三种彩色 K 的使用(三种彩色的相对比例不同),在三角形 IJK 中的所有彩色都可产生。基于色度图的形状,很容易看出所有彩色并不都可用混合三种彩色,如红色,绿色,蓝色来产生。不能构建角点在可见范围但能覆盖所有可见范围的三角形。

色度图也可用于比较不同彩色显示器和彩色打印机的彩色色阶[Fol et al. 94]。对在一个设备上重现另一个设备上的彩色色阶的不同技术的比较见[MonFai97]。因为一个彩色打印机的彩色色阶相对少于一个彩色显示器的彩色色阶,在显示器上看到的彩色并不能都打印到纸上。要把屏幕上的彩色图像真实地打印出来,需要对显示器使用一个缩减的色阶。一些图像处理程序,如 Adobe PhotoshopTM,支持用户选择用于打印的色阶。

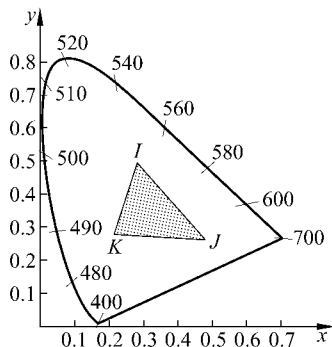


图 3.5 通过混合彩色 I 和 J , 在线段 IJ 上可产生各种彩色。通过混合彩色 I 、 J 和 K , 所有三角形 IJK 中的彩色都可产生(根据[Fol et al. 94])

3.1.4 Macadam 椭圆

因为使用二维彩色表达只丢失了亮度信息,色度可从色度图中借助色调和饱和度来提取。色度可用指定光谱的波长和混合比率来描述。这之所以可能是因为两种色度的不同加权混合处在连接这两种色度的连线上。根据 Helmholtz,一种彩色可用一种谱色和一种非彩色(E)的加性混合来描述(除去紫色)。它们是描述色调的主波长(dominant wavelength) λ_d 和描述饱和度的刺激纯度(excitation purity) p_e 。

一个色度 F 的主波长可由发出于 W 穿过 F 的光线与光谱彩色传输的交点 S 确定。对那些没有这样交点的彩色,紫色边界与它们相交。这样得到的波长称为补色波长(complementary wavelength) λ_c 。光谱彩色分量定义为 $WF:WS$ 。

注意色度之间的差,它们并不被感知为相等,而是在色度图中等距离。例如,在绿色范围能比在蓝色范围发现更多小的彩色细

微差别。MacAdam 的工作揭示了彩色中的大差异,为区分参考彩色人类视觉系统会把它们感知为相等。从中,MacAdam 获得了 25 个刺激的分布,它们在色度图中看起来像椭圆(**MacAdam 椭圆**(MacAdam ellipse))(见图 3.6)。最小的椭圆和最大的椭圆的关系约为 $0.94:69.4$ 。

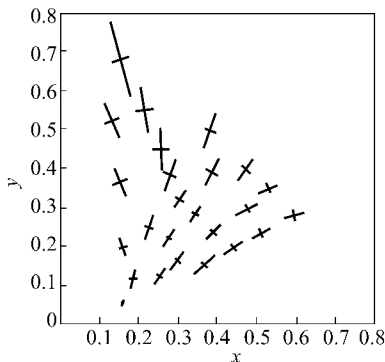


图 3.6 在这个对应 2° CIE 标准观察者的色度图中,MacAdam 椭圆用它们的两个半轴表示。半轴用系数 10 进行了伸缩。采用了 [WysSti82] 的数据来给出此图

3.2 基于物理学和工艺的彩色空间

下面介绍具有直接工艺参考意义的空间。如同与 RGB 彩色空间那样,它们也有与生理彩色空间的重合。

3.2.1 RGB 彩色空间

在计算机技术中使用最广泛的彩色空间是 **RGB 彩色空间** (RGB color space),它建立在加性混合三种基色 R、G、B 的基础上(见 3.1 节)。国际标准化的三基色 R、G、B 的波长已给在

表 3.1 中。需要注意,用术语红色(red)、绿色(green)、蓝色(blue)只是为了对基色的描述提供标准。可见彩色和波长并不等价。为避免可能的混淆,也可用记号 L 、 M 、 S ,而不用 R 、 G 、 B 来代表具有长、中等和短波长的光。不过,常用的记号还是 R 、 G 、 B ,在下面也用它们。

基色在绝大多数情况下是图像传感器的“参考色”。它们构成三维正交(彩色)矢量空间的基矢量,其中零矢量代表黑色(见图 3.7)。原点也记成黑点(black point)。在 RGB 空间,任何彩色都可以看作基矢量的线性组合。在一个这样的 RGB 彩色空间中,一幅彩色图像在数学上看作一个具有三个分量的矢量函数。三个矢量分量由对长波,中波和短波范围的可见光的亮度测量而确定。对一幅(三通道)彩色数字图像(digital color image) C ,对每个图像像素 (x, y) ,需要指出三个矢量分量 R 、 G 、 B :

$$C(x, y) = [R(x, y), G(x, y), B(x, y)]^T = (R, G, B)^T$$

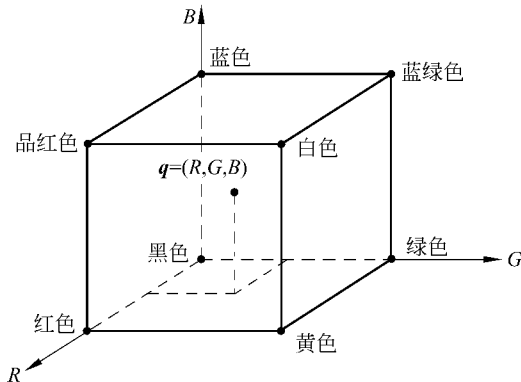


图 3.7 在 RGB 彩色空间,彩色立方体中的每个矢量准确代表一种彩色,其中 $0 \leq R, G, B \leq G_{\max}$, R, G, B 是整数

这些值称为三刺激值(tristimulus values)。由矢量分量 R 、