

第5章 颜色的度量体系



目录

5.1 颜色科学

5.1.1 彩色图像形成

5.1.2 伽马(γ)校正

5.1.3 颜色匹配函数

5.1.4 CIE色度图

5.1.5 色域

5.1.6 $L^*a^*b^*$ (CIELAB) 色彩模型

5.1.7 颜色编目系统

5.2 图像中的颜色模型

5.2.1 RGB颜色模型

5.2.2 多传感器相机

5.2.3 相机相关颜色

5.2.4 CMY颜色模型

5.3 视频中的颜色模型

5.3.1 视频中的色彩模型

5.3.2 YUV颜色模型

5.3.3 YIQ颜色模型

5.3.4 YCbCr颜色模型

目录

5.1 颜色科学

- 5.1.1 彩色图像形成
- 5.1.2 伽马(γ)校正
- 5.1.3 颜色匹配函数
- 5.1.4 CIE色度图
- 5.1.5 色域
- 5.1.6 $L^*a^*b^*$ (CIELAB) 色彩模型
- 5.1.7 颜色编目系统

5.2 图像中的颜色模型

- 5.2.1 RGB颜色模型
- 5.2.2 多传感器相机
- 5.2.3 相机相关颜色
- 5.2.4 CMY颜色模型

5.3 视频中的颜色模型

- 5.3.1 视频中的色彩模型
- 5.3.2 YUV颜色模型
- 5.3.3 YIQ颜色模型
- 5.3.4 YCbCr颜色模型

5.1.1 光与频率

- 颜色是视觉系统对可见光的感知结果。
- 可见光是波长在380~780 nm之间的电磁波
 - 我们看到的大多数光不是一种波长的光，而是由许多不同波长的光组合成的。

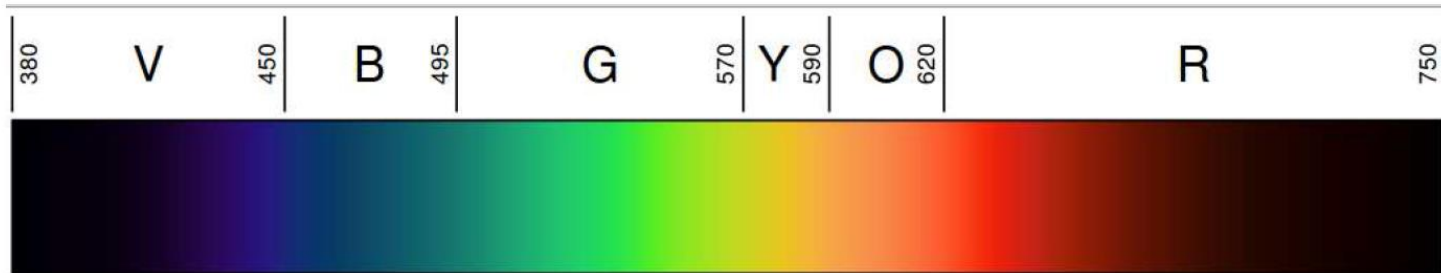
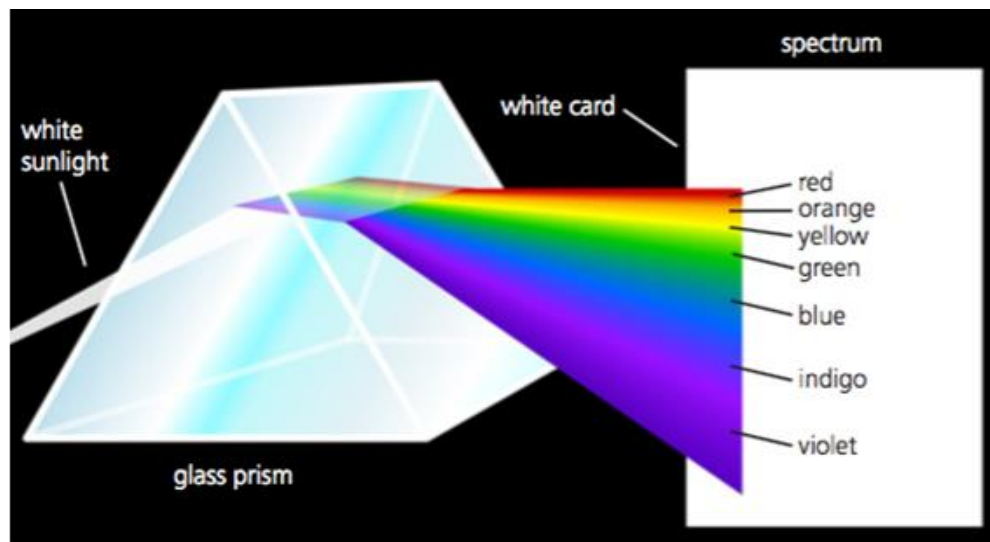
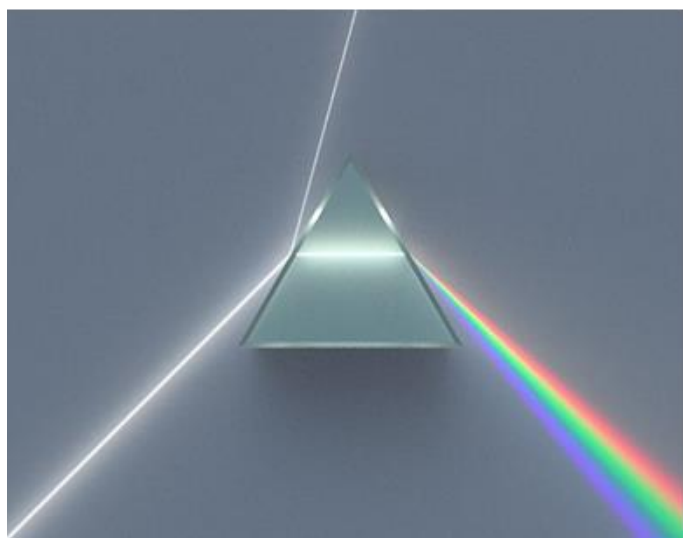


Figure 4.5: Visible light spectrum corresponds to the range of electromagnetic waves that have wavelengths between 400nm and 700nm. (Figure by David Eccles for Wikipedia.)

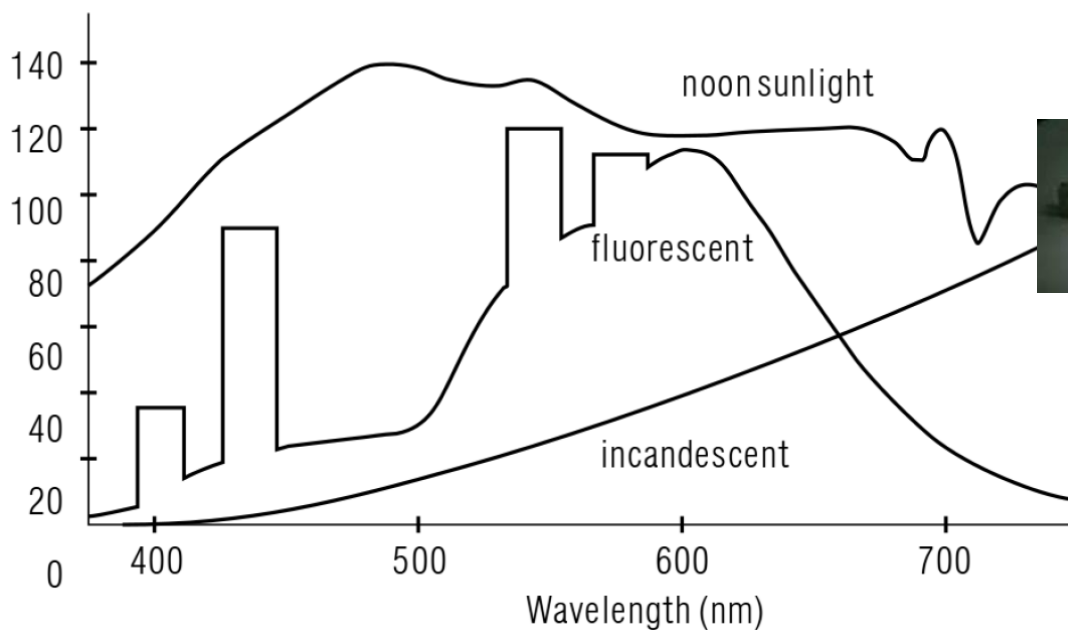
5.1.1 光与频率



- Isaac Newton(1642-1727) 用棱镜演示了一束白光可被分解成多个可见光谱

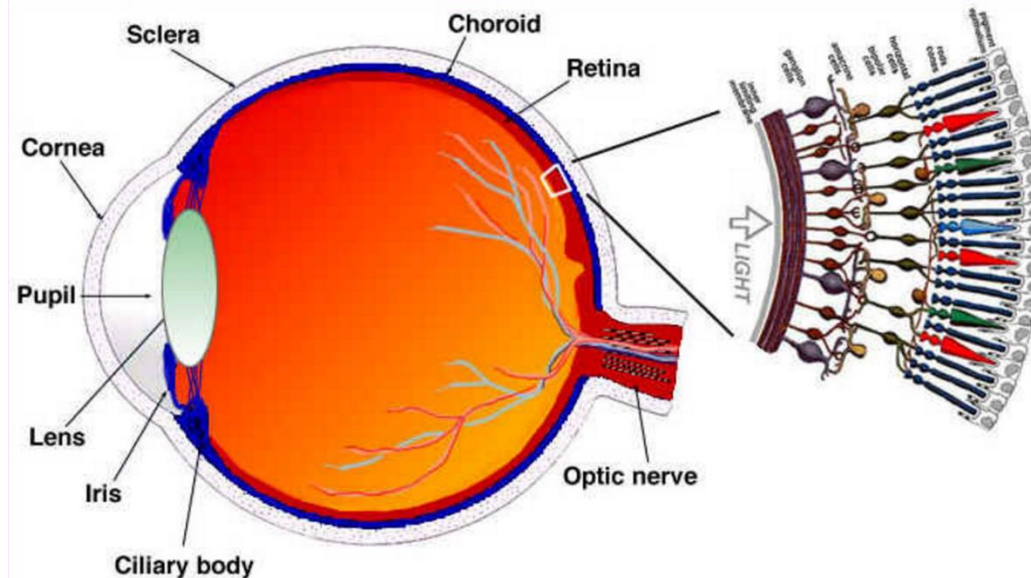
常见光源的光谱能量分布

光谱能量分布函数: $E(\lambda)$



5.1.1 人类视觉

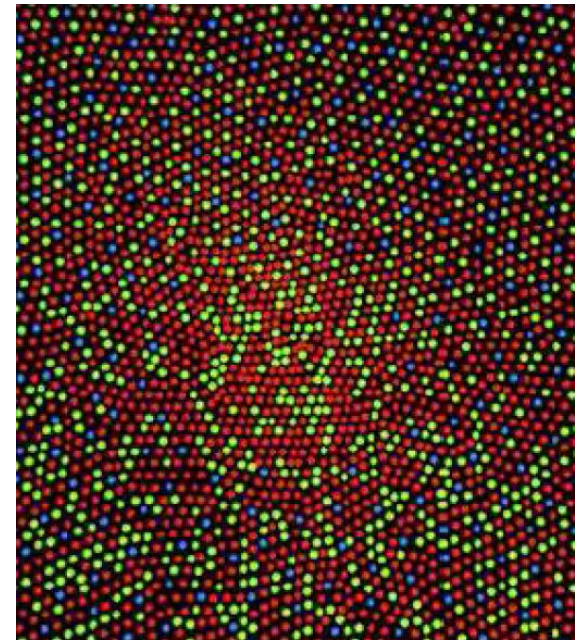
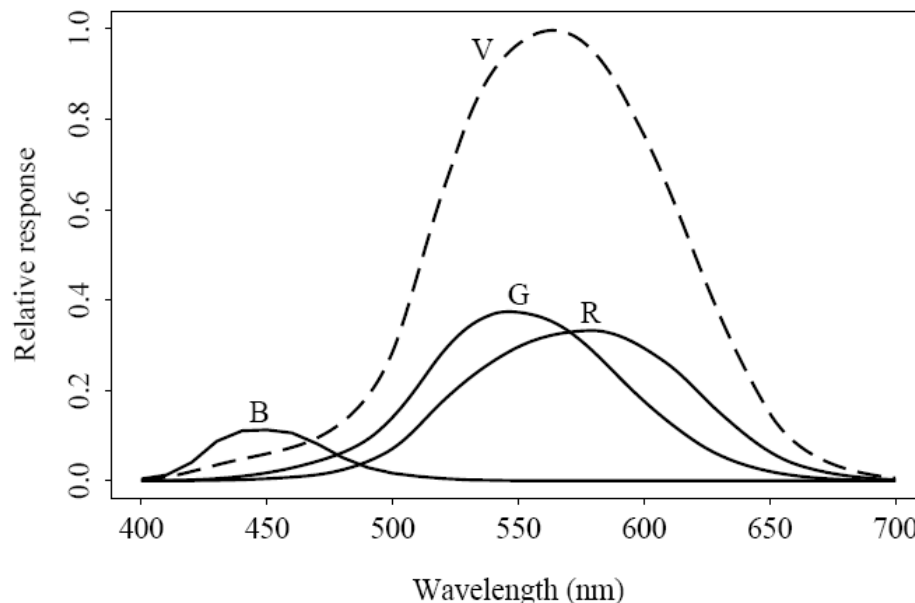
- 眼睛像照相机一样工作，镜头将图像聚焦在视网膜上（上下颠倒，左右颠倒）。
- 视网膜由一种杆状细胞和三种椎体细胞组成。



- 大脑似乎利用R-G、G-B和B-R之间的差异，以及将所有R、G和B结合进高的光线亮度级的消色差通道。

5.1.1 眼睛的光谱灵敏度

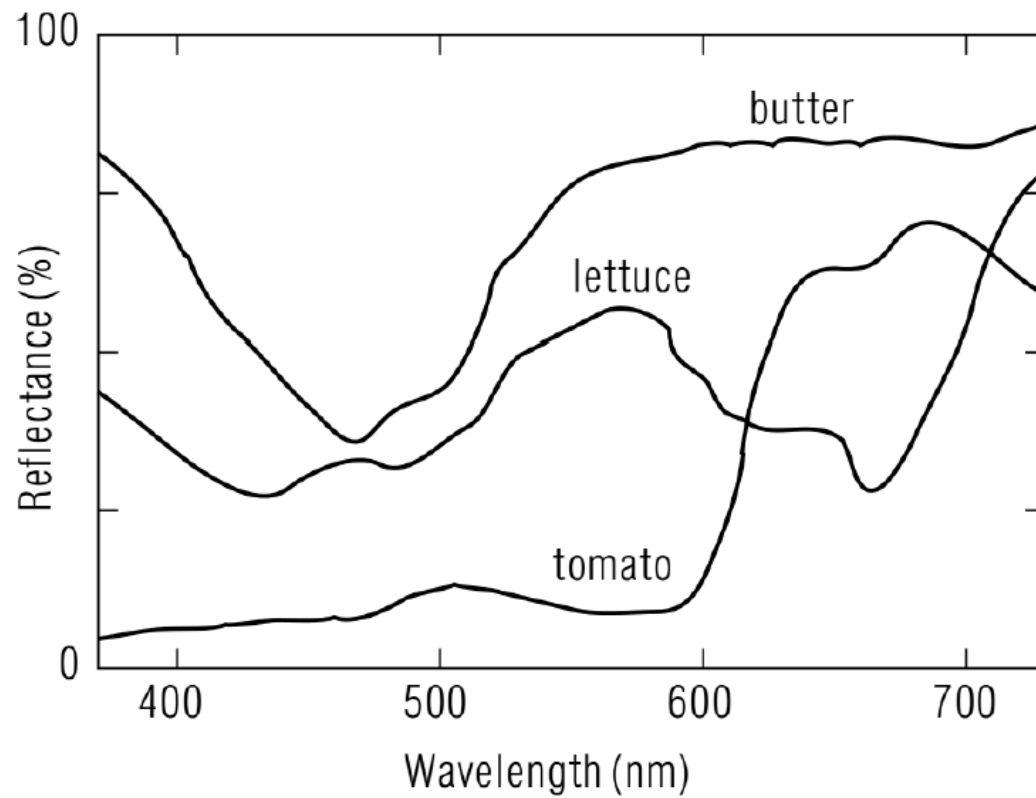
- 眼睛对可见光谱中间的光最敏感，感光器的敏感度是波长的函数。 $q(\lambda) = (qR(\lambda), qG(\lambda), qB(\lambda))T$
- 发光效率曲线 $V(\lambda)$ 为红色、绿色和蓝色响应曲线的总和，与 $2R+G+B/20$ 成正比。



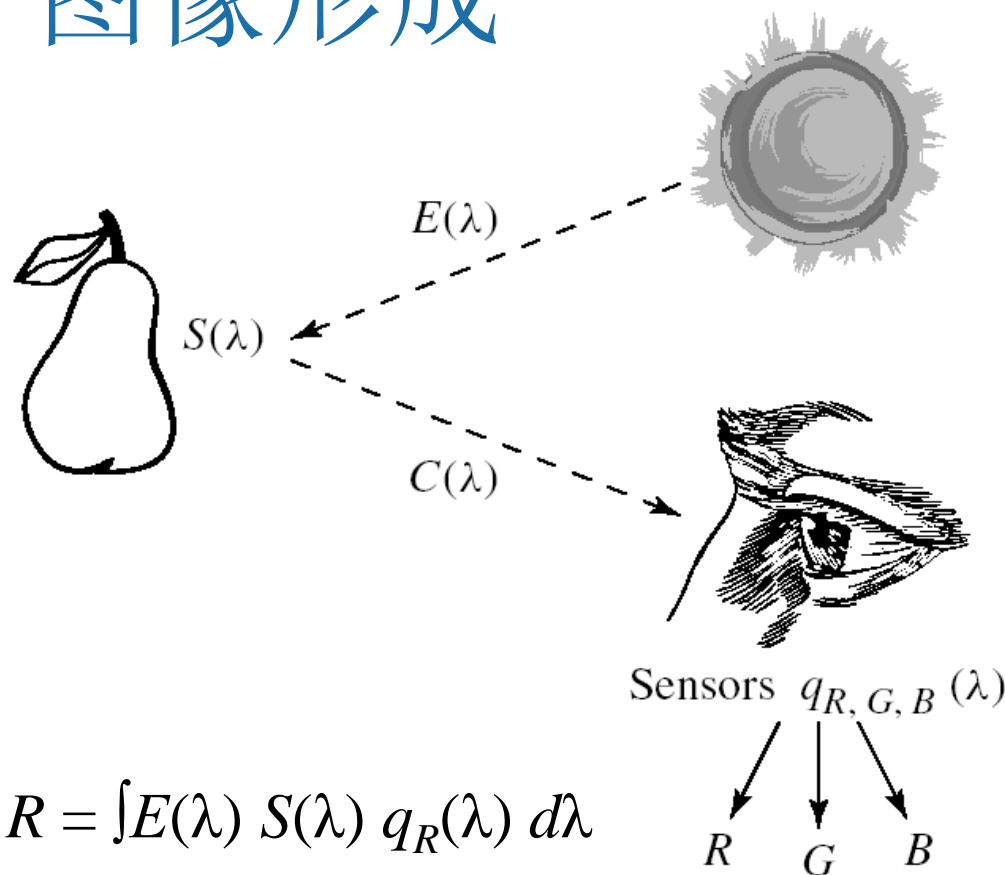
R, G, and B 视锥细胞和发光效率曲线 $V(\lambda)$.

频谱反射函数

反射函数: $S(\lambda)$



5.1.1 图像形成



椎体光谱灵敏度函数

$$R = \int E(\lambda) S(\lambda) q_R(\lambda) d\lambda$$

$$G = \int E(\lambda) S(\lambda) q_G(\lambda) d\lambda$$

$$B = \int E(\lambda) S(\lambda) q_B(\lambda) d\lambda$$

5.1.2 相机系统

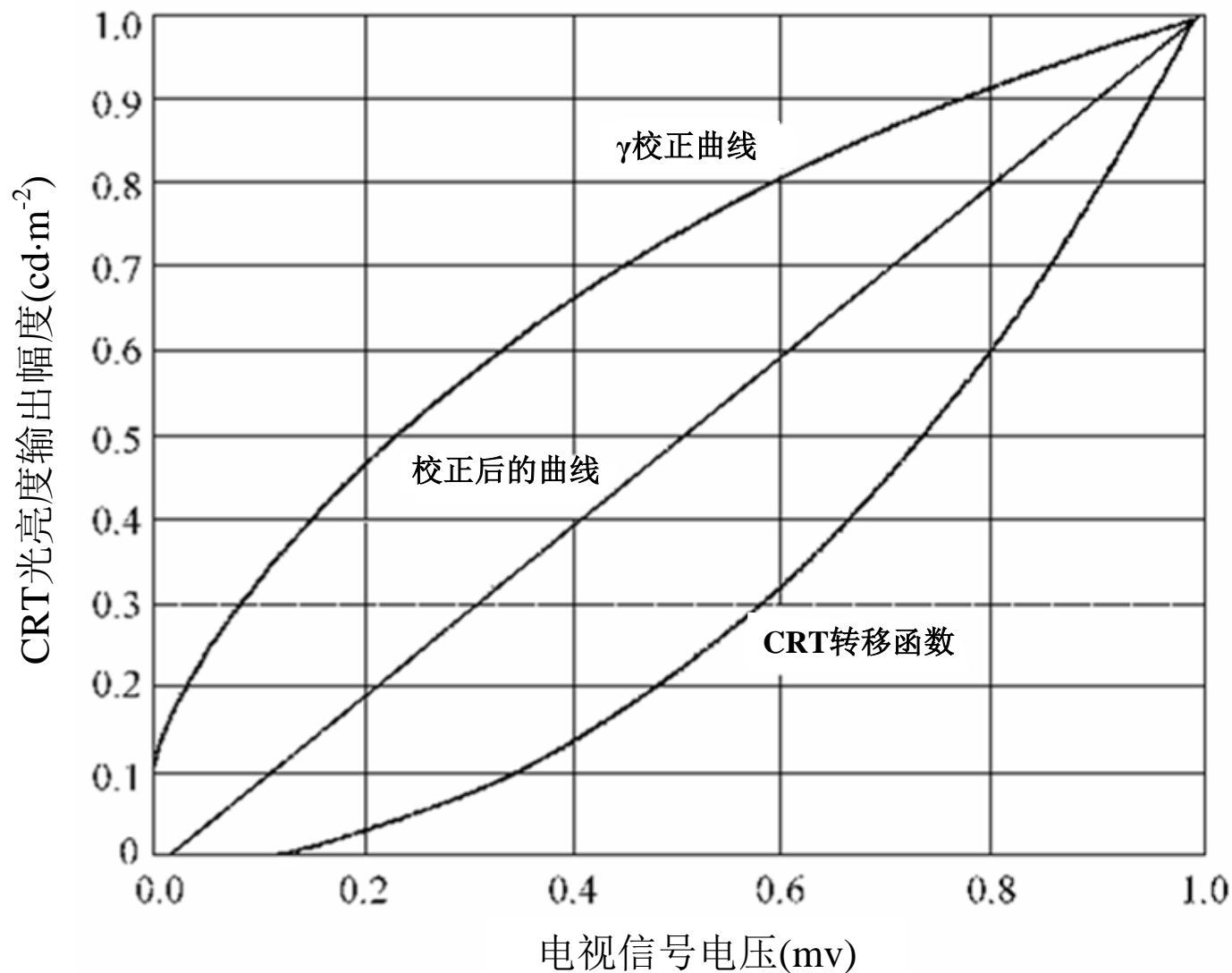
- 相机系统以类似方式工作; 相机在每个像素位置产生三个信号（对应于视网膜位置）。
- 模拟信号转换为数字信号，截断为整数并存储。如果使用的像素精度为 8 位，则任何 R、G、B 的最大值为 255，最小值为 0。
- 然而，进入计算机用户眼睛的光线是屏幕发出的光——屏幕本质上是一个自发光源。因此，需要知道进入眼睛的光线 $E(\lambda)$ 。

5.1.2 伽马(γ)校正

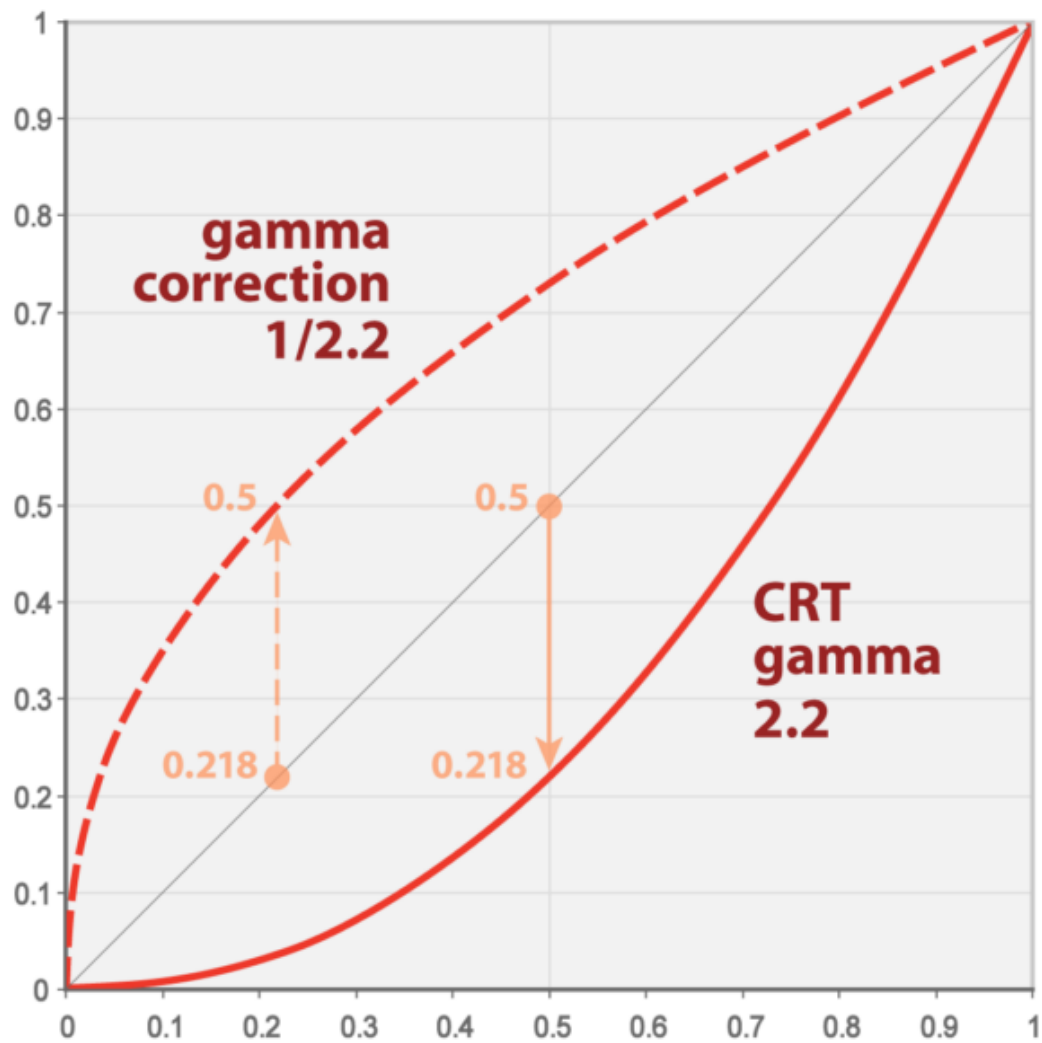
- 显示设备产生的光亮度实际上与电压的幂函数大致成正比；幂函数的指数称为伽玛，用 γ 表示。
 - 通常用 R' 表示伽玛校正信号，即在传输前信号值变为原信号的 $(1/\gamma)$ 次方，这样才能得到线性信号：

$$R \rightarrow R' = R^{1/\gamma} \Rightarrow (R')^\gamma \rightarrow R$$

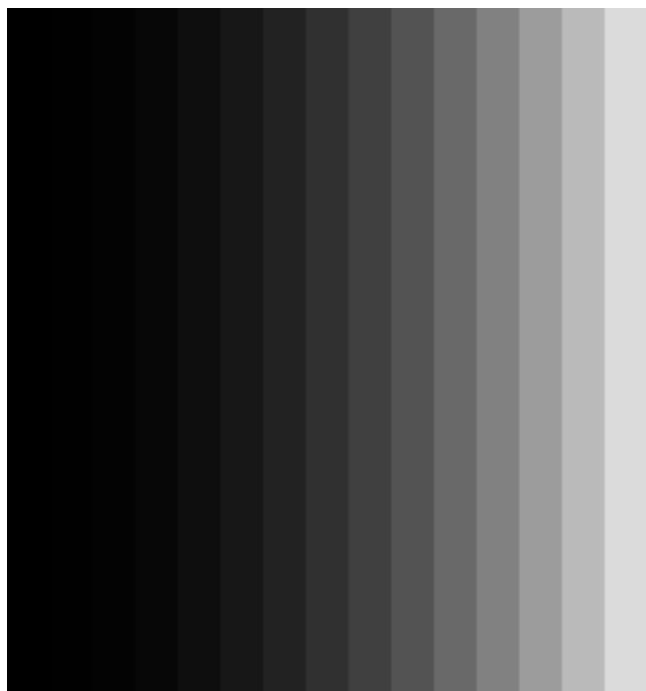
5.1.2 伽马(γ)校正



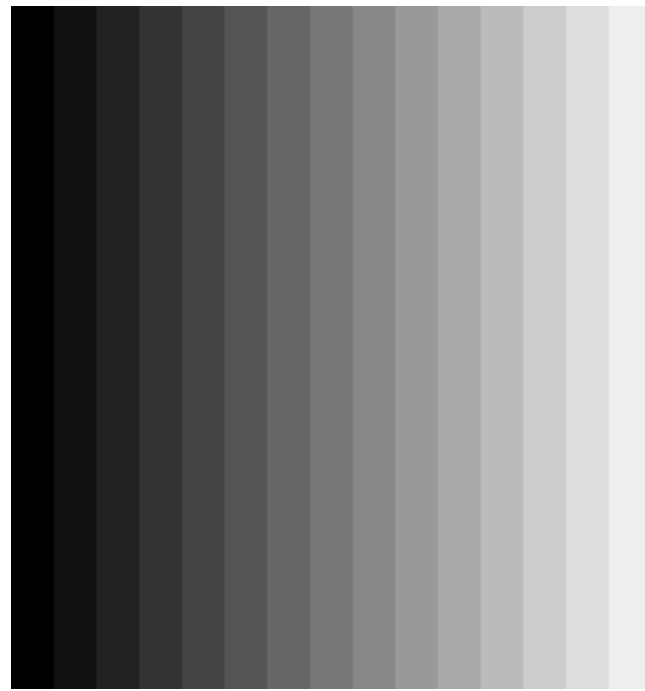
5.1.2 伽马(γ)校正



5.1.2 伽马(γ)校正



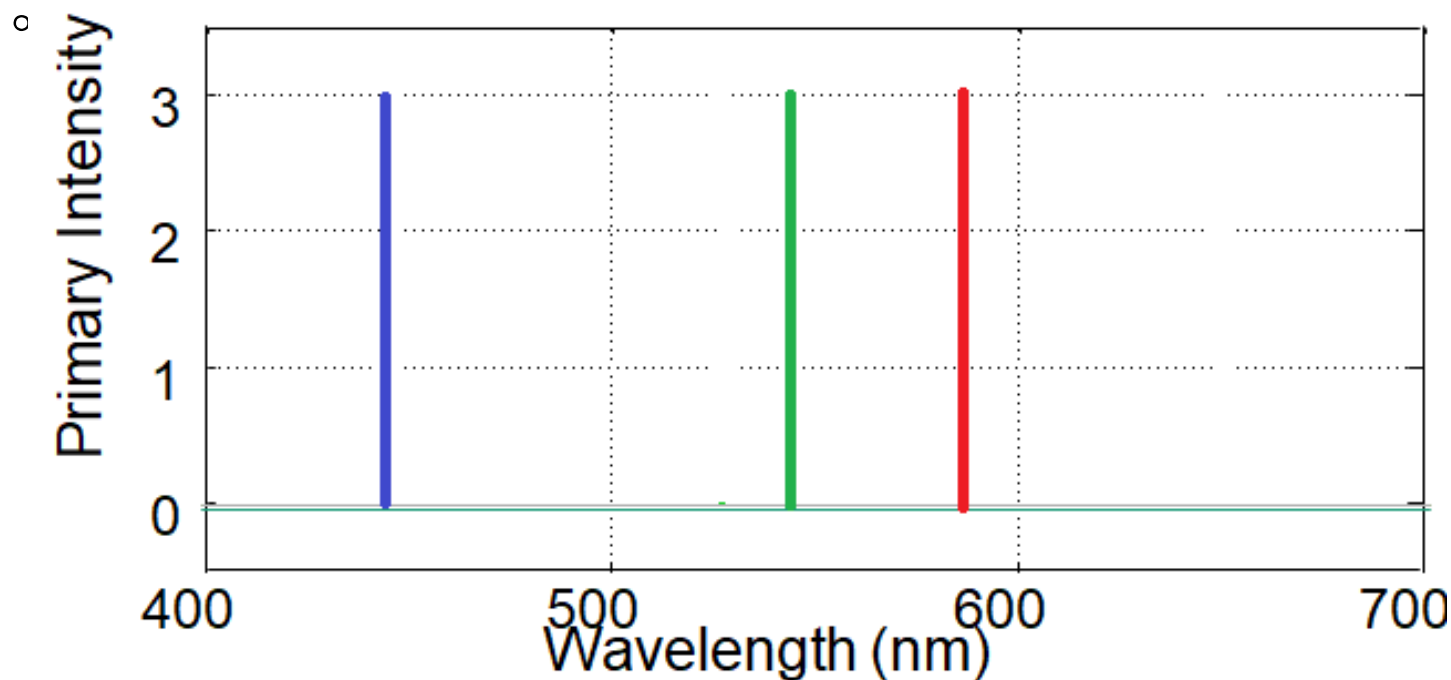
(a): 0~255 的斜坡显示，无伽玛校正



(b): 使用伽玛校正的图像

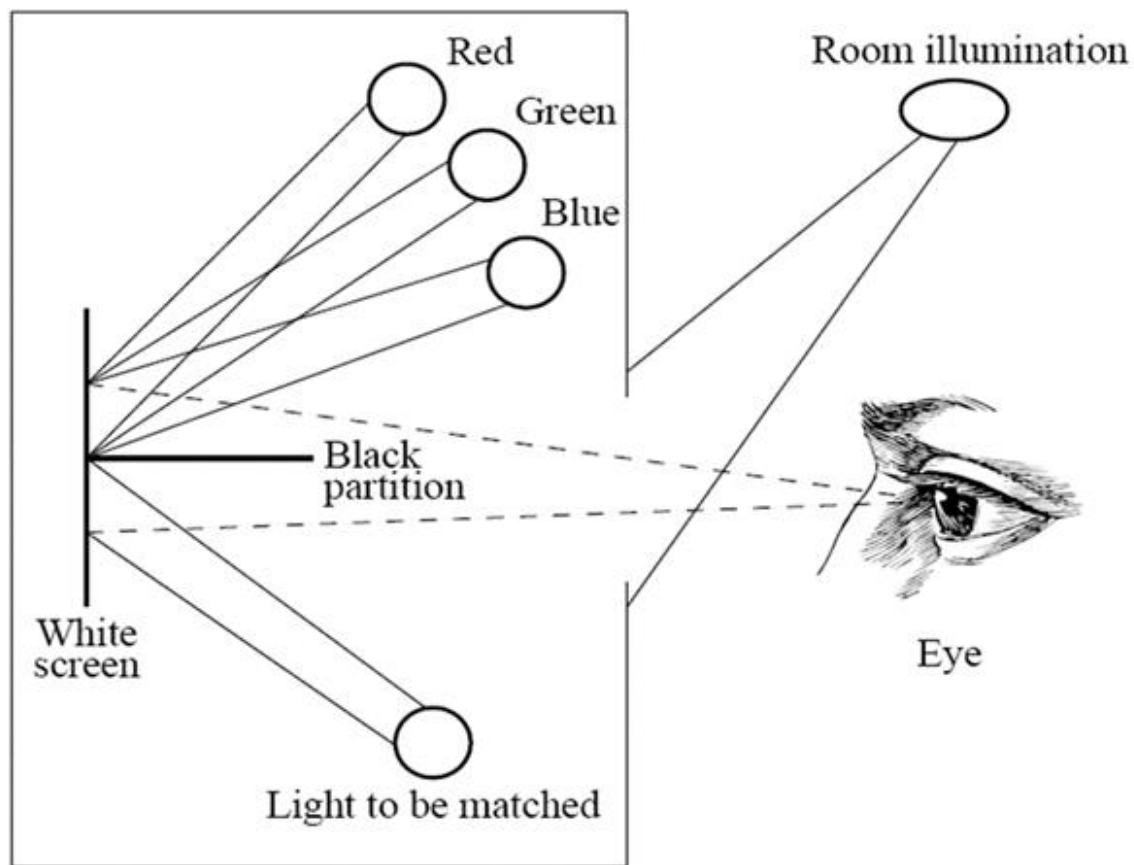
5.1.3 颜色匹配函数

- 在眼睛敏感度曲线产生前，一种包含于心理学中的技术将基本R、G和B光与给定的颜色匹配起来

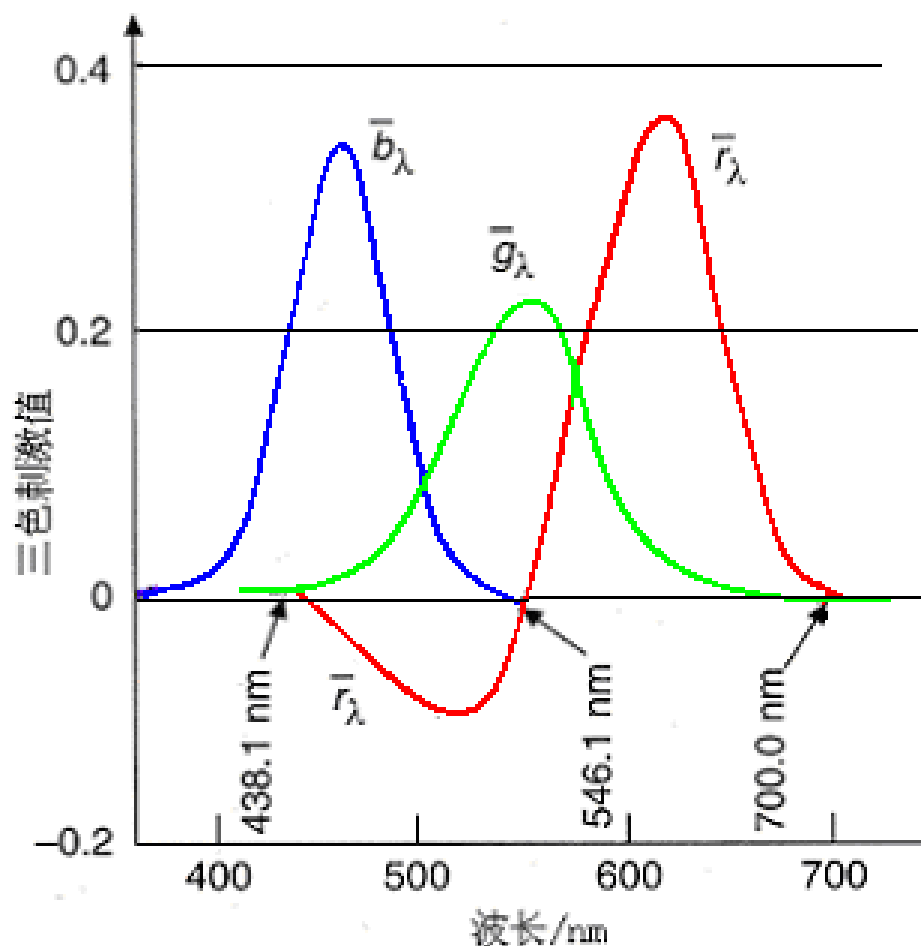


三种基本颜色：440nm, 545nm, 580nm

5.1.3 颜色匹配函数



5.1.3 颜色匹配函数



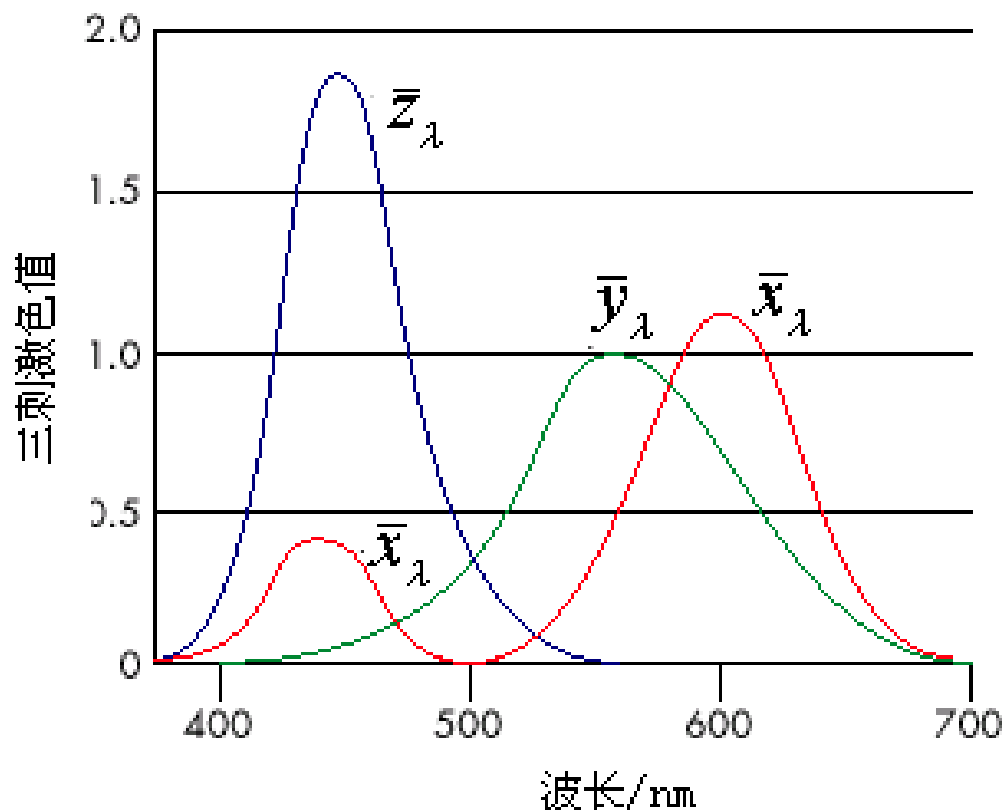
International Commission on Illumination
Commission Internationale de l'Éclairage
Internationale Beleuchtungskommission

国际照明委员会

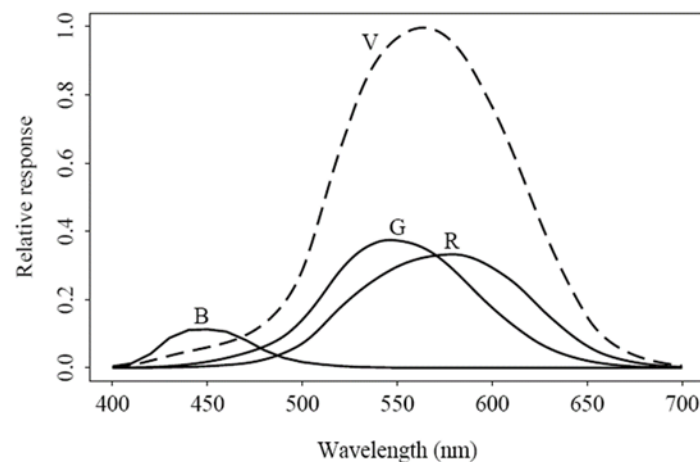
1931 CIE RGB颜色匹配曲线
(RGB Color Matching Curves)

5.1.4 CIE色度图

- 由于颜色匹配曲线具有负值，因此设计了一组虚构三原色使得匹配函数仅具有正值。



CIE 1931标准XYZ颜色匹配函数



眼睛敏感度曲线

5.1.4 CIE色度图

- 对于一个光谱能量分布 $E(\lambda)$ ，描述颜色所需的基本色度信息为 (X, Y, Z) ，其中 Y = 亮度

$$X = \int E(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda$$

$$Y = \int E(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda$$

$$Z = \int E(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda$$

- 3D 数据难以可视化，因此 CIE 设计了基于 (X, Y, Z) 的 2D 图。

5.1.4 CIE色度图

- 把 X 、 Y 和 Z 值相对于总辐射能量 ($X+Y+Z$)规格化

$$x = \frac{X}{X+Y+Z} \quad y = \frac{Y}{X+Y+Z} \quad z = \frac{Z}{X+Y+Z}$$

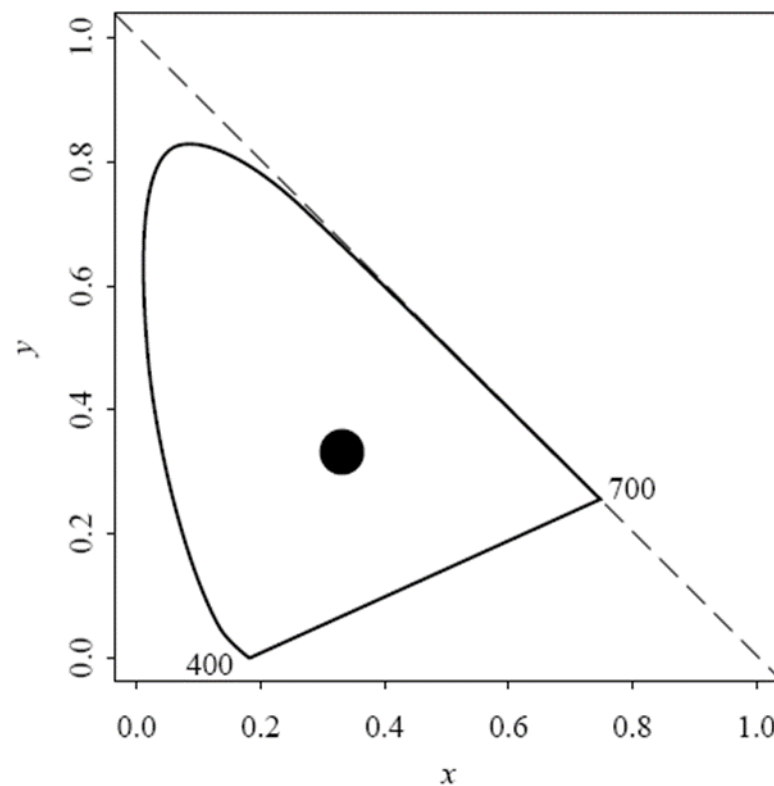
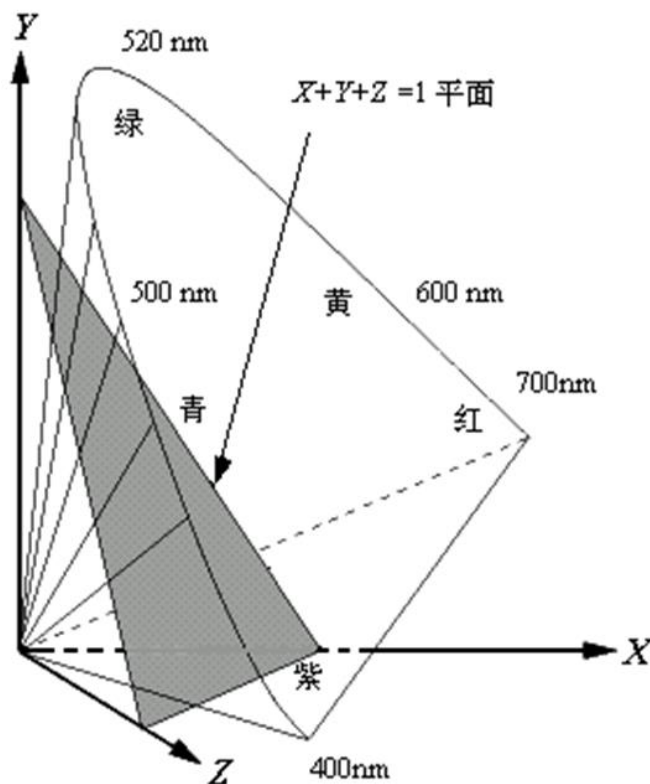
- 这实际上意味着 (x 、 y 、 z) 中的一个值是冗余的, 因为

$$x + y + z = \frac{X+Y+Z}{X+Y+Z} \equiv 1$$

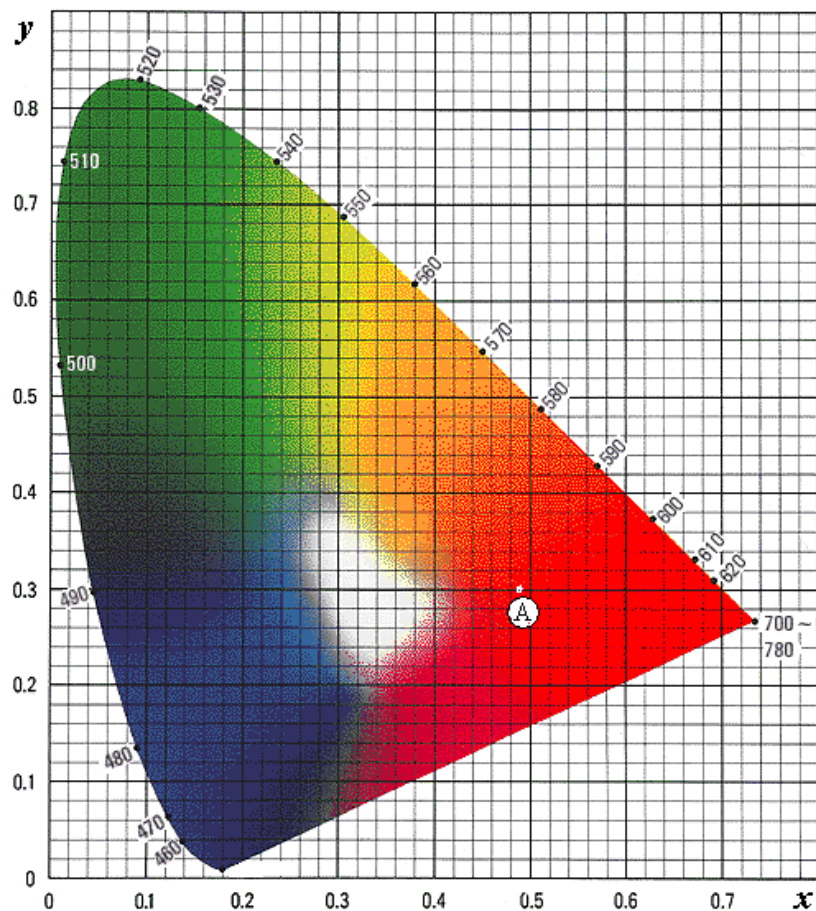
- 因此 $z = 1 - x - y$

5.1.4 CIE色度图

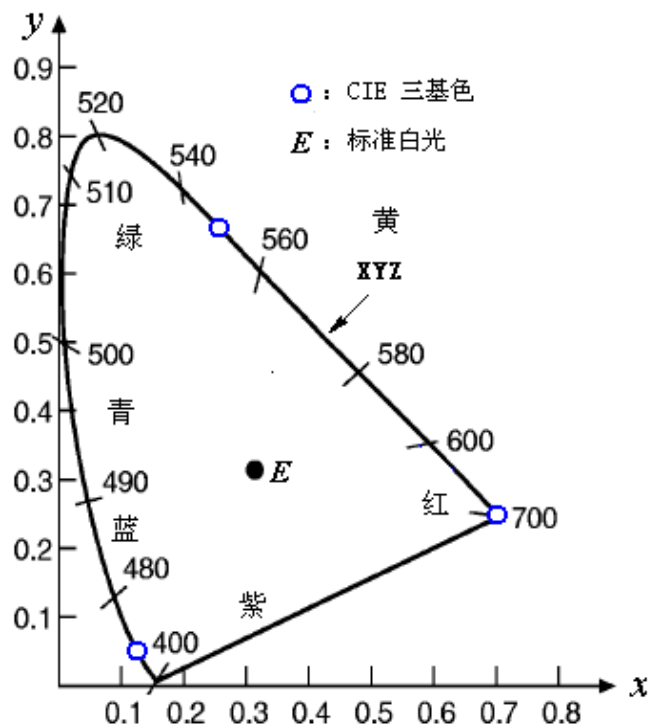
将每个三刺激向量（X、Y、Z）投影到（1，0，0）、（0，1，0）和（0，0，1）确定的平面上。



5.1.4 CIE色度图



(a) 色度图



(b) 轮廓图

CIE 1931色度图

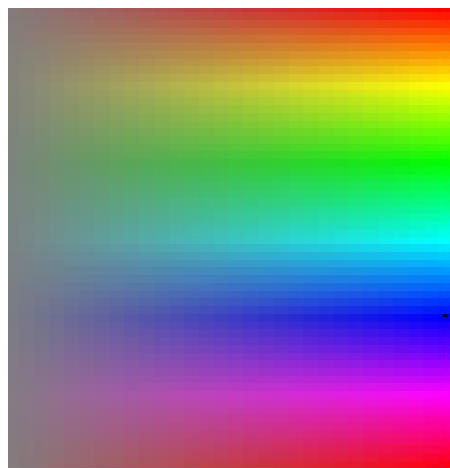
色调(hue)



- 视觉系统对一个区域呈现的颜色的感觉，即对可见物体辐射或反射的光波波长的感觉
- 色调数目多于1000万种
 - 普通人可区分200种色调、50种饱和度和500级灰度
 - 颜色专业人士可辨认的色调数大约300~400种

饱和度

- 颜色的纯洁性
 - 当一种颜色掺入其他光成分越多时，就说该颜色越不饱和
 - 单一波长的光谱色是完全饱和的颜色



饱和度



Original image, with relatively muted colors

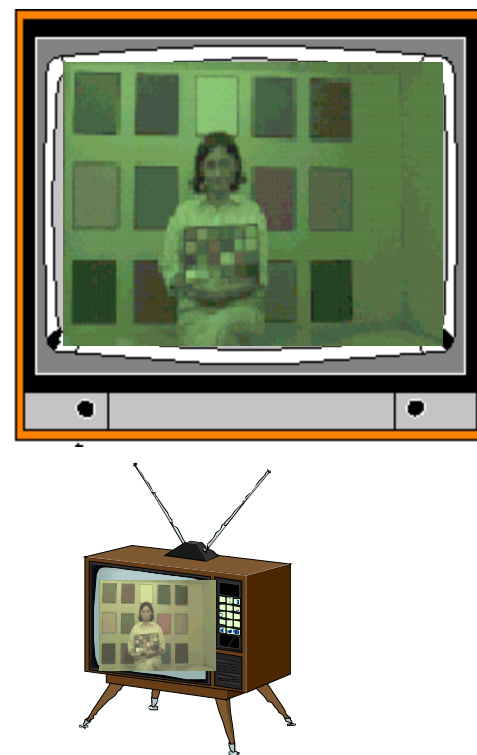


HSL saturation increased 50%

- 降低一个特定频率光波的饱和度
 - 降低它的强度(intensity)
或
 - 掺入白色、黑色、或者它的补色

5.1.5 色域

- 怎样生成与设备无关的颜色？



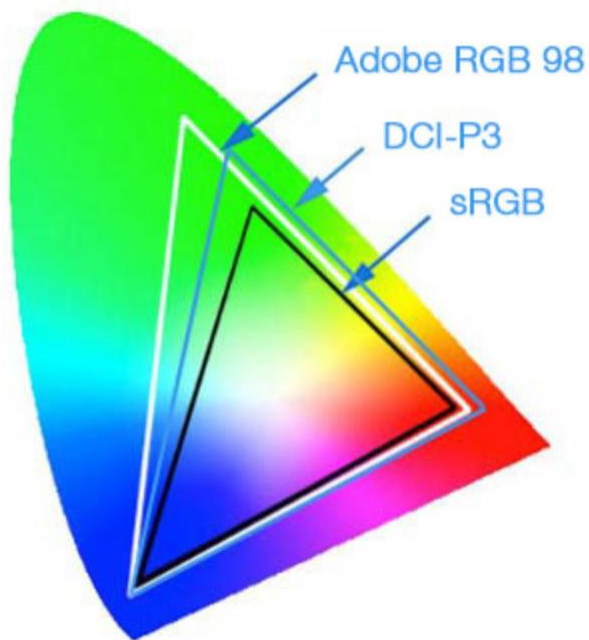
5.1.5 色域

- 对于任何 (x, y) 对，我们希望找到 RGB 三个值给出指定的 (x, y, z) ，其中 $z = 1-x-y$.

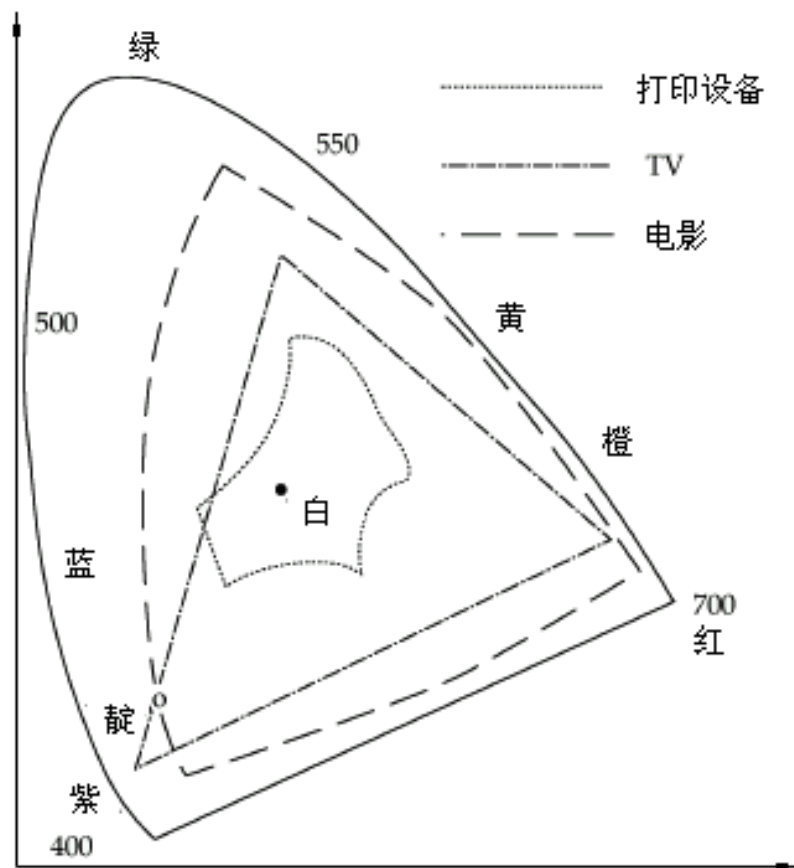
$$\begin{bmatrix} x_r & x_g & x_b \\ y_r & y_g & y_b \\ z_r & z_g & z_b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}$$

- 如果 RGB 某个值为负数，该怎么办？
这种颜色，人类可见，在显示设备的色域之外。
 1. 只需使用最接近的色域内颜色
 2. 选择最接近的补充颜色。

5.1.5 色域

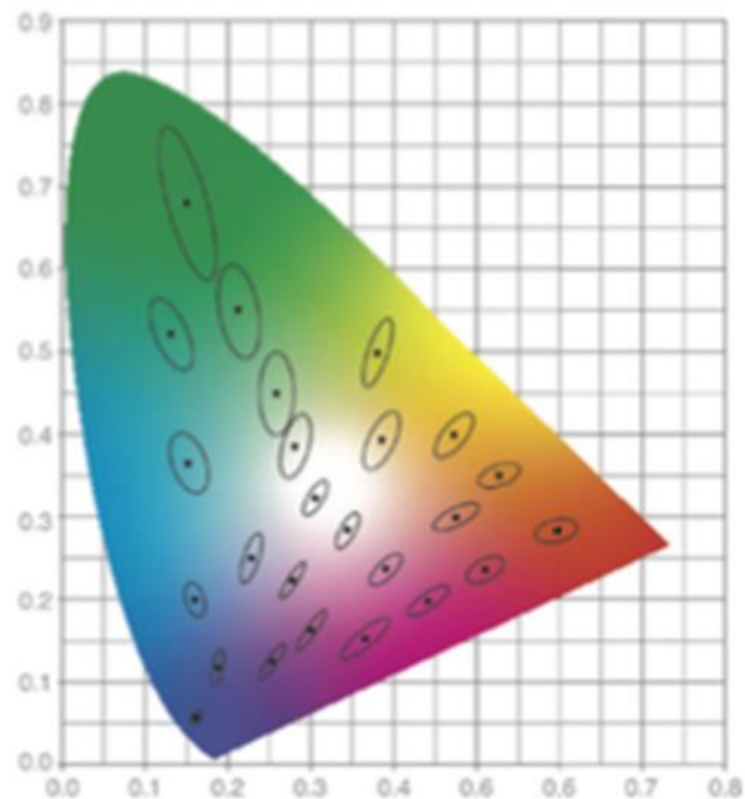
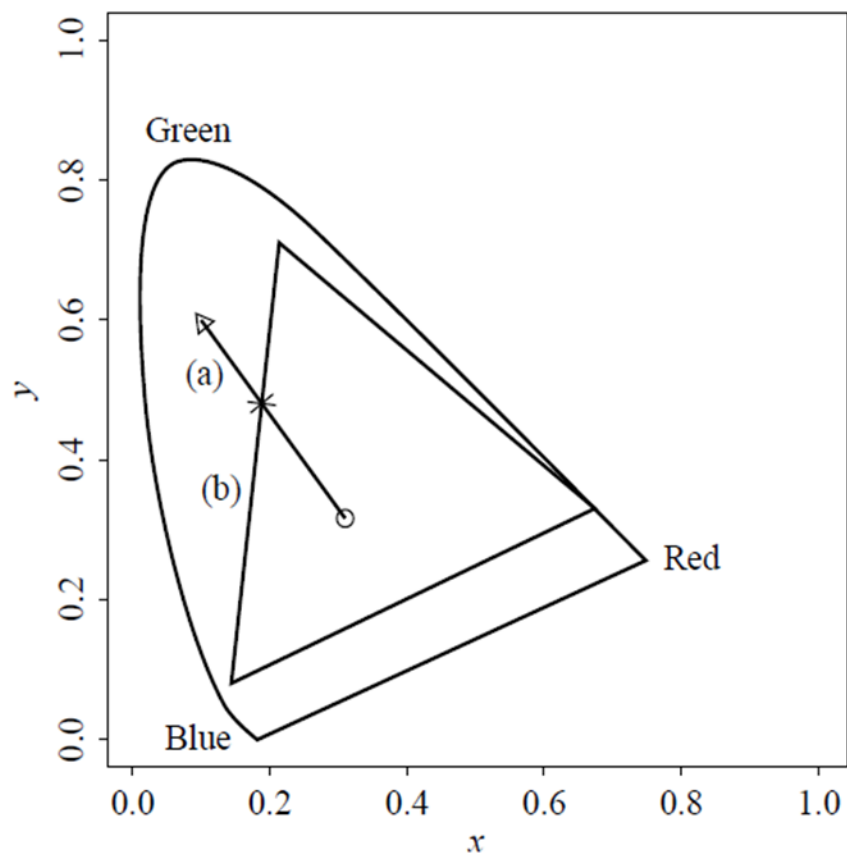


色域gamut



几种设备重现的颜色范围

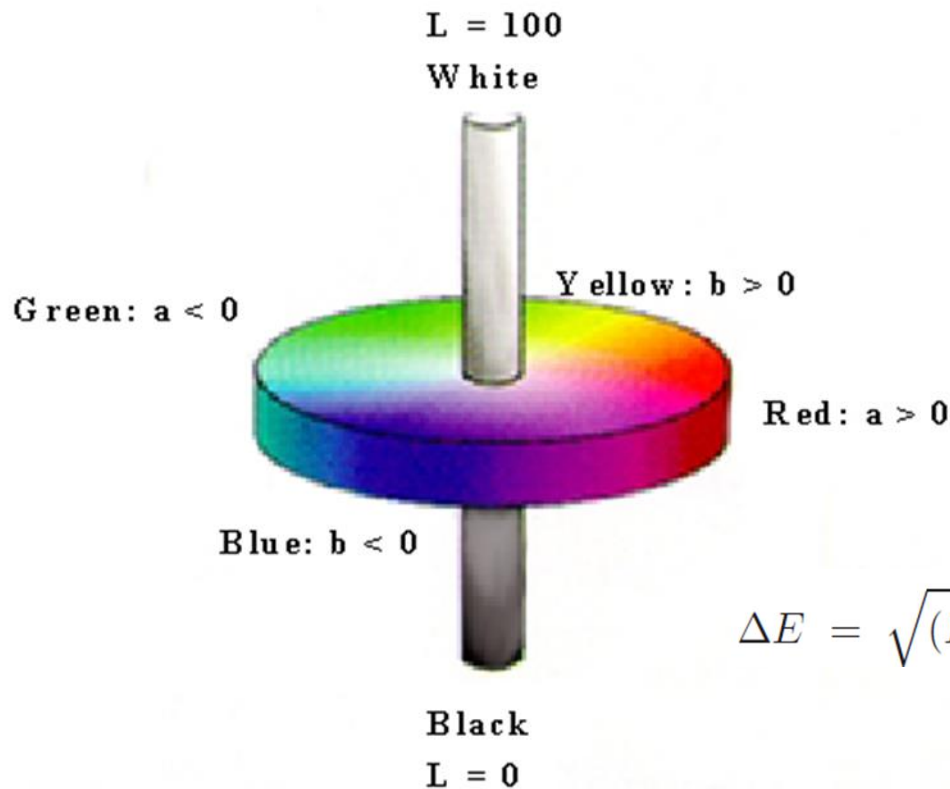
5.1.5 域外颜色



5.1.6 $L^*a^*b^*$ (CIELAB) 色彩模型

- 韦伯定律：感知相等的差异与幅度成正比。幅值越大，感知变化的差异就越多。
- 从数学上讲，在强度 I 上，只要变化 $\frac{\Delta I}{I}$ 是常数，感知到的变化是相同的。
- 对于人类视觉，CIE 应用该规则得到CIELAB 空间。在这个空间里被量化的是颜色和亮度上所感知的差异。

5.1.6 L*a*b*(CIELAB) 色彩模型



颜色差异:

$$\Delta E = \sqrt{(L_1^* - L_2^*)^2 + (a_1^* - a_2^*)^2 + (b_1^* - b_2^*)^2}$$

CIELAB model

5.1.6 L*a*b*(CIELAB) 色彩模型

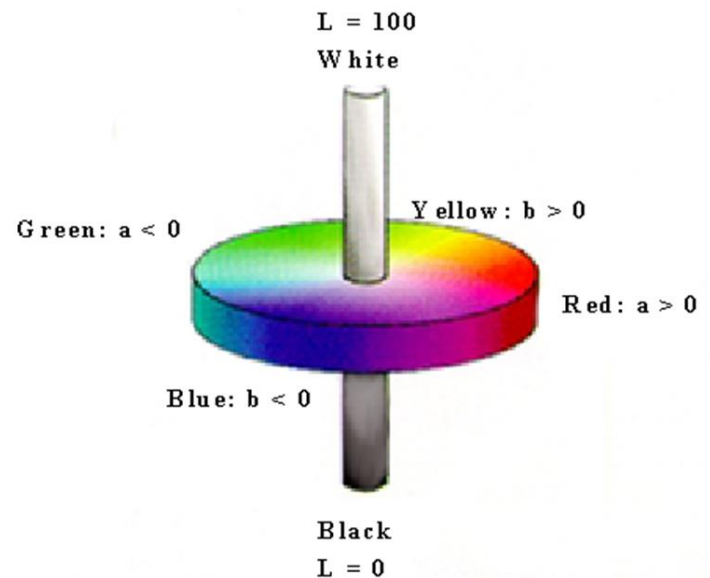
$$L^* = 116 \left(\frac{Y}{Y_n} \right)^{(1/3)} - 16$$

$$a^* = 500 \left[\left(\frac{X}{X_n} \right)^{(1/3)} - \left(\frac{Y}{Y_n} \right)^{(1/3)} \right]$$

$$b^* = 200 \left[\left(\frac{Y}{Y_n} \right)^{(1/3)} - \left(\frac{Z}{Z_n} \right)^{(1/3)} \right]$$

辅助定义包括：

$$\text{chroma} = c^* = \sqrt{(a^*)^2 + (b^*)^2}, \text{ hue angle} = h^* = \arctan \frac{b^*}{a^*}$$



5.1.7 其他颜色坐标系统

- a) CMY — 青、品红、黄色相减混色模型;
- b) HSL — 色调、饱和度、亮度;
- c) HSV — 色调、饱和度、值;
- d) HSI — 色调、饱和度、强度;
- e) HCL — 色调、色度、亮度;

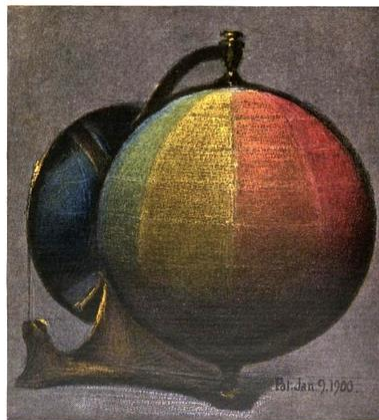
5.1.7 颜色编目系统

- 颜色系统(color system)

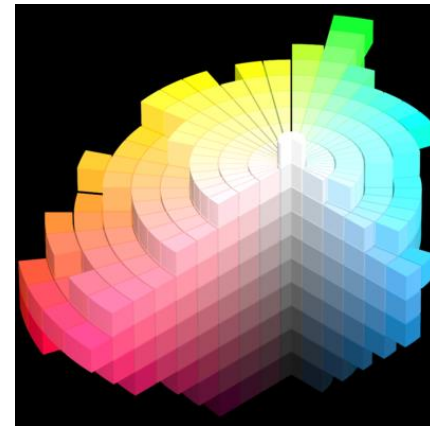
- 颜色模型(color model, color space): 用简单方法描述所有颜色的一套规则和定义
- 编目系统(cataloging system): 给每一种颜色分配一个唯一的名称或一个号码

5.1.7 Munsell颜色编目系统

- Albert H. Munsell建立了一个近似的感知规范系统，用色调(hue)、值(value)和色度(chroma)三个坐标轴讨论和制定颜色。

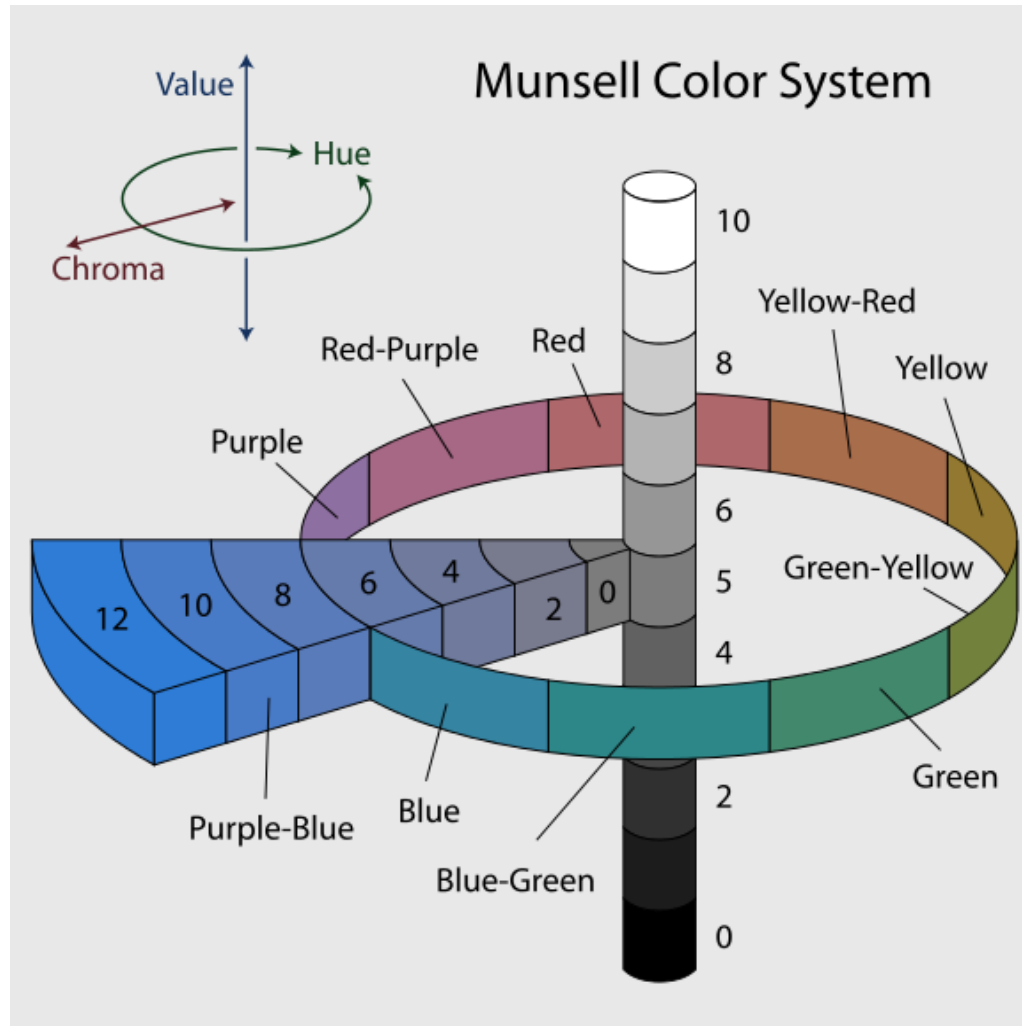


A BALANCED COLOR SPHERE

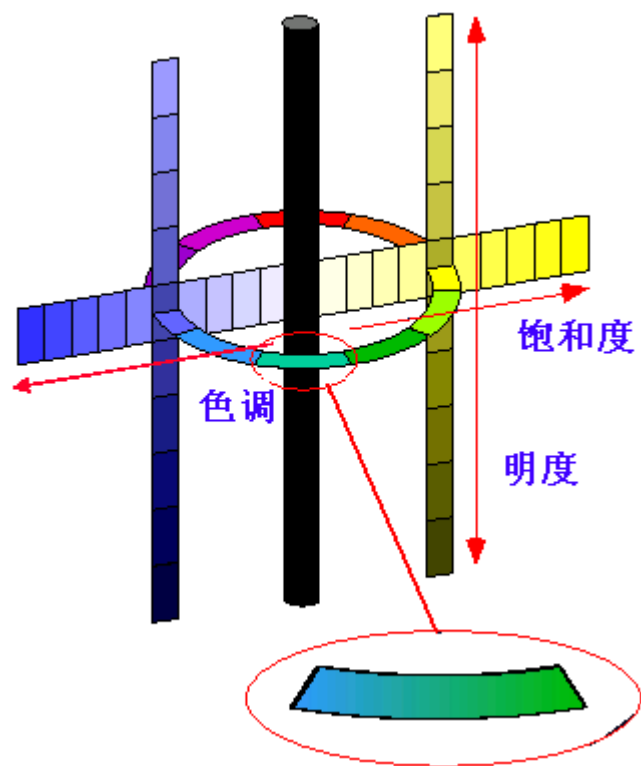


- 主要思想:希望对任何用户使用同一的颜色规范。

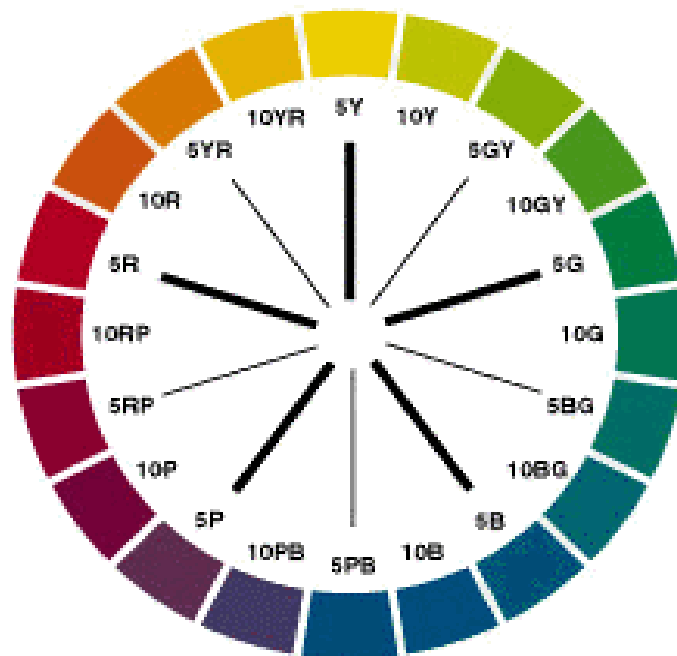
5.1.7 Munsell颜色系统



5.1.7 Munsell颜色系统



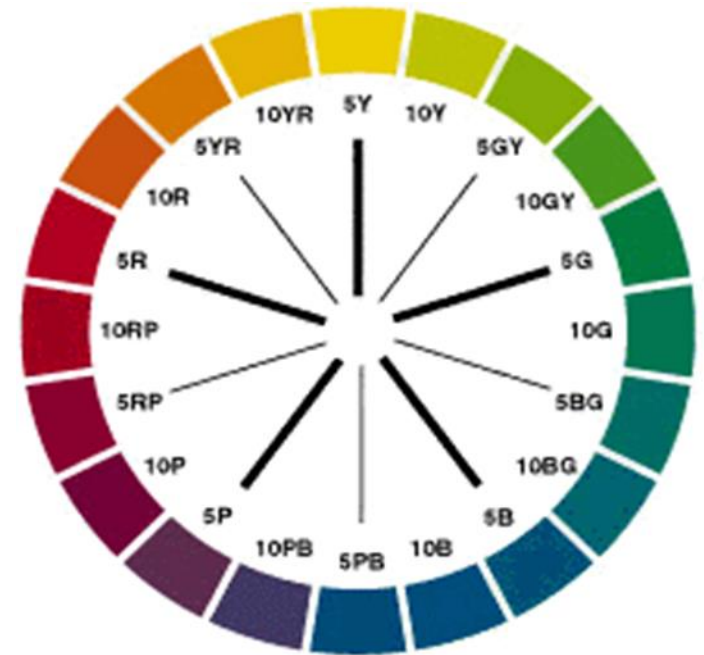
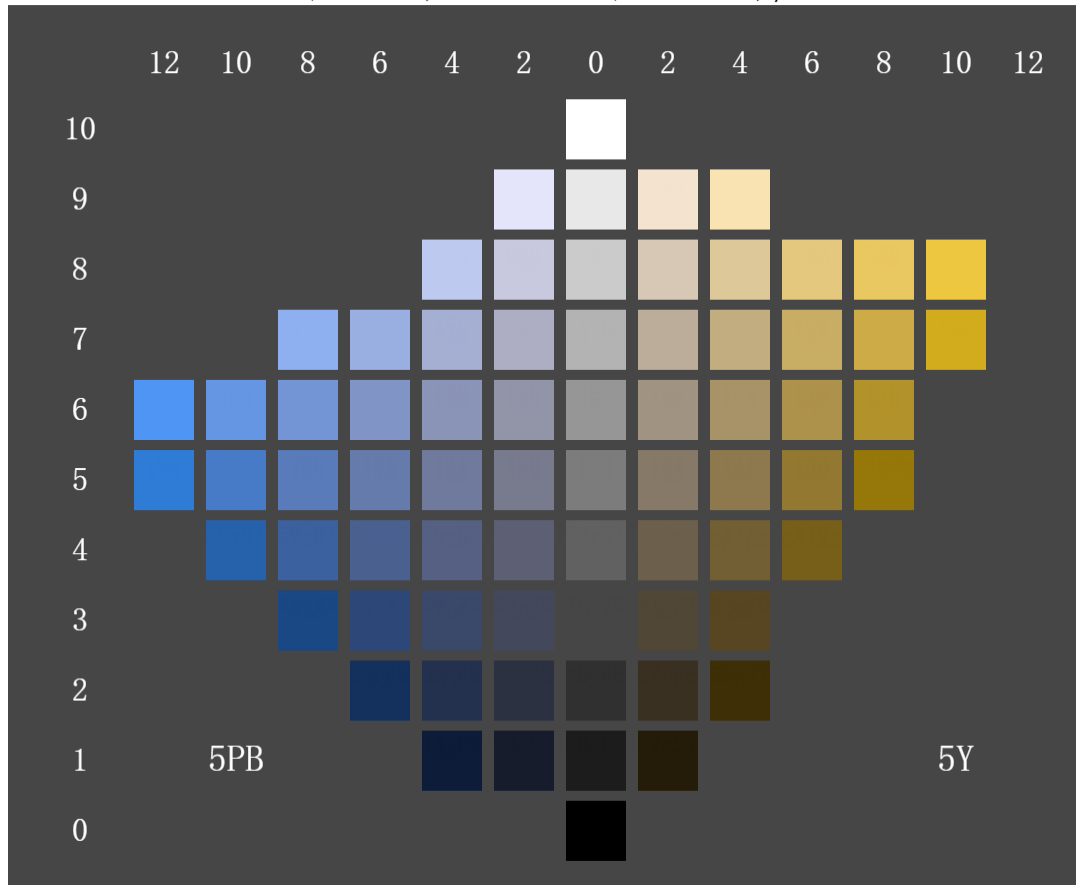
(a) 颜色属性



(b) 色调

5.1.7 Munsell颜色系统

Munsell *value* (vertical) and *chroma* (horizontal); hue 5Y and 5PB



5.1.7 Pantone编目系统



Ultra Violet
18-3838



Greenery
15-0343



Rose Quartz
13-1520



Serenity
15-3919



Marsala
18-1438



Radiant Orchid
18-3224



Emerald
17-5641



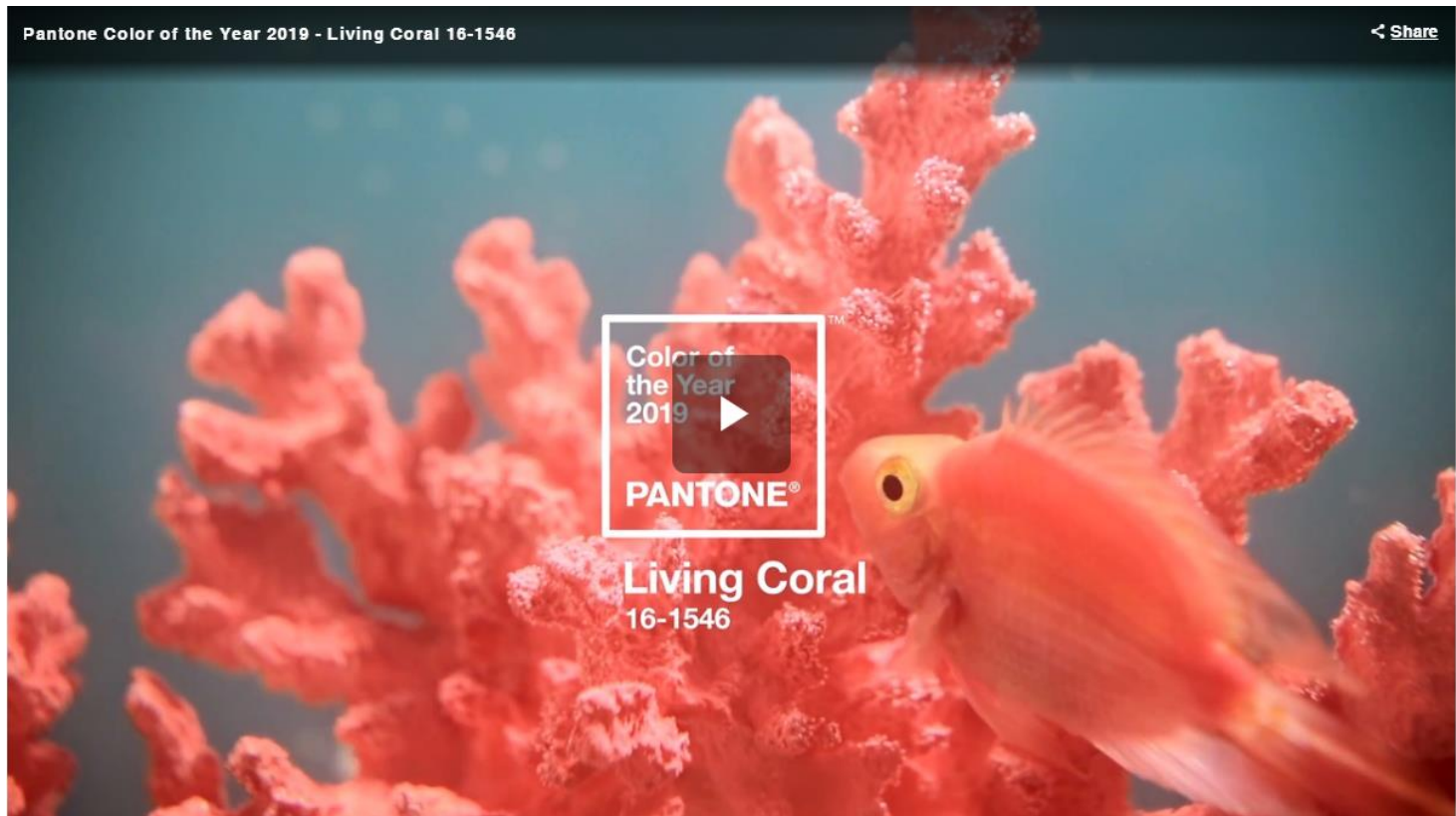
Tangerine Tango
17-1463



Honeysuckle
18-2120

PANTONE 16-1546 Living Coral

An animating and life-affirming coral hue with a golden undertone that energizes and enlivens with a softer edge



目录

5.1 颜色科学

5.1.1 彩色图像形成

5.1.2 伽马(γ)校正

5.1.3 颜色匹配函数

5.1.4 CIE色度图

5.1.5 色域

5.1.6 $L^*a^*b^*$ (CIELAB) 色彩模型

5.1.7 颜色编目系统

5.2 图像中的颜色模型

5.2.1 RGB颜色模型

5.2.2 多传感器相机

5.2.3 相机相关颜色

5.2.4 CMY颜色模型

5.3 视频中的颜色模型

5.3.1 视频中的色彩模型

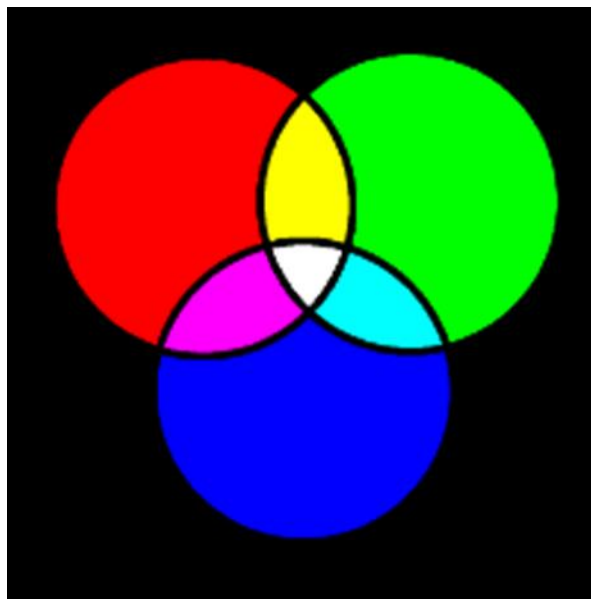
5.3.2 YUV颜色模型

5.3.3 YIQ颜色模型

5.3.4 YCbCr颜色模型

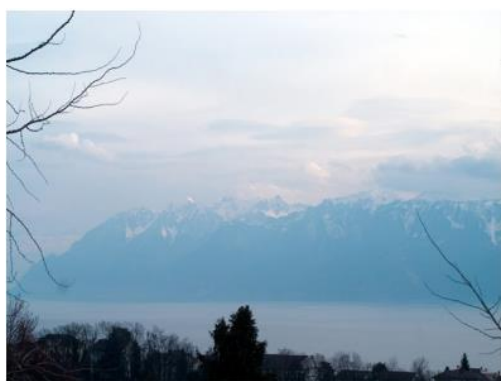
5.2.1 显示器的颜色模型

- 通常以RGB形式存储颜色的信息。



5.2.2 多传感器相机

- 使用具有三个以上传感器的相机可以获得更精确的颜色。
- 可以移除通常放置在相机中的近红外滤光片，从而将摄像机的灵敏度扩展到红外线。

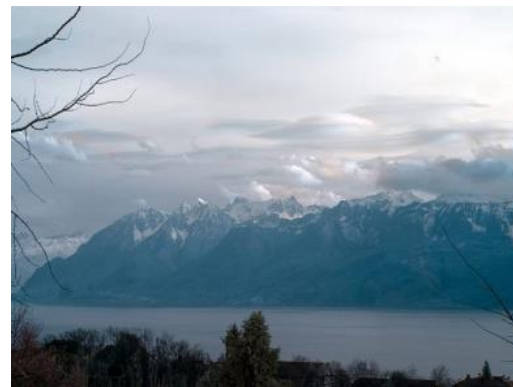


RGB

+



Near-Infrared

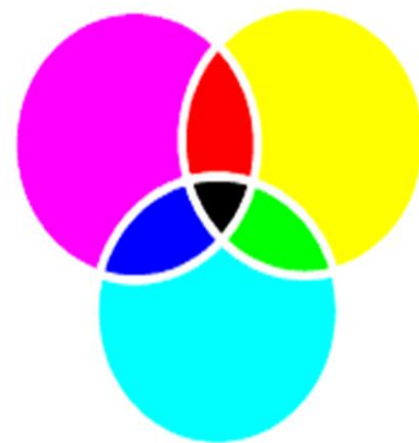


Combination:

5.2.3 相机相关的颜色

- 除了 RGB 外，另外两个与相机相关的常用颜色空间：
 - HSV:
H 代表色调;S 代表颜色的"饱和度";V 代表"值", 表示亮度.
 - sRGB (standard RGB) :
为了实现人类色彩感知和设备相关颜色的平衡, 使用sRGB作为与显示屏相关的颜色空间
特别适用于网页的色彩空间, 默认网页的色彩空间

5.2.4 CMY相减混色模型



- 适用于不发光的无源物体，颜色由该物体吸收或者反射哪些光波决定。
- 用三种基本颜色即青色(cyan)、品红(magenta)和黄色(yellow)的颜料按一定比例混合得到颜色
- 打印彩色图像用CMY相减混色模型

目录

5.1 颜色科学

5.1.1 彩色图像形成

5.1.2 伽马(γ)校正

5.1.3 颜色匹配函数

5.1.4 CIE色度图

5.1.5 色域

5.1.6 $L^*a^*b^*$ (CIELAB) 色彩模型

5.1.7 颜色编目系统

5.2 图像中的颜色模型

5.2.1 RGB颜色模型

5.2.2 多传感器相机

5.2.3 相机相关颜色

5.2.4 CMY颜色模型

5.3 视频中的颜色模型

5.3.1 视频中的色彩模型

5.3.2 YUV颜色模型

5.3.3 YIQ颜色模型

5.3.4 YCbCr颜色模型

5.3.1 视频中的色彩模型

■ 视频颜色变换

- 主要来源于较旧的模拟彩色电视编码方法。亮度与颜色信息分开。
- 北美和日本用一种YIQ方法传输电视信号、录像带。
- 欧洲的模拟电视、录像带使用 YUV矩阵变换。
- 最后，数字视频主要使用称为 YCbCr 的矩阵变换，该转换与 YUV 密切相关。

5.3.2 YUV颜色模型

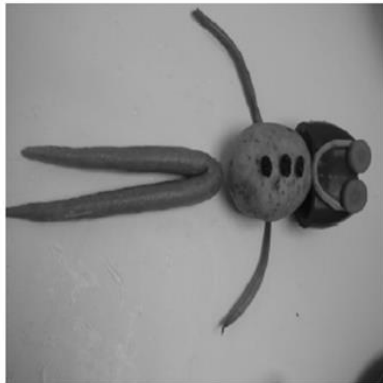
- YUV编码亮度信号和色度信号。
 - 色度是指同一亮度下的颜色和参考白色之间的差异

$$U = B' - Y'$$

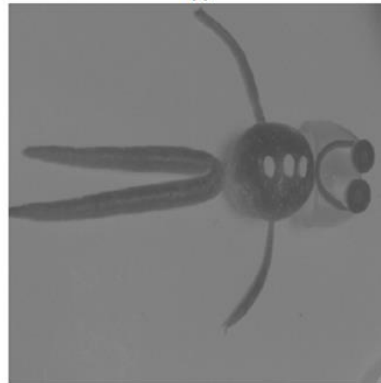
$$V = R' - Y'$$



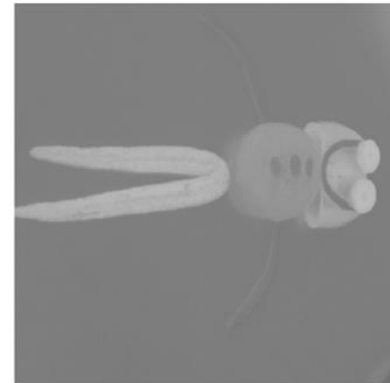
(a)



(b)



(c)



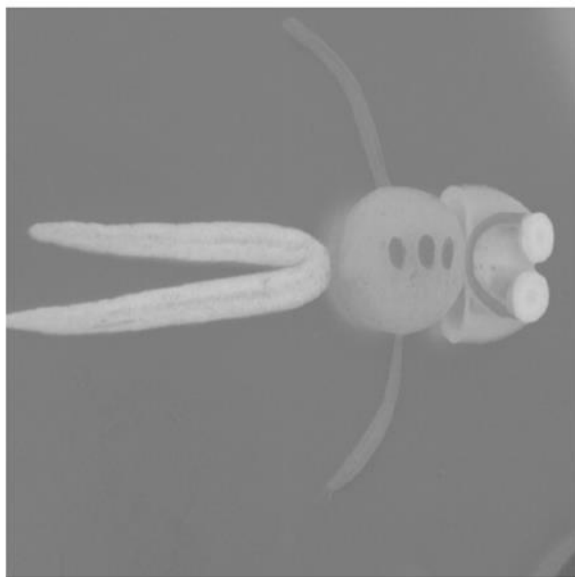
(d)

5.3.3 YIQ颜色模型

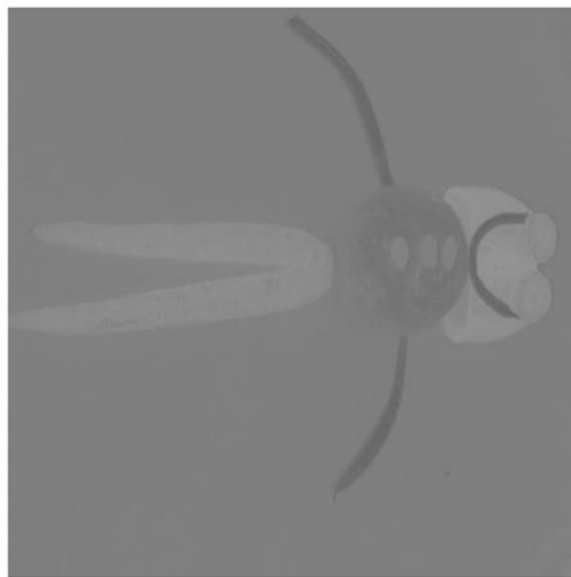
- Y' 在 YIQ 中与 YUV 相同; Y 和 V 旋转了 33° :

$$I = 0.492111(R' - Y') \cos 33^\circ - 0.877283(B' - Y') \sin 33^\circ$$

$$Q = 0.492111(R' - Y') \sin 33^\circ + 0.877283(B' - Y') \cos 33^\circ$$



(a)



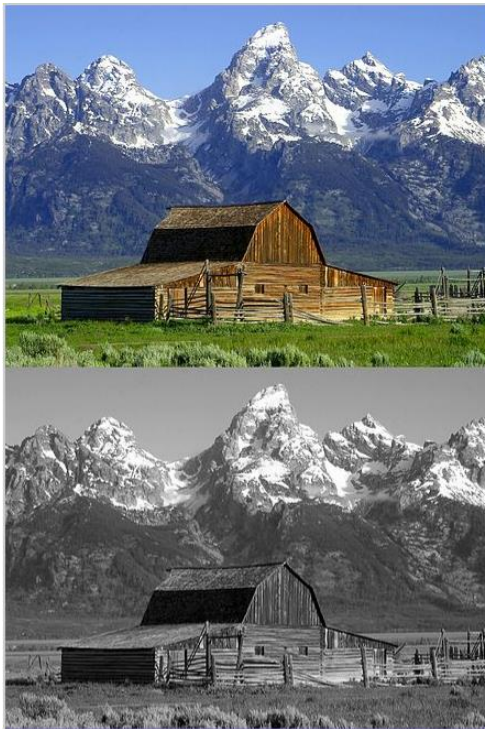
(b)

5.3.4 YCbCr颜色模型

- 用于JPEG图像编码和MPEG视频编码

$$C_b = ((B' - Y')/1.772) + 0.5$$

$$C_r = ((R' - Y')/1.402) + 0.5$$



YCbCr采样格式

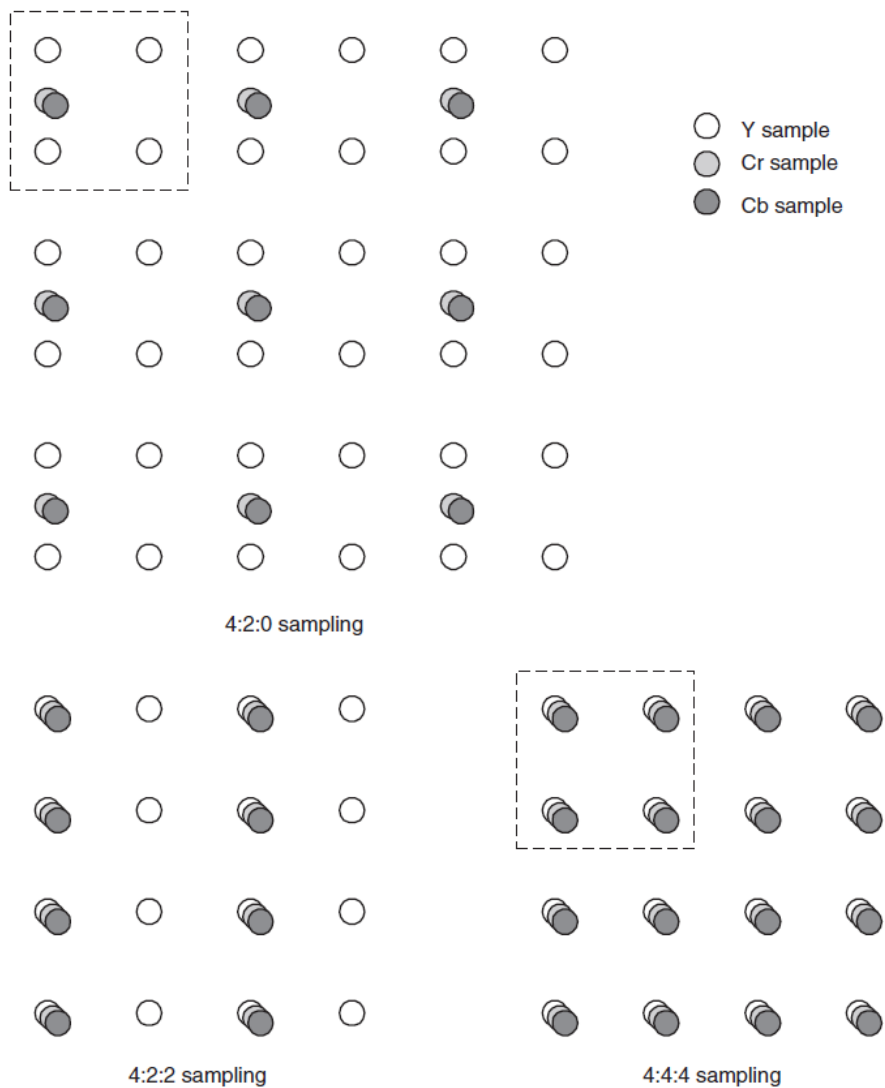


Figure 2.11 4:2:0, 4:2:2 and 4:4:4 sampling patterns (progressive)

第6章 颜色空间变换



目录

6.1 该用什么颜色空间

6.2 颜色空间转换

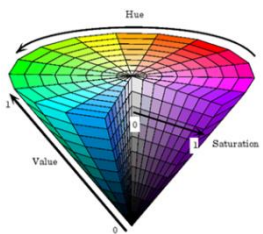
6.1 该用什么颜色空间

■ 从颜色感知角度

- 混合(mixture)型颜色空间：
 - RGB, CMY(K)和XYZ
- 非线性亮度/色度型颜色空间
 - L^*a^*b , YUV和YIQ, YCbCr
- 强度/饱和度/色调型颜色空间
 - HSI, HSL, HSV和HCL

6.1 该用什么颜色空间

- 从技术角度



- 计算机图形颜色空间：主要用于电视机和计算机的颜色显示系统

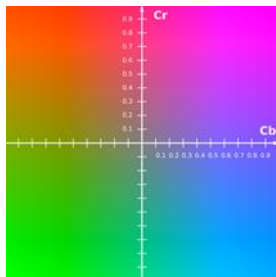
- RGB, HSI, HSL, HSV

- XYZ型颜色空间/CIE颜色空间：由国际照明委员会(CIE)定义的颜色空间，与设备无关的颜色表示法

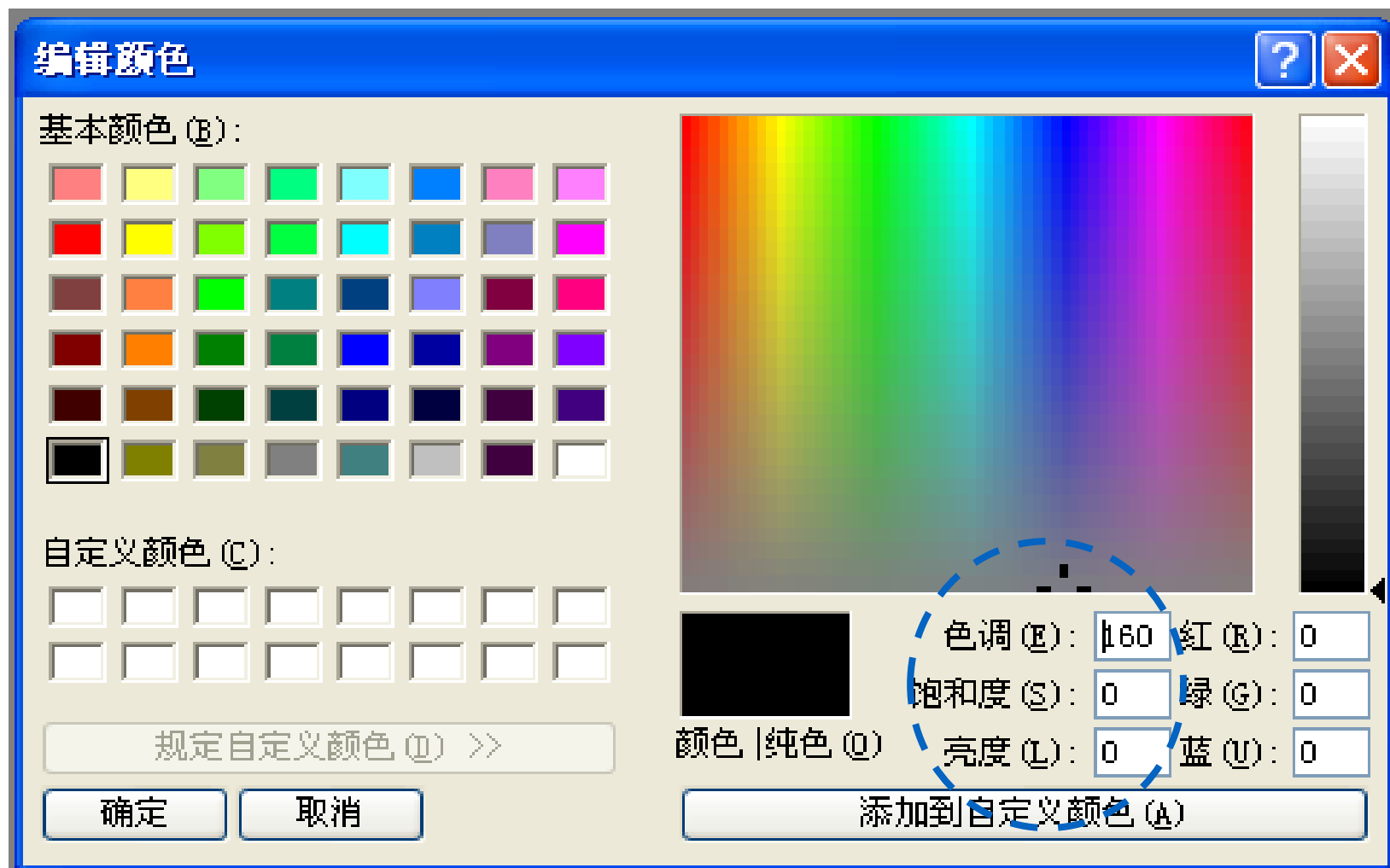
- XYZ, CIE $L^*a^*b^*$, 等

- 电视系统颜色空间：主要目的是通过压缩色度信息以有效地播送彩色电视图像

- YUV, YIQ, YCbCr



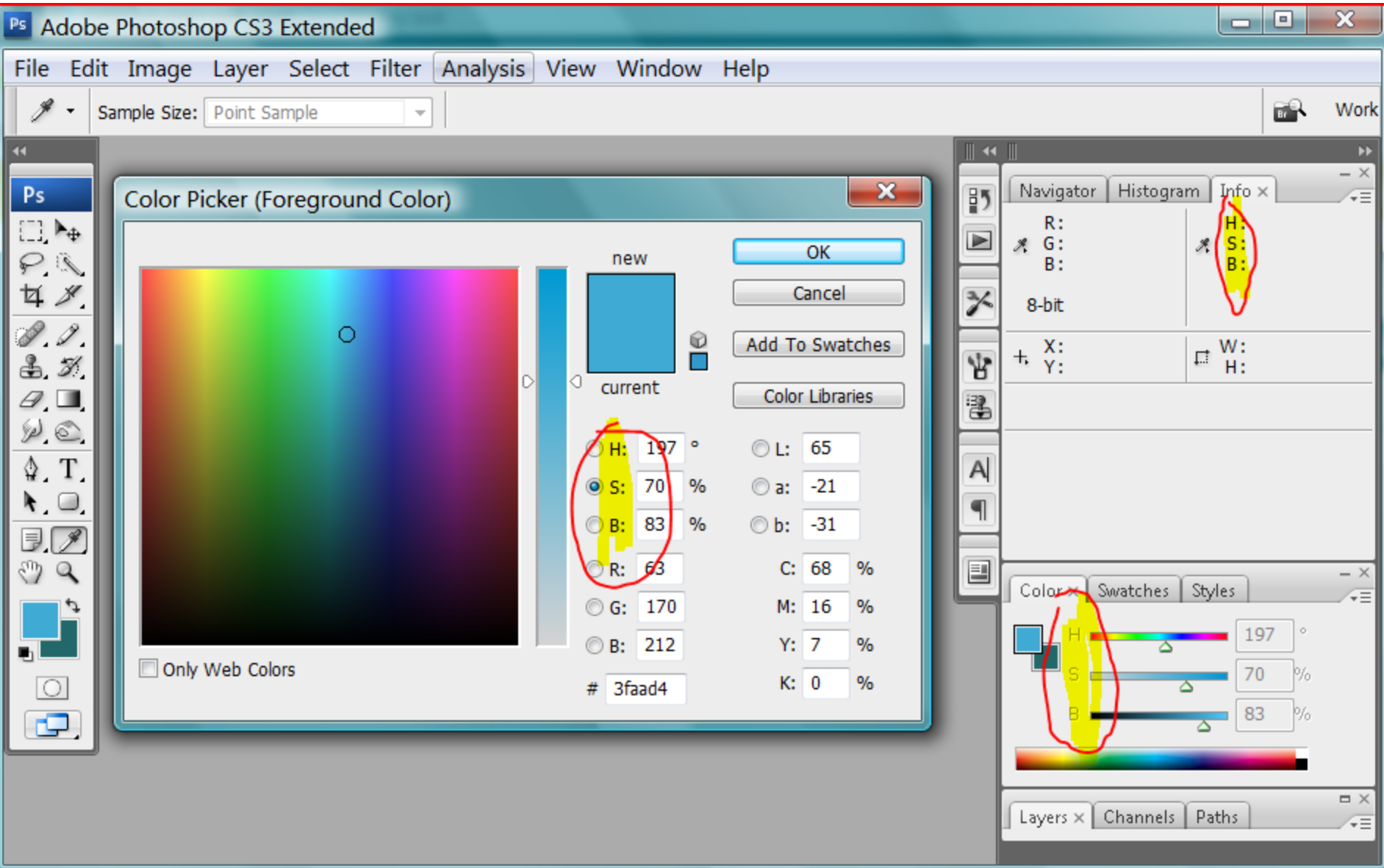
Windows调色板



6.1 该用什么颜色空间

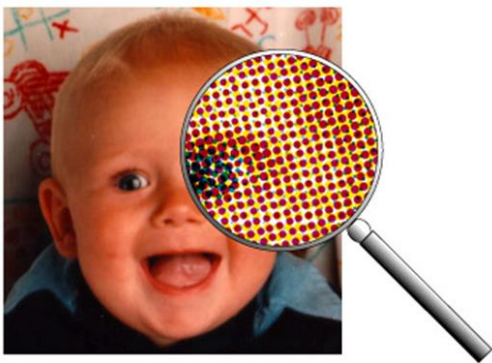
颜色空间的分类

类型	RGB型	XYZ型	YUV型
混合型(mixture)	RGB	XYZ	-
非线性亮度/色度 (luma/chroma)	-	$L^*a^*b^*$ $L^*u^*v^*$	YUV YIQ
强度/饱和度/色调 (intensity/saturation/hue)	HSI, HSL HSV	LCh/CHL	



6.2 颜色空间转换

RGB → CMY



CMY → RGB

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

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

6.2 颜色空间转换

$$\text{CMY} \rightarrow \text{CMYK} \quad \left\{ \begin{array}{l} K = \min(C, M, Y) \\ C = (C - K) / (1 - K) \\ M = (M - K) / (1 - K) \\ Y = (Y - K) / (1 - K) \end{array} \right.$$

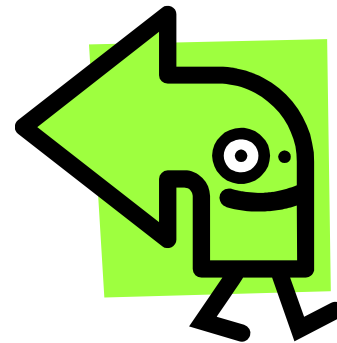
$$\text{CMYK} \rightarrow \text{CMY} \quad \left\{ \begin{array}{l} C = \min(1, C * (1 - K) + K) \\ M = \min(1, M * (1 - K) + K) \\ Y = \min(1, Y * (1 - K) + K) \end{array} \right.$$

Quiz

■ 下列哪些颜色空间与设备无关？

(1) RGB (2) CIE XYZ (3) CIE $L^*A^*B^*$

END



第6章 颜色空间变换