

1. 色彩科学
2. 图像中的色彩模型
3. 视频中的色彩模型

## 图像和视频中的色彩



讲师：肖俊

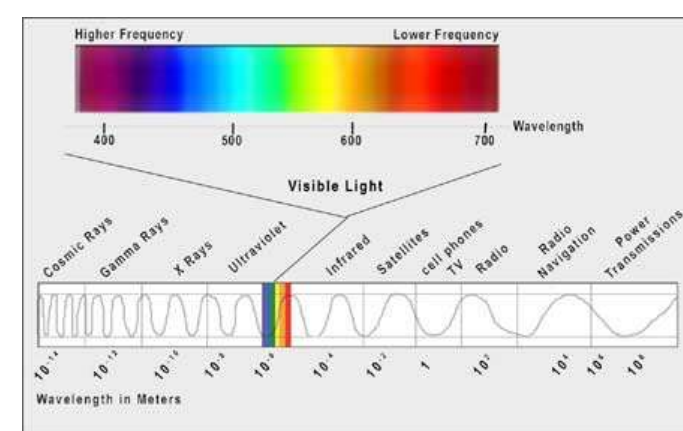
软件与技术学院

### 1. 色彩科学

- 光与光谱
- 伽马校正
- 配色函数
- $L^*a^*b^*$  (CIELAB) 色彩模型
- CMY(CMYK)
- HSV
- 其他颜色模型

### 1.1 光与光谱

- 光是一种电磁波，其颜色由波长表征 - 激光——单一波长 - 大多数光源——多个波长的贡献 - 短波——蓝色，长波——红色 - 可见光范围：400 — 700 nm (纳米， $10^{-9}M$ )



### 1.1 光与光谱

- 分光光度计：一种用于测量可见光的设备，它通过衍射光栅（有刻痕的表面）反射光线，将不同波长的光分散开来。

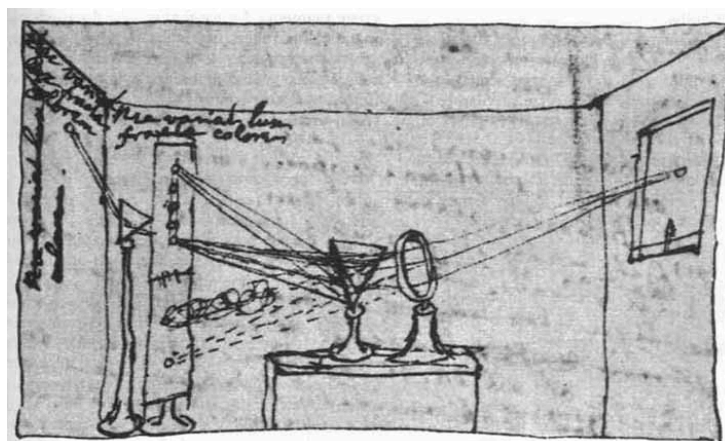
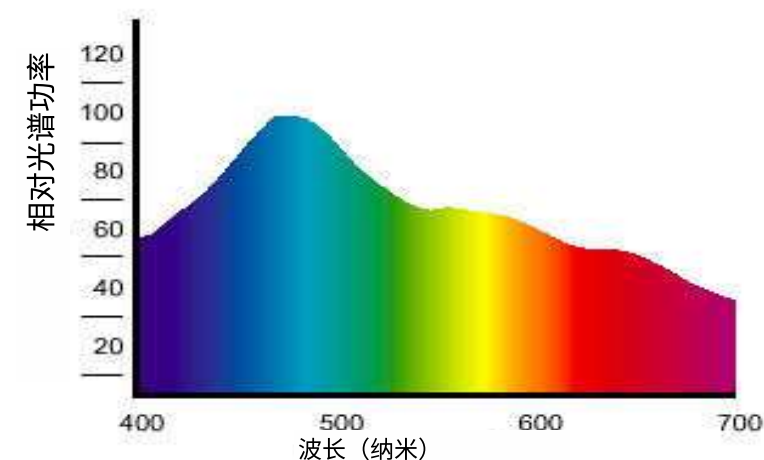


图4.1：艾萨克·牛顿爵士的实验。

### 1.1 光与光谱

- 光谱功率分布 (SPD)
  - 每个波长区间内的相对功率
  - 波长的符号是  $\lambda$ 。这条曲线称为  $E(\lambda)$ 。



日光的光谱功率分布

### 1.1 光与光谱

- 人类视觉
  - 像相机一样工作
  - 将图像聚焦到视网膜上的晶状体

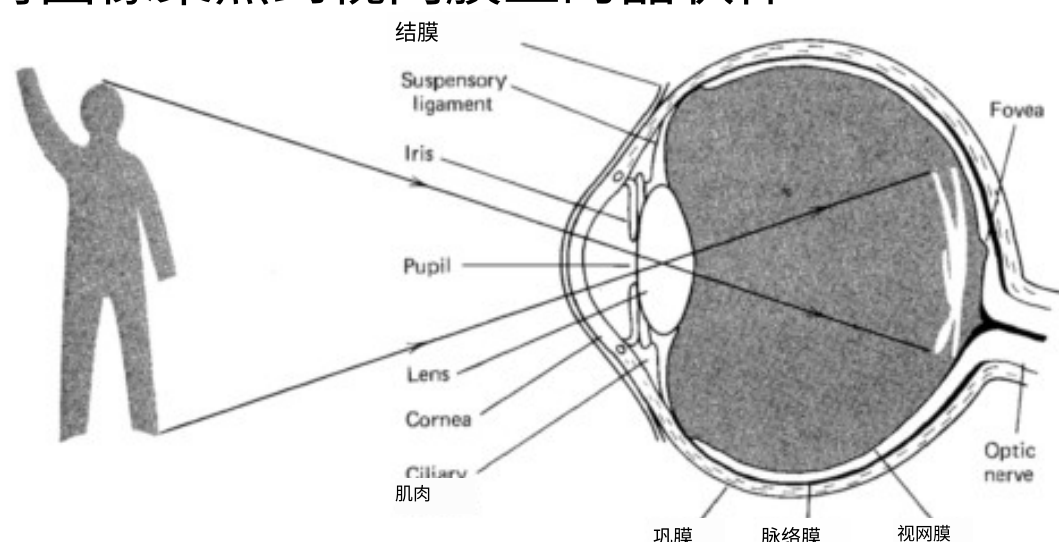


Fig. 1. Human retina as seen through an ophthalmoscope.

### 1.1 光与光谱

- 人类视觉 (续)
  - 视网膜——视杆细胞和视锥细胞
  - 在光线较暗时，视杆细胞发挥作用，产生灰度图像。
  - 在光线较亮时，每个视锥细胞都会产生信号。三种视锥细胞分别对红 (R)、绿 (G)、蓝 (B) 光最为敏感。

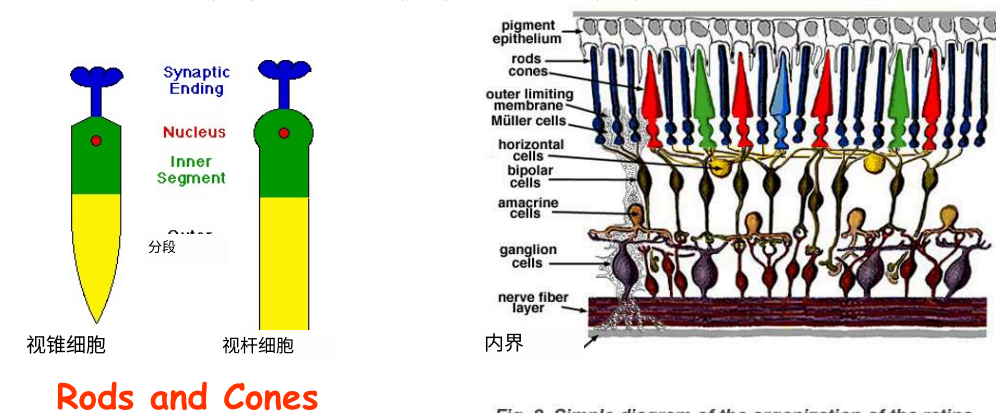


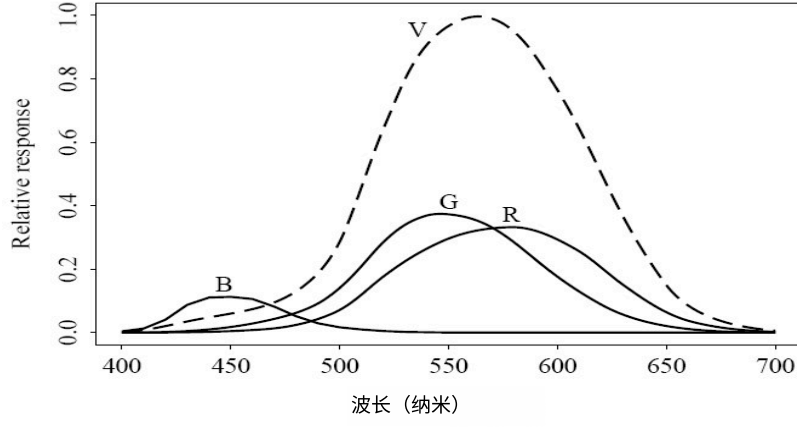
Fig. 2. Simple diagram of the organization of the retina.



## 1.1 光与光谱

### •眼睛的光谱灵敏度

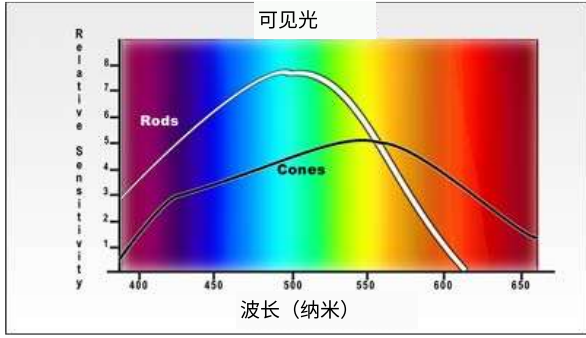
- 对可见光谱的中间部分最为敏感
- 我们的感受器的灵敏度也是波长的函数
- 显示总体灵敏度的发光效率函数
- 蓝色感受器的灵敏度未按比例显示，因为它比红色或绿色曲线小得多



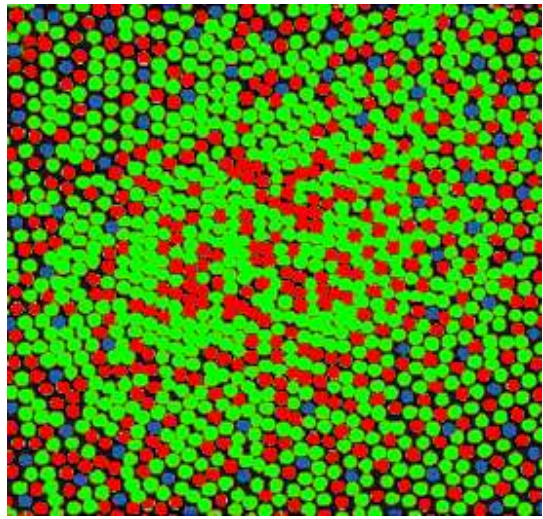
## 1.1 光与光谱

□ 眼睛的光谱灵敏度（续） - 视杆细胞 - 宽波长范围，黑白感知

- 约600万个视锥细胞 - 颜色
- 红:绿:蓝 = 40:20:1



视杆细胞和视锥细胞的光谱灵敏度



眼睛对入射光的响应

## 1.1 光与光谱

- 这些光谱灵敏度函数通常用“ $R, G, B$ ”以外的字母表示；这里我们使用向量函数  $q(\lambda)$ ，其分量为

$$q(\lambda) = (q_R(\lambda), q_G(\lambda), q_B(\lambda))^T \quad (4.1)$$

- 眼睛中每个颜色通道的响应与激发的神经元数量成正比。

我们可以用积分的形式简洁地表达这个想法：

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

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

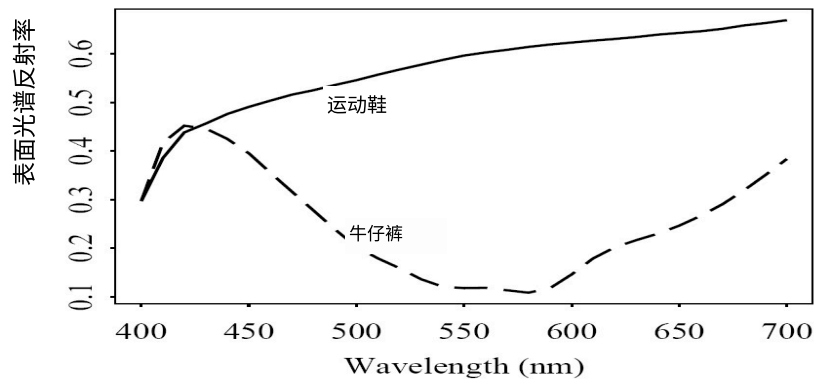
$$B = \int E(\lambda) q_B(\lambda) d\lambda \quad (4.2)$$

## 1.1 光与光谱

### •图像形成

- 不同表面在不同波长下反射的光量不同，深色表面比浅色表面反射的能量少。

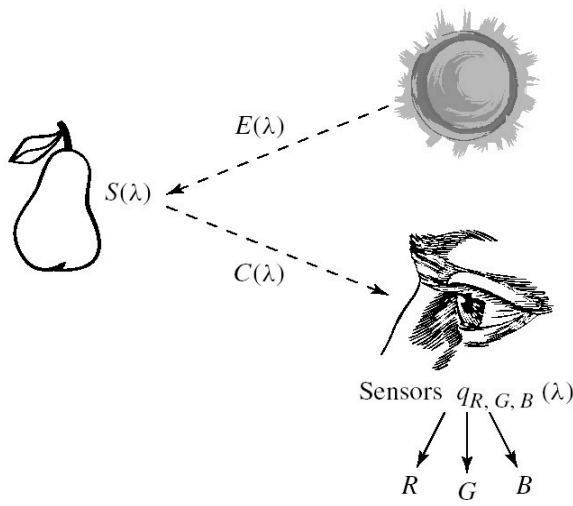
- 图4.4展示了（1）橙色运动鞋和（2）褪色蓝色牛仔裤的表面光谱反射率。反射函数表示为  $S(\lambda)$ 。



## 1.1 光与光谱

### •因此，图像形成过程如下：

- 具有光谱功率分布  $E(\lambda)$  的光源发出的光照射到具有表面光谱反射率函数  $S(\lambda)$  的表面上，发生反射，然后被人眼的视锥细胞函数  $q(\lambda)$  过滤。



## 1.1 光与光谱

- 函数  $C(\lambda)$  称为颜色信号，它由  $E(\lambda)$ （光源）与  $S(\lambda)$ （反射率）的乘积组成： $C(\lambda) = E(\lambda)S(\lambda)$ 。

- 考虑图像形成模型的方程如下：

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

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

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

## 1.1 光与光谱

### •相机系统

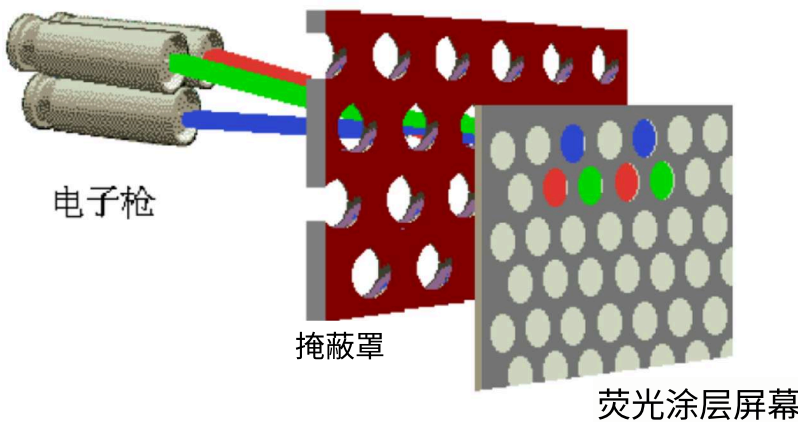
- 相机系统的构造方式类似；专业级相机在每个像素位置（对应视网膜位置）产生三个信号。

- 模拟信号被转换为数字信号，截断为整数并存储。如果使用的精度为8位，则任何  $R, G, B$  的最大值为255，最小值为0。

## 1.2 伽马校正

### •阴极射线管显示器

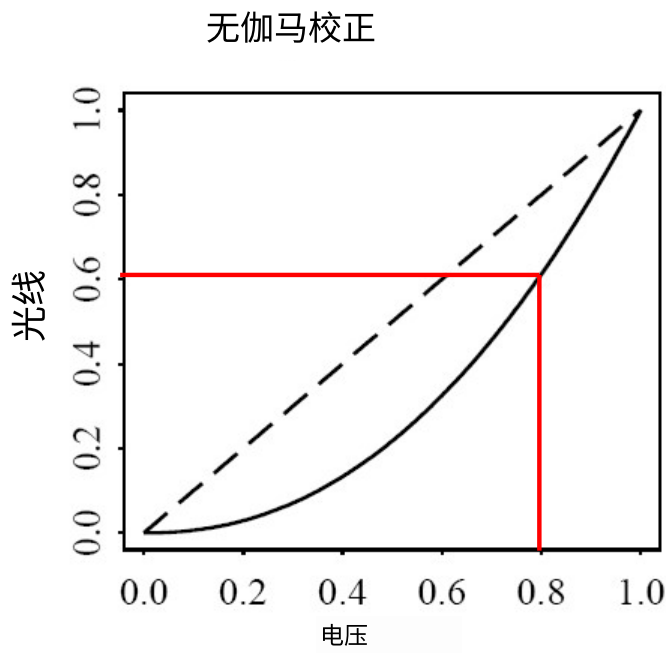
- 将RGB数值转换回模拟信号（电压），驱动阴极射线管（CRT）中的电子枪
- !! 光线与电压呈线性关系





## 1.2 伽马校正

- 阴极射线管（CRT）的光线与驱动电压
  - 与电压的R次方成正比 -  $> R Y$
- 该次方称为“伽马”，符号为  $\gamma$ 。伽马值约为2.2。



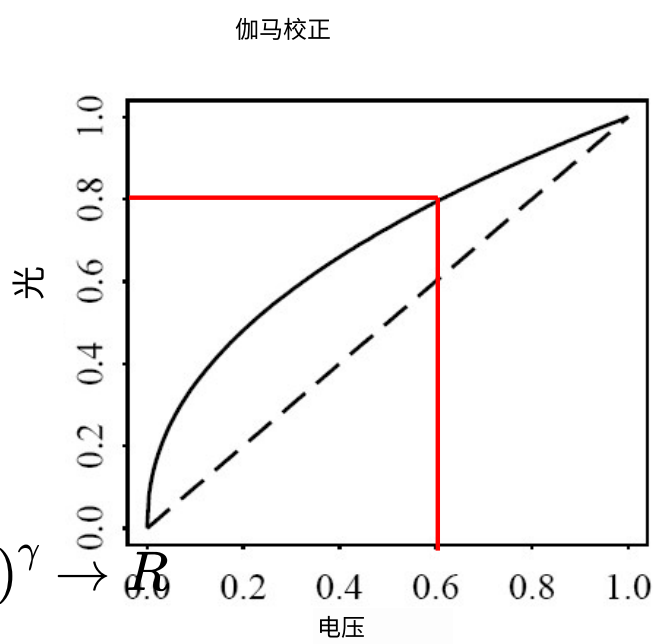
## 1.2 伽马校正

- 信号在“伽马校正”之前

传输

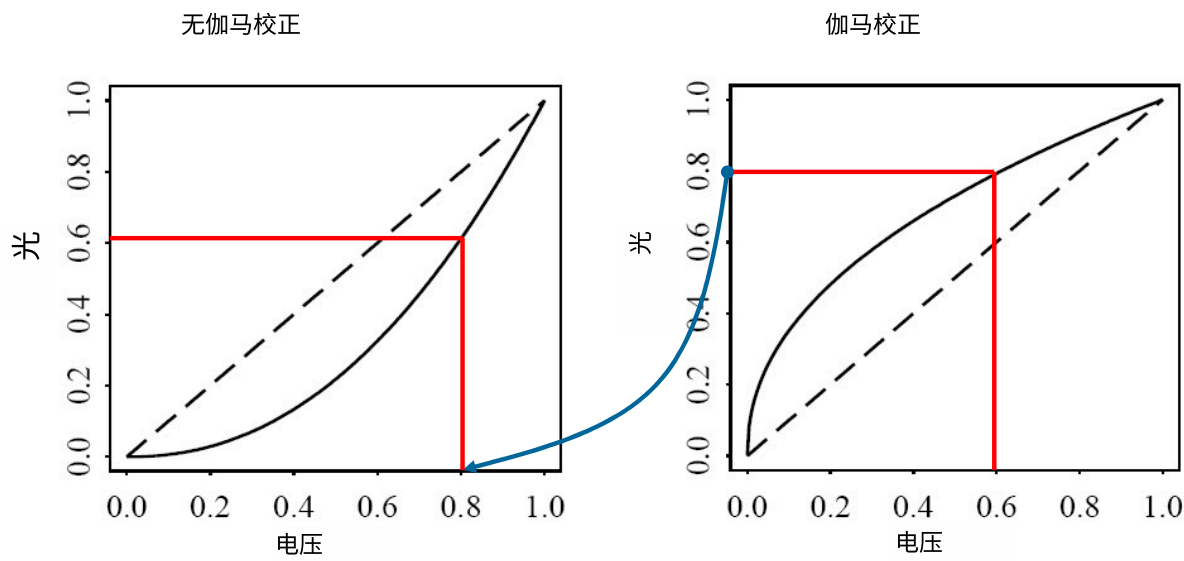
- 通常的做法是，对于在传输前通过提升到  $(1/\gamma)$  次幂进行伽马校正的信号，附加一个撇号。因此，我们得到线性信号：

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



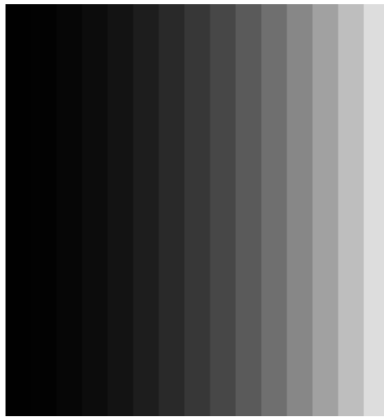
## 1.2 伽马校正

- 电压归一化到最大值 1

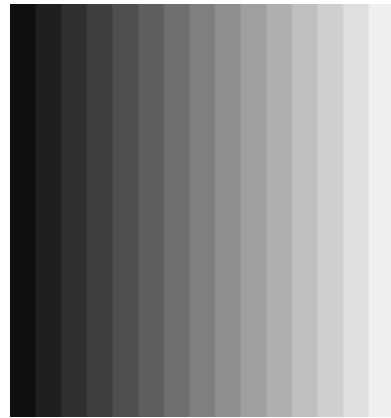


## 1.2 伽马校正

- 伽马校正效果
  - 示例 - 显示从0到255的渐变



无伽马校正



应用伽马校正

## 1.2 伽马校正



原始图像



伽马校正后

## 1.2伽马校正

- 相机传递函数：一种实用方法

$-R \rightarrow R := a \times R^{1/\gamma} + b$ ，在原点处需特别注意

$$V_{out} = \begin{cases} 4.5 \times V_{in} & V_{in} < 0.018 \\ 1.099 \times (V_{in} - 0.099) & V_{in} \geq 0.018 \end{cases}$$

- 由SMPTE（电影电视工程师协会）推荐以及电视），标准为SMPTE - 170

- 为什么采用2.2的伽马值？（NTSC制）
  - 实际值接近2.8（约等于  $1.25 \times 2.2$ ）
- 与伽马校正相关的一个问题
  - 何种强度级别——像素值中的何种位模式
  - 对级别比率而非绝对强度最为敏感

## 1.3 颜色匹配函数

- 即使不知道图4.3中的眼睛敏感度曲线，心理学中也发展出了一种技术，用于将基本的  $R$ ,  $G$  和  $B$  光的组合与给定的色调进行匹配。
- 实验中使用的特定一组三种基本光被称为三原色集。
- 为了匹配给定的颜色，要求受试者使用一组控制器分别调节三原色的亮度，直到产生的光斑与所需颜色最接近。
- 基本情况如图4.8所示。用于进行此类实验的设备称为色度计。

## 1.3 颜色匹配函数

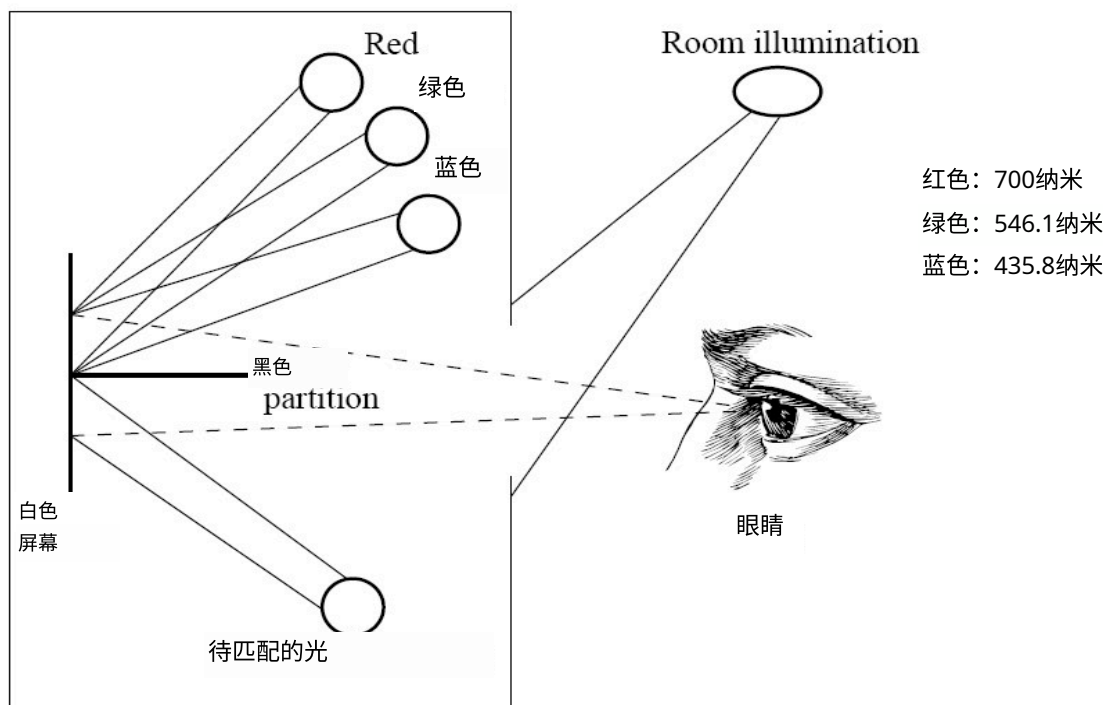


图4.8：色度计实验。



### 1.3 配色函数

•受试者为匹配每种单波长光而选择的R、G和B的量形成了配色曲线。这些曲线用  $\bar{r}(\lambda)$ ,  $\bar{g}(\lambda)$ ,  $\bar{b}(\lambda)$  表示，如图4.9所示。

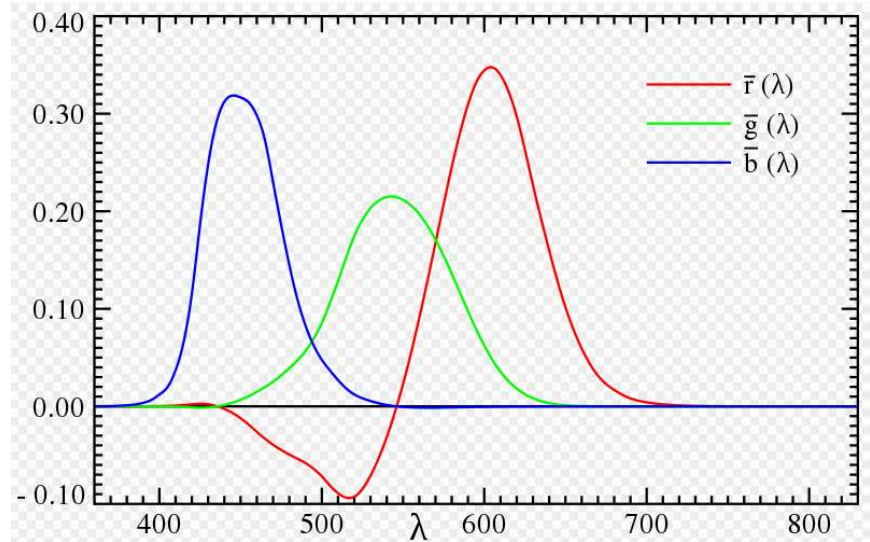


图4.9：CIE RGB配色函数

### 1.3 配色函数

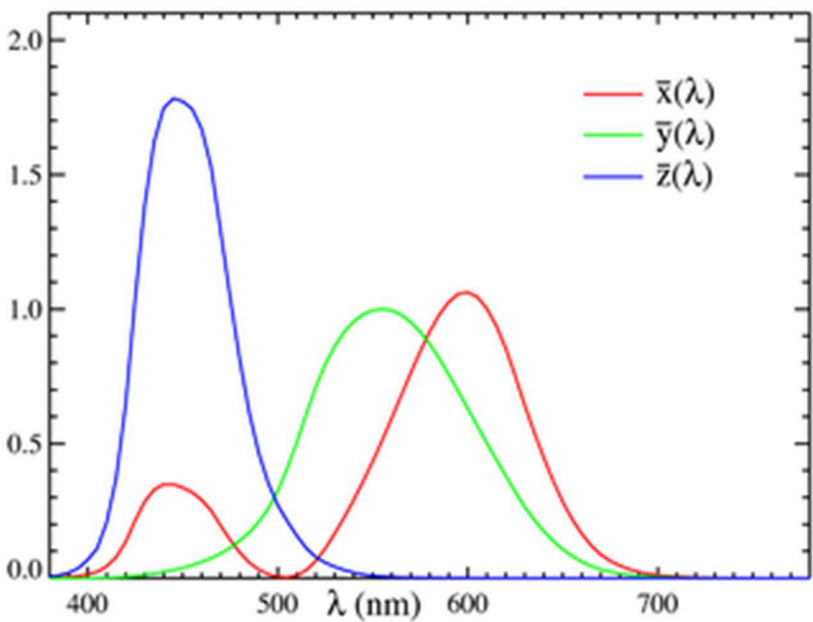
•由于  $\bar{r}(\lambda)$  配色曲线有一个负波瓣，因此设计了一组虚拟原色，从而得到只有正值的配色函数。

(a) 所得曲线如图4.10所示；这些曲线通常被称为配色函数。

(b) 它们与  $\bar{r}, \bar{g}, \bar{b}$  曲线相差一个  $3 \times 3$  矩阵，并表示为  $\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$

(c) 选择该矩阵，使得中间标准颜色匹配函数  $\bar{y}(\lambda)$  恰好等于图4.3所示的发光效率曲线  $V(\lambda)$ 。

### 1.3 颜色匹配函数



CIE标准颜色匹配函数：CIE XYZ颜色空间

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

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

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

#### XYZ到RGB的转换

•现在，从XYZ到RGB的  $3 \times 3$  转换矩阵取为

$$T = M D \tag{4.15}$$

即使对于非白点的其他点：

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \tag{4.16}$$

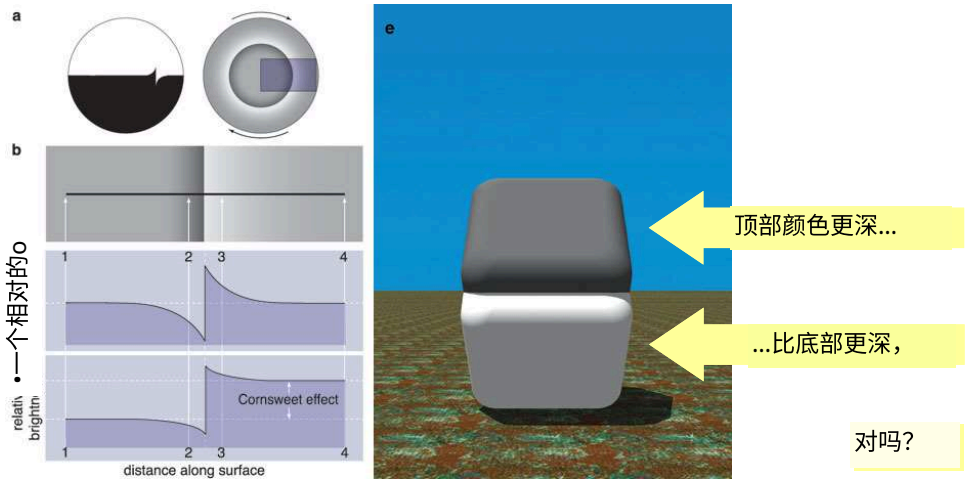
•对于SMPTE规范，我们得到：

$$T = \begin{bmatrix} 0.3935 & 0.3653 & 0.1916 \\ 0.2124 & 0.7011 & 0.0866 \\ 0.0187 & 0.1119 & 0.9582 \end{bmatrix} \tag{4.17}$$

•展开写，即为：

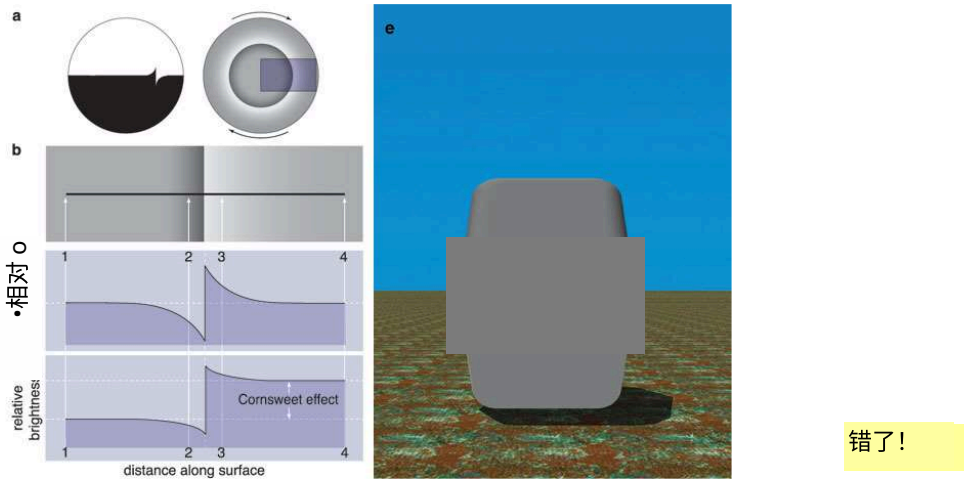
$$\begin{aligned} X &= 0.3935 \cdot R + 0.3653 \cdot G + 0.1916 \cdot B \\ Y &= 0.2124 \cdot R + 0.7011 \cdot G + 0.0866 \cdot B \\ Z &= 0.0187 \cdot R + 0.1119 \cdot G + 0.9582 \cdot B \end{aligned} \tag{4.18}$$

### 颜色感知：康斯威特效应



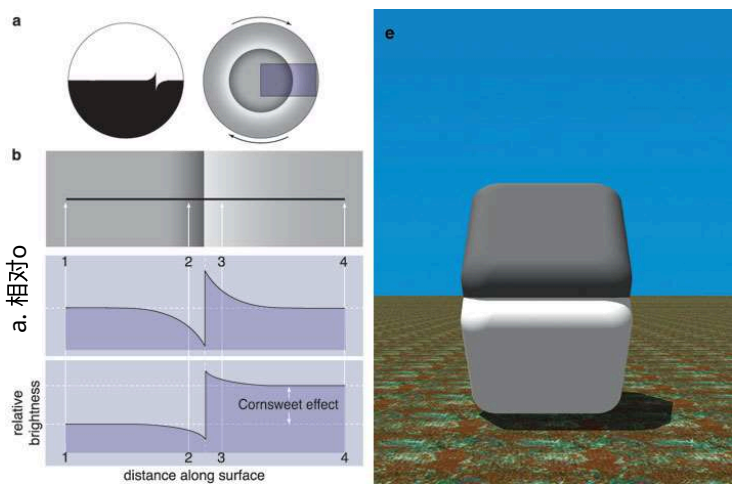
戴尔·珀维希、R. 博·洛托、苏拉吉特·南迪，《我们为何所见即所得》，《美国科学家》，2002年5 - 6月，第90卷，第3期

### 颜色感知：康斯威特效应



戴尔·珀维希、R. 博·洛托、苏拉吉特·南迪，《我们为何所见即所得》，《美国科学家》，第90卷，第3期，2002年5 - 6月

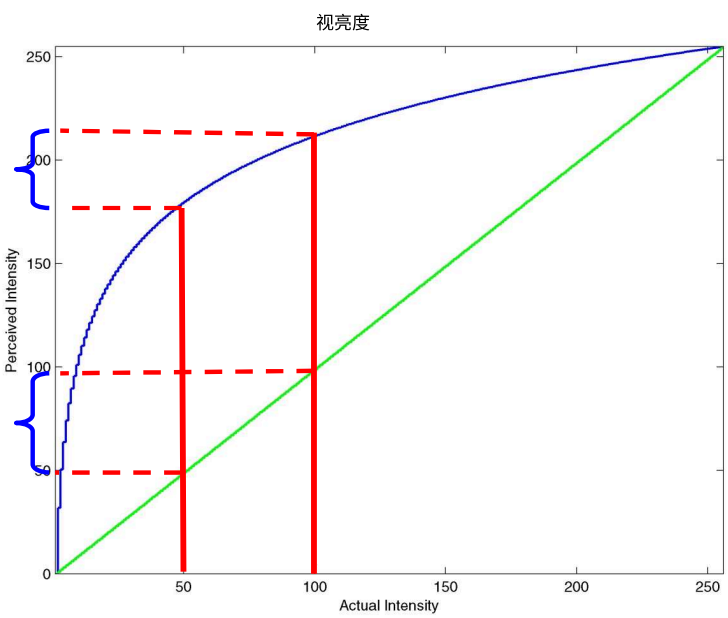
### 颜色感知：康斯威特效应



戴尔·珀维希、R. 博·洛托、苏拉吉特·南迪，《我们为何所见即所得》，《美国科学家》，第90卷，第3期，2002年5 - 6月

### 亮度感知

强度变化的线性斜率被感知为对数关系。



绿色曲线为实际强度；蓝色曲线为感知强度。



1.4 L\*a\*b\*（CIELAB）颜色模型

- 韦伯定律（源自心理学）
  - 某一量的数值越大，要察觉到差异所需的变化量就越大
  - 如果变化的比率相同，那么变化的感知程度大致相同——一种对数近似

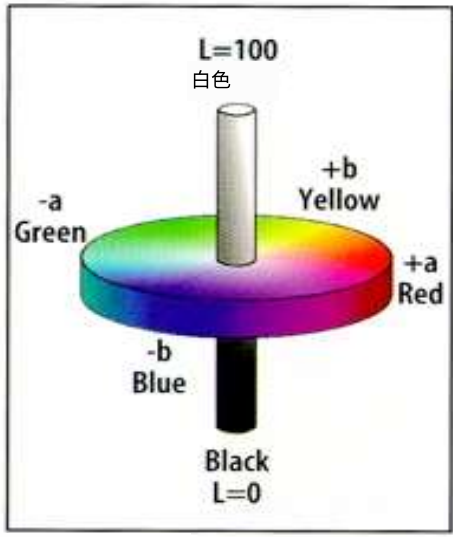
- 50->100, 100%
- 100->150, 50%



1.5 L\*a\*b\*（CIELAB）颜色模型

• 国际照明委员会（CIE）——人类视觉：

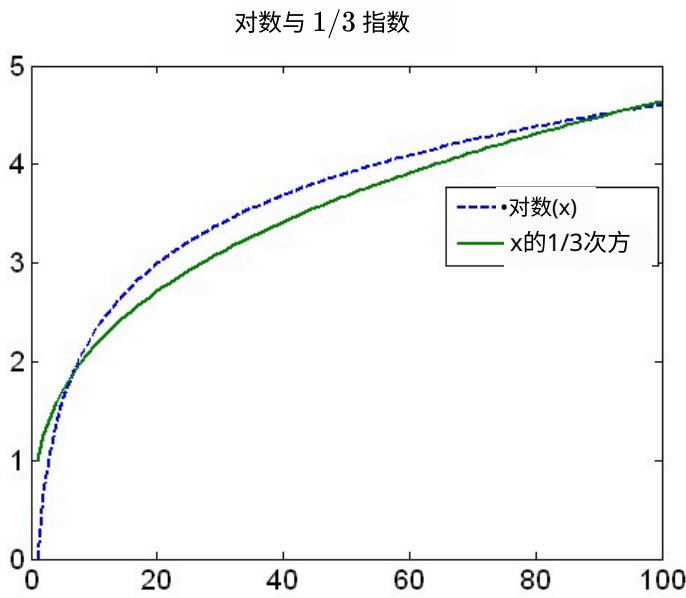
CIELAB空间，也称为L\*a\*b\*  
• 三个值——亮度、彩度和色相  
- 使用1/3 的幂律而非对数



Lab模型

1.3 L\*a\*b\*（CIELAB）颜色模型

- 对数接近 1/3 的幂律



1.3 L\*a\*b\*（CIELAB）颜色模型

- 色差定义为

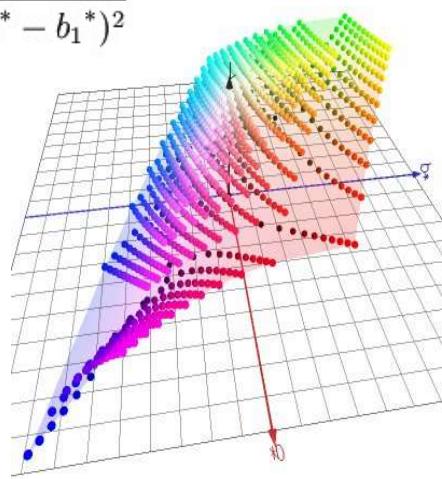
$$\Delta E^*_{ab} = \sqrt{(L_2^* - L_1^*)^2 + (a_2^* - a_1^*)^2 + (b_2^* - b_1^*)^2}$$

其中，

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

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

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

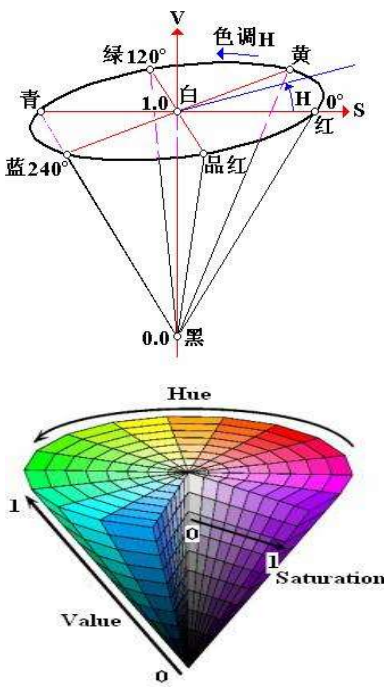


L\*a\*b\* 空间

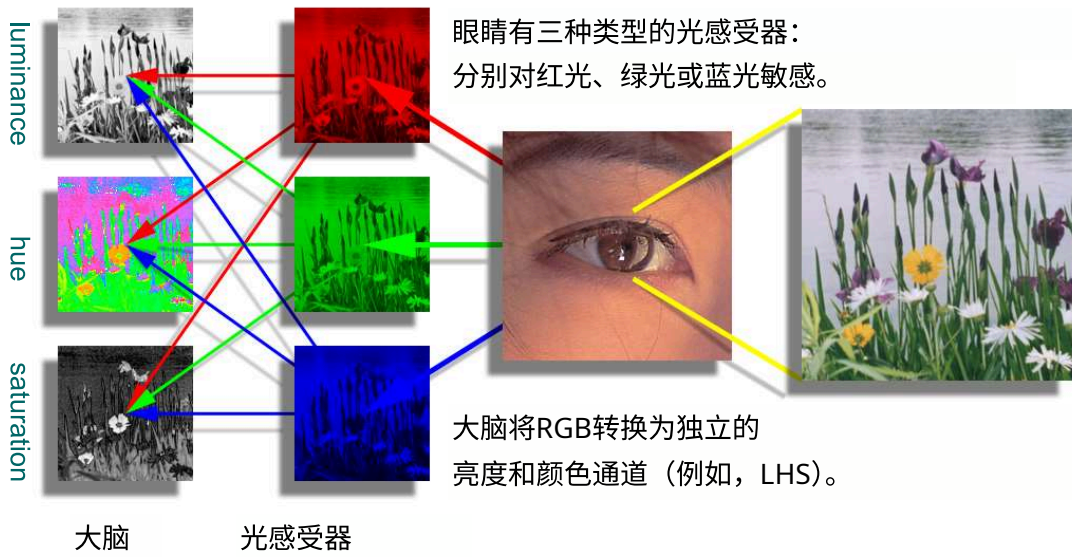
其中Xn、Yn、Zn为白点的XYZ值

1.4 其他颜色模型

- HSL(HSB) - 色相、饱和度，亮度/明度。
- HSV - 色相、饱和度、明度
- HIS - 色调、饱和度和亮度
- HCl - C = 色度
- HVC - V = 明度
- HSD - D = 暗度
- CMY
- ...



1.4 其他颜色模型在大脑中：  
从RGB到LHS

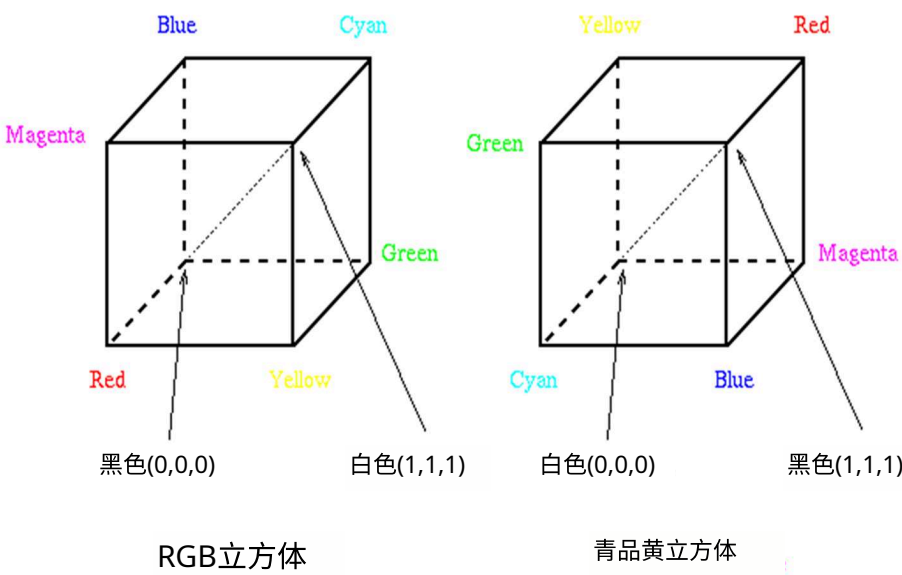


2. 图像中的颜色模型

- 阴极射线管显示器的RGB颜色模型
- CMY颜色模型
- 从RGB到CMY的转换
- CMYK颜色系统

2.1 阴极射线管显示器的RGB模型

- 在帧缓冲区中存储与强度成比例的整数
- 伽马校正

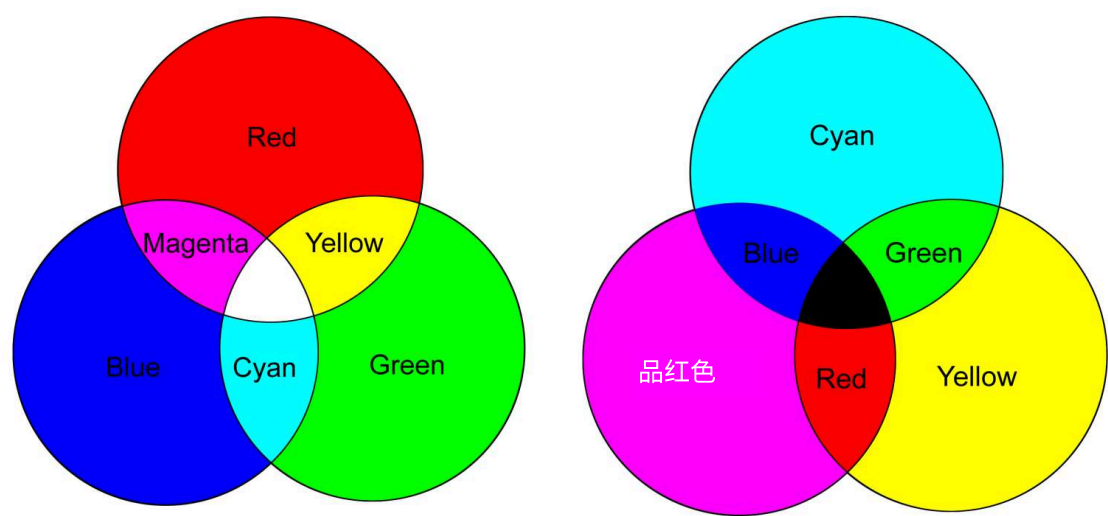


RGB立方体

青品黄立方体



## 2.2 减色法颜色：CMY



加色法和减色法颜色  
RGB 是加色法颜色；CMYK 是减色法颜色

## 2.3 从 RGB 到 CMY 的转换

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

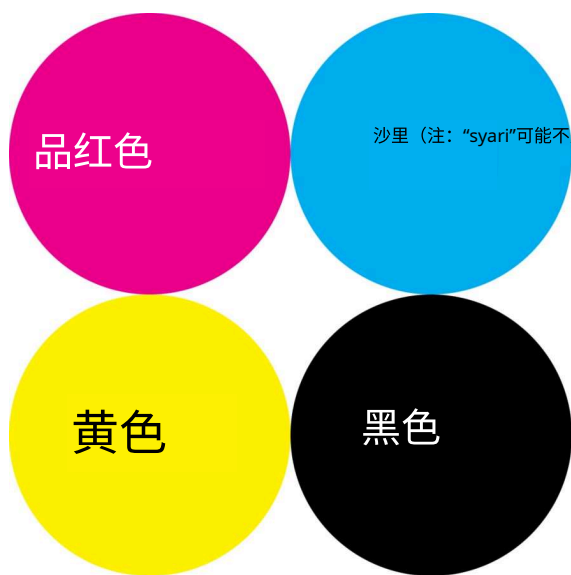
$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} C \\ M \\ Y \end{bmatrix}$$

逆变换

## 2.4 颜色去除：CMYK

$$K \equiv \min\{C, M, Y\}$$

$$\begin{bmatrix} C \\ M \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C - K \\ M - K \\ Y - K \end{bmatrix}$$



CMYK系统通过添加K分量来获得“真正的”黑色

## 3. 视频中的颜色模型

- YUV 颜色模型
- YIQ 颜色模型
- YCbCr 颜色模型

## 3. 视频中的颜色模型

### •视频颜色转换

- (a) 主要源自早期为电视编码颜色的模拟方法。亮度与颜色信息是分离的。
- (b) 例如，一种类似于公式 (4.9) 的矩阵变换方法，称为 YIQ，用于在北美和日本传输电视信号。
- (c) 在欧洲，录像带使用 PAL 或 SECAM 编码，这些编码基于采用名为 YUV 的矩阵变换的电视。
- (d) 最后，数字视频大多使用一种名为 YCbCr 的矩阵变换，它与 YUV 密切相关

## 3.1 YUV 颜色模型

- YUV - 用于 PAL 模拟视频，也是数字视频的 CCIR601 标准
- $Y = 0.299R + 0.587G + 0.114B$
- 色度定义为：
$$\begin{aligned} U &= B - Y \\ V &= R - Y \end{aligned}$$
- $U = V = 0$ . 无色度!

## 3.1 YUV颜色模型

### •经过伽马校正后 (R', G', B')

$$U = B' - Y'$$

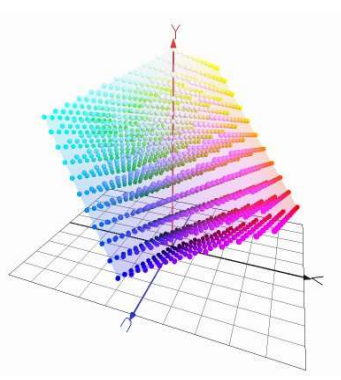
$$V = R' - Y'$$

$$\begin{bmatrix} Y' \\ U \\ V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.299 & 0.587 & 0.144 \\ -0.299 & -0.587 & 0.886 \\ 0.701 & -0.587 & -0.114 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R' \\ G' \\ B' \end{bmatrix}$$

### •在PAL制应用中

$$U = 0.492 (B' - Y')$$

$$V = 0.877 (R' - Y')$$



YUV空间

## 3.1 YUV颜色模型

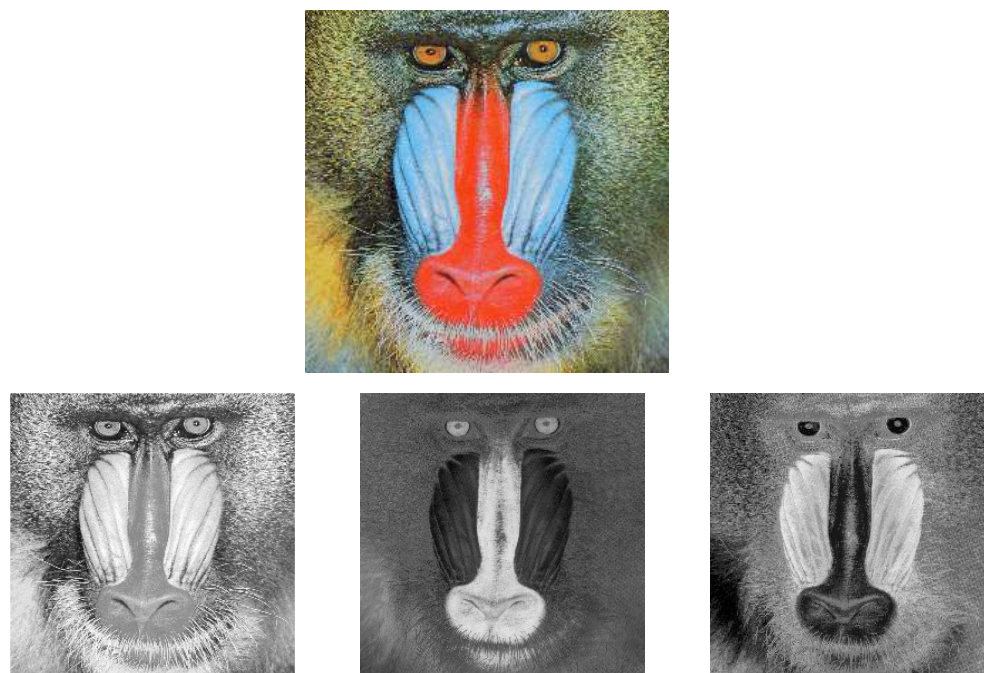


图4.18：彩色图像的Y'UV分解。顶部图像 (a) 是原始彩色图像；(b) 是 Y'；(c, d) 是 (U, V)

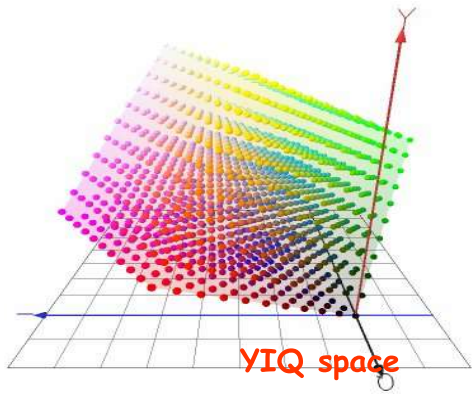


### 3.2 YIQ颜色模型

- YIQ——用于NTSC制彩色电视广播
  - 适配黑白电视（仅使用Y）
- U和V未体现人类视觉敏感度的高低层次
  - NTSC制中使用I和Q，而非U、V。
- I——橙 - 蓝，Q——紫 - 绿
  - 我和 Q 是通过将 R - Y 和 B - Y 旋转33 ° 得到的。
$$I = 0.877(R - Y) \cos 33 - 0.492(B - Y) \sin 33$$
$$Q = 0.877(R - Y) \sin 33 + 0.492(B - Y) \cos 33$$

### 3.2 YIQ颜色模型

- 得出以下方程：
$$-I = 0.736(R - Y) - 0.268(B - Y) = 0.596R - 0.275G - 0.321B$$
$$-Q = 0.478(R - Y) + 0.413(B - Y) = 0.212R - 0.523G + 0.311B$$
- 对 Y 最敏感，其次是I，对 Q 最不敏感
- 在NTSC广播中，各分量的带宽如下：
  - 4.2兆赫兹分配给 Y
  - 1.5兆赫兹分配给I -
  - 0.55兆赫兹分配给Q



### 3.2 YIQ色彩模型

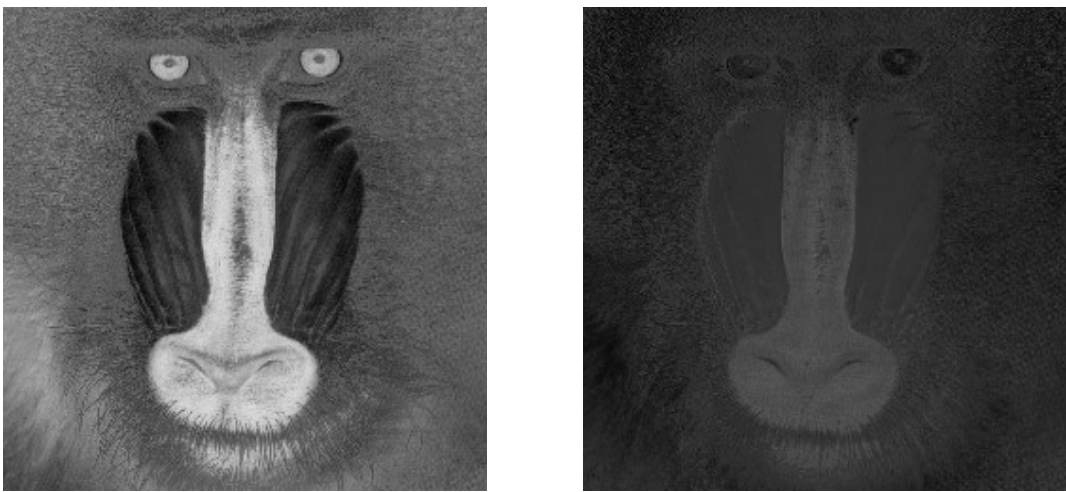


图4.19：彩色图像的 I 和 Q 分量。

### 3.3 YCbCr色彩模型

- YCbCr - 国际电信联盟无线电通信部门（ITU - R）BT.601 - 4标准
  - YCbCr模型与YUV密切相关
    - $C_b = (B - Y)/1.772 + 0.5$
    - $C_r = (R - Y)/1.402 + 0.5$
- $$\begin{bmatrix} Y' \\ C_b \\ C_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.299 & 0.587 & 0.114 \\ -0.168736 & -0.331264 & 0.5 \\ 0.5 & -0.418688 & -0.081312 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R' \\ G' \\ B' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0.5 \\ 0.5 \end{bmatrix}$$
- YCbCr广泛应用于JPEG图像压缩和MPEG视频压缩。

结束

谢谢！

邮箱：junx@cs.zju.edu.cn