

2018-2019年度第二学期 00106501

# 计算机图形学



童伟华 管理科研楼1205室

E-mail: [tongwh@ustc.edu.cn](mailto:tongwh@ustc.edu.cn)

中国科学技术大学 数学科学学院

<http://math.ustc.edu.cn/>





## 第四节 显示中的问题

# 人类视觉系统



- 可见光是电磁波谱的一部分，波长介于350 - 750 nm
- 颜色 $C(\lambda)$ 就是介于这个范围内的能量分布
- 在人类的视觉系统中，视网膜上有三种类型的锥形感光细胞，每种具有自己的波谱感应性
- 从而人脑只能“看”到三种值，称为三种刺激 (tristimulus)

# 三值

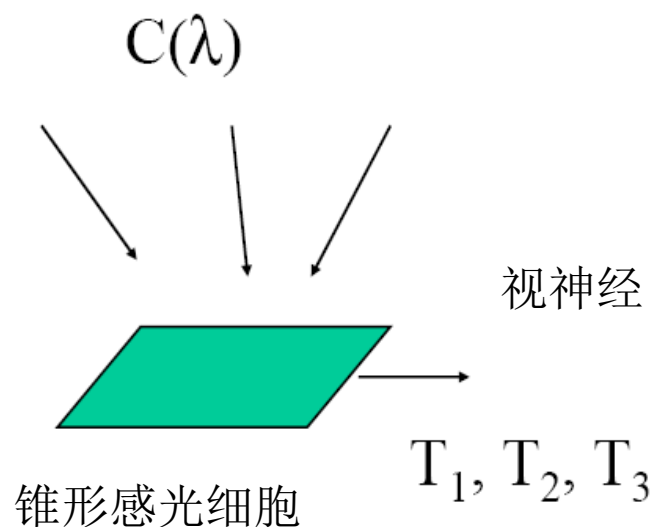


- 人类的视觉中心具有三种锥形感光细胞，它们的感应曲线记为  $S_1(\lambda)$ ,  $S_2(\lambda)$  和  $S_3(\lambda)$
- 对于颜色  $C(\lambda)$ ，锥形细胞输入的三值为

$$T_1 = \int S_1(\lambda) C(\lambda) d\lambda$$

$$T_2 = \int S_2(\lambda) C(\lambda) d\lambda$$

$$T_3 = \int S_3(\lambda) C(\lambda) d\lambda$$



# 三色理论



- 对于任两种颜色，如果它们具有相同的三值，那么看起来就是一样的
- 因此显示设备（CRT、LCD、胶卷）只需要生成正确的三值就可以匹配一种颜色
- 这可能做到吗？不一定
  - 在不同的系统中有不同的原色（不同的感应曲线）

# 问题

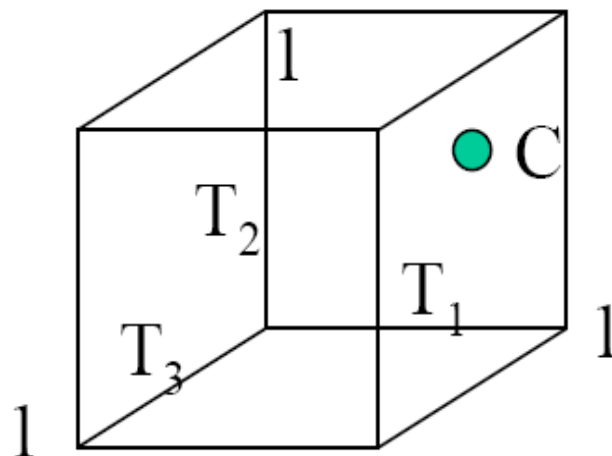


- 人类的感应曲线与物理设备的感应曲线不同
- 人类：曲线的中心在蓝、绿、黄绿
- CRT：RGB
- 彩色打印：CMY或者CMYK
- 那么我们匹配的是哪一种颜色呢？如果不同匹配，那么最接近的颜色是什么呢？

# 颜色的表示



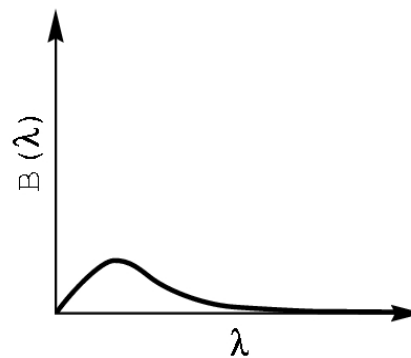
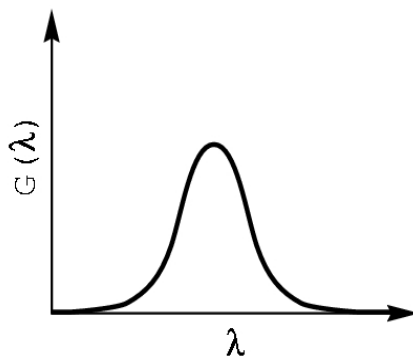
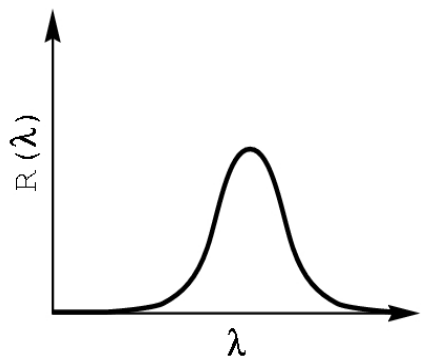
- 考虑颜色  $C(\lambda)$
- 它生成三值  $T_1, T_2, T_3$ 
  - 记为  $C = (T_1, T_2, T_3)$
  - 为了方便, 假定  $0 \leq T_1, T_2, T_3 \leq 1$ , 因为总是有一个我们能感觉到的最大亮度, 而且能量总是非负的
  - $C$  就是颜色立方体中的一点



# 颜色的生成



- 考虑CRT显示设备，它采用RGB体系，感应曲线为



- 三值：

$$T_1 = \int R(\lambda)C(\lambda)d\lambda$$

$$T_2 = \int G(\lambda)C(\lambda)d\lambda$$

$$T_3 = \int B(\lambda)C(\lambda)d\lambda$$



# 匹配



- 这个 $T_1, T_2, T_3$ 值与特定的设备有关
- 如果使用另外的设备，那么就会得到不同的值，这些值与人类锥形感光细胞得到的值不一样
- 因此我们需要找到匹配的方法，以及规范化的方法

## ■ 不同的颜色系统在实际中的应用

- 基于不同的原色

- NTSC RGB
- UVW
- CMYK
- HLS

- 理论

- XYZ

## ■ 倾向于把亮度与颜色（色度）信息分开

- 简化为二维情形

# 三值坐标



■ 对于任何的原色体系，定义

$$t_1 = \frac{T_1}{T_1 + T_2 + T_3}$$

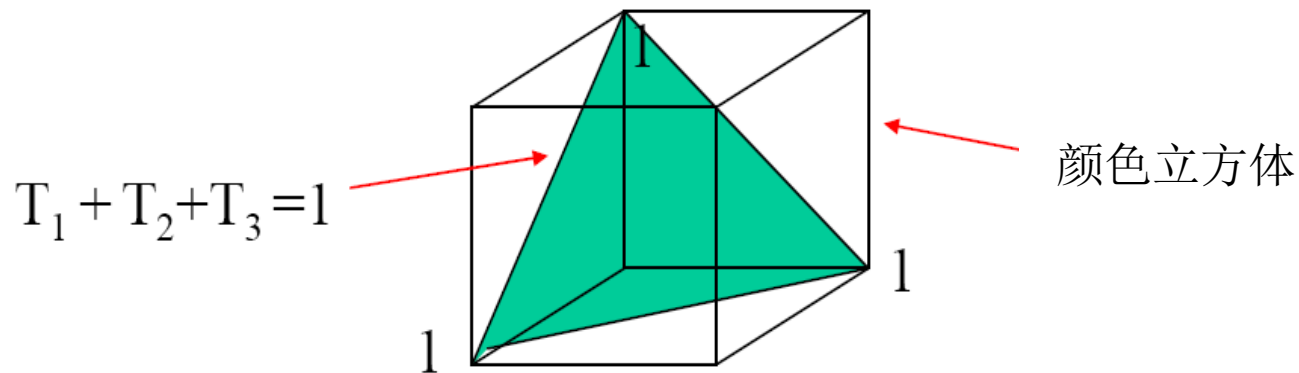
$$t_2 = \frac{T_2}{T_1 + T_2 + T_3}$$

$$t_3 = \frac{T_3}{T_1 + T_2 + T_3}$$

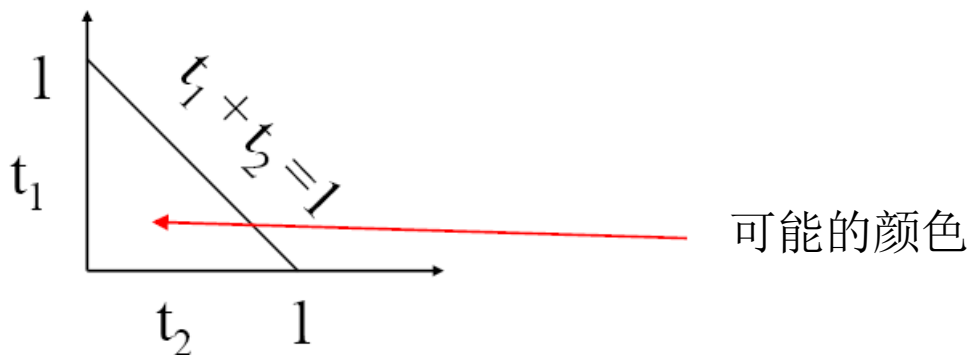
$$t_1 + t_2 + t_3 = 1$$

$$0 \leq t_1, t_2, t_3 \leq 1$$

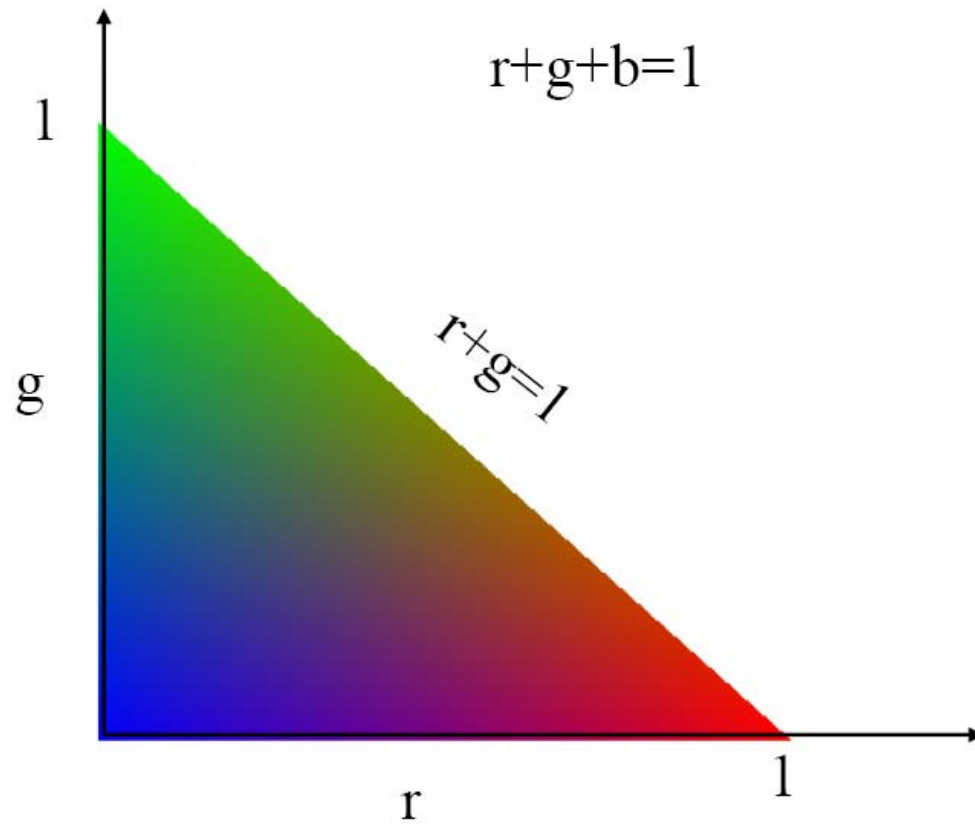
# Maxwell 三角形



## ■ 投影到二维：色度空间 (chromaticity space)



# NTSC RGB

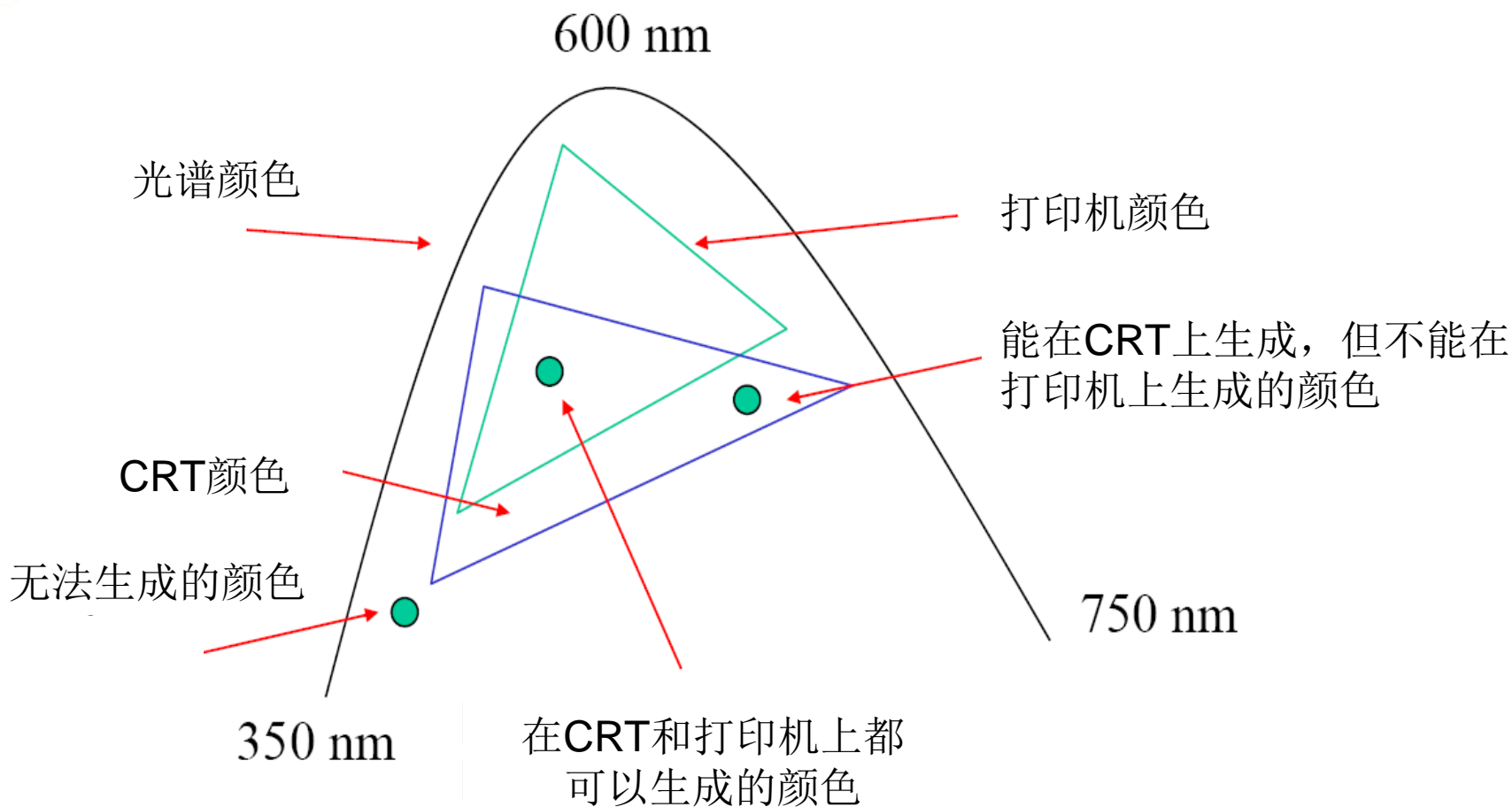


# 生成其它颜色

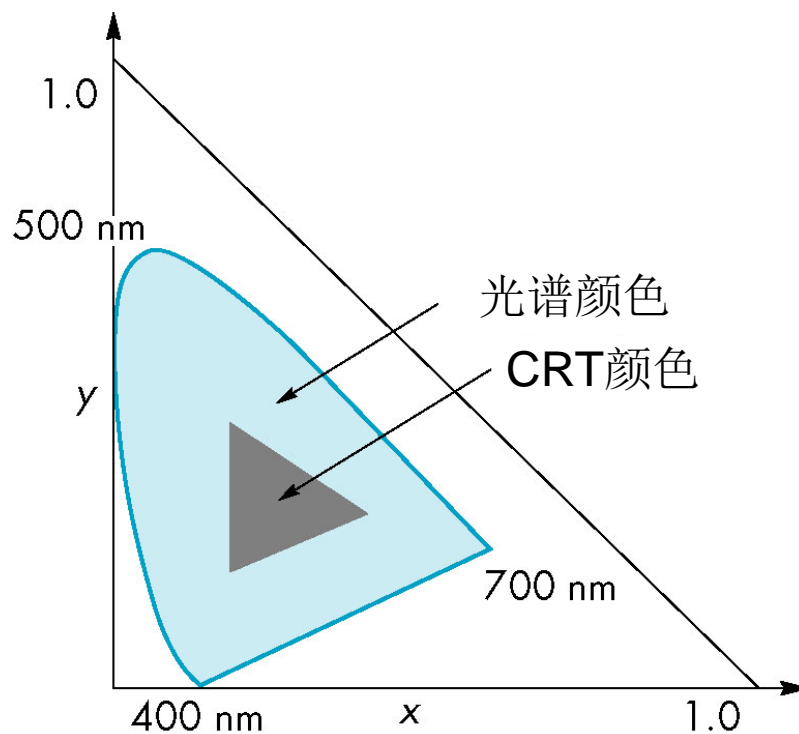


- 在一个系统中可以生成的颜色并不一定能在其它的系统中生成
- 如果我们可以生成在350 - 750nm之间所有的纯光谱颜色，那么通过光谱颜色的叠加就可以生成所有其它的颜色
- 在实际的系统（CRT，胶卷）中，不可能生成所有的纯光谱颜色
- 可以通过把每个系统中的颜色立方体投影到（某个系统的）色度空间中，从而分析可以逼近的程度

# 颜色范围 (gamuts)



- 在这个系统中所有的可见纯光谱颜色都可以生成
- 一个理论上的系统，不对应于任何物理原色
- 标准的参考系统





## ■ 最接近真实原色的系统

- National Television Systems Committee (NTSC) RGB与CRT中荧光 (phosphors) 匹配

## ■ 胶卷:

- 正片 - 加色 (RGB)
- 底片 - 减色 (CMY)

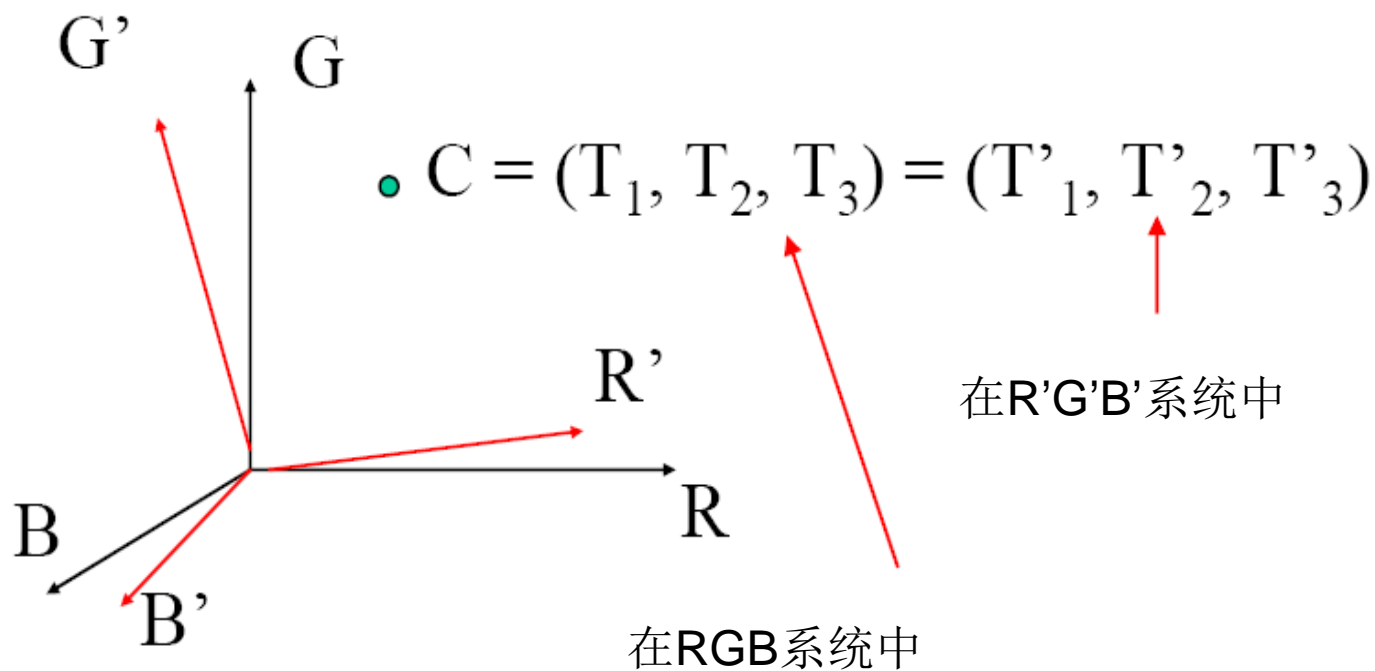
## ■ 彩色打印行业采用CMYK (K = 黑色)

- K用来生成最高深度的黑色
- 例如: 打印机墨盒

# 颜色变换



- 每个加色体系是另外一种加色体系的线性变换



# RGB, CMY, CMYK



- 假设1是一种原色的最大值

$$C = 1 - R \quad M = 1 - G \quad Y = 1 - B$$

- 把CMY转化为CMYK

$$K = \min(C, M, Y)$$

$$C' = C - K$$

$$M' = M - K$$

$$Y' = Y - K$$

# 颜色矩阵



- 存在 $3 \times 3$ 矩阵把颜色从一个系统中的表示转变为另一个系统中的表示

$$\begin{bmatrix} T'_1 \\ T'_2 \\ T'_3 \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \end{bmatrix}$$

- 例如：从XYZ到NTSC RGB
  - 在色度参考系中计算
- 在XYZ中取一种颜色，检验变换后能否显示出来，然后再检验结果的三值是否在(0,1)内

## ■ NTSC传输颜色

### ■ Y表示亮度

- 来自于在TV信号中把亮度与色度信息分开的需要

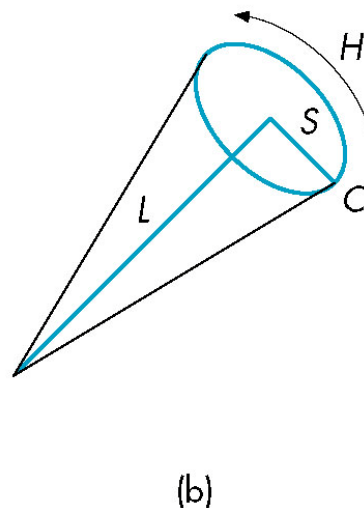
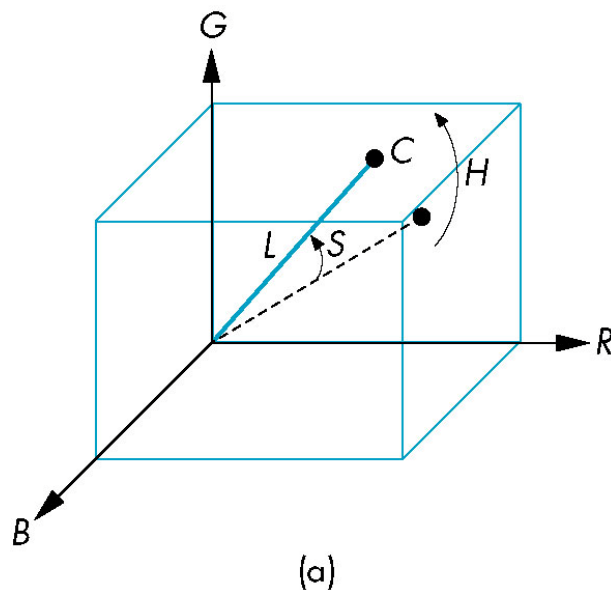
$$\begin{bmatrix} Y \\ I \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.299 & 0.587 & 0.114 \\ 0.596 & -0.275 & -0.321 \\ 0.212 & -0.523 & 0.311 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}$$

### ■ 注意亮度显示了对绿色的高度敏感性

# 其它的颜色系统



- UVW: 对于相同的视觉误差具有相同的数值误差
- HLS: 感觉颜色 (Hue, Lightness, Saturation)
  - 颜色空间的极坐标表示



- 强度与CRT电压之间的关系是非线性的
  - $I = c V^\gamma$
- 可以应用查找表进行校正
- 人类的亮度反映是对数形的
  - 在灰度层次上相同的间隔得到的反应差不是均匀的
  - 也可以应用查找表进行校正
- CRT不能生成完全的黑色
  - 限制了对比度

# 抖动 (Dithering) 输出技术



- 问题：显示设备的灰度级或色彩精度不高时怎么办？
- 解决方法：以空间分辨率为代价换取灰度级或彩色的精度
- 半色调 (Halftoning) 输出技术：
  - 利用摄影术中的方法来模拟灰度级，采用的方法是创建大小变化的黑色原点图案
  - 原理：人的视觉系统具有把小圆点聚集起来的集成特性，因此人眼看到的不是孤立的小圆点，而是一个小区域内的像素的平均灰度，它正比于其中黑色像素与小区域内所有像素的比值
  - 应用：黑白报纸中的图片
- OpenGL 中：
  - `glEnable(GL_DITHER);`





Thanks for your attention!

