

更高质量的成像

课程3-色彩理论及应用





课程资料来源及致谢



15-463, 15-663, 15-862 Computational Photography, Fall 2021

Time: Mondays, Wednesdays 11:50 am - 1:10 pm ET
Location: GHC 4303
Instructor: Ioannis (Yannis) Gkioulekas
Teaching Assistants: Alice Lai, Jenny Lin

许多图表引自2021年CMU计算摄影学课程讲义，因排版原因此后不再注明，感谢CMU及Ioannis教授的开源精神，课程链接：http://graphics.cs.cmu.edu/courses/15-463/2021_fall/

一些图像引自相关参考文献，在此讲义最后列出了参考阅读文献



思考作业1中关于颜色校正的要求

2 颜色校正和白平衡 (20分)

对于这部分，你将使用在第1部分末尾选择的HDR图像。如图2左侧所示，你的色调映射图像在房间的暗部分往往会呈现出橙色调。这是因为房间内的非常低的光线和房间外光线的大对比度使得相机的自动白平衡失效。此外，即使白平衡工作得很完美，我们对各种图像合成所处的颜色空间也没有非常小心。

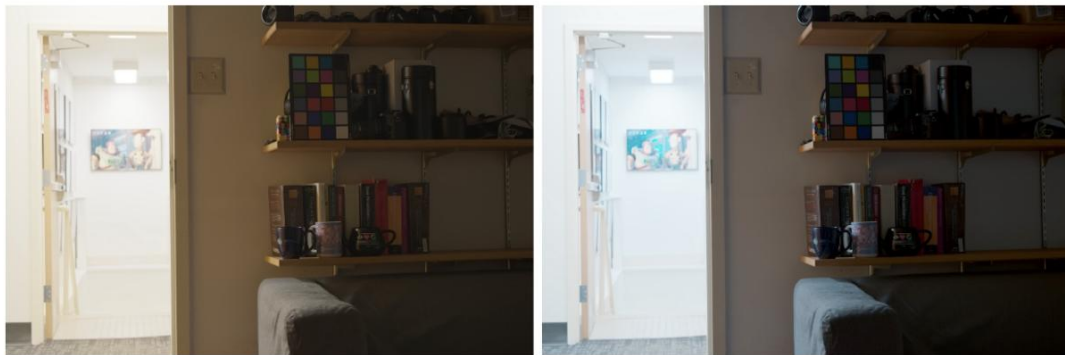


图2：未经颜色校正（左）和经过颜色校正（右）的色调映射HDR图像。

你可以应用我们在计算摄影学课程第1季《从光线到图像-相机成像的原理》中讨论的任何自动白平衡算法来改善这个问题。但是，由于图像中包含一个色卡（图3），我们可以做得更好，进行更准确的颜色校正。

问题：如何进行准确的颜色校正？颜色校正的内在涵义是什么？



思考Photoshop拾色器中多种颜色格式的意义？




问题：HSB、Lab、RGB、CMYK，都是什么意思？

颜色是计算摄影中非常重要的知识
我们将用一整节课来打好基础




目录

 1. 色彩基础知识


 2. 视网膜颜色空间

 3. 颜色匹配

 4. 线性颜色空间

 5. 色度


 6. 颜色校正

 7. 非线性颜色空间

 8. 颜色重建思考



目录

 1. 色彩基础知识

 2. 视网膜颜色空间

 3. 颜色匹配

 4. 线性颜色空间

 5. 色度

 6. 颜色校正

 7. 非线性颜色空间

 8. 颜色重建思考

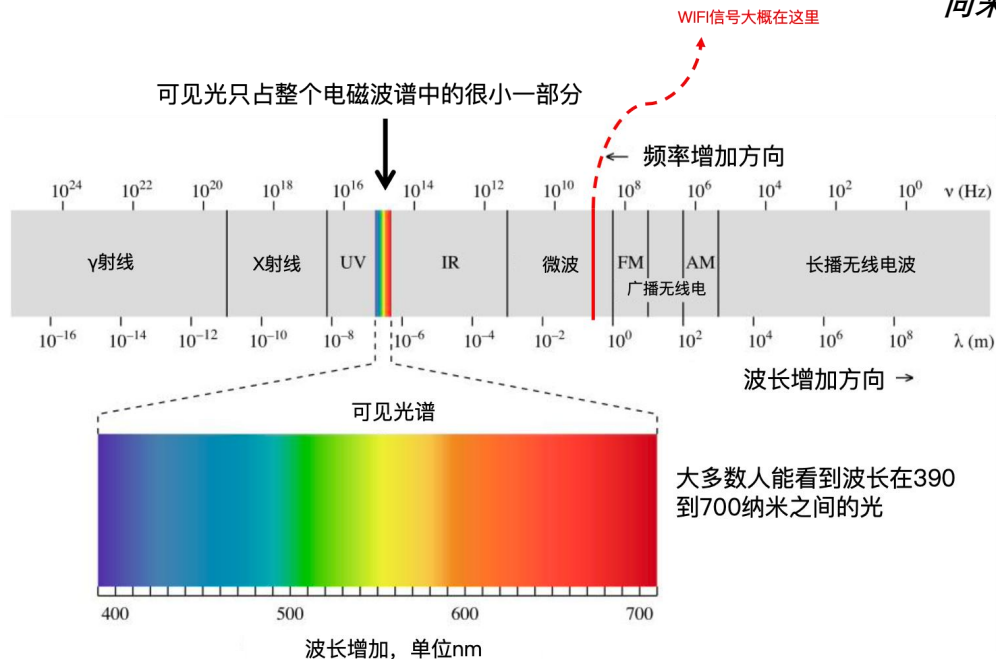


颜色是人类对进入人眼的光的感知之产物

“颜色”不是光（电磁辐射）的客观物理属性，波长才是

“正确地说，光线不是有色的；在它们里面，没有别的什么，只有某种力量和倾向来激起对这种或那种颜色的感觉。”

——艾萨克·牛顿



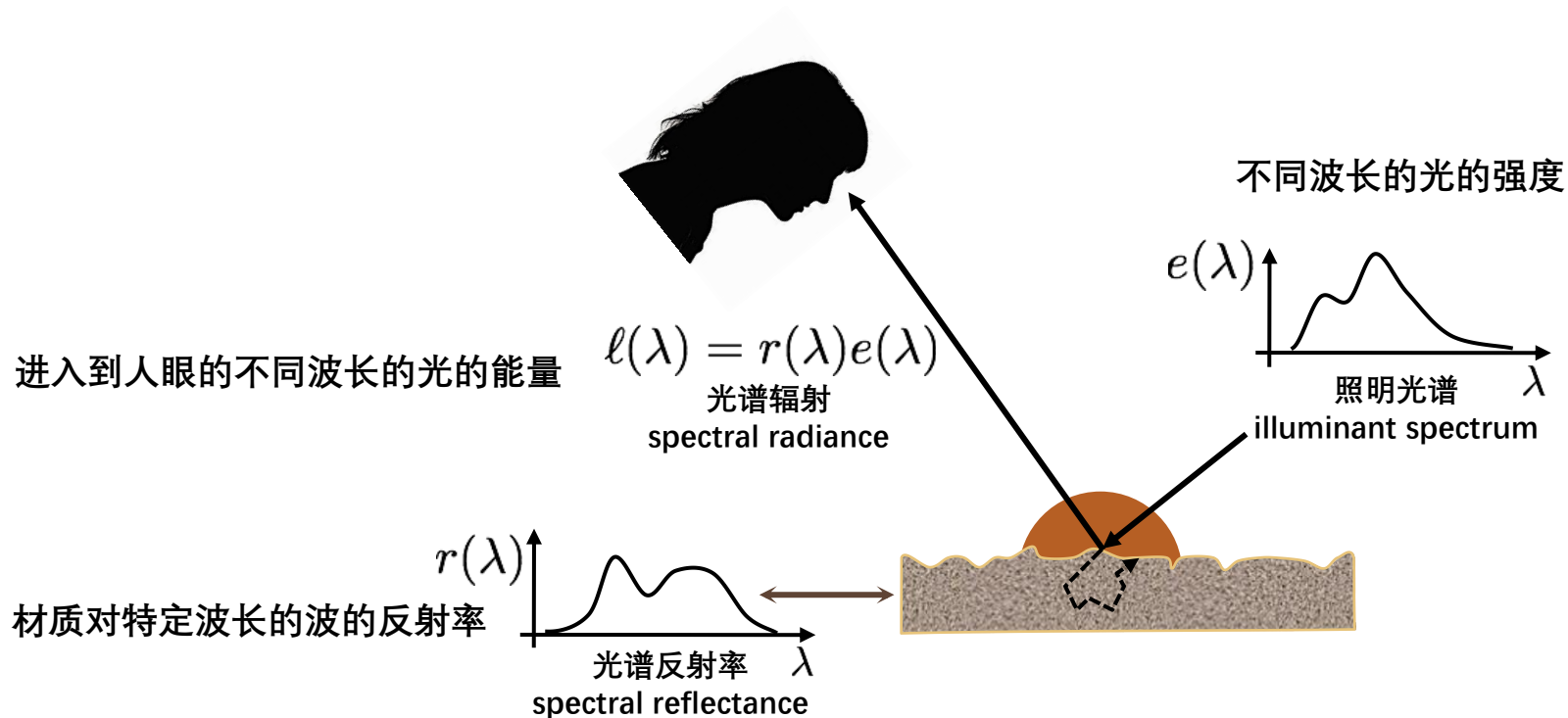
电磁波谱

我们所说的“颜色”是我们主观感知电磁波谱中很小一个范围的感觉

参考第一季课程《从光线到图像-相机成像的原理》第4课《图像传感器与ISP》

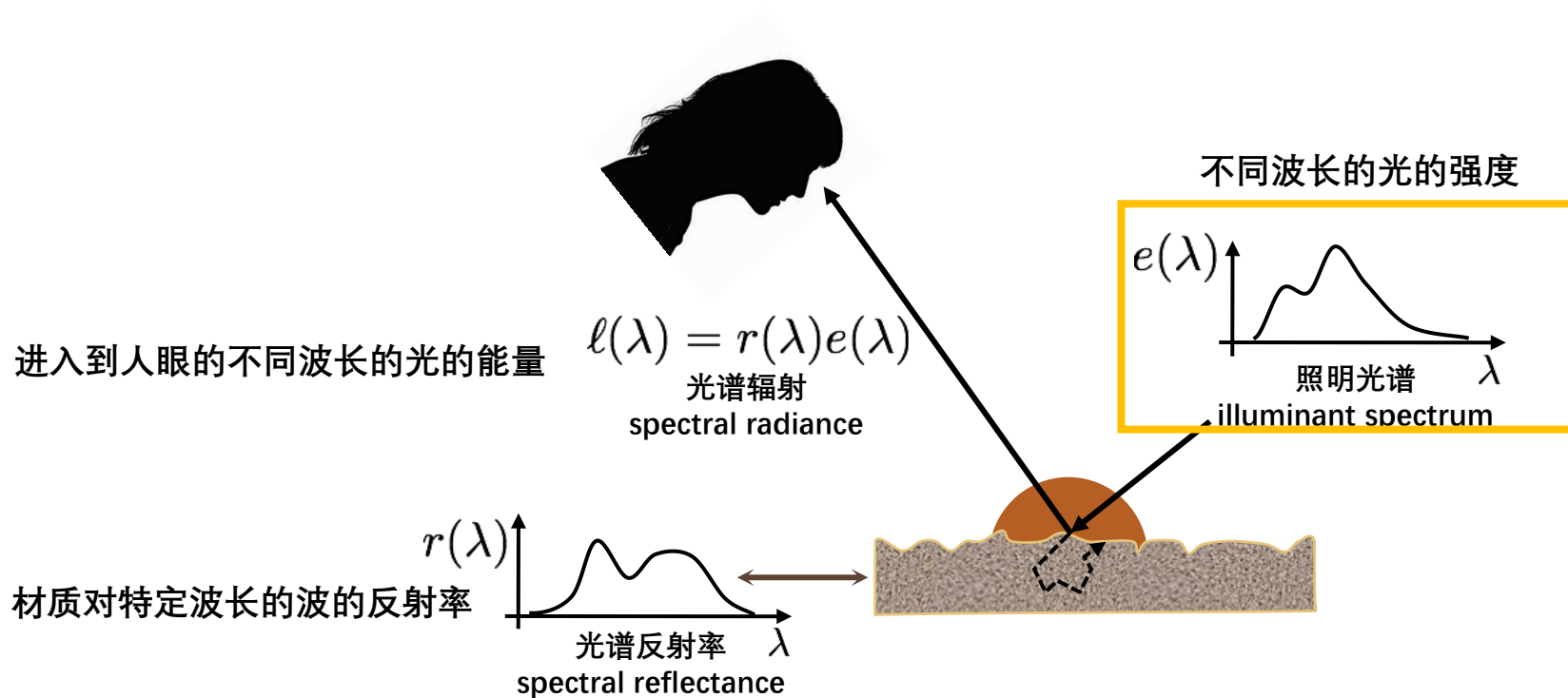


进入人眼的光是由光源以及被照明的物体的反射共同作用的结果





不同的光源有不同的光谱功率分布



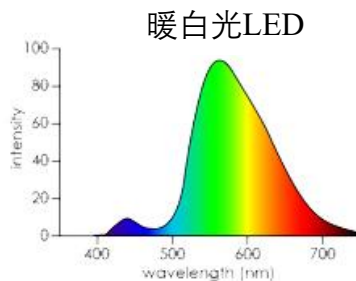
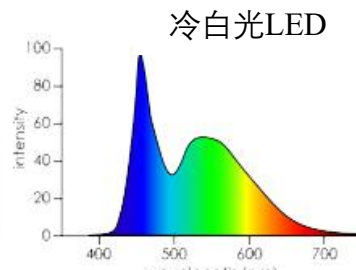
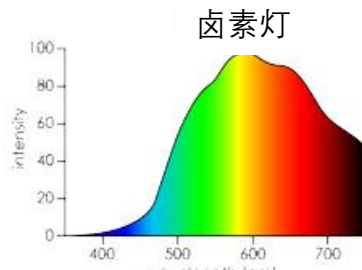
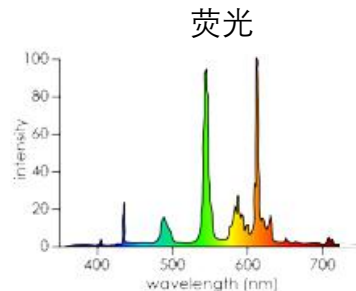
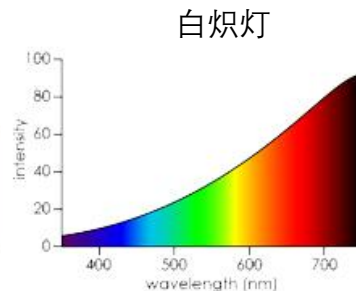
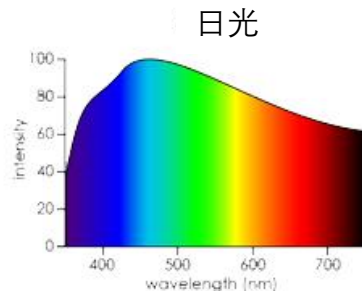


光谱功率分布 (Spectral Power Distribution - SPD)

- 大多数类型的光由多种波长的光组成
- 我们可以根据不同波长上的功率分布来描述光



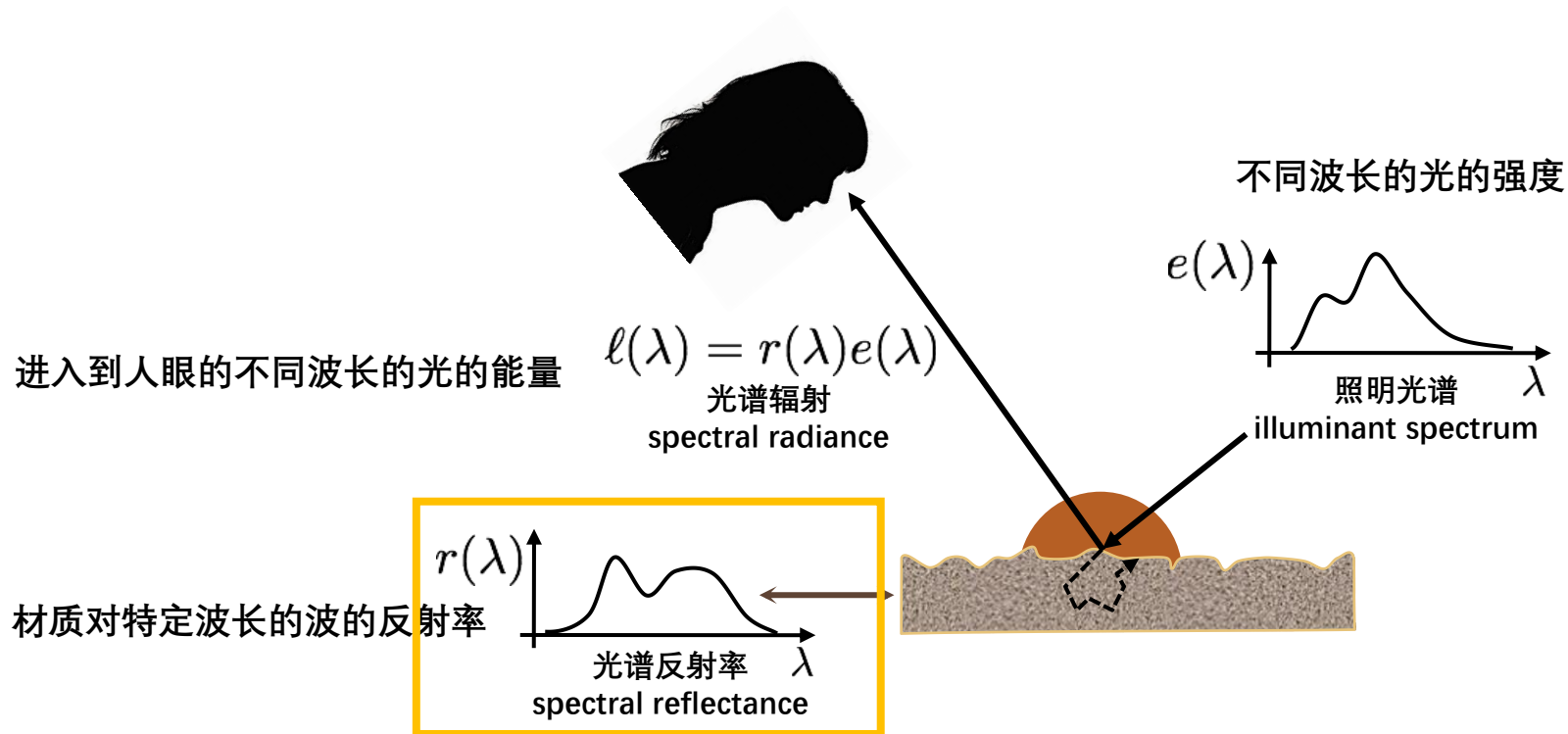
我们对所有这些分布的感觉都视为“白色”



参考第一季课程《从光线到图像-相机成像的原理》第4课《图像传感器与ISP》



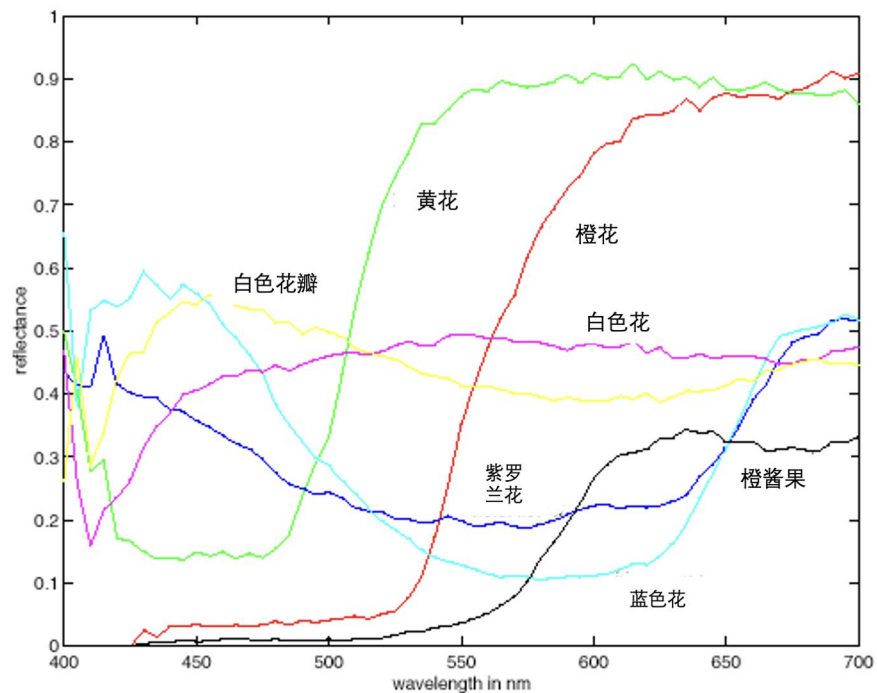
不同的材质对不同波长的光的反射率不同





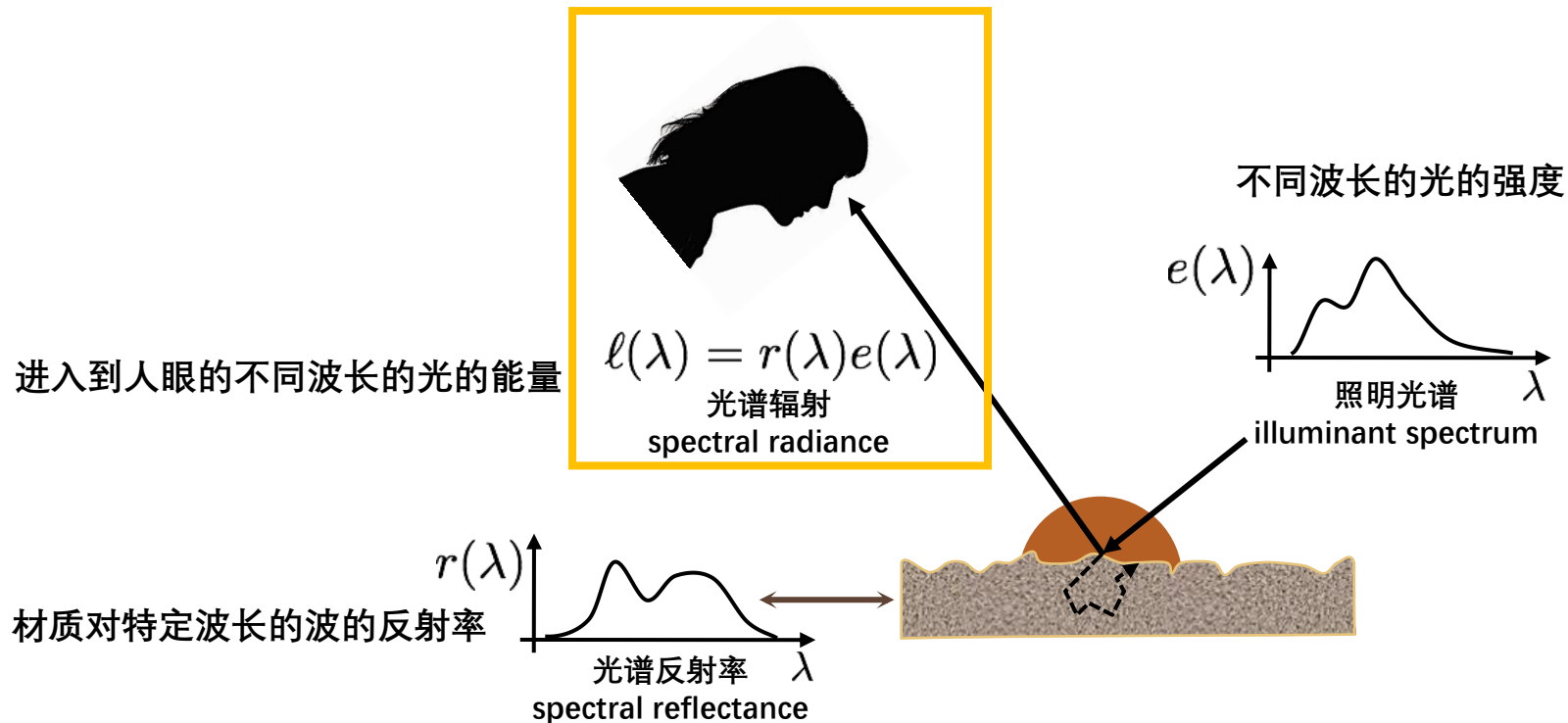
光谱反射率(Spectral Reflectance)

- 大多数材料对不同波长的光的吸收和反射不同,
- 光谱反射率(Spectral Reflectance)是不同波长上反射光与入射光的比率。





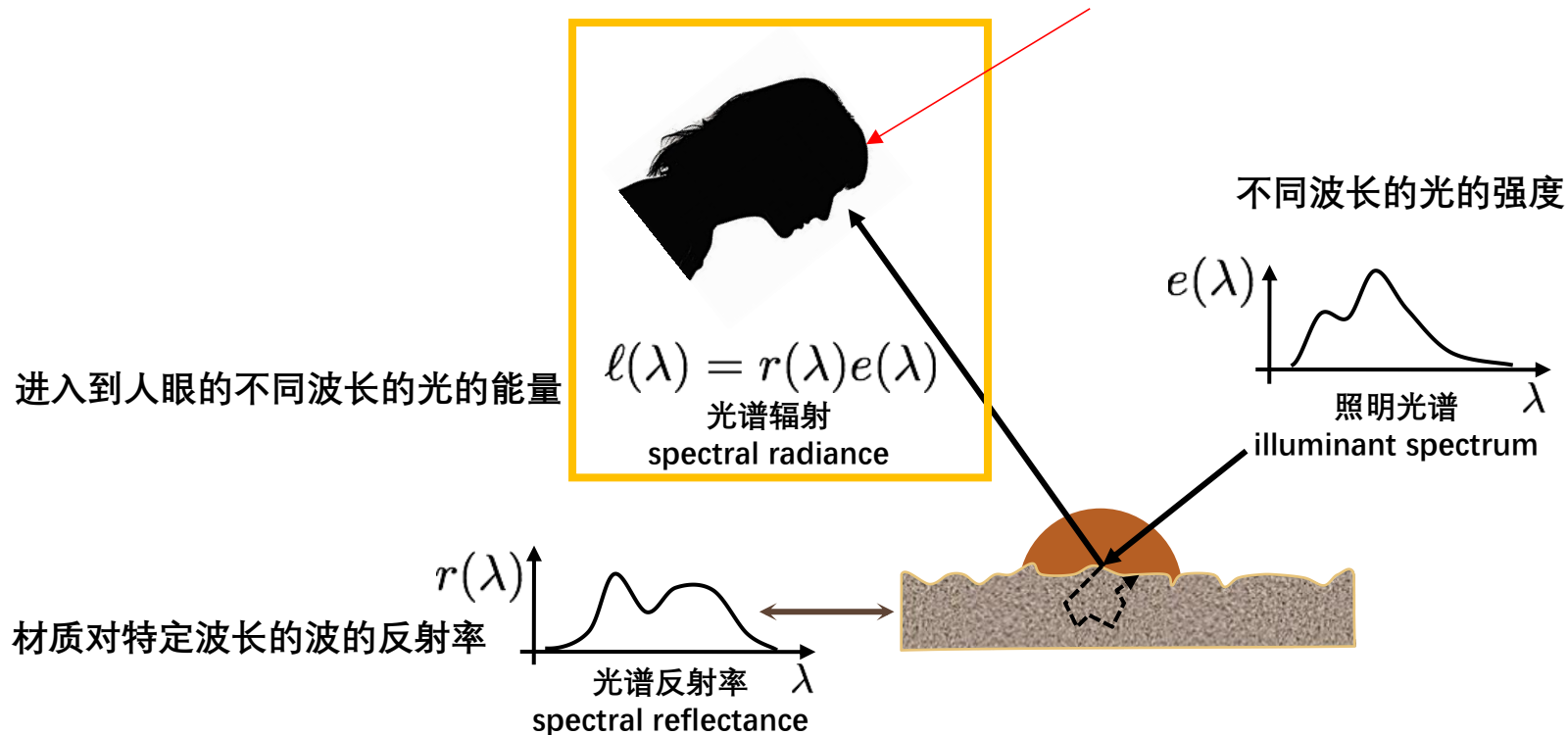
进入人眼的光是由光源以及被照明的物体的反射共同作用的结果





进入人眼的光是由光源以及被照明的物体的反射共同作用的结果

人眼对不同波长的光具有不同的响应
这种不同由光谱灵敏度函数来量化





光谱灵敏度函数 (Spectral Sensitivity Function - SSF)

- 任何光传感器（数字或非数字，包括人眼）对不同波长都有不同的灵敏度。
- 这是通过传感器的光谱灵敏度函数来描述的 $f(\lambda)$
- 当测量某个 SPD为 $l(\lambda)$ 的光时，传感器会产生标量响应

传感器的标量响应 \longrightarrow

$$R = \int_{\lambda} \overset{\substack{\text{光的 SPD} \\ \downarrow}}{l(\lambda)} \overset{\substack{\text{传感器的SSF} \\ \swarrow}}{f(\lambda)} d\lambda$$

光的SPD的加权组合：在传感器灵敏度较高的波长上光的贡献更大

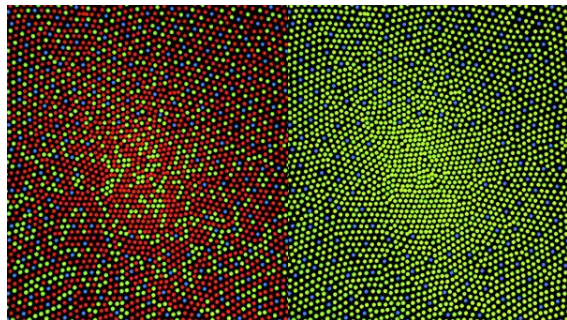


人眼的光谱灵敏度函数

- 人眼包含所谓视锥细胞的光传感器的集合
- 有三类具有不同光谱灵敏度的视锥细胞
- 所以人类的颜色感知是三维的（三原色）

$k_s(\lambda), k_m(\lambda), k_l(\lambda)$: 人眼的光谱灵敏度函数
 $l(\lambda)$: 经过材质反射到人眼的光谱辐射
 c_s, c_m, c_l : 视网膜感光细胞的响应, 即视网膜颜色

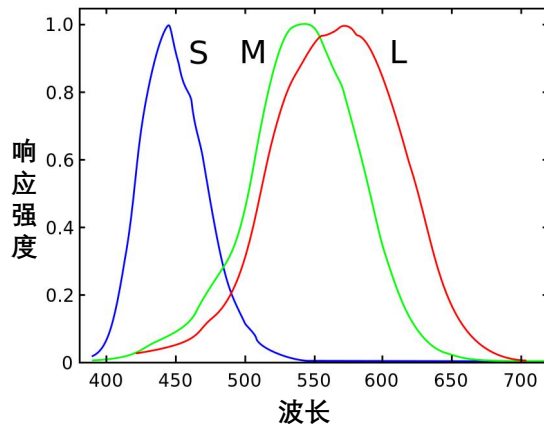
正常视力人眼的视锥细胞分布(64% L, 32% M)



“短S”
$$c_s = \int_{\lambda} l(\lambda) k_s(\lambda) d\lambda$$

“中M”
$$c_m = \int_{\lambda} l(\lambda) k_m(\lambda) d\lambda$$

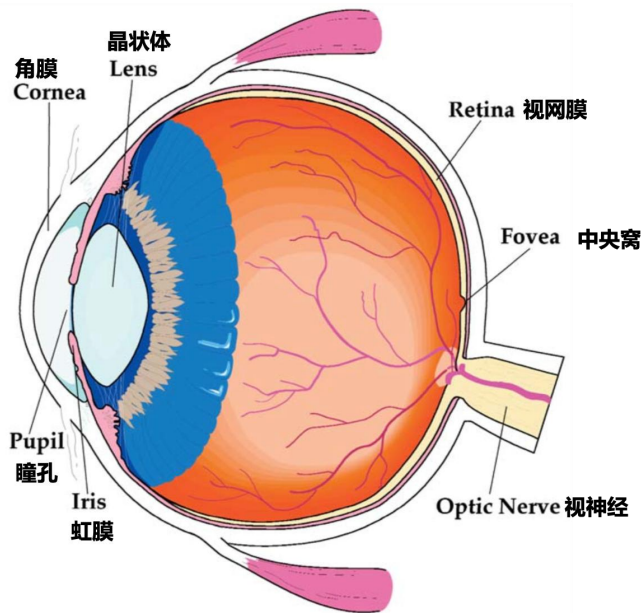
“长L”
$$c_l = \int_{\lambda} l(\lambda) k_l(\lambda) d\lambda$$



参考第一季课程《从光线到图像-相机成像的原理》第4课《图像传感器与ISP》



阅读资料-人眼结构

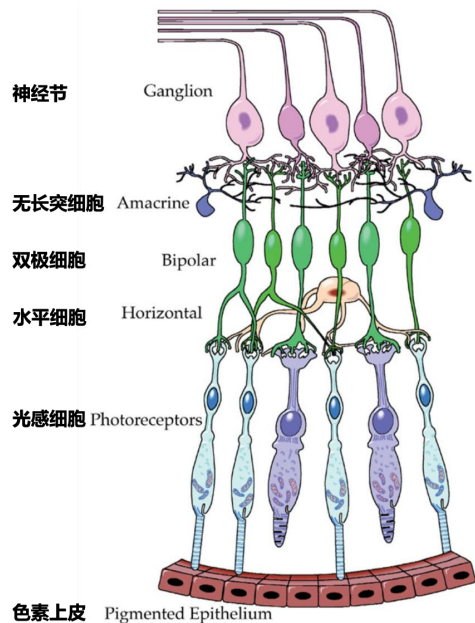


- 1.视网膜的角色：视网膜是人眼视觉系统中的关键部分
- 2.光感细胞数量：视网膜包含大约1.3亿个光感细胞,负责收集光信号
- 3.视神经纤维的作用：大约一百万根视神经纤维携带采集的光信号
- 4.信息传递的高度压缩：光信号被高度压缩，人们不完全理解其机制

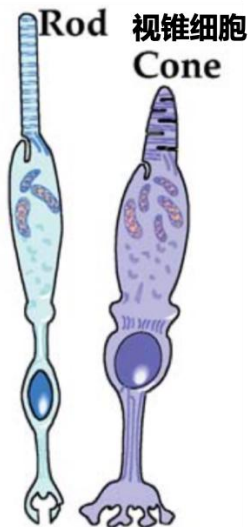
参考知乎专栏文章[23. 颜色知识1-人类的视觉系统与颜色](#)



阅读资料-人眼结构



视杆细胞



1.光感细胞的两种类型：存在两种光感细胞——视杆细胞和视锥细胞。

2.亮度水平的影响：

1. 低亮度：视杆细胞主要在低亮度条件下工作。
2. 高亮度：视锥细胞在高亮度下发挥作用。
3. 中间亮度：在中间亮度水平，视杆细胞和视锥细胞都会工作。

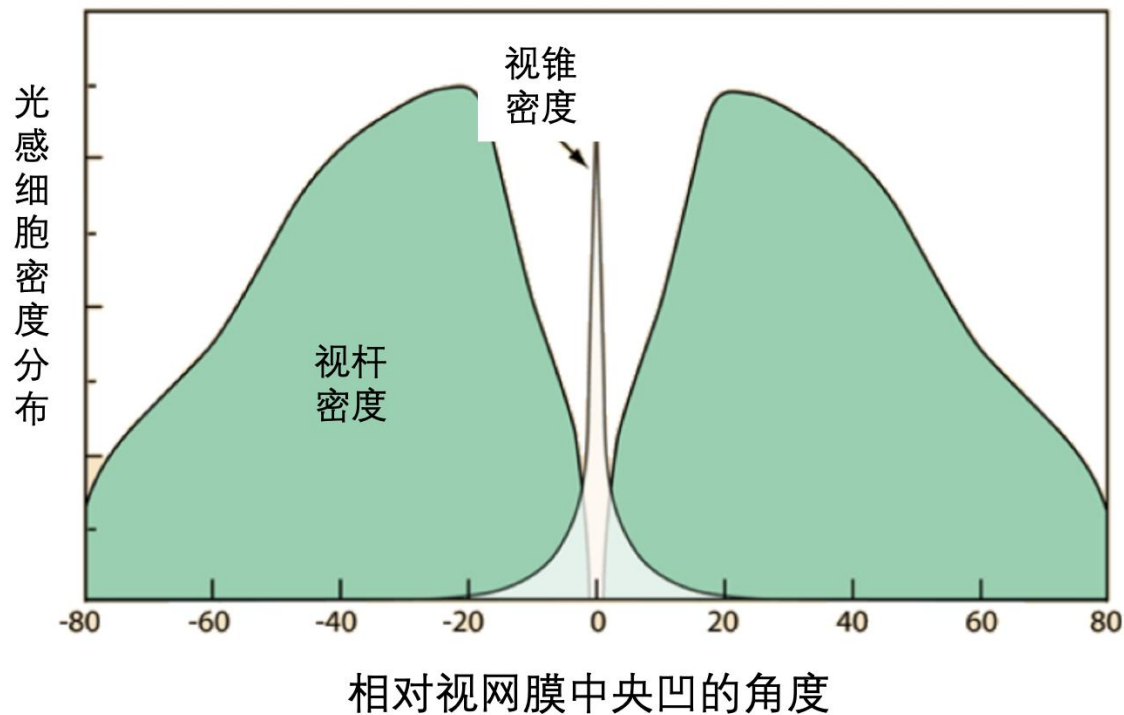
3.视杆细胞的特点：只有一种视杆细胞，它不参与颜色的感知

4.视锥细胞的多样性：有三种类型的视锥细胞，对不同波长的光有不同的响应。

参考知乎专栏文章[23. 颜色知识1-人类的视觉系统与颜色](#)



视锥细胞主要集中在视网膜中央附近



参考知乎专栏文章[23. 颜色知识1-人类的视觉系统与颜色](#)

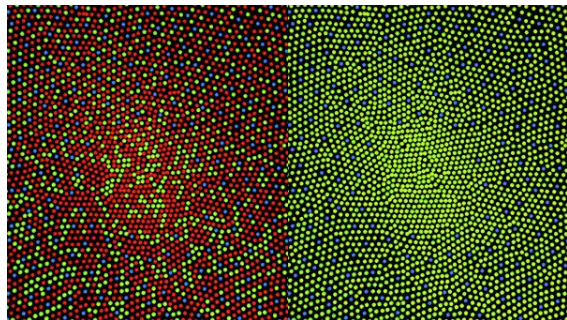


视锥细胞对输入光的响应构成了视网膜颜色

- 人眼包含所谓视锥细胞的光传感器的集合
- 有三类具有不同光谱灵敏度的视锥细胞
- 所以人类的颜色感知是三维的（三原色）

$k_s(\lambda), k_m(\lambda), k_l(\lambda)$: 人眼的光谱灵敏度函数
 $l(\lambda)$: 经过材质反射到人眼的光谱辐射
 c_s, c_m, c_l : 视网膜感光细胞的响应, 即视网膜颜色

正常视力人眼的视锥细胞分布(64% L, 32% M)



“短S” $c_s = \int_{\lambda} l(\lambda) k_s(\lambda) d\lambda$

“中M” $c_m = \int_{\lambda} l(\lambda) k_m(\lambda) d\lambda$

“长L” $c_l = \int_{\lambda} l(\lambda) k_l(\lambda) d\lambda$

响应强度

$$c_s = \int_{\lambda} l(\lambda) k_s(\lambda) d\lambda$$

波长

参考第一季课程《从光线到图像-相机成像的原理》第4课《图像传感器与ISP》



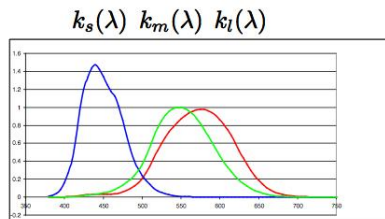
人类的颜色视觉

$k_s(\lambda)$, $k_m(\lambda)$, $k_l(\lambda)$: 人眼的光谱灵敏度函数
 $l(\lambda)$: 经过材质反射到人眼的光谱辐射
 c_s , c_m , c_l : 视网膜感光细胞的响应, 即视网膜颜色

视网膜颜色

$$\mathbf{c}(\ell(\lambda)) = (c_s, c_m, c_l)$$

$$c_s = \int k_s(\lambda) \ell(\lambda) d\lambda$$



LMS sensitivity functions



感知颜色/物体颜色/颜色名称

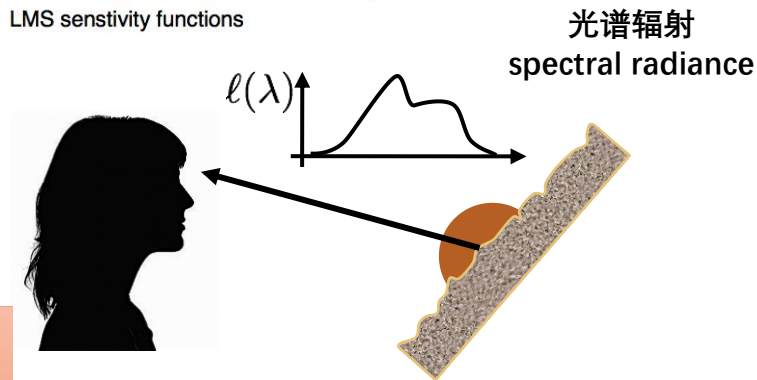
视网膜颜色

角膜到视网膜表面

感知颜色

视网膜内部

大脑





视网膜颜色和人的大脑感知的颜色可能不同

视网膜颜色

角膜到视网膜表面

感知颜色

视网膜内部

大脑



视网膜颜色和人的大脑感知的颜色可能不同





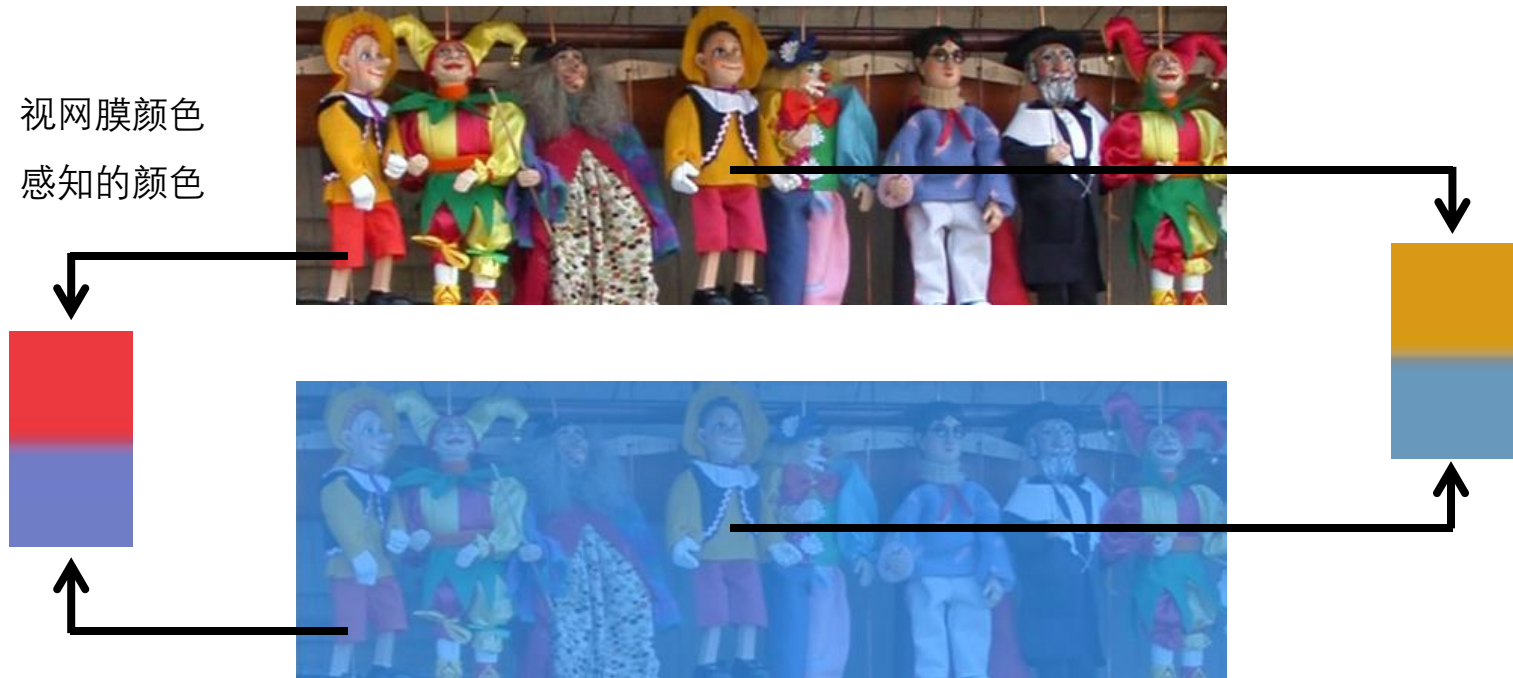
视网膜颜色和人的大脑感知的颜色可能不同

人类视觉系统具有色度适应性(chromatic adaptation):

在不同的光源下，我们大部分时间可以正确地感知白色（和其他颜色）

下：视网膜颜色

上：感知的颜色

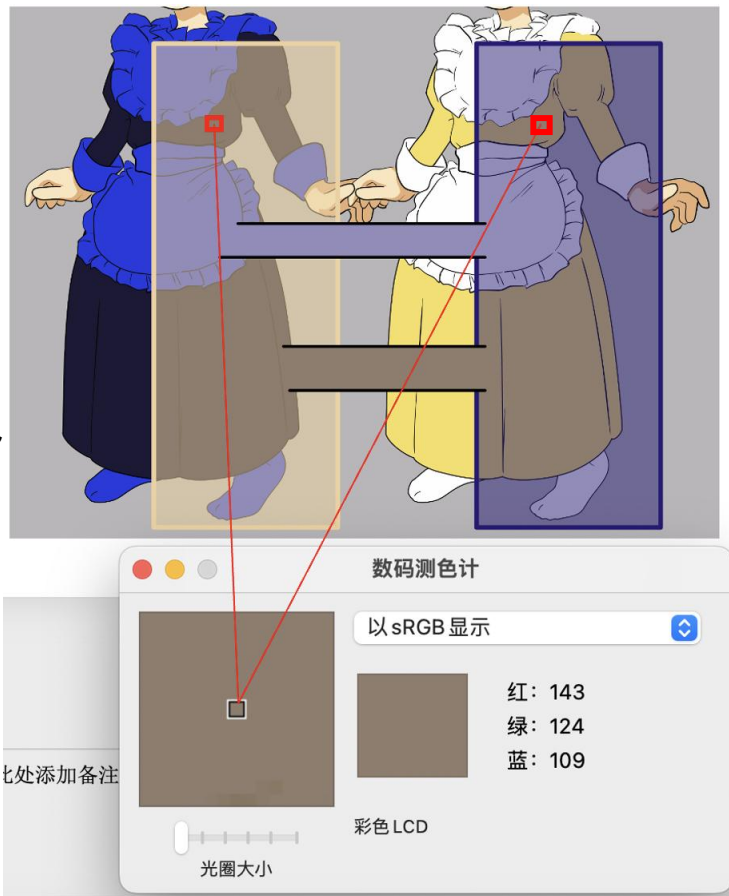




视网膜颜色和人的大脑感知的颜色可能不同

人类视觉系统具有色度适应性

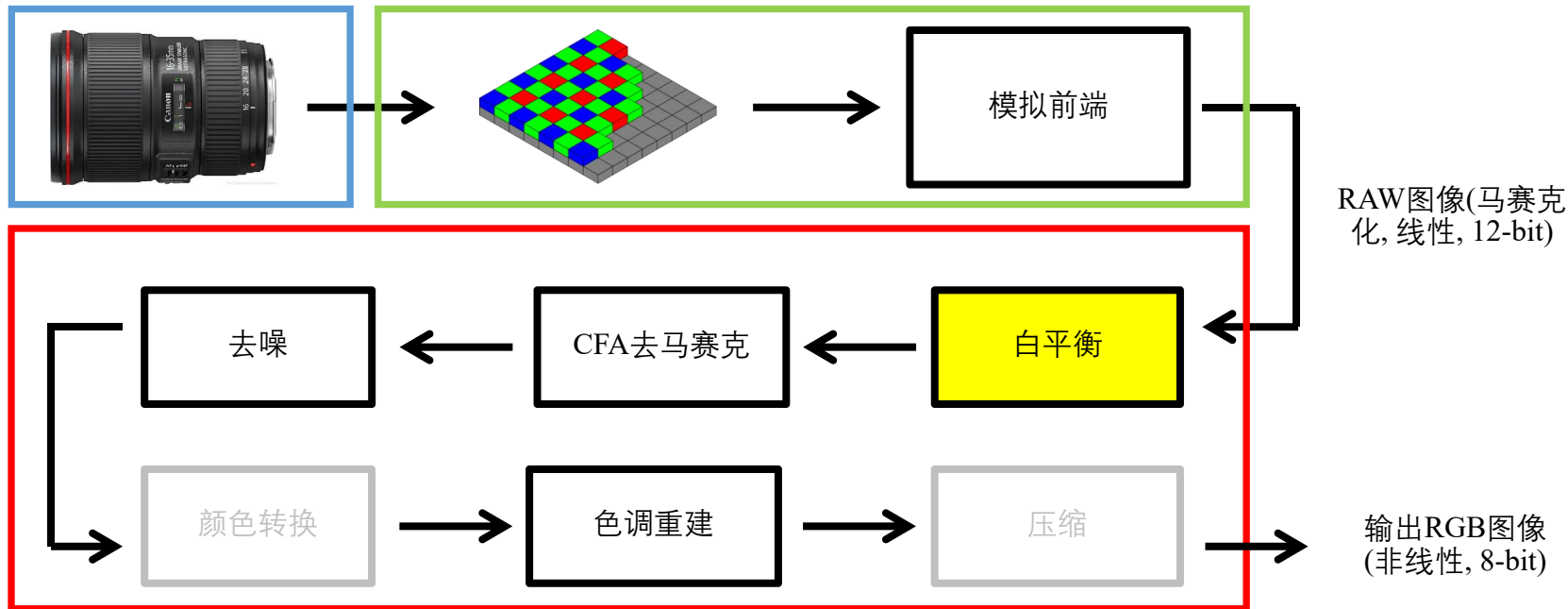
人脑会将相同的视网膜颜色解释为不同的颜色





白平衡是模拟人类的色度适应性的过程

相机图像信号处理器 (Image Signal Processor - ISP) 应用一系列图像处理操作，将 RAW 图像转换为“传统”图像。



参考第一季课程《从光线到图像-相机成像的原理》第4课《图像传感器与ISP》



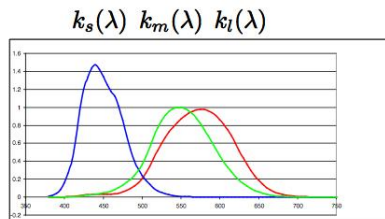
本课中我们将详解视网膜颜色

$k_s(\lambda)$, $k_m(\lambda)$, $k_l(\lambda)$: 人眼的光谱灵敏度函数
 $l(\lambda)$: 经过材质反射到人眼的光谱辐射
 c_s , c_m , c_l : 视网膜感光细胞的响应, 即视网膜颜色

视网膜颜色

$$\mathbf{c}(\ell(\lambda)) = (c_s, c_m, c_l)$$

$$c_s = \int k_s(\lambda) \ell(\lambda) d\lambda$$



LMS sensitivity functions



感知颜色/物体颜色/颜色名称

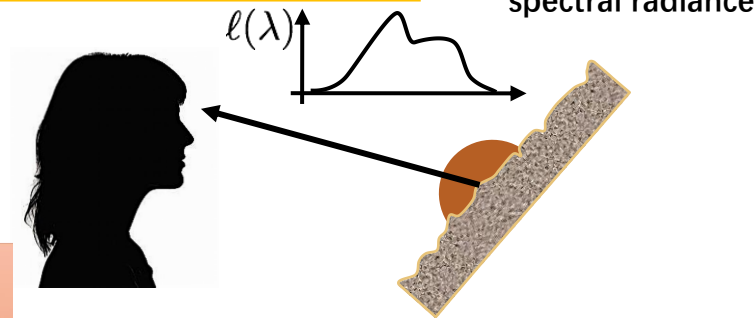
视网膜颜色

角膜到视网膜表面

感知颜色

视网膜内部

大脑





目录



1. 色彩基础知识



2. 视网膜颜色空间



3. 颜色匹配



4. 线性颜色空间



5. 色度



6. 颜色校正



7. 非线性颜色空间



8. 颜色重建思考



光谱灵敏度函数 (Spectral Sensitivity Function - SSF)

- 任何光传感器（数字或非数字，包括人眼）对不同波长都有不同的灵敏度。
- 这是通过传感器的光谱灵敏度函数来描述的 $f(\lambda)$
- 当测量某个 SPD为 $l(\lambda)$ 的光时，传感器会产生标量响应

传感器的标量响应 \longrightarrow

$$R = \int_{\lambda} \overset{\substack{\text{光的 SPD} \\ \downarrow}}{l(\lambda)} \overset{\substack{\text{传感器的SSF} \\ \swarrow}}{f(\lambda)} d\lambda$$

光的SPD的加权组合：在传感器灵敏度较高的波长上光的贡献更大

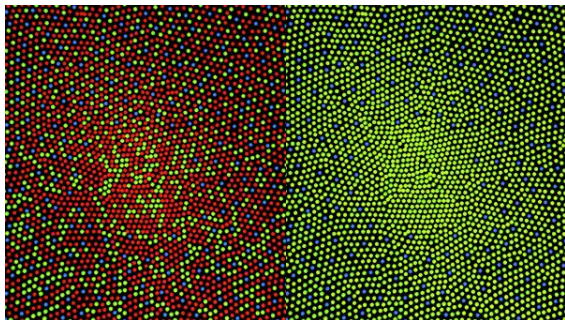


视锥细胞对输入光的响应构成了视网膜颜色

- 人眼包含所谓视锥细胞的光传感器的集合
- 有三类具有不同光谱灵敏度的视锥细胞
- 所以人类的颜色感知是三维的（三原色）

$k_s(\lambda), k_m(\lambda), k_l(\lambda)$: 人眼的光谱灵敏度函数
 $l(\lambda)$: 经过材质反射到人眼的光谱辐射
 c_s, c_m, c_l : 视网膜感光细胞的响应, 即视网膜颜色

正常视力人眼的视锥细胞分布(64% L, 32% M)



“短S” $c_s = \int_{\lambda} l(\lambda) k_s(\lambda) d\lambda$

“中M” $c_m = \int_{\lambda} l(\lambda) k_m(\lambda) d\lambda$

“长L” $c_l = \int_{\lambda} l(\lambda) k_l(\lambda) d\lambda$

响应强度

$$c_s = \int_{\lambda} l(\lambda) k_s(\lambda) d\lambda$$

波长

参考第一季课程《从光线到图像-相机成像的原理》第4课《图像传感器与ISP》

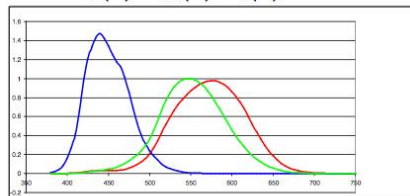


视网膜颜色空间 – 所有可见纯色光的视网膜颜色在该空间中构成一个曲线

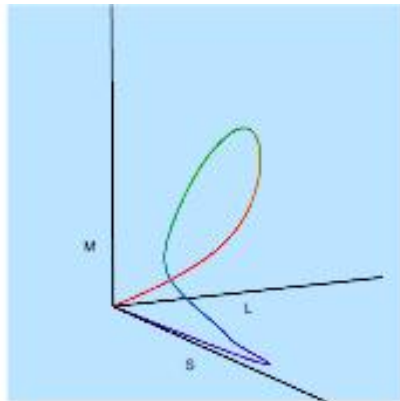
$$\mathbf{c}(\ell_{\lambda_i}) = (c_s, c_m, c_l)$$



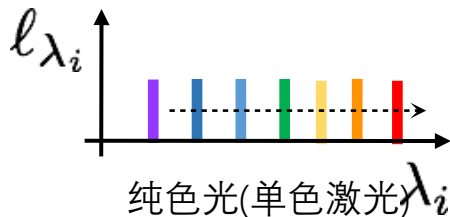
$k_s(\lambda)$ $k_m(\lambda)$ $k_l(\lambda)$



LMS sensitivity functions



- 视网膜颜色空间是一个3维的颜色空间，即LMS颜色空间。
- 任何一种纯色光在这个3维空间中都有对应的坐标
- 我们可以画出这些坐标，并从不同的角度去观察画出的曲线



$$\mathbf{c}(\ell_{\lambda_i}) = k(\lambda_i)l(\lambda_i) = \begin{bmatrix} k_s(\lambda_i)l(\lambda_i) \\ k_m(\lambda_i)l(\lambda_i) \\ k_l(\lambda_i)l(\lambda_i) \end{bmatrix}$$

$k_s(\lambda_i)l(\lambda_i)$ 意味着短视锥细胞对波长为 λ_i 强度为 $l(\lambda_i)$ 的单色光的响应

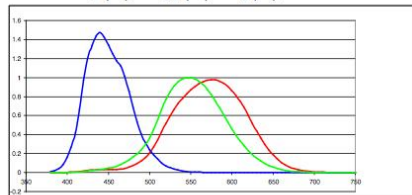


视网膜颜色空间 – 从不同视角观察这个由纯色光的视网膜颜色构成的曲线

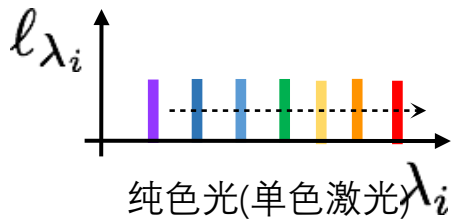
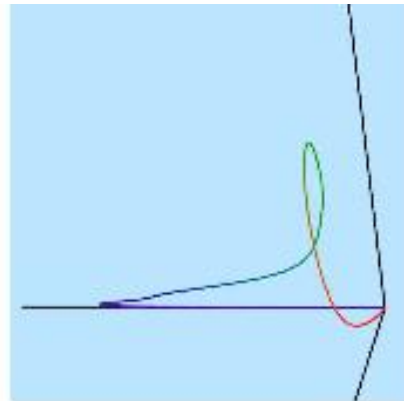
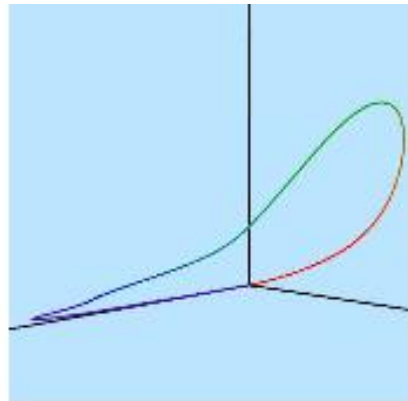
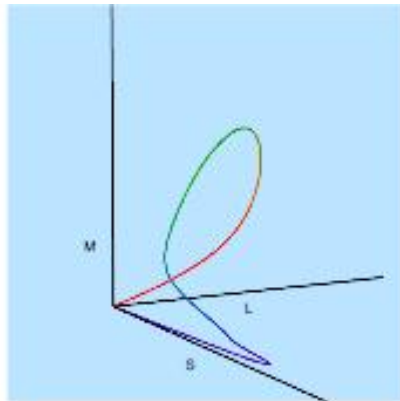
$$\mathbf{c}(\ell_{\lambda_i}) = (c_s, c_m, c_l)$$



$k_s(\lambda)$ $k_m(\lambda)$ $k_l(\lambda)$



LMS sensitivity functions



纯色光(单色激光)

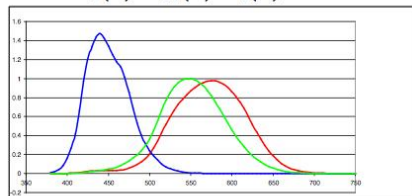


视网膜颜色空间 – 从不同视角观察这个由纯色光的视网膜颜色构成的曲线

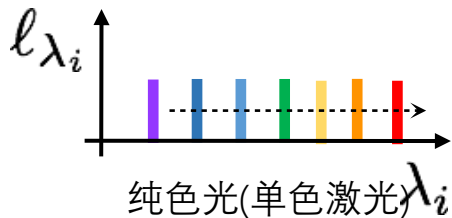
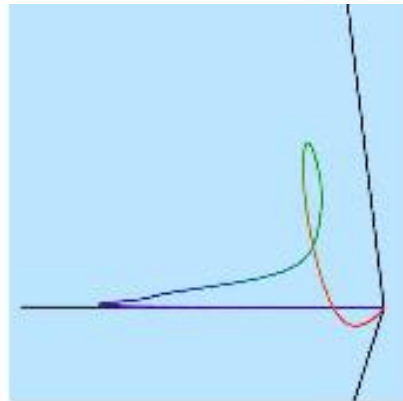
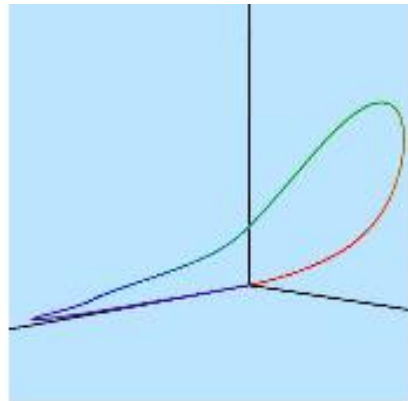
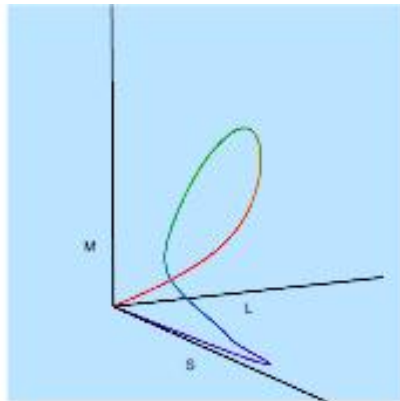
$$\mathbf{c}(\ell_{\lambda_i}) = (c_s, c_m, c_l)$$



$k_s(\lambda)$ $k_m(\lambda)$ $k_l(\lambda)$



LMS sensitivity functions



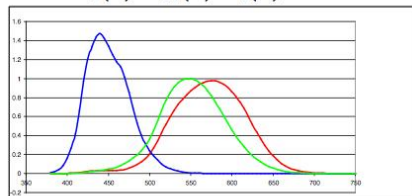
- 曲线呈套索状
- 位于第一象限
- 以波长为参数
- 从原点开始和结束
- 永远不靠近M轴

视网膜颜色空间 – 考虑纯色光的强度后曲线变成曲面

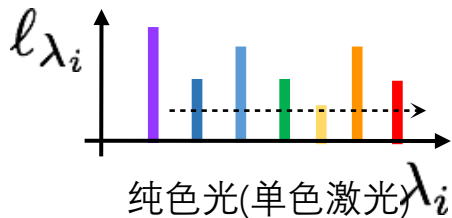
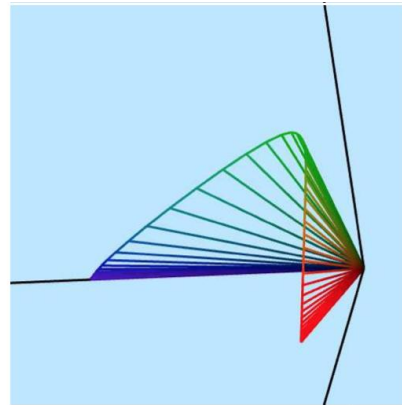
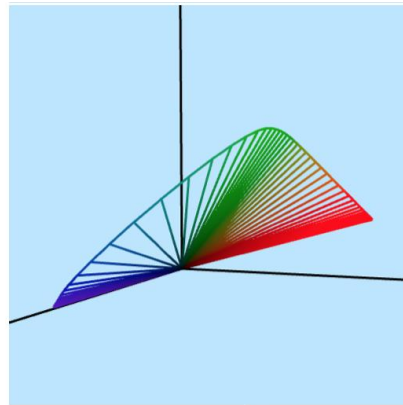
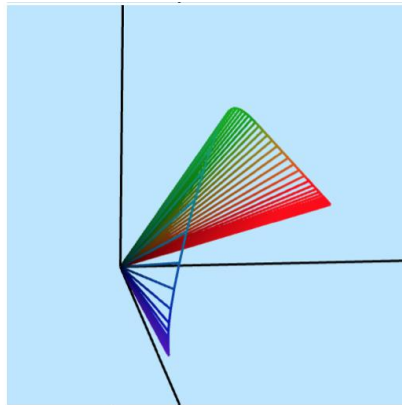
$$\mathbf{c}(\ell_{\lambda_i}) = (c_s, c_m, c_l)$$



$k_s(\lambda)$ $k_m(\lambda)$ $k_l(\lambda)$



LMS sensitivity functions



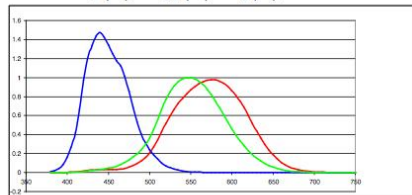
如果我们还考虑激光强度的变化，这个“套索”就会变成具有“马蹄形”截面的径向锥体

视网膜颜色空间 – 混合不同强度的纯色光构成凸锥体

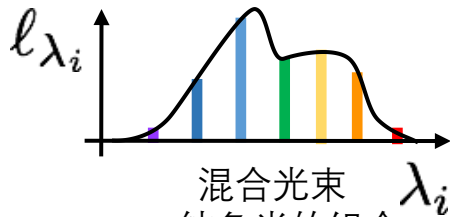
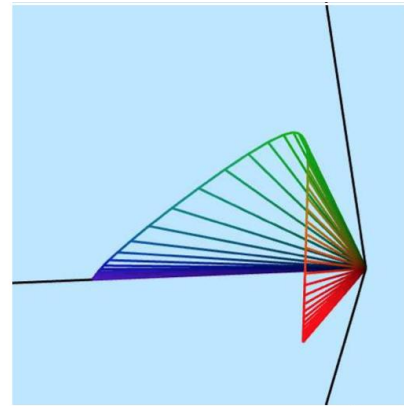
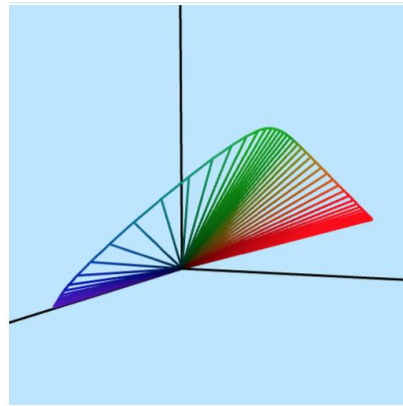
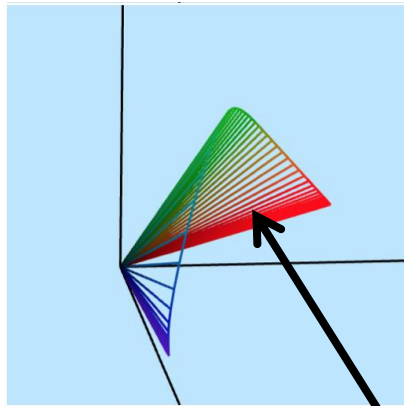
$$\mathbf{c}(\ell_{\lambda_i}) = (c_s, c_m, c_l)$$



$k_s(\lambda)$ $k_m(\lambda)$ $k_l(\lambda)$



LMS sensitivity functions



混合光束
= 纯色光的组合

混合光束的颜色位于凸锥内部，边界为单色光产生的表面

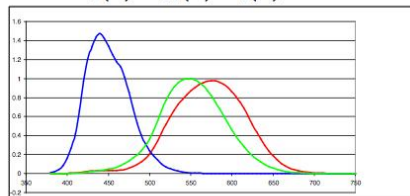


视网膜颜色空间 – 同色异谱现象

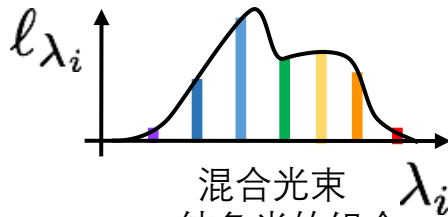
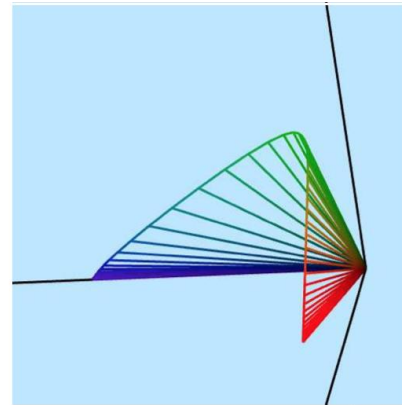
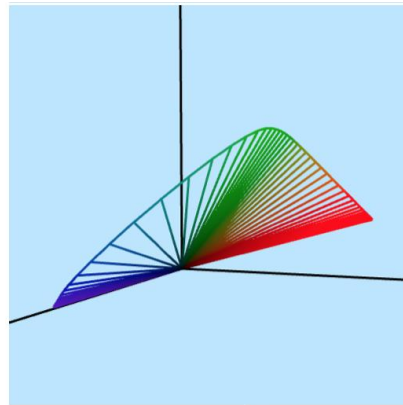
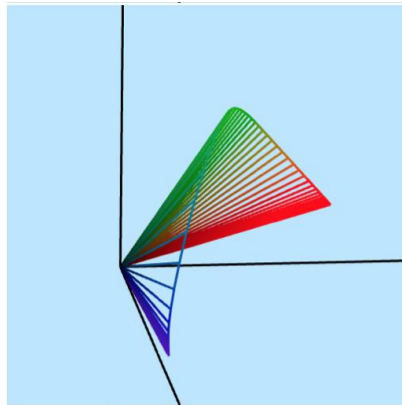
$$\mathbf{c}(\ell_{\lambda_i}) = (c_s, c_m, c_l)$$



$k_s(\lambda)$ $k_m(\lambda)$ $k_l(\lambda)$



LMS sensitivity functions



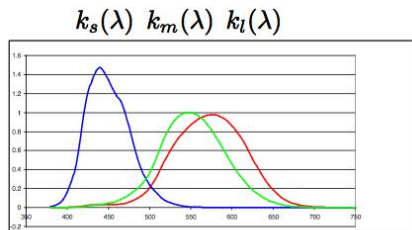
混合光束
= 纯色光的组合

不同的混合光束可以产生相同的视网膜颜色，这些光束称为**同色异谱**



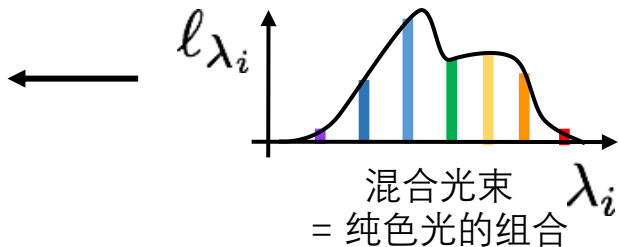
视网膜颜色空间 – 同色异谱现象

$$\mathbf{c}(\ell_{\lambda_i}) = (c_s, c_m, c_l)$$



LMS sensitivity functions

$$c(l) = \int c(l(\lambda))d\lambda = \int k(\lambda)l(\lambda)d\lambda = \begin{bmatrix} \int k_s(\lambda)l(\lambda)d\lambda \\ \int k_m(\lambda)l(\lambda)d\lambda \\ \int k_l(\lambda)l(\lambda)d\lambda \end{bmatrix}$$

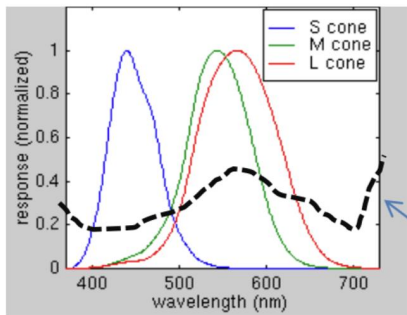


不同的混合光束可以产生相同的视网膜颜色，这些光束称为**同色异谱**



视网膜颜色空间——同色异谱示例

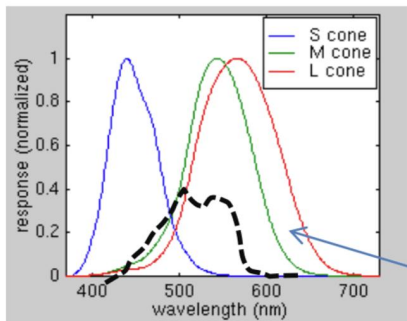
SPD1, 相同人眼光敏函数



SPD1

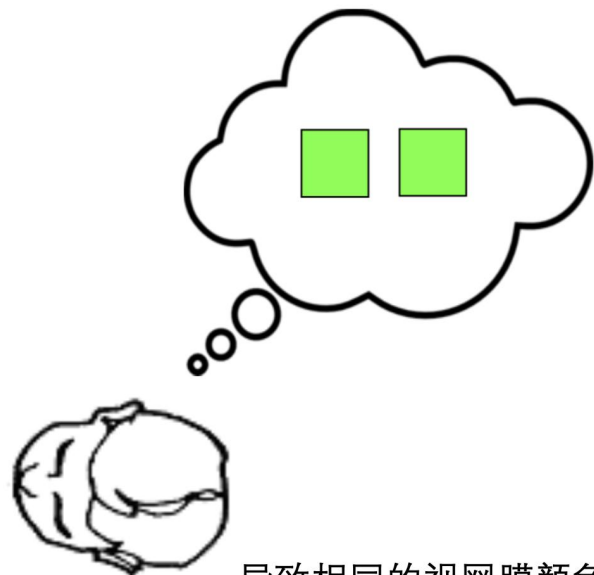
视网膜颜色
坐标
 $S=0.2, M=0.8,$
 $L=0.8$

SPD2, 相同人眼光敏函数



SPD2

视网膜颜色
坐标
 $S=0.2, M=0.8,$
 $L=0.8$



导致相同的视网膜颜色



目录



1. 色彩基础知识



2. 视网膜颜色空间



3. 颜色匹配



4. 线性颜色空间



5. 色度



6. 颜色校正



7. 非线性颜色空间




8. 颜色重建思考



三原色理论

融合R1份红色、G1份绿色、B1份蓝色得到颜色1

颜色1  = R1  + G1  + B1 

颜色2  = R2  + G2  + B2 

融合R2份红色、G2份绿色、B2份蓝色得到颜色2

 +  = (R1+ R2)  + (G1+ G2)  + (B1+B2) 

颜色3 

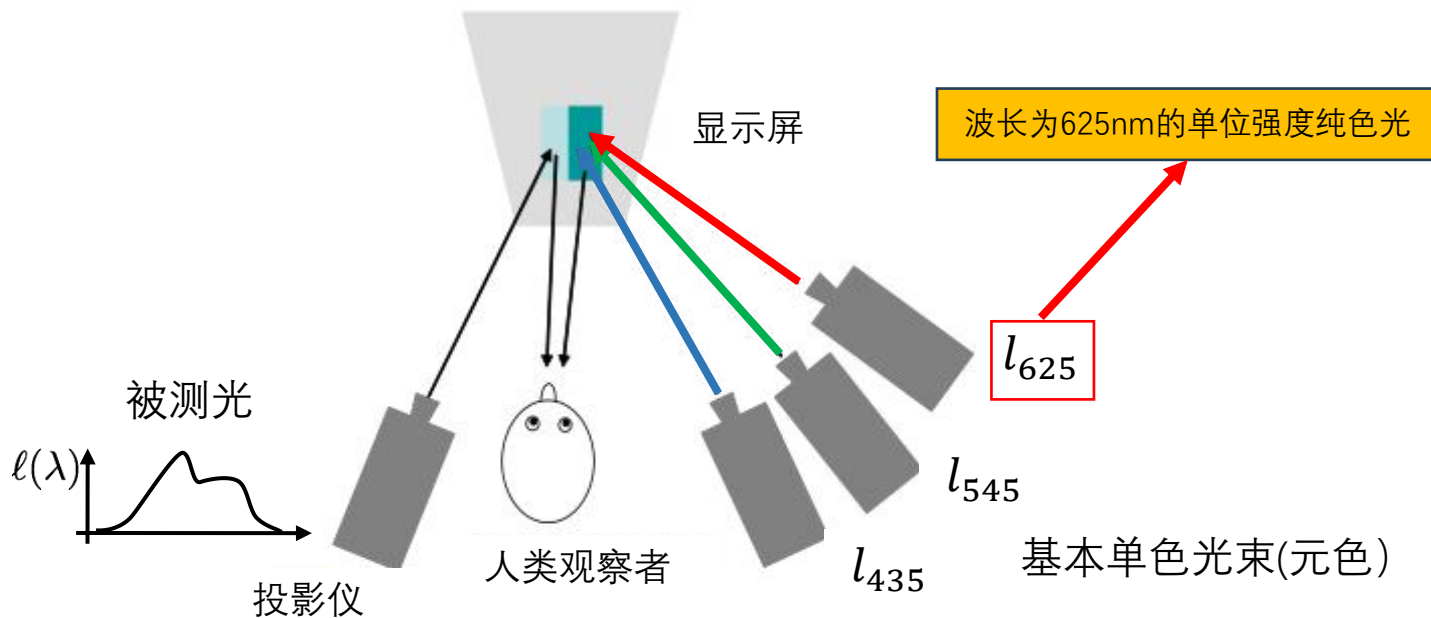
颜色组合符合加性原则

在3种视锥细胞被发现和深入研究之前，人们很早就通过经验观察到仅通过3种基本颜色就可以组合成其他的颜色，这就是**三元色理论**

虽然三元色理论能够解释一些现象，但是人们还需要更加准确的方法来量化颜色。于是在三元色理论的基础上，**人们希望构建3个标准的基本颜色，并以此来量化所有的可见的颜色**



CIE颜色匹配实验

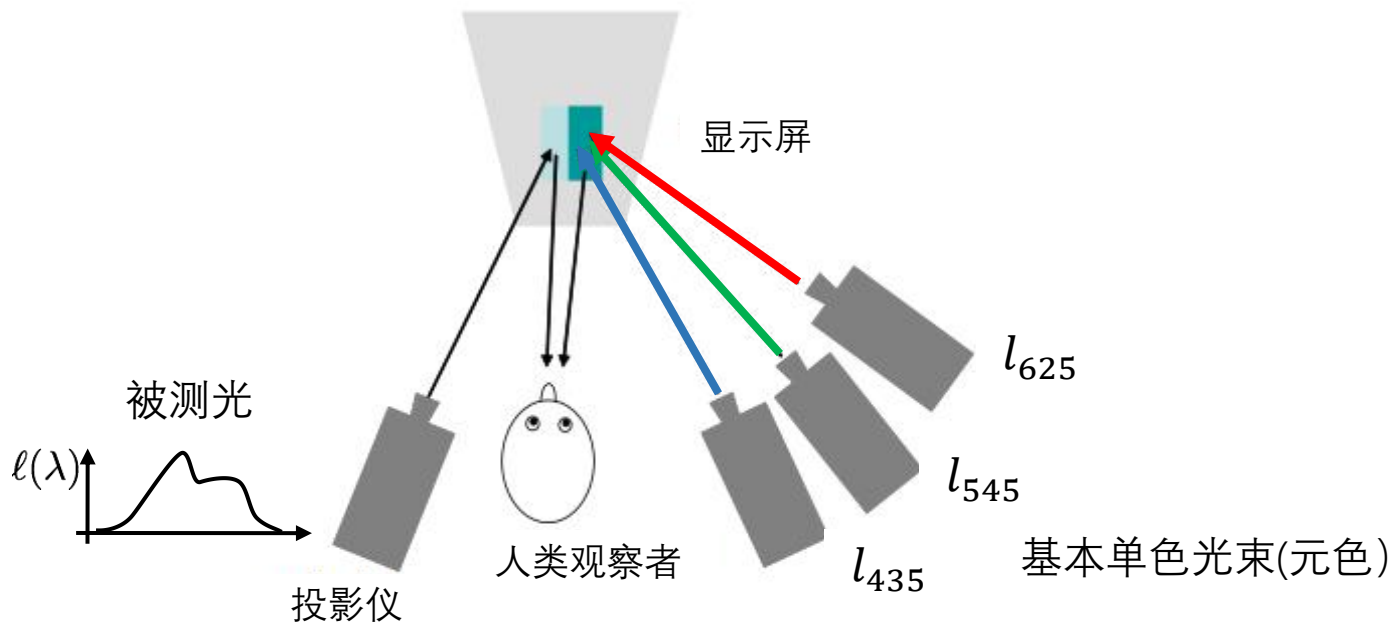


调整基本光的强度，直到观察者无法区分被测光和投射的光

$$c(l(\lambda)) = \alpha(l_{435}) + \beta(l_{545}) + \gamma(l_{625})$$



CIE颜色匹配实验



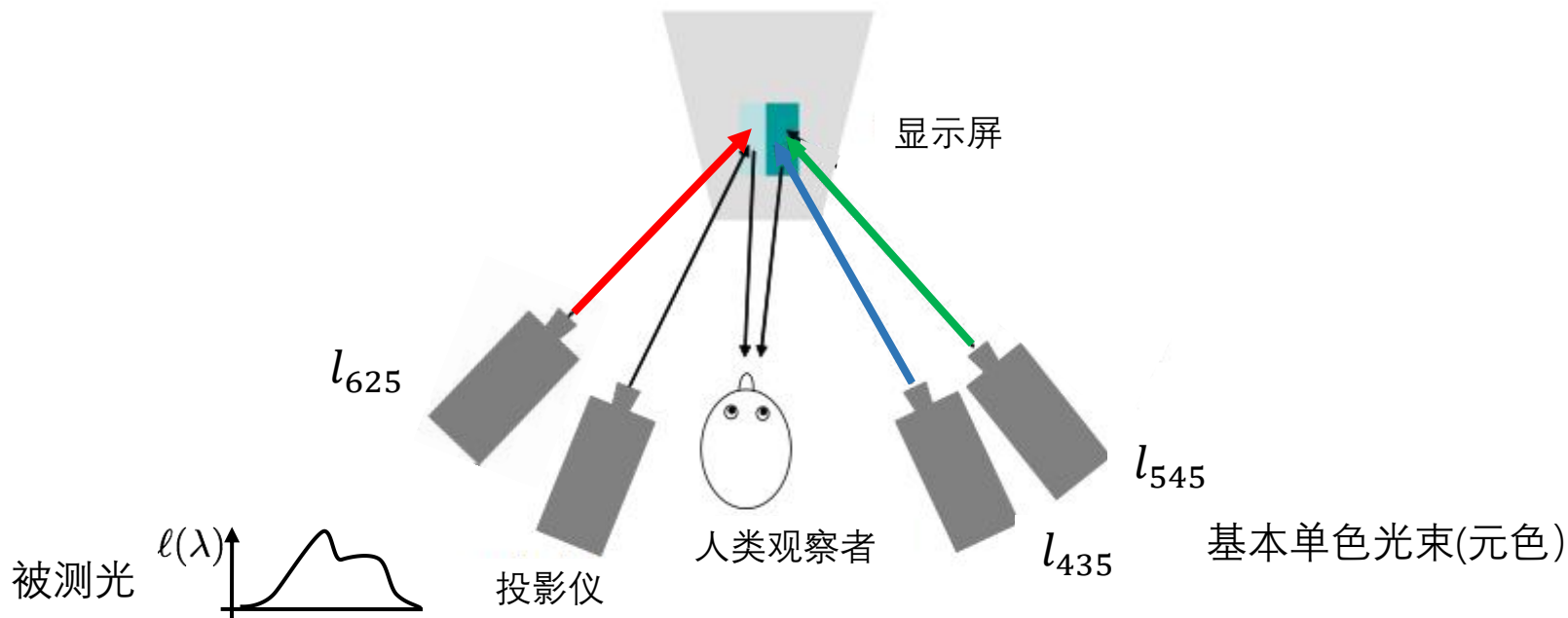
调整基本光的强度，直到观察者无法区分被测光和投射的光

$$c(l(\lambda)) = \alpha(l_{435}) + \beta(l_{545}) + \gamma(l_{625})$$

等号表示左右两边有相同的视网膜颜色，
也即是达到了同色异谱



CIE颜色匹配实验

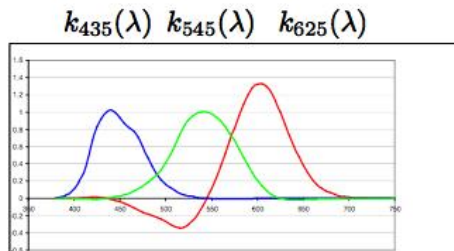


为了匹配一些被测光，需要在左侧投射一些基本光，这等效于从右侧减去该基本光

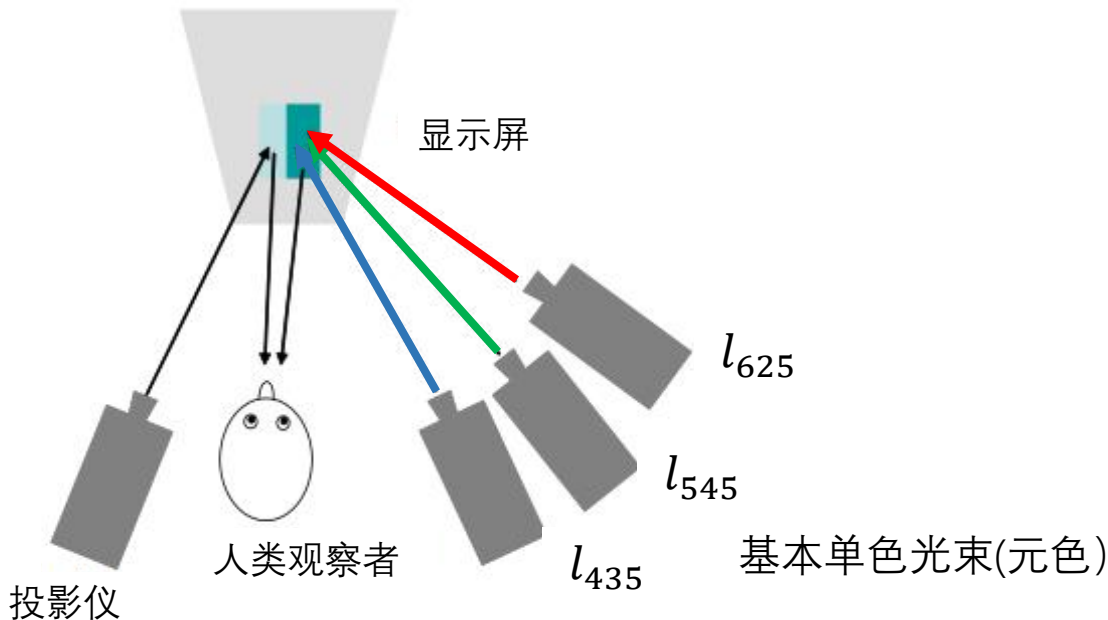
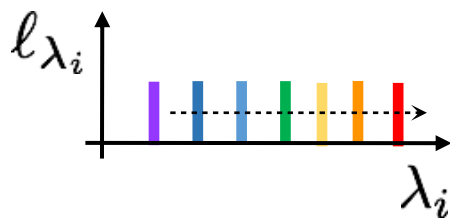
$$c(l(\lambda)) + \gamma(l_{625}) = \alpha(l_{435}) + \beta(l_{545})$$
$$\Rightarrow c(l(\lambda)) = \alpha(l_{435}) + \beta(l_{545}) - \gamma(l_{625})$$



CIE颜色匹配实验



颜色匹配实验得到的系数

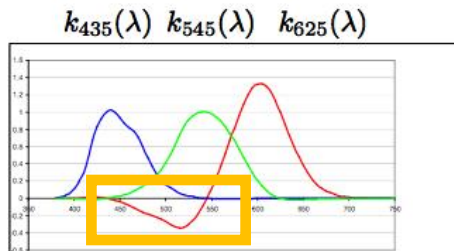


改变被测光的波长 λ 重复这个实验，并记录与之匹配的三元色的系数（包括正负值）

$$c(\lambda) = k_{435}(\lambda)c(l_{435}) + k_{545}(\lambda)c(l_{545}) + k_{625}(\lambda)c(l_{625})$$

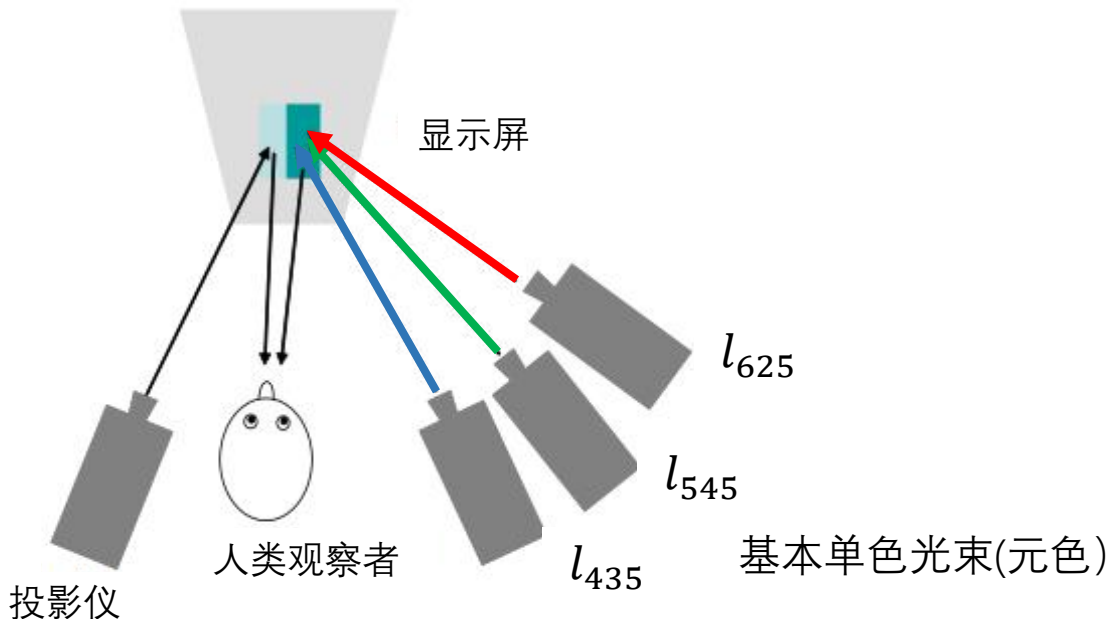
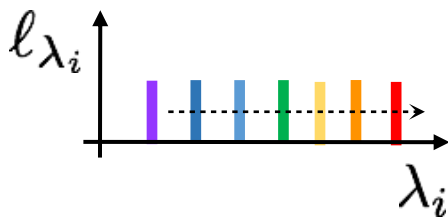


CIE颜色匹配实验



颜色匹配实验得到的系数

注意这里有负数

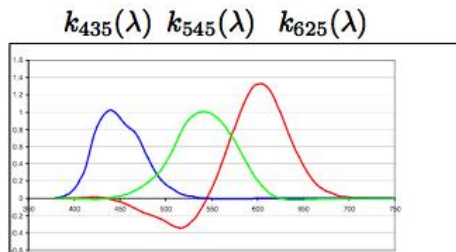


改变被测光的波长 λ 重复这个实验，并记录与之匹配的三元色的系数（包括正负值）

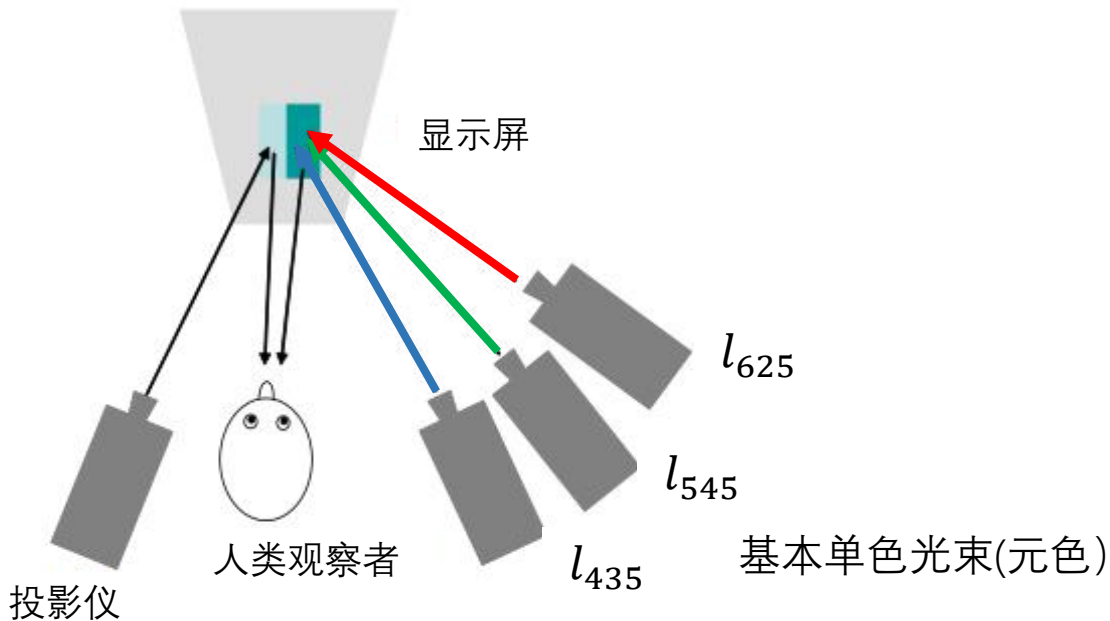
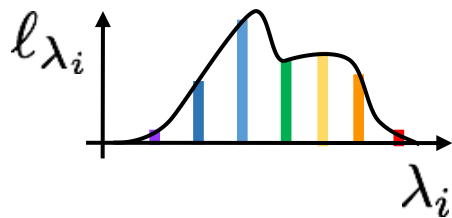
$$c(\lambda) = k_{435}(\lambda)c(l_{435}) + k_{545}(\lambda)c(l_{545}) + k_{625}(\lambda)c(l_{625})$$



CIE颜色匹配实验



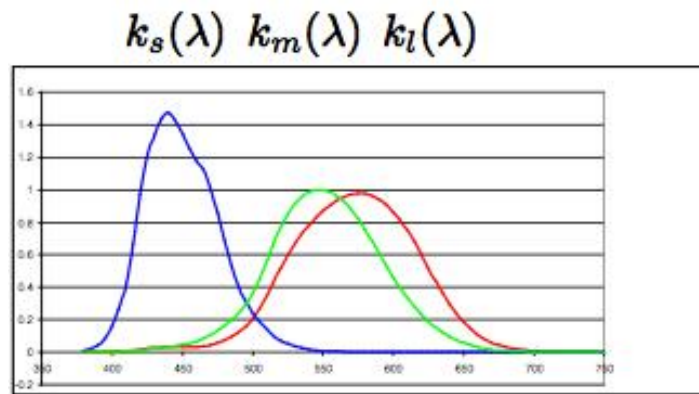
颜色匹配实验得到的系数



那么混合光的情况如何呢

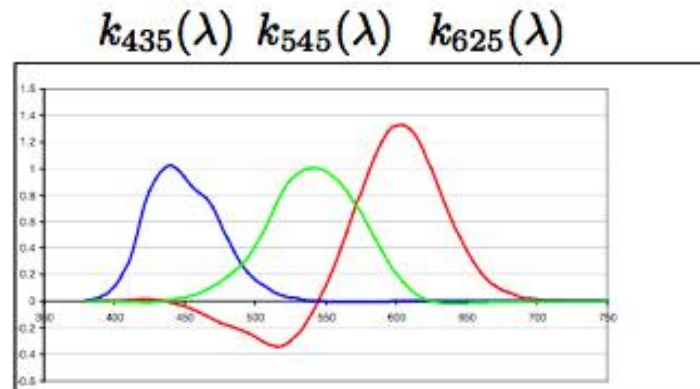


两种视角看待视网膜颜色



人眼光谱灵敏度函数

分析：视网膜颜色是通过使用颜色敏感度函数分析光谱功率分布来产生



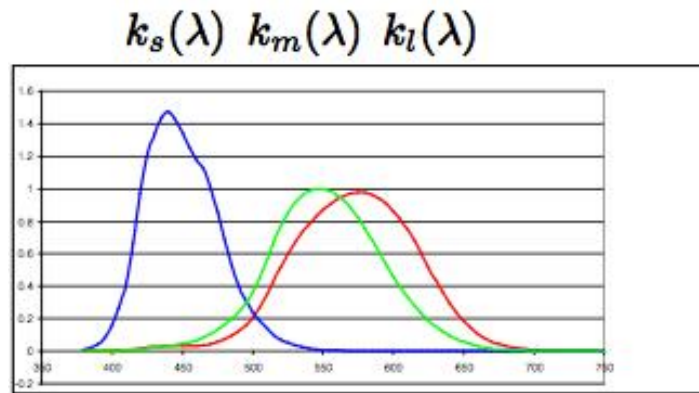
颜色匹配实验得到的系数

合成：视网膜颜色是通过使用颜色匹配函数合成三元色来产生

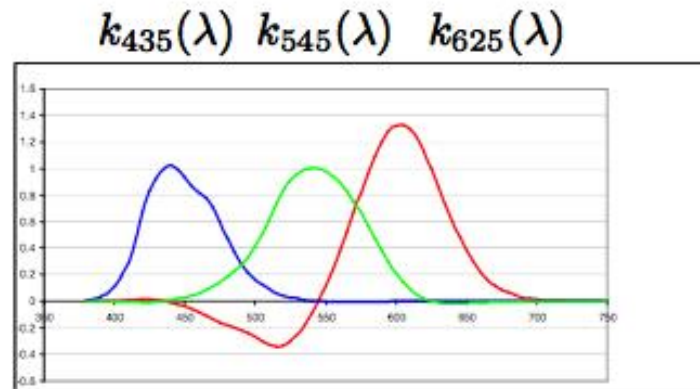
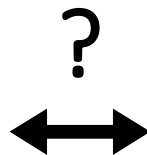
两种视角分别应用在哪些情况？



两种视角看待视网膜颜色



人眼光谱灵敏度函数



颜色匹配实验得到的系数

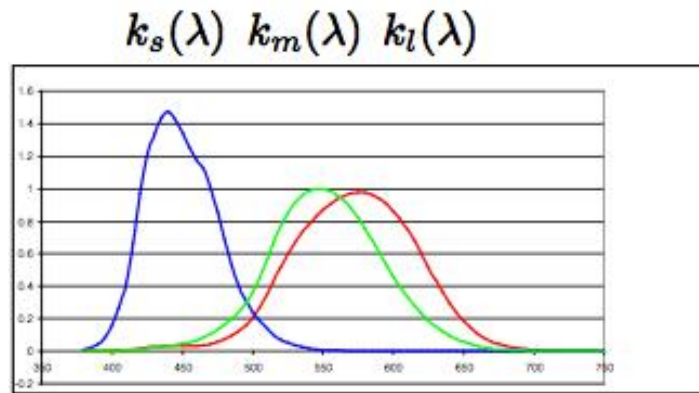
分析：视网膜颜色是通过使用颜色敏感度函数分析光谱功率分布来产生

合成：视网膜颜色是通过使用颜色匹配函数合成三元色来产生

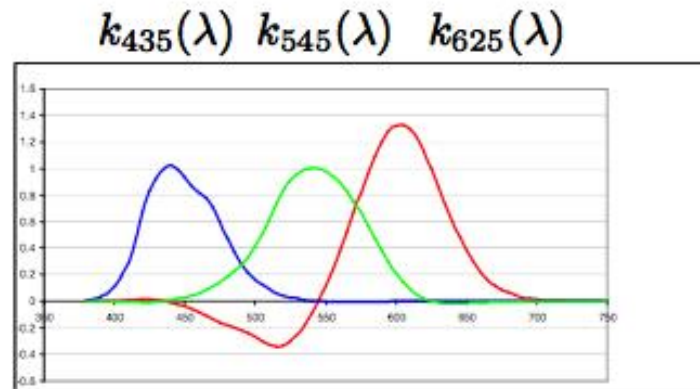
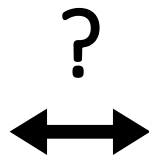
它们之间又如何相互关联？



两种视角看待视网膜颜色



人眼光谱灵敏度函数



颜色匹配实验得到的系数

分析：视网膜颜色是通过使用颜色敏感度函数分析光谱功率分布来产生

合成：视网膜颜色是通过使用颜色匹配函数合成三元色来产生

这两种观点是等价的：视网膜颜色颜色匹配函数也是颜色敏感度函数。对于每组颜色敏感度函数，都有相应的原色。




目录

 1. 色彩基础知识

 2. 视网膜颜色空间

 3. 颜色匹配

 4. 线性颜色空间

 5. 色度

 6. 颜色校正

 7. 非线性颜色空间

 8. 颜色重建思考



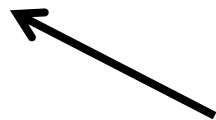
线性颜色空间

1) 颜色匹配实验输出(单位强度的单色光):

$$c(\lambda_i) = k_{435}(\lambda_i)c(l_{435}) + k_{545}(\lambda_i)c(l_{545}) + k_{625}(\lambda_i)c(l_{625})$$

矩阵表示:

$$\begin{bmatrix} | \\ c(\lambda_i) \\ | \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} | & | & | \\ c(l_{435}) & c(l_{545}) & c(l_{625}) \\ | & | & | \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_{435} \\ k_{545} \\ k_{625} \end{bmatrix}$$



$$\mathbf{c}(\ell_{\lambda_i}) = (c_s, c_m, c_l)$$

为了得到视网膜颜色 $c(\lambda_i)$, 元色 $c(l_{435})$ 的系数应该是 $k_{435}(\lambda_i)$



线性颜色空间

1) 颜色匹配实验输出(单位强度的单色光):

$$c(\lambda_i) = k_{435}(\lambda_i)c(l_{435}) + k_{545}(\lambda_i)c(l_{545}) + k_{625}(\lambda_i)c(l_{625})$$

矩阵表示:

$$\begin{bmatrix} | \\ c(\lambda_i) \\ | \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} | & | & | \\ c(l_{435}) & c(l_{545}) & c(l_{625}) \\ | \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_{435} \\ k_{545} \\ k_{625} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{c}(\ell_{\lambda_i}) = (c_s, c_m, c_l)$$

→ 为了得到视网膜颜色 $c(\lambda_i)$, 元色 $c(l_{435})$ 的系数应该是 $k_{435}(\lambda_i)$



线性颜色空间

1) 颜色匹配实验输出(单位强度的单色光):

$$c(\lambda_i) = k_{435}(\lambda_i)c(l_{435}) + k_{545}(\lambda_i)c(l_{545}) + k_{625}(\lambda_i)c(l_{625})$$

矩阵表示:

$$\begin{matrix} \text{3x1} \\ \left[\begin{array}{c} | \\ c(\lambda_i) \\ | \end{array} \right] \end{matrix} = \begin{matrix} \text{3x3} \\ \left[\begin{array}{ccc} | & | & | \\ c(l_{435}) & c(l_{545}) & c(l_{625}) \\ | & | & | \end{array} \right] \end{matrix} \begin{matrix} \text{3x1} \\ \left[\begin{array}{c} k_{435} \\ k_{545} \\ k_{625} \end{array} \right] \end{matrix}$$

2) 对于任意的混合光可以表示为:

$$\left[\begin{array}{c} | \\ c(l(\lambda)) \\ | \end{array} \right] = \left[\begin{array}{ccc} | & | & | \\ c(l_{435}) & c(l_{545}) & c(l_{625}) \\ | & | & | \end{array} \right] \left[\begin{array}{c} \int k_{435}(\lambda)l(\lambda)d\lambda \\ \int k_{545}(\lambda)l(\lambda)d\lambda \\ \int k_{625}(\lambda)l(\lambda)d\lambda \end{array} \right]$$

思考: 这部分怎么来的?





线性颜色空间

1) 颜色匹配实验输出(单位强度的单色光):

$$c(\lambda_i) = k_{435}(\lambda_i)c(l_{435}) + k_{545}(\lambda_i)c(l_{545}) + k_{625}(\lambda_i)c(l_{625})$$

矩阵表示:

$$\begin{matrix} \text{3x1} \\ \left[\begin{array}{c} | \\ c(\lambda_i) \\ | \end{array} \right] \end{matrix} = \begin{matrix} \text{3x3} \\ \left[\begin{array}{ccc} | & | & | \\ c(l_{435}) & c(l_{545}) & c(l_{625}) \\ | & | & | \end{array} \right] \end{matrix} \begin{matrix} \text{3x1} \\ \left[\begin{array}{c} k_{435} \\ k_{545} \\ k_{625} \end{array} \right] \end{matrix}$$

2) 混合两个不同波长不同强度的光得到:

$$c(\lambda_1) + c(\lambda_2) = \left[\begin{array}{ccc} | & | & | \\ c(l_{435}) & c(l_{545}) & c(l_{625}) \\ | & | & | \end{array} \right] \left[\begin{array}{c} k_{435}(\lambda_1)l(\lambda_1) + k_{435}(\lambda_2)l(\lambda_2) \\ k_{545}(\lambda_1)l(\lambda_1) + k_{545}(\lambda_2)l(\lambda_2) \\ k_{625}(\lambda_1)l(\lambda_1) + k_{625}(\lambda_2)l(\lambda_2) \end{array} \right]$$



线性颜色空间

1) 颜色匹配实验输出:

$$c(\lambda_i) = k_{435}(\lambda_i)c(l_{435}) + k_{545}(\lambda_i)c(l_{545}) + k_{625}(\lambda_i)c(l_{625})$$

矩阵表示:

$$\begin{matrix} \text{3x1} \\ \left[\begin{array}{c} | \\ c(\lambda_i) \\ | \end{array} \right] \end{matrix} = \begin{matrix} \text{3x3} \\ \left[\begin{array}{ccc} | & | & | \\ c(l_{435}) & c(l_{545}) & c(l_{625}) \\ | & | & | \end{array} \right] \end{matrix} \begin{matrix} \text{3x1} \\ \left[\begin{array}{c} k_{435} \\ k_{545} \\ k_{625} \end{array} \right] \end{matrix}$$

2) 对于任意的混合光可以表示为:

$$\left[\begin{array}{c} | \\ c(l(\lambda)) \\ | \end{array} \right] = \left[\begin{array}{ccc} | & | & | \\ c(l_{435}) & c(l_{545}) & c(l_{625}) \\ | & | & | \end{array} \right] \left[\begin{array}{c} \int k_{435}(\lambda)l(\lambda)d\lambda \\ \int k_{545}(\lambda)l(\lambda)d\lambda \\ \int k_{625}(\lambda)l(\lambda)d\lambda \end{array} \right]$$



线性颜色空间

1) 颜色匹配实验输出:

$$c(\lambda_i) = k_{435}(\lambda_i)c(l_{435}) + k_{545}(\lambda_i)c(l_{545}) + k_{625}(\lambda_i)c(l_{625})$$

矩阵表示:

$$\overset{3 \times 1}{\begin{bmatrix} | \\ c(\lambda_i) \\ | \end{bmatrix}} = \begin{bmatrix} \overset{3 \times 3}{\begin{bmatrix} | & & | \\ c(l_{435}) & c(l_{545}) & c(l_{625}) \\ | & & | \end{bmatrix}} \overset{3 \times 1}{\begin{bmatrix} k_{435} \\ k_{545} \\ k_{625} \end{bmatrix}} \end{bmatrix}$$

2) 对于任意的混合光可以表示为:

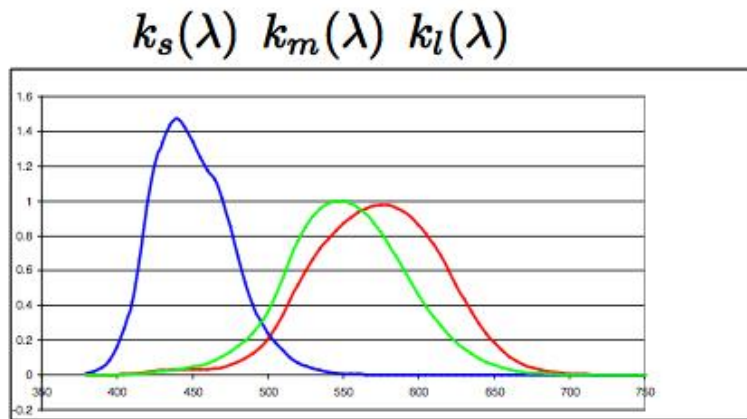
$$\begin{bmatrix} | \\ c(l(\lambda)) \\ | \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} | & & | \\ c(l_{435}) & c(l_{545}) & c(l_{625}) \\ | & & | \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \int k_{435}(\lambda)l(\lambda)d\lambda \\ \int k_{545}(\lambda)l(\lambda)d\lambda \\ \int k_{625}(\lambda)l(\lambda)d\lambda \end{bmatrix}$$

看起来有点熟悉?



回顾用颜色敏感度函数表示的视网膜颜色

$$c(l) = \int c(l(\lambda))d\lambda = \int k(\lambda)l(\lambda)d\lambda = \begin{bmatrix} \int k_s(\lambda)l(\lambda)d\lambda \\ \int k_m(\lambda)l(\lambda)d\lambda \\ \int k_l(\lambda)l(\lambda)d\lambda \end{bmatrix}$$



LMS sensitivity functions

$k_s(\lambda_i)l(\lambda_i)$ 意味着短视锥细胞对波长为 λ_i 强度为 $l(\lambda_i)$ 的单色光的响应



线性颜色空间 – 两种视网膜颜色通过变换基矩阵相互转换

1) 颜色匹配实验输出:

$$c(\lambda_i) = k_{435}(\lambda_i)c(l_{435}) + k_{545}(\lambda_i)c(l_{545}) + k_{625}(\lambda_i)c(l_{625})$$

矩阵表示:

$$\begin{matrix} \text{3x1} \\ \left[\begin{array}{c} | \\ c(\lambda_i) \\ | \end{array} \right] \end{matrix} = \begin{matrix} \text{3x3} \\ \left[\begin{array}{ccc} | & | & | \\ c(l_{435}) & c(l_{545}) & c(l_{625}) \\ | & | & | \end{array} \right] \end{matrix} \begin{matrix} \text{3x1} \\ \left[\begin{array}{c} k_{435} \\ k_{545} \\ k_{625} \end{array} \right] \end{matrix}$$

2) 对于任意的混合光可以表示为:

$$\begin{matrix} \text{以颜色敏感度函数在LMS} \\ \text{空间表示的视网膜颜色} \end{matrix} \begin{matrix} \left[\begin{array}{c} | \\ c(l(\lambda)) \\ | \end{array} \right] \end{matrix} = \begin{matrix} \text{变换基矩阵} \\ \left[\begin{array}{ccc} | & | & | \\ c(l_{435}) & c(l_{545}) & c(l_{625}) \\ | & | & | \end{array} \right] \end{matrix} \begin{bmatrix} \int k_{435}(\lambda)l(\lambda)d\lambda \\ \int k_{545}(\lambda)l(\lambda)d\lambda \\ \int k_{625}(\lambda)l(\lambda)d\lambda \end{bmatrix}$$

变换基矩阵

以颜色匹配方式用三元色
混合表示的视网膜颜色



线性颜色空间 – 两种视网膜颜色通过变换基矩阵相互转换

这意味着我们可以任意改变所选择的三元色的波长，形成不同的颜色坐标空间

$$\begin{bmatrix} c(\ell(\lambda)) \\ | \\ | \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} | & | & | \\ \mathbf{c}_1 & \mathbf{c}_2 & \mathbf{c}_3 \\ | & | & | \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \int k_1(\lambda)\ell(\lambda)d\lambda \\ \int k_2(\lambda)\ell(\lambda)d\lambda \\ \int k_3(\lambda)\ell(\lambda)d\lambda \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} c(\ell_{435}) & c(\ell_{545}) & c(\ell_{625}) \\ | & | & | \end{bmatrix} \mathbf{M}^{-1} \quad \uparrow \quad \begin{bmatrix} k_1(\lambda) \\ k_2(\lambda) \\ k_3(\lambda) \end{bmatrix} = \mathbf{M} \begin{bmatrix} k_{435}(\lambda) \\ k_{545}(\lambda) \\ k_{625}(\lambda) \end{bmatrix}$$

$\mathbf{M}^{-1}\mathbf{M}$ 这里可以插入任意可逆的矩阵M

以颜色敏感度函数在LMS
空间表示的视网膜颜色

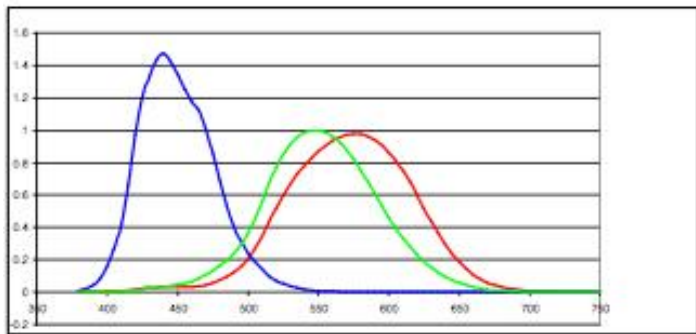
$$\begin{bmatrix} c(l(\lambda)) \\ | \\ | \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} | & | & | \\ c(l_{435}) & c(l_{545}) & c(l_{625}) \\ | & | & | \end{bmatrix} \mathbf{Y} \begin{bmatrix} \int k_{435}(\lambda)l(\lambda)d\lambda \\ \int k_{545}(\lambda)l(\lambda)d\lambda \\ \int k_{625}(\lambda)l(\lambda)d\lambda \end{bmatrix}$$

变换基矩阵

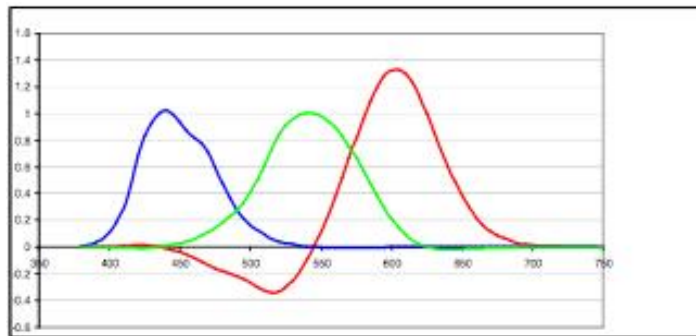
以颜色匹配方式用三元色
混合表示的视网膜颜色



一些重要的颜色空间



人眼光谱敏感度颜色空间,
即LMS颜色空间



CIE RGB颜色空间

这不是实践中常用
的RGB颜色空间



进一步用两种观点看待视网膜颜色

分析: 视网膜颜色是功率谱分布函数和三个颜色匹配函数(也即是光敏感度函数)的点积形成的三个数(一个三维向量)，这是一个颜色测量的过程

合成: 视网膜颜色是三个元色向量的加权和构成的三个数(一个三维向量)，它匹配特定的功率谱分布形成的视网膜感知，这是一个颜色重建的过程

如何制作一个可以测量颜色的设备?

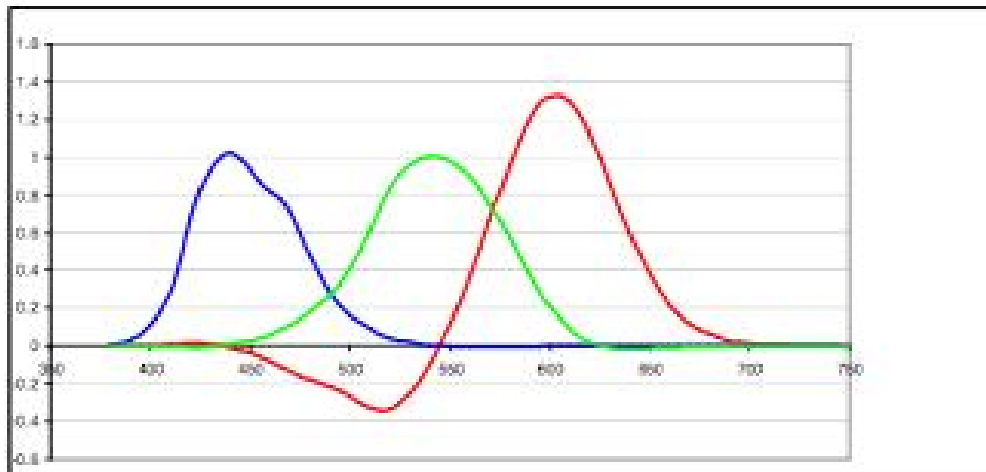


如何制作一个可以测量颜色的设备

可以像人眼一样:

- 选择三种功率谱滤波器 (即三个颜色匹配函数).
- 用它们进行三种测量, 得到三个值

那么, 我们可以用CIE RGB颜色匹配函数吗?



CIE RGB 颜色空间

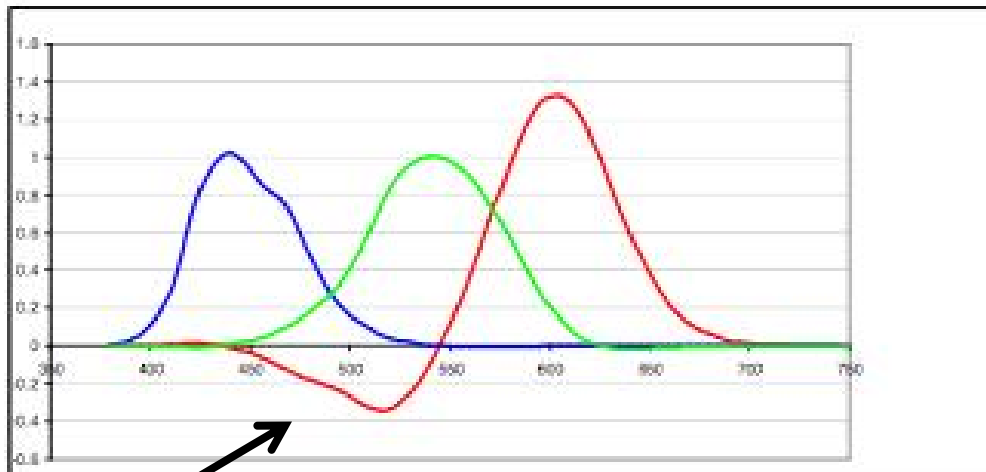


如何制作一个可以测量颜色的设备

可以像人眼一样:

- 选择三种功率谱滤波器 (即三个颜色匹配函数).
- 用它们进行三种测量, 得到三个值

那么, 我们可以用CIE RGB颜色匹配函数吗?



CIE RGB 颜色空间

不行, 这里有负值, 但我们不能从传感器的响应中减去一部分光电子

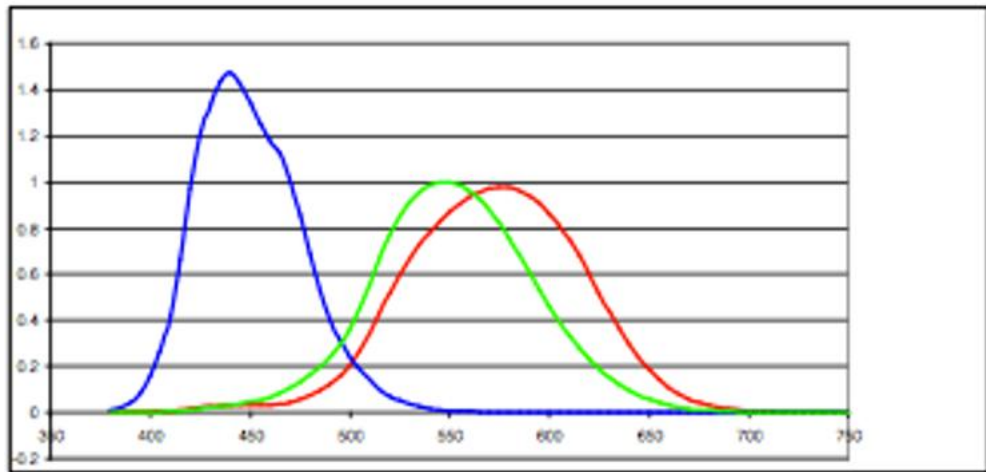


如何制作一个可以测量颜色的设备

可以像人眼一样:

- 选择三种功率谱滤波器 (即三个颜色匹配函数).
- 用它们进行三种测量, 得到三个值

那么, 我们可以用LMS颜色匹配函数吗?



LMS颜色空间



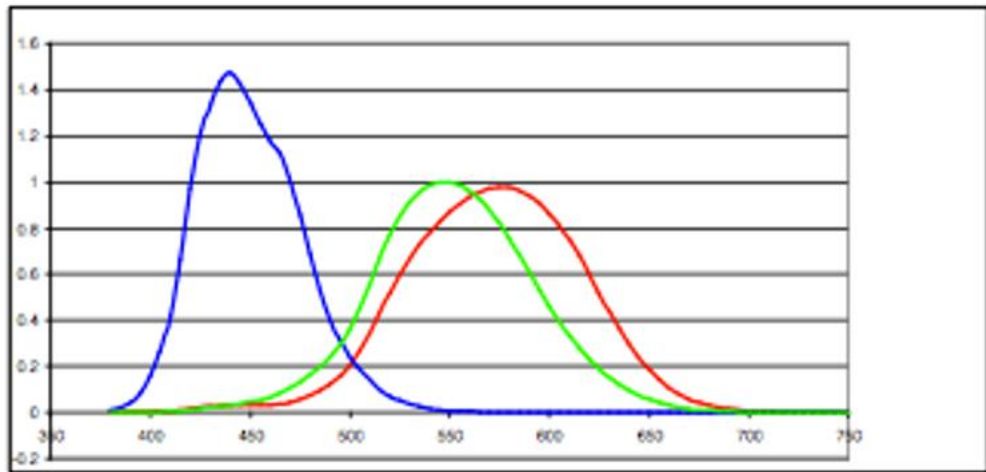
如何制作一个可以测量颜色的设备

可以像人眼一样:

- 选择三种功率谱滤波器 (即三个颜色匹配函数).
- 用它们进行三种测量, 得到三个值

那么, 我们可以用LMS颜色匹配函数吗?

的确可以, 但在进行CIE颜色匹配实验时, 人们还不知道人眼光谱敏感度函数, 也就不了解LMS颜色空间

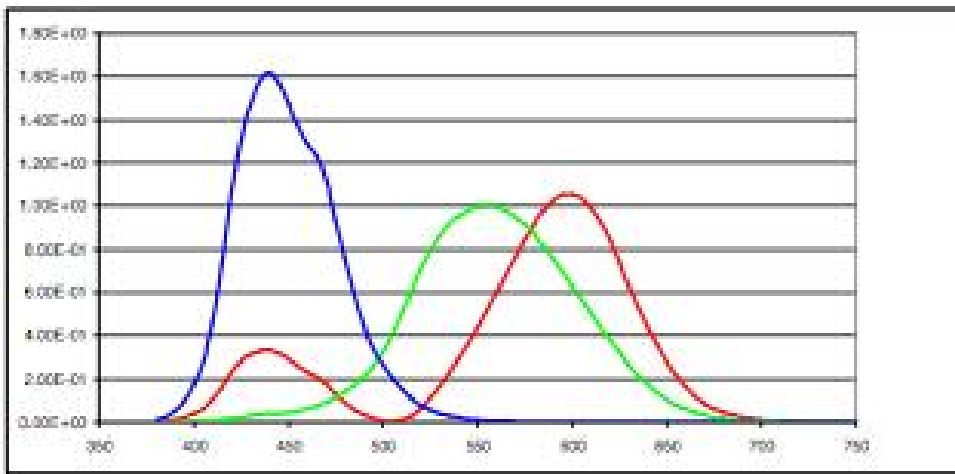


LMS颜色空间



人们构建了CIE XYZ颜色空间

- 基于CIE RGB颜色空间，调整了蓝色和绿色，使得红色没有负数。
- 这是最重要的独立于任何设备的参考颜色空间



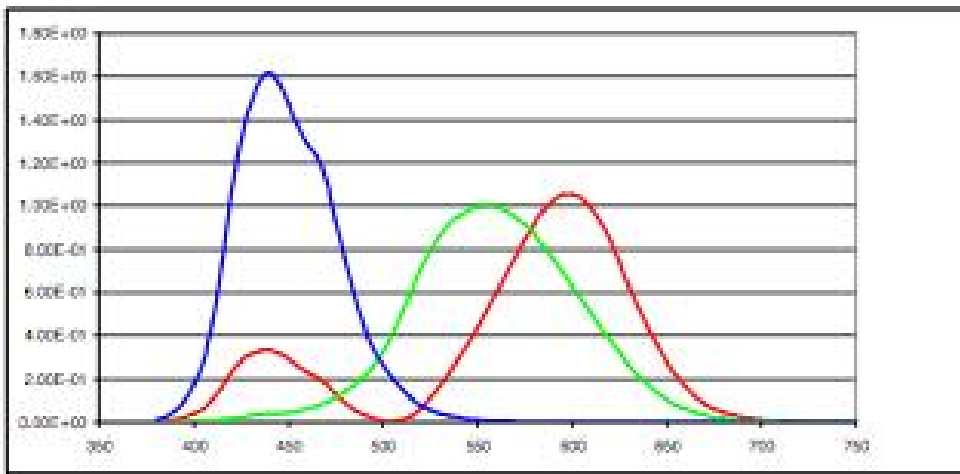
CIE XYZ颜色空间

令人惊讶的事实：诞生了八九十年的CIE XYZ颜色空间的颜色匹配实验仅仅使用了12个人类观测者



人们构建了CIE XYZ颜色空间

- 基于CIE RGB颜色空间，调整了蓝色和绿色，使得红色没有负数。
- 这是最重要的独立于任何设备的参考颜色空间



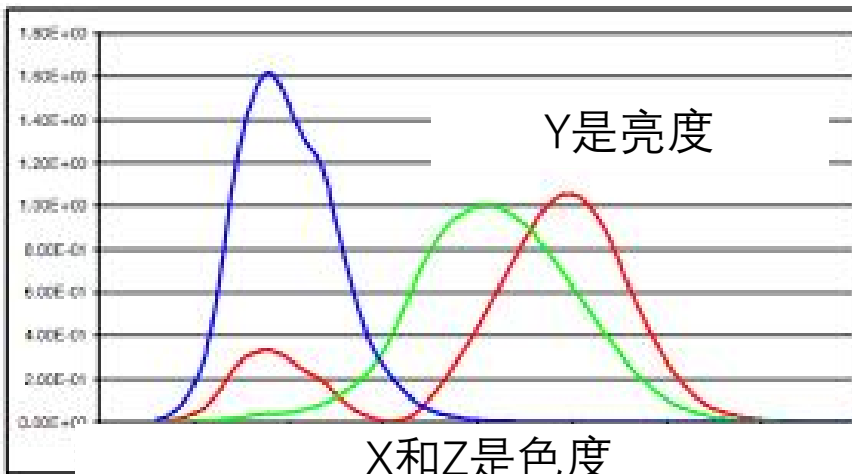
CIE XYZ颜色空间

如何利用CIE XYZ颜色将图像转换为灰色？



人们构建了CIE XYZ颜色空间

- 基于CIE RGB颜色空间，调整了蓝色和绿色，使得红色没有负数。
- 这是最重要的独立于任何设备的参考颜色空间

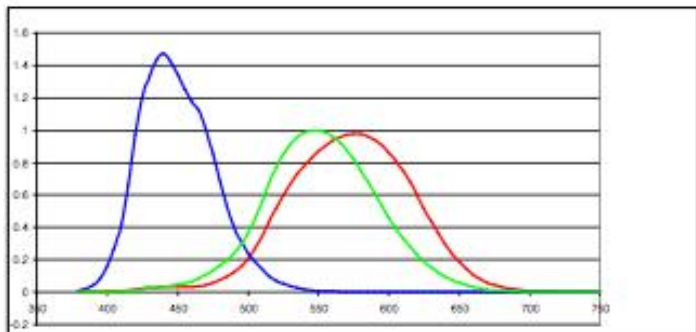


CIE XYZ颜色空间

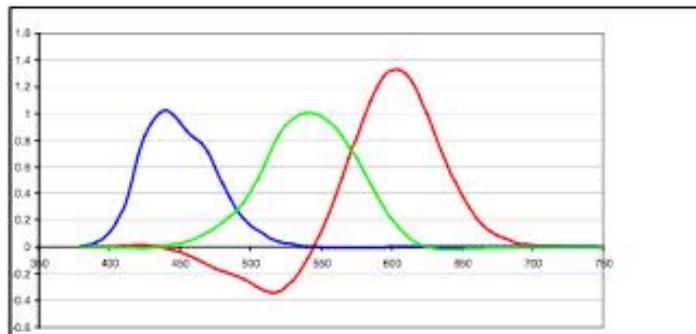
如何利用CIE XYZ颜色将图像转换为灰色？



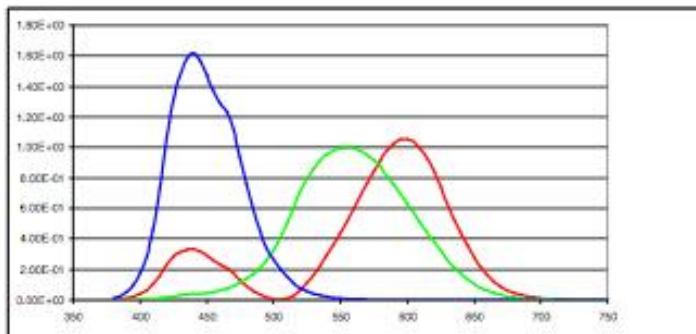
一些重要的颜色空间



LMS颜色空间



CIE RGB颜色空间



CIE XYZ颜色空间



进一步用两种观点看待视网膜颜色

分析: 视网膜颜色是功率谱分布函数和三个颜色匹配函数(也即是光敏感度函数)的点积形成的三个数(一个三维向量)，这是一个颜色测量的过程

合成: 视网膜颜色是三个元色向量的加权和构成的三个数(一个三维向量)，它匹配特定的功率谱分布形成的视网膜感知，这是一个颜色**重建**的过程

如何制作一个可以重建颜色的设备？

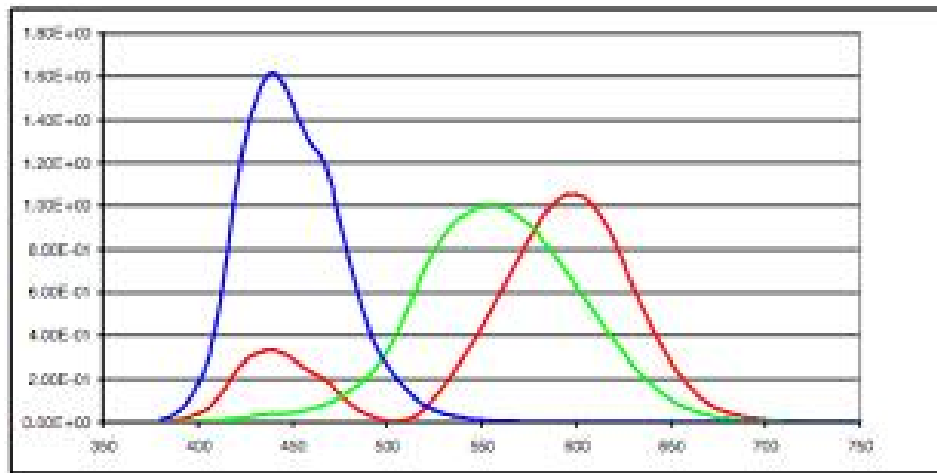


如何制作一个可以重建颜色的设备？

像颜色匹配实验一样：

- 选择三个基本色
- 用这三个基本色的加权和来表示任意颜色
- 注意目标颜色要匹配某种真实的功率谱分布形成的视网膜感知

那么可以用XYZ颜色空间的基本色吗？



CIE XYZ颜色空间



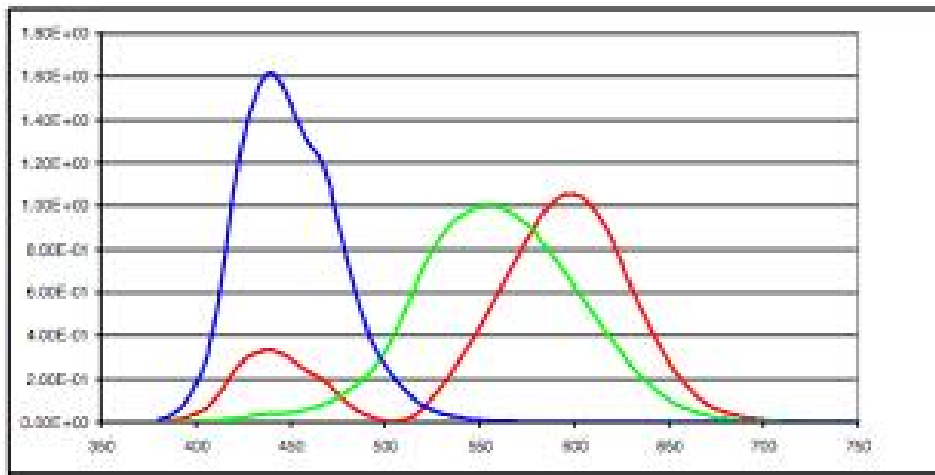
如何制作一个可以重建颜色的设备？

像颜色匹配实验一样：

- 选择三个基本色
- 用这三个基本色的加权和来表示任意颜色
- 注意目标颜色要匹配某种真实的功率谱分布形成的视网膜感知

那么可以用XYZ颜色空间的基本色吗？

- 不行，因为XYZ颜色空间的基本色具有负的功率谱分布，不是真实的颜色，我们无法构造这种原色并把它们混叠在一起。
- LMS颜色空间基本色的情况和之前说的类似

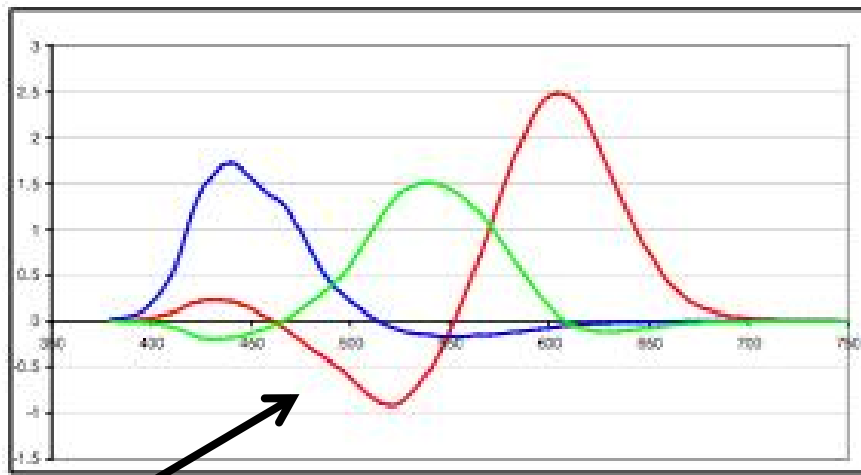


CIE XYZ颜色空间



标准RGB颜色空间(sRGB颜色空间)

- 由微软和惠普在1996年提出
- 基于当时的CRT显示器的特性
- 和CIE RGB类似，但不完全等同



也有负值

sRGB颜色空间

虽然它冠以“标准”二字，但通常你拿到的RGB图像却来自于不同的RGB颜色空间



阅读资料-标准RGB颜色空间(sRGB颜色空间)

sRGB图像在保存之前，会通过一个特定的色调再现曲线（通常称为伽马曲线）进行处理，这个处理并不是线性的。

色调再现曲线是色彩管理的一个重要部分，用于调整图像的亮部和暗部，以便在不同的显示设备上呈现出预期的视觉效果。sRGB色彩空间定义了一个标准的曲线，用于将图像数据从线性（光的实际强度）转换为非线性（更符合人眼感知的方式），这有助于在各种设备上保持颜色和亮度的一致性。

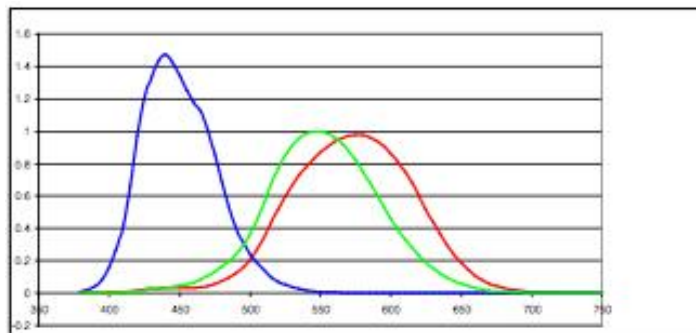
$$\text{非线性像素值 } C_{\text{non-linear}} = \begin{cases} 12.92 \cdot C_{\text{linear}}, & C_{\text{linear}} \leq 0.0031308 \\ (1 + 0.055) \cdot C_{\text{linear}}^{\frac{1}{2.4}} - 0.055, & C_{\text{linear}} \geq 0.0031308 \end{cases}$$

线性原始像素值

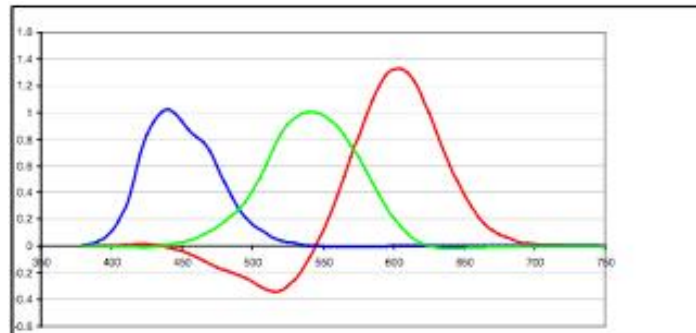
参考第一季课程《从光线到图像-相机成像的原理》第4课《图像传感器与ISP》



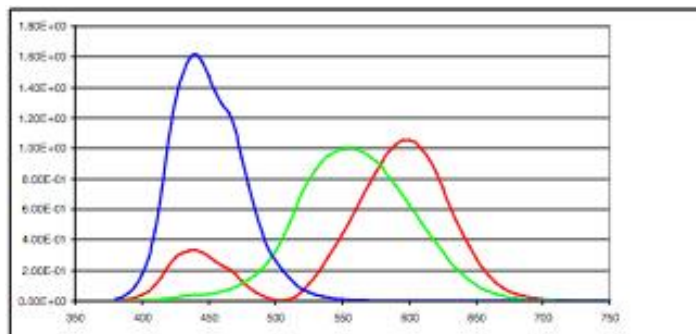
一些重要的颜色空间



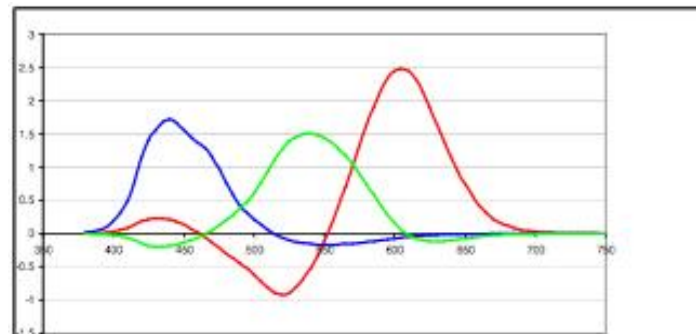
LMS颜色空间



CIE RGB 颜色空间



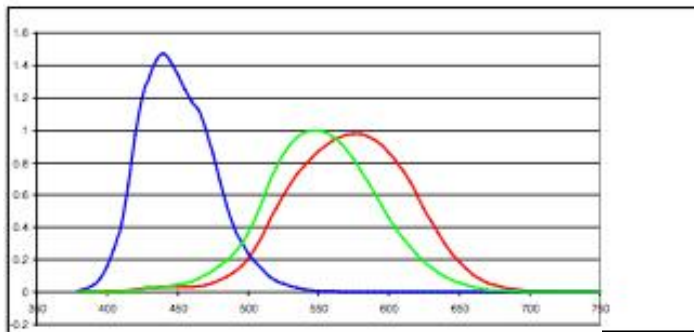
CIE XYZ 颜色空间



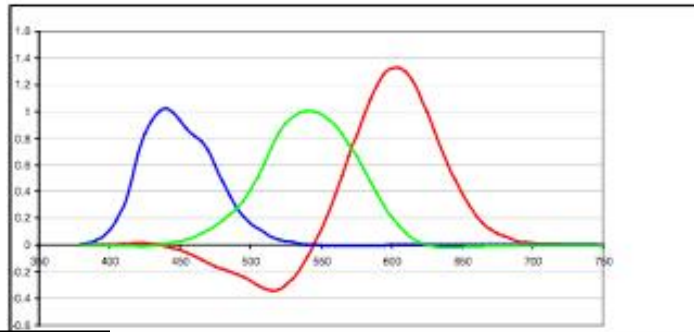
sRGB 颜色空间



一些重要的颜色空间

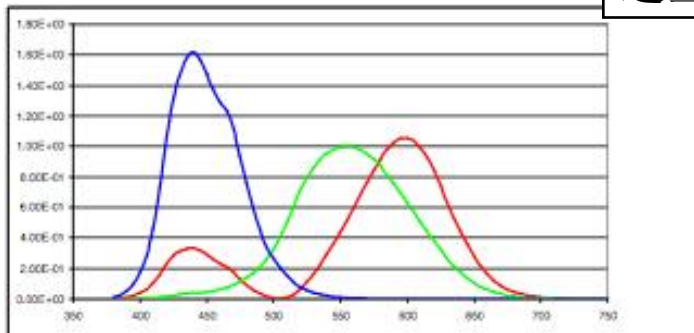


LMS颜色空间

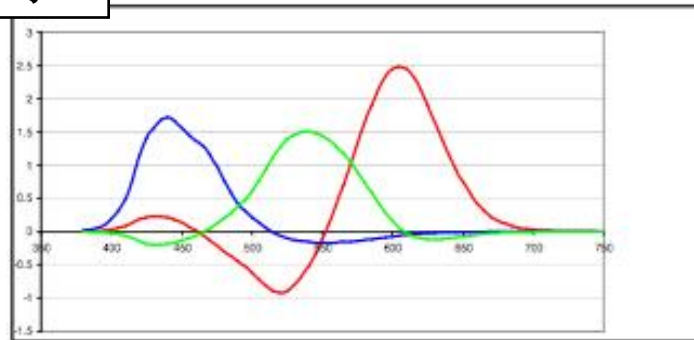


CIE RGB 颜色空间

有办法关联和比较
这些颜色空间吗？



CIE XYZ 颜色空间



sRGB 颜色空间



目录



1. 色彩基础知识



2. 视网膜颜色空间



3. 颜色匹配



4. 线性颜色空间



5. 色度



6. 颜色校正



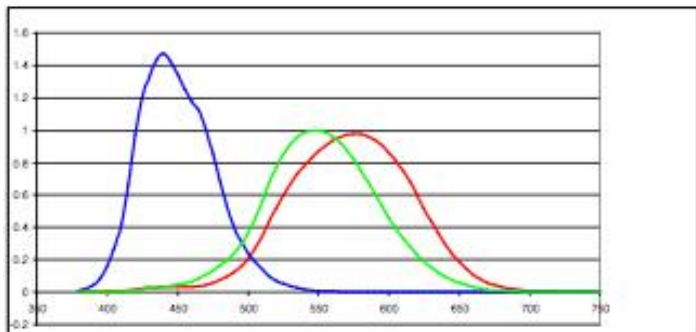
7. 非线性颜色空间



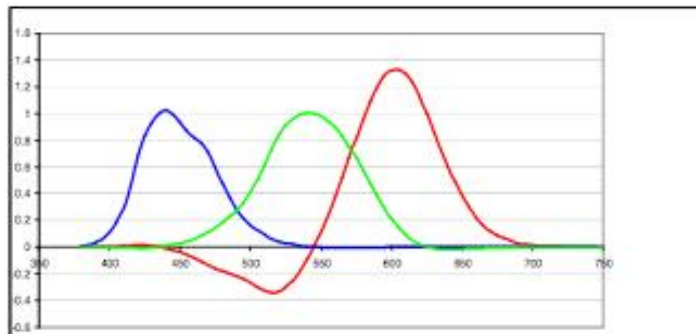
8. 颜色重建思考



目前看到的颜色空间都是三维的，毕竟难关联和比较它们

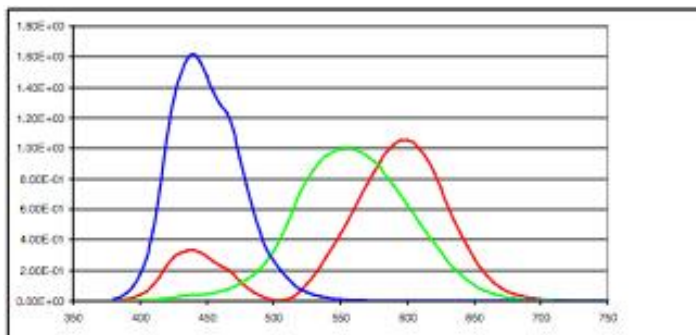


LMS颜色空间

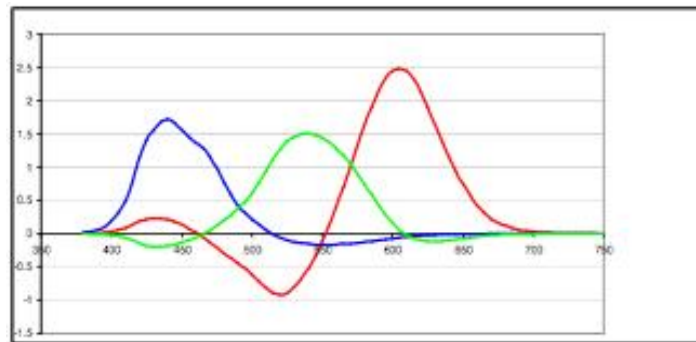


CIE RGB 颜色空间

有更好的表示方法吗？



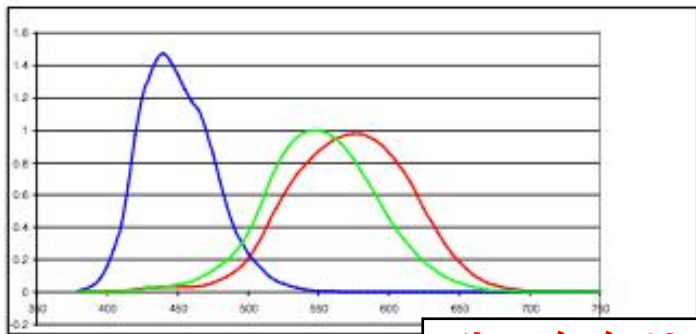
CIE XYZ 颜色空间



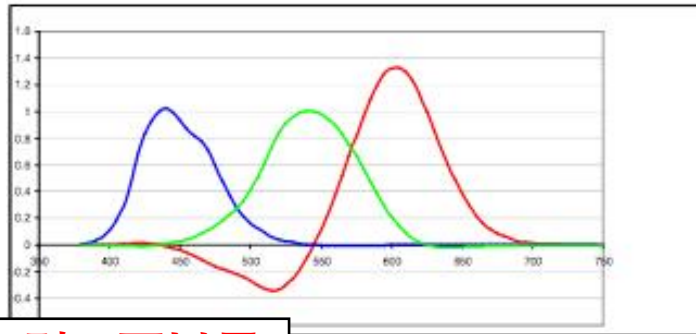
sRGB 颜色空间



目前看到的颜色空间都是三维的，毕竟难关联和比较它们

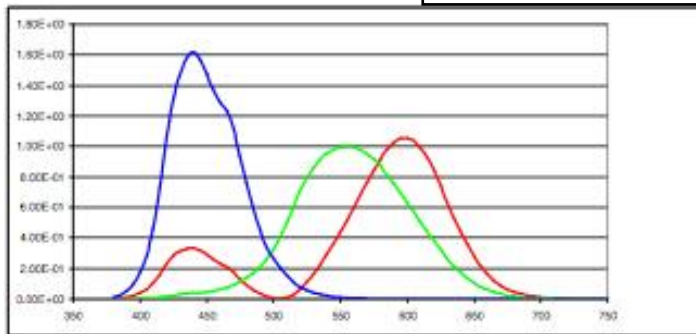


LMS颜色空间

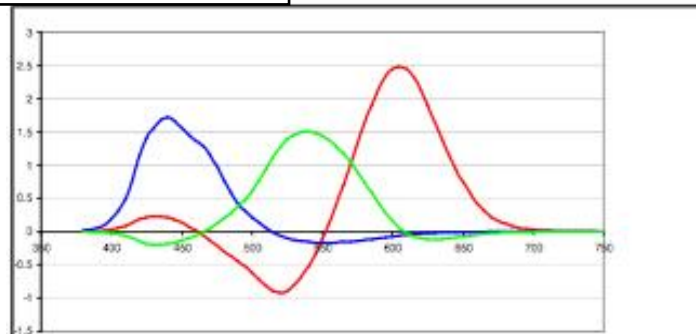


RGB 颜色空间

为了仅仅比较颜色的区别，可以用二维的方式来表现



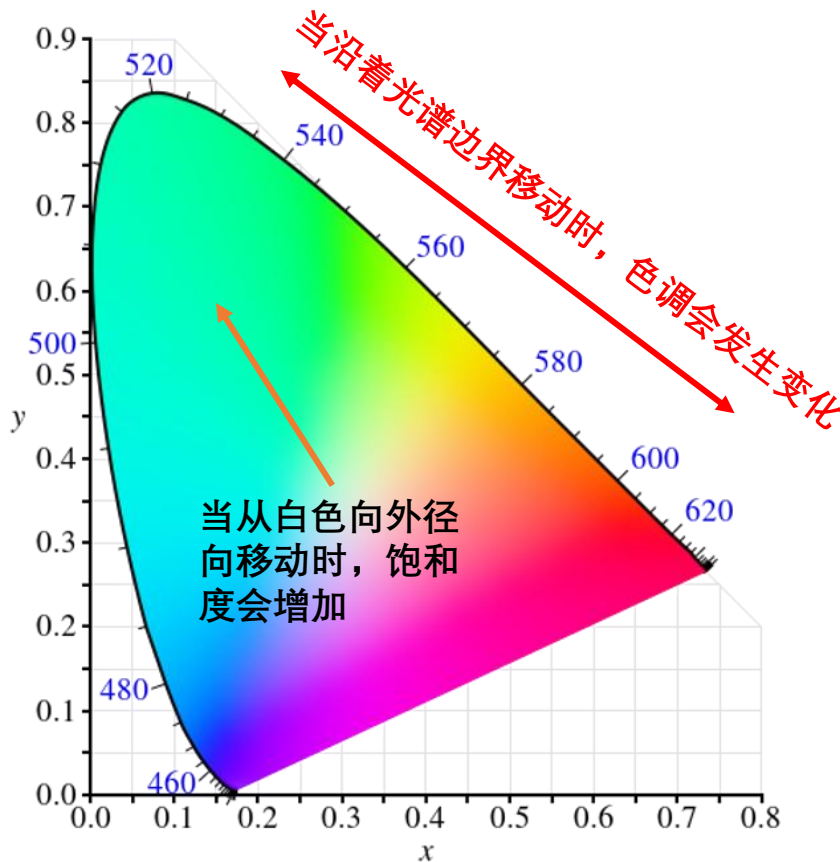
CIE XYZ 颜色空间



sRGB 颜色空间



CIE xy空间是3D 视网膜色彩空间的二维透视投影，我们仅用它来描述色度



$$x = \frac{X}{X + Y + Z}$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z}$$

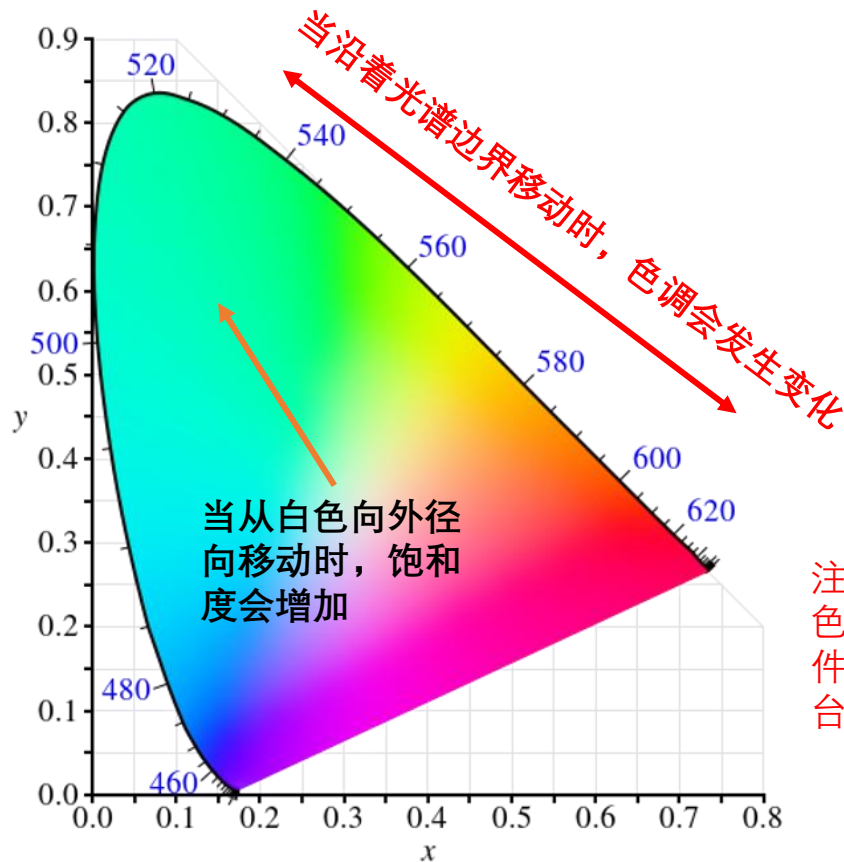
$$(X, Y, Z) \longleftrightarrow \underbrace{(x, y, Y)}_{\text{色度}}$$

亮度/明度

CIE xy空间是3D 视网膜色彩空间的二维透视投影



CIE xy 颜色空间被称为色度空间，下图也叫做CIE xy色度图



$$x = \frac{X}{X + Y + Z}$$

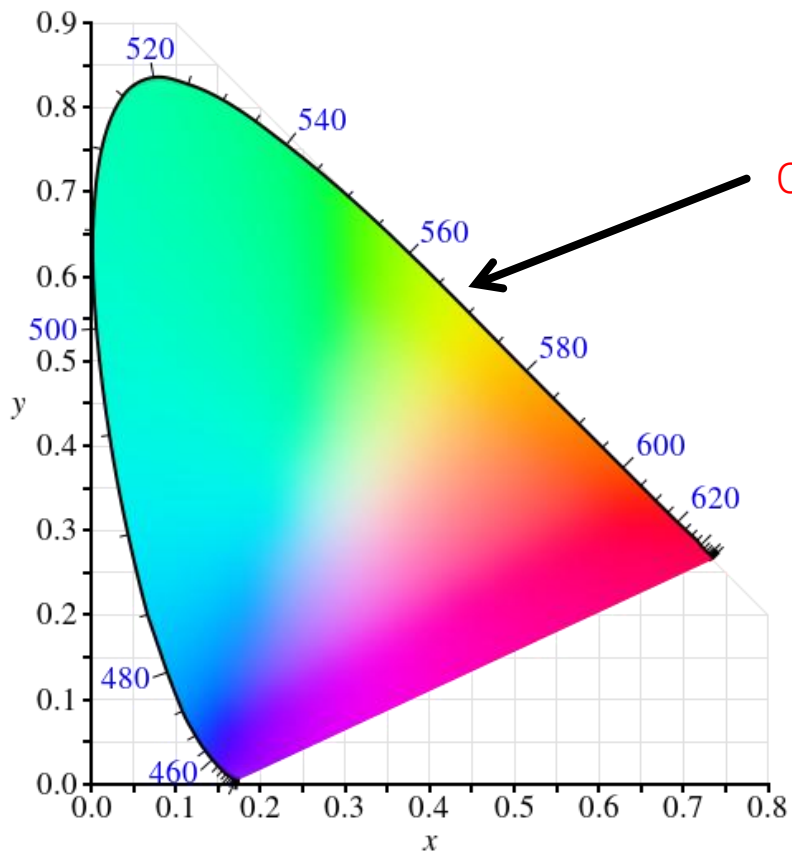
$$y = \frac{Y}{X + Y + Z}$$

$$(X, Y, Z) \longleftrightarrow (\underline{x}, y, Y)$$

注意你在你自己的电脑上观察色度图时，图中看到的颜色可能会误导你，因为不同的显示设备，不同的原始文件中的色彩管理配置文件都会影响你看到的颜色。换一台设备你可能会看到不同的色度图颜色



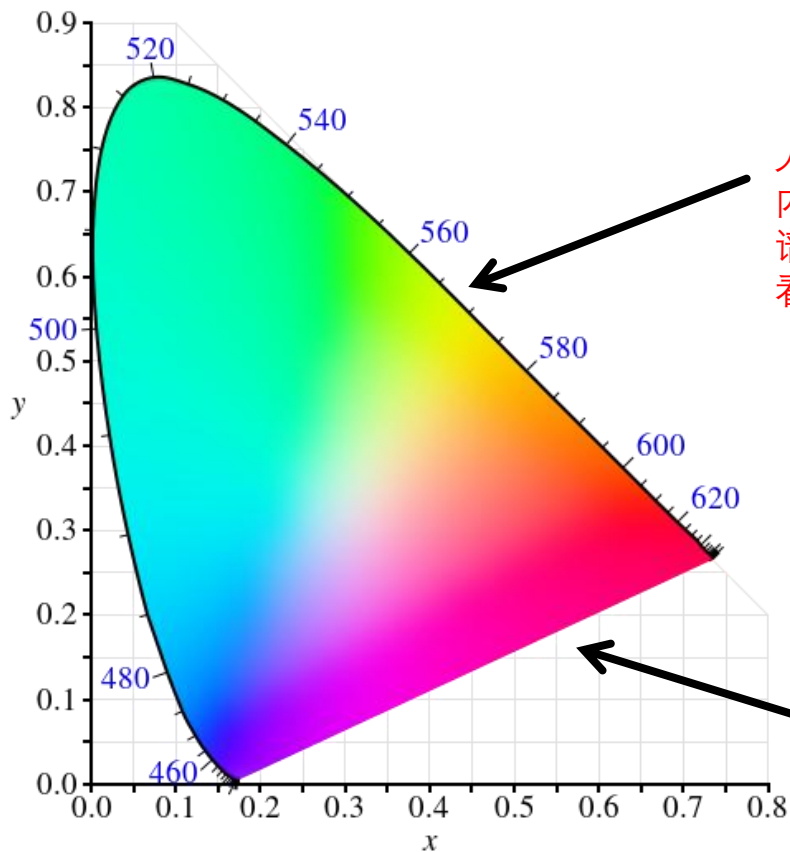
CIE xy 色度图



CIE xy色度图的边界代表了什么?



CIE xy 色度图



人类眼睛能够感知的色彩的极限，即可见光范围内的纯色光以及紫边线（连接蓝色和红色端的光谱颜色）。这个边界内的所有颜色表示人眼可以看到的颜色。

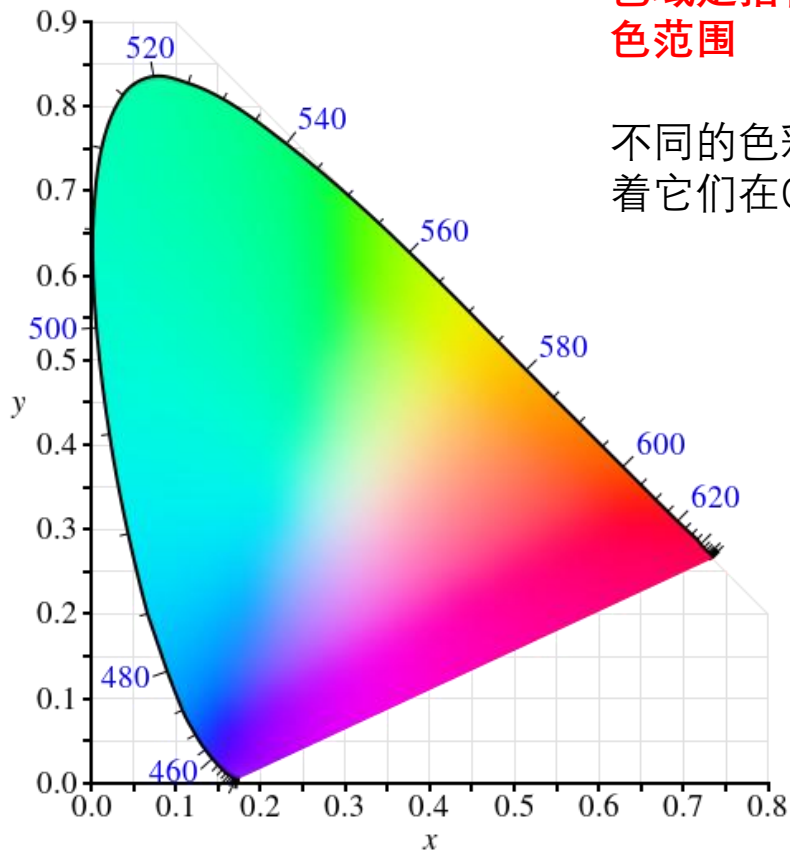
紫边线：光谱轨迹的两端（红色和蓝色端）通过一条直线连接起来，这条线称为紫边线，它代表了混合蓝光和红光所能产生的非纯色光



色域 (Color Gamuts)

色域是指在特定的色彩空间内，能够被显示或再现的颜色范围

不同的色彩空间能够显示或再现的颜色范围不同，意味着它们在CIE xy色度图上覆盖区域不同



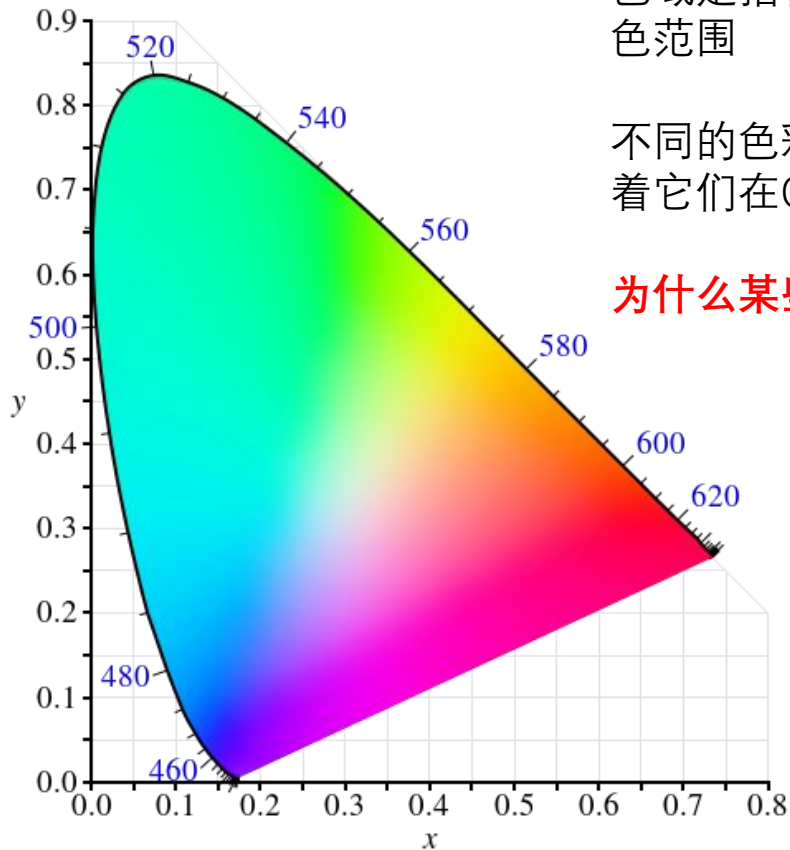


色域 (Color Gamuts)

色域是指在特定的色彩空间内，能够被显示或再现的颜色范围

不同的色彩空间能够显示或再现的颜色范围不同，意味着它们在CIE xy色度图上覆盖区域不同

为什么某些色彩空间不能覆盖CIE xy色度图中的所有颜色？



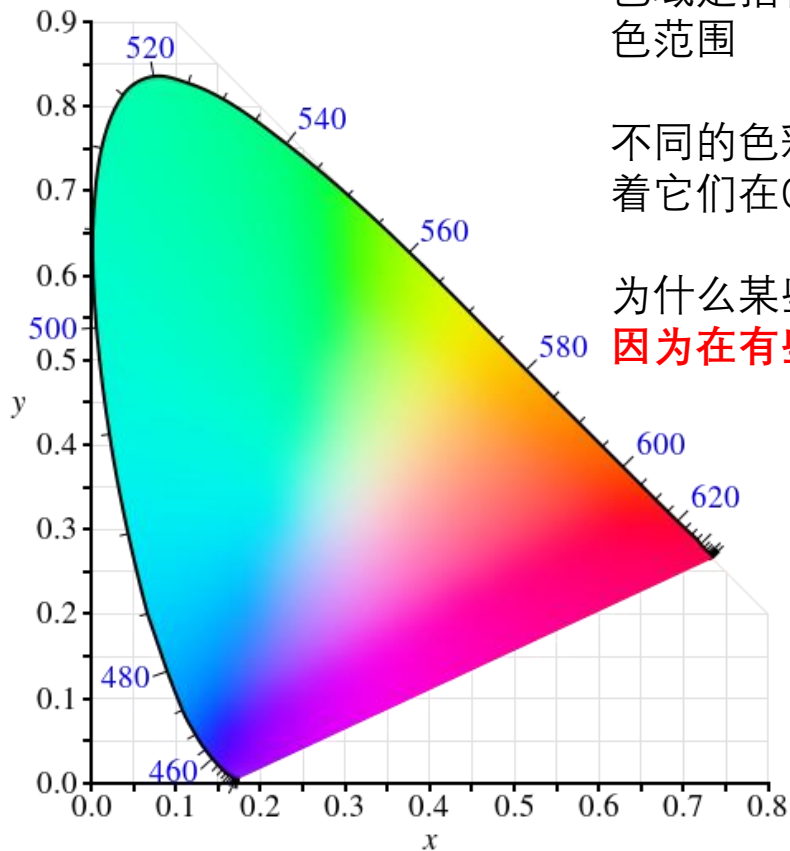


色域 (Color Gamuts)

色域是指在特定的色彩空间内，能够被显示或再现的颜色范围

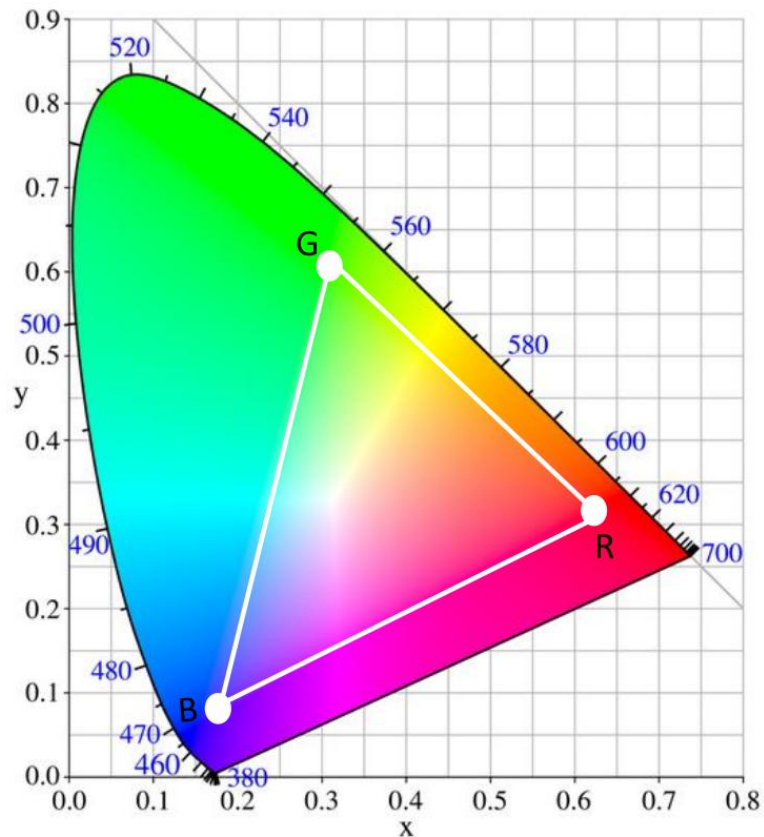
不同的色彩空间能够显示或再现的颜色范围不同，意味着它们在CIE xy色度图上覆盖区域不同

为什么某些色彩空间不能覆盖CIE xy色度图中的所有颜色？
因为在有些颜色空间中，需要使用负的权重值





色域 (Color Gamuts)



不同的色彩空间能够显示或再现的颜色范围不同，意味着它们在CIE xy色度图上覆盖区域不同

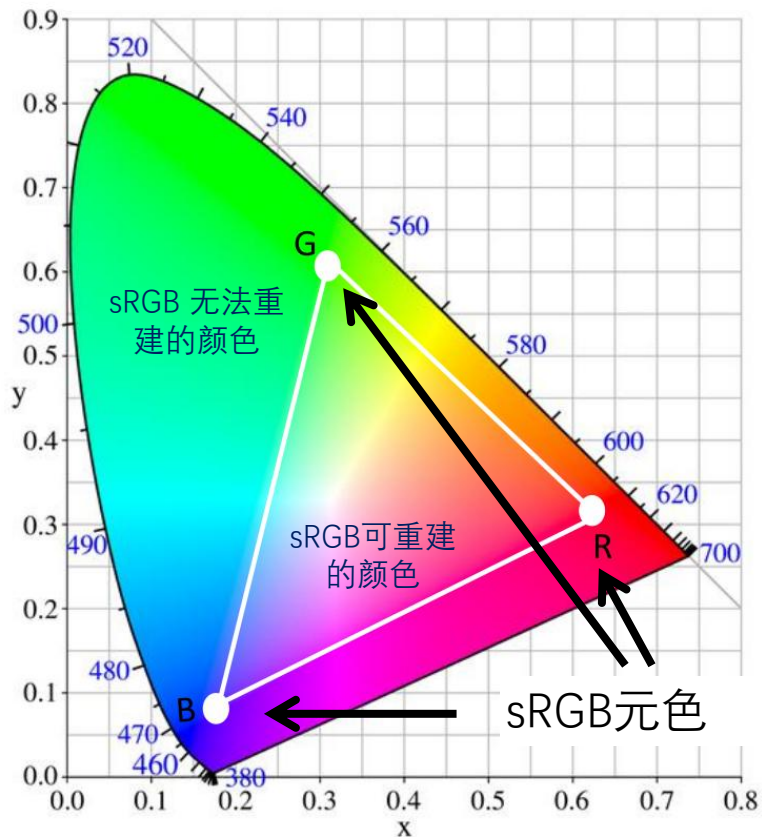
sRGB色彩空间有三个元色，在CIE xy色度图上表现为三个点，构成一个三角形

那么：

- 这三个点在哪里？
- 三角形内的意义是？
- 三角形外的意义是？

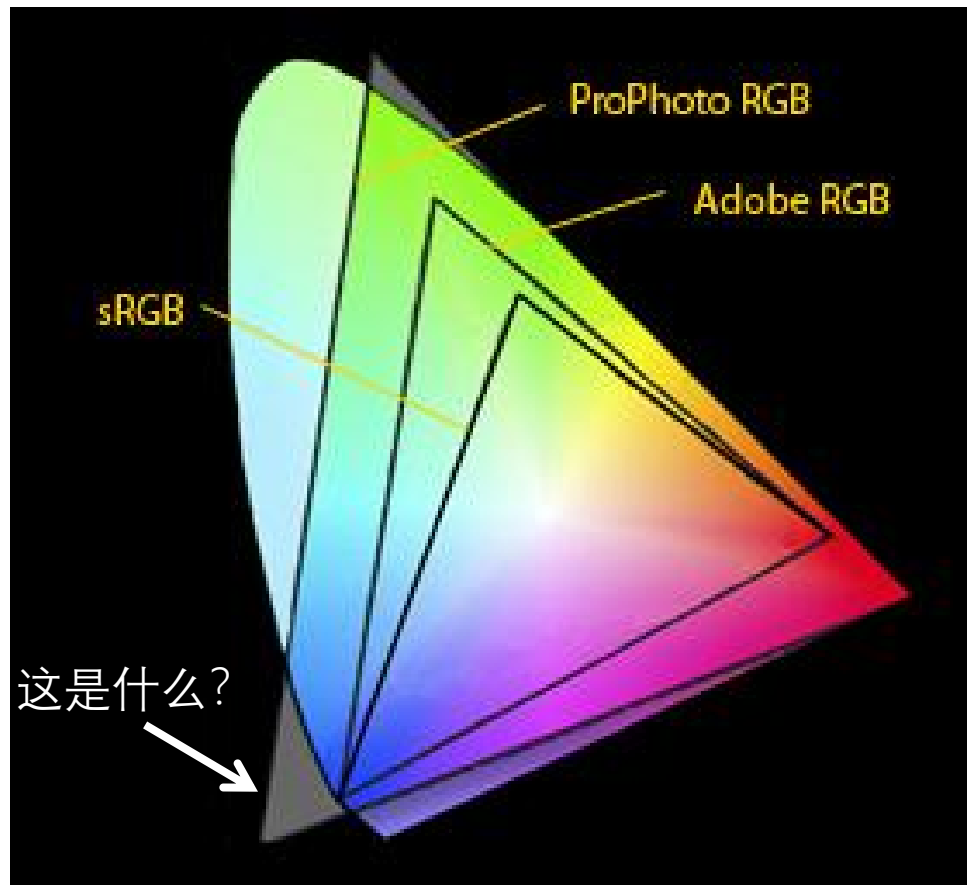


sRGB色域 (sRGB Color Gamuts)



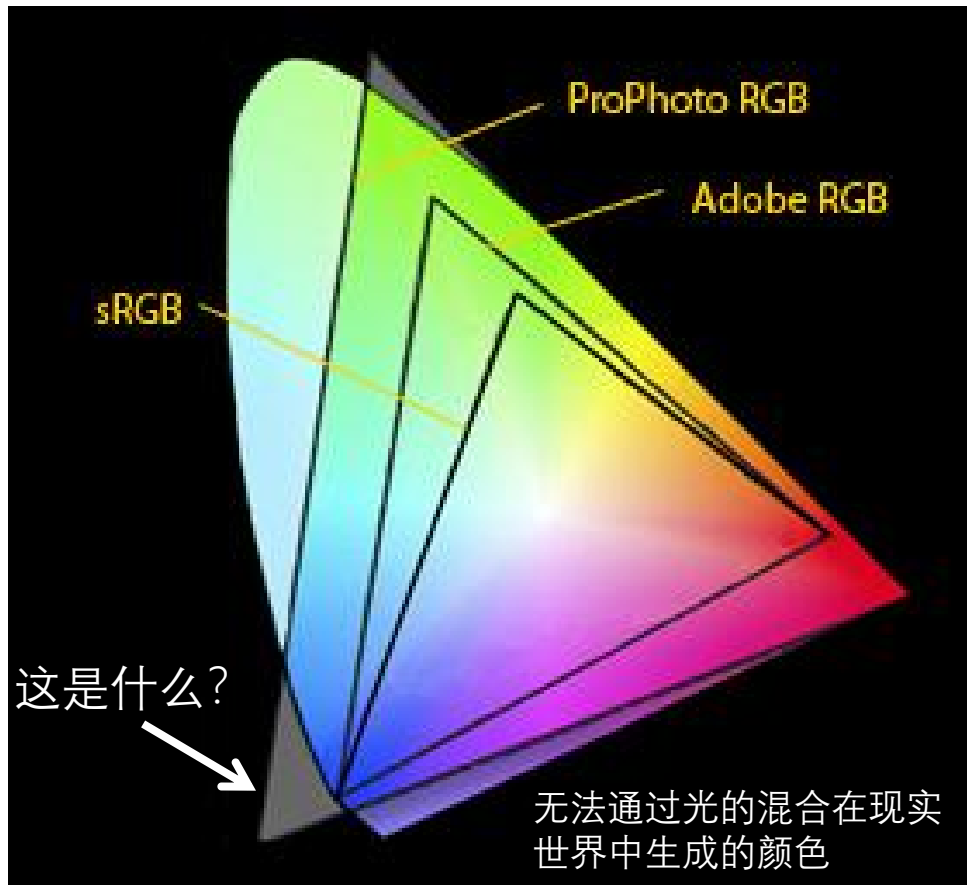


各种常见工业RGB空间的色域



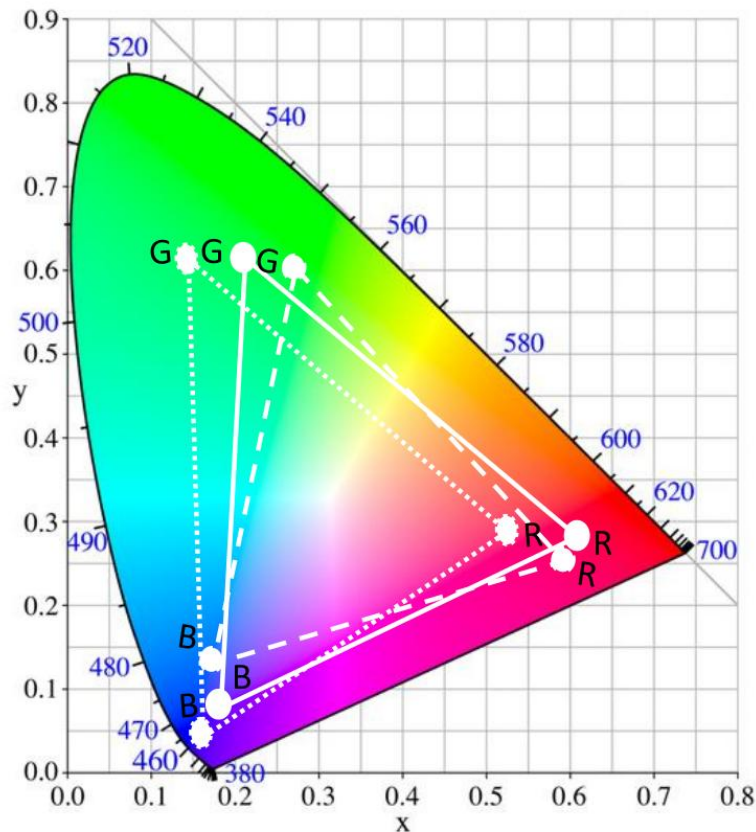


各种常见工业RGB空间的色域

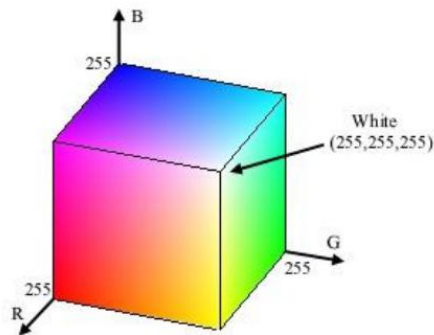




各种RGB色彩空间的问题



设备 1 ———
设备 2
设备 3 - - -



如果不同设备选择的基础色(元色)不同, 那么RGB值是没有意义的



小结：一些关于颜色空间的必须知道的信息

分析: 视网膜颜色是功率谱分布函数和三个颜色匹配函数(也即是光敏感度函数)的点积形成的三个数（一个三维向量），这是一个颜色测量的过程

合成: 视网膜颜色是三个元色向量的加权和构成的三个数（一个三维向量），它匹配特定的功率谱分布形成的视网膜感知，这是一个颜色重建的过程

基础问题: 分析光谱（如相机、眼睛）与合成光谱（如显示器）不可能完全相同。如果不引入负值，就不可能编码所有可能的颜色

从分析角度：CIE XYZ是视网膜颜色的一种表示方法，它只需要正坐标值。但是为了合成这个空间中的颜色值，却需要具有负值的元色。

从合成角度：RGB是另一种颜色表示方法，它的元色都是实际的物理原色（红、绿、蓝）。然而，为了在RGB空间中表示某些人眼可以感知的颜色，我们实际上需要负的坐标。这再次说明了用有限的RGB原色来表示眼睛或相机捕捉到的所有颜色的局限性。



小结：一些关于颜色空间的必须知道的信息

分析: 视网膜颜色是功率谱分布函数和三个颜色匹配函数(也即是光敏感度函数)的点积形成的三个数（一个三维向量），这是一个颜色测量的过程

合成: 视网膜颜色是三个元色向量的加权和构成的三个数（一个三维向量），它匹配特定的功率谱分布形成的视网膜感知，这是一个颜色重建的过程

实践问题: 许多不同的设备有不同的RGB颜色，很多时候我们并不清楚它们具体的元色和对应的颜色空间，**这使得在不同的设备间对齐颜色非常困难。**



三个设备拍摄的同场景具有不同的颜色



使用具有相同设置的3个不同相机拍摄的同场景的图像，**据称**是在sRGB空间中



目录



1. 色彩基础知识



2. 视网膜颜色空间



3. 颜色匹配



4. 线性颜色空间



5. 色度



6. 颜色校正



7. 非线性颜色空间



8. 颜色重建思考



颜色标定

在不同的RGB颜色空间中转换，可以对源RGB向量应用平移和缩放完成

$$c' = M \cdot c + t$$

变换后的RGB向量

源RGB向量

这个等式中各个量的维度是？



颜色标定

在不同的RGB颜色空间中转换，可以对源RGB向量应用平移和缩放完成

$$\overset{3 \times 1}{c'} = \overset{3 \times 3}{M} \cdot \overset{3 \times 1}{c} + \overset{3 \times 1}{t}$$

变换后的RGB向量

源RGB向量

这个等式中各个量的维度是？

缩放矩阵是3x3，平移向量是3x1，颜色向量是3x1



颜色标定

在不同的RGB颜色空间中转换，可以对源RGB向量应用平移和缩放完成

$$\overset{3 \times 1}{c'} = \overset{3 \times 3}{M} \cdot \overset{3 \times 1}{c} + \overset{3 \times 1}{t}$$

变换后的RGB向量 源RGB向量

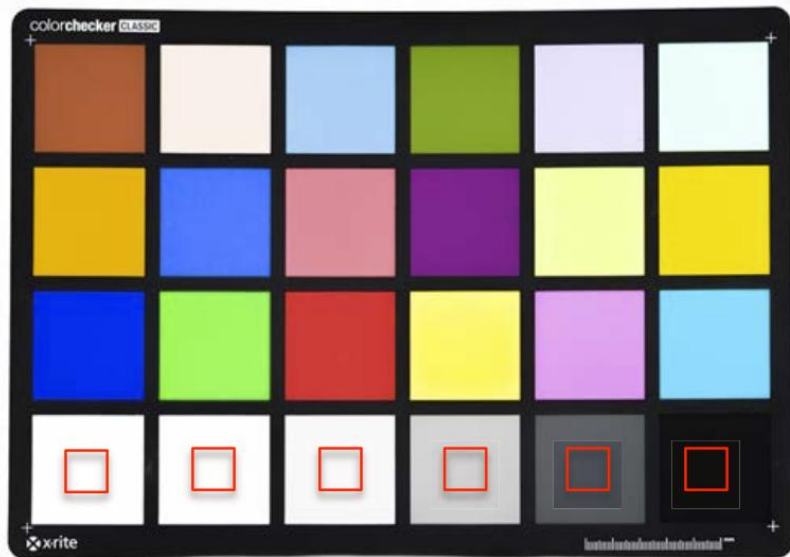
这个等式中各个量的维度是？

缩放矩阵是3x3，平移向量是3x1，颜色向量是3x1

那么如何确定目标颜色向量呢，我们需要先标定出M和t



可以用一个标准色卡进行



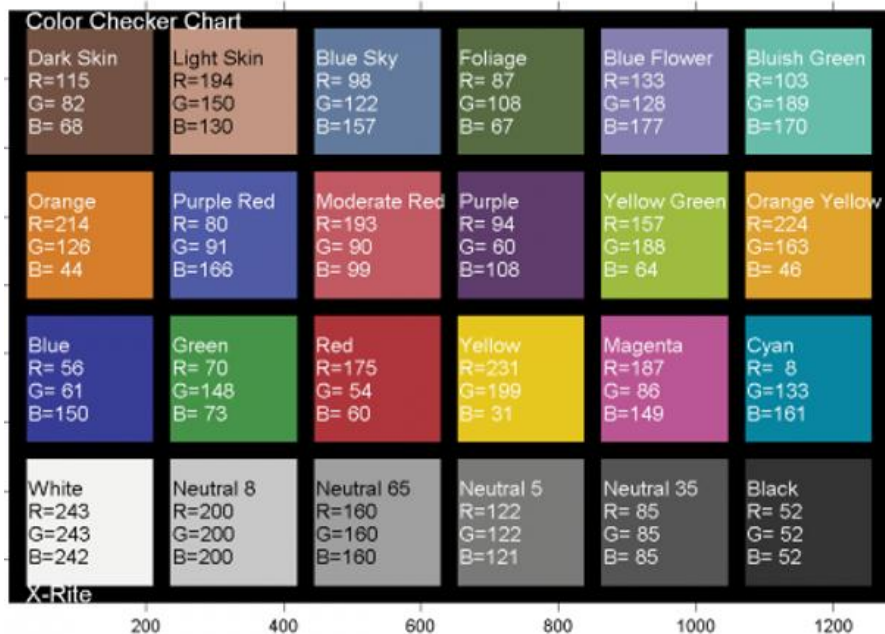
色卡上每一块都具有已知的CIE XYZ颜色坐标

色卡可用于:

1. 颜色标定
2. 使用最后一行来做辐射度标定(传感器的响应曲线标定)



可以用一个标准色卡进行



色卡上每一块都具有已知的CIE XYZ颜色坐标

色卡可用于:

1. 颜色标定
2. 使用最后一行来做辐射度标定(传感器的响应曲线标定)



可以用一个标准色卡进行

Color Checker Chart					
Dark Skin R=115 G= 82 B= 68	Light Skin R=194 G=150 B=130	Blue Sky R= 98 G=122 B=157	Foliage R= 87 G=108 B= 67	Blue Flower R=133 G=128 B=177	Bluish Green R=103 G=189 B=170
Orange R=214 G=126 B= 44	Purple Red R= 80 G= 91 B=166	Moderate Red R=193 G= 90 B= 99	Purple R= 94 G= 60 B=108	Yellow Green R=157 G=188 B= 64	Orange Yellow R=224 G=163 B= 46
Blue R= 56 G= 61 B=150	Green R= 70 G=148 B= 73	Red R=175 G= 54 B= 60	Yellow R=231 G=199 B= 31	Magenta R=187 G= 86 B=149	Cyan R= 8 G=133 B=161
White R=243 G=243 B=242	Neutral 8 R=200 G=200 B=200	Neutral 65 R=160 G=160 B=160	Neutral 5 R=122 G=122 B=121	Neutral 35 R= 85 G= 85 B= 85	Black R= 52 G= 52 B= 52
X-Rite					
200	400	600	800	1000	1200

色卡上每一块都具有已知的CIE XYZ颜色坐标

可以使用任何色卡的图像进行颜色标定吗？

- 需要是线性图像(Raw图像)!
- 如果你没有线性图像，首先需要进行辐射度标定，这样才能将非线性图像转为线性图像

色卡可用于:

1. 颜色标定
2. 使用最后一行来做辐射度标定(传感器的响应曲线标定)



颜色标定

在不同的RGB颜色空间中转换，可以对源RGB向量应用平移和缩放完成

$$\overset{3 \times 1}{c'} = \overset{3 \times 3}{M} \cdot \overset{3 \times 1}{c} + \overset{3 \times 1}{t}$$

变换后的RGB向量 源RGB向量

这个等式中各个量的维度是？

缩放矩阵是3x3， 平移向量是3x1， 颜色向量是3x1

那么如何确定目标颜色向量呢，我们需要先标定出M和t

那么拍摄了色卡后，如何求出M和t呢？



颜色标定 – 求M和t的方法

在不同的RGB颜色空间中转换，可以对源RGB向量应用平移和缩放完成

$$c' = \begin{bmatrix} M & t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c \\ 1 \end{bmatrix}$$



颜色标定 – 求M和t的方法

在不同的RGB颜色空间中转换，可以对源RGB向量应用平移和缩放完成

$$c' = \overset{3 \times 1}{[M} \quad \overset{3 \times 4}{t}] \overset{4 \times 1}{\begin{bmatrix} c \\ 1 \end{bmatrix}}$$

在3x1的向量尾部加上1变为齐次向量



颜色标定 – 求M和t的方法

在不同的RGB颜色空间中转换，可以对源RGB向量应用平移和缩放完成

$$c' = \underbrace{\overset{3 \times 1}{[M} \quad \overset{3 \times 4}{t}]}_T \underbrace{\overset{4 \times 1}{\begin{bmatrix} c \\ 1 \end{bmatrix}}}_C$$



颜色标定

将颜色向量变为齐次坐标，并对它应用一个仿射变换

$$c' = T \cdot C$$

非齐次的目标颜色向量
3x1

整合了缩放
平移的仿射
变换矩阵
3X4

原始颜色向量的
齐次表示 4X1

如何求解上述变换矩阵T?



确定仿射变换矩阵

首先展开颜色向量间的线性变换

$$c' = T \cdot C \quad \Rightarrow \quad \overset{3 \times 1}{\begin{bmatrix} r' \\ g' \\ b' \end{bmatrix}} = \overset{3 \times 4}{\begin{bmatrix} t_1 & t_2 & t_3 & t_4 \\ t_5 & t_6 & t_7 & t_8 \\ t_9 & t_{10} & t_{11} & t_{12} \end{bmatrix}} \overset{4 \times 1}{\begin{bmatrix} r \\ g \\ b \\ 1 \end{bmatrix}}$$



确定仿射变换矩阵

将变换矩阵变为一个列向量，并重整如下

这是一个常见技巧，不过我跟你一样，每次看到都觉得太精秒了☺

$$\begin{array}{c} \text{3x1} \\ \begin{bmatrix} r' \\ g' \\ b' \end{bmatrix} \end{array} = \begin{array}{c} \text{3x12} \\ \begin{bmatrix} r & g & b & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & r & g & b & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & r & g & b & 1 \end{bmatrix} \end{array} \begin{array}{c} \text{12x1} \\ \begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \\ t_4 \\ t_5 \\ t_6 \\ t_7 \\ t_8 \\ t_9 \\ t_{10} \\ t_{11} \\ t_{12} \end{bmatrix} \end{array}$$



确定仿射变换矩阵

将变换矩阵变为一个列向量，并重整如下

这是一个常见技巧，不过我跟你一样，每次看到都觉得太精秒了☺

$$\begin{array}{c} 3 \times 1 \\ \begin{bmatrix} r' \\ g' \\ b' \end{bmatrix} \end{array} = \begin{array}{c} 3 \times 12 \\ \begin{bmatrix} r & g & b & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & r & g & b & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & r & g & b & 1 \end{bmatrix} \end{array} \begin{array}{c} 12 \times 1 \\ \begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \\ t_4 \\ t_5 \\ t_6 \\ t_7 \\ t_8 \\ t_9 \\ t_{10} \\ t_{11} \\ t_{12} \end{bmatrix} \end{array}$$

12个未知数

一个颜色块已知3对关系



确定仿射变换矩阵

像下面一样，组合多个颜色块的信息才能求解

$$\begin{array}{c} \text{Nx3x1} \\ \begin{bmatrix} r' \\ g' \\ b' \\ \vdots \\ r' \\ g' \\ b' \end{bmatrix} \end{array} = \begin{array}{c} \text{Nx3x12} \\ \begin{bmatrix} r & g & b & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & r & g & b & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & r & g & b & 1 \\ \vdots & & & & \vdots & & & & \vdots & & & \\ r & g & b & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & r & g & b & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & r & g & b & 1 \end{bmatrix} \end{array} \begin{array}{c} \text{12x1} \\ \begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \\ t_4 \\ t_5 \\ t_6 \\ t_7 \\ t_8 \\ t_9 \\ t_{10} \\ t_{11} \\ t_{12} \end{bmatrix} \end{array}$$

$\underbrace{\hspace{1.5cm}}_b$

$\underbrace{\hspace{15cm}}_A$

$\underbrace{\hspace{1.5cm}}_x$



求解

将问题转换为一个最小二乘问题，误差为：

$$E_{LLS} = ||Ax - b||^2$$

展开上面式子

$$E_{LLS} = x^T(A^T A)x - 2x^T(A^T b) + ||b||^2$$

最小化上述误差：

设导数为 0

$$(A^T A)x = A^T b$$

求解x

$$x = (A^T A)^{-1} A^T b$$

如果使用Matlab，可以用下面代码轻松搞定：

$$x = A \setminus b$$

注意：我们不直接求逆矩阵
可以用高斯消元法、LU分解、
SVD分解等方法求解，目前我们
不需要考虑这些数学问题

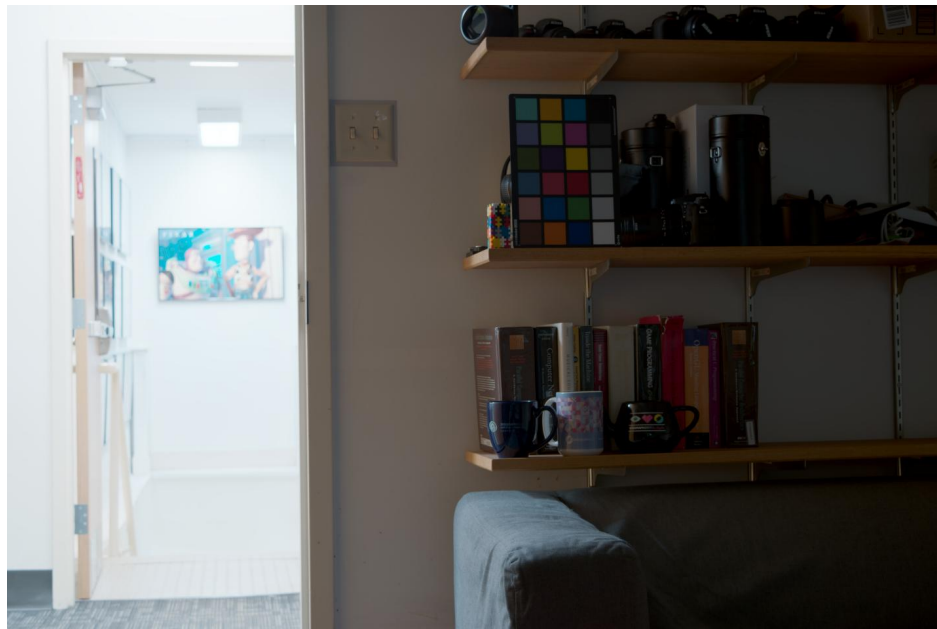




一个颜色校正的示例



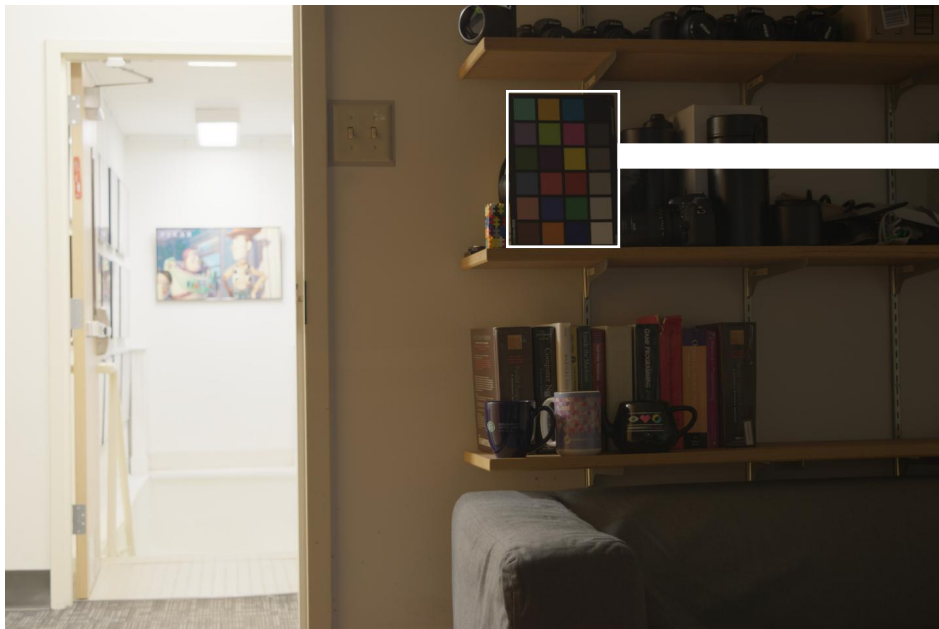
原始图像



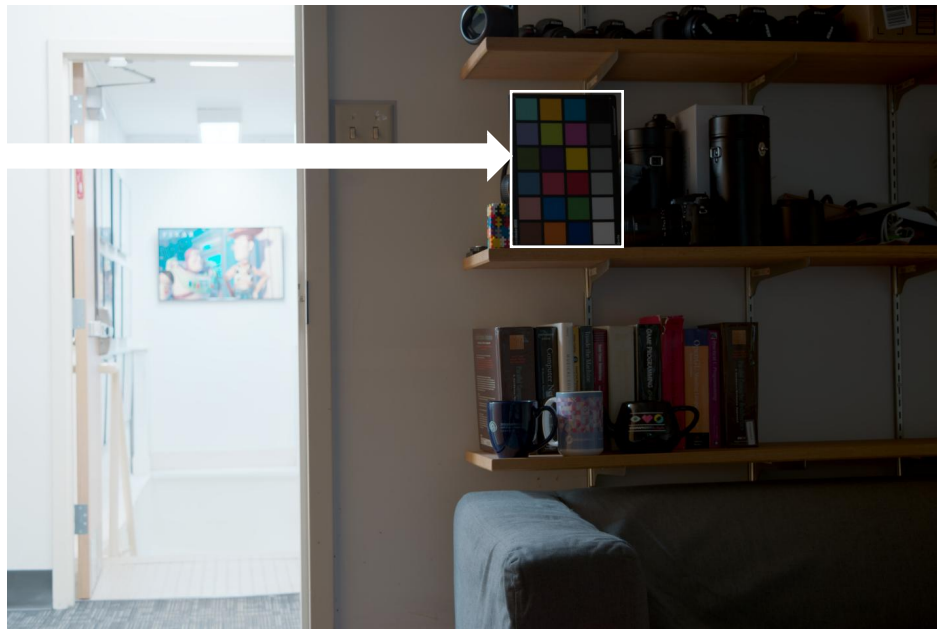
颜色校正后的图像



一个颜色校正的示例



原始图像



颜色校正后的图像



一个颜色校正的示例

2 颜色校正和白平衡 (20分)

对于这部分，你将使用在第1部分末尾选择的HDR图像。如图2左侧所示，你的色调映射图像在房间的暗部分往往会呈现出橙色调。这是因为房间内的非常低的光线和房间外光线的大对比度使得相机的自动白平衡失效。此外，即使白平衡工作得很完美，我们对各种图像合成所处的颜色空间也没有非常小心。

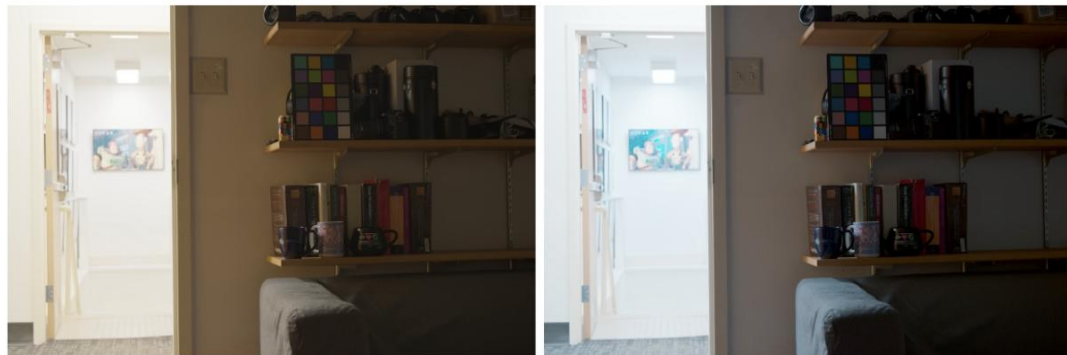
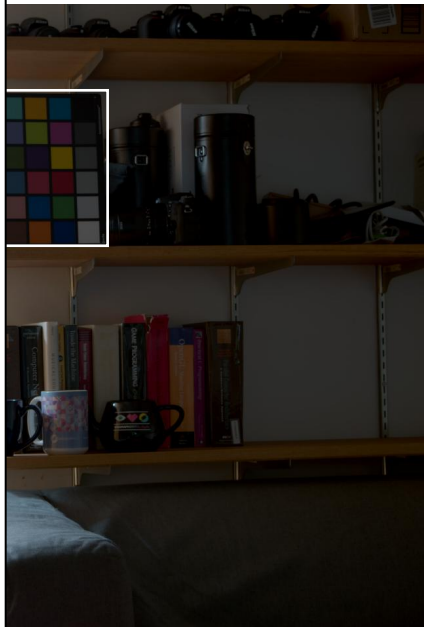


图2：未经颜色校正（左）和经过颜色校正（右）的色调映射HDR图像。

你可以应用我们在计算摄影学课程第1季《从光线到图像-相机成像的原理》中讨论的任何自动白平衡算法来改善这个问题。但是，由于图像中包含一个色卡（图3），我们可以做得更好，进行更准确的颜色校正。

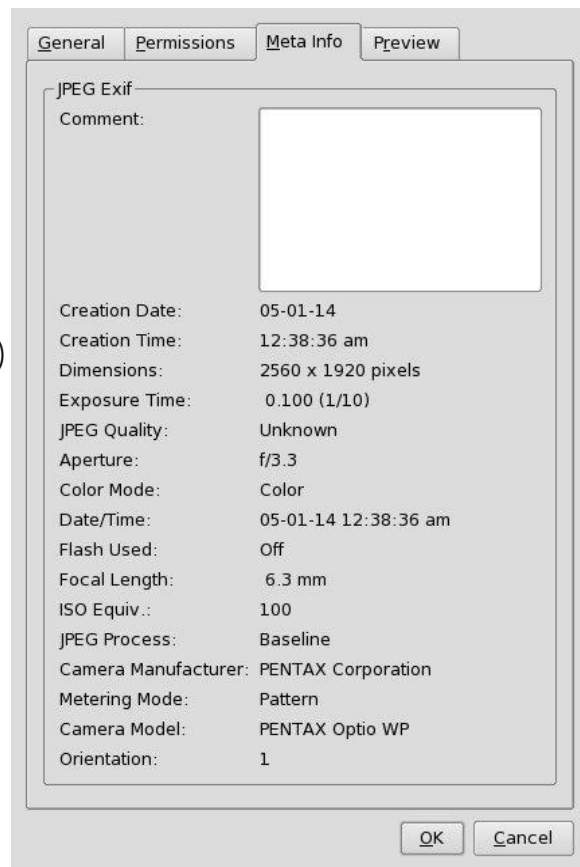


的图像



可以从图像的EXIF信息中寻找线索

如果你无法进行颜色标定，请查看图像的EXIF数据（如果有的话）
通常包含有关色调再现曲线和**色彩空间**的信息。





显示器的色彩配置文件



色度计：校准的设备，用于测量标准参考颜色空间（通常是CIE XYZ）中显示的光亮度和色彩值

校色软件会比较测量的色彩响应与标准值之间的差异并做出自动修正。修正后会产生一个显示器色彩配置文件并存在系统内。以后计算机每次启动时，会自动加载此配置文件，这样显示器便能依据此配置文件正确地显示色彩了

校色软件会在显示器上显示标准的RGB数值图像，同时读取色度计的实际光亮度 and 色彩响应值



目录



1. 色彩基础知识



2. 视网膜颜色空间



3. 颜色匹配



4. 线性颜色空间



5. 色度



6. 颜色校正



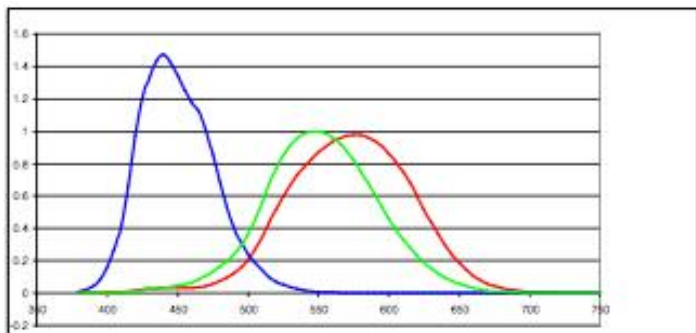
7. 非线性颜色空间



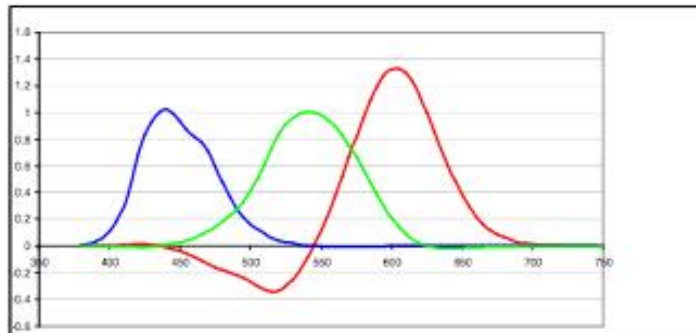
8. 颜色重建思考



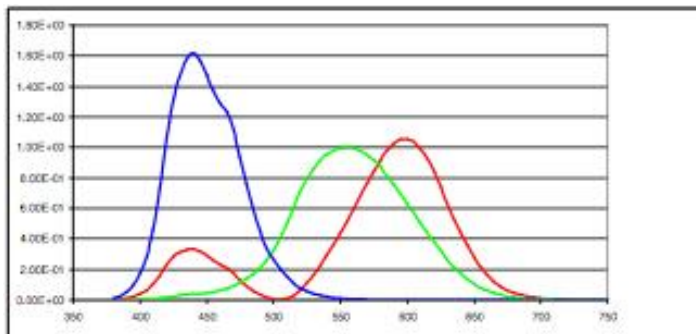
一些重要的线性颜色空间



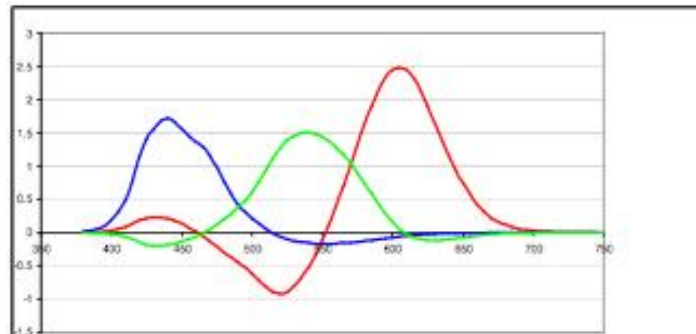
LMS颜色空间



CIE RGB 颜色空间



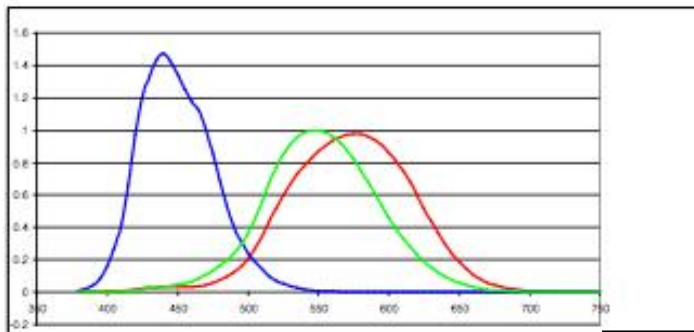
CIE XYZ 颜色空间



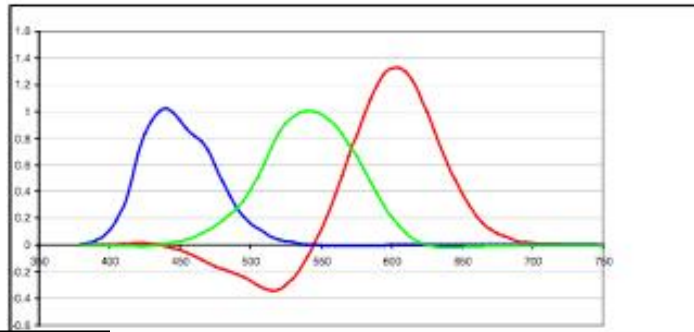
sRGB 颜色空间



一些重要的线性颜色空间

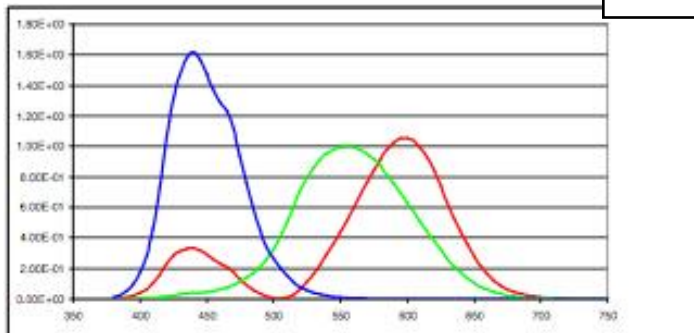


LMS颜色空间

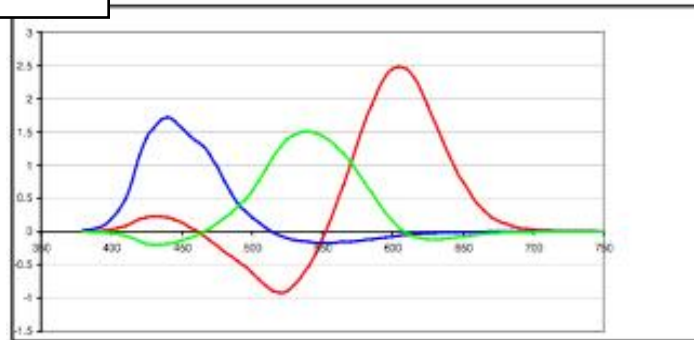


CIE RGB 颜色空间

那么有非线性的颜色空间吗？



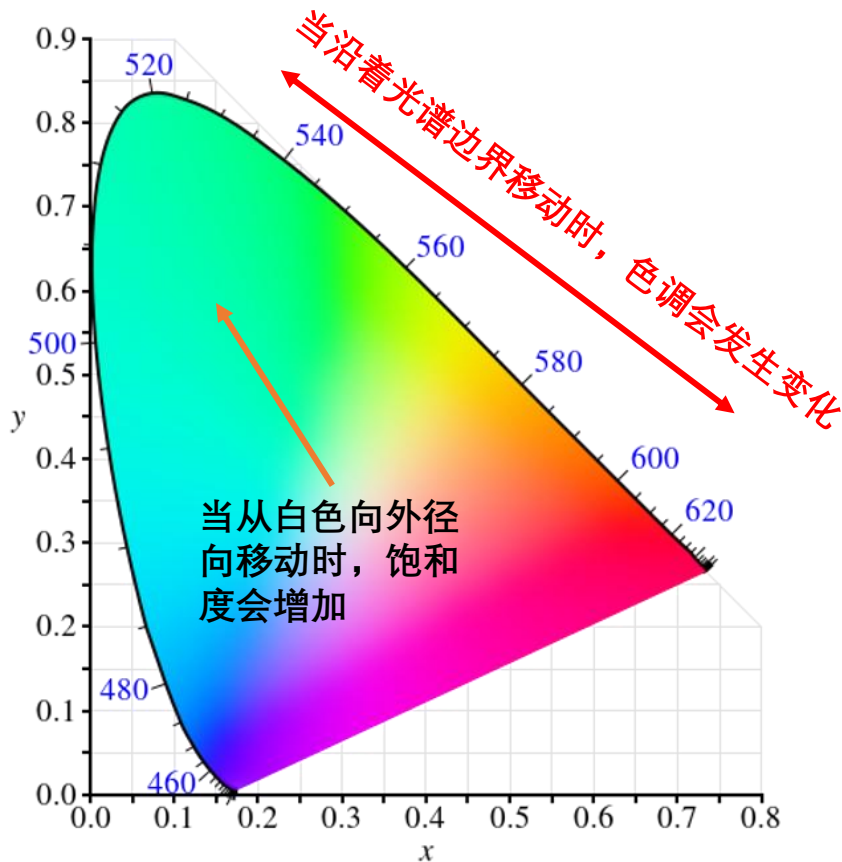
CIE XYZ 颜色空间



sRGB 颜色空间



CIE xy 颜色空间 - 色度空间



$$x = \frac{X}{X + Y + Z}$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z}$$

$$(X, Y, Z) \longleftrightarrow (x, y, Y)$$

色度
↑
亮度/明度

CIE xyY颜色空间就是非线性的



但CIE xyY颜色空间不是均匀颜色空间

先看看均匀颜色空间：

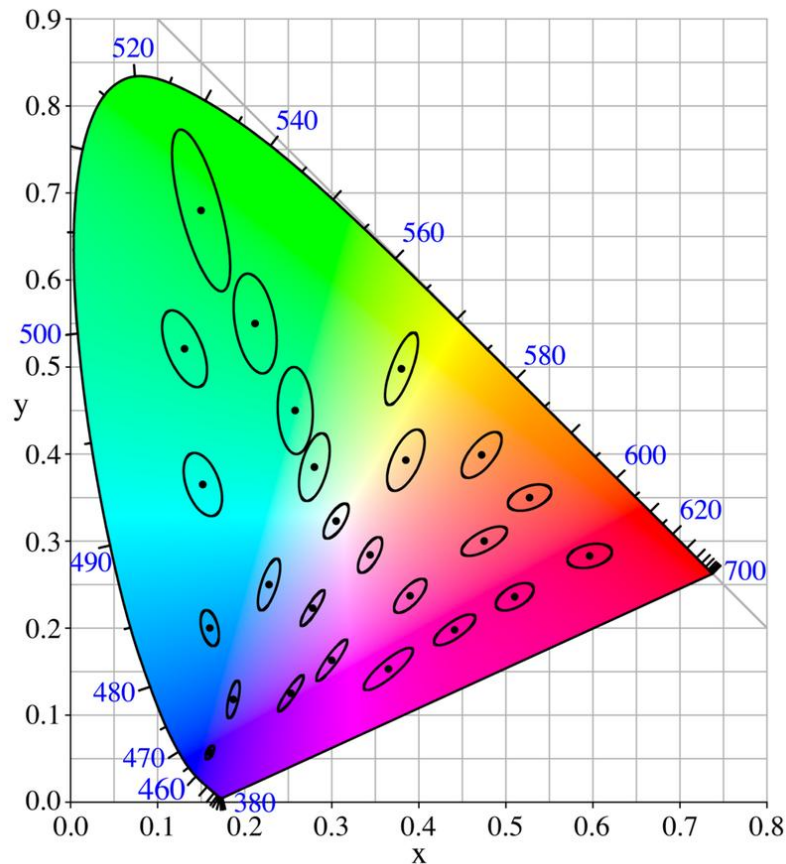
寻找映射 $F: R^3 \rightarrow R^3$ ，使得映射后的颜色的感知距离可以用欧式距离来描述：

$$d(\vec{c}, \vec{c}') \approx \underbrace{\|F(\vec{c}) - F(\vec{c}')\|_2}_{\text{两个新颜色向量}}$$

用F变换得到的颜色空间是均匀的



MacAdam Ellipses - 麦卡当椭圆



每个麦卡当椭圆都是色度空间中无法感知颜色差异的区域：

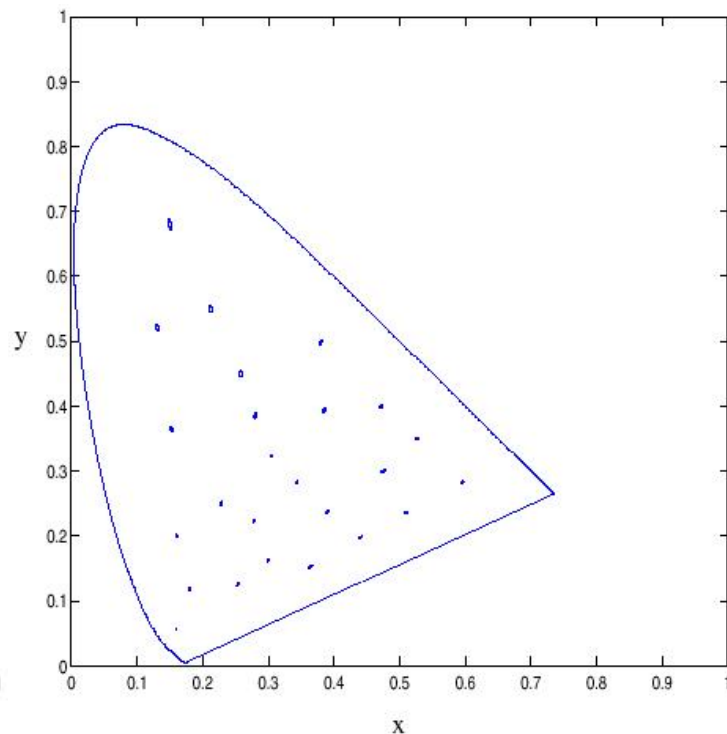
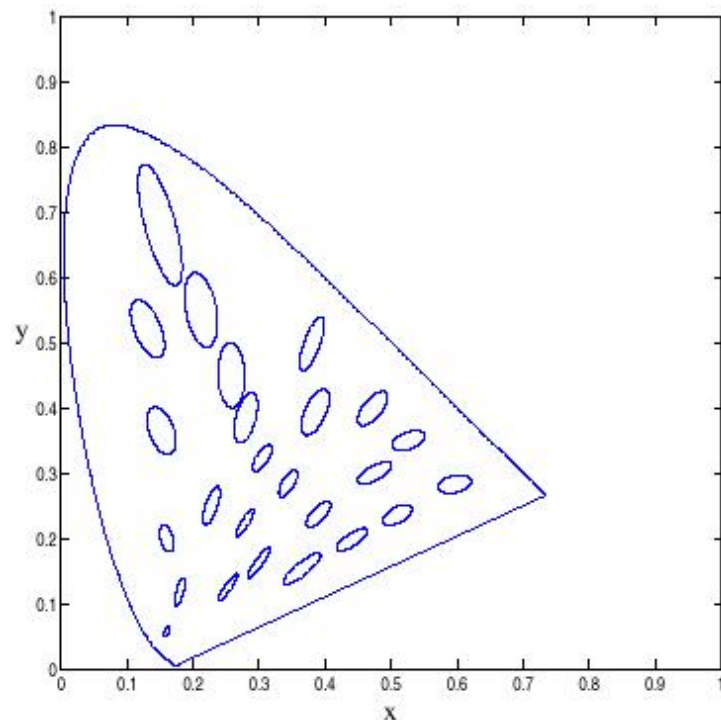
- 它们是椭圆而不是圆形。
- 它们在色度空间的不同部分改变尺度和方向

这也证明了CIE xyY 不是均匀颜色空间



关于麦卡当椭圆的小知识

麦卡当椭圆通常被显示为其实际尺度的10倍，这是为了演示的需要。实际上不可感知颜色变换的区域要小得多！



Lab (aka L*ab, aka L*a*b*) 颜色空间是均匀的颜色空间

在 L^*ab 颜色空间中的 L^* 分量被定义为

$$L^* = 116f \quad (2.105)$$

其中 Y_n 是标准白色的亮度值（参考Fairchild 2005），

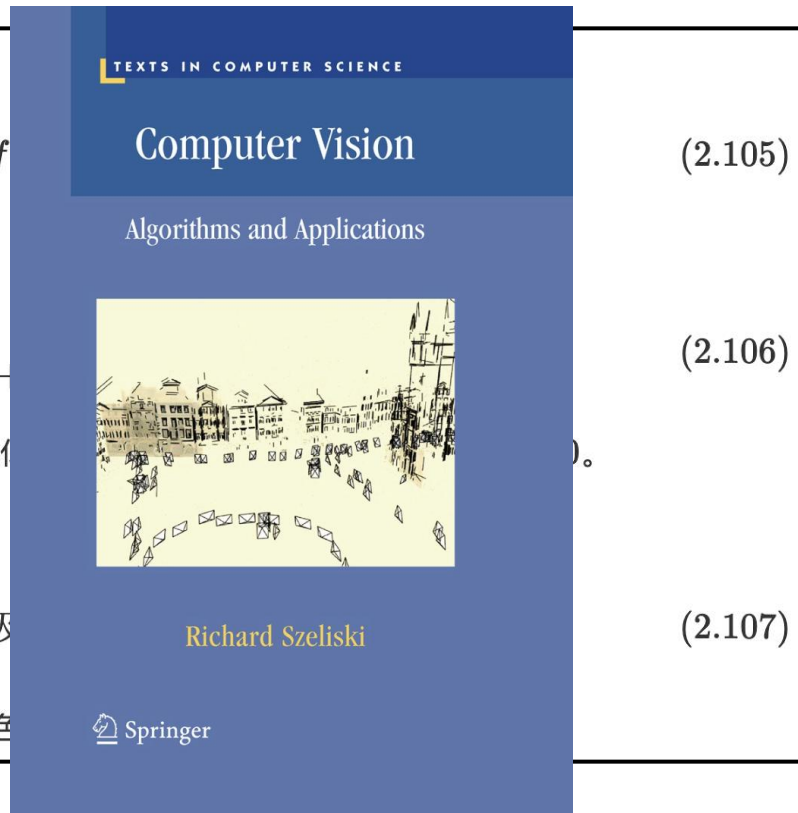
$$f(t) = \begin{cases} t^{1/3} & t > 6/29 \\ t/(3\delta^2) & t \leq 6/29 \end{cases} \quad (2.106)$$

是立方根的有限斜率近似函数，其中 $\delta = 6/29$ 。结果大致近似于

以类似的方式， a 和 b 分量被定义为

$$a^* = 500 \left[f\left(\frac{X}{X_n}\right) - f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) \right] \quad \text{以及} \quad (2.107)$$

其中， (X_n, Y_n, Z_n) 是测量的白点。图2.32i-k显示了样本彩色



参考《Computer Vision: Algorithms and Applications》



Lab (aka L*ab, aka L*a*b*) 颜色空间是均匀的颜色空间

在 L^*ab 颜色空间中的 L^* 分量被定义为

$$L^* = 116f\left(\frac{Y}{Y_n}\right), \quad (2.105)$$

其中 Y_n 是标准白色的亮度值（参考Fairchild 2005），

$$f(t) = \begin{cases} t^{1/3} & t > \delta^3 \\ t/(3\delta^2) + 2\delta/3 & \text{else,} \end{cases} \quad (2.106)$$

是立方根的有限斜率近似函数，其中 $\delta = 6/29$ 。结果大致近似了均匀亮度感知值，其中范围为 $0 \dots 100$ 。

以类似的方式， a 和 b 分量被定义为

$$a^* = 500 \left[f\left(\frac{X}{X_n}\right) - f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) \right] \quad \text{以及} \quad b^* = 200 \left[f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) - f\left(\frac{Z}{Z_n}\right) \right], \quad (2.107)$$

其中， (X_n, Y_n, Z_n) 是测量的白点。图2.32i-k显示了样本彩色图像的Lab*表示。

Lab (aka L*ab, aka L*a*b*) 颜色空间是均匀的颜色空间

在 L^*ab 颜色空间中的 L^* 分量被定义为

$$L^* = 116f\left(\frac{Y}{Y_n}\right), \quad (2.105)$$

其中 Y_n 是标准白色的亮度值（参考Fairchild 2005），

这部分是？

$$f(t) = \begin{cases} t^{1/3} & t > \delta^3 \\ t/(3\delta^2) + 2\delta/3 & \text{else,} \end{cases} \quad (2.106)$$

是立方根的有限斜率近似函数，其中 $\delta = 6/29$ 。结果大致近似了均匀亮度感知值，其中范围为 $0 \dots 100$ 。

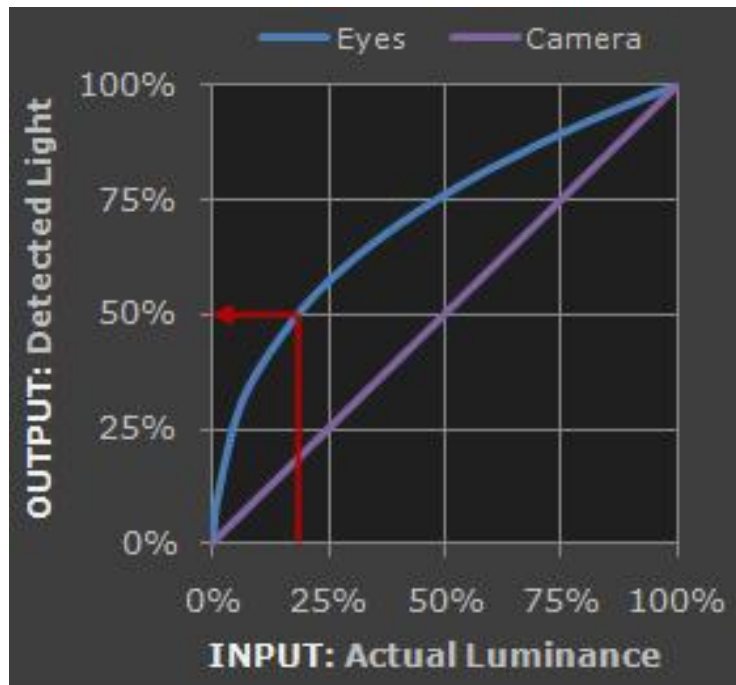
以类似的方式， a 和 b 分量被定义为

$$a^* = 500 \left[f\left(\frac{X}{X_n}\right) - f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) \right] \quad \text{以及} \quad b^* = 200 \left[f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) - f\left(\frac{Z}{Z_n}\right) \right], \quad (2.107)$$

其中， (X_n, Y_n, Z_n) 是测量的白点。图2.32i-k显示了样本彩色图像的Lab*表示。



人眼感知亮度与测量亮度是有区别的



- 人眼对输入光线的响应是非线性的（感知亮度）
- 然而视觉感知（感知亮度）是非线性的：我们对深色调更敏感，近似一个 γ 函数

Lab (aka L*ab, aka L*a*b*) 颜色空间是均匀的颜色空间

在 L^*ab 颜色空间中的 L^* 分量被定义为

$$L^* = 116f\left(\frac{Y}{Y_n}\right), \quad (2.105)$$

其中 Y_n 是标准白色的亮度值（参考Fairchild 2005），

这部分近似了一个Gamma函数

$$f(t) = \begin{cases} t^{1/3} & t > \delta^3 \\ t/(3\delta^2) + 2\delta/3 & \text{else,} \end{cases} \quad (2.106)$$

是立方根的有限斜率近似函数，其中 $\delta = 6/29$ 。结果大致近似了均匀亮度感知值，其中范围为 $0 \dots 100$ 。

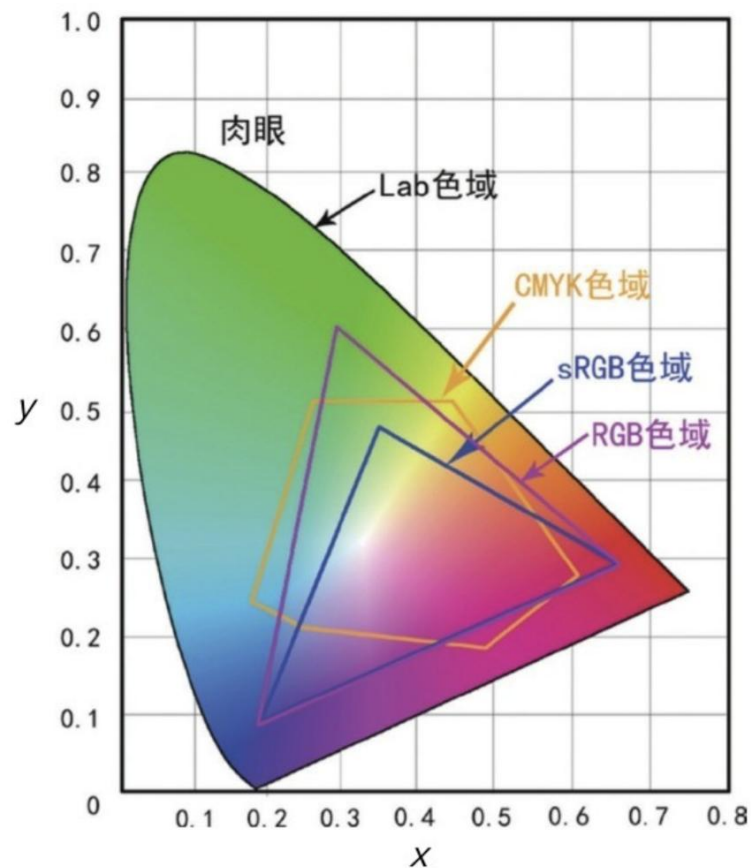
以类似的方式， a 和 b 分量被定义为

$$a^* = 500 \left[f\left(\frac{X}{X_n}\right) - f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) \right] \quad \text{以及} \quad b^* = 200 \left[f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) - f\left(\frac{Z}{Z_n}\right) \right], \quad (2.107)$$

其中， (X_n, Y_n, Z_n) 是测量的白点。图2.32i-k显示了样本彩色图像的Lab*表示。



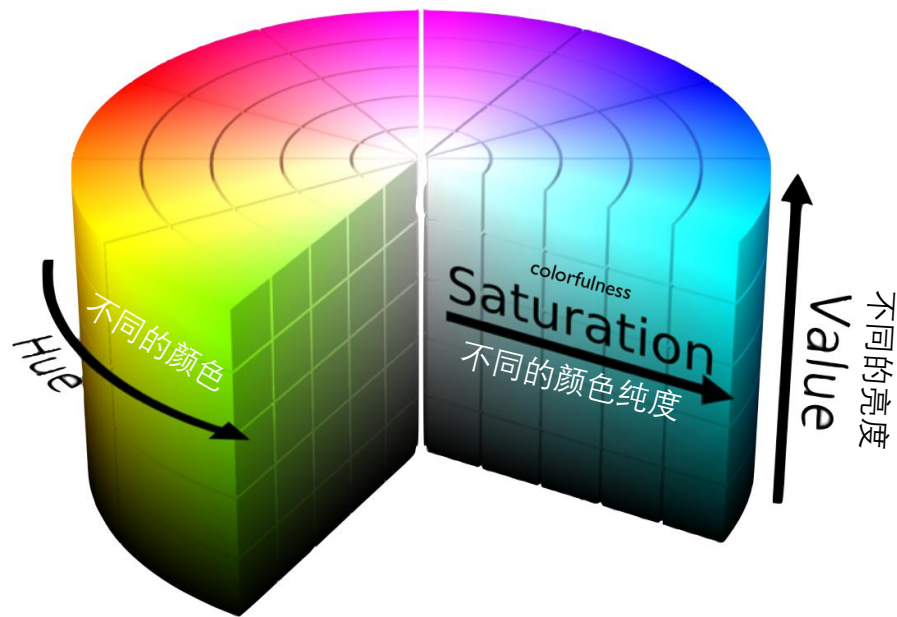
Lab (aka L^*ab , aka $L^*a^*b^*$) 颜色空间是均匀的颜色空间





色调Hue、饱和度Saturation和亮度Value

在计算摄影学和颜色科学中，当讲到色调（Hue）、饱和度（Saturation）、亮度（Value）这些概念时，经常提到HSV色彩空间

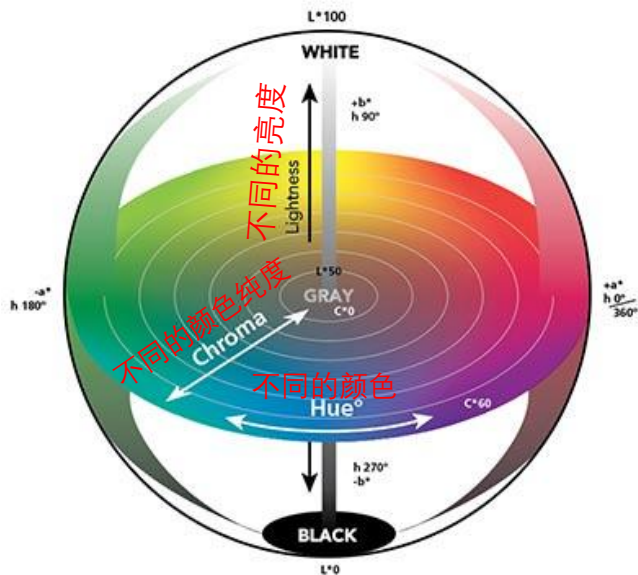


- 色调（Hue）：颜色的种类，如红色、蓝色等。
- 饱和度（Saturation）：颜色的纯度，低饱和度颜色接近灰色。
- 亮度（Value）：颜色的明暗程度。

HSV是一种直观的颜色表示方式，常用于图像编辑和用户界面设计，但它并不总是精确反映人类对颜色的感知差异。



更符合人类感知的是LCh色彩空间



L对应L*ab颜色的亮度L*，对应HSV颜色的Value

C-Chroma对应HSV颜色的饱和度Saturation，但是是通过L*ab颜色的a和b坐标的欧式距离得到：

$$C = \sqrt{a^2 + b^2}$$

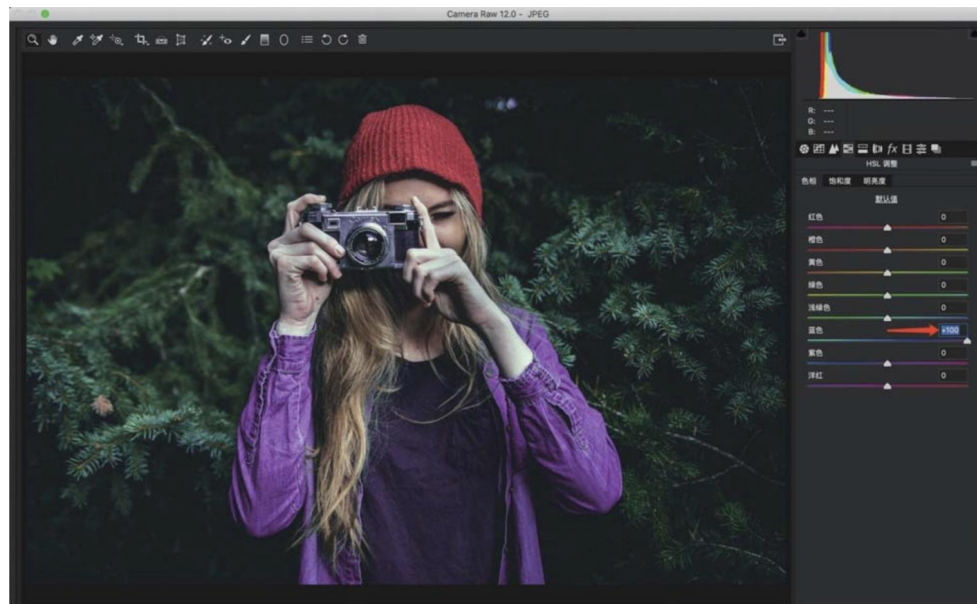
h对应HSV颜色的色调H，但通过计算a和b坐标的反正切得到，公式为

$$h = \arctan\left(\frac{b}{a}\right)$$

这提供了一种更符合人类视觉感知的方式来描述颜色



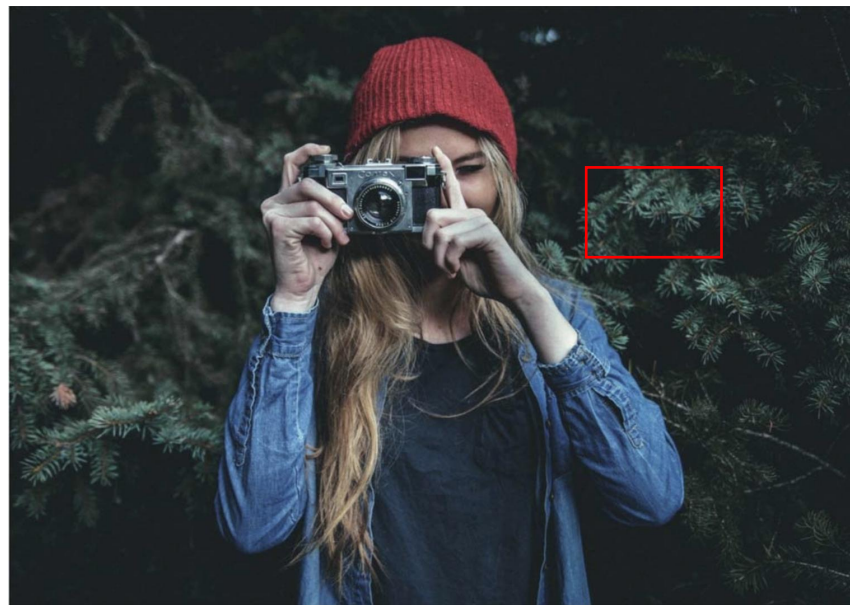
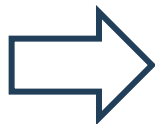
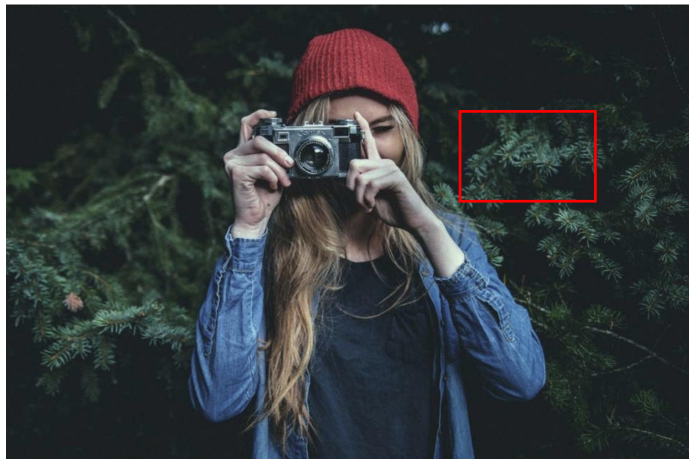
利用色调、饱和度和亮度的知识调色



参考《数码摄影后期高手之路》- 5.1.2 《色相》



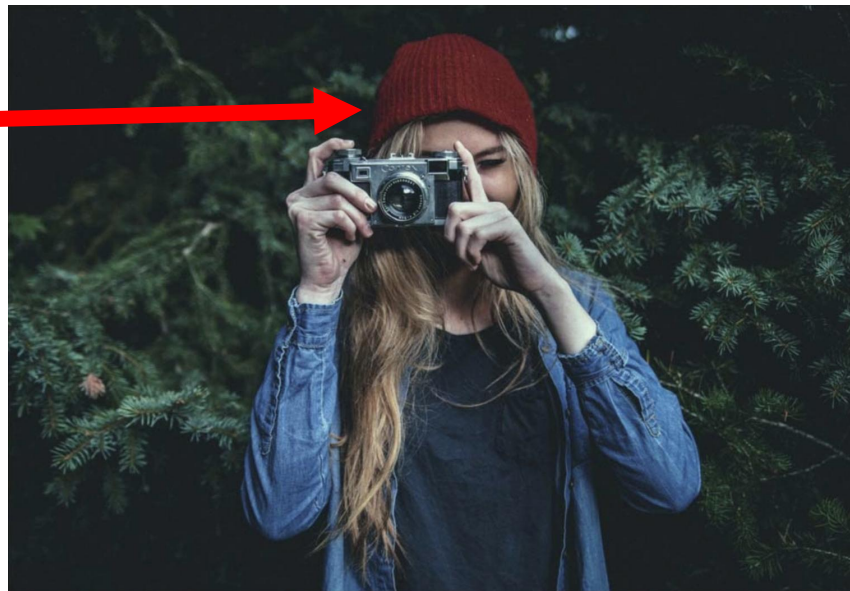
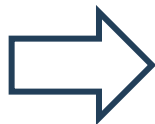
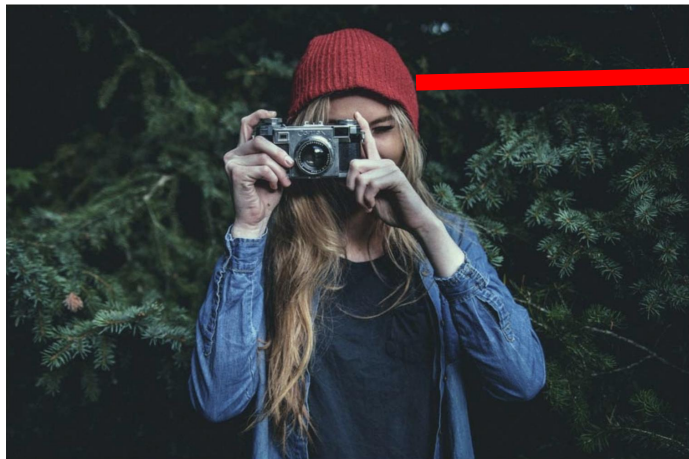
利用色调、饱和度和亮度的知识调色



参考《数码摄影后期高手之路》- 5.1.3 《饱和度》



利用色调、饱和度和亮度的知识调色



参考《数码摄影后期高手之路》- 5.1.4 《亮度》



目录

 1. 色彩基础知识

 2. 视网膜颜色空间

 3. 颜色匹配

 4. 线性颜色空间

 5. 色度

 6. 颜色校正

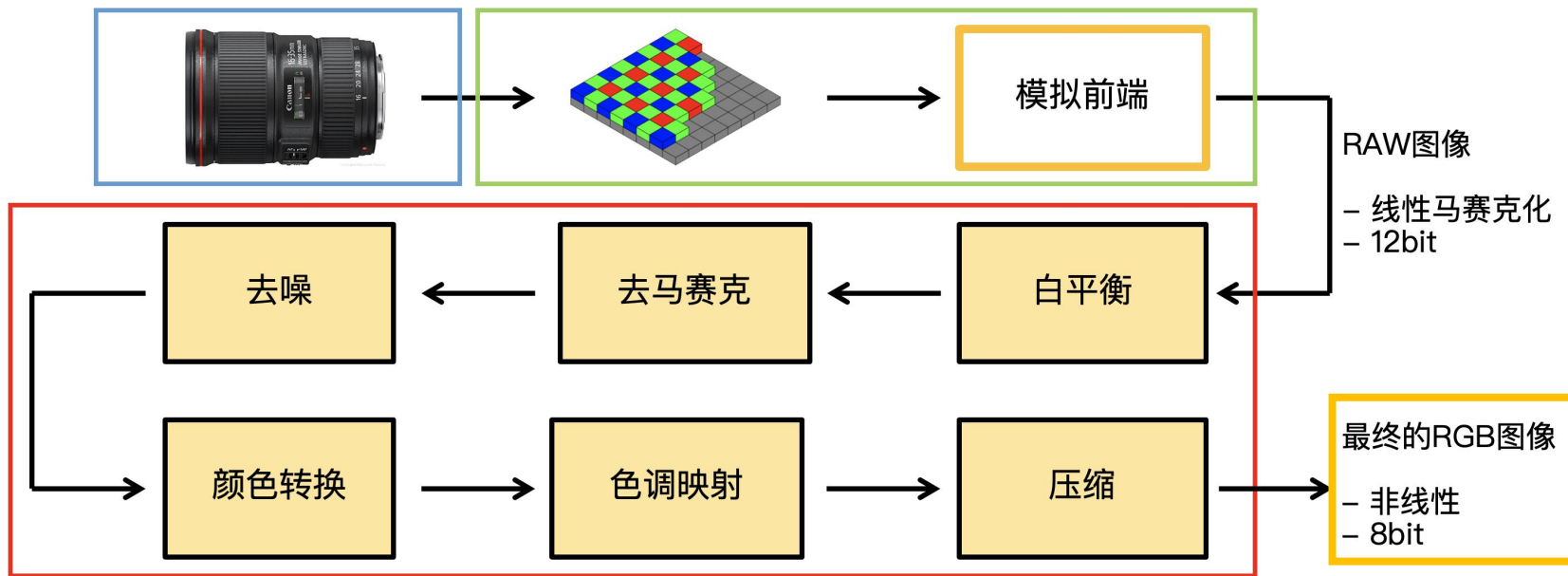
 7. 非线性颜色空间

 8. 颜色重建思考



相机通过ISP处理后输出非线性的RGB图像

如何正确的重建相机得到的图像的颜色，使得符合人类的感知？





将图像的颜色转换为符合人类感知的颜色并在显示器上显示

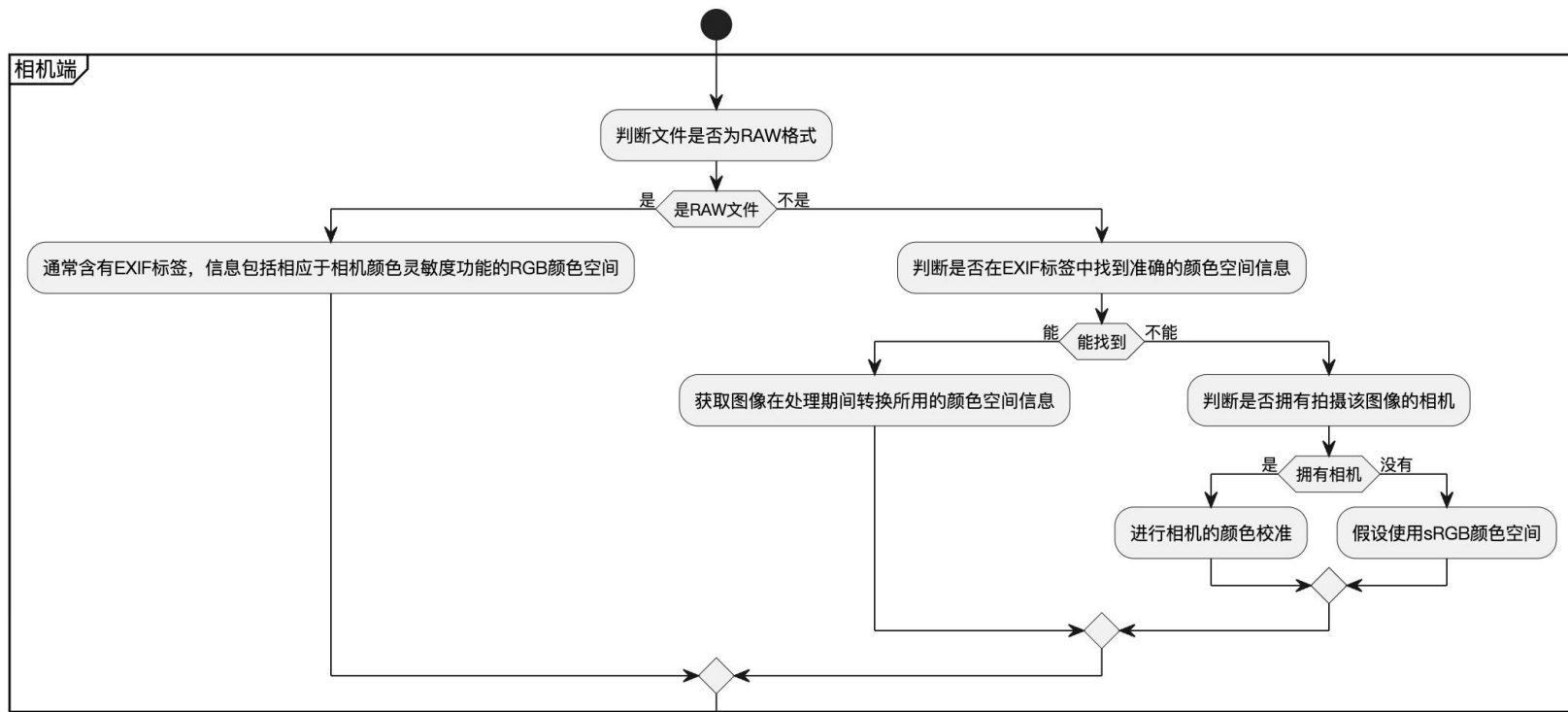
将图像文件从其存储的颜色空间转换为标准参考颜色空间, 例如CIE XYZ颜色空间



然后转换到显示器的颜色空间, 在显示器上正确的显示



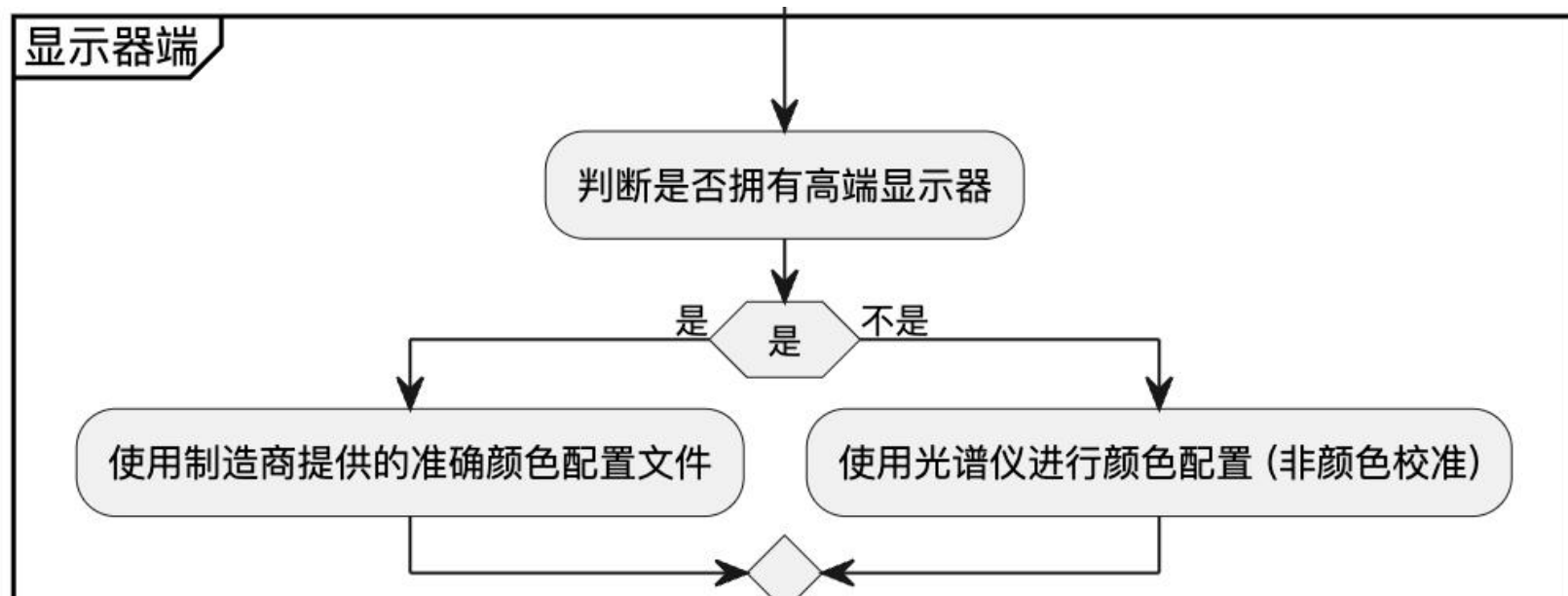
在相机端获取拍摄时的颜色空间并利用它正确的转换图像颜色



利用上述获取到的信息将图像原始颜色转换到标准CIE XYZ颜色
再从CIE XYZ颜色转换到某种特定颜色空间，例如sRGB颜色空间



校正显示器，使得显示器能正确显示特定颜色空间的图像



确保显示器能正确显示特定颜色空间的图像



参考资料

CHAPTER 4 后期流程——典型工作流 101

4.1 软件预设工作 103

4.2 画面校正 115

4.3 基本调整 143

4.4 二次构图 207

4.5 常用效果 219

4.6 综合案例 236



数码摄影后期高手之路（第2版）

李涛



如何正确的将图像转换为灰度图？



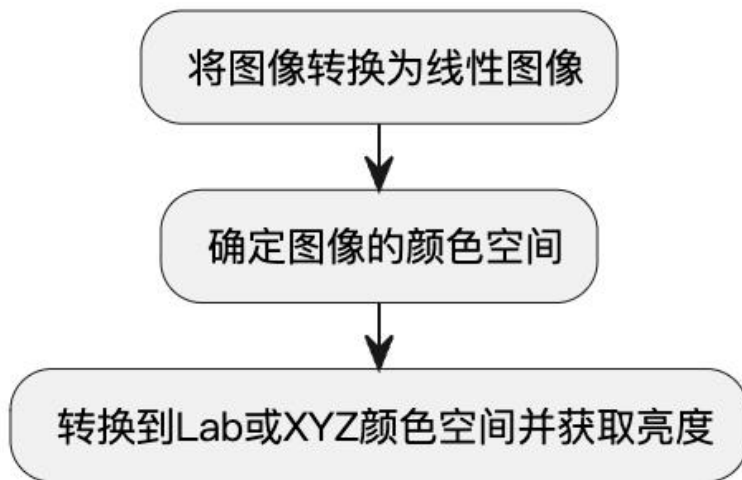
如何正确的将图像转换为灰度图？

```
import cv2  
img = cv2.cvtColor(img, cv2.COLOR_RGB2GRAY)
```

这样很简单，但只是一个近似的方法

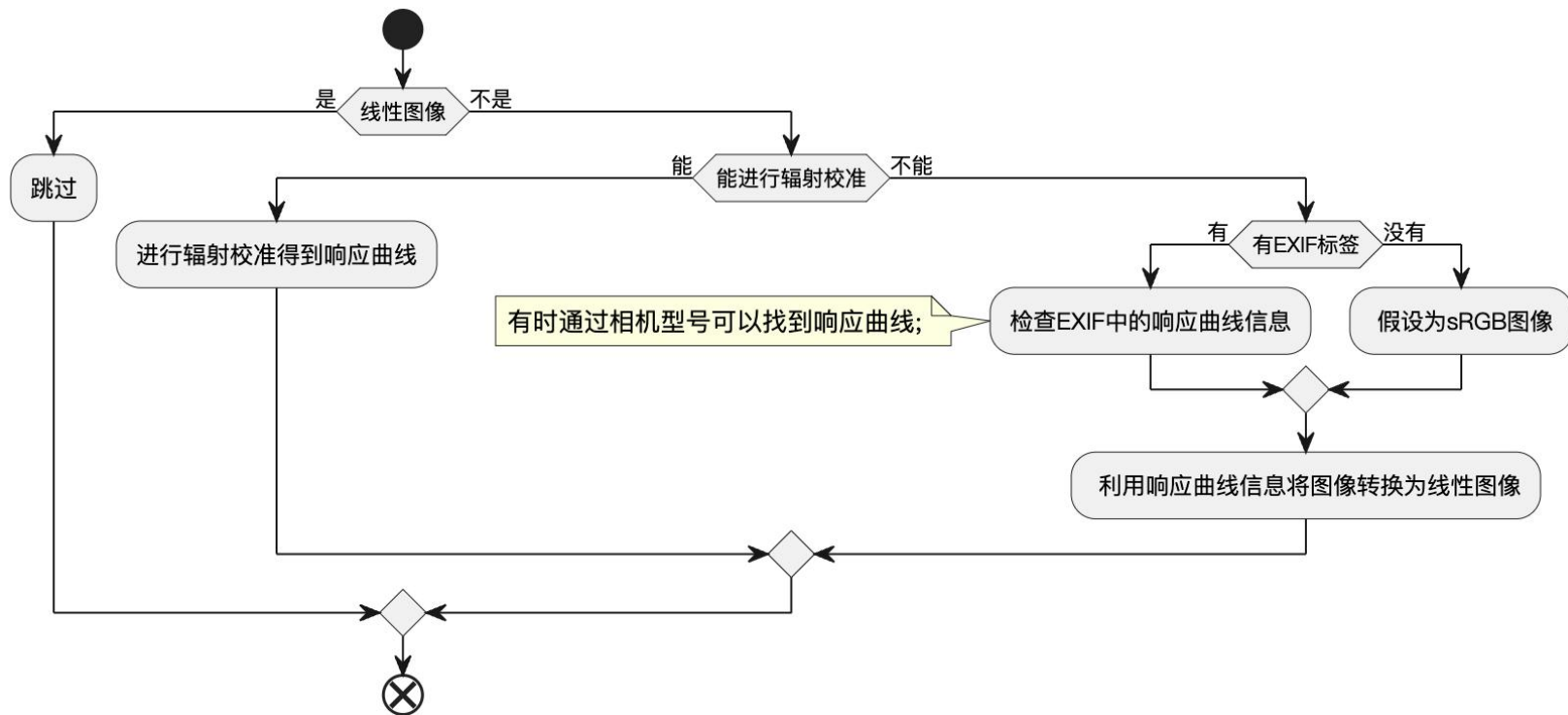


如何正确的将图像转换为灰度图？



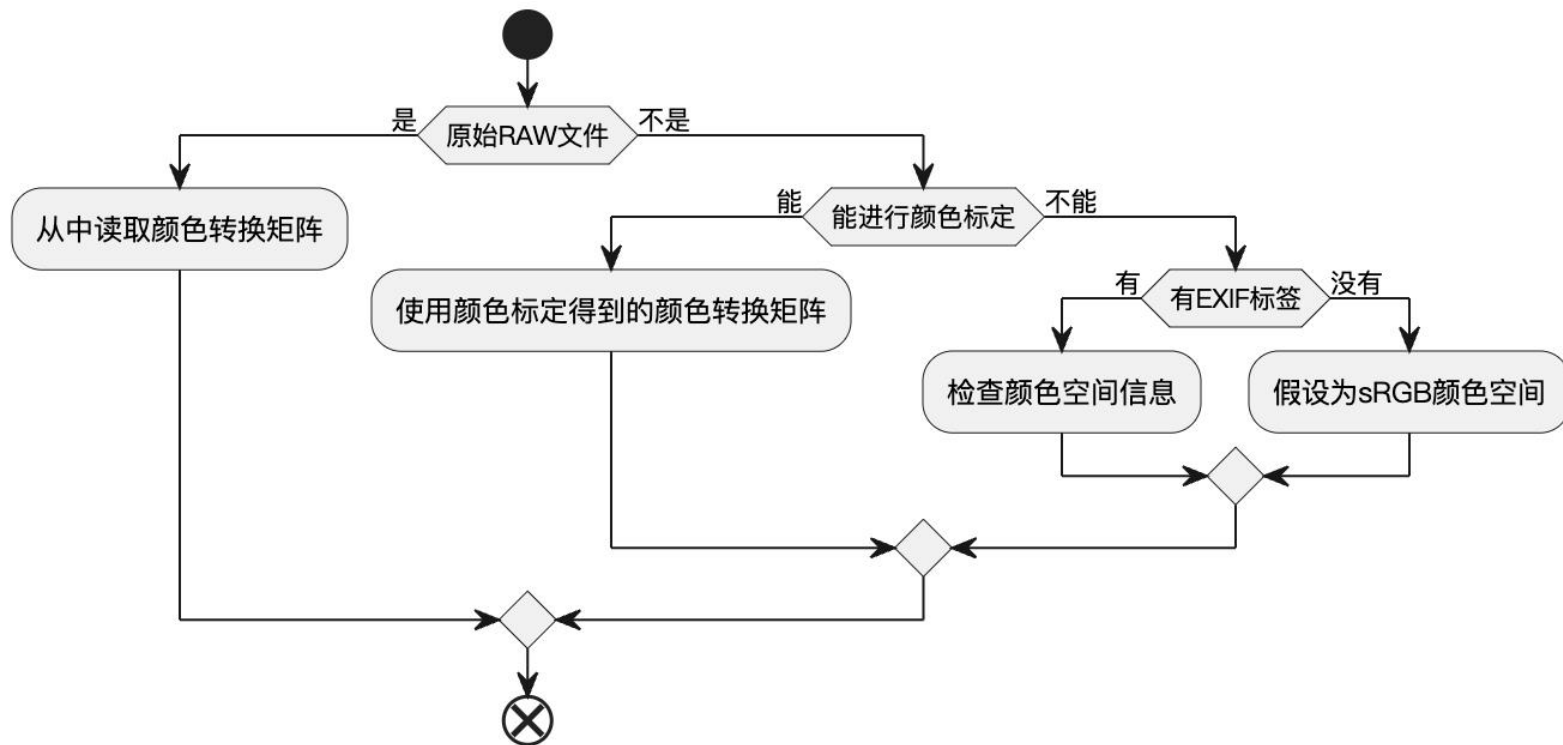


将图像转换为线性图像



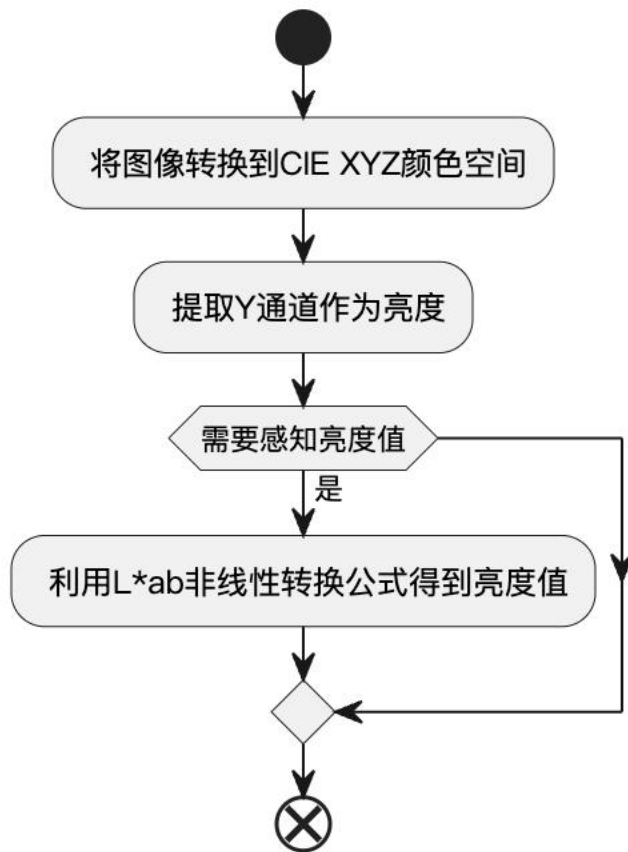


确定图像的颜色空间





转换到L*ab颜色空间并获取亮度





重新思考一下下面代码的含义

```
import cv2  
img = cv2.cvtColor(img, cv2.COLOR_RGB2GRAY)
```



参考下面的论文你可以获取到更多关于转换图像为亮度图的知识

Why You Should Forget Luminance Conversion and Do Something Better

Rang M. H. Nguyen
National University of Singapore
nguyenho@comp.nus.edu.sg

Michael S. Brown
York University
mbrown@eecs.yorku.ca

Abstract

One of the most frequently applied low-level operations in computer vision is the conversion of an RGB camera image into its luminance representation. This is also one of the most incorrectly applied operations. Even our most trusted softwares, Matlab and OpenCV, do not perform luminance conversion correctly. In this paper, we examine the main factors that make proper RGB to luminance conversion difficult, in particular: 1) incorrect white-balance, 2) incorrect gamma/tone-curve correction, and 3) incorrect equations. Our analysis shows errors up to 50% for various colors are not uncommon. As a result, we argue that for most computer vision problems there is no need to attempt luminance conversion; instead, there are better alternatives depending on the task.

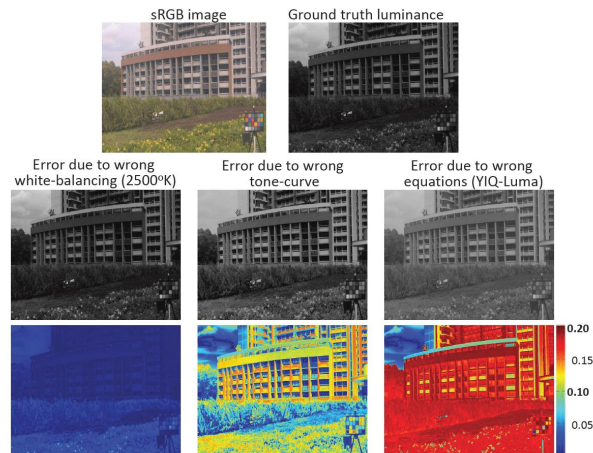


Figure 1. This figure shows examples of errors that arise due to improper luminance conversion. The ground truth luminance for this experiment is captured from a hyperspectral camera.



参考阅读资料

基础阅读资料:

- Szeliski textbook, Section 2.3.2, 3.1.2
- Michael Brown, "Understanding the In-Camera Image Processing Pipeline for Computer Vision," CVPR 2016, Very detailed discussion of issues relating to color photography and management, slides available at: http://www.comp.nus.edu.sg/~brown/CVPR2016_Brown.html
- Gortler, "Foundations of 3D Computer Graphics," MIT Press 2012.
Chapter 19 of this book has a great coverage of color spaces and the theory we discussed in class, it is available in PDF form from the CMU library.

更多阅读资料:

- Reinhard et al., "Color Imaging: Fundamentals and Applications," A.K Peters/CRC Press 2008.
- Koenderink, "Color Imaging: Fundamentals and Applications," MIT Press 2010.
- Fairchild, "Color Appearance Models," Wiley 2013.
All of the above books are great references on color photography, reproduction, and management. The book by Reinhard et al. is my go-to reference on color.
- Nine Degrees Below, <https://ninedegreesbelow.com/>
Amazing resource for color photography, reproduction, and management.
- Bruce Lindbloom's website, <http://brucelindbloom.com/>
An online page with a lot of information about color transforms, adaptation, and so on.
- MetaCow, https://www.rit.edu/cos/colorscience/rc_db_metacow.php
The best colorchecker dataset ever.
- Kim et al., "A New In-Camera Imaging Model for Color Computer Vision and Its Application," PAMI 2012.
A detailed discussion of color processing in the image processing pipeline of modern cameras, and how to do color calibration for accurate color reproduction.
- Nguyen and Brown, "Why You Should Forget Luminance Conversion and Do Something Better," CVPR 2017.
A detailed discussion of all the intricacies and challenges in trying to convert a color image to grayscale.

感谢聆听 !

Thanks for Listening

