颜色空间理论

Dezeming Family

Dezeming

Copyright © 2021 Dezeming Family

Copying prohibited

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying and recording, or by any information storage or retrieval system, without the prior written permission of the publisher.

Art. No 0
ISBN 000–00–0000–00–0
Edition 0.0

Cover design by Dezeming Family

Published by Dezeming
Printed in China

目录

0.1 本文前言 5

1 颜色与色彩感知 6

1.1 什么是颜色 6

1.2 功率谱密度与色域 7

1.2.1 功率谱密度 7

1.2.2 色域 8

1.3 视觉三基色（三原色）假说与一些常见术语 9

1.3.1 色调与色相 10

1.3.2 饱和度简介 10

1.3.3 对比度简介 11

2 图像亮度与灰度图生成 12

2.1 人的亮度感知 12

2.2 Gamma 矫正 13

2.3 彩色图转灰度图 14

3 色彩模型 15

3.1 颜色空间模型 15

3.2 各种色彩空间模型 16

3.2.1 RGB 彩色模型 16

3.2.2 CMY、CMYK 彩色模型 16
3.2.3 HSI(HSL)、HSV(HSB) 彩色模型 17
3.2.4 YUV 彩色模型 17
3.3 小结 17
Literature 17

前言及简介

DezemingFamily 系列书和小册子因为是电子书，所以可以很方便地进行修改和重新发布。如果您获得了 *DezemingFamily* 的系列书，可以从我们的网站 *[https://dezeming.top/]* 找到最新版。对书的内容建议和出现的错误欢迎在网站留言。

0.1 本文前言

很多研究图像的人并不非常了解图像中的颜色空间，哪怕是有一定研究图形学或计算机视觉经验的很多人也是如此，包括我自己。有时候，我总觉得颜色空间理论中充满了各种巧合——不同的空间之间的转换、自然界颜色与三原色的对应关系——都巧合得有些不可思议。

在做图像去噪中，我发现有些色彩的处理与颜色空间有很深的关系，而一直云里雾里的感觉也让我非常为难，因此我花费了一些精力来系统地学习了一下各种颜色的表示以及我们的视觉效应。为了构建成一个体系，我决定把这些知识串联起来，构建成这本小书。本小书只是一个最基础的介绍，重点在于知识扫盲。本人也不是主要研究这个方向，这个方向深入研究会涉及一些物理光学、能量、统计学和生物学的内容，限于本人知识有限，其他非常见的理论以后遇到再进行补充。

1. 颜色与色彩感知

1.1 什么是颜色 6

1.2 功率谱密度与色域 7

1.2.1 功率谱密度

1.2.2 色域

1.3 视觉三基色（三原色）假说与一些常见术语 9

1.3.1 色调与色相

1.3.2 饱和度简介

1.3.3 对比度简介

本章从物理的角度来描述一下颜色。然后介绍颜色空间的一些基础知识，包括人眼细胞对光波谱的响应等内容。本章不会讲过于深入的内容，而是做一个知识科普。

1.1 什么是颜色

通常来说，我们对颜色的描述都是错误的，比如我们说，苹果是红色的，香蕉是黄色的，墙是白色的，这些描述都不准确。

以墙为例，当我们用白光照射的时候，看到的墙就是白色，但当我们用红光照射时，看到的墙就是红色，因此，不发光的物体本身没有任何颜色，颜色是我们对看到的光进行的描述。

当我们注视这火焰的时候，我们感到里面有黄色和红色，当我们看着烧红的铁块，我们看到它发出红色的光，我们就可以说，火焰是红色和黄色的，烧红的铁是红色的。

因为有了光，我们才能看到物体，我们对光的感知，就是颜色。

究竟什么是光，我们知道，光是一种辐射电磁波，既然是一种波，它就有波长和频率。一般可见光的波长都在 $380nm$ 到 $780nm$ 之间，我们看到的光一般都是各种不同波长的光混合而成的。

光速 = 波长乘以频率，光在不同介质中的速度是不一样的，例如在水中的速度要小于在真空中的速度。我们当前假设所有的描述都是在真空中，也就是说光速相等。

当波长为 $700nm$ 左右时的单波长光我们感受到的是红色，当波长为 $450nm$ 左右时的波长我们感受到的是蓝靛色。那什么是白光呢？白光的定义其实没这么简单，有人说，白光就是包含了各种波长的光的集合，这种说法并不正确，因为当一束光中，如果波长 $700nm$ 左右的光占绝大部分，那么人们感受到的就是偏红色的光。那么白光需要所有的波长在整束光中的比例相等吗？这也未必。我们一般认为阳光属于白色光，蓝天下阳光的光谱如图1.1，可以看出，阳光的光谱中，各个波长的比重都有不同（阳光直射的光谱是不一样的）。

在计算机中，光经常会使用 RGB 等表示方法，也就是说标准的红绿蓝经过组合来得到其他颜色，这是对自然界光谱的简化，但我们需要知道的是，只用 RGB 就只能合成一定数目的颜色

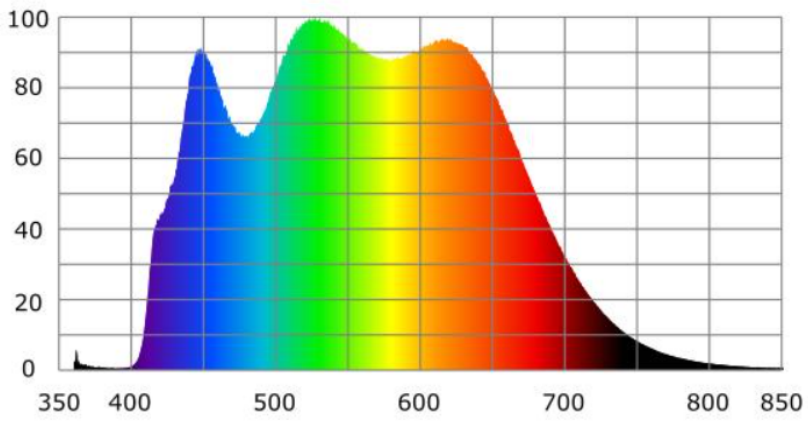

图 1.1: 阳光光谱

而什么样的光谱要被表示为标准的红色呢？这里面牵扯到很多理论，也需要人的直观感受（不同 RGB 模型的标准红色分量是有点区别的，但区别不大）。

此外，除了 RGB，还有 CMY、HSV 等颜色模型，为什么我们有不同的颜色模型，这主要体现在应用方面。

最后提一句，几何光学应用在图形学中，一般称作辐射度量学（radiometry），包含了光的能量、光的散射等信息。

1.2 功率谱密度与色域

1.2.1 功率谱密度

谱功率密度（SPD）表示光线中不同波长的光占的比例。SPD 是线性的，也就是说两种光可以线性叠加，比如开两个手电筒会比一个手电筒亮。颜色是人感知 SPD，并不是真正的物理现象，我们一般定义颜色是符合大多数人感知的色彩，也有少数人对颜色的感知与一般人不太一样，比如红绿色盲患者。

人眼内部有三种锥形细胞来感知颜色，如图1.2，不同的视锥细胞对光的感知响应是不同的。对于波长 $500nm$ 的光，绿视锥响应最强烈，红蓝视锥响应很相近；对于波长 $650nm$ 的光，红视锥响应最强烈，蓝绿视锥几乎不响应。神奇的是，在显微镜下观察可发现，这三种细胞的分布在不同人之间差异非常明显。

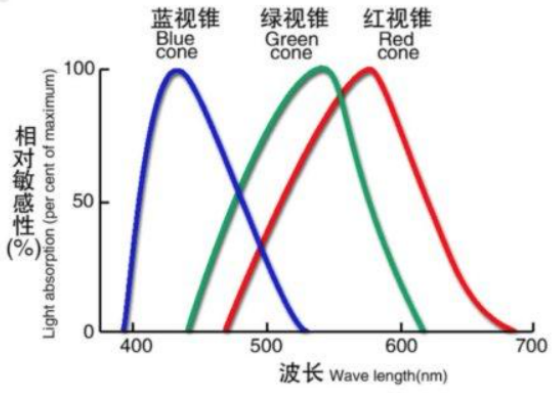

图 1.2: 视锥细胞响应曲线

我们感受到的颜色值，就是所见光的实际光谱曲线与我们的视锥细胞对光响应曲线相乘后的积分。我们标记三种细胞分别为 S，M，L，对于不同的光谱，积分以后就得到了不同的值，也就是一个向量 (s,m,l)。之后，我们的大脑就会将 (s,m,l) 翻译成我们感知到的颜色。可以想象，由于三种细胞分布很不同，所以对于相同的光谱，不同的人感知是不同的，正常人能很轻易地区分开红色和蓝色，但是对不同的人

来说红色或许意味非常不同。

我们可以想象，(s,m,l) 不一定是仅有一种光谱得到的，很有可能有不同的光谱与响应曲线相乘再积分后得到同样的 (s,m,l) 值，即同色异谱。

颜色之间是可以混合的（谱之间相加）。自然界都是加色系统，简单来说多个光谱相加就会变亮。计算机图像一般也是使用加色系统，即 RGB 三原色（三基色）。我们下一节再介绍三基色的选取方法。

1.2.2 色域

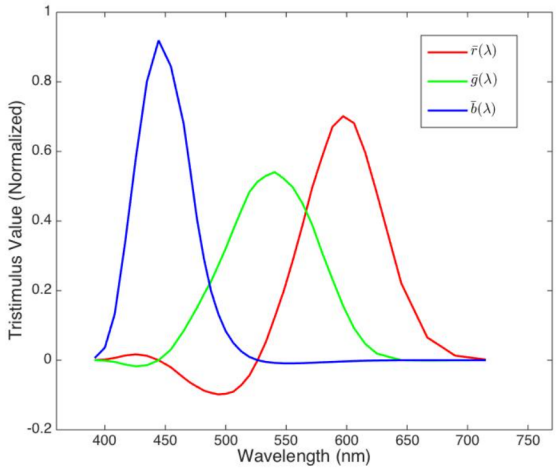

图 1.3: CIE-RGB 三原色

CIE 组织定义了当前主流的 RGB 系统。R 的波长是 $700nm$ 左右，G 是 $546.1nm$，B 是 $435.8nm$ 左右，CIE-RGB 的目标是使用这三种基础三原色混合出与任何单一波长的光感知到的颜色一样的颜色，经过实验和匹配，得到如图1.3的结果。

大家可能会不理解，图上为什么会有负值，难道颜色还能表示成负的？直观上理解这是因为 RGB 三原色饱和度太高，导致低饱和度的颜色混合不出来（我们会在第三章进行详细讲解）。实际上我们使用混合三原色时，有些颜色确实混合不出来。当我们要混合某种颜色 $C(\lambda)$，我们混合不出来，但如果我们发现:$C(\lambda)+0.15R=0.73G+0.28B$，因此可以得到 $C(\lambda)=-0.15R+0.73G+0.28B$，也就出现了负值。

另外一个重要的颜色系统叫 CIE-XYZ 系统，该系统在匹配不同波长光时不会有负数（关于原因，会在第三章详细解释），如图1.4。

通过 CIE-XYZ 曲线可以合成颜色值 (X,Y,Z)，由于人眼对绿色的敏感性，我们可以认为这里的 Y 是表示亮度（注意曲线 y 横跨了整个光谱）。通过系数归一化，即:

$$(\frac{X}{X+Y+Z},\frac{Y}{X+Y+Z},\frac{Z}{X+Y+Z})=(x,y,z) \tag{1.2.1}$$

就能得到色彩空间可视化结果如图1.5（因为 $z=1-x-y$，所以我们只需要 x 和 y 坐标，但是因为 Y 表示亮度，所以我们通常显示的色域图是固定 Y 的。Y 值不同，色域图其实是不同的。虽然图的横纵坐标显示的是 x 和 y，但这里的 y 轴其实表示的是 Z 归一化以后的值

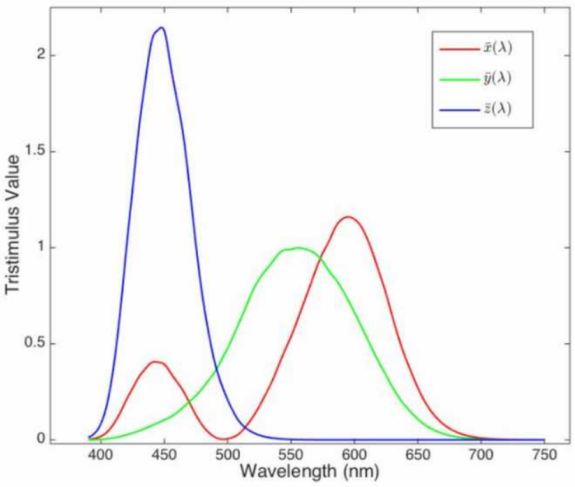

图 1.4: CIE-XYZ 三原色

（z 值））。

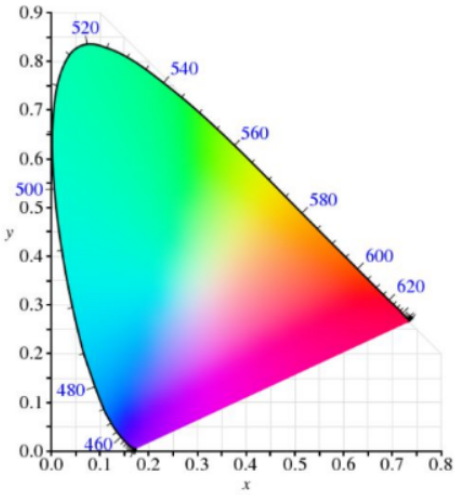

图 1.5: 色域图

该图1.5的颜色空间就叫色域。不同的颜色空间表示的色域范围都不一样，比如 sRGB 只能表示图1.6里面蓝色三角形区域内的颜色值：

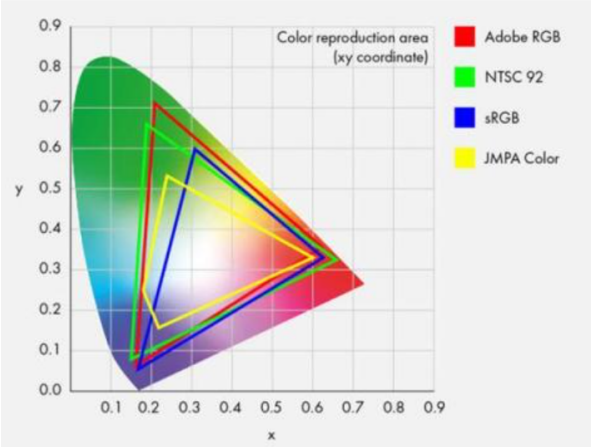

图 1.6: 不同颜色空间的色域范围

CIE-XYZ 三原色被称为理想三原色，而 CIE-RGB 被称为真实三原色。我们后面还会再介绍，在 PhotoShop 软件常使用 HSV 系统（Hue-Saturation-Value），即色调-饱和度-亮度三个属性来定义颜色。HSV 和 sRGB（计算机常用的 RGB 颜色空间我们一般称为 sRGB）可以互相转化。

1.3 视觉三基色（三原色）假说与一些常见术语

我们选择的三基色（三原色）需要满足一些条件：

- 首先，所有颜色都可由三基色混合得到，而三基色之间还要相互独立，即任一基色不能由其他基色混合得到。

- 其次，如果三基色的混合比相等，则色调和色饱和度也应该是相等。
- 需要和真实物理现象相同，即，采用三基色分别合成的任意两种颜色 A' 和 B' 混合产生的新颜色 C'，与实际的这两种颜色 A 与 B 混合起来得到的新颜色相同。
- 同时，混合以后得到的颜色亮度是原来各分量光亮度的总和。

这些条件可以列一系列的函数方程，满足这些函数的三个光谱值就可以定义为三基色光谱。三基色系统可以简单分为两种，一种是加性系统，三基色可以简述为【红、绿、蓝】，例如电视电脑显示；另一种是减色系统，三基色可以简述为【青、品、黄】，用于彩色印刷。

下面我们介绍一些颜色理论中的常见术语。

1.3.1 色调与色相

色调 (tone) 表示图像原色的明暗度，例如灰度图像的颜色范围就是 0 – 255，因此是 256 级色调。

在 RGB 模式中，色调表示红绿蓝三种原色各自的明暗程度，例如对于红色，可以分为浅红，一般红和深红。当然，色调的描述主要指色彩外观的倾向，比如“浅绿色调”。

我们有时候也会称红色为暖色调（给人一种火焰的感觉），或者称淡蓝色、偏白的蓝色为冷色调（给人一种冰霜的感觉）。因此，色调是人的主观感受。

色相 (hue) 是人对色彩的感知，在 HSL 和 HSV 色彩空间中，H 就是指的色相。色相从 0 度到 360 度，红色是 0 度，黄色是 60 度，而橙色在红色和黄色之间，是 30 度：

图 1.7: 色相图

色相可以通过 RGB 根据公式计算得到，这里暂时不介绍。

1.3.2 饱和度简介

饱和度 (Saturation) 指的是图像的色彩浓度，有时候会被称为色度（在科研领域，一般色调与饱和度一起被称为色度 (chromaticity)，也不知道是不是翻译问题，因此需要明确区分）。在各种色彩模型中，对饱和度有不同的量化模式，在绘画、电影与摄影学中也各有不同。下图是 potplayer 中调节的饱和度从最低到最高的效果（片段来自《星河战队 1》）：

图 1.8: 饱和度变化图，从左到右分别是饱和度最低，原始饱和度与饱和度最高

饱和度一般指相对纯净度，纯谱色是全饱和的颜色，而深红（红色掺加了白色）、浅紫（紫色掺加了白色）等颜色是欠饱和的，也就是说，饱和度与颜色所含白光的量成反比关系。

1.3.3 对比度简介

对比度 (Contrast) 表示颜色之间的差别，也就是从黑到白的渐变层次。对比度越高，则色彩就越丰富，图像也就更鲜明；低对比度图像看起来会灰蒙蒙的。下图是 potplayer 中调节的对比图从最低到最高的效果：

图 1.9: 对比度变化图，从左到右分别是对比度最低，原始对比度与对比度最高

可以看到，虽然对比度过高看起来更清晰，但是视觉效果也不会很好。

2. 图像亮度与灰度图生成

2.1 人的亮度感知 12

2.2 Gamma 矫正 13

2.3 彩色图转灰度图 14

本章主要介绍图像的亮度与灰度，包括人的主观感知、*gamma* 矫正与图像如何转化为灰度图等内容。

2.1 人的亮度感知

光强度单位是坎德拉 (candela)，指光源在指定方向的单位立体角内发出的光通量（在计算机图形学中，可以理解为点光源在单位立体角的光强度）。但是这并不能完全代表亮度，因为亮度需要考虑单位面积的光强，于是亮度的单位是“坎德拉/平方米”，也被称为尼特 (nit)，1nit=1 坎德拉/平方米（cd/m^2）。

人的主观亮度与实际亮度的感知呈对数关系，人能够适应的光强度级别的范围很宽（$10^{-3}-10^{6}cd/m^2$），但是人眼的临时感受范围是分段的，比如在暗区域，人眼会自动调整灵敏度进行暗适应——也就是说，同一时刻下人眼可以辨别的不同强度级别的范围与总的适应范围相比是很小的，比如图2.1，如果人眼处于亮度在 B_a 附近时，那么对于 B_b 亮度，人眼感受到的就是黑色。

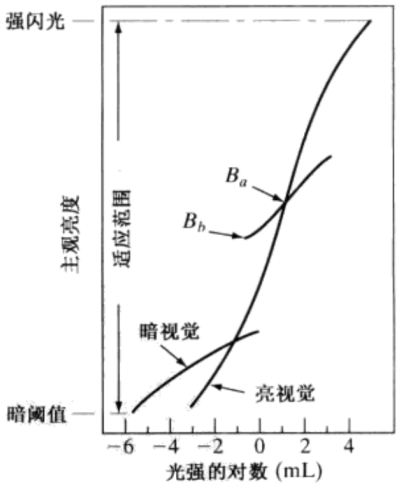

图 2.1: 主观亮度感知

人的视觉特征会产生三种视觉现象 [2]，如图2.2。马赫带现象，意为人的视觉会出现“上冲”或“下冲”，导致在不同亮度的交界处有轻微的过渡带（大家需要仔细观察）；同时对比现象说明，背景变亮时，同样颜色的中心方块看起来会变暗（还比如，用纸张遮住眼睛看太阳，会发现纸张看起来呈现黑色）；错觉现象，比如 (a) 图我们会自动补齐正方向的边界，而边缺失的地方仿佛有一条明暗界线，(d) 中的斜线斜度相同，但人眼看起来却并不平行。

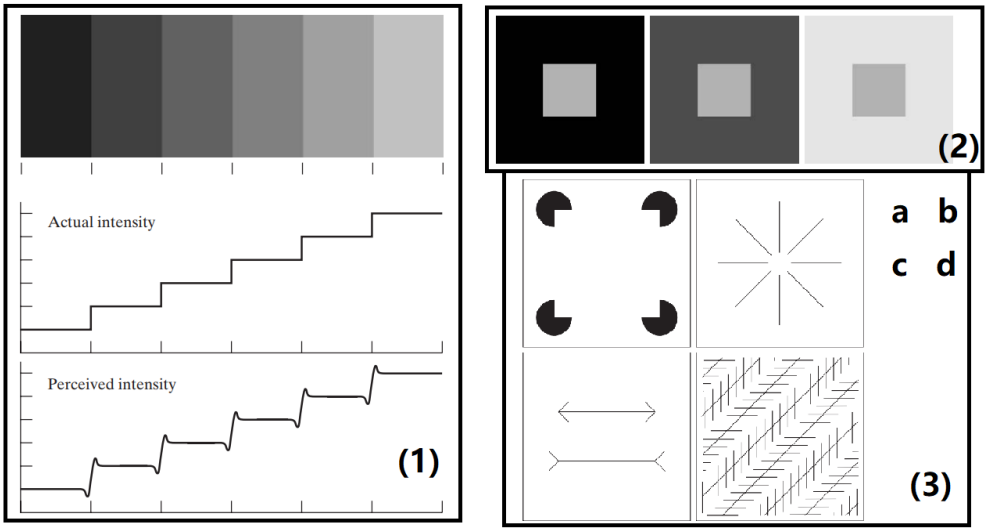

图 2.2: 三种视觉现象，(1) 表示马赫带现象，(2) 表示同时对比现象，(3) 表示错觉现象

2.2 Gamma 矫正

Gamma 矫正是图形图像领域一个很重要但是很奇特的问题，有些时候总觉得自己在似懂非懂之间徘徊。本文参考了 [4] 和 [5]。

动物的眼睛很多都会对暗处颜色分辨能力比亮处更高，比如，如果有黑色到白色 256 个色阶均匀分布，我们希望暗处的地方色阶更多一些，因此需要矫正一下2.3（现在只关注虚曲线）。

gamma 矫正是幂的关系：

$$out = in^{\frac{1.0}{2.2}} \tag{2.2.1}$$

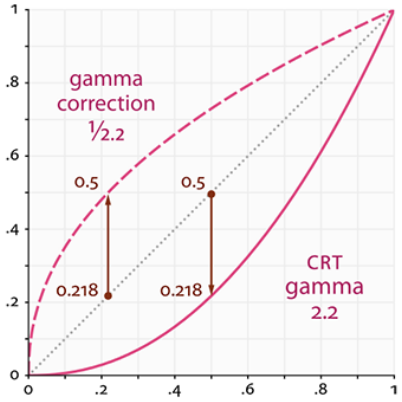

图 2.3: Gamma 矫正方法

可以看到 gamma 矫正（2.2 的倒数）以后，暗处范围 0−0.218 会扩展到 0−0.5。人类的视觉符合 gamma（幂函数）的性质。如果不将图像 gamma 矫正，那么数据位或者带宽的利用就会分布不均匀，会有过多的数据位或者带宽用来表示人类根本无法察觉到的差异，而用于表示人类非常敏感的视觉感知范围的数据位或者带宽又会不足（因此我们希望更亮的部分数据位较少，较暗的部分数据位较多）。图像的 gamma 矫正并不是必须的，如果不考虑结果就进行矫正可能会得到适得其反的效果。

老式的阴极摄像管 (CRT) 显示器中电压提高两倍，亮度并不能提高两倍，而是输入输出呈现出一个指数关系，如图2.3中 CRT 的 gamma 曲线（实线），比如我们输入的亮度是 0.5，那么显示的结果并不是 0.5 的亮度，而是 0.218。因此，如果我们对图像进行一次 gamma 矫正，显示的图像就恰好是我们希望显示的那样。

现在计算机图形学计算中都是在线性空间进行的，而有时候，我们读入的图像，比如纹理图像，却是经常是已经矫正好的处于 gamma 空间中的图像（即原图像的 $\frac{1}{gamma}$ 次幂），所以，再次进行 gamma 矫正则会过亮，所以需要先将纹理变回 sRGB 空间再进行处理（$data_g$ 表示 gamma

空间中的数据）：

$$data_{sRGB} = (data_g)^{gamma} \tag{2.2.2}$$

2.3 彩色图转灰度图

我们一般认为绿色更亮，而红蓝色相对比较暗。在 XYZ 系统中，Y 就表示亮度。将 RGB 图像转换为灰度图其实就是给 RGB 各个分量加权相相加来得到的。YUV 颜色空间中的 Y 就表示亮度信息，RGB 空间转 YUV 空间的 Y 的公式是：

$$Y = 0.299R + 0.587G + 0.114B \tag{2.3.1}$$

可以看到，绿色占比重更大一些，蓝红色占比重更小一些。

在 OpenCV 里，cvtColor 函数会调用 cvtColorBGR2Gray 来将彩色图转换为灰度图，里面有两种形式：

```
1 template<> struct RGB2Gray<uchar>
2 template <> struct RGB2Gray<float>
```

对于 float 类型的数据显而易见：

```
1 const float B2YF = 0.114f;
2 const float G2YF = 0.587f;
3 const float R2YF = 0.299f;
4 static const float coeffs0[] = { R2YF, G2YF, B2YF };
```

就是用这三个系数去乘以 RGB 分量。

3. 色彩模型

3.1 颜色空间模型 15

3.2 各种色彩空间模型 16

3.2.1 RGB 彩色模型

3.2.2 CMY、CMYK 彩色模型

3.2.3 HSI(HSL)、HSV(HSB) 彩色模型

3.2.4 YUV 彩色模型

3.3 小结 17

本章讲述各种常见的色彩空间模型。

3.1 颜色空间模型

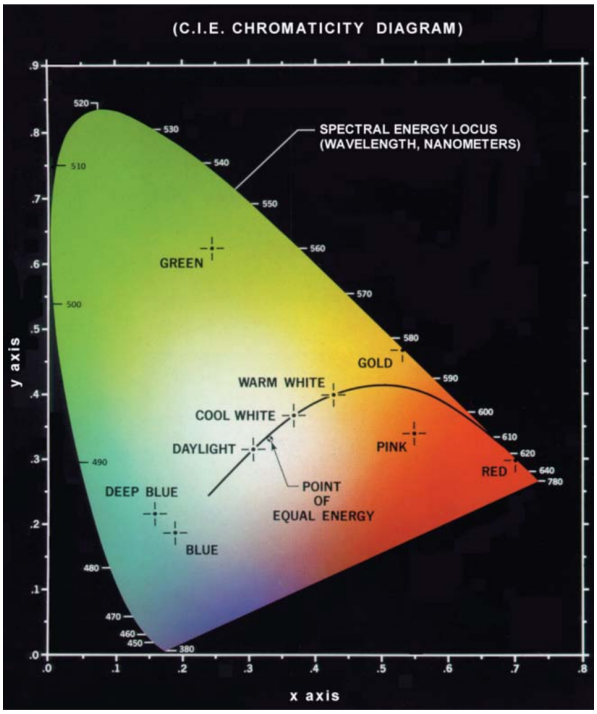

图 3.1: CIE-色度图

前面我们已经介绍过，这里讲一下详细的原理。

通常，区分不同颜色特性的参数是亮度、色调和饱和度。在 XYZ 三色系统中，定义了 xyz 满足 $x+y+z=1$。再看一下 CIE 色度图（色域图）3.1。在色度图中，最中间的点叫做等能量点 (point of equal power)，也就是 xyz 三个分量比重相等（纯白色）。

位于色度图的边界上的任何点都是全饱和点，当一个点离开边界逼近等能量点时，就相当于不断变得欠饱和。而如果在色度图上画一条线段，则线段内的任何点所代表的颜色都能够由线段端点所代表的颜色线性组合得到，于是，只要在色度图上画一个三角形，则三角形内任何一个点所代表的颜色都能够由三角形三个端点所构成的颜色合成得到。

这也说明了仅仅由三个点无法构成三角形外的全部颜色，因为一般更高饱和度的颜色在边界处，整个边界不是规则的图形，三角形的三个顶点必须要在边界内部，所以边界处不可

能包含在三角形内，因此无法合成出来，除非某分量的线性权重是负数，这也印证了第一章我们讲述的内容。

3.2 各种色彩空间模型

现如今，大多数色彩模型主要是面向硬件和应用，例如对于显示器，RGB 比较常用；对于打印机，CMY 和 CMYK 比较常用。而 HSI 模型则更符合人们的描述方式，而且在数字图像处理中，它可以解除颜色与灰度之间的关系，可应用于各种灰度处理技术。

3.2.1 RGB 彩色模型

RGB 模型可以放在笛卡尔坐标系中：

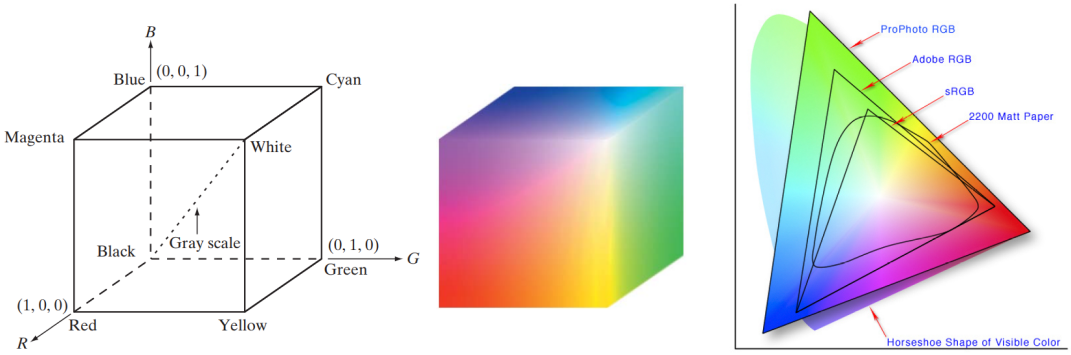

图 3.2: RGB 彩色立方体示意图

不同的设备和应用会有不同的 RGB 模型空间，例如 sRGB 和 Adobe RGB。RGB 模型是我们最熟悉的彩色模型，不再花时间赘述。

3.2.2 CMY、CMYK 彩色模型

通过 RGB 三原色相加，可以产生二次色，例如红加蓝变为深红，绿加蓝变为青色，红加绿变为黄色。

对颜料来说，颜料的原色应该是白光减去被吸收的光的颜色，并传输另外两种原色。于是，颜料的三原色就变为了深红色、青色和黄色：

$$\begin{bmatrix} C \\ M \\ K \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.0 \\ 1.0 \\ 1.0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \tag{3.2.1}$$

等量的颜料三原色混合可以产生黑色，但并不纯，而且这三种颜色的颜料一般都比黑色（直接用碳就好）更贵，所以会单独加入第四种颜色——黑色，于是就构成了 CMYK 彩色模型（即四色打印）。

3.2.3 HSI(HSL)、HSV(HSB) 彩色模型

HSL 模型一般也被叫做 HSI 模型，是美国色彩学家孟塞尔（H.A.Munsell）于 1915 年提出的。HSL 即色相 (hue)、饱和度 (saturation), 强度 (lightness/luminance)，HSI 中，I 表示强度 (intensity)。

虽然用 RGB 等三色模型描述很简单（而且对于彩色相机获取图像以及显示图像都有好处），但并不符合人的直觉——我们并不会认为一张图是由三张不同原色的图一起构成的。对人来说，一个彩色物体我们一般用色调、饱和度和亮度来描述。

HSV（V 即 value，明度）与 HSB（B 即 brightness，明度）是同一回事，是一个六角锥体模型，是 1978 年 A. R. Smith 根据颜色直观特性创建的一种颜色空间。HSV 模型和 HSV 与 HSL 之间的区别（扩展成圆柱形表示）可以看下图（图片来自于 [6]）：

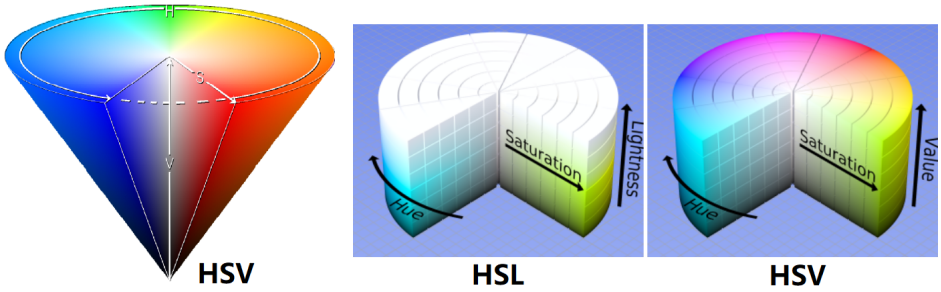

图 3.3: HSV 模型和 HSV 与 HSL 之间的区别

3.2.4 YUV 彩色模型

人对亮度比色差更敏感，由此产生了 YUV 模型，Y 表示亮度，U 和 V 表示红色和蓝色的色差信息。经过一些修改，变为 YU(Cb)V(Cr)，即 YCbCr 彩色模型（Cb 表示色度蓝，Cr 表示色度红）。YCbCr 是现在应用最广泛的 YUV 类模型。

YCoCg 是另一种 YUV 彩色模型（Co 表示色度橙，Cg 表示色度绿），它比 YCbCr 模型计算更简单，以及有着更好的颜色去关联性。由于该模型与 RGB 之间的转换过程中系数都是二进系数，即 $(\frac{1}{2},\frac{1}{4})$ 这种，所以在相互转换时有简便的转换方法，计算更容易 [7]。

3.3 小结

到这里，关于颜色空间的基础知识就介绍完了。但是不同的色彩模型其实在定义以及与 RGB 相互转换的原理都省略了，因为这些内容理解起来确实需要很多时间和精力——大概只有色彩学专家才能把里面的方方面面都搞明白吧。由此，我对 HSV 和 HSI 的基本原理只进行了略讲，以前在翻书中花了大量精力去研究原理，但现在对自己的研究好像没有什么作用，因此也就没有再花更多篇幅去详细介绍。对于美工来说，其实只需要知道一些基本概念，然后通过手动调节就能看出效果。

本文对于基础入门已经足够，以后有时间我会再对单个颜色模型以及应用场景做更详细的描述。

参考文献

[1] [https://zhuanlan.zhihu.com/p/158700586]

[2] 冈萨雷斯. 数字图像处理. 第 3 版 [M]. 人民邮电出版社, 2015.

[3] https://zh.m.wikipedia.org/zh-hans/%E8%89%B2%E7%9B%B8

[4] https://www.zhihu.com/question/27467127/answer/37602200

[5] https://learnopengl-cn.github.io/05%20Advanced%20Lighting/02%20Gamma%20Correction/

[6] http://t.zoukankan.com/timlly-p-11664635.html

[7] https://en.wikipedia.org/wiki/YCoCg