

色彩校正

色彩校正[1]的目的是调整输入输出设备的颜色响应到已知状态。被校准的设备有时被称为*校准源*；用作标准的色彩空间有时也称为*校准目标*。

色彩校准已被许多行业使用，例如电视制作，游戏，摄影，工程，化学，医药等。

由于输入输出设备的制造工艺等，其通道响应存在非线性失真，为了校正该设备输出的图片，必须将其捕捉到的色彩与实际色彩进行校正。

色彩校正流程

色彩校正通常分成2个步骤：

一是先将输入色彩空间线性化为与亮度成正比。这个过程是不适定问题[2]，因此有许多不同的解决方案；

二是做线性变换，把色彩空间变成绝对RGB色彩空间。所用的线性变换的矩阵称为色彩变换矩阵（color correction matrix，CCM），也称为CCM矩阵。CCM矩阵需要通过非线性优化来求解。

拟合过程

拟合过程主要是指指定线性化方案和求解CCM矩阵。

拟合过程是首先将输入色彩线性化，然后乘以CCM矩阵以变换到绝对色彩空间，接着变换成色彩距离计算空间（通常是CIE lab），与此同时，参考色彩也转成色彩距离计算空间，然后去优化输入色彩与参考色彩之间的距离，使其尽可能的小，由此求出CCM矩阵。

推断过程

当完成拟合过程后，我们可以对图像进行校正。对于输入的图片，我们使用拟合时使用的线性化方式进行线性化，然后乘以CCM矩阵，此时数据已成为绝对的线性RGB色彩空间。然后我们将线性化RGB空间转换成RGB空间，然后输出图像。注意，线性化RGB空间转换成RGB空间的反线性化过程是由色彩空间决定的，与之前的线性化过程无关。

校正色卡

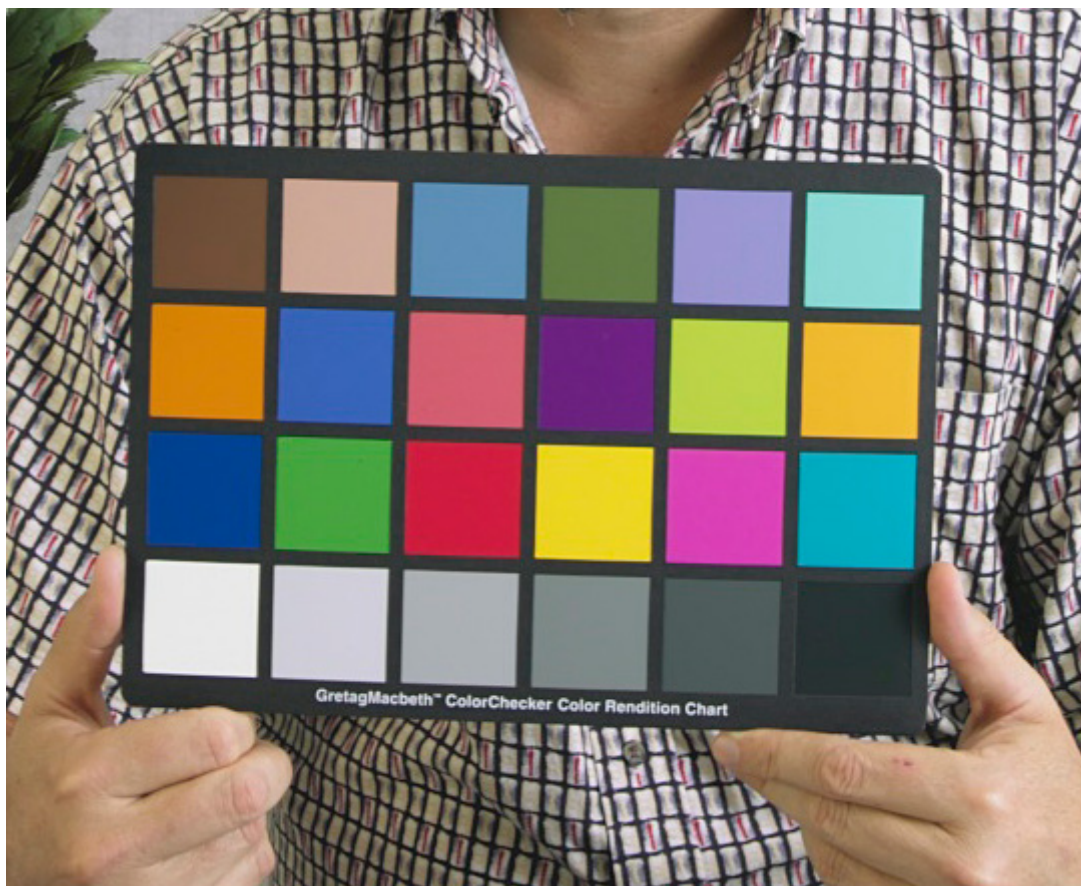
通常使用的校准色彩叫做色卡（colorchecker），最著名的是麦克白色卡（Macbeth ColorChecker）。

色卡提供色彩校正中的参考色，所有的颜色都已经被标定。最流行的标准色卡是Macbeth色卡，如图[3]所示，它包括4*6个色块，其中，最后一行的色块是灰色色块，可以用于灰度线性化或是白平衡。

Macbeth色卡在2度角D50光源下的颜色被多人标定过，各自的结果互相有差异[4-5]。2度角D65光源的颜色可以通过色彩适应来计算，也可以使用测量结果。本程序支持Macbeth色卡，2度角D50和2度角D65的颜色表的数据来自于[6]，注意，使用色彩适应去将2度角D50转换成2度角D65与程序自带的数据会有差异。

此外，Xrite公司还生产种类各异的其他色卡[7]。

此外，可以手制色卡，标定所有颜色。



线性化

进行色彩校正的时候，对测量数据的第一步操作便是将其线性化。由于测量色彩空间尚未标定，我们通常采用一些经验的方式来进行线性化。经验上通常采用的线性化有这么几种[8]：

1. 恒等变换。线性化时不做任何改变，通常原因是输入的RGB图像通道值与亮度成正比。比如输入的测量数据为RAW格式，那么测量数据已经是线性化了的，因此不需要进行线性化。
2. 伽马校正。gamma值通常设为2.2，也可以自定义。
3. 多项式拟合。为了防止过拟合，拟合的次数通常不超过3，具体拟合方法又能细分成好几种。

CCM矩阵

色彩校正的时候通常使用CCM矩阵作为从线性化的输入色彩空间到线性绝对色彩空间变换的近似。

CCM矩阵的形状通常 3×3 和 4×3 两种。前者对色彩的数值进行线性变换，而后者做仿射变换。换言之，色彩空间在前者的变换后保持原点不变，而后者可以发生平移。可见， 3×3 的CCM矩阵的变换集合是 4×3 的真子集，这意味着使用 4×3 CCM矩阵拟合的解集更大。然而，最新的论文更愿意使用 3×3 的CCM矩阵而非后者。

在拟合过程时，CCM矩阵需要有个初始值用以之后的优化。通常，初始化的方案有2种，一种采用白平衡，一种采用最小二乘法估计。

色彩距离

色彩距离[9]量化了人们感受的色彩差异。

通常情况下，使用[国际照明委员会](#)（CIE）提出的CIE76，CIE94或CIEDE2000的标准。它们都需要先将色彩空间转换成CIE lab空间中，然后使用数学公式来计算。CIEDE2000的公式中存在一些不连续性，详见文献[10]。

此外CMC l:c (1984)距离也是常见的色彩距离。

此外，我们可以使用RGB空间的欧式距离作为色彩距离，它在机器视觉有一定用途；或者使用线性RGB空间的欧式距离作为色彩距离，它计算简单，可以作为基于其他距离的模型的初始值，是最小二乘法初值估计的由来。

饱和

并非所有颜色都能参与到最终损失函数的计算。最大的排斥理由是饱和[8]。如果测量的某个颜色的R, G, B通道中有一通道达到或非常靠近最大值，很可能在这个通道发生了饱和。饱和的出现通常意味着该通道实际亮度可能被截断了，不能反映真实的值，无法被线性化。因此，需要将饱和的颜色去除，判定条件是其中任一通道发生了饱和。基于相同的理由，饱和通道也不能用于计算线性化过程的参数。

损失函数

为了优化CCM矩阵，需要一个CCM矩阵映射到实数值的函数，然后尽可能减少实数值以获取更好的CCM矩阵，而这个函数就被称为损失函数[11]。色彩校正中，损失函数通常设置为所有测量数据与参考数据对应色彩距离的加权平方和，而这个权重值通常有几种设置方法：

1. 均为1，即所有颜色差值的地位相等；
2. 第二种是等比与亮度的幂，此处的亮度是简单的设置为参考色彩在CIE lab色彩空间中的 L^* 分量；
3. 第三种是手动输入，这种更为灵活，但前提是使用者充分掌握色彩领域相关知识。

所有的权重都将归一化，以便比较损失函数值。归一化并不会影响损失函数的收敛。

非线性优化

有了损失函数后，便可以对CCM矩阵做非线性优化。

由于最常用的CIEDE2000的距离公式并不连续，因此不能采用基于导数的非线性优化方法。Nelder-Mead方法[12]是最广泛使用的无导数非线性优化方法，有许多已有的实现可使用，一般优先使用该方法作为非线性优化方法。此外，模式搜索（pattern search method, PSM）[13]因其过程简单易懂易实现，也是业界经常使用的非线性优化方法。

参考文献

1. https://en.wikipedia.org/wiki/Color_correction
2. Bianco, S., Bruna, A.R., Naccari, F., Schettini, R.: Color correction pipeline optimization for digital cameras. J. Electron. Imaging **22**(2), 023014:1–023014:10 (2013)
3. <https://en.wikipedia.org/wiki/ColorChecker>
4. <http://www.babelcolor.com/colorchecker.htm>
5. https://xritephoto.com/ph_product_overview.aspx/?ID=938&Action=Support&SupportID=5884
6. <https://www.imatest.com/wp-content/uploads/2011/11/Lab-data-Illuminate-D65-D50-spectro.xls>
7. <https://xritephoto.com/>
8. <https://www.imatest.com/docs/colormatrix/>
9. https://en.wikipedia.org/wiki/Color_difference
10. Sharma, Gaurav; Wu, Wencheng; Dalal, Edul N. (2005). "The CIEDE2000 color-difference formula: Implementation notes, supplementary test data, and mathematical observations" (PDF). *Color Research & Applications*. Wiley Interscience. **30** (1): 21–30. doi:10.1002/col.20070
11. https://en.wikipedia.org/wiki/Loss_function
12. https://en.wikipedia.org/wiki/Nelder%E2%80%93Mead_method
13. [https://en.wikipedia.org/wiki/Pattern_search_\(optimization\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Pattern_search_(optimization))