

CCM 原理

其实很简单，本质上就是调整饱和度。一个 3×3 的矩阵，去乘以 RGB 组成的 3×1 矩阵得到新的值；或者一个 3×4 的矩阵，去乘以 RGB 再补上一个 1 的 4×1 向量，得到了 3×1 的新值。

通常用色卡来做：

1. 假设标准色卡的参考 RGB 为 b ，其大小为 3×24 ，每一列表示色卡的 RGB
2. 假设采集图片的色卡的 RGB 为 x ，其大小为 3×24 ，每一列表示色卡的 RGB。

通过求解 $Ax=b$ 即可得到 A 这个 3×3 矩阵了；那如果 A 是 3×4 矩阵呢，那么 x 的大小是 4×24 ，原来的 x 加上一列全 1，这样求解就是正确大小了。

为了便于讲述， x 选择 3×3 的矩阵，其中的元素从左上角开始计数， m_1 到 m_9 。可知：

$$\text{newR} = m_1 * R + m_2 * G + m_3 * B$$

$$\text{newG} = m_4 * R + m_5 * G + m_6 * B$$

$$\text{newB} = m_7 * R + m_8 * G + m_9 * B$$

有一个问题是会破坏白平衡，以白色块举例子， $R=G=B$ ，那么 $\text{newR} = R * (m_1 + m_2 + m_3)$ 、 $\text{newG} = G * (m_4 + m_5 + m_6)$ 、 $\text{newB} = B * (m_7 + m_8 + m_9)$ ，如果系数不进行约束，极大可能白色块 newR 、 newG 、 newB 不相等。

所以通常会有约束： $m_1 + m_2 + m_3 = m_4 + m_5 + m_6 = m_7 + m_8 + m_9 = \alpha$ ，其中 α 是一个常数，通常是 1，当然你也可以取别的值。不过还是 1 最好，还是拿白色块思考，是 1 的话， $\text{newR} = R$ ，不会改变原来的值太多。

有约束了就不能直接在 $Ax=b$ 用逆矩阵求解了。那就是一个最小化问题， A 相当于求下面矩阵。

$$\text{CCM} = \begin{bmatrix} 1 - x_1 - x_2 & x_1 & x_2 \\ x_3 & 1 - x_3 - x_4 & x_4 \\ x_5 & x_6 & 1 - x_5 - x_6 \end{bmatrix}$$

最小化就是最小化 **24 色卡的差距**，那么这个差距怎么算呢？每个预测色卡和参考色卡的 RGB 之差的平方和？nonono，有专门的颜色差异指标，又是一个很大的话题了，没必要细看。

可以去看 wiki 上的颜色差异，这里简单说一下，有两种指标：deltaE 和 deltaC，这两个都是需要将 RGB 转为 Lab 再进行比较。deltaE 比 deltaC 多考虑了 L 这个亮度指标，**不过本质上它们是一个东西（个人推测）**，你根据 deltaE 进行优化最后得到参数和 deltaC 优化是一样的，只不过最后的指标值会有不同罢了。比如相当于一个用 sum(x)，一个用 sum(x+1)。

deltaE 和 deltaC 又有很多变种，从一开始的直接平方差之和，到后来各种条件，没必要细看，知道这玩意就行了，比如这个图，一个是 76 年的，一个是 00 年，后面太复杂了额：

应用 (L_1^*, a_1^*, b_1^*) 和 (L_2^*, a_2^*, b_2^*) 两个 **L*a*b*** 色彩空间的颜色：

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

本公式对应的**最小可觉差**： $\Delta E_{ab}^* \approx 2.3$ [6]

CIEDE2000 [编辑]

鉴于1994年的公式并没有充分解决**感知非均匀特性**的问题，CIE再次修缮了定义，并加入了5个修订系数：[12][13]

- 色调旋转项(R_T)，用来应对常出问题的蓝色区域（色相角度275°左右）；[14]
- 中性色调补偿（对应L*C*h差异）
- 亮度补偿（ S_L ）
- 色度补偿（ S_C ）
- 色调补偿（ S_H ）

$$\Delta E_{00}^* = \sqrt{\left(\frac{\Delta L'}{k_L S_L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C'}{k_C S_C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H'}{k_H S_H}\right)^2 + R_T \frac{\Delta C'}{k_C S_C} \frac{\Delta H'}{k_H S_H}}$$

注：下面的公式请使用角度而非弧度，尤其在 R_T 上需要注意。

k_L, k_C, k_H 一般取1。

$$\Delta L' = L_2^* - L_1^*$$

$$\bar{L} = \frac{L_1^* + L_2^*}{2} \quad \bar{C} = \frac{C_1^* + C_2^*}{2}$$

$$a'_1 = a_1^* + \frac{a_1^*}{2} \left(1 - \sqrt{\frac{\bar{C}^7}{\bar{C}^7 + 25^7}}\right) \quad a'_2 = a_2^* + \frac{a_2^*}{2} \left(1 - \sqrt{\frac{\bar{C}^7}{\bar{C}^7 + 25^7}}\right)$$

$$\bar{C}' = \frac{C'_1 + C'_2}{2} \text{ and } \Delta C' = C'_2 - C'_1 \quad \text{where } C'_1 = \sqrt{a_1'^2 + b_1'^2} \quad C'_2 = \sqrt{a_2'^2 + b_2'^2}$$

$$h'_1 = \text{atan2}(b'_1, a'_1) \mod 360^\circ, \quad h'_2 = \text{atan2}(b'_2, a'_2) \mod 360^\circ$$

Note: The inverse tangent (\tan^{-1}) can be computed using a common library routine `atan2(b, a)` which usually has a range from $-\pi$ to π radians; color specifications are given in 0 to 360 degrees, so some adjustment is needed. The inverse tangent is indeterminate if both a' and b are zero (which also means that the corresponding C' is zero); in that case, set the hue angle to zero. See Sharma 2005, eqn. 7.

$$\Delta h' = \begin{cases} h'_2 - h'_1 & |h'_1 - h'_2| \leq 180^\circ \\ h'_2 - h'_1 + 360^\circ & |h'_1 - h'_2| > 180^\circ, h'_2 \leq h'_1 \\ h'_2 - h'_1 - 360^\circ & |h'_1 - h'_2| > 180^\circ, h'_2 > h'_1 \end{cases}$$

Note: When either C'_1 or C'_2 is zero, then $\Delta h'$ is irrelevant and may be set to zero. See Sharma 2005, eqn. 10.

$$\Delta H' = 2\sqrt{C'_1 C'_2} \sin(\Delta h'/2), \quad \bar{H}' = \begin{cases} (h'_1 + h'_2 + 360^\circ)/2 & |h'_1 - h'_2| > 180^\circ \\ (h'_1 + h'_2)/2 & |h'_1 - h'_2| \leq 180^\circ \end{cases}$$

Note: When either C'_1 or C'_2 is zero, then \bar{H}' is $h'_1 + h'_2$ (no divide by 2; essentially, if one angle is indeterminate, then use the other angle as the average; relies on indeterminate angle being set to zero). See Sharma 2005, eqn. 7 and p. 23 stating most implementations on the internet at the time had "an error in the computation of average hue".

$$T = 1 - 0.17 \cos(\bar{H}' - 30^\circ) + 0.24 \cos(2\bar{H}') + 0.32 \cos(3\bar{H}' + 6^\circ) - 0.20 \cos(4\bar{H}' - 63^\circ)$$

$$S_L = 1 + \frac{0.015(\bar{L} - 50)^2}{\sqrt{20 + (\bar{L} - 50)^2}} \quad S_C = 1 + 0.045\bar{C}' \quad S_H = 1 + 0.015\bar{C}' T$$

$$R_T = -2\sqrt{\frac{\bar{C}'^7}{\bar{C}'^7 + 25^7}} \sin\left[60^\circ \cdot \exp\left(-\left[\frac{\bar{H}' - 275^\circ}{25^\circ}\right]^2\right)\right]$$

最后的最后，说一下代码实现，用的陈伟师兄写的代码，写的很好，最终实现的代码在 `color_matrix.py` 中。本质上用的 `scipy` 的 `minimize` 来做，他的好处是不用在计算式中将 $1-m_2-m_3$ 显著地替换 m_1 ，而是在参数 `constraints` 中添加 $m_1+m_2+m_3=1$ ，这样看起来很直观。

不适合入门，但是回头看感觉很不错：<https://zhuanlan.zhihu.com/p/413851281>.