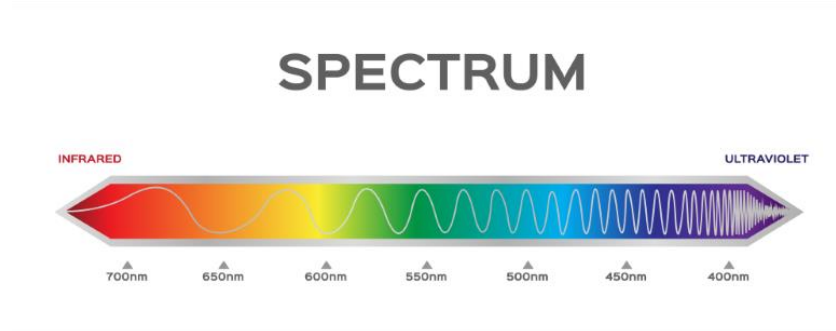


颜色一致性指数 (COLOR CONSISTENCY INDEX 简称 CCI)

颜色一致性指数基于物理和比色法，因此让我们首先回顾比色法的基础。

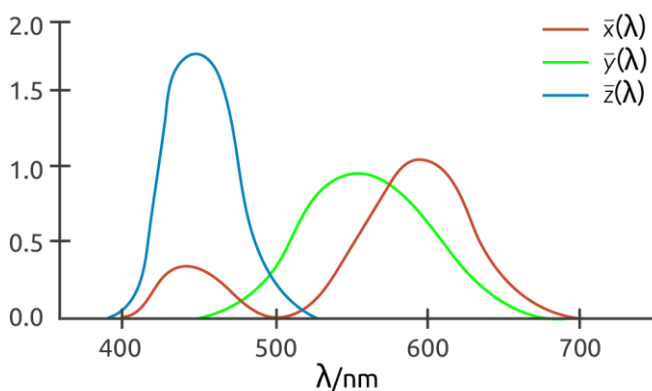
可见光只是电磁辐射的一小部分，人眼只能看到 380nm (紫) 到 780nm (深红) 的波长



可见光谱 $I(\lambda)$ 从 380nm 到 780nm

图 1

可见光通过人眼视网膜传感器转换为三个刺激值 X, Y, Z。视网膜传感器称为“锥体”，并且存在三种锥体：一种锥体用于红色 (X)，一种锥体用于绿色 (Y) 和一个锥形代表蓝色 (Z)。



Retina cones sensitive curves
视网膜锥敏感曲线

$$X = \int_{380}^{780} I(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda$$

$$Y = \int_{380}^{780} I(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda$$

$$Z = \int_{380}^{780} I(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda$$

Mathematical expression of X, Y, Z stimuli

图 2

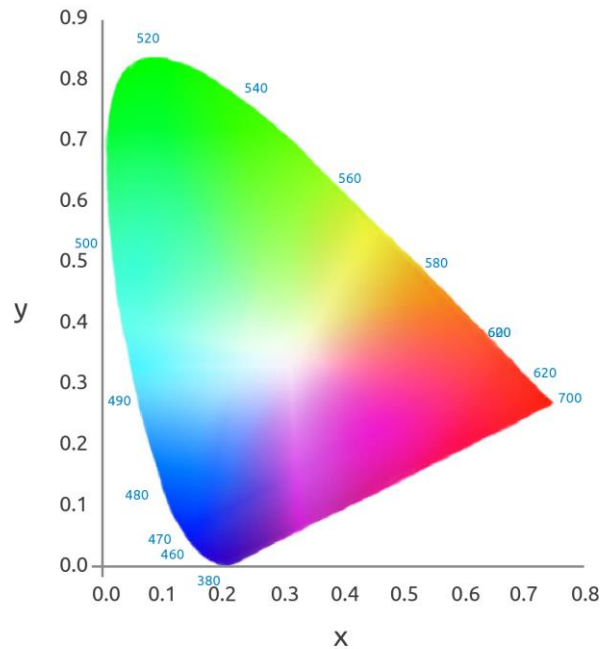
这三个刺激值 X, Y, Z 生成三维颜色空间，该空间太复杂而无法处理。因此，应该对三个刺激值进行归一化，以将绝对亮度与相关的颜色信息分开。该归一化步骤通过以下操作来执行。

$$x = \frac{X}{X+Y+Z} \quad y = \frac{Y}{X+Y+Z} \quad z = \frac{Z}{X+Y+Z} = 1-x-y$$

Normalized x, y stimuli

图 3

可以仅从 x 和 y 获得归一化的 z 刺激，因此现在将三维颜色空间缩小为二维空间。这就是获得 (x, y) 颜色空间（也称为 CIE 1931 颜色空间）的方式。当绘制在二维图片上时，我们将得到著名的“马蹄形”图，如下所示。

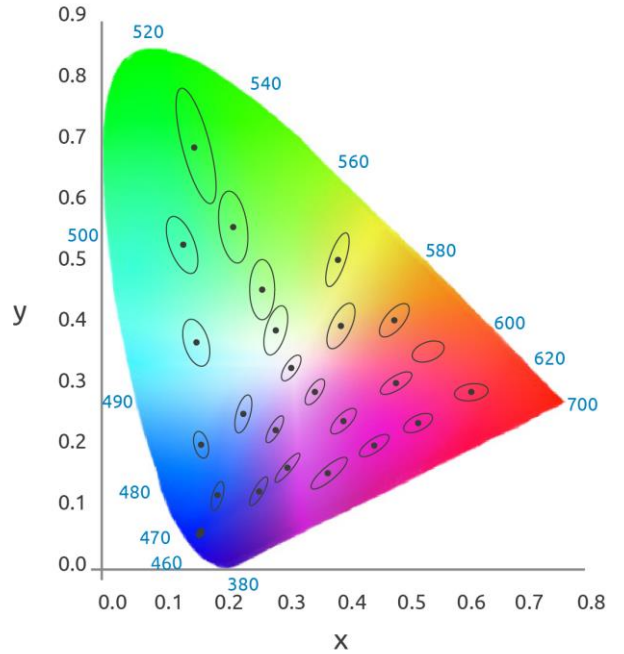


CIE 1931 Diagram

图 4

现在，让我们考虑一下该图中的两个相邻的颜色阴影。眼睛如何区分两个相邻的色度？大卫·麦克亚当 (David MacAdam) 在 1949 年回答了这个问题。他对有代表性的人群进行了实验。然后，根据结果，他定义了 25 个大小和方向不同的椭圆，其中普通人眼可能无法分辨出两种颜色。

这就是 MacAdam 椭圆的定义方式：MacAdam 椭圆是 CIE 1931 图的区域，在其中可能无法区分两种颜色。



MacAdam ellipses in the CIE 1931 Diagram

图 5

这些椭圆极大地有助于了解人眼的敏感性。但是，椭圆的大小和方向不恒定，这使得它们很难在实际操作中使用。理想情况下，计量设备将需要恒定大小的圆圈。

因此，定义了另一个颜色空间，其中人眼的灵敏度更加均匀。这个想法是应用可逆的非线性变换以便“扭曲”色彩空间。这就是 CIE 1976 色彩空间的定义方式，它是派生自 CIE 1931 的另一种色彩空间，其中人眼具有更恒定的灵敏度。从一种颜色空间到另一种颜色空间的转换由以下公式给出。

图 6
$$u' = \frac{4x}{-2x + 12y + 3} \quad v' = \frac{9y}{-2x + 12y + 3}$$

CIE1931 to CIE1976 direct transformation

图 7
$$x = \frac{9u'}{6u' - 16v' + 12} \quad y = \frac{4v'}{6u' - 16v' + 12}$$

CIE1976 to CIE1931 reverse transformation

通过直接变换获得两个新的刺激值 u' 和 v' 。绘制时，我们获得 CIE 1976 色彩空间，如下所示。

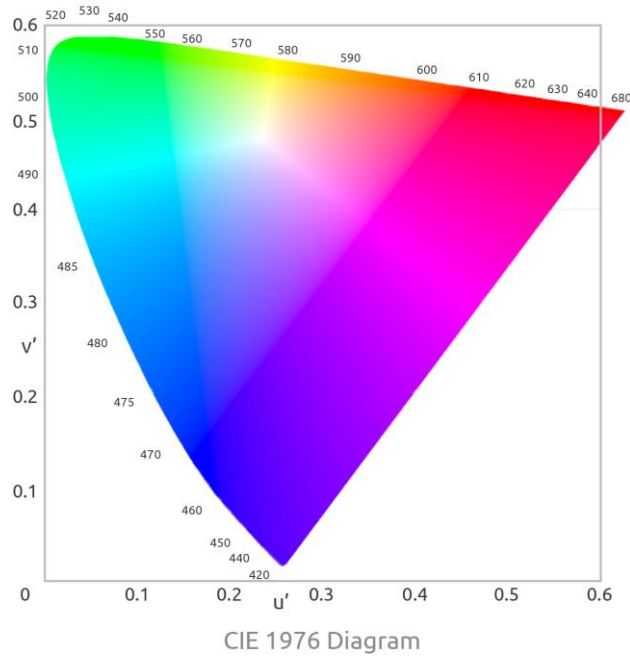
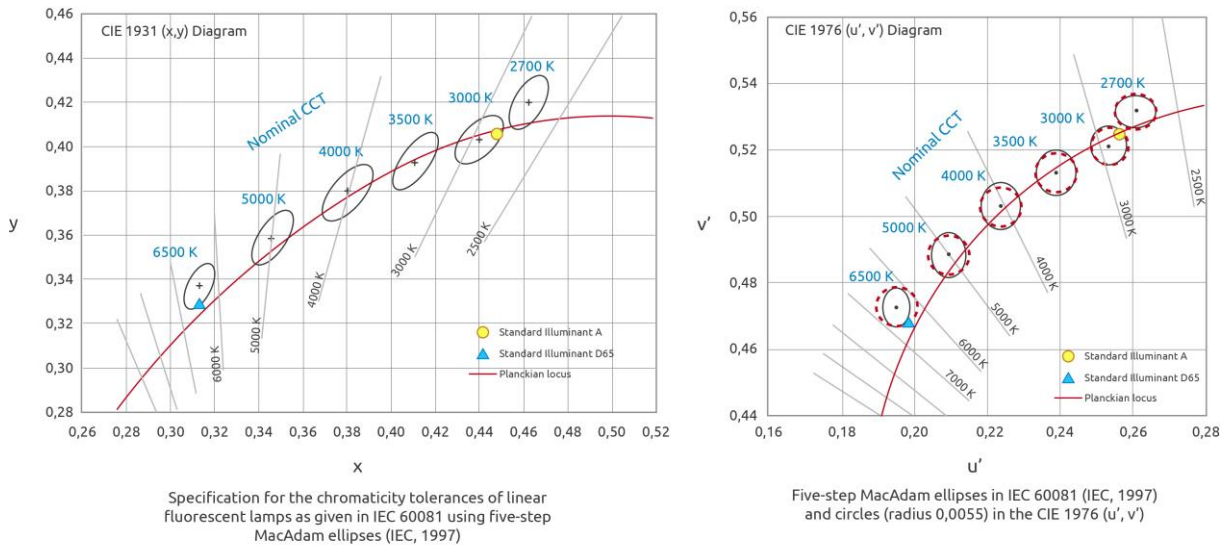


图 8

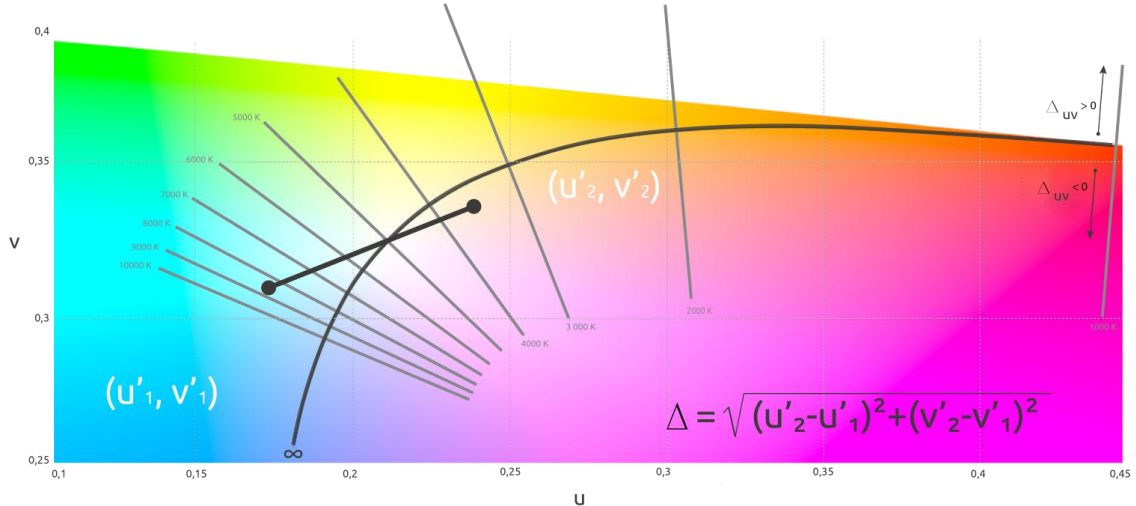
在 CIE 1976 图表中，尽管 McAdam 椭圆并非完全相同，但它们的椭圆更均匀，尺寸和方向也相当。特别是，如果我们更靠近白色阴影（也称为黑体轨迹或普朗克轨迹），则可以将 McAdam 椭圆同化为恒定的圆。



MacAdam ellipses next to the white shades in CIE1931 (left) and CIE1976 (right)

图 9

图 9 显示，在 CIE 1976 图表中，在黑体轨迹（所有白色阴影所在的位置）旁边，MacAdam 椭圆等效于 $D = 0.0022$ 恒定直径的圆。因此，检查是否可以区分两个不同的白光源的简便方法是计算 CIE1976 图中这两个白光源之间的距离。如果距离小于 $D = 0.0022$ ，则可能无法区分两个白色光源。

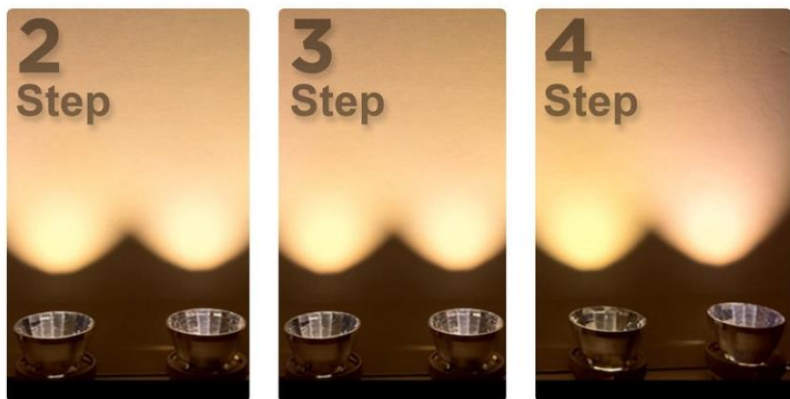


Discriminating two white shades in the CIE1976 diagram

图 10

这是定义 MacAdam 椭圆步数(n)的方式:

- 考虑两个不同的白光源 (1) 和 (2)
- 在 CIE 1931 图表中测量其色度坐标 (x_1, y_1) 和 (x_2, y_2)
- 在 CIE 1976 图中将 (x_1, y_1) 和 (x_2, y_2) 转换为 $(u' 1, v' 1)$ 和 $(u' 2, v' 2)$
- 计算 $(u' 1, v' 1)$ 与 $(u' 2, v' 2)$ 之间的距离
- 计算 $n = \Delta / 0.0022$
- 结果是 MacAdam 椭圆步数(n 值)越高，两个白光源之间的视觉差异就越大



n-steps MacAdam ellipses

Xicato

图 11

测算颜色一致性指数(CCI)方法

MacAdam 椭圆步数(n)是区分单个白光源的常用技术。所有的 LED 制造商都使用它来定义白色 LED 的颜色容器。但是，我们的主题有些不同。主题不是要区分两个不同的白光源，而是要测量单个光分布内的颜色变化。

这个想法是将椭圆步数(n)概念从两个离散点扩展到一个连续分布。代替考虑两个离散点之间的距离，应考虑连续分布的标准偏差。让我们考虑一个白色的光源，它在屏幕上投射出发白的光。想法是拍摄照度分布的“图片”，并将该图片中的所有像素都视为基本白光源。然后计算所有像素的标准偏差，并将其转换为 MacAdam 椭圆。这就是颜色一致性索引的构建方式，它是 MacAdam 椭圆的扩展。

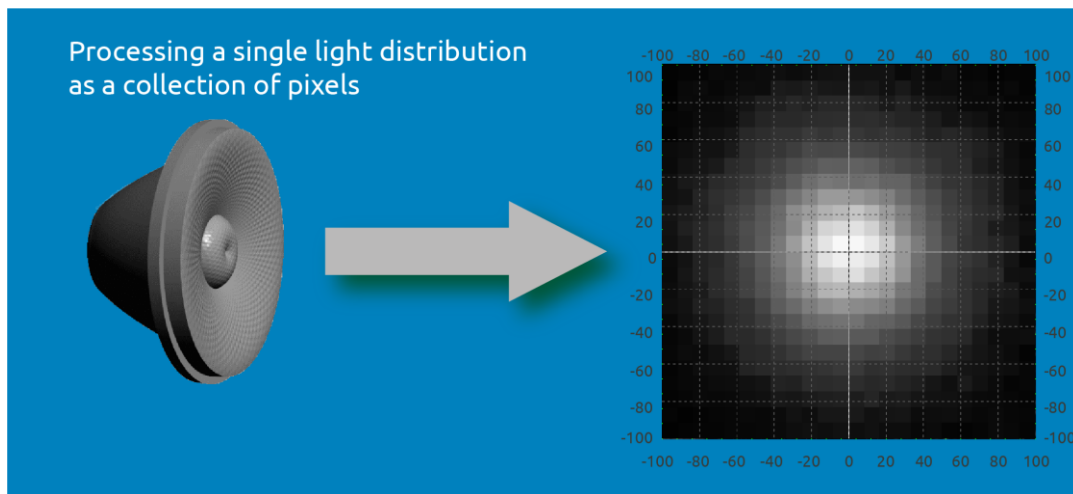


图 12

颜色一致性指数 (CCI) 应按以下方法计算。

1. 显示 2700° K 至 6500° K，优选 6000° K 的白色

换句话说，考虑白色的结果光，而不是一些奇特的颜色。

该技术假定 MacAdam 椭圆在 CIE 1976 图中为恒定半径的圆。但是，在 CIE 1976 图表中，MacAdam 椭圆可能被同化为半径不变的圆，仅适用于黑色阴影附近的白色阴影。这可以在图 9 上看到。对于任何其他颜色，尤其是对于饱和色，MacAdam 椭圆的大小和方向仍然不同。

该技术假定 MacAdam 椭圆在 CIE 1976 图中为恒定半径的圆。但是，在 CIE 1976 图表中，MacAdam 椭圆可能被同化为半径不变的圆，仅适用于黑色阴影附近的白色阴影。这可以在图 9 上看到。对于任何其他颜色，尤其是对于饱和色，MacAdam 椭圆的大小和方向仍然不同。

理想的情况是考虑“完美”的白色，它对应于 6000° K 的相关色温（在 CIE1931 图中， $x = 1/3$ 和 $y = 1/3$ ）。但是，从 6500° K 到 2700° K 的任何白色阴影仍然有效。

2. 用校准的视频色度计映射色度坐标

换句话说，将光分布投影在白色屏幕上，并使用已校准的计量设备对其“拍照”。

对于任何物理测量，都需要适当的实验室设备。测量时应使用校准的亮度计/视频色度计。要求如下：

已针对亮度/照度进行校准，具有线性灵敏度在 CIE1931 (x, y) 或 CIE1976 (u', v') 图中针对色度进行了校准。最小 10 位像素深度，理想情况下为 12 位像素深度。也可以使用 HDR 摄像机（建议使用）

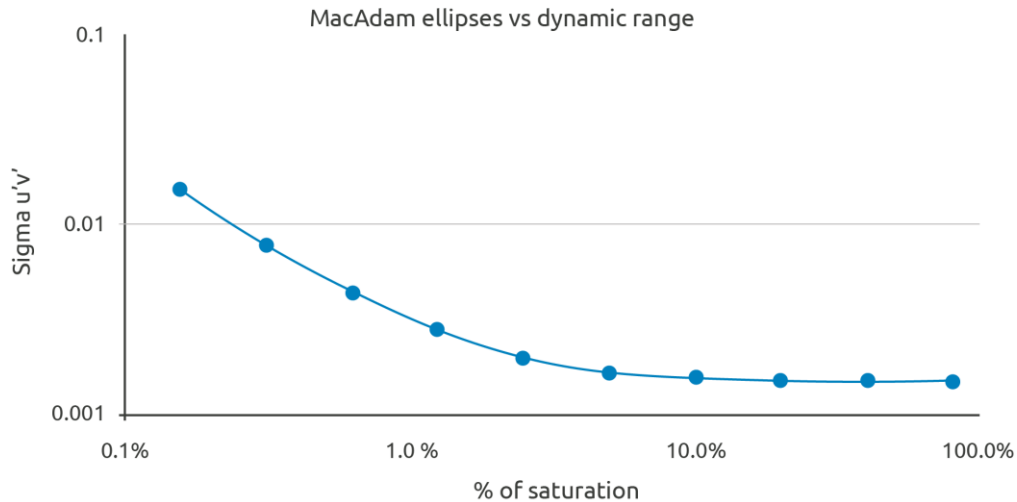
常规的数码相机使用隐藏的信号转换，以使图片看起来更好。用户无法控制的这些信号转换通常为：未校准的原始信号 XYZ => 线性矩阵转换 RGB => 自动白平衡 => 非线性伽马校正 sRGB。可以理解，使用这种更改的数据来计算 (x, y) 色度坐标可能很危险。因此，可能无法使用普通网络摄像头或智能手机！

3. 跳过所有 10%最大照度值以下的像素

换句话说，具有较低照度（能量）的像素并不重要，因此不应考虑。

从 12 位深度的数字图像中计算 (x, y) 颜色坐标可能很棘手。 (x, y) 颜色坐标应使用以下公式从原始 X, Y, Z 刺激中计算得出： $x = X / (X + Y + Z)$ 和 $y = Y / (X + Y + Z)$ 。如果 X, Y, Z 刺激太低（发生在信号低的黑暗区域），则 12 位数字化的量化过程将在计算中产生很大的噪声。这就像在计算 A / B 限制时，A 和 B 同时变为零。

下图来自使用 12 位校准的视频色度计进行的测量。在几个曝光时间下，测量了具有良好但不是很好的均匀性的白光分布。然后针对每个曝光时间计算 (u', v') 平均色点的标准偏差。100%饱和表示摄像机信号值达到 4096 值。



Influence of the dynamic range on the color coordinates measurement precision.

图 13

图 13 显示，测量值在 5% 以上稳定，而在 5% 以下变化。因此，仅考虑代表大于最大照度的 10% 的像素，并将最大照度调整为大于相机饱和度的 50% 的像素是安全的。低于最大照度值 10% 的像素将被跳过。

取最高值 10% 的还有另一种解释。在经典的测光法中，强度分布的特征是半峰高角度 (FWHM) 和百分之十峰高角度 (FWTM)。通常认为，FWTM 值代表人眼感知的主要光分布。跳过所有低于最大照度 10% 的像素，意味着在计算中仅考虑人眼感知的主光分布。

4. 通过相对照度对像素进行加权

换句话说，更重要的是给予较亮的像素。

生活经验表明，照度越高，人眼的颜色均匀性问题就越明显。因此，在对色度坐标进行运算时，应按照度对计算的每个步骤进行加权。

5. 对于所有重要像素，计算 XY 空间中的平均色点 (X0, Y0)

现在该计算结果了。为了计算标准偏差，我们首先需要计算平均值。

我们将首先计算总通量 $F_T = \sum_n E_n$ 其中 E_n 是第 n 个像素的照度。

然后，我们将计算平均色点 (x_0, y_0)。这只能在 CIE 1931 xy 图中完成，因为 CIE 1931 xy 是线性色彩空间，而 CIE 1976 u'v' 是非线性色彩空间。但是，在 CIE 1931 xy 或 CIE 1976 u'v' 中进行计算会使实践经验几乎没有差别。

然后，按照度加权的平均色点 (x_0, y_0) 应计算如下。

$$x_0 = \frac{1}{F_T} \sum_n E_n \times x_n \text{ 和 } y_0 = \frac{1}{F_T} \sum_n E_n \times y_n$$

图 14

当照度恒定 ($E_n = \text{恒定}$) 时，可以指出该公式是平均值计算。

请记住，任何低于最大照度 10% 的像素都将被跳过。

6. 对于所有重要像素，计算 U' V' 空间中的标准偏差： $\sigma_{u' v'}$

应使用以下公式将平均色点 (x_0, y_0) 转换为 CIE 1976 (u'_0, v'_0) 颜色坐标

$$u'_0 = \frac{4x_0}{-2x_0 + 12y_0 + 3} \text{ 和 } v'_0 = \frac{9y_0}{-2x_0 + 12y_0 + 3}$$

按照度加权的标准偏差 $\sigma_{u'v'}$ ，应按以下方法计算。

$$\sigma_{u'v'} = \sqrt{\frac{1}{F_T} \sum_n E_n [(u'_n - u'_0)^2 + (v'_n - v'_0)^2]}$$

图 15

当照度恒定 ($E_n = \text{恒定}$) 时，可以指出该公式是标准偏差计算。

请注意，任何低于最大照度 10% 的像素都将被跳过。

7. 解释结果

颜色一致性指数 (CCI) 是标准偏差 $\sigma_{u'v'}$, 按照图 15 计算。该数字通常在 0.001 至 0.050 之间变化。

颜色一致性指数 (CCI) 是 MacAdam 椭圆步数(n)概念的扩展, 适用于连续的白光分布。在实际经验中, 其行为类似于 MacAdam 椭圆步数(n), 等效的 MacAdam 椭圆步数为 $n = \sigma_{u'v'} / 0.0011$ 。

颜色一致性指数 (CCI) MacAdam 步数 (n)	对应 u' 和 v' 颜色偏差	比色对比差异
1	<0.0016	视觉上无法察觉
2 - 4	0.0017-0.0049	视觉上很难察觉
大于等于 5	>0.0050	视觉上很明显

有关颜色一致性指数 (CCI) 的常见问题 (Q&A)

1. 您是否已对色彩一致性指数 (CCI) 进行专利保护？ 您是否允许第三方测量自己的灯具的颜色一致性指数？

我们在谈论科学，科学可能未获得专利。任何人都可以自由使用颜色一致性指数 CCI 并共享结果。

2. 我们在谈论科学，科学可能未获得专利。 任何人都可以自由使用颜色一致性指数 (CCI) 并共享结果。

颜色一致性指数 CCI 是给出趋势并比较两种光分布的指标。并不是要完全了解颜色的外观。在某种程度上，颜色一致性指数类似于半峰高最大角度 (FWHM)。FWHM 是一种衡量光束大小的值，它不能提供光分布的完整而透彻的概览。

3. 为什么选择此方法，而不考虑另一种采用更多物理参数方法？

该想法是使用照明行业的人们熟悉的已知物理概念，并将其扩展到颜色均匀性和颜色混合的问题。我们担心只有很少的人会理解和吸收基于复杂信号处理和模糊计算的新技术概念。

4. 您是否可以分享公布使用此技术进行一些测量结果？

您可以访问 <https://www.optic-gaggione.com/products/> 并浏览我们的标准光学产品组合。我们的大多数混色光学器件都具有颜色一致性指数 (CCI)。

5. 因此，颜色一致性指数 CCI 可评估透镜的质量吗？

颜色一致性指数 CCI 不完全是用于测量光源 (LED) 和透镜之间的关系的。为了获得良好的混色，您需要同时有一个好的 LED 和一个好的透镜。透镜和 LED 对齐和组装的质量也会影响混色质量。

6. 我可以使⤵用颜色一致性指数 (CCI) 来评估我的白色光源灯具的超角度颜色 (COLOR-OVER-ANGLE: CoA) 吗?

当然! 该技术最初是为 RGBW 色彩混合应用开发的, 但它也可用于可调色温灯具和白色光源灯具。如果您可以为灯具色温, 则可以使用颜色一致性指数 (CCI) 对其进行评估。