

改进的 CIELAB 均匀颜色空间

杜方家, 徐杨, 李长军*

辽宁科技大学计算机与软件工程学院, 辽宁 鞍山 114051

摘要 颜色学的发展依赖于感知现象和实验数据。随着视觉色差实验数据的增加,人们试图探索研发与 CIELAB 颜色空间一样简单,但更加均匀的颜色空间。分析了 CIELAB 颜色空间的特性,并基于这些特性提出了包含 4 个参数的颜色空间,称之为 MLAB 颜色空间。新颜色空间参数的确定是非线性约束优化问题,可保证优化后的空间能很好地预测由国际照明委员会专家组收集的视觉色差数据集 COM-corrected。基于 COM-corrected 数据集的比较表明,MLAB 颜色空间显著优于 CIELAB 颜色空间。基于色调线性数据集和椭圆数据集的测试表明,MLAB 颜色空间较 CIELAB 颜色空间也有一定程度的进步。

关键词 颜色; 均匀颜色空间; 色差度量; 感知差异; 色调; 色度椭圆

中图分类号 O432.3

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202242.0133001

Modified CIELAB Uniform Color Space

Du Fangjia, Xu Yang, Li Changjun*

College of Computer Science and Software Engineering, University of Science and Technology Liaoning,
Anshan, Liaoning 114051, China

Abstract The development of colorimetry relies on the perceptual phenomena and the experimental data. With the increase of experimental data of visual color difference, people tries to explore and develop new color space, which is as simple as the CIELAB color space, but more uniform. The characteristics of CIELAB color space are analyzed, and a color space with four parameters based on these characteristics is proposed, which is called MLAB color space. The determination of the new color space parameters is a nonlinear constrained optimization problem, which can ensure that the optimized space can well predict the COM-corrected visual color difference dataset collected by the expert group of International Commission on Illumination. Comparison based on COM-Corrected dataset shows that MLAB color space is significantly better than CIELAB color space. Tests based on hue linearity and ellipse datasets show that MLAB color space is also improved to a certain extent compared with CIELAB color space.

Key words color; uniform color space; color difference metrics; perceptual difference; hue; color discrimination ellipse

1 引言

色度学将三刺激值 XYZ 空间作为基础的颜色空间。根据应用场景的不同,研究人员着力于将三刺激值空间转换为其他空间,如用于色差计算和色彩分析的 CIELAB 颜色空间^[1],预测色貌属性及提供基于色貌模型均匀颜色空间(UCS)的色貌模型空

间^[2]等。色度学被广泛应用于颜色管理和色彩再现等领域中,其中色貌模型^[2]和设备特征化^[3-4]是跨媒体色彩再现的重要工具。虽然 XYZ 空间体系早已完善,但是准确计算三刺激值一直是颜色领域科学家关注的课题^[5]。本文对 CIELAB 颜色空间进行了分析并研究了如何改进该空间。

国际照明委员会(International Commission on

收稿日期: 2021-06-15; 修回日期: 2021-07-15; 录用日期: 2021-07-19

基金项目: 国家自然科学基金(61575090,61775169)、辽宁省教育厅基金(LJKZ0310,LJKZ0319)

通信作者: *cjliustl@sina.com

Illumination, CIE) 于 1976 年推出 CIELAB 颜色空间^[1], 随后该颜色空间被广泛应用于各个领域。许多色差公式和颜色空间都是在 CIELAB 颜色空间的基础上发展起来的^[6], 如 CMC^[7], DIN99^[8], CIE94^[9], DIN99d^[10] 等。在任何照明和观察条件下, 实现颜色空间中任意两种颜色刺激的感知差异和计算所得到的色差保持一致是改进色差公式的主要目标^[11]。因此, Luo 等^[12] 基于一系列色差实验数据的拟合, 得到了用于评估小到中等颜色差异的 CIEDE2000 色差公式, 该公式也成为目前感知差异与计算色差一致性表现最好的色差公式。然而, CIEDE2000 色差公式只能进行色差的量化, 并不与相关的颜色空间对应, 故其无法解决与颜色色调、亮度差异相关的问题。CIE 技术专家组 1-55 指出, 理想色差公式应建立在相关的 UCS^[10] 上, 该色差公式就是 UCS 上的欧氏距离。DIN99 以及 DIN99d 等虽然具有相关的颜色空间, 但其转换公式相对复杂, 这会给实际应用带来不便。尽管 CIEDE2000 色差公式已经正式取代 CIELAB 色差公式, 但是 CIELAB 颜色空间以其转换公式简单, 相对均匀等特点仍在被广泛地应用。CIELAB 转换公式由 Munsell 色系 (Munsell notation) 的拟合得到, 随着心理物理学实验完备性和科学性的提升, 最初拟合得到的 CIELAB 颜色空间转换公式已不再适用于当

今广泛使用的色差数据集^[11], 即 1976 年 CIELAB 颜色空间预测得到的色差已不能与感知颜色差异较好地匹配。因此, 找到一个与 CIELAB 颜色空间一样简单, 但又能很好预测视觉色差实验数据的颜色空间是非常有必要的。

本文将 CIE 技术专家组 1-55 收集的物理心理学实验色差数据集作为训练数据, 通过对现有 CIELAB 转换公式的分析, 找到了需要优化的参数和相应的约束条件并进行了优化, 推导出了与 CIELAB 转换公式形式相同, 且能更好预测色差视觉实验数据的颜色空间, 称之为 MLAB 空间。关于 CIELAB 颜色空间的优化和 MLAB 颜色空间的推导将会在第 2 节中讨论, 第 3 节为 CIELAB 颜色空间和 MLAB 颜色空间的性能对比, 最后一节为结论。

2 色差数据和 MLAB 颜色空间

2.1 色差数据集

使用由 CIE 技术专家组 1-55 收集的部分色差数据集, 这些色差数据来自不同机构的心理物理学实验, 分别为 BFD-P, Leeds, RIT-DuPont, Witt 和 COM-corrected 数据集, 如表 1 所示。表 1 中还介绍了这些数据集的样本个数、在 CIELAB 空间中的平均色差、样本材质和实验环境等相关参数。

表 1 BFD-P, Leeds, RIT-DuPont, Witt 和 COM-corrected 数据集的相关参数

Table 1 Related parameters for BFD-P, Leeds, RIT-DuPont, Witt and COM-corrected datasets

Dataset	Number of pairs	Mean (ΔE_{ab}^*)	Weighting coefficient	Light source	Material
BFD-P	2776	3.0	1	Three reference whites close to D65	Various
Leeds	307	1.6	9	D65	Matt paint
RIT-DuPont	312	1.4	9	Color temperature of 6100 K	Gloss paint
Witt	418	1.9	7	D65	Gloss paint
COM-corrected	11273			All above	All above

在这些数据集中, BFD-P 数据集由英国 Derby 大学 Luo 等实验得到, 具有最多的样本个数 (2776 个)。BFD-P 数据集使用多种纺织样本, 在 3 种接近 D65 的光源下进行实验。Leeds 数据集是 Kim 和 Nobbs 于 1997 年在利兹大学进行实验获得的。Witt 数据集使用光泽涂料作为样本, 在 D65 光源下实验获得。RIT-DuPont 数据集是 1984 年罗切斯特理工大学的 Munsell 实验室和杜邦自动化所联合获得的数据, 由观察者在色温为 6100 K 的环境下观察有光泽涂料的样本得到。为了获得更好的色差公式训练效果, Luo 等^[12] 将这 4 个数据集进行了加权的组合, 其比例为 1:9:9:7, 组合后的数据集称为

COM-weighted 数据集。随后, Melgosa 等^[13] 对 COM-weighted 数据集进行了修正, 最终成为 COM-corrected 数据集。CIEDE2000 色差公式由 COM-weighted 数据集训练得到, 在本实验中使用 COM-corrected 数据集来训练得到新的颜色空间。

2.2 标准化残差平方和

Guan 等^[14] 于 1999 年提出 PF/3 (performance factor divided by 3) 方法来评价预测色差和感知颜色差异的拟合程度。由于 PF/3 方法在使用时存在一些参数相关的问题^[15], 故 Garcia 等^[16] 提出了标准化残差平方和 (STRESS, S_{STRESS}) 指标。本实验将 STRESS 作为拟合的评价指标, 该指标的表达式为

$$\left\{ \begin{aligned} S_{\text{STRESS}}(\Delta E, \Delta V) &= 100 \left[\frac{\sum_{i=1}^N (\Delta E_i - \gamma \Delta V_i)^2}{\sum_{i=1}^N \gamma^2 \Delta V_i^2} \right]^{1/2}, \\ \gamma &= \frac{\sum_{i=1}^N \Delta E_i^2}{\sum_{i=1}^N \Delta E_i \Delta V_i} \end{aligned} \right. \quad (1)$$

式中： ΔE_i 为第 i 个样本的色差； ΔV_i 为第 i 个样本的感知差异； N 为该数据集中的样本个数。STRESS 值保持在 0~100 范围内，该指标越小表示预测色差和感知差异的匹配程度越好。

2.3 MLAB 颜色空间

CIELAB UCS(ANLAB) 来源于早期广泛使用的 Adams-Nickerson UCS^[17]，其形式为

$$\begin{cases} L = 40 \times 0.23V_Y = 9.2V_Y \\ a = 40(V_X - V_Y) \\ b = 40 \times 0.4(V_Y - V_Z) = 16(V_Y - V_Z) \end{cases} \quad (2)$$

式中：常数 40 用于调节色差的量级，文献[17]中推荐使用 42.00, 41.86 和 50.00； V_X, V_Y, V_Z 为 Munsell 色系中的明度 (V)； L 为 AN40 空间中的亮度值； a 和 b 为色度坐标。若样本和对应光源的三刺激值分别为 X, Y, Z 和 X_w, Y_w, Z_w ，则 V_Y 可由 Judd 多项式^[18]确定

$$\begin{aligned} 100(Y/Y_w) &= 1.2219V_Y - 0.23111V_Y^2 + \\ &0.233951V_Y^3 - 0.021009V_Y^4 + 0.0008404V_Y^5, \end{aligned} \quad (3)$$

V_X 和 V_Z 也可由 (3) 式类似的形式定义。(3) 式和 (2) 式中的常数项 (0.23 和 0.4) 均在 Munsell 色系的基础上获得。Adams^[19] 基于 Munsell 系数的研究发现，当固定明度时坐标空间 ab 的等纯度线接近圆形，优于 CIE 于 1931 年推出的 xy 空间。

由于 (2) 式中 V_X, V_Y, V_Z 的确定较为困难，因此采用 1964 CIEUVW 空间的亮度函数 W^* 替代。亮度函数 W^* 的表达式为

$$W^* = 25(100Y/Y_w)^{1/3} - 17, \quad (4)$$

式中： W^* 在 0~100 范围内。以 $V_Y = W^*/10$ 的形式替换 V_Y ，并以类似的形式将 V_X 替换为 $[25(100X/X_w)^{1/3} - 17]/10$ ，将 V_Z 替换为 $[25(100Z/Z_w)^{1/3} - 17]/10$ 。因此，(2) 式的形式变为

$$\begin{cases} L = 106.76(Y/Y_w)^{1/3} - 15.64 \\ a = 464.16[(X/X_w)^{1/3} - (Y/Y_w)^{1/3}] \\ b = 185.66[(Y/Y_w)^{1/3} - (Z/Z_w)^{1/3}] \end{cases} \quad (5)$$

为了将亮度值保持在 0~100 范围内，将 L, a, b 值除以 0.9112，得到

$$\begin{cases} L_1 = L/0.9112 = 117.16(Y/Y_w)^{1/3} - 17.16 \\ a_1 = a/0.9112 = 509.39[(X/X_w)^{1/3} - (Y/Y_w)^{1/3}] \\ b_1 = b/0.9112 = 203.75[(Y/Y_w)^{1/3} - (Z/Z_w)^{1/3}] \end{cases} \quad (6)$$

对 (6) 式中的参数进行一定的调整，可以得到与目前使用的 1976 CIELAB 颜色空间相似的参数形式

$$\begin{cases} L_2 = 116(Y/Y_w)^{1/3} - 16 \\ a_2 = 500[(X/X_w)^{1/3} - (Y/Y_w)^{1/3}] \\ b_2 = 200[(Y/Y_w)^{1/3} - (Z/Z_w)^{1/3}] \end{cases} \quad (7)$$

其中，当亮度值 Y 很小时可能出现负值；在立方根函数 $t^{1/3}$ 中，当 t 接近 0 时函数的导数为无穷大，即函数 $t^{1/3}$ 在计算的角度时是不稳定的，故将函数 $t^{1/3}$ 改为分段函数 $\Phi(t)$

$$\Phi(t) = \begin{cases} \frac{841}{108}t + \frac{16}{116}, & t \leq t_0 \\ t^{1/3}, & t > t_0 \end{cases} \quad (8)$$

式中：

$$t_0 = \left(\frac{24}{116}\right)^3. \quad (9)$$

将 (7) 式中的立方根函数替换为 $\Phi(t)$ ，就得到了目前广泛使用的 CIELAB 颜色空间 $L^* a^* b^*$ 的公式

$$\begin{cases} L^* = 116\Phi\left(\frac{Y}{Y_w}\right) - 16 \\ a^* = 500 \left[\Phi\left(\frac{X}{X_w}\right) - \Phi\left(\frac{Y}{Y_w}\right) \right] \\ b^* = 200 \left[\Phi\left(\frac{Y}{Y_w}\right) - \Phi\left(\frac{Z}{Z_w}\right) \right] \end{cases} \quad (10)$$

从 CIELAB 颜色空间的演变过程中可以发现，该颜色空间转换公式的参数主要由 Munsell 系数的拟合和经验公式得到，所有参数如 500, 200, 116 以及分段函数中的幂函数等都远非最优。因此，本文主要基于 CIE 技术专家组 1-55 收集的实验数据对 CIELAB 颜色空间进行优化，以确定最优参数。

需要注意的是，在 (8)~(10) 式中 $\Phi(t)$ 为 0~1 范围内单调递增的分段函数， t_0 为函数分段点。 $\Phi(t)$ 和 $\Phi'(t)$ [$\Phi(t)$ 的一阶导数] 在分段点连续，并且 $\Phi(0) = 16/116, \Phi(1) = 1, \Phi(t)$ 和 $\Phi'(t)$ 的函数图像如图 1(a) 所示。

为了保证亮度值 L^* 在 0~100 之间，在转换过程中对每个样本的三刺激值与其对应光源的三刺激值进行矫正，通过分段函数对矫正后的三刺激值进

行非线性转换。当样本为无颜色的灰色时,该样本颜色被称为中性色,其在 3 个通道的刺激值与对应光源 3 个通道的刺激值比值相同($X/X_w=Y/Y_w=Z/Z_w$),此时 $\Phi(X/X_w)=\Phi(Y/Y_w)=\Phi(Z/Z_w)$,由(10)式可知, $a^*=b^*=0$ 。中性色没有颜色特性,只有亮度差异。另外,在 $X/X_w>Y/Y_w$ 情况下,由 $\Phi(t)$ 的单调性可知,当 $a^*>0$ 时,颜色呈红色,当 $a^*<0$ 时,颜色呈绿色;在 $Y/Y_w<X/X_w$ 情况下,当 $b^*>0$ 时,颜色呈蓝色,当 $b^*<0$ 时,颜色呈黄色。

根据以上 CIELAB 颜色空间的特性,本文提出改进的 CIELAB 颜色空间,称为 MLAB 颜色空间。MLAB 颜色空间 L_m^*, a_m^*, b_m^* 的转换公式为

$$\begin{cases} L_m^* = (100 + p_1) \Phi_m\left(\frac{Y}{Y_w}\right) - p_1 \\ a_m^* = p_2 \left[\Phi_m\left(\frac{X}{X_w}\right) - \Phi_m\left(\frac{Y}{Y_w}\right) \right] \\ b_m^* = p_3 \left[\Phi_m\left(\frac{Y}{Y_w}\right) - \Phi_m\left(\frac{Z}{Z_w}\right) \right] \end{cases}, \quad (11)$$

式中: p_1, p_2, p_3 为优化参数; $\Phi_m(t)$ 为单调递增的分段函数,且一阶导数连续,该分段函数的一般形式为

$$\Phi_m(t) = \begin{cases} p_4 t_1^{p_4-1} t + \frac{p_1}{100 + p_1}, & t \leq t_1 \\ t^{p_4}, & t > t_1 \end{cases}, \quad (12)$$

式中: p_4 为优化参数; t_1 为优化后函数的分段点并

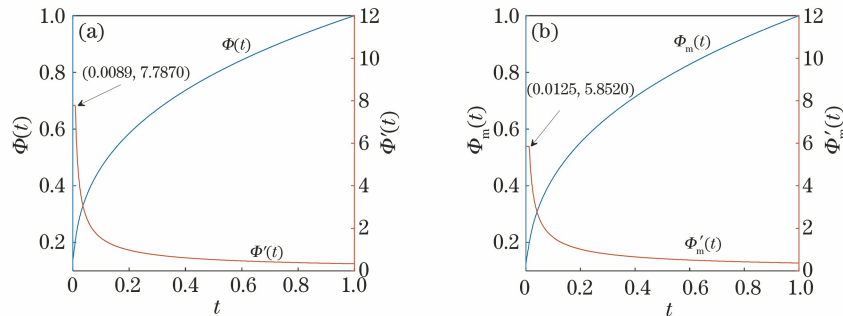


图 1 CIELAB 颜色空间和 MLAB 颜色空间的分段函数及导数图像。(a) CIELAB 颜色空间;(b) MLAB 颜色空间

Fig. 1 Piecewise function and derivative images of CIELAB color space and MLAB color space.

(a) CIELAB color space; (b) MLAB color space

3 MLAB 颜色空间的评价

3.1 预测色差实验对比表现

对于 CIELAB 颜色空间和 MLAB 颜色空间,其色差公式都可由空间内点的欧氏距离来定义。MLAB 颜色空间的色差公式为

$$\Delta E_m^* = \sqrt{(\Delta L_m^*)^2 + (\Delta a_m^*)^2 + (\Delta b_m^*)^2}. \quad (15)$$

满足

$$t_1 = \left[\frac{p_1}{100 + p_1} (1 - p_4)^{-1} \right]^{\frac{1}{p_4}}, \quad (13)$$

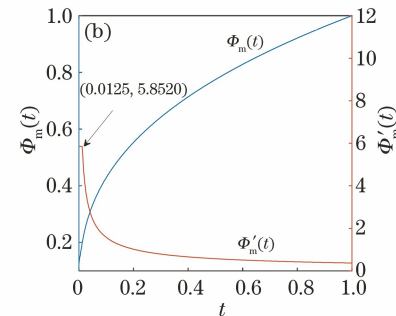
可以发现(12)式和(13)式的分段函数 $\Phi_m(t)$ 及一阶导数 $\Phi'_m(t)$ 满足在 0~1 范围内连续。为了保证 MLAB 颜色空间与 CIELAB 颜色空间有相同的红绿和黄蓝轴特性,(11)~(13)式中的优化参数需要满足

$$\begin{cases} p_1 > 0 \\ p_2 > 0 \\ p_3 > 0 \\ 0 < p_4 < 1 \end{cases}. \quad (14)$$

本文使用 COM-corrected 数据集,以(11)式为转换公式,并将预测色差与视觉感知色差间 STRESS 值最小作为优化目标。同时,使用 MATLAB 求解该具有约束的非线性优化问题。优化后的参数如表 2 所示。图 1(b)为优化后非线性函数 $\Phi_m(t)$ 及其导数 $\Phi'_m(t)$ 的函数图像,可以看到,分段函数及其导数均连续,且 $\Phi_m(t)$ 单调递增。优化后的函数分段点为 $t_1=0.0125$ 。

表 2 优化后的 MLAB 颜色空间转换公式参数

MLAB color space				
Parameter	p_1	p_2	p_3	p_4
Value	14.4000	311.5000	111.0000	0.3684



色差公式可以评价 MLAB 颜色空间和 CIELAB 颜色空间预测色差的性能。将两个颜色空间分别应用于 BFD-P, Leeds, RIT-DuPont, Witt 和 COM-corrected 数据集并预测色对色差 ΔE 。评价色差与对应感知差异 ΔV 的拟合程度仍使用 STRESS 值。表 3 展示了 CIELAB 和 MLAB 颜色空间在不同数据集上的表现。表 3 的第 1,2 行分别

给出了不同数据集下 CIELAB 和 MLAB 颜色空间预测色差和感知差异的 STRESS 值。可以发现, MLAB 颜色空间对应的 STRESS 值($S_{\text{STRESS_MLAB}}$) 在每个数据集下都小于 CIELAB 颜色空间对应的

STRESS 值($S_{\text{STRESS_LAB}}$)。因此, 新的颜色空间 MLAB 相比 CIELAB 颜色空间可以更好地预测色差实验数据。

表 3 CIELAB 和 MLAB 颜色空间在不同数据集上的表现

Table 3 Performance of CIELAB and MLAB color spaces on different datasets

Indicator	BFD-P	Leeds	RIT-DuPont	Witt	COM-corrected
$S_{\text{STRESS_LAB}}$	42.5	40.1	33.4	51.7	43.9
$S_{\text{STRESS_MLAB}}$	40.9	37.9	27.9	45.9	40.6
R	0.926	0.893	0.698	0.788	0.855
$[F_c, 1/F_c]$	[0.928, 1.077]	[0.799, 1.252]	[0.800, 1.249]	[0.825, 1.212]	[0.964, 1.038]
$S_{\text{STRESS_DE2000}}$	29.6	19.2	19.5	30.2	27.5

STRESS 值^[20]表明 MLAB 颜色空间预测视觉实验数据优于 CIELAB 颜色空间, 本文还通过统计的方式来检验两者是否有统计意义上的显著差别。根据 CIE 文件^[11], 定义 R 为

$$R = \left(\frac{S_{\text{STRESS_MLAB}}}{S_{\text{STRESS_LAB}}} \right)^2. \quad (16)$$

(16)式定义的 R 为两个空间 STRESS 比值的平方, 该指标服从自由度 $n-1$ 和 $n-1$ 的施耐德柯氏 F -分布^[11], 其中 n 为对应数据集的样本对个数。同时, 设定 95% 的置信度可以得到对应该数据集的双尾施耐德柯氏 F -分布的临界值 F_c 。表 3 中第 3, 4 行分别给出了在不同数据集下的 R 值以及置信区间 $[F_c, 1/F_c]$ 。根据 CIE 文件^[11], $R < F_c$ 表明 MLAB 颜色空间预测视觉色差数据显著优于 CIELAB 空间; $F_c \leq R < 1$ 表明 MLAB 颜色空间优于 CIELAB 空间但不显著; $1 < R \leq 1/F_c$ 表明 CIELAB 颜色空间优于 MLAB 空间, 但不显著; $1/F_c < R$ 表明 CIELAB 颜色空间显著优于 MLAB 空间。

如表 3 所示, MLAB 颜色空间在 5 个数据集上对色差的预测效果均优于 CIELAB 颜色空间, 整体上 MLAB 颜色空间的 STRESS 值比 CIELAB 颜色空间小 2~6。对于 Leeds 数据集, 检验参数 R 大于临界值 F_c 且小于 1, 而在 BFD-P, RIT-DuPont, Witt 和 COM-corrected 数据集中检验参数 R 均小于临界值 F_c , 这说明对于 Leeds 数据集, 尽管在 STRESS 值的比较中 MLAB 颜色空间要优于 CIELAB 颜色空间, 但在统计意义上 MLAB 颜色空间与 CIELAB 颜色空间预测色差与感知差异的匹配程度差异不显著。对于 BFD-P, RIT-DuPont, Witt 和 COM-corrected 数据集, MLAB 颜色空间预测色差实验数据表现(表 3 中加粗数字)要显著优于

CIELAB 颜色空间。对于由其他 4 个数据集加权组合得到并广泛使用的 COM-corrected 数据集, MLAB 有明显提升, 这标志着 MLAB 颜色空间对色差的预测与人眼感知差异的匹配程度要显著优于 CIELAB 颜色空间。

表 3 中最后一行还给出了 CIEDE2000 色差公式在各个数据集中的预测表现($S_{\text{STRESS_DE2000}}$), 可以看到, MLAB 颜色空间预测色差数据较 CIEDE2000 色差公式有很大差距。尽管与 CIELAB 空间相比, MLAB 颜色空间的均匀性有显著提高, 但 MLAB 颜色空间的均匀性还未达到理想的程度, 有一定的进步空间。然而, CIEDE2000 色差公式只能用于评价色差, 并不具备相关的颜色空间以评价亮度、色度的差异, 故 MLAB 色差公式仍有优势。

3.2 预测色调线性实验数据对比表现

色调线性实验数据常用于评价颜色空间。Xiao 等^[21]实验研究了红、黄、绿、蓝色调, 这些色调统称单一色调。该数据集使用峰值亮度为 120 cd/m^2 的 CRT(cathode ray tube)显示器进行实验, 由 185 名实验者参与观察, 其中每个色调包含 9 个数据, 共有 36 种颜色。Hung 等^[22]使用峰值亮度为 50 cd/m^2 的 CRT 显示器组织实验, 其实验数据集中包含 12 个色调, 每个色调包含 4 种色度等级, 共有 48 种颜色。Ebner 等^[23]使用峰值亮度为 71 cd/m^2 的 CRT 显示器进行心理物理学实验来确定色调, 其数据集中有 15 个色调, 每个色调有不同数量的色度和亮度的颜色, 共计 321 种。

在理想的 UCS 中, 所有具有相同色调颜色的连线是一条直线, 称为色调线, 且所有的色调线都交于原点。CIELAB 和 MLAB 颜色空间在 Xiao 数据集, Hung 和 Berns 数据集, Ebner 和 Fairchild 数据集的色调分布如图 2 所示。

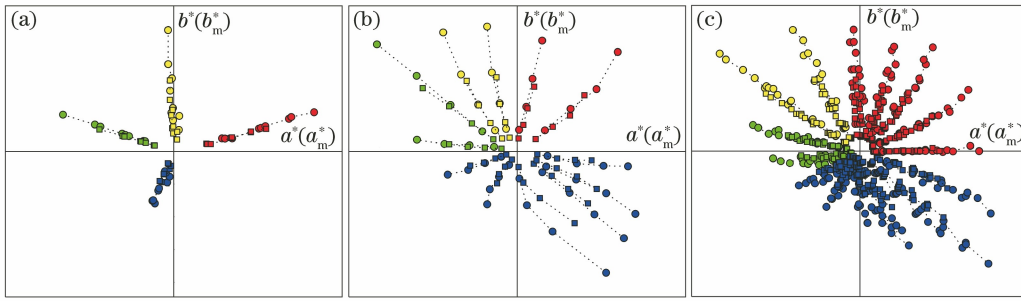


图 2 不同数据集下的 CIELAB 和 MLAB 颜色空间色调, 圆形表示 CIELAB, 正方形表示 MLAB。(a) Xiao 数据集; (b) Hung 和 Berns 数据集; (c) Ebner 和 Fairchild 数据集

Fig. 2 Hues of CIELAB and MLAB color spaces under different datasets, circle represents CIELAB, square represents MLAB. (a) Xiao dataset; (b) Hung and Berns dataset; (c) Ebner and Fairchild dataset

从图 2 中可以发现, MLAB 颜色空间比 CIELAB 颜色空间更加紧凑。MLAB 颜色空间对色调的预测与 CIELAB 颜色空间具有相似的特性, 它们预测的同色调的颜色样本较为集中地分布在色调角相近的色调线(由同一色调数据拟合出的直线)周围。由于 CIELAB 颜色空间与 MLAB 颜色空间转换公式不同, 因此它们预测色调的线性程度以及

预测色调线与中心的接近程度发生了变化。如在 Hung 和 Berns 数据集中, MLAB 空间和 CIELAB 空间在紫色区域的色调偏移角度有较大的不同。通过对预测色调拟合线的研究来对比两个颜色空间预测色调的线性程度和色调线与原点的接近程度。MLAB 和 CIELAB 颜色空间的色调拟合线如图 3 所示。

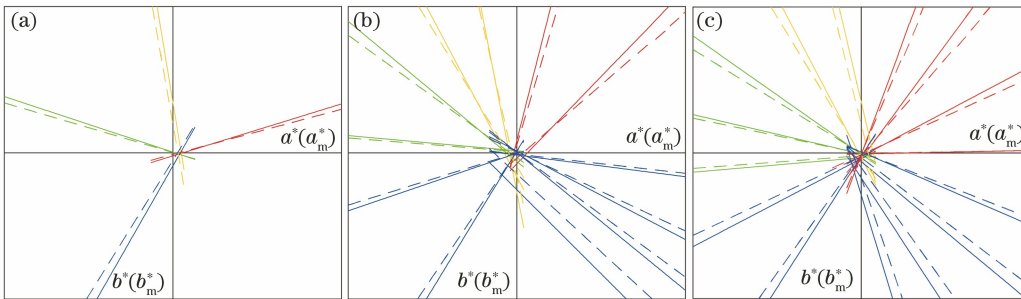


图 3 不同数据集下的 CIELAB 和 MLAB 色调拟合线, 实线代表 CIELAB, 虚线代表 MLAB。(a) Xiao 数据集; (b) Hung 和 Berns 数据集; (c) Ebner 和 Fairchild 数据集

Fig. 3 Hue fitting lines of CIELAB and MLAB under different datasets, solid line represents CIELAB, dashed line represents MLAB. (a) Xiao dataset; (b) Hung and Berns dataset; (c) Ebner and Fairchild dataset

图 3 中的拟合线是通过预测颜色样本的最小二乘拟合得到的。从图 3 中可以发现, 两个颜色空间的色调拟合线在蓝色区域有较大的角度差距, 在其他区域的角度相近。在 3 个数据集中, MLAB 颜色空间的色调拟合线都更加接近坐标原点, 特别是在 Hung 和 Berns 数据集以及 Ebner 和 Fairchild 数据集的蓝紫色区域中, MLAB 颜色空间与中心的接近程度更明显。为了量化两个颜色空间的色调线性程度和色调线接近原点的特性, 采用的指标为标准差(SD, S_{SD})^[24]和原点到色调线的相对距离 D 。这两个指标的定义为

$$\begin{cases} S_{SD} = \frac{1}{J} \sum_{k=1}^J \sqrt{\frac{1}{M-1} \sum_{j=1}^M (h_{k,j} - \eta_k)^2} \\ \eta_k = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M h_{k,j} \end{cases}, \quad (17)$$

$$\begin{cases} D_o = \frac{1}{J} \sum_{k=1}^J \delta_k \\ \delta_k = \frac{|\omega \mu_k|}{\sqrt{\omega^2 \epsilon_k^2 + 1}} \end{cases}, \quad (18)$$

式中: J 为色调线的个数; M 为每个色调线对应的颜色样本数; η_k 为第 k 个色调线的平均色调角; $h_{k,j}$ 为第 k 个色调第 j 个颜色的色调角; δ_k 为第 k 个色调拟合线与坐标原点的距离; μ_k 为色调拟合线的截距; ϵ_k 为斜率; ω 为缩放因子。利用(17)式计算出每个色调线的色调角标准差后, 取其平均以得到颜

色空间在对应数据集中整体的色调线性程度。由于 MLAB 颜色空间相较 CIELAB 颜色空间有一定的压缩,因此需要乘上一个权重将其空间放大至与 CIELAB 颜色空间相同的维度。将 CIELAB 空间的缩放因子设定为 1,MLAB 空间的缩放因子由在对

应数据集中 CIELAB 预测选定颜色的坐标值与 MLAB 空间预测该颜色坐标值的比值得到。SD 值越小,表明颜色空间的色调线性程度越好, D_o 越小,表明颜色空间色调拟合线越接近坐标原点。CIELAB 与 MLAB 颜色空间的 SD 和 D_o 如表 4 所示。

表 4 CIELAB 和 MLAB 颜色空间在不同数据集下的 S_{SD} 与 D_o 。

Table 4 S_{SD} and D_o for CIELAB and MLAB color spaces under different datasets

Color space	Xiao dataset		Hung and Berns dataset		Ebner and Fairchild dataset	
	S_{SD}	D_o	S_{SD}	D_o	S_{SD}	D_o
CIELAB	2.6	2.2	3.8	4.4	3.6	3.3
MLAB	2.8	1.5	3.8	3.2	3.7	2.4

在 3 个数据集中 MLAB 空间的缩放因子都约为 1.7。从表 4 中可以看到,在 Xiao 数据集以及 Ebner 和 Fairchild 数据集中,MLAB 颜色空间的线性程度较 CIELAB 颜色空间有轻微程度的下降,但 MLAB 颜色空间在每个数据集下的 D_o 均有提升,这表明 MLAB 颜色空间的色调线相较 CIELAB 颜色空间有更好的聚集程度,更符合色调的特性。因此,即便略微损失了部分线性程度,MLAB 颜色空间对比 CIELAB 颜色空间仍是进步的。

3.3 预测色度椭圆实验数据对比表现

通常使用围绕几个颜色中心的心理物理学实验数据在颜色空间内拟合成的三维色度椭球来判断空间的均匀性。椭球中心到椭球上的任何点不论空间

距离的大小都是等色差的。当不考虑亮度仅在色度平面讨论时,三维色度椭球成为二维的椭圆。对于理想的 UCS 来说,所有等色差点的空间距离都应相等,也就是说在 UCS 色度平面上的椭圆都应无限接近圆形,并且在空间内任意位置处色度椭圆的大小应保持一致。因此,可以通过观察某空间色度椭圆的形状与大小来判断该空间的均匀性。本文使用的色度椭圆来自 BFD-P 和 RIT-DuPont 数据集,称为 BFD-RIT 数据集^[10]。使用 Alder 开发的 Monte Carlo 方法^[25],从 BFD-RIT 数据集中选择出了 116 个可以可靠拟合的椭圆。BFD-RIT 椭圆数据在 CIELAB 和 MLAB 颜色空间的表现如图 4(a)和图 4(b)所示。

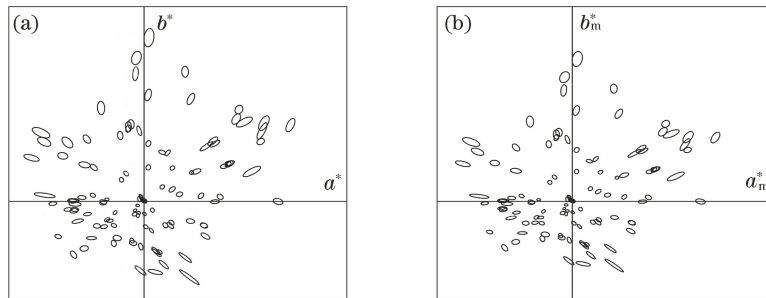


图 4 CIELAB 和 MLAB 空间的 BFD-RIT 椭圆。(a) CIELAB 颜色空间;(b) MLAB 颜色空间

Fig. 4 BFD-RIT ellipses of CIELAB and MLAB color space. (a) CIELAB color space; (b) MLAB color space

在图 4(a)中,CIELAB 颜色空间的色度椭圆伴随中心点接近原点有变小的趋势,而当中心点远离原点时椭圆有被拉伸的趋势,其中蓝紫色区域被拉伸的程度最为严重。在 MLAB 颜色空间中色度椭圆有相似的分布情况,但在黄蓝轴方向被拉伸的程度较轻。尤其在黄色区域,可以明显观察到 MLAB 颜色空间的椭圆更接近圆。通过椭圆分布很难给出明确的比较,故需要客观地度量它们的均匀性。通过判断两个空间的局部均匀性(LU, U_{LU})和全局均匀性(GU, U_{GU})^[26]来更加直观地表述这两个空间的

均匀程度。本文中 LU 和 GU 依然使用 STRESS 来定义,其形式为

$$\begin{cases} U_{LU} = f_{STRESS}(\xi, U), \\ \xi = \begin{bmatrix} A_1 & A_2 & \dots & A_I \\ B_1 & B_2 & \dots & B_I \end{bmatrix}, \end{cases} \quad (19)$$

$$\begin{cases} U_{GU} = f_{STRESS}(\tau, S), \\ \tau = [\pi A_1 B_1 \quad \pi A_2 B_2 \quad \dots \quad \pi A_I B_I] \end{cases}, \quad (20)$$

式中:下标 I 代表色度椭圆个数; A_i 为第 i 个色度椭圆长轴长度; B_i 为第 i 个色度椭圆短轴长度; ξ 为一个以长短轴比构成的向量; U 为一个与 ξ 维数相

同的全 1 向量; τ 为一个以椭圆面积构成的向量; S 为一个与 τ 维数相等的向量, 它的每个元素值都等于所有椭圆面积的均值。(19)式的目的是评价每个色度椭圆与圆形的接近程度, 也就是 LU。(20)式的目的是评价所有椭圆的面积是否接近, 即 GU。LU 和 GU 都有一定的局限性, 不能单独评价空间均匀性的优劣。CIELAB 颜色空间和 MLAB 颜色空间的 LU 和 GU 表现如表 5 所示。从表 5 中可以看到, CIELAB 与 MLAB 的 LU 表现相似, 但对于 GU, MLAB 颜色空间略优于 CIELAB 颜色空间。

表 5 CIELAB 和 MLAB 颜色空间的 LU 和 GU 表现

Table 5 Performance of LU and GU for CIELAB and MLAB color spaces

Color space	U_{LU}	U_{GU}
CIELAB	39.5	60.7
MLAB	39.5	59.6

由于两个颜色空间有着相似的 LU 表现, 为了更好地探究两个颜色空间的色度椭圆分布, 图 5 更加详细地描述了两个颜色空间色度椭圆的长短轴比属性。色度椭圆的长短轴比是不小于 1 的, 当比值为 1 时椭圆呈理想的圆形。因此, 具有长短轴比接近 1 的色度椭圆数量更多的颜色空间有更好的色度椭圆预测特性。图 5 将按照一定百分比划分的长短轴比作为横坐标, 将长短轴比占该百分比的色度椭圆数量作为纵坐标。例如, CIELAB 空间和 MLAB 空间中占长短轴比前 10%~20% (长短轴由小到大排列后的数量占比) 的色度椭圆分别有 35 和 36 个。从图 5 中可以看出, 两个颜色空间的色度椭圆的长短轴比较小的占多数, 说明它们的色度椭圆只有较少的比例被大幅度拉伸。在长短轴比前 20% 范围内, MLAB 颜色空间色度椭圆数量相比 CIELAB 颜色空间数量更多, 说明 MLAB 颜色空间有更多的色

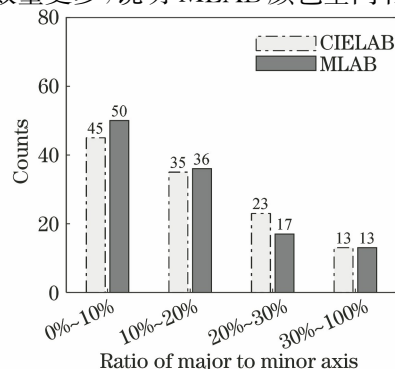


图 5 MLAB 和 CIELAB 空间色度椭圆的长短轴比分布
Fig. 5 Distribution of ratios of major to minor axis for MLAB and CIELAB color spaces

度椭圆长短轴比接近 1, 也就是说, 即使 MLAB 颜色空间与 CIELAB 颜色空间具有相似的 LU 表现, 其接近圆形的色度椭圆更多。综合两个颜色空间的 LU 和 GU 表现以及长短轴比的直方图分析, 可以发现, MLAB 颜色空间预测椭圆数据优于 CIELAB 颜色空间, MLAB 颜色空间相对更加均匀。

4 结 论

通过对 CIELAB 颜色空间的分析, 提出了与 CIELAB 颜色空间具有相同结构, 包含 4 个参数的 MLAB 颜色空间。同时, 通过求解约束非线性优化问题确定了 MLAB 颜色空间的最优参数, 使其能更好地预测由 CIE 技术专家组 1-55 收集的 COM-corrected 色差实验数据集。基于 COM-corrected 数据集及构成该数据集的 4 个独立数据集 (BFD-P, Leeds, RIT-DuPont 和 Witt) 的测试结果表明, MLAB 颜色空间在 COM-corrected 数据集及 4 个独立数据集中预测色差与感知色差都具有更小的 STRESS 值。统计检验结果表明, 在 COM-corrected, BFD-P, RIT-DuPont 和 Witt 数据集上, MLAB 颜色的空间预测都显著优于 CIELAB 颜色空间。此外, 还基于色调线性数据集和椭圆数据集对 MLAB 和 CIELAB 颜色空间进行了评价。对色调线性数据集的预测结果对比表明, MLAB 颜色空间在数据集上有轻微的色调线性程度损失, 但其色调线距离坐标原点较近, 总体仍优于 CIELAB 颜色空间。对于椭圆数据集的预测结果对比表明, MLAB 颜色空间与 CIELAB 颜色空间的 LU 表现相近, 但其 GU 优于 CIELAB 颜色空间, 即 MLAB 颜色空间是相对更加均匀的颜色空间。

参 考 文 献

- [1] Robertson A R. Historical development of CIE recommended color difference equations [J]. Color Research & Application, 1990, 15(3): 167-170.
- [2] Bai X Q, Liao N F. Research on color space uniformity based on new color appearance model CAM16 [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40 (4): 0433001.
白雪琼, 廖宁放. 基于新型色貌模型 CAM16 的颜色空间均匀性研究 [J]. 光学学报, 2020, 40 (4): 0433001.
- [3] Zhao Y, Xu Y, Gao C, et al. Characteristic reverse algorithm based on multi-illuminants printer [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57 (15): 153302.

- 赵艳, 徐杨, 高程, 等. 基于多光源打印机特征化逆向算法研究[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(15): 153302.
- [4] Xu P, Zhang H J, Zhang K Q, et al. Optimization of colorimetric characterization target for color digital cameras based on uniform color samples [J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(11): 1133001.
- 徐鹏, 章海军, 张克奇, 等. 基于均匀颜色样本的彩色数码相机色度特征化目标样本优化[J]. 光学学报, 2021, 41(11): 1133001.
- [5] Li L L, Wang Z F, Li C J. Optimum weighting table method based on asymmetric triangular instrumental function [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(5): 0520002.
- 李林璐, 王智峰, 李长军. 基于非对称三角形仪器函数的最优加权表方法[J]. 光学学报, 2020, 40(5): 0520002.
- [6] Kuehni R G. Industrial color difference: progress and problems [J]. Color Research & Application, 1990, 15(5): 261-265.
- [7] Clarke F J, McDonald R, Rigg B. Modification to the JPC79 colour-difference formula [J]. Journal of the Society of Dyers and Colourists, 2008, 100(4): 128-132.
- [8] Büring H. Eigenschaften des Farbenraumes nach DIN 6176 (DIN99-Formel) und seine Bedeutung für die industrielle Anwendung [EB/OL]. [2021-04-05]. http://www.germancolorgroup.de/html/Vortr_02_pdf/GCG_%202002_%20Buering.pdf.
- [9] CIE. Industrial colour-difference evaluation: CIE 116-1995 [S]. Vienna: Central Bureau of the CIE, 1995.
- [10] Cui G, Luo M R, Rigg B, et al. Uniform colour spaces based on the DIN99 colour-difference formula [J]. Color Research & Application, 2002, 27(4): 282-290.
- [11] CIE 217. Recommended method for evaluating the performance of colour-difference formulae [M]. Vienna: CIE Central Bureau, 2016.
- [12] Luo M R, Cui G, Rigg B. The development of the CIE 2000 colour-difference formula: CIEDE2000 [J]. Color Research & Application, 2001, 26(5): 340-350.
- [13] Melgosa M, Huertas R, Berns R S. Performance of recent advanced color-difference formulas using the standardized residual sum of squares index [J]. Journal of the Optical Society of America A, 2008, 25(7): 1828-1834.
- [14] Guan S S, Luo M R. Investigation of parametric effects using small colour differences [J]. Color Research & Application, 1999, 24(5): 331-343.
- [15] Luo M R, Cui G, Li C. Uniform colour spaces based on CIECAM02 colour appearance model [J]. Color Research & Application, 2006, 31(4): 320-330.
- [16] García P A, Huertas R, Melgosa M, et al. Measurement of the relationship between perceived and computed color differences [J]. Journal of the Optical Society of America A, 2007, 24(7): 1823-1829.
- [17] McLaren K. Publications sponsored by the colour measurement committee: V the Adams-Nickerson colour-difference formula [J]. Journal of the Society of Dyers and Colourists, 2008, 86(8): 354-356.
- [18] Newhall S M, Nickerson D, Judd D B. Final report of the OSA subcommittee on the spacing of the Munsell colors [J]. Journal of the Optical Society of America, 1943, 33(7): 385-418.
- [19] Adams E Q. X-Z planes in the 1931 I.C.I. system of colorimetry [J]. Journal of the Optical Society of America, 1942, 32(3): 168-173.
- [20] Xu Q, Zhao B, Cui G, et al. Testing uniform colour spaces using colour differences of a wide colour gamut [J]. Optics Express, 2021, 29(5): 7778-7793.
- [21] Xiao K D, Wuergler S, Fu C Y, et al. Unique hue data for colour appearance models. Part I: loci of unique hues and hue uniformity [J]. Color Research & Application, 2011, 36(5): 316-323.
- [22] Hung P C, Berns R S. Determination of constant hue loci for a CRT gamut and their predictions using color appearance spaces [J]. Color Research & Application, 1995, 20(5): 285-295.
- [23] Ebner F, Fairchild M D. Finding constant hue surfaces in color space [J]. Proceedings of SPIE, 1998, 3300: 107-117.
- [24] Zhao B Y, Luo M R. Hue linearity of color spaces for wide color gamut and high dynamic range media [J]. Journal of the Optical Society of America A, 2020, 37(5): 865-875.
- [25] Alder C. A Monte Carlo method for the validation of discrimination ellipse data [J]. Journal of the Society of Dyers and Colourists, 2008, 97(12): 514-517.
- [26] Safdar M. Study on the development of a uniform color space for perception-based image processing [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017: 87.