

# 基于CIE1931标准色空间的多基色模型及显示颜色校正技术研究

周光辉 高德帅 王晓琳

2025 年 5 月 21 日

## 摘要

在现代显示技术领域，颜色的准确呈现对于提升视觉体验至关重要。本研究围绕颜色空间转换与显示颜色校正的关键问题进行探讨，解决不同设备间颜色还原差异以及显示颜色不均匀等难题。针对问题一，普通显示屏色域小于视频源色域致使色彩损失。研究基于CIE1931标准色空间，构建多种转换损失函数（欧氏距离、CIELAB色差、加权颜色分量误差）。采用仿射变换将视频源颜色空间映射到显示屏RGB颜色空间，以最小化颜色转换损失。随后应用基于伽马校正的对比度调整方法改善视觉呈现。针对问题二，涉及四基色视频源（RGBV）到五基色显示屏（RGBCX）的颜色转换。本研究首先明确各基色在CIE1931空间的坐标与亮度。利用重心坐标法将颜色表示为基色的线性组合，并建立映射规则。以CIELAB色差公式定义损失函数，通过遗传算法（或参考文献中提及的梯度下降法）优化映射比例系数，最小化颜色转换损失。针对问题三，解决LED显示屏因像素发光器件差异导致的颜色不一致问题。将颜色数据转换至CIELAB等适宜空间，利用色差公式量化差异，并据此对LED显示器进行颜色校正，成功应用于64x64数据模块，实现颜色均匀呈现。本文详细阐述了针对这三个关联问题的模型、算法及分析。

**关键词：** 颜色空间转换；CIE1931标准色空间；损失函数；颜色校正；仿射变换；伽马校正；多基色系统；CIELAB；遗传算法。

## 目录

1 引言	3
2 相关技术与理论基础	3
2.1 CIE颜色系统	3
2.1.1 1931 CIE-RGB 系统	3
2.1.2 1931 CIE-XYZ 系统	4
2.1.3 CIE $x_yY$ 色度坐标与亮度	4
2.2 颜色转换损失函数	4
2.2.1 欧氏距离损失	4
2.2.2 CIELAB 和 CIEDE2000 色差公式	4
2.2.3 加权颜色分量误差损失	5
2.3 仿射变换用于色域映射	5
2.4 使用伽马校正进行对比度调整	5
2.5 多基色系统和重心坐标	5
2.6 优化算法（遗传算法）	6
2.7 用于颜色均匀性的双边滤波	6

目录	2
<b>3 问题一：BT.2020到sRGB的颜色空间转换与优化</b>	<b>6</b>
3.1 BT.2020到sRGB的颜色空间转换模型	6
3.1.1 通过仿射变换进行色域映射	6
3.1.2 通过自适应伽马校正进行对比度增强	7
3.2 实验结果与分析（问题一）	7
3.2.1 色域映射可视化	7
3.2.2 量化评估（CIEDE2000色差）	8
3.2.3 对比度增强评估	8
<b>4 问题二：四通道RGBV到五通道RGBCX的颜色空间转换</b>	<b>9</b>
4.1 RGBV到RGBCX的转换模型	9
4.1.1 定义基色特性	9
4.1.2 RGBV系统中的源颜色分解	10
4.1.3 将RGBV系数映射到RGBCX系数	10
4.1.4 RGBCX中的颜色重建和损失函数	11
4.1.5 映射系数 $k_1, k_2$ 的优化	11
4.2 实验结果与分析（问题二）	11
<b>5 问题三：LED显示器颜色校正</b>	<b>12</b>
5.1 LED显示器颜色校正模型	12
5.1.1 数据输入和预处理	12
5.1.2 步骤一：原始RGB到CIE $xyY$ 的转换	12
5.1.3 步骤二：使用双边滤波进行CIE $xy$ 色度均匀化	13
5.1.4 步骤三：从平滑色度和原始亮度转换回RGB	13
5.1.5 步骤四：基于目标颜色的逐像素缩放校准	13
5.2 实验结果与分析（问题三）	14
<b>6 结论</b>	<b>15</b>

## 1 引言

在我们对世界的感知中，色彩扮演着至关重要的角色，无论是观察都市的晚风还是春日的田野。颜色是光作用于人眼引起的视觉感知现象，它与物体的材质和光照有关，由物体反射（或发射）的电磁波的特定波长决定。为了忠实地再现真实世界的色彩，颜色采集设备（如摄像机）和显示设备（如监视器）至关重要。然而，一个重大的挑战在于记录设备的感知能力与显示设备的再现能力并不完全一致。高性能显示器的主要目标是尽可能逼真地表达所记录的颜色。

根据人类视觉的特性，在彩色再现过程中，最重要的是获得与原始场景相同的色彩感觉，而不是完美恢复原始光的光谱成分。不同的光谱分布的光可以产生相同的色彩感觉。通过适当选择三种基色并按不同比例组合它们，可以诱导出各种不同的色彩感觉。合成色彩的亮度是这三种基色亮度之和，而色度则由它们的相对比例决定。虽然可以使用各种三色组合，但显示领域主要采用红（R）、绿（G）和蓝（B）基色，因为它们几乎可以合成自然中所有可观察到的颜色。

本文探讨了颜色管理和显示技术中的三个关键问题：

1. 颜色空间转换（问题一）：普通显示屏的色域通常小于高清视频源（例如BT.2020标准）的色域，导致颜色损失。本研究旨在定义合适的转换损失函数，并设计从视频源颜色空间到显示屏RGB颜色空间的映射，以最小化这种损失。
2. 颜色空间转换（4通道到5通道，问题二）：为了更好地表现自然色彩，摄像机可能包含一个额外的V通道（RGBV源），从而扩大色域。同时，LED显示器正被设计成具有五个基色（RGBCX）以增强其能力。此问题需要定义一个合适的从四通道源到五通道显示器的映射，并最小化转换损失。
3. LED显示器颜色校正（问题三）：全彩LED显示屏可能因单个发光器件色度的变化而在像素间出现颜色不一致现象，即使在相同的校准值下也是如此。本研究旨在基于前述问题的色域转换结果应用颜色校正，以实现屏幕整体颜色均匀，并在一个64x64的显示数据模块上进行演示。

总体目标是通过解决这些在色彩科学和工程领域的多方面挑战来增强现代显示系统中的色彩保真度和视觉体验。

## 2 相关技术与理论基础

### 2.1 CIE颜色系统

颜色的量化描述是颜色科学的核心问题之一。1931年，国际照明委员会（CIE）提出了两种重要的颜色匹配函数系统：1931 CIE-RGB和1931 CIE-XYZ系统，它们为现代颜色测量和描述奠定了坚实的基础。

#### 2.1.1 1931 CIE-RGB 系统

1931 CIE-RGB系统是基于人眼对红（R）、绿（G）、蓝（B）三种原色的感知而建立的。通过实验测量人眼对不同波长光的感知，该系统定义了三个颜色匹配函数： $\bar{r}(\lambda)$ 、 $\bar{g}(\lambda)$  和  $\bar{b}(\lambda)$ 。这些函数描述了匹配任何可见颜色所需的三种原色的线性组合。所选的原色是波长为700 nm（红）、546.1 nm（绿）和435.8 nm（蓝）的单色光。该系统的一个缺点是匹配某些颜色需要负系数，这在某些应用中不切实际。

### 2.1.2 1931 CIE-XYZ 系统

为解决RGB系统中的负值问题，CIE引入了1931 CIE-XYZ系统。该系统通过使用三个虚构（不可实现）的原色（X）、（Y）、（Z），将RGB匹配函数转换为三个新的颜色匹配函数  $\bar{x}(\lambda)$ 、 $\bar{y}(\lambda)$ 、 $\bar{z}(\lambda)$ ，确保所有颜色匹配系数（XYZ三刺激值）均为非负。XYZ三刺激值是通过将颜色的光谱功率分布  $S(\lambda)$  与每个颜色匹配函数相乘并积分得到的：

$$X = k \int_{\lambda} S(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

$$Y = k \int_{\lambda} S(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda \quad (2)$$

$$Z = k \int_{\lambda} S(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda \quad (3)$$

其中  $k$  是归一化常数。Y值被特意定义为与颜色的亮度成正比。由于其实用性和准确性，CIE-XYZ系统已成为最广泛使用的颜色描述模型。

### 2.1.3 CIE xyY 色度坐标与亮度

为了将色度信息（色调和饱和度）与亮度（明度）分开，CIE XYZ值被归一化以获得xy色度坐标： $x = X/(X + Y + Z)$ ， $y = Y/(X + Y + Z)$ ， $z = Z/(X + Y + Z)$ 。由于  $x + y + z = 1$ ，通常仅使用  $(x, y)$  来指定色度。然后通过其色度坐标  $(x, y)$  和其亮度  $Y$  来完整描述颜色，通常写作  $(x, y, Y)$ 。CIE 1931 xy色度图是一个马蹄形曲线，代表所有可见光谱色，内部点代表各种混合色，中心点通常代表白色。

## 2.2 颜色转换损失函数

在颜色空间转换中，损失函数量化原始颜色和转换后颜色之间的差异或误差，指导优化过程。

### 2.2.1 欧氏距离损失

在CIE 1931 xy色度空间中，如果源颜色为  $(x_{src}, y_{src})$ ，转换后的目标颜色为  $(x_{dst}, y_{dst})$ ，则欧氏距离损失  $L_E$  定义为：

$$L_E = \sqrt{(x_{src} - x_{dst})^2 + (y_{src} - y_{dst})^2} \quad (4)$$

该函数简单直观，但未完全考虑人眼对颜色差异的视觉感知，因为CIE xy空间并非感知均匀。

### 2.2.2 CIELAB 和 CIEDE2000 色差公式

CIELAB颜色空间 ( $L^*a^*b^*$ ) 被设计为更具感知均匀性，其中  $L^*$  代表亮度， $a^*$  代表红绿轴， $b^*$  代表黄蓝轴。CIEDE2000 ( $\Delta E_{00}$ ) 色差公式是一种先进的度量标准，用于计算CIELAB空间中两种颜色之间的差异，被认为是最准确的之一。它定义为：

$$L_C = \Delta E_{00} = \sqrt{\left(\frac{\Delta L'}{k_L S_L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C'}{k_C S_C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H'}{k_H S_H}\right)^2 + R_T \left(\frac{\Delta C'}{k_C S_C}\right) \left(\frac{\Delta H'}{k_H S_H}\right)} \quad (5)$$

此处， $\Delta L'$ 、 $\Delta C'$ 、 $\Delta H'$  分别是亮度、色度和色调的差异，由加权函数  $S_L, S_C, S_H$  和参数因子  $k_L, k_C, k_H$ （通常设为1）调整。 $R_T$  是一个旋转函数，用于解释蓝色区域中色度和色调差异之间的相互作用。该公式提供了一个与人类感知高度一致的颜色差异度量。

### 2.2.3 加权颜色分量误差损失

对于RGB颜色空间，可以根据各个颜色分量的误差定义加权损失函数  $L_W$ ：

$$L_W = w_R(R_{src} - R_{dst})^2 + w_G(G_{src} - G_{dst})^2 + w_B(B_{src} - B_{dst})^2 \quad (6)$$

其中  $(R_{src}, G_{src}, B_{src})$  是源RGB值， $(R_{dst}, G_{dst}, B_{dst})$  是目标RGB值， $w_R, w_G, w_B$  是总和为1的非负权重。这些权重可以根据人眼对不同颜色分量的敏感度或特定应用需求进行调整。

## 2.3 仿射变换用于色域映射

仿射变换是一种线性映射方法，它保留点、直线和平。在二维中，它可以执行平移、旋转、缩放和剪切等操作。对于色域映射，如果一个点  $(x, y)$  被变换为  $(x', y')$ ，则变换为：

$$x' = ax + by + e \quad (7)$$

$$y' = cx + dy + f \quad (8)$$

参数  $a, b, c, d, e, f$  可以通过使用对应点来确定，例如CIE xy色度图中源色域和目标色域三角形的顶点。对于三对顶点  $(x_i, y_i)$  和  $(x'_i, y'_i)$ （其中  $i = 1, 2, 3$ ），可以求解一个包含六个线性方程的方程组来确定这些参数。

## 2.4 使用伽马校正进行对比度调整

颜色空间转换后，图像对比度可能不足。基于幂律函数  $y = x^\gamma$  的伽马校正可以调整图像亮度和对比度。

**局部直方图均衡化：** 该方法通过对局部图像块应用直方图均衡化来增强对比度。对于彩色图像，通常仅应用于亮度通道（例如YCrCb中的Y通道）以避免颜色失真。

**自适应伽马校正：** 该技术根据图像区域的局部特性（如局部平均强度）动态调整伽马值  $\gamma$ 。例如，可以相对于参考强度（例如128）计算  $\gamma$ ，使较暗区域变亮（ $\gamma < 1$ ）并调整较亮区域（ $\gamma > 1$ ）。

该过程通常包括图像分块，应用局部直方图均衡化（尤其是对彩色图像的Y通道），然后对每个块应用自适应伽马校正，最后合并这些块。

## 2.5 多基色系统和重心坐标

传统的三基色（RGB）系统在颜色再现范围上存在局限性。多基色系统（MPS）使用三个以上的基色来扩大色域。例如，相机可能使用RGBV（V代表附加颜色，例如紫色或其他特定色调），显示器可能使用RGBCX（C代表青色，X代表另一个基色，如黄色）。**重心坐标：** 在由  $n$  个基色  $P_1, P_2, \dots, P_n$  定义的颜色空间中，其色域内的任何颜色  $C$  都可以表示为基色的线性组合： $C = \sum_{i=1}^n \alpha_i P_i$ ，其中  $\alpha_i \geq 0$  且  $\sum_{i=1}^n \alpha_i = 1$ 。系数  $\alpha_i$  是  $C$  相对于这些基色的重心坐标。对于源颜色  $(x_{src}, y_{src})$  在一个4基色系统（例如，具有色度  $(x_R, y_R), (x_G, y_G), (x_B, y_B), (x_V, y_V)$  的RGBV系统）中，系数  $(\alpha_R, \alpha_G, \alpha_B, \alpha_V)$  可以通过求解以下方程组得到：

$$x_{src} = \alpha_R x_R + \alpha_G x_G + \alpha_B x_B + \alpha_V x_V \quad (9)$$

$$y_{src} = \alpha_R y_R + \alpha_G y_G + \alpha_B y_B + \alpha_V y_V \quad (10)$$

$$1 = \alpha_R + \alpha_G + \alpha_B + \alpha_V \quad (11)$$

亮度  $Y_{src}$  也可以表示为  $Y_{src} = \sum \alpha_i Y_i$ 。

## 2.6 优化算法（遗传算法）

为了最小化颜色转换损失，采用了优化算法。

**遗传算法（GA）：** GA是一种受自然选择启发的启发式搜索算法。它通过选择、交叉和变异等操作，在几代中进化候选解（例如映射系数）的群体，以找到给定适应度函数（例如最小化CIELAB颜色差异）的最优或近优解。

## 2.7 用于颜色均匀性的双边滤波

双边滤波是一种非线性、边缘保留的平滑滤波器。它同时考虑了相邻像素的空间距离及其值（例如颜色、强度）差异。这使得它可以在平滑区域的同时保留清晰的边缘，使其适用于减少显示器上的颜色变化而不会模糊重要细节。

# 3 问题一：BT.2020到sRGB的颜色空间转换与优化

本章详细介绍了将颜色从通常用于高清视频源的BT.2020宽色域转换为标准显示屏中常见的sRGB色域的方法。主要挑战是sRGB色域之外的颜色可能会丢失或失真。该方法结合了用于色域映射的仿射变换和用于优化sRGB显示屏上视觉输出的后续对比度增强技术。

## 3.1 BT.2020到sRGB的颜色空间转换模型

转换过程包括两个主要阶段：基于CIE 1931 xy色度坐标使用仿射变换进行色域映射，以及使用局部直方图均衡化和自适应伽马校正进行对比度增强。

### 3.1.1 通过仿射变换进行色域映射

**原理与模型：** 仿射变换提供了两种颜色空间之间的线性映射。二维色度坐标  $(x, y)$  到  $(x', y')$  的变换是：

$$x' = a \cdot x + b \cdot y + e \quad (12)$$

$$y' = c \cdot x + d \cdot y + f \quad (13)$$

六个参数  $(a, b, c, d, e, f)$  是通过求解由BT.2020色域的三刺激 primaries 坐标映射到sRGB色域相应 primaries 坐标所形成的线性方程组来确定的。标准（D65白点） primaries xy坐标是：

BT.2020: R(0.708, 0.292), G(0.170, 0.797), B(0.131, 0.046).

sRGB: R(0.640, 0.330), G(0.300, 0.600), B(0.150, 0.060).

**映射流程：** 对于源BT.2020图像中的每个像素：

**伽马解码（逆OETF）：** 使用BT.2020逆光电转换函数将输入的BT.2020 RGB值转换为线性光RGB。

**RGB到XYZ：** 使用标准BT.2020到XYZ转换矩阵  $(M_{BT.2020 \rightarrow XYZ})$  将线性BT.2020 RGB转换为CIE XYZ。

**XYZ到xyY：** 计算源颜色的色度坐标  $(x_{src}, y_{src})$  和亮度  $Y_{src}$ 。

应用仿射变换：使用求解得到的仿射参数（公式 12, 13）将  $(x_{src}, y_{src})$  映射到目标色度  $(x_{dst}, y_{dst})$ 。

亮度保持（简化）：假设  $Y_{dst} = Y_{src}$ 。更高级的色域映射算法可能会调整亮度。

xyY到XYZ：将映射后的  $(x_{dst}, y_{dst}, Y_{dst})$  转换回目标sRGB的XYZ值。

XYZ到RGB：使用标准XYZ到sRGB转换矩阵（ $M_{XYZ \rightarrow sRGB}$ ）将XYZ转换为线性sRGB。

颜色裁剪：将得到的线性sRGB值裁剪到有效范围[0, 1]。

伽马编码（OETF）：对裁剪后的线性sRGB值应用sRGB光电转换函数。

### 3.1.2 通过自适应伽马校正进行对比度增强

为了解决色域映射后可能出现的对比度降低问题，对图像的亮度分量应用局部对比度增强。

处理步骤：

颜色空间转换（到YCbCr）：将经过色域映射的sRGB图像转换为YCbCr空间，并提取亮度（Y）通道。

图像分块：将Y通道划分为较小的块（例如8x8像素）。

局部直方图均衡化：对Y通道的每个块独立应用直方图均衡化。

自适应伽马校正：对于每个均衡化后的块：

- 计算块的平均亮度  $\mu_{block}$ 。
- 动态计算伽马值，例如  $\gamma_{block} = 1.0/(\mu_{block}/128.0)$ （处理  $\mu_{block} = 0$  以避免除以零，如果128.0假设像素值范围为0-255，则对像素值进行归一化）。
- 对该块应用伽马校正： $I_{out} = (I_{in}/MaxVal)^{\gamma_{block}} \times MaxVal$ 。

图像合并与逆转换：重新组合处理后的Y通道块，与原始Cb和Cr通道合并，并转换回sRGB颜色空间。

## 3.2 实验结果与分析（问题一）

本节概述了BT.2020到sRGB转换的预期实验结果展示。

### 3.2.1 色域映射可视化

为了研究 BT.2020 色域在仿射变换下的几何特性，我们在 BT.2020 色域的边缘均匀地选取了一系列点。这些点通过线性插值的方式生成，确保它们能够均匀地覆盖色域的边界。随后，我们将这些点分别应用仿射变换，并对其变换前后的坐标位置进行了可视化分析。如图1所示，通过可视化结果，可以直观地观察到仿射变换对 BT.2020 色域的映射效果。

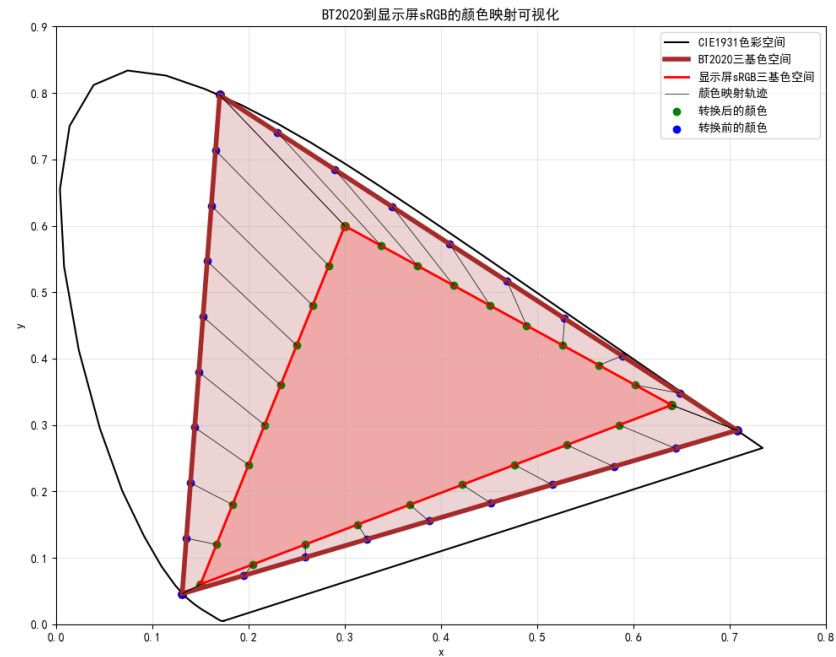


图 1: 从BT.2020到sRGB的仿射变换色域映射可视化。

3.2.2 量化评估（CIEDE2000色差）

应转换一组标准BT.2020测试颜色，包括sRGB色域内和色域外的颜色。应计算原始BT.2020颜色（可能在理想的BT.2020显示器上感知）与其sRGB映射版本（在sRGB显示器上感知）之间的CIEDE2000色差（ $\Delta E_{00}$ ）并制成表格。

表 1: 映射到sRGB的BT.2020示例颜色的CIEDE2000色差。			
BT.2020 颜色描述	原始 (xyY)	映射后 sRGB (xyY)	$\Delta E_{00}$
示例颜色1 (偏红)	$[(x,y,Y)]$	$[(x',y',Y')]$	[数值]
示例颜色2 (偏绿)	$[(x,y,Y)]$	$[(x',y',Y')]$	[数值]
示例颜色3 (偏蓝)	$[(x,y,Y)]$	$[(x',y',Y')]$	[数值]
示例颜色4 (色域外)	$[(x,y,Y)]$	$[(x',y',Y')]$	[数值]
...	...	...	...

注意：此表中的数据为占位符，应替换为实际实验结果。

对表 1 的分析将侧重于色域内颜色的保留程度（低  $\Delta E_{00}$ ）以及色域外颜色的映射方式（例如，映射到最近的sRGB边界点，旨在最小化感知差异）。

3.2.3 对比度增强评估

对比度增强算法的视觉影响将通过比较处理前后的图像来展示。

- (a) 色域映射后，对比度增强前  
[插入图像]
- (b) 对比度增强后  
[插入图像]

图 2: 对比度增强效果的视觉比较。



在视觉上，图 2 应显示暗部和亮部细节的改善以及整体图像活力的增强。在数量上，可以在增强前后比较均方根（RMS）对比度或图像熵等度量。

表 2: 对比度增强的量化度量。

度量	增强前	增强后
RMS 对比度	[数值]	[数值]
图像熵	[数值]	[数值]

注意：数据为占位符。

表 2 中这些度量的增加将表明对比度的成功改善。

组合方法旨在最小化色域映射过程中的颜色损失，然后恢复或增强图像细节和活力，以在标准显示器上获得最佳观看效果。

## 4 问题二：四通道RGBV到五通道RGBCX的颜色空间转换

本章探讨了将视频信号从四基色源（RGBV）转换为五基色LED显示屏（RGBCX）的挑战。目标是在利用这些多基色系统提供的扩展色域的同时，以最小的颜色损失实现这种转换。所提出的方法包括重心坐标表示、建立映射规则，并使用遗传算法（或梯度下降法）优化这些规则，以最小化CIELAB空间中的感知色差。

### 4.1 RGBV到RGBCX的转换模型

#### 4.1.1 定义基色特性

第一步是准确定义源（RGBV）和目标（RGBCX）系统中每个基色的CIE 1931 xy色度坐标和相对亮度（Y）。示例特性（数值仅为说明，应精确指定）：

源四基色（RGBV）：

- R:  $(x_R, y_R), Y_R$
- G:  $(x_G, y_G), Y_G$
- B:  $(x_B, y_B), Y_B$
- V:  $(x_V, y_V), Y_V$

目标五基色（RGBCX）：

- R':  $(x_{R'}, y_{R'}), Y_{R'}$  （如果显示器共享基色，R'通常与R相同）
- G':  $(x_{G'}, y_{G'}), Y_{G'}$
- B':  $(x_{B'}, y_{B'}), Y_{B'}$
- C:  $(x_C, y_C), Y_C$  （青色基色）
- X:  $(x_X, y_X), Y_X$  （例如黄色或其他自定义基色）

图 3 说明了此类系统的假设色域。

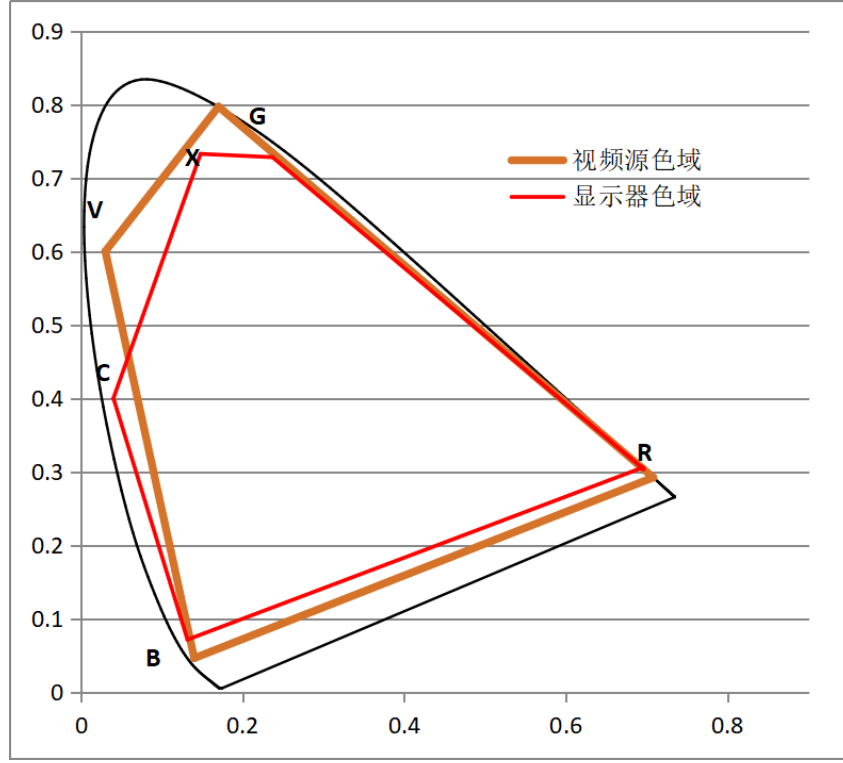


图 3: 四基色 (RGBV) 和五基色 (RGBCX) 色域的可视化。

#### 4.1.2 RGBV系统中的源颜色分解

RGBV色域内的任何颜色  $(x_{src}, y_{src})$  都可以用相对于RGBV基色的重心坐标  $(\alpha_R, \alpha_G, \alpha_B, \alpha_V)$  来表示。这些系数通过求解以下方程组得到：

$$x_{src} = \alpha_R x_R + \alpha_G x_G + \alpha_B x_B + \alpha_V x_V \quad (14)$$

$$y_{src} = \alpha_R y_R + \alpha_G y_G + \alpha_B y_B + \alpha_V y_V \quad (15)$$

$$1 = \alpha_R + \alpha_G + \alpha_B + \alpha_V \quad (16)$$

$$Y_{src} = \alpha_R Y_R + \alpha_G Y_G + \alpha_B Y_B + \alpha_V Y_V \quad (17)$$

求解公式 14-17（如果亮度单独处理，则为子集）以获得  $\alpha_i \geq 0$ 。

#### 4.1.3 将RGBV系数映射到RGBCX系数

需要一个规则将四基色系数  $\alpha = (\alpha_R, \alpha_G, \alpha_B, \alpha_V)$  映射到五基色系数  $\beta = (\beta_{R'}, \beta_{G'}, \beta_{B'}, \beta_C, \beta_X)$ 。一种常见的方法是假设R、G、B的贡献基本保留，V通道的贡献分配给新的C和X通道：

$$\beta_{R'} = \alpha_R \quad (\text{假设R基色相似}) \quad (18)$$

$$\beta_{G'} = \alpha_G \quad (\text{假设G基色相似}) \quad (19)$$

$$\beta_{B'} = \alpha_B \quad (\text{假设B基色相似}) \quad (20)$$

$$\beta_C = k_1 \cdot \alpha_V \quad (21)$$

$$\beta_X = k_2 \cdot \alpha_V \quad (22)$$

其中  $k_1$  和  $k_2$  是待优化的映射比例系数，通常约束为  $k_1 + k_2 = 1$ （如果  $\alpha_V$  要完全分配且没有其他源贡献给C和X）。 $\beta_j$  的总和也应为1以用于目标空间中的重心表示，如果  $k_1 + k_2 \neq 1$  或  $\alpha_V = 0$ ,

则可能需要归一化。

#### 4.1.4 RGBCX中的颜色重建和损失函数

使用  $\beta_j$  系数和RGBCX基色特性重建目标颜色  $(x_{dst}, y_{dst}, Y_{dst})$ :

$$x_{dst} = \sum_{j \in \{R', G', B', C, X\}} \beta_j x_j \quad (23)$$

$$y_{dst} = \sum_{j \in \{R', G', B', C, X\}} \beta_j y_j \quad (24)$$

$$Y_{dst} = \sum_{j \in \{R', G', B', C, X\}} \beta_j Y_j \quad (25)$$

颜色转换损失定义为原始源颜色  $(x_{src}, y_{src}, Y_{src})$  和重建的目标颜色  $(x_{dst}, y_{dst}, Y_{dst})$  (两者都转换为CIELAB值后) 之间的CIELAB色差  $\Delta E_{ab}^*$  (或CIEDE2000,  $\Delta E_{00}$ )。  $Loss = \Delta E((L_{src}^*, a_{src}^*, b_{src}^*), (L_{dst}^*, a_{dst}^*, b_{dst}^*))$

#### 4.1.5 映射系数 $k_1, k_2$ 的优化

使用遗传算法 (GA) 或梯度下降法找到最小化  $Loss$  函数的最优  $k_1, k_2$ 。

适应度函数 (对于GA):  $\Delta E_{ab}^*$  (或  $\Delta E_{00}$ ) 值作为适应度, 值越低越好。

变量 (对于GA):  $k_1, k_2$  (例如, 在[0,1]范围内)。

流程 (对于GA):

1. 初始化  $(k_1, k_2)$  对的群体。
2. 迭代应用选择、交叉和变异。
3. 评估每个新个体的适应度。
4. 在达到设定的代数或收敛时终止。

## 4.2 实验结果与分析 (问题二)

为了验证RGBV到RGBCX的转换, 选择一个特定的源颜色  $(x_{src}, y_{src}, Y_{src})$ 。例如, 设源颜色为  $(x_{src} = 0.3, y_{src} = 0.4, Y_{src} = 1.0)$ 。计算重心坐标  $\alpha_i$ 。运行优化算法 (例如, 用户LaTeX代码片段中问题二详细描述GA, 或PDF中的梯度下降法) 以找到最优的  $k_1, k_2$ 。

**优化过程 (GA收敛):** 提供的LaTeX代码给出了GA运行结果:

```
代数 20/300, 当前代最优适应度: 0.360567, 全局最优适应度: 0.360567, 最优个体: [0.2489, 0.5106]
代数 40/300, 当前代最优适应度: 0.360553, 全局最优适应度: 0.360553, 最优个体: [0.2489, 0.5107]
...
代数 120/300, 当前代最优适应度: 0.360465, 全局最优适应度: 0.360465, 最优个体: [0.2489, 0.5124]
...
代数 180/300, 当前代最优适应度: 0.360447, 全局最优适应度: 0.360447, 最优个体: [0.2484, 0.5123]
...
代数 280/300, 当前代最优适应度: 0.360445, 全局最优适应度: 0.360445, 最优个体: [0.2484, 0.5125]
代数 300/300, 当前代最优适应度: 0.360445, 全局最优适应度: 0.360445, 最优个体: [0.2484, 0.5125]
```

这表明收敛到一个解, 其中  $\Delta E_{ab}^* \approx 0.36$ 。

**优化参数和实现的色差：** 来自GA示例：最优  $k_1 \approx 0.2484$ ,  $k_2 \approx 0.5125$ 。源CIELAB（示例）： $(L_{src}^* \approx 8.99, a_{src}^* \approx -8.03, b_{src}^* \approx 4.77)$ 。使用最优  $k_1, k_2$  时的目标CIELAB： $(L_{dst}^* \approx 8.66, a_{dst}^* \approx -8.06, b_{dst}^* \approx 4.91)$ 。得到的  $\Delta E_{ab}^* \approx 0.360445$ 。

$\Delta E_{ab}^*$  值约为0.36，非常低，表明预期源颜色与使用优化映射的五基色显示器再现的颜色之间存在非常接近的感知匹配。这证明了所选优化策略对于给定颜色样本和混合模型的有效性。

颜色混合模型的选择（例如，直接平均xy坐标与在XYZ空间中混合）会显著影响结果。PDF的方法使用基于重心坐标应用于目标基色xyY值的混合模型。

像GA这样的优化算法可以有效地在参数空间中搜索  $k_1, k_2$  以最小化感知误差。

未来的工作可能包括使用更广泛的颜色进行测试，比较不同的颜色混合模型，并可能使用CIEDE2000进行更准确的感知损失计算。

## 5 问题三：LED显示器颜色校正

本章重点校正LED显示屏中的颜色不均匀性，这种不均匀性源于单个像素元件发射特性的变化。即使使用相同的信号驱动，像素也可能显示不同的颜色，从而降低图像质量。所提出的方法使用CIE 1931标准色空间进行分析和校正，结合通过双边滤波进行平滑处理和针对目标颜色的逐像素校准。该方法应用于64x64显示数据模块。

### 5.1 LED显示器颜色校正模型

目标是使64x64显示模块上的每个像素在需要显示特定目标颜色（例如R220, G0, B0）时，输出尽可能接近该目标颜色的颜色。

#### 5.1.1 数据输入和预处理

输入包括64x64像素中每个像素的R、G、B数据，代表它们在给定标称输入下（例如，来自“RGB.xlsx”等Excel文件）的实际、不均匀输出。这些RGB值通常归一化到[0, 1]范围。

#### 5.1.2 步骤一：原始RGB到CIE xyY的转换

对于每个具有原始测量RGB值  $(R_{ij}^{(orig)}, G_{ij}^{(orig)}, B_{ij}^{(orig)})$  的像素  $(i, j)$ ：

RGB到XYZ：使用标准转换矩阵（例如sRGB到XYZ）将RGB转换为XYZ。

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{ij}^{(orig)} = M_{sRGB \rightarrow XYZ} \cdot \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix}_{ij}^{(orig)} \quad (26)$$

使用的矩阵是：

$$M_{sRGB \rightarrow XYZ} = \begin{pmatrix} 0.4124564 & 0.3575761 & 0.1804375 \\ 0.2126729 & 0.7151522 & 0.0721750 \\ 0.0193339 & 0.1191920 & 0.9503041 \end{pmatrix}$$

XYZ到xy: 计算CIE xy色度坐标  $(x_{ij}^{(orig)}, y_{ij}^{(orig)})$ 。

$$x_{ij}^{(orig)} = X_{ij}^{(orig)} / (X_{ij}^{(orig)} + Y_{ij}^{(orig)} + Z_{ij}^{(orig)}) \quad (27)$$

$$y_{ij}^{(orig)} = Y_{ij}^{(orig)} / (X_{ij}^{(orig)} + Y_{ij}^{(orig)} + Z_{ij}^{(orig)}) \quad (28)$$

(处理  $X + Y + Z = 0$  的情况)。

亮度保持/参考: 保留XYZ转换中的原始亮度  $Y_{ij}^{(orig)}$  (或根据用户LaTeX代码中问题三基于加权原始RGB单独计算的参考亮度  $Y_{ij}^{(lum)}$ ) 以供后续重建使用。例如,  $Y_{ij}^{(lum)} = 0.2126729R_{ij}^{(orig)} + 0.7151522G_{ij}^{(orig)} + 0.0721750B_{ij}^{(orig)}$ 。

### 5.1.3 步骤二: 使用双边滤波进行CIE xy色度均匀化

为了减少像素间的色度变化, 同时保留重要的颜色边界, 对  $x^{(orig)}$  和  $y^{(orig)}$  矩阵分别应用双边滤波。

$$x_{ij}^{(smooth)} = \text{BilateralFilter}(x^{(orig)}, d, \sigma_{color}, \sigma_{space})_{ij} \quad (29)$$

$$y_{ij}^{(smooth)} = \text{BilateralFilter}(y^{(orig)}, d, \sigma_{color}, \sigma_{space})_{ij} \quad (30)$$

典型参数 (例如, 滤波器直径  $d = 9$ , 颜色标准差  $\sigma_{color} = 75$ , 空间标准差  $\sigma_{space} = 75$ ) 根据实验选择。

### 5.1.4 步骤三: 从平滑色度和原始亮度转换回RGB

使用平滑后的色度  $(x_{ij}^{(smooth)}, y_{ij}^{(smooth)})$  和保留的亮度 (例如  $Y_{ij}^{(lum)}$  或  $Y_{ij}^{(orig)}$ ), 转换回RGB空间以获得  $(R_{ij}^{(new)}, G_{ij}^{(new)}, B_{ij}^{(new)})$ 。

xyY到XYZ:

$$X_{ij}^{(smoothY)} = (x_{ij}^{(smooth)} / y_{ij}^{(smooth)}) \cdot Y_{ij}^{(lum)} \quad (31)$$

$$Z_{ij}^{(smoothY)} = ((1 - x_{ij}^{(smooth)} - y_{ij}^{(smooth)}) / y_{ij}^{(smooth)}) \cdot Y_{ij}^{(lum)} \quad (32)$$

(处理  $y_{ij}^{(smooth)} = 0$ )。得到的XYZ是  $(X_{ij}^{(smoothY)}, Y_{ij}^{(lum)}, Z_{ij}^{(smoothY)})$ 。

XYZ到RGB: 使用逆转换矩阵  $M_{XYZ \rightarrow sRGB}$ 。

$$\begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix}_{ij}^{(new)} = M_{XYZ \rightarrow sRGB} \cdot \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{ij}^{(smoothY)} \quad (33)$$

裁剪: 将得到的  $(R_{ij}^{(new)}, G_{ij}^{(new)}, B_{ij}^{(new)})$  值裁剪到  $[0, 1]$  范围。

### 5.1.5 步骤四: 基于目标颜色的逐像素缩放校准

此步骤调整每个像素的  $(R_{ij}^{(new)}, G_{ij}^{(new)}, B_{ij}^{(new)})$  值以匹配预定义的目标颜色  $(R_{target}, G_{target}, B_{target})$  (例如, 对于R220,  $R_{target} = 220/255, G_{target} = 0, B_{target} = 0$ )。对于每个像素  $(i, j)$ :

计算缩放系数：

$$scale_{R,ij} = R_{target}/R_{ij}^{(new)} \quad (\text{如果 } R_{ij}^{(new)} > 0, \text{ 否则为 } 1 \text{ 或其他适当值}) \quad (34)$$

$$scale_{G,ij} = G_{target}/G_{ij}^{(new)} \quad (\text{如果 } G_{ij}^{(new)} > 0 \text{ 且 } G_{target} > 0, \text{ 否则特殊处理}^*) \quad (35)$$

$$scale_{B,ij} = B_{target}/B_{ij}^{(new)} \quad (\text{如果 } B_{ij}^{(new)} > 0, \text{ 否则为 } 1 \text{ 或其他适当值}) \quad (36)$$

\*目标通道为零时的特殊处理：如果  $G_{target} = 0$  且  $G_{ij}^{(new)} \neq 0$ ，则  $scale_{G,ij}$  理想情况下应为 0。如果  $G_{target} = 0$  且  $G_{ij}^{(new)} = 0$ ，则  $scale_{G,ij} = 1$ 。PDF建议如果当前值为正则进行除法，否则为1，这可能需要针对目标零值进行细化。

应用缩放并裁剪：

$$R_{ij}^{(final)} = \text{clip}(R_{ij}^{(new)} \cdot scale_{R,ij}, 0, 1) \quad (37)$$

$$G_{ij}^{(final)} = \text{clip}(G_{ij}^{(new)} \cdot scale_{G,ij}, 0, 1) \quad (38)$$

$$B_{ij}^{(final)} = \text{clip}(B_{ij}^{(new)} \cdot scale_{B,ij}, 0, 1) \quad (39)$$

$(R_{ij}^{(final)}, G_{ij}^{(final)}, B_{ij}^{(final)})$  矩阵表示要发送到显示器的校正后RGB值。

## 5.2 实验结果与分析（问题三）

校正过程应用于64x64显示数据，目标是均匀的目标颜色，例如R220 ( $R_{target} \approx 0.8627, G_{target} = 0, B_{target} = 0$ )。

(a) 未校准显示（示意图，如PDF图4.1）

(b) 校准后显示（示意图，如PDF图4.2）

[插入未校准显示图像]

[插入校准后显示图像]

图 4: 校正前后LED显示屏颜色均匀性的视觉比较。

视觉改善：如图 4 示意图所示，校准后的显示器（b）应显示出比未校准状态（a）明显更均匀的颜色。斑驳和颜色变化应明显减少。

量化评估：

1. 校正前颜色变化：分析原始像素RGB与其平均RGB或目标RGB之间的CIELAB  $\Delta E_{ab}^*$ （或  $\Delta E_{00}$ ）值分布。分布范围广表明不均匀性高。
2. 校正后颜色变化：计算每个校正后像素  $(R_{ij}^{(final)}, G_{ij}^{(final)}, B_{ij}^{(final)})$  与目标颜色  $(R_{target}, G_{target}, B_{target})$  之间的  $\Delta E_{ab}^*$ （或  $\Delta E_{00}$ ）。平均  $\Delta E$  应较低， $\Delta E$  的标准差应显著减小。大多数值理想情况下应低于感知阈值（例如  $\Delta E_{00} < 1$ ）。
3. 均匀性度量：校正后显示器上R、G、B通道（或L\*、a\*、b\*通道）的标准差可用作均匀性的度量。校正后这些值应较低。

强调目标是使每个像素的颜色尽可能接近目标（R220, G0, B0）。应用于64x64数据模块旨在证明这种实现的均匀性。所描述的方法有效地解决了颜色不均匀问题。

使用双边滤波有助于在不过度模糊的情况下平均颜色差异。

基于目标颜色进行调整的最终校准步骤对于在特定目标颜色值下实现所需的均匀性至关重要。

局限性包括对特定显示器的sRGB到XYZ转换矩阵准确性的依赖，以及xy平滑步骤中对亮度的简化处理。

## 6 结论

本研究探讨了现代显示技术中的三个关键挑战：从宽色域（BT.2020）到标准色域（sRGB）的颜色空间转换、多基色系统（RGBV到RGBCX）之间的映射，以及校正LED显示屏中的颜色不均匀性。

对于BT.2020到sRGB的转换（问题一），详细介绍了一种采用仿射变换进行色域映射和自适应伽马校正进行对比度增强的模型。该方法旨在在标准显示器上显示宽色域内容时，最大限度地减少颜色损失，同时保留视觉细节和活力。多种损失函数（欧氏距离、CIELAB、加权RGB误差）的定义为评估和优化此类转换提供了坚实的框架。

对于四基色RGBV到五基色RGBCX的转换（问题二），提出了一种基于重心坐标分解和优化映射规则的方法。通过使用遗传算法（或梯度下降法）优化的系数（ $k_1, k_2$ ）将附加源基色（V）的贡献分配给新的显示基色（C, X），以最小化CIELAB颜色差异，可以实现高度的颜色保真度。实验示例证明了将感知色差降至极低水平的潜力。

对于LED显示器颜色校正（问题三），开发了一种逐像素校正策略，以解决LED发射中固有的不均匀性。该方法包括将测量的RGB值转换为CIE  $xyY$ 空间，应用双边滤波平滑色度变化，然后使用缩放因子将每个像素的RGB输出校准到特定的目标颜色。应用于64x64数据模块展示了其在实现显示器整体颜色外观一致性方面的有效性。

总体模型优势与局限性：所提出的模型利用CIE1931标准色空间作为基础元素，确保了颜色分析和处理的设备无关性基础。多种损失函数的使用满足了从简单几何距离到复杂感知色差等不同评估需求。不同技术的组合（仿射变换、伽马校正、重心坐标、优化算法、双边滤波）展示了解决这些复杂颜色再现问题的综合方法。然而，也存在局限性。基于CIELAB的计算可能计算量较大。所做的假设（例如某些空间的感知均匀性、颜色通道的独立性、显示特性的稳定性、新通道的线性可加性）简化了建模，但可能无法完美反映现实世界的复杂性。某些损失函数中权重的确定也可能具有主观性或需要广泛的经验验证。

未来方向与普适性：所探讨的方法可以扩展到各种显示技术（LCD、OLED、MicroLED）以及直接显示之外的应用，例如图像编辑软件和打印。随着HDR和更宽色域等显示技术的普及，这些模型的基本原理可以被调整和改进以应对新的挑战。未来的工作可以侧重于提高计算效率，开发更复杂的非线性映射算法，结合更复杂的感知模型，以及探索用于自适应颜色管理和校正的机器学习方法。

总之，本文为理解和解决显示系统中的关键颜色再现问题提供了一个详细的框架。所提出的模型和技术为增强颜色准确性、一致性和整体视觉质量提供了实用的解决方案，有助于显示技术的发展。