

物体反射光谱的多色拟合技术研究

王康华, 徐立君*, 任 玉, 周建伟, 李栋梁, 王婷婷, 蔡红星

长春理工大学物理学院, 吉林 长春

收稿日期: 2022年11月8日; 录用日期: 2023年1月5日; 发布日期: 2023年1月12日

摘 要

传统基于RGB体制的显示技术, 其本质是异谱同色成像, 为进一步提升显示端与真实物体反射光谱匹配度, 减少色差, 本文提出一种基于多通道的反射光谱重建方法, 可在显示端更加接近物体反射特性, 色差更小, 效果更真实。本方法通过增加显示通道的数量, 扩大了光谱范围, 提高显示信息的完整性; 并利用QPSO (量子粒子群)多光谱重建算法, 拟合真实物体表面反射光谱, 达到重建物体真实反射光谱目的。在实验验证中, 首先利用LED光源, 对4种标准光源照射下的24色标准色卡中的各个颜色进行反射光谱重建, 共计384组光谱。当通道数量从3增加到8时, 光谱匹配度从80%增加到大于90%, 且平均色差小于2, 验证了本方法可以大幅度提高显示光谱与真实物体的光谱匹配度, 同时大幅减少色差。

关键词

光谱匹配度, 多光谱重建, QPSO, 色差

Research on Multicolor Fitting Technology of Object Reflectance Spectrum

Kanghua Wang, Lijun Xu*, Yu Ren, Jianwei Zhou, Dongliang Li, Tingting Wang, Hongxing Cai

School of Physics, Changchun University of Science and Technology, Changchun Jilin

Received: Nov. 8th, 2022; accepted: Jan. 5th, 2023; published: Jan. 12th, 2023

Abstract

The essence of the traditional display technology based on RGB system is heterochromatic imaging. In order to further improve the matching between the display end and the reflection spectrum of the real object and reduce the color difference, this paper proposes a reflection spectrum reconstruction method based on multi-channel, which can be more accurate on the display end.

*通讯作者。

文章引用: 王康华, 徐立君, 任玉, 周建伟, 李栋梁, 王婷婷, 蔡红星. 物体反射光谱的多色拟合技术研究[J]. 传感器技术与应用, 2023, 11(1): 58-70. DOI: 10.12677/jsta.2023.111007

Close to the reflection characteristics of the object, the chromatic aberration is smaller, and the effect is more realistic. By increasing the number of display channels, the method expands the spectral range and improves the integrity of the displayed information; and uses the QPSO (quantum particle swarm) multispectral reconstruction algorithm to fit the reflection spectrum of the real object surface to achieve the purpose of reconstructing the real reflection spectrum of the object. In the experimental verification, the LED light source was used to reconstruct the reflection spectrum of each color in the 24-color standard color card under the illumination of 4 standard light sources, resulting in a total of 384 groups of spectra. When the number of channels increased from 3 to 8, the spectral matching degree increased from 80% to more than 90%, and the average chromatic aberration is less than 2. It is verified that this method can greatly improve the spectral matching between the displayed spectrum and the real object, and at the same time greatly reduce the chromatic aberration.

Keywords

Spectral Match, Multispectral Reconstruction, QPSO, Chromatic Aberration

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

传统基于 RGB 成像显示已经应用十分广泛,但其本质是异谱同色成像,即成像显示端所显示的光谱与物体的真实光谱存在较大差异。随着科学技术的高速发展,人们对色彩还原的精度要求逐渐提高,如何在显示端实现“色谱合一”(即颜色与光谱一一对应)成为了一项十分重要的研究[1]-[6]。

最早 Gressmann 在 1854 年总结出著名的 Gressmann 定律,为现代色度学颜色测量和标定奠定了基础[7]。1931 年 CIE 专委会基于 Wright [8]和 Guild [9]在 1928 年到 1930 年完成的色匹配实验,制定了著名的 CIE1931 色匹配函数,对人类颜色视觉给出了数学概括,对定义和准确再现颜色给出了参考。1974 年柯达公司的工程师 Bayer 发明 RGB 彩色滤光片阵列,即拜尔阵列滤波器,现在已经成为彩色图像显示的主要技术之一[10]。但 RGB 成像体制在本质上对人眼所获得的颜色信息进行了压缩,将所有颜色通过 RGB 三通道进行简化输出,在显示端呈现的光谱与真实物体反射光谱匹配度存在较大差异[11]。

基于以上传统基础理论,诸多科学家针对多基色显示减小同色异谱,即提高显示端的光谱匹配度问题开展了一系列的研究。2005 年 Michael 等人研究了基于多基色显示时避免同色异谱的方案,优化了多基色的显示设计,并提供了避免同色异谱问题的设计规则,但仍受到任何单一滤波器引起的颜色混淆增加的影响[12]。2008 年 Boris 等人研究了在计算机显示器和物体颜色刺激之间的非对称同色异谱颜色匹配[13]。2017 年 Zhang 等人采用一个由 13 种窄带 LED 和 4 种荧光粉型白光 LED 构成的 17 通道 LED 阵列,用来提升 LED 日光模拟器同色异谱质量的光谱匹配,该方法改善了匹配光谱的同色异谱指数质量等级以及显色性能[14]。2020 年 Wang 等人将三基色麦克亚当理论拓展到多基色显示系统,并提出了多基色显示系统中基色强度之间的关系,优化了 4 基色显示系统的强度[15]。2021 年 Jiao 等人优化并确定适用于彩色微光的 6 原色虾蛄眼仿生色谱体系,实现 6 基色图像至 3 基色图像的转换[16]。2021 年 Adrian 等人研究了 LED 光谱功率分布对各个观察者以不同的方式感知 LED 光谱和自然日光之间的色度差的影响[17]。2021 年 Song 等人提出了基于反射光谱色域覆盖率的大色域显示器色域评价指标,给出了接近极限色域并具有高光效率的多基色激光显示设计方案[18]。

随着多色显示理论研究的深入,针对多色显示器件的研究也得到了许多重大进展。2017年 Ji 等人研究了量子点液晶显示背光技术广色域的特点,以及在提升显示器件色域方面的优势[19]。2018年 Li 等人从结构,材料,性能,应用几方面对 LCD, OLED, QLED 及 Micro LED 这几种主流显示技术进行了对比研究[20]。

以上研究分别从理论和技术方面对多色显示领域进行了探讨,并提供了不同的研究思路。本文针对传统 RGB 体制中出现的颜色压缩以及同色异谱问题,提出了一种针对物体反射光谱的多色拟合技术,首先通过增加显示通道数,扩大光谱范围,提高了颜色信息显示的完整性;再利用 QPSO 算法重建真实物体表面反射光谱,大幅度提高了光谱匹配度并减少了误差。

2. 理论研究

2.1. 光谱拟合

物体真实表面反射光谱是一条连续曲线,多光谱成像系统可以获取物体表面所有颜色的反射光谱曲线。虽然由一般的成像设备获取的 RGB 响应值也能重建出反射光谱,但是,与只有三个光谱通道的普通 RGB 三色图像相比,多光谱图像包含了更多的光谱通道,所以多光谱图像包含了更加丰富而且准确的光谱信息,这使得多光谱成像系统重建出的反射光谱精度比普通成像设备重建出反射光谱精度更高。另外,对物体反射光谱的多个波段的采样可以特别详细的记录颜色特性,有效的解决了传统方法下数据精度过低的问题。多光谱技术还通过对采样通道数量的增加,极大地提高了色彩信息显示的完整性,因此能实现高精度的色彩拟合。

因此为了提升显示端光谱匹配度和减少色差,本文采用不同颜色的 LED 光谱为多通道光谱,针对物体真实反射光谱对其拟合。目前,进行多光谱拟合的主要方法是迭代算法。成熟的迭代算法有很多种,如最速梯度法,以及在光谱研究领域最常用的最小二乘法等,因为最小二乘法具有运算效率高,对矩阵操作方便等优点,故选用最小二乘法进行拟合计算。

最小二乘法:

首先根据光谱叠加原理得到 LED 的光谱合成模型:

$$L(\lambda) = \sum k_i S_i(\lambda) \quad (1)$$

式中: $L(\lambda)$ 为拟合后的 LED 光谱模型, k_i 为拟合系数, $S_i(\lambda)$ 为不同波段的单个 LED 模型。

1) 光谱离散采样,构建目标光谱矩阵 $S(t)$:

$$S(t) = [y_1, y_2, y_3, \dots, y_t]^T \quad (2)$$

式中, t 为目标光谱的离散采样点个数, y 为各采样点, T 表示矩阵转置。

2) 构造 LED 光谱矩阵 $S_{LED}(i)$ 和 LED 单元 $N_i(t)$:

$$S_{LED}(i) = [N_1(t), N_2(t), \dots, N_t(t)]^T \quad (3)$$

式中, t 为 LED 单元离散采样点个数, i 为拟合单元个数决定拟合矩阵的大小以及仿真的精度, LED 单元越多仿真精度越高。

3) 构造系数矩阵 $K = [k_1, k_2, \dots, k_i]^T$, 得到拟合计算公式:

$$S_{LED}(i) \times K = S_t \quad (4)$$

4) 通过上式计算出系数 K , 这里 $i \ll t$, 因此该计算为超定方程的求解过程,而超定方程组没有古典意义下的解,但是可以求出它的广义解法,即最小二乘解 K^* :

$$\|S_{(t)} - S_{LED}(i)K^*\|_2 = \min_{K \in R^T} \|S(t) - S_{LED}K\|_2 \quad (5)$$

目前有很多算法可以实现超定方程组的最小二乘解, 常见的有模拟退火算法、遗传算法、L-M 算法等, PSO 算法等[21]。

2.2. QPSO(量子粒子群算法)

PSO 算法是一种基于群体智能的优化算法, 在 PSO 系统中, 每个优化问题的潜在解都可以想象成 N 维搜索空间上的一个点, 称之为“粒子”, 而所有的粒子都有一个被目标函数决定的适应值, 即目标函数值。每个粒子在搜索空间中以一定的速度飞行, 这个速度根据它本身的飞行经验来动态调整。通常粒子将追随当前最好的粒子, 并经过逐代搜索, 最终得到最优解。在每一代中, 粒子将跟踪两个最好的位置, 一个是粒子本身迄今找到的最好位置, 称为个体最好位置(pbest)。另一个为整个粒子群迄今找到的最好位置, 称为全局最好位置(gbest) [22]。

而 QPSO 算法是基于 PSO 算法的进阶算法, 具体算法流程如下, 在一个 N 维的目标搜索空间中, OPSO 算法由 M 个代表潜在问题解的粒子组成群体 $X = \{X_1, X_2, \dots, X_M\}$, 在 t 时刻, 第 i 个粒子位置 $X_i(t) = [X_{i,1}(t), X_{i,2}(t), \dots, X_{i,N}(t)]$, $i = 1, 2, \dots, m$

粒子没有速度向量。个体最好位置表示为 $P_i(t) = [P_{i,1}(t), P_{i,2}(t), \dots, P_{i,N}(t)]$, 群体的全局最好位置为 $G(t) = [G_1(t), G_2(t), \dots, G_N(t)]$, 且 $G(t) = P_g(t)$, 其中 g 为处于全局最好位置粒子的下标, $g \in \{1, 2, \dots, M\}$ 。

对于最小化问题, 目标函数越小, 对应的适应值越好。粒子 i 的个体最好位置 pbest:

$$P_i(t) = \begin{cases} X_i(t) & \text{若 } f[X_i(t)] < f[P_i(t-1)] \\ P_i(t-1) & \text{若 } f[X_i(t)] \geq f[P_i(t-1)] \end{cases}$$

群体的全局最好位置 gbest:

$$g = \arg \min_{1 \leq i \leq m} \{f[P_i(t)]\}$$

$$G(t) = P_g(t)$$

2.3. LED 光谱模型

利用多个单峰离散的 LED 光谱拟合目标光谱, 需要在保证相邻 LED 光谱存在叠加区域的前提下, 选择覆盖目标光谱的 LED 单元, 利用合成方法对选择的 LED 合成目标光谱的效果进行仿真实验, 对拟合结果进行光谱匹配度分析, 根据拟合结果调整 LED 模型参数, 再次进行仿真实验, 最终确定光谱拟合最优系数。

由于 LED 发光特性, 单个 LED 在其光轴方向上单位立体角内辐射功率随电流变化的关系可以用高斯函数来近似, 采用物理量表示如下:

$$L_\lambda = \alpha I e^{-2(\lambda - \lambda_c)/\omega^2} \quad (6)$$

式中 L_λ 为单个 LED 在光轴方向上的辐射强度, α 为光电转换系数, 对于单个 LED 转换系数为常数, I 为电流, λ_c 为峰值波长。

实验测得的 LED 光谱分布函数并不是轴对称的, 直接用高斯分布拟合单个 LED 光谱会有偏差, 但由于标准高斯拟合的相关系数为 0.982, 与实际光谱曲线的相关系数接近于 1, 且我们是对多个波段的 LED 进行光谱拟合, 所以选用标准高斯分布的 LED 光谱进行拟合是可行的[23]。

为了使实验更加符合实际情况, 我们模拟了 4 组方案, 分别为传统 RGB 通道(即本文中的 3 通道), 4 通道, 6 通道和 8 通道, 各组数据如表 1 及图 1 所示。

Table 1. Specific parameters of each LED under 4 different channels
表 1. 4 种不同通道数下各 LED 具体参数

Number of channels	Center wavelength(nm)	FWHM(nm)
3	435, 546, 700	100
4	420, 500, 580, 660	100
6	410, 470, 530, 590, 650, 710	80
8	400, 445, 490, 535, 580, 625, 670, 715	65

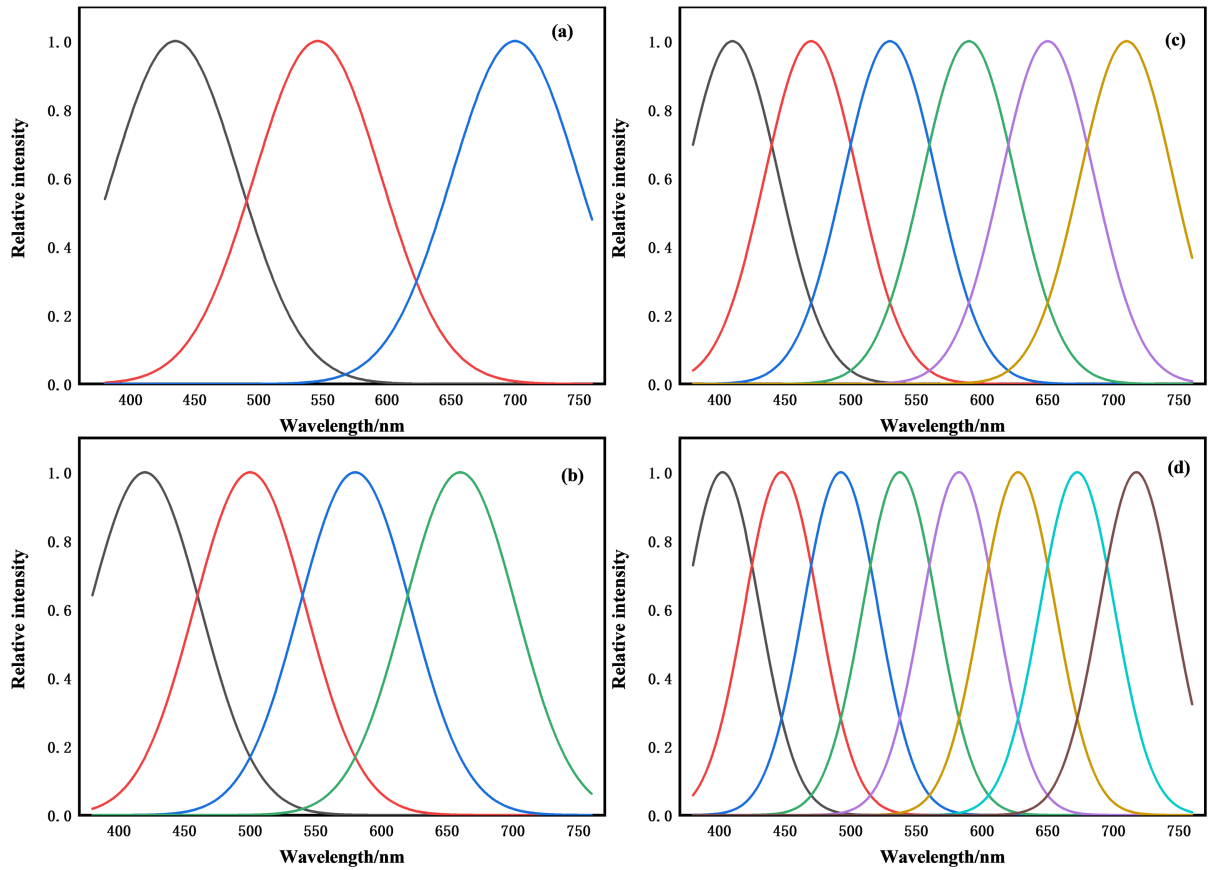


Figure 1. Three groups of LED spectra simulated by simulation. (a) RGB 3 channels; (b) 4 channels; (c) 6 channels; (d) 8 channels

图 1. 模拟仿真的 3 组 LED 光谱。(a) 为 RGB 3 通道；(b) 为 4 通道；(c) 为 6 通道；(d) 为 8 通道

3. 实验与结果分析

对于 QPSO 算法在光谱拟合上的理论支持，现对理论进行实验验证，由仿真实验结果分析该方法的光谱拟合效果。

为了使得模拟实验具有一般性，我们选用的目标光谱为处于 4 种标准光源照射下的 24 色标准色卡反射光谱。标准色卡均是用哑光油漆或涂料模拟自然界典型物体的光谱曲线制作而成，对自然界典型物体颜色具有较好代表性。具体见图 2，标准光源则模拟了现实生活中不同场景下的自然光源。我们选用的四种标准光源分别为 A 光源，CWF 光源，D65 光源，HZ 光源，具体光源参数见表 2。



Figure 2. 24-color standard color card
图 2. 24 色标准色卡

Table 2. Standard light source parameters
表 2. 标准光源参数

standard light source	Alight source	CWFlight source	D65light source	HZlight source
color temperature	2856 K	4150 K	6500 K	2300 K

图 3 为各光源照射下标准色卡第 4, 10, 14, 16 的反射光谱:

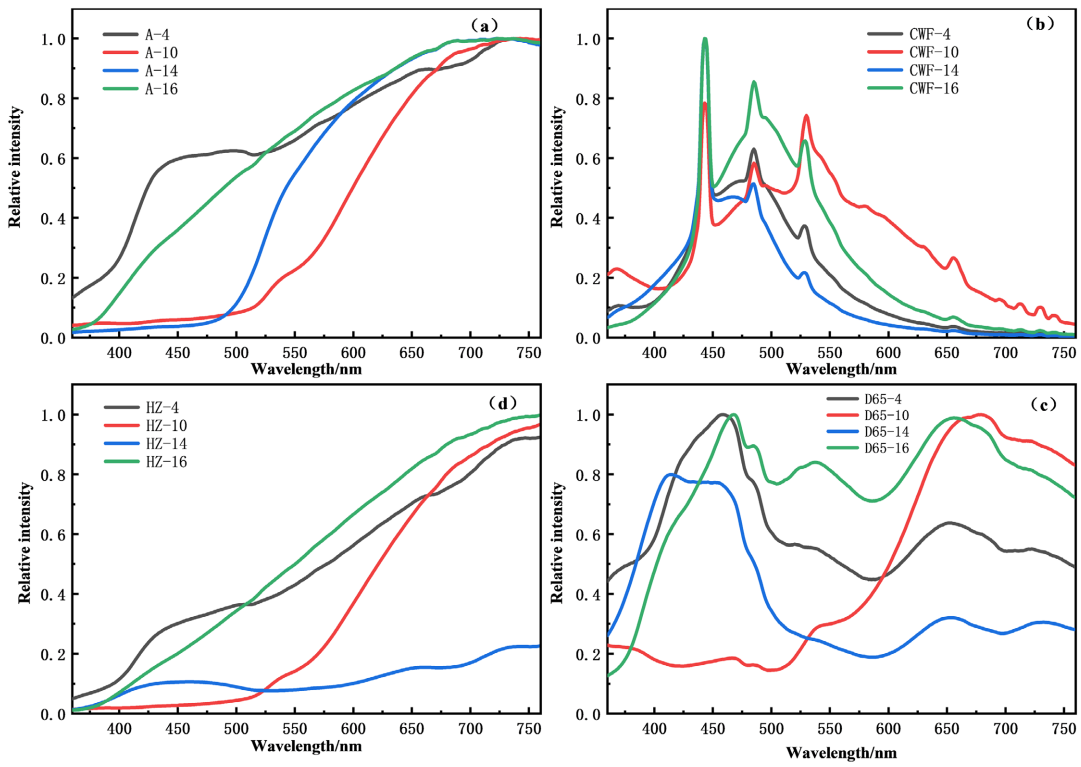


Figure 3. Reflection spectra of the 4th, 10th, 14th and 16th color blocks of the standard color card under the illumination of 4 light sources. (a) The reflection spectrum under the illumination of the standard light source A; (b) The reflection spectrum under the illumination of the standard light source CWF; (c) The reflection spectrum under the illumination of standard light source D65; (d) The reflection spectrum under the illumination of standard HZ

图 3. 标准色卡在 4 种光源照射下的第 4, 10, 14, 16 个色块的反射光谱。(a) 为标准光源 A 照射下的反射光谱; (b) 为标准光源 CWF 照射下的反射光谱; (c) 为标准光源 D65 照射下的反射光谱; (d) 为标准 HZ 照射下的反射光谱

我们随机选取 A 光源照射下的第 4 色块, CWF 光源照射下的第 10 色块, D65 光源照射下的第 16 色块, HZ 光源照射下的第 14 色块作为目标, 分别将这 4 种反射光谱作为目标光谱。随后我们选取可见光波段 380~760 nm, 分别将图 1 中模拟的 3 通道, 4 通道, 6 通道, 8 通道光谱作为基向量光谱, 运用 QPSO 算法对其拟合, 部分拟合结果如图 4 所示:

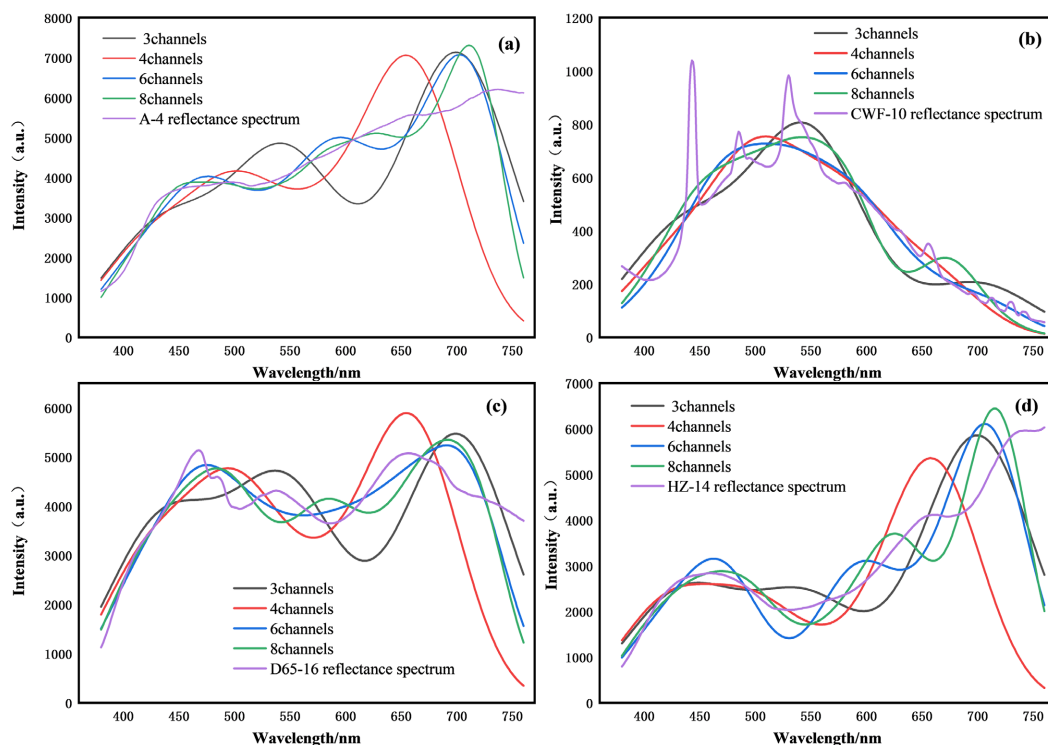


Figure 4. Fitting diagram of QPSO algorithm. (a) The reflection spectrum of the 4th color block of the color card under the illumination of the standard light source A; (b) The reflection spectrum of the 10th color block under the illumination of the standard light source CWF; (c) The reflection spectrum of the 16th color block under the illumination of the standard light source D65; (d) The reflection spectrum of the 14th color block under the illumination of the standard light source HZ

图 4. QPSO 算法拟合图。(a) 为标准光源 A 照射下色卡第 4 色块反射光谱; (b) 为标准光源 CWF 照射下第 10 色块反射光谱; (c) 为标准光源 D65 照射下第 16 色块反射光谱; (d) 为标准光源 HZ 照射下第 14 色块反射光谱

对比实验结果我们可以发现, 在目标光谱中出现过于“陡峭”的波峰或者出现过于“平缓”的波峰时, 拟合光谱与目标光谱之间差异较大。这是因为在选择基向量时, 所选的基向量其半高宽远大于目标光谱中部分波段的半高宽或者所选的基向量其半高宽远小于目标光谱中部分波段的半高宽, $FWHM_{拟合} \gg FWHM_{目标}$, 或 $FWHM_{拟合} \ll FWHM_{目标}$ 。

分析以上问题我们可以得到, 理论上只要我们所选的基向量半高宽越小, 数量越多峰值波长间隔越小的 LED 光谱数据组合成光谱越平滑, 拟合光谱与目标光谱相似度越高, 能更好的分辨目标光谱尖峰处的细节, 但是间隔越小使计算量、数据采集量都会增加。

所以使用间隔过小的 LED 光谱数据拟合成目标光谱是不符合实际的。在调整基向量参数时要尽可能符合实际 LED 光谱参数。

4. 误差分析

4.1. 光谱匹配度

根据以上模拟仿真分析, 我们对结果进行光谱匹配度[24]分析, 定义为拟合光谱积分面积占目标光谱

积分面积百分比，公式如下：

$$\eta = \frac{E_1 - E_2}{E_3} \times 100\% \tag{7}$$

- η ：光谱匹配度；
- E_1 ：拟合光谱积分面积；
- E_2 ：拟合光谱与目标光谱未重合部分积分面积；
- E_3 ：目标光谱积分面积。

在接下来实验中，我们拟合了在 4 种光源条件下，分别用 RGB 3 通道，4 通道，6 通道和 8 通道作为基向量，对 24 色标准色卡各色块的反射光谱，总共 384 组实验。针对该实验结果，我们对其进行光谱匹配度分析，分析结果见下表 3：

Table 3. Spectral matching degree
表 3. 光谱匹配度

standard light source	Maximum spectral match			
	3channels	4 channels	6 channels	8 channels
A light source	80.34%	84.53%	95.19%	95.30%
CWF light source	83.75%	94.91%	95.45%	95.81%
D65 light source	81.37%	89.68%	95.23%	95.34%
HZ light source	76.64%	80.12%	93.64%	94.26%

standard light source	Average spectral match			
	3 channels	4 channels	6 channels	8 channels
A light source	78.16%	74.83%	90.42%	90.30%
CWF light source	81.57%	91.07%	93.00%	92.57%
D65 light source	79.91%	83.36%	93.03%	92.33%
HZ light source	73.02%	71.31%	88.99%	90.21%

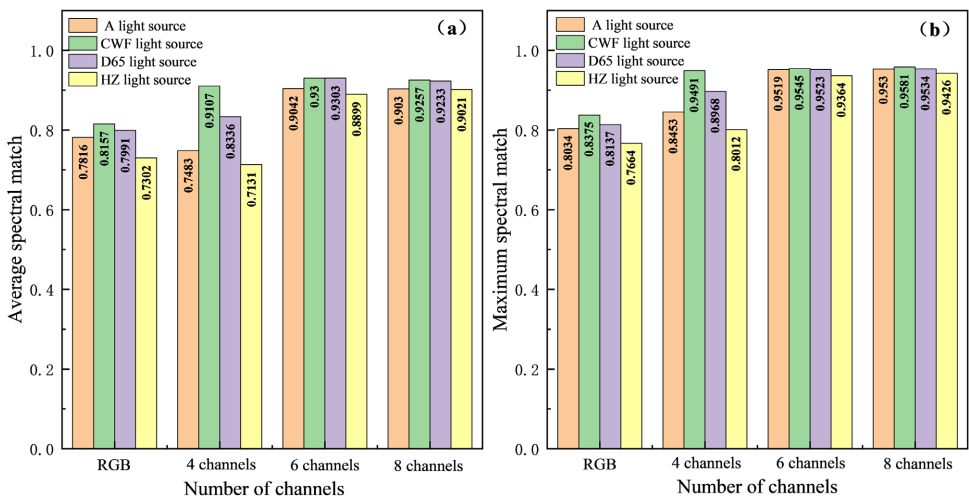


Figure 5. Comparison of spectral matching under each channel. (a) The average spectral matching degree; (b) The maximum spectral matching degree
图 5. 各通道下光谱匹配度对比。(a) 为平均光谱匹配度；(b) 为最大光谱匹配度

由图 5 可以看出, 随着通道数的增加, 光谱匹配度逐渐增大。6 通道时拟合光谱与目标光谱的光谱匹配度基本大于 90%, 8 通道时全部大于 90%, 拟合结果优异。

4.2. CIEDE2000 色差公式

CIEDE2000 差公式为 CIE 专委会在 2000 年提出的新的色差评价公式, 此公式在目前国际上所有新的和旧的视觉实验数据的测试中均有较精确的预测性能。具体公式如下:

$$\Delta E_{00}^2 = \left(\frac{\Delta L'}{K_L \cdot S_L} \right)^2 + \left(\frac{\Delta C'}{K_C \cdot S_C} \right)^2 + \left(\frac{\Delta H'}{K_H \cdot S_H} \right)^2 + R_T \cdot \left(\frac{\Delta C' \cdot \Delta H'}{K_C \cdot S_C \cdot K_H \cdot S_H} \right) \quad (8)$$

$$\Delta E_{00} = \sqrt{\Delta E_{00}^2} \quad (9)$$

式中: $\Delta L'$ 为亮度差异; $\Delta H'$ 为色相角差异; K_L 为亮度参数因子; K_H 为色相角参数因子; S_L 为亮度加权函数; S_C 为色度加权函数; S_H 为色相角加权函数; R_T 为在 CIEDEAB 空间的蓝色和蓝紫色区域中根据彩度变化计算的旋转度[25]。

具体计算过程主要包含以下四个步骤:

- 1) 计算目标颜色样品在 CLELAB 颜色空间中的 L、A、B;
- 2) 计算 a' 、 C'_{ab} 和 h'_{ab}

$$\begin{cases} L' = L \\ a' = (1 + G) * a \\ b' = b \\ C'_{ab} = \sqrt{a'^2 + b'^2} \\ h'_{ab} = \arctan(b'/a') \end{cases} \quad (10)$$

其中,

$$G = 0.5 * \left(1 - \sqrt{\overline{C_{ab}^*}^7 / \overline{C_{ab}^*}^7 + 25^7} \right) \quad (11)$$

其中 $\overline{C_{ab}^*}$ 表示两个色样的平均彩度值。

- 3) 计算 $\Delta L'$ 、 $\Delta C'_{ab}$ 和 $\Delta H'_{ab}$

$$\begin{cases} \Delta L' = L'_1 - L'_2 \\ \Delta C'_{ab} = C'_{ab,1} - C'_{ab,2} \\ \Delta H'_{ab} = 2\sqrt{C'_{ab,1} * C'_{ab,2}} \sin(\Delta h'_{ab}/2) \end{cases} \quad (12)$$

- 4) 计算 S_L 、 S_C 、 S_H 和 T :

$$\begin{cases} S_L = 1 + \frac{0.015(\overline{L'} - 50)^2}{\sqrt{20 + (\overline{L'} - 50)^2}} \\ S_C = 1 + 0.045\overline{C'_{ab}} \\ S_H = 1 + 0.015\overline{C'_{ab}}T \\ T = 1 - 0.017 \cos(\overline{h'_{ab}} - 30^\circ) + 0.24 \cos(2\overline{h'_{ab}}) + 0.32 \cos(3\overline{h'_{ab}} + 6^\circ) - 0.2 \cos(4\overline{h'_{ab}} - 63^\circ) \end{cases} \quad (13)$$

其中,

$$\begin{cases} R_T = -\sin(2\Delta\theta)R_C \\ \Delta\theta = 30 \exp\left\{-\left[\overline{h'_{ab}} - 275^\circ/25\right]^2\right\} \\ R_C = 2\sqrt{\overline{C'_{ab}}^7 / \overline{C'_{ab}}^7 + 25^7} \end{cases} \quad (14)$$

Table 4. Lab values after 4-channel fitting under the illumination of light source A

表 4. A 光源照射下 4 通道拟合后 Lab 值

Color Card	L	a	b
A-1	81.57	22.62	43.17
A-2	70.5	36.64	21.68
A-3	70.48	36.64	21.64
A-4	78.07	23.16	17.42
A-5	76.26	36.75	60.63
A-6	75.37	22.27	-19.9
A-7	95.41	6.61	55.19
A-8	56.61	59.25	32.08
A-9	62.21	52.99	57.37
A-10	62.24	52.93	57.09
A-11	90.64	13.47	50.13
A-12	90.64	13.47	50.15
A-13	87.94	26.25	102.89
A-14	87.95	26.25	102.9
A-15	87.91	26.34	103.01
A-16	94.19	9.67	47.12
A-17	85.9	27.62	90.04
A-18	68.33	46.63	-29.05
A-19	96.19	4.71	35.39
A-20	85.49	17.87	33.68
A-21	82.68	19.66	29.93
A-22	83.74	18.1	29.35
A-23	83.34	18.42	28.26
A-24	76.53	30.03	32.1

表 4 为 A 光源照射下 4 通道拟合后的 Lab 值。所有模拟结果根据 4.2 式计算得 CIEDE2000 平均色差如表 5 所示:

Table 5. Color difference analysis
表 5. 色差分析

number of channels		RGB 3 channels			
standard light source	A light source	CWF light source	D65 light source	HZ light source	
CIEDE2000Average color difference	3.4	4.2	3.65	3.74	

number of channels		4 channels			
standard light source	A light source	CWF light source	D65 light source	HZ light source	
CIEDE2000Average color difference	2.91	3.1	3.37	1.93	

number of channels		6 channels			
standard light source	A light source	CWF light source	D65 light source	HZ light source	
CIEDE2000Average color difference	2.85	2.05	1.93	1.86	

number of channels		8 channels			
standard light source	A light source	CWF light source	D65 light source	HZ light source	
CIEDE2000Average color difference	1.88	1.94	1.83	1.71	

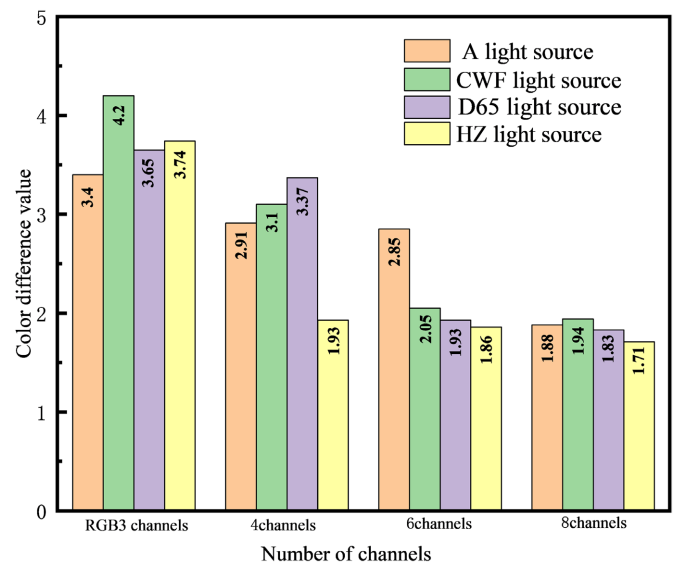


Figure 6. Chromatic aberration analysis of 4, 6, and 8 channels under 4 standard light sources
图 6. 4 种标准光源下 4、6、8 通道色差分析

由表 4 可以看出，当 LED 光谱基向量为 4 通道时，拟合光谱与目标光谱之间色差较大，特别是针对于在 D65 光源下的色卡反射光谱，色差为 3.1，拟合结果不理想。由图 6 可看出，随着 LED 光谱基向量的增加，色差逐渐减小，当通道数为 8 时，4 种标准光源下的平均色差均 ≤ 2 ，表明模拟结果良好，满足要求，证明了我们第 2 节中结论的准确性。

5. 结论

综上所述，我们通过增加显示通道的数量，模拟了 3、4、6、8 通道的 LED 光谱，扩大了光谱范围，

并首次利用 QPSO 算法将模拟的 4 组 LED 基向量光谱与 4 种标准光源辐照 24 色标准色卡的全部 384 组光谱进行拟合。结果表明, 随着通道数的增加, 光谱匹配度逐渐增大, 色差逐渐减小。8 通道时光谱匹配度全部大于 90%, 平均色差均 ≤ 2 , 证明了该多色拟合技术提升显示端与物体真实反射光谱匹配度和减少色差的可行性。

基金项目

吉林省自然科学基金项目(20200201257JC)。

参考文献

- [1] Wright, W.D. (1929) A Re-Determination of the Trichromatic Coefficients of the Spectral Colours. *Transactions of the Optical Society*, **30**, 141-164. <https://doi.org/10.1088/1475-4878/30/4/301>
- [2] Cao, Y., Zhao, B., Tong, X., et al. (2021) Data-Driven Framework for High-Accuracy Color Restoration of RGBN Multispectral Filter Array Sensors under Extremely Low-Light Conditions. *Optics Express*, **29**, 23654-23670. <https://doi.org/10.1364/OE.426940>
- [3] Fang, J. and Kim, Y. (2018) A Matrix-Based Method of Color Correction for Metamerism Failure between LCD and OLED. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, **49**, 1044-1047. <https://doi.org/10.1002/sdtp.12188>
- [4] 易定容, 孔令华, 赵艳丽, 杨子涵. 窄带快照式多光谱成像色彩还原方法[J]. 光谱学与光谱分析, 2021, 41(1): 183-187.
- [5] 丁然, 冯晶, 孙洪波. 色彩还原 - 高显色指数有机单晶白光发光二极管器件[J]. 科学通报, 2020, 65(23): 2422-2423.
- [6] 孙炎. 多原色显示技术研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京理工大学, 2018.
- [7] Schubring, G. (2013) Hermann Günther Graßmann (1809-1877): Visionary Mathematician, Scientist and Neohumanist Scholar. Springer, Dordrecht.
- [8] Wright, W.D. (1930) A Re-Determination of the Mixture Curves of the Spectrum. *Transactions of the Optical Society*, **31**, 201-218. <https://doi.org/10.1088/1475-4878/31/4/303>
- [9] Guild, J. (1931) The Colorimetric Properties of the Spectrum. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Containing Papers of a Mathematical or Physical Character*, **230**, 149-187. <https://doi.org/10.1098/rsta.1932.0005>
- [10] Bayer, B.E. (1976) Color Imaging Array. US Patent No. 3971065A.
- [11] 徐海松. 颜色信息工程[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2015.
- [12] Brill, M.H. and Larimer, J. (2005) Avoiding on-Screen Metamerism in N-Primary Displays. *Journal of the Society for Information Display*, **13**, 509-516.
- [13] Oicherman, B., Luo, M.R., Rigg, B. and Robertson, A.R. (2008) Effect of Observer Metamerism on Colour Matching of Display and Surface Colours. *Color Research and Application*, **33**, 346-359. <https://doi.org/10.1002/col.20429>
- [14] 章夫正, 徐海松, 丰恒. 提升 LED 日光模拟器同色异谱质量的光谱匹配方法[J]. 照明工程学报, 2017, 28(2): 23-27.
- [15] 王贯. 新型显示中的立体色域理论[D]: [博士学位论文]. 合肥: 中国科学技术大学, 2020.
- [16] 焦祉衡. 低照度多光谱彩色成像中色彩还原技术研究[D]: [硕士学位论文]. 长春: 长春理工大学, 2021.
- [17] Eissfeldt, A., Zandi, B., Herzog, A. and Khanh, T.Q. (2021) Quantifying Observer Metamerism of LED Spectra Which Chromatically Mimic Natural Daylight. *Optics Express*, **29**, 38168-38184. <https://doi.org/10.1364/OE.433411>
- [18] 宋洪亚. 图像的光谱编码获取与色彩重现若干问题研究[D]: [博士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2021.
- [19] 季洪雷, 周青超, 潘俊, 等. 量子点液晶显示背光技术[J]. 中国光学, 2017, 10(5): 666-680.
- [20] 李继军, 聂晓梦, 李根生, 等. 平板显示技术比较及研究进展[J]. 中国光学, 2018, 11(5): 695-710.
- [21] 倪俊雄, 白廷柱, 徐英莹. LED 可变光谱光源的多光谱拟合反演研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2012, 32(6): 1606-1610.
- [22] 孙俊. 量子行为粒子群优化算法研究[D]: [博士学位论文]. 无锡: 江南大学, 2009.
- [23] 王立辉. 基于 LED 阵列光源的太阳光谱合成技术研究[D]: [硕士学位论文]. 长春: 长春理工大学, 2018.
- [24] 朱孔硕, 孙健刚, 李果华, 马晓光. LED 太阳模拟器光谱匹配度与辐照不均匀度的实现[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 18(1): 1-10.

2015, 52(12): 193-198.

- [25] 王萌萌. 基于多通道成像系统的颜色高保真图像获取方法研究[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2020.