

## 基于奇异值分解的液晶显示器光谱特征化

姚建伟, 张肖辉\*, 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** 提出一种新的显示器光谱特征化方法。首先,通过奇异值分解的手段获得单通道最重要的  $k$  个基向量,这样任何单通道的光谱辐亮度都是这些基向量的线性组合,而对应的基下坐标也可通过正交性获得,从而也建立了查找表。因此对于单通道的任何驱动值,对应的光谱辐亮度便可由基向量线性表示出,组合系数通过查找表和插值技术获得。最后对于任何一组驱动值  $R$ 、 $G$ 、 $B$ ,便可由单通道的光谱加和预测出总体光谱辐亮度。当  $k=1$  时,本文方法退化成传统的假定色品恒定的分段线性插值(PLCC)方法。同时也提出了新方法的逆向模型。测试结果表明,按色差和光谱均方根误差度量,本文提出的正向模型不仅优于传统的 Gain-Offset-Gamma 和 PLCC 模型,也优于最近提出的光谱辐射亮度分区模型和光谱辐射亮度分段分区模型。

**关键词** 颜色; 奇异值分解; 通道独立性; 液晶显示器; 光谱特征化

中图分类号 O432.3

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1633002

## Spectral Characterization of Liquid Crystal Displays Based on Singular Value Decomposition

Yao Jianwei, Zhang Xiaohui\*, Li Changjun

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

**Abstract** In this paper, a new spectral characterization method for displays is developed. Firstly, after singular value decomposition, the  $k$  most important basis vectors can be obtained for each of the three channels, so that for any given driving signal, its corresponding spectral radiance on each channel can be the linear combinations of these basis vectors and the datum coordinates can be acquired through orthogonality. Then, a lookup table is compiled. Thus, for any driving single in an individual channel, the corresponding spectral radiance can be linearly expressed by basis vectors and the combination coefficients can be got by the lookup table and the interpretation technique. Finally, for any set of driving signals  $R$ ,  $G$ , and  $B$ , the overall spectral radiance can be predicted by the summation of the spectral radiances on the three individual channels. When  $k=1$ , the proposed method becomes the traditional piecewise linear interpolation assuming constant chromaticity (PLCC) method. The inverse model for the proposed method is also given. Comparison results in terms of the color difference and spectral root mean square error show that the proposed forward model is better not only than the traditional Gain-Offset-Gamma and PLCC methods but also than the newly developed spectral radiance model based on wavelength partition and spectral radiance piecewise partition model.

**Key words** color; singular value decomposition; channel independence; liquid crystal display; spectral characterization

**OCIS codes** 330.1730; 330.1710; 330.1715

收稿日期: 2021-01-22; 修回日期: 2021-02-15; 录用日期: 2021-03-18

基金项目: 国家自然科学基金(61575090,61775169)

通信作者: \*2930031511@qq.com

## 1 引言

对液晶显示器进行精准颜色特征化,有助于跨媒体颜色再现。显示器颜色特征化模型可以分为两类,早期显示器特征化主要建立显示器驱动信号  $R$ 、 $G$ 、 $B$  和颜色三刺激值  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  之间的相互转换关系。这类模型是从色度角度考虑建立色度特征化模型,只需考虑建立和色度值如三刺激值的转换关系,比较方便。比较经典特征化模型有增益-偏置-伽马(GOG)模型<sup>[1]</sup>、假定色品恒定的分段线性插值(PLCC)模型<sup>[2]</sup>和假定色品变化的分段线性插值(PLVC)模型<sup>[3]</sup>等。GOG 模型用含有增益-偏置-伽马三个参数的解析函数表示显示器的电-光转换函数,被国际照明委员会(CIE)推荐为阴极射线管(CRT)显示器的颜色特征化方法;PLCC 模型假定显示器各通道色品坐标不变,通过分段线性插值建立模型;PLVC 模型考虑到色品坐标随驱动值的变化而变化,精度较高,但逆向模型较复杂。此外,Fairchild 等<sup>[4]</sup>提出建立 3-1D 亮度查找表,用于描述液晶显示器的电-光转换函数,特征化精度较高。Day 等<sup>[5]</sup>提出优化由黑点校正后单通道最大驱动值对应的测量值组成的转换矩阵系数,并利用训练数据建立亮度查找表,提升了颜色特征化精度。Wen 等<sup>[6]</sup>考虑到显示器通道之间的干扰,提出了双通道干扰(TPC)模型,其颜色特征化精度高于其他模型,仅次于三维查找表(3D-LUT)模型<sup>[7]</sup>。宫睿等<sup>[8]</sup>将分空间处理的思想应用于液晶显示器色度特征化精度较高的掩模模型<sup>[9]</sup>,提出了分空间补偿模型,虽然达到了较高的色度精度但模型训练需要更多的测量样本。Zhang 等<sup>[10]</sup>将 PLVC 模型和分区补偿误差模型组合,提出了一种复合模型,也达到了较高精度。

另一类显示器特征化模型是考虑从光谱角度建立光谱特征化模型,光谱包含更多的信息,是颜色的本质,建立光谱特征化模型能准确预测光谱,保留更多的颜色信息,适用于需保存更多原始本质颜色信息的情况。尤其是随着多光谱图像技术的发展和多光谱图像的跨媒体再现的需求,需要建立显示器的  $R$ 、 $G$ 、 $B$  和对应的光谱辐亮度的相互转换关系,也称为显示器的光谱特征化。建立显示器的光谱特征化模型的优点是能达到较高的预测精度且能很好地避免同色异谱现象。此类模型有刘浩学等<sup>[11-12]</sup>提出的光谱辐射分区模型(记为 SRPM),Tian 等<sup>[13]</sup>在 SRPM 模型基础上提出的

光谱辐射亮度分段分区模型(记为 SRPPM)和 Zhang 等<sup>[14]</sup>给出的反向模型,均是考虑建立驱动值和光谱辐亮度的关系。考虑到光谱的维数较高,可以利用主成分分析<sup>[15]</sup>将光谱数据降维,再通过神经网络模型<sup>[16-18]</sup>建立任意驱动值和光谱辐亮度的关系,这类模型往往需要较多训练样本。麻祥才等<sup>[19]</sup>分析了视觉特性对特征化模型的精度影响,提出了基于视觉特性的液晶显示器光谱特征化方法。张肖辉等<sup>[20]</sup>考虑将 GOG 和 PLCC 模型用于液晶显示器光谱特征化,特征化精度也较高。本文考虑间隔取值得到的单通道测量光谱,进行奇异值分解,通过单通道光谱少量基向量和对应基下坐标的乘积和表示预测光谱,进而通过单通道加和得到任意驱动值 RGB 组合对应的光谱辐亮度,同时也给出了相应的逆向模型,测试结果表明,本文提出的模型要优于 SRPM 和 SRPPM 模型。

## 2 基于奇异值分解的光谱特征化

显示器颜色特征化模型的一个重要假设是满足通道独立性,这也是很多显示器颜色特征化模型的假设条件,即假设显示器三通道互不干扰,任意 RGB 组合的光谱可以通过单通道光谱加和来表示。每通道分别以 15 为间隔测量纯色光谱和灰阶光谱,进而能得到纯色光谱加和后的光谱,有了光谱数据就能计算色差。加和光谱可以表示为

$$c(d_r, d_g, d_b) = c(d_r, 0, 0) + c(0, d_g, 0) + c(0, 0, d_b) - 2c(0, 0, 0), \quad (1)$$

式中: $c(d_r, d_g, d_b)$ 表示驱动值为  $d_r$ 、 $d_g$ 、 $d_b$  的光谱辐亮度; $c(d_r, 0, 0)$ 、 $c(0, d_g, 0)$ 、 $c(0, 0, d_b)$ 分别表示单通道纯色光谱辐亮度; $c(0, 0, 0)$ 为黑点( $R = G = B = 0$ )的光谱辐亮度。

相对于基于 GOG 模型和 PLCC 模型的单通道光谱辐亮度表示法即用一个因子乘以单通道最大光谱辐亮度表示法,奇异值分解法的思想是对单通道光谱采取多个基向量和对应基下的坐标的乘积和表示,进而用三通道叠加光谱表示任意 RGB 组合的光谱辐亮度。单通道间隔 15 取值测量对应的光谱辐亮度,组成单通道光谱辐亮度矩阵。考虑到黑点的影响,首先进行黑点校正,采用奇异值分解进而可得到一组基,可以表示为

$$\mathbf{S}_{m \times n} = \mathbf{U} \mathbf{D} \mathbf{V}^T, \quad (2)$$

式中: $\mathbf{S}_{m \times n}$ 为单通道取不同值时的黑点校正后光谱辐亮度组成的矩阵,这里  $m = 401$ ,  $n = 18$ ;  $\mathbf{U}$  和  $\mathbf{V}$  分

别是  $m \times m$  和  $n \times n$  的正交矩阵;  $U$  的列向量构成  $S_{m \times n}$  一组基;  $D$  是  $m \times n$  的对角矩阵, 对角线元素为  $S_{m \times n}$  的奇异值。令  $S_{m \times n}$  的秩为  $t$ , 则有  $t \leq n$ , 因此  $D$  具有以下形式

$$D = \begin{bmatrix} \sigma_1 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \cdots & \sigma_t & 0 & 0 \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & \cdots & \sigma_n \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中:  $\sigma_1 \geq \cdots \geq \sigma_t > 0, \sigma_{t+1} = \sigma_{t+2} = \cdots = \sigma_n = 0$ 。例如对  $R$  通道光谱辐亮度矩阵进行奇异值分解, 则任意  $R$  通道的光谱辐亮度可以表示为

$$f_r(\lambda, R) = \alpha_1 u_1 + \alpha_2 u_2 + \cdots + \alpha_t u_t, \quad (4)$$

式中:  $f_r(\lambda, R)$  为黑点校正后的单通道光谱;  $u_1, u_2, \cdots, u_t$  为正交矩阵  $U$  的前  $t$  个列向量。由于  $U$  是正交矩阵, 所以  $u_1, u_2, \cdots, u_t$  两两正交, 相同向量内积为 1, 不同向量内积为 0。在 (4) 式两端分别乘上  $u_j$  的转置可以得到:

$$\begin{cases} u_1^T f_r(\lambda, R) = \alpha_1 \\ u_2^T f_r(\lambda, R) = \alpha_2 \\ \vdots \\ u_t^T f_r(\lambda, R) = \alpha_t \end{cases}. \quad (5)$$

这样  $R$  单通道的光谱维度从原来的  $m$  个维度 (分量), 简化成  $t$  个维度 (分量)。实际上利用主成分分析的累计贡献率可以进一步降维, 计算下式, 求各通道  $C_k > 0.995$  的最小  $k$  值。

$$C_k = \frac{\sum_{i=1}^k \sigma_i}{\sum_{i=1}^t \sigma_i}. \quad (6)$$

$C_1$  往往很大, 如 EIZO 显示器各单通道  $C_1$  所占的比重都大于 0.99, 即第一个基向量就能较好地再现原来光谱信息, 这也是本文导出逆向模型的基础。设每个通道对应的最小  $k$  值分别表示为  $p_R, p_G, p_B$ , 分别取对应前  $p_R, p_G, p_B$  个正交向量构成如下矩阵:

$$\begin{cases} U_R = [u_{1,R} & u_{2,R} & \cdots & u_{p_R,R}] \\ U_G = [u_{1,G} & u_{2,G} & \cdots & u_{p_G,G}] \\ U_B = [u_{1,B} & u_{2,B} & \cdots & u_{p_B,B}] \end{cases}. \quad (7)$$

则单通道光谱辐亮度可近似表示为

$$\begin{cases} f_r(\lambda, R) = \alpha_{1,R} u_{1,R} + \alpha_{2,R} u_{2,R} + \cdots + \\ \alpha_{p_R,R} u_{p_R,R} = U_R \alpha_R \\ f_g(\lambda, G) = \alpha_{1,G} u_{1,G} + \alpha_{2,G} u_{2,G} + \cdots + \\ \alpha_{p_G,G} u_{p_G,G} = U_G \alpha_G \\ f_b(\lambda, B) = \alpha_{1,B} u_{1,B} + \alpha_{2,B} u_{2,B} + \cdots + \\ \alpha_{p_B,B} u_{p_B,B} = U_B \alpha_B \end{cases}, \quad (8)$$

其中,

$$\alpha_R = \begin{bmatrix} \alpha_{1,R} \\ \alpha_{2,R} \\ \vdots \\ \alpha_{p_R,R} \end{bmatrix}, \alpha_G = \begin{bmatrix} \alpha_{1,G} \\ \alpha_{2,G} \\ \vdots \\ \alpha_{p_G,G} \end{bmatrix}, \alpha_B = \begin{bmatrix} \alpha_{1,B} \\ \alpha_{2,B} \\ \vdots \\ \alpha_{p_B,B} \end{bmatrix}.$$

(9)

正向模型通过训练数据可以建立单通道驱动值 (如  $R$  通道的 18 个驱动值) 和对应正交基下坐标 (如 18 组  $\alpha_R$ ) 的查找表, 进而通过线性插值获得任意驱动值下的前几个基下坐标, 利用 (8) 式求得任意驱动值对应的单通道预测光谱, 最后利用三通道叠加进而得到任意驱动值组合对应的预测光谱辐亮度。可以表示为

$$f(\lambda, R, G, B) = f_r(\lambda, R) + f_g(\lambda, G) + f_b(\lambda, B) + f_0(\lambda), \quad (10)$$

式中:  $f_r(\lambda, R), f_g(\lambda, G), f_b(\lambda, B)$  为预测单通道黑点校正后的光谱;  $f_0(\lambda)$  为黑点光谱辐亮度。

需要说明的是, 建立查找表中  $\alpha_R$  的第 1 个分量是单调的  $\alpha_{1,R}$ , 而且靠第 1 个基向量的符号选取, 可保证  $\alpha_{1,R}$  是单调递增的。同样,  $\alpha_G$  和  $\alpha_B$  的第一个分量也都是单调递增的。这对于建立逆向模型非常重要。

对于逆向模型而言, 针对给定光谱  $f(\lambda)$ , 要确定对应的显示器驱动值  $R, G, B$ 。为此, 令  $f(\lambda) = f(\lambda, R, G, B)$ , 利用 (7)~(10) 式, 得到

$$f(\lambda, R, G, B) - f_0(\lambda) = U_V \alpha, \quad (11)$$

其中,

$$U_V = [U_R, U_G, U_B], \alpha = \begin{pmatrix} \alpha_R \\ \alpha_G \\ \alpha_B \end{pmatrix}. \quad (12)$$

注意, (11) 式中左侧向量  $f(\lambda, R, G, B) - f_0(\lambda)$  已知, 而右侧系数矩阵  $U_V$  也已知, 因此未知向量  $\alpha$  可通过最小二乘法获得, 即

$$\alpha = (U_V^T * U_V)^{-1} \{U_V^T * [f(\lambda, R, G, B) - f_0(\lambda)]\}. \quad (13)$$

当  $\alpha$  已知时, 根据 (12) 式  $\alpha_{1,R}, \alpha_{1,G}, \alpha_{1,B}$  也已

知。利用已知的基下坐标查找表,即可通过反插值获得对应驱动值  $R$ 、 $G$ 、 $B$ 。

当获得驱动值  $R$ 、 $G$ 、 $B$  后,即可利用正向模型预测光谱  $f_p(\lambda)$ 。 $f(\lambda)$  和  $f_p(\lambda)$  即可度量逆向模型的精度。

### 3 实验结果与讨论

#### 3.1 装置及条件

本文对四台液晶显示器进行测量,测量实验前要充分预热显示器和测量仪器,采集显示色的光谱辐亮度数据,波长间隔为 1 nm,波长范围为 380~780 nm。

1) 液晶显示器 4 台:专业液晶显示器 EIZO ColorEdgeCG277、NEC PA271Q、BENQ PG2401,以及普通液晶显示器 Lenovo LS2224。

2) 测量仪器:KONICA MINOLTA 公司的分光辐射亮度计(CS-2000)。

3) 测量条件:显示器色温设置为 6500 K,暗室测量,色块由 MATLAB 生成,全屏显示。测量距离为 60 cm,测量前 EIZO 和 BENQ 显示器预热 80 min,NEC 和 Lenovo 预热 90 min,CS2000 预热 80 min,每次测量三次取平均值作为显示色样测量结果。

这说明,根据参考文献[10,13],本文选择的测量距离为 60 cm。测量仪器和显示器的预热时间是根据实验获得,即首先同时打开显示器和测量仪器,让显示器显示白点( $R=G=B=255$ ),间隔 2 min 测量一次,共计 2 h,分析获得稳定测量数据所需时间,如 EIZO 显示器为 80 min。关闭显示器和测量仪器,等过段时间后通过再次实验,让显示器预热 80 min 后,再打开测量仪器测量,大约 40 min 后测量数据稳定,则测量仪器需要预热时间为 40 min, EIZO 显示器需要预热 80 min;同理获得其他显示器预热时间,如 BENQ 显示器预热时间为 80 min, NEC 和 Lenovo 预热时间为 90 min。

#### 3.2 数据采集

1) 训练样本:以 15 为间隔分别测量三通道纯色和灰阶共 69 个光谱辐亮度数据。只有三通道纯色数据用作模型训练,而灰阶数据用于检测显示器通道独立性。

2) 测试样本:各通道分别取值为 4、14、52、90、128、166、204、242,  $8 \times 8 \times 8$  共 512 颜色样本的光谱数据作为测试样本。

#### 3.3 通道独立性检验

图 1 是 EIZO 显示器驱动值分别取 60、135、195、255 的灰阶 ( $R=G=B$ ) 测量光谱和纯色叠加

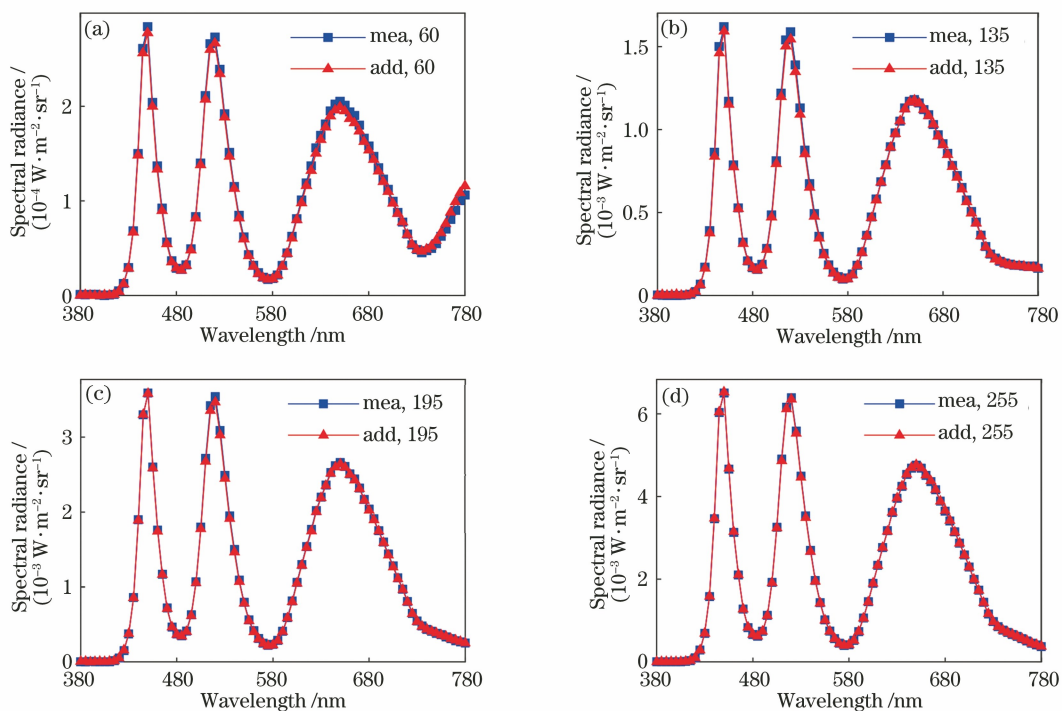


图 1 EIZO 显示器灰阶测量光谱和纯色加和光谱比较。(a) 60;(b) 135;(c) 195;(d) 255

Fig. 1 Comparison of grayscale measurement spectrum and pure color addition spectrum of EIZO display.

(a) 60; (b) 135; (c) 195; (d) 255

光谱。由图 1 可知,在取不同的驱动值时,EIZO 显示器的通道独立性较好,即可用单通道加和光谱辐亮度近似表示任意驱动值的光谱辐亮度。可以看出,测量的光谱和叠加得到的光谱基本一致,这说明 EIZO 显示器具有很好的通道独立性。

有了叠加后的光谱和灰阶光谱,就能计算三刺激值,进而可采用 CIEDE2000 公式<sup>[21]</sup>计算色差,用来检验各台显示器的通道独立性。表 1 是实验所用的四台显示器的通道独立性检验结果。从表 1 色差计算结果可知,实验所用的四台显示器通道独立性较好,近似满足通道独立性假设。注意,Lenovo 是普通商用显示器,通道独立性要比专业显示器 NEC 和 BENQ 还要好,这是意想不到的。

表 1 四台显示器通道独立性检验

Table 1 Channel independence test of four displays

$\Delta E_{00}$	EIZO	NEC	BENQ	Lenovo
Ave	0.81	1.29	1.36	0.87
Max	1.46	2.32	2.14	1.69

### 3.4 色品恒定性检验

首先对四台显示器的单通道训练光谱做黑点光谱校正,计算出相应的色品坐标,及平均色品坐标,并以平均值色品坐标作为基准色品坐标;然后再分别计算单通道各个色品坐标到基准色品坐标的欧氏距离,并以所有距离的平均值(记为  $D_p$ )用于表示单通道色品恒定性指标,其值越小表示色品恒定性越好。表 2 列出了四台显示器各通道的色品恒定性指标值,可以看出,EIZO 显示器色品恒定性最好,NEC 显示器的色品恒定性也较好,BENQ 和 Lenovo 的色品恒定性较差。

表 2 同时列出了各显示器不同通道本文方法所需的基向量个数( $N_b$ )、第一个基向量的贡献率( $C_1$ ),以及所需总基向量个数的贡献率( $C_{Nb}$ )。可以看出,对于 EIZO 和 NEC 的每个通道,以及 BENQ 显示器的 R、G 通道的第一个基向量的贡献率都超过 0.99,而 BENQ 显示器的 B 通道和 Lenovo 显示器的所有通道的第一个基向量的贡献率都不足 0.99。另外,四台显示器中 Lenovo 显示器的 G 通道色品恒定性( $3.66 \times 10^{-3}$ )最差,所需基向量个数为 4;NEC 显示器的 G 通道色品恒定指标值为  $2.20 \times 10^{-3}$ ,所需基向量个数为 3;BENQ 显示器的 G 通道色品恒定性指标值为  $8.87 \times 10^{-4}$ ,所需基向量个数为 4,因此所需基向量个数与色品恒定性关联不大。

表 2 四台显示器的色品恒定性指标及所需基向量个数

Table 2 Channel chromaticity constancy and number of basis vectors needed of four displays

Display	Channel	$D_p$	$N_b$	$C_1$	$C_{Nb}$
EIZO	R	$9.57 \times 10^{-4}$	3	0.9934	0.9950
	G	$7.49 \times 10^{-4}$	4	0.9932	0.9956
	B	$1.65 \times 10^{-3}$	4	0.9905	0.9954
NEC	R	$4.43 \times 10^{-3}$	3	0.9931	0.9956
	G	$2.20 \times 10^{-3}$	3	0.9936	0.9952
BENQ	B	$1.83 \times 10^{-3}$	3	0.9927	0.9952
	R	$6.43 \times 10^{-3}$	4	0.9924	0.9953
	G	$8.87 \times 10^{-4}$	4	0.9932	0.9957
Lenovo	B	$3.69 \times 10^{-3}$	4	0.9899	0.9951
	R	$4.83 \times 10^{-3}$	5	0.9848	0.9954
	G	$3.66 \times 10^{-3}$	4	0.9828	0.9957
	B	$1.80 \times 10^{-3}$	3	0.9883	0.9951

### 3.5 模型结果分析

经过正向模型训练,将 512 个测试样本代入到模型中可以得到预测的光谱辐亮度,由测量光谱和预测光谱能计算出光谱均方根误差,计算公式为

$$E_{\text{SMSRE}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (\mathbf{S}_{ti} - \mathbf{S}_{pi})^2}{m}}, \quad (14)$$

式中: $\mathbf{S}_{ti}$  和  $\mathbf{S}_{pi}$  分别表示测量和预测光谱数据, $i$  为光谱波长编号,波长范围为 380~780 nm,间隔为 1 nm。通过计算所有测试样本的光谱均方根误差,就能求得所有测试样本的平均和最大光谱均方根误差。同样考虑到模型预测的色度精度,采用 CIEDE2000 色差公式计算色差,计算三刺激值时采用 CIE1964 色匹配函数。

对于逆向模型的评价,正像前面提到的,通过测试数据中的每个测量光谱辐亮度曲线  $f(\lambda)$ ,预测出驱动值 RGB,借助于预测的 RGB 通过正向模型来预测光谱辐亮度曲线  $f_p(\lambda)$ ,通过  $f(\lambda)$  和  $f_p(\lambda)$  便可计算出色差度量逆向模型的精度。由于  $f(\lambda)$  是测量光谱辐亮度曲线,其对应驱动值 RGB 是已知的,因此对应驱动值 RGB 和逆向模型预测的驱动值 RGB 之差的 2 范数,记为  $\Delta E_{\text{RGB}}$ ,也可用来度量逆向模型。

本文方法简单记为 SVD 方法,在检测本文方法的表现的同时,还分别与 SRPM、SRPPM,以及纯色训练的 GOG 和 PLCC 模型进行比较。对于 SRPM

模型<sup>[11-12]</sup>,没有给出逆向模型,SRPPM 模型<sup>[13]</sup>是对 SRPM 模型的一种改进,同时也给出了逆向模型<sup>[14]</sup>。

表 3 是不同特征化模型预测精度比较。加黑的数值对应的方法表现最好,加下划线的数值对应的方法表现排第二位。

对于正向模型,有 4 个指标,分别是色差平均值和最大值、光谱均方根误差平均和最大值。由表 3 可知,对于 EIZO 和 Lenovo 显示器来说,采用 SVD 方法的正向模型平均色差较小,光谱精度也较高,是所有方法中表现最好的,这是因为二者的通道独立性较好且 SVD 方法能更准确预测单通道光谱。对于 NEC 显示器,采用 SVD 方法正向模型平均色差最小,PLCC 方法预测光谱精度最好,综合来看,

PLCC 和 SVD 方法要好于其他方法。对于 BENQ 显示器,PLCC 模型在 4 个指标中,3 个表现最好,1 个表现排第二位,而 SVD 模型 1 个指标表现最好,其余 3 个指标表排第二位,综合来看,PLCC 方法表现最好,SVD 方法表现排第二位。综合 4 台显示器来看,本文的 SVD 方法表现最好,表现排第二位的是 PLCC 方法。

对于逆向模型,也有 4 个评价指标。对于 EIZO、NEC、BENQ 显示器,SVD 方法较 GOG 和 PLCC 模型差,但优于 SRPPM 模型,且相比于 SRPPM 模型实现简单。但对于 Lenovo 显示器采用 SVD 方法的逆向模型表现最好,其次是 PLCC 模型。

总体而言,SVD 模型是一种精度较高的颜色特征化模型。

表 3 不同特征化模型预测精度比较

Table 3 Comparison of prediction accuracy of different characterization models

Display	Model	Forward model				Inverse model			
		$\Delta E_{00}$		$E_{SMSRE}/10^{-4}$		$\Delta E_{00}$		$\Delta E_{RGB}$	
		Ave	Max	Ave	Max	Ave	Max	Ave	Max
EIZO	SRPM	0.42	1.69	<u>0.1041</u>	0.2582				
	SRPPM	<b>0.39</b>	<b>1.38</b>	0.1042	0.2582	0.92	3.65	14.21	42.97
	GOG	0.49	1.85	0.1139	<u>0.2579</u>	<u>0.02</u>	<u>0.18</u>	<u>3.64</u>	<b>15.59</b>
	PLCC	0.47	1.79	0.1077	0.2605	<b>0.01</b>	<b>0.13</b>	3.68	<u>16.55</u>
	SVD	<b>0.39</b>	<u>1.39</u>	<b>0.0960</b>	<b>0.2546</b>	0.09	0.68	<b>2.95</b>	21.94
NEC	SRPM	0.68	3.98	0.1767	0.5961				
	SRPPM	<u>0.61</u>	2.21	0.1780	0.6015	1.48	5.75	16.44	44.98
	GOG	0.64	<b>2.09</b>	<u>0.1749</u>	0.5948	<b>0.01</b>	0.48	<b>4.97</b>	<b>14.68</b>
	PLCC	0.62	2.21	<b>0.1748</b>	<b>0.5868</b>	<b>0.01</b>	<b>0.10</b>	<u>5.53</u>	<u>15.15</u>
	SVD	<b>0.60</b>	<u>2.17</u>	0.1771	<u>0.5910</u>	0.18	<u>0.42</u>	6.68	17.80
BENQ	SRPM	0.86	5.84	0.1768	0.6478				
	SRPPM	0.64	2.36	0.1408	0.4858	1.32	3.97	14.81	46.82
	GOG	0.75	4.22	0.2039	0.7515	<u>0.04</u>	<u>1.25</u>	<b>5.44</b>	<u>20.88</u>
	PLCC	<b>0.57</b>	<b>2.07</b>	<u>0.1329</u>	<b>0.4726</b>	<b>0.02</b>	<b>0.65</b>	<u>6.01</u>	<b>20.61</b>
	SVD	<u>0.61</u>	<u>2.26</u>	<b>0.1297</b>	<u>0.4757</u>	0.13	1.57	7.08	22.26
Lenovo	SRPM	0.95	4.56	0.1913	0.6287				
	SRPPM	<u>0.71</u>	2.31	0.1794	0.5682	1.80	6.17	24.83	83.08
	GOG	0.83	1.95	0.2148	0.7640	<u>0.10</u>	0.97	8.05	28.61
	PLCC	0.73	<b>1.76</b>	<u>0.1718</u>	<u>0.4875</u>	<u>0.10</u>	<u>0.96</u>	<u>7.39</u>	<u>25.24</u>
	SVD	<b>0.65</b>	<u>1.94</u>	<b>0.1612</b>	<b>0.4869</b>	<b>0.06</b>	<b>0.20</b>	<b>2.99</b>	<b>9.23</b>

## 4 结 论

本文提出对单通道光谱辐亮度矩阵采用奇异值分解,进而获得一组基向量,通过前几个奇异值在所有奇异值中的比重确定单通道取对应基向量的个数,进而将单通道光谱辐亮度表示为几个基向量和基下坐标乘积和表示,建立驱动值对应基下坐标的查找表进而建立模型。逆向模型为先求基下坐标,进而获得驱动值。模型简单便于实现,只需液晶显示器满足通道独立性即可,测试结果表明,就正向模型而言,本文方法要好于传统的 GOG 和 PLCC 模型,也优于最近提出的 SRPM<sup>[11-12]</sup> 和 SRPPM 模型<sup>[13]</sup>。

对于逆向模型,尽管本文方法要优于 SRPPM 的逆向模型<sup>[14]</sup>,但精度还不如传统的 GOG 和 PLCC 模型,如何改进本文方法的逆向预测精度还需要进一步研究。事实上,可根据以逆向模型预测的  $R$ 、 $G$ 、 $B$  值为中心,确定相应的立方体或以半径为  $r$  的球体,然后在所确定的体内,将所有  $R$ 、 $G$ 、 $B$  组合代入正向模型中,选取色差或光谱均方根误差的最小值对应的 RGB 组合作为逆向模型预测优化值,这方面的研究正在进行中。

## 参 考 文 献

- [1] Berns R S. Methods for characterizing CRT displays [J]. *Displays*, 1996, 16(4): 173-182.
- [2] Post D L, Calhoun C S. An evaluation of methods for producing desired colors on CRT monitors[J]. *Color Research & Application*, 1989, 14(4): 172-186.
- [3] Post D L, Calhoun C S. Further evaluation of methods for producing desired colors on CRT monitors[J]. *Color Research & Application*, 2000, 25(2): 90-104.
- [4] Fairchild M D, Wyble D R. Colorimetric characterization of the Apple Studio Display (flat panel LCD) [J]. Rochester Institute of Technology, 1999.
- [5] Day E A, Taplin L, Berns R S. Colorimetric characterization of a computer-controlled liquid crystal display [J]. *Color Research & Application*, 2004, 29(5): 365-373.
- [6] Wen S, Wu R. Two-primary crosstalk model for characterizing liquid crystal displays [J]. *Color Research & Application*, 2006, 31(2): 102-108.
- [7] Hung P C. Colorimetric calibration in electronic imaging devices using a look-up-table model and interpolations [J]. *Journal of Electronic Imaging*, 1993, 2(1): 53-61.
- [8] Gong R, Xu H S, Zhang X D, et al. Sub-space compensation model for accurate colorimetric characterization of liquid crystal displays [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(4): 0433001.  
宫睿, 徐海松, 张显斗, 等. 液晶显示器色度特征化的分空间补偿模型 [J]. *光学学报*, 2011, 31(4): 0433001.
- [9] Tamura N, Tsumura N, Miyake Y. Masking model for accurate colorimetric characterization of LCD [J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2003, 11(2): 333.
- [10] Zhang J Q, Cai F, Liu Z, et al. A composite model for accurate colorimetric characterization of liquid crystal displays [J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2016, 24(10): 600-610.
- [11] Liu H X, Zheng L, Dai L, et al. Color characterization of LCD based on spectral additive properties [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(12): 1233002.  
刘浩学, 郑岚, 代黎, 等. 基于光谱叠加特性的液晶显示器颜色特征化方法研究 [J]. *光学学报*, 2011, 31(12): 1233002.
- [12] Liu H X, Cui G H, Huang M, et al. Colorimetric characterization of LCD based on wavelength partition spectral model [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2013, 33(10): 2751-2757.  
刘浩学, 崔桂华, 黄敏, 等. 按波长分区的 LCD 颜色特征化模型 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2013, 33(10): 2751-2757.
- [13] Tian Q H, Liu Z, Yu H Q, et al. The spectral radiance piecewise partition model for characterizing liquid crystal displays [J]. *Displays*, 2015, 39: 133-138.
- [14] Zhang J Q, Cai F, Shen X Y, et al. Backward spectral characterization of liquid crystal display based on forward spectral characterization [J]. *Journal of Spectroscopy*, 2016, 2016: 1-8.
- [15] Tzeng D Y, Berns R S. A review of principal component analysis and its applications to color technology [J]. *Color Research and Application*, 2005, 30(2): 84-98.
- [16] Wang Q J, Tian Q H. A spectral characterization model of liquid crystal display (LCD) based on RBF neural network [J]. *Packaging Engineering*, 2015, 36(17): 95-99.  
王瞿建, 田全慧. 一种基于子空间划分的 LCD 显示器光谱特征化模型 [J]. *包装工程*, 2015, 36(17): 95-99.
- [17] Ma X C, Wang X H. The method of LCD display color spectrum inverse characterization [J]. *Packaging*

- Engineering, 2017, 38(7): 188-190.
- 麻祥才, 王晓红. 一种 LCD 显示器颜色光谱反向特征化方法[J]. 包装工程, 2017, 38(7): 188-190.
- [18] Yu H Q, Liu Z, Tian Q H. A spectral characterization model of liquid crystal display based on RBF neural network[J]. Packaging Engineering, 2015, 36(19): 130-134.
- 于海琦, 刘真, 田全慧. 一种基于 RBF 神经网络的 LCD 显示器光谱特征化模型[J]. 包装工程, 2015, 36(19): 130-134.
- [19] Ma X C, Xiao Y, Qian Z W, et al. Spectral characterization method for LCD monitor based on human perception[J]. Packaging Engineering, 2020, 41(5): 223-227.
- 麻祥才, 肖颖, 钱志伟, 等. 基于视觉特性的 LCD 显示器光谱特征化方法[J]. 包装工程, 2020, 41(5): 223-227.
- [20] Zhang X H, Li X P, Gao C, et al. Spectral characterization for liquid crystal display (LCD)[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2020, 40(8): 2392-2396.
- 张肖辉, 李雪萍, 高程, 等. 液晶显示器(LCD)光谱特征化[J]. 光谱学与光谱分析, 2020, 40(8): 2392-2396.
- [21] 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.