

液晶显示器(LCD)光谱特征化

张肖辉¹, 李雪萍², 高程^{1,2}, 王智峰^{1,2}, 徐杨², 李长军^{1,2*}

1. 辽宁科技大学电子与信息工程学院, 辽宁 鞍山 114051

2. 辽宁科技大学计算机与软件工程学院, 辽宁 鞍山 114051

摘要 显示器特征化是颜色管理的关键问题之一, 早期人们关注的是建立显示器驱动信号 RGB 和色度值 XYZ 之间的相互转换关系, 文献中讨论最多的是 GOG 和 PLCC 模型。最近, 为了实现同色同谱再现, 显示器的光谱特征化成为研究的热点, 而且显示器的光谱特征化在多光谱图像的再现有着重要应用。提出采用常用的 GOG 和 PLCC 模型进行光谱特征化。虽然 GOG 和 PLCC 模型是常用的显示器特征化模型, 但文献还没有用这两个模型进行光谱特征化的讨论。首先基于通道独立性和各通道色品坐标恒定性的假设证明了 GOG 和 PLCC 模型均可用于显示器光谱特征化。然后基于目前常采用的专业显示器 EIZO CG277 和 BENQ PG2401 进行了比较研究, 同时也分别探讨了采用纯色和灰阶数据进行训练 GOG 和 PLCC 模型。比较结果表明, 采用灰阶数据训练的 GOG 和 PLCC 模型分别好于采用纯色数据训练的 GOG 和 PLCC 模型; 不论从正向还是从逆向的角度考虑采用灰阶训练的 PLCC 模型的精度要比 SRPPM 和 GOG 模型高, 而且 PLCC 模型的逆向远比 SRPPM 的逆向简单。因此建议采用灰阶数据训练的 PLCC 模型对液晶显示器进行光谱特征化。

关键词 色品恒定性; 最大值光谱辐亮度; 液晶显示器; 灰阶数据; 光谱特征化

中图分类号: O432.3 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2020)08-2392-05

引言

显示器特征化方法可以分为两类, 一类是建立显示器驱动值与色度值 XYZ 或 Lab 的特征化模型, 常见的有 GOG 模型^[1-2]、色品坐标恒定的分段线性插值^[3](PLCC)模型, 二者都是建立在通道独立性和色品坐标恒定的假设下, 区别在于 GOG 模型用解析函数表示归一化亮度, PLCC 模型用分段线性插值表示归一化亮度。色品坐标变化的分段线性插值^[4](PLVC)模型考虑了色品坐标随驱动值的变化而变化提高了精度、S 曲线模型^[5]提出一种新的 S 型函数模拟各通道的阶调复现曲线、分空间补偿模型^[6]在掩模模型^[7]的基础上把 RGB 空间分成 8 个子空间建模和补偿三刺激值预测差值提高了计算精度, 这些模型往往需要更多的测量, 且反向计算困难。第二类是对显示色的 RGB 和光谱辐亮度进行建模, 优点是能达到较高精度且能很好防止同色异谱现象, 主要有刘浩学等^[8]提出的基于光谱叠加性的光谱辐射分区模型(记为 SRPM), 以及 Tian 等在 SRPM 的基础上提出的光谱辐射

亮度分段分区模型^[9](记为 SRPPM)。尽管 SRPPM 模型较 SRPM 在(正向)预测精度上有所提高, 但都不可逆。Zhang 等在 SRPPM 模型基础上给出了一种反向模型^[10], 根据峰值波长上的光谱辐亮度值反解 RGB 值, 作为逆向模型的预测初值, 之后进行循环修正选出合适的 RGB 值作为逆向模型预测值。神经网络模型^[11-13]也被用于建立光谱特征化模型, 但这类模型往往依赖于训练数据, 需要大量训练样本且用时较长。

1 通道独立性和色品恒定性分析

显示器的通道独立性可以通过基色叠加关系来验证, 即满足式(1)

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

式中 $c(d_r, d_g, d_b)$ 表示驱动值为 d_r, d_g, d_b 时测量的三刺激值(XYZ)。 $c(d_r, 0, 0), c(0, d_g, 0), c(0, 0, d_b)$ 分别为三原色三刺激值, $c(0, 0, 0)$ 为黑点的三刺激值。以 17 为间隔

收稿日期: 2019-07-19, 修订日期: 2019-12-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(61575090, 61775169)资助

作者简介: 张肖辉, 1995 年生, 辽宁科技大学电子与信息工程学院硕士研究生 e-mail: 2930031511@qq.com

* 通讯联系人 e-mail: cjliust@sina.com

分别测量三通道纯色和灰阶共 61 个光谱辐亮度数据, 通过计算三刺激值, 以 CIEDE2000^[14] 公式计算色差, EIZO 显示器平均色差为 0.80, BENQ 显示器平均色差为 1.30, 二者的平均色差都不大, 通道独立性较好。

显示器的色品恒定性是指当单通道的驱动值改变时, 对应的色品坐标不变。我们测量得到的光谱辐亮度为各通道和黑点的叠加光谱, 考虑黑点的影响, 需要进行去除黑点处

理。两台显示器三通道以 17 为间隔分别取值, 其余通道驱动值设为 0, 将三通道测量光谱减去黑点光谱可得到黑点矫正后的光谱, 进而求得三刺激值和色品坐标。图 1 是两台显示器 EIZO(a)和 BENQ(b)三通道测量光谱经过黑点矫正后在 CIE1964 色品图上的色品坐标, 可见实验所用的两台显示器色品恒定性较好。

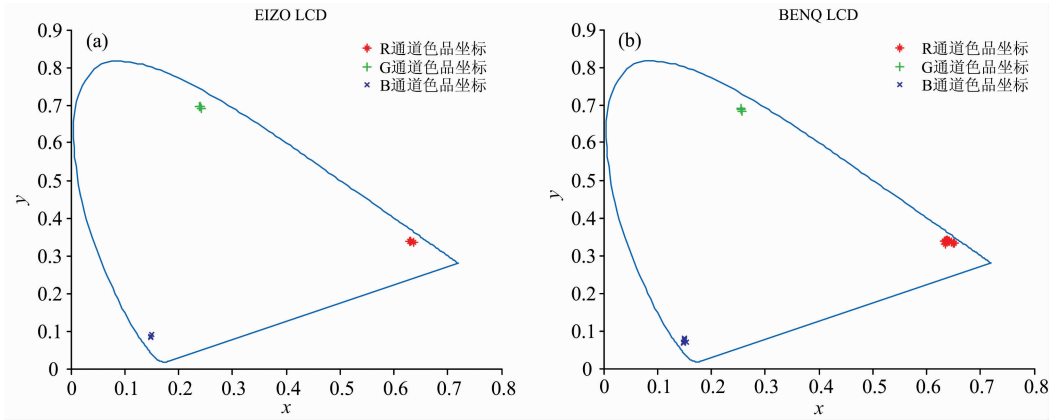


图 1 两台显示器三通道测量光谱经过黑点矫正后在 CIE1964 色品图上的色品坐标
 Fig. 1 The chromaticity coordinates of the three channels measurement spectrum of the two displays after the black correction on the CIE1964 chromaticity diagram

2 基于通道独立性和色品恒定性假设的光谱特征化模型

基于通道独立性, 任意驱动值 RGB 组合发出的光谱辐亮度可以表示为

$$f(\lambda, R, G, B) = f_r(\lambda, R) + f_g(\lambda, G) + f_b(\lambda, B) + f_0(\lambda) \quad (2)$$

式(2)中, $f(\lambda, R, G, B)$ 表示驱动值为 R, G, B 时显示器的光谱辐亮度, $f_r(\lambda, R)$, $f_g(\lambda, G)$, $f_b(\lambda, B)$ 表示分别由 R, G, B 单通道产生的光谱辐亮度(不包含黑点光谱辐亮度), $f_0(\lambda)$ 表示 R=G=B=0 时的光谱辐亮度, 即为黑点的光谱辐亮度。若能求得单通道的光谱辐亮度则可通过三通道光谱辐亮度加和再加上黑点的光谱辐亮度即可求得任意 RGB 组合的光谱辐亮度。

基于各通道色品恒定性假设, 即各通道之间的光谱辐亮度曲线具有相同的形状, 之间的差别为相差一个倍数, 即满足式(3)

$$\begin{aligned} f_r(\lambda, R) &= a_r(R)S_r(\lambda) \\ f_g(\lambda, G) &= a_g(G)S_g(\lambda) \\ f_b(\lambda, B) &= a_b(B)S_b(\lambda) \end{aligned} \quad (3)$$

式中 $a_r(R)$, $a_g(G)$, $a_b(B)$ 为归一化亮度也称为阶调复现曲线, $S_r(\lambda)$, $S_g(\lambda)$, $S_b(\lambda)$ 为单通道取最大值时黑点矫正后光谱辐亮度, 可由单通道取最大驱动值时测量得到的光谱辐亮度减去黑点的光谱辐亮度得到(如 $S_r(\lambda) = f(\lambda, 255, 0, 0) - f_0(\lambda)$)。因此单通道任意驱动值的光谱辐亮度可以通过归一化亮度与单通道最大值光谱辐亮度乘积得到。式(2)可转换

为

$$a_r(R)S_r(\lambda) + a_g(G)S_g(\lambda) + a_b(B)S_b(\lambda) = f(\lambda, R, G, B) - f_0(\lambda) \quad (4)$$

由光谱辐亮度可求得三刺激值, 则式(4)可以转换为

$$\begin{bmatrix} a_r(R) \\ a_g(G) \\ a_b(B) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_r & X_g & X_b \\ Y_r & Y_g & Y_b \\ Z_r & Z_g & Z_b \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

式(5)中, $X_r, Y_r, Z_r; X_g, Y_g, Z_g; X_b, Y_b, Z_b; X_0, Y_0, Z_0$ 分别由 $S_r(\lambda), S_g(\lambda), S_b(\lambda)$ 和 $f_0(\lambda)$ 计算得到。X, Y, Z 是对应驱动值 R, G, B 经由测量光谱 $f(\lambda, R, G, B)$ 所计算的三刺激值。

对于 GOG 模型[1, 2], $a_r(R)$, $a_g(G)$, $a_b(B)$ 通过下面解析函数给出

$$\begin{aligned} a_r(R) &= \left(a_r \frac{R}{R_{\max}} + (1 - a_r) \right)^{c_r} \\ a_g(G) &= \left(a_g \frac{G}{G_{\max}} + (1 - a_g) \right)^{c_g} \\ a_b(B) &= \left(a_b \frac{B}{B_{\max}} + (1 - a_b) \right)^{c_b} \end{aligned} \quad (6)$$

式(6)中, $R_{\max}, G_{\max}, B_{\max}$ 分别表示 R, G, B 通道最大驱动值, $a_r, c_r; a_g, c_g; a_b, c_b$ 分别为显示器三通道的增益和伽马, 可以通过训练数据优化得到。

对于 PLCC 模型[3, 4]中的 $a_r(R)$, $a_g(G)$, $a_b(B)$ 可通过建立亮度查找表和分段线性插值得到, 如 R 通道用于建立查找表的训练数据的亮度 $a_r(R_k)$ 可以通过取值 $R_1 < R_2 < \dots < R_n$ 同时令 G=B=0 用式(5)得到。当 R 与插值端点 R_i 和 R_{i+1} 相等时, 相应亮度分别为 $a_r(R_i)$ 和 $a_r(R_{i+1})$, 当在二者之间时插值公式如式(7)

$$a_r(R) = a_r(R_i) \frac{R_{i+1} - R}{R_{i+1} - R_i} + a_r(R_{i+1}) \frac{R - R_i}{R_{i+1} - R_i},$$

$$R_i < R < R_{i+1} \quad (7)$$

式(7)中, R_i 和 R_{i+1} 对应插值表中插值范围的端点对应的 R 值, $a_r(R_i)$ 和 $a_r(R_{i+1})$ 对应插值表中插值端点亮度, G 和 B 通道亮度插值公式类似。

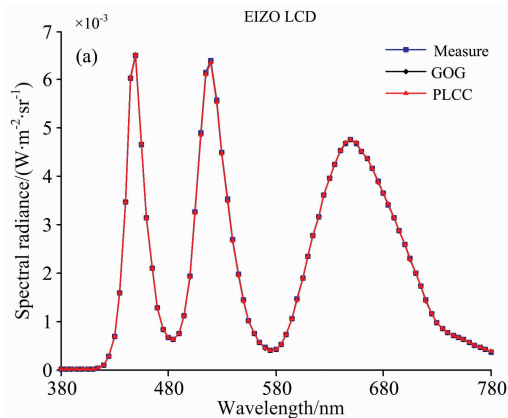
逆向模型, 由给定的光谱可求得三刺激值, 通过式(5)先求解归一化亮度 $a_r(R)$, $a_g(G)$, $a_b(B)$, GOG 模型通过解析函数[见式(6)]的逆变换可求得驱动值, PLCC 模型通过反插值获得驱动值。

3 实验结果与讨论

3.1 装置及条件

本文对两台专业显示器进行测量, 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, 用于模型的建立和测试。

(1)液晶显示器 2 台: 高端专业液晶显示器 Eizo: EIZO ColorEdgeCG277, 屏幕尺寸 27 inch(1 inch=25.4 mm), 分辨率 2 560 pixel×1 440 pixel。专业中端显示器 BenQ: BEN-QPG2401, 屏幕尺寸 24 inch, 分辨率 1 920 pixel×1 200



pixel。

(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 6 500 K, 暗室测量, 色块由 MATLAB 生成, 全屏显示, 测量距离 60 cm, 测量前显示器和 CS-2000 都预热 80 min, 每次测量三次取平均值作为显示色样测量结果。

3.2 数据采集

(1)训练样本: 以 17 为间隔分别测量三通道纯色和灰阶共 61 个光谱辐亮度数据, 用于通道独立性和色品恒定性分析, 以及模型的建立(训练)。

(2)测试样本: 考虑到模型可能在 R, G, B 取值较小时出现较大预测误差, 每个通道分别取值为 4, 14, 52, 90, 128, 166, 204, 242, $8 \times 8 \times 8$ 共 512 颜色样本的光谱辐亮度数据作为测试样本。

3.3 模型结果分析

图 2 所示的是两台显示器 EIZO(a) 和 BENQ(b) 测量得到的白场光谱辐亮度曲线(Measure)与 GOG 模型和 PLCC 模型预测光谱辐亮度曲线的比较, 从图中可以看出预测值与实际测量值结果十分接近。

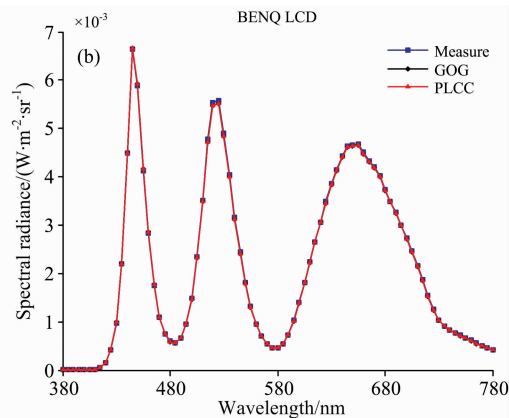


图 2 两台显示器白场的测量和预测光谱辐亮度曲线的比较

Fig. 2 Comparison between measured and predicted spectral radiance curves with $R=G=B=255$ for two displays

对于正向模型分别计算色差和光谱均方根误差(SMSRE)。光谱均方根误差计算公式为

$$\text{SMSRE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\text{Spe}_{mi} - \text{Spe}_{pi})^2}{n}} \quad (8)$$

式(8)中, Spe_{mi} 和 Spe_{pi} 分别表示测量和预测光谱辐亮度, i 表示光谱波长对应标号, 波长范围为 380~780 nm, 间隔为 1 nm, $n=401$ 。本文采用 CIEDE2000 色差公式(ΔE_{00}), 光源光谱是测得的白场光谱辐亮度曲线, 配色函数为 CIE1964 颜色匹配函数。逆向模型采用计算色差和 ΔRGB (实际 RGB 和预测 RGB 差的 2 范数)来评价模型。对于测量数据, 我们有测量的光谱辐亮度和相应的 RGB 值。逆向模型首先由测量光谱辐亮度预测 RGB 值, 因此可计算出 ΔRGB 。再由预测 RGB 代入到正向模型中预测新的光谱辐亮度, 进而可计算

色差 ΔE_{00} 。同时分别与 SRPM 模型和 SRPPM 模型作比较, 表 1 是各种模型比较结果, 其中 SRPM 模型不能逆向只参与正向比较, 同时 GOG 和 PLCC 模型均采用纯色训练数据进行训练的。

从表 1 中可以看出对于正向模型, EIZO 显示器采用 SRPPM 模型的精度最高, 采用 SRPM 模型光谱均方差平均值最小。而 BENQ 显示器采用 PLCC 模型的精度最高, SRPPM 模型的光谱均方差最大值最小而 PLCC 模型的色差最大值最小, 说明了光谱均方差和色差不是直接对应的。对于逆向模型, GOG 和 PLCC 模型明显优于 SRPPM 模型, 色差和 ΔRGB 的平均值和最大值均小于 SRPPM 模型, 且不需要循环修正 RGB, 计算简单, 便于实现。

Post 等^[3-4]曾指出对于 CRT 显示器, GOG 和 PLCC 模型采用灰阶训练数据进行训练表现要好于采用纯色训练数据

进行训练。最近我们对液晶显示器(LCD)EIZO 和 BENQ 也进行了类似的比较,结果发现采用灰阶数据训练特征化精度更高。表 2 给出 GOG 和 PLCC 采用灰阶训练时的特征化结果,比较表 2 与表 1 的结果可以发现,采用灰阶训练时模型的预测精度相比于纯色训练能达到更高的精度,且所需训练样本个数较少。正向模型采用灰阶训练时,对于 EIZO 和

BENQ 显示器,PLCC 特征化精度要高于 SRPM 和 SRPPM 模型。对于逆向模型,两台显示器采用 GOG 和 PLCC 模型精度均优于采用 SRPPM 模型的精度。通过分析可知,采用灰阶数据训练的 PLCC 光谱特征化模型无论是正向模型还是逆向模型特征化精度都较高。

表 1 两台显示器各种模型正向与逆向结果比较

Table 1 Comparison of forward and inverse results of various models of two displays

Display	Model	Forward model				Inverse model			
		ΔE_{00}		SMSRE($\times 10^{-4}$)		ΔE_{00}		ΔRGB	
		Ave	Max	Ave	Max	Ave	Max	Ave	Max
EIZO	SRPM	0.42	1.50	0.103 1	0.259 1				
	SRPPM	0.37	1.29	0.103 2	0.261 3	0.89	3.65	13.91	40.87
	GOG	0.49	1.85	0.112 9	0.257 1	0.02	0.17	3.59	15.54
	PLCC	0.46	1.86	0.105 7	0.280 7	0.01	0.13	3.87	16.63
BENQ	SRPM	0.86	5.50	0.177 6	0.661 4				
	SRPPM	0.67	2.48	0.141 1	0.481 2	1.36	3.99	15.20	48.91
	GOG	0.75	4.01	0.204 5	0.755 1	0.04	1.19	5.49	20.92
	PLCC	0.56	1.96	0.139 4	0.512 1	0.02	0.65	6.25	20.78

表 2 灰阶数据训练时的模型结果

Table 2 Model results of grayscale data training

Display	Model	Forward model				Inverse model			
		ΔE_{00}		SMSRE($\times 10^{-4}$)		ΔE_{00}		ΔRGB	
		Ave	Max	Ave	Max	Ave	Max	Ave	Max
EIZO	GOG	0.34	1.37	0.086 0	0.228 5	0.02	0.21	3.48	17.39
	PLCC	0.32	1.07	0.094 4	0.261 1	0.01	0.13	3.43	16.50
BENQ	GOG	0.77	3.52	0.205 7	0.628 6	0.04	1.17	6.02	22.77
	PLCC	0.50	1.75	0.129 0	0.451 6	0.02	0.65	5.92	20.84

4 结 论

针对近似满足通道独立性和色品恒定性的 LCD 显示器,提出了采用常用的 GOG 和 PLCC 模型进行光谱特征化,通过归一化亮度值与单通道最大值光谱辐亮度的乘积作为对应驱动值的光谱辐亮度曲线,进而按照颜色相加原理可求得任

意 RGB 组合的光谱辐亮度。对于目前常用的专业显示器 EIZO 和 BENQ 光谱辐亮度进行测量,基本满足通道独立性和色品恒定性的假设。比较结果表明,采用灰阶训练的 PLCC 模型表现要好于 SRPPM^[10-11]、SRPM 模型^[8-9]的精度,且 PLCC 的逆向模型实现要远比 SRPPM 的逆向简单,不需要循环修改 RGB,预测精度高。本文的结果对多光谱图像再现具有重要应用。

References

[1] Berns R S, Motta R J, Gorzynski M E. Color Research and Application, 1993, 18(5): 299.
 [2] Berns R S. Displays, 1996, 16(4): 173.
 [3] Post D L, Calhoun C S. Color Research and Application, 1989, 14(4): 172.
 [4] Post D L, Calhoun C S. Color Research and Application, 2000, 25(2): 90.
 [5] WANG Yong, XU Hai-song(王 勇,徐海松). Journal of Image and Graphics(中国图象图形学报), 2007, 12(3): 491.
 [6] GONG Rui, XU Hai-song, ZHANG Xian-dou, et al(宫 睿,徐海松,张显斗,等). Acta Optica Sinica(光学学报), 2011, 31(4): 0433001.
 [7] Tamura N, Tsumura N, Miyake Y. Journal of the SID, 2003, 11(2): 333.
 [8] LIU Hao-xue, ZHENG Lan, DAI Li, et al(刘浩学,郑 岚,代 黎,等). Acta Optica Sinica(光学学报), 2011, 31(12): 1233002.
 [9] Tian Quanhui, Liu Zhen, Yu Haiqi, et al. Displays, 2015, 39: 133.

- [10] Zhang Jianqing, Cai Fang, Shen Xiaoying, et al. *Journal of Spectroscopy*, 2016, (2016): 8515672.
- [11] WANG Qu-jian, TIAN Quan-hui(王瞿建, 田全慧). *Packaging Engineering(包装工程)*, 2015, 36(17): 95.
- [12] YU Hai-qi, LIU Zhen, TIAN Quan-hui(于海琦, 刘真, 田全慧). *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays(液晶与显示)*, 2016, 31(2): 201.
- [13] MA Xiang-cai, WANG Xiao-hong(麻祥才, 王晓红). *Packaging Engineering(包装工程)*, 2017, 38(7): 188.
- [14] Luo M R, Cui G, Rigg B. *Color Research and Application*, 2001, 26(5): 340.

Spectral Characterization for Liquid Crystal Display (LCD)

ZHANG Xiao-hui¹, LI Xue-ping², GAO Cheng^{1, 2}, WANG Zhi-feng^{1, 2}, XU Yang², LI Chang-jun^{1, 2*}

1. School of Electronics and Information Engineering, University of Science and Technology Liaoning, Anshan 114051, China

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

Abstract Display characterization is one of the key-problems for colour management, and in the early stage focus is on developing transforms between the display digital driving signals RGB and the colorimetric values XYZ. The GOG and PLCC models were widely considered for this kind of applications in the literature. Recently, in order to reproduce colour match in spectral, display spectral characterization becomes a hot research topic, which has a very important application for the reproduction of multispectral images. In this paper, the well-known GOG and PLCC models are proposed for spectral characterization for the liquid crystal displays. Though the GOG and PLCC models have been widely considered for the display characterization application, it seems that there are no discussions for the display spectral characterization in the literature. It is first shown in this paper that the GOG and PLCC models can indeed be used for display spectral characterization under the assumptions of channel independence and chromaticity constancy for each channel. Performance of the proposed models together with SRPM and SRPPM models are considered using the two widely used professional displays: EIZO CG277 and BENQ PG2401 LCD. At the same time, comparisons are also considered for the GOG and PLCC models trained using the pure red/green/blue colour data and the grey scale (neutral point) data respectively. The comparison results have shown that both GOG and PLCC perform better trained using the grey scale (neutral point) data than those trained using the pure red/green/blue colour data. Furthermore, the comparison results have also shown that PLCC model trained using the grey scale (neutral-point) data performs better than the SRPPM and GOG models according to both forward and inverse models. Especially, the inverse of the PLCC model is much simpler than the inverse of the SRPPM model. Hence the PLCC model is recommended for the LCD spectral characterization.

Keywords Chromaticity constancy; Maximum spectral radiance; Liquid crystal display; Neutral-point data; Spectral characterization

(Received Jul. 19, 2019; accepted Dec. 6, 2019)

* Corresponding author