

一种基于子空间划分的LCD显示器光谱特征化模型

王瞿建¹, 田全慧²

(1. 上海理工大学, 上海 200093; 2. 上海出版印刷高等专科学校, 上海 200093)

摘要:目的 为实现LCD显示器的光谱特征化,提出一种基于子空间划分的BP神经网络结合PCA的光谱特征化模型。方法 对显示器色空间进行子空间划分,在各子空间中进行模型的训练与检测。结果 子空间划分后模型的色度和光谱精度,较未进行子空间划分的模型有明显提高,PCA在不影响模型精度的同时,降低了光谱维度,提高了算法的运行效率。结论 该模型是一种高精度显示器特征化模型。

关键词: BP神经网络; 子空间划分; 光谱特征化; LCD显示器; 主成分分析

中图分类号: TS801.3 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2015)17-0095-05

A Spectral Characterization Model of Liquid Crystal Display (LCD) Based on RBF Neural Network

WANG Qu-jian¹, TIAN Quan-hui²

(1. University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;
2. Shanghai Publishing and Printing College, Shanghai 200093, China)

ABSTRACT: The aim of this study was to propose a spectral characterization model using BP neural network based on subspace partition and PCA so as to achieve spectral characterization of LCD. Color space of monitor was divided into subspaces. Training and testing of the model was processed in subspaces. Experimental results showed that model parameter optimization in the subspace was beneficial to the improvement of colorimetric and spectral accuracy of the model after subspace division. PCA can improve the operating efficiency of algorithm and reduce spectral dimension under the circumstances of maintaining accuracy. The experiment implies that this is a high-precise characteristic model for display.

KEY WORDS: BP neural network; subspace partition; spectral characterization; LCD; principal component analysis

显示器在颜色控制及色彩管理等精度要求较高的领域得到了广泛应用。要实现对显示器高精度的颜色控制,必须对显示器进行颜色特征化。精准的颜色特征化模型建立,能够有效地避免颜色在转换过程中的丢失。目前,针对显示器的特征化模型主要分为2类:色度特征化^[1-6],直接建立RGB与XYZ或Lab色度值之间的转换模型,色度特征化模型只是针对特定的观察环境,观察环境改变模型亦需重新建立;建立驱动值与光谱辐亮度之间的转换模型,即显示器的光

谱特征化模型^[8-9]。光谱辐亮度是一种既与设备无关,又与光照无关的颜色表示方法,是对颜色描述最好的选择,能够最大程度地避免色度特征化方法中的同色异谱问题,根据光谱可以得到任意观察条件下的色度信息。常用的特征化模型主要有GOG模型^[3]、查找表^[4]、多项式回归^[5-6]、神经网络^[5,9-13]等,在基于色度特征化的模型中,GOG模型是一种针对CRT显示器的模型,用于LCD显示器误差较大;查找表模型需要大量的样本,查找效率较低;多项式回归模型虽然模型简

收稿日期: 2015-05-05

基金项目: 上海市研究生创新基金(JWCXSL1402)

作者简介: 王瞿建(1988—),男,江苏如东人,上海理工大学硕士生,主攻传媒经济与管理。

通讯作者: 田全慧(1974—),女,云南昆明人,上海出版印刷高等专科学校副教授,主要研究方向为光谱颜色复制。

单、建模效率高,但是模型精度较差。基于光谱的特征化模型主要有刘浩学^[7-8]提出的基于光谱叠加性的特征化模型,该模型在单波长下建立驱动值与光谱的多项式模型,对于 n 维的光谱数据需建立 n 个回归方程,计算量大,模型复杂度高。基于此,提出采用BP神经网络进行LCD显示器的光谱特征化,基于高维的光谱辐亮度,会导致BP神经网络的训练运算量大、效率低、误差大等缺陷,故采用主成分分析对光谱反射率进行降维,在简化了神经网络结构的同时,保持了对样本较高的识别精度。这里选择BP神经网络作为特征化模型是基于2方面原因:显示器驱动值与光谱辐亮度之间的转换是非线性转换,而神经网络能够有效地解决任何非线性映射问题;现有的基于神经网络模型的设备特征化多采用BP神经网络,BP神经网络具有较强的泛化能力、容错能力及强大的自学习自组织能力。

1 关键技术

1.1 主成分分析法

主成分分析法^[14-15]是一种重要的多元统计分析方法,把多维数据转化为少数几个互相独立,并且包含原来数据大部分信息的低维数据。在实际应用中,一般取前几个主成分就可以基本包含全部信息。这里采用主成分分析法对光谱反射率数据进行降维,采用降维后的光谱数据作为BP神经网络训练的输出变量,进行神经网络训练。光谱辐亮度可以看作一系列主成分与主成分系数的组合。假定光谱辐亮度 r 是一个 n 维列向量,满足光谱辐亮度向量组 \mathbf{R} 。通过统计分析及线性运算,可获得集合 \mathbf{R} 中的 m 个 k 维基本特征向量,使得 \mathbf{R} 中任意样本的光谱辐亮度 r 都可以通过式(1)进行估算。

$$r = \sum_{i=1}^k u_i a_i = \mathbf{UA} \quad (1)$$

式中:主成分用向量组 $\mathbf{U}=\{U_1, U_2, \dots, U_k\}$ 表示; \mathbf{A} 为对应的主成分系数, $\mathbf{A}=\{a_1, a_2, \dots, a_k\}^T$ 。

当矩阵 \mathbf{U} 前 k 个特征向量的贡献率足够大时,光谱反射率可认为是前 k 个特征向量的线性组合。根据式(2)累计贡献率(CVC, cumulative variance contribution)计算公式,确定所需的主成分个数以及降维后数据的维数。

$$V^k = \sum_{i=1}^k \frac{W_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad (2)$$

1.2 子空间划分算法

为提高模型预测的精度,把整个颜色空间均匀划分为 $N \times N \times N$ 个子空间,见图1(划分成 $2 \times 2 \times 2$ 个子空间),并对每个子空间进行编号。在每个子空间中进行RBF神经网络的训练,并保存网络。对任意输入驱动值,通过搜索确定其所在的子空间,调用该子空间训练好的神经网络,输出预测光谱辐亮度值。

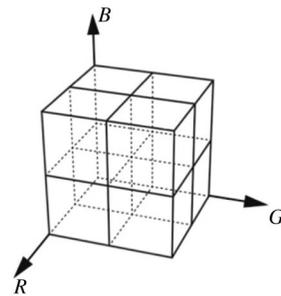


图1 子空间划分

Fig.1 Subspace partition

1.3 BP神经网络原理

BP神经网络^[11-13]是一种误差反向传播的前馈型神经网络,由输入层、隐含层(1层或多层)和输出层组成。网络由正向和反向传播组成,正向传播是输入信号从输入层经隐含层传向输出层,若输出层得到了期望的输出,则学习算法结束。否则,转至反向传播;反向传播是将误差(样本输出与网络输出之差)按原联接通路反向计算,由梯度下降法调整各层节点的权值和阈值,使误差减小。BP神经网络可以实现任意线性或非线性函数映射,被广泛应用。BP神经网络流程图见图2。

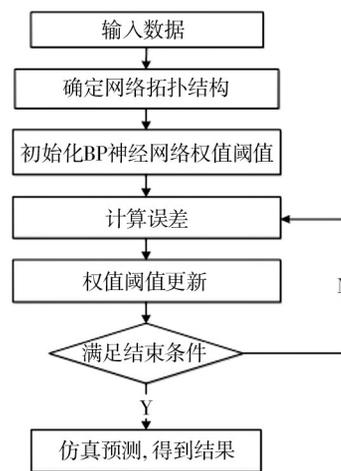


图2 BP神经网络流程

Fig.2 Procedure of BP neural network

2 实验

2.1 实验设备及样本制作

实验设备: EizoColorEdge CG246W 显示器, 亮度为 120 cd/m^2 , 可视角度为 178° , 最佳分辨率为 $1920 \text{ 像素} \times 1200 \text{ 像素}$, 面板类型 IPS, 屏幕比例为 16:9, Konicminolta CS-2000 Spectroradiometer。

样本制作: 包括训练和检测样本。训练样本是对 RGB 色空间中各通道分别进行 11 级分割, 即各通道颜色值分别取 0, 25, 50, 75, 100, 125, 150, 175, 200, 225, 255 共 1331 个色靶; 检测样本是对 RGB 色空间中各通道分别进行 9 级分割, 即各通道颜色值分别取 0, 30, 60, 90, 120, 150, 180, 210, 240 共 729 个色靶。用 Matlab 编写生成色靶代码。使用 EizoColorEdge CG246W 显示器, 整个实验在暗室中进行, 实验测量前显示器

预热 0.5 h, 使显示器达到稳定状态, 接着用 i1 pro 和 ProfileMaker 按照提示步骤, 对显示器进行校准, 并生成显示器的 icc 文件, 将该文件设置为显示器的特性化文件, 至此显示器的校准完成。采用 Konic-minolta CS-2000 Spectroradiometer 测量色靶 400~700 nm 范围内、间隔为 10 nm 的光谱数据。

2.2 主成分个数确定

根据式(2)计算得到各分区子空间的主成分累计贡献率, 见表 1。由表 1 可知, 各分区子空间前 6 个主成分的累计贡献率均达到 99.5%, 说明 6 个主成分可以完整再现颜色信息。故采用 6 个主成分将光谱反射率降为 6 维, 作为网络输出变量。降维后光谱重构的精度见表 2。由表 2 可知, 色差和均方根误差 (r_{RMSE}) 均很小, 可以忽略, 说明采用 PCA 法进行光谱亮度的降维及建模后, 重构光谱辐亮度是可行的。

表 1 不同主成分数量的累计贡献率
Tab.1 CVC of different principle components

主成分 个数	累计贡献率							
	分区 1	分区 2	分区 3	分区 4	分区 5	分区 6	分区 7	分区 8
1	54.31	72.90	76.25	68.83	84.99	73.84	73.32	67.39
2	79.90	88.64	90.93	89.25	93.10	93.75	94.60	85.74
3	99.09	99.00	99.23	99.17	99.40	99.42	99.42	99.43
4	99.35	99.55	99.47	99.48	99.48	99.50	99.48	99.50
5	99.48	99.63	99.55	99.60	99.54	99.55	99.53	99.54
6	99.52	99.68	99.61	99.65	99.59	99.59	99.57	99.58

表 2 降维后光谱重构精度
Tab.2 Precision of spectrum reconstruction after dimensionality reduction

精度	分区 1	分区 2	分区 3	分区 4	分区 5	分区 6	分区 7	分区 8
$\Delta E_{00}^* (\times 10^{-2})$	0.94	1.19	2.04	1.99	1.63	1.33	1.81	1.84
$r_{\text{RMSE}} (\times 10^{-7})$	2.97	4.84	6.20	8.21	9.79	1.21	1.28	1.48

2.3 神经网络参数确定

神经网络中隐含层和输出层分别选用 Tansig, purelin 函数作为激活函数, 网络训练算法为 Trainlm, 隐层数和隐层节点数的改变可以影响网络的性能, 但是隐含层节点多, 在提高学习精度的同时, 会增加网络的复杂度。这里选用常用的 3 层 BP 神经网络模型 (见图 3), 采用循环迭代确定最优化的网络结构及各子空间的最佳隐层节点数和训练次数。

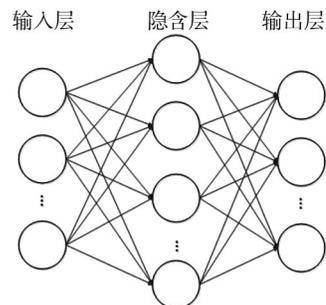


图 3 BP 神经网络结构

Fig.3 Structure of BP neural network

3 实验结果及分析

子空间划分前后BP神经网络预测光谱的色度精度(以表征色度精度)和光谱精度(以表征光谱精度)结果见表3。将分区和未分区BP神经网络预测光谱的色差进行统计,得到色差分布见图4。

表3 子空间划分前后BP神经网络的色度和光谱精度

Tab.3 Colorimetric and spectral accuracy of spectral prediction using BP neural network based on divided and undivided subspace

方法	ΔE_{00}^*		$r_{RMSE}(\times 10^{-5})$	
	平均	最大	平均	最大
分子空间	0.616 75	2.639 69	3.20	22.8
未分子空间	0.758 57	3.129 21	3.70	22.1

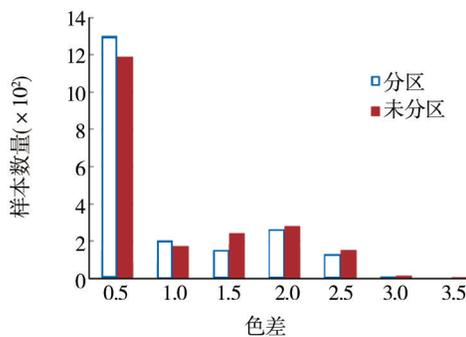


图4 色差分布

Fig.4 The distribution of color difference

由表3可知,子空间划分的BP神经网络模型预测的色度和光谱精度都有明显提高,子空间划分的BP神经网络模型预测的最大色差小于3;由图4可知,子空间划分后的模型色差0~1之间的样本点数量显著提高,色差大于2的样本点明显减少。由此可知,子空间划分BP神经网络模型的预测精度有明显提高。可见,BP神经网络模型在色度和光谱方面均达到了较高的预测精度,能够更好地满足LCD显示器特性化的精度要求。

4 结语

在分析了几种常用LCD显示器光谱特征化模型的优缺点后,认为BP神经网络模型在LCD显示器光谱特征化上具有较强的优势,故采用BP神经网络作为特征化的基本模型。同时,为提高模型的精度、采

用子空间划分方法,在子空间中分别优化模型参数,有效提高了模型整体的精度。在模型建立过程中,采用PCA对光谱辐亮度进行降维,采用BP神经网络对显示器驱动值与降维后的光谱数据进行建模。在检测模型精度时,对任意输入驱动值,通过BP神经网络模型得到的光谱数据,采用PCA进行光谱重构,得到对应的光谱辐亮度值。在建模过程中,采用PCA法对输出变量光谱辐亮度进行降维、重构,有效提高了模型的运行效率。实验结果表明:子空间划分的BP神经网络特征化模型,是一种高精度的LCD显示器光谱特征化模型。

参考文献:

- [1] 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):0433001-1—0433001-6.
GONG Rui, XU Hai-song, ZHANG Xian-dou, et al. Sub-space Compensation Model for Accurate Colorimetric Characterization of Liquid Crystal Displays[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(4): 0433001-1—0433001-6.
- [2] 王勇,徐海松.液晶显示器颜色特征化的S模型算法[J].中国图象图形学报,2007,12(3):491—494.
WANG Yong, XU Hai-song. The S Shaped Model for LCD Colorimetric Characterization[J]. Image and Graphic, 2007, 12(3): 491—494.
- [3] STOKES M, ANDERSON M, CHANDRASEKAR S, et al. A Standard Default Color Space for the Internet—Srgb[EB/OL]. [1996-11-05]. Version 1.10, <http://www.w3.org/Graphics/Color/Srgb.html>.
- [4] 刘攀,刘真,朱明.基于最佳立方体细分的显示器颜色再现模型[J].包装工程,2014,35(13):128—132.
LIU Pan, LIU Zhen, ZHU Ming. Monitor Color Reproduction Model Based on Optimal Cube Subdivision[J]. Packaging Engineering, 2014, 35(13): 128—132.
- [5] 梁静,邓晶绿,姜婷婷,等.CRT显示器的颜色转换模型[J].大连工业大学学报,2011,30(4):293—296.
LIANG Jing, DENG Jing-lv, JIANG Ting-ting, et al. CRT Display Color Conversion Model[J]. Journal of Dalian Polytechnic University, 2011, 30(4): 293—296.
- [6] 许宝卉,李言.基于ICC标准的CRT色空间转换方法的研究与比较[J].液晶与显示,2009,3(24):438—442.
XU Bao-hui, LI Yan. Research and Comparison of CRT Color Space Conversions Based on ICC Standard of Color Management[J]. Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays, 2009, 3(24): 438—442.
- [7] 李瑞娟.RGB到CIEXYZ色彩空间转换的研究[J].包装工程,2009,30(3):79—81.

- LI Rui-juan. Study on Color Space Conversion Model from RGB to CIEXYZ[J]. Packaging Engineering, 2009, 30(3): 79—81.
- [8] 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,2013,10(33):2751—2757.
LIU Hao-xue, CUI Gui-hua, HUANG Min, et al. Colorimetric Characterization of LCD Based on Wavelength Partition Spectral Model[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2013, 10(33): 2751—2757.
- [9] 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,2007,27(5):1233002-1.
LIU Hao-xue, ZHENG Lan, DAI Li, et al. Color Characterization of LCD Based on Spectral Additive Properties[J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(5): 1233002-1.
- [10] 李金城.色彩高保真复制的理论与实践[D].南京:南京林业大学,2013.
LI Jin-cheng. Theory and Practice of High-fidelity Color Reproduction[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2013.
- [11] 邹文海,徐海松,王勇.基于彩色扫描仪的图像光谱重构[J].光学学报,2007,27(5):859—863.
ZOU Wen-hai, XU Hai-song, WANG Yong. Spectral Reconstruction of Images Based on Color Scanner[J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(5): 859—863.
- [12] WANG Yong, XU Hai-song. Spectral Characterization of Scanner Based on PCA and BP ANN[J]. Chinese Optics Letters, 2005, 3(12): 725—728.
- [13] 何颂华,张刚,陈桥,等.基于BP神经网络的多基色打印机光谱特性化[J].包装工程,2014,35(13):110—115.
HE Song-hua, ZHANG Gang, CHEN Qiao, et al. Spectral Characterization of Multicolor Printer Based on BP Neural Network[J]. Packaging Engineering, 2014, 35(13): 110—115.
- [14] TZENG D Y, BERNS R S. A Review of Principal Component Analysis and Its Applications to Color Technology[J]. Color Research & Application, 2004, 29(2): 104—110.
- [15] FAIRMAN H S, BRILL M H. The Principal Components of Reflectances[J]. Color Research & Application, 2005, 30(2): 84—98.

(上接第86页)

- [2] WONG E H, MAI Y W, SEAH S K W. Board Level Drop Impact—fundamental and Parametric Analysis. Transactions of the ASME[J]. Journal of Electronic Packaging, 2005, 127: 496—502.
- [3] SUHIR E. Could Shock Tests Adequately Mimic Drop Test Conditions Transactions of the ASME[J]. Journal of Electronic Packaging, 2002, 124: 170—177.
- [4] TSAI T Y, YE H C L, LAI Y S. Response Spectra Analysis for Undamped Structural Systems Subjected to Half-sine Impact Acceleration Pulses[J]. Microelectronics Reliability, 2006.
- [5] 张波,丁汉,盛鑫军.板级电子封装在跌落冲击载荷下的动态响应分析[J].振动与冲击,2008,27(6):108—113.
ZHANG Bo, DING Han, SHENG Xin-jun. Dynamic Response of a Board 2 Level Electronic Package Under Drop Impact Load[J]. Journal of Vibration and Shock, 2008, 27(6): 108—113.
- [6] 刘芳,孟光.电路板组件板级跌落冲击动力学分析[J].机械强度,2007,29(5):713—716.
LIU Fang, MENG Guang. Dynamic Analysis of Printed Circuit Board Assembly Subjected to Drop Impact[J]. Journal of Mechanical Strength, 2007, 29(5): 713—716.
- [7] 杨雪霞,肖革胜,树学峰.板级跌落冲击载荷下无铅焊点形状对BAG封装可靠性的影响[J].振动与冲击,2013,32(1):104—107.
YANG Xue-xia, XIAO Ge-sheng, SHU Xue-feng. Effect of Solder Joint Shape on Reliability of BGA Packages Under-board Level Drop Test[J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(1): 104—107.
- [8] SINGIRESU S R. 机械振动[M].第4版.清华大学出版社,2009.
SINGIRESU S R. Mechanical Vibration[M]. 4th Edition. Beijing: Tsinghua University Press, 2009.
- [9] 李惠彬.振动理论与工程应用[M].北京:北京理工大学出版社,2006.
LI Hui-bin. Vibration Theory and Engineering Application [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2006.
- [10] 彭国勋.物流包装运输设计[M].第2版.北京:印刷工业出版社,2006.
PENG Guo-xun. Design of Logistics Packaging and Transportation[M]. 2nd Edition. Beijing: Printing Industry, 2006.