

文章编号: 0253-2239(2004)08-1039-6

基于孟塞尔系统的阴极射线管特性化新方法*

杨卫平^{1,2} 廖宁放¹ 黄庆梅¹ 郝建明² 蒋绍全²

(1 北京理工大学信息科学技术学院颜色科学与工程国家专业实验室, 北京 100081)
(2 云南师范大学物理与电子信息学院, 昆明 650092)

摘要: 提出了一种新的阴极射线管特性化的方法。该方法的特点是采用“视觉匹配”方法,在反射体表面色和自发光体之间映射一些色貌因素,但没有使用任何复杂的色貌模型。是一种考虑了一些色貌因素的阴极射线管特性化方法。由于该问题的个性因素较多,采用 BP 神经网络实现色空间的非线性映射。实验结果表明,只要阴极射线管被标定,在办公室环境下,该方法可以改进在不同的阴极射线管上重现的颜色。采用 3-7-7-3 简单的网络结构;分色相样本训练。训练样本平均色差可以达到 $3.07L^* u^* v^*$ 色差单位,测试样本平均色差可以达到 $4.55L^* u^* v^*$ 色差单位,小于阴极射线管的最大可接受色差,结果是令人满意的。这在电子商务和办公自动化方面有广泛的用途。

关键词: 色度学; 色貌模型; 颜色复制; 阴极射线管特性化; 神经网络
中图分类号: O432.3 文献标识码: A

A New Method of Cathode-Ray Tube Characterisation Based on Munsell System

Yang Weiping^{1,2} Liao Ningfang¹ Huang Qingmei¹ Hao Jianming² Jiang Shaoquan²

(1 National Laboratory of Color Science and Engineering, School of Information Science
and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081
2 School of Physics and Electron Information, Yunnan Normal University, Kunming 650092)

(Received 23 June 2003; revised 2 September 2003)

Abstract: A new method of cathode-ray tube (CRT) monitors characterization is proposed. The features of this method are, it adopted a vision matching method to map some color appearance factors between self-luminous body and reflector surface colors, but without the complexity of using any color appearance model. It is a method that it has considered some color appearance factors. The neural networks were utilized to realize nonlinear mapping in color space. The experiment indicated that the method may improve the reproduction colors in different CRT when an arbitrary assigned color is to be displayed on a CRT screen, in office environment. Some simple network structure and small samples training method were adopted. The average color difference of training samples is $3.07 L^* u^* v^*$ unit and that of testing samples is $4.55 L^* u^* v^*$. These results are smaller than the biggest acceptable color difference $10 L^* u^* v^*$ unit. The results are satisfying. The method can be widely used by electronic-commerce and automation in office.

Key words: chromatics; color appearance model; color reproduction; cathode-ray tube (CRT) characterization; neural network

* 国家自然科学基金(60278022)、云南省自然科学基金(2000A0044M)资助课题。

E-mail: yangwpcn@sohu.com

收稿日期: 2003-06-23; 收到修改稿日期: 2003-09-02

1 引 言

随着计算机和通信网络的高速发展,电子商务、办公自动化和家用计算机的普及,阴极射线管显示器(CRT)扮演着越来越重要的角色,大量的彩色图

像通过各种输入设备和计算机网络传输到桌面显示器上。另一方面,阴极射线管也经常应用于颜色理论的基础研究^[1]。在实际应用中,我们希望在不同的观察条件下,显示器都能够准确地复制输入图像的颜色。也就是我们通常所说的“所见即所得”。特别是在印刷、印染、广告和艺术品复制等领域,对颜色复制的要求越来越高。但是,当媒体、照明条件和周边环境等色貌因素改变时,如打印图像(硬拷贝,hard-copy)复制到显示器上(软拷贝,soft-copy),或显示器显示的图像由打印机输出,则在两种不同的媒体之间的颜色存在着较大色差。这就是跨媒体的颜色复制问题。为了解决这一问题,通常的做法是采用颜色管理系统,通过特性化输入/输出设备、色貌模型变换等手段,产生一个设备颜色描述头文件(Profile),通过头文件连接空间(Profile connection space,PCS)来实现不同设备的色空间和 $L^* a^* b^*$ 或XYZ之间的相互转换,来保证在不同的媒体上得到相同的三刺激值。要实现这些目的,阴极射线管的特性化和校正是一个最为基础的工作。

2 色貌和设备特性化

2.1 色貌模型

颜色复制不仅与输入/输出设备有关,而且还受到被观察图像的周边条件、照度、背景和媒体等观察条件的影响,即通常所说的色貌问题。在一个观察条件下相同的颜色,在另一个观察条件下,人的视觉系统所感知的颜色可能是不同的。从原理上来讲,这一问题可以通过一些合适的色貌模型(Color appearance model,CAM)来解决。因此,在过去的二十年中,人们提出了一些著名的色貌模型,如Hunt94,Nayatani95,RLAB,LLAB,CIECAM97s和ZLAB等等。色貌模型被使用于与颜色复制相关的一些重要场合,普遍地用来预测不同观察条件下的源和目标的颜色^[2]。然而,这些模型通常是复杂的,包含着许多非线性的数学变换,而且要获取大量的环境参量,这需要较为专业的知识和技术。

在色貌模型中,观察条件是一个重要因素。虽然,现代色貌模型已经考虑到了照度、周边条件、观察者的适应状态和媒体的改变等变化。但是,要获得一个规范性的观察场和用精确的数学变换来描述人眼及人脑的颜色视觉过程是困难的。有关研究结果表明,颜色视觉是一种与人的心理反应过程有关的结果,带有高度的非线性、模糊性以及背景和环境

的相关性等特点。因此,很难用解析性的数学表达式进行归纳或模拟。因此,色貌模型虽然从不同的研究角度对颜色刺激进行了预测,但都不能解释所有的视觉现象,还存在着一定的局限性。国际照明委员会(Commission Internationale de l'Eclairage,CIE)的各技术分部仍在继续努力对色貌模型的改进做着大量的理论和实验工作,不断推荐一些新的色貌模型(如CIECAM02)。

2.2 设备的校正和特性化

设备的特性化就是确定设备的色空间和国际照明委员会色度系统之间的关系的一个过程,而校正是指标定设备,使同一类设备处于一个统一的、标准的工作状态,例如标定阴极射线管的 γ 值和白点等^[3]。要在软硬拷贝之间真实匹配两种不同媒体的颜色,阴极射线管的特性化和校正是必须的。另外,在相同的白点,但所采用的荧光粉不同的阴极射线管之间,颜色也会产生 $18\Delta E_{ab}^*$ 的差异^[4]。因此,即使不考虑跨媒体的复制问题,阴极射线管的特性化和校正也是很重要的。

由于输入和输出设备的色空间是依赖于设备的。换句话说,每一个设备有其自己的色空间,输入的颜色参量和设备的红、绿、蓝(RGB)之间需要有一个对应关系。因此,要获得两个依赖于设备的色空间之间的匹配,最好是先通过一个中介色空间过渡。这个色空间应是设备独立的,如CIELAB,而且最好是一个均匀的色空间。阴极射线管的红绿蓝色空间在视觉上是不均匀的。例如,当红从10变到20,和从20变到30,在视觉上的感觉是不同的。这就给颜色复制和色差评价带来困难。我们希望通过一个合适的方法,在阴极射线管上映射出一个在视觉上均匀的色空间。

另外,阴极射线管采用的是红绿蓝加色原理。因此,当红、绿、蓝三个通道满足线性、单色和独立三个基本条件时,可以得到一个理想的光谱响应曲线(标准观察者),在相同的观察条件下,我们可以实现颜色复制。然而,在实际应用中,这三个条件不能被完全满足。特别是红绿蓝三个通道不是完全独立的,它们之间存在着相干误差^[5],会产生串扰,调整起来比较困难。因此,要想在阴极射线管上得到令人满意的颜色复制,必须将阴极射线管特性化和校正。

特性化输入和输出设备的方法,一般可分为两种:基于光谱响应方法和基于目标色的方法。

基于光谱响应的方法需要使用单色仪或辐射计测量出设备的光谱响应,确定设备的光谱响应和国

际照明委员会的颜色匹配函数之间的关系,从而实现 RGB→XYZ 或 XYZ→RGB 的变换。

基于目标色的方法,其基本思想是使用一个包含一定数量颜色样本的参考目标色。这些样本色被分光光度计测量,以获得它们的 XYZ 值(标准色卡已提供国际照明委员会色度坐标)。其优点是只需要知道目标色的 XYZ 值即可,是一种更加实用的方法。典型的算法有:三维查表法(3D-LUT)、多项式法和神经网络法^[6]。由于孟塞尔色空间是一个在视觉上均匀的色空间,所以其孟塞尔色卡经常被用于色空间变换^[7]、颜色标定^[8,9]和色貌模型研究^[10]。本文也采用孟塞尔颜色系统作为目标色,对阴极射线管进行特性化。

3 基于视觉匹配的阴极射线管特性化方法

3.1 训练样本对的获取

基于目标色的设备特性化方法需要建立一个用于训练的样本空间,这个样本空间由若干样本的输入值和期望值数据对组成。一般采用标准数据库或仪器测量方法建立训练样本对。但值得注意的是,人们的视觉系统信息处理机制在感知颜色中扮演着重要的角色,连接着颜色的物理属性和心理属性。因此,为了使这一问题简化,本文提出了一种基于视觉匹配、新的阴极射线管特性化的方法,并给出了一些初步的实验结果。我们希望通过视觉匹配得到一组与孟塞尔色度参量相对应的阴极射线管的红绿蓝值,使得在阴极射线管上显示一组与孟塞尔色块相匹配的颜色。当所选的孟塞尔色块匹配完成后,我

们可以得到一组与孟塞尔色度参量(VHC)相对应的红绿蓝值(VHC-RGB)。这一组数据对可以作为色空间变换算法(如 LUT 表、人工神经网络或解析方程)的参考数据,建立起一个训练样本空间。

这里要注意,既然这一匹配过程完全是由人的“视觉”来完成的,得到的阴极射线管所显示的色块的三刺激值(XYZ)必然与原来的孟塞尔色块有差异。但需要强调的是,在这一“视觉匹配”过程中,已经包含了一些色貌因素,两者的照明条件是完全一样的,但媒体不一样,这正是我们希望得到的表面色(硬拷贝)在阴极射线管(软拷贝)上的复制。

在一些实际应用中(例如印刷、印染等),基于视觉的颜色匹配方法被广泛应用,颜色视觉也是颜色理论研究的一个重要方面^[11~13]。同样,视觉评价也是评价复制图像质量的一个重要方法^[1,14~16]。彩色图像的颜色量化,也是一种基于视觉效果的归类方法^[14]。因此,视觉匹配方法在实际应用中是可行的。

通过这样的“视觉”变换,再采用适当的插值,我们可以将原来不均匀的色空间在阴极射线管上得到一个均匀的映射,如从 CIELAB 到红绿蓝,使原来不均匀的红绿蓝色空间变换为均匀。而这一映射过程是比较省时和准确。值得注意的是,这种方法将色貌的一些因素,例如媒体、照明条件和周边环境等通过人的视觉感知“传递”到另一种媒体上(如阴极射线管),是一种基于色貌的设备特性化方法。

首先,按照正常的程序校准显示器(白点:红,绿,蓝=255,255,255;黑点:红,绿,蓝=0,0,0)。然后,调节阴极射线管的红绿蓝值,通过人眼的视觉匹配,使得孟塞尔色块——复制于阴极射线管(见图 1)。

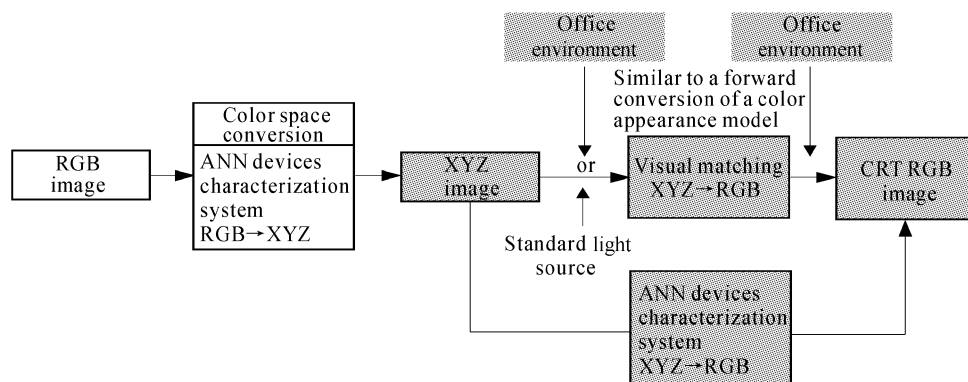


Fig. 1 The method of CRT calibration vision matching-based. The shadow blocks are our own task

将孟塞尔色卡置于与显示器成 45°角的位置,观察者与显示器和孟塞尔色卡保持一个正常的观察距离。观察条件为一般的办公室环境,室内非直接

照射的白天北窗自然光和日光灯的混合照明。孟塞尔色卡和阴极射线管处于同一照明条件下,我们采用双眼模拟观察方法^[17]。该方法是交替比较不同

媒体原和复制图像,不需要记忆原图像。这一技术被普遍应用于办公室环境下跨媒体图像比较。

仪器测量结果表明,显示器置于背窗位置,受环境照度变化的影响最小。但这一位置由于人眼直接受到窗外光线的辐射,不宜长久工作。建议使用窗帘以减少阳光的照度变化对室内的影响及保护观察者的眼睛。

3.2 色空间变换方法

由于阴极射线管的 RGB 空间是依赖于设备的,孟塞尔色卡的国际照明委员会 XYZ 空间是设备独立的,它们之间没有一个直接的映射关系。但是,我们可以认为输入/输出设备是一个黑盒子,用“视觉”匹配所得来的一组数据对,来训练人工神经网络,实现 XYZ 到 RGB 的映射。应当指出,由于视觉匹配把具体颜色传播媒介的颜色参量与通用的色貌属性参量(包括照明、背景、环境因素等)直接联系起来,因此问题的个性因素较多,这正是在跨媒体颜色复制中,传统色貌模型的方法难以解决的问题,也正是我们采用人工神经网络方法的一个重要原因。

4 实验结果

4.1 网络训练

试验中我们采用了一台三星 SyncMaster 20GLs 显示器。显示器的白点由其自身的数字控制装置来调节。采用 Trident Microsystems(Trident Blade 3D PCI/AGP)显示卡驱动,分辨率被设置为 1280×1024 ,刷新频率为 75 Hz。使用 Photo Research 1980B 将显示器的白点设置为 D65 光源的白点, 100 cd/m^2 。阴极射线管上显示的色块的 CIEXYZ 值,使用美国 X-Rite 公司生产的 DPT92 屏幕校正仪进行测量。

使用 Adobe Photoshop 6.0 在阴极射线管上生成一个 $16 \text{ cm} \times 25 \text{ cm}$ 的白色(红,绿,蓝=255,255,255)背景,与孟塞尔色卡相对应的色块被设置为 $3 \text{ cm} \times 3 \text{ cm}$ 。孟塞尔色卡的国际照明委员会标准色

度坐标值来源于 Newhall,1943 绘制的数据表^[18]。我们采用人工神经网络来实现 CIE XYZ \rightarrow RGB 的非线性变换。为了减少神经网络的全局误差和简化网络结构,我们采取小数据多网络方案,按孟塞尔色相(H)分别训练网络,即每一个色相对应一个神经网络,如 2.5R \sim 10R 训练一个神经网络,2.5YR \sim 10YR 训练另一个神经网络。

选择了 $V=3,4,6,7$ 和 $C=2,6,10$ 或 14 共 457 个孟塞尔色卡作为训练样本。样本对(XYZ \rightarrow RGB)按照各自所属的色相红(R),黄红(YR),黄(Y),绿黄(GY),绿(G),蓝绿(BG),蓝(B),紫蓝(PB),紫(P)和红紫(RP),分别训练出结构为 3-7-7-3 的 10 个神经网络。

4.2 测试结果

选择了 $V=3,4,6,7$ 和 $C=4,8$ 或 12 共 372 个孟塞尔色卡作为测试样本。我们用 X-Rite DPT92 屏幕校正仪测出屏幕上相应两个色块的 XYZ 值,然后计算其色差。

由于是自发光体,采用了 CIEL* u^*v^* 系统,所有的色差均为 CIEL* u^*v^* 单位。表 1 是训练样本的实验结果,表 2 是测试样本的实验结果。从表中可以看出,训练样本的色差是可以接受的,大部分训练样本与视觉匹配的色块在视觉上几乎没有区别。这就意味着,在我们的实验中,虽然媒体改变了,但神经网络给出了比较好的输出。对于测试样本,在个别点上存在着较大色差,但总体上与训练样本在一个数量级上,且小于 $10L^*u^*v^*$ 色差单位(显示器可接受的最大色差),结果令人满意。这说明神经网络对于测试样本可以给出比较好的插值。我们尝试过 3-20-20-20-3 这样较为复杂的网络结构,其网络的全局误差可以比 3-7-7-3 结构小一倍。可见,通过优化网络结构、样本空间和学习规则等可以进一步改进网络的输出精度。

Table 1 Summary of experimental results of training samples

Hue	Network architecture	Global error/ 10^{-5}	Average color diff.	Average chroma diff.	Average hue diff.	Max color diff.	Max chroma diff.	Max hue diff.	Number of bad samples*
R	3-7-7-3	1.2	3.65	2.62	1.56	12.57	12.20	4.54	1
YR	3-7-7-3	0.9	3.28	2.32	1.40	14.49	13.82	6.73	1
Y	3-7-7-3	4.5	2.81	1.84	1.48	6.20	5.47	4.57	0
GY	3-7-7-3	0.2	4.00	2.78	1.94	8.69	7.61	8.03	0
G	3-7-7-3	4.1	1.93	1.06	0.99	4.39	3.72	2.39	0
BG	3-7-7-3	7.4	2.30	1.26	1.24	6.75	4.32	4.45	0
B	3-7-7-3	2.5	2.86	1.22	2.03	7.21	3.43	7.08	0
PB	3-7-7-3	2.3	2.94	1.77	1.49	8.84	5.44	5.10	0
P	3-7-7-3	3.0	3.83	2.73	1.52	15.50	15.25	5.23	1
RP	3-7-7-3	3.2	2.93	1.67	1.37	11.59	11.49	5.00	1
Average		2.9	3.07	1.95	1.50	9.62	8.28	5.31	4

Table 2 Summary of experimental results of testing samples

Hue	Average color diff.	Average chroma diff.	Average hue diff.	Max color diff.	Max chroma diff.	Maxiaml hue diff.	Number of bad samples*
R	5.30	4.09	1.18	13.70	13.63	5.88	4
YR	4.39	3.43	1.85	10.21	9.12	6.00	1
Y	4.58	2.95	1.93	11.16	9.24	4.65	1
GY	5.38	4.22	2.15	12.97	11.89	6.72	1
G	3.27	2.06	1.76	7.54	5.73	4.59	0
BG	2.78	1.65	1.25	6.09	4.16	4.16	0
B	7.59	5.42	2.53	23.00	16.26	11.25	9
PB	4.00	2.63	1.89	16.83	15.01	7.35	3
P	4.26	2.64	1.92	13.57	9.54	9.48	1
RP	4.13	2.62	1.96	9.23	7.01	7.83	0
Average	4.55	3.15	1.89	12.79	10.51	6.68	20

* The number of the samples whose color difference is greater than $10L^* u^* v^*$ unit

图 2 是色差相对于 $L^* C^* H^*$ 中彩度(C^*)的分布。可以看出,大色差主要集中在较低彩度部分,也就是说,神经网络在高彩度部分的预测精度更好。

从视觉匹配的角度来看,对低彩度样本的匹配较为困难,所产生的误差较大。因此,在视觉匹配过程中,高彩度样本的匹配精度要比低彩度的高。

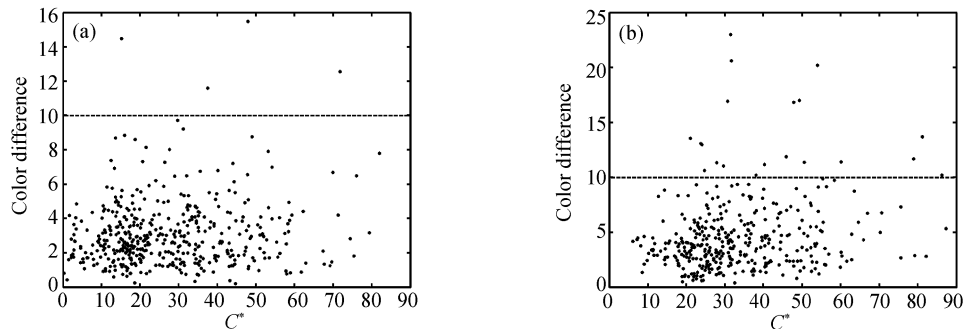


Fig. 2 The color difference ($\Delta E_{u^* v^*}$) distributing of the testing samples. (a) The training samples, (b) the testing samples

结论 本文所提出的阴极射线管特性化方法有两个优点:考虑了自发光体和反射体表面色的一些色貌差别,但是没有使用任何复杂的色貌模型;可以将所输入的数据变换到在视觉上均匀的色空间,通过插值可以容易地得到理想的输出。

本文采用分色相训练网络,简化了训练样本空间,有利于简化网络结构,降低网络的全局误差。但增加了网络数量,给实际应用添加了一些复杂性。在个别测试样本上还存在着较大色差,特别是蓝色相的网络输出效果较差。这是因为蓝色相在国际照明委员会色度图上密度较高,容差小,它的色度坐标微小变化即可引起人的视觉感知的较大差异。

如果将孟塞尔色卡置于一个标准的灯箱中,同时进行多个标准观察者的视觉匹配和评价。不仅可以得到一个更为一致、稳定的匹配,而且可以在标准照明和办公室环境两个不同的照明条件之间实现颜色的真实复制,同时完成相当于色貌模型的正、逆变换。

初步的实验结果说明该方法是可行的,我们希望进行进一步的研究,以提高测试样本的精度。

参 考 文 献

- 1 Cui Guihua, Li Wei, Fan Qiumei *et al.*. Study of the parametric effects in colour-difference evaluation using CRT display. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2001, **21** (4): 426~432 (in Chinese)
- 2 Fairchild M D. *Color Appearance Models*. Reading, MA, Addison Wesley, 1997. 217
- 3 Johnson A J. Methods for Characterising Colour Scanners and Digital Cameras, *Displays Special Issue: To Achieve WYSIWYG Colours*, 1996. 183~192
- 4 Engeldrum P G, Ingraham J L. Analysis of white point and phosphor set differences of CRT displays. *Color Research and Application*, 1990, **15**(3): 151~155
- 5 Liao Ningfang, Shi Junsheng, Zen Hua *et al.*. Analysis of interactive errors in conventional CRT colorimetric prediction models. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2000, **20**(1): 133~138 (in Chinese)
- 6 Hong Guowei, Luo M R, Rhodes P A. A study of digital camera colorimetric characterization based on polynomial

- modeling. *Color Research and Application*, 2001, **26**(1): 76~84
- 7 Simon F T, Frost J A. A new method for the conversion of CIE colorimetric data to munsell notations. *Color Research and Application*, 1987, **12**(5): 256~260
- 8 Tominaga S. Color notation conversion by neural networks. *Color Research and Application*, 1993, **18**(5): 253~259
- 9 Shiro Usui, Shigeki Nakauchi, Masac Nakano *et al.*. Reconstruction of munsell color space by a five-layer neural network. *J. Opt. Soc. Am. (A)*, 1992, **9**(4): 516~520
- 10 Wyble D R, Fairchild M D. Prediction of munsell appearance scales using various color-appearance models. *Color Research and Application*, 2000, **25**(2): 132~144
- 11 Berns R S. *Principles of Color* (颜色技术原理). Li Xiaomei, Ma Ru, Cheng Lirong Transl. Beijing: Chemical Industry Press, 2002. 100~105 (in Chinese)
- 12 Liu Weiqi, Feng Rui, Zhou Fengkun. A color brightness model fitting characteristics of the human Vision. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1999, **19**(10): 1427~1429 (in Chinese)
- 13 Wang Zhiheng, Lu Jianlin, Wang Haifeng *et al.*. A new method to test ability of color discrimination. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1994, **14**(10): 1106~1109 (in Chinese)
- 14 Ram L Pandey Vimal. Spatial color contrast matching: broad-bandpass functions and the flattening effect. *Vision Research*, 2000, **40**(23): 3231~3243
- 15 Sueeprasan S, Luo M R, Rhodes P A *et al.*. Investigation of colour appearance models for illumination changes across media. *Color Research and Application*, 2001, **26**(6): 428~435
- 16 Ren Zhibin, Sui Yongxin, Yang Yinghui *et al.*. Color quantization of color image in a homogeneous color space. *Optics and Precision Engineering* (光学精密工程), 2002, **10**(4): 340~345 (in Chinese)
- 17 Braun K M, Fairchild M D, Lessi P J A *et al.*. Viewing techniques for cross-media image comparisons. *Color Research and Application*, 1996, **21**(1): 6~17
- 18 Newhall S M, Nicherson D, Judd D B. Final report of the OSA subcommittee on spacing of the munsell colors. *J. Opt. Soc. Am.*, 1943, **33**(7): 385~418



征 订 启 事

《光学手册》

顾问: 龚祖同 主编: 李景镇 陕西科学技术出版社 16开, 1541页, 定价: 100.00元

本手册是我国编写的第一本基础性大型光学手册。全书有 2700 多个公式, 1400 余幅插图和 400 多个数据表格, 230 万字。手册包括 25 个光学分科, 5 个附录, 2 个索引。由 20 多位光学专家编撰完成, 在编写过程中得到了龚祖同、王大珩、侯洵、薛鸣球等著名光学专家的指导和帮助, 保证了该手册的编写质量和权威性。资料丰富, 表达方式详细得当, 是“一本兼顾光学工作者和非光学科技工作者的参考书”(引自王大珩院士为本书的题词)。

《第十六届全国激光会议论文集》

第十六届全国激光学术会议于 2003 年 10 月 19~22 日在上海举行, 会议论文集由《中国激光》编辑部以增刊形式出版。增刊定价为每册 100 元, 光盘版为每张 50 元。

本期增刊共收录了 170 多篇论文, 约 600 多页。出版时间为 2004 年 3 月。论文集较全面地反映了近年来我国激光科学技术研究、应用和产业化的最新成果, 显示了激光科学技术对国家 863 计划、重大项目、国家基金和产业发展等方面的重要作用与贡献。

《第八届国际光电子和光通信学术会议(OECC'2003)论文集》

第八届国际光电子和光通信学术会议于 2003 年 10 月 13~16 日在上海举行, 会议论文集由《光学学报》编辑部以增刊形式出版。增刊定价为每套 100 元, 光盘版为每张 50 元。

论文集共收录论文 436 篇, 800 多页, 分上下两册。对该论文集 OECC 会议节目委员会的评价是: 质量之高, 可与国际上知名的优秀论文集媲美。

如需购买, 请与光学期刊联合编辑部葛晓红联系。

电话: 021-69918428, 021-69918011

请从邮局汇款 地址: 上海 800-211 信箱, 光学期刊联合编辑部 邮编: 201800

光学期刊联合编辑部
2004 年 4 月