

# 彩色记录与重现系统

常城 齐春 樊鑫

(西安交通大学图象处理与识别研究所, 西安 710049)

**摘要** 随着数字化时代的到来,各种彩色图象处理设备在人们生活中占据着越来越重要的地位.为了有效地记录和处理的图象,必须了解这些设备的能力和局限,使得在记录、传输、重现彩色图象的过程中,能够减小甚至消除因设备局限而产生的色彩失真和图象误差.为了使人们对这方面的动态有所了解,针对当前最常用的彩色记录和重现设备使用的关键技术和及主要研究成果进行了较全面的叙述,并简要介绍了一些新出现的技术及其应用前景,对该领域的研究趋势做了预测.

**关键词** 彩色记录系统 彩色重现系统 彩色图象处理设备

中图法分类号: TP334 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2001)03-009

## Color Recording and Reproduction Systems

CHANG Cheng, QI Chun, FAN Xin

(Image Processing Center, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049)

**Abstract** With the development of digital technology, various kinds of color image processing devices have been more frequently used than ever and color has become even more accessible. The increased use of color has brought with it new challenges and problems. In order to meaningfully record and process color images and to reduce color error caused by color imaging devices, it is essential to understand the mechanisms and limitations of these devices. In this paper, we reviewed some of the most commonly used color image recording and reproduction systems in present day. The system mechanisms and mathematical models used for representing these systems are discussed. The main problems existing in characterization, calibration and designing processes are recapitulated and the techniques used to solve them are also mentioned. This paper also provides a succinct introduction of some relatively new color imaging techniques, as well as their limitations and potentials of future applications. A forecast of research trends is attempted as well.

**Keywords** Color recording system, Color reproduction system, Color image processing device

## 0 引言

在人类所有的感观功能中,对色彩的感知或许是最生动、最富有感染力的,人们在日常生活中接触到的电视、照片、书籍、报纸,也都充满着各种彩色图象.各种彩色处理设备的出现,如彩色扫描仪、彩色打印机、彩色液晶显示器、彩色等离子显示器等,使人们对彩色图象的获取和处理变得更加容易.可以

预期,随着数字化时代的到来,会出现越来越多的数字彩色处理设备.

彩色图象处理设备日益频繁的应用给我们提出了一系列新的课题.为了有效地记录和处理的图象,必须了解这些设备的能力和局限,使得在记录、传输、重现彩色图象的过程中,能够减小甚至消除因设备局限而产生的色彩失真和图象误差.因而本文对当前一些常用的和新出现的彩色记录和重现技术作了比较全面的介绍.

在现实世界中,各种图象是作为谱辐射率或谱反射率在空间上的分布而存在的,因此记录一幅图象的色彩信息,就是要记录这些谱辐射率或谱反射率的空间分布.相反,如果要根据所记录的信息在物理上重现一幅彩色图象,就是要从记录数据中还原出辐射率或反射率的空间分布.

## 1 彩色输出系统

彩色输出设备依其成色原理可大致分为加色成色、减色成色和混合成色3类.其中,加色成色是通过不同色彩的组合来重现颜色,通常最终谱色即为各基色谱的和或平均,如CRT和视频投影仪的成色;减色成色是通过从“白”光中移去不必要的光谱成分来重现彩色,其多用于在透明或反射性介质上重现颜色,如染料升华打印机、彩色相片和彩色幻灯片;而混合法则综合使用了加色和减色法来重现颜色,其主要用于彩色半色打印(halftone printing).

在介绍各种彩色处理设备前,先介绍一些将要用到的术语.如由于任何实际输出设备都只能产生有限的色彩,因此把某设备所能产生的所有颜色称作该设备的全色阶(gamut);又如将用于驱动设备的信号称作控制值(control value);将从控制值到设备独立彩色空间的多维映射称作定性(characterization);还有实际应用中通常需要将设备独立彩色空间的指定颜色值转换为对应的控制值,以获得相应的彩色输出,而这个反变换的过程则称为标度(calibration).另外如果设备操作是可建模的,则可以通过少量测量确定的模型参数来为设备定性;而对于不可建模的设备操作,则需要使用经验的方法,通过测量一系列的控制值来确定模型的特征函数.

### 1.1 阴极射线管 CRT

大家知道,CRT是电脑、电视最常使用的显示装置.CRT是通过电子束激发一层薄薄的荧光材料而发光,其光谱的特性由荧光材料的特性决定,通常使用3种特性的荧光粉(红、绿、蓝),分别由3束独立的电子束激发.CRT激发荧光物的辐射光强度由电子束的速度和电子的数目决定,而电子数目与电子束的扫描步调同步,这使得不同位置的荧光粉发出不同强度的光.在正常视距下,人眼看到的色彩是这3种光的空间平均,因此CRT是加色成色系统.

由于CRT显示器的色彩控制是通过红、绿、

蓝三色电子枪的电压控制来实现,因此,CRT的完全定性需要将3色激励值(CIE XYZ标准三色值或其他三色值)表示为电压随空间变化的函数.为了简单有效地为CRT显示器定性,通常要做以下3个假设,即空间均匀性、电子枪独立性和荧光物一致性<sup>[1]</sup>.其中,空间均匀性是假设CRT显示器的色彩定性不随位置的变化而变化;电子枪独立性则假设3种荧光物以及它们的激发机制不会相互作用;而荧光物一致性则假设荧光物辐射光的相关功率谱分布不随驱动电压的变化而变化.在这种假设下,每个电子枪在电压 $v$ 下的辐射光谱可以表示为

$$h = (v/v_{\max})^{\gamma} h(\lambda) \quad (1)$$

其中, $v_{\max}$ 是最大电压; $h(\lambda)$ 是最大电压对应的辐射光谱; $\gamma$ 即通常说的显示器伽马值,大多数显示器的伽马值都在2.2左右.这个模型只是一个简单的近似模型,有人对其做了一些修正<sup>[2]</sup>.基于该参数模型,只要经过少量的测量就可以为显示器定性.

为了在CRT显示器上显示精确的颜色,还必须得到定性函数的反变换,即从CIE XYZ三色激励值到电子枪驱动电压的变换关系.由于定性是基于单个电子枪的,因此可以先将CIE XYZ基色线性变换到荧光物基色,再通过代表每个电子枪操作的参数模型来得到反变换.这个反变换结果包括了一个 $1/\gamma$ 的指数形式,被称为伽马校正.由于注意到如下问题,即如果对伽马校正后的信号进行量化,那么在较高的电压幅值处会相应有较大的量化间隔,而人眼在该区域的敏感度则相对较低,因此,在数字系统中(或者在有限带宽系统的传输中)若量化前对三色激励值进行伽马校正,则相对于不使用伽马校正的系统,能够减少视觉上可感知的误差和轮廓周线.

在荧光物能够显示的颜色色阶内,使用以上模型能够很好地重现色彩,但如果要显示的颜色位于CRT荧光物全部色阶之外,则会产生严重的误差,这是广播电视最主要的色彩误差来源.此外,关于CRT定性的3个假设也存在一定的问题,即电子枪独立性和荧光物的一致性虽然经过事实检验,已经证明在大多数情况下都成立<sup>[3]</sup>,但是大多数CRT显示器在同一驱动电压下,总是屏幕中央最亮,越接近屏幕边缘,亮度越低,这种差异有时能达到25%,因此严格来说,该假设并不成立,但由于人眼本身在整个视野中的敏感度也并不均匀,而且人眼对屏幕上亮度的平滑过渡适应性很强,因而由CRT空间不均匀性造成的误差并不显著,而且还可以通过某些

算法<sup>[4]</sup>校正。

## 1.2 全色打印机( Contone Printers )

全色打印机是利用减色成色原理在特殊纸或透明介质上产生颜色.这种减色重现是通过使用不同浓度的青色、洋红、黄色颜料来分别吸收不同量的红、绿、蓝谱域的光.每种颜料则吸收它的补色,而传送其余谱域的光,其吸收量由颜料的浓度决定。

减色原理的工作过程如图1所示。

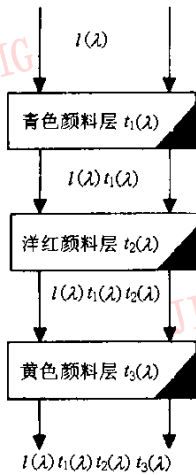


图1 减色成色过程

如果入射光的光谱为  $I(\lambda)$ ,那么穿过3层传导介质后的光谱为

$$g(\lambda) = I(\lambda)t_1(\lambda)t_2(\lambda)t_3(\lambda) \quad (2)$$

其中  $t_i(\lambda)$  为第  $i$  层的光谱传导率.如果每层颜料都是透明的(即它们不会分散入射光),而且它们的吸收系数是与其浓度成正比的(Bouguer-Beer 法则),那么,第  $i$  层的光学密度(即该层传导率的对数)可表示如下

$$d_i(c_i; \lambda) = \log_{10} t_i(c_i; \lambda) = -c_i d_i(\lambda) \quad (3)$$

其中  $t_i(c_i; \lambda)$  是第  $i$  层颜料的传导率;  $c_i$  是该层浓度,值在0到1之间;  $d_i(\lambda) = d_i(1, \lambda)$  是最大浓度时的光学密度.这样,最终传出的光谱可以表示为

$$g = L [10^{-D \times c}] \quad (4)$$

其中  $L$  为一对角阵,代表了入射光谱,  $c = [c_1 \ c_2 \ c_3]^T$  是颜料浓度矢量,  $D = [d_1 \ d_2 \ d_3]$ .在纸介质印刷中,传导光会被纸的表面反射回来,再一次通过颜料层,但只要对矩阵  $L$  进行修改,就可以对反射性介质使用相同的表达式。

现今大多数连色打印机都使用了颜料热扩散技术.在这种系统中,颜料是通过热扩散从发送薄膜上传送到打印介质上,而且除青、洋红、黄3种颜料外,

这种系统中通常还会使用黑色的颜料,以求能获得更大的对比度,并使之能更好的重现灰色.有关热扩散物理过程的详细介绍见文献[5].

连色打印机的标度需要将 CIE XYZ 三色值转换为3种颜料的浓度,为了计算方便,常假设三种颜料具有互不交叠的矩形吸收函数,这称为 block dye 假设,但在实际应用中,颜料通常并不满足 block dye 假设,而是具有平滑的吸收曲线,而且这些颜料并不是完全透明的.由于 Kubelka-Munk 法则<sup>[6]</sup>更全面地考虑了这些因素,因此得到了比 Bouguer-Beer 法则更广泛的应用.在工作中如果要很精确地确定模型参数,将是一件非常复杂和困难的工作,因为在介质和颜料层中还存在着一些连 Kubelka-Munk 也没有考虑到的反应,因此纯经验方法经常被用来为连色打印机定性.而典型的经验方法中,总是先通过测量在一系列成栅格状分布的控制值下打印机的输出颜色,即通过采样来确定从设备控制值到设备独立彩色空间的映射,而且有很多基于插值的方法可被用来确定这一映射的反变换<sup>[7]</sup>,通常最后结果是一个查找表,其值对应于色彩空间内的一个均匀栅格.此外经验方法还有基于神经网络<sup>[8]</sup>和迭代<sup>[9]</sup>的方法。

许多年来,人们一直使用基于卤化银的成象法来制作全色图象,但现在已经又出现了几种新技术,可以制作出精美度可媲美照片效果的图象,如激光热打印(laser thermal printing)就是其中应用最广泛的一项技术.激光热打印最早出现在1971年,研究者使激光通过色带基座而将颜料传送到纸上.由于激光热打印过程实际上是一个升华(sublimation)打印过程,即伴随着不定量的消融(ablation)过程,因此有时也称之为激光热升华打印.直到今天,这项技术并没有发生质的变化,但色带已换成了上面覆有染料的粘合剂(binder),同时激光系统也由原来昂贵、需要繁琐维护的 YAG 激光,换成了今天可靠、低噪音、无需维护的二极管激光器.正是这些变化使得激光热打印技术的商业化成为可能.有关激光热打印过程,参见文献[10][11].

## 1.3 半色打印机( Halftone Printers )

连色打印机需要对颜料浓度实施可靠而准确的空间控制,但这一点很难做到,如今多数桌面打印机使用了较简单的半色打印机,像 CRT 显示器一样,半色打印机也利用了人类视觉系统的低通特性,即人眼看到的颜色总是图象上某一小块区域色点的谱平均,

但与连色打印机不同的是半色打印物中某一色点内颜料的浓度是恒定不变的,因而半色打印机更便宜、更易制造,现在有多种技术可以制造出半色色点,如喷墨(inkjet)、热传送(thermal transfer)和电子摄影术(electrophotography)。

由于半色打印机中的各种颜料在它们的重叠区域可以制造出 $2^K$ 种颜色,即相当于 $K$ 种原色(Neugebauer原色)组合可以出现的颜色数,因此,半色打印机的色彩重现过程就相当于以这 $K$ 种颜色为原色的加色过程。在Neugebauer的半色打印机模型中,某个半色区域的总反射率(即该点的颜色信息)可被表示为各Neugebauer原色的加权和,而各原色的权值由其相对区域决定。这里用“宏反射率”是因为该值是一不均匀区域内的反射率平均值。虽然这种Neugebauer模型既可以用在三色空间,也可以用在光谱域,有关谱Neugebauer模型详见文献[12],但实际的半色过程包含了很多Neugebauer模型中没有考虑到的因素,比如光在纸中的渗透和分散(Yule-Nielsen效应)要比Neugebauer模型复杂得多。有关谱Neugebauer模型及其经验校正详见文献[13]。

虽然近年来半色打印取得了一些令人鼓舞的进展,但至今仍未有半色打印过程和Yule-Nielsen效应的详实精确的模型,妨碍直接使用Neugebauer模型的最主要障碍是控制值和不同颜料打印区域的关系是不可预知的,因此,即使可使用模型方法为半色打印定性,但还是需要在模型中加入经验性的成分,当然也可以像为连色打印定性那样,使用纯经验方法。由于这里的模型不是线性的,而且该模型关于设备控制值是不可分解的,因此不管是基于模型,还是基于经验,定性函数的反变换都要靠数值计算,而不能靠推导来得到,其结果通常都是一个多维查找表。尽管基于模型的方法可以明显地减少定性所需的测量次数,但由于大多数模型都忽略了很多影响半色打印的因素,其精确度有限,因此在图象艺术和印刷业等对图象质量有较高要求的应用中,宁愿使用需要大量测量的经验性方法。有关模型化方法和经验化方法的详细对比见文献[14]。

在所有的半色打印机中,最流行的应当是喷墨打印机。由于喷墨打印机能以低成本和高分辨率实现彩色输出,目前应用已经占到了市场的50%以上。其喷墨技术主要可分为按需滴落法(drop-on-demand)和连续喷射法(continuous jet),如图2所示。

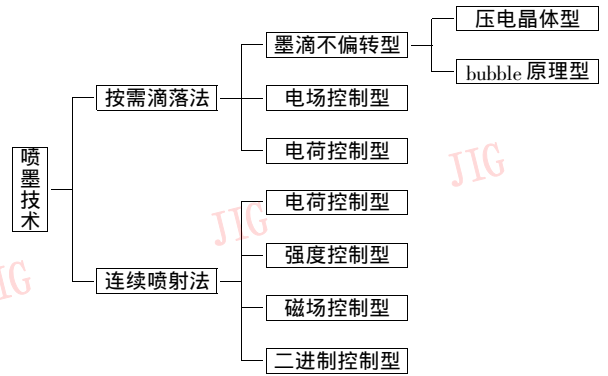


图2 喷墨技术分类

如今各种喷墨技术的发展相当快,尤其在bubble技术出现后,几乎所有的普通喷墨打印机都采用了这种技术。bubble原理是通过将微管道中的墨水加热,使其产生气泡,从而将墨水挤出管道而产生墨滴的。此原理的特点是结构简单、驱动信号简单(脉冲幅值 $<25V$ )、易集成、易实现高分辨率等。此外还有一种新近出现的热传送技术,其打印质量可达照片效果。该技术打印的字符具有环境稳定性和很短的干燥时间,由于其采用油性墨水,故使色饱和度好、分辨率高,但喷墨头的生产成本很高,原因是它分别基于喷墨盒的固体喷墨技术和色带的热升华技术<sup>[15]</sup>。目前对于喷墨技术的研究主要集中在以下4个方面:①关于墨滴的形成理论与实验研究;②关于喷嘴结构的优化设计与制造;③关于适应不同要求墨水研究;④关于高速高质量彩色图形图象输出设备的研究。有关喷墨打印技术的详细介绍,参见文献[15][16]。

#### 1.4 平板显示器

为了克服CRT显示器体积大、笨重、功耗大等缺点,人们一直致力于CRT平板化的研究。目前,在液晶显示屏(LCD)、等离子显示屏(PDP)和场发射显示屏(FED)等方面的研究已经取得了相当大的进展,有的产品也已逐步进入市场,并将它们用在便携式电脑或壁挂式HDTV显示器上<sup>[17]</sup>,大有取代CRT显示器的趋势。下面简要介绍这几种显示技术的成象原理和发展状况。

大家知道,PDP<sup>[18-20]</sup>是利用气体放电而发光的,它与正常的辉光放电不同的是,PDP的发光效率低,且极限分辨率与充气压力成正比,此外,表面放电型AC PDP还存在一个分辨率的理论极限。彩色PDP虽然有许多不同的结构,但其放电机制都是相同的<sup>[18]</sup>。PDP的彩色显示机理是先彩色PDP的前后屏玻璃

之间制成许多放电空间,然后通过辉光放电产生的真空紫外光,激发光致荧光粉的发光来实现彩色显示,图3即是充有 Ne-Xe 混合气体的表面放电型 AC PDP 发光机理的简要剖面示意图。

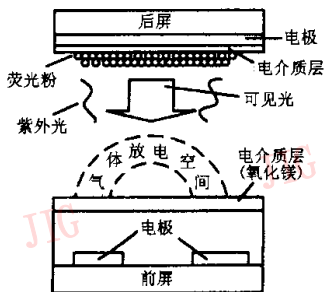


图3 AC PDP的发光机型

由于 Ne-Xe 混合气体在电压作用下,发生气体放电,其放射出的 147nm 真空紫外光能量大、强度高,所以被大多数 PDP 用来激发红、绿、蓝荧光粉发光,以实现彩色显示。PDP 一旦产生放电,其发光亮度就恒定不变。对于 CRT,通过调整阴极电压的高低就可调节亮度,而对于 PDP,只能通过控制有效放电时间的长短来控制发光亮度。

进入 90 年代,随着彩色 PDP 技术的不断进步,特别是 1993 年,富士通公司将 53cm(21 英寸)彩色 PDP 推向市场以来,彩色 PDP 就引起了世界各国显示工业界的极大兴趣,现已进入蓬勃发展的时期。尽管如此,彩色 PDP 放电的基本特性还不完全为人所知,因此提高 PDP 的发光效率、降低 PDP 的着火电压仍是今后 PDP 研究者的主要任务之一。

FED<sup>[21]</sup>将 CRT 中的热电子枪改换为平面场电子冷发射尖端阵列,这实际上是 CRT 和平板显示的有机结合,虽然这种集 CRT 和平板显示的优点于一身的技术,应该是 CRT 平板化的最佳方案,但由于 FED 的场电子发射尖端阵列工艺难度大,且要求超高真空,造价太高,加之 FED 电子束流能量低,难以激发高压彩色荧光粉,而低价彩色荧光粉的色纯度又差,其图象彩色逼真度远达不到 CRT 的水平,因此, FED 要进入市场仍存在一定困难。由此可见,研制出能在低电压和恶劣环境下保持良好特性的荧光粉,是目前该领域的主要研究任务。针对 FED 的缺点,国内有人提出了场离子显示屏(FID),该技术是利用场离子发射比场电子发射容易实现的原理,使 FID 显示屏的场离子发射在低尖端表面场强、低大气压下都可进行,

而不像场电子发射那样,要求在超高真空下进行,同时又可以获得与 FED 同等水平的清晰度<sup>[22]</sup>。

近 30 年来,液晶显示技术也取得了长足的发展,其应用之广、显示质量之卓越,均优于其他平板显示技术。现在看来在台式电脑和中小尺寸电视机领域, LCD 取代 CRT 只是一个时间问题。此外,以多晶硅 TFT-LCD 为代表的微显示(Micro Display)面向取景器(Viewfinder)虚拟显示、投影仪、头盔成像系统以及大屏幕电视等方面的庞大市场已成为 LCD 工业的第二个主要生长点。近年来,为进一步降低 LCD 显示设备的功耗和体积,又兴起了对反射型 LCD<sup>[23]</sup>的研究。此外, PALCD(等离子体选址液晶显示器)利用了等离子体来实现对 LCD 的选址,其在分辨率、功耗等方面都优于现有的 PDP 显示器,因而被认为极有希望取代 CRT,用于大屏幕 HDTV 和多媒体显示<sup>[24]</sup>。

### 1.5 其他彩色显示和打印技术

彩色发光二极管(Color LED),电致发光(Electro-Luminescent Display)等技术都是近年来出现的一些显示技术<sup>[25-26]</sup>,这些技术都克服了 CRT 显示器体积大、笨重、耗电等缺点,且大部分新技术都类似于 CRT 显示器,即利用加性成色原理成像。另有一种方法是利用了人眼的时间低通特性的 FSC(field sequential color)彩色产生法,在该法中,红、绿、蓝图象帧不是同时,而是极快地被先后投影到屏幕上<sup>[27-28]</sup>。

在彩色打印方面的研究也在最近取得了很大新的进展,如半色打印机在分辨率和打印速度上都有了很大进步,同时通过使用改进的颜料或 3 种以上的颜料,打印机的全色阶也被扩大了,这种打印机被称为“高保真打印机”<sup>[29-31]</sup>。

但直至今日,上述各种新设备的使用技术仍未成熟,如今随着这些设备日益广泛的应用,其精确性和设备建模已成为彩色成像研究的热门领域。

## 2 彩色记录系统

在对各种图象进行数字化处理之前,现实世界的各种连续空间上的模拟图象必须先经过采样和量化。

### 2.1 光谱辐射计和分光光度计(Spectroradiometers and Spectrophotometers)

光谱辐射计直接对谱分布采样,其工作原理见图 4,即光线经过透镜校准后,被分光器分成各种谱成分(常为 R、G、B 三束光),然后分别由记录设备记录下

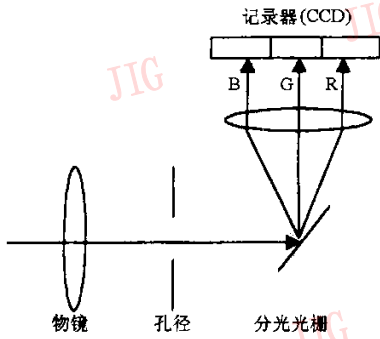


图4 光谱辐射计测量光路示意图

来.其中的分光器常用折射光栅,因为经过折射光栅后,光在记录器平面上的位移与光的波长成正比,这样就简化了标度过程.现代的光谱辐射计大都使用电荷耦合器件(CCD)阵列作记录器,但CCD输出常要经过插值和增益补偿,以得到合适的采样间隔和均匀标度的设备输出.光谱辐射计记录的光谱能量不一定局限于可见光谱,比如有的遥感卫星上携带的多谱段扫描仪还可以记录可见光谱以外的红外光谱.

分光光度计主要用于记录不发可见光物体的反射率或谱传导率.分光光度计将测量结果表示为两个光谱辐射测量值的比,其内部结构及测量光路见图5,目标物体的反射率被表示为与其与标准物体光谱辐射测量值的比.若令 $I(\lambda)$ 是光源的辐射光谱,记录设备在 $\lambda_0, \lambda_0 + (K - 1)\Delta\lambda$ 范围内作 $K$ 次间隔为 $\Delta\lambda$ 的谱测量,则某物体的测量值可表示为

$$m(k) = d_k I(\lambda_0 + k\Delta\lambda) / r_s(\lambda_0 + k\Delta\lambda), \quad (5)$$

$$0 \leq k \leq (K - 1)$$

其中 $d_k$ 为记录器在 $(\lambda_0 + k\Delta\lambda)$ 的灵敏度,而测量物体的反射率可由下式决定

$$r_o(\lambda_0 + k\Delta\lambda) = \frac{m_o(k)}{m_s(k)} r_s(\lambda_0 + k\Delta\lambda), \quad (6)$$

$$0 \leq k \leq (K - 1)$$

其中 $r_o(\lambda_0 + k\Delta\lambda)$ 和 $r_s(\lambda_0 + k\Delta\lambda)$ 分别为被测物和

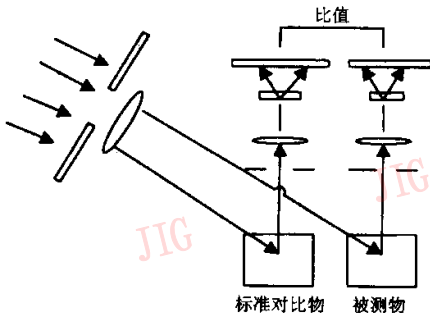


图5 分光光度计测量光路示意图

标准物体在 $\lambda_0 + k\Delta\lambda$ 谱段的反射率 $\frac{m_o(k)}{m_s(k)}$ 为两者在该谱段的测量值之比.

由于现实世界中大部分物体的反射率都是波长的平滑函数,且多数分光光度计可以工作于比光谱辐射计大的采样间隔,因此反射率通常以5,10,20nm的间隔进行采样.不仅如此,分光光度计对标度的要求也不如辐射计严格,因此分光光度计要比辐射计便宜得多,也稳定得多.

实际上,由于光谱辐射计和分光光度计的设计要考虑很多上面叙述中所没有涉及到的因素,如两种设备都受到偏离以上理想情况的系统误差(漫射光、记录器的非线性、极化效应、光照和测量条件的变化、未考虑到的荧光和热色效应(thermochromism)等)和非系统误差(记录器噪音和光子流的量子波动等)的影响,因此,需要依据已知的标准辐射率和反射率作精确的校准.有关该方面的详细讨论和较新的研究成果见文献[32].

直接进行光谱信息采样的彩色记录设备有以下特点(1)由于总的光谱能量被分割成一系列的谱采样值,因此必须采用大的测量孔径和长的合成时间才能得到可靠的测量结果(2)设备中的光学部件价格昂贵,不适合在桌面系统使用.由于采用三色原理的设备虽然精确度稍低,但花费少,速度快,且可提供可接受的色彩性能,因此,光谱辐射计和分光光度计主要用于色彩校正,因为这种应用实时性要求低,所以允许较大的测量孔径和较长的测量时间.

### 2.2 照相胶片记录

尽管胶片记录不是数字设备,但被用于很多数字彩色成象设备的输入.在这种设备中,入射光线被透镜聚光到胶片上,胶片有3层,每层覆盖一层带有感色剂的晶状感光乳剂,它们分别对蓝、绿、红光敏感.当对曝光过的胶片进行化学处理时,曝光过的晶状卤化银即被转换成银粒,未曝光的晶体则被去除,而且某层上某一固定位置银粒的个数由该点对应谱段入射光的能量决定,这样3层银粒的空间分布就记录了图象蓝、绿、红谱段的空间分布.基于减色成色原理,用青色、洋红、黄色分别替代红、绿、蓝三层的银粒,就可以得到可视彩色图象.

但要注意的是,银粒密度与对应谱段入射光强的关系是高度非线性的,同时,颗粒形成的随机性也为记录过程引入了噪声,这种噪声被称为胶片颗粒

噪声. 这种胶片颗粒噪声常被看作泊松分布和高斯分布, 并在记录图象中构成乘性噪声.

### 2.3 比色计(Colorimeters), 摄像机和扫描仪

此3类设备工作原理非常类似, 即它们都是将图象通过数个具有不同谱传导率的彩色滤光镜进行分色, 然后使用电子传感器对滤光结果进行采样.

其中, 色度计主要用于彩色显示器的色彩校正, 这种设备不需要做任何空间采样, 其每一个色彩通道均有一个记录器, 并在各通道的孔径上只作一次色彩平均测量.

数字摄像机捕获图象的方式与传统的摄像机大体相似, 所不同的是, 前者使用一个二维的 CCD 阵列来记录数据, 而不是用胶片, 且数字摄像机必须在一次曝光中同时完成空间采样和色彩过滤操作. 其中, 有一种方案分别使用了3个 CCD 阵列和红、绿、蓝滤光器, 这时必须有精确的机械和光学对准, 才能保证不同通道记录的图象相互对应. 通常, 绿通道要在水平方向上位移半个像素, 以提高单个 CCD 阵列所能达到的带宽. 另一种更经济、也更常用的方案是在半导体处理过程中, 在 CCD 阵列上叠放一层彩色滤光器来达到目的. 由于绿光谱域在视觉感知上要比其他谱域重要, 因此滤光器的排列常使得记录的绿、红、蓝像素比为 2:1:1 或 3:1:1.

扫描仪主要用于扫描纸上或透明介质上的图象, 自带有光源. 由于物体是静止的, 因此扫描仪不需要在一次曝光中记录整个图象数据. 一般的滚筒式和平板式扫描仪每个通道只有一个传感器, 然后用该传感器扫描整个图象进行空间采样, 由于任何时间都只有一个传感器在工作, 因此这种设备的定性相对简单得多, 也精确得多; 而常见的桌面扫描仪内, 含3个线性 CCD 传感器, 分别带有红、绿、蓝彩色滤光器, 这使得3个色彩通道的数据可被同时记录, 以满足桌面系统对速度的要求; 另有一种扫描仪使用3个不同的照明灯和一个线性 CCD 阵列, 先后通过3次测量得到一个三波段图象.

由于色度计、数字相机和扫描仪的工作原理极其相似, 因此本文统一用扫描仪的模型来表示, 而扫描仪系统框图见图6. 其工作原理是当扫描仪内的灯发出的光被扫描图象上某一单位区域反射后, 将经过透镜进入一个光线分离器, 在这里被分成几束光, 然后分别进入各自的滤镜通道, 并在通道末端(孔径处)被记录器记录下来. 整个过程的数学表述如下

$$t_i = M^T L_i r + \epsilon \quad (7)$$

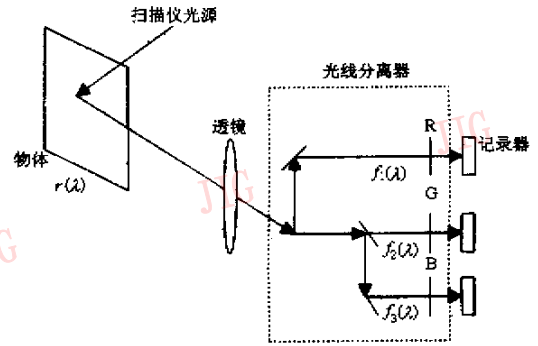


图6 彩色扫描仪的原理图

式中,  $t_i$  是扫描仪记录下来的  $K \times 1$  矢量,  $K$  为通道数;  $r$  是反射率采样, 为  $N \times 1$  矢量;  $L_i$  是  $N \times N$  的对角矩阵, 其对角线为扫描仪光源的辐射率采样;  $M = [m_1, m_2, \dots, m_i, \dots, m_K]$  是  $N \times K$  矩阵, 其列  $m_i$  为第  $i$  通道滤光镜传导率与记录器敏感度乘积的采样矢量;  $\epsilon$  是  $K \times 1$  的测量噪声矢量.

一般对于色度计和彩色相机, 被测物通常是发光物体和被外界光源照亮的物体, 这时式(7)中的  $L_i r$  定义为被测物的谱辐射率, 而且根据色度计和彩色相机记录到的数据, 通过线性变换, 就能得到被测物的标准三基色(CIE XYZ)值; 可是对于彩色扫描仪, 情况要稍复杂一些, 因为扫描仪中照明物造成的照明环境通常不同于被测物的观测环境, 即除照明物的因素外, 还有滤镜、光学部件、记录器引起的一系列经济上和技术上的限制, 设计者通常通过设计不同的滤波器  $\{f_i(\lambda)\}_{i=1,2,3}$  来解决这一问题, 文献[33]还定量分析比较了一些滤波器的性能差异. 此外, 式(7)的模型还要受到诸如漫射光、红外和紫外辐射、记录器有限动态范围等系统误差的影响<sup>[34]</sup>, 但考虑到扫描仪大多被用来处理使用减色原理的印刷品, 因此只要能从扫描仪的记录数据中推断出该印刷品中的青、洋红、黄色颜料的浓度变化就行了. 这个设计上的折衷既降低了对扫描仪的色度精确性的要求, 也大大降低了扫描仪的成本, 从而成为现在市面上大多数扫描仪的设计标准. 现在已有很多的高保真印刷品均采用了3个以上基色的印刷技术, 对于这种印刷品, 若使用一般的扫描仪, 精确度就会大打折扣.

### 2.4 多光谱成象系统(Multispectral Imaging Systems)

在遥感应用领域, 多光谱扫描仪通常使用窄带谱滤波器来记录光谱的不同谱段, 记录方式非常类

似于2.3节中的仪器,不同的是其记录频段不是局限于可见光谱,通常包括红外、可见、微波谱段。

大多数多光谱遥感应用都是为了识别所得图象,看其是否属于某一已知分类。虽然前面谈到的图象记录系统,其主要目的是为了在视觉上最大限度地保存图象信息,但式(7)同样适用于多光谱成象系统<sup>[35]</sup>。不仅如此,多谱成象系统的构造也类似于前面讨论的彩色记录系统。这样,有关彩色记录设备的设计和分析的很多理论和原则同样适用于多光谱成象系统的设计和分析。

### 2.5 主要成分记录设备(Principal Component Recording)

自然界多数物体的反射光谱都是波长的平滑函数。照片、印刷品、或绘画的谱也是如此。此类谱就可以用少数主要谱成分来精确描述。通过对反射光谱的研究表明,3至7个主要成分就可以提供大多数彩色作品反射谱的满意重现<sup>[36~38]</sup>,现在基于主要成分的物体反射光谱的线性模型已经被很多研究者用于照明和表面反射率数据的恢复,以及一些彩色校正应用。此外,主要成分方法已被用于分析卫星多光谱图象,而且已有人提出使用基于主要成分的记录器来获取卫星图象。

但自然界中还有很多自然发生的反射光谱并不满足平滑函数的假设,比如某些矿物质中由于薄膜干涉产生的颜色、某些鸟类羽毛和碳酸盐贝类上的彩虹色。在此类物体的反射光谱中使用主要成分方法会导致较大的误差。

## 3 结束语

本文介绍了当前常用的和新近出现的彩色重现和记录系统的原理,并结合实际讨论了这些系统的建模、标度,以及设计上遇到的一些问题及解决方法。随着新的彩色记录和打印、显示技术的出现,这些技术的建模、标度已给人们提出了新的课题。虽然目前还很难预期这些新设备的技术本质,但可以肯定的是,为了得到更大的设备全色阶,会有一部分设备使用3个以上的基色,如前面提到的“高保真度打印机”,因此这种系统的色彩坐标系尚有待研究<sup>[29~31]</sup>。

### 参考文献

- Brainard D H. Calibration of computer controlled color monitor. *Color Res. Appl.* 1989, 14(2):2334.
- Berns R S, Motta R J, Gorzynski M E. CRT Colorimetry. Part I: Theory and Practice. *Color Res. Appl.* 1993, 18(10):299314.
- Berns R S, Motta R J, Gorzynski M E. CRT Colorimetry. Part II: Metrology. *Color Res. Appl.* 1993, 18(10):315325.
- Cook J N, Sample P A, Weinreb R N. Solution to spatial inhomogeneity on video monitors. *Color Res. Appl.*, suppl., 1993, 18(10):224340.
- Hann R A, Beck N C. Dye diffusion thermal transfer (D2C2) color printing. *J. Imaging Technol.* 1990, 16(12):238241.
- Schunn A Berge. *Practical Color Measurement*. New York: Wiley, 1994.
- Rajala S A, Kakodkar A P. Interpolation of color data. In: Proc. IS&T/SID Color Imaging Conference: Transforms and Portability of Color, 1993(11):180183.
- Kang H R, Anderson P G. Neural network application to the color scanner and printer calibrations. *J. Electron. Imaging*, 1992, 1(4):125134.
- Chang J Z, Bouman C A, Allebach J P. Recent results in color calibration using sequential linear interpolation. In: IS&T's 47th Ann. Conf., ICPS '94: Physics and Chemistry of Imaging Systems, 1994(5):500505.
- Charles DeBoer. High-quality dry laser thermal printing technology: Principles and equipment. In: Conference Proceedings (Lasers and Electro-Optics Society Annual Meeting) CLEO, 1997, 1(5):173174.
- Charles DeBoer. Laser thermal media: The new graphic arts paradigm. *Journal of Imaging Science and Technology*, 1998, 42(1):6369.
- Viggiano J A S. Modeling the color of multi-colored halftones. In: Proc. TAGA, 1990, 4462.
- Balasubramanian R. Colorimetric modeling of binary color printers. In: Proc. IEEE Int. Conf. Image Processing, 1995(11):3132711-330.
- Kang H. Printer-related color processing techniques. In: Proc. SPIE: Color Hard Copy and Graphic Arts IV, 1995, 2413:410419.
- Hiroshi Onishi, Soichiro Mima. Thermal dissolution ink transfer for full-color printing. *Transaction on Electron Devices*, 1993, 40(4):6974.
- Hue P Le. Progress and trends in ink-jet printing technology. *Journal of Imaging Science and Technology*, 1998, 42(1):4962.
- Werner K I. The flat panel's future. *IEEE Spectrum*, 1993, 30(11):1826.
- 黎正才. 等离子体显示技术. *真空电子技术*, 1996(5):3753.
- Weber L F. The performance and promise of color AC plasma display. In: ASIA Display '95, 1995, 373376.
- Nakamura *et al.* Drive for 40-in-diagonal full-color AC plasma display. In: SID '95 Digest, 1995, 807810.
- 罗恩泽等. 场发射显示屏的基本原理和结构设计. *现代显示*, 1996(4):412.
- 罗恩泽等. 场离子显示屏:一种新型彩色平板显示屏. *现代显示*, 1999(4):2029.
- Mosley Alan. Reflective color LCDs. *Information Display*, 1998, 14(10):18-22.
- 贾正根. 等离子体显示器和等离子体选址液晶显示器. *现代显示*, 1999(2):3640.
- Castellano J A. *Handbook of display technology*. New York: Academic,

- 1992.
- 26 Sherr S. Electronic displays( 2nd ed ). New York : Wiley ,1993.
- 27 Schreiber W F. Fundamentals of electronic imaging systems : Some aspects of image processing( 3rd ed ). New York : Springer-Verlag ,1993 ,218219.
- 28 Youse J M. Mirrors on a chip. IEEE Spectrum ,1993 ,30( 11 ) :2731.
- 29 Ostromoukhov V. Chromaticity gamut enhancement by heptatone multi-color printing. In : Proc. SPIE : Device-Independent Color Imaging and Imaging Systems Integration ,1993 ,1909 :139150.
- 30 Boll H. A color to colorant transformation for a seven ink process. In : Proc. SPIE : Device-Independent Color Imaging and Imaging Systems Integration , 1994 ,2170 :108118.
- 31 Granger E M. Press controls for extra-trinary printing. In : Proc. SPIE : Color Imaging-Device-Independent Color ,Color Hard Copy ,and Graphic Arts , 1996 ,2658 :147150.
- 32 McCluney R. Introduction to Radiometry and Photometry. Boston , MA : Artech House ,1994.
- 33 Vora P L ,Trussell H J. Measure of goodness of a set of color scanning filters. J. Opt. Soc. Amer. A ,1993 ,10( 7 ) :14991509.
- 34 Farrell J E ,Wandell B A. Scanner linearity. J. Electron. Imaging. 1993 ,2( 7 ) 225230.
- 35 Campbell J B. Introduction to remote sensing. New York : Guilford ,1987.
- 36 Wandell B A. The synthesis and analysis of color images. IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell. ,1987 ,PAMI-9( 1 ) 213.
- 37 Marimont D ,Wandell B A. Linear models of surface and illuminant spectra. J. Opt. Soc. Amer. A ,1992 ,9( 11 ) :19051913.
- 38 Vrhel M J ,Gershon R ,Iwan L S. Measurement and analysis of object reflectance spectra. Color Res. Appl. ,1994 ,19( 2 ) 49.
- 常 城 1977 年生 ,1998 年毕业于西安交通大学信息与通信工程系 ,现为西安交通大学通信与信息系统硕士研究生 ,主要研究方向为模式识别、高阶累积量信号处理等。
- 齐 春 1955 年生 ,博士 ,西安交通大学图象处理与识别研究所副教授 ,1982 年毕业于西安电子科技大学 ,获学士学位 ,1989 年于国防科技大学获硕士学位 ,主要研究方向为图象检测与跟踪 ,模式识别 ,高阶累积量信号处理等 ,已发表论文 10 余篇。
- 樊 鑫 1977 年生 ,1998 年毕业于西安交通大学信息与通信工程系 ,现为西安交通大学通信与信息系统硕士研究生 ,感兴趣的方向为图象处理的应用 ,图象检测等。