

一种激光彩虹全息印刷品的颜色测量方法

冯之幸¹ 章春娥¹ 王岩松²

(¹ 北京交通大学计算机与信息技术学院, 北京 100044)
² 北京征图新视科技有限公司, 北京 100022)

摘要 由于激光彩虹全息印刷品表面光栅的特殊光学特性,其在白光下的成像会产生随机的彩虹干涉条纹,增加了全息印刷品颜色测量的难度。针对激光彩虹烟包印刷品的颜色测量问题,设计了一种全息印刷品的专用全息照明光源——穹顶光源,并以穹顶光源为照明基础构建了6通道线扫描电荷耦合器件(CCD)成像系统。在该环境下,采用基于主成分分析的光谱反射率重建方法对激光彩虹全息印刷品进行颜色测量。实验证明,提出的颜色测量方法,具有光谱重建精度高的特点,可以有效解决激光彩虹全息印刷品的颜色测量难题。

关键词 全息;激光彩虹全息;穹顶光源;主成分分析;光谱反射率重建

中图分类号 TS802.2; TS802.6; TS853⁺.6 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0933001

A New Method of Color Measurement for Laser Rainbow Holographic Printed Matter

Feng Zhixing¹ Zhang Chun'e¹ Wang Yansong²

(¹ School of Computer and Information Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)
² Beijing Focusight Technology Company Limited, Beijing 100022, China)

Abstract Owing to the special optical properties of surface gratings of laser rainbow holographic printed matter, the imaging by white light illumination can generate rainbow-colored interference fringes, which increase the difficulty of color measurement of holographic printed matter. To resolve this problem of laser rainbow cigarette packet product, a special light source--dome light which is special for holographic printed matter is designed, and a 6-channel line scanning charge coupled device (CCD) imaging system based on the dome light is constructed. In the environment, color measurement for laser rainbow holographic printed matter is made by using spectral reconstruction method based on principal component analysis technique. The experiments show that in spectral reflectance reconstruction, proposed method of color measurement has the characteristics of high-precision, and is effective to solve the problem of color measurement of laser rainbow holographic printed matter.

Key words holography; laser rainbow holography; dome light; principal component analysis; spectral reflectance reconstruction

OCIS codes 330.1710; 100.3005; 110.2970

1 引 言

激光彩虹全息印刷品的微观表面通常由凹凸不平的各种衍射条纹构成,被拍摄的物体表面的光强及其相位信息往往被记录在这些浮雕状的衍射条纹之中。在白光下对这种全息印刷品进行观察时,每一种波长的光都会被全息印刷品表面的干涉条纹所

衍射,且具有不同的衍射角,所以在不同的角度观看时,有不同的颜色成像^[1-2]。

激光彩虹全息防伪技术在特种印刷中得到大量应用,常见的有钞票印刷和烟包印刷。特种印刷中主要有以下三类常见的激光全息印刷产品:1)在彩虹全息纸张上覆盖印刷图案;2)在印刷图案上覆盖

收稿日期: 2014-03-13; **收到修改稿日期**: 2014-05-30

基金项目: 中央高校基本科研业务费(2012JM037)

作者简介: 冯之幸(1991—),女,硕士研究生,主要从事图像检测与测量方面的研究。E-mail: 13125132@bjtu.edu.cn

导师简介: 章春娥(1976—),女,博士,讲师,主要从事数字图像处理与数字水印技术、印刷品光学成像、信息安全等方面的研究。E-mail: chezhang@bjtu.edu.cn(通信联系人)

透明全息膜;3) 在印刷图案上制作局部的全息防伪标记。由于全息印刷产品其表面光栅的特殊光学特性,经过电荷耦合器件(CCD)成像后的印刷品表面的彩虹全息信息会出现随机干涉条纹,这大大增加了全息印刷产品的颜色测量难度。激光彩虹全息印刷品的呈色成像和颜色重建质量的提高值得研究。

目前国内外针对激光彩虹全息技术原理的研究较多,但对于激光彩虹全息印刷品表面衍射现象造成的颜色测量难题进行的研究较少。戚永红^[3]采用多角度分光光度仪对激光全息包装材料在包装印刷中的呈色性能进行探讨,只能在固定的角度进行颜色测量以减少误差,没有解决全息印刷品衍射现象造成的测量难题。杨鑫等^[4]为了在计算机制彩色彩虹全息图输出之前定量得到再现像的色彩保真度,提出了一种采用数值再现进行色差评价的方法,该方法在制图时进行彩虹全息再现像的色差评价,对时间和成本有所节省,但没有考虑实际的光源光谱分布以及印刷成像可能出现的缺陷,在实际应用中颜色再现时会出现较大色差。

曹从军等^[5]为了测量辐射复合材料的表面呈色性,采用了带积分球结构的多角度测量仪器进行测量,解决了由材料表面衍射现象产生的彩色条纹导致测量值分散的问题。万晓霞等^[2]对辐射纸的表面光栅的光学特性进行了分析,通过对光栅光度与光谱分布特点的研究,从理论上推导出光栅色度检测的方法条件,并建立了相应的光谱反射率模型进行实验,得到了采用漫射光照明条件后可以很好地消除衍射光栅对衍射光色彩的影响的结论。刘翠萍等^[6]从色度上分析研究了发光二极管(LED)用于彩色全息图照明的可行性,并对使用LED和定向照明卤钨灯照明再现的彩色全息图进行了色度测量与评价,实验证明,LED光谱成分更为均衡,再现效果与卤钨灯再现效果相差不大,同时,LED具有方向性好、体积小、便于平面分布且光波长可控,得出LED用作彩色全息图照明光源是可行的结论。

物体的光谱特性是物体表现出不同颜色的主要原因,在光谱图像中,场景物体光谱反射率独立于场景的观察环境,以光谱方式对图像场景进行记录,可更精确地表示颜色,减弱或消除同色异谱的影响,提供更加灵活的颜色处理和更精准的色彩再现^[7]。本文针对全息印刷品的成像特点,从光源到颜色测量提出了解决方案。设计了一种全息印刷品的专用全息照明光源——穹顶光源,使得光源内部的光强均匀,对全息印刷品表面的衍射光线有明显抑制,削弱

了衍射光栅的色散作用,基于穹顶光源设计了激光全息烟包印刷品的颜色测量方法。该方法以穹顶光源作为照明光源,利用一组滤光片和彩色三线 CCD 相机构建了一个 6 通道线扫描 CCD 成像系统,基于主成分分析的光谱反射率重建方法重建出了激光彩虹全息烟包印刷品的表面光谱反射率,并采用了 CIE1976 色差公式进行光谱重建评估。

2 系统设计

2.1 基于穹顶光源的 6 通道线扫描 CCD 成像系统

针对全息印刷品的成像特点,设计了一种全息印刷品的专用全息照明光源——穹顶光源,然后以穹顶光源为照明光源利用一组滤光片和彩色三线 CCD 相机构建了一个 6 通道线扫描 CCD 成像系统。该系统能对全息印刷品的衍射特性所造成的 CCD 成像干扰进行抑制,削弱全息光栅的影响,增强油墨颜色再现的效果,使全息印刷品上的图案信息和颜色信息得以复原,便于印刷品的颜色测量。

针对激光彩虹全息印刷品表面衍射光栅的光学特性^[8-9],穹顶光源采用类似积分球的照明方式,将入射角的范围扩大,并将具有高反射性的涂料均匀喷涂于内表面,保证衍射光线的充分反射,使入射光线能在 $(-\pi/2 \sim \pi/2)$ 均匀入射,遍布全息印刷品的照射表面,从而获得均匀的衍射光强,抑制衍射光栅的色散作用。涂料主要成分为聚四氟乙烯,其具有良好的漫射性,具有高达 98% 的反射比,减少了几何条件对全息印刷品的反射比的影响。

图 1 为穹顶光源横截面衍射光栅示意图。为了充分反射入射光线,防止 LED 光线直接照射到底部全息产品的表面,LED 照射颗粒放置在图中左下角和右下角的位置,下表面为放置全息产品的位置,顶部的开口作为成像线,利用线扫描 CCD 相机成像。

为了进行实际线扫描成像,设计的穹顶光源纵

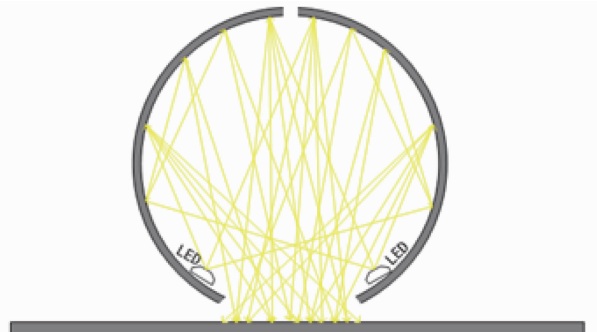


图 1 穹顶光源光学原理示意图

Fig. 1 Optical principle sketch map of dome light

向排列后长度为 500mm,即线扫描长度为 500mm,并增加了散热模块,封装后的外结构图如图 2 所示。

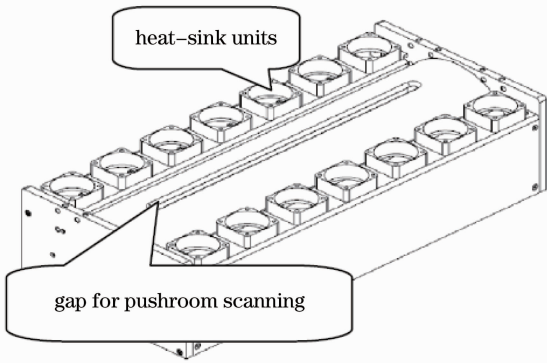


图 2 增加散热装置后的穹顶光源外结构图

Fig. 2 External structure of dome light with heat-sink units

为了在印刷工业中推广低成本且具有一定精度的印刷颜色检测评判方法,设计并构建了一个 6 通道 CCD 成像系统,该系统由三线 CCD 彩色线阵相机和一组滤光片组成,在以穹顶光源为照明光源的条件下获取全息印刷品的光谱数据。相机采用 DALSA PC30-4K80 三线 CCD 彩色线阵相机,其像元数量为 4096。相机的光谱响应曲线如图 3 所示。滤光片采用的是 Schneider 蓝色宽带滤光片 039MRC,添加滤光片后获得另外 3 个响应曲线,其峰值分布与原有 CCD 的 3 通道响应曲线的峰值分布互补。一共进行两次图像采集。使用三线 CCD 彩色线阵相机直接进行图像采集,获得 RGB 三个通道的信号输出。另外三个通道的信号输出则是在增加一组滤光片后对图像进行再次采集后得到。然后对 6 个通道的信号进行转换处理,最后得到 6 个通道的响应数据。

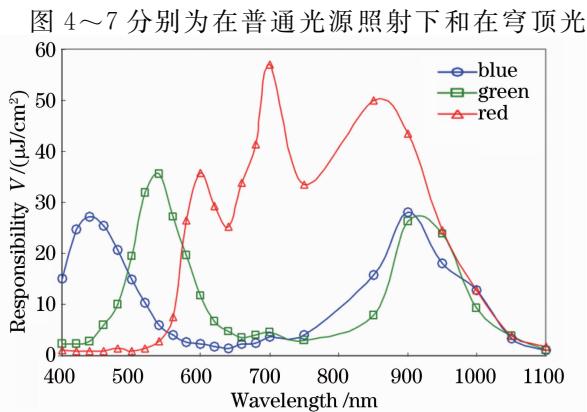


图 3 三线 CCD 彩色线阵相机光谱响应曲线

Fig. 3 Spectral response curve of three-lines CCD camera

源下采集的两种激光彩虹全息烟包产品的图像,穹顶光源下采集的图像质量明显优于普通光源。



图 4 普通光源下采集的激光彩虹全息烟包产品(红塔山经典 100)

Fig. 4 Laser rainbow holographic printed matter under the general light source (Hongtashan 100)



图 5 穹顶光源下采集的激光彩虹全息烟包产品(红塔山经典 100)

Fig. 5 Laser rainbow holographic printed matter under the dome light (Hongtashan 100)



图 6 普通光源下采集的激光彩虹全息烟包产品(贵烟)

Fig. 6 Laser rainbow holographic printed matter under the general light source (Guiyan)



图 7 穹顶光源下采集的激光彩虹全息烟包产品(贵烟)

Fig. 7 Laser rainbow holographic printed matter under the dome light (Guiyan)

2.2 基于主成分分析法(PCA)的光谱重建方法

物体表面的光谱反射光谱可以精确描述物体的颜色特性^[10-11],为了对激彩虹全息烟包印刷品进行较为精确的颜色测量,便于在工业生产中依据 GB/T 7705-2008 标准对烟包印刷品进行质量评判,采用光谱反射率重建的方法,配合前文设计 6 通道 CCD 成像系统,对在穹顶光源下采集到的光强分布均匀的图像进行光谱表征,计算出物体表面的反射光谱,对激彩虹全息烟包产品进行颜色测量。

光谱成像系统对成像物体进行拍摄后,输出的多通道图像是成像场景的光照、所成像物体的表面光谱反射特性、成像设备的光谱特性联合作用的结果^[7]。这一过程可表示为

$$\mathbf{D} = \mathbf{\Theta}^T \mathbf{R}, \quad (1)$$

式中 \mathbf{D} 为多通道输出图像, $\mathbf{\Theta}$ 为光谱敏感函数、光谱功率分布函数、光谱透射率等的采样矩阵。在相机的多通道输出图像和相关光谱特性已经获得的情况下,估算成像物体的表面光谱反射率,重建其光谱反射率,可获得变换关系 \mathbf{Q} , 得到光谱反射率重建图像

$$\mathbf{R} = \mathbf{QD}. \quad (2)$$

目前,光谱反射率的重建方法主要有三大类,分别是直接重建、插值重建和基于学习的重建方法。PCA 是一种基于学习的光谱反射率重建方法,是 Hotelling 在 1933 年提出的一种将多个变量通过线性变换以选出较少个数重要变量的一种多元统计分析方法,是一种统计意义上的特征提取方法^[12-13]。该方法能在最大程度保留原有光谱颜色信息的同时对光谱数据进行压缩,便于光谱的重建计算,且该方法对表面光滑的物体颜色重建的准确性高,故采用基于主成分分析的光谱重建方法对采集到的光谱数据进行重建。

设光谱数据集 \mathbf{R} 由 m 个样本数, n 个波段下的光谱反射率组成,可表示为

$$\mathbf{R} = (R_{11}, R_{12}, \dots, R_{m1})^T, \quad (3)$$

\mathbf{R} 的近似值 $\hat{\mathbf{R}}$ 可表示为 p 个相互正交的 n 维单位基向量 \mathbf{e}_i ($1 \leq i \leq p$) 的线性组合

$$\hat{\mathbf{R}} = \sum_{i=1}^p \mathbf{e}_i \mathbf{a}_i = \mathbf{Ea}, \quad (4)$$

式中基向量 \mathbf{e}_i 是光谱数据集 \mathbf{R} 中提取出来的特征向量,用向量组 $\mathbf{E} = (\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \mathbf{e}_3, \dots, \mathbf{e}_p)$ 表示, \mathbf{a}_i 是基向量 \mathbf{e}_i 所对应的转换系数,可表示为向量组 $\mathbf{a} = (a_1, a_2, a_3, \dots, a_p)^T$ 。

然后,采用奇异值求解法对光谱反射率进行主

成分分析,求解其基向量组 \mathbf{E} 。

光谱反射率的平均值可表示为

$$\bar{\mathbf{R}} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \mathbf{R}_i, \quad (5)$$

式中 \mathbf{R} 为 $n \times m$ 的矩阵, m 是维数,即样本数。

\mathbf{R} 的中心矩阵 \mathbf{X} 可定义为

$$\mathbf{X} = [\mathbf{R}_1 - \bar{\mathbf{R}}, \mathbf{R}_2 - \bar{\mathbf{R}}, \dots, \mathbf{R}_m - \bar{\mathbf{R}}], \quad (6)$$

式中 \mathbf{X} 为 $n \times m$ 的矩阵,其协方差矩阵 \mathbf{G} 可表示为

$$\mathbf{G} = \frac{1}{m} \mathbf{X} \mathbf{X}^T, \quad (7)$$

求解矩阵 \mathbf{G} 的特征向量时,可对 \mathbf{X} 作奇异值分解为

$$\mathbf{X} = \mathbf{USV}^T, \quad (8)$$

式中 $\mathbf{U} = [u_1, u_2, \dots, u_n]$ 是 $\mathbf{X} \mathbf{X}^T$ 的特征向量,即协方差矩阵 \mathbf{G} 的特征向量, \mathbf{V} 是 $\mathbf{X}^T \mathbf{X}$ 的特征向量;对角阵 \mathbf{S} 由 n 个奇异值降序排列组成,与矩阵 \mathbf{X} 维数一致,且其对角线上的值是矩阵 $\mathbf{X} \mathbf{X}^T$ 和矩阵 $\mathbf{X}^T \mathbf{X}$ 特征值的平方根

$$\mathbf{S} = \text{diag}(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n). \quad (9)$$

将矩阵 \mathbf{U} 的特征向量按照对应特征值进行降序排列,前 p 个特征向量的贡献率足够高时,光谱反射率就可以认为是前 p 个特征向量的线性组合^[14]。

将前 p 个特征向量的累计方差贡献率 \mathbf{V}_p 定义为如下:

$$\mathbf{V}_p = \sum_{i=1}^p \omega_i / \left(\sum_{j=1}^n \omega_j \right), \quad p \leq n. \quad (10)$$

若累计方差贡献率 \mathbf{V}_p 达到 99.9%, 则原有的光谱反射率空间 \mathbf{R} 基本可以由前 p 个特征向量所构成的子空间 $\hat{\mathbf{R}}$ 表示。

所需的 p 个特征向量确定后,对成像物体表面的反射光谱进行重建。将前 p 个特征向量代入(4)式,求得新的光谱反射率 $\hat{\mathbf{R}}$ 。加入光谱反射率均值 $\bar{\mathbf{R}}$, 则重建出成像物体表面的反射光谱

$$\mathbf{R}' = \hat{\mathbf{R}} + \bar{\mathbf{R}}. \quad (11)$$

3 验证实验

为了验证基于穹顶光源设计的激彩虹全息印刷品颜色测量方法的有效性,设计了如下实验。

实验一对 6 通道线扫描 CCD 成像系统下光谱重建算法进行验证试验,首先验证算法用于普通白卡纸上色块颜色光谱重建的有效性。为了得到在印刷现场实际可用的测量结果,实验采用印刷生产上实际使用的彩色样本数据集。该数据集由 250 个彩

色色块组成,使用 X-Rite MA68 II 分光光度计测量各色块的反射光谱,并读取各色块的三色刺激值。实验在 250 块色卡中随机挑选 200 块作为训练样本,用于计算主成分特征值,另外 50 块作为测试样本,用于验证光谱重建的精度。

验证实验时,将实验色块拼成一大张面积为 $720\text{ mm} \times 640\text{ mm}$ 的纸张,并放置于扫描平台,将三线 CCD 彩色线阵相机固定在支架上,在扫描平台上使用平行导轨上的丝杠来带动线扫描 CCD 相机从左向右进行第一次扫描,得到三个 RGB 通道的输出图像。然后,在相机镜头前增加一组滤光片,在扫描平台上从左到右进行第二次扫描,得到另外三个通道的输出图像。利用公式对 200 块训练色块的光谱反射率进行计算,求出反射光谱的协方差矩阵,进而计算出特征向量。前 9 个特征值贡献率柱状图如图 8 所示。

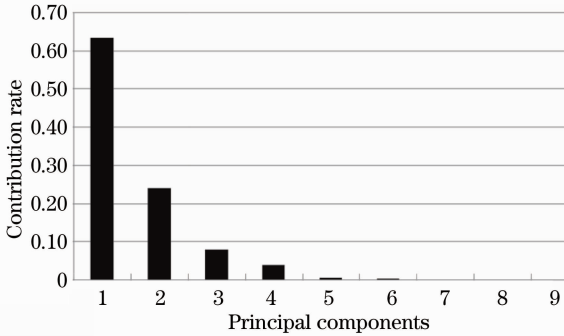


图 8 前 9 个特征值的贡献率图

Fig. 8 Variance contribution rate of the first nine principal components

由于前 6 个主成分特征向量累计方差贡献率已经超过 99.7%,可以认为这 6 个特征向量构成的子空间可以代替原有的反射率样本空间 R ,最终选定的 6 个主成分分量如图 9 所示。利用这 6 个主成分特征向量对 50 个训练色块和 50 个测试色块进行光谱重建,并将重建结果与分光光度计的测量结果相

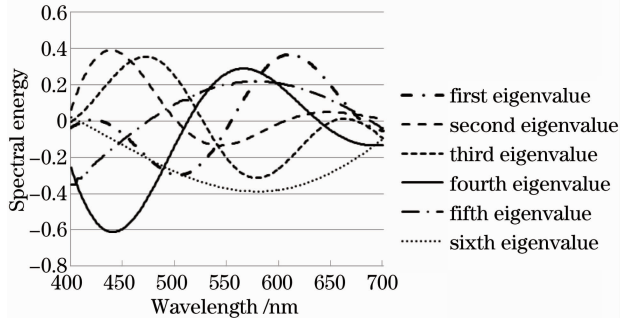


图 9 前 6 个特征根对应的主成分光谱图

Fig. 9 Spectrogram of the first six principal components

比较,用 CIE1976 的色差公式进行评价。

$$\begin{cases} L^* = 116(Y/Y_n)^{1/3} - 16, Y/Y_n > 0.008856 \\ L^* = 903.3(Y/Y_n)^{1/3}, Y/Y_n \leq 0.008856 \\ a^* = 500[f(X/X_n) - f(Y/Y_n)] \\ b^* = 200[f(Y/Y_n) - f(Z/Z_n)] \end{cases}, \quad (12)$$

$$f(x) = \begin{cases} x^{1/3}, & x > 0.008856 \\ 7.787x + \frac{16}{116}, & x \leq 0.008856 \end{cases}, \quad (13)$$

式中 X_n, Y_n 和 Z_n 是照明光源的三刺激值, X, Y 和 Z 是被测物体的三刺激值。CIE1976 色差计算公式为

$$\Delta E_{ab}^* = \sqrt{(\Delta L)^2 + (\Delta a)^2 + (\Delta b)^2}. \quad (14)$$

实验二验证穹顶光源下激光彩虹全息印刷品的颜色测量方法的有效性和可靠性,并与白光下直接使用分光光度计测量进行比较。

彩虹全息产品由于在可见光下会产生衍射现象,并随着观测角度的变化而变化,为了研究其表面呈色性能,本文先在白光下直接使用分光光度计进行测量。实验使用 X-Rite MA68 II 分光光度计进行颜色测量,测试样品选择在彩虹全息纸张上覆盖印刷图案的这种全息印刷工艺的典型代表:“贵烟”烟包产品。先选择一张已通过测定的“贵烟”标准品,再随机抽取一张测试样品,选定测试点如图 8 所示,使用分光光度计直接测量标准品和样品这五个不同角度($15^\circ, 25^\circ, 45^\circ, 75^\circ, 110^\circ$)之间的色差数据。六个区域的色差测量结果分别记为 S_T1, S_T2, \dots, S_T6 。

进行该方法的验证实验时,测试样品选择在“贵烟”烟包产品和印刷工艺为印刷图案上覆盖透明全息膜的“红塔山经典 100”烟包产品。在每种样品中分别选取 2 个批次,在每批样品中分别抽取 11 张样品,将每批抽取的 11 张样品中的第一张样品定义为标准品。

设“红塔山经典 100”烟包样品和“贵烟”烟包样品编号分别为 X 和 Y ,每种样品中抽取的两批样品批次分别为 A 和 B 。第一批“红塔山经典 100”样品依次编号为 $X_A0, X_A1 \dots X_A10$,将 X_A0 定义成标准样品,第二批“红塔山经典 100”样品依次编号为 $X_B0, X_B1 \dots X_B10$,将 X_B0 定义成标准样品。第一批“贵烟”样品依次编号为 $Y_A0, Y_A1 \dots Y_A10$,将 Y_A0 定义成标准样品,第二批“贵烟”样品依次编号为 $Y_B0, Y_B1 \dots Y_B10$,将 Y_B0 定义

成标准样品。

由于印刷工艺的特点,同一水平方向的印刷压力一致性较好,对图像采集的影响相同,在标准品和测试品上分别选择六个目视为同一色相且水平均匀分布的区域作为测试区域,为了保证数据的稳定性,每个区域范围均为 $5\text{ mm} \times 5\text{ mm}$,并采用测试区域的像素平均值为该测试区域的响应值。

图 8、9 为贵烟样品的测试区域以及红塔山的测试区域。

使用前文构建的 6 通道线扫描 CCD 成像系统对样品进行两次图像采集,得到 6 个通道的光谱数据,采用基于 PCA 的光谱反射率重建方法重建测试样品相应测试区域的反射光谱,并计算出相应测试区域的明度 L^* 、红绿度 a^* 和黄蓝度 b^* ,用 CIE1976 色差公式 ΔE_{ab}^* 来计算其色差,进行光谱重建评估。

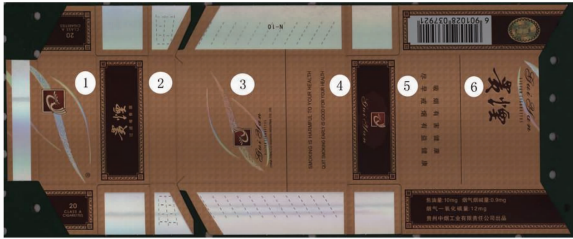


图 10 “贵烟”烟包产品及其主要测试区域

Fig. 10 Sample of ‘Guiyan’ cigarette packs and typical test areas on it

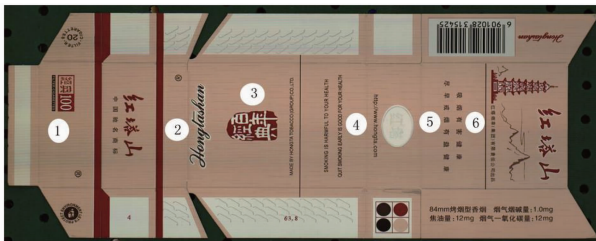


图 11 “红塔山经典 100”烟包产品及其主要测试区域

Fig. 11 Sample of ‘Hongtashan 100’ cigarette packs and typical test areas on it

4 实验结果分析

实验一为了验证 6 通道线扫描 CCD 成像系统下光谱重建算法 PCA 的有效性,对白卡纸上印刷的色块做了测试实验,对 50 个训练色块和 50 个测试色块进行了光谱重建,并将重建结果与分光光度计的测量结果相比较,实验统计的色差数据 ΔE_{ab}^* 如图 12 所示。

由以上数据可知,无论是训练色块还是测试色

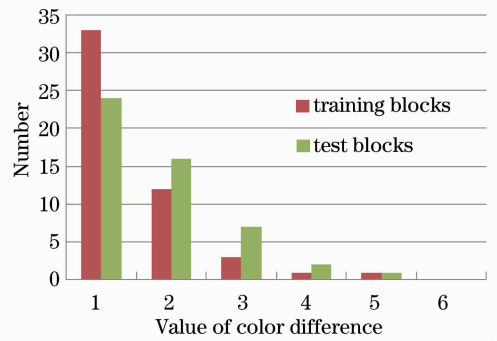


图 12 重建光谱后的色差分布图

Fig. 12 Color difference distribution map after spectrum reconstruction

块,大部分色块重建后的色差都在 $0 \sim 3$ 个 ΔE_{ab}^* 色差单位之间,重建后色差在 $3 \sim 5$ 个 ΔE_{ab}^* 色差单位之间的情况训练色块存在 2 例,测试色块存在 3 例。且经过统计计算,50 个训练色块的 ΔE_{ab}^* 平均值为 0.7172,50 个测试色块的 ΔE_{ab}^* 平均值为 1.0610。实验表明,在 6 通道线扫描 CCD 成像系统下,采用主成分分析方法提取 6 个主特征分量能够有效重建出实际印刷中使用的颜色数据集的表面光谱,因此,该方法用于穹顶光源下激光彩虹全息产品的颜色测量也具有一定的可信性。

实验二的分光光度计实验中对于标准品和测试样品,按照五个不同的角度分别在六个测试区域都进行了颜色测量,色差数据如表 1 所示。

由表 1 数据可以看出,只有在区域 1 的 25 度方向测量的标准品和样品之间的色差小于 $3\Delta E_{ab}^*$,其余观测角和测试区域测得色差均大于 $3\Delta E_{ab}^*$,最大色差达到 $12.31\Delta E_{ab}^*$,且每个区域在不同的角度测量的色差起伏很大,没有明显规律,且说明在白光下直接使用分光光度计测量激光彩虹全息印刷品无法得到稳定有效的测量结果,完全无法对这种印刷品进行颜色评价。目视可知,白光照射下激光彩虹全息印刷品表面会出现随机的彩虹干涉条纹,且随光照角度和视角变化而变化,目视结果与测量结果相符。

表 1 “贵烟”标准品和样品分光光度计色差测量结果

Table 1 Color difference between standards and samples of ‘Guiyan’ cigarette packs by spectrophotometer

	ΔE_{15}	ΔE_{25}	ΔE_{45}	ΔE_{75}	ΔE_{110}
S_C1	6.23	2.31	12.31	3.78	10.71
S_C2	11.31	15.12	7.54	6.11	8.13
S_C3	10.17	8.21	5.95	5.01	8.01
S_C4	4.08	7.83	6.25	4.92	9.27
S_C5	5.71	6.97	5.87	4.76	9.07
S_C6	6.24	7.05	5.80	5.24	8.34

表2 标准品与测试品对应测试区域的色差测量值(第一批“红塔经典100”样品)

Table 2 Color difference of the corresponding test areas between standard sample and test samples in the first batch of ‘Hongtashan 100’ cigarette packs

	ΔE_{1vs1}	ΔE_{2vs2}	ΔE_{3vs3}	ΔE_{4vs4}	ΔE_{5vs5}	ΔE_{6vs6}
X_A1	0.891	0.082	1.171	0.669	0.783	1.160
X_A2	0.958	0.347	0.436	0.700	0.987	0.711
X_A3	0.759	0.538	0.346	0.105	0.602	0.964
X_A4	0.164	0.272	0.474	0.632	0.945	0.223
X_A5	0.570	1.293	1.301	0.524	0.996	0.222
X_A6	0.417	0.501	0.849	0.865	0.709	0.565
X_A7	0.436	0.939	0.717	0.407	0.908	0.109
X_A8	0.906	1.197	0.572	0.565	0.705	0.008
X_A9	0.798	0.933	0.504	0.209	1.011	0.756
X_A10	0.526	0.196	0.597	1.122	0.336	1.012

表3 标准品与测试品对应测试区域的色差测量值(第二批“红塔经典100”烟包样品)

Table 3 Color difference of the corresponding test areas between standard sample and test samples in the second batch of ‘Hongtashan 100’ cigarette packs

	ΔE_{1vs1}	ΔE_{2vs2}	ΔE_{3vs3}	ΔE_{4vs4}	ΔE_{5vs5}	ΔE_{6vs6}
X_B1	0.925	0.802	1.123	1.171	0.973	2.018
X_B2	1.221	0.524	0.509	0.886	0.919	0.789
X_B3	0.306	0.552	1.246	0.635	0.497	2.106
X_B4	0.898	0.635	1.044	0.739	0.582	0.585
X_B5	0.858	1.359	0.811	0.744	2.008	0.583
X_B6	0.497	0.658	0.496	0.336	0.651	0.471
X_B7	1.217	0.418	0.547	0.175	0.912	2.077
X_B8	1.261	0.849	0.810	0.743	1.250	0.364
X_B9	0.384	1.371	0.562	0.761	2.047	0.847
X_B10	0.387	0.508	0.670	0.544	1.031	0.652

为了验证基于穹顶光源设计的颜色测量方法的有效性,验证测量所得色差分布是否与人眼目视感受一致,用主成分分析法重建相应测试区域反射光谱后,计算出每批样品的标准样品的6个测试区域的明度 L_0^* 、红绿度 a_0^* 和黄蓝度 b_0^* ,并将其定义为标准值。计算出每批样品的10张测试样品中每张样

品对应测试区域的明度 L^* 、红绿度 a^* 和黄蓝度 b^* ,并将其作为测试值。计算出每批样品相应测试区域标准值和测试值之间的色差 ΔE_{ab}^* 。表2和表3分别为“红塔山经典100”两批样品的测试所得的数据,表4和表5分别为“贵烟”两批样品的测试所得的数据。

表4 标准品与测试品对应测试区域的色差测量值(第一批“贵烟”烟包样品)

Table 4 Color difference of the corresponding test areas between standard sample and test samples in the first batch of ‘Guiyan’ cigarette packs

	ΔE_{1vs1}	ΔE_{2vs2}	ΔE_{3vs3}	ΔE_{4vs4}	ΔE_{5vs5}	ΔE_{6vs6}
Y_A1	2.421	1.234	1.948	2.893	1.014	2.324
Y_A2	1.417	2.171	2.989	1.422	1.145	2.207
Y_A3	2.653	0.918	1.764	0.918	2.672	1.647
Y_A4	2.856	1.327	1.538	2.429	2.997	1.647
Y_A5	2.707	1.757	1.353	2.878	0.546	2.416
Y_A6	2.302	1.071	2.503	1.776	2.329	2.815
Y_A7	1.183	1.812	2.126	1.030	2.387	2.049
Y_A8	2.026	2.023	2.880	2.518	2.776	2.167
Y_A9	0.803	0.509	2.148	2.128	0.814	1.785
Y_A10	1.262	2.028	1.082	1.005	1.680	2.633

表 5 标准品与测试品对应测试区域的色差测量值(第二批“贵烟”烟包样品)

Table 5 Color difference of the corresponding test areas between standard sample and test samples in the second batch of ‘Guiyan’ cigarette packs

	ΔE_{1vs1}	ΔE_{2vs2}	ΔE_{3vs3}	ΔE_{4vs4}	ΔE_{5vs5}	ΔE_{6vs6}
Y_B1	1.008	2.102	1.859	0.543	1.894	0.927
Y_B2	1.050	1.573	1.859	2.896	1.489	0.873
Y_B3	0.588	1.198	1.970	1.932	1.741	1.771
Y_B4	2.493	1.411	1.784	2.346	2.200	1.109
Y_B5	2.303	1.795	2.216	2.314	1.082	0.940
Y_B6	0.884	2.722	2.511	1.221	2.424	0.800
Y_B7	1.469	1.784	1.200	1.319	2.947	0.559
Y_B8	1.101	2.564	1.713	0.883	1.189	1.252
Y_B9	1.282	2.509	2.377	2.351	2.563	1.232
Y_B10	1.111	1.512	2.953	1.903	1.780	0.781

由以上数据可以看出,在同一批次中,样品具有比较相似的色差值。“红塔山经典 100”两批样品的色差测量数据中,同一批次内的样品色差测量最大值均小于 $2.5\Delta E_{ab}^*$,第一批样品和第二批样品的色差测量平均值分别为 $0.653\Delta E_{ab}^*$ 和 $0.957\Delta E_{ab}^*$,“贵烟”两批样品的色差测量数据中,同一批次内的样品色差测量最大值均小于 $3\Delta E_{ab}^*$,第一批样品和第二批样品的色差测量平均值分别为 $1.897\Delta E_{ab}^*$ 和 $1.669\Delta E_{ab}^*$ 。数据显示,“贵烟”样品的色差比“红塔经典 100”样品高,这一结果与“贵烟”的印刷工艺相关,人眼目视所得的“贵烟”样品较“红塔经典 100”样品亦具有更大的反光强度,测试结果与目视结果相符。

为了进一步验证本文提出的颜色测量方法的有效性,对同一种样品两个批次之间的色差测量值进行统计。计算反射光谱重建后的两批样品相对应的

6 个测试区域之间的色差 ΔE_{ab}^* ,实验结果表明,同一种样品两个批次之间具有相对一致的色差变化趋势,测量结果相对于分光光度计而言比较准确。目视可知,穹顶光源照射下的激光彩虹全息印刷品有良好的呈色性,成像效果也明显优于白光下成像,稳定性强,这与测量结果相符。两种样品批次间对比样品的编号分别为 X_AB0~ X_AB10 和 Y_AB0~ Y_AB10。表 6 和表 7 分别为“红塔经典 100”和“贵烟”两种样品的测试所得数据。

由以上数据可以看出,同一种样品两个批次之间具有相对一致的色差变化趋势。通过对测试数据的分析,可得到如下结论:采用基于穹顶光源的 6 通道线扫描 CCD 成像系统进行光谱反射率重建的颜色测量方法得到的测量结果稳定性强,有较好的一致性,数据比较可靠,解决了全息印刷品色差评价的行业难题。

表 6 两批样品对应测试区域的色差测量值(“红塔经典 100”)

Table 6 color difference of the corresponding test areas between two batches of ‘Hongtashan 100’ cigarette packs samples

	ΔE_{1vs1}	ΔE_{2vs2}	ΔE_{3vs3}	ΔE_{4vs4}	ΔE_{5vs5}	ΔE_{6vs6}
X_AB0	3.342	3.967	3.065	4.165	4.321	3.604
X_AB1	3.167	4.883	3.043	3.458	3.220	4.021
X_AB2	4.072	4.566	3.893	3.870	4.345	4.170
X_AB3	4.889	4.357	4.126	3.386	3.643	3.466
X_AB4	3.445	4.562	3.905	3.350	4.867	4.791
X_AB5	3.314	3.621	4.470	3.926	4.285	4.051
X_AB6	3.125	4.096	4.759	4.912	3.865	4.002
X_AB7	3.346	3.869	4.860	4.464	3.496	3.806
X_AB8	4.071	3.642	3.268	3.814	4.105	4.534
X_AB9	4.116	4.613	4.918	4.070	3.898	4.177
X_AB10	3.052	4.339	3.128	4.507	3.075	4.317

表7 两批样品对应测试区域的色差测量值(“贵烟”)

Table 7 Color difference of the corresponding test areas between two batches of ‘Guiyan’ cigarette packs samples

	ΔE_{1vs1}	ΔE_{2vs2}	ΔE_{3vs3}	ΔE_{4vs4}	ΔE_{5vs5}	ΔE_{6vs6}
Y_AB0	5.669	4.051	4.028	4.925	5.727	4.454
Y_AB1	4.436	4.876	5.076	5.974	4.122	5.617
Y_AB2	5.488	4.253	4.267	5.232	5.083	5.742
Y_AB3	4.660	5.613	4.231	5.937	4.732	5.959
Y_AB4	4.685	5.362	4.949	4.088	4.385	4.381
Y_AB5	4.776	4.728	4.539	5.245	4.372	5.433
Y_AB6	5.685	5.267	5.097	4.019	4.819	5.319
Y_AB7	5.785	4.400	5.774	4.615	4.263	4.839
Y_AB8	5.308	5.030	4.500	5.283	4.758	4.299
Y_AB9	4.881	4.759	5.164	4.234	5.304	4.018
Y_AB10	5.735	4.474	4.642	4.725	5.734	4.325

5 结 论

由于激光全息印刷品的光学衍射特点,目前尚无一种稳定的颜色测量方法,能够对这种印刷品的色差变化进行稳定评价。设计了一种全息印刷品的专用全息照明光源——穹顶光源,使得光源内部的光强均匀,对全息印刷品的衍射特性所造成的 CCD 成像干扰起到了明显的抑制作用。然后基于穹顶光源设计了激光彩虹全息烟包产品的颜色测量方法,该方法以穹顶光源作为照明光源,利用一组滤光片和彩色三线 CCD 相机构建了一个 6 通道线扫描 CCD 成像系统,并以基于主成分分析的光谱反射率重建方法对光强分布均匀的图像中物体进行光谱重建,得到激光彩虹全息烟包产品表面的反射光谱,该光谱是最终评价印刷品颜色唯一有效特征。对实际的激光彩虹全息烟包印刷品进行了大量的样本实验,对比传统的分光光度计的测量数据,采用了 CIE1976 色差公式进行光谱重建结果的评估。实验表明,提出的基于穹顶光源的激光彩虹全息印刷品颜色测量方法对于激光彩虹全息烟包印刷品具有稳定且一致的颜色测量结果,数据偏差远低于传统分光光度计的测量结果,可以解决因激光彩虹全息印刷品表面衍射现象造成的颜色测量难题,能用于全息印刷品色差控制的评判,具有很好的工业推广意义。在工业现场中,为了获取到更精准的物体表面反射光谱,可以采用 12 个通道或更多通道的成像系统进行采样,但需要解决成像系统和多通道滤光片的安装和校准难题,这是后续课题研究的方向之一。

参 考 文 献

- 1 Ma Shengtao. A Study on the Reflection Echelon Grating Diffraction Characteristics [D]. Chongqing: Chongqing University, 2010.
马升涛. 反射型阶梯光栅的衍射特性研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2010.
- 2 Wan Xiaoxia, Liu Zhen, Hang Xingguo. The spectral reflectance model of coloring images on holographic papers [J]. China Printing and Packaging Study, 2010, 2(z1): 43-46.
万晓霞, 刘 振, 黄新国. 全息光栅基彩色图像光谱反射率模型 [J]. 中国印刷与包装研究, 2010, 2(z1): 43-46.
- 3 Qi Yonghong. Research on the color characteristic of laser materials for the printing package [C]. 10th National Conference on Packaging Engineering, 2006. 320-322.
戚永红. 激光全息包装材料在包装印刷中呈色性能的探讨 [C]. 第十届全国包装工程学术会议交流论文集, 2006. 320-322.
- 4 Yang Xing, Li Yong, Wang Hui, *et al.*. Color difference of computer generated rainbow hologram based on numerical reconstruction [J]. Acta Photonica Sinica, 2013, 42(3): 332-335.
杨 鑫, 李 勇, 王 辉, 等. 利用数值再现实现彩虹全息色差评价 [J]. 光子学报, 2013, 42(3): 332-335.
- 5 Cao Congjun, Zheng Yuanlin. Research on measurement of chromatic characteristics on holographic foil materials [J]. Packaging Engineering, 2004, (5): 170-171, 181.
曹从军, 郑元林. 镭射复合材料表面呈色性能的检测与分析 [J]. 包装工程, 2004, (5): 170-171, 181.
- 6 Liu Cuiping, Yu Jia, Li Xuyan, *et al.*. Colorimetric research on LED displaying color holograms [J]. Acta Photonica Sinica, 2012, 41(2): 218-221.
刘翠萍, 于 佳, 黎旭艳, 等. LED 用于彩色全息图照明的色度研究 [J]. 光子学报, 2012, 41(2): 218-221.
- 7 Wang Ying. The Study of the Multispectral Image Color Reproduction Technologies [D]. Xi'an: Xidian University, 2010.
王 莹. 多光谱图像色彩再现关键技术研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2010.
- 8 Fan Shuwei, Bai Liang, Zhou Qinghua. Research on blaze properties of diffraction gratings with vector simulation [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(s1): s105001.
樊叔维, 白 亮, 周庆华. 衍射光栅闪耀特性的矢量理论仿真研究 [J]. 光学学报, 2012, 32(s1): s105001.
- 9 Peng Fei, Yang Deixing, Zhang Pan, *et al.*. Diffraction angular bandwidth broadening of volume holographic grating by multiplex

- structures [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(9): 090901.
- 彭 飞, 杨德兴, 张 攀, 等. 多重结构对体全息光栅衍射角带宽的拓展[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(9): 090901.
- 10 Noboru Ohta. *Color Technology* [M]. Liu Zhongben transl. Xi'an; Xi'an Jiaotong University Press, 1997.
- 大田登. *色彩工学* [M]. 刘中本 译. 西安: 西安交通大学出版社, 1997.
- 11 Tang Shunqing. *Colorimetry* [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1991.
- 汤顺清. *色度学* [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1991.
- 12 Jon Yngve Hardeberg, Francis Schmitt, Hans Brettel, *et al.*. Multispectral image acquisition and simulation of illuminant changes [J]. *Color Imaging: Vision and Technology*, 1999, (8): 145–165.
- 13 H F Imai, A L Taplin, A E Day. Comparison of the Accuracy of Various Transformations from Multi-Band Images to Reflectance Spectra [R]. Munsell Color Science Lab, 2002.
- 14 Ding Guohua, Zhu Yuanhong, Li Bo, *et al.*. Comparison of spectrum reconstruction on different number of color block [J]. *Packaging Engineering*, 2012, (3): 14–18.
- 丁国华, 朱元泓, 李 博, 等. 基于不同色块数量的光谱重构对比[J]. *包装工程*, 2012, (3): 14–18.

栏目编辑: 何卓铭