

基于模糊局部信息C均值算法的网目调 光谱反射率预测模型研究

徐军飞 周小凡 石 勇

南京林业大学江苏省制浆造纸科学与技术重点实验室, 江苏 南京 210037

摘要 提出了一种网目调光谱反射率预测方法。网目调单个网点由若干个区域组成:网点核心区域,该区域的油墨层厚度均匀,且等于实地印刷的油墨层厚度;其余边缘区域有一个模糊的厚度分布函数,这部分油墨层厚度比实地油墨层厚度薄,且越靠近网点边缘油墨层厚度越薄。采用模糊局部信息C均值算法按像素密度值聚类网目调单个网点,得到了层次分明的网点密度分布并计算各个层次的面积率。以此建立了一个新的光谱反射率预测模型,该模型预测的光谱反射率与实际印刷样张测量得到的光谱反射率具有很好的光谱匹配曲线,证明该算法模型具有较高的预测精度。

关键词 色彩光学; 光谱反射率预测; Lambert-Beer定律; 模糊局部信息C均值算法; 核心-边缘模型

中图分类号 O432.3

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0933001

Halftone Spectral Prediction Model Based on Fuzzy Local Information C-Means Clustering Algorithm

Xu Junfei Zhou Xiaofan Shi Yong

Jiangsu Provincial Key Laboratory of Pulp and Paper Science and Technology,

Nanjing Forestry University, Nanjing, Jiangsu 210037, China

Abstract A spectral prediction model is proposed and applied to halftone print on paper substrate. The single dot of halftone print consists of several regions: core area of the dot has uniform thickness and the same thickness of ink-layer as that of the solid print. The edge regions have fuzzy thickness distribution function, and the thickness of ink-layer is thinner than that of the solid print. The single dots of halftone print are clustered based on the density of pixel by the fuzzy local information C-means clustering algorithm, the well-bedded halftone dots can be achieved by the algorithm, and the fractional surface coverage of each cluster region can be calculated. A new algorithm model for halftone spectral prediction is established, and the spectral reflectivity predicted by the algorithm is well consisted with that measured through the halftone presswork proof, demonstrating that the prediction accuracy of the model is higher.

Key words color optics; spectral reflectivity prediction; Lambert-Beer law; fuzzy local information C-means clustering algorithm; core-fringe model

OCIS codes 330.1690;330.1710;330.1730

1 引 言

网点是印刷复制中的最基本单元,网点面积率是印刷品上网点所占的百分比例,是网目调印刷品颜色计算中的关键参数之一。光谱反射率反映了网目调颜色最基本的信息^[1],因此,光谱反射率的精确预测是保证印刷品颜色精确复制的关键。光谱反射率预测模型最早应用于网目调颜色预测的方法是 Murray-Davies

收稿日期: 2015-03-23; 收到修改稿日期: 2015-05-05

基金项目: 国家自然科学基金(31270629)、江苏高校优势学科建设工程项目(PAPD)

作者简介: 徐军飞(1988—),男,硕士研究生,主要从事网目调颜色预测模型、光学网点扩大算法、纸张散射理论等方面的研究。E-mail: feijunxu@126.com

导师简介: 周小凡(1965—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事纸张散射理论、特种纸、纸制微滤膜、纸制超滤膜技术等方面的研究。E-mail: zxiaofan@njfu.com.cn

公式^[2],该方法假设网目调印刷品只是由空白纸张和印有油墨网点的纸张两部分组成,将印刷品的反射率看成纯粹的油墨网点部分反射率与空白部分反射率之和,由于没有考虑到光学网点扩大,所以无法实现准确的预测。1951年,Yule等^[3]考虑了纸张、实地油墨的光谱反射率和网目调印刷品之间的非线性对应关系建立了Yule-Nielson模型,考虑了由于光在纸张中散射所引起的光学网点扩大效应,但是该模型仅仅增加了参数进行修正,而且参数求解十分困难,目前,参数只有几个特定的值^[4]。

Clapper等^[5]在Yule-Nielson模型基础上,合理假设了光线在网目调印刷品中的传播,进而建立了经典Clapper-Yule模型。该模型不仅考虑了光线在印刷品-空气界面上发生的多重内反射以及在纸张内发生的横向散射,而且将纸基反射率和油墨层的透射率都视为独立的变量^[6]。然而,经典Clapper-Yule模型预测出来的反射光谱普遍偏暗,且模型中涉及到的一系列光学参数测量非常困难,存在纸张与油墨的光谱折射率难以测量的技术瓶颈。目前,应用Clapper-Yule模型所需要的光学参数基本都是采用1974年Hecht^[7]的研究结果和1942年Judd^[8]的研究结果。为了提高预测精度,2005年,Hersch等^[9]假设入射光线在网目调印刷品中以不同距离进行横向传播,对此进行分程近似,从而建立了分程Clapper-Yule模型,他们假设进入网目调印刷品的光一部分按经典Clapper-Yule模型的理论进行长程传播,另一部分光则进行短程传播,并研究了光在印刷品中进行长程和短程传播相应的比例,但是模型中的光学参数仍然采用Hecht和Judd研究中的数据。

上述模型研究方向基本集中在通过修正光学网点扩大、考虑光散射路径等进行建模。2004年日本学者Azuma等^[10]最早提出了网点核心-边缘的概念,将单个网点根据厚度划分为核心和边缘两部分,并假设核心与边缘的厚度比例为2:1,但在他们的研究中并未提出具体方法分割核心部分与边缘部分的面积,核心与边缘的厚度比例2:1也仅仅是一种假设的近似。2014年Atiqur等^[11]同样假设网点边缘具有与核心部分不同的厚度,通过显微成像技术进行划分,增加了网点边缘效应,从而修正了Murray-Davies公式,建立了扩展的Murray-Davies模型。本文在上述研究的基础上,对单个网点进行显微成像,发现由于油墨渗透、光散射效应等对网目调单个网点的核心-边缘结构具有重要影响,但是与前两者研究不同的是,网点边缘部分厚度并非是一个恒定值而是由内向外呈曲线分布,越向外沿厚度越小。基于此,为了应用这一现象改善网点面积率计算方法,提高光谱反射率预测精度,采用模糊局部信息C均值算法按像素密度值聚类分割单个网点,结果发现聚类后单个网点具有密度层次分明的面积分布,从而建立了一种新的光谱反射率预测模型。因为油墨层密度值和油墨层的厚度值具有对应正比关系,因此将油墨层密度比例近似为油墨层的厚度比例。

2 网目调单个网点密度聚类分割及光谱反射率预测模型

采用模糊局部信息C均值算法按像素密度值聚类分割网点显微图,发现网目调单个网点具有光滑、递变的边缘密度分布,其核心部分具有均匀的密度值,与印刷实地密度值近似相等,而边缘部分由内向外密度逐渐递减呈密度曲线分布函数,如图1所示。

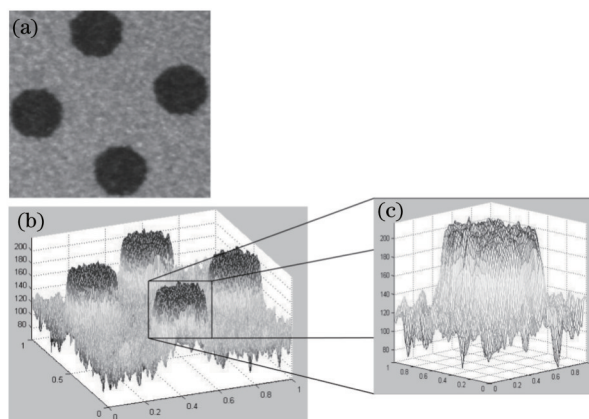


图1 单个网点密度分布趋势

Fig.1 Density distribution of a single dot

Emmel等^[12]采用显微成像技术对单个网点做过类似的研究,其研究结果与本文类似(图2),都证实了单个网

点的边缘部分密度并不是均匀的,而是呈逐渐递减趋势,但 Emmel 等在研究中直接将网点像素数据化(显示网点每一像素的灰度值),并未考虑网目调网点的噪声影响,因此,他们的研究仅仅是发现了这个趋势并根据显微网点像素密度作出一个近似的密度曲线分布,并未提出具体分割方法,也未考虑网目调网点噪声的影响。

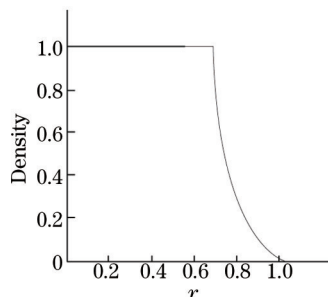


图 2 Emmel 研究中单个网点由核心到边缘的密度径向函数

Fig.2 Radial density function of a single dot from core to fringe in Emmel's study

研究目标是提供具体方法将网目调单个网点按每一个像素的密度值聚类分割得到层次分明的网点图像,并计算网点聚类后各密度层次的面积比例,从而进行光谱反射率预测。传统的模糊 C 均值算法(FCM)对无噪声或噪声水平较低的图像分割效果良好,但是对噪声污染较重的图像比较敏感,分割效果较差。这是因为 FCM 算法在图像分割中,各个像素是相互独立的,相邻像素之间不会产生任何影响,没有利用图像的空间信息。网目调网点显微图像往往存在大量噪声,且噪声通常是随机的^[13-14]。若直接在分割前对图像进行平滑滤波处理,噪声不一定能够全部去掉,还很可能使图像本身的一些细节和边缘信息丢失,影响最终分割的准确性。

模糊局部信息 C 均值算法(FLICM)提出了一种新颖的模糊因子 G_{ki} , 该因子用一种模糊的方式结合了局部空间信息和局部灰度信息,旨在提高对噪声图像分割的稳健性^[15]。在控制邻域像素对目标噪声像素影响的程度上采用邻域像素到目标噪声像素的欧氏距离大小来度量,使目标噪声像素服从于邻域像素,得到密度值相同的像素区域,降低了噪声并保留了图像信息,从而提高了分割的精确性。其表达式为

$$G_{ki} = \sum_{\substack{j \in N_i \\ i \neq j}} \frac{1}{d_{ij} + 1} (1 - u_{kj})^m \|x_j - v_k\|^2, \quad (1)$$

式中 N_j 为像素 x_j 邻域的集合, d_{ij} 为邻域像素 x_j 与中心点像素 x_i 的欧氏距离, $d_{ij} = \|x_j - x_i\|$, v_k 为第 k 类的聚类中心, u_{kj} 为像素 x_j 隶属于第 k 类的程度, m 为模糊加权指数。

FLICM 算法将所提出的模糊因子引入到 FCM 算法中,其改进的目标函数为

$$J_m = \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^c (u_{ki}^m \|x_i - v_k\|^2 + G_{ki}), \quad (2)$$

式中 x_i 为第 i 个像素点的灰度值, v_k 为第 k 类的聚类中心, N 为像素个数, c 为聚类层数, u_{ki} 为像素 x_i 隶属于第 k 类的程度, m 为模糊加权指数。

在满足 $\sum_{k=1}^c u_{kj} = 1$ 的条件下,根据 Lagrange 乘数法求目标函数 J_m 的极小值,聚类中心 u_{ki} 和隶属度矩阵 v_k 定义为

$$u_{ki} = \frac{1}{\sum_{j=1}^c \left(\frac{\|x_i - v_k\|^2 + G_{ki}}{\|x_i - v_j\|^2 + G_{ji}} \right)^{\frac{1}{m-1}}}, \quad (3)$$

$$v_k = \frac{\sum_{i=1}^N u_{ki}^m x_i}{\sum_{i=1}^N u_{ki}^m}. \quad (4)$$

因此,网目调单个网点显微图像的模糊局部信息 C 均值算法的步骤如下:

1) 设置聚类层数 c 值, 模糊性参数 m 值和终止条件参数 ξ 。在应用中 m 一般取 2, 聚类层数 c 则结合算法得到的图像噪声考虑, 寻找最佳聚类层数(噪声最小条件下最多的聚类层数);

2) 设置初始化随机模糊矩阵;

3) 设置循环计数器 $b = 0$;

4) 采用(4)式计算聚类层数 c 值;

5) 采用(3)式计算对应隶属度值;

6) 假如 $\max\{U^{(b)} - U^{(b+1)}\} < \xi$, 则计算终止。否则, 转为 $b = b + 1$ 继续步骤 4)。

由于 Lambert-Beer 定律不需要考虑周边邻近分子对介质分子的影响, 始终是成立的, 而油墨层是半透明介质, 类似于半透明薄膜层。因此, 根据 Lambert-Beer 定律, 油墨层的透射率可定义为

$$T = \frac{I}{I_0} = \exp(-KX), \quad (5)$$

式中 K 为薄膜吸收系数, X 为油墨层厚度。设油墨印在纸基上时, 实地油墨层厚度为标准厚度 X_s , 则实地印刷时墨层的透射率 T_s 为

$$T_s = \frac{I_s}{I_0} = \exp(-KX_s), \quad (6)$$

将(6)式实地油墨层厚度扩展到一般油墨层厚度, 定义为 X , 则一般厚度下的油墨层透射率 T 与实地油墨层厚度下的 T_s 关系式为

$$T = \exp(-KX) = \exp(-K \frac{X}{X_s} X_s) = \exp(-KX_s \frac{X}{X_s}) = T_s \frac{X}{X_s}, \quad (7)$$

式中 $\frac{X}{X_s}$ 为不同油墨层厚度的比例, 根据之前的假设在文中近似为密度比例, 标记为 ρ 。其中, 实地油墨层透射率 T_s 采用分程 Clapper-Yule 模型取极值计算。

根据 Murray-Davies 公式, 模型可以写为

$$R(\lambda) = a_c R_c(\lambda) + (1 - a_c - a_f) R_p(\lambda) + a_f R_f(\lambda), \quad (8)$$

式中 a_c 为核心部分网点面积率, a_f 为边缘部分的网点面积率, $R_c(\lambda)$ 为核心部分光谱反射率, $R_p(\lambda)$ 为基材部分光谱反射率, $R_f(\lambda)$ 为边缘部分的光谱反射率。

网点边缘部分光谱反射率可以写为

$$R_f(\lambda) = R_p(\lambda) T_s^\rho, \quad (9)$$

网点边缘部分总的网点面积率为

$$a_f = a_1 + a_2 + \dots + a_n, \quad (10)$$

式中 n 的数目与聚类层数 c 相等, 网点边缘部分各聚类层面积率即网点边缘每一聚类层中的像素个数与整个网目调图像像素的比例。

最终建立的网目调光谱反射率预测模型为

$$R(\lambda) = a_c R_c(\lambda) + (1 - a_c - a_f) R_p(\lambda) + a_1 R_p(\lambda) T_s^{\rho_1} + a_2 R_p(\lambda) T_s^{\rho_2} + \dots + a_n R_p(\lambda) T_s^{\rho_n}, \quad (11)$$

式中 $R(\lambda)$ 为网目调光谱反射率, $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n$ 为边缘部分不同聚类层密度值与核心部分(实地部分)密度值的比例, T_s 为核心部分(实地部分)透射率, $T_s^{\rho_1}, T_s^{\rho_2}, \dots, T_s^{\rho_n}$ 通过(7)式得到。

聚类层数 c 是模型的重要参数之一, 网点面积率的个数与聚类层数 c 是相等的。理论上根据网点密度衰减的曲线分布形式, 聚类层数应当可以分为无数层, 然而在实际应用中聚类层数分为无数层是不现实的, 且研究中发现聚类层数并非越多越理想, 因为当聚类层数增加到一定程度时网目调网点层次间就会产生噪声干扰, 影响网点面积率的准确计算。因此, 设置聚类层数的主要依据是以得到层次分明的网目调网点为前提条件, 聚类层数越多越好, 即在网点相应层次邻域无噪声干扰的最多分层数(噪声最小化为主要聚类原则)。对青色、品红色、黄色和黑色的单色 10% ~ 90% 的网目调网点进行聚类, 结果表明不同颜色、不同网点面积条件下(面积率 10% ~ 90%) 网点聚类层数并不一定相同。但在研究中发现 4 种颜色都在网点面积率

50%~60%左右可分层数较多(图3),可以理解为网点边缘模糊程度较高。这个现象与光学网点扩大分布有相同规律,光学网点在50%~60%附近扩大程度最大,而光学网点扩大是由于油墨与基材间的光散射效应引起的。因此,从上述分析可以看出光散射效应与网点边缘密度衰减有密切的关联。

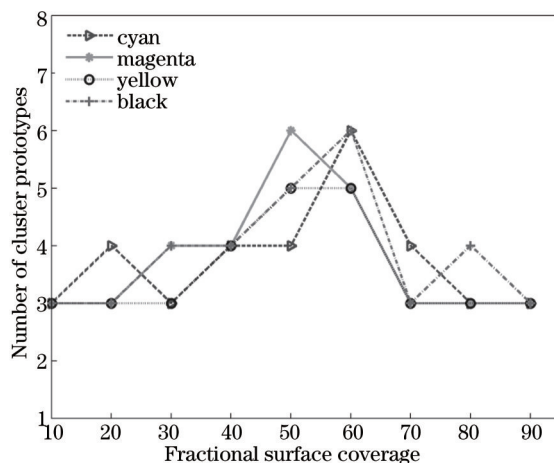


图3 网点面积率10%~90%的聚类层数

Fig.3 Number of cluster prototypes under the fractional surface coverage of 10% ~ 90%

3 实验结果及分析

实验中采用日本特菱牌定量为128 g/m²的铜版纸作为基材,并分别使用东洋油墨在海德堡CX-102-6四色印刷机上印制出青色、品红色、黄色和黑色网目调为10%~90%的单色印刷样张。测量样张光谱反射率的仪器是美国X-Rite公司的GretagMacbeth ColorEye XTH积分球式分光光度仪,测试使用光源为D65光源,测量几何为d/8°、视场为2°的标准视场,镜面反射被排除,波长范围为380~730 nm,间隔为10 nm,每个样张的光谱反射率由36个数据组成。此外,采用电子显微镜拍摄青色、品红色、黄色和黑色网目调为10%~90%的印刷样张网点。

在Matlab软件中,采用模糊局部信息C均值算法逐一对每一个网点进行聚类分割,根据聚类的最佳分层数,每个聚类网点有相应的分层级别,计算相应聚类层的面积率。应用核心-边缘模型和本文模型分别聚类分割黑色50%网目调单个网点(图4)。

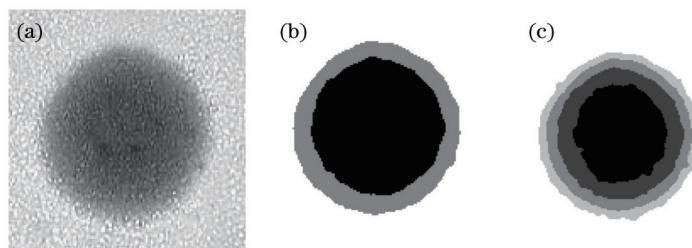


图4 网目调单个网点聚类图。(a) 单个网点显微图像;(b) 核心-边缘模型分割后结果;(c) 本文模型分割后结果

Fig.4 Clustering of a single dot. (a) Microscope image of a single dot; (b) result of core-fringe model; (c) result of the proposed model

采用核心-边缘模型、本文模型分别预测青色、品红色、黄色和黑色网目调面积率为10%~90%的单色印刷样张,采用plot函数绘制出核心-边缘模型和本文模型预测的光谱反射率曲线和实测曲线比较图,且计算两模型预测光谱反射率曲线与实测光谱反射率曲线的加权标准误差(WRMS)及色差(ΔE_{94})。鉴于篇幅,在此仅绘制出青色、品红色、黄色和黑色网目调面积率20%、40%、60%、80%的实测曲线和预测曲线对比图,如图5所示,计算得到光谱反射率加权标准误差WRMS及色差 ΔE_{94} ,如表1所示。

综合人眼视觉系统的特性,可以对测量值与预测值之间的标准偏差进行加权处理,加权的标准偏差公式为^[16]

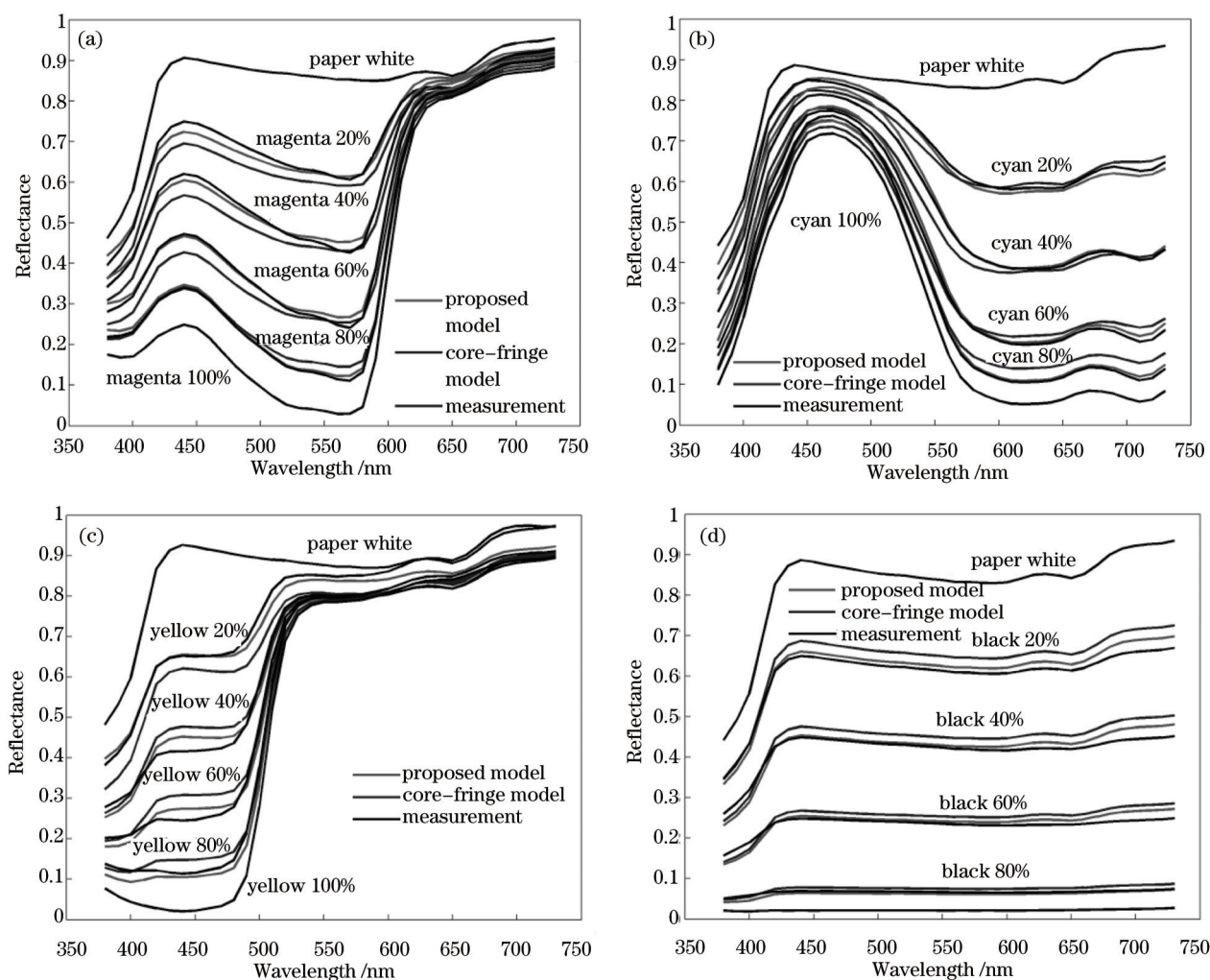


图 5 预测光谱反射率曲线与实测光谱反射率曲线比较

Fig.5 Measured and predicted spectral reflectance of several samples

$$f_{WRMS} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{36} (R_m - R_p)^2 w(\lambda)}}{36}, \quad (12)$$

式中 R_m 为测量得到的光谱反射率值, R_p 为光谱反射率预测值, $w(\lambda)$ 为权重。 $w(\lambda)$ 定义为

$$w(\lambda) = \frac{1}{R_m(\lambda)}. \quad (13)$$

模糊局部信息 C 均值算法按像素密度值聚类分割单个网点,实际上最主要是分割单个网点边缘的模糊部分,由于网点部分和纸白部分发生的光散射影响造成了单个网点边缘具有密度不均匀的面积率分布。在网目调印刷颜色预测中一般计算网点面积率的方法是将网点显微图像二值化后得到的网点面积比例作为物理网点面积率,根据上述分析,这样做显然带来了很大的误差,因为网点边缘部分与核心部分的密度值相差很大,在二值化过程中将模糊边缘简单地抛弃或者等同于核心部分处理都是不科学的,因此,处理网目调单个网点边缘部分,计算出网点核心部分和边缘各层次的面积比例对于网目调印刷的颜色预测具有重要的意义。本文方法按像素密度值聚类分割单个网点排除噪声干扰得到层次分明的网目调单个网点,根据不同密度层次计算出相对应的面积比例从而预测网目调单色印刷品颜色,虽然模型计算相对于光谱 Yule-Nielsen 公式、光谱 Neugebauer 方程更为复杂,但该方法的应用可以扩展到一般性,不受特殊值的限制,而且通过上述实验分析得出,采用该模型预测光谱反射率取得了更精确的结果。

表 1 预测光谱反射率与实测光谱反射率的差异比较

Table 1 Deviation between measured and predicted spectral reflectance of samples

Print sample	Core-fringe model		Proposed model		Print sample	Core-fringe model		Proposed model			
	Area coverage /%	ΔE_{94}	WRMS	ΔE_{94}	WRMS	Area coverage /%	ΔE_{94}	WRMS	ΔE_{94}	WRMS	
Cyan	10	1.86	0.0086	1.05	0.0069	Magenta	10	1.98	0.0091	1.44	0.0057
	20	1.62	0.0045	0.74	0.0030		20	2.19	0.0060	1.45	0.0029
	30	2.01	0.0093	0.98	0.0063		30	2.78	0.0090	1.74	0.0038
	40	2.12	0.0080	0.81	0.0054		40	2.79	0.0080	1.53	0.0054
	50	2.21	0.0098	1.12	0.0073		50	2.81	0.0072	1.91	0.0031
	60	1.61	0.0074	0.95	0.0047		60	2.43	0.0048	1.53	0.0019
	70	2.39	0.0099	1.06	0.0068		70	2.68	0.0061	1.84	0.0026
	80	1.77	0.0093	0.73	0.0031		80	2.59	0.0027	0.89	0.0013
	90	1.84	0.0084	0.86	0.0055		90	2.85	0.0048	1.78	0.0029
Yellow	10	1.72	0.0082	1.40	0.0052	Black	10	1.87	0.0103	1.13	0.0081
	20	2.16	0.0099	0.95	0.0051		20	1.92	0.0077	0.72	0.0033
	30	1.91	0.0088	0.78	0.0059		30	1.56	0.0092	0.89	0.0072
	40	2.15	0.0042	1.38	0.0028		40	1.89	0.0076	0.78	0.0039
	50	1.94	0.0076	0.96	0.0045		50	1.76	0.0080	0.98	0.0069
	60	2.23	0.0045	1.26	0.0028		60	1.98	0.0072	0.92	0.0043
	70	1.98	0.0042	1.02	0.0031		70	1.82	0.0070	1.03	0.0045
	80	1.50	0.0041	0.99	0.0029		80	1.97	0.0052	1.16	0.0033
	90	1.89	0.0040	0.98	0.0026		90	1.85	0.0054	1.22	0.0043

4 结 论

采用模糊局部信息 C 均值算法将单个网点显微图根据密度值进行聚类分割,从实验看出单个网点可以分割为层次分明的网点,根据 Lambert-Beer 定律,建立了单个网点不同层次间的透射率关系式,利用分层的 Clapper-Yule 模型计算油墨实地透射率。建立了网目调单色印刷品光谱反射率预测模型。运用 Atiqur 和 Ole 提出的核心-边缘模型和本文模型分别进行网目调光谱反射率预测比较。结果表明,本文提出的预测模型计算得到的预测值与实际测量得到的实际值更加接近。分别求解了上述两种模型预测值与实际测量值的色差 ΔE_{94} 和加权标准偏差 WRMS,结果显示,本文模型预测得到的光谱反射率具有更小的色差值和加权标准偏差。综上所述,本文提出的新模型具有更高的光谱反射率预测精度。该模型仅针对网目调单色印刷的研究,至于复合色中多色叠印的影响,以及该模型在多色叠印中的光谱反射率预测则有待进一步研究。

参 考 文 献

- 1 He Songhua, Liu Zhen, Chen Qiao. Research of spectral dimension reduction method based on matrix \tilde{R} theory[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(2): 0233001.
- 何颂华,刘真,陈桥.基于矩阵 \tilde{R} 理论的光谱降维方法研究[J].光学学报,2014,34(2):0233001.
- 2 A Murray. Monochrome reproduction in photoengraving[J]. J Franklin Inst, 1936, 221(6): 721-744.
- 3 J A C Yule, W J Nielsen. The penetration of light into paper and its effect on halftone reproduction[C]. Proc TAGA, 1951: 65-76.
- 4 Xu Jinlin, Xu Junfei. Review of optical dot gain and discussion of dot percentage[J]. China Printing and Packaging Study, 2012, 4(1): 1-6.
- 徐锦林,徐军飞.光学网点增大研究综述及网点面积率探讨[J].中国印刷与包装研究,2012,4(1):1-6.
- 5 Zhang Yixin, Du Yanjun. Clapper-Yule spectral reflection and transmission of halftone color fluorescent image[J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(2): 365-370.

- 张逸新, 杜艳君. 半色调荧光图像的光谱反射与透射模型[J]. 光学学报, 2007, 27(2): 365-370.
- 6 Zhang Yixin, Zang Dongjuan, Ge Jinghuan. Clapper-Yule color prediction model for recto-verso halftone images[J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(1): 200-204.
- 张逸新, 臧冬娟, 葛惊寰. 双面半色调图像的 Clapper-Yule 色彩预测分程模型[J]. 光学学报, 2008, 28(1): 200-204.
- 7 E Hecht. Schaum's Outline of Optics[M]. New York: McGraw-Hill, 1974.
- 8 M Hebert, R D. Hersch. Classical print reflection models, a radiometric approach[J]. J Imaging Sci Technol, 2004, 48(4): 363-374.
- 9 R D Hersch. Spectral reflection and dot surface prediction models for color halftone prints[J]. J Electro Imaging, 2005, 14(3): 033001.
- 10 Y Azuma, M Inui. Color prediction of halftone prints using core-fringe model[J]. J Soc Photogr Sci Technol, 2004, 67: 40-41.
- 11 M Atiqur, N Ole, E Per. Extension of Murray-Davies tone reproduction model by adding edge effect of halftone dots[C]. SPIE, 2014, 9018: 90180F.
- 12 P Emmel, I Amidror, V Ostromoukhov, *et al.*. Predicting the spectral behaviour of colour printers for transparent inks on transparent support [C]. Proceedings of the IS&T/SID 96 Color Imaging Conference: Color Science, Systems and Applications, 1996: 86-91.
- 13 S S Guo, W Q Jin, L X Wang. Quality assessment for visible and infrared color fusion images of typical scenes[J]. Chin Opt Lett, 2012, 10(8): 081101.
- 14 Kong Lingjun, Liu Zhen, Jiang Zhongmin. Study of the perceptual quality evaluation on print sharpness based on slanted-edge[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(6): 0633001.
- 孔玲君, 刘真, 姜中敏. 基于倾斜刃边的印刷清晰度感知质量测评研究[J]. 光学学报, 2014, 34(6): 0633001.
- 15 S Krinidis, V Chatzis. A robust fuzzy local information c-means clustering algorithm[J]. IEEE Trans Image Processing, 2010, 19(5): 1328-1337.
- 16 A Karbasi, S Moradian, S Asiaban. The use of two constant Kubelka-Munk theory in spectrophotometric color matching[C]. Proceedings of ICE 2007, 2007: 418-420.