

印刷复制过程图像信息熵传递分析

金杨^{1,2}, 刘真¹, 邬旭杰²

(1. 南京林业大学, 南京 210037; 2. 北京印刷学院, 北京 102600)

摘要: 基于 Shannon 信息论中有关信息量及信息熵的基本概念, 通过对实际单色加网印刷图像的测试、计算和分析, 获得了印刷图像的零阶、一阶、二阶信息熵。这一分析方法及结果, 对认识印刷过程图像信息传递特性具有重要意义。

关键词: 信息量; 信息熵; 印刷图像

中图分类号: TS801.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2012)23-0133-04

Analysis on Information Entropy Transmission of Image in Printing Process

JIN Yang^{1,2}, LIU Zhen¹, WU Xu-jie²

(1. Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China; 2. Beijing Institute of Graphic Communication, Beijing 102600, China)

Abstract: Based on the basic concepts of information-quantity and information-entropy in the theory of Shannon, tests of monochromatic screened printed images were carried out. After computing and analysis, the information quantity and information entropy of zero to second order were obtained. The analysis method and result are significant for the knowledge of information transmission characteristic of printing process.

Key words: information quantity; information entropy; printed image

印刷复制过程承担着图文信息传递的任务。通过这一过程, 原始信息被传递到承印物上。由于图像蕴含信息的丰富性, 在印刷过程传递的信息中, 图像占有较大份额。在印刷过程中, 不可避免地存在着一些内部及外部的干扰因素, 影响原始信息的传递, 使其发生某些畸变或导致信息损失。

基于上述原因, 笔者以信息论为基础, 通过对原始图像及其印刷图像的信息量/信息熵的测试和分析, 获取印刷过程中信息传递的实际状况, 这有利于印刷图像信息传递状况量化、印刷信息传递监控, 并对奠定印刷质量控制的信息学基础具有重要意义。

1 信息学基础

1.1 信息量和信息熵

信息论由 C. E. Shannon^[1]提出。

原始信息从信息源发出, 经发送机转换成信号并

通过信道传输。其中, 信道上存在噪声(干扰)源。信号被接收机收到并将信号重新转换为信息, 信息最终被受信者(信宿)获取。

信息源是一个可以发出信息的客观实体, 可以发出多种不同信息符号, 这些符号或符号的组合构成了信息内容。若信息源可以发出 N 种不同的信息符号, 即: $a_i (i = 1, \dots, N)$, 而某一符号 a_i 由信息源发出的概率为 $P(a_i)$, 则: 接收到符号 a_i 所获得的信息量 $I(a_i)$ 为:

$$I(a_i) = \log_2 \frac{1}{P(a_i)} \quad (1)$$

(1) 式给出的信息量称为“自信息量”, 单位为“比特”, 需满足符号 a_i 的发出与其他符号的发出无关(无记忆信息源)的条件。

一般而言, 信息源大多是“有记忆信源”, 它发出某个符号与其之前发出的符号具有相关性, 故需要按照条件概率进行信息量计算, 例如: 信息源刚发出 a_j

的情况下,又发出 a_i 的概率 $P(a_i/a_j)$,所获信息量为“互信息量”。

信息源发出大量符号,被接收端收到后获取信息,而每收到 1 个符号平均所获的信息量称为信息熵。其基本定义为:

$$H = \sum_{i=1}^N P(a_i) I(a_i) = \sum_{i=1}^N P(a_i) \log_2 \frac{1}{P(a_i)} \quad (2)$$

(2) 式的 H 为零阶信息熵,满足无记忆信息源条件。计入信息源发出的前 1 个、前 2 个符号的信息熵分别为一阶和二阶信息熵。同理可知高阶信息熵的概念。

1.2 图像的信息量和信息熵^[2-3]

不妨将离散数字图像看作是按像素发出多种符号的信息源。其中,每个像素符号可具有不同的色彩状况。

对黑白二值数字图像而言,其信息源符号集仅包含{黑/白}两种符号;对 8 位量化的灰度数字图像,其符号集包含 256 种不同符号;而彩色图像的符号集所含符号数量很大,如 24 位彩色图像,其符号数为 16 777 216 种。

以 8 位灰度数字图像为例,其灰度级为 $G_i(i=0, 1, \dots, 255)$,每个灰度级在图像中出现的概率为 $P(G_i)$,则其自信息量 $I(G_i)$ 和零阶信息熵 H_0 分别为:

$$I(G_i) = \log_2 \frac{1}{P(G_i)} \quad (3)$$

$$H_0 = \sum_{i=1}^N P(G_i) \log_2 \frac{1}{P(G_i)} \quad (4)$$

在图像中,将某一像素的灰度级 $G_j(j=0, \dots, 255)$,与其前面出现的 N 个像素的灰度值 $G_{j-1}, G_{j-2}, \dots, G_{j-N}$ 关联,可组合成 1 个新符号。获取条件概率 $P(G_j/G_{j-1}, G_{j-2}, \dots, G_{j-N})$,则可利用下式计算出 N 阶信息熵 H_N 。其中, M 为 $N+1$ 个灰度级组合后信息符号的总数, $M = 256N + 1$ 。

$$H_N = \sum_{i=1}^M P(G_j/G_{j-1}, G_{j-2}, \dots, G_{j-N}) \log_2 \frac{1}{P(G_j/G_{j-1}, \dots, G_{j-N})} \quad (5)$$

图像的信息熵既可以反映其对图像信息的传递及再现状况,也可以表明图像信息压缩的可能性和程度,这对于更好地估计和评价图像压缩有利^[4-5]。

其中,各灰度级在图像中出现的概率越接近,即:图像的阶调层次数越多、分布越均衡,则其零阶熵越

高。在极端情况下,256 个灰度级在图像中出现的概率相等, $P(G_j) = 1/256$,则 $H_0 = 8$ 比特/像素;若图像在传递过程中损失了一些灰度级,或其分布均衡度低,则其零阶信息熵 $H_0 < 8$ 比特/像素,图像具有无损压缩的空间。

图像的高阶信息熵反映了图像像素灰度值之间的相关程度。如果图像相邻像素灰度级之间的差异小(相关性强),则条件概率值就较大,互信息量和高阶熵就较低,图像的低频成分较丰富,具有较大的压缩空间。反之,如果图像的细节灰度突变性较强,相邻像素的灰度级之间差异较大,则条件概率值就较小,互信息量和高阶熵就较高,图像压缩空间较小。

2 图像信息量及信息熵的印刷传递测试

为了获取图像信息量及信息熵在印刷复制过程中的变化,了解印刷复制这一信息通道对图像信息量及信息熵的实际传递状况,进行了测试版的印刷、数字化及分析。

2.1 测试元素及测试版

在研究中,对 8 位灰度模式的数字图像进行印刷复制,并对印刷品进行信息量、信息熵等的测试分析。

印刷过程所能传递和再现的灰度级数是图像信息再现的基础之一。为此,256 级灰度的印刷传递测试是十分必要的测试项目。此外,具有不同特点的 8 位灰度图像也是测试关注的焦点。最终,为了考查印刷复制过程的频谱传递特性,还安排了多种不同空间频率图像作为测试目标。将上述 3 类测试元素组成的测试版见图 1,测试版的技术参数见表 1。

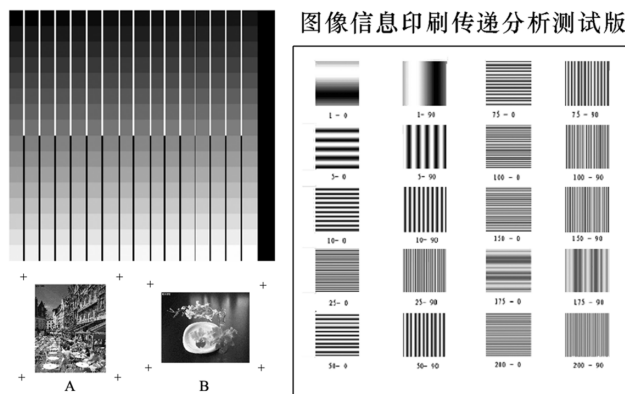


图 1 图像信息传递测试版

Fig. 1 Test plate for image information transmission test

表 1 测试版技术参数
Tab.1 Parameters of the test plate

项目	参数或设置
尺寸/mm	420×300
梯尺灰度级数	256 (0 ~ 255)
ISO 图像分辨率/dpi	960
波纹图像分辨率/dpi	2400
空间频率(周期/in) *	1, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 150, 175, 200
波纹方向	水平、垂直
记录分辨率/dpi	2400
加网线数(Lpi)/网角(°)	150 / 0

* 1 in=25.4 mm

采用 Adobe Illustrator, XRITE ColorPort 等软件工具制作测试版的数字文件,经 Harlequin Navigator RIP 的处理,由方正公司的热敏计算机直接制版机输出成印版,并在海德堡公司 SM-52 印刷机上印刷成样张。

2.2 测试及分析

2.2.1 灰度级印刷再现的测试

采用 Eye-One Pro 分光光度计,对样张上的 256 级灰度梯尺进行色度 (L^*, a^*, b^*) 测试。为确保测量数据的可靠性,测量次数为 3 次,求出平均值。

测试结果表明:就测量数据而言,样张上的 256 级灰度都能够区分。由此可知,在本研究的实验环境及条件下,印刷信息通道具备传递 256 级灰度的能力。

计入人眼对明度差别的分辨能力,取人眼色差辨别阈值 $\Delta E=0.5$ 作为区分梯级差异的界限,经过计算得到:视觉可分辨的灰度级数为 118 级,相当于 6.8836 比特所能再现的图像层次级数($2^{6.8836}=118$)。

2.2.2 灰度图像信息熵的计算

印刷测试版中的两幅灰度图像具有不同的特点,

表 2 测试图像 A/B 的零阶、一阶及二阶信息熵
Tab.2 Zero-, 1st- and 2nd order entropy of tested images A and B

熵图像	图 A					图 B				
	零阶	一阶/ 水平	一阶/ 垂直	二阶/ 水平	二阶/ 垂直	零阶	一阶/ 水平	一阶/ 垂直	二阶/ 水平	二阶/ 垂直
原灰度图像	7.539	6.651	6.671	5.939	5.967	7.187	5.50	5.566	4.819	4.888
RIP 网点图像	0.914	0.673	0.678	0.593	0.599	0.840	0.600	0.607	0.519	0.529
印刷网点图像	7.093	5.875	5.865	5.20	5.181	6.677	5.479	5.456	4.843	4.809
印刷图像与原始图像熵值比	0.941	0.883	0.879	0.876	0.868	0.929	0.996	0.98	1.005	0.984

就两幅原始灰度图像而言,其零阶信息熵反映了灰度分布的均衡程度。测试表明:两者的零阶熵接

图像 A(街边咖啡馆)具有较丰富的细节和灰度突变边界,灰度分布较为均衡,而图像 B(兰花)则具备较大面积的灰度柔和渐变,灰度分布略微偏向暗调。

为了对印刷图像进行信息熵分析,必须对样张进行数字化扫描。将两幅印刷图像皆以 2400 dpi 的分辨率扫描成灰度模式的数字文件,且不去网、不进行附加的扫描图像处理。

在零阶信息熵的计算中,需对图像像素各灰度级的概率进行统计,而不必顾及一个像素与其相邻像素的灰度级相关性,即:仅需统计图像的 $P(G_i)$,再根据 (3),(4) 式计算零阶信息熵即可。

如(5) 式所示,在一阶和二阶信息熵的计算中,所进行的像素灰度级概率统计需要考虑多个像素。

其中,一阶信息熵相关的统计需计入 2 个像素的灰度值,即:在 1 行(或 1 列)像素中,若当前像素的灰度值为 G_j ,而此像素左侧(或上方)的 1 个像素的灰度值为 G_i ,则对“已出现 G_i 的情况下又出现 G_j ”的事件予以计数,以获取条件概率 $P(G_j/G_i)$ 。同理,二阶信息熵相关的统计需要计入 3 个像素的灰度值,即:在 1 行或 1 列像素中,若当前像素的灰度值为 G_k ,而在当前像素左侧(或上方)的 1 个像素的灰度值为 G_j 、在当前像素左侧(或上方)的 2 个像素的灰度值为 G_i ,则需对“已出现 G_i, G_j 的情况下又出现 G_k ”的事件予以计数,以获取概率 $P(G_k/G_i, G_j)$ 。在所有的条件概率统计完毕后,计算出一阶及二阶的图像信息熵。

A, B 两幅原始图像、数字加网图像、印刷品扫描图像的零阶、一阶及二阶信息熵见表 2。

为进行比较分析,分别对原始灰度图像(不加网)、RIP 后的二值加网数字图像、印刷样张加网图像(灰度模式)进行了信息熵计算。其中,分别按水平和垂直方向计算了一阶及二阶信息熵。

近,图 A 的零阶信息熵略高于图 B。在一阶和二阶信息熵方面,图 A 都大于图 B,反映出图 A 的像素灰度

值相关程度低于图 B,这与图 A 的突变轮廓丰富而图 B 的灰度变化较柔和有关。两幅图像的水平及垂直信息熵虽有差距(水平熵值略高),但较接近,说明其图像内容的方向性并不明显。

由于栅格图像处理(Ripping)后的加网图像仅有黑白二值,其零阶信息熵接近于 1 比特/像素是顺理成章的。加网图像 A 的一阶及二阶熵高于图像 B,同样反映了其细节丰富的特点。

经扫描获得的印刷品网点图像为灰度模式,从实际图像上观察,网点虽被完全识别,但网点与空白部分的灰度并非黑白二值,而分布有较多的灰度级。对其进行的零阶、一阶和二阶熵计算,所得结果表明:除个别数据外,这些信息熵都比原始灰度图像的各阶熵值低,可见印刷过程的信息损失。

将 A 和 B 两幅图像相比,图 A 的熵值比图 B 高,这显然是由原始图像的信息特征决定的。在表 2 中,图 B 印刷网点图像的二阶水平熵值(带下划线)略高于原始图像,其原因应与网点图像的微观突变性相关。原图像加网处理后,会产生大量网点与空白的突

变,采用与印版记录分辨率相同的分辨率扫描后,进行高阶熵计算时,有可能产生熵值高于原图的状况。这种状况不应看作图像信息丰富性提高,而是加网过程提供的“伪细节”所致。

总体上,细节丰富、突变边界较多、高频成分较强的图像,其高阶信息熵传递状况略差于平缓渐变(低频)成分较多的图像。这一点从表 2 中最后一行的信息熵传递比率(印刷图像熵值/原图像熵值)可以看出。

2.2.3 印刷过程的空间频率传递测试

图像信息熵的传递与图像频谱成分的传递状况紧密相关,可传递的高频成分越多,高阶信息熵损失越少。

在研究中,对印刷测试版上 10 种不同空间频率正弦波的横/纵各 2 幅网点图像(共 20 幅)进行了分辨率 2400 dpi 扫描,获得数字图像。随后,在 MATLAB 软件平台上,对其进行傅里叶变换,获得频谱数据。各正弦波图像直流成分和特征频率成分的傅里叶谱值(频谱数据值=表中数据 $\times 10^8$)见表 3。

表 3 不同空间频率正弦波图像的傅里叶谱值
Tab.3 Fourier spectrum values of sinusoidal wave images under different spatial frequencies

方向	项目	空间频率(周期/英寸)									
		1	5	10	25	50	75	100	150	175	200
水平	直流成分	5.7	5.58	5.58	5.49	5.24	5.35	7.02	5.1	5.04	5.07
	特征频率成分	3.1	2.97	2.89	2.64	2.28	2.25	2.22	1.52	1.32	1.4
垂直	直流成分	5.74	5.62	5.62	5.46	5.43	5.67	4.89	5.4	5.24	5.13
	特征频率成分	3.1	2.94	2.82	2.51	1.69	1.65	1.08	0.33	0.09	0.15

从表 3 可见,在所设置的加网印刷条件下,空间频率为 1~200 周期/in 的正弦波频率都能够顺利传递到印刷品图像中。这符合文献[6]所做出的结论^[6]。在各种空间频率下,傅里叶频谱直流成分的谱值较接近,而随空间频率上升,所传递的特征频率傅里叶谱值下降,表明印刷过程对较高频率成分的传递能力随频率上升而减弱。

3 结论

通过对印刷复制过程的图像信息熵及频谱成分传递测试及分析,结果表明:印刷复制过程存在图像信息的损失,总体表现为印刷图像零阶及高阶信息熵低于原图像;在所采用的实验条件下,印刷调幅加网网点能够再现 256 级灰度阶调层次,为零阶信息熵达

到 8 比特/像素奠定了基础;图像自身所具备的各阶熵值与其自身灰度分布均匀性、细节丰富性、突变边界等相关,灰度阶调分布范围广且均衡的图像零阶信息熵较高,而细节丰富、边界突变强烈的图像,其高阶熵值较高;基于印刷复制过程对频谱信息的传递随频率升高而变弱,故对高阶熵值较高的原始图像,其印刷传递性劣于对高阶熵值较低的原始图像;印刷图像中的网点是对图像信息的一种干扰,有可能增大图像高阶信息熵值,但并非有效信息。

参考文献:

[1] SHANNON C E. 通信的数学理论[DB/OL]. 陈国敏,译. (2011-05-27). <http://www.2cto.com/ebook/201105/27469.html>.

- tion Transformations Tested Using New Colour Appearance Data in Textiles[J]. *Color Res Appl*, 1995, 20: 313-327.
- [18] BRAUN K M, FAIRCHILD M D. Testing Five Color Appearance Models for Changes in Viewing Conditions[J]. *Color Res Appl*, 1997, 21: 165-174.
- [19] 吴旭东, 石俊生, 云利军. 一组显示器与打印体对应色数据及其色适应模型评价[J]. *光学学报*, 2011, 31(5): 53-64.
- WU Xu-dong, SHI Jun-sheng, YUN Li-jun. New Set of Corresponding Colors Data between Monitor and Printer and Evaluation of Chromatic Adaptation Transforms[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(5): 53-64.
- [20] LUO M R, HUNT R W G. The Structure of the CIE 1997 Colour Appearance Model (CIECAM97s) [J]. *Color Res Appl*, 1998, 23: 138-146.
- [21] LUO M R, CLARKE A A, RHODES P A. Quantifying Colour Appearance. Part I. LUTCHI Colour Appearance Data [J]. *Color Res Appl*, 1991, 16: 166-180.
- [22] LUO M R, CLARKE A A, RHODES P A. Quantifying Colour Appearance. Part II. Testing Colour Models Performance Using LUTCHI Color Appearance Data [J]. *Color Res Appl*, 1991, 16: 181-197.
- [23] LUO M R, CLARKE A A, RHODES P A. Quantifying Colour Appearance. Part III. Supplementary LUTCHI Color Appearance Data [J]. *Color Res Appl*, 1993, 18: 98-113.
- [24] LUO M R, GAO X W, RHODES P A. Quantifying Colour Appearance. Part IV. Transmissive Media [J]. *Color Res Appl*, 1993, 18: 191-209.
- [25] HUNT R W G, LUO M R. Evaluation of a Model of Colour Vision by Magnitude Scalings: Discussion of Collected Results [J]. *Color Res Appl*, 1994, 19: 27-33.
- [26] JUAN L G, LUO M R. New Magnitude Data for Evaluation Colour Appearance Models [C]. NPL, UK, Colour and Vision Scales 2000, 2000: 3-5.
- [27] JUAN L G, LUO M R. New Magnitude Estimation for Scaling Saturation [C]. *Proceeding of SPIE*, 2002, 4421: 575-578.
- [28] FAIRCHILD M D, BERNIS R S. Image Color Appearance Specification through Extension of CIELAB [J]. *Color Res Appl*, 1993, 18: 178-190.
- [29] BRAUN K M, FAIRCHILD M D, ALESSI P J. Viewing Environments for Cross-Media Image Comparisons [J]. *Color Res Appl*, 1996, 21: 6-17.
- [30] LUO M R, LYU Wei-ge, XU Hai-song. Testing Performance of CIECAM02 in Predicting Perceptual Contrast [J]. *Chinese Optics Letters*, 2012, 10(3): 33-310.
- [31] LI C, M R LUO, HUNT R W G, et al. The Performance of CIECAM02 [C]. *Proc IS&T/SID 10th Color Imaging Conference*, 2002: 28-32.
- [32] 刘红芳, 赵秀萍, 金洪勇. 图像色貌模型的研究及应用 [J]. *包装工程*, 2008, 29(6): 58-60.
- LIU Hong-fang, ZHAO Xiu-ping, JIN Hong-yong. Research and Application of Image Color Appearance Model [J]. *Packaging Engineering*, 2008, 29(6): 58-60.

(上接第 136 页)

- SHANNON C E. A Mathematical Theory of Communication [DB/OL]. Translated by CHEN Guo-min. (2011-05-27). <http://www.2cto.com/ebook/201105/27469.html>.
- [2] 金杨. 印前流程中图像的信息量和信息熵分析[J]. *北京印刷学院学报*, 2000, 8(3): 1-9.
- JIN Yang. Analysis of Information Capacity and Entropy of Image in the Prepress Workflow [J]. *Journal of Beijing Institute of Graphic Communication*, 2000, 8(3): 1-9.
- [3] HIRADEZKY R. Objektive Qualitätsbeurteilung von Druckprodukten und Möglichkeiten Zur Analytischen Behandlung von Reproduktion und Druckprozessen mit Hilfe der Informationstheorie [D]. Darmstadt: Technischen Hochschule Darmstadt, 1977.
- [4] 姚军财. 基于人眼视觉特性的印刷图像压缩技术研究 [J]. *包装工程*, 2011, 32(5): 69-72.
- YAO Jun-cai. Compression Technology of Printed Image Based on Human Vision Characteristics [J]. *Packaging Engineering*, 2011, 32(5): 69-72.
- [5] 和克智, 刘奇龙, 赵鸿雁. 包装印刷中 JPEG2000 标准实现的研究 [J]. *包装工程*, 2006, 27(1): 79-83.
- HE Ke-zhi, LIU Qi-long, ZHAO Hong-yan. Study on Realization of JPEG2000's in Packaging and Printing [J]. *Packaging Engineering*, 2006, 27(1): 79-83.
- [6] JIN Yang. Analysis on Frequency Transfer Characteristics of AM/FM Screening Image [C]//XIA Pei-jie. 2005 Beijing International Conference on Imaging. Beijing: Science Press, 2005.