

# 面向保真印刷的CMYK图像鲁棒水印方法

王彩印<sup>1,2</sup>, 孔祥维<sup>1</sup>, 李超<sup>2</sup>

(1. 大连理工大学信号与信息处理 辽宁 大连 116024; 2. 大连工业大学轻工与化学工程学院 辽宁 大连 116034)

**【摘要】**CMYK印刷图像数字水印所面临的主要挑战是抵抗印刷扫描过程的鲁棒性和水印对印刷图像颜色保真度的影响。该文基于CMYK颜色空间的再现特征和人眼视觉特点,提出在图像的Y色信息通道和K色信息通道中分别嵌入有意义水印和结构模板信号。为了提高印刷图像的颜色保真度,基于人眼视觉特征建立了视觉蒙版,并在图像的空间域中对水印信号进行重塑,以胶版印刷为工业应用背景进行了一系列实验测试。实验结果表明本文提出的面向保真印刷的CMYK图像鲁棒水印方法,适用于以胶版印刷方式为应用背景的CMYK图像保真复制,在实际应用中具有较好的有效性。

**关键词** CMYK颜色空间; 数字水印; 保真印刷; 视觉蒙版; 印刷图像

中图分类号 TP391.41 文献标志码 A doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2017.03.009

## Robust Watermarking Applying to CMYK Printed Image for Fidelity Printing

WANG Cai-yin<sup>1,2</sup>, KONG Xiang-wei<sup>1</sup>, and LI Chao<sup>2</sup>

(1. School of Information and Communication Engineering, Dalian University of Technology Dalian Liaoning 116024;

2. School of Light Industry and Chemical Engineering, Dalian Polytechnic University Dalian Liaoning 116034)

**Abstract** The challenges faced with printed image watermarking applications mainly are the robustness against distortion caused by print-scanning processing and the color fidelity of printed images. Based on the feature of CMYK color space and human visual system, this paper presents a robust CMYK printed image watermarking, which embeds the informative watermark and the structure template signal respectively in the Y color information channel and K color information channel. The embedded template enables the necessary robustness against geometric distortions in print-scanning process. A spatial perceptual mask is used to reshape the embedded energy after it is inverted to the spatial domain, which significantly improves the color fidelity and the image quality. A series of proof tests have been carried out on lithographic printing presses and shows that the watermark embedded in the CMYK images is well preserved and can be extracted with a high quality, and simultaneously, a remarkable fidelity of color and tones on printed copies is also well preserved.

**Key words** CMYK color space; digital watermarking; fidelity printing; perceptual mask; printed image

印刷图像数字水印<sup>[1-4]</sup>是在数字图像中嵌入一些标识信息(如所有者信息、编号或公司logo等),嵌入的信息不能被人察觉,不影响原图像的视觉效果和使用价值,并在图像处理、流通传播及印刷过程中不能被去掉。通过扫描印刷图像提取这些标识信息,可以对原数字图像和印刷图像进行版权保护、取证及真伪鉴别等。印刷图像数字水印算法应具有抵抗图像处理和印刷-扫描过程的鲁棒性,同时应满足印刷颜色再现的保真度。近些年来面向打印和印刷图像的数字水印技术已取得了一定的研究成果。

已有算法主要分为两类:第一类是半色调图像

鲁棒水印技术<sup>[5-8]</sup>;第二类是数字连续调图像鲁棒水印技术<sup>[9-13]</sup>。半色调水印算法主要是在图像半色调化的过程中或者半色调化后嵌入水印信息,印刷过程中的网点扩大将会导致水印信息难以检测,且无法对数字连续调图像和复制图像进行同步保护。数字连续调图像鲁棒水印技术是在数字连续调图像中嵌入水印信息,嵌入水印的图像经过图像处理、传递和印刷,扫描印刷图像提取水印信息,可以对数字图像和印刷图像进行同步保护。文献[9-11]针对灰度图像提出了抗打印-扫描过程的水印算法;文献[12]分析了RGB(红、绿和蓝)彩色图像的颜色空间特征,

收稿日期: 2015-12-03; 修回日期: 2016-03-07

基金项目: 国家自然科学基金创新研究群体(71421001)

作者简介: 王彩印(1982-),女,博士,主要从事印刷图像处理与复制、包装与印刷防伪技术等方面的研究。

在R通道中嵌入水印信息, 算法测试了胶版印刷过程, 提出的水印算法本身不能校正图像的几何变形, 在提取水印前需要对图像做校正处理。文献[13]基于四元数傅里叶变换和改进的均匀极坐标映射提出了彩色图像数字水印算法, 算法抵抗几何变形的鲁棒性很强, 算法还未进行打印/印刷-扫描的测试。目前提高水印鲁棒的方法主要有: 基于模板的方法<sup>[14-17]</sup>、基于特征的方法<sup>[18-19]</sup>和RST不变域的方法<sup>[20-21]</sup>。基于模板的方法对抵抗图像几何变形具有良好的效果<sup>[22]</sup>, 模板水印通常在图像的傅里叶域嵌入<sup>[14-17]</sup>, 有意义水印可与模板水印嵌入同一域或不同域。然而, 模板水印和有意义水印的同时嵌入将增加图像噪声, 影响水印的透明性, 尤其是在图像较平滑的区域。

综上所述, 数字连续调鲁棒水印可以对原数字连续调图像和印刷图像同步保护, 然而, 已有算法大部分是针对RGB图像或者灰度图像, 主要用于激光打印和喷墨打印。另一方面, 提高水印鲁棒的模板水印和携带信息的有意义水印会降低印刷图像的保真度。本文基于CMYK颜色空间特征和人眼视觉理论, 提出在图像的Y通道和K通道中分别嵌入有意义水印和结构模板信号, 水印信号选择在图像的频率域中嵌入, 为了提高图像质量和印刷图像的颜色

保真度, 基于人眼视觉特征建立了视觉蒙版, 并在图像的空间域中对水印信号进行重塑。以胶版印刷为工业应用背景, 进行了一系列实验测试, 实验结果表明提出的水印算法, 适用于胶版印刷方式的CMYK图像保真复制。

## 1 水印嵌入和提取方法

印刷图像必须能真实再现原稿, 在视觉上要和原稿具有高度保真性, 因此, 在CMYK颜色空间中选择水印信息的嵌入分量时基于人眼视觉系统的两个基本特性: 1) 人眼对图像的色相变化特别敏感; 2) 人眼对黄-蓝的高频变化不敏感<sup>[23]</sup>, 再结合试验发现: 在Y通道中嵌入水印信息的图像视觉效果最好; 越多颜色通道的信息改变会引起噪声的叠加, 从而导致图像整体质量下降; 如果将有意义水印信息和结构模板信息全部放入Y色通道中, 将导致Y色通道中信号改变剧烈, 从而影响颜色的色相。故本文提出在图像的Y色信息通道和K色信息通道中分别嵌入有意义水印和结构模板信号。为了达到水印鲁棒性和图像保真性的平衡, 本文将结合人眼视觉特征建立视觉蒙版, 将频率域嵌入的水印转换到空间域并进行水印重塑。本文提出的嵌入方法如图1所示。

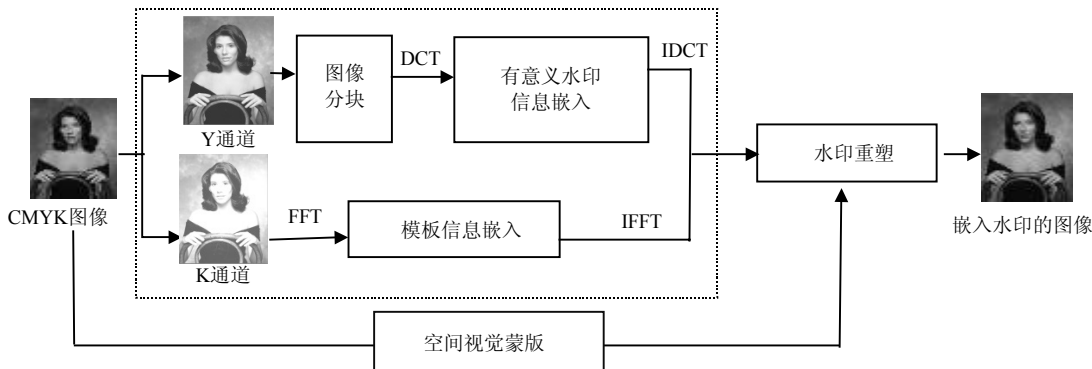


图1 水印信号嵌入流程图

### 1.1 水印嵌入算法

为了使水印具有较强的鲁棒性, 水印信息包括两个部分: 1) 结构模板水印信号, 用于校正图像在印刷及扫描过程中所经历的几何变形; 2) 有意义水印信号, 用于版权保护或者图像取证的logo或者编码信息。为了避免水印信号的叠加, 在不同的颜色通道分别嵌入模板信号和有意义水印信号。模板水印信号在K色通道嵌入, 不会引起图像色相的改变, 有意义水印在Y色通道中嵌入。

#### 1) 结构模板信号嵌入

通过对CMYK颜色空间及人眼视觉特征的分析

可知, CMYK颜色空间中K通道信息的变换将改变颜色的明亮度和饱和度, 不会改变颜色的色相, 因此, 在K通道中嵌入结构模板信号, 将图像的黑色分量做DFT变换, 在中频区域选取两组位于两条直线上的28个模板点。这些点均匀分布在倾角为 $\theta_1$ 和 $\theta_2$ 的两条直线上, 每条线上有14个点, 为了保证嵌入水印后的傅里叶系数的对称性, 只在上半平面选取14个点, 然后修改与原点对称点的系数即可。修改模板点处傅里叶系数的幅度值, 改变量以不可见为标准, 通常取局部平均值加2~3倍的方差<sup>[14-15]</sup>, 如式(3)所示:

$$\text{New\_MagT} = \text{LocalMean}(i) + \delta_1 S(i) + \delta_2 \text{std} \quad i=1,2,\dots,8 \quad (3)$$

式中,  $\text{New\_MagT}$ 是DFT幅度值;  $\text{LocalMean}(i)$ 是局部平均幅度值;  $S(i)$ 是局部标准方差;  $\text{std}$ 是全局标准方差;  $\delta_1$ 和 $\delta_2$ 是强度。

2) 有意义水印信息嵌入

水印信息优先在黄色分量中嵌入, 基于DCT域优良的性能, 且对图像压缩、缩放等具有较好的鲁棒性, 有意义水印选择图像的DCT域<sup>[24-25]</sup>。首先将图像进行分块处理, 本文将图像进行8\*8的分块处理; 然后对每个图像块进行DCT变换, 为了更好地保持图像的视觉效果和水印的鲁棒性, 在每个块DCT域的中频区随机选择两个系数 $F_1^i$ 和 $F_2^i$ 。如果水印信息为1, 则使 $F_1^i$ 大于 $F_2^i$ ; 否则, 使 $F_2^i$ 大于 $F_1^i$ , 表示为:

$$\begin{cases} \begin{cases} F_1^{i'} = F_1^i + D_i \\ F_2^{i'} = F_2^i - D_i \end{cases} & \text{当水印信息 } b_i=1 \text{ 时} \\ \begin{cases} F_2^{i'} = F_2^i + D_i \\ F_1^{i'} = F_1^i - D_i \end{cases} & \text{当水印信息 } b_i=0 \text{ 时} \\ D_i = \begin{cases} d_i + a/2 & \text{当 } 0 \leq d_i \leq a \\ d_i & \text{当 } d_i > a \\ a/2 & \text{当 } d_i < 0 \end{cases} \\ d_i = \begin{cases} F_2^i - F_1^i & \text{当 } b_i=1 \\ F_1^i - F_2^i & \text{当 } b_i=0 \end{cases} \end{cases} \quad (4)$$

式中,  $F^{i'}$ 为水印图像DCT系数值;  $F^i$ 为原图像DCT系数值;  $D_i$ 是总修改量;  $d_i$ 是 $F_1^i$ 和 $F_2^i$ 的差值;  $a$ 为控制水印强度的调整因数;  $b_i$ 为水印信号。

1.2 水印提取算法

首先在图像黑色通道中检测水印模板, 根据模板信号估计图像的几何变形并进行校正<sup>[14-15]</sup>。然后, 在图像黄色通道中提取有意义水印信息, 对图像黄色分量进行分块处理, 并对每个块图像做DCT变换。根据密钥选择嵌入水印的位置, 比较两个位置上DCT系数的大小确定水印信号值, 如果 $F_1^i$ 大于 $F_2^i$ , 则水印为1, 否则水印为0。

2 空间域视觉蒙版

2.1 空间域视觉蒙版

基于人眼视觉对亮调、暗调、边缘周围和纹理区域的噪声不敏感特征<sup>[23]</sup>, 建立空间视觉蒙版主要考虑人眼视觉系统的四个特征属性: 亮度、对比度、边缘和纹理, 根据人眼视觉特征可以量化表示图像

任一像素 $I(i,j)$ 的亮度蒙版、对比度蒙版、边缘蒙版和纹理蒙版。

若用 $C$ 表示像素 $I(i,j)$ 周围的邻域, 当 $C \times C=2 \times 2$ 时, 根据人眼视觉对亮调和暗调区域的噪声不敏感特征, 像素 $I(i,j)$ 的亮度蒙版可以表示为:

$$L_m(i,j) = \begin{cases} 1 + I_a(i,j) & I_a(i,j) > 0.5 \\ 1 + (1 - I_a(i,j)) & \text{其他} \end{cases} \quad (5)$$

$$I_a(i,j) = \frac{1}{256 \times 4} \sum_{(i,j) \in C} I(i,j)$$

式中,  $I_a(i,j)$ 为 $C$ 区域中像素亮度的平均值。

像素与周围像素的差异比像素本身的亮度值更重要, 既在对比度较强的区域人眼对噪声不敏感, 故像素 $I(i,j)$ 的对比度蒙版可以表示为:

$$C_m(i,j) = 2 \left( 1 + \frac{L_{\max}(i,j) - L_{\min}(i,j)}{L_{\max}(i,j) + L_{\min}(i,j)} \right) \quad (6)$$

式中,  $L_{\max}(i,j)$ 和 $L_{\min}(i,j)$ 分别是区域 $C$ 中像素的最大亮度值和最小亮度值。

像素 $I(i,j)$ 的边缘蒙版可以用邻域中像素的平均梯度能量表示, 人眼对不同方向的噪声敏感度不同, 通常人眼对垂直和水平方向的噪声大于对角方向的噪声, 故对角方向的边缘蒙版值比垂直和水平方向的蒙版值要高一些, 如式(7)所示。

$$E_m(i,j) = \frac{1}{12} \sum_{\substack{(i,j) \in C \\ (m,n) \in C}} \left\{ \begin{array}{l} \sqrt{2} \quad \text{当 } |i-m|=|j-n|=1 \\ 1 \quad \text{其他} \end{array} \right\} \times [I(i,j) - I(m,n)]^2 \quad (7)$$

像素 $I(i,j)$ 的纹理蒙版可以局部方差表示:

$$T_m(i,j) = \text{Var}\{I(i,j)\}_{(i,j) \in C} \quad (8)$$

因此, 空间视觉蒙版是上述四大特征蒙版的结合:

$$M_m(i,j) = L_m(i,j)(C_m(i,j))^\alpha (E_m(i,j)T_m(i,j))^\beta \quad (9)$$

式中,  $M_m(i,j)$ 是视觉蒙版矩阵;  $\alpha$ 和 $\beta$ 是权重系数, 在实验中取 $\alpha=0.5$ ,  $\beta=0.25$ 。

2.2 水印重塑

分别在CMYK图像Y通道的DCT域和K通道的DFT域嵌入有意义水印和模板水印后, 将其转换到空间域, 并使用式(10)对水印信息进行重塑。

$$\begin{cases} I_w(i,j) = I(i,j) + \mu M_m(i,j)W(i,j) \\ \mu = \sqrt{\frac{\sum W_m^2(i,j)}{\sum (M_m(i,j)W_m(i,j))^2}} \end{cases} \quad (10)$$

式中,  $I_w(i,j)$ 是添加了水印信息的图像;  $I(i,j)$ 是原图像;  $M_m(i,j)$ 是视觉蒙版矩阵;  $W(i,j)$ 是从频

率域转换到空间域的水印信息； $\mu$ 是比例因数，保证在水印重塑时总水印能量不变。使用视觉蒙版对水印重塑后再将其添加到原始图像中，如图2所示。图2a为原始图像，图2b为未使用视觉蒙版的水印图像与原图像的差分图像，图2c为使用了视觉蒙版的水印图像与原图像的差分图像，使用视觉蒙版之后在图像的亮调、暗调和纹理区域有更高的水印强度。

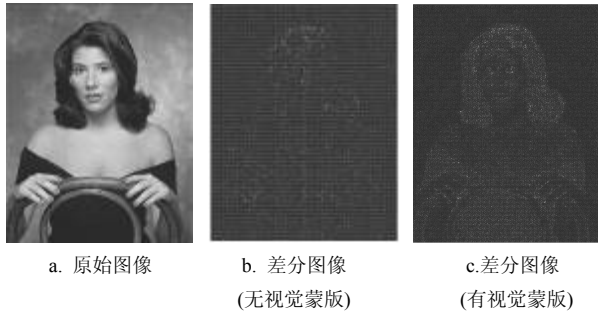


图2 原图像与添加水印后图像之间的差分图像比较

### 3 实验



图3 测试图像和水印图像

为了测试本文提出的CMYK印刷图像数字水印算法，选择用于印刷工业测试的GATF标版上的6种印刷测试图作为嵌入水印的原图像，分别代表风景记忆色(1530\*1024)、饱和度(1024\*1024)、亮调(1299\*1024)、暗调(1320\*1024)、中性灰图像

(1024\*1281)和人物肤色(1024\*1306)6幅图像，如图3a~图3f所示。水印图像如图3g所示，大小为40\*40(扩频后变成120\*120)。实验中图像分块为8\*8，调整因数 $a=50$ 。

#### 3.1 图像质量评价与比较分析

##### 1) 印前嵌入水印图像的质量评价与比较分析

一方面，通过比较未使用视觉蒙版的嵌入水印图像和使用视觉蒙版的嵌入水印图像，对本文提出的视觉蒙版对图像质量的改善效果进行评价；另一方面，通过与文献[12]提出的抗印刷-扫描的数字水印算法和文献[13]提出的彩色图像鲁棒算法比较，对比分析了本文提出的算法。评价方法包括客观评价法和主观评价法，客观评价法所使用的评价指标主要有：峰值信噪比(PSNR)、权重峰值信噪比(wPSNR)、Watson指标<sup>[26]</sup>和结构相似度(SSIM)<sup>[27]</sup>。其中，Watson指标包括全局感知误差(TPE)和大于局部感知误差阈值的块数(NB1和NB2)，NB1的阈值设置为肉眼可以感知到的视觉误差值，NB2的阈值通常是肉眼可接受的最大视觉误差值。

6幅图像的客观评价指标值如表1所示。对于同一幅图像，由于未使用视觉蒙版的嵌入水印图像和使用了视觉蒙版的嵌入水印图像有相同的水印总能量，故与原图像的PSNR值都是相同的，但其他指标参数不尽相同。图像的PSNR都在36 dB及以上，在PSNR值相同的情况下，使用了视觉蒙版的嵌入水印图像的wPSNR和SSIM值都有所提高。从Watson指标来看，使用了视觉蒙版的嵌入水印图像与原图像之间的感知误差更小一些，超过感知误差阈值的图像块数更少一些。除了风景记忆色和饱和度图像外，其他图像的局部感知误差超过最大阈值的图像块数都为0。如图4所示，为了看得更清楚一些，将图像中的一部分进行了放大。在未使用视觉蒙版的嵌入水印图像中可以看到明显的噪声，而使用了视觉蒙版的嵌入水印图像噪声更小，不易察觉，尤其是在图像的平滑区域，与原图像更接近。故使用了视觉蒙版的嵌入水印图像质量有所提高。

与文献[12]和文献[13]算法的比较中，在PSNR值基本相同的情况下，本文提出的带有视觉蒙版算法的wPSNR和SSIM值大于文献[12]和文献[13]。本文算法嵌入水印图像的全局感知误差明显低于对比文献的，超过感知误差阈值的图像块数少于文献[12]和文献[13]，本文算法具有更好的图像视觉效果。

表1 嵌入水印图像质量比较

测试图像	评价参数	文献[12]算法	文献[13]算法	本文无视觉蒙版算法	本文有视觉蒙版算法
景物记忆色图像	PSNR	37.9	36.8	36.8	36.8
	wPSNR	43.5	43.1	43.6	43.8
	SSIM	0.987 9	0.985 6	0.989 0	0.994 5
	TPE	0.59	0.63	0.58	0.31
	NB1	143	157	153	56
	NB2	61	69	68	12
饱和度色图像	PSNR	36.7	36	36	36
	wPSNR	38.1	37.9	38.3	39.8
	SSIM	0.989 9	0.990 9	0.993 8	0.995 0
	TPE	0.54	0.57	0.52	0.21
	NB1	138	141	135	36
	NB2	81	85	78	11
亮度图像	PSNR	37.6	37	37	37
	wPSNR	39.1	39.2	39.6	39.9
	SSIM	0.992 1	0.990 1	0.994 7	0.998 5
	TPE	0.46	0.44	0.42	0.22
	NB1	123	119	112	52
	NB2	53	50	48	0
暗调图像	PSNR	36.9	36.2	36.2	36.2
	wPSNR	39.9	39.5	39.8	40.7
	SSIM	0.989 5	0.981 1	0.993 7	0.996 6
	TPE	0.59	0.60	0.57	0.20
	NB1	109	110	106	28
	NB2	40	39	35	0
中性灰图像	PSNR	37	35	35	35
	wPSNR	37.1	37.8	37.7	40.1
	SSIM	0.991 0	0.992 1	0.995 0	0.996 2
	TPE	0.51	0.49	0.49	0.19
	NB1	112	107	109	12
	NB2	39	36	37	0
肤色图像	PSNR	38.6	38.6	38.6	38.6
	wPSNR	44.0	43.9	44.2	45.1
	SSIM	0.983 2	0.982 7	0.988 5	0.989 5
	TPE	0.51	0.55	0.46	0.23
	NB1	137	139	136	38
	NB2	70	74	64	0

2) 印后嵌入水印图像的保真度评价

评价嵌入水印图的保真度的常用评价指标依然是PSNR, 但用于印刷图像保真度评价的参数是颜色色差( $\Delta E$ )<sup>[3]</sup>(色差能反映人眼对颜色的差别)。为了更加准确地评价嵌入水印后印刷图像的保真度, 本文选择用于印刷保真度测试的颜色色块, 如图5a所示, 这些颜色块在与设备无关的颜色空间CIE L\*a\*b\*中的位置如图5b所示, 这些颜色块构成了印刷能再现的颜色范围, 通过典型颜色块的色差评价印刷图像

的保真度。

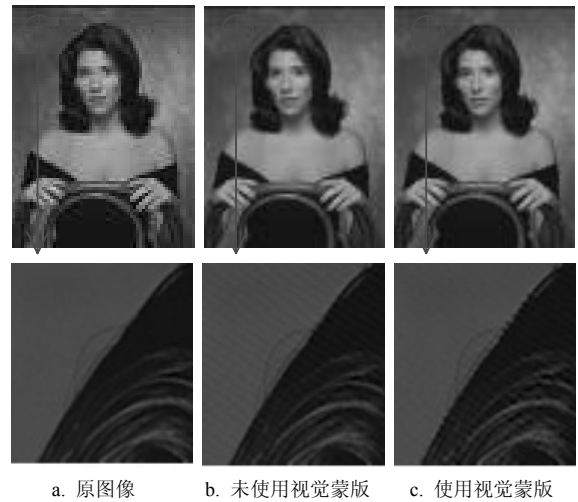


图4 图像质量比较

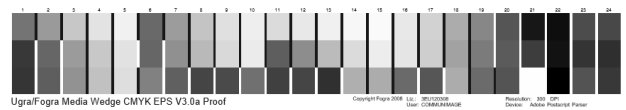
胶版印刷是工业复制领域使用最广泛的一种印刷方式, 工艺流程数字化程度高, 制版方便, 故本文实验使用的印刷方式为胶版印刷, 所使用的相关设备、耗材和工艺参数如表2所示。

表2 印刷测试所用设备、耗材

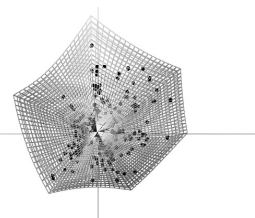
扫描仪	制版机	印刷机	纸张	辅料
AGFA SNAPSAN 600	CREO Trendsetter 800II	KBA Rapida 105	128 g/m <sup>2</sup> 铜版纸	科艺水斗液、东洋天狮油墨

表3 工艺参数

加网参数			印刷工艺参数		
加网线数	加网角度	加网形状	印刷色序	印刷速度	印刷压力
175线/英寸	C75°、M15°、Y0°、K45°	圆形	KCMY	5 000	0.07



a. 用于评价印刷图像保真度的色块



b. 典型色块在CIE L\*a\*b\*空间中的位置

图5 印刷图像保真度评价色块的选择

使用表2所示的印刷工艺对添加水印信息的测试图像印刷输出并扫描。印刷图像和原图像PSNR值如表3所示, 印前添加水印图像和原图像的PSNR值相同的情况下, 本文算法印后的PSNR值都在24 dB

以上,相较于文献[12]和文献[13]的算法,印刷图像的视觉效果更好。

表4 印后图像质量比较

测试图像	评价参数	印前	印后		
			文献[12]算法	文献[13]算法	本文有视觉蒙版算法
景物记忆色图像	PSNR	37.9	16.4	15.8	26.6
饱和色图像	PSNR	36.7	15.5	14.7	24.2
亮度图像	PSNR	37.6	18.6	18.5	25.1
暗调图像	PSNR	36.9	17.3	18.9	25.6
中性灰图像	PSNR	37	18.4	16.6	25.4
肤色图像	PSNR	38.6	19.1	19.9	27.1

分别使用本文提出的有视觉蒙版算法、文献[12]和文献[13]的算法对图5a所示的颜色块添加水印信息,保持印前PSNR值相同,印刷后的色块与原色块色差统计图如表4所示,结果显示本文算法添加水印图像印刷后的色块色差在10以内的像素数约85%,文献[12]的约70%,文献[13]的约76%,本文算法印刷后的图像保真性较高。

表5 色差统计

算法	$\Delta E \leq 5$	$5 < \Delta E \leq 10$	$10 < \Delta E$
文献[12]	22%	48%	30%
文献[13]	23%	53%	24%
本文算法	32%	59%	15%

### 3.2 水印抵抗印刷-扫描鲁棒性评价与比较分析

首先对本文算法在不同扫描分辨率下的水印检测误差率进行测试,然后在相同扫描分辨率下将本文算法与文献[12]和文献[13]的算法进行对比实验。

使用表2和表3所示的印刷设备和工艺参数印刷嵌入水印的图像,分别用100 dpi、150 dpi、200 dpi、300 dpi、600 dpi和1 200 dpi的扫描分辨率扫描6幅印刷测试图像,并提取水印信息,提取结果如表5所示。当扫描分辨率为100 dpi时,水印提取的误差率较高,其中中性灰图像的水印误差率达到了70%以上,水印误差率最小的是饱和色图像,也达到了60%以上,原水印图像几乎分辨不出;当扫描分辨率为150 dpi时,水印检测误差率有所下降,最大和最小的水印误差率分别是65.3%和52.1%,水印图像依然不易分辨;当扫描分辨率为200 dpi时,最大的水印误差率下降到50%以下;扫描分辨率增大到300 dpi时,肤色图像、饱和色图像和暗调图像下降到了30%以下,水印图像能够达到视觉分辨的程度,而景物记忆色图像、亮度图像和中性灰图像的水印误差率依然在

30%以上;而当扫描分辨率达到600 dpi时,中性灰图像的水印检测误差率最高为29.9%,饱和色图像的误差检测率最低为19.7%,所有图像的水印检测误差率都在30%以下,检测到的水印图像视觉可清晰辨别;当扫描分辨率为1 200 dpi时,水印检测误差率相比600 dpi的有所下降,但下降的幅度较小,因此,扫描分辨率只要大于等于600 dpi提取的水印图像便可清晰分辨。

表6 图像印刷-扫描后的水印检测误差率

图像类型	扫描分辨率/dpi					
	100	150	200	300	600	1200
景物记忆色图像	0.699	0.598	0.453	0.329	0.286	0.238
饱和色图像	0.612	0.521	0.376	0.238	0.197	0.152
亮度图像	0.682	0.618	0.433	0.337	0.292	0.242
暗调图像	0.681	0.572	0.371	0.277	0.216	0.204
中性灰图像	0.711	0.653	0.481	0.350	0.299	0.259
肤色图像	0.679	0.583	0.391	0.289	0.233	0.212

在实际生产流程中常用的扫描分辨是300 dpi,故在比较本文算法和文献[12]、文献[13]的算法时,采用300 dpi扫描印刷图像,结果如表6所示。其中文献[12]提取的水印误差率达到了60%以上,而本文算法和文献[13]算法提取的水印误差率较接近,都在35%以下。

表7 与文献[12]和文献[13]的比较结果

图像类型	文献[12]	文献[13]	本文算法
景物记忆色	0.618	0.313	0.329
饱和色	0.621	0.306	0.238
亮度	0.608	0.311	0.337
暗调	0.591	0.271	0.277
中性灰	0.623	0.341	0.350
肤色	0.589	0.305	0.289

### 3.3 算法优化

FFT和DCT反变换的舍入误差将影响图像质量和水印鲁棒性。在FFT或者DCT域嵌入的水印能量反变换后被分配到空间域每一位像素上的能量是浮点数形式,而图像像素值是位于0~255之间的整数。像素值能表示的最小误差是1,实际上有一些像素点上分配的水印能量在-1~1之间,这些像素点通过舍入取整后水印能量将增强或降低。本文的算法根据视觉蒙版值对这些点进行优化处理,当视觉蒙版值大于一定的阈值时,增加水印能量,如式(11)所示。因为空间蒙版值越大代表图像该点的复杂度越高,对噪声不敏感。

$$\begin{cases} I(i, j) = I_0(i, j) + 1 & 0 < W(i, j) < 1, M_m(i, j) > \omega \\ I(i, j) = I_0(i, j) - 1 & -1 < W(i, j) < 0, M_m(i, j) > \omega \end{cases} \quad (11)$$

式中,  $W(i, j)$ 是反变换后的水印能量;  $\omega$ 是视觉蒙版阈值。

## 4 结 束 语

从实验结果可以得出以下几点结论: 1) 采用CMYK颜色空间可以减少由于颜色空间转换引起的水印信息和颜色失真; 2) 相比在其他通道嵌入水印信息, 在Y通道和K通道分别嵌入有意义水印和结构模板水印有利于图像的保真印刷; 3) 本文建立的视觉蒙版和空间域的水印重塑能有效的提高印刷图像颜色保真度, 在图像纹理复杂的区域分配较强的水印信息, 而在图像平滑区域分配较弱的水印信息。与文献[12]算法相比, 本文算法在图像保真度和算法鲁棒性两方面都有优势, 与文献[13]算法相比, 在鲁棒性相接近的情况下本文算法有效地提高了图像的保真度, 更适合保真印刷, 对胶版印刷过程鲁棒, 且可以抵抗JPEG压缩和常规的几何变形操作。接下来需要改进的方面有: 1) 优化算法以提高抵抗图像几何变形和低分辨扫描输入的鲁棒性; 2) 算法是否抵抗其他传统印刷方式还有待进一步研究和测试。

## 参 考 文 献

- [1] DAVOINE F. Triangular meshes: a solution to resist to geometric distortions based watermark-removal softwares[J]. Proc Eurasip Signal Process Conf, 2015: 1985-1988.
- [2] 吴海涛, 詹永照. 数字水印技术综述[J]. 软件导刊, 2015, 14(8): 45-48.  
WU Hai-tao, ZHAN Yong-zhao. Digital imagewatermarking: an overview [J]. Software Guide, 2015, 14(8): 45-48.
- [3] 王彩印, 孔祥维, 郭君, 等. 基于 ICC 色彩空间转换的彩色印刷图像数字水印[J]. 光电子·激光, 2014, 25(11): 2186-2195.  
WANG Cai-yin, KONG Xiang-wei, GUO Jun, et al. Adaptive color printing image watermarking based on ICC color space conversion[J]. Journal of Optoelectronics Laser, 2014, 25(11): 2186-2195.
- [4] 王玲, 王晓建, 彭启琮, 等. 半脆弱印刷数字有意义水印算法研究[J]. 电子科技大学学报, 2008, 37(增刊): 71-74.  
WANG Ling, WANG Xiao-jian, PENG Qi-zhong, et al. Research on semi-fragile printed meaningful watermarking. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2008, 37(S): 71-74.
- [5] JING M G, CHANG C S, YUN F L, et al. Oriented modulation for watermarking in direct binary search halftone images[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2012, 21(9): 4117-4127.
- [6] FU M S, AU O C. Steganography in halftone images: Conjugate error diffusion[J]. Signal Process, 2003, 83(10), 2171-2178.
- [7] 张真诚, 黄国峰. 植基于人类视觉系统之二色调图像信息隐藏技术[J]. 通信学报, 2002, 23(5): 9-17.  
CHANG Chin-chen, HWANG Guo-feng. An information hiding technique for Halftone images based on human visual effects[J]. Journal of communication, 2002, 23(5): 9-17.
- [8] 曹鹏. 二进制加密信号调制印刷品调幅网点的形状的加密防伪印刷技术: CN102184428B[P]. 2013.  
CAO Peng. Encryption and anti-fake printing technology based on modulating the dot shape of the amplitude modulation screening: CN102184428B[P]. 2013.
- [9] MAK BOL N M, KHOO B E, RASSEM T H. Performance evaluation of SVD-based digital image watermarking scheme on print-scan and print-cam (PSPC) applications[C]//2014 International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems (ISPACS). [S.l.]: IEEE, 2014: 48-53.
- [10] SOLANKI K, MADHOW U, MANJUNATH B S, et al. Estimating and undoing rotation for print-scan resilient data hiding[C]//2004 International Conference on Image Processing. [S.l.]: IEEE, 2004.
- [11] ANU P, ANJA K, TAPIO S. Multiple domain watermarking for print-scan and JPEG resilient data hiding[J]. Lecture Notes in Computer Science, 2008, 5041: 279-293.
- [12] YONG X, YI Y, HAI H T, et al. Effect of embedding way on printed watermarking image by lithography[C]//2014 International Conference on Cyber-Enabled Distributed Computing and Knowledge Discovery (CyberC). [S.l.]: IEEE, 2014: 286-289.
- [13] OUYANG J, COATRIEUX G, CHEN B, et al. Color image watermarking based on quaternion Fourier transform and improved uniform log-polar mapping[J]. Computers & Electrical Engineering, 2015, 46: 419-432.
- [14] PEREIRA S, PUN T. Robust template matching for affine resistant image watermarks[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2000, 9(6): 1123-1129.
- [15] KANG X, HUANG J, SHI Y Q, et al. A DWT-DFT composite watermarking scheme robust to both affine transform and JPEG compression[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2003, 13(8): 776-786.
- [16] TOKAR T, LEVICKY D. Robust watermarking of gray scale images by using synchronization templates[C]//Proceedings of 17th International Conference Radioelektronika. [S.l.]: [s.n.], 2007.
- [17] WANG C, NI J, ZHUO H, et al. A geometrically resilient robust image watermarking scheme using deformable multi-scale transform[C]//Proceedings of 17th IEEE International Conference on Image Processing (ICIP). Hongkong, China: IEEE, 2010.
- [18] BASP, CHASSERY J, MARQ B. Geometrically invariant watermarking using feature points[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2002, 11(9): 1014-1028.
- [19] LI X, GUO B, CHEN L. RST invariant image watermarking based on invariant contents[C]//Proceedings of Fourth International Conference on Genetic and

- Evolutionary Computing (ICGEC). Washington, DC: IEEE Computer Society, 2010.
- [20] O'RUANAIDH J, PUN T. Rotation, scale, and translation invariant digital image watermarking[J]. *Signal Processing*, 1998, 66(3): 303-317.
- [21] LIN C, WU M, BLOOM J, et al. Rotation, scale, and translation resilient watermarking for images[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2001, 10(5): 767-782.
- [22] ZHENG D, LIU Y, ZHAO J, et al. A survey of RST invariant image watermarking algorithms[J]. *ACM Computing Surveys*, 2007, 35(2): 5.
- [23] RENTZEPERIS I, ALEXANDER D M, KIPER D C, et al. Orientation perception anisotropies indicate functional segregation within the color system[J]. *Journal of Vision*, 2015, 15(9): 10.1167/15.9.13.
- [24] KAUR B, KAUR A, SINGH J. Steganographic approach for hiding image in DCT domain[J]. *International Journal of Advances in Engineering & Technology*, 2011, 1(3): 72-78.
- [25] 白伟. DCT水印算法在抗剪切攻击方面的研究[J]. *太原师范学院学报(自然科学版)*, 2014, 13(3): 63-66.  
BAI Wei. Shearing attack research based on DCT watermarking algorithm[J]. *Journal of Taiyuan Normal University (Natural Science Edition)*, 2014, 13(3): 63-66.
- [26] PEREIRA S, VOLOSHYNOVSKIY S, MADUENO M, et al. Second generation benchmarking and application oriented evaluation[C]//*Information Hiding*. Berlin Heidelberg: Springer, 2001.
- [27] WANG Z, BOVIK A C, SHEIKH H R, et al. Image quality assessment: from error visibility to structural similarity[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2004, 13(4): 600-612.

编辑 叶芳

-----  
(上接第484页)

- [12] 王旭, 李元勋, 李颖. 含有非磁性气隙层层叠电感直流特性的研究[J]. *压电与声光*, 2014, 36(6): 1010-1012.  
WANG Xu, LI Yuan-xun, LI Jie. Research on DC bias current characteristics of multilayer chip inductors with non-magnetic air gap[J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2014, 36(6): 1010-1012.
- [13] 刘凤君. 开关电源设计与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2014: 288-289.  
LIU Feng-jun. Design and apply of switching power supply[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2014: 288-289.
- [14] LI Yuan-xun, LIU Ying-li, ZHANG Huai-wu, et al. The sintering properties and interfacial investigation of barium ferrite and ceramic cofiring system for the application of LTCC technology[J]. *Journal of Applied Physics*, 2009, 105: 07A745.
- [15] WANG Lai-li, HU Zhi-yuan, LIU Yan-fei, et al. A horizontal-winding multipermeability LTCC inductor for a low-profile hybrid DC/DC converter[J]. *IEEE Trans Power Electron*, 2013, 28(9): 4365-4375.

编辑 叶芳