

一种抗旋转的全息水印算法

周中原¹, 孙刘杰¹, 唐波¹, 范冬梅², 万其卫²

(1. 上海理工大学, 上海 200093; 2. 上海宝钢包装股份有限公司, 上海 200093)

摘要: 为了找到一种能够抵抗旋转攻击的安全的水印算法, 综合分析了常见的水印算法后, 发现离散小波变换、离散余弦变换、奇异值分解的变换域水印能够较好地满足抗旋转攻击的需求。对水印图像进行了双随机相位全息加密, 通过密钥保障水印的安全性, 把加密的水印嵌入到变换域中。设计了试验, 研究了含有水印的图像在平移、缩放、旋转、中值滤波、高斯噪声、椒盐噪声和压缩攻击下提取水印质量的影响。实验结果表明, 水印能够抵抗常见的几何攻击, 特别是旋转攻击, 对常见的噪声压缩攻击同样有很好的效果。基于变换域的全息水印算法具有很好的鲁棒性, 能够抵抗常见的几何攻击, 具有很好的安全性, 没有密钥不能对水印进行检测和去除。

关键词: 水印; 离散小波变换; 离散余弦变换; 奇异值分解; 全息

中图分类号: TS853+.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2013)19-0095-06

An Anti-rotation Holographic Watermarking Algorithm

ZHOU Zhong-yuan¹, SUN Liu-jie¹, TANG Bo¹, FAN Dong-mei², WAN Qi-wei²

(1. University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 2. Shanghai Baosteel Packaging Co., Ltd., Shanghai 200093, China)

Abstract: Commonly used watermarking algorithms were analyzed. It was founded that discrete wavelet transform, discrete cosine transform, and singular value decomposition can meet the demand of resisting rotation attacks and double random phase encrypted holographic technology can meet demand of security. Holographic watermark image was embedded into the transform domain. The influences of rotation, scale, translation, median filter, Gaussian noise, salt and pepper noise, and JPEG compression on the quality of extracted watermark image were studied by experiments. The result showed that the holographic digital watermarking technology based on transform domain can resist common geometric attacks, especially rotation attacks, and effective to resist common noise and compression attacks. It was concluded that the watermarking technology is of both robustness and security.

Key words: watermark; DWT; DCT; SVD; holography

随着计算机技术和互联网技术的发展, 数字作品的版权保护越来越受到重视。传统的版权保护技术不能很好地适用于数字作品, 数字水印技术应运而生。数字水印技术是在数字内容中嵌入隐蔽的标记, 这种标记通常是不可见的, 只有通过专用的检测工具才能提取。近些年来, 数字水印技术发展迅速, 各种各样的水印算法层出不穷。按照嵌入水印的空间进行划分, 数字水印可分为空间域水印和频率域水印。频率域水印的鲁棒性一般较好, 笔者将介绍一种鲁棒

性、不可见性、安全性较好的水印算法。

1 基本理论与技术

1.1 二维离散小波变换

小波变换是指用有限长或快速衰减的振荡波形来表示信号。二维离散小波变换需要 1 个二维可分离的尺度函数 $\varphi(x, y)$ 和 3 个可分离的“方向敏感”的二维小波 $\phi^1(x, y)$, $\phi^2(x, y)$ 和 $\phi^3(x, y)$, 给定可分离

收稿日期: 2013-07-29

基金项目: 上海市教委科研创新重点项目(13ZZ111); 国家新闻出版总署数字印刷工程研究中心开放基金项目(10-00-309-000); 2012 年国家级“大学生创新创业训练计划”项目; 数字水印技术在出版物版权保护中的应用研究(121025226)

作者简介: 周中原(1990-), 男, 山东菏泽人, 上海理工大学硕士生, 主攻图像处理和数字水印。

的二维尺度函数和二维小波函数,定义尺度基函数和平移基函数分别为:

$$\varphi_{j,m,n}(x,y)=2^{j/2}\varphi(2^jx-m,2^jy-n) \tag{1}$$

$$\phi_{j,m,n}^i(x,y)=2^{j/2}\varphi^i(2^jx-m,2^jy-n) \quad (i=1,2,3) \tag{2}$$

其中, i,j,m,n 均为正数。那么,大小为 $M\times N$ 的函数 $f(x,y)$ 的二维离散小波变换是:

$$W_{\varphi}(j_0,m,n)=\frac{1}{\sqrt{MN}}\sum_{x=0}^{M-1}\sum_{y=0}^{N-1}f(x,y)\varphi_{j_0,m,n}(x,y) \tag{3}$$

$$W_{\varphi}^i(j_0,m,n)=\frac{1}{\sqrt{MN}}\sum_{x=0}^{M-1}\sum_{y=0}^{N-1}f(x,y)\varphi_{j_0,m,n}^i(x,y) \tag{4}$$

($i=1,2,3$)

式中, j_0 为任意的初始尺度;系数 $W_{\varphi}(j_0,m,n)$ 定了在尺度 j_0 的 $f(x,y)$ 的近似,系数 $W_{\varphi}^i(j_0,m,n)$ 对于 $j\geq j_0$ 附加了 3 个 0 方向的细节。通常令 $j_0=0,N=M=2(j=0,1,2,\cdots,j-1$ 和 $m,n=0,1,2,\cdots,2^j-1)$ 。

二维离散小波变换的逆变换定义为:

$$f(x,y)=\frac{1}{\sqrt{MN}}\sum_m\sum_nW_{\varphi}(j_0,m,n)\varphi_{j_0,m,n}+\frac{1}{\sqrt{MN}}\sum_{i=1}^3\sum_{j=j_0}^{\infty}\sum_m\sum_nW_{\varphi}^i(j,m,n)\phi_{j,m,n}^i(x,y) \tag{5}$$

对图像进行二维离散小波变换,可得到 1 个低频分量和 3 个高频分量。二级二维离散小波分解图(简称“二级小波分解图”)见图 1,第 1 级小波分解将图像分为 1 个低频分量 LL_1 和 3 个低频分量 HL_1,LH_1,HH_1 ,将低频分量 LL_1 进行小波分解,即第 2 级小波分解,得到 1 个低频分量 LL_2 和 3 个高频分量 HL_2,LH_2,HH_2 。图像的大部分能量都集中在低频分量 LL_1 中,图像的轮廓主要集中在高频分量 HL_1,LH_1,HH_1 中。从对图像的重要性来说,各个分量从重要到不太重要顺序为 $LL_2,HL_2,LH_2,HH_2,HL_1,LH_1,HH_1$ [2]。人眼对于边缘轮廓比较敏感,把水印嵌入到 LL_2 中,有着不易被察觉的优点。

1.2 离散余弦变换

离散余弦变换是与傅里叶变换相关的一种变换,类似于离散傅里叶变换,但是只使用实数。设大小为 $m\times n$ 的图像 $f(x,y)$,离散余弦变换的公式为:

$$F(u,v)=a_0C(u,v)\sum_{x=0}^{m-1}\sum_{y=0}^{n-1}f(x,y)\cos\left[\frac{(2x+1)\pi u}{2m}\right]\cos\left[\frac{(2y+1)\pi v}{2n}\right] \quad (u=0,1,2,$$

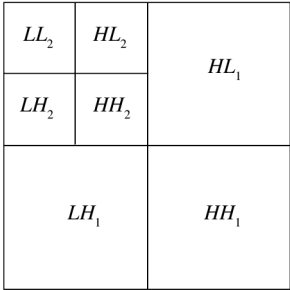


图 1 二维离散小波分解图
Fig. 1 2D-DWT decomposition

$$\cdots,m-1;v=0,1,2,\cdots,n-1) \tag{6}$$

其逆变换公式为:

$$f(x,y)=a_1\sum_{u=0}^{m-1}\sum_{v=0}^{n-1}C(u,v)F(u,v)\cdot\cos\left[\frac{(2x+1)\pi u}{2m}\right]\cos\left[\frac{(2y+1)\pi v}{2n}\right] \quad (x=0,1,2,\cdots,m-1;y=0,1,2,\cdots,n-1) \tag{7}$$

其中:

$$a_0a_1=\frac{4}{mn}$$

$$C(u,v)=\begin{cases} \frac{1}{2} & u=v=0 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & uv=0 \text{ 且 } u\neq 0 \\ 1 & uv>0 \end{cases} \quad [3] \tag{8}$$

由图 2 可以看到图像的低频分量主要集中在左上角,而向右下角方向能量越来越高。由图 3 可以看出,把 DCT 频谱图分为低频、中频和高频 3 部分。如果把水印嵌入到低频部分,会影响水印的不可见性;如果把水印嵌入到高频部分,会影响水印的鲁棒性。为了既能保证鲁棒性又能保证不可见性,把水印嵌入到中频部分是个折衷的办法。该方法将对图像首先进行 4×4 分块,分别取得各个分块中 $(3,2)$ 位置点,嵌入水印。

1.3 奇异值分解

假设 M 是一个 $m\times n$ 阶矩阵,其中的元素全部属于域 K ,也就是实数域或复数域。如此则存在一个分解使得:

$$M=USV^* \tag{9}$$

式中, U 为 $m\times m$ 阶酉矩阵; S 为半正定 $m\times n$ 阶对角矩阵; V^* 为 V 的共轭转置,是 $n\times n$ 阶酉矩阵。这样



图2 DCT 频谱图

Fig. 2 DCT spectrum

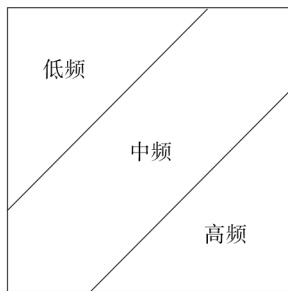


图3 DCT 频谱示意

Fig. 3 Diagram of DCT spectrum



图4 原始图像

Fig. 4 Original image

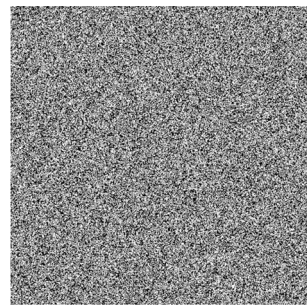


图5 全息图像

Fig. 5 Holographic image

的分解就称作 M 的奇异值分解。 S 对角线上的元素 $S_{i,i}$ 即为 M 的奇异值。

图像奇异值分解的显著特征在于:奇异值对几何失真(放大、平移、转置、镜像)的不变性;奇异值体现图像的能量特性, U 和 V 体现图像的视觉特性(几何特性);对图像施加小的扰动时,奇异值的稳定性使奇异值不会有大的变化。奇异值的这些优良特性,是嵌入的水印具有对几何失真较强的鲁棒性^[4]。

2 双随机相位加密技术

设待加密图像或数据为已归一化的 $f(x, y)$, 图像大小为 $M \times N$, 其中 (x, y) 为空域坐标。令 (ζ, η) 为频域坐标, $\varphi(x, y)$ 为双随机相位的加密图像, $p(x, y)$ 和 $b(\zeta, \eta)$ 为均匀分布在 $[0, 1]$ 之间的 2 个独立白噪声随机图像。则双随机相位的加密图像为:

$$\varphi(x, y) = \{f(x, y) \exp[j2\pi p(x, y)]\} * h(x, y) \quad (10)$$

式中, $h(x, y)$ 为 $B(\zeta, \eta) = \exp[j2\pi b(\zeta, \eta)]$ 的脉冲响应; $*$ 为卷积运算符^[5]。

加密图像的解密过程是加密的逆过程,即将加密图像进行傅里叶变化后乘以 $\exp[j2\pi b(\zeta, \eta)]$, 再进行逆傅里叶变换后乘以 $\exp[-j2\pi p(x, y)]$, 就可以得到原始图像 $f(x, y)$ 。理论证明 $\varphi(x, y)$ 是一个白噪声图像, 其均值为 0, 方差为:

$$\sigma_{\varphi}^2 = \frac{1}{M \times N} \left[\sum_{u=0}^{M-1} \sum_{v=0}^{N-1} |f(u, v)|^2 \right] \quad (11)$$

双随机相位全息加密技术能够保证水印的安全性,防止非法检测和去除。全息技术能够能使图像在部分损坏的情况,仍能提取完整的水印信息,增加水印的鲁棒性^[7]见图4—5。

3 嵌入和提取方法

3.1 嵌入方法

嵌入方法见图6,具体步骤如下所述。

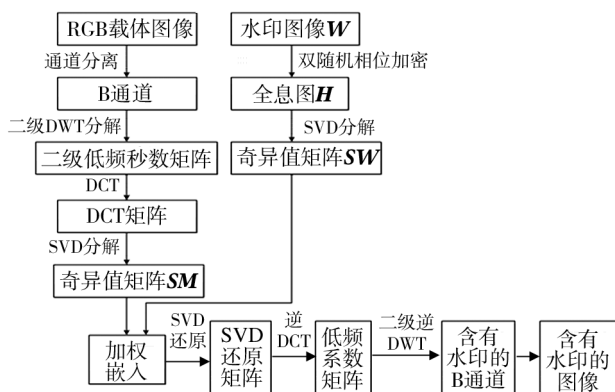


图6 水印嵌入方法

Fig. 6 Diagram of embedding watermark

- 1) 对水印图像进行双随机相位加密,得到全息图 H 。
- 2) 对 H 进行 SVD 分解,得到奇异值矩阵 SW 。
- 3) 对 RGB 彩色图像进行通道分离,得到 B 通道。
- 4) 对 B 通道进行二级离散小波变换,得到其低频系数矩阵。
- 5) 对低频系数矩阵进行 4×4 分块,进行离散余弦变换。
- 6) 取每一分块的 DCT 系数的 $(3, 2)$ 点,组成一个新的矩阵。
- 7) 对新的矩阵进行 SVD 分解,得到奇异值矩阵 SM 。
- 8) 嵌入系数为 k ,嵌入关系式为 $SM + k \cdot SW$ 。
- 9) 进行 SVD 还原、逆 DCT、逆 DWT、通道合并得到含有水印的图像。

3.2 提取方法

嵌入方法见图 7, 具体步骤如下所述。

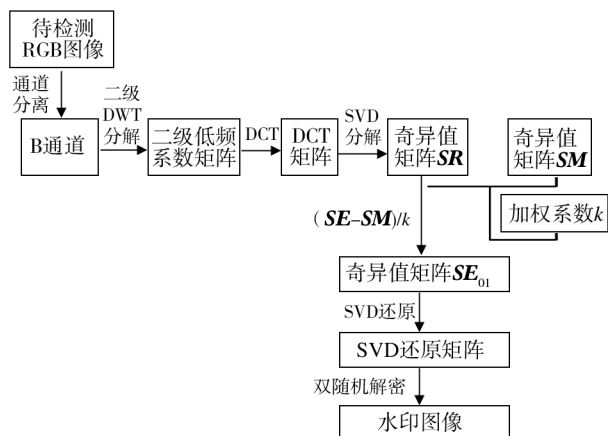


图 7 水印提取方法

Fig. 7 Diagram of extracting watermark

- 1) 对待检测的 RGB 彩色图像进行通道分离, 得到 B 通道。
- 2) 对 B 通道进行二级离散小波变换, 得到其低频系数矩阵。
- 3) 对低频系数矩阵进行 4×4 分块, 进行离散余弦变换。
- 4) 取每一分块的 DCT 系数的 (3, 2) 点, 组成一个新的矩阵。
- 5) 新的矩阵进行 SVD 分解, 得到奇异值矩阵 SE 。
- 6) 按照 $(SE-SM)/k$ 进行计算, SVD 还原。
- 7) 使用密钥进行双随机相位解密, 得到水印图像。

4 实验结果与分析

4.1 峰值信噪比

峰值信噪比 (Peak Signal to Noise Ratio, 简称为 PSNR) 是一个表示信号最大可能功率和影响它的表示精度的破坏性噪声功率的比值的工程术语。由于许多信号都有非常宽的动态范围, 峰值信噪比常用 dB 单位来表示。

峰值信噪比经常用作图像压缩等领域中信号重建质量的测量方法, 它常简单地通过均方差 (MSE) 进行定义。2 个 $m \times n$ 单色图像 I 和 K , 如果一个和另外一个的噪声近似, 那么它们的均方差定义为:

$$MSE = \frac{1}{mn} \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} ||I(i,j) - K(i,j)||^2 \quad (12)$$

峰值信噪比定义为:

$$PSNR = 10 \lg \left(\frac{\max_I^2}{MSE} \right) = 20 \lg \frac{\max_I}{\sqrt{MSE}} \quad (13)$$

其中, $\max_I$ 是表示图像点颜色的最大数值, 如果每个采样点用 8 位表示, 那么就是 255。更为通用的表示是, 如果每个采样点用 B 位线性脉冲编码调制表示, 那么 $\max_I$ 就是 $2^B - 1$ 。

对于每点有 RGB 3 个值的彩色图像来说峰值信噪比的定义类似, 只是均方差是所有方差之和除以图像尺寸再除以 3^[8]。

4.2 相关性系数

为了定量评估原始水印图像和提取水印图像之间的相似度, 可用相关性系数^[9] NC 定义, 相关系数 NC 越大, 图像越接近, 2 个图像的相关度越高, 它们之间的相关系数 NC 可定义为:

$$NC = \frac{\sum \sum f_1(m,n) f_2(m,n)}{\sqrt{\sum \sum f_1(m,n)^2 \sum \sum f_2(m,n)^2}} \quad (14)$$

为了验证算法的可行性, 对常见的图像进行嵌入和提取操作。对 3 幅不同的图像嵌入 3 个不同的水印, 见图 8, 含有水印的图像与原来的图像进行比较,

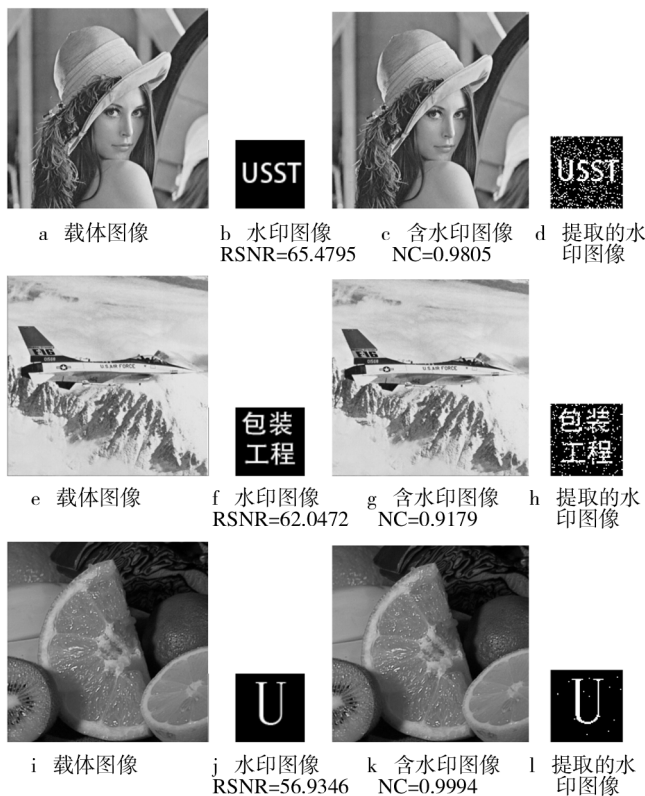


图 8 水印嵌入与提取仿真结果

Fig. 8 Simulation results of embedding and extracting watermark

PSNR 均在 50 以上,而普通的水印算法 PSNR 能达到 30~40 dB 就很好了,说明本算法水印的不可见性非常高,见图 8c,8g,8k,含水印图像和原始载体图像非常接近,肉眼无法辨别。提取的水印图像与原始水印图像进行比较,NC 值均在 0.9 以上,说明提取的水印图像质量不错,见图 8d,8h,8l,可以很明显地辨别出水印。

4.3 水印算法的鲁棒性仿真实验

为了验证算法提取水印的鲁棒性,对含有水印的图像进行平移、缩放、旋转、椒盐噪声、中值滤波、高斯噪声、JPEG 压缩这几种常见的攻击做了相关的性能测试^[10]。实验结果见图 9,算法对常见的几何攻击

(平移、缩放、旋转)具有很好的抵抗性,见图 9a—f,几何攻击之后,提取出的水印的 NC 值均在 0.93 以上,说明提取出来的水印与嵌入的水印相似度高。如图 9g,9h,9i 分别展示了含有水印的图像经过椒盐噪声、高斯噪声、压缩后的图像和对应提取的水印图像,图像的 NC 值均在 0.98 以上,说明对图像进行噪声压缩攻击后,提取出的水印效果仍旧很好。特别需要指出的是,图 9j 经过中值滤波后,载体图像的 PSNR 很高,提取的水印的 NC 值相对较低,说明本算法抵抗中值滤波的效果不是很好。

5 结语

研究了离散小波变换、离散余弦变换、奇异值分解和全息水印技术,通过多种技术的结合,提出了基于变换域的全息水印算法。算法具有较强的不可见性,对常见的平移、缩放、旋转、椒盐噪声、高斯噪声、中值滤波和压缩攻击具有较强的鲁棒性,具有一定的实用价值。

参考文献:

- [1] 王志明,殷诸成,曾慧. 数字图像处理与分析[M]. 北京:清华大学出版社,2012:36-37.
WANG Zhi-ming, YIN Zhu-cheng, ZENG Hui. Digital Image Processing and Analysis[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2012:36-37.
- [2] 黄达人,刘九芬,黄继武. 小波变换域图像水印嵌入对策和算法[J]. 软件学报,2002,13(7):1290-1297.
Huang Da-ren, LIU Jiu-fen, HUANG Ji-wu. The Watermarking Embedding Strategy and Algorithm Based on Wavelet Transform Domain[J]. Journal of Software, 2002, 13(7): 1290-1297.
- [3] 侯宏花. 数字图像处理与分析[M]. 北京:北京理工大学出版社,2011(9):60-61.
HOU Hong-hua. Digital Image Processing and Analysis[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2011(9):60-61.
- [4] 张立民,钟兆根,彭耿. 基于奇异值分解的多卫星信号盲检测[J]. 电讯技术,2013(1):11.
ZHANG Li-min, ZHONG Zhao-gen, PENG Geng. Blind Detection of Multi-satellite Signals Based on SVD[J]. Telecommunication Engineering, 2013(1):33-38.
- [5] 孙刘杰,庄松林. 双随机相位加密同轴傅里叶全息水印防伪技术[J]. 光学学报,2007,27(4):621-624.



图9 水印鲁棒性仿真结果

Fig. 9 Simulation results of watermark robustness

- SUN Liu-jie, ZHUANG Song-lin. Forgery Prevention Based on In-line Fourier Holographic Watermark with Double Random Phase Encryption [J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27 (4): 621-624.
- [6] 李孟涛, 孙刘杰, 李晨璐, 等. 基于小波变换的傅里叶加密印刷水印算法研究[J]. 包装工程, 2012, 33(1): 108-112.
- LI Meng-tao, SUN Liu-jie, LI Chen-lu. Research on Fourier Encryption Printing Watermarking Algorithm Based on Wavelet Transform [J]. Packaging Engineering, 2012, 33 (1): 108-112.
- [7] 孙刘杰, 庄松林. 双随机相位加密全息标识防伪技术研究[J]. 光学学报, 2007, 27(1): 31-34.
- SUN Liu-jie, ZHUANG Song-lin. Anti-fake Technique by Double Random Phase Encrypted Holographic Mark [J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(1): 31-34.
- [8] 王敏, 周磊, 周树道, 等. 基于峰值信噪比和小波方向特性的图像奇异值去噪技术[J]. 应用光学, 2013(1): 85-89.
- WANG Min, ZHOU Lei, ZHOU Shu-dao. Image SVD Denoising Based on PSNR and Wavelet Directional Feature [J]. Journal of Applied Optics, 2013(1): 85-89.
- [9] 朱竹青, 冯少彤, 聂守平, 等. 基于离散余弦变换的复值加密图像隐藏技术研究[J]. 中国激光, 2009, 36(1): 177-181
- ZHU Zhu-qing, FENG Shao-tong, NIE Shou-ping, et al. Complex Valued Encrypted Image Hiding Technology Based on Discrete Cosine Transform [J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(1): 177-181.
- [10] 李孟涛, 孙刘杰, 刘真. 变换域加密全息水印算法[J]. 包装工程, 2011, 32(15): 22-24.
- LI Meng-tao, SUN Liu-jie, LIU Zhen. Encrypted Holographic Watermarking Algorithm Based on Transform Domain [J]. Packaging Engineering, 2011, 32(15): 22-24.

(上接第 86 页)

- [4] 刘士伟, 魏庆葆. 基于 BP 神经网络的 CMYK 到 $L^*a^*b^*$ 颜色空间转换模型[J]. 中国卫生统计, 2011, 32(11): 69-71.
- LIU Shi-wei, WEI Qing-bao. The Conversion of CMYK to $L^*a^*b^*$ Color Space and BP Neural Network Model [J]. Chinese Health Statistics, 2011, 32(11): 69-71.
- [5] 张德丰. Matlab 神经网络应用设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009: 259-261. (余不详)
- ZHANG De-feng. Matlab Neural Network Application Design [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2009: 259-261.
- [6] 刘春艳, 凌建春, 寇林元, 等. GA-BP 神经网络与 BP 神经网络性能比较[J]. 中国卫生统计, 2013, 30(2): 173-176.
- LIU Chun-yan, LING Jian-chun, KOU Lin-yuan, et al. GA-BP Neural Network and BP Neural Network Performance Comparison [J]. Chinese Health Statistics, 2013, 30(2): 173-176.
- [7] 全国印刷标准化技术委员会. 常用印刷标准解读[M]. 北京: 印刷工业出版社, 2005.
- The National Standardization Technical Committee Printing. Common Printing Standard Interpretation [M]. Beijing: Printing Industry Publishing House, 2005.

(上接第 89 页)

- SUN Yin, YANG Song, QU Ru-yun. Suppression of Moire Patterns in Scanned Halftone Images [J]. Packaging Engineering, 2007, 28(10): 14-16.
- [2] 姚海根. 数字加网技术[M]. 北京: 印刷工业出版社, 2000: 97-99.
- YAO Hai-gen. Digital Screening Technology [M]. Beijing: Printing Screening Technology, 2000: 97-99.
- [3] 李树坤. 彩色网目调丝网印刷龟纹[J]. 工业技术, 2005 (9): 78-81
- LI Shu-kun. Moire of Screen Printing in Color Halftone [J]. Industry Technology, 2005(9): 78-81.
- [4] 蒋文燕, 徐玉香. 多色网点叠印中龟纹的模拟与控制[J]. 包装工程, 2010, 31(15): 101-104, 113.
- JIANG Wen-yan, XU Yu-xiang. Simulation and Control of Moire in Multicolor Dot Superimposition [J]. Packaging Engineering, 2010, 31(15): 101-104, 113.
- [5] WANG Shen-ge, LOCE Robert. Uniform-rosette Color Halftoning for N-color Moiré-free Printing [J]. Journal of Electronic Imaging, 2008, 17(2). (余不详)
- [6] 胡更生, 李小东. 网点面积率和位相对玫瑰斑可视程度的影响[J]. 技术应用, 1998(1): 31-33.
- HU Geng-sheng, LI Xiao-dong. Dot Area and Phase Affect Visible of Rose Spots [J]. Technology Applications, 1998 (1): 31-33.
- [7] HAINS C M, CALIF A. Method for Reducing 2-color Moire in 4-color Printing: United States, 5381247 [P], 1995-10-01.
- [8] 杨斌. 网目调丝印龟纹现象理论分析与研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2001.
- YANG Bin. Analysis and Reserch for Moire Appearance of Screen Printing [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2001.