

抗打印扫描数字水印算法的鲁棒性^{*}

牛少彰, 伍宏涛, 谢正程, 刘 歆, 杨义先

(北京邮电大学信息安全中心, 北京 100876)

摘 要: 提出了一种能够抵抗打印和扫描的数字水印算法。算法的关键在于强鲁棒性。首先分析了打印扫描对图像的影响, 针对打印扫描对图像影响的特点, 选取在图像的 DCT 域上嵌入水印信息。对 DCT 变换后的系数按照他们的位置进行了特殊的分类, 通过分类后每一类中正负号的数量来表达水印信息, 增强了算法的鲁棒性。然后对水印的嵌入位置、鲁棒性和嵌入强度进行了研究。由于该算法对打印扫描的鲁棒性, 可用于印刷图像的版权保护和认证。

关键词: 数字水印; 离散余弦变换; 打印扫描

中图分类号: TN918 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2004) S2-0001-04

数字水印技术通过在数字作品中加入一个不可察觉的标识信息, 需要时可以通过算法提出标识信息来进行验证, 为解决数字产品的侵权问题提供了一个有效的解决途径, 因而成为当前的研究热点。关于图像的水印算法已经有许多种, 但主要是针对计算机网络中的数字作品。大多数算法不能抵抗打印扫描攻击, 这是由于打印扫描涉及 DA 和 AD 两次转换, 这要求数字水印算法具有非常强的鲁棒性, 才能抵抗两次格式转换。

打印和扫描已成为目前图像进行复制和传播的普遍方式, 随着数字化技术的迅猛发展, 将图像在电子数字格式和打印的格式之间进行转换变得非常容易。经过打印扫描后的图像, 虽然看上去和原图相似, 实际上图像的像素值发生了很大的变化。寻找在打印和扫描过程中不变的数字特征, 设计具有非常强的鲁棒性算法, 成为数字水印技术的一个研究难点。

数字水印按嵌入方法可以分为空间域水印和变换域水印。空间域方法通过改变载体信息的空间域特性来隐藏水印^[1,2]; 变换域方法通过改变数据变换域的一些系数来隐藏水印, 基于变换域的数字水印算法主要有: 离散余弦变换、离散傅立叶变换和离散小波变换等^[3-5]。

在印刷品中进行信息隐藏是目前信息隐藏领域的一个新的研究应用方向。通过印刷水印系统, 可以将一些标识信息嵌入在印刷图像中, 以解决印刷

品的版权保护、来源认证和防止伪造等问题^[6-10]。

1 打印和扫描对图像的影响

为了寻找能够对打印和扫描仍然鲁棒的数字水印算法, 需要考察哪些数值在图像经过打印和扫描后没有改变或者改变较小。首先考察打印和扫描在空间域上对图像的影响。对于灰度图像, 其像素值在 0~255 之间变化, 因而可以将一幅灰度图像的所有像素值分为 256 类, 通过统计 256×256 的 LENA 灰度图像的像素值中每类的个数, 得到其像素值分布的直方图如图 1 (a) 所示。为进行对比, 将 LENA 灰度图像打印扫描后重新得到了数字图像, 其像素值分布的直方图如图 1 (b) 所示。

从 LENA 图像的像素值分布上, 可以看出在打印扫描前后的差别比较明显, 这种较大的差异将导致水印检测的失败。

将 256×256 的 LENA 灰度图像按照 16×16 进行分块, 并对打印扫描前后的 LENA 灰度图像的 DCT 系数的变化情况逐块进行了比较, 鉴于图像的分块较多, 这里只给出一对对应块打印扫描前后 DCT 系数变化的比较图, 如图 2 所示。

之所以对 256×256 的 LENA 图像按照 16×16 进行分块, 是出于对水印容量的考虑。为了进一步说明打印扫描对整幅图像在变换域上的影响, 下面对所有的 DCT 系数进行分类。

由于 LENA 灰度图像的大小为 256×256 , 按照

* 收稿日期: 2004-09-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60073049); 国家重点基础研究发展规划资助项目 (TG1999035804); 北京市自然科学基金资助项目 (4042022)

作者简介: 牛少彰 (1963 年生), 男, 教授; E-mail: szniu@bupt.edu.cn

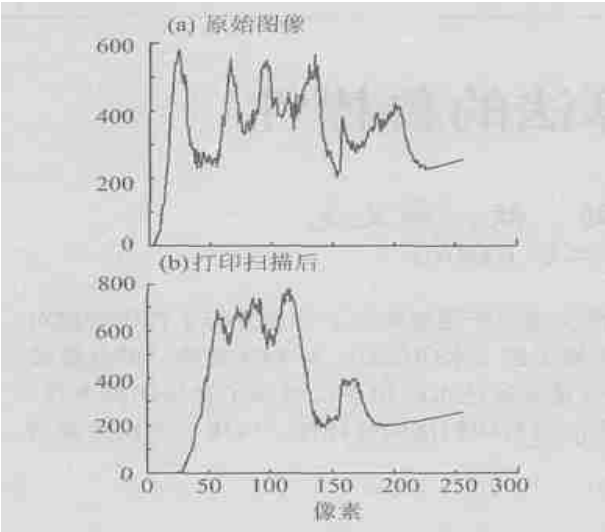


图 1 LENA 图像的像素值分布的直方图
Fig 1 Histogram distribution for pixels

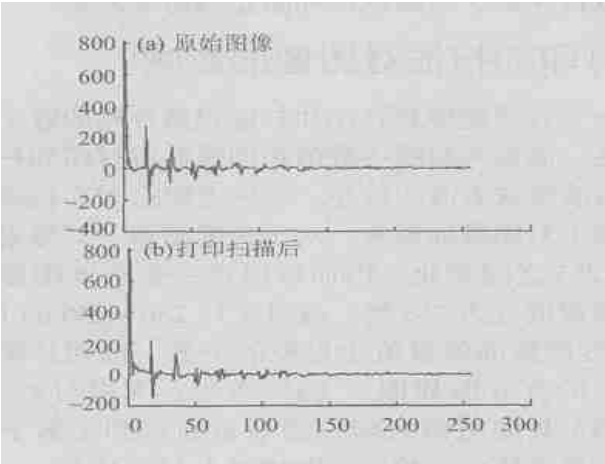


图 2 LENA 图像中的 1 个 16×16 分块
的 DCT 系数变化图
Fig 2 Frequency distribution on a 16×16 part

16×16 进行分块, 可以得到 256 个小块, 记为, $D_i, i=1, 2, \dots, 256$. 对第 i 个 16×16 的小块作 DCT 变换, 将得到的 DCT 系数记为 $F_i(u, v)$, $u, v=0, 1, 2, \dots, 15$, 可以将所有的 DCT 系数分为 256 类. 为简单起见, 引入记号

$$F(u, v) = \{F_i(u, v) \mid i = 1, 2, \dots, 256\}, \\ u, v = 0, 1, 2, \dots, 15$$

则 $F(0, 0)$ 为 DC 系数类, 余者均为 AC 系数类. 在引入上面的分类后, 就可以比较每类系数在打印扫描前后变化的情况, 限于篇幅, 只给出 $F(8, 7)$ 在打印扫描前后变化的比较图 (图 3).

从图 2 和图 3, 我们看到打印扫描对图像的 DCT 系数影响较小.

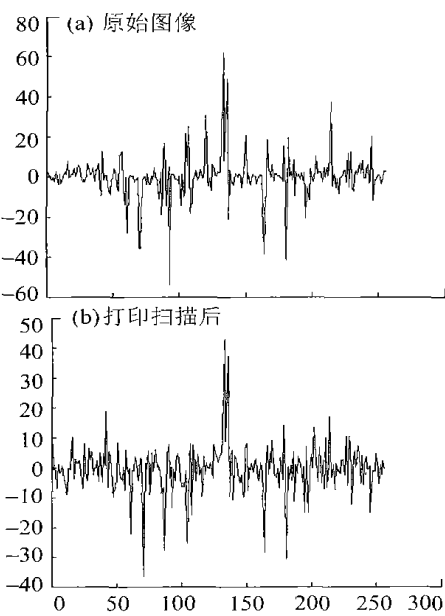


图 3 LENA 图像 DCT 系数 $F(8, 7)$ 的变化图
Fig 3 Frequency distribution on $F(8, 7)$

2 数字水印嵌入算法

通过研究 DCT 系数在打印扫描前后的变化情况 (图 3), 可以看到 DCT 系数 $F_i(u, v), i = 1, 2, \dots, 256$ 在零点附近变化. 由于打印扫描前后 DCT 系数的变化从图形上看只是形状相似, 而不同的打印机和扫描仪对图像的影响不同, 因而很难找打印扫描前后 DCT 系数之间的数量关系 $F(u, v)$. 下面通过改变中数据的正负号的数量来表达水印信息, 设 d 为嵌入水印的强度, 取定 (u, v) 作为水印的嵌入位置, 令

$$n^+(u, v) = \text{集合 } F(u, v) \text{ 中正数的个数}, \\ n^-(u, v) = \text{集合 } F(u, v) \text{ 中负数的个数},$$

当要在 $F(u, v)$ 中嵌入 0 时, 即 $W(i) = 0$, 考察集合 $F(u, v)$ 中的数值, 如果

$$n^+(u, v) - n^-(u, v) > d \quad (1)$$

则不需要修改 $F(u, v)$ 中的数值, 否则将 $F(u, v)$ 中绝对值最小的负数改为正数, 绝对值不变, 如此下去, 直到 (1) 式成立. 当要嵌入 1 时, 即 $W(i) = 1$ 时, 考察集合 $F(u, v)$ 中的数值, 如果

$$n^-(u, v) - n^+(u, v) > d \quad (2)$$

则不需要修改 $F(u, v)$ 中的数值, 否则将 $F(u, v)$ 中绝对值最小的正数改为负数, 绝对值不变, 如此下去, 直到 (2) 式成立. 由于是通过 $F(u, v)$ 中正负号的数量来表达水印信息的, 减少了打印扫描前后对 DCT 系数改变程度的依赖, 因而具有较高的鲁棒性.

数字水印的提取是嵌入的逆过程。对已经打印的图像进行扫描, 重新得到数字图像, 将图像按照 16×16 进行分块, 对每一块进行 DCT 变换, 得到 DCT 系数, 对于嵌入的水印的数据集 $F(u, v)$, 计算中 $n^-(u, v)$ 和 $n^+(u, v)$,

$$\text{IF } n^+(u, v) > n^-(u, v) \text{ THEN } W(i) = 0$$
$$\text{ELSE } W(i) = 1.$$

对所有的嵌入位置进行提取, 得到所嵌入的水印信息。

3 试验结果及分析

本文算法全部在 Matlab 6.1 平台上得以实现, 对多幅不同的图像进行了实验, 但限于篇幅, 仅以 LENA 256×256 灰度图像作为例子。

虽然可以在 DCT 的低频系数上嵌入数字水印, 但对图像的质量影响较大, 这是由于人眼对 DCT 的低频分量敏感, 而对中频系数的修改不会使图像出现明显的降质。因此下面只在 DCT 的中频系数上嵌入水印。

令 $u+v=k$, 首先在 $k=15$ 的位置上嵌入水印信息。按照上面的嵌入算法, 可以嵌入 16 bit, 选取 $d=144$, 嵌入水印序列为 101001101011101, 经过 DCT 变换后按照上面的算法嵌入水印序列后有 $|n^+(u, v) - n^-(u, v)| = 144$, 由于离散余弦变换利用了图像的内容自相关性, 经过 DCT 反变换后, 再经过 DCT 变换, 重新统计 $F(0, 15), F(1, 14), F(2, 13), \dots, F(15, 0)$ 中 $n^+(u, v)$ 和 $n^-(u, v)$, 发现 $|n^+(u, v) - n^-(u, v)| < 144$ (见表 1)。

表 1 打印扫描前后的 $n^+(u, v) - n^-(u, v)$ 的值
Tab. 1 $n^+(u, v) - n^-(u, v)$ of the original and after print and scan

打印扫描前	-88	96	-108	116	108	-116	-132	90
打印扫描后	4	8	-1	16	36	-44	-30	60
打印扫描前	-100	100	-112	-100	-96	-72	68	-96
打印扫描后	-42	60	-62	-44	-26	-34	24	-32

从表 1 的数据中可以发现两者符号不一致的只是第 1 个数据, 即在集合 $F(0, 15)$ 中的水印信息没有能够正确检出。检测的正确率为 93.75%。

为了达到 100% 的正确率, 可增加嵌入强度, 选取 $d=230$, 虽然嵌入强度取得比较大, 但图像的质量没有明显的改变。在图 4 (a) 为原始图像, 图像的尺寸为 256×25 , (b) 为原始图像按照上面的嵌入算法, 在 $k=15, d=230$, 时嵌入 16 bit 后的图像, (c) 为 (b) 打印扫描后的图像。



图 4 LENA 图像

Fig. 4 LENA image

从图 4 中可以看到即使在嵌入强度非常大的情况下, 对于中频系数 $F(0, 15), F(1, 14), F(2, 13), \dots, F(15, 0)$ 的改变, 都不会引起可察觉的变化。而检测的正确率达到 100%。在嵌入强度不变的情况下, 为克服图像的边缘影响, 去掉 $F(0, 15)$, 只嵌入 15 bit, 也可以达到 100% 的正确率, 但是降低了水印的容量。

为了扩大水印的容量, 保持嵌入强度 $d=144$ 不变, 在 $k=14, 15$ 的位置都嵌入水印, 可以嵌入 31 bit, 错检 1 bit; 在 $k=13, 14, 15$ 的位置都嵌入水印, 可以嵌入 45 bit, 错检仍是 1 bit。并且错检只出现在 $k=15$ 的位置, 说明在相同的嵌入强度下, k 越小, 鲁棒性越好。但 k 越小, DCT 系数就越接近低频, 对图像的质量影响就越大。在嵌入强度 $d=230$ 的情况下, 取 $k=8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15$, 可嵌入 100 bit, 但图像出现了人眼可察觉的非常明显的改变, 在这种情况下, 嵌入水印已经失去了意义。

因此, 对于打印和扫描来说, 嵌入的位置仍为中频, 并且应去掉分块后的边缘位置。但为了扩大水印的容量, 也可在中低频嵌入水印, 为保证图像的质量, 可针对不同的 k 选取不同的嵌入强度 d 。

在对扫描后的图像的处理上, 使用 Photoshop 软件将扫描后的图像重新变成分辨率为 72 dpi 的数字图像, 大小也调整为 256×256 。使用的打印机为 HP4VC 激光打印机, 扫描仪为紫光 B6210 扫描仪。将嵌入水印的图像用 HP4VC 激光打印机在普通打印纸上打印输出, 然后用紫光 B6210 扫描仪扫描输入, 分辨率设置为 400 dpi。

4 结 语

本文提出了一种能够抵抗打印和扫描的数字水印算法, 通过研究打印扫描对图像在空间域和变换域上的影响, 选取了在图像的 DCT 域上嵌入水印, 针对打印扫描对图像影响的特点, 对 DCT 变换后的系数进行了分类, 通过分类后每一类中正负号的数量来表达水印信息, 增强了算法的鲁棒性。

对印刷品提供版权保护是数字水印技术当前研究中的一个新的研究方向,也是一个研究难点,这方面的文献相对较少。关于强鲁棒性数字水印算法的进一步研究是今后的研究方向。印刷水印除了可用于印刷品的版权认证和保护外,还可以用于证件的防伪造和篡改。在数字水印的研究中,印刷水印正越来越受到重视,并且具有很好的发展前景和广泛的用途。

参考文献:

- [1] Van SCHYNDEL R G, TIRKEL A Z, OSBORNE C F. A digital watermark[J]. Proc IEEE Int'l Conference on Image Processing, 1994(2): 86—90.
- [2] WOLFGANG R B, DDIP E J. A watermark for digital image [J]. Proc IEEE Int'l Conference on Image Processing, 1996 (3): 219—222.
- [3] COX I J. Secure spread spectrum watermarking for multimedia[J]. IEEE Trans on Image Processing, 1997, 6(12): 1673—1687.
- [4] COX I J, LINNARIZ J P M G. Some general methods for tampering with watermarks[J]. IEEE J Selected Areas in Communications, 1998, 16(4): 587—593.
- [5] 钮心忻, 杨义先. 基于小波变换的数字水印隐藏与检测算法[J]. 计算机学报, 2000, 23(1): 21—27.
- [6] 张静, 张春田. 能抗打印——扫描过程的数字图像水印算法[A]. 全国第三届信息隐藏学术研讨会论文集, 2001: [C]. 151—157.
- [7] 宋玉杰, 刘瑞祯, 谭铁牛, 等. 数字水印技术在印刷品防伪中的应用[J]. 中国图像图形学报, 2001, 6(5): 450—454.
- [8] MING S F, OSCAR C A. Data hiding watermarking for halftone images[J]. IEEE Transactions of Image Processing, 2002, 11(4): 477—484.
- [9] TADASHI M, KINEO M. Robustness investigation of DCT digital watermark for printing and scanning[J]. Electronics and Communications in Japan, 2003, 86(4): 11—19.
- [10] 牛少彰, 钮心忻, 杨义先, 等. 半色调图像中数据隐藏算法[J]. 电子学报, 2004, 32(7): 41—44.

Robustness Investigation of Digital Watermarking Algorithm for Print and Scan Process

NIU Shao zhang, WU Hong tao, XIE Zheng cheng, LIU Xin, YANG Yi xian

(Information Security Center, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: A novel digital watermarking algorithm for print and scan process is proposed. The key of this algorithm is its strong robustness. First, the effect of printing and scanning for images is discussed. According to the characteristic of the effect the digital watermarking is embedded on the DCT domain of images. Especially, the DCT coefficients are classified by their position. After classify, the digital watermarking is expressed by the count of difference between the positive and the negative in each group, and the robustness is enhanced. Then, the relation among the position, robustness and intension is studied in detail. Since this algorithm is robust for printing and scanning, it can also be used in copyright and authentication purposes of digital image for the printed format.

Key words: digital watermarking; DCT; printing and scanning