

doi:10.3969/j.issn.1674-7100.2013.02.009

打印/扫描过程中数字水印图像的失真及还原

王娟娟, 肖颖喆, 李娟, 冯起芹, 单武扬, 谢勇

(湖南工业大学 包装与材料工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘要: 数字水印图像的鲁棒性和稳定性与打印/扫描过程中的失真密切相关。打印是数字图像向半色调图像转换的过程, 会对水印图像造成低通滤波攻击、半色调攻击和几何攻击; 扫描是打印的逆过程, 是半色调图像向数字图像转换的过程, 会对水印图像引入低通滤波攻击和几何攻击。低通滤波攻击和半色调攻击会对数字水印图像造成非线性像素值失真, 几何攻击则会引起几何失真。非线性像素值失真的校正对策有: 对打印机或扫描仪的分辨率进行最优化设置, 对 γ 值进行校正, 使用空间低通滤波去除高斯噪声等; 几何失真的校正对策有: 通过周期性的冗余嵌入克服几何异步攻击, 进行模版嵌入设计实现同步等。

关键词: 打印/扫描; 数字水印; 非线性像素值失真; 几何失真; 失真还原

中图分类号: TS805

文献标志码: A

文章编号: 1674-7100(2013)02-0040-05

Distortion and Reduction of Digital Watermarking Image in Print-Scan Process

Wang Juanjuan, Xiao Yingzhe, Li Juan, Feng Qiqin, Shan Wuyang, Xie Yong

(School of Packaging and Material Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: The robustness and stability of digital watermarking image is closely related to the distortion caused by the print-scan process. Printing is the conversion process between digital images and halftone images, and causes low-pass filtering attack, halftone attack and geometric attack into the watermarking image; scanning is the reverse process of printing, which leads into low pass filtering attack and geometric attack. Thereinto, nonlinear distortion of pixel values on digital watermarking image is caused by low pass filtering attack and halftone attack, while geometric attack causes the geometric distortion. The correction countermeasures for the nonlinear distortion of pixel value include optimally setting the resolution of printer or scanner, correcting the gamma value, using the spatial low-pass filter to remove Gauss noise, etc while the reductive countermeasures for geometric distortion consists of overcoming geometric asynchronous attacks by embedding the cyclical redundancy, designing template embedding to achieve synchronization, and so on.

Key words: print-scan; digital watermarking; nonlinear distortion of pixel values; geometric distortion; reductive countermeasures for distortion

收稿日期: 2012-10-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61170101)

作者简介: 王娟娟(1989-), 女, 河南平顶山人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为产品包装安全与环境,

E-mail: 327410579@qq.com

通信作者: 肖颖喆(1974-), 女, 湖北汉川人, 湖南工业大学副教授, 硕士, 主要从事包装设计理论与文化方面的教学与研究, E-mail: xiaoyingzhe7410@126.com

打印/扫描是图像由电子数字模式向文本图像模式进行转换的最普遍的一种形式,目前已成为图像复制和传播的重要方式。这种图像复制和传播方式简便易行,给人们的生活提供了便捷服务,但同时也使图像造假和篡改变得更容易。在此背景下,数字水印技术应运而生。数字水印技术是将一些标识信息(即数字水印)直接嵌入数字载体(包括多媒体、文档、图像、软件等)当中,或间接表示(修改特定区域的结构),在不影响原载体的使用价值和不容易被探知和再次修改的情况下,达到防伪的目的。数字水印图像的出现一定程度上抑制了图像造假和篡改等现象,但由于打印/扫描过程中图像在数字图像和半色调图像之间的相互转化,产生了多次不均匀重采样和量化操作^[1],使其与原图像在灰度分布上发生了较大的改变,产生了失真,而水印的鲁棒性和脆弱性是与印刷扫描过程中的失真紧密联系在一起的。定性、定量地分析打印/扫描过程对数字图像的攻击以及所引起的各种失真,并提出对应的失真还原对策,以保证水印具有较强的鲁棒性和稳健性,这已成为目前亟待解决的问题。

1 打印过程对数字水印图像的攻击

打印过程是数字图像向半色调图像转换的过程,即D/A转换。其综合利用了人眼视觉系统具有空间低通滤波的特性,能够模糊半色调图像中像素点之间的不连续区域,而图像具有任何一个小局部的纹理相似、像素的灰度值接近的特性,进而使用一组打印点代表相同个数的一组像素,通过这组打印点综合出该组像素的整体灰度效果^[2]。

目前,通常使用的打印机为激光打印机,其基本工作原理是:由计算机传来二进制数据信息,通过视频控制器转换为视频信号,然后由视频接口/控制系统将视频信号转换为激光驱动信号,再由激光扫描系统产生字符信息的激光束,最后由电子照相系统使激光束成像并转印到打印纸上。激光打印机是将激光扫描技术和电子显像技术相结合的非击打输出设备,采用半色调技术,使用黑白点阵打印^[3-4]。激光打印机的内部结构复杂,具体结构如图1所示。

从图1中可以看出,激光打印机的内部构造较复杂,影响因素较多,很难准确对每个部件进行数学描述,因此,用数学表达式描述各个部件对打印中数字图像的影响较困难,其代价较高且实际意义较小。鉴于此,本文不对各个部件引起的图像失真进行一一介绍。

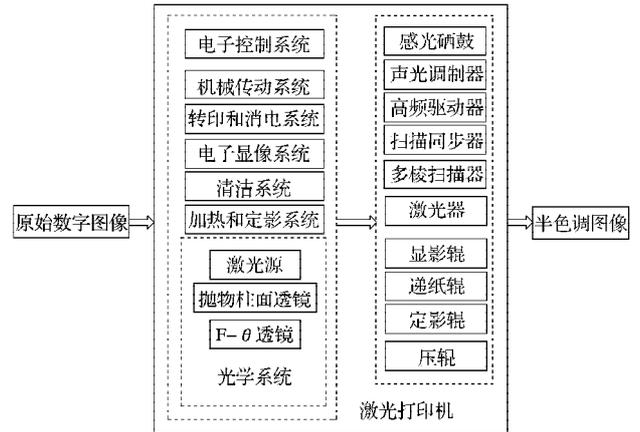


图1 激光打印机的内部结构示意图

Fig. 1 The internal structure diagram of laser printer

通过多次试验以及分析相关资料发现,激光打印机在打印过程中对数字图像造成的攻击主要有3种:低通滤波攻击、半色调攻击和几何攻击^[5]。

1) 低通滤波攻击。低通滤波是一种信号过滤方式,与高通滤波对立,规则为低频信号能正常通过,而超过设定临界值的高频信号则被阻隔、减弱。因此,低通滤波攻击表现为打印后对水印图像低频成分的影响较小,即集中反映图像信息的基本部分被保存下来,但对图像的中高频域的系数影响较大,印刷作品的高频细节部分丢失。这也表明,水印嵌入到低频时具有较强的鲁棒性。造成低通滤波攻击的因素较多,如打印机本身产生的各类噪声和系统点增益,打印过程中是否有灰尘、纸屑附着于打印机零部件,墨粉不足,以及打印图像在使用中的磨损程度等^[6-7]。

2) 半色调攻击。半色调攻击主要是针对灰度数字图像而言的。半色调技术是指在连续灰度图像二值量化输出时,为了补偿量化误差对图像质量产生的负效应而采用的一种图像处理方法^[8]。由半色调技术引起的失真对原始图像有较大影响,会对水印造成半色调攻击,使水印难以提取或受到破坏。一般来说,激光打印机常采用半色调技术抖动法输出图像^[9],通过黑白点阵来重现灰度数字图像。由于人眼能够模糊图像像素点之间的不连续部分,抖动法输出的图像肉眼看上去和原始图像一致,但图像局部细节往往存在失真,如在水印图像上出现高频抖动的纹理、打印图像变得模糊、图像边缘毛刺增多等。造成半色调攻击的因素较多,如元器件的老化程度、激光束的扩散、纸张的光滑度和吸水性、打印分辨率DPI(dots per inch)的高低、油墨的黏度和黏结性等性能以及半色调网点的形状等,这些因素都能引起图像的失真,导致输出图像的品质降低。

3) 几何攻击。几何攻击一般由人为因素引起。在实际操作中, 打印纸在放入打印机时可能会发生卷角、歪斜等现象, 或因打印机使用时间过长发热而使纸张卷曲一定角度等, 这些都将导致打印图像发生相应的旋转、歪斜或弯曲等几何扭曲变形。此外, 对数字水印图像进行旋转、剪切、缩放等操作, 也可能引起几何失真。这些失真往往会造成数字水印不同步, 甚至使水印信息在一定程度上丢失, 从而对水印的提取、检测造成干扰。

2 扫描过程对数字水印图像的攻击

扫描过程是半色调图像向数字图像的转换, 即 A/D 转换。其需要数字图像信号的输入设备扫描仪和存储设备计算机配合完成。其工作原理为: 首先用扫描仪对原印刷图像进行光学扫描, 然后将光学图像传送到光电转化器中, 并转化为模拟电信号, 其后将模拟电信号转化为数字电信号, 最后通过计算机接口输送至计算机中存储为数字图像。

扫描仪的种类较多, 有平板式扫描仪、馈纸式扫描仪、手持式扫描仪以及滚筒式扫描仪等。扫描仪的内部结构较复杂, 但基本工作原理大致相同, 本文以平板式扫描仪为例, 简单介绍其内部构造。平板式扫描仪主要由三大系统组成, 其内部结构如图 2 所示。

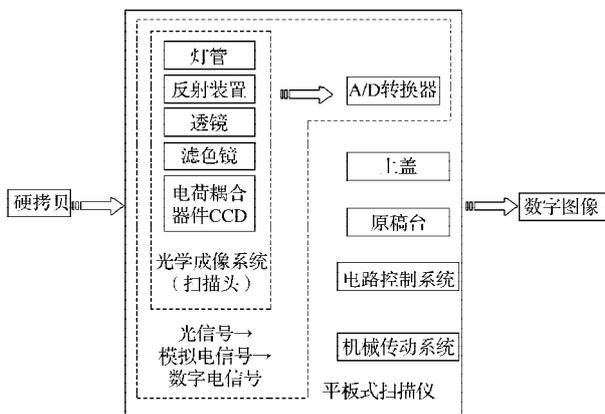


图 2 平板式扫描仪的内部结构示意图

Fig. 2 The internal structure diagram of flatbed scanner

扫描过程中, 扫描仪中 2 个起关键作用的原件电荷耦合器件 (charge-coupled device, CCD) 和 A/D 变换器, 将图像信息从光信号转换为模拟电信号, 再转换为数字电信号, 这些转换将会引起水印信息一定程度的丢失, 从而影响水印的提取效果。概括起来, 扫描过程的攻击主要有 2 种, 即低通滤波攻击和几何攻击^[5]。

1) 低通滤波攻击。扫描过程中的低通滤波攻击也叫高斯低通滤波攻击, 由扫描仪的光学传递函数高斯模糊函数决定。其与扫描仪本身的机械特性紧密相连: 扫描仪的步进电机产生的高斯随机噪声、CCD 的各个元件之间的光敏感度和电隔离、电子电路的不稳定性等, 都会对数字水印图像造成攻击, 影响图像的质量; 扫描仪光学成像部分的精度, 如扫描头 (包括灯管、反光镜、滤色镜和 CCD) 的清晰度、运光波、结晶均匀度等, 也会直接影响图像的清晰度; 扫描仪分辨率的高低和各元部件的老化程度, 也在一定程度上影响着图像的扫描品质。除了扫描仪自身特性的影响外, 扫描所处的外部环境, 如环境噪声、扫描灰暗度、照射光线强度是否充足等因素, 也会对水印图像造成低通滤波攻击。此攻击对图像的影响主要表现为: 扫描后出现图像模糊, 对比度降低, 图像有斑点, 颜色错位、偏色及出现龟纹等^[6-7,10]。

2) 几何攻击。扫描过程也会对数字图像造成几何攻击。理想情况下, 扫描过程是无需人工介入的, 直接构造器械和编制软件对打印作品进行扫描, 并对图像进行适当的位置校正, 从而避免人为因素造成的影响。然而现实中, 往往需要人工介入来完成一些操作, 如需要打印操作者将打印文稿放在扫描台的预定位置, 这就不可避免会产生干扰。这种攻击同打印过程中的几何攻击相似, 主要是由未能准确放入打印图像及打印图像产生褶皱、磨损、旋转、偏移等而引起的。另外, 扫描仪和打印图像之间的分辨率不同, 相当于对图像进行了缩放, 也会引起一定的几何失真。这种失真对数字水印图像会产生显著影响, 在一定程度上会破坏防伪效果。

3 失真还原对策

打印或扫描后的图像和原图像之间的逼真度通常通过均方误差 (mean squared error, MSE)、峰值信噪比 (peak signal to noise ratio, PSNR) 和归一化误差 (normalized error, NC) 3 个指标^[11]来进行定性描述, 反映打印 / 扫描前后图像灰度和空间域系数的差别, 其中, 归一化误差是新的图像质量客观评价指标, 常被用于评价数字水印的质量^[12]。

均方误差的表达式为

$$\varepsilon_{\text{MSE}} = \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} [g(i,j) - f(i,j)]^2 / M \times N. \quad (1)$$

式中: $M \times N$ 为图像大小, $f(i,j)$ 和 $g(i,j)$ 分别表示原始

图像和打印扫描后的图像。

峰值信噪比的表达式为

$$P_{\text{SNR}} = 10 \times \log \left[\frac{M \times N \times m^2}{\sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} [g(i,j) - f(i,j)]^2} \right] = 10 \times \log \left[\frac{m^2}{\varepsilon_{\text{MSE}}} \right] \quad (2)$$

归一化误差的表达式为

$$\varepsilon_{\text{NC}} = |f(i,j) - g(i,j)| / (|f(i,j)| + 1) \quad (3)$$

通过上述打印/扫描过程对水印图像影响的分析,可将数字水印图像在此过程中的失真描述为图3所示。

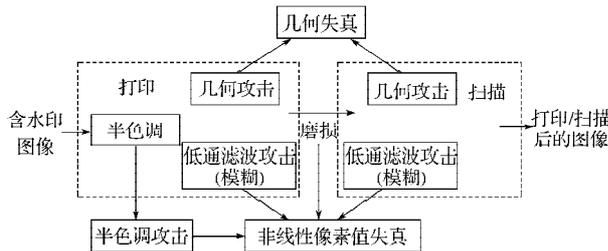


图3 打印/扫描过程中引入的失真

Fig. 3 The distortion caused by print-scan process

由图3可知,打印/扫描对数字图像攻击引起的失真有非线性像素值失真(由半色调攻击和低通滤波攻击引起)和几何失真(由几何攻击引起)^[10],其相应的校正对策如下:

3.1 非线性像素值失真校正对策

非线性像素值失真即灰度值失真,主要是由半色调攻击和低通滤波攻击造成的。其主要集中在水印图像的高频区域和深色阴暗部分,表现为图形亮度对比度下降,模糊不清,水印信息损失等。由于打印/扫描后图像像素值的非线性关系较难确定,尚无一套精确的还原非线性像素值失真的方法,仅通过试验测试得到如下一些常用的校正最小化图像非线性像素值失真的方法,可以近似地恢复打印/扫描图像的像素值失真:

1) 对打印机或扫描仪的分辨率进行最优化设置,保证图像的高频细节部分能够细腻地表现出来,更容易提取出水印;

2) γ 值表示输出图像对输入信号的失真度,在打印/扫描图像时,可通过软件直接对 γ 值进行校正;

3) 采用空间低通滤波去除打印/扫描过程带来的高斯噪声;

4) 使用Photoshop软件,并以峰值信噪比最优为目标,进行非线性亮度变换和对比度拉升变换。

在选择这些失真校正方法时,应避免引入新的

失真。这些常用的校正方法能在一定程度上对图像进行失真校正,但因考虑因素较单一,校正效果不稳定,图像的还原质量不佳^[5-6],因此还有待更深入的研究。

3.2 几何失真校正对策

几何失真主要是指由于数字水印图像经过旋转、平移、剪切或缩放等操作而引起的水印图像和原始图像之间信息不同步的现象。针对这些不同步现象,除了尽量避免人为因素的影响,如人为调整,减小旋转、偏移或剪切的程度等,目前,学界提出了一种新技术——自同步技术。自同步技术的提出,为解决几何失真提供了一定的依据。根据自同步技术原理,可以得到如下校正几何失真的对策:

1) 通过周期性的冗余嵌入克服几何异步攻击^[6]。该方法能够校正全局几何失真,但实际信息嵌入容量较小。

2) 进行模版嵌入设计实现同步^[13]。模版嵌入能够准确获取打印/扫描过程中图像经历的几何变换,但模版容易被检测到而去除,且因对图像进行了附加修改,在嵌入水印的同时又加入模版信息,可能会引起水印图像失真,影响水印的检测和提取效果。

3) 使用旋转、平移和尺度变换的不变嵌入域进行几何校正^[13-14]。该变换又称作傅立叶梅林变换,有较强大的理论支持,但是其计算复杂繁琐,若坐标系发生变化,将会引入新的失真——差值失真。

4) 将同一个水印嵌入图像4个不同位置的自参考方法^[13]。该方法可以较好地抵抗旋转、伸缩、平移和改变长宽比等几何攻击,但是对剪切、压缩、镜像和滤波等攻击的抵抗性较弱。S. Voloshynovskiy等人对该技术进一步发展,提出了一种水印块分配方案,能较好地抵抗仿射变换攻击和压缩攻击^[15]。

5) 采用图像特征点技术抵抗几何攻击^[5,16]。该技术能利用图像自身特征实现同步,即绝对同步,但其性能主要取决于几何攻击后特征同步模板保留情况,不理想情况下,会产生同步特征检测失败,从而导致水印检测失败。

4 结语

打印/扫描过程中,低通滤波攻击、半色调攻击和几何攻击对数字图像会造成非线性像素值失真和几何失真,在一定程度上影响了数字水印的提取品质。由于影响失真的因素较多,难以定性地把握其间的关系,因此,上述失真还原对策仅能在一定程

度上恢复水印图像的丢失部分,且可能会因校正方法选择不恰当而引入新的失真。如何快速准确地克服这些影响因素,并最大程度地减少失真对数字水印图像的影响,这对数字水印技术的发展有着重要的现实意义。

参考文献:

- [1] Kenneth R Castleman. 数字图像处理[M]. 朱志刚, 林学闾, 石定机, 等译. 北京: 电子工业出版社, 2011: 5-38.
Kenneth R Castleman. Digital Image Processing[M]. Zhu Zhigang, Lin Xueyin, Shi Dingji, et al Translated. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2011: 5-38.
- [2] Thrasyvoulos N Pappas. Printer Models and Color Halftoning[C]//Proceedings-Icassp, IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing. Minnesota: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1993: 333-336.
- [3] 刘永利. 激光打印机的基本结构和工作原理:上[J]. 家电维修技术, 2012, 6(2): 23-24.
Liu Yongli. The Basic Structure and Working Principle of Laser Printer: One[J]. Technology for Overhauling Electrical Home Appliance, 2012, 6(2): 23-24.
- [4] 刘永利. 激光打印机的基本结构和工作原理:下[J]. 家电维修技术, 2012, 6(3): 23-24.
Liu Yongli. The Basic Structure and Working Principle of Laser Printer: Two[J]. Technology for Overhauling Electrical Home Appliance, 2012, 6(3): 23-24.
- [5] 舒南飞. 抗打印扫描数字水印算法设计与研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2010.
Shu Nanfei. The Design and Research of Print-Scan Resistant Watermarking Algorithm[D]. Beijing: Beijing University of Post and Telecommunications, 2010.
- [6] 冀芊茜. 抗打印扫描数字水印算法研究及其在证件防伪中的应用[D]. 吉林: 吉林大学, 2007.
Ji Qianqian. Research on Digital Watermarking Algorithm for Print-and-Scan Process and Application in Certificate Anti-Counterfeit[D]. Jilin: Jilin University, 2007.
- [7] 葛云露. 抗打印扫描数字水印系统分析与算法研究[D]. 吉林: 吉林大学, 2007.
Ge Yunlu. The Systems Analysis and Algorithm Research on Digital Watermarking Techniques for Image Print-Scan Process[D]. Jilin: Jilin University, 2007.
- [8] Solanki K, Madhow U, Manjunath B S, et al. Estimating and Undoing Rotation for Print-Scan Resilient Data Hiding [C]//Image Processing, ICIP International Conference. Singapore: IEEE Signal Processing Society, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2004: 39-42.
- [9] Glenn David Blatner, Roth Fleishma Steve. 扫描与半色调处理[M]. 2版. 刘慧洁, 潘文林, 毛鹤祥, 等译. 北京: 清华大学出版社, 2000: 157-211.
Glenn David Blatner, Roth Fleishma Steve. Scanning and Halftone Processing[M]. 2nd ed. Liu Huijie, Pan Wenlin, Mao Hexiang, et al Translated. Beijing: Tsinghua University Press, 2000: 157-211.
- [10] 年桂君. 抗同步攻击鲁棒性数字水印技术研究[D]. 吉林: 吉林大学, 2008.
Nian Guijun. Digital Watermarking Robust Against Synchronization Attacks[D]. Jilin: Jilin University, 2008.
- [11] 庞建新. 图像质量客观评价的研究[D]. 北京: 中国科学技术大学, 2008.
Pang Jianxin. Research on Image Objective Quality Assessment[D]. Beijing: University of Science and Technology of China, 2008.
- [12] 张丽强. 印刷图像数字水印技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2005.
Zhang Liqiang. Research on Digital Watermark Available for Printed Images[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2005.
- [13] 陈萍. 鲁棒的印刷图像水印研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2006.
Chen Ping. Research on Robust Watermark for Printed Images [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2006.
- [14] Zheng Dong, Liu Yan, Zhao Jiying, et al. A Survey of RST Invariant Image Watermarking Algorithms[J]. ACM Computing Surveys (CSUR), 2007, 39(2): doi10.1145/1242471.1242473.
- [15] Voloshynovskiy S, Degullaume F, Pun T. Content Adaptive Watermarking Base on a Stochastic Multiresolution Image Modeling[C]//Eusipco 2000, European Signal Processing Conference. Tampere: TTKK-Paino, 2000: 1953-1956.
- [16] Bas P, Chassery J M, Macq B. Geometrically Invariant Watermarking Using Feature Points[J]. IEEE Trans. Image Process, 2002, 11(9): 1014-1028.

(责任编辑:徐海燕)