

doi:10.3969/j.issn.1674-7100.2013.04.011

全息数字水印技术在防伪印刷领域的应用研究

肖颖喆, 张 雯, 单武扬

(湖南工业大学 包装与材料工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘要: 将全息数字水印技术应用于防伪印刷无需添加任何新的材料, 对设备和工艺也没有特殊的要求, 同时还可提高水印的不可见性, 其操作性较强。综述了空间域和变换域2类全息数字水印算法的研究现状, 提出了现有全息数字水印方案应用于防伪印刷中存在的问题, 并展望了其研究方向, 即: 将现有技术和印刷实验相结合, 研究不同承印物、印刷方式和原稿对该技术应用到防伪印刷中的影响, 开发一套完善的、应用于印刷品的水印质量评价和鉴别体系。

关键词: 数字水印; 全息图; 防伪印刷

中图分类号: TS853+.6

文献标志码: A

文章编号: 1674-7100(2013)04-0047-05

Research on Application of Holographic Digital Watermarking Anti-Counterfeiting Printing

Xiao Yingzhe, Zhang Wen, Shan Wuyang

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

Abstract: Without adding any new materials, with no special requirements of equipment and processes, holographic digital watermarking could be applied in anti-counterfeiting printing and improve the watermark invisibility and operational practicality. A brief introduction of research status of holographic digital watermarking algorithm in spatial domain and transform domain is given, and the problems in applying prospect scheme in printing security are proposed. The future research direction is put forward as combining existing technology and printing with experiment, researching on the impact of applying prospect scheme by using different substrates, printing methods and techniques in anti-counterfeiting printing, developing a comprehensive system applicable to the watermark printing quality evaluation and identification.

Key words: digital watermarking; hologram; anti-counterfeiting printing

0 引言

目前, 商品市场经济中不法分子通过制假、贩假谋取私利的行为屡见不鲜。现有印刷防伪技术大多通过在印刷过程中添加特殊材料或者采用特殊工艺

达到防伪的目的。然而, 特殊的材料、工艺又往往会引起印品成本提高、不适合大批生产、环境污染、安全性下降等问题。针对上述问题, 全息数字水印技术在防伪印刷领域的应用研究应运而生, 为防伪

收稿日期: 2013-07-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61170101)

作者简介: 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 & 包装设计理论与文化方面的教学与研究, E-mail: xiaoyingzhe7410@126.com

通信作者: 张 雯(1989-), 女, 天津人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为印刷品水印防伪技术,

E-mail: 1621463696@qq.com

印刷提供了一种新思路。

将全息数字水印技术应用于防伪印刷的主要操作如下：印刷前，通过计算机程序对将要印刷的数字图像进行处理，在图像中嵌入不可见的水印信息；印刷完成后，通过拍照或扫描的方式将印刷图像转换为数字图像，提取并鉴别其中的水印信息，以达到防伪的目的。将全息数字水印技术应用于防伪印刷无需添加任何新的材料，对设备和工艺也没有特殊的要求。现有全息数字水印技术主要用于数字媒体的版权保护和认证^[1-3]，而其在印刷防伪领域的应用鲜见报道。

近年来，国内外研究者对全息数字水印技术进行了研究^[1-4]，该技术虽然日趋成熟，但水印的鲁棒性、不可见性和容量之间的权衡问题尚未得到圆满解决。同时，现有技术主要针对数字媒体的版权保护和认证问题，若将其应用于印刷领域，仍需进一步将该技术和印刷工艺相结合。

1 基于全息图的数字水印算法

数字水印技术是利用密钥对信息进行加密，生成水印信息，然后使用某种嵌入算法将其嵌入宿主图像中，再提取并鉴别水印信息，以实现防伪目的^[1]。全息数字水印信息的嵌入及提取过程见图1。

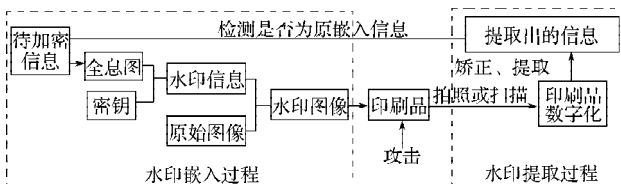


图1 全息数字水印流程图

Fig. 1 The flow chart of holographic digital watermarking

1.1 数字水印的鲁棒性、容量、不可见性及其制约关系

通常情况下，可通过权衡水印的鲁棒性、容量和不可见性3个性质来确定适合的水印方案^[2-3]。鲁棒性是指水印抵制不同攻击和篡改操作的能力；容量是水印嵌入过程中可以被嵌入信息量的大小；不可见性是指倘若使用数字水印技术作为防伪技术，水印不应影响宿主图像的视觉效果，即水印不可见。

以上3个性质相互矛盾，相互制约。一方面，为了保证水印信息不被造假者轻易提取、篡改，必然要保证较好的鲁棒性，因而水印信息要嵌入易于感知的部分；另一方面，为了具有较高的不可见性，水印不得被放置在不易被感知的部分。因此，鲁棒性和不可见性相互矛盾，不易同时满足。同样，没

有一个水印方案既可抵制广泛的攻击，又具有很高的容量；降低水印的不可见性，才能提高水印容量。大部分数字水印方案在尝试找到这3个性质之间的一个折衷。将全息图引入数字水印技术中，利用全息图的不可撕毁性，提高水印的鲁棒性；全息图的记录形式是高频中的干涉条纹，人眼对其不敏感，可提高水印信息的不可见性。因此，可利用全息图特有的性质，探寻数字水印鲁棒性和不可见性之间更佳的平衡点。

1.2 数字全息图的优势

随着电荷耦合元件(charge-coupled device, CCD)成像器件的出现和计算机技术的发展，全息图的记录和重构过程脱离了传统光学元件而转移到计算机上完成，形成了数字全息图^[5]。数字全息图应用于数字水印防伪技术中具备以下优势：

1) 全息图是编码形式的高频干涉条纹，人类视觉对其不可见，且以干涉条纹形式记录的全息图类似随机条纹，因而可视全息水印信息为伪噪声，这极大地提高了水印的不可见性。

2) 不可撕毁性。由于全息图上的每个点并不是和原物平面的单个点一一对应，而是在整个原物平面共同作用下产生的，因而可以通过全息图上的部分点还原全部信息。该性质极大地改善了印刷过程中因网点离散化造成水印信息丢失而不能顺利提取水印的问题。

3) 全息图的记录和重构过程需要相同的衍射距离和光波波长，重构时必须提供相同的参数才能恢复原信息。因此，使用全息图作为水印信息，一定程度上对信息进行了加密。

4) 与传统光学全息图相比，数字全息图的记录和重构过程均在计算机上完成，省去了光学元件的加入和物理化学处理过程，操作性更强。

2 全息数字水印算法的研究现状

根据水印的嵌入位置，可将全息数字水印算法分为空间域和变换域2类。

2.1 空间域

空间域又称图像空间，在空间域中嵌入水印意味着宿主图像的像素值被直接修改。空间域算法先于变换域算法被提出，水印嵌入操作流程较简单，易被滤波、压缩等操作攻击。

N. Takai等^[6]提出将傅里叶全息图应用到数字水印技术中，并通过仿真实验，比较了常系数加权和自适应加权在不同嵌入强度条件下水印信息重构的效果，结果表明，常系数加权总体上优于自适应加权。此外，还对连续调图像和半色调图像分别做了

不同程度的剪切攻击的仿真实验,结果表明,在遭受不同剪切面积的攻击时,重构出的水印图文大小是一致的,这充分证明了全息图的不可撕毁性。但是,该算法对 JPEG 压缩攻击的抵抗较为脆弱。另外,先将宿主图像经过低通滤波,再将计算机生成的傅里叶全息水印信息嵌入宿主图像的空间域中,该过程本身就是对宿主图像的攻击,因此在一定程度上会降低图像质量。

Sun Liuji 等^[7]在文献[6]的基础上,结合加密技术和全息技术,提出一种双随机相位加密同轴傅里叶全息水印方案,该方案嵌入强度适中且安全性能较高,在水印嵌入强度适中的条件下,具有较好的不可见性,并可通过盲检测鉴别真伪。另外,打印/扫描实验表明,该方案可以应用于证件、包装防伪领域。Spagnolo 等^[8]将 RSA 公匙加密技术和全息技术相结合:在水印嵌入阶段,使用私钥(private key, SK)嵌入水印,其中 SK 是保密的;而在水印提取阶段,任何人都可以使用公钥(public key, PK)验证水印。这种加密技术和全息图的结合可有效地防止伪造者篡改和拷贝水印信息,且该方案具有出色的抗剪切能力,但嵌入水印前宿主图像同样需要经过低通滤波,会导致水印图像质量下降,且易被 JPEG 压缩攻击破坏的缺点并没有得到改善。

孙云峰等^[9]将傅里叶全息数字水印技术应用到彩色图像印刷防伪技术中:将傅里叶全息图作为水印信息嵌入 CIELAB 颜色空间的亮度分量 L 中,以减小颜色损失,实现了大信息量的嵌入;设计了水印提取过程需要的定位-校正程序,实现了水印的盲检测,实用性较强。但是,其定位-校正程序主要涉及几何校正,而未涉及曝光、涂污、油墨不均匀引起的椒盐噪声等攻击造成的失真校正。

2.2 变换域

考虑到算法的鲁棒性,空间域水印算法易于被滤波、有损压缩等攻击破坏,且通常在嵌入水印前需要使用低通滤波处理宿主图像,降低了图像质量。变换域数字水印算法将水印信息嵌入宿主图像变换域,可有效提高对信号处理操作的鲁棒性。关于变换域的研究主要集中在离散余弦变换(discrete cosine domain, DCT)域和离散小波变换(discrete wavelet transform, DWT)域^[10]。

2.2.1 DCT 域

在 DCT 域中嵌入水印,首先需要对手主图像进行 DCT 处理。考虑到人眼视觉对图像低频部分更为敏感,为保证水印的不可见性,一般不会将水印嵌入低频部分;图像压缩主要破坏图像的高频部分,但

对低频部分影响不大:故通常选择中频嵌入水印。

针对文献[6]提出的空间域全息数字水印方案的不足,H. T. Chang 等^[11]提出将水印信息嵌入 DCT 的中频系数中,以提高水印的不可感知性。但通过对整幅图进行逆傅里叶变换即可提取水印,安全性较低,且仍未解决文献[6]方案中抗压缩能力差的缺点。基于此,尉迟亮等^[12]采用 JPEG 模型和分解 DCT 系数的方法,保证全息数字算法对剪切等图像处理操作稳健性的同时,提高了对 JPEG 有损压缩攻击的稳健性。

为了进一步提高算法的安全性,赵雅晶等^[13]在水印信息嵌入宿主图像前,先进行 Arnold 置乱变换,再嵌入宿主图像 DCT 的中频系数。引入 Arnold 置乱变换,一方面可将置乱次数当做密钥,提高算法的安全性;另一方面,Arnold 置乱变换将全息水印信息中所涵盖的内容均匀分布,降低了因含有重要信息的部分被攻击而重构效果低劣的可能,一定程度上提高了算法的鲁棒性。唐雪婷等^[14]在对全息水印信息进行 Arnold 置乱变换的同时,对宿主图像进行 hadamard 变换,提高了算法的鲁棒性。另外,针对 Arnold 置乱变换在迭代次数接近周期时会再现原图的缺陷,王敏^[15]引入混沌映射理论,进一步加密水印信息。

上述 DCT 域中的全息数字水印算法采用的均为傅里叶全息图,针对傅里叶全息图变换平面单一的缺陷,杨涛等^[16]提出一种结合菲涅尔全息图和 DCT 域的数字水印技术,并采用隔行或隔列的方式嵌入水印,可实现水印的盲提取。该算法对剪切、滤波、有损压缩、旋转等图像处理操作的稳定性较好。

2.2.2 DWT 域

DWT 具有较好的时频域特性及良好的局部性,成为近年来的研究热点。经过一次小波分解,可得到 4 个子带,分别记作 LL, LH, HL, HH。其中,LL 是低频子带,承载着原图的主要信息;其余 3 个子带则是原图边缘、细节的体现。经过二次小波分解,可得到 4 个子带,分别记作 LL₂, LH₂, HL₂, HH₂。以此类推得到多次小波分解的子带。

O. E. Okman 等^[17]在水印嵌入阶段引入量化索引调制(quantization index modulation, QIM),该方法将水印信息嵌入低频小波系数,抗滤波和压缩能力较强,且水印提取过程只需量化器,实现了盲提取。同大多数水印方案相似,该方案着眼于解决信号进程攻击,如加噪、低通滤波及 JPEG 压缩攻击,而忽略了当图像受到几何攻击不能顺利提取的问题。Li Jianzhong^[18]使用量化嵌入算法将水印嵌入小波域低

频子带的同时,在水印提取阶段使用尺度不变特征变换(scale invariant feature transform, SIFT)、不变质心(invariant centroid)和脉冲耦合神经网络(pulse coupled neural network, PCNN),来评估几何变形参数,以校正图像的几何变形,水印提取过程较方便。但将水印信息嵌入低频子带,虽然提高了算法的鲁棒性,但同时也降低了图像质量,使得水印图像和宿主图像之间的差异变得较为明显。倘若嵌入高频子带HH中,虽保证了水印的不可见性却也降低了抗低通滤波的能力。面对此问题, Lee Mn-Ta等^[19]将菲涅尔全息图作为水印信息分别嵌入一次小波分解的LH, HL子带,并通过仿真实验对其在不同嵌入强度的峰值信噪比(peak signal to noise ratio, PSNR)和误差参数做了比较。结果表明,整体上嵌入LH略好一些,但效果并不明显;同时,嵌入强度越大,误检率越低,而水印图像与原图间的差异也越明显。

针对孪生像的混叠问题,吴建华等^[20]对原水印信息进行零扩展后,再将水印信息嵌入宿主图像二次小波分解后的HL₂, LH₂中能量块较大的子带中。仿真实验中嵌入强度达50%时,该算法对JPEG压缩攻击和剪切攻击均具有较好的鲁棒性,且不可见性亦可得到满足。但是水印的提取过程需要原宿主图像,未能实现盲提取。

Xie Yong等^[21]为提高水印抵抗印刷过程中图像半色调化处理引入的攻击,提出将菲涅尔全息图进行Arnold置乱加密处理后,嵌入二次小波变换的中频HH₂子带中。该方案将全息数字水印技术和印刷过程中的实际问题相结合,提高了抗半色调化的鲁棒性,且可同时满足不可见性,但提取出的水印信息不够清晰。Xie Yong等^[22]提出CMYK色彩空间的全息数字水印方案,并通过打印/扫描实验,比较了水印嵌入不同色彩通道的图像质量。

3 问题与展望

面对激烈的市场竞争和日趋严峻的环境问题,全息数字水印防伪技术因其成本较低、环境友好的优势,得到了越来越多的关注。

3.1 问题

全息数字水印技术在印刷防伪领域的应用尚未成熟,现有的全息数字水印方案大多针对数字媒体,将其应用于防伪印刷中仍存在如下问题:

1) 现有方案中仅涉及打印/扫描实验和以纸质材料为承印物的印刷实验,而实际印刷中可能涉及的其他承印物还有很多,该技术对其他承印物的适

用性没有研究。

2) 现有方案中用于评价失真的指标,如PSNR、均方误差(mean squared error, MSE)等指标,尚不能达到和人眼视觉一致。换言之,即便评价失真的指标指示添加水印后的图像和原水印图像差别很小,但人眼仍然可以轻易将其区别开。

3) 现有水印方案虽然也涉及失真校正的问题,但在印刷图像经过拍照或扫描等方式再次数字化的同时,不可避免地伴随着多重攻击,如几何攻击(缩放、旋转、透视)、曝光、涂污、油墨不均匀引起的椒盐噪声以及CMYK 4色印刷图像转换为RGB彩色数字图像引起的颜色失真等攻击,如何在获取数字图像后,对以上多种失真同时或连续进行校正的研究尚未见报道。

4) 印刷过程本身就是对数字图像的一种攻击,如印刷过程带来的图像半色调化造成水印信息的丢失。如何提高嵌入水印后对抗印刷过程攻击的能力,将是影响将全息数字水印技术应用到防伪印刷领域的关键性问题。

3.2 展望

现有的全息数字水印方案虽然主要针对数字媒体,但已有研究对其在印刷领域的应用依然做出了较大贡献,将该技术应用于防伪印刷领域的研究可朝以下方向进行:

1) 现有全息数字水印方案大多试图寻找水印鲁棒性和不可见性之间的平衡点,而将该技术应用于印刷,借助纸张固有的纹向和半色调效果,一定程度可提高水印的不可见性。未来的研究工作可将现有技术 and 印刷实验相结合,以反馈得到更适合的水印方案。

2) 将全息水印技术应用于印刷领域,力图找到可以不添加特殊材料、不引进新的印刷设备的方法。承印物、印刷方式以及原稿本身的明度、色调和饱和度等因素都会影响该技术的应用效果。进一步的研究工作可探讨不同承印物、印刷方式和原稿对该技术应用到防伪印刷中的影响,并据此调整方案。

3) 开发一套完善的、应用于印刷品的水印质量评价和鉴别体系,包括图像失真的校正、水印的提取、水印质量的评价和鉴别等。

参考文献:

- [1] Hebah H O Nasereddin. Digital Watermarking a Technology Overview[J]. International Journal of Research and Reviews in Applied Sciences, 2011, 6(1): 89-93.

- [2] Damien Muselet, Alain Trémeau. Recent Trends in Color Image Watermarking[J]. Journal of Imaging Science and Technology, 2009, 53(1): 1-15.
- [3] Jeffrey Lubin, Jeffrey A Bloom, Cheng Hui. Robust Content-Dependent High-Fidelity Watermark for Tracking in Digital Cinema[J]. SPIE Proceedings, 2003, 5020: 536-545.
- [4] 冯起芹, 单武扬, 薛继武, 等. 基于全息水印印刷防伪的半色调算法[J]. 包装学报, 2013, 5(1): 26-30.
Feng Qiqin, Shan Wuyang, Xue Jiwu, et al. The Halftoning Algorithm Based on Holographic Watermark Security[J]. Packaging Journal, 2013, 5(1): 26-30.
- [5] Hendry David. Book Review: Digital Holography: Digital Hologram Recording, Numerical Reconstruction, and Related Techniques[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2006, 44(11): 1236-1237.
- [6] Takai N, Mifune Y. Digital Watermarking by a Holographic Technique[J]. Applied Optics, 2002, 41(5): 865-873.
- [7] Sun Liujie, Zhuang Songlin. Watermarking by Encrypted Fourier Holography[J]. Optical Engineering, 2007, 46(8). doi: 10.1117/1.2769366.
- [8] Giuseppe Schirripa Spagnolo, Michele De Santis. Holographic Watermarking for Authentication of Cut Images [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2011, 49(12): 1447-1455.
- [9] 孙云峰, 翟宏琛, 杨晓苹, 等. 傅立叶计算全息数字水印在彩色图像印刷防伪中的应用[J]. 光电子·激光, 2008, 19(7): 952-955.
Sun Yunfeng, Zhai Hongchen, Yang Xiaoping, et al. Application of Fourier CGH Digital Watermarking Technique in Color Image Forgery-Prevention Printing[J]. Journal of Optoelectronics & Laser, 2008, 19(7): 952-955.
- [10] 肖颖喆, 王娟娟. 抗打印/扫描数字水印技术的研究进展[J]. 包装学报, 2012, 4(3): 49-53.
Xiao Yingzhe, Wang Juanjuan. Research Progress of Print-Scan Resistant Digital Watermarking Technology[J]. Packaging Journal, 2012, 4(3): 49-53.
- [11] Chang H T, Tsan C L. Image Watermarking by Use of Digital Holography Embedded in the Discrete-Cosine-Transform Domain[J]. Applied Optics, 2005, 44(29): 6211-6219.
- [12] 尉迟亮, 顾济华, 刘薇, 等. 基于数字全息及离散余弦变换的图像数字水印技术[J]. 光学学报, 2006, 26(3): 355-361.
Yuchi Liang, Gu Jihua, Liu Wei, et al. An Image Digital Watermarking Technique Based on Digital Holography and Discrete Cosine Transform[J]. Acta Optica Sinica, 2006, 26(3): 355-361.
- [13] 赵雅晶, 钟金钢. 全数字全息术在图像信息隐藏中的应用[J]. 光学技术, 2005, 31(6): 854-857.
Zhao Yajing, Zhong Jingang. Application of All-Digital Holography in Digital Image Hiding[J]. Optical Technique, 2005, 31(6): 854-857.
- [14] 唐雪婷, 潘伟. 一种基于数字水印的印刷品防伪方法[J]. 福州大学学报: 自然科学版, 2008, 36(增刊1): 17-20.
Tang Xueting, Pan Wei. A Forgery Detection Method in Printed Materials Based on Digital Watermarking[J]. Journal of Fuzhou University: Natural Science Edition, 2008, 36(S1): 17-20.
- [15] 王敏. 基于数字全息图像的鲁棒数字水印技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.
Wang Min. The Research on Robust Digital Watermarking Technology Based on Digital Hologram[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011.
- [16] 杨涛, 徐建锋, 杨国光, 等. 基于数字全息和离散余弦变换的数字水印技术[J]. 光电工程, 2009, 36(12): 91-96.
Yang Tao, Xu Jianfeng, Yang Guoguang, et al. Digital Watermarking Technique Based on Digital Holography and Discrete Cosine Transform[J]. Opto-Electronic Engineering, 2009, 36(12): 91-96.
- [17] Okman O E, Akar G B. Quantization Index Modulation-Based Image Watermarking Using Digital Holography[J]. Journal of the Optical Society of America, 2007, 24(1): 243-252.
- [18] Li Jianzhong. Robust Image Watermarking Scheme Against Geometric Attacks Using a Computer-Generated Hologram [J]. Applied Optics, 2010, 49(32): 6302-6312.
- [19] Lee Mn-Ta, Hsuan T Chang, Wang Mu-Liang. Image Watermarking Using Phase-Shifting Digital Holography Embedded in the Wavelet Domain[C]//2009 Fifth International Conference on Information Assurance and Security. Xi'an: IEEE Computer Society, 2009: 37-40.
- [20] 吴建华, 王铮. 基于数字全息和块能量分析的水印算法[J]. 计算机工程与应用, 2010, 46(7): 118-120.
Wu Jianhua, Wang Zheng. Watermarking Algorithm Based on Digital Holography and Block Energy Analysis[J]. Computer Engineering and Applications, 2010, 46(7): 118-120.
- [21] Xie Yong, Feng Qiqin, Shan Wuyang, et al. A Fresnel Hologram Watermarking Scheme for Halftone Image[C]//ICTMF. USA: IERI, 2012: 256-262.
- [22] Xie Yong, Shan Wuyang, Cao Xiaolong, et al. Analysis and Comparison of Holographic and Traditional Digital Image Watermarking in DWT Domain[C]//ICCSE. Melbourne: IEEE Computer Society, 2012: 790-793.

(责任编辑: 徐海燕)