全息数字水印的相关检测研究

张雷洪[1]，孙刘杰[1]，马秀华[2]，郑继红[1]，秦 海[1]，刘 真[1]
(1.上海理工大学，上海 200093；2.中国科学院上海光学精密机械研究所，上海 201800)

摘要：通过 MATLAB 软件对全息水印的 Vander Lugt 相关检测进行了仿真，结果表明光学相关检测能够提取出载体图像中的原始水印信息，原始水印和其共轭像位置输出相关峰不受提取图像对比度的影响。对含全息数字水印图像进行了嵌入强度、位压缩、剪切、嵌入白噪声的相关实验，结果表明：相关峰均大于 3，能够提取出原始水印相关峰信息，可以用于版权保护；同时验证了全息水印具有较强的抗低通滤波、噪声、剪切性能，具有较好的鲁棒性。

关键词：Vander Lugt 相关检测；傅里叶变换；频谱面
中图分类号：TS853^{+}.6　**文献标识码**：A　**文章编号**：1001-3563(2011)15-0113-05

Study of Correlation Detection of Holographic Watermark

ZHANG Lei-hong[1]，*SUN Liu-jie*[1]，*MA Xiu-hua*[2]，*ZHENG Ji-hong*[1]，*QIN Hai*[1]，*LIU Zhen*[1]
(1. University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 2. Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Shanghai 201800, China)

Abstract: The Vander Lugt correlation detection of holographic watermark was simulated by MATLAB software. The original watermark information was obtained from the carrier image by correlation detection. The correlation peak was also obtained and appeared in the position of the original watermark image and the conjugated image without effect by the contrast gradient of the extraction image. The optical correlation detection was set up and used to detect the original watermark information. The correlation peak was obtained from the carrier images distorted by noise added, JPEG compression, part occluded, and low pass filter. The results showed that the correlation peak is bigger than 3; holographic watermark can extract correlation peak of original watermarked image and can be used in copyright protection. It was proved that holographic watermark has strong resistance to low pass filter, noise, and cutting; it has good robustness.

Key words: Vander Lugt correlation detection; Fourier transform; spectrum plane

全息技术生成的干涉图像可以记录光强和相位信息，生成的全息图是实值函数图像，因此人们广泛地使用全息数字水印来实现版权保护和认证。文献[1－21]对全息数字水印的生成和提取认证进行了研究，提出了数字水印的检测方法，文献[1－16]通过模拟实验验证了其可行性。由于直接提取的原始全息数字水印包含有其共轭像，加上提取过程中随机噪声的干扰，提取的原始水印对比度较差，有时很难辨别出原始水印的信息。针对以上情况，文献[16－17]通过联合相关检测法和 Vander Lugt 相关器法对数字水印进行了相关输出检测。由于在检测过程中 4f 检测系统存在像素对不准的问题，文献只给出了一个粗糙的结果。笔者针对以上研究的不足，简化 Vander Lugt 相关检测方法，对全息数字水印进行相关峰检测，检测原始水印图像的信息。全息水印相关检测克服了噪声、对比度对提取原始水印信息的影响，增强了全息数字水印检测的可靠性，为版权认证提供了一个可靠的光学认证方法。

收稿日期：2011-05-31
基金项目：上海理工大学博士启动费(1D-11-309-001)；上海市 085 工程项目资助；上海市教委重点课程(1K-11-309-001)；上海理工大学核心课程(1K-00-309-007)
作者简介：张雷洪(1981－)，男，江苏泰兴人，博士，上海理工大学讲师，主要从事数字水印研究。

1 全息水印 Vander Lugt 相关检测原理

设目标图像为 $i(x,y)$，则其傅里叶变换频谱为 $I(f_x,f_y)=F\{i(x,y)\}$，匹配滤波器为目标图像频谱的复共轭 $I^*(f_x,f_y)$。将待识别的图像 $g(x,y)$放置在 4f 系统的输入面上，将匹配滤波器放置在 4f 系统频谱面上，则频谱面上的频谱为 $G(f_x,f_y)I^*(f_x,f_y)$，其中 $G(f_x,f_y)=F\{g(x,y)\}$。在 4f 系统输出平面上能得到的图像为：

$$o(x',y')=F^{-1}\{G(f_x,f_y)I^*(f_x,f_y)\}=i(x',y')\otimes g(x',y')$$

其中：$F^{-1}(*)$为傅里叶逆变换；符号⊗表示卷积运算。如果待识别图像中含有目标图像信息，则在输出图像的相应位置会产生相关输出[17]。

设原始水印图像定义为 $g_{mark}(x,y)$，经过一个随机相位模板的调制后的图像表示为 $g_0(x,y)=g_{mark}(x,y)\exp[i\phi(x,y)]$，生成的全息水印通过计算其功率谱滤除常数项后为：

$$H(\xi,\eta)=G_{mark}{}^*(\xi,\eta)R(\xi,\eta)+G_{mark}(\xi,\eta)R^*(\xi,\eta)$$

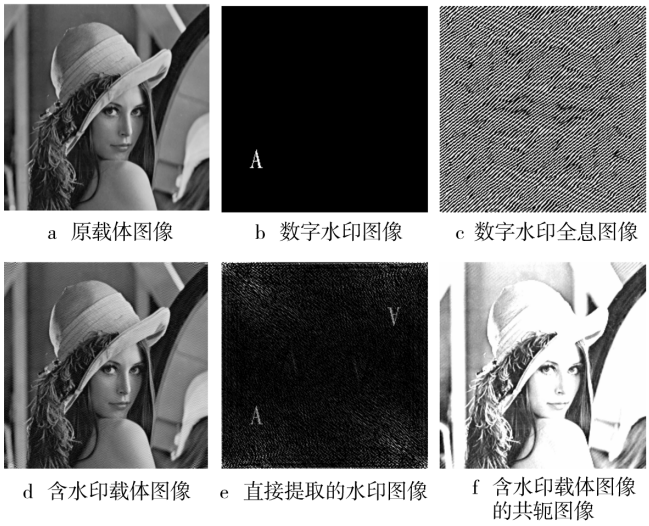
式中二维相位 $\phi(x,y)$是由高斯随机数决定的。将 $H(\xi,\eta)$的复共轭 $H^*(\xi,\eta)$作为目标匹配滤波器，将 $g_0(x,y)$作为待识别的图像放在输入平面上。则 4f 系统频谱面上的图像为 $H^*(\xi,\eta)\cdot F\{g_{mark}(x,y)\}$。4f 系统输出面上的图像为：

$$F^{-1}\{H^*(\xi,\eta)\cdot F\{g_0(x,y)\}\}=F^{-1}\{H^*(\xi,\eta)\}\otimes\{g_0(x,y)\}=g_0{}^*(x-a,x-b)\otimes g_0(x,y)+g_0(-x-a,-x-b)\otimes g_0(x,y) \quad (1)$$

由式(1)可知，在 4f 系统输出面上的(a,b)，$(-a,-b)$位置会形成相关峰输出，同样也是直接提取的原始水印图像和其共轭像出现的位置。如果把式(1)中全息水印图像的共轭 $H^*(\xi,\eta)$替换为含有全息水印的载体图像 $K(x,y)$的共轭 $K^*(x,y)$，则在 4f 系统输出面上的(a,b)，$(-a,-b)$同样会形成相关峰输出。其中 $K(x,y)=\alpha H(x,y)+C(x,y)$，$C(x,y)$为载体图像，$H(x,y)$为全息水印图像，$\alpha$ 为嵌入水印强度。采用相关检测可以获取载体图像中的原始水印信息，减少噪声的干扰。

2 Vander Lugt 相关器检测方法仿真研究

全息水印的 Vander Lugt 相关检测算法可以通过 MATLAB 软件进行仿真。首先对原始水印图像 $f(x,y)$进行 $\phi(x,y)$调制后生成其全息图像；按嵌入系数 α，对载体图像 $C(x,y)$和原始水印的全息图进行叠加求和，生成含全息水印的载体图像 $K(x,y)$，见图 1d。对含有全息水印的载体图像求其共轭图像 $K^*(x,y)$，见图 1f，作为匹配滤波器。



a 原载体图像　b 数字水印图像　c 数字水印全息图像

d 含水印载体图像　e 直接提取的水印图像　f 含水印载体图像的共轭图像

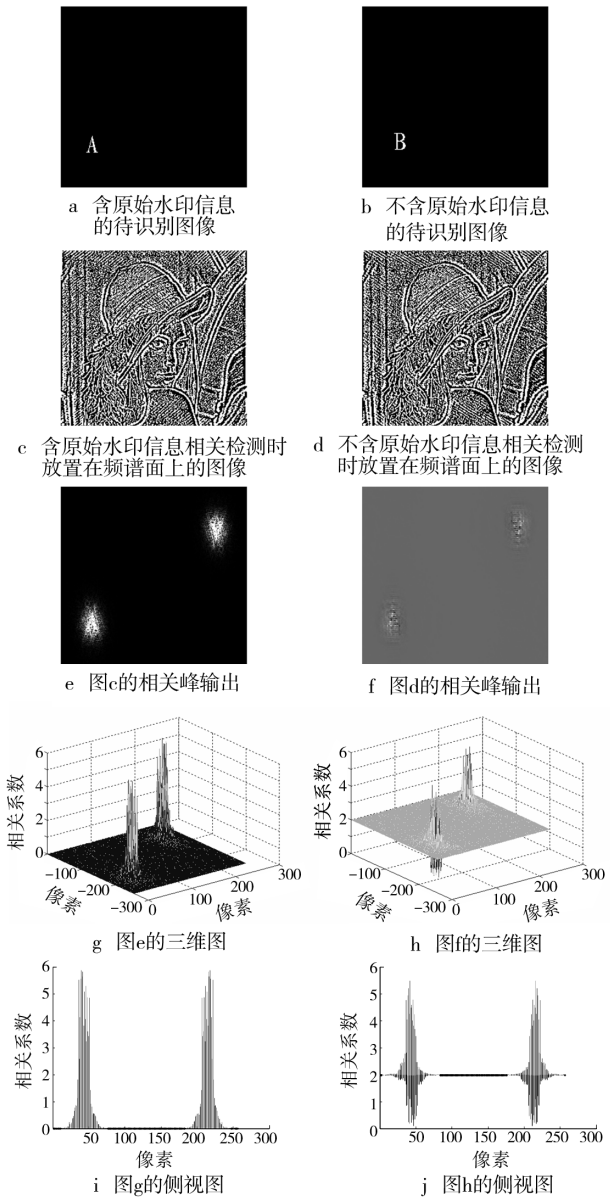
图 1 全息水印图像

Fig. 1 Holographic watermarked image

全息水印 Vander Lugt 相关器检测过程如下：对嵌入全息水印后的载体图像的共轭图像 $K^*(x,y)$进行滤波处理；滤波处理后对载体图像与原始水印图像的傅里叶变换的乘积(见图 2c)进行傅里叶逆变换，就可以得到原始水印图像的相关输出峰，见图 2g。输出图像相关峰的位置就是载体图像中含有原始水印图像和其共轭图像的位置，见图 2e。分别采用含原始水印和不含原始水印的待识别图像进行计算机仿真，其中待识别图像中含水印信息位置相同。

由图 1 和 2 可见：将含原始水印信息图 2b 作为待识别图像，将其傅里叶变换与含全息水印的载体图像的共轭图像(图 1f)的乘积(见图 2c)，放置在 4f 系统的频谱面上，经过一个傅里叶逆变换后也会得到一个相关峰输出，且输出峰值较高。相关峰输出位置为原始水印图像与其共轭像的位置。

将不含原始水印信息图 2b 作为待识别图像，将其傅里叶变换与含全息水印的载体图像的共轭图像(图 1f)的乘积(见图 2d)，放置在 4f 系统的频谱面上，经过一个傅里叶逆变换后也会得到一个相关峰输出。相关峰输出位置为原始水印图像与其共轭像的位置。



a 含原始水印信息的待识别图像　b 不含原始水印信息的待识别图像

c 含原始水印信息相关检测时放置在频谱面上的图像　d 不含原始水印信息相关检测时放置在频谱面上的图像

e 图c的相关峰输出　f 图d的相关峰输出

g 图e的三维图　h 图f的三维图

i 图g的侧视图　j 图h的侧视图

图 2　全息水印相关检测提取结果

Fig. 2 Extraction results of correlation detection of holographic watermark

由于不含原始水印信息的待识别图像与全息水印图像没有相关项，所以输出相关峰的峰值较小。

3　Vander Lugt 相关器检测方法实验研究

由于 Vander Lugt 相关器检测的 4f 系统中，待识别图像的傅里叶变换与作为匹配滤波器的共轭图像存在像素对不准，以及白噪声问题，文献[1]中的实验结果有很大的不确定性。采用计算模拟得出的待识别图像的傅里叶变换与作为匹配滤波器的共轭图像的乘积，直接进行光学傅里叶逆变换，得到 Vander Lugt 相关器检测的相关输出。通过实验来验证相关检测方法的可行性和全息数字水印的鲁棒性。

采用氦氖激光器，波长 632.8 nm；傅里叶变换透镜，焦距 300 mm，口径 50.8 mm；宽带分光棱镜；AVT 数字摄像机，像素 1628×1236，14fps，1/1.8" CCD，Gige/1394 接口；德国 HOLOEYE 公司生产的空间光调制器 LC2002 SLM(spatial light modulator)，中间面积为 26.6 mm×20.0 mm，分辨率为 800×600 等，按搭建光学相关检测系统，见图 3。

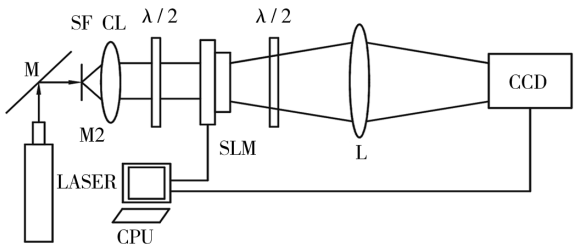


图 3　光学相关检测系统

Fig. 3 Optical correlation detection system

3.1　实验研究

实验步骤如下：(1)按图 3 组建实验系统，调整光阑，使出射光成为光斑直径大于 30 mm 的平行光束；(2)连接 SLM 和 CCD 到计算机系统，将 SLM、透镜 L 和 CCD 同轴安放在光路上，并使 SLM 和 CCD 分别位于透镜的前后频谱面上；(3)将滤波处理后的含全息水印载体图像与待识别图像的傅里叶变换相乘的结果(图 2c，d)显示在 SLM 上，调整 SLM 和 CCD 相关参数，就可以得到相关峰输出图像。实验结果见图 4。

由图 4 可见：含全息水印载体图像与待识别图像的傅里叶变换的乘积经过一个傅里叶逆变换后，就得到相关输出图像(见图 4a，b)。相关峰输出位置为直接提取的原始水印图像与其共轭像的位置，实验与仿真结果相符。如果将不含原始水印的待识别图像(图 2b)的傅里叶变换与载体图像的共轭图像(图 1f)的乘积(图 2d)，放置在 4f 系统的频谱面上，经过一个傅里叶变换后也会得到一个相关峰输出，输出位置，与将含原始水印的待识别图像(图 2a)作为待识别图像得到的相关峰输出位置相当，但是其与全息水印图像没有相关项，相关峰较小，实验与仿真结果相符。采用光学相关检测系统能够检测出原始水印信息，较计算

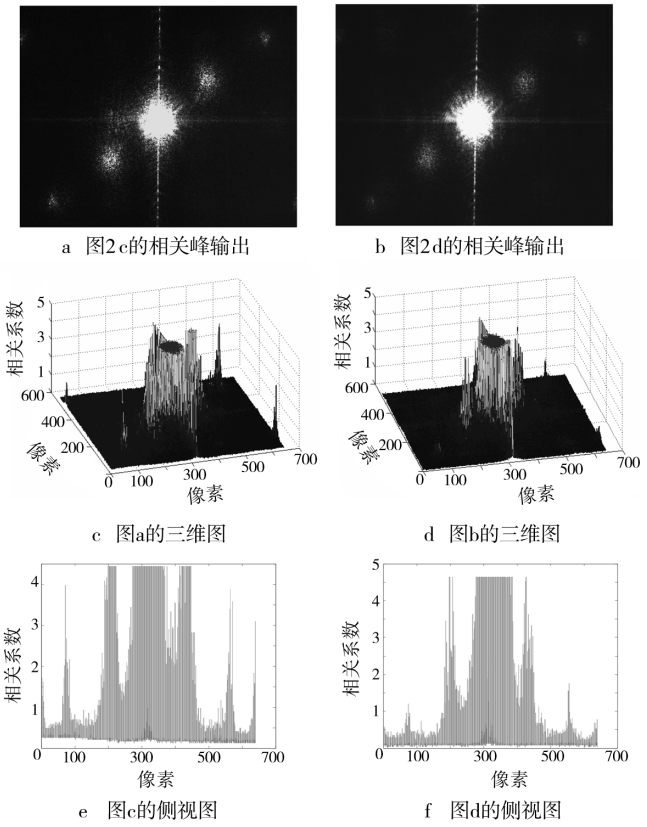


图 4 相关检测实验输出结果

Fig. 4 Output of correlation detection experiment

模拟系统具有并行性和快捷性。

3.2 鲁棒性检验

3.2.1 全息数字水印嵌入强度系数变化

改变嵌入系数 α，得到嵌入加密水印强度不同的含全息水印载体图像，分别与待识别图像的傅里叶变换的乘积图相乘后，送入光学 Vander Lugt 相关器系统，得出相关输出图像。提取其相关峰的峰值，见图 5。

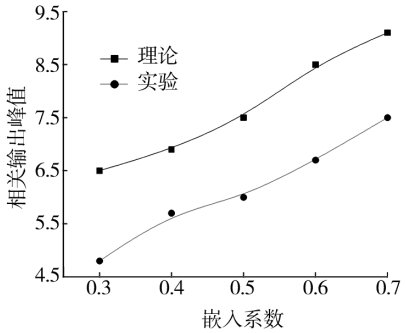


图 5 不同嵌入强度下的相关输出峰值

Fig. 5 The correlation output peak in different embedded coefficient

可见，随着嵌入系数的增大，载体图像中嵌入水印的信息增大，实验得出的相关峰的峰值增大。由于光学系统的非线性以及光学元器件的精度影响，同时实验过程中引入了噪声，实验得出的相关输出峰值较计算模拟得出的相关峰的峰值小。实验结果表明，全息水印在嵌入强度较低的条件下，仍能检测出水印信息，具有较强的鲁棒性。

3.2.2 添加白噪声

在嵌入系数为 0.3 的含全息水印载体图像中，添加 0.05～0.15 强度的随机白噪声，分别与待识别图像的傅里叶变换的乘积图相乘后，送入光学 Vander Lugt 相关器系统，得出相关输出图像。提取其相关峰的峰值，见图 6。

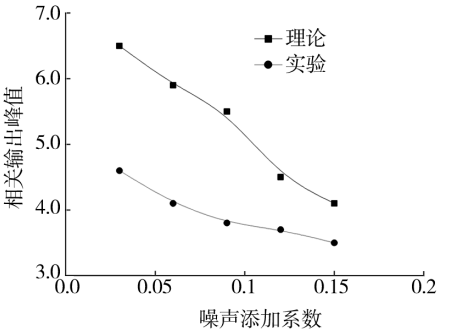


图 6 不同噪声条件下的相关输出峰值

Fig. 6 The correlation output peak in different noise

可见，随着随机白噪声强度的增大，实验得出的相关峰的峰值减小。在添加强度为 0.15 时，相关峰值输出仍然较强，添加随机白噪声后的含水印图像仍能准确地提取出相关峰值输出。可见，该全息水印对添加的随机噪声具有较强的鲁棒性。

3.2.3 部分剪切

将嵌入系数为 0.3 的含全息水印载体图像剪切掉其中心的大部分，对剩余部分图像分别与待识别图像的傅里叶变换的乘积图相乘后，送入光学 Vander Lugt 相关器系统，得出相关输出图像。提取其相关峰的峰值，见图 7。可见随着剪切面积的增大，实验得出的相关峰的峰值减小。在剩余面积为 25% 时，得出的相关峰的峰值较小，仍能准确提取出相关峰输出，证明全息水印的嵌入对剪切攻击具有较强的鲁棒性。

3.2.4 位压缩

将嵌入系数为 0.3 的含全息水印载体图像进行有损质量压缩，分别与待识别图像的傅里叶变换的乘积图相乘后，送入光学 Vander Lugt 相关器系统，得

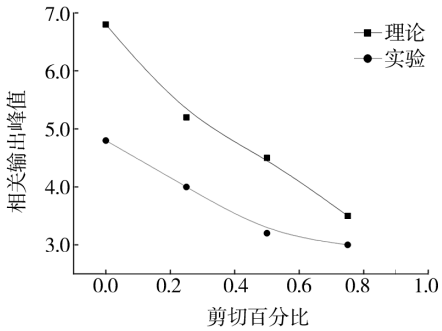


图 7　不同剪切条件下的相关输出峰值

Fig. 7 The correlation output peak in different cutting condition

出相关输出图像。提取其相关峰的峰值，见图 8。可

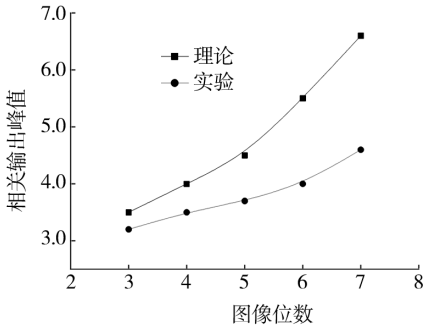


图 8　不同位压缩下的相关输出峰值

Fig. 8 The correlation output peak in different JPEG compression

见随着图像位数的减小，实验得出的相关峰的峰值在减小。在位数为 3 时，得出的相关峰的峰值较小，仍能准确地提取出相关峰值输出图像，证明全息水印的嵌入对位压缩具有较强的鲁棒性。

3.2.5　加密水印其余鲁棒性能实验

通过 Photoshop 画笔对将嵌入系数为 0.3 的含全息水印载体图像严重涂鸦污染后进行相关峰检测，峰值为 3.5。对嵌入系数为 0.3 的含全息水印载体图像进行高斯低通滤波，滤波器阶数 $N=2$，截止频率 $D_0=50$，其峰值为 3.75。可见，经过涂鸦和滤波后全息水印仍能获得相关输出。

4　总结

全息水印 Vander Lugt 光学相关检测能够提取出载体图像中的原始水印信息，在原始水印和其共轭像位置输出相关峰。对于不含原始水印的待识别图像，输出相关峰较小。从不同嵌入强度、位压缩、剪切、嵌入白噪声的含全息水印的载体图像中，光学相关检测系统仍能检测出原始水印的相关峰。光学相关检测系统的实验证明了全息水印具有较强的抗低通滤波、噪声、剪切性能，具有较好的鲁棒性，可以进行版权保护。

参考文献：

[1] JAVIDI B, NOMURA T. Securing Information by Use of Digital Holography[J]. Opt Lett, 2000, 25(1): 28－30.

[2] NISHCHAL N K, JOSEPH J, SINGH K. Fully Phase Encryption Using Digital Holography [J]. Opt Eng, 2004, 43(12): 2959－2966.

[3] XU L, PENG X, GUO Z, et al. Imaging Analysis of Digital Holography[J]. Opt Express, 2005, 13(7): 2444－2452.

[4] TAKAI N, MIFUNE Y. Digital Watermarking by a Holographic Technique[J]. Appl Opt, 2002, 41(5): 865－873.

[5] KISHK S, JAVIDI B. 3D Watermarking by a 3D Hidden Object[J]. Opt Express, 2003, 11(8): 874－888.

[6] KISHK S, JAVIDI B. Information Hiding Technique with Double Phase Encoding[J]. Appl Opt, 2002, 41(26): 5462－5470.

[7] 彭翔，张鹏，牛憨笨. 虚拟光学信息隐藏理论及并行硬件实现[J]. 光学学报，2004，24(5)：623－627.

[8] NOMURA T, OKAZAKI A, KAMEDA M, et al. Image Reconstruction from Compressed Encrypted Digital Hologram[J]. Opt Eng, 2005, 44(7): 075801－075807.

[9] KIM H, KIM D H, LEE Y H. Encryption of Digital Hologram of 3-D Object by Virtual Optics [J]. Opt Express, 2004, 12(20): 4912－4921.

[10] CHENG C J, LIN L C. Correlation-based Watermarking by a Digital Holographic Technique[J]. Opt Eng, 2005, 44(1): 010501-1.

[11] ABOOKASIS D, MONTAL O, ABRAMSON O, et al. Watermarks Encypted in a Concealogram and Deciphered by a Modified Joint-transform Correlator [J]. App Opt, 2005, 44(15): 1－5.

[12] KIM H, LEE Y H. Optical Watermarking of Digital Hologram of 3-D Object[J]. Opt Express, 2005, 13(8): 2881－2886.

（下转第 135 页）

[3] 卫延斌,史仪凯,康晓兵.胶印机输墨系统计算机控制与设计[J].包装工程,2006,27(3):27－29.
[4] 王英.油墨密度于墨键开合度关系的研究[J].中国印刷与包装研究,2010(10):34－36.
[5] 卢军.数字式油墨预置系统——DIPS [J].印刷杂志,2008(6):23－25.
[6] 李伟.浅谈印刷机墨层厚度的在线监测[J].印刷技术,2007(30):22－24.
[7] 杜艳君,张逸新.经典色彩呈色模型[J].包装工程,2006,27(2):99－101.
[8] HERSCH R. Deducing Ink Thickness Variations by a Spectral Prediction Model[J]. Color Research and Application,2009,34(6):432－442.
[9] 刘真.基于 Calabro-Mercatucci 模型的 CCD 在线检测印刷墨量的研究[J].中国印刷与包装研究,2010(5):34－36.
[10] 张海燕.电容测微在印刷机墨层厚度在线监测中的应用[J].仪表技术与传感器,2008(9):44－37.

(上接第 117 页)

[13] KISHK S,JAVIDI B. 3D Watermarking by a 3D Hidden Object[J]. Opt Express, 2003,11(8):874－888.
[14] FRANEL Y,CASTRO A,NAUGHTON T J,et al. Security Analysis of Optical Encryption[J]. Proc of SPIE,2005,5986:
[15] Van DROOGENBROECK M,BENEDETT R. Techniques for a Selective Encryption of Uncompressed and Compressed Images[J]. In ACIVS'02, Ghent, Belgium, Proceedings of Advanced Concepts for Intelligent Vision Systems,2002:90－97.
[16] CHENG C J,LIN L C. Correlation-based Watermarking by a Digital Holographic Technique[J]. Opt Eng,2005,44(1):1.
[17] 林睿,常鸿森,李榕.光学图像识别相关器的 MATLAB 仿真[J].华南师范大学学报,2004,4(11):70－73.
[18] 黄军.基于离散余弦变换域的数字水印研究[J].包装工程,2010,31(13):108.
[19] 丁盈盈,刘真.3 种频域数字水印算法的分析和比较[J].包装工程,2011,32(5):103.
[20] 黄惠芬.分形与小波相结合的鲁棒性数字水印算法[J].包装工程,2010,31(11):31.
[21] 王灿才.基于空间域 LSB 数字水印的鲁棒性研究[J].包装工程,2009,30(3):76.

(上接第 126 页)

3　结语

JDF 仍处于不断的发展和完善阶段,标准的定义中仍存在一些定义漏洞。基于 JDF 规范 1.4a 版本对印刷质量检测相关内容进行添加,并介绍了在这种情况下保证 JDF 文档有效性和兼容性的方法。

参考文献:

[1] 薛延学,张二虎,吴学毅.基于计算机视觉的印刷包装品缺陷检测系统[J].包装工程,2004,25(5):64－66.
[2] 鲁继文,张二虎,段刚龙.基于图像处理的印品质量在线检测[J].印刷杂志,2005(2):49－51.
[3] 罗如柏,赵金娟,周世生.基于 XML 的 JDF 在印刷工业中的应用研究[J].包装工程,2006,27(6):163－165.
[4] 司军锋,张玥.印刷质量在线检测技术的诠释与探讨[J]印刷质量与标准化,2006(2):9－13.
[5] 罗如柏,赵金娟,周世生.基于 XML 的 JDF 在印刷工业中的应用研究[J].包装工程,2006,27(6):163－165.
[6] 周世生,罗如柏,赵金娟.印刷数字化与 JDF 技术[M].北京:印刷工业出版社,2008.
[7] CIP4. JDF Specification Release 1.4a[EB/OL]. (2009-12-17). http://www.cip4.org/docu－ments/jdf－specifications/JDF1.4a.pdf.
[8] 周生炳,宋浩,肖伟.XML 从入门到精通[M].北京:电子工业出版社,2002.
[9] 贾素玲,王强,姚琪琳.XML 技术应用[M].北京:清华大学出版社,2007.