

一种抗任意角度旋转的全息水印算法

徐逸¹, 孙刘杰¹, 王勇¹, 龚一珉¹
(上海理工大学, 上海 200093)

摘要: **目的** 针对目前数字水印在抗旋转攻击方面鲁棒性较差等问题, 提出一种基于 DWT 变换和仿射变换的抗任意角度旋转的数字全息水印算法。**方法** 首先对数字水印进行全息加密, 保证水印的安全性; 结合 DWT 变换, 将水印信息嵌入载体图像; 然后通过仿射变换实现图像的角度校正, 进而实现抗任意角度旋转攻击及其他常见攻击。**结果** 水印在受到各种攻击后, 仍能被有效提取, 尤其是抗任意角度旋转攻击, NC 值均大于 0.6。**结论** 提出的算法对任意角度旋转攻击有较强的鲁棒性, 可以有效地从含水印的图像中提取水印信息, 保证了水印的安全性和有效性。

关键词: 全息水印; DWT 变换; 仿射变换; 旋转攻击

中图分类号: TS801.3; TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2017)17-0183-05

An Anti-Arbitrary-Angle-Rotation Holographic Watermarking Algorithm

XU Yi¹, SUN Liu-jie¹, WANG Yong¹, GONG Yi-min¹
(Shanghai University for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

ABSTRACT: The work aims to propose a digital anti-arbitrary-angle-rotation holographic watermarking algorithm based on DWT transform and affine transformation, with respect to the poor robustness of the current digital watermarking in anti-rotation attack. Firstly, the encrypted hologram of the digital watermarking was done to ensure the watermark security. In combination with DWT transform, the watermark information was embedded in the carrier image. Then, the image angle was rectified based on the affine transformation, thus achieving the anti-arbitrary-angle-rotation attacks and other common attacks. After various attacks, especially the anti-arbitrary-angle-rotation attack, the watermark could still be effectively extracted. The NC value was greater than 0.6. The proposed algorithm is robust against the arbitrary angle rotation attack, and the watermark information can be effectively extracted from the watermarked image, which ensures the security and effectiveness of the watermark.

KEY WORDS: holographic watermark; DWT transform; affine transformation; rotation attack

随着信息技术的快速发展, 信息系统所面临的各种安全威胁也是日益突出, 信息安全问题已经成为涉及经济、政治、文教等诸多领域的战略安全问题^[1-2]。从1996年, 英国剑桥牛顿研究所召开第一届国际信息隐藏学术研讨会开始, 许多学者对数字水印技术进行了多方面的研究, 如水印的加密方式, 水印的嵌入提取方式, 水印的鲁棒性等, 并取得了很大的进展。如2002年Nobukatsu Takai等首次提出傅里叶全息加密方式, 对水印进行加密^[3], 直到2007年孙等对该算法

进行了改进, 提高了水印的加密性和鲁棒性^[4-6]。

对于水印鲁棒性方面, 旋转是较为常见的攻击, 学者们进行了各方面的尝试, 如基于不变域的傅里叶梅林变换^[7], 在坐标转换的过程中, 会丢失一定的数据影响水印图像的质量; 基于特征点的 SIFT 算法^[8]精确度取决于提取的特征点, 然而当大角度旋转攻击时其特征点数量和精确度降低, 影响水印的提取。近年来包观笑等^[9]提出的基于 SSIM 结构相似性指数的抗旋转水印技术, 解决了 SIFT 算法抗大角度旋转攻

收稿日期: 2017-3-13

基金项目: 上海理工大学科技发展项目 (16KJFZ017); 上海市教委科研创新重点项目 (13ZZ111)

作者简介: 徐逸 (1993—), 女, 上海理工大学硕士生, 主攻图像处理、数字水印和印刷防伪技术。

通讯作者: 孙刘杰 (1965—), 男, 博士, 上海理工大学教授、硕导, 主要研究方向为图像处理和数字水印。

击,但其计算量大,且水印提取效果欠佳。仿射变换作为一种基本的几何变换,大部分被用于交通标志检测、织物图像配准等^[10-12]。也有学者,如刘志军等^[13-14],将该技术作为水印置乱加密的一种方式,运用到数字水印中。文中在他们的研究基础上,将仿射变换运用于二维图像抗旋转中,结合DWT变换,对数字全息水印的抗旋转鲁棒性进行进一步的研究,提出一种能够抗任意角度旋转攻击的数字全息水印技术。

1 全息水印的生成与重建

数字水印必须具备一定的安全性,全息水印自身带有一定的不可破解性,现采用双随机相位调制方法加密,使得全息水印安全性更好,在没有密钥的情况下,盗版者无法破解或者去除加密全息水印。

设待加密的水印为 $f(x,y)$, 大小为 $M \times N$, (x,y) 为空域坐标, (ξ,η) 为频域坐标, $p(x,y)$, $b(\xi,\eta)$ 分别为在 $[0,1]$ 间均匀分布的独立白噪声的随机图像,通过双随机相位加密后,加密的图像 $\Phi(x,y)$ 为:

$$\phi(x,y) = \{f(x,y) \exp[j2\pi p(x,y)]\} \otimes h(x,y) \quad (1)$$

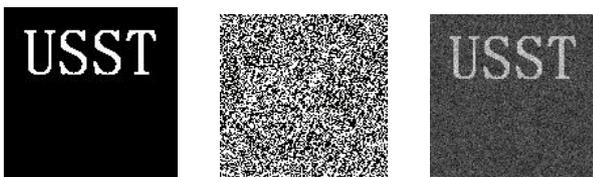
式中: $h(x,y)$ 为 $C(x,y)=\exp[j2\pi b(\xi,\eta)]$ 的脉冲响应; \otimes 为卷积的运算符号。 $\Phi(x,y)$ 是一个复数,无法作为水印信息直接叠加到载体图像中,因此将傅里叶全息技术与双随机相位加密技术相结合,对原始水印进行加密生成全息加密水印,数学表达式为:

$$I_E(\xi,\eta) = \{[F(\xi,\eta) \otimes A(\xi,\eta)]B(\xi,\eta)\}^2 + \{R(\xi,\eta)\}^2 + \{[F(\xi,\eta) \otimes A(\xi,\eta)]B(\xi,\eta)\}R^*(\xi,\eta) + \{[F(\xi,\eta) \otimes A(\xi,\eta)]B(\xi,\eta)\}^*R(\xi,\eta) \quad (2)$$

式中: $F(\xi,\eta)$ 和 $A(\xi,\eta)$ 为式(1)中 $f(x,y)$ 与 $p(x,y)$ 的傅里叶变换坐标; * 为共轭; 式(2)中等式右方前两项通过计算参考光与双随机相位加密调制的物光功率谱去除,转换为加密傅里叶全息图 $I'_E(\xi,\eta)$ 表达式为:

$$I'_E(\xi,\eta) = \{[F(\xi,\eta) \otimes A(\xi,\eta)]B(\xi,\eta)\}R^*(\xi,\eta) + \{[F(\xi,\eta) \otimes A(\xi,\eta)]B(\xi,\eta)\}^*R(\xi,\eta) \quad (3)$$

水印的重建过程就是加密的逆过程,即首先将加密后的图像 $I'_E(\xi,\eta)$ 傅里叶变换后,用相位值 $-b$ 进行随机调制,也就是乘以 $\exp[-j2\pi b(\xi,\eta)]$; 接着傅里叶反变换,用相位值 $-p$ 进行随机调制,也就是乘以 $\exp[-j\pi p(\xi,\eta)]$,即得到原始的图像 $f(x,y)$ 。仿真实验见图 1。



a 原始二值水印 b 加密全息水印 c 重建的水印信息

图 1 加解密全息水印仿真结果

Fig.1 Simulation results of encryption and decryption

从图 1 可以看出经过解密,得到的水印图像已经能够清楚地看见版权信息,若要进一步得到更加清晰的水印图像,可以再对重建水印进行处理,如归一化、二值化等。

2 二维离散小波变换

二维离散小波变换(DWT)^[15-16]在每个层次上,把图像分解为4幅图像,产生水平细节系数 H_j 、垂直细节系数 V_j 、对角细节系数 D_j 这3个高频带系数和一个低频带系数 A_j 。其中低频带表示由小波变换分解级数决定的最大尺度、最小分辨率下对原始图像的最佳逼近。其统计特征和原图像相似,图像的大部分能量集中在此。高频带系列则分别是图像在不同尺度、不同分辨率下的细节信息。分辨率越低,其中有用信息的比例就越高。二维离散小波变换对图像的分解过程见图2。

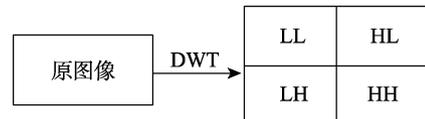


图 2 二维离散小波变换对图像的分解
Fig.2 Image decomposition by 2D DWT

文中对载体图像进行二级小波分解。由于含水印图像大多是面向打印扫描的,在打印扫描过程中,图像细节部分极易丢失,因此实验选择在载体图像二级小波分解后的低频系数中嵌入水印,从而提高水印的鲁棒性。

3 基于仿射变换的旋转校正

仿射变换是一种常见的图像几何变换。在计算机图像处理中主要可用于图像配准、图像增强、图像恢复等方面。在二维图形中共线的点经过仿射变换仍然是共线的点;平行直线仍然是平行直线;两平行线段的比值保持不变^[17]。实验利用仿射变换的这三大性质对图像进行旋转校正。

根据仿射变换的代数定义,图像的几何变换可以用向量 $a(x,y)$ 和 $a'(x',y')$ 之间的关系表示,表达式为:

$$\begin{cases} x' = a_{11}x + a_{12}y + a_{13} \\ y' = a_{21}x + a_{22}y + a_{23} \end{cases}, \text{ 且 } \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{vmatrix} \neq 0 \quad (4)$$

将式(4)表示的仿射变换用矩阵乘法来实现:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

则矩阵 $M = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \end{bmatrix}$ 即为仿射矩阵。下面分2种情况讨论,分别是以原点为中心的旋转和以任

意一点为中心的旋转。

以原点为中心逆时针旋转 θ 弧度的旋转可以通过

过矩阵 $M = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \end{bmatrix}$ 。则式(5)可转换为：

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = M \times \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

以二维平面上任意一点 (x_0, y_0) 为中心点逆时针旋转 θ 弧度，其仿射变换矩阵 M 可以表示为

$$M = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & x_0(1 - \cos \theta) + y_0 \sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta & y_0(1 - \cos \theta) - x_0 \sin \theta \end{bmatrix}$$

同理可得：

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & x_0(1 - \cos \theta) + y_0 \sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta & y_0(1 - \cos \theta) - x_0 \sin \theta \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

在已知原始图像的向量坐标 (x, y) 和待校正图像的向量坐标 (x', y') 的前提下，可求出校正角度 θ 。由于仿射变换的计算过程只是进行简单的代数运算，并不会对计算结果造成影响。通过逆旋转将待校正图像还原，然后进行水印提取。如果坐标足够精确，则所求校正角度也越精确。

4 实验仿真

4.1 实验设计

文中宿主图像采用像素大小为 512×512 的 RGB 图像。水印为二值图像，像素大小为 128×128 ，见图 3a, b。数字水印的嵌入和提取过程见图 4。仿真实验环境为 Matlab7.10.0 (R2010a)。

首先对数字水印图像进行双随机相位全息加密，得到加密后的全息水印图像。接着对宿主图像进行分



图 3 水印嵌入与提取仿真

Fig.3 The simulation of watermark embedding and extraction

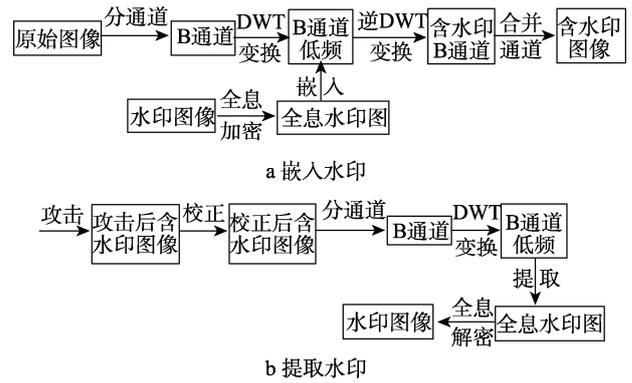


图 4 水印嵌入与提取流程

Fig.4 The flow chart of watermark embedding and extraction

通道处理。对于 R, G, B 三原色，人眼对绿色最敏感，对蓝色最不敏感，因此将水印信息嵌在 B 通道的 DWT 低频域中，得到含水印图像，见图 3c。未受攻击提取得到的水印图像见图 3d。

接着对含水印图像进行任意角度旋转攻击。以 5° 的旋转攻击为例，攻击后的含水印图像见图 5a。为提取水印，实验在 Matlab 操作环境下选择配准点见图 6。其中左边为待校正的含水印图像，右边为参考图像。配准点采用手工交互的形式选择，选择时要相对分散，尽量不要集中在某个区域，且数量要恰当，不宜过多或过少，过多则影响校正速度，过少则影响配准精度，一般选择 5 对配准点为宜。此时得到一组向量为 $a(107.75, 287.5)$ 和 $a'(131.75, 278.5)$ ，带入仿射变换式(6)，计算得到 θ 为 4.76° ，误差仅为 0.24° 。然后将图像逆旋转 θ 角进行角度校正，校正后的图像为图 5b，最后从校正后的图像中提取水印，为提高提取水印的质量，对水印进行二值化，中值滤波等处理，最终得到水印图像 5c，从中可以明显看到 USST 的水印信息。



图 5 旋转校正及水印提取

Fig.5 The image of rotation correction and watermark extraction

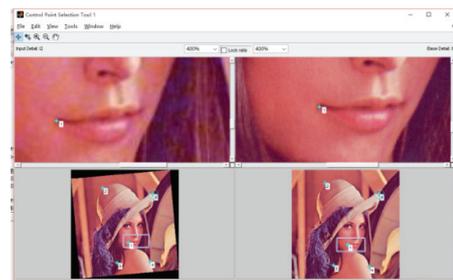


图 6 Matlab 操作环境下图像校正

Fig.6 Image correction under Matlab operating environment

4.2 实验结果与分析

4.2.1 抗旋转攻击实验

为评价水印算法的优劣,文中除了采用主观评价法,还采用峰值信噪比即PSNR值来评价嵌入水印的不可见性,用相似度即NC值来评价提取水印的效果。对含水印图像进行小角度和大角度的旋转攻击,并与文献[18]和文献[19]进行比较。仿真实验中,为尽量减小旋转攻击造成的物理影响,采用双三次插值法,最精确的插补图像。水印的嵌入强度均为0.8,在此嵌入强度下,水印具有较好的不可见性,未受到攻击时,PSNR值达到64.7426,同时又能保证水印具有一定的鲁棒性。图像旋转校正后的部分水印提取图像见图7。

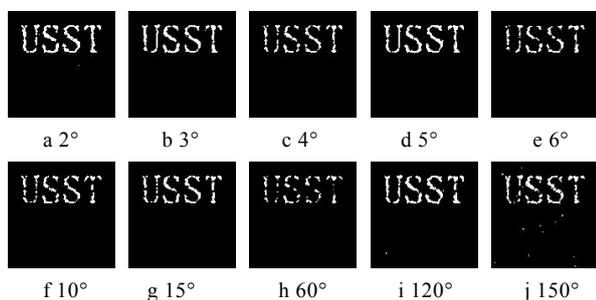


图7 各角度旋转校正后水印提取

Fig.7 Extracted watermark image of all angle corrected image

采用主观评价法,可以明显看出水印的提取效果良好。无论是小角度旋转攻击还是大角度的旋转攻击,提取的水印效果图辨识度都很高且具有一定的稳定性。具体实验数据见表1。

表1 实验数据

Tab.1 The experimental data

旋转攻击角度/(°)	NC 值		
	文献[18]	文献[19]	文中算法
5	0.51	0.7	0.8211
10	0.46	0.67	0.7583
15	0.41	0.62	0.7932
60	—	0.56	0.6287
120	—	0.55	0.8167
150	—	0.57	0.7427

首先与相关文献进行对比。采用文中提出的算法,所提取得到的水印NC值基本在0.7以上,比文献[18]提高约一半,并且文献[18]所提出的算法无法抗大角度的旋转,当旋转攻击达到15°时,提出的水印效果已很差。文献[19]算法能够从大小角度旋转攻击后的图像中提取得到水印信息,但是所提出的水印效果较差,NC值在0.6左右,并且旋转角度越大,提出的水印效果越差。相较于文献[19]的算法,文中算法所提取的水印NC值基本在0.7以上,具有很高的相似

性,能够有效地抗任意角度攻击。然后对不同旋转角度的实验结果进行分析。根据仿射变换的特性,只要选择的配准点足够精确和具有代表性,所计算得到的角度就越精确,从而提出的水印效果越好。从数据来看,5°的旋转攻击与120°的旋转攻击后,提取得到的水印效果差别不大。

4.2.2 抗其他攻击实验

为进一步验证该算法的有效性和鲁棒性,对含水印图像进行加噪、压缩、剪切等常见的攻击处理,得到的实验数据见表2。表2数据说明,提出的算法对于载体图像的质量总体较好,水印具有良好的不可见性。当含水印图像在遭到噪声、压缩、剪切、等常见攻击以及组合攻击时,仍然能有效提取水印,且提取得到的水印NC值在0.85左右,鲁棒性良好,因此,文中提出的数字全息水印算法不仅能够有效地抗任意角度旋转攻击,还能够抵抗其他常见攻击,具有良好的安全性和鲁棒性。

表2 其他攻击实验结果

Tab.2 Experimental results of other watermarking attacks

攻击方式	PNSR 值	NC 值
guassian0.02	39.2804	0.9524
guassian0.03	35.8441	0.9357
salt&pepper0.02	49.0082	0.9692
salt&pepper0.03	45.4854	0.9602
JPEG 压缩 40	66.4405	0.8517
JPEG 压缩 50	65.7217	0.827
剪切 1/8	38.9076	0.7598
剪切 1/4	32.7044	0.6909
组合 guassian&JPEG 压缩	46.5402	0.9214
组合 salt&pepper &JPEG 压缩	61.1402	0.8556

5 结语

针对水印的鲁棒性提出了一种能够抗任意角度旋转攻击的数字全息水印算法。结合双随机相位全息加密技术、DWT 和仿射变换,通过 Matlab 仿真实验,说明了文中算法的有效性。实验结果表明,文中算法在保持水印不可见性良好的情况下,可以有效抵抗常见的水印攻击,尤其是抗旋转攻击,鲁棒性良好,能够起到较好的版权保护作用,且算法校正精度高,性能稳定,有利于后续水印技术在打印扫描等实际应用中的研究。

参考文献:

[1] 陈奇明,钮心忻,杨义先. 数字水印的研究进展和应用[J]. 通信学报, 2001, 22(5):71—79.
CHEN Qi-ming, NIU Xin-xin, YANG Yi-xian. The

- Research Developments and Applications of Digital Watermarking[J]. Journal of China Institute of Communications, 2001, 22(5): 71—79.
- [2] 尹浩, 林闯, 邱峰. 数字水印技术综述[J]. 计算机研究与发展, 2005, 42(7): 1093—1099.
YIN Hao, LIN Chuang, QIU Feng. A Survey of Digital Watermarking[J]. Journal of Computer Research and Development, 2005, 42(7): 1093—1099.
- [3] NOBUKATSU T, MIFUNE Y. Digital Watermarking by a Holographic Technique[J]. Applied Optics, 2002, 41(5): 885—873.
- [4] 孙刘杰, 庄松林. 加密同轴全息水印技术[J]. 光学精密工程, 2007, 15(1): 132—136.
SUN Liu-jie, ZHUANG Song-lin. Digital Watermark of Encrypted In-line Holography[J]. Optics and Precision Engineering, 2007, 15(1): 132—136.
- [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(10): 622—626.
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(10): 622—626.
- [6] WANG Shuo-zhong, HUANG Su-juan, ZHANG Xin-peng, et al. Hologram-based Watermarking Capable of Surviving Print-scan Process[J]. Opt Technol, 2011, 49(7): 176—178.
- [7] 龚冬梅, 顾济华. 基于QR码的抗几何攻击数字全息水印[J]. 包装工程, 2015, 36(9): 124—129.
GONG Dong-mei, GU Ji-hua. Holographic Digital Watermarking Algorithm Against Geometric Attacks[J]. Packaging Engineering, 2015, 36(9): 124—129.
- [8] 汪祖辉, 孙刘杰, 蒋哲薇, 等. 一种抗几何攻击的小波域水印算法[J]. 包装工程, 2015, 36(21): 102—108.
WANG Zu-hui, SUN Liu-jie, JIANG Ze-wei, et al. A Watermarking Algorithm Against Geometric Attack in DWT Domain[J]. Packaging Engineering, 2015, 36(21): 102—108.
- [9] 包观笑, 孙刘杰. 自适应尺度还原的抗旋转全息水印技术[J]. 光电子激光, 2015, 26(7): 1336—1341.
BAO Guan-xiao, SUN Liu-jie. Anti-rotation Holographic Watermarking Technology Based on Adaptive Scale Reduction[J]. Journal of Optoelectronics Laser, 2015, 26(7): 1336—1341.
- [10] 左丹丹, 刘鑫, 朱双东. 仿射变换在交通标志检测中的应用[J]. 宁波大学学报, 2011, 24(2): 42—45.
ZUO Dan-dan, LIU Xin, ZHU Shuang-dong. The Application of Affine Transformation in the Traffic Signs[J]. Journal of Ningbo University, 2011, 24(2): 42—45.
- [11] XUE Z, SHEN D G, TEOH E K. An Efficient Fuzzy Algorithm for Aligning Shapes under Affine Transformation[J]. Pattern Recognition, 2001, 34(6): 1171—1180.
- [12] 张彪, 邹哲, 陈书界, 等. 基于仿射变换与 Levenberg-Marquardt 算法的织物图像配准[J]. 光学学报, 2017, 37(1): 1—9.
ZHANG Biao, ZOU Zhe, CHEN Shu-jie, et al. Fabric Image Registration Based on Affine Transform and Levenberg-Marquardt Algorithm[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(1): 1—9.
- [13] 李银华, 叶瑞松. 一种基于仿射变换的图像置乱预处理的水印算法[J]. 汕头大学学报, 2014, 29(1): 9—16.
LI Yin-hua, YE Rui-song. A Watermarking Scheme Based on Image Shuffling Pre-processing Using Affine Transformation[J]. Journal of Shantou University, 2014, 29(1): 9—16.
- [14] 刘志军. 基于复合混沌与仿射变换的彩色图像加密算法[J]. 山东大学学报, 2016, 46(4): 1—8.
LIU Zhi-jun. Color Image Encryption Algorithm Based on Complex Chaos and Affine Transform[J]. Journal of Shandong University, 2016, 46(4): 1—8.
- [15] 刘真, 丁盈盈. 一种优化的基于DWT的抗打印扫描的数字水印算法[J]. 包装工程, 2011, 32(11): 93—99.
LIU Zhen, DING Ying-ying. An Optimized and DWT-Based Printing and Scanning Resistant Watermark Algorithm[J]. Packaging Engineering, 2011, 32(11): 93—99.
- [16] KUMAR V, KUMAR R D. Digital Image Steganography Based on Combination of DCT and DWT[J]. Communications in Computer and Information Sciences, Information and Communication Technologies, Part 3, 2010, 34(101): 596—601.
- [17] 张召悦, 魏孝强. 基于SIFT和仿射变换的航空器起飞图像跟踪方法[J]. 航空计算机技术, 2016, 46(1): 82—89.
ZHANG Zhao-yue, WEI Xiao-qiang. Aircraft Takeoff Image Tracking Method Based on SIFT Algorithm and Affine Transform Model[J]. Aeronautical Computing Technique, 2016, 46(1): 82—89.
- [18] 李振宏, 吴慧中. 基于DWT及方向可控金字塔变换的抗几何攻击水印[J]. 中国图像图形学报, 2010, 15(2): 212—219.
LI Zhen-hong, WU Hui-zhong. Geometrically Robust Image Watermark Based on DWT and Steerable Pyramid[J]. Journal of Image and Graphics, 2010, 15(2): 212—219.
- [19] 包观笑, 孙刘杰. 抗任意旋转攻击的数字水印防伪技术[J]. 光电子激光, 2015, 26(1): 156—161.
BAO Guan-xiao, SUN Liu-jie. Digital Watermarking Technology Against Arbitrary Rotation Attack[J]. Journal of Optoelectronics Laser, 2015, 26(1): 156—161.