

文章编号:1001-9081(2010)03-0702-03

## 基于图像特征点的数字水印算法

刘晶,王映辉,何文娟

(西安理工大学 计算机科学与工程学院,西安 710048)

(liujing@xaut.edu.cn)

**摘要:**几何攻击作用在加载有水印的图像上,水印同步信息被破坏,导致水印检测失败。为了恢复已失去的同步信息,提出一种基于筛选尺度不变特征估计几何攻击参数的数字水印算法。首先提取图像的尺度不变特征,利用像素差的平方和筛选尺度不变特征,去除易受几何攻击影响的尺度不变特征,保证最小二乘法迭代运算快速收敛,迭代一次就能得到基本准确的几何变换参量;水印信息进行游程编码,在其码值对应的载体图像的DCT块内嵌入。实验结果表明,该算法能获得很好的图像质量,且能十分有效地抵抗各种几何攻击。

**关键词:**尺度不变特征变换;特征点匹配;像素差平方和;最小二乘法;游程编码;几何攻击

**中图分类号:** TP309 **文献标志码:** A

## Digital watermarking algorithm based on image feature point

LIU Jing, WANG Ying-hui, HE Wen-juan

(Faculty of Computer Science and Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an Shaanxi 710048, China)

**Abstract:** It might fail to detect watermarking now that geometric attacks perform on a watermarked image and destroy the synchronization of the watermark signals embedded in the image. To restore the lost synchronism, a novel method to estimate the geometric operation using sifted Scale-Invariant Feature Transform (SIFT) was proposed. According to Sum of Squared Differences (SSD) of the pixels, the suitable feature points were refined to ensure robustness of the least-squares solution. The least squares iterative was convergent quickly, and the one step iteration would be able to get high accuracy geometric parameters; encoding binary watermark image by using Run-Length Code (RLC), watermarking was done by altering the coefficients of the DCT blocks corresponding to the value of RLC. The simulation results show that the proposed scheme achieves good image quality and it is robust to geometric attacks.

**Key words:** Scale-Invariant Feature Transform (SIFT); feature points matching; Sum of Squared Differences (SSD); least-squares solution; Run-Length Code (RLC); geometric attack

### 0 引言

起初,数字水印技术主要研究水印对加噪、压缩和滤波等一般图像处理的鲁棒性,水印信息嵌入的区域并非载体图像的重要视觉区域,这是第一代水印算法的思想<sup>[1-2]</sup>。文献[3]首先提出了第二代数字水印的概念,基本思想是利用图像自身的稳定特征来定位水印的嵌入位置。第二代水印增强了数字水印对几何攻击(旋转、平移、剪切)的抵抗能力。图像的稳定特征可以是抽象的,也可以是语义上有意义的,如图像的边缘、边角点、纹理区域,或者是图像中具有一定特征的部分。稳定特征在水印处理过程中有两种作用:1)作为检测水印的参考位置和方向;2)其灰度值或变换系数携带水印信息。目前大多数算法基于第一种方式,这时,水印区域是以稳定特征为中心的区域,或者由稳定特征唯一确定的区域。该区域的形状可以是正方形、圆形或者三角形等。文献[4-5]利用多尺度 Harris 检测算子从载体图像中提取出稳定的特征点,然后根据特征尺度自适应确定水印区域。文献[6-7]提出将水印信息嵌入到由 SIFT 特征点构造的三角形表征和圆形表征的区域。

大量实验表明,这类算法带来的问题是:1)水印信息在特征点周围嵌入,会对原始特征点的属性产生严重影响;2)攻击类型及攻击强度不同,图像提取的特征点不尽相同,

原特征点消失,新特征点出现,还有些特征点发生位置偏移,消失或偏移的特征点使水印区域不能很好匹配,而新特征点对水印提取造成干扰;3)为了弥补上述缺陷,算法通常在多个特征点周围区域重复嵌入同一水印信息,理论上,能明显改善水印的鲁棒性,但是,特征点的数目、分布密度及水印信息容量对该方法的可行性造成威胁。

综上所述,笔者认为可以由特征点来估计出图像的几何攻击参数(旋转、缩放、平移),并由此对图像进行逆变换使其与原始状态相同;水印信息嵌入则应该和这些特征点分离,为的是确保特征点不受水印影响,只随几何攻击变化而不同。因此,本文关注的是如何通过特征点得到准确的几何变换矩阵参量,即得到水印同步信息。为了剔除位置偏移大的特征点,即位置发生偏移的特征点不参与几何变换参数的计算过程,提出用特征窗的像素差平方和进行特征点筛选;然后,利用最小二乘法对剩下的特征点进行迭代,求解几何变换方程。同时,出于特征点自身鲁棒性考虑,文中用尺度不变特征变换(Scale-Invariant Feature Transform, SIFT)变换来提取特征点。

### 1 特征点的提取和匹配

#### 1.1 特征点的提取

SIFT 由 Lowe 于 2004 年提出<sup>[8]</sup>。目前,它是计算机视觉中非常重要和有效的一种匹配算法,具有旋转和比例尺度不

收稿日期:2009-09-27;修回日期:2009-11-12。

**作者简介:**刘晶(1973-),女,辽宁朝阳人,博士研究生,主要研究方向:图像处理、数字水印;王映辉(1967-),男,甘肃庄浪人,教授,博士生导师,主要研究方向:图形与图像处理、三维建模;何文娟(1973-),女,陕西西安人,讲师,主要研究方向:计算机网络安全。

变性等特点,匹配可靠性非常高。如图1所示,将原始图像与不同尺度的高斯函数卷积,得到图像的尺度空间。将尺度空间中相邻的图像相减,便得到高斯差(Difference of Gaussians, DoG)图像。将 DoG 图像中的每一点与其周围的 8 个点以及相邻的上下尺度图像中对应位置的 9 个点进行比较,若均大于或均小于这 26 个点,则确定为兴趣特征点;给每个兴趣特征点分配 8 个方向向量信息,使其具备旋转不变性;为了增强匹配的鲁棒性,对每个特征点使用  $4 \times 4$  共 16 个像素来描述,这样对于一个特征点就可以产生 128 个数据,形成 128 维的 SIFT 特征向量。当两幅图像的 SIFT 特征向量生成后,一般采用兴趣点特征向量的欧式距离来作为两幅图像中兴趣点的相似性度量。取图像 1 中的某个兴趣点,并找出其与图像 2 中欧式距离最近的前两个兴趣点,在这两个兴趣点中,如果最近的距离除以次近的距离少于某个比例阈值,则接受这一对匹配点。实验研究表明:比例阈值选取不同, SIFT 匹配点数目不同,匹配点对的稳定性也不一样。实际中,为了保证 SIFT 匹配点数目,比例阈值取值往往不能过低,而大的比例阈值使稳定性差位置发生偏移的特征点也匹配成对。如何去除这些兴趣点,使它不参与几何矩阵的估算,是本文下面要讲述的内容。

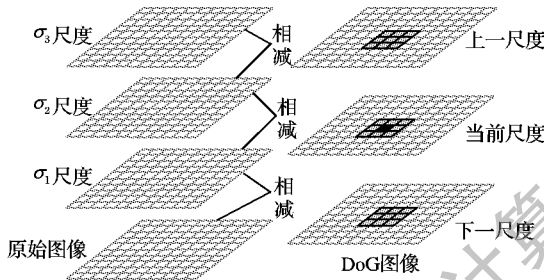


图1 图像的尺度空间与高斯差(DoG)图像

## 1.2 特征点筛选

在载体图像和水印化图像中,以每个特征点为中心,开辟一个  $5 \times 5$  的窗  $\omega$  作为特征匹配对象,称作特征窗。求特征窗内最小像素差的平方和(Sum of Squared Differences, SSD):

$$SSD_{\min} = \sum_{\omega} [I_k - I_0]^2 \quad (1)$$

其中:  $I_0$  和  $I_k$  分别代表载体图像和水印化图像对应特征窗内的像素亮度值。

展开式(1):

$$SSD_{\min} = \sum_{\omega} I_0^2 - \sum_{\omega} I_0 I_k + \sum_{\omega} I_k^2 \quad (2)$$

式(2)右边第一项和第三项分别表示特征窗内的总能量,是一个常数。第二项是两个特征窗的互相关,随特征窗不同而改变。因此可以用下列相关函数作为相似度测度:

$$\rho_{0,k} = \frac{\sum_{\omega} I_0 \times I_k}{\sqrt{\sum_{\omega} I_0^2} \sqrt{\sum_{\omega} I_k^2}} \quad (3)$$

其中:  $0 < \rho_{0,k} < 1$ 。  $\rho$  值接近 1,说明匹配的特征点相对载体图像的特征点无位置变化。将所有特征点的  $\rho$  值从大到小排序,取  $\rho$  值接近 1 的前  $n$  个特征点来计算变换矩阵  $T$ 。需要说明的是,  $\rho$  值计算,目的是考查载体图像的一个特征点和水印化图像中某个特定的特征点的相似性,计算过程中并没有将载体图像某个特征点和水印化图像中所有的特征点进行相似比较,这和图像识别中的相关法匹配是不同的。因此,本文给出的判断两个特征点相似性计算远没有图像识别的相关法匹配复杂。

## 1.3 求解几何变换参数

图像的平移、旋转和缩放都属于仿射变换,设载体图像中的像素用齐次坐标  $[x, y, 1]$  表示,水印化图像中的像素用  $[x', y', 1]$  表示,则几何变换  $T$  用式(4)表示:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b & e \\ c & d & f \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

求解式(4)至少需要 3 组特征点。要保证解的稳定性,应该有 7 组<sup>[9]</sup> 以上的特征点。式(4)可写为:

$$B = T \times A \quad (5)$$

列向量  $B, A$  分别为水印化图像和载体图像中特征点的齐次坐标,当匹配特征点的数量取  $n$ ,式(5)对应方程的个数应为  $2n$  个。实际上,匹配的特征点即使正确,它们的位置一般也有偏差,所以式(5)不存在精确解,只能求它的广义解。用最小二乘法,将水印化图像  $B_i$  与利用式(5)计算值求差取平方和最小作为“优化判据”。令:

$$f(t) = \sum_{i=0}^{2n-1} \left( b_i - \sum_{j=0}^2 t_{ij} a_{ij} \right)^2 \quad (6)$$

当  $f(t)$  最小时,可用函数  $f(t)$  对矩阵  $T$  中的 6 个系数( $a, b, c, \dots$ )求偏导数,令这 6 个偏导数等于零,得到关于  $a, b, c$  等 6 个为未知数的方程组,解方程组得到几何变换矩阵  $T$ 。

为了判断几何变换矩阵  $T$  的好坏,求相关系数  $R$ :

$$R_j = \frac{\left[ \sum_{i=0}^{n-1} A_{i,j} B_{i,j} - n \left( \sum_{i=0}^{n-1} \frac{A_{i,j}}{n} \right) \left( \sum_{i=0}^{n-1} \frac{B_{i,j}}{n} \right) \right]}{\sqrt{\left[ \sum_{i=0}^{n-1} A_{i,j}^2 - n \left( \sum_{i=0}^{n-1} \frac{A_{i,j}}{n} \right)^2 \right] \left[ \sum_{i=0}^{n-1} B_{i,j}^2 - n \left( \sum_{i=0}^{n-1} \frac{B_{i,j}}{n} \right)^2 \right]}} \quad (7)$$

其中:  $n$  为匹配特征点的数量;下标  $i$  表示第  $i$  个匹配点;  $j$  表示匹配点的  $x(j=0)$  或  $y(j=1)$  分量。  $R$  数值接近 1,说明矩阵  $T$  中的参数合格;否则,将解  $T$  代入式(4),删除误差较大的匹配点,重复上述过程直至解  $T$  使相关系数符合要求。解出几何变换参量便可对图像进行逆变换,从而恢复图像原来状态。

## 2 水印方案的设计

上面叙述中,主要讨论了通过稳定的特征点如何求得图像的几何变换参量,下面针对一个二值水印,说明在一个恢复的图像中如何定位水印信息。在文中,载体图像进行  $4 \times 4$  分块离散余弦变换(Discrete Cosine Transform, DCT),对二值水印图像进行游程编码处理,即将二值水印图像用一系列黑或白像素游程的长度来表示,对所有 DCT 块依次编号,在一个编号等于游程编码值的 DCT 块中,修改块中的中频系数,每个系数的修改量按照式(8)以人类视觉不可察觉为前提进行。

$$I'(i,j) = I(i,j) + w \times W(i,j) \quad (8)$$

其中:  $I(i,j), I'(i,j)$  分别表示载体图像  $I$  和水印化图像  $I'$  在坐标  $(i,j)$  处的 DCT 系数;  $w$  表示水印嵌入强度的控制参数;  $W(i,j)$  表示水印数据。为确保水印鲁棒, DCT 块的连续 3 个中频系数嵌入同一信息。水印检测和提取过程中,先对检测图像作 SIFT,得到 SIFT 特征点,按照上述内容进行特征点筛选和求解几何变换矩阵参量,继而对检测图像实施校正。校正后的图像通过 DCT 变换得到 DCT 块,然后,比较二值水印游程编码值对应的 DCT 块,如果检测图像 DCT 的中频系数大于原图中频系数,说明该 DCT 块嵌有水印。在没有任何攻击下,二值水印的游程码值可以使水印定位很精确,且不需要额外存储空间,对信号的常规处理(压缩、滤波、加噪)表现出很

强的鲁棒性;遭受平移、旋转和缩放等几何攻击后,用本文方法成功校正检测图像,那么提取出的水印信息与原始水印信息进行相似值计算,结果都在0.70以上。

### 3 实验仿真

为验证本文算法的可行性,从三个方面来做实验:1)改变SIFT比例阈值和几何攻击类型,研究SIFT特征点的变化;2)用本文方法筛选SIFT特征点,计算几何矩阵参数,校正图像;3)对图像实施攻击,检测本文水印方案的有效性。从图2(b)和图2(c)可以看出:在旋转角度不同,SIFT的比例阈值相同情况下,SIFT特征点的数目、分布密度及位置是不同的;而图2(b)和图2(d)说明攻击类型相同,SIFT的比例阈值选取不同,SIFT特征点的数目、分布情况还是不同。这个实验说明水印信息嵌入在以这些特征点为标志的区域内是不可靠的,特征点一旦消失,该特征点周围的水印就无法检测。实验



图2 比例阈值与攻击类型对SIFT特征点的影响

表1 几何参数的估算

| 几何参数 | 旋转 20°   |          | 旋转 10°   |          | 缩放 0.8 |         | 缩放 0.5 |         |
|------|----------|----------|----------|----------|--------|---------|--------|---------|
|      | 理论值      | 计算值      | 理论值      | 计算值      | 理论值    | 计算值     | 理论值    | 计算值     |
| $a$  | 0.9397   | 0.9411   | 0.9848   | 0.9854   | 0.8    | 0.7997  | 0.5    | 0.5017  |
| $b$  | 0.3420   | 0.3542   | 0.1736   | 0.1723   | 0      | 0       | 0      | -0.0003 |
| $c$  | -0.3420  | -0.3277  | -0.1736  | -0.1756  | 0      | 0.0003  | 0      | 0.0002  |
| $d$  | 0.9397   | 0.9193   | 0.9848   | 0.9975   | 0.8    | 0.8010  | 0.5    | 0.4992  |
| $e$  | -36.0593 | -38.8339 | -20.2824 | -20.2527 | 0      | -0.1432 | 0      | -0.6323 |
| $f$  | 51.4979  | 52.7842  | 24.1716  | 23.8188  | 0      | -0.3334 | 0      | -0.2292 |

表2 各种几何攻击下水印检测结果  $\rho$

| 图像      | 平移   |       | 剪切     |        | 缩放     |        |        |        | 旋转     |        |        |        |
|---------|------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|         | 向上5行 | 向下10行 | 随机剪5%  | 随机剪10% | 0.3    | 0.5    | 0.8    | 3      | 1.8°   | 3°     | 10°    | 20°    |
| Lena    | 1    | 1     | 0.9874 | 0.9738 | 0.7056 | 0.8112 | 0.8983 | 0.7863 | 0.9736 | 0.9527 | 0.9138 | 0.8934 |
| Baboon  | 1    | 1     | 0.9893 | 0.9859 | 0.7151 | 0.8041 | 0.8896 | 0.7897 | 0.9832 | 0.9465 | 0.9259 | 0.8874 |
| Peppers | 1    | 1     | 0.9926 | 0.9874 | 0.7039 | 0.7968 | 0.8974 | 0.7910 | 0.9899 | 0.9621 | 0.9274 | 0.9024 |

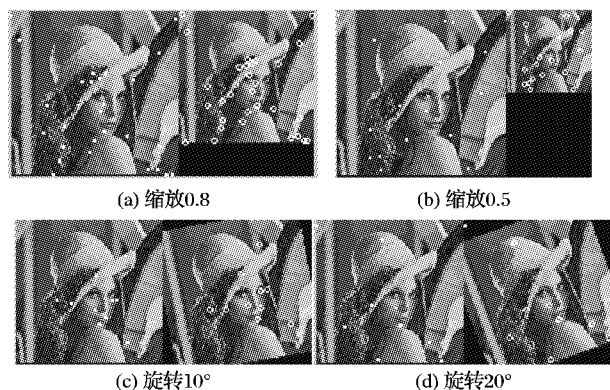


图3 几何参数估算特征点位置

### 4 结语

本文提出了一种筛选SIFT特征点恢复同步信息,水印嵌入独立于特征点的数字水印算法。由于比例阈值选取和攻击

二中,估算 $a$ 、 $b$ 、 $c$ 等6个参数,然后通过这6个参数求出原图的特征点在测试图的位置坐标。表1列出采用本文方法计算出的几何变换参数值与实际数值的对比。

图3显示出四种攻击下通过表1的参数值计算得到的特征点位置坐标。图中实心白色的标记是提取的特征点,空心白色的标记是计算的坐标值。可以看出空心白色的标记点和实心白色的标记点基本上是重合的,即实际计算值和理论分析值基本一致,说明用筛选的特征点计算出的几何变换参数非常准确。表2列出算法鲁棒性能测试结果。从表2可以看出,算法对抗平移、剪切、缩放、旋转等攻击效果较好,算法能准确无误地提取水印,水印的相似度在0.70以上。对缩放攻击,当图像放大时,能完全提取水印;当图像缩小时,由于存在信息丢失,提取水印的相似度稍低,但也能足以判断水印存在。此外,算法还能抵抗一些组合攻击,如旋转加剪切,旋转加缩放等,其整体性能较为理想。

类型都能使SIFT特征点分布发生改变,而且,将水印信息嵌入在特征点周围区域,会引起特征点本身属性改变,因此,本文提出只利用SIFT特征点来估算几何攻击参数,恢复水印同步信息;为了快速算出精度较高的仿射变换参量,文中提出用窗内像素最小误差平方和对特征点进行筛选,对筛选得到的特征点进行最小二乘法拟合,从而获得准确的几何攻击参数;水印嵌入位置由水印本身的游程编码决定,游程码值对应的DCT块中的中频系数携带水印信息。该方案的局限在于只适用于二值水印图。实验结果表明算法在保证图像质量前提下,能有效地抵抗旋转、缩放、平移和剪切等几何攻击。

#### 参考文献:

- [1] NIKOLAIDIS N, PITAS I. Robust image watermarking in the spatial domain [J]. Signal Processing, 1998, 66(3): 385-403.
- [2] KUNDUR D, HATZINAKOS D. A robust digital image watermarking method using wavelet-based fusion [C]// ISCC 2008: 2008 IEEE Symposium on Computers and Communications. Piscataway: IEEE Press, 1997: 544-547.

(下转第707页)

采用了以下几种方式进行攻击,如图2所示。

1)重新采样。重新采样分为下采样和上采样两种。其中下采样是指将音频信号由原来的44.1 kHz采样频率变为22.05 kHz,然后再将采样频率变回原来的44.1 kHz;上采样是指将音频信号由原来采样频率变为48 kHz,然后再变回原来的采样频率。

2)重量化。重量化分为下量化和上量化两种。其中下量化是指将音频的采样精度由原来的16变成8,然后再变换回原来的采样精度;上量化是指将音频的采样精度由原来的16变成32,然后再变换回原来采样精度16。

3)低通滤波。采用阶数为2,截止频率为11 025 Hz的巴特沃斯低通滤波器进行滤波。

4)幅度攻击。将音频幅度分别增大或减少40%。

5)噪声攻击。添加高斯白噪声,使得添加后的混合音频信噪比降低至20 dB。

6)MP3压缩攻击。利用CoolEdit音频软件对混合音频经

过Wav—MP3—Wav的音频格式转换。

为了对比本文算法与文献[4]、[6]、[8]、[9]中的算法,特对比提取水印的归一化系数,如表1所示。

| 水印 | 攻击方式                                |
|----|-------------------------------------|
| 北  | 原始水印                                |
| 北  | 未经过任何攻击所提取的水印                       |
| 北  | 经过下采样处理的混合音频提取出的水印                  |
| 北  | 经过上采样处理的混合音频提取出的水印                  |
| 北  | 经过下量化处理的混合音频提取出的水印                  |
| 北  | 经过上量化处理的混合音频提取出的水印                  |
| 北  | 经过低通滤波的混合音频提取出的水印                   |
| 北  | 经过幅度增加40%的混合音频提取出的水印                |
| 北  | 经过幅度减少40%的混合音频提取出的水印                |
| 北  | 经过加噪处理后混合音频提取出的水印                   |
| 北  | 混合音频经过cooledit软件进行96kps的MP3攻击后提取的水印 |
| 北  | 混合音频经过cooledit软件进行56kps的MP3攻击后提取的水印 |
| 北  | 混合音频经过cooledit软件进行32kps的MP3攻击后提取的水印 |

图2 原始水印与各种不同攻击下提取的水印对比

表1 各种算法在各种攻击后提取图片归一化系数对比

| 算法      | 直接提取 $\rho$ | 重采样    |        | 重量化    |        | 低通滤波   | 幅度攻击   |        | 噪声攻击   | MP3攻击  |                    |        |
|---------|-------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------------------|--------|
|         |             | 上      | 下      | 上      | 下      |        | +40%   | -40%   |        | 96 kps | 56 kps             | 32 kps |
| 本文算法    | 1.0000      | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | 0.9276 | 0.9467 | 1.0000 | 1.0000 | 0.9548 | 1.0000 | 1.0000             | 1.0000 |
| 文献[4]算法 | 1.0000      | 0.9069 | 0.8437 | 1.0000 | 0.9742 | 0.6524 | 未涉及    | 未涉及    | 未涉及    | 未涉及    | 未涉及                | 0.8452 |
| 文献[6]算法 | 0.9840      | 0.9840 | 0.9833 | 未涉及    | 0.9653 | 0.9792 | 未涉及    | 未涉及    | 0.9602 | 未涉及    | 0.8912             | 未涉及    |
| 文献[8]算法 | 1.0000      | 0.7843 | 0.7245 | 未涉及    | 0.6892 | 0.7465 | 未涉及    | 未涉及    | 0.8267 | 0.8624 | 0.7543<br>(64 kps) | 不能提取   |
| 文献[9]算法 | 0.8823      | 0.8820 | 0.8819 | 未涉及    | 0.6512 | 0.8611 | 未涉及    | 未涉及    | 0.7902 | 未涉及    | 未涉及                | 未涉及    |

#### 4 结语

本文充分利用复倒谱变换的性质,将LSB思想与量化思想相结合,提出了一种新的音频水印算法,算法不需要任何经验值,便于实际应用。该算法具有良好的鲁棒性,非常好的透明性,提取属于盲提取,能经受噪声、重新采样、重新量化、低通滤波和幅度攻击等多种攻击。与普通的SMM算法相比,本算法解决了阈值选取等问题,具有更好的鲁棒性。

#### 参考文献:

- [1] KWANG L S, SUNG H Y. Digital audio watermarking in the cepstrum domain [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2000, 46(3): 744-750.
- [2] XIN L, HEATHER Y H. Transparent and robust audio data hiding in cepstrum domain [C]// Proceedings of 2000 IEEE International Conference on Multimedia and Expo. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2000: 397-400.

- [3] HSIEH C T, SOU P Y. Blind cepstrum domain audio watermarking based on time energy features [C]// Proceedings of the 14th International Conference on Digital Signal Processing. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2002: 705-708.
- [4] 李跃强,孙星明,周天亮.基于复倒谱变换的数字音频水印研究[J].计算机工程,2006,32(23):145-147.
- [5] 李跃强,孙星明,侯发忠.基于复倒谱系数均值比较的数字音频水印算法[J].微计算机信息,2006,22(24):250-253.
- [6] 刘娇,费耀平,李敏.基于量化的倒谱变化数字音频水印算法[J].计算机工程与应用,2007,43(33):84-86.
- [7] 张力,钱泰斌,纪震,等.复倒谱域自适应音频盲水印技术[J].计算机工程,2007,33(4):128-131.
- [8] 吕秀丽,年桂君.基于倒谱域的鲁棒音频数字水印算法[J].大庆石油学院学报,2005,29(4):130-132.
- [9] TANG XIANG-HONG, NIU YA-MEI, YUE HENG-LI, et al. A digital audio watermark embedding algorithm [J]. International Journal of Information Technology, 2005, 11(12): 24-31.

(上接第704页)

- [3] KUTTER M, BHATTACHARJEE S K, EBRAHIMI T. Towards second generation watermarking scheme [C]// Proceedings of the 6th International Conference on Image Processing. Kobe, Japan: [s. n.], 1999: 26-58.
- [4] BAS P, CHASSERY J M, MACQ B. Geometrically invariant watermarking using feature points [J]. IEEE Transactions on Image Process, 2002, 11(9): 1014-1028.
- [5] 王向阳,侯丽敏,乌俊.基于图像特征点的强鲁棒数字水印嵌入方案[J].自动化学报,2008,34(1):1-6.
- [6] LEE H Y, LEE C H, LEE H K. Feature-based image watermarking

- method using scale-invariant keypoints [C]// PCM2005: Advances in Multimedia Information Processing, LNCS 3768. Berlin: Springer, 2005: 312-324.
- [7] LEE H Y, KIM H, LEE H K. Robust image watermarking using local invariant features [J]. Optical Engineering, 2006, 43(3): 1-10.
- [8] LOWE D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints [J]. International Journal of Computer Vision, 2004, 60(2): 91-110.
- [9] 吕冀,汪瀚,高洪民,等.图像局部特征识别中的多目标分离[J].光子学报,2008,37(8):1708-1712.