

尺度不变特征点在局部图像水印算法中的应用

余艳玮 卢正鼎 凌贺飞

(华中科技大学计算机科学与技术学院, 湖北武汉 430074)

摘要: 局部图像水印算法, 将水印以图像特征为参照点嵌入到各个局部区域中, 因此是一种抗几何攻击的有效方法。为了使得各个用于嵌水印的局部区域在水印检测过程中能准确地再现, 作为参照点的特征必须是鲁棒的。本文利用尺度不变特征点作为同步水印的参照点。为了使得参照点的分布均匀、稳定, 我们通过自适应的邻域半径来从尺度不变特征点中筛选出用于同步水印的参照点。将筛选出的特征点作为顶点生成 Delaunay 三角网, 将三角网中的每一个三角形作为一个用于嵌水印的局部区域。实验结果表明, 经过一般的信号处理攻击及旋转、缩放、裁剪和轻微的纵横比改变等几何攻击后, 用于嵌水印的局部区域的局部区域大多能准确地再现, 利用尺度不变特征点来同步水印是可行的。

关键词: 数字水印; 几何攻击; 特征

Application of Scale Invariant Feature points in Localized Image Watermarking Algorithms

Yanwei Yu, Zhengding Lu, Hefei Ling

College of Computer Science and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, 430074

Abstract: As a solution to counter geometrical attacks, a localized image watermarking algorithms embed the watermark into each local regions referring to image features. To redetect the local regions for embedding the watermark in the watermark detection process, the feature as the reference should be robust. The scale invariant feature points are used as the reference to synchronize the watermark. To make the distribution of the reference even and stable, the references are selected out of the scale invariant points by using the adaptive radius of the neighbor. A Delaunay tessellation is performed on the selected points and each triangle of the tessellation are use as the region for embedding the watermark. Experimental results show that most local regions for embedding the watermark can be redetected after common signal attacks and geometrical attacks including rotation, scaling, cropping and slight aspect ratio change, and It is feasible by using the scale invariant feature points to synchronize the watermark.

Key words: digital watermarking, geometrical attacks, feature

1. 引言

鲁棒的数字水印技术已经成为数字多媒体产品的版权保护的一个有效解决办法。到目前为止, 鲁棒水印技术已经取得了很大的进展。但是, 轻微的几何攻击就能使得水印的位置失去同步, 使得以前存在的大多数的鲁棒水印算法失效, 因此, 数字水印对于几何攻击的鲁棒性问题迫切需得到解决^[1]。另外, 考虑到目前的很多应用中是不能获得原始载体图像的, 因此抗几何失真的鲁棒的盲数字水印方法是必需的。

基于特征的水印方法^[2-3], 也可称为局部数字

水印, 将水印位置与图像内容绑定在一起, 而不是与图像坐标绑定在一起, 以便水印检测能没有同步误差地被执行。局部数字水印将水印以图像的特征为参照嵌入到图像的多个局部位置, 因此有望能真正地解决抗几何攻击^[1], 尤其是抗局部几何攻击和伴随着裁减的几何攻击。

Bas et al.^[2]首先提取出图像的Harris特征点, 再利用这些特征点作为顶点生成Delaunay三角网。水印通过典型的加性方式被嵌入到三角网的每一个三角形中。但是, Harris特征点容易对于缩放变换是敏感的^[3], 因此该文中的水印算法是不抗缩放攻击的。Ji等^[4]采用分水岭法将图像进行区域分割, 然后将水印扩频嵌入到各个分割出的区

*) 基金项目: 国家自然科学基金项目 (60502024); 湖北省自然科学基金项目 (2005ABA267)。余艳玮 在读博士, 主要研究领域为数字水印、神经网络。卢正鼎 硕士, 教授, 主要研究领域为信息安全、分布异构系统集成; 凌贺飞 博士, 副教授, 主要研究领域为图像处理、数字水印。

域中。该方法理论上能抗噪声、几何攻击和JPEG压缩。但是，分水岭法普遍存在过度分割问题，因此分割得到的区域本身就不具有鲁棒性。而且，分水岭法计算复杂度过高，因此该文的方法存在应用的局限性。

从回顾中不难发现，在基于特征的局部水印方法中，用于同步水印的特征的鲁棒性对于水印系统的鲁棒性起着至关重要的作用。由于SIFT特征点已被证明对于图像旋转、缩放、平移、亮度变化不变的，对于仿射变换和噪声攻击也有一定程度的稳定性，且SIFT特征点的计算速度可达到实时性，因此本文中利用尺度不变特征点(以下简称SIFT特征点)^[5]作为同步水印的参照点。由于SIFT特征点是图像匹配应用而设计的，因此不能直接用于水印应用中。我们首先利用具有自适应半径的邻域来筛选出可用于水印同步的特征点。考虑到三角形形状本身具有仿射不变性和Delaunay三角形的优越性，本文将特征点作为顶点来生成Delaunay三角网，将三角网中的每一个三角形作为一个用于嵌水印和检测水印的局部区域，以实现水印的同步。

本文结构如下：第二节中简单介绍了SIFT特征点的基本知识；第三节中详细阐述了如何利用SIFT特征点来同步水印。第四节通过实验来验证SIFT特征点用于同步水印是可行的；最后给出结论和未来工作的展望。

2. SIFT 特征点

SIFT特征点是由Lowe^[5]提出的。SIFT特征点检测的基本思想是通过可识别尺度空间中的稳定点的分层过滤器来实现特征的检测。

首先利用高斯差分(DOG)核，生成高斯差分尺度空间 $D(x, y, \sigma)$ ：

$$D(x, y, \sigma) = (G(x, y, k\sigma) - G(x, y, \sigma)) * I(x, y) = L(x, y, k\sigma) - L(x, y, \sigma) \quad (1)$$

其中， (x, y) 是空间坐标， σ 是尺度坐标， $G(x, y, \sigma)$ 是尺度可变的高斯函数：

$$G(x, y, \sigma) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-(x^2+y^2)/2\sigma^2} \quad (2)$$

生成的高斯差分尺度(DOG)空间的一个范例如图1所示。

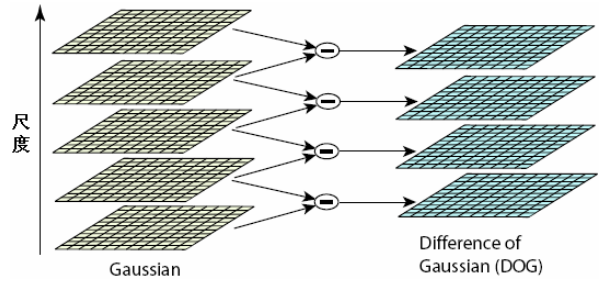


图1 DOG 尺度空间

接下来，检测尺度空间的极值点，以初步确定特征点的位置和尺度。图2为DOG尺度空间的三个相邻尺度。在检测尺度空间极值时，图中标记为叉号的像素需要和它所有的相邻像素比较，看其是否比它的图像域和尺度域的所有相邻像素大或者小，以确保该检测点在尺度空间和二维图像空间都检测到局部极值。其中，叉号的像素的相邻像素包括同一尺度的8个相邻像素和上下相邻尺度对应的 9×2 个像素，总共有26个像素。

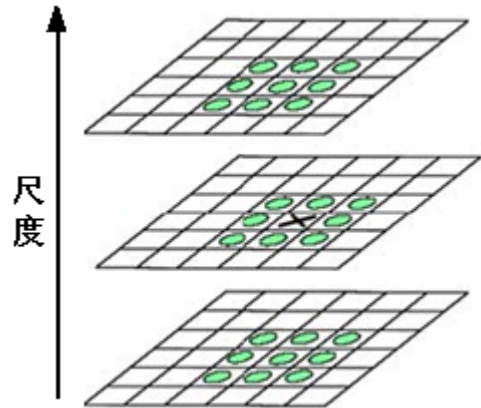


图2 DOG 尺度空间的局部极值检测

最后，通过拟和三维二次函数以精确确定特征点的位置和尺度。由于DoG算子会产生较强的边缘响应，因此还要剔除低对比度的特征点和不稳定的边缘响应点(因为DoG算子会产生较强的边缘响应)，以增强特征点的稳定性。特征点的稳定性 γ 可以利用一个 2×2 的Hessian矩阵 H 计算如下：

$$\gamma = \frac{(D_{xx} + D_{yy})^2}{D_{xx}D_{yy} - D_{xy}^2}, H = \begin{bmatrix} D_{xx} & D_{xy} \\ D_{xy} & D_{yy} \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中， D 表示尺度空间图像的导数。若 $\gamma < \frac{(e+1)^2}{e}$ ，则认为该特征点是稳定的。其中， e 表示最大特征值和最小特征值的比率，可用来控

制稳定性。通常，设置 $e=10$ 。

3. 利用 SIFT 特征点来同步水印

在局部数字水印算法中，水印被重复地嵌到各个局部区域中。用于嵌水印的局部区域在检测时是否能准确再现，将直接影响到各局部区域上水印检测的有效性。用于嵌水印的局部区域在检测时是否能准确再现的问题，本质上是作为局部区域的参照点的特征的鲁棒性。SIFT 特征点具有如下特性：1) 是图象的局部特征，对旋转、尺度缩放、平移、亮度变化保持不变性，对视角变换、仿射变换、噪声也保持一定程度的稳定性；2) 高速性：经优化的 SIFT 算法可以达到实时的要求。因此本文选择 SIFT 特征点作为同步水印的参照点。

由于三角形的形状具有仿射不变性，即，三角形经过仿射变换后，仍为三角形。又由于 Delaunay 三角形具有如下重要性质：1) Delaunay 三角网在特征点分布均匀的情况下可避免产生下塌和过小的锐角三角形，并且三角网中的任何一个三角形中不包含另一个三角形；2) 局部特性^[6]：如果三角网中一个顶点(特征点)发生变化，则只有与之相关的三角形受到影响；3) Delaunay 三角形的计算简单。因此本文将特征点作为顶点来生成 Delaunay 三角网，将三角网中的每一个三角形作为一个用于嵌水印的局部区域。

考虑到水印应用的特殊性，用于生成 Delaunay 三角网的特征点的分布密度必须稳定、适中。若相邻特征点的距离太小，则在纹理复杂区域上会遍布特征点，由此生成的 Delaunay 三角形面积太小；若相邻特征点的距离太大，则特征点的数目会很少，由此生成的 Delaunay 三角形数量太少。

为了控制特征点的分布，通常的做法是利用圆形邻域约束规则^[2]：若某特征点在其圆形邻域中取得强度最大值，则该特征点被选为同步水印的特征点。其中，圆形邻域的半径由图像的大小来控制。但是，若遭受伴随着裁减的复合攻击时，该方法将失效。

本文利用特征点的尺度信息来自适应地确定邻域半径，即：

$$r = \lambda \cdot s \quad (4)$$

其中， s 表示特征点在取得局部极值时所对应的

尺度， λ 是常量，可用来控制特征点的数量。本文的特征点的强度可用该点所对应的 DOG 函数值 D 来衡量。由于特征点的尺度 s 具有缩放不变性，因此得到的特征点的分布是缩放不变的。

4. 仿真实验

为了验证 SIFT 特征点能较好地同步水印，我们对测试图像分别进行了 Stirmark 3.1 中所包括的信号处理攻击和几何攻击。我们用重复率 R 来衡量 SIFT 特征点的性能，重复率 R 表示攻击前后的图像上相一致的区域对的数量与原始图像上的区域数量的比率。若两个区域的位置偏移不超过一个像素，特征尺度的偏差不超过 1 个单位，则认为这两个区域是一致的。我们通过将攻击后的图像的坐标逆变换到原始图像的坐标来计算水印嵌入区域的重复量。重复率 R 越大，则表明 SIFT 特征点越能较好地同步水印。

我们选择三个大小为 512×512 的标准图像(包括 Baboon, Lena 和 Pepper)作为测试图像。实验中，SIFT 算法中用到的高斯函数的尺度范围是 $[2,32]$ ；相邻尺度之间的比率为 $\sqrt{2}$ ；设置 $\lambda=15$ 。另外，实验中发现，特征尺度过小或过大时，相应的特征点不太稳定，因此在进行特征点的密度控制前，我们依据经验，从候选特征点中剔除了特征半径小于 2、大于 10 的点。

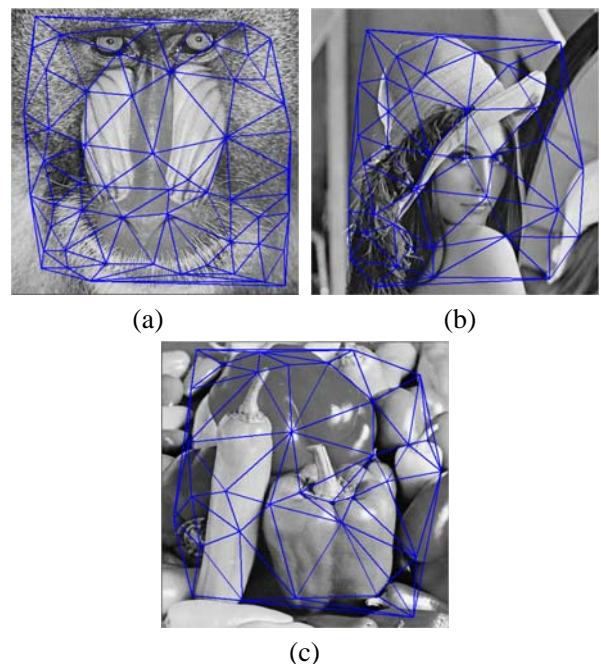


图 3 (a) Baboon 图像上的 Delaunay 网；(b) Lena 图像上的 Delaunay 网；(c) Pepper 图像上的 Delaunay 网

原始 Baboon, Lena 和 Pepper 图像上生成的 Delaunay 三角网的三角形数量分别是 101、70 和 59。原始 Baboon, Lena 和 Pepper 图像上生成的 Delaunay 三角网分别如图 3 所示。信号处理和几何攻击后的图像上生成的 Delaunay 三角网的三角形的重复率 R 分别如表格 1 和 2 所示。

Table 1. 信号处理攻击下的重复率 R

攻击	Baboon	Lena	Pepper
Median filter 2×2	13.9	15.7	20.3
Median filter 3×3	10.9	11.7	10.2
FMLR	16.8	5.7	3.4
Gaussian filter 3×3	20.8	11.4	30.5
JPEG 90	49.5	54.3	49.2
JPEG 70	32.7	35.7	44.1
JPEG 50	27.7	24.3	37.3

Table 2. 几何攻击下的重复率 R

攻击	Baboon	Lena	Pepper
Cropping 20% off	23.8	8.5	15.3
Rotation 10°	9.9	7.1	6.8
Scaling 75%	5.0	12.9	1.7
Scaling 150%	5.9	11.4	11.9
Aspect ratio change (1.10,1.00)	8.9	8.6	11.9
Aspect ratio change (1.00,1.10)	6.9	17.1	15.3

从表中数据可以看出，总地来说，图像 Baboon 的区域的重复率 R 不及图像 Lena 和 Pepper，这主要是由于图像 Baboon 的纹理性比较强。而且，当遭受轻微的纵横比改变时，仍有少量的局部区域被正确检测到。总地来说，用于同步水印的大多数不变区域对于一般的信号处理攻击和几何攻击是鲁棒的。而且，只要攻击后的图像上至少一个用于嵌有水印的局部区域被正确检测到，则可判断被检测的图像带有版权信息。因此，总地说来，SIFT 特征点用于同步水印是可行的。

5. 结论和未来展望

目前的大多数鲁棒的数字水印算法不能抵抗

几何攻击，根本原因是图像遭受几何攻击后，水印检测位置和水印嵌入位置的同步性会被破坏。局部图像水印算法，将水印以图像特征为参照点嵌入到各个局部区域中，从而水印的同步问题迎刃而解。

本文利用 SIFT 特征点来同步水印。实验数据表明，SIFT 特征点用于同步水印是可行的，由 SIFT 特征点生成的局部区域不仅对信号处理鲁棒，对于一般的几何攻击，包括裁剪、旋转、缩放、平移和轻微的纵横比改变等都具有较好的鲁棒性。下一步的工作是寻找鲁棒的大容量的水印算法，并将该算法用于各个局部区域上，实现一套完整的局部水印方案。

参考文献

- [1]G. Sharma, D. J. Coumou. Watermark Synchronization: Perspective and a New Paradigm. In Proc. 40th Annual Conference on Information Sciences and Systems, NJ, 22-24 March 2006, pp. 1182-1187.
- [2]P. Bas, J.-M. Chassery, and B. Macq. Geometrically Invariant Watermarking Using Feature Points. IEEE Trans. Image Process., vol. 11, no. 9, pp. 1014-1028, Sep. 2002.
- [3]K. Mikolajczyk and C. Schmid, "An affine invariant interest point detector," in Proc. ECCV, 2002, vol. 2350, LNCS, pp. 128-142.
- [4]Zhen J., Lai J., Jing J., et al. An Improved Second Generation Digital Image Watermarking Scheme. Mathematics of Data/Image Coding, Compression, and Encryption VI, with Applications, 2004, 5208, 218-223
- [5]D. G. Lowe: Distinctive image features from scale-invariant keypoints. International Journal of Computer Vision, Vol. 60, pp. 91-110, 2004.
- [6] E. Bertin, S. Marchand-Maillet, and J. -M. Chassery, Optimization in voronoi diagrams. Norwell, MA: Kluwer, 1994, pp. 209-216.