

基于 SURF 特征区域的鲁棒水印算法

侯 翔¹ 闵连权¹

¹ 信息工程大学地理空间信息学院,河南 郑州,450001

摘 要:针对遥感影像的安全保护,提出了一种基于 SURF 特征区域的鲁棒水印算法。首先在影像中检测 SURF 特征点,选取鲁棒性强的点构造互不重叠的特征区域并进行归一化处理,进而对归一化的区域实施整数小波变换,根据生成的模板选取相应位置的系数,最后通过量化的方式将水印信息重复嵌入到每个特征区域内。水印的检测可直接在攻击后的影像中进行,无需校正恢复,实现了盲提取。采用边缘像素替换的策略来保证影像的数据精度,不影响遥感影像的使用。实验表明,该算法具有良好的不可见性,且对常规攻击和几何攻击均具有较强的鲁棒性,可有效保护遥感影像的安全。

关键词:遥感影像;鲁棒水印;SURF 算子;特征区域;图像归一化;数据精度

中图法分类号:P237

文献标志码:A

遥感影像是地理空间信息的重要载体,其军事和经济价值日益凸显,在测绘、导航、侦察、监测等诸多领域发挥着重要的作用。然而,数字化的存储方式和开放性的网络环境在实现遥感影像快捷传输和高效共享的同时,也对影像数据的安全保护带来了全新的挑战。近年来,针对遥感影像的数据泄密、非法篡改、所有权侵犯等现象屡禁不止。数字水印技术是信息安全领域发展起来的前沿技术,是遥感影像安全保护的重要手段。

遥感影像数字水印技术的研究,虽然起步较晚,但由于其重大的现实意义,同样取得了蓬勃发展。文献[1]对遥感影像数字水印的评测标准进行了研究,并指出普通图像的水印技术不完全适用于遥感影像。文献[2]利用人类视觉特性和视觉模型选择重要的小波系数嵌入水印,但在检测时需要原始影像参与,属于非盲算法,实用性并不强。文献[3]基于伪随机序列的嵌入块位置选择机制并通过精度约束对嵌入水印后的影像进行误差控制,较好地满足了影像数据近无损的要求。文献[4]将加密后的二值图像水印嵌入到分块置乱的遥感影像中,对常规攻击具有良好的鲁棒性,但不能抵抗几何攻击。文献[5]利用模板匹配的方法来抵抗几何攻击,但在检测时需要密钥矩阵参与,属于半盲算法。文献[6]在 Contourlet 域

将水印嵌入到归一化后的遥感影像中,但由于是整体嵌入,算法对于改变影像大小的剪切并不具有鲁棒性。总体而言,目前遥感影像水印算法的研究多采用第一代水印的方法^[2-7],鲜有涉及第二代水印技术,即基于图像特征的算法。然而,在具体的应用中,嵌入水印后的遥感影像不可避免地要进行旋转、缩放、改变原始尺寸的剪切、瓦片的拼接等处理,并且在水印检测时旋转的角度、缩放的倍数、剪切拼接后相对于原始影像的位置都是未知的,这些几何攻击破坏了水印的同步性,从而导致检测失败。基于图像特征的算法为解决这一问题提供了全新的思路,且针对普通图像的算法研究已经比较深入^[8-13],可为遥感影像水印的研究提供方法借鉴。本文在现有算法的基础上,结合 SURF 特征点和整数小波变换的优良特性,设计了一种基于 SURF 特征区域的遥感影像鲁棒盲水印算法,其对常规攻击和几何攻击均具有较强的鲁棒性。

1 SURF 特征区域的构造

1.1 SURF 检测算子

SURF(speeded up robust features)是 Bay 等在 SIFT 算子的基础上提出的一种快速鲁棒局

部特征检测算法^[14]。相比于其他特征算子, SURF 在保持了对图像缩放、旋转不变性的同时, 增强了对光照变换和噪声干扰的鲁棒性, 且在计算效率上具有明显优势。SURF 特征点检测是基于尺度空间理论, 首先需要利用逐步放大的近似高斯滤波器对输入图像的积分图像进行卷积操作, 以建立尺度空间。进而使用 Hessian 矩阵来检测每一层的极值点, 对于图像中的任一点 $X(x, y)$, 在尺度 δ 的 Hessian 矩阵定义为:

$$\mathbf{H}(X, \delta) = \begin{bmatrix} L_{xx}(X, \delta) & L_{xy}(X, \delta) \\ L_{xy}(X, \delta) & L_{yy}(X, \delta) \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, $L_{xx}(X, \delta)$ 为高斯二阶微分 $\partial^2 g(\delta) / \partial x^2$ 在点 $X(x, y)$ 与图像 I 的卷积; $L_{xy}(X, \delta)$ 与 $L_{yy}(X, \delta)$ 具有类似含义。

然后将高斯二阶微分模板替换为盒子滤波器, 将图像的卷积转换为盒子滤波运算。令盒子滤波器与图像卷积的结果分别为 D_{xx} 、 D_{xy} 和 D_{yy} , 则式(1)可简化为:

$$\text{Det}(\mathbf{H}) = D_{xx}D_{yy} - (0.9D_{xy})^2 \quad (2)$$

为了定位图像中的极值点, 对该点邻近的 $3 \times 3 \times 3$ 的立方体邻域进行非极大值抑制。将每个点与相邻尺度和相邻位置的 26 个邻域值进行比较, 选取极值点作为特征点的候选点。在尺度空间和图像空间进行插值运算, 从而实现特征点的精确定位。

1.2 SURF 特征区域的选取

假设某个 SURF 特征点的坐标为 (x_n, y_n) , 特征尺度为 σ_n , 则以 (x_n, y_n) 为圆心, R_n 为半径可构造圆形特征区域, 有:

$$(x - x_n)^2 + (y - y_n)^2 = R_n^2 \quad (3)$$

式中, $R_n = k \cdot \text{round}(\sigma_n)$, k 为调节半径大小的正整数, $\text{round}()$ 为四舍五入取整函数。

将水印重复嵌入到这些特征区域内, 即可有效抵抗几何攻击。然而, 由于检测出的特征点众多, 圆形区域会出现重叠, 且由于特征尺度 σ_n 的值大小不一, 造成特征区域尺寸差别很大, 为水印的嵌入带来不便。实验表明, σ_n 值过小或过大时的特征点稳定性较差, 因此, 选取中间尺度的点构造特征区域。进一步根据响应值的大小, 优先选择鲁棒性强的特征点构造圆形区域, 若出现重叠, 则舍弃鲁棒性差的点。任意两点 (x_{n+1}, y_{n+1}) 、 (x_n, y_n) 至少应满足:

$$\sqrt{(x_{n+1} - x_n)^2 + (y_{n+1} - y_n)^2} \geq R_{n+1} + R_n \quad (4)$$

据此, 可得到互不重叠的特征区域。大数据量是遥感影像区别于普通图像的重要特征, 对于较大尺寸的遥感影像而言, 按此方法筛选后得到

的特征区域众多。考虑到实际操作的可行性, 为进一步减少嵌入区域的数量, 可再次从中选取出鲁棒性最强的若干个特征区域, 作为水印的嵌入区域。

2 基于 SURF 的水印算法

2.1 图像的归一化

由于数字遥感影像是以矩阵的形式来表示的, 因此, 需要在圆形特征区域(图 1(a))的四周补充零像素, 使其成为大小为 $2R_n \times 2R_n$ 的矩形图像块(图 1(b)), 再对其进行归一化处理。图像的归一化是建立在图像矩的基础上, 其基本原理是利用图像矩的特性来预测几何变换的参数, 得到一个对旋转、缩放等几何变换具有不变性的正则化结果(图 1(c))。图像归一化的过程^[15]主要包括图像的中心化、X 方向错切变换、Y 方向错切变换、X 和 Y 方向缩放变换等。

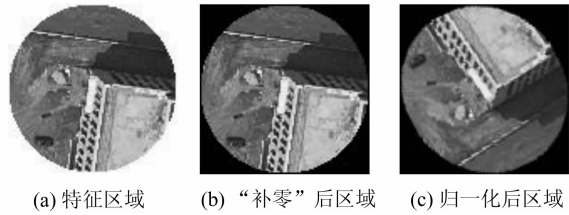


图 1 特征区域的提取及处理

Fig. 1 Feature Region Extracting and Processing

2.2 水印的嵌入

第二代水印采用冗余嵌入的思想, 把相同的水印信息重复嵌入到所有的特征区域, 其具体步骤如下。

1) 水印信息的生成。利用密钥 Key 生成一个长度为 N 的伪随机序列 $W = \{w_i, i = 1, 2, \dots, N\}$, $w_i \in \{0, 1\}$ 。

2) 利用 SURF 检测算子在遥感影像中提取特征点, 确定待嵌入水印的特征区域, 并对“补零”后的影像进行归一化处理。

3) 对归一化后的特征区域进行二级整数小波变换, 生成“回”字型模板(图 2(a))。模板应满足 $0 < l_1 < l_2 < d$, 其中 l_1 、 l_2 分别为内外矩形的边长, d 为对角线高频子带的长度。按照模板上的元素分布, 在对角线高频子带中修改相应位置的系数(图 2(b)), 从而使水印嵌入到对应区域(图 2(c))。

这样不仅可以避免后续操作(“去零”和反向归一化)造成边缘水印信息的损失, 还能够最大程度地保证特征点周围的像素值不被修改, 提高了

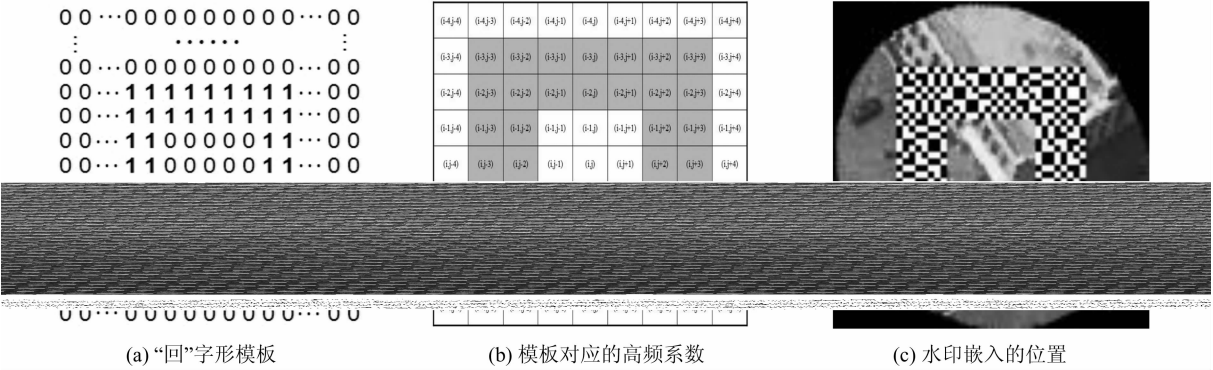


图 2 嵌入位置的选取

Fig. 2 Selection of Embedding Position

水印检测时特征点提取的准确性。对系数的修改方案如下。

(1) 若 $w_i=1$

$$X'_{ij} = \begin{cases} X_{ij} + \lambda/2, & \text{mod}(X_{ij}, \lambda) < \lambda/2 \\ X_{ij}, & \text{mod}(X_{ij}, \lambda) \geq \lambda/2 \end{cases} \quad (5)$$

(2) 若 $w_i=0$

$$X'_{ij} = \begin{cases} X_{ij}, & \text{mod}(X_{ij}, \lambda) < \lambda/2 \\ X_{ij} - \lambda/2, & \text{mod}(X_{ij}, \lambda) \geq \lambda/2 \end{cases} \quad (6)$$

式中, λ 为量化步长, 与水印的不可见性和鲁棒性密切相关。

4) 将修改后的系数进行逆整数小波变换, 并对得到的影像进行反向归一化处理, 然后将其四周的零像素去除, 得到嵌入水印后的圆形区域。

5) 将圆形区域中的边缘像素用原始影像中对应位置的像素替换。由于影像在正反归一化的过程中会导致边缘像素的损失, 为保证遥感影像的数据精度, 满足嵌入水印后影像应用的要求, 本文提出了边缘像素替换的策略, 来进一步提高嵌入水印后遥感影像的品质。由于边缘位置并未嵌入水印, 因此, 替换边缘像素不会对水印信息的完整性造成影响。

6) 重复以上操作使所有特征区域全部嵌入水印。用这些区域代替原始影像中相同位置的特征区域即可得到嵌入水印后的遥感影像。

2.3 水印的检测

水印检测的具体步骤如下。

1) 利用密钥 Key 生成长度为 N 的伪随机序列 $W = \{w_i, i=1, 2, \dots, N\}, w_i \in \{0, 1\}$ 。

2) 从待检测的遥感影像中提取 SURF 特征点, 按照 § 1.2 所述方法确定待嵌入水印的特征区域, 并对“补零”后的影像进行归一化处理。

3) 对归一化后的特征区域进行二级整数小波变换, 根据生成的“回”字型模板, 在对角线高频子带相应位置的系数中提取水印。提取规则如下:

$$w_k = \begin{cases} 1, & \text{mod}(X_{ij}, \lambda) < \lambda/2 \\ 0, & \text{mod}(X_{ij}, \lambda) \geq \lambda/2 \end{cases} \quad (7)$$

4) 将检测出的水印序列 w_k 与生成的水印序列 w_i 进行比较, 若相同的比特位数大于检测阈值 T , 则判定该特征区域含有水印。重复以上步骤直至所有特征区域检测完毕。若检测出两个以上的特征区域含有水印, 则判定该影像中含有水印。

值得注意的是, 在嵌入的水印序列长度较短的情况下, 若检测阈值 T 的取值不当, 则在水印检测的过程中存在着虚警的可能性, 导致在未嵌入水印的区域检测出水印信息。 w_k 与 w_i 中每一比特位相同的概率为 $1/2$, 由此可推出每个特征区域及整幅影像的虚警率^[16]:

$$P_{\text{FA_disk}} = \sum_{r=T}^L \left(\frac{1}{2}\right)^L \left(\frac{L!}{r!(L-r)!}\right) \quad (8)$$

$$P_{\text{FA_image}} = \sum_{i=2}^m (P_{\text{FA_disk}})^i (1 - P_{\text{FA_disk}})^{m-i} \binom{m}{i} \quad (9)$$

式中, r 为 w_k 与 w_i 中相同的比特位数; L 为水印序列的长度; m 为特征区域的个数。将预先设定的虚警率 $P_{\text{FA_image}}$ 代入式(8)、式(9), 即可计算出检测阈值 T 的取值。

3 实验及分析

实验选用 $2\,500$ 像素 \times $2\,000$ 像素大小的遥感影像作为载体, 由于筛选出的特征区域众多, 为便于统计和分析, 从中选取鲁棒性最强的 30 个特征区域嵌入水印。设定水印序列长度为 200 Bit, 半径调节参数 $k=16$, 检测阈值 T 为 140。

3.1 不可见性

按照本文设计的算法嵌入水印, 进行不可见性实验, 如图 3 所示。其中图 3(a) 为原始遥感影像, 图 3(b) 为嵌入水印后的遥感影像。实验结果

表明,从主观视觉上难以观察出水印嵌入前后两幅影像的差异,满足人类视觉系统的要求。客观上,采用峰值信噪比(PSNR)来衡量水印嵌入后遥感影像的品质,其值越大说明嵌入水印后的影像与原始影像越接近。选择适当的量化步长 λ ,PSNR 均在 46 dB 以上,说明该算法具有良好的不可见性,嵌入水印后的遥感影像仍然保持了较高的品质。

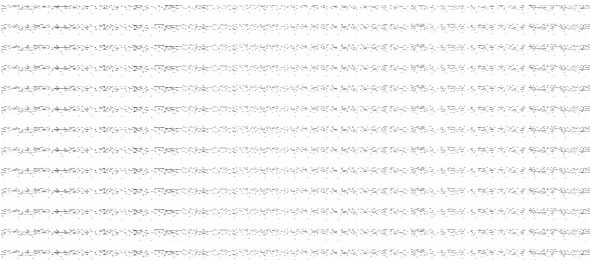


图 3 不可见性实验

Fig. 3 Experimental Results of Imperceptibility

3.2 鲁棒性

为验证算法的鲁棒性,对嵌入水印后的遥感影像进行常规攻击和几何攻击测试,并从攻击后的影像中提取水印信息。用检测率(即攻击后影像中成功检测出水印的特征区域的个数与原始影像中嵌入水印的特征区域的个数之比)和检测出水印的最大 NC 值来衡量鲁棒性的强弱,实验结果如表 1、表 2 所示。

表 1 常规攻击实验

Tab.1 Experimental Results of Traditional Signal Processing Attacks

攻击方式	攻击强度	检测率	NC _{max}	检测标识
高斯噪声	0.005	15/30	0.939	成功
椒盐噪声	0.01	14/30	0.946	成功
中值滤波	3×3	20/30	0.951	成功
均值滤波	3×3	16/30	0.921	成功
JPEG 压缩	60	22/30	0.973	成功
	20	15/30	0.889	成功
亮度调整	+35	16/30	0.996	成功
	-30	12/30	0.986	成功
亮度调整+中值滤波	+25,3×3	13/30	0.921	成功
均值滤波+JPEG 压缩	3×3,90	10/30	0.866	成功

由表 1 可以看出,算法对加噪、滤波、压缩、亮度调整等常规攻击及其组合攻击均具有较强的鲁棒性。

表 2 几何攻击实验

Tab.2 Experimental Results of Geometric Attacks

攻击方式	攻击强度	检测率	NC _{max}	检测标识
旋转	10°	9/30	0.852	成功
	20°	8/30	0.816	成功
	30°	6/30	0.793	成功
缩放	0.8	5/30	0.763	成功
	1.2	9/30	0.896	成功
剪切	1 927×1 545	13/30	1.000	成功
	1 476×1 114	4/30	1.000	成功
拼接	3 400×2 500	30/30	1.000	成功
剪切+旋转	2 217×1681,5°	11/30	0.889	成功
旋转+缩放	5°,1.1	7/30	0.812	成功

由表 2 可以看出,算法可有效抵抗几何攻击。在几何攻击后不需要校正恢复即可检测水印,具有很强的实用性,同时也提高了检测效率。而针对遥感影像处理过程中常用的大幅影像的剪切和瓦片数据的拼接操作,只要两个以上嵌入水印的特征区域包含在处理后的影像内,即可成功提取水印,无需再考虑处理后的遥感影像相对于原始影像的位置。

为进一步验证算法的鲁棒性,将本文算法与文献[16]的算法进行对比。为保证载体图像的一致性,将本文算法应用于普通图像,选取 512×512×8 Bit 的 Lena 图像作为嵌入载体,用检测率的百分比来衡量鲁棒性的强弱,实验结果如表 3 所示。

表 3 的结果表明,本文算法抵抗常规攻击和几何攻击的鲁棒性均优于文献[16]。

3.3 数据精度分析

精度是地理空间数据的重要特征,对于遥感影像的水印算法而言,不仅要满足视觉上的不可见性,更重要的是满足数据精度的要求,不能影响其使用价值。在量化步长 λ 适宜的情况下,算法主要通过边缘像素替换的策略来保证数据的精

表 3 鲁棒性对比/%

Tab.3 Comparison of Robustness/%

	高斯滤波	锐化	JPEG 50	旋转 45°	缩放 0.9	中心剪切
本文算法	43.8	37.5	50.0	12.5	37.5	31.3
文献[16]方法	33.3	11.1	18.5	7.4	14.8	18.5

度。分别将边缘像素替换前后影像的灰度值与原始遥感影像的灰度值进行比较,实验结果如表 4 所示。从表 4 中可以看出,采用边缘像素替换策

略可将嵌入水印后影像的改变量控制在 4 个灰度值以内,有效地确保了数据的精度。

表 4 数据精度对比/%

Tab. 4 Comparison of Data Accuracy/%

	相对于原始影像灰度值的改变量		
	0	1~4	≥5
替换前	89.15	5.29	5.56
替换后	98.18	1.82	0

将水印嵌入前后的遥感影像进行非监督分类实验,以此来验证含水印影像的可用性,分类方法为 IsoData,将遥感影像按照灰度值分为 5 个等级,实验结果如表 5 所示,其中误判率为原始影像像元数与嵌入水印后影像像元数之差的绝对值与原始影像像元数的比值。

表 5 非监督分类实验

Tab. 5 Experimental Results of Unsupervised Classification

分类等级	原始影像像元数	嵌入后影像像元数	误判率/%
1	1 505 449	1 460 881	1.63
2	1 531 988	1 576 298	1.59
3	819 607	820 187	0.07
4	848 803	848 512	0.03
5	294 153	294 122	0.01

由此可知,按照本文算法嵌入水印对遥感影像分类的影响很小,不会影响遥感影像的正常使用。

4 结 语

本文采用第二代水印的思想,结合 SURF 算子和整数小波变换的优良特性,顾及遥感影像的自身特点,提出了一种基于 SURF 特征区域的遥感影像鲁棒盲水印算法。算法在保持了遥感影像数据精度的同时,可有效抵抗噪声、滤波、JPEG 压缩、亮度调整等常规攻击和旋转、缩放、剪切、拼接等几何攻击,且无需对攻击后的影像进行校正恢复即可从中提取水印,具有较强的实用性和高效性,可有效保护遥感影像的安全。

参 考 文 献

[1] Chen Hui, Guo Ke, Zheng Wenfeng. The Research of Digital Watermarking Evaluation Standard for Remote Sensing Image[J]. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 2008, 30(5): 436-442(陈辉, 郭科, 郑文峰. 数字水印技术应用于遥感图像版权保护的评测标准研究[J]. 物探化探计算技术, 2008, 30(5): 436-442)

[2] Geng Xun, Gong Zhihui, Zhang Chunmei. A Watermarking Algorithm for Remote Sensing Image Based on HVS and Integer Wavelet Transform[J].

Bulletin of Surveying and Mapping, 2007(8): 20-22(耿迅, 龚志辉, 张春美. 基于 HVS 和整数小波变换的遥感图像水印算法[J]. 测绘通报, 2007(8): 20-22)

[3] Zhu Changqing, Ren Na. An Algorithm for Digital Watermark Based on Pseudo-random Sequence and DCT for Remote Sensing Image[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2011, 36(12): 1 427-1 429(朱长青, 任娜. 一种基于伪随机序列和 DCT 的遥感影像水印算法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2011, 36(12): 1 427-1 429)

[4] Zhu Peng, Jia Fei, Zhang Junliang. A Copyright Protection Watermarking Algorithm for Remote Sensing Image Based on Binary Image Watermarking[J]. *Optik*, 2013, 124: 4 177-4 181

[5] Ren Na, Zhu Changqing, Wang Zhiwei. Semi-blind Watermarking Algorithm Resistance on Geometrical Attacks for High-resolution Remote Sensing Image[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2011, 36(3): 327-332(任娜, 朱长青, 王志伟. 抗几何变换的高分辨率遥感影像半盲水印算法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2011, 36(3): 327-332)

[6] Li Lili, Sun Jinguang. A Watermarking Scheme for Remote Sensing Images Based on Contourlet Transformation[J]. *Computer Applications and Software*, 2012, 29(2): 60-63(李丽丽, 孙劲光. 基于 Contourlet 变换的遥感影像数字水印方案[J]. 计算机应用与软件, 2012, 29(2): 60-63)

[7] Gao Guangda, Ren Na, Wang Yongzhi, et al. Digital Watermarking Algorithm Using Image Relocation and Traversal Detection for Remote Sensing Image[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2012, 37(10): 1 229-1 231(高光大, 任娜, 王永志, 等. 利用影像重定位和遍历检测的遥感影像水印算法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2012, 37(10): 1 229-1 231)

[8] Yu Yanwei, Ling Hefei, Zou Fuhao, et al. Robust Localized Image Watermarking Based on Invariant Regions [J]. *Digital Signal Processing*, 2012(22): 170-180

[9] Li Leida, Guo Baolong. Localized Image Watermarking in Spatial Domain Resistant to Geometric Attacks [J]. *International Journal of Electronics and Communications*, 2009, 63: 123-131

[10] Chen C H, Tang Y L, Wang C P, et al. A Robust Watermarking Algorithm Based on Salient Image Features [J]. *Optik*, 2014, 125: 1 134-1 140

[11] Wang Xiangyang, Niu Panpan, Yang Hongying, et al. Affine Invariant Image Watermarking Using Intensity Probability Density-based Harris Laplace

Detector [J]. *J Vis Commun Image R*, 2012(23): 892-907

[12] Deng Cheng, Li Jie, Gao Xinbo. Geometric Attacks Resistant Image Watermarking in Affine Covariant Regions[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2010, 36 (2): 221-228(邓成, 李洁, 高新波. 基于仿射协变区域的抗几何攻击图像水印算法[J]. 自动化学报, 2010, 36(2): 221-228)

[13] Niu Panpan, Wang Xiangyang, Jin Haibo, et al. A Feature-based Robust Digital Image Watermarking Scheme Using Bandelet Transform [J]. *Optics & Laser Technology*, 2011, 43: 437-450

[14] Bay H, Ess A, Tuytelaars T, et al. Speeded-up Robust Features [J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 2008, 110(3):346-259

[15] Dong P, Brankov J G, Galatsanos N P. Digital Watermarking Robust to Geometric Distortions [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2005, 14 (12): 2 140-2 150

[16] Seo J S, Yoo C D. Image Watermarking Based on Invariant Regions of Scale-space Representation [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2006, 54(4): 1 537-1 549

A Robust Watermarking Algorithm Using SURF Feature Regions

HOU Xiang¹ MIN Lianquan¹

1 Institute of Geographical Spatial Information, Information Engineering University, Zhengzhou 450001, China

Abstract: To study the security protection of remote sensing images, a robust watermarking algorithm based on SURF feature regions was proposed. Initially, feature points were extracted from original image by using SURF detector, and points with stronger robustness were further selected to construct non-overlapping feature regions and image normalization was performed. Then integer wavelet transform was applied on the normalized regions, and corresponding position coefficients were selected according to the generated template. Finally, the watermark was embedded repeatedly into every feature region using quantization method. Watermark detection could be done directly from the attacked image without correction, and also realize the blind extraction. An edge pixels replacement scheme was used to ensure the data accuracy, so the watermark had no effect on the application of remote sensing images. Experimental results show that the proposed algorithm is not only invisible, but also robust against common image processing operations and geometric attacks, so it can protect remote sensing images security effectively.

Key words: remote sensing images; robust watermarking; SURF detector; feature regions; image normalization; data accuracy

First author: HOU Xiang, PhD candidate, specializes in geographical spatial data security. E-mail: hxhouxianghx@163.com

Corresponding author: MIN Lianquan, PhD, professor. E-mail: rainman_mlq@163.com

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, Nos. 41471337, 41071245; the Open Research Fund Program of State Key Laboratory of Geo-information Engineering Foundation of China, No. SKLGIE2014-M-4-6.