

文章编号:1004-4213(2010)08-1377-6

可抵抗 JPEG 压缩的鲁棒可逆水印^{*}

武丹^{1,2},汪国昭¹

(1 浙江大学 数学系 计算机图像图形处理研究所,杭州 310027)

(2 中国计量学院 数学系,杭州 310018)

摘 要:提出了一种可用于半脆弱认证的鲁棒可逆水印算法.该算法利用了鲁棒的统计量-图像均值,通过计算相邻两个图像子块均值的差分,根据差分的范围,将差分进行不同程度地平移来嵌入水印;再根据差分的平移量分别调整两个子块的各个像素,以保证算法的可逆性.同时该算法利用分块直方图调整来避免像素的溢出.对常见图像和三类医学图像(CT、超声波、X 光图像)进行仿真实验,发现该可逆水印算法对 JPEG 压缩具有良好的鲁棒性.并且具有较高的图像质量.

关键词:图像处理;数字水印;可逆水印;JPEG 压缩;均值差分

中图分类号:TP391

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20103908.1377

0 引言

近年来,在医学诊断、军事图像和遥感图像处理等领域中,国内外学者对宿主图像进行分析和研究^[1],通过调整图像中那些对人眼不敏感或不易被检测到变化的信息,提出了可逆水印技术^[2-7].该技术使得在提取出水印之后,能够完全恢复原始图像.文献[2-3]利用相邻两个像素之间的差分来嵌入可逆水印;文献[4-5]通过调整直方图来嵌入可逆水印;文献[6-7]通过调整相邻像素之间的预测误差来嵌入可逆水印.在图像没有受到任何攻击的前提下,这些方法都可以提取水印,并能够恢复原始图像.目前国内外文献中研究的可逆水印多是脆弱水印.而在实际应用中,为了方便图像的传输和保存,需要对图像进行压缩(当前普遍采用 JPEG 有损压缩),不仅使得原始图像无法恢复,而且水印也无法提取.为解决这种问题,De Vleeschouwer et al.^[8]最早提出了一种可抵抗高质量的 JPEG 压缩的可逆水印算法.他利用 Patchwork^[9]的思想,分块计算图像的质心,通过质心的调整来嵌入水印,并且利用圆的双边映射来避免像素溢出.文献[10]通过在非重要区域嵌入非盲的鲁棒水印来抵抗 JPEG 压缩.文献[11]提出了基于纠错码思想的可逆水印,即利用纠错码来提高水印的鲁棒性,并同时避免像素的溢出.这类

水印算法具有以下双重特性:第一,在水印后的图像没有受到任何攻击的条件下,水印可以被正确提取,并且原始图像可以完全恢复;第二,若水印后的图像经过适当的 JPEG 压缩,则水印仍然可以被正确提取.

在实际应用中,文献[8]引入的双边映射虽然可以提高水印的鲁棒性,但是降低了水印后图像的质量.而因为需要水印与纠错码相互转化,文献[11]所提出的算法计算比较复杂.本文提出了一种基于分块图像均值的可逆水印算法,同时该算法也可以抵抗 JPEG 压缩.在嵌入相同的水印的情况下,本文算法具有很好的鲁棒性,并且具有比 Ni 的算法更好的图像质量.

1 算法的主要思想

常见的两种可逆水印算法是利用相邻两个像素的差分的最低有效位(差分扩张)和利用某一特定像素的最低有效位(直方图平移)来嵌入水印,但是简单的图像改动都会对这两种算法提取的水印造成破坏.本文利用分块图像均值的差分来进行水印嵌入,可以提高算法的鲁棒性,具体思想如下.

图像的均值是一种鲁棒的统计量^[12],因此我们考察每个子块的图像均值.将图像分成 $N \times N$ 的小块,考查图像子块的均值 $a = \frac{1}{N \times N} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N I(i, j)$. 以某一 CT 图像(图 1)的 bmp 格式(I_1)和 jpg 格式(I_2)为例.首先将图像分成 8×8 的小块(如果构不成 8×8 的子块,则该块不处理),然后分块计算两格式图像的均值,则对应子块均值之差为: $D_i = a_{i_1} - a_{i_2}$,其直方图如图 2.

^{*} 国家自然科学基金(60773179)、国家重点基础研究发展计划(2004CB318000)和浙江省教育厅基金(Y200909370)资助

Tel:13777414025

Email:linlin_52@yahoo.com.cn

收稿日期:2008-10-24

修回日期:2009-01-29

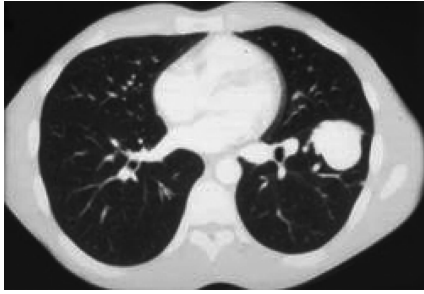


图 1 CT 图像(250×170)
Fig. 1 Computed Tomography image(250×170)

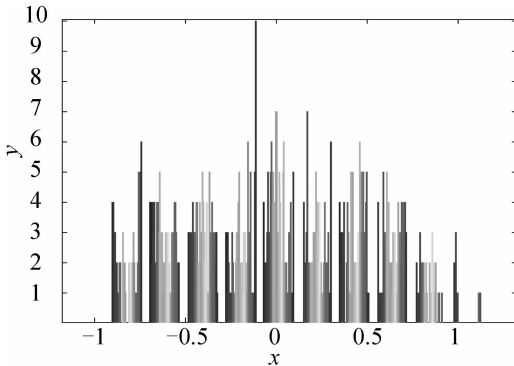


图 2 均值之差的分布
Fig. 2 Distribution of difference of means

为了使得水印嵌入时和水印提取时的块的位置保持一致(这是经过攻击后的图像能否正确提取水印的关键),我们必须记录嵌入水印的子块.但是如果每一幅图像都记录水印的嵌入位置,则不能做到盲提取,并且浪费了大量的空间.因此本文采用均值差分平移的方法来嵌入水印.

1.1 水印的嵌入

将图像分成 8×8 的小块(如果构不成 8×8 的子块,则该块不处理),然后计算每一子块的均值,得到均值矩阵 $a = (a(i, j))_{p \times q}$. 相邻两个均值之间计算差分,得到差分矩阵 $d = (d(i, j))_{p \times \lfloor q/2 \rfloor}$, 式中

$$d(i, j) = a(i, 2j-1) - a(i, 2j) \quad (i=1, \dots, p; j=1, \dots, \lfloor q/2 \rfloor) \quad (1)$$

将差分按照以下三类进行处理:

- Case 1: 若 $d(i, j) \geq K$, 则 $d'(i, j) = d(i, j) + \sigma$;
- Case 2: 若 $d(i, j) \leq -K$, 则 $d'(i, j) = d(i, j) - \sigma$;
- Case 3: 若 $-K < d(i, j) < K$, 则用来嵌入水印. 若 $b=1$, $d'(i, j) = d(i, j) + K$; 若 $b=0$, $d'(i, j) = d(i, j) - K$. 此处 K, σ 为阈值, 且全为整数. K 用来决定嵌入容量, 并且 $\sigma \geq 2K$.

图 3 是嵌入水印前后图像子块均值差分的分布. 由图 3 可知, 在 $[-K-\sigma, -2K]$ 和 $[2K, K+\sigma]$ 是空余的, 可用来调整因压缩而产生的差分误差. 一般情况下, 通过判断子块的均值差分是否介于 $[(3K-\sigma)/2, (3K+\sigma)/2]$ 之间, 来判断该差分是否嵌入了水印.

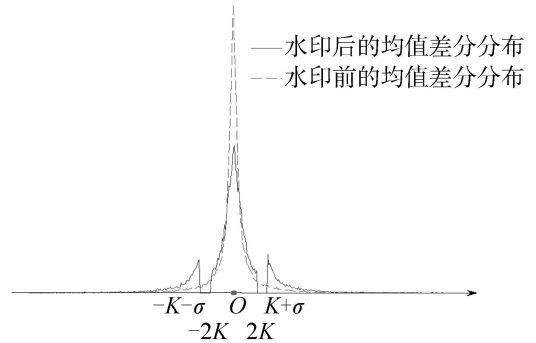


图 3 嵌入水印前后的均值差分的分布
Fig. 3 Distribution of the difference of means

1.2 图像像素的调整

令 $\Delta d = d'(i, j) - d(i, j)$, 由嵌入过程可知 $|\Delta d|$ 只有两种可能: σ 或 K , 则

$$\begin{cases} a'(i, 2j-1) = a(i, 2j-1) + \lfloor \frac{\Delta d + 1}{2} \rfloor \\ a'(i, 2j) = a(i, 2j) - \lfloor \frac{\Delta d}{2} \rfloor \end{cases} \quad (2)$$

即若均值改变 $\lfloor \frac{\Delta d + 1}{2} \rfloor$ (或 $\lfloor \frac{\Delta d}{2} \rfloor$), 则图像子块

中的每一个像素都应该相应改变 $\lfloor \frac{\Delta d + 1}{2} \rfloor$ (或 $\lfloor \frac{\Delta d}{2} \rfloor$).

1.3 溢出问题的解决

在像素调整过程中, 像素增加的最大值是 $\lfloor \frac{\sigma + 1}{2} \rfloor$, 减少的最大值是 $\lfloor \frac{\sigma}{2} \rfloor$. 为了避免像素的溢出, 本文采用分块直方图调整的方法. 对于灰度图像, 像素的范围是 $0 \sim 255$. 而对于两个 8×8 的子块, 至多占用 128 个像素, 从而至少还有 128 个空余, 因此可以在每个小块中进行调整而不会产生溢出. 因为图像灰度具有很强的相关性, 所以两个 8×8 的子块的直方图一般具有四种形式, 见图 4

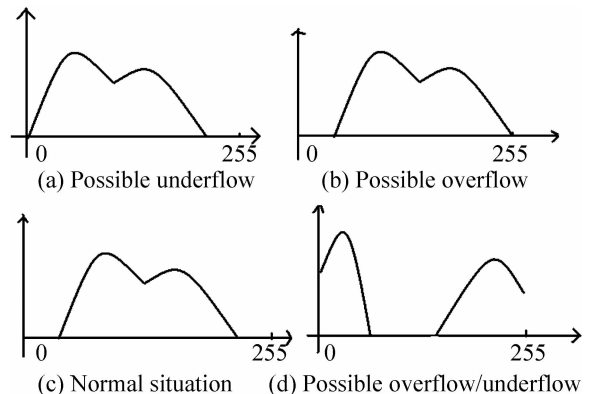


图 4 子块的直方图分布的四种情况
Fig. 4 Block histogram of four categories

为了更好的说明问题,以 $\sigma=4$ 为例. 在像素调整地过程中,增加和减少的最大值是 2,因此在每个子块的直方图中至少有 4 个空余,因此对于图 4(a)和(b)两种情况,只需分别以 255、0 为标志点,右移和左移两个像素即可,而对于情况图 4(c)不需要调整;对于情况 d,需要记录位置 L 和标志点 P ,并将标志点左右两边的所有像素向中间平移两个单位. 因为情况图 4(a)、(b)和(c)能够完全区分^[11],因此不需要记录,就可以恢复原始图像,把该过程作为预处理过程.

2 水印的嵌入过程

水印的嵌入过程可以分为 3 个步骤:

1) 预处理过程:把图像分成 8×16 的小块,分块考查直方图. 若出现 1.3 中所述的情况图 4(a),则以 255 为标志点,右移 $\left\lfloor \frac{\sigma+1}{2} \right\rfloor$ 个单位. 若出现情况 b,则以 0 为标志点,左移 $\left\lfloor \frac{\sigma}{2} \right\rfloor$ 个单位. 若出现情况图 4(a),则记录该子块的位置 L 和记录标志点 P ,同时将标志点 P 左右两边的像素,向中间平移 $\left\lfloor \frac{\sigma+1}{2} \right\rfloor$ 或 $\left\lfloor \frac{\sigma}{2} \right\rfloor$ 个单位. 出现情况 c,不处理. 并且以 $\text{flag}=1$ 来表示整个图像需要预处理; $\text{flag}=0$ 来表示没有对图像进行预处理. 将该 flag 、 L 、 P 与水印一起组成嵌入信息.

2) 将图像分成 8×8 的小块,并分别计算每一块的均值,组成均值矩阵.

3) 如式(1),计算相邻两个均值的差,组成差分矩阵,按照 1.1 中所述来嵌入水印,并按照式(2)来调整像素.

3 水印的提取与原始图像的恢复过程

收到嵌入水印的图像后,按照以下步骤提取水印,并恢复原始图像.

1) 将水印后的图像分成 8×8 的小块,并分别计算每一块的均值,组成均值矩阵 a' .

2) 计算相邻两个均值的差,组成差分矩阵 d' . 为抵抗压缩,选择 $|d'(i,j)| \leq (3K+\sigma)/2$ 的子块来提取水印

$$\begin{cases} b=1, & d'(i,j) \geq 0 \\ b=0, & d'(i,j) < 0 \end{cases} \quad (3)$$

同时可以恢复原始的均值差分:如果 $|d'(i,j)| \leq (3K+\sigma)/2$ 则

$$\begin{cases} d(i,j) = d'(i,j) - K, & d'(i,j) \geq 0 \\ d(i,j) = d'(i,j) + K, & d'(i,j) < 0 \end{cases} \quad (4)$$

如果 $|d'(i,j)| > (3K+\sigma)/2$ 则

$$\begin{cases} d(i,j) = d'(i,j) - \sigma, & d'(i,j) \geq 0 \\ d(i,j) = d'(i,j) + \sigma, & d'(i,j) < 0 \end{cases} \quad (5)$$

然后计算,则原始图像的像素可以用下式来恢复

$$\begin{cases} a'(i,2j-1) = a'(i,2j-1) - \left\lfloor \frac{\Delta d + 1}{2} \right\rfloor \\ a'(i,2j) = a'(i,2j) + \left\lfloor \frac{\Delta d}{2} \right\rfloor \end{cases} \quad (6)$$

3) 根据提取出的水印的首位 flag ,判断是否进行了分块直方图平移,若首位为 0,则不需要平移,若首位为 1,分成 8×16 的小块,按照与嵌入时相反的方向分块进行直方图平移.

4 实验结果

本文分别以 CT 图像(图 1)、超声波图像(图 6(a))、X 光图像(图 7(a))以及常用的 512×512 灰度图像(Lena, Baboon, Boat)为例进行水印嵌入. 以 matlab 7.0 为平台,randint()产生的 0、1 序列为水印. 在所有的实验中都是把图像分为 8×8 的小块. 图 5 是嵌入 92 bits 水印后的 CT 图像(PSNR=38.046 2 dB);图 6(b)是嵌入 568 bits 水印后的超声波图像(PSNR=39.976 dB);图 7(b)是嵌入 1 084 bits 水印后的 X 光图像(PSNR=38.736 1 dB). 同时如果水印后的图像没有经过压缩,在提取出水印之后能够完全恢复图像.

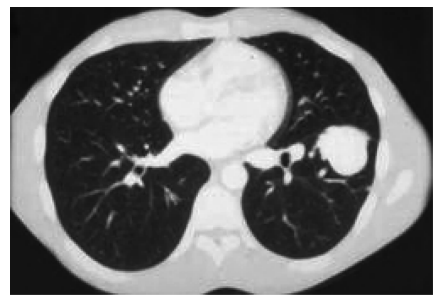
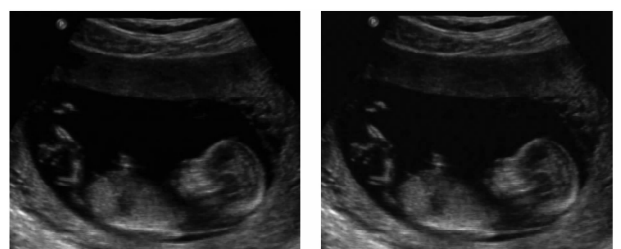


图 5 嵌入水印后的 CT 图像

Fig. 5 The watermarked computed tomography image



(a) Original

(b) Watermarked image

图 6 超声波图像(445×330)

Fig. 6 Ultrasound image

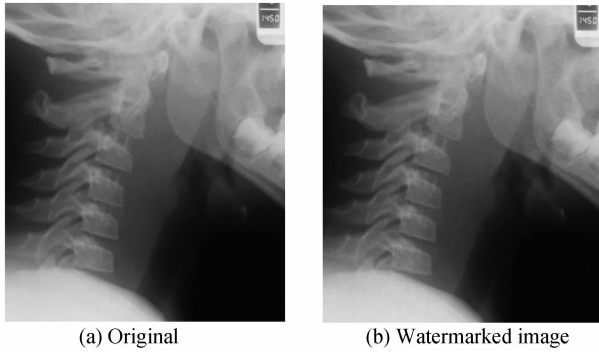


图 7 X 光照片 (459×521)
Fig. 7 Radiograph

可抵抗 JPEG 压缩的可逆水印算法优劣比较主要取决于三个方面:1)水印的嵌入容量;2)嵌入水印后图像的质量(通常以 PSNR 来衡量);3)水印的鲁棒性.因此本文给出了基于这三者的比较.表 1 列出了三类医学图像的嵌入水印容量、水印嵌入时的阈值(K)、嵌入水印后图像的 PSNR.表 1 说明,随着 K 的增加,水印的嵌入容量增加,同时图像的质量相应降低.并且在同一个阈值下,X 光照片的水印容量最大,这是因为 X 光照片中,介于的差分最多.

表 1 三类医学图像的结果比较

Table1 Comparison of three kinds of medical images

	Threshold Payload		PSNR of watermarked image/dB
CT	1	68	39.541 2
	2	88	39.540 3
	3	92	38.046 2
Ultrasound	2	568	39.976 0
	3	626	37.468 0
	4	678	36.895 8
	2	1 084	38.736 1
Radiograph	3	1 212	36.677 5
	4	1 418	35.142 1

首先以三类医学图像为载体,将本文的算法与 Ni 的算法进行比较,表 2 列出了关于 PSNR 的比较结果.由表 2 可知,在嵌入相同数量的水印时,我们的算法具有更好的图像质量.为比较两种算法的鲁棒性,实验中我们在医学图像中嵌入水印(嵌入数据如表 2),并将嵌入信息后的图像进行 JPEG 压缩.为了确定压缩后的图像是否含有水印,本文采用归一化相关系数(Normalized Cross-correlation, NC)^[13]对提取的水印和原始水印的相似性进行定量检测.图 8 显示了两种算法在不同的质量因子下所提取出的医学图像中水印的 NC.由图 8 可知,用本文的算法提取出的水印具有更高的相似度,其中超声波图像的优势更加明显.如果取水印的相似度门限为 0.9,则医学图像至少可抵抗质量因子为 60 的 JPEG 压缩.由此可见,本文的算法也提高了水印的鲁棒性.

表 2 以医学图像为载体的算法比较结果

Table2 PSNR comparison of watermarked images

Image	Payload	PSNR of watermarked image/dB	
		Ni	Our
CT	50	39.206 2	44.833 1
Ultrasound	100	41.620 1	44.170 4
Radiograph	100	44.076 4	48.597 3

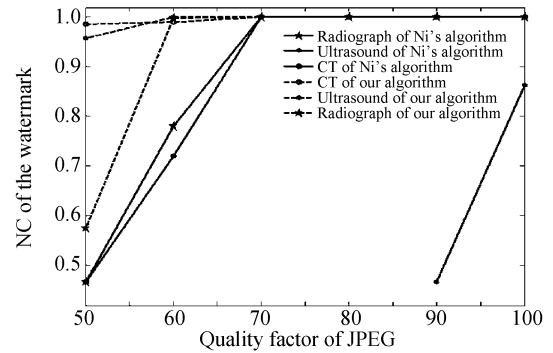


图 8 关于医学图像两种算法鲁棒性的比较

Fig. 8 Robustness comparison of medical images

本文又以常用图像为载体,对两种算法进行比较(表 3),结果发现我们的算法在保证较高图像质量的同时,也提高了水印的嵌入容量.为比较鲁棒性,在实验中,分别嵌入不同数量的水印(如表 3),并将嵌入信息后的图像进行 JPEG 压缩.图 9 显示了两算法所提取出的常用图像中水印的 NC.由图 9 可知,当质量因子小于 80 时,Ni 的算法所提取出的水印的相似度已经很低了,而本文的算法在质量因子为 20 时,相关系数仍然在 0.87 以上.如果取水印的相似度门限为 0.9,则常用图像至少可抵抗质量因子为 30 的 JPEG 压缩.因此,对于常用图像,本文的算法也能够更好的抵抗 JPEG 压缩,鲁棒性的优势亦更加明显.

表 3 以常用图像为载体的算法比较结果

Table3 Comparison of commonly used images

Image	Payload		PSNR of watermarked image/dB	
	Ni	Our	Ni	Our
Lena	792	900	40.2	42.892 3
Baboon	585	602	38.7	40.522 7
Boat	560	886	40.5	40.792 0

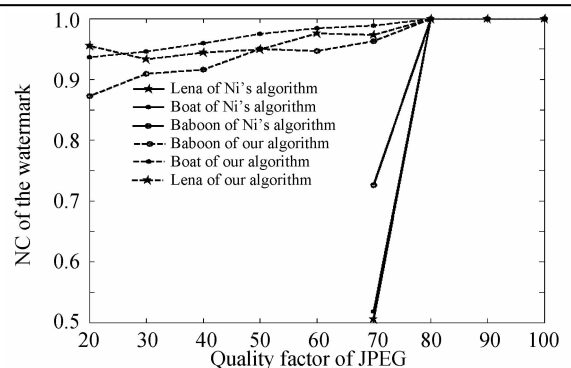


图 9 关于常见图像两种算法鲁棒性的比较

Fig. 9 Robustness comparison of commonly used images

5 结论

根据分块图像的均值在压缩前后变化不大的性质,本文提出了一种基于均值差分的鲁棒可逆水印. 通过将差分进行不同程度的平移来嵌入水印,并相应调整图像的每个像素;同时采用分块直方图平移的方法来避免灰度值的溢出. 在提取水印的过程中,根据均值差分的范围区分嵌入水印的子块来提取水印. 在水印后的图像没有受到任何攻击时,该算法可以正确提取水印并恢复原始图像;若水印后的图像经过适当 JPEG 压缩,则该算法仍然能够正确提取水印,从而可用于图像的半脆弱认证. 对三类不同的医学图像和常用图像进行测试,发现本文的算法均能保证较高 PSNR;而且以医学图像为载体,该算法至少可抵抗质量因子为 60 的 JPEG 压缩,以常用图像为载体,该算法至少可抵抗质量因子为 30 的 JPEG 压缩.

参考文献

- [1] YANG Jin-bao, LIU Chang-chun, HU Shun-bo, *et al.* Mean divergence measures for medical image registration [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(5): 1046-1051.
- [2] TIAN J. Reversible data embedding using a difference expansion [J]. *IEEE Transactions on Circuits Systems and Video Technology*, 2003, **13**(8): 890-896.
- [3] ZHANG Xin-peng, WANG Shuo-zhong. Lossless information hiding pixel-Value exchange [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2005, **16**(8): 956-960.
张新鹏,王朔中. 基于像素交换的无损信息隐藏[J], *光电子·激光*, 2005, **16**(8): 956-960.
- [4] NI Z, SHI Y. Q, ANSARI N, *et al.* Reversible data hiding[J]. *IEEE Transactions on Circuits Systems and Video Technology*, 2006, **16**(3): 354-362.
- [5] GAO Tie-gang, GU Qiao-lun. A new reversible data hiding of high capacity for image [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2008, **19**(5): 663-666.
高铁杠,顾巧论. 一种大容量的图像可逆信息隐藏算法[J]. *光电子·激光*, 2008, **19**(5): 663-666.
- [6] THODI D M, RODRIGUEZ J J. Expansion embedding techniques for reversible watermarking [J]. *IEEE Transaction on Image Processing*, 2007, **16**(3): 721-730.
- [7] XIE Yu-ming, CHENG Yi-ming, WANG Yi-xiao, *et al.* Lossless data hiding method in image based on linear prediction [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2006, **18**(4): 585-591.
谢于明,程义民,王以孝,等. 基于线性预测的图像无损信息隐藏方法[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2006, **18**(4): 585-591.
- [8] de VLEESCHOUWER C, DELAIGLE J F, MACQ B. Circular interpretation of bijective transformations in lossless watermarking for media asset management [J]. *IEEE Transactions on Multimedia*, 2003, **5**(1): 97-105.
- [9] KUMARI B P, RALLABANDI V P S. Modified patchwork-based watermarking scheme for satellite imagery [J]. *Signal Processing*, 2008, **88**(4): 891-904.
- [10] ZAIN J, CLARKE M. Reversible watermarking surviving JPEG compression[C]. in Proc Int Conf IEEE Eng Med Biol Soc Shanghai, China, Sep. 1-4, 2005(3): 3759-3762.
- [11] NI Z, SHI Y Q, ANSARI N, *et al.* Robust lossless image data hiding designed for semi-fragile image authentication [J]. *IEEE Transactions on Circuits Systems and Video Technology*, 2008, **18**(4): 497-509.
- [12] NIKOLAIDIS N, PITAS I, SOLACHIDIS V. Robust image watermarking in the spatial domain [C]. in Proc Int Conf Image Processing, Vancouver, BC, Canada, Sep. 10-13, 2000 (3): 9-12.
- [13] FU M S, AU O C. Data hiding watermarking for halftone images[J]. *IEEE Trans on Image Processing*, 2002, **11**(4): 477-484.

Robust Reversible Watermarking Scheme against JPEG Compression

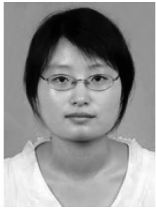
WU Dan^{1,2}, WANG Guo-zhao¹

(1 *Institute of Computer Graphics and Image Processing, Department of Mathematics, Zhejiang University, Hangzhou, 310027, China*)

(2 *Department of Mathematics, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China*)

Abstract: A novel reversible watermarking scheme is proposed, which is robust against high-quality JPEG compression. By computing the difference between the means of two adjacent image blocks, employing it to embed the watermark, and using block histogram shifting to avoid overflow/underflow, this technique receives both losslessness and robustness. If the watermarked image does not change at all, the watermark can be extracted out correctly and the original image can be recovered losslessly. If the watermarked image is compressed to some extent, the watermark can still be correctly extracted for semi-fragile authentication. The scheme is successfully applied to three kinds of medical images and commonly used images. Experimental results show that the high visual quality of images, the pure payload, and the robustness of the proposed scheme against compression are acceptable for many applications, including semi-fragile image authentication.

Key words: Image processing; Digital watermark; Reversible watermark; JPEG compression; Difference between two means



WU Dan was born in 1979. She received her M. S. degree from Zhejiang University in 2004. Now she is a Ph. D. degree candidate, and her research interests focus on image processing and digital watermarking.



WANG Guo-zhao was born in 1944. He is a professor and Doctoral Supervisor, and his research interests focus on computer graphics, computer aided geometric design and image processing.