

# 一种基于医学图像中感兴趣区域的数字水印算法

董莉, 王玲, 江沸波

(湖南师范大学 物理与信息科学学院, 湖南 长沙 410081)

**摘要:** 提出了一种基于医学图像中感兴趣区域(ROI)的盲检测水印算法, 将包含重要病理信息的灰度图像作为数字水印, 经置乱后在混沌序列的控制下嵌入到宿主小波域非感兴趣区域中。实验结果表明, 该算法在保护医学 ROI 的同时提高了水印抗 JPEG 压缩的鲁棒性, 并对篡改、几何剪切、滤波等均具有良好的鲁棒性和透明性, 而且混沌序列增强了系统的安全性。

**关键词:** 医学影像 数字水印 小波变换 混沌映射 感兴趣区域

迅猛发展的计算机科学技术正在广泛地渗透到医学领域中, 采用计算机 X 光断层扫描技术(CT)和磁共振成像技术(MRI)进行诊断已经成为现代医学诊断不可或缺的有效辅助手段。随着计算机网络技术的发展, 通过网络将所诊断的数字化影像传向远方将成可能。这标志着通过网络进行远程医疗诊断的数字化医疗时代已经到来。医学数字影像传输及通信 DICOM(Digital Imaging and Communications in Medicine)标准的建立, 促进了数字医疗影像信息的交流。然而, 医疗影像及数据信息在网络传输的过程中同样会遭遇篡改、非法复制、版权保护等信息安全问题, 数字水印技术为解决这种信息安全问题提供了有效的手段。数字水印技术将标志性数字信息嵌入到多媒体数字作品中, 其特有的鲁棒性和安全性保证了在经历信息交流过程中的数据处理后, 仍能完整可靠地提取水印标志, 从而起到鉴别内容真伪、保护版权等作用。根据数字水印标志隐藏位置的不同, 可将水印分为时间/空间域数字水印和变换域数字水印。时/空域数字水印通常直接在载体信号空间域或时间域上叠加水印标志。变换域数字水印则用水印信息调制多媒体载体信号的变换域(如离散傅立叶变换 DFT、离散余弦变换 DCT、离散小波变换 DWT 等)系数实现水印的嵌入<sup>[1]</sup>。

对于医学影像来说, 水印透明性要求较高, 为了不影响图像的质量, 一般文献中常选择将二值图像作为水印标志, 通过改变宿主变换域的高频系数嵌入水印(如参考文献[2]), 将不同用途的水印标志嵌入到宿主小波变换后的水平和垂直细节子带。医学图像中的感兴趣区域 ROI(Region of Interest)指的是那些包含重要病理特征或诊疗信息的区域<sup>[3]</sup>, 若在该区域嵌入水印, 则有可能造成错误的诊断。Hyung-Kyo Lee 等人提出在 ROI 外的空域嵌入水印<sup>[4]</sup>。该算法在提取水印时需要原始图像, 这使其应用受到一定的限制。本文对参考文献[4]中的

算法提出一种改进方案, 即提出一种基于医学图像中感兴趣区域的数字水印算法。首先采用小波分解对原图或感兴趣区域进行压缩, 提取其低频子带  $LL$ , 并将其分解为二值位平面的形式, 经空域置乱生成水印标志; 然后对原始医学图像进行小波分解, 根据医学图像中显示的病理特征, 将水印嵌入到低频子带 ROI 以外区域的位平面, 由混沌序列控制嵌入位置; 最后经小波逆变换得到嵌入水印以后的图像。水印的检测只须掌握密钥, 便可实现盲检测。实验结果显示, 由于在小波域嵌入水印, 与参考文献[4]比较, 该算法对于抗 JPEG 压缩性能有明显改善, 并对剪切、篡改(尤其是对 ROI 的篡改)、滤波等均具有较好的鲁棒性。混沌序列用于控制嵌入位置大大增强了算法的安全性。

## 1 基本原理

### 1.1 原始医学图像的多分辨率分解

基于小波变换的图像多分辨率分解方式, 将原始图像划分为不同频率和不同方向上的多个高频子图和一个低频子图。由于其良好的空间方向选择性, 十分符合人类视觉机制(HVS), 使得小波变换已成功并广泛地应用于数字水印算法的设计中。对图像进行三级小波分解, 可得到三个分辨率层次上的垂直细节子带  $HL_k$ 、水平细节子带  $LH_k$ 、对角细节子带  $HH_k$  ( $k=1, 2, 3$ ) 和一个原始图像的近似子带  $LL_3$ , 如图 1 所示。细节子带中蕴含图像中不同方向上的高频成份的轮廓边缘信息,  $LL_3$  则是原始图像的低频近似部分。由于  $HL_k$ 、 $LH_k$ 、 $HH_k$  ( $k=1, 2, 3$ ) 所含的能量较小, 且人眼对它们不敏感, 常见的图像压缩算法会去除或破坏它们。为了提高数字水印对 JPEG 压缩的鲁棒性, 同时也为了保护医学图像中感兴趣区域不被破坏这一应用要求, 本文选择属于二级小波分解后的  $LL_2$  中感兴趣区域以外的部分系数作为水印的嵌入区域  $LL_2^{NROI}$ 。 $LL_2^{NROI}$  表征了图像的时频特性, 系数被修改的  $LL_2^{NROI}$  区域经小波逆变换后将仅仅影响到

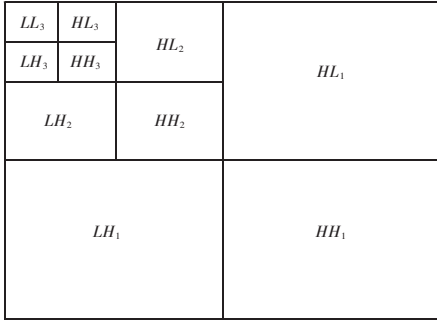
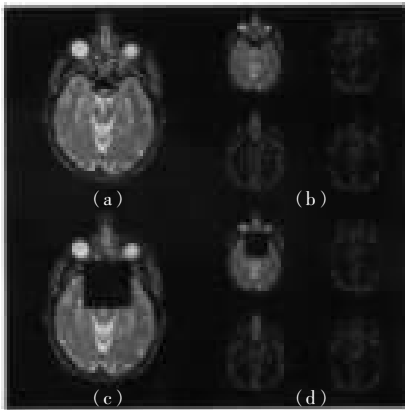


图1 图像的多分辨率分解

原图的 NROI 区域，这样 ROI 区域就被很好地保护起来了。这正是小波变换这种时频分析方法与传统的频域分析方法之间本质区别的体现。如图 2 所示，若将医学影像中感兴趣区域的近似系数置零，从重构后的图像中可以明显看到，图像的感兴趣部分变得模糊难辨，而其他部分的细节信息仍然清晰可辨。正是抓住时频分析的这一特点，本文给出的算法在保持医学影像重要区域不被破坏的同时又提高了算法抗 JPEG 压缩等常见攻击的鲁棒性。



(a) 原始医学图像；(b) 一级小波分解后各层系数图像；(c) ROI 区域近似系数被去除后的图像；(d) 被处理的各层系数图像

图2 小波分析的时频分析特性

### 1.2 灰度水印图像的二值化分解

本文采用  $32 \times 32$  的 256 灰度级图像作为水印，由原始医学图像经四级小波分解压缩掉高频细节后得到。为实现灰度水印的嵌入，采用图像信号的位分解方法对灰度级为  $2^l$  的图像信号进行二值化分解。(1)式和(2)式分别给出了灰度像素的分解与二值信号的合成公式。 $x(i, j)$  为灰度像素值， $x^l(i, j)$  为分解的第  $l$  个位平面。

$$x^l(i, j) = [x(i, j) / 2^l] \bmod 2, x(i, j) \in \{0, 1\} \quad (1)$$

$$x(i, j) = \sum_{l=1}^L x^l(i, j) \times 2^l, x(i, j) \in [0, 255] \quad (2)$$

### 1.3 混沌映射

混沌序列由于其对初值极高的敏感性以及很强的类随机特性，具有比传统伪随机序列更为优越的密码特性和安全性<sup>[6]</sup>。本文采用一类非常简单且易于实现的混沌系统 Logistic 映射产生混沌序列，以控制水印嵌入的

具体位置，并采用 Arnold 变换对  $N \times N$  的水印进行空域置乱。因此提高了系统的安全性，增强了水印抗几何剪切的鲁棒性。Logistic 映射和 Arnold 变换的定义分别用(3)式和(4)式表示。由(3)式产生的双极性实数值混沌序列  $x = \{x(i) | x(i) \in [-1, 1], 1 \leq i \leq N \times N \times L\}$  经公式(5)变换可得到二值混沌序列  $X = \{X(i) | X(i) \in \{0, 1\}, 1 \leq i \leq N \times N \times L\}$ 。

$$x_{n+1} = 1 - \mu x_n^2, \mu \in [0, 2], x_n \in [-1, 1] \quad (3)$$

$$\begin{pmatrix} x_{i+1} \\ y_{i+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \end{pmatrix} \pmod N \quad (4)$$

$$X_k = \text{ceil} \left( \frac{x_k + 1}{2} - 0.5 \right), k = 0, 1, \dots, N \quad (5)$$

## 2 基于医学图像中感兴趣区域的数字水印算法

### 2.1 水印嵌入算法

医学图像中包含重要病理特征及诊疗信息，将以病理特征及诊疗信息为中心的区域记为 ROI，该区域以外的部分称为非感兴趣区域，记为 NROI。图 3 给出了水印嵌入的过程。

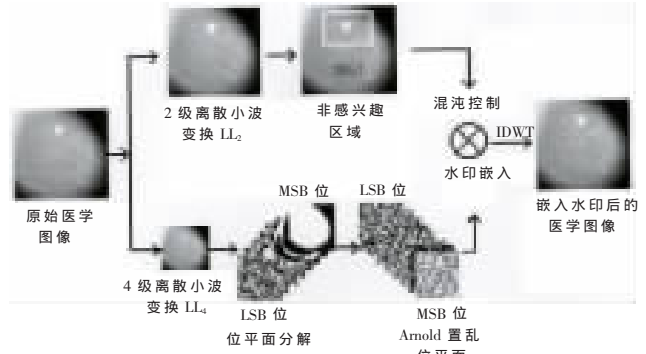


图3 水印嵌入过程

#### 2.1.1 水印信号生成

首先采用 haar 小波对原始医学图像  $M$  进行四级小波分解，提取能量最高且集中原图主要病理特征的低频近似系数  $LL_4$  进行归一化处理映射在  $[0, 2^{L-1}]$  内；然后对其进行二值分解并对分解产生的 8 个位平面进行 Arnold 变换，增强水印抗几何剪切的鲁棒性，得到待嵌入的水印信号  $W$ 。

#### 2.1.2 水印信号的嵌入

首先采用 haar 小波对  $M$  进行二级小波分解，提取近似系数  $LL_2$ ，并在密钥 Alpha 控制下由(3)式和(5)式生成一个二值混沌序列  $P$ ，在其控制下按以下规则将水印信号  $W$  嵌入在  $LL_2$  的 NROI 区域：

$$(1) \text{ if } P(i, j) = 1 \& W(i, j) \approx \beta^{b_1}(i, j)$$

$$\beta^{b_1}(i, j) = W(i, j)$$

$$\beta(i, j) = \sum_{l=1}^L \beta^l(i, j) \times 2^l$$

$$(2) \text{ if } P(i, j) = 0 \& W(i, j) \approx \beta^{b_2}(i, j)$$

$$\beta^{b_2}(i, j) = W(i, j)$$

$$\beta(i, j) = \sum_{l=1}^L \beta^l(i, j) \times 2^l$$

(3)  $LL_2 = \beta$

式中,  $\beta = \text{uint8}(\frac{LL_2(i,j)}{\max(\max(LL_2))} \times 255)$

$$\beta^{b_1}(i,j) = [\beta(i,j)/2^{b_1}] \bmod 2$$

$$\beta^{b_2}(i,j) = [\beta(i,j)/2^{b_2}] \bmod 2 \quad b_1, b_2 \in [1, L]$$

然后对修改后的各层小波系数进行逆变换得到嵌入水印以后的图像  $M_w$ 。

### 2.2 水印提取算法

水印提取如图 4 所示。首先采用 haar 小波对嵌入水印后的图像  $M_w$  进行二级小波分解, 得到近似系数  $LL_2'$ ; 然后利用与嵌入过程相同的密钥 Alpha 生成二值混沌序列  $P'=P$ , 在其控制下从  $LL_2'$  的 NROI 区域按以下规则提取水印:

- (1) if  $P'(i,j) == 1$   
 $W'(i,j) = [\beta'(i,j)/2^{b_1}] \bmod 2$   
 else  
 $W'(i,j) = [\beta'(i,j)/2^{b_2}] \bmod 2$   
 end

(2) 对提取出的二值序列  $W'$  进行 Arnold 反置乱, 得到  $W'_1$ 。

(3) 运用公式 (2) 将二值信号合成为提取出的灰度水印  $w'$

$$w'(i,j) = \sum_{i=1}^L W'_1(i,j) \times 2^i, \quad w'(i,j) \in [0, 255]$$

式中,  $\beta' = \text{uint8}(\frac{LL_2'(i,j)}{\max(\max(LL_2'))} \times 255)$ ,  
 $b_1, b_2 \in [1, L]$

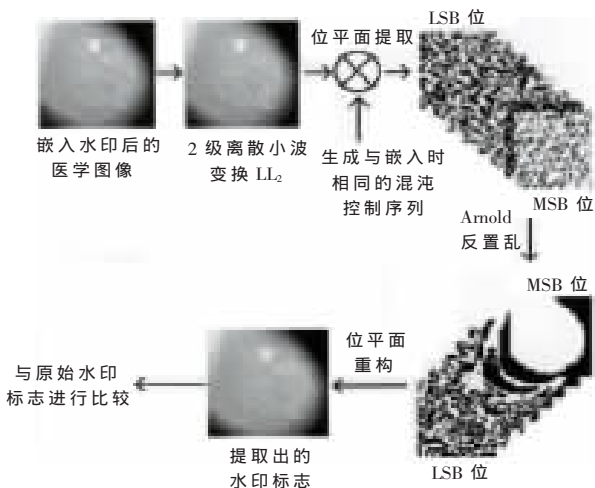


图 4 水印提取过程

### 3 仿真结果及分析

本文选取 512×512 的医学用乳腺 X 光片作为宿主图像, 水印标志为 32×32 的 256 灰度级有意义图像。实验中各项参数值为: 混沌密钥 Alpha=0.2845, Arnold 位平面置乱迭代均为 10 次。表 1 给出了水印系统在不同形式攻击下的 PSNR 和 NC 值。图 5 给出了水印攻击及检测结果。图 6 给出了本算法与参考文献[4]算法的透明性和鲁棒性的比较曲线, 其中 data1 为本算法实验数据, data2 为参考文献[4]实验数据。

从以上实验结果可以看出, 经过改进的算法在保证较高透明性的前提下, 抗 JPEG 有损压缩的性能明显增强, 此外对其他的一些攻击, 如噪声、恶意篡改、几何剪切等, 尤其是对医学 ROI 的攻击都具有良好的鲁棒性。

本文利用基于人眼视觉特性的小波变换的时频分析特性所提出的算法, 在保护医学 ROI 的同时提高了水印抗 JPEG 压缩的鲁棒性, 并实现了盲检测, 且算法复杂度低、计算量小, 对篡改、几何剪切、滤波等均具有良好的鲁棒性和透明性, 混沌序列增强了系统的安全性, 较好地满足了医学图像认证这一应用领域的特殊要求, 因此具有较强的实用性。

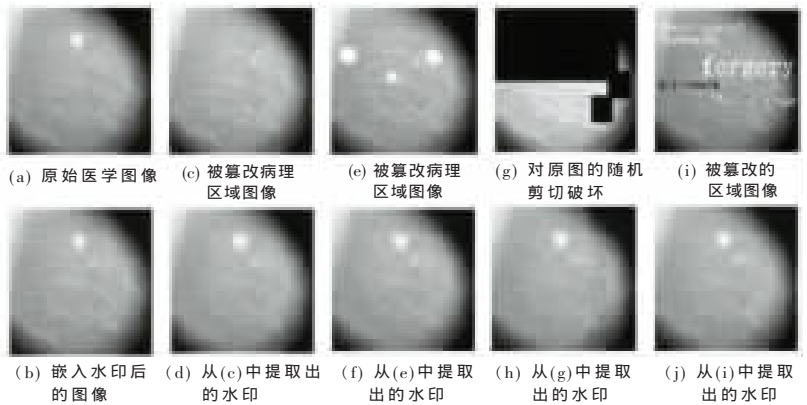


图 5 水印攻击及检测图

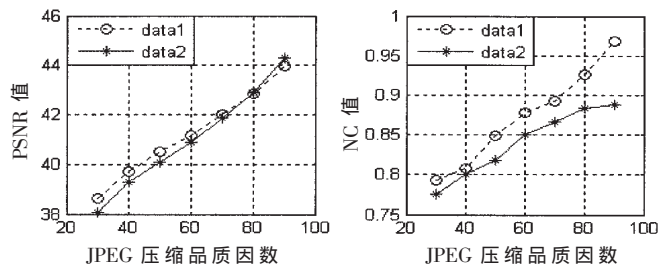


图 6 与参考文献[4]算法的抗 JPEG 压缩水印鲁棒性比较

表 1 医学图像水印透明性及鲁棒性实验结果

	JPEG 品质因子						盐椒噪声	中值滤波	恶意篡改 (c)	恶意篡改 (e)	恶意篡改 (i)	随机剪切 (g)	
	90	80	70	60	50	40							30
PSNR	43.973 6	42.855 6	41.980 6	41.152 5	40.508 8	39.703 2	38.631 7	20.639 9	37.546 2	33.969 4	26.382 9	18.758 8	7.132 0
NC	0.968 0	0.925 6	0.893 0	0.878 4	0.848 2	0.808 3	0.792 4	0.940 7	0.943 9	1.000 0	1.000 0	0.999 4	0.988 1

(接上页)

### 参考文献

- [1] 孙圣和,陆哲明,牛夏牧,等.数字水印技术及应用[J].北京:科学出版社,2004.
- [2] A medical image watermarking scheme based on wavelet transform [J]. Proceedings of the 25th Annual International Conference of the IEEE EMBS Cancun, Mexico, September 17-21, 2003:856-859.
- [3] WAKATANI A. Digital Watermarking for ROI medical images by using compresses signature image [J]. HICSS, 2002, 157.
- [4] LEE H K, KIM H J, KWON K R, et al. Digital watermarking of medical image using ROI information[J]. Enterprise Networking and Computing in Healthcare Industry, 2005:HEALTHCOM 2005: Proceedings of 7th International Workshop on 23-25 June 2005:404-407.
- [5] MASUDE N, AIHARA K. Cryptosystems with discretized chaotic maps[J]. IEEE Transactions on Circuits and systems-I: Fundamental theory and Applications, 2002, 149(1).
- [6] 陈永红,黄席樾.基于混沌映射和矩阵奇异分解的公开数字水印技术[J].计算机仿真,2005,22(1):138-141.

(收稿日期:2006-08-25)