

# 自适应大容量医学图像可逆数据隐藏算法

黄斌<sup>1</sup>, 史亮<sup>2</sup>, 邓小鸿<sup>3\*</sup>, 陈志刚<sup>3</sup>

(1. 莆田学院 电子信息工程系, 福建 莆田 351100; 2. 厦门大学 软件学院, 福建 厦门 361005;  
3. 中南大学 信息科学与工程学院, 长沙 410083)

(\* 通信作者电子邮箱 dxh\_lizi@sohu.com)

**摘要:** 提出了一种新的医学图像无损数据隐藏算法, 根据医学图像特点, 将隐秘信息分别嵌入在感兴趣区域和非感兴趣区域中。在非感兴趣区域中, 采用自适应整数变换方法增大嵌入容量并控制失真; 在感兴趣区域, 采用最低有效位替换方法控制水印图像质量。实验结果表明, 算法的嵌入容量在 1.2 bpp 到 1.7 bpp 之间, 而峰值信噪比保持在 43 dB 左右。与现有相关算法相比, 嵌入容量具有明显优势并保持较高的图像质量。另外, 本方法计算复杂度低, 能方便应用于实际的医学信息系统中。

**关键词:** 可逆数据隐藏; 医学图像; 整数变换; 最低有效位; 感兴趣区域

**中图分类号:** TP391.41 **文献标志码:** A

## Adaptive high-capacity reversible data hiding algorithm for medical images

HUANG Bin<sup>1</sup>, SHI Liang<sup>2</sup>, DENG Xiao-hong<sup>3\*</sup>, CHEN Zhi-gang<sup>3</sup>

(1. Electronic Information Engineering Department, Putian University, Putian Fujian 351100, China;

2. School of Software, Xiamen University, Xiamen Fujian 361005, China;

3. School of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha Hunan 410083, China)

**Abstract:** A new reversible data hiding algorithm for medical images was proposed. The hidden information was embedded into Region Of Interest (ROI) and non-interest respectively. In ROI, an adaptive integer transform scheme was employed to enhance the embedding capacity and control distortions. And in Region of Non-Interest (RONI), the classical Least Significant Bit (LSB) method was used to keep the marked image's quality. The experimental results show that, compared with previous works, the performance of the proposed method has been significantly improved in terms of capacity and image quality. The proposed method's embedding capacity is between 1.2 bpp and 1.7 bpp, while the Peak Signal-to-Noise Ratio (PSNR) can maintain the 43 dB or so. Moreover, the proposed method with high run efficiency can be applied into the practical hospital information system.

**Key words:** reversible data hiding; medical image; integer transform; Least Significant Bit (LSB); Region of Interest (ROI)

## 0 引言

无损数据隐藏当隐秘数据被提取后, 原始载体能被无损恢复<sup>[1-5]</sup>。计算机网络的普及、医疗信息系统 (Hospital Information System, HIS) 及图像存储和通信系统 (Picture Archiving and Communication Systems, PACS) 的快速发展, 加速了远程诊断应用。越来越多的医学信息 (如电子病历和诊断图像) 开始在公网上传输, 病人的隐私受到了极大的挑战。数据隐藏技术将电子病历嵌入到相关的医学图像中, 一方面节省了 HIS 的存储空间; 另一方面增强了病人数据的机密性和节省了传输带宽。医学图像可逆数据隐藏的主要性能需求包括高嵌入容量、高图像质量和低计算复杂度。其中, 嵌入容量和图像质量成反比关系, 须选取折中方案, 即在可接受的图像质量范围内寻求更高的嵌入容量。低的计算复杂度保证了方法的实用性, 能与现有的 HIS 和 PACS 相结合。

大多数无损数据隐藏方法以自然图像为实验载体<sup>[6-8]</sup>, 其方法主要是利用经典的整数变换方法。虽然这些方法能较

好地移植到医学图像中来, 但是均忽略了医学图像自身的特点。目前专门针对医学图像的无损数据隐藏方法较少, 文献 [9-10] 将整数变换方法应用到医学图像中, 并重点解决了医学图像可逆数据隐藏中的溢出问题, 但嵌入容量偏低。文献 [11-12] 提出了医学图像分区域的特点, 即由感兴趣区域 (Region Of Interest, ROI) 和非感兴趣区域 (Region Of Non-Interest, RONI) 组成, 前者是医学诊断的重点依据, 后者则通常由黑色的背景区域组成。本文利用 RONI 存在大量平滑区域的特点, 提出利用自适应性大容量整数变换算法<sup>[13]</sup> 提高嵌入容量, 对于敏感度高的 ROI 区域, 采用最低有效位 (Least Significant Bit, LSB) 算法<sup>[14-15]</sup> 减少失真。实验证明, 本文的方法能较好地满足大容量和高质量的需求。另外, 算法实施简单, 运行效率较高。

## 1 自适应整数变换方法

自适应整数变换是根据当前图像块的特征动态地选择嵌入强度, 如在平滑区域嵌入更多的信息, 而在纹理结构复杂区

收稿日期: 2012-04-25; 修回日期: 2012-05-28。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61103202); 国家重点实验室 2011 年度开放基金资助项目 (SKLST201113); 福建星火科技项目 (2010S0017); 莆田市科技项目 (2011G04-2)。

作者简介: 黄斌 (1981-), 男, 福建莆田人, 讲师, 硕士, CCF 会员, 主要研究方向: 网络与信息安全; 史亮 (1973-), 男, 福建厦门人, 副教授, 博士, 主要研究方向: 网络与信息安全; 邓小鸿 (1982-), 男, 湖北天门人, 讲师, 博士研究生, CCF 会员, 主要研究方向: 数字水印; 陈志刚 (1964-), 男, 湖南益阳人, 教授, 博士, CCF 高级会员, 主要研究方向: 信息安全。

域则相反。设原始图像块用  $X$  表示  $X = \{x_i | i = 0, \dots, n\}$ ，隐秘信息为  $W = \{w_i | i = 1, \dots, n\}$ ，嵌入信息后图像块用  $Y = \{y_i | i = 0, \dots, n\}$  表示，则整数变换公式如下：

$$\begin{cases} y_0 = kx_0 - \alpha_{n,k}(X) \\ y_1 = kx_1 - \alpha_{n,k}(X) + w_1 \\ \vdots \\ y_n = kx_n - \alpha_{n,k}(X) + w_n \end{cases} \quad (1)$$

其中： $k$  是整数， $\alpha_{n,k}(X)$  是一个与  $X$  相关的常量， $w_i \in [0, 1, \dots, k-1]$ 。式(2)给出了衡量隐秘图像质量的峰值信噪比 (Peak Signal-to-Noise Ratio, PSNR) 的计算公式，可以得出图像质量与均方误差 (Mean Square Error, MSE) 相关，通过嵌入引发的 MSE 可用式(3)表示。

$$\begin{cases} PSNR = 10 \lg(255 \times 255 / MSE) \\ MSE = 1 / (N \times N) \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (y_i - x_i)^2 \end{cases} \quad (2)$$

$$MSE = (y_0 - x_0)^2 + (y_1 - x_1)^2 + \dots + (y_n - x_n)^2 = (kx_0 - \alpha_{n,k}(X) - x_0)^2 + (kx_1 - \alpha_{n,k}(X) + w_1 - x_1)^2 + \dots + (kx_n - \alpha_{n,k}(X) + w_n - x_n)^2 \quad (3)$$

将式(3)展开可知 MSE 是关于  $\alpha_{n,k}(X)$  的一元二次函数，为了使 MSE 值最小，则可得到  $\alpha_{n,k}(X)$  的值，如式(4)所示：

$$\alpha_{n,k}(X) = \text{floor} \left( \left( 2(k-1) \sum_{i=0}^n x_i + (k-1)n / 2(n+1) \right) \right) \quad (4)$$

这里 floor 表示向下取整。将式(4)带入到式(1)中，可得到式(5)和(6)，分别用于原始图像块像素的恢复和隐秘信息提取。

$$x_i = y_0 + \text{floor} \left( \frac{k-1}{n+1} \sum_{j=1}^n \text{floor} \left( \frac{y_j - y_0}{k} \right) + \frac{n(k-1)}{2(n+1)} \right) + \text{floor} \left( \frac{y_i - y_0}{k} \right) \quad (5)$$

$$w_i = y_i - kx_i + \alpha_{n,k}(X) \quad (6)$$

文献[13]中将式(4)中  $\alpha_{n,k}(X)$  的取值近似为  $\text{floor} \left( 2(k-1) \sum_{i=0}^n x_i / 2(n+1) \right)$ ，则式(4)可简化为  $\alpha_{n,k}(X) \approx (k-1) \bar{x}$ ， $\bar{x}$  代表块  $X$  中像素的均值，将其代入到式(3)中可得到 MSE 的简化表达式如下：

$$MSE = \sum_{i=0}^n (y_i - x_i)^2 \approx \sum_{i=0}^n (kx_i - (k-1)\bar{x} - x_i)^2 = (k-1)^2 \nu(X);$$

$$\nu(X) = \sum_{i=0}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (7)$$

从式(7)可以得出，当原始图像块确定后  $k$  的值可以根据当前像素值的方差和 PSNR 的规定值进行动态调整。如给定  $PSNR \geq 30$  dB， $\nu(X) = 4$  时  $k_{\max} = 5$ 。

考虑到实际医学图像特点，RONI 区域存在大量平滑区域，其像素值均值接近于 0，所以文献[13]对  $\alpha_{n,k}(X)$  的近似并不适合于医学图像，只有当  $k \leq 3$  时近似成立。文本的处理方法如下：当块像素方差大于等于阈值  $V$  (设为 4) 时  $k = 2$ ，反之  $k = 4$ 。改进理由是一方面严格控制了隐秘图像的失真 ( $PSNR \geq 30$  dB)，另一方面减少了文献[11]中循环查找最优  $k$  值的过程，提高了算法效率。当然对于嵌入过程中可能会发

生溢出的块，取  $k = 1$ ，即当前块不嵌入水印。对于 8 bit 位深度图像，判断溢出公式如下所示。

$$\begin{cases} 0 \leq kx_0 - \alpha_{n,k}(X) \leq 255 \\ 0 \leq kx_n - \alpha_{n,k}(X) + k - 1 \leq 255 \end{cases} \quad (8)$$

## 2 自适应大容量整数变换方法

### 2.1 算法总体模型

图 1 给出了算法的嵌入模型，算法的提取是嵌入的逆过程，限于篇幅没有给出，其执行过程在 2.3 节中详细描述。图 1 中相关说明如下：隐秘数据分为两部分嵌入，一部分和 RONI 区域中的  $k$  值信息一起采用 LSB 替换方法嵌入在 ROI 区域中；另一部分和 ROI 区域中原始的 LSB 信息采用自适应整数变换嵌入在 RONI 区域中。为了提高算法安全性，隐秘信息长度、ROI 区域坐标和 LSB 信息的长度等作为嵌入密钥分发。为了便于算法描述，引入表 1 所示符号。

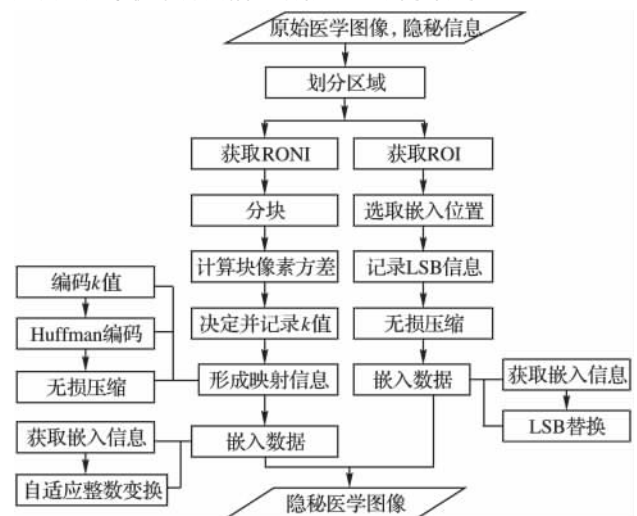


图 1 算法嵌入模型

表 1 算法中使用的相关符号表

符号	含义	符号	含义
$I$	原始医学图像	$I_w$	嵌入后医学图像
$M$	隐秘数据	$M_1$	嵌入在 ROI 数据
$M_2$	嵌入在 RONI 数据	$S_{LSB}$	RONI 区域最低有效位
$B_k$	$k$ 值的二进制序列	$H_{Bk}$	Huffman 编码后 $k$ 值
$LC\_H\_Bk$	无损压缩后映射信息	$LC\_S_{LSB}$	无损压缩后 LSB 信息
$X$	RONI 中分块集合	$Key$	RONI 区域嵌入密钥
$m^*n$	分块尺寸	$Y$	隐秘 RONI 中分块集合
$Num\_ROI$	ROI 区域像素个数	$Num\_B$	RONI 区域分块总数

### 2.2 数据嵌入

数据嵌入步骤如下：

- 1) 将  $I$  划分为 ROI 和 RONI 区域，划分可由专科医生指定，记录下 ROI 区域坐标信息，如四边形区域，需记录下四个顶点坐标；
- 2) 将 RONI 区域划分成互不重叠的  $m^*n$  块，得到  $X$ ；
- 3) 根据式(7)计算  $X$  块中像素值的方差  $\nu(X)$ ，决定当前块嵌入强度  $k$ ，根据式(8)判断是否溢出，如果溢出则当前  $k = 1$ ，依次记录下  $k$  值信息；
- 4) 将记录下的  $k$  值信息进行编码得到  $B_k$ ，进行 Huffman 编码得到  $H_{Bk}$ ，采用无损压缩方法如算术编码 AC 压缩得到  $LC\_H\_Bk$ ， $Length(LC\_H\_Bk)$  代表其长度；
- 5) 获得 ROI 区域最低有效位集合  $S_{LSB}$ ，采用无损压缩方

法得到  $LC_{S_{LSB}}$   $Length(LC_{S_{LSB}})$  代表其长度;

6) 将  $M$  划分成  $M_1$  和  $M_2$ ,  $M_2$  的长度为  $Num\_ROI$  与  $Length(LC\_H\_Bk)$  的差;

7) 采用 LSB 替换方法将  $LC\_H\_Bk$  和  $M_2$  嵌入到 ROI 中;

8) 采用式 (1) 中的整数变换算法将  $M_1$  和  $LC_{S_{LSB}}$  嵌入

到 RONI 区域中;

9) 得到隐秘图像  $I_w$ 。

值得注意的是,出于算法安全性和盲提取的需要,将  $M$  的长度、ROI 区域坐标、分块尺寸、Huffman 字母表、 $Length(LC\_H\_Bk)$  和  $Length(LC_{S_{LSB}})$  作为解密密钥  $Key$ 。

### 2.3 数据提取与图像恢复

数据提取与图像恢复过程如下:

1) 获取密钥  $Key$ , 得到 ROI 和 RONI 区域、 $M$  的长度、分块尺寸、Huffman 字母表、 $Length(LC\_H\_Bk)$  和  $Length(LC_{S_{LSB}})$ ;

2) 读取  $I_w$  中 ROI 区域最低有效位, 得到  $LC\_H\_Bk$  和  $M_2$ ;

3) 解压  $LC\_H\_Bk$  并 Huffman 解码得到  $Bk$  信息;

4) 将 RONI 区域划分成互不重叠的  $m \times n$  块, 得到  $Y$ ;

5) 按照式 (5) 和 (6) 恢复像素和提取隐秘数据, 得到恢复后  $X$  隐秘数据  $LC_{S_{LSB}}$  和  $M_1$ ;

6) 解压  $LC_{S_{LSB}}$  得到 ROI 区域原始最低有效位  $S_{LSB}$ ;

7) 采用 LSB 替换方法还原得到恢复后 ROI;

8) 重组 RONI 和 ROI 区域得到恢复后图像。

算法所需嵌入的数据负载就是 ROI 区域的最低有效位个数, 设 ROI 区域的尺寸为  $H \times W$ , 由于图像相邻像素间的高相关性, 采用算术编码进行无损压缩后  $Length(LC_{S_{LSB}})$  远远小于  $Length(H \times W)$ 。另外  $Key$  的大小主要由三个长度信息、分块尺寸 (8 bit)、Huffman 字母表 (最大仅需 12 bit 表示) 和 ROI 区域坐标 (每个点 18 bit, 最大 72 bit) 组成。设  $M$  的长度为 30 bit,  $Length(LC\_H\_Bk)$  和  $Length(LC_{S_{LSB}})$  均为 20 bit, 整个  $Key$  信息仅需要 162 bit, 不会造成大的通信负载。关于 RONI 区域中分块尺寸选择问题, 在第 3 章的实验中会给出详细的讨论。最后, 由于 LSB 算法的安全性偏低, 在 ROI 中可随机选择嵌入开始位置增加算法的安全性。

## 3 实验结果与讨论

为了证明算法的可行性, 实验中选取了大量的不同类型的医学图像做了实验, 均得到了较好的实验结果。限于篇幅, 选取四种不同类型的四幅图像作为载体 (均为  $512 \times 512 \times 8$  bit, JPG 格式) 说明, 如图 2 所示, 图中白色四边形是对应图像的 ROI 区域 (均由专科医生指定)。需要说明的是, 通常直接从医学设备上获取的图像为 DICOM 格式, 图像数据部分占 12 bit, 为了节省存储空间和诊断方便, 通常将图像数据部分转化为 JPG 格式存储。实验中所用图像均来自于中南大学湘雅医学院数据中心, 所有实验数据均来自于 Matlab7.0 仿真结果。

为了说明最优的分块尺寸, 实验中选取的分块尺寸分别取  $2 \times 2$   $3 \times 3$   $4 \times 4$   $6 \times 6$ , 图 3 给出了 MRI\_skull 图像在不同尺寸下的数据嵌入容量。从前面所得的嵌入容量公式  $n/(n+1) \lg k$  可得如下结论: 当分块尺寸越大, 嵌入容量越大; 但是当分块尺寸越大时, 图像块像素的方差会越大, 这时

出于图像质量的控制  $k$  值会减小。图 3 中数据验证了前面的结论, 当分块尺寸上升到  $4 \times 4$  时, 嵌入容量和图像质量最好, 但当尺寸进一步上升时, 嵌入容量反而下降, 在其他图像的测试中也得到相同的结论, 所以分块尺寸选择  $4 \times 4$ 。

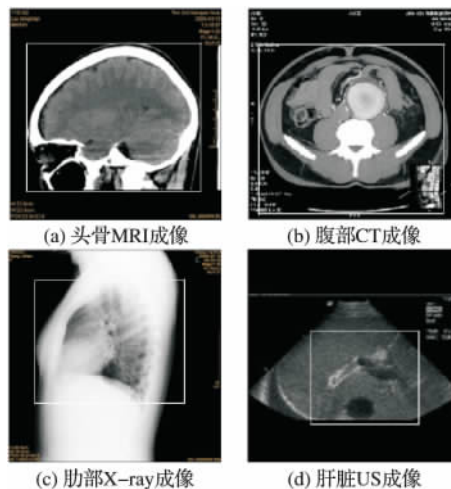


图 2 实验中采用的医学图像

图 4 给出了四幅测试图像在不同嵌入容量下的峰值信噪比 (Peak Signal-to-Noise Ratio, PSNR)。很明显, 图像的嵌入容量与 ROI 区域的大小成反比, 另外与 ROI 区域和 RONI 区域的平滑程度都有关系。ROI 区域越平滑, 图像块像素方差越小,  $k$  值越大, 嵌入数据越多; RONI 区域越平滑, LSB 的压缩效果更好, 从而减少嵌入数据的负载。US\_Liver 具有较多的平滑 RONI 区域, 嵌入容量最大, CT\_Abdomen 具有较少的 RONI 区域, 并且 ROI 区域纹理复杂, 嵌入容量最小。其次, 所有载体图像的 PSNR 值均大于 43 dB, 本文方法在获得较高容量下的同时保证了图像质量。

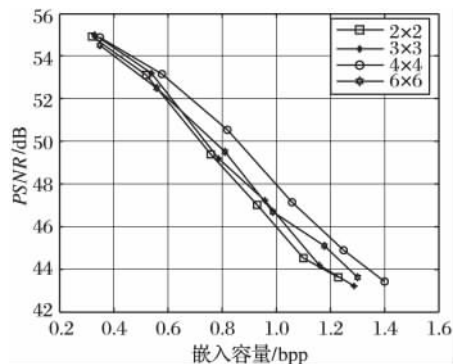


图 3 MRI\_Skull 图像在不同尺寸下的嵌入容量

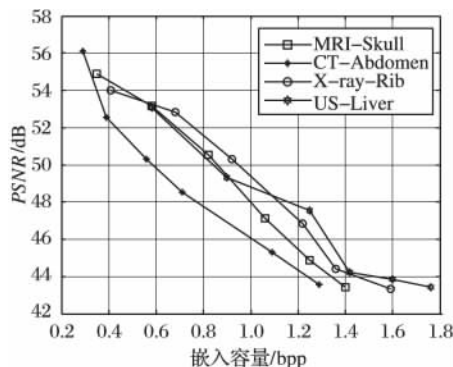


图 4 四幅载体图像在不同嵌入容量下的 PSNR

表 2 给出了本文方法和文献 [9 - 10] 的比较结果, 表中

给出了单轮次嵌入时不同载体图像最大嵌入容量时的 PSNR 值。文献 [9] 利用  $2 \times 2$  块中的 3 个像素嵌入数据, 文献 [10] 在其基础上进行改进增加了嵌入容量, 但均小于 0.75 bpp。本文方法的嵌入容量是文献 [10] 的 2~3 倍, PSNR 值仅降低了不到 2 dB。

表 2 与文献 [8-9] 方法的性能比较

载体图像	文献 [8] 方法		文献 [9] 方法		本文方法	
	容量/ bpp	PSNR/ dB	容量/ bpp	PSNR/ dB	容量/ bpp	PSNR/ dB
MRI_Skull	0.313	43.18	0.488	44.39	1.394	43.43
CT_Abdomen	0.534	42.58	0.627	43.99	1.278	43.58
X-Ray_Rib	0.310	44.39	0.553	44.82	1.577	43.33
US_Liver	0.453	43.07	0.631	43.70	1.763	43.42

## 4 结语

信息隐藏技术在数字医学信息中发挥着越来越重要的作用, 本文提出了一种自适应和高容量的医学图像信息隐藏方法, 将隐秘信息分别嵌入在感兴趣区域和非感兴趣区域中。对于诊断敏感的 ROI, 采用失真度较低的 LSB 替换算法保证图像质量; 对于 RONI, 采用自适应的整数变换增大嵌入容量。实验结果验证了本方法的优越性, 但方法仍有不完善地方, 如 ROI 区域的获取需要医生指定, 如何自动获取 ROI 将是下一步的工作重点。

### 参考文献:

- [1] 刘东彦, 刘文波, 张弓. 图像内容可恢复的半脆弱水印技术研究[J]. 中国图象图形学报, 2010, 15(1): 20-25.
- [2] 曾晓, 陈真勇, 陈明, 等. 基于零系数索引的可逆图像水印[J]. 计算机研究与发展, 2010, 47(7): 1304-1312.
- [3] 李立宗, 顾巧论, 高铁杠. 基于公钥的可逆数字水印[J]. 计算机应用, 2012, 32(4): 971-975.
- [4] YANG QUNTING, GAO TIGANG, LI FAN. Reversible robust data hiding scheme based on histogram shifting in multi-wavelet domain[J]. International Journal of Advancements in Computing Technology, 2011, 3(5): 185-193.

(上接第 2778 页)

信息的嵌入, 并且可以快速地从文档中提取出水印信息, 为 PDF 文档的信息隐藏和数字版权保护提供了新思路。实验证明该算法水印容量能满足数字版权保护的要求, 隐蔽性好, 执行速度快, 对 PDF 文档的版权保护具有较好实用价值。

### 参考文献:

- [1] 周继军, 杨著, 钮心忻, 等. 文本信息隐藏检测算法研究[J]. 通信学报, 2004, 25(12): 97-101.
- [2] BRASSIL J T, LOW S, MAXEMCHUK N F. Copyright protection for the electronic distribution of text documents[J]. Proceedings of the IEEE, 1999, 87(7): 1181-1196.
- [3] ZOU DEKUN, SHI Y Q. Formatted text document data hiding robust to printing, copying and scanning[C]// ISCAS'05: Proceedings of 2005 IEEE International Symposium on Circuits and Systems. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2005: 4971-4974.
- [4] 舒后, 何薇, 齐亚莉. 基于文本文档的版权保护技术——文本数字水印的研究[J]. 计算机应用与软件, 2006, 23(7): 30-32.
- [5] 龚琳. 基于 PDF 的数字文件管理与信息隐藏技术[J]. 兰台世界, 2009(2): 20-21.
- [6] 程玉柱, 邱春荣, 胡伏湘. 数字水印的研究进展与应用综述[J].

- [5] PENG FEI, LEI YU-ZHOU, LONG MIN, *et al.* A reversible watermarking scheme for two-dimensional CAD engineering graphics based on improved difference expansion[J]. Computer-Aided Design, 2011, 43(8): 1018-1024.
- [6] TIAN J. Reversible data embedding using a difference expansion[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2003, 13(8): 890-896.
- [7] ALATTAR A M. Reversible watermark using the difference expansion of a generalized integer transform[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2004, 13(8): 1147-1156.
- [8] CHEN C C, TSAI Y H. Adaptive reversible image watermarking scheme[J]. The Journal of Systems and Software, 2011, 84: 428-434.
- [9] TAN C K, NG J C, XU X T, *et al.* Security protection of DICOM medical images using dual-layer reversible watermarking with tamper detection capability[J]. Journal of Digital Imaging, 2011, 24(3): 528-540.
- [10] DENG X H, CHEN Z G, DENG XH, *et al.* A novel dual-layer reversible watermarking for medical image authentication and EPR hiding[J]. Advanced Science Letters, 2011, 4(11): 3678-3684.
- [11] GUO X T, ZHUANG T G. A region-based lossless watermarking scheme for enhancing security of medical data[J]. Journal of Digital Imaging, 2009, 22(1): 53-64.
- [12] 田平平, 刘丽, 陈玉婷. 基于曲线聚类的动态 PET 影响感兴趣区域提取新方法[J]. 计算机应用, 2012, 32(2): 535-550.
- [13] PENG F, LI X L, YANG B. Adaptive reversible data hiding scheme based on integer transform[J]. Signal Processing, 2012, 92(1): 54-62.
- [14] FRIDRICH J, GOLJAN M, LISONEK P, *et al.* Writing on wet paper[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2005, 53(10): 3923-3935.
- [15] KIM KS, LEE M J, LEE H Y, *et al.* Reversible data hiding exploiting spatial correlation between sub-sampled images[J]. Pattern Recognition, 2009, 42(1): 3083-3096.

长沙民政职业技术学院学报, 2010, 17(2): 122-125.

- [7] Adobe Systems Incorporated. PDF reference (Version 1.7) [EB/OL]. [2006-11]. <http://www.adobe.com>.
- [8] 张浩, 钟尚平. 一种以文本内容为载体的信息隐藏技术[J]. 微处理机, 2010, 31(3): 39-42.
- [9] 刘友继, 孙星明, 罗刚. 一种新的基于 PDF 文档结构的信息隐藏算法[J]. 计算机工程, 2006, 32(17): 230-232.
- [10] 钟尚平, 陈铁睿. 基于 PDF 文档作为掩体的信息隐写方法[J]. 计算机工程, 2006, 32(3): 161-163.
- [11] 严智萍, 朱更明. 文本数字水印技术研究[J]. 计算机安全, 2007(12): 15-17.
- [12] 王坤, 杨峰. 数字水印技术综述[J]. 计算机安全, 2010(3): 59-61.
- [13] 朱香卫, 肖亮, 吴慧中. 数字图像水印性能评估指标的研究[J]. 通信技术, 2009, 42(1): 256-258.
- [14] 马秀莹, 林家骏. 数字水印系统性能评价研究的现状与展望[J]. 计算机工程与设计, 2009, 30(22): 5233-5238.
- [15] 毛颖. 数字水印攻击及对策分析[J]. 信息安全与技术, 2012, (2): 15-17.