

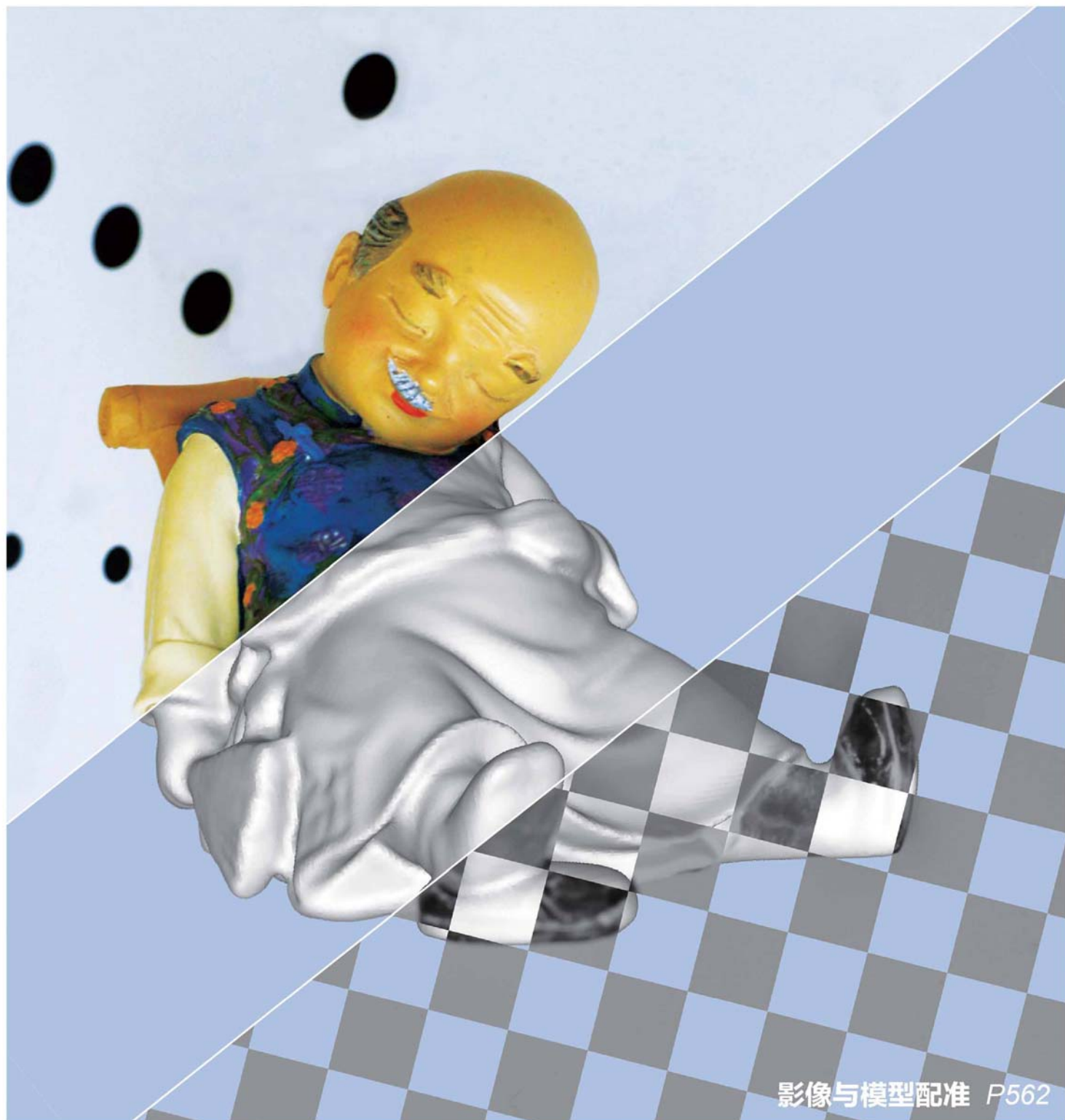


主办: 中国科学院遥感与数字地球研究所
中国图象图形学学会
北京应用物理与计算数学研究所

中国图象图形学报

2014
04
VOL.19

ISSN1006-8961
CN11-3758/TB



影像与模型配准 P562



第19卷第4期（总第216期）

2014年4月16日

中国精品科技期刊
中国国际影响力优秀学术期刊
中国科技核心期刊

版权声明

凡向《中国图象图形学报》投稿，均视为同意在本刊网站及CNKI等全文数据库出版，所刊载论文已获得著作权人的授权。本刊所有图片均为非商业目的使用，所有内容，未经许可，不得转载或以其他方式使用。

Copyright

All rights reserved by Journal of Image and Graphics, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS. The content (including but not limited text, photo, etc) published in this journal is for non-commercial use.

主管单位 中国科学院

主办单位 中国科学院遥感与数字地球研究所
中国图象图形学学会
北京应用物理与计算数学研究所

主 编 李小文

编辑出版《中国图象图形学报》编辑出版委员会

邮政信箱 北京9718信箱

邮 编 100101

电子信箱 jig@irsa.ac.cn

电 话 010-64807995

网 址 www.cjig.cn

广告经营许可证 京朝工商广字第0361号

总 发 行 北京报刊发行局

订 购 全国各地邮局

海外发行 中国国际图书贸易集团有限公司
(邮政信箱：北京399信箱 邮编：100048)

印刷装订 北京科信印刷有限公司

Journal of Image and Graphics

Title inscription: Song Jian

Monthly, Started in 1996

Superintended by Chinese Academy of Sciences

Sponsored by Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS
China Society of Image and Graphics

Institute of Applied Physics and Computational Mathematics

Editor-in-Chief LI Xiaowen

Editor, Publisher Editorial and Publishing Board of Journal of
Image and Graphics

P.O.Box 9718, Beijing, P.R.China

Zip code 100101

E-mail jig@irsa.ac.cn

Telephone 010-64807995

Website www.cjig.cn

Distributed by Beijing Bureau for Distribution of Newspapers and Journals

Domestic All Local Post Offices in China

Overseas China International Book Trading Corporation
(P.O.Box 399, Beijing 100048, P.R.China))

Printed by Beijing Kexin Printing Co., Ltd.

CN 11-3758/TB

ISSN 1006-8961

CODEN ZTTXFZ

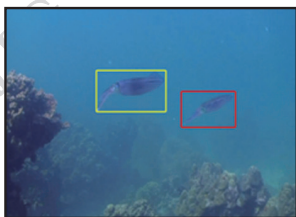
国外发行代号 M1406

国内邮发代号 82-831

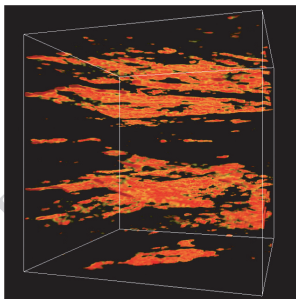
国内定价 50.00元



面泊松融合结合色彩变换的无缝纹理辐射处理(第512页)



融合视觉深度的特征计算与水下目标跟踪(第534页)



针对全空子数据体的GPU体绘制(第577页)

图像处理和编码

- 梯度矢量扩散控制实现边缘保持的彩色图像去噪
贾迪, 孟祥福, 张一飞, 董娜, 李思慧 0493
- 联合矩阵F范数的低秩图像去噪
刘新艳, 马杰, 张小美, 胡钊政 0502
- 面泊松融合结合色彩变换的无缝纹理辐射处理
周漾, 郑顺义, 黄荣永, 马电 0512
- 改进的局部方向模式纹理表示方法
刘海军, 常东超, 张凌宇 0520
- 图像插值空间大容量可逆数字水印算法
王继军 0527

图像分析和识别

- 融合视觉深度的特征计算与水下目标跟踪
王慧斌, 程勇, 陈哲 0534
- 融合颜色属性和空间信息的显著性物体检测
徐丹, 唐振民, 徐威 0541
- 采用人工鱼群的改进广义Hough变换目标定位
李志, 谢强 0549
- 非规则弯曲形变的不变量表示
李国祥, 夏国恩 0556

图像理解和计算机视觉

- 小物体3维重建中影像与几何模型的配准
郑顺义, 王晓南 0562
- 像素聚类改进二进制描述子鲁棒性
惠国保, 李东波 0569

计算机图形学

- 针对全空子数据体的GPU体绘制
李国和, 段忠祥, 吴卫江, 洪云峰, 刘智渊, 程远 0577

医学图像处理

- 基于无损水印的医学图像篡改检测和质量恢复
邓小鸿, 陈志刚, 毛伊敏 0583

遥感图像处理

- 特征点和不变矩结合的遥感图像飞机目标识别
曾接贤, 付俊, 符祥 0592
- 结合稀疏识别的自适应Wallis滤波在高分辨率影像控制点匹配中的应用
耿蕾蕾, 孙权森, 纪则轩, 刘佑鑫, 袁凯 0603

第9届和谐人机环境联合学术会议专栏

- 局部特征点的3维模型变换域水印算法
张建明, 周小梅, 王新宇, 詹永照 0613
- 足球视频搜索引擎中的用户偏好挖掘
胡雨成, 于俊清, 黄贤强, 何云峰, 管涛 0622
- 随机亮度差量化的二进制特征描述
庄东晔, 张冬明, 张勇东, 李锦涛 0630
- L_1 优化在网格去噪中的应用
王鹏, 王胜法, 曹俊杰, 李楠楠, 李波, 苏志勋 0637
- 多视点视频双向实时转码技术的设计与实现
孙立峰, 蔡飞飞, 杨士强 0645

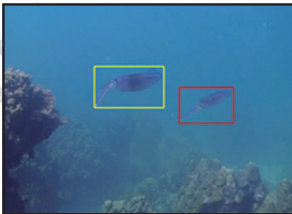
- 第五届数字地球高峰论坛征文通知 封三

CONTENTS

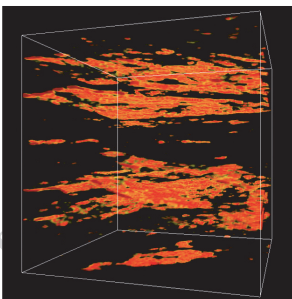
JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS



Face-wise Poisson blending with color transfer in seamless texturing(P512)



Visual depth based feature calculation and underwater target tracking(P534)



GPU-based volume rendering for full-empty subdata blocks(P577)

Image Processing and Coding

Edge preserving denoising of color image through controlling the gradient vector Jia Di, Meng Xiangfu, Zhang Yifei, Dong Na, Li Sihui	0493
Image denoising of low-rank matrix recovery via joint Frobenius norm Liu Xinyan, Ma Jie, Zhang Xiaomei, Hu Zhaozheng	0502
Face-wise Poisson blending with color transfer in seamless texturing Zhou Yang, Zheng Shunyi, Huang Rongyong, Ma Dian	0512
Improved local directional pattern texture descriptor Liu Haijun, Chang Dongchao, Zhang Lingyu	0520
High capacity reversible watermarking for image interpolation space Wang Jijun	0527

Image Analysis and Recognition

Visual depth based feature calculation and underwater target tracking Wang Huibin, Cheng Yong, Chen Zhe	0534
Combining color names with spatial information for salient object detection Xu Dan, Tang Zhenmin, Xu Wei	0541
Improved generalized Hough transform using artificial fish swarm algorithm in target location Li Zhi, Xie Qiang	0549
The global descriptor for bending non-rigid shapes Li Guoxiang, Xia Guoen	0556

Image Understanding and Computer Vision

Images and geometric model registration in 3D reconstruction of small objects Zheng Shunyi, Wang Xiaohan	0562
Robust descriptor structured by pixel clustering Hui Guobao, Li Dongbo	0569

Computer Graphics

GPU-based volume rendering for full-empty subdata blocks Li Guohe, Duan Zhongxiang, Wu Weijiang, Hong Yunfeng, Liu Zhiyuan, Chen Yuan	0577
--	------

Medical Image Processing

Lossless watermarking algorithm for medical image's tamper detection and recovery with high quality Deng Xiaohong, Chen Zhigang, Mao Yimin	0583
---	------

Remote Sensing Image Processing

Aircraft target recognition in remote sensing images based on distribution of the feature points and invariant moments Zeng Jiexian, Fu Jun, Fu Xiang	0592
Adaptive enhancement via sparse recognition for automatic control point extraction in high-resolution images Geng Leilei, Sun Quansen, Ji Zexuan, Liu Jixin, Yuan Kai	0603

Special Issue on HHME 2013

Transform domain watermarking scheme of 3D models based on local feature points Zhang Jianming, Zhou Xiaomei, Wang Xinyu, Zhan Yongzhao	0613
User preference mining for soccer video search engine Hu Yucheng, Yu Junqing, Huang Xianqiang, He Yunfeng, Guan Tao	0622
Novel binary feature from intensity difference quantization Zhuang Dongye, Zhang Dongming, Zhang Yongdong, Li Jintao	0630
The application of l_1 -optimization in mesh denoising Wang Peng, Wang Shengfa, Cao Junjie, Li Nannan, Li Bo, Su Zhixun	0637
The design and implementation of real time MVC transcoding Sun Lifeng, Cai Feifei, Yang Shiqiang	0645

中图法分类号: TP391.9 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2014)04-0583-09

论文引用格式: 邓小鸿, 陈志刚, 毛伊敏. 基于无损水印的医学图像篡改检测和质量恢复[J]. 中国图象图形学报, 2014, 19(4): 583-591.
 [DOI:10.11834/jig.20140413]

基于无损水印的医学图像篡改检测和质量恢复

邓小鸿^{1,2,3}, 陈志刚^{2,3}, 毛伊敏¹

1. 江西理工大学应用科学学院, 赣州 341000;
2. 中南大学信息科学与工程学院, 长沙 410083;
3. 中南大学移动医疗实验室, 长沙 410083

摘要: **目的** 采用无损数字水印算法对医学图像进行篡改检测和恢复是一个重要的研究领域。针对现有方法在区域划分和块特征值选取上的不足, 提出一种新的基于四叉树分解和线性加权插值技术的无损水印算法。**方法** 首先对原始的医学图像进行四叉树分解, 得到非固定尺寸且具有高同质性的图像块; 然后利用线性加权插值方法计算每个图像块的特征值作为水印信息, 最后采用基于混沌的简单可逆整数变换进行水印嵌入。**结果** 在提取端当水印图像没有受到篡改时, 原始的图像能被无损恢复; 当受到篡改时, 算法能精确定位篡改区域并能高质量恢复, 采用本文算法恢复的图像质量较现有方法高出 20 dB 左右。另外, 在水印图像遭到较大程度篡改时, 本文算法的正检率和负检率均优于现有方法。**结论** 实验结果表明, 本文算法相比现有方法具有更高的嵌入容量、篡改检测精确性、恢复图像质量。算法适用于医学图像的完整性认证和篡改检测中。

关键词: 无损数字水印; 医学图像; 四叉树分解; 线性插值; 篡改检测

Lossless watermarking algorithm for medical image's tamper detection and recovery with high quality

Deng Xiaohong^{1,2,3}, Chen Zhigang^{2,3}, Mao Yimin¹

1. College of Applied Science, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China;
2. College of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;
3. Mobile Medical Laboratory, Central South University, Changsha 410083, China

Abstract: **Objective** With the rapid development of telemedicine and online diagnosis, more and more precious medical images have been transmitted through the open network, and the security problem of medical images has been taken much attention by many researchers. The integrity authentication of transmitted medical image is a key step in information protection. Watermarking technology is generally regarded as an effective method for integrity authentication. However, like other quality-sensitive images such as medical imagery, any slight distortions are not acceptable, because the distortion may cause wrong diagnosis. Therefore, using lossless watermarking method for medical image's tamper detection and recovery is a very important research field. Aiming at the existent algorithm's defects in region division and block's features chosen, a new lossless watermarking method based on quad-tree decomposition and linear weight interpolation is presented in this paper. **Method** First, the quad-tree decomposition is used to divide the original medical image into flexible size blocks with high homogeneity. Because this division method can reduce the length of feature value, much more information can be em-

收稿日期: 2013-08-27; 修回日期: 2013-09-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(61272494, 41362015); 江西省自然科学基金项目(20122BAB201045); 江西理工大学校级科研基金项目(jxxj12149)

第一作者简介: 邓小鸿(1982—), 男, 讲师, 中南大学信息科学与工程学院计算机应用专业博士研究生, 中国计算机学会会员, 主要研究方向为网络与信息安全、医学图像处理。E-mail: dxh_lizi@sohu.com

bedded. Then a new linear weight interpolation method is used to compute each block's features as watermark information in our method. Because in existent methods, the mean used of the block's pixels are used as recovery feature for each block, the tampered regions occurring in the low frequency region of an image (usually, the image's texture complex area), it is not the best choice for restoring all tampered pixels with mean values, because it will reduce the quality of the recovered image. Finally, in order to reduce the embedding and extraction algorithm's complexity and enhance watermarking method's security, these features are embedded by using simple invertible integer transformation based on chaos. The introduction of chaos system improves the presented method's security. **Result** In order to test the presented method's validity, we test some performance properties including reversibility, embedding capacity, watermarked and recovered image's quality, and the detection accuracy rate. The experimental results show that the original image can be recovered with any distortion if the watermarked image was not been tampered, otherwise the tampered region can be localized and recovered with high similarity in the extracting procedure. Compared with the existent method, the embedding capacity is obviously prior to the similar method and the recovered image's quality using our method is about 20 dB higher. In addition, when the watermarked image is tampered to a large degree, the right detection rate and wrong detection rate is obviously better than the existent method. Since all the algorithms are open to the public, we introduce the logistic chaotic mapping to select the reference pixel's position in watermark embedding procedure. Due to the initial sensitivity and randomness, an adversary cannot obtain the correct watermark embedding positions easily if the initial parameters of logistic mapping are secret. **Conclusion** Experimental results show that, compared with previous similar schemes, the presented method not only achieves high embedding capacity and good visual quality of restored image, but also has more accuracy for tampering detection. The presented method can be applied to realize medical image's integrity authentication and tampering detection.

Key words: lossless watermarking; medical image; quad-tree decomposition; linear interpolation; tamper detection

0 引言

在区域医疗信息共享中,如远程诊断的应用,除了要能证明原始医学图像的真实来源外,对传输过程中图像的完整性进行认证也十分重要^[1]。医学图像的完整性认证又称为篡改检测,早期的篡改检测算法只对图像的篡改与否进行判断,而目前的篡改检测算法要求对篡改区域进行精确定位和近似恢复。图像的认证算法大致可以分为基于数字签名的方法和基于水印的方法两种,前者属于早期的篡改检测算法,利用 hash 函数的高敏感性使得方法具有较高的检测精度,但不能进行篡改区域的定位^[2]。近来,基于无损数字水印的篡改检测策略被提出来,特别适应于质量敏感的图像载体,如医学图像和军事图像中^[3-6]。当水印图像未受到篡改时,原始的图像能被无损恢复;反之,借助提取的水印信息能精确定位篡改的区域,并能无损或近似地恢复出篡改区域。

大部分基于无损数字水印的篡改检测算法均将图像进行固定尺寸分块,然后选取块的特征值作为水印嵌入在图像块中。如果图像受到篡改,则重新计算出来的块特征与提取的水印信息不匹配,实现篡改检测的定位。Chiang 等人^[7]将图像进行 4×4

的分块,并选取每块的均值作为恢复特征值,然后采用基于差值扩展的无损数字水印方法将特征值嵌入。Guo 等人^[8]将图像首先进行 2×2 的分块,然后采用 hash 函数计算每块的认证信息作为水印嵌入,为了提高检测精确性,方法可将分块后的每个图像块进行多级划分。Li 等人^[9]将图像划分成重要区域和背景区域,然后针对重要区域采用 Chiang 等人方法实施认证。但固定块的划分方法存在着如下的弊端:1)篡改检测的精确性在于分块尺寸,尺寸越小越精确,但需要嵌入的水印信息更多;2)未能充分考虑图像自身像素之间的高相关性和区域特性,如医学图像中的感兴趣区域和非感兴趣区域的像素可能被划分在同一个块中。针对固定块方法中的不足,Kim 等人^[10]和 Deng 等人^[11]均提出了非固定块的划分方法,根据像素间自身的特性自适应进行分块尺寸选择,新的方法不仅充分考虑了医学图像的分区域特性,并且在嵌入容量和篡改检测精确性上具有优势。Kim 的方法采用块的均值作为恢复特征值,已经证明了在恢复图像中高频区域,即图像平滑区域时具有优势,但在恢复纹理复杂区域时存在恢复图像质量不高问题,另外,Kim 的方法易遭受保持均值的篡改攻击。本文重点对 Kim 的方法不足进行了改进,提出一种改进的基于四叉树分解和线性插值技术的医学图像篡改检测和恢复算法。算法提

出了采用块的线性加权插值技术获得特征值,有效抑制了保持均值的篡改攻击,并且在医学图像纹理复杂区域时具有明显优势。为了解决了 Kim 方法中选择参考子样图像时需要的循环计算问题,提出了新的基于混沌简单可逆整数变换方法来嵌入特征值,大大提高了算法执行效率。另外,混沌系统的引入也增强了水印算法的安全性。

1 相关技术介绍

1.1 图像四叉树分解

定义1 图像的四叉树表示。图像的四叉树表示法采用金字塔式的数据结构存储图像。四叉树的树根对应整幅图像,叶子节点对应单个像素或者是具有相同特征的像素组成的方阵,每个非叶子节点均有4个子节点。图1给出了一个具有3级结构的四叉树表示方法。

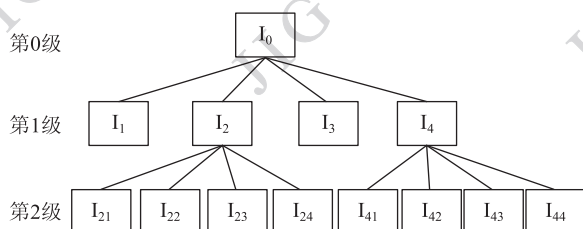


图1 图像的四叉树表示方法

Fig. 1 Image's quad-tree representation

图像的四叉树存储非常适合于方形图像和像素点的个数为2的整数次幂图像。四叉树由多级构成,树根在第0级,每分一次又多一级。对于一个有 n 级的四叉树,其节点总数 N 的最大值为

$$N_{\max} = \sum_{k=0}^n 4^k = (4^{n+1} - 1)/3 \approx \frac{4}{3} \times 4^n \quad (1)$$

定义2 图像的四叉树分解。图像的四叉树分解将一个方形图像划分为4个等尺寸的方形块,然后对4个方形块判别是否满足给定的同质性准则。如果当前块满足准则,保持不变,否则继续分解为4个方形块,并判定是否满足准则,直到所有的方形块满足给定的准则为止。默认的四叉树分解准则可表示为

$$p_{\max} - p_{\min} > (g_l - 1) \times \gamma \quad (2)$$

式中, $p_{\max}$ 和 $p_{\min}$ 分别代表方形块中的灰度值最大像素和最小像素, g_l 代表像素的灰度级数, γ 为一个值为 $[0,1]$ 的小数。默认准则为当方形块中的最大

像素与最小像素差值大于 $(g_l - 1) \times \gamma$ 时,方形块需要继续划分。图2给出了1幅MRI(核磁共振成像)脑部图像(尺寸为 512×512 ,灰度级为256)和它对应的四叉树分解图。从四叉树的分解方法来看,其属于不定尺寸的图像划分。并且从划分的结果来看,其分解得到的图像块中的像素具有高同质性,适合于进行无损信息隐藏。本文算法中规定最小的块尺寸为 2×2 。

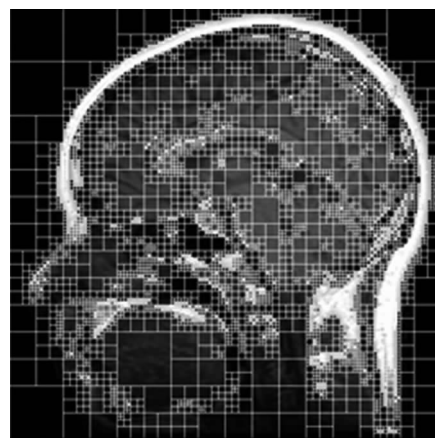


图2 图像的四叉树分解实例($\gamma=0.2$)

Fig. 2 Image's quad-tree decomposition($\gamma=0.2$)

对医学图像进行四叉树分解,可以充分利用像素块之间的相关性,另外的一个优势是特征值的长度。医学图像的特点是具有较多的连续背景区域,如果采用固定块划分方法和选取每块的均值作为特征值,为了实现篡改检测的精确性,设分块尺寸为 4×4 ,那么一共有16384块($512 \times 512 / 16$),每块需要8 bit存储空间,则特征值一共有131072 bit。采用四叉树分解,如图2所示分解结果一共是12097块,特征值一共有96776 bit,比固定块划分方法具有明显优势。

1.2 线性加权插值

Kim的方法中将图像块的均值作为特征值,存在两个问题:1)图像块的均值没有考虑像素间的相关性和块的纹理结构,当篡改区域纹理比较复杂或者像素间灰度差较大时,用均值作为该块所有像素的灰度值并不合适;2)选取块均值作为特征值容易遭受保持块均值的篡改攻击,一个攻击者极有可能通过简单修改块中的像素而使均值不变。算法采取了一个简单的线性加权插值技术来获取图像块的特征值。既然四叉树分解后的图像块具有高同质性,算法仅使用块中的一部分像素值来计算特征值是可

取的,针对块尺寸较大的区域,计算量具有优势。

定义3 图像块的线性加权特征值。图像块的线性加权特征值由块中对角像素的加权平均值表示,具体描述如下:

设 B 为方形图像块,其尺寸为 m 。设 $\mathbf{d}^{(1)}$ 和 $\mathbf{d}^{(2)}$ 分别是 B 中正负对角线上的像素值,分别表示为 $\mathbf{d}^{(1)} = [B(1,1), B(2,2), \dots, B(m,m)]$ 和 $\mathbf{d}^{(2)} = [B(1,m), B(2,m-1), \dots, B(m,1)]$, $\mathbf{x}$ 为正负对角线上的像素均值,表示为 $\mathbf{x} = (\mathbf{d}^{(1)} + \mathbf{d}^{(2)})/2$ 。图3给出了一个 4×4 像素块和它的正负对角像素。

$d_1^{(1)}$			$d_4^{(2)}$
	$d_2^{(1)}$	$d_3^{(2)}$	
	$d_2^{(2)}$	$d_3^{(1)}$	
$d_1^{(2)}$			$d_4^{(1)}$

图3 4×4 图像块的正负对角像素

Fig. 3 Image block's positive and negative diagonal pixels

设 $w_j (1 \leq j \leq 2)$ 代表 $\mathbf{d}^{(1)}$ 和 $\mathbf{d}^{(2)}$ 的权值,计算 B 的特征值

$$\mathbf{F}_i = \sum_{j=1}^2 w_j \mathbf{d}_{i,k}^{(j)} / (2 \times m) \quad (3)$$

$$1 \leq i \leq n, 1 \leq k \leq m$$

式中, $\mathbf{d}_{i,k}^{(j)}$ 表示第 i 个图像块中的对角线上元素, n 是图像块的总数, m 是当前方形图像块的尺寸。特征值集合 $\mathbf{F}$ 表示为 $\mathbf{F} = \mathbf{F}_n \oplus \mathbf{F}_{n-1} \oplus \dots \oplus \mathbf{F}_1$, $\oplus$ 代表拼接操作,将特征值反序排列主要是为了将当前块的特征值嵌入在其他块中。为了减小插值产生的误差,正负对角线上的像素权值至关重要。设 $\mathbf{D} = [\mathbf{d}^{(1)}; \mathbf{d}^{(2)}]$, 权值 $\mathbf{w}$ 为

$$\mathbf{w} = (\mathbf{D}\mathbf{D}^T)^{-1} \mathbf{D}\mathbf{x}^T \quad (4)$$

其推导过程如下:

设预测插值产生的误差为 $\mathbf{e}$, 可表示为

$$\mathbf{e}_i = \mathbf{x}_i - \mathbf{F}_i = \mathbf{x}_i - \sum_{j=1}^2 w_j \mathbf{d}_k^{(j)} / (2 \times m) \quad (5)$$

式中, $1 \leq i \leq m, 1 \leq k \leq m, m$ 为常数,在计算最佳权值时省略。权值的集合可以通过最小化预测插值的平方和得到,预测插值的平方和 E 可表示为

$$E = \sum_{i=1}^n \mathbf{e}_i^2 = \sum_{i=1}^n \left(\mathbf{x}_i - \sum_{j=1}^2 w_j \mathbf{d}_k^{(j)} \right)^2 \quad (6)$$

记 $\mathbf{X} = [\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_m]$, 那么 E 可表示为

$$E = \left\| \mathbf{X} - \sum_{j=1}^2 w_j \mathbf{d}_k^{(j)} \right\|^2 \quad (7)$$

式中, $\|\cdot\|$ 为向量的范数。使 E 最小也就是找到向量 $\mathbf{d}_k^{(j)}$ 的线性组合,使得其和最接近 $\mathbf{X}$,这可以通过查找向量 $\mathbf{X}$ 在向量 $\mathbf{d}_k^{(j)}$ 空间上的正交投影来得到,等价于得到正交于 $\mathbf{d}_k^{(j)}$ 的向量 $\mathbf{X} - \sum_{j=1}^2 w_j \mathbf{d}_k^{(j)}$,这两个正交向量的点积为零,可表示为

$$\mathbf{d}^{(h)} \cdot \left(\mathbf{X} - \sum_{j=1}^2 w_j \mathbf{d}_k^{(j)} \right) = 0, 1 \leq h \leq 2 \quad (8)$$

式(8)可变形为

$$\mathbf{d}^{(h)} \sum_{j=1}^2 w_j \mathbf{d}_k^{(j)} = \mathbf{d}^{(h)} \cdot \mathbf{X} \quad (9)$$

式(9)可用矩阵形式表示为

$$\mathbf{D}\mathbf{D}^T \mathbf{w} = \mathbf{D}\mathbf{X}^T \quad (10)$$

式中, $\mathbf{D} = [\mathbf{d}^{(1)}; \mathbf{d}^{(2)}]$, $\mathbf{w} = [w_1, w_2]^T$, 那么可推导出计算权值 $\mathbf{w}$ 的公式,如式(4)所示。

对于图像纹理平滑区域,采用线性加权插值方法获得的特征值与均值基本一致,然而,对于复杂区域,得到的特征值在恢复篡改区域时具有更高的图像质量,并且能有效抵抗保持均值攻击和提高篡改检测的精确性。后面的实验部分证明了这个结论。

1.3 基于混沌的可逆整数变换

基于混沌的可逆整数变换的基本思路是在每个图像块中利用混沌系统随机选择一个像素作为参考像素,然后根据块中其他像素与参考像素的关系嵌入水印。

1) 基于混沌的参考像素选择。算法采用效率较高的 logistic 混沌映射^[12] 选择块中参考像素 ref , 这里 ref 的值在数据嵌入过程中并不发生改变。选择方法为

$$\begin{cases} x_{k+1} = \mu x_k (1 - x_k) \\ index(ref) = \lfloor x_{k+1} \times m \times m \rfloor \end{cases} \quad (11)$$

式中, $0 < \mu \leq 4, x_{k+1} \in [0, 1], m \times m$ 是块的尺寸。 $index(ref)$ 为 ref 在块中的索引值(默认扫描顺序为从上到下,从左到右)。当 $3.569\,945\,6 < \mu \leq 4$ 时, x_{k+1} 的值呈现混沌状态,初值 x_k 和 μ 作为密钥能很好地保证 ref 的安全性,从而提高了水印算法的安全性。

2) 可逆整数变换。嵌入步骤如下:

(1) 对于图像块中除 ref 的任一像素 a , 如果 $|a - ref| < T$, 嵌入一位水印,即

$$\begin{cases} a_b = a + T & b(i) = 1 \\ a_b = a - T & b(i) = 0 \end{cases} \quad (12)$$

式中, T 是嵌入阈值,其值越大嵌入容量越大,嵌入

引入的失真也越大。 $\mathbf{b}$ 代表待嵌入的二进制数据流, $l(\mathbf{b})$ 代表其长度。 a_b 代表嵌入水印后的像素, $1 \leq i \leq l(\mathbf{b})$ 。否则转步骤 (2)。

(2) 对于满足 $|a - \text{ref}| \geq T$ 的像素进行调整, 即

$$\begin{cases} a_b = a + T & a \geq \text{ref} \\ a_b = a - T & a < \text{ref} \end{cases} \quad (13)$$

(3) 重复执行步骤 (1) (2), 直到所有块被处理完或者是待嵌入的数据已经嵌入完毕。

为了防止溢出, 必须确保水印像素满足

$$\begin{cases} a_b < 2^d - 1 \\ a_b > 0 \end{cases} \quad (14)$$

由于四叉树分解将灰度值相近的像素分在同一个块中, 对于像素值处于上边界或者下边界的图像块, 可将处于下边界 (像素值接近于 0) 的图像块向右平移, 设标志 $\delta = 1$; 将处于上边界的图像块向左移, $\delta = -1$; 将 δ 值作为水印负载嵌入, 用于图像块中像素的无损恢复。

假设图像的四叉树分解结果和 logistic 混沌映射的初始参数 x_k, μ 已知, 数据提取和像素恢复步骤如下:

1) 根据 x_k 和 μ 得到每个像素块中的参考像素 ref , 判断块中其他像素与 ref 的关系, 如果 $a_b \geq \text{ref}$, 则 $a_r = a_b - T$, 反之 $a_r = a_b + T$, a_r 为恢复后像素;

2) 判断 a_r 与 ref 的关系, 如果 $a_b \geq \text{ref}$ 且 $|a_r - \text{ref}| < T$, 则提取 1, 如果 $a_b < \text{ref}$ 并且 $|a_r - \text{ref}| < T$ 则提取 0;

3) 重复执行步骤 1) 2), 直到所有块被处理完毕, 或者水印已经提取完毕。

1.4 基于无损压缩的 LSB 替换

最低有效位 (LSB) 置换是多媒体数字水印领域最简单的方法之一, 为了正确提取数据和无损恢复图像像素, 原始图像的四叉树分解信息 (表示为 q , 其长度为 $l(q)$) 必须提供给提取方。本文算法将四叉树分解信息采用基于无损压缩的 LSB 替换算法嵌入, 无损压缩算法为熟知的游程编码 (RLC), RLC 用来在原始图像的 LSB 数据流中产生额外的嵌入空间来存储 q , 设 n_A 为图像像素集合 $(I_1, I_2, \dots, I_n)$ 中像素的个数。使用式 (15) 产生嵌入 q 的空间。

$$l(q) + l(R_{\text{RLC}}(P_{\text{LSB}}(I_1, I_2, \dots, I_n))) = n_A \quad (15)$$

式中, $P_{\text{LSB}}(I_1, I_2, \dots, I_n)$ 是 $I_1, I_2, \dots, I_n$ 的最低有效位平面, $R_{\text{RLC}}(P_{\text{LSB}}(I_1, I_2, \dots, I_n))$ 为采用 RLC 方法将

$P_{\text{LSB}}(I_1, I_2, \dots, I_n)$ 压缩后的结果。一旦嵌入空间产生, 则将 q 和 $P_{\text{LSB}}(I_1, I_2, \dots, I_n)$ 嵌入。

既然四叉树分解后的每个图像块可用 $2^n \times 2^n$ 形式表示, 可将每块的尺寸信息转化为二进制形式。分块尺寸和对应的二进制如表 1 所示。

表 1 四叉树分解后图像块的尺寸编码

Table 1 Image block's code after quad-tree decomposition

尺寸/像素	编码	尺寸/像素	编码
2 × 2	000	32 × 32	100
4 × 4	001	64 × 64	101
8 × 8	010	128 × 128	110
16 × 16	011	256 × 256	111

考虑到分解为大尺寸的块数较少, 根据不同尺寸块出现的频率可以使用 Huffman 编码进一步减小 q 的长度, 表示为 $\text{Huf}(q)$ 。

2 算法实施

2.1 算法模型

水印嵌入分两级进行, 第 1 级用于嵌入特征值, 第 2 级用于将图像的认证码和四叉树分解信息嵌入在第 1 级水印图像中。第 1 级数据嵌入过程如图 4 所示。首先对原始图像进行四叉树分解, 记录下分解后每块的尺寸信息; 然后利用线性插值技术求每个图像块的特征值, 根据特征值数量设定嵌入阈值 T , 采用基于混沌系统的可逆整数变换嵌入。

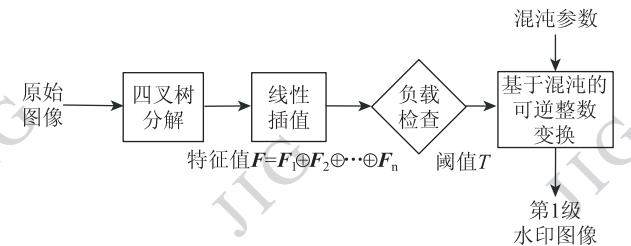


图 4 第 1 级嵌入过程图

Fig. 4 The procedure of first level embedding

第 2 级水印嵌入如图 5 所示。首先将记录的四叉树分解信息进行 Huffman 编码, 与第 1 级水印图像认证码、阈值 T 一起利用基于无损压缩的 LSB 替换算法嵌入在第 1 级水印图像中, 得到第 2 级水印图像。

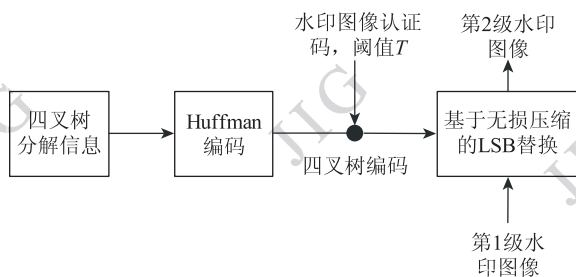


图5 第2级嵌入过程图

Fig. 5 The procedure of second level embedding

水印的提取过程如图6所示。首先从第2级水印图像中采用LSB提取算法得到第1级水印图像的认证码和四叉树分解信息,重新计算恢复出的第1级水印图像的认证码,如果与提取的一致则说明图像未篡改,采用可逆整数变换提取出嵌入的特征值,并恢复出原始图像。否则进行篡改区域定位与区域恢复。

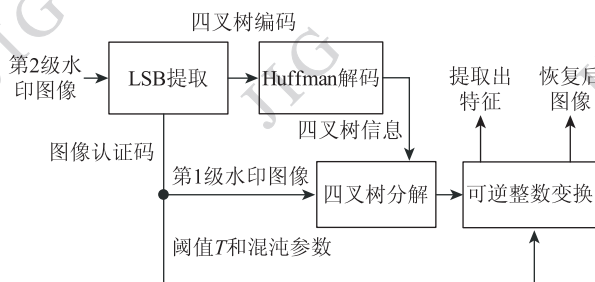


图6 数据的提取过程

Fig. 6 The procedure of data extraction

篡改检测与篡改区域恢复过程如图7所示。篡改检测与区域恢复过程如下:首先根据得到的四叉树分解信息重新对恢复后图像进行分解,利用线性插值技术重新计算特征值,与提取出的特征值逐一进行比对,如果不同则证明当前块被篡改,用提取出的对应块的特征值进行近似恢复。

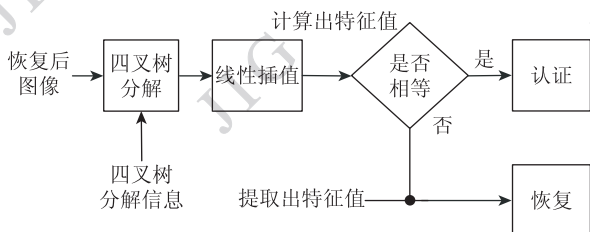


图7 篡改检测与篡改区域恢复过程

Fig. 7 The procedure of tampering region detection and recovery

2.2 水印嵌入

水印嵌入详细步骤如下:

1) 设定参数 γ , 对原始图像进行四叉树分解, 记录下分解后每块的尺寸 (默认顺序从上到下, 从左到右), 即四叉树分解信息 q ;

2) 采用线性加权插值技术求每块图像的特征值, 得到总的特征值 F , 表示为 $F = F_n \oplus F_{n-1} \oplus \dots \oplus F_1$;

3) 将 F 转换为二进制形式作为第1级水印信息 w_1 , 注意第1个图像块的特征值最后嵌入;

4) 根据 w_1 的长度设定嵌入阈值 T ;

5) 设定 logistic 混沌系统的初始参数 x_k 和 μ , 利用基于混沌的可逆整数变换嵌入 w_1 ;

6) 得到第1级水印图像 I_{w_1} ;

7) 采用 MD5 (Message Digest 5) 算法得到 I_{w_1} 的128位认证码 M-128;

8) 将四叉树分解信息 q 进行 Huffman 编码得到 $Huf(q)$, 与阈值 T 和 M-128 形成第2级水印信息 w_2 ;

9) 采用基于无损压缩的 LSB 替换算法将 w_2 嵌入在 I_{w_1} 中, 为了实施对第1级水印图像的保护, 可重复嵌入认证码, 确保每一个像素的最低有校位进行数据嵌入, 得到第2级水印图像 I_{w_2} 。

为了算法的安全性, 将参数 x_k 和 μ 、 $Huf(q)$ 的长度和编码表以密钥方式发送给接收方。

2.3 水印提取、篡改检测与恢复

假设参数 x_k 和 μ 、 $Huf(q)$ 的长度和编码表已知, 详细步骤如下:

1) 用 LSB 提取算法提取 I_{w_2} 的隐秘数据并恢复出第1级水印图像 I_{w_1} , 得到第1级水印图像的认证码、阈值 T 和 $Huf(q)$;

2) 重新利用 MD5 算法计算 I_{w_1} 的认证码, 与提取出的认证码进行比较, 如果相同对原始图像进行无损恢复 (执行步骤3), 否则进行篡改检测与恢复 (执行步骤3)~(7));

3) 根据阈值 T 、 x_k 和 μ , 利用基于混沌的可逆整数变换提取特征值 F 和恢复图像 I_R ;

4) 对 $Huf(q)$ 进行解码得到四叉树分解信息 q ;

5) 根据 q 将 I_R 进行分解;

6) 采用线性加权插值技术求每块图像的特征值, 得到新的特征值 F' , $F' = F'_1 \oplus F'_2 \oplus \dots \oplus F'_n$;

7) 将 F 和 F' 逐一进行比对, 则能定位篡改区域, 如果第 j 块受到篡改, 则用该块提取的特征值 F_j 恢复篡改区域。

3 算法性能分析

3.1 性能指标

图像篡改检测算法的性能主要通过四个指标衡量:篡改检测精确性、嵌入容量、隐秘图像质量和篡改恢复图像的质量。

1) 篡改检测精确性通过以下两个方面指标计算:

(1) 正检率 (TPR), 即正确检测出发生篡改的块占所有篡改块总数的比率;

(2) 负检率 (FNR), 即错误检测出发生篡改的块占所有篡改块总数的比率。

2) 算法的嵌入容量。为了更好地与其他篡改检测算法相比较, 算法的嵌入容量仅计算第1级可嵌入特征值的数据量。本文算法的嵌入容量与嵌入阈值 T 和四叉树分解参数 γ 相关, 当 γ 越小, 分块尺寸越多, 图像块像素间的相关性越大, 阈值 T 选取的自由性大。一般情况下 γ 越小, 阈值 T 越小。对于医学图像, 通过设定合理的参数 γ 和阈值 T , 算法的嵌入容量的值域在 $(0.75 \text{ bit/像素}, 1 \text{ bit/像素})$ 之间, 下限代表所有的分块为 2×2 块, 上限代表所有的分块接近于 256×256 。

3) 隐秘图像的质量。隐秘图像的质量与阈值 T 直接相关, 为了保证不引起大的失真, $T \leq 6$ 。一种极端的情况就是所有像素均调整了6个灰度级, 根据 PSNR 峰值信噪比的计算公式, 最小的 $\text{PSNR}_{\min} = 10 \times \lg(255 \times 255 / 36)$ 为 32.75 dB。

算法的篡改检测精确性和篡改区域恢复后的图像质量通过稍后的实验结果给出。

3.2 实验结果与讨论

实验中随机选取了100幅 512×512 的 DICOM 格式的医学图像作为实验对象 (均来自于中南大学湘雅医学院数据中心), 限于篇幅, 以其中6幅为例说明, 如图8所示。实验重点是对提出算法的可逆性、嵌入容量、隐秘图像质量、篡改检测精度和篡改区域恢复后的图像质量进行比较。实验结果均来自于 Matlab7.0 工具的仿真数据, 实验设计方案如下: 1) 算法的可逆性, 即在水印图像未受到篡改时恢复图像与原始图像的一致性进行测试; 2) 对载体图像的四叉树分解情况、嵌入阈值、容量和隐秘图像质量进行测试; 3) 对本文采用的可逆整数变换方法与相类似方法进行性能比较; 4) 对篡改区域的恢复图像

质量与 Kim 的方法进行比较; 5) 对篡改检测的精确性与 Kim 的方法进行比较。在水印图像未受到篡改时, 提取出的认证码与重新计算的一致, 并且最后恢复出来的图像与原始图像一致, 证明了算法的可逆性。

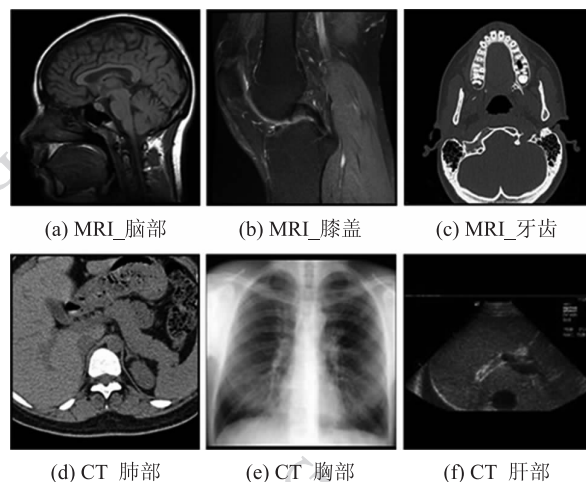


图8 6幅 DICOM 格式的医学诊断图像

Fig. 8 Six cover medical images with DICOM format

6幅 DICOM 格式的载体图像的四叉树分解情况、嵌入阈值 T 、嵌入容量和隐秘图像的质量如表2所示。注意, 表2中列出的嵌入容量仅仅是采用可逆整数变换时可嵌入的特征值数量。从表2中可以看出, 随着分解参数 γ 和载体图像本身纹理结构的不同, 四叉树分解后的块数是不一样的, 造成待嵌入的特征值数量不同。如果每个块的特征值转化为8 bit 的二进制, 根据表2中总的块数和容量可以看出, 通过选取合适的阈值 T 可以得到充足的嵌入容量将特征值的二进制流全部嵌入。因本文采用的可逆整数变换与 Deng 的方法^[3]一样, 故表3中给出了两种方法在嵌入容量和隐秘图像质量上的不同, 测试图像选取了同样的两幅图像 (MRI_脑部和 US_肝部图像)。从表3可以看出, 本文算法在嵌入容量上明显优于 Deng 的方法, 因为 Deng 的方法采用固定块划分 (尺寸为 2×2), 在当前块纹理比较复杂时, 其他像素与参考像素的差大于阈值无法用来嵌入水印, 而本文算法经过四叉树分解得到的图像块具有高的同质性, 其他像素与参考像素的差较小, 更多的像素用于嵌入数据。从嵌入容量上来看, 与固定块的方法相比, 四叉树分解能充分考虑图像自身的纹理结构, 是将图像分块的较好选择。在隐秘图像质量上, MRI_脑部图像纹理比较复杂, Deng 的方

法将较多像素调整了一个阈值的幅度,造成隐秘图像质量较小,本文方法虽然嵌入了更多的信息但是隐秘图像质量均优于 Deng 的方法。然而对于纹理比较平滑的 US_肝部图像,本文算法在嵌入更多数据的过程中,使得更多的像素进行了调整,隐秘图像质量低于 Deng 的方法。

表 2 6 幅载体图像的四叉树分解结果、
阈值 T 、嵌入容量和 PSNR

Table 2 The result of quad-tree decomposition,
threshold T , embedding capacity and PSNR

载体图像	r	总块数	阈值 T	容量/bit	PSNR/dB
MRI_脑部	0.002 7	7 764	4	140 706	38.453
MRI_膝盖	0.002 5	4 350	3	82 288	41.004
MRI_牙齿	0.005 9	8 084	5	126 928	39.690
CT_肺部	0.005 0	4 478	5	73 876	39.446
Xray_胸部	0.006 9	9 516	4	152 351	36.855
US_肝部	0.001	10 887	3	183 717	40.911

表 3 本文算法和文献[3]的嵌入容量和 PSNR 比较

Table 3 The comparison of embedding capacity and
PSNR between literature [3] and our method

载体图像	文献[3]		本文算法	
	容量/bit	PSNR/dB	容量/bit	PSNR/dB
MRI_脑部 $T=1$	61 730	49.941	69 280	50.425
MRI_脑部 $T=3$	118 531	40.444	120 915	40.939
MRI_脑部 $T=5$	147 744	36.035	155 389	36.522
US_肝部 $T=1$	117 222	50.726	130 550	50.416
US_肝部 $T=3$	159 573	41.287	183 717	40.911
US_肝部 $T=5$	176 822	36.914	209 138	36.501

为了证明本文算法在特征值选择上的优势,着重和 Kim 的方法^[10]比较了在篡改区域恢复图像的质量,实验结果在图 9 中给出。图 9(a)为原始 MRI_脑部图像,图 9(b)为四叉树分解图($r=0.002\ 7$),图 9(c)为篡改发生在区域(288,112,32,32)的图像,质量 PSNR = 30.069 dB,图 9(d)为篡改发生在区域(192,352,24,24)的图像,质量 PSNR = 33.092 dB,图 9(e)为采用 Kim's 的方法恢复图 9(c)中的篡改区域后的图像,质量 PSNR = 51.719 dB,图 9(f)为使用本文算法恢复图 9(c)中的篡改区域后的图像,质量 PSNR = 51.746 dB,图 9(g)为采用 Kim 的方法恢复图 9(d)中的篡改区域后的图像,质量 PSNR = 52.123 dB,图 9(h)为使用本文算法恢复图 9(d)中

的篡改区域后的图像,质量 PSNR = 70.658 dB。

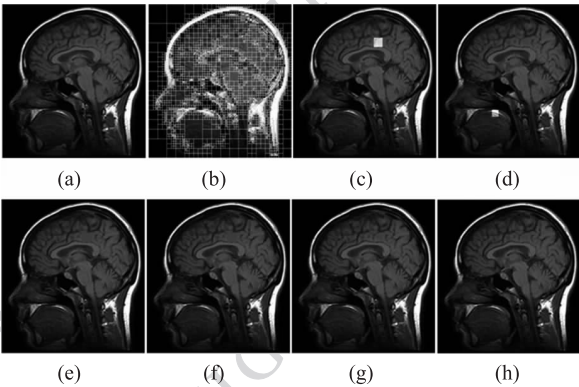


图 9 MRI_脑部图像的篡改和恢复结果

Fig. 9 The tampering and recovery result of MRI_Skull image

在图 9(c)中,篡改发生区域在图像的较平滑地带,(288,112,32,32)表示为从坐标点(288,112)开始的 32×32 图像块。既然 Kim 的方法和本算法在平滑区域得到的特征值基本相同,两种方法恢复后的图像质量在图 9(e)(f)中基本一致。但是在图 9(d)中,篡改区域发生在纹理较复杂的区域(192,352,24,24),恢复出图像质量相差较大。从图 9(g)(h)中的 PSNR 值可以看到,显然本文提出的采用线性加权插值所求特征值明显优于均值算法,这是因为线性插值方法充分考虑到了像素之间的相关性。

为了测试算法的篡改检测精确性,实验中对 MRI_脑部的隐秘图像进行了篡改。具体的修改方法如下:随机选择一定数量的 32×32 的块,对其像素进行修改,修改时保持该块的均值不变,如将一半像素增加一个灰度级,而另外一半像素减去一个灰度级。图 10 给出了 50 次实验后本文算法和 Kim 方法的篡改检测精确度的平均值。图 10(a)为正检率 TPR 的均值,图 10(b)则是负检率 FNR 的均值。从图 10 中可以看出,随着篡改图像块数的增大,Kim 方法中正检率 TPR 开始下降,并且 FNR 开始增大。原因在于一些篡改块刚好发生在四叉树分解的方块中,并且均值没有发生变化。虽然,提出方法的篡改检测精确性随着篡改块的增多也呈下降趋势,但明显优于 Kim 方法,因为保持均值的攻击很大程度改变了采用线性加权插值技术得到的块特征值。另外,如果篡改操作破坏了第 2 层数据的提取,即错误的四叉树分解信息将导致正检率 TPR 增大。

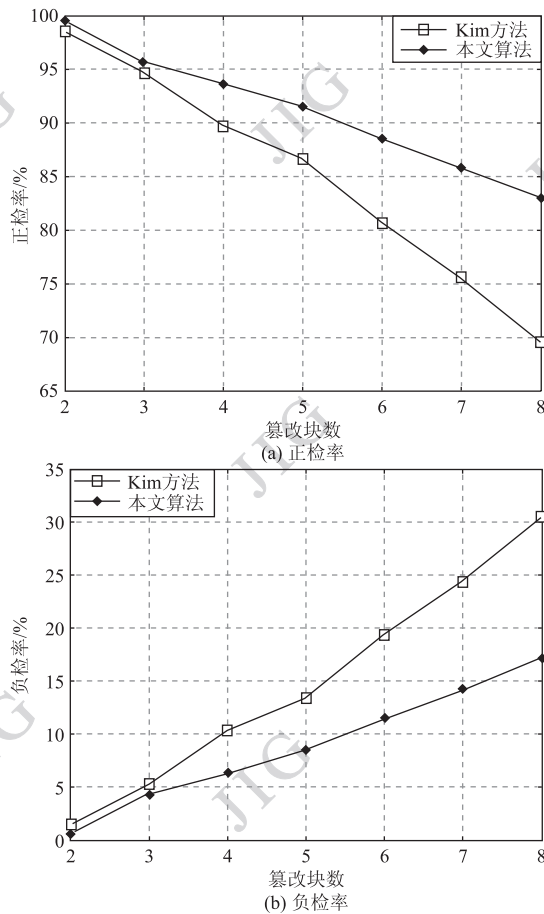


图10 篡改检测精确度比较

Fig. 10 The comparison result of tampering detection accuracy

4 结论

网络环境下医学图像的完整性认证具有十分重要的意义,基于无损数字水印的图像篡改检测方法具有明显优势。由于医学图像典型的分区域特征和重点区域纹理复杂特性,固定块的划分方法并不适用于医学图像。本文提出了一种四叉树分解的非固定块划分方法,很好地考虑了医学图像自身的区域和纹理特征,另外,针对 Kim 方法在图像块特征值选取上的不足,提出了利用线性加权插值方法获取新的特征值作为水印信息。针对 Kim 方法提出的水印嵌入算法的高复杂性,提出了利用基于混沌的可逆整数变换方法减少了算法的复杂性和提高了安全性。实验结果表明,本文算法在水印嵌入容量、篡改检测精确性和恢复图像质量上具有明显优势。方法适用于对网络环境下的质量敏感图像进行篡改检测和质量恢复。

参考文献 (References)

- [1] Chen F, He H J, Wang H X. Variable-payload self-recovery watermarking scheme for digital image authentication [J]. Chinese Journal of Computers, 2012, 35(1): 154-163. [陈帆, 和红杰, 王宏霞. 用于图像认证的变容量恢复水印算法[J]. 计算机学报, 2012, 35(1): 154-163.]
- [2] Zhong X Y, Feng Q J, Chen W F, et al. Hard authentication for medical image based on sensitivity of hash function [J]. Journal of Image and Graphics, 2008, 13(2): 204-208. [钟晓燕, 冯前进, 陈武凡, 等. 基于 Hash 函数敏感性的医学图像精确认证[J]. 中国图象图形学报, 2008, 13(2): 204-208.]
- [3] Deng X H, Chen Z G, Deng X H, et al. A novel dual-layer reversible watermarking for medical image authentication and EPR hiding [J]. Advanced Science Letters, 2011, 4(11): 3678-3684.
- [4] Li C T, Li Y. Medical images authentication through repetitive index modulation based watermarking [J]. International Journal of Digital Crime and Forensics, 2009, 1(4): 32-39.
- [5] Peng F, Lei Y Z, Long M, 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 L H, Zheng N N, Xue J R, et al. An integrated visual saliency-based watermarking approach for synchronous image authentication and copyright protection [J]. Signal Processing: Image Communication, 2011, 26(8): 427-437.
- [7] Chiang K H, Chien K C C, Chang R F, et al. Tamper detection and restoring system for medical images using wavelet-based reversible data embedding [J]. Journal of Digital Imaging, 2008, 21(1): 77-90.
- [8] Guo X T, Zhuang T G. Lossless watermarking for verifying the integrity of medical images with tamper localization [J]. Journal of Digital Imaging, 2009, 22(6): 620-628.
- [9] Li C L, Wand Y H, Ma B, et al. Tamper detection and self-recovery of biometric images using salient region-based authentication watermarking scheme [J]. Computer Standards & Interfaces, 2012, 34(4): 367-379.
- [10] Kim K S, Lee M J, Lee J W, et al. Region-based tampering detection and recovery using homogeneity analysis in quality-sensitive imaging [J]. Computer Vision and Image Understanding, 2011, 115(9): 1308-1323.
- [11] Deng X H, Chen Z G, Zeng F, et al. Authentication and recovery of medical diagnostic image using dual reversible digital watermarking [J]. Journal of Nanoscience and Nanotechnology, 2013, 13(3): 2099-2107.
- [12] Rawat S, Raman B. A chaotic system based fragile watermarking scheme for image tamper detection [J]. International Journal of Electronics and Communications, 2011, 65(10): 840-847.