

DOI:10.3969/j.issn.1005-202X.2023.12.011

医学影像物理

用于CT和MRI图像的轮廓波变换双水印算法

田振宇¹, 徐皓¹, 崔欣欣¹, 刘晶¹, 杨建兰²

1. 甘肃中医药大学信息工程学院, 甘肃 兰州 730000; 2. 泉州市正骨医院, 福建 泉州 362000

【摘要】目的:为解决CT与MRI图像版权侵权与恶意破坏问题,通过结合轮廓波变换与斑点检测技术,提出一种基于轮廓波变换自动选择感兴趣区域(ROI)的双水印算法。**方法:**该算法通过斑点检测与奇异值分解,选取医学图像轮廓波低频域与诊断最相关的位置作为ROI,在ROI生成零水印图像用于保护图像的完整性,并将ROI生成的零水印与版权水印共同嵌入图像的非感兴趣区域。**结果:**该双水印算法与其他双水印算法相比,载体医学图像遭受攻击后的不可见性有很大提升,结构相似度达到94%以上。**结论:**斑点检测轮廓波双水印算法对常规攻击与几何攻击具有较好的鲁棒性,且对于载体医学图像视觉质量有明显提升。

【关键词】双重水印;斑点检测;医学图像水印;篡改检测

【中图分类号】R318;TP391

【文献标志码】A

【文章编号】1005-202X(2023)12-1523-08

Double watermarking algorithm for CT and MRI images based on contourlet transform

TIAN Zhenyu¹, XU Hao¹, CUI Xinxin¹, LIU Jing¹, YANG Jianlan²

1. School of Information Engineering, Gansu University of Chinese Medicine, Lanzhou 730000, China; 2. Quanzhou Orthopedic-Traumatological Hospital, Quanzhou 362000, China

Abstract: Objective To propose a double watermarking algorithm based on contourlet transform and speckle detection to automatically select the region of interest (ROI) for solving the problems of copyright infringement and malicious destruction of CT and MRI images. **Methods** The method used speckle detection and singular value decomposition to select the most relevant location in the low frequency domain of the medical image contourlet wave as the ROI, generated a zero-watermarked image in ROI for protecting image integrity, and embed the ROI zero-watermark and the copyright watermark together in the region of non-interest. **Results** Compared with other double watermarking algorithms, the double watermarking algorithm could greatly improve the invisibility of the carrier image after the attack. The double watermarked images had a structure similarity index measure higher than 94%. **Conclusion** The proposed double watermarking algorithm incorporating speckle detection and contourlet transform has better robustness against conventional attacks and geometric attacks, and significantly improves the visual quality of carrier images.

Keywords: double watermarking; spot detection; medical image watermarking; tamper detection

前言

医学图像数据在医院整体医学数据存储空间中约占90%,医学图像的传输交换在远程医疗、手术教学、医学研究方面发挥着重要作用,CT与MRI图像

是其中最为常见的两类。CT与MRI图像在网络传输过程中安全与否,关系到患者的治疗进展、医患双方的隐私安全,保护其不被非法盗取和使用,有利于降低医患纠纷发生风险,增加患者满意度。近年来数字水印技术已广泛应用于医学图像的安全传输工作中,图像数字水印算法主要分为时域和频域两大类。时域数字水印技术是基于图像像素进行水印嵌入,由于像素值的编码位数较多,且相邻像素间像素值存在关联,因此根据像素位编码^[1]、像素块^[2]等思路设计的水印算法受到人们广泛关注,这类算法的优点在于水印信息量丰富,可以承载大量医患隐私信息,但缺点是水印隐蔽效果、抗攻击效果较差。频

【收稿日期】2023-07-05

【基金项目】泉州市科技计划项目(CQZ2023N002S0004)

【作者简介】田振宇,硕士研究生,研究方向:医学图像处理, E-mail: 1747993895@qq.com

【通信作者】杨建兰,硕士,副教授,研究方向:卫生信息管理系统开发与研究、卫生信息数据挖掘、医学影像识别与应用, E-mail: FJYJL@gszy.edu.cn

域数字水印技术则是基于图像的变换域进行水印嵌入,如离散余弦变换(Discrete Cosine Transform, DCT)、离散小波变换(Digital Wavelet Transform, DWT)、提升小波变换(Lifting Wavelet Transform, LWT)^[3]、不变整数小波变换、轮廓波变换^[4]、非下采样轮廓波变换(Nonsub Sampled Contourlet Transform, NSCT)^[5]、Slant变换^[6]、Curvelet变换^[7]等,还有一部分文献将多种变换结合使用^[8]。频域数字水印技术由于存在时频变换操作使得算法较为复杂,其优点在于载体图像与原始图像视觉差异感知不显著,并且抵抗攻击效果较时域水印也有明显提升。饶俊慧等^[9]将水印嵌入经三级小波分解后的奇异值分解(Singular Value Decomposition, SVD)分量中,得到一种结合DCT与SVD的半脆弱水印算法,但该算法得到的含水印图像细节存在部分损失。Vaidya^[3]结合LWT与DWT,将患者指纹作为水印实现身份验证,以识别原始医学图像和患者隐私,LWT可以实现更丰富的特征提取和信号分解,比传统分解方案更灵活,从而提高算法的不可见性。Gul等^[4]提出一种结合Contourlet与DCT的鲁棒水印算法,并优化嵌入强度和嵌入位置,在保持良好不可见性的基础上提升算法抵抗压缩攻击能力,但该算法水印容量太小以至于医学图像无法携带信息量稍大的版权水印图像。Sajeer等^[10]提出一种利用冗余离散小波变换(Redundant Discrete Wavelet Transform, RDWT)来定位最高熵分量以嵌入水印的方法,该方法的水印容量较大,但RDWT的不可逆性导致恢复图像存在一定程度的失真。Hatami等^[11]首先将宿主图像分解为不重叠块再进行Contourlet变换,利用Contourlet分解多向和多分辨率的特点,使得该算法在保证不可见性的条件下提升鲁棒性。Wang等^[12]在文献[11]基础上,将经过NSCT的高频子带作为目标嵌入位置,并依据快速广义极复指数幅度加入水印信息,由于NSCT高频子带中的信息有利于实现纹理分析和边缘检测,因此该算法对于几何攻击的抵抗效果良好。然而由于高斯噪声、椒盐噪声可以改变载体图像中的部分像素,导致分解时将会出现不同程度的信息偏差,因此载体图像遭受常规攻击后提取的水印图像清晰度较差。

根据水印用途不同,图像水印技术可分为脆弱水印、鲁棒水印等。脆弱水印通过水印的完整性反映图像是否遭到攻击,用于检测载体图像的真实性与完整性。与脆弱水印不同,鲁棒水印可以抵御攻击,并保留水印信息用于版权认定或传输特定信息。此外,部分算法将以上水印结合使用,使得水印算法同时实现多种用途。赵彦霞等^[13]提出一种多功能零

水印算法,首先获取零水印图像与半脆弱水印图像的信息矩阵,并将两个信息矩阵分别与上述零水印、半脆弱水印进行异或运算得到零水印,该水印算法对强度较大的攻击抵抗效果好,且提出的篡改定位功能可以识别病灶的修改,但载体图像对普通攻击的鲁棒性有待提高。刘西林等^[14]将分块宿主图像变换为离散分数阶Krawtchouk域,并将水印嵌入经过奇异值分解的实离散Krawtchouk系数中得到鲁棒水印,实验结果表明该算法对常规攻击鲁棒性较好,但文献中并未对几何攻击进行详细实验。针对水印算法抵抗几何攻击效果不佳问题,周琳等^[15]提出一种基于轮廓波变换的鲁棒水印算法,该算法对于常规攻击、几何攻击,以及两两组合攻击都有良好的抵抗效果,但该算法的缺点是复杂度较高且耗时较长,不适用于远程医疗中迅速提取水印图像的使用场景。陈青等^[16]针对医学图像水印算法提取过程复杂、接收端定位感兴趣区域(Region of Interest, ROI)处理时间过长的问題,提出一种基于特征值提取、自动还原ROI的双水印算法。但不同图像鉴别篡改所需要的ROI特征值数量不同,因此无法确定一个合适的特征值数目来平衡篡改检测精度与图像批量处理效率的关系。针对基于ROI特征方案无法适配实验之外图像问题,研究人员提出使用密钥进行篡改检测的方案。Zhang等^[17]提出一种基于整数小波变换的双重加密水印算法,对剪切、滤波攻击的抵抗效果好,但密钥的准确性易影响到水印的识别。Li等^[18]在不变小波域的基础上结合DCT形成混合域,再进行奇异值分解,产生更多的密钥,结果表明该算法对几何攻击具有较强的鲁棒性,但该算法仅实现了维护数字图像版权功能,未能同时实现图像完整性检测。王苗苗等^[19]提出一种篡改检测双重水印算法,通过将水印图像嵌入Schur分解的上三角矩阵最大系数中,实现图像版权鉴定与篡改定位,但该双重水印算法操作复杂,不适用于传输大批量图像的情况。David等^[20]提出一种基于DICOM非感兴趣区域(Region of Non-Interest, RONI)的混合数字水印方案,经过实验验证,该算法宿主医学图像的视觉质量达到无失真程度,但该算法未验证在其他DICOM(如CR、MRI)的效果,不具备普遍性。

医学图像水印与普通图像水印的区别在于,医学图像对于视觉失真较为敏感,特别是与医生诊断相关的ROI位置。研究人员通过划分ROI实现图像关键部分提取,从而有助于精准保护医学图像重要内容不被非法修改。ROI可以由专业医生手动标记得到或通过算法自动生成,医生手动分割得到的ROI与RONI准确度较高,如Singh等^[21]、Nazari等^[22]、Liu

等^[23]提出的方案,然而手动分割的成本过高,不利于图像数量庞大的情形。Huang等^[24]基于图像的视觉显著性模型将图像块自动分割为ROI与RONI,并将ROI信息嵌入RONI中以保护ROI的视觉特征,但检测结果准确性有待进一步提高。Balasamy等^[25]提出一种基于模糊选择的ROI提取方案,首先使用一条穿过医学图像中心点的参考线旋转遍历该图像的所有方向,其次将经过筛选的位置确定为ROI,该方案能较为准确地识别ROI与RONI的不同特点,但时间成本较高。Alshanbari^[26]将ROI通过LZW(Lempel-Ziv-Welch)压缩,将得到的信息存储于RONI中,用于保证ROI无损恢复,但该算法的鲁棒性有待提高。Arevalo-Ancona等^[27]使用K-means聚类进行重要位置提取,并将该区域作为ROI区域用于检测图像的完整性。Bamal等^[28]训练ANN网络实现自动分割ROI与RONI,该基于深度学习网络需要基于大规模数据集进行训练,不适用于即时传输的医学图像加密系统。

在医疗数据传输过程中,目前的数字水印算法无法同时实现版权保护与检测篡改。针对上述问题,本文提出一种结合斑点检测、SVD、归一化的轮廓波变换双重水印算法。本文算法以CT或MRI图像作为宿主医学图像,将认证水印与宿主医学图像ROI部分进行异或运算生成零水印,并将零水印与版权水印DWT低频分量共同嵌入宿主医学图像RONI。本文算法的优势是利用斑点检测,根据医学图像内容不同自动定位不同敏感区域作为ROI,对于含病灶医学图像可实现定位病灶区域作为ROI,使得

认证水印嵌入与诊断最相关部分,保护医学图像重要区域不被篡改;其次,本文算法通过对轮廓波低频分量进行归一化,提高载体医学图像抗攻击性能,同时该水印算法可以获得几乎无损的视觉质量,因此在载体医学图像经过可靠性验证后,载体医学图像无需提取水印也可以直接发送到医生端使用。

1 图像水印技术

1.1 轮廓波变换

轮廓波变换,也称Contourlet变换,其原理是将图像在每个方向上分解为不同尺度的分量,与小波变换等根据频率划分不同分量的分解方案相比,轮廓波变换包含的尺度信息能更好地恢复遭受攻击后的图像。轮廓波变换分为两个步骤实现:拉普拉斯金字塔分解和方向滤波器组滤波。图1是二层轮廓波分解示意图。原始医学图像首先经过第一层分解,生成低频图像和方向子带,对第一层分解得到的低频图像进行第二层分解,得到与第一层相似的低频图像和方向子带,称为中频子带和方向子带,图像经过两次轮廓波分解后,形成低频、中频、高频3种分量,其中低频图像承载图像大部分能量,图像的灰度起伏平缓,主要包含原始图像的大致内容,中频、高频分量包含能量微小,主要携带原始图像纹理、梯度等细节内容。根据人类视觉系统原理,对于图像中灰度变化比较平缓的位置,人眼提取信息能力较弱,因此将水印信息添加至低频分量有利于降低水印对载体医学图像的视觉影响。

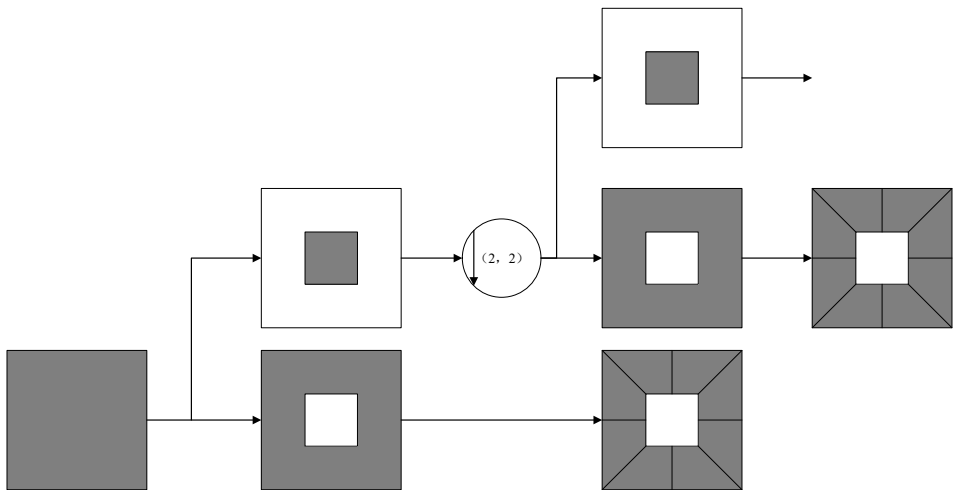


图1 轮廓波变换流程图
Figure 1 Flowchart of contourlet transform

1.2 斑点检测

Harris角点检测是基于图像局部区域像素值梯

度变化的一种形态学图像特征提取算法,该算法对旋转变换具有鲁棒性,但无法抵御缩放攻击,本文为

提取缩放不变的ROI,使用高斯拉普拉斯算子进行尺度选择,得到相应尺度空间中的局部二维极大值,并根据参数确定斑点中心位置和斑点区域半径。改进Harris检测算法得到的ROI具有旋转、缩放和平移不变性,将认证水印嵌入上述ROI可提升宿主医学图像抗几何攻击能力。以下为本文斑点检测过程:

(1)对高斯函数求拉普拉斯变换,为简化计算,拉普拉斯变换可看作图像二阶求导的近似:

$$g(x, y, \sigma) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-(x^2 + y^2)/(2\sigma^2)} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \nabla^2 g(x, y, \sigma) &= g_{xx}(x, y, \sigma) + g_{yy}(x, y, \sigma) \\ &= \partial^2 g / \partial x^2 + \partial^2 g / \partial y^2 \end{aligned} \quad (2)$$

式中, $g(x, y, \sigma)$ 为尺度 σ 的高斯函数。式(2)为生成高斯滤波器拉普拉斯算子:

(2)求得最大响应,令式(2)为0:

$$\nabla^2 g(x, y, \sigma) = \partial^2 g / \partial x^2 + \partial^2 g / \partial y^2 = 0 \quad (3)$$

求解式(3)得: $r = \sqrt{2} \sigma$ 。

(3)去除边缘点,若当前区域的主要梯度方向只有一个时,表示该区域在图像的边缘位置,不是角点,因此舍弃该区域。

(4)根据 σ 大小显示结果圆,即为所求的区域,并将区域半径 r 定义为斑点中心产生拉普拉斯响应峰值尺度。

2 基于轮廓波变换的双水印算法

2.1 水印嵌入过程

图2为水印嵌入过程,本文算法选取一幅含病灶的脑部MRI图像A作为宿主医学图像,选取一幅灰度图像R作为认证水印图像,选取一幅灰度图像T作为版权水印图像。双重水印嵌入过程如下:

(1)为防止水印被恶意提取后导致信息泄漏,首先对水印图像预加密。将认证水印R与版权水印T二值化,并对二值化图像T进行Arnold置乱加密,产生加密水印图像R、T,其中R将作为认证水印应用于检测图像篡改,T则先进行DWT,得到低频分量 T_{LL}

作为版权水印应用于鉴别图像版权归属。

(2)提取宿主医学图像的ROI与RONI。宿主医学图像A进行两次轮廓波分解,由于图像主体信息存在于轮廓波域低频分量中,因此选取A中低频分量 A_{LL} 作为水印信息嵌入分量,依据第1.2节斑点检测技术在 A_{LL} 中提取ROI与RONI,为使得嵌入区域尺寸与水印尺寸匹配,根据水印图像R尺寸大小对ROI、RONI进一步调整,形成水印嵌入区域 R_I 与 R_N 。

(3)为避免载体医学图像产生失真进而影响诊断结果,采用不修改ROI内容的零水印嵌入方案,将步骤(1)加密水印图像R嵌入步骤(2)得到的嵌入区域 R_I ,从而形成零水印图像 W_I :

$$W_I = R \oplus R_I \quad (4)$$

(4)其次生成嵌入RONI的鲁棒水印。如式(5)所示,将零水印图像 W_I 通过SVD分解,得到 W_I 的S分量 S_I ,同时选取版权水印图像低频分量 T_{LL} 进行SVD分解,得到含有鲁棒水印信息的 S_T 分量,将 S_T 作为水印信息嵌入宿主医学图像,形成鲁棒水印:

$$W_I = U_I \cdot S_I \cdot V_I^T \quad (5)$$

(5)RONI水印嵌入。为提高载体医学图像对于几何攻击的鲁棒性,在加入水印信息前对RONI区域 R_N 进行归一化。将归一化处理后的 R_N 进行SVD分解,并将分解得到的 S_N 分量分为 S_{NR1} 与 S_{NR2} 两部分。根据式(6),将 S_{NR1} 与零水印图像 W_I 的S分量 S_I 相加得到 S_{NW1} , S_{NR2} 与版权水印图像低频部分S分量 S_T 相加得到 S_{NW2} , S_{NW1} 与 S_{NW2} 结合得到 S_N , S_N 作为承载双水印信息矩阵,用于得到载体医学图像。本文将水印嵌入系数 σ_0 设为0.2。

$$S_N = (S_{NR1} + \sigma_0 \cdot S_I) + (S_{NR2} + \sigma_0 \cdot S_T) \quad (6)$$

(6)载体医学图像重构。所得 S_N 经过SVD逆变换、逆归一化,并与未嵌入水印的低频宿主图像重构,形成含水印的低频载体图像 W_N ,将 W_N 与宿主图像轮廓波分解的中频、高频部分进行轮廓波逆变换,得到载体医学图像 A_R 。

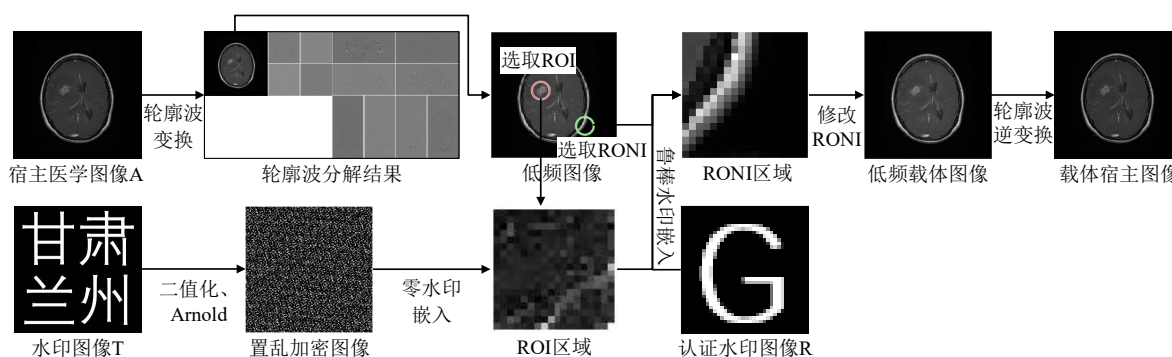


图2 双水印嵌入过程

Figure 2 Double watermark embedding process

2.2 水印提取

选取远程医疗接收端图像 A_R 作为载体医学图像,同时将原始医学图像 RONI 部分 R_N 作为参考图像,水印提取是水印嵌入的逆过程,具体步骤如下:

(1)提取载体医学图像的 ROI 与 RONI。首先对载体医学图像 A_R 进行轮廓波分解,得到低频图像 A_{RLL} ,并依据第 1.2 节斑点检测技术对 A_{RLL} 进行斑点区域提取,生成 R_{IR} 与 R_{NR} 两部分含水印区域,并根据原始医学图像 R_N 的尺寸调整 R_{NR} ,得到含有鲁棒水印的 RONI 目标载体区域 R_{NR} ,这部分区域用于提取鲁棒水印。

(2)提取水印信息。由于鲁棒水印信息位于经 SVD 分解的 RONI 区域 S 分量中,因此对含有鲁棒水印的 R_{NR} 进行归一化,并通过 SVD 分解得到载体图像的 S 分量 S_{RRN} 。同时对原始图像 RONI 区域 R_N 进行 SVD 分解,得到原始医学图像的 S 分量 S_{RN} 。将载体图像 S 分量 S_{RRN} 与原始图像 S 分量 S_{RN} 作差,得到版权水印的 S 分量 S_{RW1} 与认证水印的 S 分量 S_{RW2} , S_{RW1} 计算过程如式(7)所示, S_{RW2} 同理:

$$S_{RW1} = (S_{RN} - S_{RRN}) / \sigma_0 \quad (7)$$

(3)将含有版权水印信息的 S_{RW1} 进行 SVD 逆变

换,并进行离散小波逆变换,得到版权水印图像 W_{R1} ,用于判定该医学图像的版权归属。

(4)将含有认证水印信息的 S_{RW2} 进行 SVD 逆变换,得到含有认证水印的图像区域 W_{R2} ,并将 W_{R2} 与 R_N 中与认证水印相关的部分区域进行异或运算,得到认证水印图像 W_2 ,如式(8)所示。将认证水印图像与原始认证水印对比,根据二者相似度判断图像是否被篡改。

$$W_2 = W_{R2} \oplus R_N \quad (8)$$

3 测试与分析

3.1 实验参数

为测试本文算法性能,采用 Windows 10 操作系统和 Matlab R2020a 软件平台进行仿真实验。如图 3 所示,本次实验随机选取 4 幅 512×512 像素的脑部 MRI 图像、4 幅 512×512 像素的肺部 CT 图像作为宿主医学图像,选取 32×32 像素的“G”字样灰度图像作为认证水印图像,选取 256×256 像素的“甘肃兰州”字样灰度图像作为版权水印图像。本实验中,Contourlet 变换 LP 类型选择“9-7”,DFB 类型选择“pkva”方向滤波器。

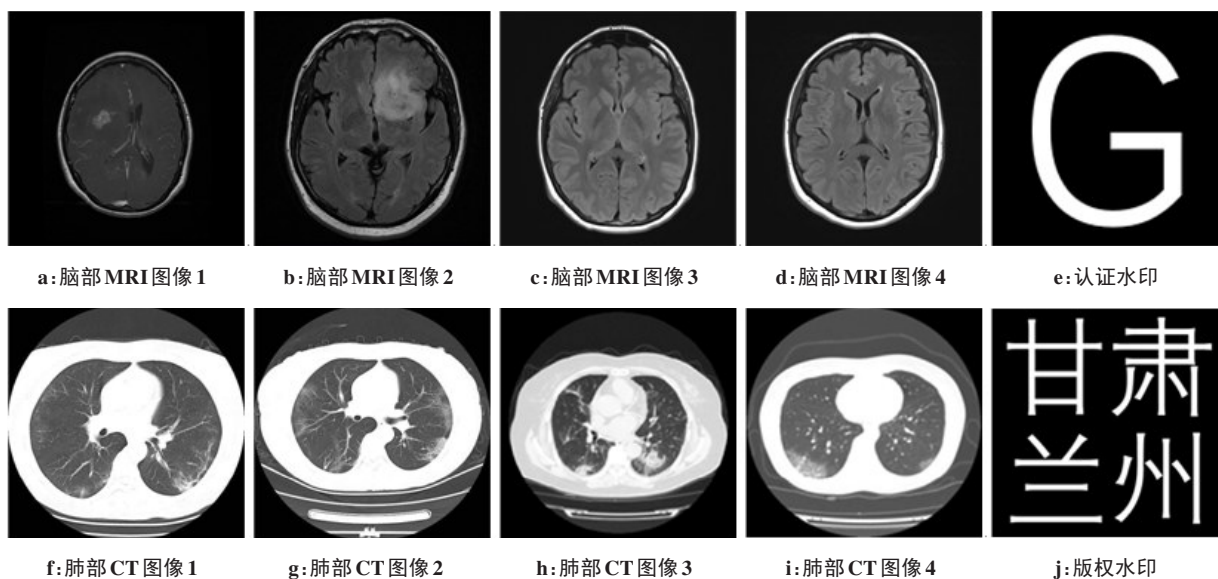


图3 宿主医学图像和水印图像

Figure 3 Host medical images and watermarked images

3.2 不可见性测试

水印算法的不可见性是指水印嵌入宿主医学图像后,人眼无法从载体图像中感知水印图像,水印不可见性效果随嵌入强度增大逐步降低,直至肉眼感知到水印存在。由于医学图像的特殊性,要求加入的水印信息不能影响宿主医学图像的视觉质量,特

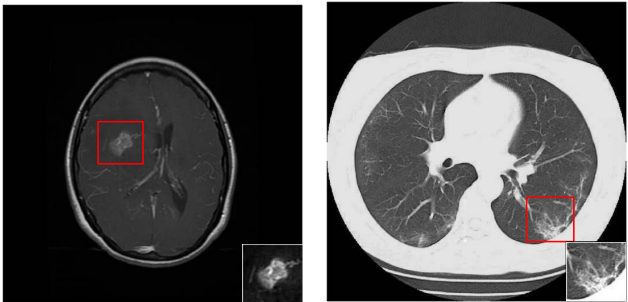
别是图像中至关重要的病灶区域需要完整保留,基于此本文通过斑点检测技术将病灶区域识别为 ROI,以保护该位置不受水印信息的影响,从而保证接收端 ROI 信息的准确性。

为测试医学图像水印的隐藏效果,以图 3a、图 3f 作为宿主医学图像进行实验,测试含水印图像的峰

值信噪比(Peak Signal to Noise Ratio, PSNR)和结构相似度(Structure Similarity Index Measure, SSIM)值。PSNR用于量化载体医学图像与宿主医学图像之间的像素值差异,一般认为,当PSNR大于42 dB时,水印具有良好的不可见性。此外,人眼捕捉图像信息能力因图像亮度不同而有差异,且人眼对低频信息、高频信息敏感度不同,因此在衡量水印嵌入质量时,仅使用基于独立像素差异的PSNR无法完全准确衡量医生实际视觉感受,为更好地模拟医生诊断疾病真实情景,本文引入基于感知模型的SSIM作为另一衡量图像失真程度指标,SSIM通过图像局部结构信息建立感知模型,根据图像亮度、结构、对比度、纹理等信息计算SSIM值,该指标更符合人眼主观感受。SSIM取值范围为[0,1],值越大表示载体图像越接近原始图像。实验结果如表1所示。根据表1可知,从图像整体来看,脑部MRI图像与肺部CT图像的PSNR均在50 dB以上,SSIM值均接近100%,可见载体医学图像几乎不存在失真,说明应用本文水印算法的载体医学图像可用于医学诊断。从局部区域来看,以上两幅图像ROI位置的PSNR均在50 dB以上,SSIM值均接近100%,符合ROI位置的诊断要求。图4为含有水印信息的脑部MRI图像与肺部CT图像,由图4可以看出,本文算法在局部与全局两方面均实现了良好的不可见性,嵌入的水印信息并未影响到载体图像的视觉效果。

表1 含水印医学图像PSNR和SSIM值
Table 1 PSNR and SSIM of watermarked images

| 图像类型 | 整体图像 | | ROI图像 | |
|---------|---------|--------|---------|--------|
| | PSNR/dB | SSIM/% | PSNR/dB | SSIM/% |
| 脑部MRI图像 | 54.75 | 99.98 | 53.35 | 99.57 |
| 肺部CT图像 | 54.68 | 99.94 | 50.63 | 99.01 |



a: 含水印脑部MRI图像 b: 含水印肺部CT图像

图4 含水印医学图像

Figure 4 Watermarked images

为进一步验证本文算法的不可见性效果,将本文算法与文献[29-30]进行比较,结果如表2所示。从表2数据可知,本文算法在载体医学图像质量上远高于以上文献,这是由于本文算法版权水印与认证水印的嵌入位置均选取图像灰度变化平缓的低频分量,降低了对载体医学图像视觉效果的影响,且本文算法针对ROI采用无损的零水印嵌入方式,保留ROI图像透明性,因此该方案得到的载体医学图像与原始图像十分相似,满足医学图像不可感知性要求。此外,本文算法中用于嵌入双水印的RONI位置不含医学图像敏感信息,不会对医生判断病情造成干扰。

表2 不同方法PSNR和SSIM值比较
Table 2 Comparison of PSNR and SSIM among different methods

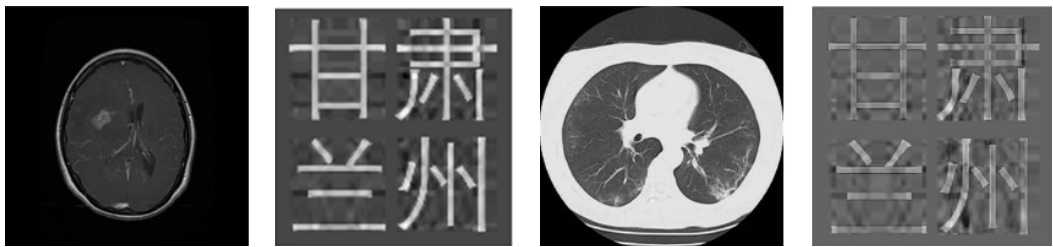
| 方法 | PSNR/dB | SSIM/% |
|----------|---------|--------|
| 本文算法 | 56.04 | 99.98 |
| 文献[29]算法 | 39.01 | 97.35 |
| 文献[30]算法 | 39.67 | 97.33 |

3.3 鲁棒性测试

为检测水印算法抗攻击性能,对图3a、图3f施加常规攻击与几何攻击,模拟图像在公共网络传输时受到的信号干扰与恶意攻击,并采用归一化相关系数(Normalised Correlation, NC)计算提取水印与原始水印的相似程度。NC取值范围为[0,1],通常当提取水印相较于原始水印NC值小于0.5时,认为该水印图像存在严重模糊,无法根据水印图像含义判定版权归属。

图5a、图5c分别为图3a、图3f遭到高斯噪声攻击后的结果,图5b、图5d分别为图5a、图5f中提取的水印图像,根据图5a、图5c可以发现,遭受攻击后的载体医学图像内容未明显改变,图像细节信息保存较完整,纹理分明,完全符合医学图像诊断要求。如表3所示,载体医学图像遭受常规攻击后,NC值在95%以上,表明版权水印图像质量基本未受影响,可以根据水印图像含义确定该图像版权归属,且载体图像SSIM值均大于98%,因此本文算法对常规噪声抵抗性能良好,能基本避免因图像传输噪声引起的误诊。

几何攻击改变了载体医学图像像素点相对位置,导致包含在其中水印信息顺序错乱,致使水印无法提取或提取后无法复原,本文在嵌入水印过程中增加归一化操作,通过归一化找出图像不变参数并保存,提取水印时应用不变参数来还原原始图像,抵消几何攻击对图像的修改。以图3a为例进行几何攻击实验,结果



a:含高斯噪声的脑部MRI b:含噪脑部MRI提取的水印 c:含高斯噪声的肺部CT d:含噪肺部CT提取的水印

图5 含噪声载体图像和提取水印
Figure 5 Noisy images and extracted watermarks

表3 常规攻击结果

Table 3 Conventional attack results

| 攻击类型 | 攻击强度 | NC/% | SSIM/% |
|-----------|--------|-------|--------|
| 高斯噪声 | 0.010 | 97.73 | 99.41 |
| 椒盐噪声 | 0.001 | 97.28 | 99.57 |
| 乘性噪声 | 0.001 | 98.02 | 99.42 |
| 中值滤波 | 3.000 | 97.75 | 99.50 |
| 高斯低通滤波 | 3×3 | 97.76 | 99.36 |
| JPEG | 50.000 | 96.90 | 98.93 |
| JPEG 2000 | 12.000 | 95.39 | 98.82 |
| 锐化 | 0.800 | 97.22 | 99.62 |

表4 几何攻击结果

Table 4 Geometric attack results

| 攻击类型 | 攻击强度 | NC/% | SSIM/% |
|------|------|-------|--------|
| 剪切 | 0.10 | 88.96 | 97.98 |
| 缩放 | 0.25 | 86.33 | 97.67 |
| 缩放 | 4.00 | 84.40 | 97.16 |
| 旋转 | 2.00 | 87.17 | 98.84 |
| 运动模糊 | 7.40 | 96.14 | 99.00 |

如表4所示,在未对载体图像进行几何校正情况下,本文算法ROI的SSIM值均保持在97%以上,提取版权水印图像NC值在84%以上,表明算法仍保持较高鲁棒性。

为证明本文算法的优越性,将本文载体医学图像质量与文献[31-32]作比较,3种算法NC、SSIM值如表5所示,通过实验数据对比表明,本文算法抵抗中值滤波攻击后SSIM值较文献[31]存在5%的差距,然而在抵抗其他攻击时本文算法的鲁棒性都有所提升。

表5 载体医学图像鲁棒性比较结果

Table 5 Comparative results of carrier image robustness

| 攻击类型 | 攻击强度 | 本文算法 | | 文献[31]算法 | | 文献[32]算法 | |
|-------|-------|--------|--------|----------|--------|----------|--------|
| | | NC/% | SSIM/% | NC/% | SSIM/% | NC/% | SSIM/% |
| 高斯噪声 | 0.002 | 100.00 | 98.72 | 71.71 | 98.22 | 99.94 | 92.80 |
| 椒盐噪声 | 0.001 | 99.95 | 99.34 | 99.14 | 99.33 | 99.93 | 97.92 |
| 中值滤波 | 3.000 | 99.98 | 94.73 | 81.32 | 99.66 | 99.76 | 96.41 |
| 平均值滤波 | 3.000 | 99.92 | 99.63 | 99.99 | 99.32 | - | - |
| 维纳滤波 | 3.000 | 100.00 | 99.83 | - | - | 99.74 | 96.64 |
| 锐化 | 0.200 | 99.99 | 99.33 | 69.85 | - | 99.75 | 31.22 |

3.4 篡改检测分析

为验证本文算法篡改检测性能,对载体医学图像进行剪切等模拟图像篡改操作,计算认证水印图像NC结果如表6所示。实验结果表明,NC值为50%~60%,表明接收端图像被不法分子恶意修改,需请求发送端重新传输图像。与此相反,若对载体医

学图像施加滤波、噪声攻击等信道常见噪声,认证水印NC值可保持在78%以上,考虑噪声对图像质量的影响,本文算法设定NC值大于75%即认为图像是完整的,且遭受攻击后ROI的SSIM值可保持在99%以上,不影响图像质量,可将图像投入使用。

表 6 篡改检测结果
Table 6 Tamper detection results

| 篡改攻击类型 | 攻击强度 | SSIM/% | NC/% | 是否遭到篡改 |
|--------|-------|--------|-------|--------|
| 剪切 | 0.100 | 75.94 | 54.68 | 是 |
| 高斯低通滤波 | 3×3 | 99.53 | 79.80 | 否 |
| 高斯噪声 | 0.010 | 99.54 | 78.01 | 否 |
| 乘性噪声 | 0.001 | 99.53 | 78.53 | 否 |

4 结 语

为解决医学图像在传输过程中的篡改与侵权问题,提出一种基于轮廓波变换的斑点检测双水印算法,本文算法可以根据不同医学图像自动选择目标宿主图像 ROI,并避免在该位置嵌入水印信息进而影响病灶位置诊断,且将零水印随载体医学图像传输,不需要在版权中心进行水印图像备案,降低资源消耗。将本文算法与其他双水印算法相比,本文算法遭受攻击后载体图像失真度明显降低,提高了医生诊断准确度;同时本文算法利用认证水印图像的完整度可实现篡改检测,通过可量化的标准确定图像是否被篡改,提升鉴别篡改的精度。未来考虑将该算法用于超声、PET、内窥镜等其他类型医学图像中,提高算法的普适性。

【参考文献】

[1] 肖振久,李南,王永滨,等. 基于超混沌的医学图像篡改定位零水印算法[J]. 计算机工程与应用, 2017, 53(7): 115-120.
Xiao ZJ, Li N, Wang YB, et al. Zero watermarking scheme for medical image temper location based on hyper-chaos encryption[J]. Computer Engineering and Applications, 2017, 53(7): 115-120.

[2] 张正伟,肖绍章,李芬芬. 结合二次差值扩展与插值扩展的可逆图像水印算法[J]. 光电子·激光, 2020, 31(5): 539-548.
Zhang ZW, Xiao SZ, Li FF. Reversible image watermarking algorithm combining quadratic difference expansion with interpolation expansion [J]. Journal of Optoelectronics-Laser, 2020, 31(5): 539-548.

[3] Vaidya SP. Fingerprint-based robust medical image watermarking in hybrid transform[J]. Vis Comput, 2023, 39(6): 2245-2260.

[4] Gul E, Toprak AN. Contourlet and discrete cosine transform based quality guaranteed robust image watermarking method using artificial bee colony algorithm[J]. Expert Syst Appl, 2023, 212: 118730.

[5] Hu F, Cao H, Chen S, et al. A robust and secure blind color image watermarking scheme based on contourlet transform and Schur decomposition[J]. Vis Comput, 2022, 1: 1-20.

[6] Su Q, Liu D, Sun Y. A robust adaptive blind color image watermarking for resisting geometric attacks[J]. Inform Sci, 2022, 606: 194-212.

[7] Eswaraiah R, Sudhir T, Chaitanya PS. Curvelet transform based watermarking for telemedicine[J]. Wireless Pers Commun, 2022, 122 (1): 309-329.

[8] Mohrekeish M, Azizi S, Shirani S, et al. Hierarchical watermarking framework based on analysis of local complexity variations [J]. Multimed Tools Appl, 2018, 77(23): 30865-30890.

[9] 饶俊慧,吴晓云. 融合DCT与SVD的半脆弱弱图像水印算法研究[J]. 计算机仿真, 2022, 39(7): 507-511.
Rao JH, Wu XY. Semi fragile image watermarking algorithm based on DCT and SVD[J]. Computer Simulation, 2022, 39(7): 507-511.

[10] Sajeer M, Mishra A. A robust and secured fusion based hybrid medical image watermarking approach using RDWT-DWT-MSVD with hyperchaotic system-Fibonacci Q matrix encryption[J]. Multimed Tools Appl, 2023, 82: 1-23.

[11] Hatami E, Rashidy Kanan H, Layeghi K, et al. An optimized robust and invisible digital image watermarking scheme in Contourlet domain for protecting rightful ownership[J]. Multimed Tools Appl, 2023, 82(2):

2021-2051.

[12] Wang X, Peng F, Niu P, et al. Statistical image watermark decoder using NSM-HMT in NSCT-FGPCET magnitude domain [J]. J Inf Secur Appl, 2022, 69: 103312.

[13] 赵彦霞,孙洁丽,周增慧,等. 基于SVD和SAE的医学图像多功能零水印算法[J]. 电信科学, 2017, 33(11): 102-111.
Zhao YX, Sun JL, Zhou ZH, et al. Multipurpose zero watermarking algorithm for medical image based on SVD and SAE [J]. Telecommunications Science, 2017, 33(11): 102-111.

[14] 刘西林,吴永飞,肖翔宇,等. 实离散分数Krawtchouk变换及其在数字图像水印中的应用[J]. 中国图象图形学报, 2022, 27(1): 252-261.
Liu XL, Wu YF, Xiao XY, et al. Real discrete fractional Krawtchouk transform with an application to image watermarking [J]. Journal of Image and Graphics, 2022, 27(1): 252-261.

[15] 周琳,张天骐,冯嘉欣,等. Blob-Harris特征区域结合CT-SVD的鲁棒图像水印算法[J]. 信号处理, 2020, 36(4): 520-530.
Zhou L, Zhang TQ, Feng JX, et al. Image watermarking algorithm based on Blob-Harris feature region and CT-SVD[J]. Journal of Signal Processing, 2020, 36(4): 520-530.

[16] 陈青,宗德琦. 用于医学图像认证的Contourlet-SVD双水印算法[J]. 小型微型计算机系统, 2019, 40(1): 205-209.
Chen Q, Zong SQ. Medical digital image Contourlet-SVD dual watermarking algorithm[J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2019, 40(1): 205-209.

[17] Zhang L, Wei D. Image watermarking based on matrix decomposition and gyrtator transform in invariant integer wavelet domain [J]. Signal Process, 2020, 169: 107421.

[18] Li YM, Wei D, Zhang L. Double-encrypted watermarking algorithm based on cosine transform and fractional Fourier transform in invariant wavelet domain [J]. Inform Sci, 2021, 551: 205-227.

[19] 王苗苗,吴德阳,胡森,等. 一种面向医学图像的篡改检测双重水印算法[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(6): 310-321.
Wang MM, Wu DY, Hu S, et al. A double watermarking algorithm for tamper detection of medical images [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(6): 310-321.

[20] David MM, Manuel CH, Francisco GU, et al. Secured telemedicine of medical imaging based on dual robust watermarking [J]. Vis Comput, 2022, 38(6): 2073-2090.

[21] Singh P, Devi KJ, Thakkar HK, et al. Region-based hybrid medical image watermarking scheme for robust and secured transmission in IoMT[J]. IEEE Access, 2022, 10: 8974-8993.

[22] Nazari M, Mehrabian M. A novel chaotic IWT-LSB blind watermarking approach with flexible capacity for secure transmission of authenticated medical images [J]. Multimed Tools Appl, 2021, 80(7): 10615-10655.

[23] Liu X, Lou J, Fang H, et al. A novel robust reversible watermarking scheme for protecting authenticity and integrity of medical images [J]. IEEE Access, 2019, 7: 76580-76598.

[24] Huang R, Liu H, Liao X, et al. A divide-and-conquer fragile self-embedding watermarking with adaptive payload [J]. Multimed Tools Appl, 2019, 78(18): 26701-26727.

[25] Balasamy K, Suganyadevi S. A fuzzy based ROI selection for encryption and watermarking in medical image using DWT and SVD [J]. Multimed Tools Appl, 2021, 80(5): 7167-7186.

[26] Alshanbari HS. Medical image watermarking for ownership & tamper detection [J]. Multimed Tools Appl, 2021, 80(11): 16549-16564.

[27] Arevalo-Ancona RE, Cedillo-Hernandez M. Zero-watermarking for medical images based on regions of interest detection using K-Means clustering and discrete fourier transform [J]. IJACSA, 2023, 14(6): 581-588.

[28] Bamal R, Kasana SS. Dual hybrid medical watermarking using walsh-slantlet transform [J]. Multimed Tools Appl, 2019, 78(13): 17899-17927.

[29] 张琳琳,杨亮,高铁杠. 基于自嵌入鲁棒双水印的图像认证算法[J]. 光电子·激光, 2020, 31(2): 206-213.
Zhang LL, Yang L, Gao TG. Self-embedding robust dual watermarking scheme for image authentication [J]. Journal of Optoelectronics-Laser, 2020, 31(2): 206-213.

[30] Singh OP, Singh AK, Zhou H. Multimodal fusion-based image hiding algorithm for secure healthcare system [J]. IEEE Intell Syst, 2023, 38 (4): 53-61.

[31] Kumar C, Singh AK, Kumar P. Dual watermarking: an approach for securing digital documents [J]. Multimed Tools Appl, 2020, 79(11): 7339-7354.

[32] Khare P, Srivastava VK. A secured and robust medical image watermarking approach for protecting integrity of medical images [J]. Trans Emerg Telecommun Technol, 2021, 32(2): e3918.

(编辑:陈丽霞)