

## 基于自适应直方图均衡化的医学图像可逆对比度增强算法

谭碰, 欧博

引用本文

谭碰, 欧博. [基于自适应直方图均衡化的医学图像可逆对比度增强算法](#)[J]. 计算机科学, 2024, 51(6A): 230700124-7.

TAN Peng, OU Bo. [Medical Image Reversible Contrast Enhancement Based on Adaptive Histogram Equalization](#) [J]. Computer Science, 2024, 51(6A): 230700124-7.

---

## 相似文章推荐 (请使用火狐或 IE 浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

[基于噪声不可见性的自适应图像对抗重编程方法](#)

Adaptive Image Adversarial Reprogramming Based on Noise Invisibility Factors  
计算机科学, 2023, 50(4): 110-116. <https://doi.org/10.11896/jsjx.220300024>

[噪声环境下的人脸防伪识别算法研究](#)

Face Anti-spoofing Algorithm for Noisy Environment  
计算机科学, 2021, 48(6A): 443-447. <https://doi.org/10.11896/jsjx.200900207>

[一种基于特征提取的访问控制方法](#)

Access Control Method Based on Feature Extraction  
计算机科学, 2019, 46(2): 109-114. <https://doi.org/10.11896/j.issn.1002-137X.2019.02.017>

[基于多尺度分解与预测误差扩展的可逆图像水印算法](#)

Reversible Image Watermarking Algorithm Based on Multi-scale Decomposition and Prediction Error Expansion  
计算机科学, 2017, 44(12): 100-104. <https://doi.org/10.11896/j.issn.1002-137X.2017.12.020>

[基于KQML语言的医学图像agent协调系统设计](#)

计算机科学, 2002, 29(3): 99-102.

# 基于自适应直方图均衡化的医学图像可逆对比度增强算法

谭 碰 欧 博

湖南大学信息科学与工程学院 长沙 410082

(tanpeng@hnu.edu.cn)

**摘 要** 目前,一些可逆数据隐藏算法通常是对图像进行类似直方图均衡化的信息嵌入操作来实现对比度增强。这类方法虽然简单有效,但是缺乏明确的目标函数来指引参数选择,难以优化对比度增强效果,因而容易产生增强不足或过度增强等问题。为了优化可逆信息嵌入后的对比度增强效果,提出了一种基于自适应直方图均衡化并结合对比度增强的医学图像可逆数据隐藏算法。该方法基于预测误差扩展技术来实现可逆数据嵌入,并通过所定义的自适应直方图均衡化目标函数来优化预测残差直方图的修改,确定最优的数据嵌入点,在确保对比度增强的前提下实现低失真的可逆嵌入。实验结果表明,相比同类算法,所提方法在实现可逆嵌入的同时,能够进一步增强图像对比度,辅助提升医学图像中的目标识别效率。

**关键词:** 医学图像处理;可逆对比度增强;自适应直方图均衡化;预测误差扩展

**中图分类号** TP309.7

## Medical Image Reversible Contrast Enhancement Based on Adaptive Histogram Equalization

TAN Peng and OU Bo

College of Computer Science and Electronic Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China

**Abstract** At present, some reversible data hiding algorithms usually conduct the histogram-equalization like data hiding to achieve the contrast enhancement effect for the image. The advantage is that the algorithm is easy to design and conduct. However, it lacks of the optimization objective function, and cannot determine the suitable parameters to optimize the reversible contrast enhancement. As a result, it may suffer the problems of insufficient or excessive enhancement, etc. In order to improve the reversible contrast enhancement effect after data embedding, this paper proposes a reversible data hiding algorithm for medical image combined with contrast enhancement based on adaptive histogram equalization. In the proposed method, the reversible data embedding is implemented by using prediction-error expansion. The objective function of adaptive histogram equalization is designed to optimize the prediction-error histogram modification and determine the optimal embedding positions, by considering the low-distortion embedding and the better contrast enhancement. Experimental results show that compared with other methods, the proposed method can further achieve contrast enhancement effect after reversible data embedding, and therefore improve the target identification of medical image.

**Keywords** Medical image processing, Reversible contrast enhancement, Adaptive histogram equalization, Prediction-error expansion

## 1 引言

随着互联网的发展与和多媒体处理技术的普及,越来越多的普通用户开始掌握信息的修改权和发布权,能够利用便捷的多媒体编辑工具较为简捷地完成对多媒体信息内容的修改,并发布到公共网络平台,从而迅速影响社会生活的方方面面。而人工智能技术更是使得伪造内容可以达到以假乱真的程度,“眼见为实”等传统观念在数字虚拟世界中不断被颠覆,司法公正、新闻真实性等社会诚信遭受严重挑战。为了解决信息安全问题,确保数字世界的良好秩序,密码学等一系列安全技术被不断提出、研究和应用。其中,信息隐藏技术作为保证信息真实性、完整性的重要技术之一,能够以文本、图像、视频等为载体来实现安全数据的隐藏和信息通信<sup>[1-5]</sup>,一直是学

界和工业界关注的焦点。然而,传统信息隐藏算法设计极少考虑对原始载体的恢复,因而其信息嵌入过程会对嵌入载体造成永久失真,即在正确提取出秘密信息后,无法修复载体内容的失真。这种永久失真对于要求内容精确性的敏感领域是难以接受的。例如,在医学领域的应用中,医学图像的失真可能会影响医生对患者病情做出正确诊断,从而产生严重的后果。

为了满足敏感领域图像保护和处理的需求,可逆数据隐藏(Reversible Data Hiding, RDH)技术<sup>[6-9]</sup>应运而生,它不仅能够保证嵌入信息的隐秘性和可提取性,还能实现原始载体的无损恢复。对于医学图像处理来说,可逆算法既可以将患者数据嵌入原始图像以实现隐私保护,又可以保证原始内容的完美恢复,从而不妨碍医生对医学图像的正确诊断。这使得

基金项目:国家自然科学基金(61872128)

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China(61872128).

通信作者:欧博(oubo@hnu.edu.cn)

可逆信息隐藏技术在医学图像处理领域有着极高的应用潜力。现有的可逆信息隐藏方法按嵌入方式可以分为：基于无损压缩的可逆信息隐藏<sup>[10]</sup>、基于直方图移位的可逆信息隐藏<sup>[11-13]</sup>和基于差分扩展的可逆信息隐藏<sup>[14]</sup>等。其中，可逆对比度增强算法<sup>[15-20]</sup> (Reversible Contrast Enhancement, RCE) 是具有对比度增强效果的 RDH 算法，可实现图像增强、可逆数据嵌入以及原始数据与图像的无损恢复等功能。此类算法主要应用于医学图像等成像环境不稳定的特殊应用场景，其核心原理是通过载体直方图进行类似直方图均衡化的可逆嵌入操作，在实现隐密信息嵌入的同时实现对比度增强、改善图像视觉质量。可逆对比度增强算法首先由 Wu 等<sup>[21]</sup> 提出，该算法主要基于传统的直方图移位 (Histogram Shifting, HS)<sup>[22]</sup> 可逆嵌入框架设计而成，通过选取图像直方图中的两个最高仓 (即直方图峰值) 做扩展操作以实现信息嵌入，并对剩余的灰度值像素依据其在直方图中的位置做加减 1 的移位操作或者保持不变，从而保证可逆性。根据对比度增强要求，多次重复上述嵌入过程，可以有效实现对像素分布的“拉伸”，并逐步达到类似直方图均衡化的效果，实现对比度增强。

不同于自然图像，医学图像色调变化比较单一，存在明显的前景和背景区域；同时，受成像条件限制，医学图像内容还可能存在光照不均匀、对比度不佳等问题。因此，如何根据医学图像特点来提升可逆对比度算法的性能，是当前该领域的主要研究问题。基于 Wu 等的研究，更多以医学图像作为载体的可逆对比度增强算法被进一步提出<sup>[23-25]</sup>。Wu 等<sup>[26]</sup> 提出了基于像素直方图进行数据嵌入的可逆对比度增强算法，通过直方图均衡化操作来实现全局区域的对比度增强效果。Yang 等<sup>[27]</sup> 提出了基于预测误差直方图进行可逆数据嵌入的算法，将信息优先嵌入在纹理区域，以期实现纹理区域的对比度增强效果。然而，现有的改进方法主要是基于类似直方图均衡化的操作来增强图像对比度，较少考虑设计明确的目标函数来指引参数选择，因而难以优化和精确控制对比度增强效果。

为了解决上述问题，优化对比度增强效果，本文提出了一种基于自适应直方图均衡化并结合对比度增强的可逆数据隐藏算法。该方法首先对医学图像进行背景分割，分离出背景区域和感兴趣区域 (Region of Interests, ROI)，从而只对 ROI 区域进行对比度增强，以免造成不必要的视觉失真。然后基于预测误差扩展技术来实现可逆数据嵌入，并通过所定义的自适应直方图均衡化目标函数来指导预测误差直方图的修改，确定最优的数据嵌入点，以达到兼顾低失真嵌入和对比度增强的目的。实验结果表明，相比同类算法，所提方法在实现可逆嵌入的同时，能够进一步实现对比度增强效果，辅助提升医学图像内容的诊断识别。

本文第 2 章介绍所提算法及其具体算法步骤；第 3 章对实验结果进行分析；最后总结全文。

## 2 所提方法

本文提出一种基于自适应直方图均衡化的医学图像可逆对比度增强算法，其数据嵌入流程如图 1 所示，主要分为图像分割和数据嵌入优化两个阶段。首先，通过经典的极大类间方差法对原始医学图像进行背景分割，分离出 ROI 区域和背景区域，选择 ROI 区域作为数据嵌入区域。然后，根据所提

出的自适应直方图均衡化目标函数选择预测误差直方图嵌入点进行数据嵌入，并生成载密图像，从而实现低失真嵌入和合理的对比度增强。

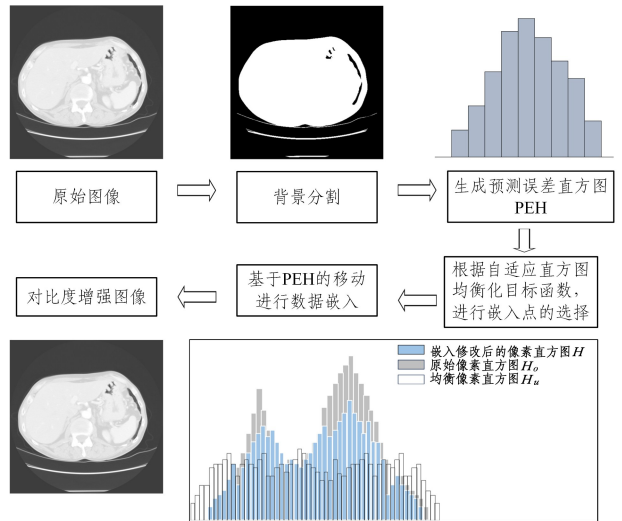


图 1 本文方法的数据嵌入流程

Fig. 1 Data embedding process of the proposed method

医学图像分割是实现可逆数据隐藏法中数据优化嵌入的一个重要技巧，用以分离出 ROI 区域和背景区域，从而完成对嵌入区域的合理选择，避免对背景这类容易造成明显失真的像素进行嵌入修改。然而，不同于常规图像分割，在可逆数据隐藏算法中，分割过程必须是可逆的，即在嵌入端对载体图像进行图像分割、信息嵌入产生增强图像后，在提取端提取嵌入信息前需对增强图像进行与嵌入端相同的图像分割操作或者得到与嵌入端相同的图像分割结果，才能准确提取嵌入信息，恢复原始图像。这就要求用于图像分割的输入数据在嵌入端和提取端是一致的，从而保证后续数据提取和图像恢复的可逆性。为了实现图像分割结果的可逆性，本文采用双层嵌入方案将一幅图像的处理分为两个独立的阶段。将图像所有像素分为两层，在对第一层像素进行嵌入时，对第二层像素进行背景分割，将所得结果用以标记对应的第一层像素，将其划分为前景像素或背景像素；在对第二层像素进行修改时，则采用相同的图像分割策略仅对第一层像素作分割处理操作。由于双层像素是交错划分的，两层像素具备相似的空间、像素强度等特征，因此其分割结果也相似，可以保证分割的准确性。采用上述交互分割的方法，即可以保证分割的可逆性。

### 2.1 背景分割

大部分医学图像由明显的 ROI 区域和背景区域组成。其中，背景像素色调单一且多为纯黑的边界像素值，对其进行信息嵌入会造成明显的视觉失真和产生大量边信息，导致嵌入效率降低。因此，本文只对包含医学目标的 ROI 区域进行对比度增强操作。

本文采用经典的 Otsu 算法<sup>[28]</sup> (最大类间方差法) 进行图像分割，其基本原理是使用聚类算法根据图像的灰度特性将图像分成两部分，通过设定分割阈值使两部分之间的类间方差最大，从而完成对前景、背景区域的划分。令大小  $M \times N$  的图像记为  $I(x, y)$ ，前景与背景的分割阈值记作  $T$ 。类间方差  $g$  的计算公式如式(1)所示：

$$g = \frac{N_1}{M \times N} \times \frac{N_2}{M \times N} \times (\mu_1 - \mu_2)^2 \quad (1)$$

其中  $N_1$  为图像中灰度值小于或等于  $T$  的像素个数,  $N_2$  为图像中灰度值大于  $T$  的像素个数,  $\mu_1, \mu_2$  分别为前景像素、背景像素占整幅图像的平均灰度。通过遍历可能的阈值最终选择使得前景和背景像素的类间方差  $g$  最大的值作为阈值  $T$ 。

如图 2 所示,我们将医学图像灰度值大于  $T$  的像素作为背景像素,将灰度值小于或等于  $T$  的像素作为前景像素,从而实现图像分割。图中白色部分为前景区域,黑色部分为背景区域,与此同时,生成一张与原始医学图像同等大小的二进制分割结果记录图,用“1”表示背景像素的位置,用“0”表示前景像素的位置。在后续的数据嵌入中,仅对记录图中标定为“0”的像素做修改处理。

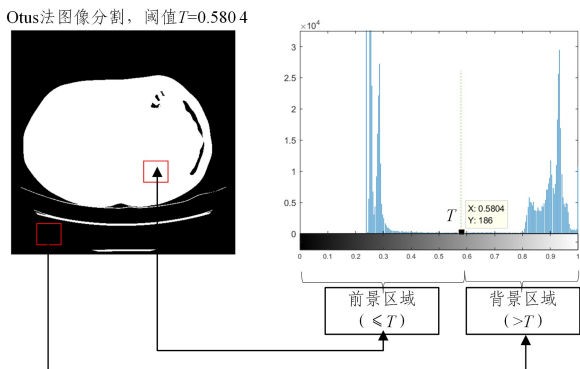


图 2 基于 Otsu 分割算法的图像分割示意图

Fig. 2 Illustration of image segmentation based on Otsu segmentation algorithm

双层嵌入框架下的图像分割流程如图 3 所示。当第一层用于嵌入时,第二层的像素用来进行图像分割并生成二值图像,以标记第一层像素中的背景区域像素和 ROI 区域像素,而第一层像素不参与标记。其中,第二层像素上采样填补第一层像素的缺省值,得到完整的图像用于图像分割。当对第二层进行嵌入时,则用第一层嵌入修改后的像素进行图像分割并生成二值图像,以标记第二层像素中的背景区域像素和 ROI 区域像素。其中,以第一层嵌入修改后的像素上采样填补第二层像素位置的缺失值,得到完整的图像用于图像分割。第一、二层分割的区别在于,对第二层进行嵌入修改时,是以第一层嵌入修改后的像素作为基准像素完成上采样,而第一层嵌入时,作为上采样基准的第二层像素是未经过修改的原始像素。这样就保证了分割结果的可逆性。

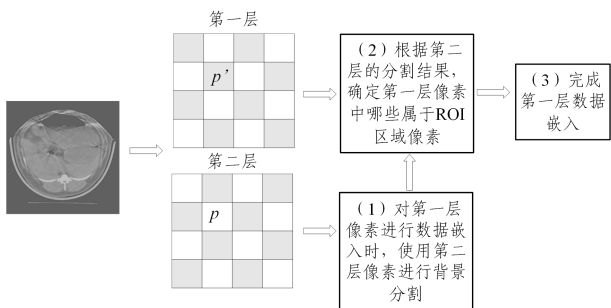


图 3 双层嵌入方案,以第一层嵌入为例

Fig. 3 Double layer embedding scheme, taking the first layer embedding as an example

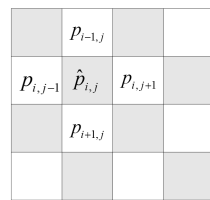


图 4 菱形预测模式

Fig. 4 Rhombus prediction pattern

## 2.2 数据嵌入

本文采用双层嵌入方案进行数据嵌入,此处以第一层嵌入为例讲解数据嵌入的实现细节。本文所提算法是基于预测误差直方图的扩展进行数据嵌入,其原理为利用灰度图像相邻像素的相关性,使用菱形预测方法<sup>[29]</sup>,用周围的像素来预测该像素从而产生预测值与预测误差,最后利用产生的预测误差进行信息隐藏。图 4 给出了菱形预测模式。当前像素值  $p_{i,j}$  通过 4 个相邻像素 ( $p_{i,j-1}, p_{i+1,j}, p_{i,j+1}, p_{i-1,j}$ ) 预测,预测值  $\hat{p}_{i,j}$  通过式(2)计算:

$$\hat{p}_{i,j} = \frac{p_{i,j-1} + p_{i+1,j} + p_{i,j+1} + p_{i-1,j}}{4} \quad (2)$$

预测差值  $e_{i,j}$  通过式(3)计算:

$$e_{i,j} = p_{i,j} - \hat{p}_{i,j} \quad (3)$$

原始图像在经过背景分割后,可确定图像的 ROI 区域。经过菱形预测后,可计算第一层属于 ROI 区域的每个像素的预测差值,通过统计这些预测差值的数量,生成预测误差直方图。本文算法通过所定义的自适应直方图均衡化目标函数来指导预测误差直方图的修改,通过优化模块的模拟嵌入过程确定最优的数据嵌入点,再进行数据嵌入。自适应嵌入优化目标函数定义如下:

$$\text{minimize } \| \mathbf{H} - \mathbf{H}_o \|_2^2 + \| \mathbf{H} - \mathbf{H}_u \|_2^2 \quad (4)$$

其中,  $\mathbf{H}_o$  为原始像素直方图一维向量,  $\mathbf{H}_u$  为均衡像素直方图一维向量,  $\mathbf{H}$  为嵌入后修改的像素直方图一维向量,  $\| \mathbf{H} - \mathbf{H}_o \|_2^2$  和  $\| \mathbf{H} - \mathbf{H}_u \|_2^2$  均为所计算向量的 2 范数。该目标函数分为两部分,第一部分用来控制嵌入失真,使嵌入修改后的直方图与原始直方图的分布尽可能相似;第二部分用来使嵌入后的直方图  $\mathbf{H}$  朝着均匀分布的方向进行修改,模拟一个类似直方图均衡化的效果,实现图像对比度增强。图 5 给出了基于自适应直方图均衡化目标函数的嵌入优化示意图。

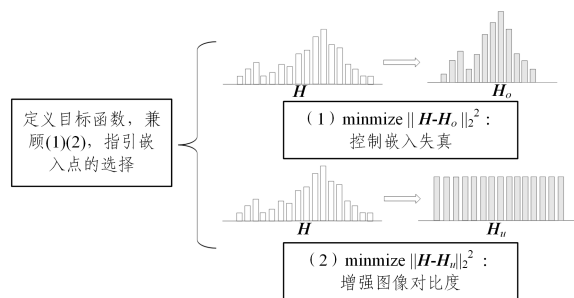


图 5 所定义的目标函数及其嵌入过程示意图

Fig. 5 Defined objective function and data embedding process

第一层像素经过背景分割、预测误差直方图的生成后,还需通过优化模块选出最优的一组嵌入点,其值为  $a, b$ 。算法的优化模块用于在最小化目标函数的过程中实现自适应参数选择,实现低失真嵌入和对比度增强的效果。根据式(5),将

8组嵌入点取值代入公式,进行预测误差直方图的扩展,实现模拟嵌入,生成嵌入后修改的像素直方图  $H$ ,分别计算它们的目标函数值,而每一组嵌入点的取值对应一个目标函数值。结合嵌入容量的大小,从8个目标函数值中选出满足嵌入容量且最小的目标函数值,找到对应的嵌入点  $a, b$  值,即为最优的一组嵌入点,用于实际的第一层数据嵌入。

第二层数据嵌入不再进行优化,选择与第一层相同的一组嵌入点进行嵌入。其中,  $a, b$  为给定嵌入点的值,  $a < 0, b > 0$ , 取值如下:

$$\begin{cases} a = -b - 1 \\ b \in \{0, 1, \dots, 7\} \end{cases} \quad (5)$$

可由式(5)计算出8组给定的嵌入点的值。当图像像素经式(2)、式(3)计算得出的预测误差值与给定嵌入点的值  $a, b$  相等时,即选定该像素作为数据嵌入点。通过优化模块确定下一组最优嵌入点的值后,进行数据嵌入,具体嵌入机制如图6所示。

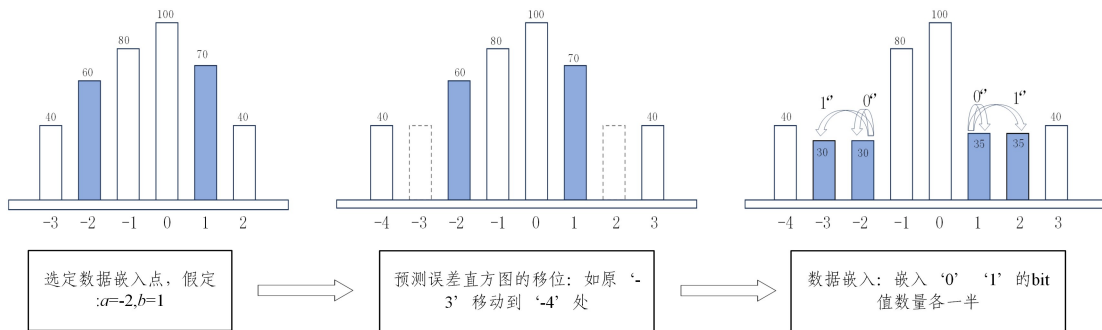


图6 数据嵌入机制

Fig. 6 Data embedding mechanism

### 2.3 预处理

为了防止直方图移位产生的溢出/下溢等问题,算法还需进行预处理操作。定义一个二进制位置图,记录 ROI 区域中值为  $\{0, 1, 254, 255\}$  的像素,生成二进制序列,并用无损压缩算法压缩后生成边信息,最后通过 LSB 替换算法嵌入到图像指定区域。然后将 ROI 区域像素中值为“1”的像素修改为“0”,将值为“255”的像素修改为“254”,防止在进行数据嵌入时发生溢出。

### 2.4 算法实现步骤

本文提出的 RDH 算法采用双层嵌入方案,基于预测误差扩展技术来实现可逆数据嵌入,并通过所定义的自适应直方图均衡化目标函数来确定最优的数据嵌入点,在进行数据嵌入的同时增强图像对比度。算法数据嵌入过程如下。

步骤1 菱形预测:原始图像像素经过菱形预测分成两层。

步骤2 背景分割:基于 Otsu 算法,以第二层像素进行图像分割,标记第一层像素中的背景区域像素和 ROI 区域像素。

步骤3 计算边信息长度:生成具有与原始图像相同大小的二进制位置图,将位置图信息压缩用于后续的数据嵌入。

步骤4 模拟嵌入及优化:对第一层像素进行模拟嵌入,计算得出给定嵌入容量下使得目标函数值最小的最优嵌入点。

步骤5 计算排序阈值:数据嵌入时优先对复杂度低的

像素进行处理。

$$e'_{i,j} = \begin{cases} e_{i,j} - 1, & \text{如果 } e_{i,j} < a \\ e_{i,j} - m, & \text{如果 } e_{i,j} = a \\ e_{i,j}, & \text{如果 } a < e_{i,j} < b \\ e_{i,j} + m, & \text{如果 } e_{i,j} = b \\ e_{i,j} + 1, & \text{如果 } e_{i,j} > b \end{cases} \quad (6)$$

标记图像的像素值  $p'_{i,j}$  通过将预测差值与像素值相加计算得出,如式(7)所示:

$$p'_{i,j} = e'_{i,j} + \hat{p}_{i,j} \quad (7)$$

像素进行处理。

步骤6 完成数据嵌入:选定嵌入点后,基于预测误差直方图的扩展进行数据嵌入。

步骤7 依次重复以上步骤,生成对比度增强图像:在第一层数据嵌入完成后,对第二层像素依次完成背景分割、边信息长度的计算、数据嵌入等操作。

数据提取和图像恢复过程如下:先对图像的第二层像素进行背景分割和数据提取操作。完成数据提取与图像恢复过程后,再对图像的第一层像素进行背景分割及数据提取操作,从而恢复原始图像。

步骤1 获取标记图像,对图像进行背景分割操作得到前景背景分割图,确定 ROI 区域像素。解压缩提取的位置图,用于区分边界像素值中的预修改像素。

步骤2 数据提取过程:计算修改后的像素预测值,将像素按复杂度进行降序排序,计算和恢复原始预测残差值。

步骤3 逐一恢复原始像素值,恢复原始图像。

## 3 实验结果与分析

为了验证所提算法的有效性和可行性,本文从 NBIA<sup>1)</sup> 网站上随机选取了一些医学图像,在 MATLAB R2016a 软件上进行仿真实验。选取8幅对比度不同的医学图像(a)~(h)进行实验,分别为脑部图1、上腹部、脊椎图1、X光、脑部图2、脑部图3、脊椎图2、脊椎图3。图7(a)和图7(d)大小为  $256 \times 256$ ,其余图片大小均为  $512 \times 512$ 。

<sup>1)</sup> <http://imaging.nci.nih.gov>

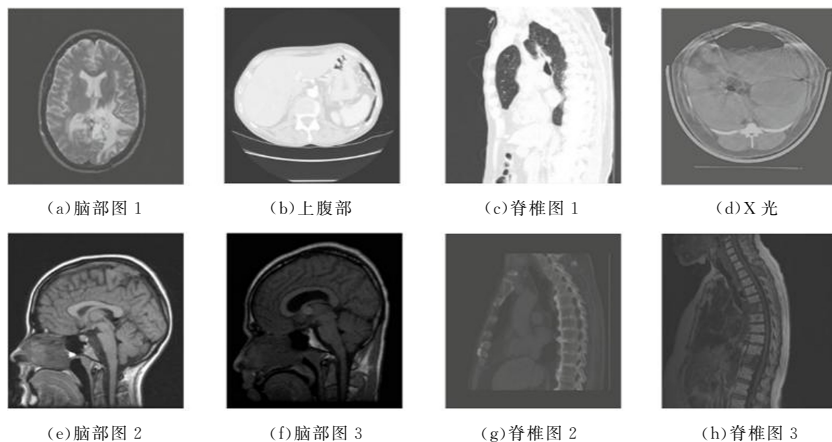


图7 原始图像

Fig. 7 Original images

### 3.1 性能评价指标

为验证所提算法的嵌入性能,本文与文献[12]、文献[19]和文献[25]的方法进行了对比。文献[12]是针对医学图像的RDH方法,文献[19]的算法是一种增强原始图像和保持图像亮度的RDH方法,文献[25]是基于自动对比度增强的RDH方法。为了对算法性能进行分析,选取均方误差(Mean Square Error, MSE)作为评价指标来检验算法的可逆性。

$$MSE = \frac{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N (x' - x)^2}{MN} \quad (8)$$

其中,  $M$ ,  $N$  为图像的长和宽,  $x$  为原始图像像素值,  $x'$  为恢复图像的像素值。MSE 值越小, 表示两幅图像之间的差异越小, 当其值为 0 时, 表示两幅图像完全相同, 即算法是可逆的, 在提取出嵌入信息后, 无损恢复了原始图像。

此外, 本文还选取嵌入率、峰值信噪比(Peak Signal to Noise Ratio, PSNR)、结构相似性(Structural Similarity Indexing Measure, SSIM)、相似对比度误差作为评价指标, 对所提算法和对比算法进行性能评估及比较。其中, 嵌入率用平均每像素所嵌入的比特数表示, 计算公式如下:

$$ER = \frac{Payload}{MN} \quad (9)$$

此处, Payload 为总的载荷比特数。PSNR 值是通过计算载体图像与嵌入秘密信息后的图像的统计误差。在同一嵌入率下, PSNR 越大说明图像质量越好, 图像失真度越小, 算法性能越好。SSIM 是用来衡量两幅图像之间的相似度的指标。SSIM 的取值为 0 到 1, 当 SSIM 值为 1 时表示两幅图像完全相同, 当 SSIM 值为 0 时表示两幅图像差异极大。SSIM 值越接近 1, 表示图像结构越稳定。相似对比度误差是用来评估图像对比度效果的指标, 当其值大于 0.5 时表示图像对比度增强, 相似对比度误差的值  $C$  根据式(10)进行计算。

$$C = \frac{Std_e - Std_o}{255} + 0.5 \quad (10)$$

其中,  $Std_o$  和  $Std_e$  分别表示原始图像和对比度增强图像的标准差。

### 3.2 实验结果分析

可逆数据隐藏算法为了保证载体内容的可逆恢复, 通常要求传输信道是安全可靠的, 因此其主要关注的问题是可逆性。图 8 是本文所提算法在图 7(a) 脑部图 1 上嵌入信息并恢复图像得到的实验结果。由图 8 可以看出, 原始图像和恢复

图像视觉上完全相同, 表明所提出的 RDH 算法是可逆的。同时, 原始图像与恢复图像的 MSE 值为 0 这一实验数据也验证了这一结论。

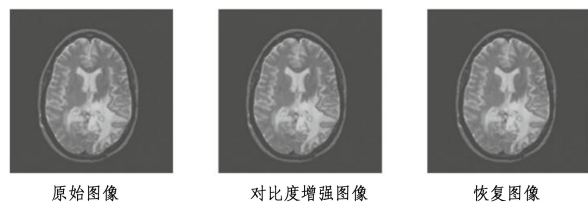


图8 不同状态下的图7(a)

Fig. 8 Fig. 7(a) under different states

本文算法与文献[12]、文献[19]及文献[25]中提出的算法进行了对比实验, 不仅比较了图 7(h) 在不同嵌入率下的算法的 PSNR 值、SSIM 值、相似对比度误差值  $C$  的大小, 还比较了不同医学图像下算法的 PSNR, SSIM 值随嵌入容量的变化。

由表 1 可以看出, 在相同嵌入率下, 本文算法处理后的对比度增强图像相比其他算法取得了更高的 PSNR 值、SSIM 值, 说明所提算法在保持图像稳定性方面性能更好, 增强后的图像质量也更好。

表1 本文算法和文献[12]、文献[19]、文献[25]算法的实验结果比较

Table 1 Experimental results of the proposed algorithm and algorithms in literatures [12, 19, 25]

算法	嵌入率	PSNR	SSIM	C
本文	0.10	60.92	0.9999	0.4999
	0.30	55.45	0.9998	0.5000
	0.50	53.02	0.9996	0.5001
文献[12]	0.10	58.47	0.9999	0.5000
	0.30	53.60	0.9997	0.4999
图 7(h) 脊椎图 3	0.50	51.37	0.9994	0.4999
	0.10	55.26	0.9998	0.5006
文献[19]	0.30	48.42	0.9991	0.5015
	0.50	46.90	0.9980	0.5025
文献[25]	0.10	25.64	0.5923	0.6370
	0.30	25.64	0.5924	0.6370
	0.50	25.65	0.5928	0.6370

整体性能评估显示, 本文所提算法在用于医学图像 ROI 对比度增强方面优于文献[12]、文献[19]与文献[25]中的算法。由图 9 和图 10 的 16 幅图像可以直观地看出, 相比文献[12]提出的算法, 本文算法在相同嵌入容量下, 取得了更高的 PSNR 值和 SSIM 值, 对图像的对比度增强效果更明显。

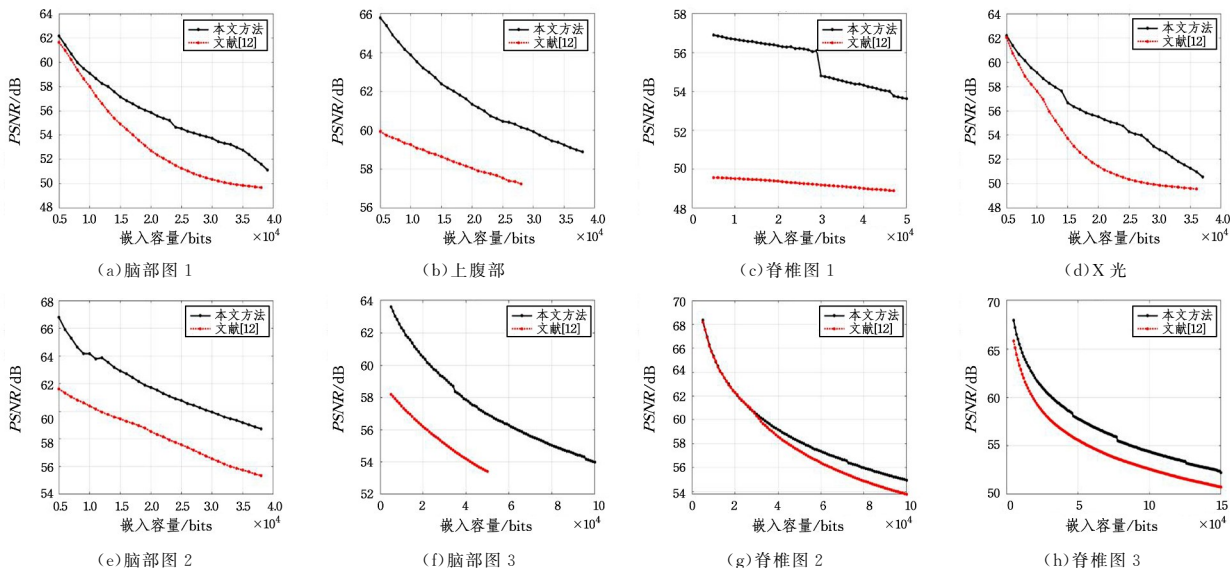


图9 在不同算法、相同嵌入容量下的 PSNR 值比较

Fig. 9 Comparison of PSNR values of different algorithms with the same embedding capacity

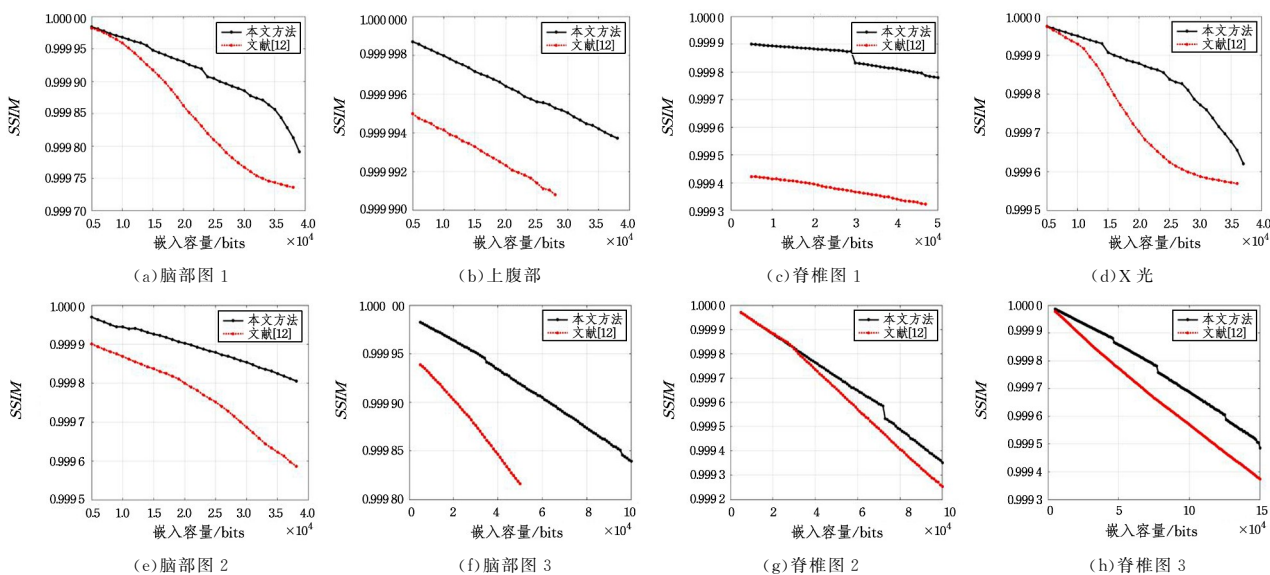


图10 在不同算法、相同嵌入容量下的 SSIM 值比较

Fig. 10 Comparison of SSIM values of different algorithms with the same embedding capacity

**结束语** 本文提出了一种基于自适应直方图均衡化的用于医学图像对比度增强的可逆信息隐藏算法。该算法考虑到医学图像的特点,首先通过背景分割,将医学图像分离成 ROI 区域和背景区域,并只对 ROI 区域进行数据嵌入和对比度增强处理。然后通过优化模块中定义的目标函数来指导预测误差直方图的修改,选择最优的嵌入点,使一定嵌入容量下医学图像的对比度增强效果最好。实验结果表明,与其他 RDH 算法相比,该算法在相同嵌入率下取得了更高的 PSNR 值和 SSIM 值,对图像进行对比度增强的效果更好,具有良好的视觉质量。

参考文献

[1] FENG D G, ZHANF M, LI H. Big data Security and Privacy Protection [J]. Journal of Computer Science, 2014, 37(1): 246-258.  
 [2] LI F H, LI H, JIA Y, et al. Privacy computing: concept, connota-

tion and its research trend [J]. Journal on Communications, 2016, 37(4): 1-11.  
 [3] XIA Y, LANG R L, CAO W B, et al. Overview of Research on Image Based Information Hiding Detection Algorithms and Implementation Technologies [J]. Computer Research and Development, 2004(4): 728-736.  
 [4] YIN H, LIN C, QIU F, et al. Overview of Digital Watermarking Technology [J]. Computer Research and Development, 2005(7): 1093-1099.  
 [5] DENG X H, CHEN Z G, LIANG D Q, et al. High capacity lossless information hiding method for medical images by region [J]. Journal of Communications, 2015, 36(1): 193-202.  
 [6] SHI Y Q, LI X L, ZHANG X P, et al. Reversible data hiding: advances in the past two decades [J]. IEEE Access, 2016, 4: 3210-3237.  
 [7] WANG Y Y, HE H J, CHEN F, et al. Reversible Data Hiding of JPEG Images Based on Distortion Expansion Cost [J]. Compu-

- ter Research and Development, 2020, 57(11): 2271-2282.
- [8] WU Y Q, GUO Y T, TANG J, et al. A ciphertext reversible information hiding algorithm based on adaptive Huffman encoding [J]. *Journal of Computer Science*, 2021, 44(4): 846-858.
- [9] OU B, YIN Z X, XIANG S J. Overview of reversible data hiding in plaintext image [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2022, 27(1): 111-124.
- [10] ZHANG W M, HU X C, LI X L, et al. Recursive histogram modification; establishing equivalency between reversible data hiding and lossless data compression [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2013, 22(7): 2775-2785.
- [11] LI J W, HU Y J, CHEN K Y. Reversible data hiding technique using prediction error histogram translation [J]. *Chinese Journal of Graphics and Images*, 2009, 14(6): 1088-1095.
- [12] HONG W, CHEN T S, SHIU C W. Reversible Data Hiding Based on Histogram Shifting of Prediction Errors [C]// 2008 International Workshop on Education Technology and Training & 2008 International Workshop on Geoscience and Remote Sensing, Shanghai, China, 2008: 578-581.
- [13] HAO J, PING P, FU D Y, et al. A Double Histogram Translation Reversible Information Hiding Method after Compressed Difference [J]. *Computer Science*, 2022, 49(9): 340-346.
- [14] TIAN J. Reversible data embedding using a difference expansion [J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2003, 13(8): 890-896.
- [15] LI R, LI X Y. Reversible data hiding for pixel value sorting in image partition selection [J]. *Chinese Journal of Image and Graphics*, 2017, 22(12): 1664-1676.
- [16] HE W G, XIONG G Q, ZHOU K, et al. Large capacity reversible data hiding based on improved pixel sorting prediction [J]. *Computer Application Research*, 2018, 35(1): 266-271.
- [17] GAO G Y, SHI Y Q. Reversible data hiding using controlled contrast enhancement and integer wavelet transform [J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2015, 22(11): 2078-2082.
- [18] WU H T, TANG S H, HUANG J W, et al. A novel reversible data hiding method with image contrast enhancement [J]. *Signal Processing: Image Communication*, 2018, 62: 64-73.
- [19] KIM S, LUSSI R, QU X C, et al. Reversible data hiding with automatic brightness preserving contrast enhancement [J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2019, 29(8): 2271-2284.
- [20] WU H T, MAI W Q, MENG S Y, et al. Reversible data hiding with image contrast enhancement based on two-dimensional histogram modification [J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 83332-83342.
- [21] WU H T, DUGELAY J L, SHI Y Q. Reversible image data hiding with contrast enhancement [J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2015, 22(1): 81-85.
- [22] NI Z C, SHI Y Q, ANSARI N, et al. Reversible data hiding [J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2006, 16(3): 354-362.
- [23] YUAN T X, WU H T, XU Y L, et al. Reversible data hiding algorithm and its application to medical images [J]. *Journal of Frontiers of Computer Science and Technology*, 2016, 10(6): 856-866.
- [24] YANG Y, XIAO X X, CAI X, et al. A secure and privacy-preserving technique based on contrast-enhancement reversible data hiding and plaintext encryption for medical images [J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2020, 27: 256-260.
- [25] GAO G Y, TONG S K, XIA Z H, et al. Reversible data hiding with automatic contrast enhancement for medical images [J]. *Signal Processing*, 2021, 178: 107817.
- [26] WU H T, HUANG J W, SHI Y Q. A reversible data hiding method with contrast enhancement for medical images [J]. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 2015, 31: 146-153.
- [27] YANG Y, ZHANG W M, LIANG D, et al. Reversible data hiding in medical images with enhanced contrast in texture area [J]. *Digital Signal Processing*, 2016, 52: 13-24.
- [28] OTSU N. A threshold selection method from gray-level histograms [J]. *IEEE Transactions on Systems*, 1979, 9(1): 62-66.
- [29] SACHNEV V, KIM H J, NAM J, et al. Reversible Watermarking Algorithm Using Sorting and Prediction [J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2009, 19(7): 989-999.
- [30] National Biomedical Imaging Archive (NBIA) [EB/OL]. (2014-11-30) [2015-04-28]. <http://imaging.nci.nih.gov>.



**TAN Peng**, born in 1999, postgraduate. Her main research interests include data hiding and its related topics and so on.



**OU Bo**, born in 1985, associate professor, Ph.D supervisor. His main research interests include reversible data hiding and its related topics and so on.