

# 控制与决策

Control and Decision

## 自适应直觉模糊相异直方图裁剪的图像增强算法

兰蓉, 贾亚雯

引用本文:

兰蓉, 贾亚雯. 自适应直觉模糊相异直方图裁剪的图像增强算法[J]. *控制与决策*, 2021, 36(12): 2919–2928.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0845>

---

## 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

### [概率区间值直觉犹豫模糊Maclaurin对称平均算子及决策方法](#)

Probabilistic interval-valued intuitionistic hesitant fuzzy Maclaurin symmetric mean operators and decision method  
*控制与决策*. 2021, 36(5): 1249–1258 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1370>

### [基于双边分解与 \$L\_1\$ 暗通道的战场图像增强算法](#)

A battlefield image enhancement algorithm based on bilateral decomposition and  $L_1$  dark channel prior  
*控制与决策*. 2021, 36(5): 1165–1172 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1213>

### [基于FRC框架的红外与可见光图像融合方法](#)

Infrared and visible image fusion based on FRC algorithm  
*控制与决策*. 2021, 36(11): 2690–2698 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0669>

### [考虑时间序列的动态大群体应急决策方法](#)

Dynamic large group emergency decision-making method considering time series  
*控制与决策*. 2020, 35(11): 2609–2618 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0088>

### [一种基于稀疏系数匹配学习的图像去雾算法](#)

An image dehazing method based on learning framework with sparse coefficient matching  
*控制与决策*. 2020, 35(11): 2797–2802 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.1764>

# 自适应直觉模糊相异直方图裁剪的图像增强算法

兰 蓉<sup>†</sup>, 贾亚雯

(西安邮电大学 通信与信息工程学院, 西安 710121)

**摘要:** 针对经典的直方图均衡化图像增强算法可能存在的对比度过度增强、亮度分布不均匀和细节信息不突出等问题, 提出自适应直觉模糊相异直方图裁剪的图像增强算法. 基于直觉模糊集的“投票模型”, 引入直觉模糊相异直方图的概念, 并基于此提取图像像素的空间位置信息. 同时, 利用 S 型隶属度函数对图像直觉模糊相异直方图进行自适应裁剪, 采用分段策略对裁剪后的直觉模糊相异直方图进行均衡化处理. 最后, 利用直觉模糊集的犹豫度刻画原图像的未知信息, 修正由引导滤波获得的细节图像, 从而保留图像丰富的细节信息. 针对 3 种类型的图像, 即自然图像、MRI 脑图像及近红外图像的实验结果表明, 所提出算法能够有效提高图像的对比度, 保留图像的细节信息, 使图像呈现较自然的视觉效果, 改善图像的质量评价指标.

**关键词:** 图像增强; 直方图均衡化; 直觉模糊集; S 形隶属度函数; 相异直方图

中图分类号: TP391

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2020.0845

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



引用格式: 兰蓉, 贾亚雯. 自适应直觉模糊相异直方图裁剪的图像增强算法[J]. 控制与决策, 2021, 36(12): 2919-2928.

## Adaptive intuitionistic fuzzy dissimilar histogram clipping image enhancement algorithm

LAN Rong<sup>†</sup>, JIA Ya-wen

(School of Telecommunication and Information Engineering, Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an 710121, China)

**Abstract:** Aiming at the shortcomings of the classic histogram equalization image enhancement algorithm, such as excessive contrast, uneven brightness distribution and low detail information, an adaptive intuitionistic fuzzy dissimilar histogram clipping image enhancement algorithm is proposed. Firstly, based on the “voting model” of intuitionistic fuzzy sets, this paper defines the concept of an intuitionistic fuzzy dissimilar histogram to extract the spatial location information of image pixels. Secondly, an S-type membership function is used to adaptively clip the intuitionistic fuzzy dissimilar histogram. Then, a segmentation strategy is used to equalize the clipped intuitionistic fuzzy dissimilar histogram. Finally, the hesitancy of the intuitionistic fuzzy set is used to characterize the unknown information of the original image, and modify the detailed image obtained by the guide filtering, thereby the rich detailed information of an image is retained. The experimental results for three types of images, namely natural images, MRI brain images and near-infrared images, show that the proposed algorithm efficiently enhances contrast, retains the details, yields natural visual quality images, and improves an image quality evaluation index.

**Keywords:** image enhancement; histogram equalization; intuitionistic fuzzy set; S-type membership function; dissimilar histogram

## 0 引言

图像增强在计算机视觉、模式识别等领域发挥着至关重要的作用<sup>[1]</sup>, 其目的是通过对图像进行修正, 改善图像的视觉效果, 提供直观、清晰、适合分析的图像<sup>[2]</sup>. 当实际获得的图像质量较差, 如对比度低、

细节不清晰和整体亮度不均匀等时, 会给后续的图像分析和处理带来困难. 在众多的图像增强算法中, 基于直方图均衡化的增强算法应用较为广泛. 经典的直方图均衡化(histogram equalization, HE)算法对不同种类的图像均可产生较好的增强效果<sup>[3]</sup>, 但可能会

收稿日期: 2020-06-27; 修回日期: 2020-09-11.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61571361, 61671377); 西安邮电大学西邮新星团队计划项目(xyt2016-01).

责任编辑: 彭木根.

<sup>†</sup>通讯作者. E-mail: ronglanlogic@163.com.

存在过度增强、平均灰度迁移与灰度级过度合并、细节丢失等问题。

为了解决这些问题,限制对比度自适应直方图均衡化(contrast limited adaptive histogram equalization, CLAHE)算法<sup>[4]</sup>通过裁剪直方图来防止图像过度增强,但算法中的裁剪值不能自适应选取。Vidya等<sup>[5]</sup>提出利用三角模糊隶属度函数解决裁剪值自适应选取的问题,该算法对多模生物图像增强效果较好,但增强后的图像亮度分布不均,且对自然图像增强效果较差。Paul等<sup>[6]</sup>提出基于平台三直方图均衡化的图像增强(plateau limit-based tri-histogram equalisation for image enhancement, PLTHE)算法,该算法利用直方图分段技术使得增强后的图像可保持与原图像相似的亮度水平,但容易造成图像局部细节丢失,产生不自然的外观。上述算法仅利用单个像素的信息对图像进行增强,并未考虑像素的空间信息,往往导致增强后的图像不自然,不符合视觉特性。模糊上下文对比度增强(fuzzy-contextual contrast enhancement, FCCE)算法<sup>[7]</sup>利用模糊集理论提出模糊相异直方图的概念,该算法考虑图像中的上下文关系,可为增强后的图像带来较为自然的视觉效果。

由于模糊集的隶属度仅可表示像素对其邻域像素的支持与非支持程度两方面的信息,无法表示未知信息,使得模糊相异直方图对信息的表示不充分,增强后的图像易出现色彩偏暗和细节不够突出等问题。而直觉模糊集<sup>[8]</sup>作为模糊集概念的推广,不仅能够表示隶属度与非隶属度,还可表示像素与其邻域像素空间关系的未知信息。鉴于此,本文基于直觉模糊集理论对模糊相异直方图概念进行推广,定义图像的直觉模糊相异直方图概念。在对图像缺乏先验知识的情况下,直觉模糊相异直方图可以提取图像中的未知信息,得到图像上下文关系的合理表示,从而有效避免不确定、不精确信息的损失。此外,上述基于直方图均衡化的图像增强算法可能出现对比度过度增强,细节模糊等问题。为此,提出自适应直觉模糊相异直方图裁剪的图像增强算法,该算法将模糊相异直方图推广到直觉模糊相异直方图。同时,利用S型隶属度函数对直觉模糊相异直方图进行自适应裁剪,再对裁剪后的直觉模糊相异直方图进行分段均衡化。利用直觉模糊集中的犹豫度概念描述图像像素的未知信息,对由引导滤波获得的细节图像进行修正,尽可能保留丰富的图像细节。最后,通过对自然图像、MRI脑图像和近红外图像3种类别的图像数据进行仿真实验,结果表明所提出算法具有较强的增强效果。

## 1 基本概念及相关工作

### 1.1 直觉模糊集<sup>[8]</sup>

设  $X$  为有限论域,则  $X$  上的直觉模糊集  $A$  定义为

$$A = \{(x, \mu_A(x), \mu_{cA}(x)) : x \in X\}, \quad (1)$$

其中映射  $\mu_A : X \rightarrow [0, 1]$  和映射  $\mu_{cA} : X \rightarrow [0, 1]$  分别称为隶属度函数和非隶属度函数,且满足  $\forall x \in X, 0 \leq \mu_A(x) + \mu_{cA}(x) \leq 1$ 。

元素  $x$  对直觉模糊集  $A$  的犹豫度表示为

$$\pi_A(x) = 1 - \mu_A(x) - \mu_{cA}(x), \quad (2)$$

显然  $0 \leq \pi_A(x) \leq 1$ 。

### 1.2 模糊相异直方图

考虑到图像像素的空间位置信息,文献[7]利用输入图像的模糊性质计算模糊相异直方图。

输入一幅  $M \times N$  的图像  $I_o$ , 有

$$I_o = \{I_o(p, q) | 0 \leq p \leq M - 1, 0 \leq q \leq N - 1\}.$$

其中:像素强度  $I_o(p, q) = \lambda, \lambda \in \{0, 1, \dots, L - 1\}, L = 256$ 。

随后,以  $3 \times 3$  窗口大小计算邻域像素模糊相似度的模糊隶属度函数为

$$\mu_s(p, q) = \max\{1 - |I_o(i, j) - I_o(p, q)|/\sigma, 0\}.$$

其中:  $i = p + m, j = q + n, m, n \in \{-1, 0, 1\}, \sigma$  为输入图像的标准偏差。该邻域像素的模糊隶属度为

$$\tilde{\mu}(p, q) = \frac{1}{9} \sum_{m=-1}^1 \sum_{n=-1}^1 \mu_s(p + m, q + n). \quad (3)$$

最后,对相似模糊集取补集<sup>[9]</sup>,即  $\mu_{c'}(p, q) = 1 - \tilde{\mu}(p, q)$ ,表示像素  $I_o(p, q)$  与其邻域像素的相异程度,模糊相异直方图  $H_{fdh}$  为

$$H_{fdh} = \{h_{fdh}(\lambda) | \lambda = 0, 1, \dots, L - 1\}; \quad (4)$$

$$h_{fdh}(\lambda) = \sum_{p=0}^{M-1} \sum_{q=0}^{N-1} \Phi_\lambda(p, q); \quad (5)$$

$$\Phi_\lambda(p, q) = \begin{cases} \mu_{c'}(p, q), & I_o(p, q) = \lambda; \\ 0, & \text{otherwise,} \end{cases} \quad (6)$$

### 1.3 限制对比度自适应直方图均衡化算法

限制对比度自适应直方图均衡化算法在计算转换函数前,通过裁剪直方图限制对比度放大,超过裁剪值的像素会被重新均匀地分配在直方图的其他部分<sup>[4]</sup>。直方图裁剪上限计算公式为

$$\beta = \frac{\hat{N}[1 + \eta \times (s_{\max} - 1)]}{l}, \quad (7)$$

$$s_{\max} = \frac{\gamma}{\partial}. \quad (8)$$

其中:  $\hat{N}$  为图像某个子块的像素总数,  $\eta$  为截断系数,  $l$  为该子块的最大灰度级数,  $\gamma, \delta$  分别为该子块的灰度均值与均方差,  $s_{\max}$  为最大允许的斜率.

## 2 自适应直觉模糊相异直方图裁剪的图像增强算法

由于HE算法及其改进算法未考虑图像上下文之间的关系,且容易造成细节信息的丢失,本文提出自适应直觉模糊相异直方图裁剪的图像增强算法.

### 2.1 预处理

为了改善低质量图像的色彩信息,首先对图像RGB三个通道分别进行动态范围拉伸<sup>[10]</sup>,具体如下:

$$R' = \frac{R - \min(R)}{\max(R) - \min(R)}, \quad (9)$$

$$G' = \frac{G - \min(G)}{\max(G) - \min(G)}, \quad (10)$$

$$B' = \frac{B - \min(B)}{\max(B) - \min(B)}, \quad (11)$$

$$I_1 = R' + G' + B'. \quad (12)$$

其中:  $\min(\cdot)$  和  $\max(\cdot)$  分别为各颜色空间矩阵中像素的最小值和最大值,  $I_1$  为颜色通道拉伸后得到的预处理图像.

将预处理图像  $I_1$  的RGB空间转换为HSI空间. 由于H通道和S通道不会直接影响人类对图像对比度的感知,并且人类视觉系统对强度变化特别敏感,保持图像的色调H与饱和度S不变,仅对亮度通道I进行变换,从而避免对图像颜色信息的影响.

### 2.2 直觉模糊相异直方图

灰度是图像的重要特征之一,但在图像增强过程中,多数算法仅考虑灰度信息,导致图像增强存在一定的局限性和盲目性. 为了解决该问题,本文算法考虑像素的空间位置信息,引入直觉模糊相异直方图概念,为图像中的模糊、不精确信息建模,并利用直觉模糊相异直方图提取图像的空间信息.

直觉模糊集<sup>[8]</sup>是模糊集的推广概念,能更为准确地刻画图像内容的不精确、不确定性信息. 因此,本文基于模糊集与直觉模糊集之间的关系,借助“投票模型”将模糊相异直方图进行推广,得到直觉模糊相异直方图的概念,具体构造方式如下.

在实际投票过程中,支持者和反对者的观点通常会相互影响,从而产生犹豫或中立者. 假设在模糊集中隶属度  $\mu(p, q)$  为支持者,则  $1 - \mu(p, q)$  为反对者. 若支持者受到反对者的影响,则会产生犹豫者,表示为  $\mu(p, q)(1 - \mu(p, q))$ ; 若反对者受到支持者的影响产生犹豫者,则表示为  $(1 - \mu(p, q))\mu(p, q)$ . 从而,直觉模糊

集的犹豫度<sup>[11]</sup>为

$$\pi(p, q) = 2\mu(p, q)(1 - \mu(p, q)), \quad (13)$$

相应的直觉模糊集的隶属度和非隶属度分别为

$$\mu^*(p, q) = \mu^2(p, q), \quad (14)$$

$$\mu c^*(p, q) = (1 - \mu(p, q))^2. \quad (15)$$

根据生成的直觉模糊集,构造直觉模糊相异直方图  $H_{fdh}^*$  为

$$H_{fdh}^* = \{h_{fdh}^*(\lambda) | \lambda = 0, 1, \dots, L - 1\}; \quad (16)$$

$$h_{fdh}^*(\lambda) = \sum_{p=0}^{M-1} \sum_{q=0}^{N-1} \Phi_{\lambda}^*(p, q); \quad (17)$$

$$\Phi_{\lambda}^*(p, q) = \begin{cases} \mu c^*(p, q), & I_1(p, q) = \lambda; \\ 0, & \text{otherwise,} \end{cases} \quad (18)$$

其中:  $I_1(p, q)$  为预处理图像,  $L = 256$ .

直方图往往呈现明显的尖峰,如图1(b)所示. 在模糊相异直方图中(如图1(c)所示),由于考虑了图像中像素的空间位置关系,峰值得到一定降低,但是在IFDH中,由于同时考虑了图像中的未知信息,使得IFDH中峰值较低,相较于模糊相异直方图更为平滑(如图1(d)所示). 因此,对于位于图像的高度纹理化区域中的像素,IFDH可以提供相对显著的对比度改善. 位于平滑区域的灰度值变化幅度较小,从而避免了平滑区域的过度拉伸,能够有效防止过度增强.

利用“投票模型”生成的直觉模糊相异直方图不涉及任何参数,避免了参数选取带来的计算成本或者主观因素对增强效果的影响.

### 2.3 基于S型隶属函数的自适应直方图裁剪

为了实现直方图裁剪值的自适应选取,提高算法对不同类型图像的适应性,本文提出利用S型隶属度函数自适应获得裁剪值. 该方法可有效限制IFDH中的高频灰度级,从而解决图像局部对比度过度增强的问题. S型隶属度函数如下所示:

$$S(x) = \frac{a}{1 + e^{-kx+b}}. \quad (19)$$

其中:  $k$  为曲线的陡峭程度;  $a$  和  $b$  保证曲线趋近于  $(255, 1)$  且经过点  $(z, 0.5)$ , 显然  $a = 1, b = 0.05z; 0 < S(x) < 1; x \in \{0, 1, \dots, 255\}$ .

通过大量实验发现,当  $k = 0.05$  时增强效果普遍较好,最终得到

$$S(x) = \frac{1}{1 + e^{-0.05x+0.05z}}, \quad (20)$$

$$z = \frac{x_{\max} + x_{\min}}{2}, \quad (21)$$

其中  $x_{\max}$  和  $x_{\min}$  分别为像素的最大、最小值.

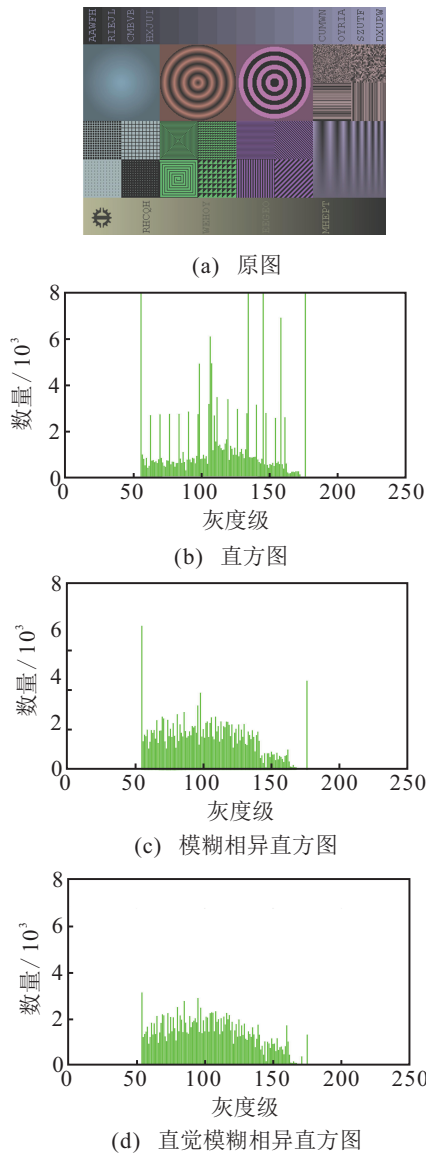


图1 直方图对比

利用S型隶属函数根据IFDH中像素的数量计算出各灰度级对应的裁剪值后,由式(7)自适应计算直方图的裁剪上限.同时,将超出IFDH裁剪上限的像素均匀地分配到IFDH的其他部分,得到裁剪后的视觉模糊相异直方图 $\bar{H}_{fdh}^*$ .

2.4 直方图分段均衡化

直方图分段技术是一种有效保持图像平均亮度的方法<sup>[12]</sup>.由于直方图分段过多容易导致输出图像的对比度降低,本文采用Ostu法<sup>[13]</sup>自适应确定图像的分割阈值 $g$ ,将IFDH分为两段,对两个子直方图分别均衡化.子直方图的概率密度函数表示为

$$P_{back}(\lambda) = \frac{\bar{H}_{fdh}^*(\lambda)}{N_{back}}, 0 \leq \lambda \leq g; \quad (22)$$

$$P_{pro}(\lambda) = \frac{\bar{H}_{fdh}^*(\lambda)}{N_{pro}}, g + 1 \leq \lambda \leq L - 1. \quad (23)$$

两个子直方图中像素的总数分别为 $N_{back}$ 和 $N_{pro}$ ,子直方图的累积概率密度函数分别为

$$C_{back}(\lambda) = \sum_{\lambda=0}^g P_{back}(\lambda), \quad (24)$$

$$C_{pro}(\lambda) = \sum_{\lambda=g+1}^{L-1} P_{pro}(\lambda). \quad (25)$$

直方图的转换函数为

$$y_{back}(\lambda) = g \times C_{back}(\lambda), \quad (26)$$

$$y_{pro}(\lambda) = (g + 1) + (L - g + 1) \times C_{pro}(\lambda). \quad (27)$$

对图像中组成背景与前景的像素分别进行直方图均衡化,可以有效防止图像的平均灰度迁移,保持图像原有的亮度.最后,将子直方图合并后再映射到原图像,形成增强后的亮度通道 $I_e$ .

2.5 基于犹豫度的细节增强

在多数基于HE的图像增强算法中,容易造成细节信息的损失.为了解决此问题,本文利用犹豫度进行细节增强.

首先,利用引导滤波器<sup>[14]</sup>对原始图像 $I_o$ 进行滤波得到图像 $I_d$ ,从而得到图像细节 $I_b = I_o - I_d$ .然后,利用式(13)生成的犹豫度 $\pi$ 增强图像中的细节,即

$$I_{bz} = I_b \times (1 + \pi), 0 < \pi < 1. \quad (28)$$

将修正后的细节图像 $I_{bz}$ 与增强后的 $I_e$ 通道融合,得到细节增强后的强度通道

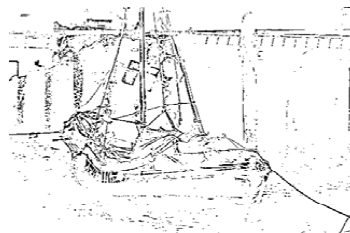
$$I_z = I_{bz} + I_e. \quad (29)$$



(a) 没有细节增强



(b) 细节增强



(c) 两者之间的差

图2 细节增强对比

最后,转换HSI空间到RGB空间得到增强图像。

**注1** 由于像素强度具有上、下限,经过细节增强处理后,会有个别灰度值超过上、下限,为了缓和离群值的影响,将超过强度上、下限的灰度值设定为图像中像素的最大、最小值。

如图2所示,本文算法采用直觉模糊集的犹豫度作为修正因子,可以自适应地增强图像边缘区域中的细节,船的轮廓以及水波纹等更加清晰。

## 2.6 算法流程

给出自适应直觉模糊相异直方图裁剪的图像增强算法的具体流程如图3所示。

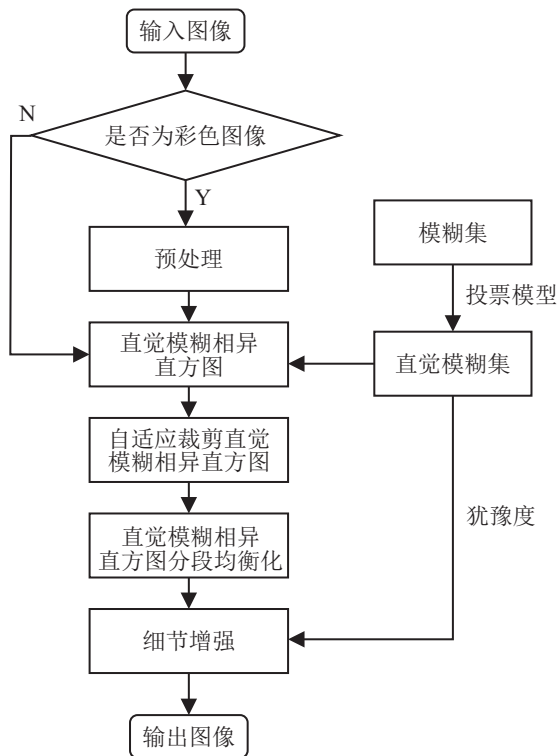


图3 本文算法流程

首先,利用“投票模型”构造预处理(灰度)图像的IFDH,提取图像的空间位置信息;其次,基于IFDH像素数量构造S型隶属度函数实现直觉模糊相异直方图的自适应裁剪;然后,对IFDH进行自适应分段均衡化;最后,通过犹豫度增强图像细节得到增强图像。

## 3 实验结果与分析

为验证算法性能,选择3种类型的测试图像,分别来自4个数据集:坦佩雷图像数据集2013(tampere image dataset 2013, TID2013)<sup>[15]</sup>、分类主观图像质量(categorical subjective image quality, CSIQ)<sup>[16]</sup>、RGB-NIR<sup>[17]</sup>场景数据集和互联网脑分割数据集(internet brain segmentation repository, IBSR)<sup>[18]</sup>。

相关对比算法包括:HE算法<sup>[3]</sup>;CLAHE算法<sup>[4]</sup>,给定裁剪值 $\alpha_{CLAHE} = 50$ ;为了保持亮度,对直方图进行分段均衡化的BPASHE算法<sup>[19]</sup>,算法参

数根据原文设定;三角模糊隶属度对比度受限自适应直方图均衡化(triangular fuzzy membership-contrast limited adaptive histogram equalization, TFM-CLAHE)算法<sup>[5]</sup>,将图像平均分为4个互不重叠的子块;对图像背景与细节分别进行处理的基于多级直方图形状分割(multi-level histogram shape segmentation, MLHSS)的对比度增强算法<sup>[20]</sup>,参数设置依据原文献给出的最优值,并使用细节增强算法;FCCE算法<sup>[7]</sup>、二维直方图均衡化(two-dimensional histogram equalization, 2DHE)算法<sup>[21]</sup>,均以 $3 \times 3$ 窗口大小计算邻域像素间的信息;利用加权变分模型的同时反射和照明估计(simultaneous reflectance and illumination estimation, SRAIE)算法<sup>[22]</sup>,参数根据原文设定。

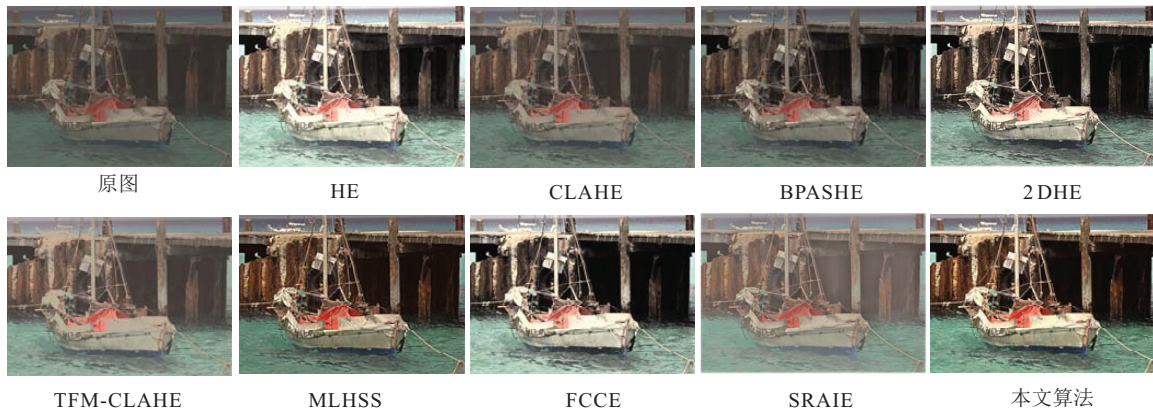
### 3.1 图像增强视觉效果对比

分别选择TID2013和CSIQ数据集中各1幅图像、IBSR数据集和RGB-NIR数据集中各2幅图像进行测试。如图4~图6所示,由于HE算法和2DHE算法直接对直方图进行全局均衡化处理,导致增强后的图像亮度不均匀。CLAHE算法、BPASHE算法和SRAIE算法处理的图像整体较暗,增强后的图像与原图相比视觉差别不明显。TFM-CLAHE算法增强的MRI脑图在亮度较高的区域出现过度增强,导致图像中的细节信息丢失,对自然图像和近红外图像对比度增强较差。MLHSS算法处理后的图像视觉效果较好,但在个别图像中会发生算法失效的现象,如图4(b)第7幅图所示。FCCE算法虽然引入图像上下文信息增强了图像对比度,但是图像亮度分布不均匀,细节不够突出。本文算法增强的图像,对比度提高,细节信息丰富,视觉效果更加自然,彩色图像的色彩更加鲜艳。

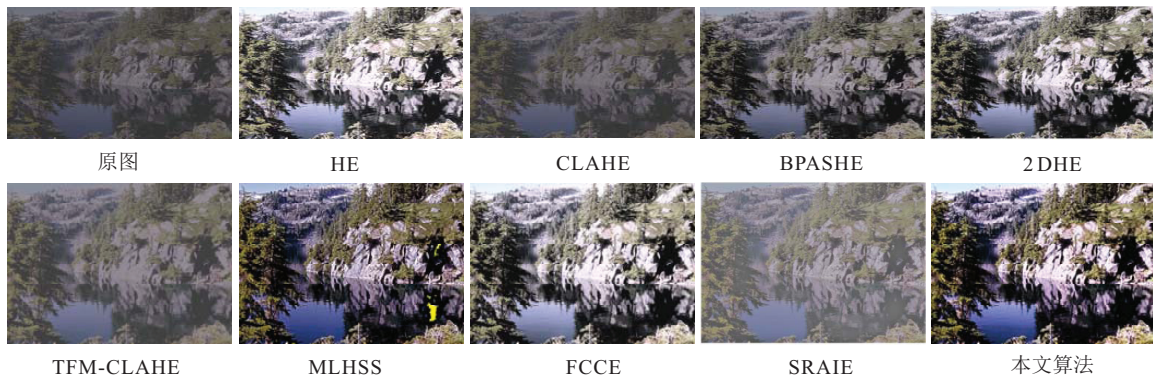
### 3.2 图像质量客观评价指标

为了客观分析本文算法的性能,采用5种定量指标(信息熵<sup>[1]</sup>(information entropy, IE)、质量感知相对对比度量<sup>[23]</sup>(quality-aware relative contrast measure, QRCM)、饱和度<sup>[1]</sup>(saturation, S)、平均梯度<sup>[3]</sup>(average gradient, AG)和边缘保持系数<sup>[24]</sup>(edge preservation index, EPI))对增强后的图像进行客观质量评价。

IE描述图像细节及内容的丰富性,IE越大表明图像包含的信息量越大。QRCM利用原图像和处理后图像的梯度幅度测量相对对比度变化和图像质量变化,取值范围为 $[-1, 1]$ ,QRCM值越大图像对比度越高。S表示图像中颜色的强度,S值越大图像颜色越明亮。AG表示图像的细节丰富程度,AG越大图像质量越高、越清晰。

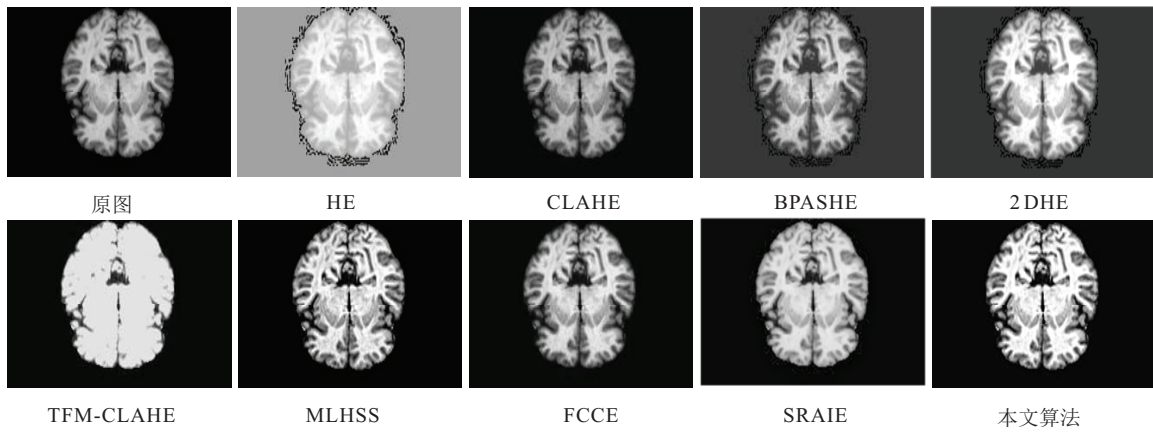


(a) ill\_17\_5 图像

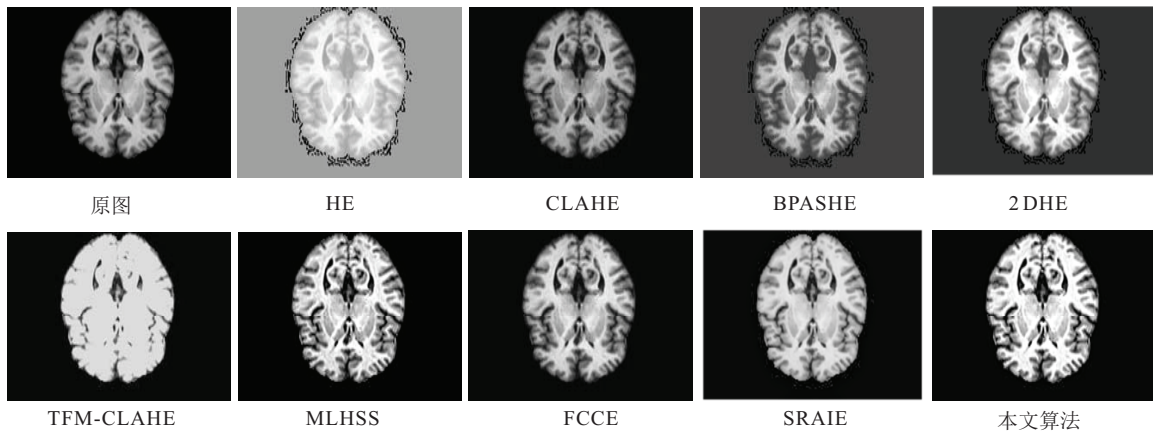


(b) lake.contrast 图像

图4 TID2013和CSIQ结果



(a) IBSR\_07\_ana\_strip\_127 图像



(b) IBSR\_07\_ana\_strip\_132 图像

图5 MRI脑图像结果

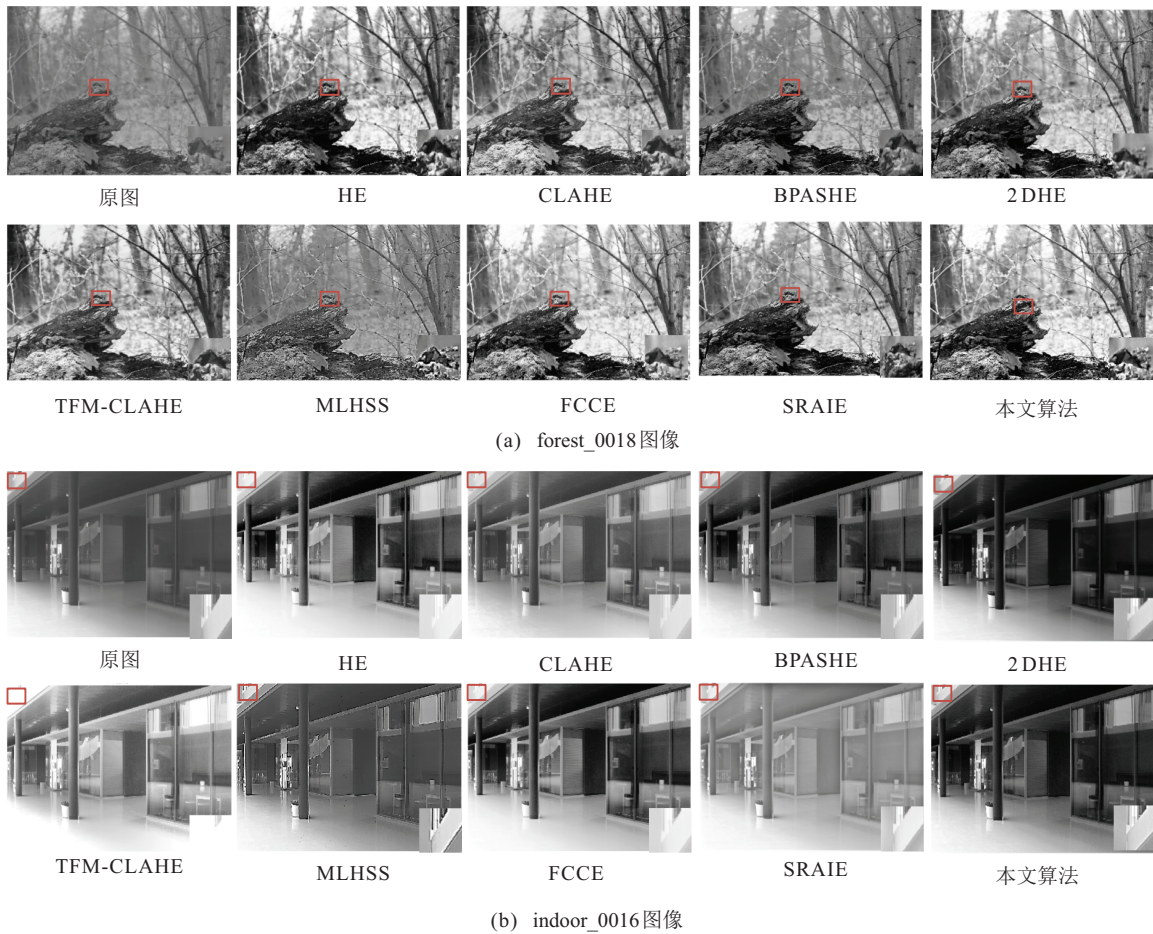


图6 近红外图像结果

针对TID2013数据集和CSIQ数据集选择的自然图像如表1所示. 统计TID2013数据集中125幅图像、CSIQ数据集中150幅图像对5种质量评价指标的平

均值, 分别如表2和表3所示. 由表1~表3可知, 本文算法质量评价指标IE、QRCM、S、AG和EPI结果大多优于对比算法, 图像增强性能较好.

表1 TID2013和CSIQ数据集中图像的质量评价

图像	指标	HE	CLAHE	BPASHE	2DHE	TFM-CLAHE	MLHSS	FCCE	SRAIE	本文算法
i11_17_5 图像	IE	7.437	6.664	6.748	7.403	5.853	7.163	<u>7.476</u>	6.678	<b>7.653</b>
	QRCM	0.442	0.125	0.207	0.444	0.003	0.290	0.454	<b>0.698</b>	<u>0.496</u>
	S	0.092	0.095	<u>0.096</u>	0.094	0.095	0.248	0.093	0.094	<b>0.255</b>
	AG	13.178	5.561	7.003	12.925	4.566	8.023	<u>13.679</u>	5.322	<b>17.084</b>
	EPI	3.249	1.383	1.741	3.178	1.178	2.005	<u>3.355</u>	1.273	<b>4.216</b>
lake.contrast 图像	IE	7.190	5.865	6.614	7.236	5.325	<u>7.390</u>	7.294	6.470	<b>7.448</b>
	QRCM	0.509	0.024	0.331	0.516	-0.097	0.441	0.521	<b>0.724</b>	<u>0.561</u>
	S	0.047	0.048	0.048	0.048	0.048	<b>0.279</b>	0.048	0.048	<u>0.249</u>
	AG	17.662	5.020	10.975	17.734	4.401	14.145	<u>18.770</u>	6.829	<b>23.610</b>
	EPI	3.811	1.080	2.373	3.829	0.972	3.015	<u>4.047</u>	1.409	<b>5.088</b>

表2 TID2013中125幅图像对5种质量评价指标的平均值

指标	HE	CLAHE	BPASHE	2DHE	TFM-CLAHE	MLHSS	FCCE	SRAIE	本文算法
IE	<b>7.545</b>	7.321	7.225	7.251	7.515	7.221	7.237	7.067	<u>7.421</u>
QRCM	0.185	0.091	0.092	0.710	0.143	0.094	0.212	<b>0.699</b>	<u>0.288</u>
S	0.228	0.232	<u>0.233</u>	0.230	0.226	0.274	0.229	0.223	<b>0.281</b>
AG	<u>12.590</u>	9.317	9.396	9.808	11.462	8.703	12.500	9.920	<b>16.667</b>
EPI	<u>2.086</u>	1.422	1.478	1.963	1.701	1.326	2.009	1.127	<b>2.580</b>

表3 CSIQ中150幅图像对5种质量评价指标的平均值

指标	HE	CLAHE	BPASHE	2DHE	TFM-CLAHE	MLHSS	FCCE	SRAIE	本文算法
IE	6.846	6.266	6.482	6.872	6.112	7.042	<u>7.977</u>	6.317	<b>8.266</b>
QRCM	0.297	0.056	0.157	0.706	0.087	0.246	0.378	<b>0.718</b>	<u>0.425</u>
S	0.100	0.101	0.101	0.101	0.100	<u>0.288</u>	0.116	0.101	<b>0.297</b>
AG	12.083	5.933	7.269	11.523	6.649	8.820	<u>13.448</u>	3.104	<b>16.761</b>
EPI	<u>6.918</u>	1.365	3.013	6.814	1.497	4.870	5.796	1.250	<b>7.227</b>

表4 MRI脑图像质量评价

图像	指标	HE	CLAHE	BPASHE	2DHE	TFM-CLAHE	MLHSS	FCCE	SRAIE	本文算法
IBSR_07_ana_strip_127 图像	IE	3.560	3.969	3.726	3.756	2.202	3.968	3.843	<b>4.485</b>	<u>3.974</u>
	QRCM	-0.355	-0.002	-0.103	0.043	-0.380	0.047	0.079	<b>0.538</b>	<u>0.214</u>
	AG	5.894	5.241	5.928	6.162	4.369	5.672	6.071	5.811	<b>9.356</b>
	EPI	1.304	1.028	1.199	1.369	0.858	1.103	1.182	1.237	<b>1.844</b>
IBSR_07_ana_strip_132 图像	IE	3.816	4.155	3.893	3.871	2.501	4.196	4.191	<u>4.308</u>	<b>4.311</b>
	QRCM	-0.265	-0.019	0.001	0.044	-0.332	0.089	0.117	<b>0.534</b>	<u>0.246</u>
	AG	5.865	4.578	5.633	<u>6.457</u>	4.303	5.546	5.933	6.210	<b>9.029</b>
	EPI	<u>1.418</u>	0.998	1.265	1.323	0.933	1.199	1.290	1.231	<b>1.990</b>

表5 近红外图像质量评价

图像	指标	HE	CLAHE	BPASHE	2DHE	TFM-CLAHE	MLHSS	FCCE	SRAIE	本文算法
forest_0018 图像	IE	6.819	<u>7.731</u>	6.851	6.929	5.985	7.365	7.390	6.934	<b>7.850</b>
	QRCM	0.292	0.288	0.162	0.275	0.080	<b>0.401</b>	0.293	0.110	<u>0.398</u>
	AG	8.566	7.937	5.826	7.328	6.120	<b>16.525</b>	7.999	4.712	<u>11.600</u>
	EPI	2.238	2.081	1.531	1.922	1.629	<b>5.354</b>	2.109	1.203	<u>3.174</u>
indoor_0016 图像	IE	6.807	<u>7.483</u>	6.930	7.027	6.155	7.264	7.069	7.086	<b>7.709</b>
	QRCM	0.186	0.143	0.109	0.132	0.058	<b>0.272</b>	0.193	0.084	<u>0.229</u>
	AG	3.895	2.815	2.965	2.628	2.850	<b>6.263</b>	3.618	2.014	<u>4.146</u>
	EPI	2.348	1.697	1.791	1.524	1.709	<b>4.184</b>	2.154	1.066	<u>2.572</u>

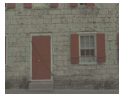
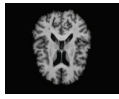

针对MRI脑图像和近红外图像的质量评价,如表4和表5所示.由于饱和度S基于图像颜色通道进行计算,只对IE、QRCM、AG和EPI质量评价指标进行测试.由表4可知,本文算法对MRI脑图像的质量评价指标优于大部分对比算法,IE和QRCM仅次于SRAIE算法,但视觉效果优于SRAIE算法.由表5可知,本文算法在近红外图像中IE的质量评价指标最高,MLHSS算法的QRCM、AG、EPI质量评价指标最高,本文算法次之.但考虑到MLHSS算法处理的图像严重失真,造成不良的视觉效果,本文提出的图像增强算法仍然具有一定的有效性.

为了分析本文算法3个步骤:IFDH、直方图裁剪、细节增强的有效性,采取消融策略进行对比,分别构造了3种算法:本文算法中仅去掉直觉模糊相异直

方图,保留其他步骤;仅去掉直方图裁剪步骤,保留其他步骤;仅去掉利用犹豫度的细节增强,保留其他步骤.选择了3幅不同类型的图像,从评价指标方面分析各步骤的优势.

如表6所示,去掉IFDH的算法未考虑像素的位置信息,细节信息丢失,性能指标有所下降,因此IFDH对图像增强是有效的.去掉细节增强的算法造成增强后的图像细节信息丢失,各评价指标低于本文算法,表明利用犹豫度可以有效增强图像细节,改善图像质量.当去掉直方图裁剪时,信息熵指标较低.综合看,本文算法中3个主要步骤都具有一定的有效性.上述实验表明,采用直觉模糊集理论不但能够表示图像中的不确定性,而且改善了图像的增强效果.

表6 消融实验质量评价

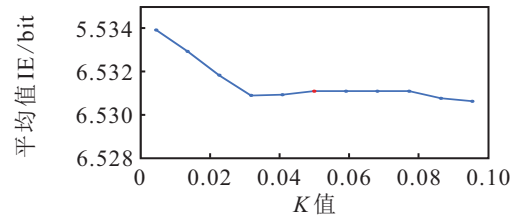
图像	指标	本文算法	去掉IFDH	去掉直方图裁剪	去掉细节增强
	IE	<u>7.759</u>	<b>7.818</b>	7.706	7.741
	QRCM	<b>0.547</b>	0.544	<u>0.546</u>	0.507
	S	<u>0.128</u>	0.127	<b>0.130</b>	0.107
	AG	<b>26.137</b>	25.502	<u>26.020</u>	21.175
	EPI	<b>5.025</b>	4.934	<u>5.014</u>	4.092
	IE	<b>3.962</b>	<u>3.953</u>	3.908	3.661
	QRCM	<b>0.227</b>	<u>0.205</u>	0.167	0.145
	S	/	/	/	/
	AG	<b>9.109</b>	<u>8.929</u>	8.513	6.602
	EPI	<b>1.924</b>	<u>1.906</u>	1.793	1.321
	IE	<u>7.381</u>	<b>7.699</b>	7.363	7.055
	QRCM	<b>0.284</b>	0.279	<u>0.283</u>	0.100
	S	/	/	/	/
	AG	<u>11.564</u>	11.383	<b>11.601</b>	6.549
	EPI	<u>2.401</u>	2.372	<b>2.408</b>	1.306

### 3.3 参数k对性能指标的影响

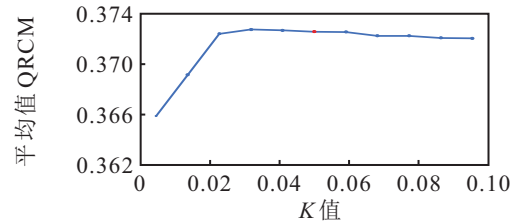
为了选择合适的k值,从每个数据集中选择一幅图像. 在区间[0, 0.1]内,以0.01的步长进行实验,获得4幅图像性能指标的平均值,结果如图7所示. 由图7可见:当k < 0.03时,指标IE、QRCM、AG、EPI、S值变化较大;当k = 0.05时,各指标值都较优,并且避免了图像过度饱和现象,因此,本文算法令参数k = 0.05.

### 3.4 算法运行效率分析

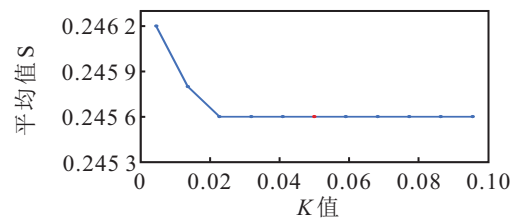
随机选取20幅图像对本文算法和对比算法的运行时间平均值进行比较,结果如表7所示. 与8种对比算法相比,本文算法的运行时间处于中间位置,由于HE、BPASHE、2DHE和FCCE算法复杂度较低,算法效率较高,但考虑到性能指标和视觉效果两方面,本文算法仍具有一定的有效性.



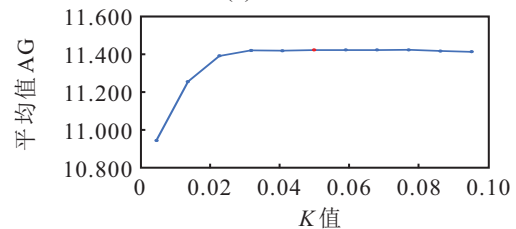
(a) IE指标结果



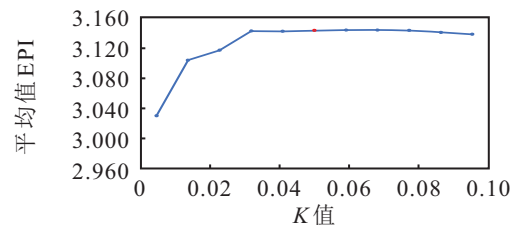
(b) QRCM指标结果



(c) S指标结果



(d) AG指标结果



(e) EPI指标结果

图7 不同k值的结果

表7 运行时间对比

指标	HE	CLAHE	BPASHE	2DHE	TFM-CLAHE	MLHSS	FCCE	SRAIE	本文算法
运行时间/s	0.876	2.155	1.233	1.261	3.599	1.917	1.404	3.829	1.769

## 4 结论

经典的HE及相关改进算法仅仅利用单个像素的灰度特征进行计算,未考虑图像空间信息、对比度增强过度、图像平均亮度迁移和细节丢失等问题. 鉴于此,本文基于直觉模糊集理论,提出自适应直觉模糊相异直方图裁剪的图像增强算法. 该算法利用直觉模糊集的“投票模型”生成直觉模糊集的犹豫度,构造直觉模糊相异直方图. 为了防止对比度过度增强,利用S型模糊隶属函数实现对直方图的自适应裁剪,并利用阈值分割技术实现自适应的直方图分段均衡

化处理,有效保持图像原有亮度,同时利用犹豫度保留图像中的细节信息. 仿真实验及性能指标的量化分析表明,相较于对比算法,所提出算法在视觉效果和评价指标方面均获得了较好的图像增强效果. 另外,本文算法中参数k的取值对算法影响较大,k的自适应选取是值得探讨的课题之一.

### 参考文献(References)

[1] Veluchamy M, Subramani B. Image contrast and color enhancement using adaptive gamma correction and histogram equalization[J]. Optik-International Journal for

- Light and Electron Optics, 2019, 183(8): 329-337.
- [2] 姚若河, 黄继武, 吴湘淇. 改进的直方图均衡化图像增强算法[J]. 铁道学报, 1997, 19(6): 78-81.  
(Yao R H, Huang J W, Wu X Q. An improved image enhancement algorithm of histogram equalization[J]. Journal of the China Railway Society, 1997, 19(6): 78-81.)
- [3] 丁畅, 董丽丽, 许文海. “直方图”均衡化图像增强技术研究综述[J]. 计算机工程与应用, 2017, 53(23): 12-17.  
(Ding C, Dong L L, Xu W H. Review of “histogram” equalization technique for image enhancement[J]. Computer Engineering and Applications, 2017, 53(23): 12-17.)
- [4] 杨有, 李波. CLAHE和细节放大相结合的档案图像增强方法[J]. 中国图象图形学报, 2011, 16(4): 522-527.  
(Yang Y, Li B. A method of document image enhancement based on the combination of CLAHE and detail amplifying[J]. Journal of Image and Graphics, 2011, 16(4): 522-527.)
- [5] Vidya B S, Chandra E. Triangular fuzzy membershipcontrast limited adaptive histogram equalization (TFMCLAHE) for enhancement of multimodal biometric images[J]. Wireless Personal Communications, 2019, 106(2): 651-680.
- [6] Paul A, Bhattacharya P, Maity S P, et al. plateau limit-based tri-histogram equalisation for image enhancement[J]. IET Image Processing, 2018, 12(9): 1617-1625.
- [7] Parihar A S, Verma O P, Khanna C. Fuzzy-contextual contrast enhancement[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2017, 26(4): 1810-1819.
- [8] Atanassov K T. Intuitionistic fuzzy sets[J]. Fuzzy Sets and Systems, 1986, 20(1): 87-96.
- [9] Zadeh L A. Fuzzy sets[J]. Information and Control, 1965, 8(3): 338-353.
- [10] Veluchamy M, Subramani B. Image contrast and color enhancement using adaptive gamma correction and histogram equalization[J]. Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 2019, 183(8): 329-337.
- [11] 兰蓉, 林洋. 抑制式非局部空间直觉模糊C-均值图像分割算法[J]. 电子与信息学报, 2019, 41(6): 1472-1479.  
(Lan R, Lin Y. Suppressed non-local spatial intuitionistic fuzzy C-means image segmentation algorithm[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2019, 41(6): 1472-1479.)
- [12] Mun J, Jang Y, Nam Y, et al. Edge-enhancing bi-histogram equalisation using guided image filter[J]. Journal of Visual Communication and Image Representation, 2019, 58(1): 688-700.
- [13] Otsu N. A threshold selection method from gray-level histograms[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1979, 9(1): 62-66.
- [14] He K, Sun J, Tang X. Guided image filtering[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2013, 35(6): 1397-1409.
- [15] Ponomarenko N, Jin L, Iermeiev O, et al. Color image database TID2013: Peculiarities and preliminary results[C]. European Workshop on Visual Information Processing. Paris: IEEE, 2013: 106-111.
- [16] Larson E C, Chandler D M. Most apparent distortion: full-reference image quality assessment and the role of strategy[J]. Journal of Electronic Imaging, 2010, 19(1): 1884-2020.
- [17] Brown M, Susstrunk M. Multi-spectral sift for scene category recognition[C]. The 24th IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Colorado: IEEE, 2011: 177-184.
- [18] Valverde S, Oliver A, Cabezas M, et al. Comparison of 10 brain tissue segmentation methods using revisited IBSR annotations[J]. Journal of Magnetic Resonance Imaging, 2015, 41(1): 93-101.
- [19] 董丽丽, 丁畅, 许文海. 基于直方图均衡化图像增强的两种改进方法[J]. 电子学报, 2018, 46(10): 2367-2375.  
(Dong L L, Ding C, Xu W H. Two improved methods based on histogram equalization for image enhancement[J]. Acta Electronica Sinica, 2018, 46(10): 2367-2375.)
- [20] Tohl D, Li J S L. Contrast enhancement by multi-level histogram shape segmentation with adaptive detail enhancement for noise suppression[J]. Signal Processing: Image Communication, 2019, 71(7): 45-55.
- [21] Celik T. Two-dimensional histogram equalization and contrast enhancement[J]. Pattern Recognition, 2012, 45(10): 3810-3824.
- [22] Fu X Y, Zeng D L, Huang Y, et al. A weighted variational model for simultaneous reflectance and illumination estimation[C]. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Las Vegas: IEEE, 2016: 2782-2790.
- [23] Celik T. Spatial mutual information and pagerank-based contrast enhancement and quality-aware relative contrast measure[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2016, 25(10): 4719-4728.
- [24] 张微, 孙蓉桦, 章孝灿. 基于改进的小波软阈值法的 SAR 图像去噪[J]. 遥感信息, 2004, 19(4): 4-6.  
(Zhang W, Sun R H, Zhang X C. Noise removal of SAR image based on improved wavelet soft-thresholding method[J]. Remote Sensing Information, 2004, 19(4): 4-6.)

### 作者简介

兰蓉(1977-), 女, 副教授, 博士, 从事图像处理、模式识别等研究, E-mail: ronglanlogic@163.com;

贾亚雯(1995-), 女, 硕士生, 从事图像增强的研究, E-mail: jiaayawen3121@163.com.

(责任编辑: 郑晓蕾)