

文章编号：1002-1582(2021)06-0747-07

基于自适应直方图均衡化耦合拉普拉斯变换的红外图像增强算法

吕侃徽¹, 张大兴^{2*}

(1. 浙江金融职业学院 信息技术学院, 浙江 杭州, 310018)

(2. 杭州电子科技大学 计算机学院, 浙江 杭州, 310018)

摘要：当前较多红外图像增强方法利用图像灰度特征增强图像,这类方法忽略了图像灰度分布的不均匀性,导致增强结果存在细节丢失和对比度不理想等问题,为了克服上述问题,提出了一种自适应直方图均衡化耦合拉普拉斯变换的红外图像增强算法。将输入图像进行均匀分割后,借助洛伦兹曲线的基尼系数,求取了图像灰度分布的不均匀性程度,从而构造了自适应的上、下限阈值,用于对图像进行自适应直方图均衡化,以实现对图像进行对比度增强;引入平滑滤波方法,去除图像中的噪声。并在传统拉普拉斯变换的基础上,融入图像像素值的对角二阶导数信息,形成8邻域拉普拉斯变换,以完成图像边缘等细节内容的锐化处理,以增强图像清晰度;利用本算法对不同红外图像进行了增强实验,结果显示,本算法具有更好的增强质量,其输出图像拥有更高的对比度和清晰度,呈现出更好的视觉效果。

关键词：红外图像增强; 直方图均衡化; 自适应阈值; 平滑滤波; 拉普拉斯变换; 灰度不均匀性

中图分类号：TP391 文献标识码：A

DOI:10.13741/j.cnki.11-1879/o4.2021.06.018

Infrared image enhancement algorithm based on adaptive histogram equalization coupled with Laplace transform

LV Kanhui¹, ZHANG Daxing^{2*}

(1. School of Information Technology, Zhejiang Financial College, Hangzhou 310018, China)

(2. School of Computer, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: At present, many infrared image enhancement methods use image gray features to enhance the image. These methods ignore the non-uniformity of image gray distribution, resulting in the loss of details and unsatisfactory contrast. In order to overcome the above problems, an infrared image enhancement algorithm based on adaptive histogram equalization coupled with Laplace transform is proposed. Firstly, after the input image is evenly segmented, the degree of non-uniformity of image gray distribution is calculated with the help of Gini coefficient of Lorentz curve. Based on the degree of non-uniformity of image gray distribution, the adaptive upper and lower thresholds are constructed to realize adaptive histogram equalization for image contrast enhancement. Then, the smooth filtering method is introduced to remove the noise in the image. Based on the traditional Laplace transform, the eight neighborhood Laplace transform is formed by integrating the diagonal second derivative information of image pixel value, which is used to sharpen the image edge and other details, so as to enhance the image clarity. Finally, the algorithm is used to enhance different infrared images. The experimental results show that the contrast and clarity of the enhanced image are better, and the visual effect is better.

Key words: infrared image enhancement; histogram equalization; adaptive threshold; smoothing filter; laplace transform; inhomogeneity of gray scale

收稿日期：2021-03-02；收到修改稿日期：2021-08-16

基金项目：国家自然科学基金(61572160, 61272391); 浙江省自然科学基金资助项目(LY20F020002); 浙江省科技厅科研项目(15ZJSS1024); 浙江省省属高校基本科研业务费项目资金资助(2021ZD08)

作者简介：吕侃徽(1978—),男,副教授,硕士,从事计算机图像、嵌入式系统、计算机视觉方面的研究。

张大兴(1971—),男,副教授,博士,从事图像处理、模式识别、密码学方面的研究。

* 通讯作者：51074889@qq.com

0 引言

红外图像对可见光的依赖性较弱,在夜间等环境下也能反应出拍摄现场的场景^[1]。正由于红外图像具有的这种独特性能,其被人们广泛用于夜间监测、遥感探测以及军事侦查等领域。虽然红外图像对成像环境的要求较低,但红外图像的对比度较低,不能较好的表现场景中的边缘等细节信息,使得图像的清晰度较低^[2,3]。因此,如何增强红外图像的对比度和清晰度就成为了当下的研究重点。

近年来,在人们的研究下,出现了大量的红外图像增强方法。如 Medina 等^[4]利用直方图均衡化的原理,将图像的灰度特征映射到直方图中,提出了一种基于削波直方图均衡化的红外图像增强算法,将直方图分为 4 个子直方图,然后根据子直方图的大小对每个子直方图进行切割限制,实现子直方图的均衡化,进而完成对红外图像的增强。这种方法虽然能够较好的提升红外图像的对比度,但其没有考虑图像灰度分布的不均匀性,易使得增强后图像出现图像细节内容丢失的现象。顾振飞等^[5]根据图像的亮度和纹理特征,对图像的显著和非显著内容进行了提取,接着利用图像的强度特征,通过暗通道先验的方法,求取了图像的透射图,并在透射图的基础上,通过导向全变分模型对图像显著区域的边缘进行了增强。该方法虽然增强了图像的清晰度,但没有考虑图像的灰度均匀性,使得增强后图像的对比度下降。Lu 等^[6]通过多尺度卷积的方法来提高图像的清晰度,接着采用遗传算法来对图像的亮暗区域进行分割,最后采用区间直方图及灰度均匀化的方法对图像的亮暗区域进行亮度和对比度调节。该方法通过遗传算法来分割图像的亮暗区域时,对阈值的依赖性较强,且区间直方图及灰度均匀化没有考虑图像灰度的不均匀性,易使得增强后图像出现细节表达能力不强的现象。

对此,本文对图像进行均匀分割后,利用洛伦兹曲线度量了图像灰度的不均匀性,并以其为依据,构造了自适应的上、下限阈值,用于对图像进行自适应直方图均衡化,以避免增强图像对比度时,出现欠增强和细节内容丢失的现象。接着采用平滑滤波的方法,滤除图像中的噪声。通过引入图像像素值的对角二阶导数信息的方法,形成了 8 邻域拉普拉斯变换,利用其对去噪后的图像进行锐化处理,以增强图像的清晰度。通过实验可见,本文算法增强后的图像具有较好的对比度和较高的清晰度。

1 本文图像增强算法设计

本文所设计的红外图像增强算的流程如图 1 所示。该算法分为图像对比度处理和图像清晰度处理两个部分。

(1) 图像对比度处理。在图像对比度处理时,先将输入的红外图像按照同等大小均匀分割,获取非重叠的子图。接着利用洛伦兹曲线的基尼系数,度量图像的灰度不均匀性,并以其为依据,构造自适应上、下阈值,用于修改子图像的直方图,接着求取每个局部直方图分布的累积分布函数,实现自适应直方图均衡化,进而完成图像的对比度增强。

(2) 图像清晰度处理。在图像清晰度处理时,借助平滑滤波对图像进行去噪。接着将图像的对角二阶导数信息引入传统拉普拉斯变换的过程中,形成 8 邻域拉普拉斯变换,对图像的边缘等细节进行锐化,完成图像的清晰度增强,输出增强后的图像。

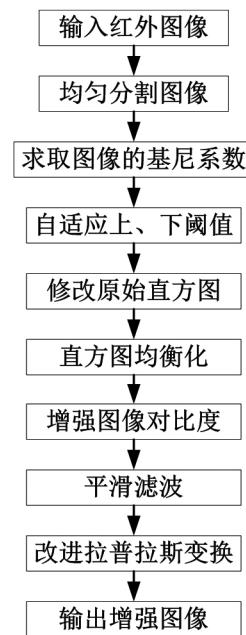


图 1 本文图像增强算法的过程

1.1 图像对比度增强处理

对于灰度图像,其对比度可以定义为,通过可感知的灰度差异,将目标信息与图像背景区分开来的程度。增强图像的对比度,有利于区分图像中的目标信息与背景信息。直方图均衡化方法通过均匀的改变图像的灰度分布,来增强图像的对比度,其使用较为广泛。然而直方图均衡化方法没有考虑图像灰度分布的不均匀性,易导致图像的细节内容丢失或局部欠增强的现象出现^[7-9]。对此,本文借助洛伦兹曲线来度量图像灰度分布的差异性来设计一种自适应的直方图均衡化方法,以增强图像的对比度。

洛伦兹曲线是经济学中发展起来的一种统计模型,用来表示分布的不平等性。不平等度由洛伦兹曲线的曲率,即基尼系数来表示。基尼系数与不平等度成正比^[10]。同时,一条等分线通常与洛伦兹曲线一起绘制,其表示一个均匀分布的结果。图2显示了以图像 I_k 灰度信息为基础所绘制的洛伦兹曲线示意图。

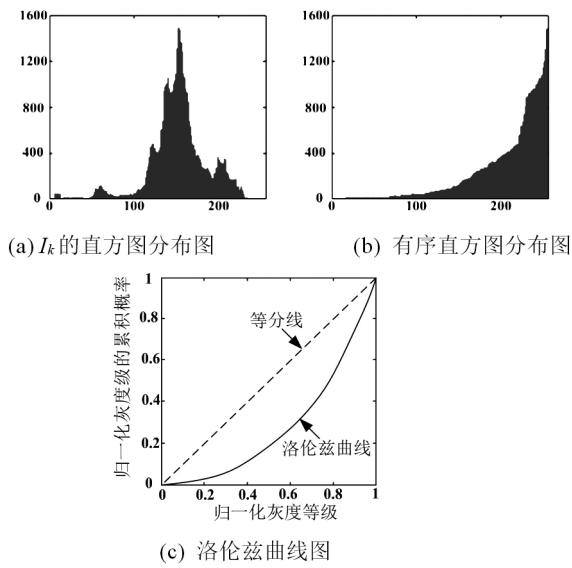


图2 洛伦兹曲线示意图

基尼系数 g 的求取过程为

$$g = \frac{\sum_{k=0}^{K-1} \{ \text{cdf}_e(I_k) - \text{cdf}_c(I_k) \}}{\sum_{k=0}^{K-1} \text{cdf}_e(I_k)} \quad (1)$$

$$k = 0, 1, 2, \dots, K-1$$

式中, K 为 I_k 的灰度级总数; k 为 I_k 的灰度级; $\text{cdf}_e(I_k)$ 和 $\text{cdf}_c(I_k)$ 分别为等分线和洛伦兹曲线的累积分布函数。

在增强对比度之前,将图像 I_k 按照 $m \times n$ 的大小分割成一定数量的非重叠子图像。这样每个子图像可以根据其各自的局部直方图分布独立地进行增强,避免相邻区域直方图的影响,以促使较好的保留图像的细节信息。与此同时,为了避免子图像拼接处出现较大的偏差,本文利用相邻子图像的像素加权平均值来生成一组插值像素值,以平滑子图像边界附近的块效应,从而保证拼接处不会出现较大的偏差。

随后,利用基尼系数 g 构造自适应上、下限阈值 T_u 和 T_l 为

$$\begin{cases} T_u = (1-g)h_{\max} + gT_l \\ T_l = n/K \end{cases} \quad (2)$$

式中, h_{\max} 为最高的直方图数量; n 为图像中的像素

个数。

根据式(2)得到的 T_u 和 T_l ,修改 I_k 的直方图,可表示为

$$h_i(I_k) = \begin{cases} h(I_k) & h(I_k) < T_u \\ T_u & h(I_k) \geq T_u \end{cases} \quad (3)$$

$$r_i(I_k) = \begin{cases} h_i(I_k) & h_i(I_k) > T_l \\ h_i(I_k) + \frac{c_x}{k_{T_l}} & h_i(I_k) \leq T_l \end{cases} \quad (4)$$

式中, $h(I_k)$ 为原始图像的直方图函数; $h_i(I_k)$ 和 $r_i(I_k)$ 分别表示对 $h(I_k)$ 上限和下限修改后的直方图函数; c_x 为满足 $h(I_k) \geq T_u$ 部分的灰度级的数量, k_{T_l} 为满足 $h_i(I_k) \leq T_l$ 部分的灰度级的数量。

通过 T_u 和 T_l 以图像灰度分布的不均匀性为依据,修改原始图像的直方图,有助于避免欠增强和细节内容丢失的现象。最后,通过 $r_i(I_k)$ 求取每个局部直方图分布的累积分布函数 $\text{cdf}(I_k)$ 来实现修改后直方图分布的均衡化^[11],可表示为

$$\text{cdf}(I_k) = \sum_{k=0}^{K-1} \frac{r_i(I_k)}{n} \quad (5)$$

再借助 $\text{cdf}(I_k)$ 来求取增强后的输出图像 I_{out} 为

$$I_{\text{out}} = (G_{\max} - G_{\min}) \text{cdf}(I_k) + G_{\min} \quad (6)$$

式中, G_{\max} 和 G_{\min} 为图像最大灰度值和最小灰度值。

通过式(6)获取输出图像 I_{out} 后,再依据双线性插值,利用相邻子图像的像素加权平均值,生成一组插值像素值,以平滑子图像边界附近的块效应,完成图像的重建。图4显示了原始红外图像对比度增强后的结果。



(a) 原始红外图像 (b) 对比度增强后的红外图像

图3 对比增强结果

1.2 图像清晰度增强处理

在计算机视觉和图像处理中,可通过锐度来描述图像边缘信息的突出程度,体现图像的清晰度。高锐度图像具有更突出的边缘信息和边界清晰的图像细节,使得图像具有更高的清晰度。拉普拉斯变换可对图像进行锐化,使得图像的边缘信息更为突出,增强图像的清晰度^[12,13]。由于拉普拉斯变换会受图像中噪声的影响,因此需要对图像进行去噪处

理。平滑滤波方法可对图像进行去噪,且方法较为简单^[14,15]。对此,本文将采用平滑滤波对图像进行去噪后,再通过拉普拉斯方法来增强图像的清晰度。

平滑滤波方法通过一个 $a \times b$ 大小的滤波模板 $U(a, b)$,对输入图像 $I(x, y)$ 进行去噪,其去噪过程为

$$f(x, y) = \sum_{m=-a}^a \sum_{n=-b}^b U(m, n) I(x - m, y - n) \quad (7)$$

式中, $f(x, y)$ 为去噪后的输出图像。

本文采用的滤波模板 $U(a, b)$ 为一个如图 4 所示的 3×3 模板。

1/9	1/9	1/9
1/9	1/9	1/9
1/9	1/9	1/9

图 4 滤波模板的示意图

通过式(7)完成去噪后,即可对 $f(x, y)$ 进行拉普拉斯变换。

拉普拉斯变换是基于图像 $f(x, y)$ 在 x, y 方向上的二阶导数实现的, $f(x, y)$ 在 x, y 方向上的二阶导数分别为

$$\frac{\partial^2 f(x, y)}{\partial^2 x} = f(x + 1, y) + f(x - 1, y) - 2f(x, y) \quad (8)$$

$$\frac{\partial^2 f(x, y)}{\partial^2 y} = f(x, y + 1) + f(x, y - 1) - 2f(x, y) \quad (9)$$

将式(8)和式(9)相加,即可得到 $f(x, y)$ 的拉普拉斯变换结果 $L(x, y)$ ^[16] 为

$$L(x, y) = f(x + 1, y) + f(x - 1, y) + f(x, y + 1) + f(x, y - 1) - 4f(x, y) \quad (10)$$

从式(10)可见,拉普拉斯变换仅在图像的行、列上对图像进行了清晰度增强。为了进一步改善图像清晰度的增强效果,在此加入图像对角方向上的信息,对式(10)进行改进,形成 8 邻域拉普拉斯变换,以获取具有更高清晰度的图像 $L'(x, y)$,可表示为

$$L'(x, y) = f(x + 1, y) + f(x - 1, y) + f(x, y + 1) + f(x, y - 1) + f(x + 1, y - 1) + f(x - 1, y + 1) + f(x - 1, y - 1) - f(x + 1, y + 1) - 8f(x, y) \quad (11)$$

通过本文方法,对图进行清晰度优化,结果如图 5 所示。从图 5 可见,增强后的图像具有较好的对比度和清晰度。



图 5 增强图像

2 实验结果

在 Intel i7 10700K CPU、500GB 硬盘的 PC 上,采用 Matlab2014 来验证本文算法的增强性能。为了突出所提技术的优势,将文献[17]、文献[18]视为对比组。其中,文献[17]算法通过非抽样加性小波变换分解输入图像获取其子带,然后通过同态变换方法和直方图均衡方法,分别增强图像的亮度和对比度,具有较好的代表性和新颖性。文献[18]算法通过金字塔变换方法,求取图像的低频和高频系数,利用模糊集理论和抗锐化掩模分别增强图像的对比度和清晰度,具有一定的创新性。实验中,输入图像的分割尺寸 $m \times n$ 设置为 3×3 。且实验样本均来自 OTCBVS 红外图像库。

2.1 图像增强视觉效果测试

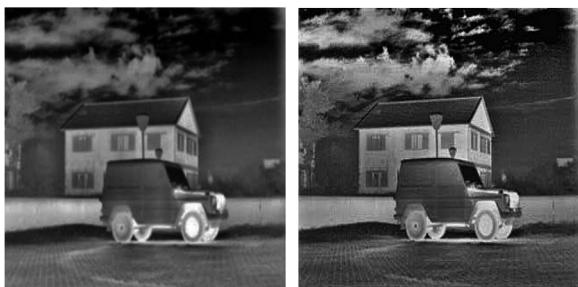
在此,利用三种算法分别对不加噪声干扰的 house-jeep 红外图像和 outdoor 红外图像,以及加了噪声干扰的 airport 红外图像和 building 红外图像进行增强。图 6 显示了三种算法对不加噪声干扰的 house-jeep 红外图像的增强效果。从图 6 可见,图 6 (b) 中房屋和车辆轮胎处过亮,且树木轮廓不清晰,天空中云彩的对比度较低,且存在云彩边缘等细节信息丢失的现象。图 6(c) 中房屋和树木的轮廓较为模糊,天空中云彩的亮度偏暗,地面砖块与草之间存在边界模糊的现象。图 6(d) 中房屋和树木的轮廓较为清晰,云彩的亮度适中且边缘清晰,地面砖块与草之间的边界也清晰可见,图像的整体对比度较好、亮度适中。图 7 显示了三种算法对噪声污染的 outdoor 红外图像增强的效果。对比图 7 中三种算法增强的图像可见,图 7(b) 中行人的亮度偏亮,树木的亮度偏黑,路边的汽车对比度较低,且树木的边缘等细节丢失。图 7(d) 中整体亮度偏低,且对比度也不高,房屋的细节不清晰。图中亮度和对比度都较好,树木和房屋的边缘等细节明显,行人的亮度也较为适中,路边汽车的对比度也较好,能够较为清晰的体现出细节内容。图 8 展示了三种算法对噪声污



(a) 红外图像



(b) 文献[17]算法



(c) 文献[18]算法

(d) 本文算法

图 6 house-jeep 红外图像增强效果



(a) 噪声干扰的红外图像



(c) 文献[18]算法

(d) 本文算法

图 8 噪声污染下 airport 红外图像增强效果



(a) 噪声干扰的红外图像

(b) 文献[17]算法



(c) 文献[18]算法

(d) 本文算法

图 7 outdoor 红外图像增强效果

染的 airport 红外图像增强的效果。对比图 8 中三种算法增强的图像可见,图 8(b)中整体偏亮,飞机和云彩的边缘等细节信息存在丢失的现象,地面草坪和跑道的边界较为模糊,图像中还存在噪声。图 8(c)中云彩和飞机的亮度偏暗,天空中云彩的对比度较低,且云彩存在细节内容丢失的现象。图 8(d)中整体亮度较为正常,图像的对比度较好,图像中不存在噪声,飞机和云彩的边缘等细节信息较为完整,地面草坪和跑道的边界较为清晰,草坪上草的细节信息也得到了较好的体现。图 9 显示了三种算法对



(a) 噪声干扰的红外图像

(b) 文献[17]算法



(c) 文献[18]算法

(d) 本文算法

图 9 噪声污染下 building 红外图像增强效果

噪声污染的 building 红外图像增强的效果。观察图 9中三种算法增强的图像可见,图 9(b)中房屋的过亮,对比度较低,不能较好的体现房屋的窗户等细节信息。图 9(c)偏暗且较为模糊,不能较好的体现房屋边缘以及窗户边缘等细节信息。图 9(d)中亮度和对比度都较好,房屋和窗户的边缘等细节内容都清晰可见。由此可见,本文算法增强的图像具有较好的视觉效果。因为本文算法利用洛伦兹曲线设计了自适应上、下限阈值,实现了自适应的直方图均衡化,在增强图像对比度的同时,保留了图像的细节

信息。同时本文算法还利用平滑滤波方法进行了去噪,在经典拉普拉斯变换的基础上,加入图像的像素值的对角二阶导数信息,获取了改进的拉普拉斯变换,对图像的清晰度进行了增强,从而提高了本文算法增强后图像的视觉效果。

2.2 客观测试

为了进一步测试三种算法增强图像的性能,在此采用模糊线性指数(Fuzzy Linear Index, FLI)、熵值(Entropy, E)和平均梯度(Average Gradient, AG),对图 6 至图 9 中三种算法增强后的图像进行数据测试。

FLI、E 和 AG 常被用于对增强后的图像进行客观数据评价。FLI 体现了图像对比度的大小,FLI 的值越小,就表示增强后图像具有越好的对比度和质量。E 表征了图像所含信息的丰富度,E 的值越大,就表示增强后图像具有越好的质量。AG 表征了图像细节信息的含量,AG 的值越大,就表示增强后图像保留了越丰富的边缘等细节内容,就具有越好的清晰度。

令增强后的图像为 $I(x, y)$,其大小为 $M \times N$ 。则 FLI、E 和 AG 的计算过程可表述为

$$\begin{cases} \text{FLI} = \frac{2}{M \times N} \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N \min[w_{xy}, (1 - w_{xy})] \\ w_{xy} = \sin\left[\frac{\pi}{2}\left(1 - \frac{I_{xy}}{I_{\max}}\right)\right] \end{cases} \quad (12)$$

$$E(i, j) = \sum_{M, N} p(m_{i, j}) \log_2(p(m_{i, j})) \quad (13)$$

$$AG = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^{M-1} \sum_{j=1}^{N-1} \left[\frac{I_x(i, j)^2 + I_y(i, j)^2}{2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (14)$$

式中, w_{xy} 为灰度比例因子; I_{xy} 为坐标处像素的灰度值; I_{\max} 为图像中的最大灰度值; $p(m_{i, j})$ 为灰度值 $m_{i, j}$ 的概率; $I_x(i, j)$ 和 $I_y(i, j)$ 分别为 $I(x, y)$ 在 x 和 y 轴上的一阶差分值图像。

三种算法增强后图像的 FLI、E 和 AG 结果如表 1 所示。对比表 1 所示三种算法增强后图像的数据测试结果可见,本文算法增强后图像的数据测试结果,较文献[17]、文献[18]算法增强后图像的数据测试结果更为理想。以图 7 增强后图像的数据为例,本文算法增强图像的 FLI、E 和 AG 值分别为 0.1942、7.8915 和 13.9996,而此时文献增强后图像对应的 FLI、E 和 AG 值分别为 0.2513、7.6135 和 12.7687,文献[18]增强后图像对应的 FLI、E 和 AG 值分别为 0.2294、7.7927 和 13.2738。由此可见,本

文算法的图像增强性能较强。因为本文算法在增强图像的对比度时,对图像进行了分割,避免了相邻区域直方图的影响,以促使较好的保留图像的细节信息,并且通过洛伦兹曲线度量了图像灰度分布的不均匀性,根据灰度分布的不均匀性设计了自适应的直方图均衡化方法,有助于避免欠增强和细节内容丢失的现象,对图像的对比度进行了增强。同时,本文算法还采用了平滑滤波方法去除了图像中的噪声后,考虑了图像的行、列、对角上像素值的二阶导数信息,获取了改进的拉普拉斯变换,有效增强了图像的边缘等细节信息,从而提高了本文算法的增强性能。文献[17]中通过非抽样加性小波变换将图像分解成六个子带,并将每个子带分解为光照分量和反射分量,并通过同态变换的方法对子带进行亮度增强,依据图像的灰度特征,通过直方图均衡方法,增强图像的对比度,获取增强后的图像。由于非抽样加性小波变换缺乏方向的选择性,其在分解图像时会丢失图像的细节信息,另外文献[17]中设计的直方图均衡方法没有考虑图像灰度的不均匀性,易使得增强后图像出现欠增强与细节丢失的情况,从而使得该方法的增强性能不佳。文献[18]中利用可调金字塔模型对红外图像进行多尺度分解,得到图像的低频系数和高频系数,利用模糊集理论对低频系数进行非线性变换,以增强图像的对比度,采用阈值法对高频系数进行降噪处理,并利用抗锐化掩模对图像细节进行处理,以增强图像的清晰度。由于基于模糊集理论的非线性变换方法,没有考虑图像灰度分布的不均匀性,易导致其对比度增强的效果不佳,另外,阈值法对高频系数进行降噪处理,对阈值的选择性要求较高,且不能保护图像的边缘等细节信息,易丢失图像的细节信息,从而降低了该算法的增强性能。

表 1 三种技术的量化测试数据

名称		图 6	图 7	图 8	图 9
本文算法	FLI	0.186	0.194	0.213	0.199
	E	8.035	7.891	7.628	7.794
	AG	15.081	13.999	12.864	13.685
文献[17]	FLI	0.237	0.251	0.279	0.261
	E	7.803	7.613	7.412	7.526
	AG	12.953	12.768	11.537	12.057
文献[18]	FLI	0.213	0.229	0.244	0.235
	E	7.984	7.792	7.564	7.651
	AG	14.297	13.273	11.987	12.867

3 结 论

本文对图像进行均匀分割后,借助洛伦兹曲线度量了图像灰度分布的不均匀性,并在此基础上设计了自适应的上、下限阈值,用于对图像进行自适应直方图均衡化,以达到增强图像对比度时,不丢失图像细节信息的目的。采用平滑滤波方法对图像进行了去噪处理后,将图像的像素值的对角二阶导数信息融入到传统拉普拉斯变换中,形成改进的拉普拉斯变换,对图像的边缘等细节内容进行更为精细的锐化,以达到增强图像清晰度的目的。通过实验可知,本文算法增强的图像具有较好的对比度和清晰度,增强图像的FLI值较低而AG值较高,说明本文算法能较有效的增强红外图像。

参考文献:

- [1] 王瑞, 尧王冠, 胡海峰. 低照度夜间红外监控图像增强系统设计[J]. 激光杂志, 2019, 40(8):64—67.
Wang Ruiyao, Wang Guan, Hu Haifeng. Design of low illumination night infrared monitoring image enhancement system[J]. Laser Journal, 2019, 40(8):64—67.
- [2] 王爽, 邵艳明, 宋敏敏. 一种面向目标跟踪性能的红外图像自适应增强方法[J]. 红外技术, 2019, 41(7):646—653.
Wang Shuang, Shao Yanming, Song Minmin. An adaptive enhancement method for infrared image based on target tracking performance[J]. Infrared Technology, 2019, 41(7):646—653.
- [3] 张晓娟, 樊东燕. 红外图像动态范围压缩和对比度增强研究[J]. 激光杂志, 2020, 41(6):76—79.
Zhang Xiaojuan, Fan Dongyan. Infrared image dynamic range compression and contrast enhancement study[J]. Laser Journal, 2020, 41(6):76—79.
- [4] Medina C R D, Brizuela P I A, Mello R J C. Quadri-histogram equalization for infrared images using cut-off limits based on the size of each histogram[J]. Infrared Physics & Technology, 2019, 99(1):257—264.
- [5] 顾振飞, 袁小燕, 张登银. 一种基于区域显著性识别的红外图像增强方法[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2019, 40(6):681—687.
Gu Zhenfei, Yuan Xiaoyan, Zhang Dengyin. Infrared image enhancement method based on regional saliency recognition[J]. Journal of Jiangsu University(Natural Science Edition), 2019, 40(6):681—687.
- [6] Lu Haoxiang, Liu Zhenbing, Pan Xipeng. An adaptive detail equalization for infrared image enhancement based on multi-scale convolution[J]. IEEE Access, 2020, 8(1):156763—156773.
- [7] 邓超迪, 李川, 李英娜. 基于直方图均衡化和双边滤波的变压红外图像增强[J]. 电力科学与工程, 2020, 36(11):38—44.
Deng Chaodi, Li Chuan, Li Yingna. Transformer infrared image enhancement based on histogram equalization and bilateral filtering[J]. Electric Power Science and Engineering, 2020, 36(11):38—44.
- [8] Liu Chengwei, Sui Xiubao, Kuang Xiaodong. Adaptive contrast enhancement for infrared images based on the neighborhood conditional histogram[J]. Remote Sensing, 2019, 11(11):1381.
- [9] Abhishek P, Tandra S, Paritosh B. Adaptive clip-limit-based bi-histogram equalization algorithm for infrared image enhancement [J]. Applied Optics, 2020, 59(28):9032—9041.
- [10] 吴健生, 门·新纳, 梁景天. 基于基尼系数的生态系统服务供需均衡研究——以广东省为例[J]. 生态学报, 2020, 40(19):6812—6820.
Wu Jiansheng, Men Xinna, Liang Jingtian. Research on supply and demand equilibrium of ecosystem services in Guangdong Province based on the gini coefficient[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(19):6812—6820.
- [11] Barik R, Saha T, Chatterjee S. Reduction based histogram equalization technique for image enhancement[J]. International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering, 2019, 8(11Special):1268—1271.
- [12] Yang Xi, Han Mingrui, Tang Hengliang. Detecting defects with support vector machine in logistics packaging boxes for edge computing[J]. IEEE Access, 2020, 8(1):64002—64010.
- [13] 郭钰璐, 董丽丽, 许文海. 融合边缘信息的对比度增强算法[J]. 红外技术, 2019, 41(7):616—622.
Guo Yulu, Dong Lili, Xu Wenhai. Contrast enhancement algorithm for edge information fusion[J]. Infrared Technology, 2019, 41(7):616—622.
- [14] Pan Mincheng. A universal approach to designing an image interpolator with an image smoothing filter[J]. Journal of Signal and Information Processing, 2019, 10(1):12—18.
- [15] Liu Wei, Zhang Pingping, Chen Xiaogang. Embedding bilateral filter in least squares for efficient edge-preserving image smoothing[J]. IEEE Transactions on Circuits & Systems for Video Technology, 2020, 30(1):23—35.
- [16] Hervé L, Louhichi S, Pène F. Multiplicative ergodicity of Laplace transforms for additive functional of Markov chains[J]. ESAIM: Probability & Statistics, 2019, 23(1):607—637.
- [17] Ashiba H I, Mansour H M, Ahmed H M. Enhancement of IR images using histogram processing and the Undecimated additive wavelet transform[J]. Multimedia Tools & Applications, 2019, 78(9):11277—11290.
- [18] Zheng Qinghe, Tain Xinyu, Yang Mingqian. Near-infrared image enhancement method in IRFPA based on steerable pyramid [J]. Engineering Letters, 2019, 27(2):100—111.