

文章编号: 1002-1582(2026)03-0361-07

频次均衡分布与边缘优化的红外图像增强

王荣福*

(广东科技学院 计算机学院, 广东 东莞 523083)

摘 要: 为了克服红外图像增强方法的缺陷, 进一步改善红外图像的效果, 提出了频次均衡分布与边缘优化的红外图像增强方法。统计图像像素在各个灰度级上分布的频次, 然后对频次序列进行指数变换, 以适当地降低低频次与高频次的差距; 另外, 调整部分较小的灰度级频次, 以避免对应的灰度级被合并; 最后根据频次对图像的像素值进行均衡映射, 以此改善红外图像的亮度和对比度。进一步地, 提出一种方向边缘算子, 用它提取八个方向的边缘图像, 然后对均衡映射后的图像进行边缘优化, 以强化边缘和纹理的显著性特征。实验结果显示, 经本文方法处理后的红外图像, 边缘和纹理特征较清晰, 图像质量指标平均梯度和信息熵优于增强性能较好的现有方法, 分别高出1.96%和0.55%以上, 因此, 方法可以更好地应用于红外图像应用领域。

关 键 词: 图像增强; 频次的指数变换; 均衡映射; 方向边缘算子; 边缘优化

中图分类号: TN211

文献标识码: A

Infrared image enhancement based on balanced distribution of frequency and edge optimization

WANG Rongfu*

(School of Computer, Guangdong University of Science and Technology, Dongguan 523083, China)

Abstract: Be aimed at the defects of infrared image enhancement methods and further improve the effect of infrared images, an infrared image enhancement method based on balanced distribution of frequency and edge optimization is proposed. It computes the frequency of image pixels for each gray level, and performs exponential transformation on the frequency sequence to appropriately reduce the difference between low frequency and high frequency. In addition, it adjusts the frequencies of certain low-frequency gray levels to avoid being merged. Finally, the pixel values of the image are mapped equally according to the frequency, so as to improve the brightness and contrast of the infrared image. Furthermore, a directional edge operator is proposed to extract edge images in eight directions, and then the edge of the equally mapped image is optimized to highlight the salient features of the edge and texture. The experimental results show that for the infrared image processed by the proposed method, its edge and texture features are clearer, the average gradient and information entropy of image quality indicators are better than the existing methods with better enhancement performance, which are 1.96% and 0.55% higher respectively. Therefore, the method in this paper can be better applied to infrared image applications.

Keywords: image enhancement; exponential transformation of frequency; equally mapping; directional edge operator; edge optimization

0 引 言

红外成像是根据场景发出或反射的红外辐射

源进行成像, 相对于可见光成像, 其具有全天候工作、非接触检测、实时性与动态检测等优势, 广泛应用于目标检测、火力控制、情报收集以及

收稿日期: 2026-02-25; 收到修改稿日期: 2026-04-17

基金项目: 教育部产学合作协同育人项目 (230805211152352); 东莞市社会发展科技项目 (20221800905782)

作者简介: 王荣福 (1979—), 男, 副教授, 硕士, 从事计算机图形学和物联网方面的研究。

* 通讯作者: 447019622@qq.com

无损检测等领域,但是其在亮度分布、对比度和细节信息的清晰度上不如可见光成像^[1]。因此,亟需改善红外图像的视觉效果,提升红外图像的场景表示能力。直方图均衡是最快速的图像增强方法,但是其会造成信息丢失和过增强^[2]。自适应限幅的双直方图均衡对直方图均衡进行了改进,其有效控制了过增强,但是其对图像对比度的改善不明显^[3]。汪伟等^[4]提出一种自适应阈值的直方图均衡方法,但是其对细节层与基本层的加权融合采用固定的加权系数,对部分图像会产生失真效果。为了校正红外图像的低亮度和低对比度的缺陷, Jiang等^[5]先用同态滤波提升图像的整体亮度与对比度,然后用自适应的直方图均衡 (Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization, CLAHE) 增强图像的微弱细节和改善分布不均的亮度。

相对于红外图像,可见光图像的场景信息表示能力更强,因此,部分学者利用可见光图像对红外图像进行增强^[6]。Sun等^[7]利用可见光图像与红外图像的互补性,分别从细节增强、对比度保持和亮度平衡的角度对红外图像进行增强。Donia等^[8]借助于具有良好动态范围的图像,对红外图像进行图像匹配和融合增强。图像匹配固然能改善红外图像的效果,但是对于不同图像,会产生过度增强的效果。针对现有的图像融合方法未能充分提取可见光图像的细节,从而导致图像融合的效果不自然, Zhou等^[9]提出了一种多权重的图像融合框架,但是增强图像的多数信息依赖于可见光图像,对于没有对应可见光图像的红外图像就失去了增强的意义。

针对当前的增强方法在提升图像对比度的同时,存在曝光过度、噪声放大以及增强图像中的目标不够显著等缺陷, Wang等^[10]对红外图像应用反向非线性灰度映射,然后对结果图像进行分层和Gamma校正。但是对亮度低、细节模糊的图像的增强效果不明显。Li等^[11]用引导滤波将图像分解为多尺度的细节层与基础层,用CLAHE增强基础层的对比度,最后将基础层与细节层进行线性融合。鉴于红外成像与雾天成像的近似性, Gao等^[12]对大气散射模型进行改进,使其适用于红外图像增强。郝锦虎等^[13]利用小波变换的多分辨率分析,在小波域中对低频和高频图像分别进行双边滤波与阈值滤波增强。但是阈值滤波在去除噪声的同时会模糊图像的边缘和细节。

近年来,部分学者结合神经网络提出了基于学习的图像增强方法^[14]。Zhu等^[15]用自适应的深度神经网络提取图像的多尺度特征,进而进行局部

特征融合增强。文献[16]用卷积神经网络分别学习红外图像与可见光图像的权重,然后将红外图像与可见光图像进行加权融合。基于深度学习的方法,往往依赖于庞大的数据集,无监督的增强方法往往泛化能力差,而有监督的增强方法所需要的基准数据集往往难以获得,缺乏实用性。

为使红外成像能以更好的效果应用于各个邻域,提出了基于频次均衡分布与边缘优化的红外图像增强方法。该方法一方面使得像素在灰度级空间中得到合理的分布,改善图像的亮度和对比度,另一方面根据图像边缘的几何特征,改善细节信息的清晰度,凸显图像的显著性特征。

1 本文方法

假设红外图像为 I ,灰度级数为 L ,先对 I 进行基于频次指数变换和灰度级保持的均衡映射,在保持图像灰度级的同时,实现灰度级动态空间的合理利用,从而改善图像的亮度和对比度;然后用提出的方向边缘算子,提取图像各个方向的边缘图像,将边缘图像与均衡映射图像进行线性融合,凸显图像的边缘和纹理特征。

1.1 基于频次指数变换的均衡映射

图像的效果在较大程度上决定于像素值在灰度级空间上的合理分布、灰度级空间是否充分利用。如果将像素值均匀地分布于灰度级空间,固然充分利用了灰度级空间,但是未能突出图像的显著性特征和有效提升图像的对比度。自适应的直方图均衡通过灰度级的频次进行灰度级重分布,但是其设定固定的阈值,对大于阈值的频次进行截断和重分布,对不同的图像缺乏适应性和鲁棒性。

经过对红外图像的细微观察和分析发现,对于一张红外图像,频次较大的灰度级对图像信息的表示能力较强,而频次较小的灰度级的信息表示能力相对较小。因此,像素在灰度级空间上的理想分布应为:在保证充分利用灰度级空间的同时,图像中频次较大的灰度级应分配较大的空间,但不能过大,否则会产生过度增强而破坏图像信息,且会因挤压频次较小的灰度级空间而产生欠增强;频次较小的灰度级应分配较小的空间,但不能过小,否则会产生欠增强。

根据以上分析,提出了基于频次指数变换和灰度级保持的灰度级均衡映射方法,具体步骤如下。

(1) 计算图像 I 的灰度级频次

$$f(i) = \text{sum}(I == i), i \in [0, 1, \dots, (L-1)] \quad (1)$$

式中 $\text{sum}()$ 为统计满足条件的元素个数的函数。

(2) 提取非 0 频次以及对应的灰度级

$$\text{idx} = \text{find}(f \sim 0) \quad (2)$$

$$F = f(\text{idx}) \quad (3)$$

式中, $\text{find}()$ 为查找满足条件的索引的函数, idx 为频次非 0 的灰度级序列, F 为与 idx 一一对应的像素频次序列。

(3) 将频次序列 F 归一化

$$F_{\text{nor}} = \frac{F}{\text{sum}(F)} \quad (4)$$

(4) 将归一化序列 F_{nor} 进行自适应的指数变换

$$F_{\text{nor}} = (F_{\text{nor}})^{\gamma} \quad (5)$$

式中, γ 为自适应的指数函数, 定义为

$$\gamma = \min\left(\frac{\text{mean}(F_{\text{nor}})}{\text{prctile}(F_{\text{nor}}, 90) - \text{prctile}(F_{\text{nor}}, 10)}, 1\right) \quad (6)$$

式中, $\text{prctile}()$ 为百分位函数; $\text{prctile}(F_{\text{nor}}, 90)$ 为序列 F_{nor} 从小到大排序后 90% 处的数据值。为了避免极端的奇异值, 取序列 F_{nor} 排序后的 90% 与 10% 处数据值的差值, 与序列 F_{nor} 的均值之间的比值作为指数。

对序列 F_{nor} 进行指数变换, 旨在缩小较高频次与较低频次之间的差距, 从而避免高频次的灰度级占用过大的空间, 而低频次的灰度级只有极小的空间或被其他灰度级合并。式 (6) 在分子均值一定的情况下, 作为高频次的 $\text{prctile}(F_{\text{nor}}, 90)$ 与低频次的 $\text{prctile}(F_{\text{nor}}, 10)$ 之间的差值越大, 对应的 γ 就越小, 对高、低频次差距的压缩程度就越大, 反之 γ 就越大, 对高、低频次差距的压缩程度就越小。

(5) 调整 F_{nor} 较小的频次

即便是对序列 F_{nor} 进行了指数变换, 个别极小的频次会直接导致在以下的灰度级均衡映射中产生灰度级合并, 因此借助阈值对个别频次较小的灰度级进行调整。

$$\text{idx_small} = \left(F_{\text{nor}} < \frac{1}{L-1}\right) \quad (7)$$

$$F_{\text{nor}}(\text{idx_small}) = F_{\text{nor}}(\text{idx_small}) + \frac{1}{L-1} \quad (8)$$

$$F_{\text{nor}} = \frac{F_{\text{nor}}}{\text{sum}(F_{\text{nor}})} \quad (9)$$

凡是频次小于 $1/(L-1)$ 的灰度级, 在以下的灰度级均衡映射中会产生灰度级合并, 所以在式 (7) 中设置阈值 $1/(L-1)$, 筛选频次较小的灰度级。式 (8) 为在原来极低的频次上增加一个阈值的值。式 (9) 对经变换和调整后的频次序列重

新归一化。

(6) 对归一化序列 F_{nor} 进行顺次累计求和

$$l = \text{length}(F_{\text{nor}}) \quad (10)$$

$$F_{\text{cum}}(r) = \sum_{k=0}^r F_{\text{nor}}(k), r \in [0, 1, \dots, l-1] \quad (11)$$

式中, $\text{length}()$ 为测量元素个数的函数。

(7) 根据 F_{cum} 进行灰度级映射, 获得新的灰度级序列

$$M(r) = F_{\text{cum}}(r) \times (L-1) \quad (12)$$

$$M(0) = 0 \quad (13)$$

为充分利用灰度级空间, 式 (13) 特别地将第一个非 0 频次的灰度级设置为最小值 0。新灰度级序列是根据图像的特征对原灰度级序列的合理分布。

(8) 对原图像进行灰度级变换

对原灰度级序列中的每个元素 $\text{idx}(r)$ ($r \in [0, 1, \dots, l-1]$), 在原图像 I 查找对应的坐标索引

$$(x, y) = \text{found}(I, \text{idx}(r)) \quad (14)$$

然后, 用新灰度级序列中的元素 $M(r)$ (两序列 idx 和 M 中的索引 r 是一致的), 在图像 I 中进行灰度级替换

$$I(x, y) = M(r) \quad (15)$$

式 (14) 与 (15) 中的 (x, y) 为像素的坐标序列。

基于频次指数变换的均衡映射, 能从像素值在灰度级空间的分布上来改善图像的亮度和对比度。

基于频次指数变换的均衡映射的示例如图 1 所示, 假设图像的灰度级数为 $L=256$ 。对比图 1 (a) 与图 1 (b), 可以看出指数变换前各个灰度级对应的频次差异悬殊, 而指数变换后, 频次之间的差异大大降低。作为对比, 图 1 (c) 为根据指数变换前的频次进行灰度级均衡的效果, 很明显, 因为频次的差异悬殊而产生灰度级合并, 从而导致灰度级减少了三分之一, 图像的部分信息丢失。再者, 对应频次较高的灰度级过度挤占频次较低的灰度级的动态空间, 从而导致高频次的灰度级产生过增强, 而低频次的灰度级产生欠增强。相对地, 根据变换后的频次进行均衡映射后的灰度级数保持不变, 而且灰度级在动态空间得到合理分布: 高频次的灰度级占用较大的空间, 而低频次的灰度级占用相对较小的空间, 从而在保持图像灰度级数的同时, 有效提升图像的对比度和显著性特征。

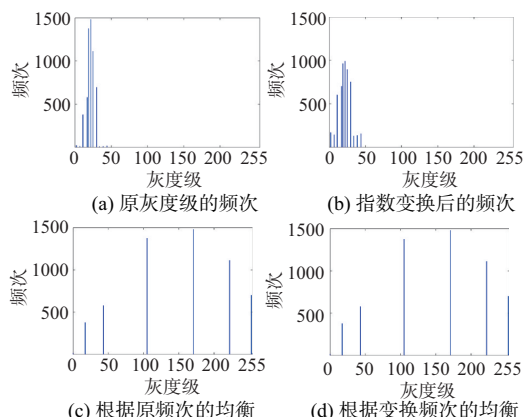


图 1 灰度级均衡映射的示例

1.2 基于方向边缘算子的边缘优化

基于频次指数变换的灰度级均衡映射，是从充分利用灰度级空间的角度提升图像的对比度和清晰度，但是忽略了图像的几何特征。为了增强图像的边缘细节和纹理特征，提出了基于方向边缘算子的边缘优化方法。其中，提出了八方向的边缘算子，如图 2 所示，它能更好地识别图像中不同方向的边缘。八个方向的边缘算子，以不同位置 and 不同方向的像素差值，拟合图像的不同位置 and 不同方向的边缘。

将图 2 所示的八个方向边缘算子分别记为 O_i ($i=1\sim 8$)，分别将它们与经均衡映射后的红外图像 I 进行卷积，提取八个方向的边缘图像

$$E_i = \text{conv}(I, O_i), i = 1 \sim 8 \quad (16)$$

$$AG = \frac{\sum_{x=1}^{h-1} \sum_{y=1}^{w-1} \sqrt{\frac{(I(x,y) - I(x+1,y))^2 + (I(x,y) - I(x,y+1))^2}{2}}}{h \times w} \quad (18)$$

$$E = - \sum_{x=0}^{L-1} P(x) \log_2 P(x) \left(\sum_{x=0}^{L-1} P(x) = 1 \right) \quad (19)$$

式中， h 和 w 分别为图像的高和宽； $P(x)$ 为图像中像素取值为灰度级 x 的概率。

视觉效果用人眼的视觉感知综合地评价图像的实际效果，但具有一定的主观性；平均梯度度量局部像素在水平和垂直方向上的变化，体现图像的对比度；信息熵体现图像的信息含量与边缘细节的丰富程度。

2.1 主观分析

将各个方法同时应用于六个场景的红外图像，然后将结果按不同场景分别列于图 3~8 中，其中图 X(a) ($X=3\sim 8$) 为增强前的红外图像。六个场景的红外图像的分辨率均为 288×384 ，灰度级数均为 256，包含人物、自然景物、建筑等多样性场景。为了更加清晰地比较各个方法的增强效果，对于每一图像，将用白色方框选择的一处细节区

将经均衡映射后的红外图像 I 与八个方向边缘图像进行线性融合，获得边缘优化的增强图像

$$I = I + \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 E_i \quad (17)$$

对均衡映射后的图像融合八个方向边缘图像的均值，一方面会增加图像的灰度级数，提升图像的有效信息量，另一方面会凸显图像的边缘细节和纹理特征，图像的细节信息更加清晰。

$$\begin{array}{cccc} \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} -1 & -1 & 1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 \\ -1 & 1 & 0 \\ -1 & 1 & 0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 \\ -1 & -1 & 1 \end{bmatrix} \\ \text{(a) } 0^\circ & \text{(b) } 45^\circ & \text{(c) } 90^\circ & \text{(d) } 135^\circ \\ \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0 & 1 & -1 \\ 0 & 1 & -1 \\ 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 1 & -1 & -1 \\ 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ \text{(e) } 180^\circ & \text{(f) } 225^\circ & \text{(g) } 270^\circ & \text{(h) } 315^\circ \end{array}$$

图 2 方向边缘算子

2 实验比较与分析

为了综合地评价提出方法的有效性，在实验环境 Intel(R) Core(TM) i7-7700、RTX 3060 和 Matlab 2024b 中，根据图像的视觉效果、信息熵和平均梯度，在不同场景的红外图像上比较各个增强方法的性能。其中，实验比较方法为文献[5]、[8]、[11]和[13]中提出的方法，下文中根据作者的姓将方法分别统一命名为 Jiang、Donia、Li 和 Hao。平均梯度和信息熵的定义为^[17]

域进行放大，然后置于该图像的下方。增强前的六个场景红外图像具有共同的特点：亮度偏低、对比度较低以及细节信息较模糊，而各个方法均能在不同程度上改善图像的效果。

如图 3 所示，Jiang 方法和 Li 方法能较好地改善图像的对比度和去除了模糊效果，但是 Jiang 方法的亮度偏低，部分图像信息的显示不够清晰。Donia 方法产生部分过度增强，而 Hao 方法增强后的细节信息较为模糊。本文方法的增强效果优于其他方法，从放大的细节区域也可以看出，增强后的细节区域较清晰、亮度较适宜。

各方法对场景二的处理效果如图 4 所示，相对地，本文方法增强后的亮度较适宜，细节信息较丰富，对比度较高，目标对象的显示效果较逼真。虽然 Li 方法的增强效果与本文方法较为接近，对比度也较高，但是根据放大的细节区域的比较，其在细节信息的清晰度和丰富程度上逊色于本文方法。

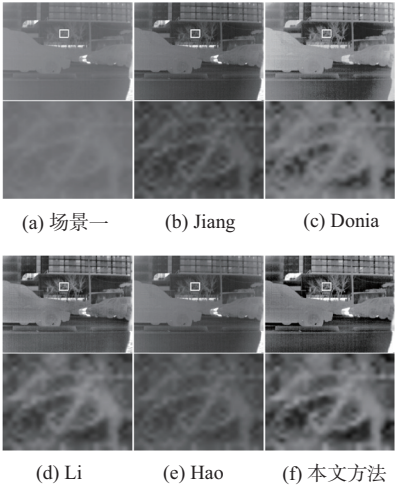


图 3 场景一的增强效果

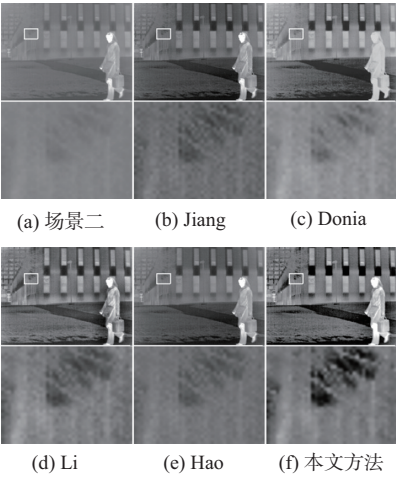


图 4 场景二的增强效果

如图 5 所示，场景三的条纹细节较多，Donia 方法对图像对比度的提升不明显，细节信息较模糊，而 Hao 方法的对比度偏低，边缘细节不够清晰。与其他方法相比，本文方法能在更大程度上改善图像的清晰度，细节信息更丰富，显著性特征更明显。Li 方法的增强效果相对较好，但根据放大区域的比较，本文方法的显示效果更逼真。

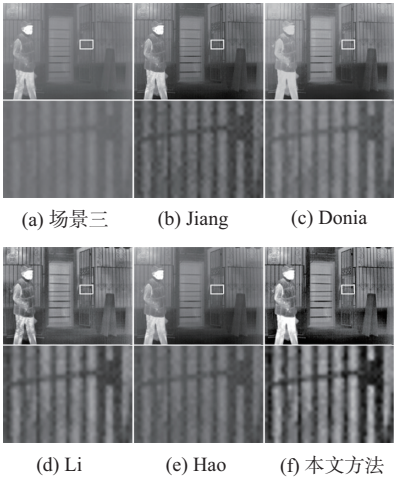


图 5 场景三的增强效果

如图 6 所示，场景四原图像较为模糊，部分图像信息淹没于雾霾效果中。Jiang 方法的对比度较高，但是亮度偏暗，而 Li 方法的增强效果较理想，与本文方法较为接近，但从放大的细节区域看，本文方法在边缘细节的增强效果上具有更大的优势，细节信息更丰富、更清晰。

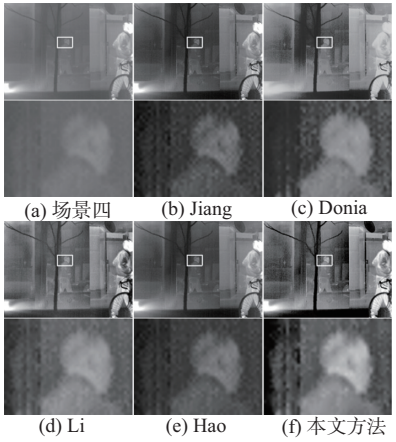


图 6 场景四的增强效果

如图 7 所示，场景五原图像具有较多的平滑区域，而细节区域较少，从整体图像的效果来看，除了 Li 方法和本文方法的对比度和清晰度较好之外，其他方法对图像对比度的改善不够明显，另外，根据放大的细节区域，可以看出本文方法处理后的图像信息更加清晰，细节特征更加明显。

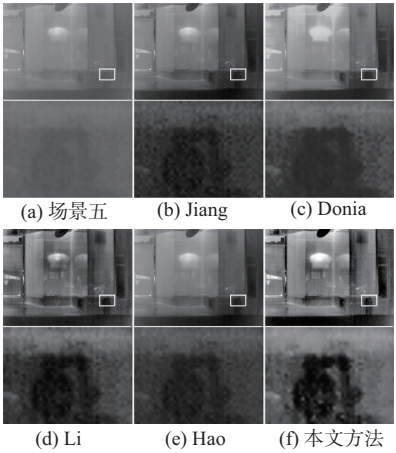


图 7 场景五的增强效果

如图 8 所示，场景六图像的模糊效果较为严重，Jiang 方法和 Hao 方法在对比度的提升和细节的增强上不够显著，图像依然有明显的雾霾效果，虽然 Donia 方法对应的放大细节区域较为清晰，但是图像的整体画面有过度增强的效果。相对地，本文方法增强后的图像信息更清晰、完全消除了模糊效果。

从增强图像的直观效果看，本文方法的实际增强效果，无论在亮度调整、对比度提升以及细节信息的清晰度上，比实验比较的方法更优。本

文提出的方法能更好地应用于红外图像的应用领域。

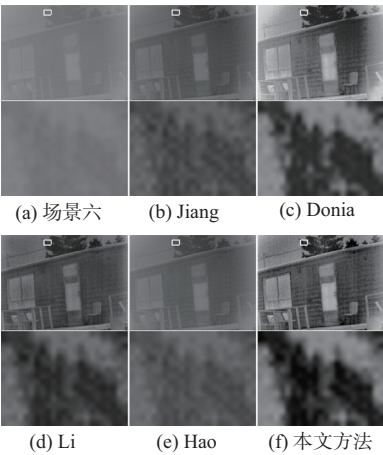


图8 场景六的增强效果

2.2 客观分析

视觉感知能综合地评价增强图像的效果，但是具有一定的主观性。为了更客观、更准确地比较和评价方法的增强效果，计算图3~8中各个图像的平均梯度与信息熵，并将平均梯度与信息熵分别列于表1与表2中。

表1 各方法对六个场景的平均梯度

场景	原图	Jiang	Donia	Li	Hao	本文
一	3.86	11.2	10.5	11.5	9.37	12.8
二	3.88	10.2	9.67	10.7	8.32	11.2
三	4.56	12.1	9.91	13.2	10.1	15.2
四	3.90	10.4	9.27	11.2	8.89	12.1
五	3.52	9.64	7.74	10.9	7.95	11.4
六	2.86	8.39	13.4	12.1	7.61	13.6

表2 各方法对六个场景的信息熵

场景	原图	Jiang	Donia	Li	Hao	本文
一	5.59	7.19	7.03	7.27	7.06	7.45
二	6.04	7.25	6.91	7.35	7.22	7.48
三	6.34	7.51	7.16	7.49	7.24	7.76
四	6.08	7.34	7.08	7.32	7.02	7.58
五	6.23	7.31	6.82	7.33	6.89	7.52
六	4.88	6.41	6.77	6.92	6.33	7.25

平均梯度量化图像的对比度，平均梯度越大，表示图像的对比度越高。如表1所示，原红外图像因为亮度和对比度较低、细节较模糊，对应的平均梯度普遍较小。各增强方法处理后，均能在不同程度上提升图像的平均梯度。其中，Donia方法的平均梯度较小，因为其结合图像匹配和图像融合，对不同的图像缺乏鲁棒性，容易产生过增强，导致图像信息丢失，而Hao方法的平均梯度也较小，因为分别对低频和高频图像进行双边滤波和阈值增强，会破坏图像的细节信息。Jiang方法结

合同态滤波与CLAHE，能在较大程度上提升图像的对比度，因此其对应的平均梯度较大。Li方法对应的平均梯度也较大，其利用引导滤波的边缘保持能力，将CLAHE应用于基础层，能明显提升图像的对比度。

相对地，本文方法对各个场景红外图像的平均梯度均为最大，一方面，基于频次指数变换的均衡映射，能在较大程度上增大像素之间的差异，提升对比度；另一方面，基于方向边缘算子的边缘优化，强化图像的边缘和细节特征，进一步改善图像的清晰度。

综合表1中各个方法对应的平均梯度，将其可视化于饼形图中，如图9所示。显然本文方法所占的饼块最大，占比为22.30%，方法Li次之，因此本文方法对不同的图像具有较强的鲁棒性，整体上能在较大程度上提升图像的对比度。

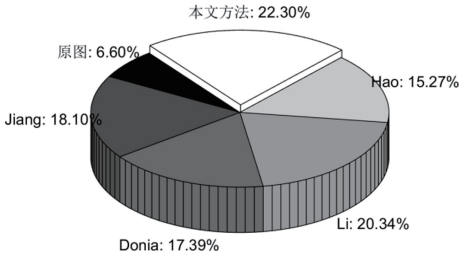


图9 各方法的平均梯度的综合占比

信息熵根据像素值的概率分布来度量图像的信息量。信息熵值越高，表明图像中像素值的分布越分散、越均匀，图像所包含的信息量和细节就越丰富。表2中的数据显示，各方法对原红外图像的信息熵均有不同程度的提升，其中，Donia方法的信息熵相对较小，其通过图像规定化以及与原图像的融合，对图像的信息表示能力改善不明显。Hao方法的信息熵与Donia方法相差不大，即便其用模糊集改善图像的对比度，但是双边滤波和阈值滤波，会破坏部分图像信息。Jiang方法和Li方法的信息熵相对较大，能较好地提升图像对场景信息的记录能力。与其他实验方法相比，对应于不同的红外图像，本文方法的信息熵更大，在更大程度上提升图像的信息容量。

综合表2中各方法的信息熵，将其可视化于图10中。其中，本文方法的信息熵综合占比大于其他方法，而Li方法和Jiang方法分别次之，Donia方法和Hao方法的综合占比相对较小。因此，从整体上看，本文方法在提升图像的信息熵上优于其他方法，基于有向边缘算子的边缘强化，能较好地改善图像的信息表示能力。

综上所述，本文提出的方法能更好地提升图像的对比度，改善图像对场景信息的表示能力，

凸显图像的显著性特征，增强后的红外图像能更好地应用于各个领域。

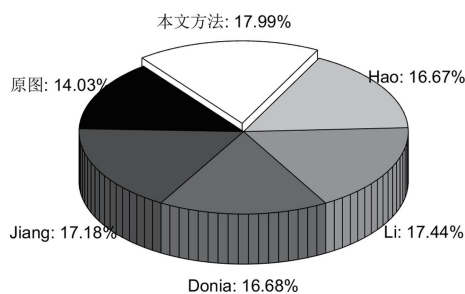


图10 各方法的信息熵的综合占比

3 结 论

为使红外成像能以更好的效果应用于各个领域，提出了基于频次均衡分布与边缘优化的增强方法。在对像素频次进行自适应的指数变换和调整的基础上，对图像的像素进行均衡映射；提出方向边缘算子，提取图像的各个方向边缘，进而对均衡映射后的图像进行边缘优化。提出方法分别从灰度级分布与几何特征的显著性两方面提升图像的对比度、清晰度以及几何特征的显著性。实验数据验证了本文方法增强后的红外图像，在视觉效果、对比度以及边缘细节的清晰度上优于现有方法，对场景信息的显示更逼真，因此，本文方法能更好地应用于目标检测、火力控制、情报收集以及无损检测等领域，在应用上具有实质的实效性。但是本文方法在极端苛刻的成像条件下的鲁棒性不足，以后研究工作将侧重于极端苛刻条件下的红外成像的增强。

参考文献：

- [1] Wang Q W, Jin P C, Wu Y H, et al. Infrared image enhancement: a review[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2025, 18: 3281—3299.
- [2] 周辉奎, 顾牡丹. 自适应加权直方图均衡化的红外图像增强[J]. 光学技术, 2023, 49(06): 750—755.
Zhou Huikui, Gu Mudan. Infrared image enhancement based on adaptive weighted histogram equalization[J]. Optical Technique, 2023, 49(06): 750—755.
- [3] Xu Z D, Zhang J F. Infrared image enhancement using weighted guided image filtering with steering kernel[J]. Signal, Image and Video Processing, 2025, 19(8): 1863—1703.
- [4] 汪伟, 许德海, 任明艺. 一种改进的红外图像自适应增强方法[J]. 红外与激光工程, 2021, 50(11): 419—427.
Wang Wei, Xu Dehai, Ren Mingyi. An improved infrared image adaptive enhancement method[J]. Infrared and Laser Engineering, 2021, 50(11): 419—427.
- [5] Jiang W, Xue D. Infrared image enhancement for photovoltaic panels based on improved homomorphic filtering and CLAHE[J]. Lecture Notes in Computer Science, 2024, 14495: 348—361.
- [6] Yuan Z, Sun X D, Zhang H Q, et al. Near-infrared and visible fusion for image enhancement based on multi-scale decomposition with rolling WLSF[J]. Infrared Physics & Technology, 2023, 128: 104434.
- [7] Sun S, Song K, Man Y. et al. DCBFusion: an infrared and visible image fusion method through detail enhancement, contrast reserve and brightness balance[J]. The Visual Computer, 2024, 40: 5763—5781.
- [8] Donia E A, El-Rabaie E M, El-Samie F E, et al. Infrared image fusion for quality enhancement[J]. Journal of Optics, 2023, 52(2): 658—664.
- [9] Zhou Y, He K, Xu D, et al. A multi-weight fusion framework for infrared and visible image fusion[J]. Multimedia Tools and Applications, 2024, 83: 68931—68957.
- [10] Wang Y, Sui X B, Wang Y H, et al. Raw infrared image enhancement via an inverted framework based on infrared basic prior[J]. Expert Systems with Applications, 2024, 253 (3): 124314.
- [11] Li H Z, Wang S J, Li S, et al. Thermal infrared-image-enhancement algorithm based on multi-scale guided filtering[J]. Fire, 2024, 7(6): 192.
- [12] Gao M J, Bai Y, Liao H P, et al. Contrast enhancement algorithm for infrared images based on atmospheric scattering model[J]. Computers & Electrical Engineering, 2024, 118(12): 109318.
- [13] 郝锦虎, 杜玉红, 王帅, 等. 基于小波变换和改进双边滤波的红外图像增强算法[J]. 红外技术, 2024, 46 (09): 1051—1059.
Hao Jinhu, Du Yuhong, Wang Shuai, et al. Infrared image enhancement algorithm based on wavelet transform and improved bilateral filtering[J]. Infrared Technology, 2024, 46 (09): 1051—1059.
- [14] 邱春红. 基于卷积神经网络的红外与可见光户外图像融合[J]. 光学技术, 2022, 48 (04): 492—498.
Qiu Chunhong. Infrared and visible light outdoors image fusion based on convolutional neural network[J]. Optical Technique, 2022, 48 (04): 492—498.
- [15] Zhu G, Chen Y H, Wang X Q, et al. MMFF-NET: Multi-layer and multi-scale feature fusion network for low-light infrared image enhancement[J]. Signal Image and Video Processing, 2023, 18(2): 1089—1097.
- [16] Qi J, Abera D E, Fanose M N, et al. A deep learning and image enhancement based pipeline for infrared and visible image fusion[J]. Neurocomputing, 2024, 578: 127353.
- [17] Kadhim T Q, Daway H G, Kadhim A M. Low lightness image enhancement using HSV color based on DCP with color restoration and lightning stretch[J]. Lecture Notes in Networks and Systems, 2024, 1098: 321—330.