

一种基于红外对比度提升的高动态范围压缩技术

公志强, 刘仁军, 汪利庆, 彭玲, 罗音

(武汉华中数控股份有限公司, 湖北 武汉 430000)

摘要: 如何将红外探测器采集的高动态范围的数据压缩为低动态范围图像数据的同时, 能尽可能地保留图像的信息, 提高图像的对比度一直是一个技术难点。针对这一问题, 本文提出了一种新的红外图像压缩方法。该方法引入了直方图信息, 通过对直方图进行分割, 区分背景区域像素和目标区域像素; 然后计算压缩映射模型; 最后结合分割后的直方图对图像的像素采用不同强度的对比度增强。本文算法利用直方图区分背景区域像素与目标区域像素, 在增强图像对比度时, 能有效抑制背景噪声。通过实验对比, 结果表明, 本文所提出的算法更能较好地突出图像的细节, 增强图像对比度。

关键词: 高动态范围; 红外图像压缩; 对比度增强; 直方图分割

中图分类号: TP391

文献标识码: A

文章编号: 1001-8891(2021)08-0792-06

A High Dynamic Range Compression Technique Based on Infrared Contrast Enhancement

GONG Zhiqiang, LIU Renjun, WANG Liqing, PENG Ling, LUO Yin

(Wuhan Huazhong Numerical Control Co. Ltd., Wuhan 430000, China)

Abstract: It has always been technically difficult to compress the high dynamic range data collected by an infrared detector to low dynamic range image data, while preserving the image information as much as possible and improving the contrast of the image. To solve this problem, a new infrared image compression method was proposed. In this method, histogram information is introduced, and the pixels of the background and target regions are distinguished by the segmentation of the histogram. Then, the compression model is established. Finally, enhancing the contrast of the image pixels using different coefficients combines the segmented histogram. The algorithm proposed in this paper uses histogram information to distinguish the pixels of the background region and the pixels of the target region and can effectively suppress background noise when enhancing the image contrast. The experimental results show that the proposed algorithm can better highlight details and improve the contrast.

Key words: high dynamic range, infrared image compression, contrast enhancement, histogram segmentation

0 引言

红外成像产品广泛应用于军事、医疗、安防等领域^[1], 其图像质量直接影响着产品的适用范围。高质量的红外图像一直是人们所追求的目标。但是, 红外探测器采集的数据具有高动态的特性, 其灰度级范围远远大于传统显示设备所能显示的灰度级范围。因此, 需要将高动态范围的红外数据压缩为 8 bit, 以便显示器显示。如何在数据压缩的过程中, 保留红外图像的

细节信息, 增强图像的对比度一直是一个技术难点。

针对这一问题, 大量的算法被提出。直方图均衡化 (histogram equalization, HE)^[2] 算法作为全局映射算法, 采用累积直方图的方式将图像灰度值映射到 0~255 之间。算法通过统计灰度级的像素个数占总像素的比例来分配映射范围, 灰度级中像素个数占比越大, 映射范围就越大, 图像的对比度也就越大。对于图像中存在大区域的背景像素时, 算法会将图像的噪声放大。平台直方图均衡化算法^[3] 是直方图均衡化算

收稿日期: 2020-07-16; 修订日期: 2020-10-20。

作者简介: 公志强 (1985-), 男, 汉族, 江西南昌人, 硕士, 工程师, 主要研究方向: 红外图像处理。E-mail: gongzq@hznc.com。

通信作者: 刘仁军 (1992-), 男, 汉族, 湖北仙桃人, 硕士, 工程师, 主要研究方向: 图像处理。E-mail: feelingjunrenliu@163.com。

基金项目: 面向公共卫生疫情防控的红外测温图像人工智能检测关键技术研究 (2020010602011989)。

法的一个改进版,算法通过设定平台阈值,将直方图中灰度级的像素个数大于阈值的像素个数置为该阈值,以此减小其像素占比,从而抑制其灰度级的对比度,起到抑制背景噪声放大的作用。双平台直方图均衡化算法[4]相比平台直方图算法而言,引入了下限平台阈值。下限平台阈值的作用是为了提高灰度级中像素个数小于下限平台值的像素数,以此提升图像的细节。不管是平台直方图均衡化还是双平台直方图均衡化算法,图像效果都受平台阈值的影响。文献[5]采用双边滤波的方法将图像分为细节层和背景层两部分,然后利用 DDE (digital detail enhancement) 算法对细节层的数据进行增强。该方法在增强图像对比度的同时,还能抑制图像背景噪声,但在图像强边缘处会出现伪影效果。文献[6]根据灰度级阈值将直方图分割为目标像素的灰度级和背景像素的灰度级。背景像素采用灰度级占总像素的比例保持不变的方式对像素值进行线性映射,目标像素采用基于直方图的方式进行映射,以此拉伸目标的对比度。但对于直方图中存在小于阈值的背景像素的场景图像,该算法无法进行准确分割,导致背景像素和目标像素都经过基于直方图的映射处理,使得背景噪声被放大,噪声显著。文献[7]对对比度限制的直方图均衡化方法 (contrast limited adaptive histogram equalization, CLAHE) 进行了改进,并结合对比度增强的思想,提出了平衡对比度限制直方图均衡化和对比度增强相结合的新算法 (balanced CLAHE and contrast enhancement)。该方法利用人眼的视觉特性,以改进后的 CLAHE 算法作为映射函数,再对映射后的图像进行增强。文献[8]采用的增强因子在增强图像细节的同时,也增强了背景噪声,这是不希望看到的结果。文献[9]采用基于梯度边缘信息的多方向拉普拉斯的增强方法对处理海面背景的红外图像,然后再采用灰度级分组的方法压缩图像,该算法针对海面背景的红外图像有较好的效果,但是使用场

景受限。文献[10]则在梯度域下进行图像的增强处理。文献[11-12]将图像进行分层处理,分别处理细节层和基础层。

针对红外探测器获取的 14 bit 数据压缩到 8 bit 数据的过程,图像对比度低,细节不突出的问题,本文提出了一种新的图像压缩方法用于保留图像细节和增强图像对比度。该方法首先将直方图进行分割,用于区分背景区域和目标区域;然后计算压缩映射函数;最后结合分割后的直方图对图像的局部对比度进行增强处理,算法的具体实现在第一部分进行讲解。

1 算法实现

1.1 直方图分割

红外图像的直方图反映着图像中灰度级与对应的像素个数的关系,最能直观体现出图像的信息分布。红外图像具有高背景的特点,根据这个特性,本文假设背景区域的像素在直方图中会以一个高而窄的波峰呈现出来。以此作为依据,将背景区域的像素从直方图中进行区分。首先对直方图进行高斯平滑处理,得到平滑的直方图 $p(i)$ 。以 T 作为阈值对直方图的灰度级的像素个数进行划分,直方图中灰度级的像素个数高于阈值的为背景区域的灰度级,小于阈值的灰度级为目标灰度级。其阈值的计算方法如下:

$$T = \beta \cdot \frac{M \cdot N}{P_e} \quad (1)$$

式中: β 为背景敏感度,值越大,灰度级对应的像素数大于阈值的是背景灰度级的可能越大; M 、 N 为图像的行列数; P_e 为直方图中有效灰度级的个数。

如图 1 所示,左侧图中阈值线 T (平行于坐标横轴的横线) 与直方图相交处为直方图的候选灰度级分割点,即图中箭头所指的交点 LP_i 。在所有的候选交点 LP_i 中,计算相邻灰度级之间的有效灰度级的平均像素值 $aveP$:

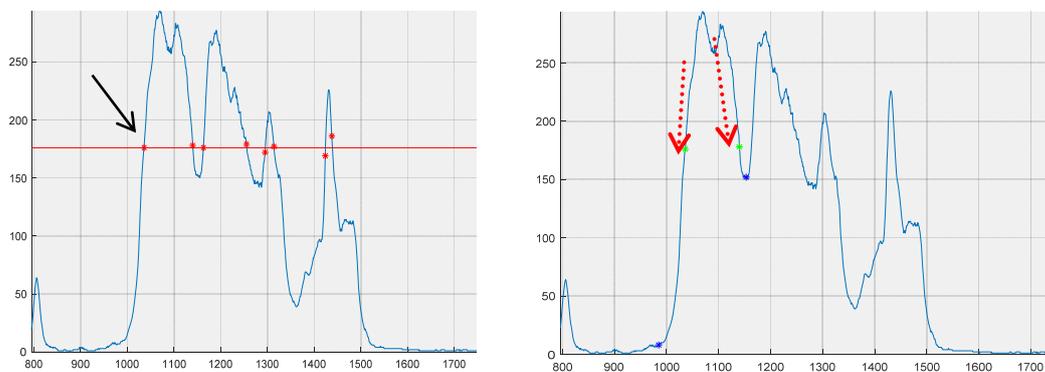


图 1 分割点示意图 (左) 和最终分割点示意图 (右)

Fig. 1 Schematic diagram of Segmentation points (left) and schematic diagram of final segmentation points (right)

$$\text{ave}P = \frac{\sum_{j=LP_i}^{LP_{i+1}} p(j)}{P_j} \quad (2)$$

P_j
 $j \in (LP_i, LP_{i+1})$

式中： i 为阈值 T 与直方图的交点的个数； LP_i 为第 i 个点对应的灰度级； $p(j)$ 为灰度级为 j 的像素的个数； P_j 为灰度级从 $LP_i \sim LP_{i+1}$ 之间有效灰度级。

在计算的所有的有效灰度级的平均像素值中，以平均像素值最大时对应的灰度级 LP_i 和 LP_{i+1} 作为最后的候选灰度级分割点。在该分割点的基础上，分别向直方图左侧和右侧进行遍历计算，具体的计算方法是：以灰度级 LP_i 在直方图中的位置为起点，以 $\text{step}L$ 为灰度级间距，计算在直方图中，灰度级为 LP_i 和 $LP_i - \text{step}L$ 之间的斜率。将灰度级 LP_i 逐步左移，遍历计算 LP_i 和 $LP_i - \text{step}L$ 之间的斜率。如果斜率由正值变为负值或者由正值变为 0，则此时的 LP_i 在的位置为波峰左侧的波谷所在位置；同理，以 LP_{i+1} 为起点，将灰度级 LP_{i+1} 逐步向右移动，遍历计算 LP_{i+1} 和 $LP_{i+1} + \text{step}L$ 之间的斜率，如果斜率由负值变为正值或者由负值变为 0，最终计算得到的灰度级为另一个波谷的位置。实验中， $\text{step}L$ 取值 5 时可以达到很好的效果。

1.2 压缩映射函数的计算

依据文献[6]定义的以公式(3)作为局部对比度模型：

$$C(x, y) = \frac{f(x, y)}{f_M(x, y)} \quad (3)$$

式中： $f(x, y)$ 为输入原始图像； $f_M(x, y)$ 为输入原始图像的低通滤波的版本。以公式(3)为基础，若要想增强输出图像的局部对比度，则有：

$$\frac{f^{\text{out}}(x, y)}{f_M^{\text{out}}(x, y)} = \left[\frac{f^{\text{in}}(x, y)}{f_M^{\text{in}}(x, y)} \right]^\alpha \quad (4)$$

式中： α 为增强因子，当其值大于 1 时，则会对图像起到增强作用。人眼对亮度的感知度与红外辐射在对数域的响应接近，所以，可将公式(4)改写为如下：

$$F^{\text{out}}(x, y) - F_M^{\text{out}}(x, y) = \alpha [F^{\text{in}}(x, y) - F_M^{\text{in}}(x, y)] \quad (5)$$

式中： $F^{\text{in}}(x, y)$ 、 $f_M^{\text{in}}(x, y)$ 分别为输入图像 $f(x, y)$ 和输入图像的低通滤波版本 $f_M(x, y)$ 在对数域的形式； $F^{\text{out}}(x, y)$ 、 $F_M^{\text{out}}(x, y)$ 分别为输出图像 $f^{\text{out}}(x, y)$ 和输出图像的低通滤波版本 $f_M^{\text{out}}(x, y)$ 在对数域的形式。文献[8]推导出，在对数域下， $F_M^{\text{out}}(x, y)$ 近似等于 $P(F^{\text{in}}(x, y))$ ，即公式(6)：

$$F_M^{\text{out}}(x, y) \cong P(F^{\text{in}}(x, y)) \quad (6)$$

则公式(5)又可以改写为公式(7)：

$$F^{\text{out}}(x, y) = P(F^{\text{in}}(x, y)) + \alpha [F^{\text{in}}(x, y) - F_M^{\text{in}}(x, y)] \quad (7)$$

式中： $P(F^{\text{in}}(x, y))$ 为对数域下输入图像的映射函数。公式(7)可以改写为如下形式：

$$f^{\text{out}}(x, y) = p(f^{\text{in}}(x, y)) \cdot \left[\frac{f^{\text{in}}(x, y)}{f_M^{\text{in}}(x, y)} \right]^\alpha \quad (8)$$

式中： $p(f^{\text{in}}(x, y))$ 为输入图像的映射函数。

本文采用对比度限制的直方图均衡化算法来计算映射函数 $p(f^{\text{in}}(x, y))$ 。首先，通过阈值 T 对直方图中灰度级的像素个数进行限制，将灰度级中像素个数大于 T 的像素设置为 T ，见公式(9)；然后将超出阈值的像素个数分配给低于阈值 T 的灰度级。与传统的等比例分配不同的是，本文采用灰度级的像素个数占比的方式进行分配，参见公式(10)：

$$h^{\text{clipped}}(i) = \begin{cases} h(i) & \text{if } h(i) < T \\ T & \text{else} \end{cases} \quad (9)$$

$$h^{\text{new}}(i) = \begin{cases} h^{\text{clipped}}(i) & h(i) > T \\ h^{\text{clipped}}(i) + \frac{h(i)}{\sum_{\forall i: h(i) < s} h(i)} \cdot E & h(i) \leq T \end{cases} \quad (10)$$

$$E = \sum_{i=0}^{\text{Max}} (T - h(i)), h(i) > T \quad (11)$$

公式(10)中， E 为直方图的灰度级中，每个灰度级的像素数大于阈值 T 时，超出的像素数的总和，见公式(11)。直方图的灰度级经过重新分配后，小于阈值 T 的灰度级的像素个数得到提高。当采用直方图均衡化的方法进行映射时，图像的细节会得到提升。红外图像中会存在大背景的情况，尽管直方图的像素经过了重新分配，但是背景区域的像素个数依旧为 T ，相对直方图中其他灰度级而言，其占比依旧较大，尤其是在目标像素占比较少少的情况。由于人眼对低频区域的噪声较为敏感，所以从视觉效果来看，背景区域的噪声就较为显著。为了进一步抑制背景像素的噪声，本文对经过公式(10)重新分配后的直方图再一次进行处理。统计出低于阈值 T 的有效灰度级的平均像素个数 $\text{ave}L$ ，如果灰度级的像素个数大于 $\text{ave}L$ ，则将其置于 $\text{ave}L$ ，得到最新的直方图 h^{NEW} 。

$$h^{\text{new}}(i) = \begin{cases} h^{\text{new}}(i) & h^{\text{new}}(i) < \text{ave}L \\ \text{ave}L & h^{\text{new}}(i) \geq \text{ave}L \end{cases} \quad (12)$$

得到最新的直方图后，将其进行归一化处理，再进行均衡化处理就可以得到映射函数 p ：

$$h_{\text{nor}}(i) = \frac{h^{\text{new}}(i)}{\sum h^{\text{new}}(i)} \quad (13)$$

$$p(f^{in}(x,y)) = 255 \cdot \frac{\sum_{i=0}^{f^{in}(x,y)} h_{nor}(i)}{\sum_{i=0}^{\max(f^{in}(x,y))} h_{nor}(i)} \quad (14)$$

与文献[8]使用相同增强因子 α 对所有像素点的局部对比度进行处理,在增强目标对比度的同时,背景噪声也被增强。本文对此做出改进,通过直方图分割的方法区分背景像素和目标像素,然后对背景区域像素和目标区域的像素采用不同的增强因子 α 进行局部对比度的增强处理,从而在一定程度上避免了图像噪声的增强放大。

2 实验结果

本文采用局部均值的方法计算输入图像的低通滤波版本。滑动窗口的不同尺寸影响着图像的平滑效果,从而影响着局部对比度。窗口的尺寸越大,图像越平滑,局部对比度就越突出。随着滑动窗口的尺寸变大,遍历图像所需要的时间也随之增加。图 2 所示为采用不同尺寸窗口遍历计算得到的局部对比度图的统计直方图。图像中,横坐标局部对比度放大 1000 倍的结果,纵坐标为对应的像素点的个数。从图像中可以看出,图像的局部对比度主要集中在 900~1100 之间,值为 1000 表示对图像的像素不进行增强,大于 1000 表示对像素值拉伸,小于 1000 表示对像素值的压缩。不同尺寸窗口下的局部对比度的统计直方图在横坐标为 1000 附近高度重合,在接近 900 和 1100 时才呈现分层现象。分析可知,在相同的横坐标下,对应的纵坐标值越大表示图像中需要增强或者压缩的像素点越多,图像增强效果越明显。从图像可以,滑动窗口尺寸为 3×3 的局部对比度直方图处于所有直方图最下层,随着窗口尺寸变大,直方图的中局部对比度值的像素个数也越大,窗口大小为 7×7、9×9、11×11 所对应的直方图几乎完全重合,窗口大小为 5×5 的直

方图则与之很接近。综合考虑,实验采用的滑动窗口的尺寸为 5×5。

通过对直方图分割可以将背景区域区分出来,背景区域和非背景区域采用不同的增强因子 α 对图像的局部细节进行增强。实验将背景区域像素增强因子置为 1,即映射输出图像的像素的局部对比度和原始数据的像素的局部对比度保持不变。考虑到映射函数 p 经过直方图重新分配的过程中,在一定程度上提升了细节的对比度,所以此时的增强因子不易过大。为了防止图像溢出,影响图像的可视化效果,实验将非背景区域的像素的增强因子置为 2。

为了客观评价算法效果,本文和其他算法进行了对比,并测试了 5 个场景的红外图像。这 5 个场景分别为室内场景(场景一)、高热物体(热水杯)和低温物体(冰可乐)共存的场景(场景二)、室内目标单一的场景(场景三)、室外场景(场景四)和室外部分天空部分建筑的场景(场景五),分别对应图 3 中的第一行至第五行图像。从图像中可以看出,采用本文的算法处理得到的图像细节和对比度都有较大的提升,如场景一所示,本文提出的方法相比线性映射方法和文献[7]提出的方法对比度有明显提高,和文献[7]提出的方法相比,人物区域的细节更突出,如图中人的头发,嘴和眉毛区域;在场景二中,对比本文提出的方法与文献[7]提出的方法,经过本文算法处理得到的小型电风扇的细节没有经过文献[7]算法处理得到的显著,这是由于文献[7]对每个像素的局部对比度进行了增强,但是,其噪声也明显的增加;场景三体现了文献[7]所提出方法的不足之处,图像中墙壁区域的噪声显著;场景四中,相比其他的 3 个场景的对比度和细节,本文提出的方法对比度有明显提高,细节也更突出,如天空区域所存在的电线。场景五中,

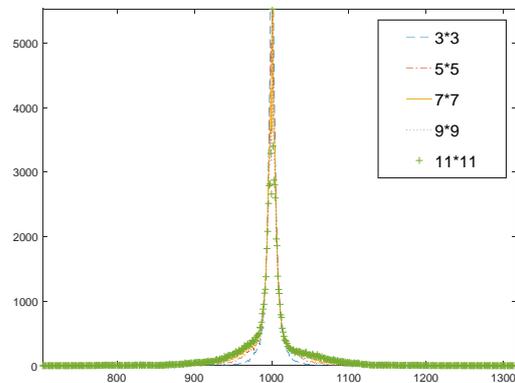


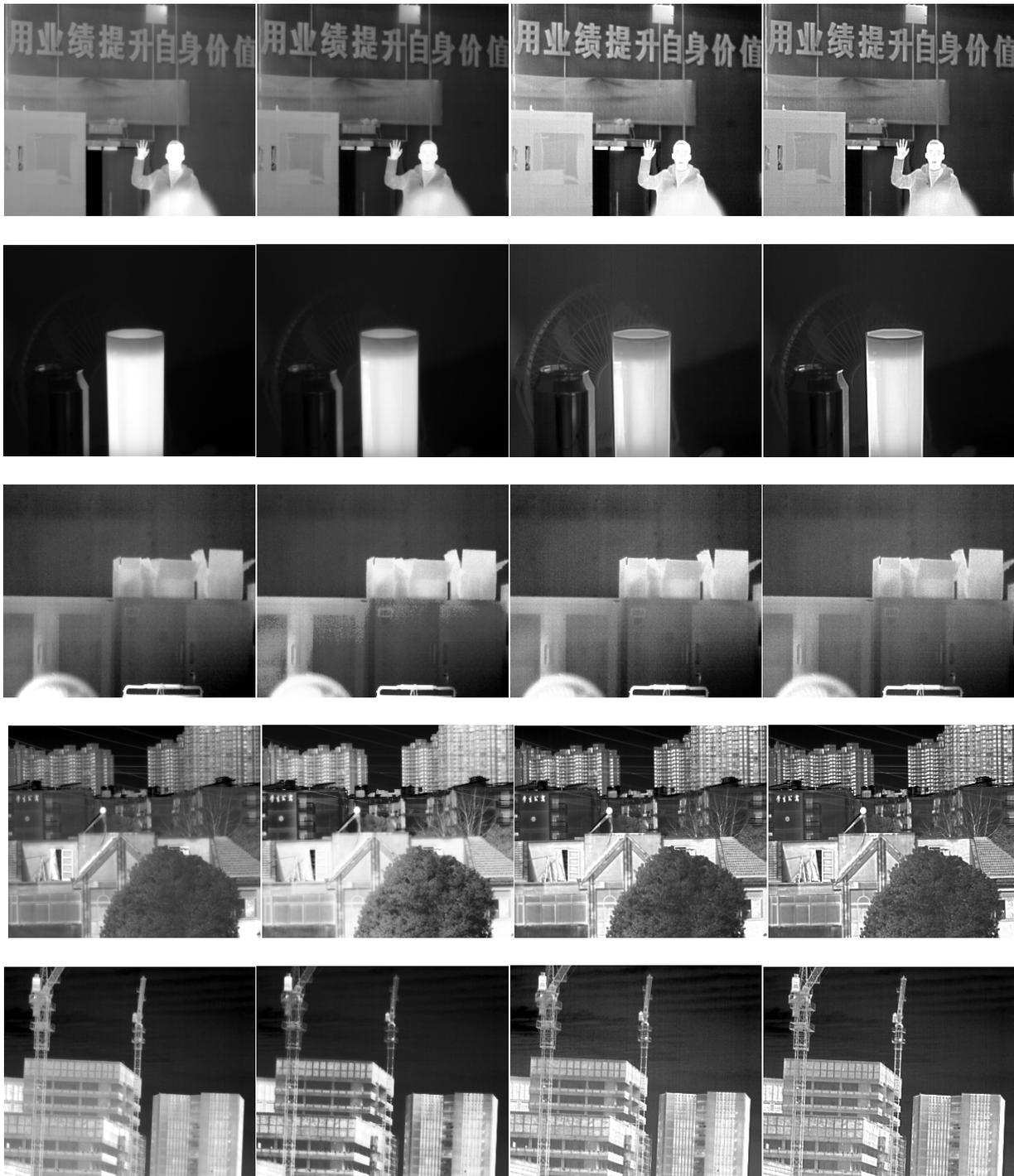
图 2 示例图及不同滤波尺寸下的局部对比度直方图

Fig.2 Sample image and local contrast under different filter sizes

由于天空辐射的缘故，采用线性映射处理图像的目标建筑的对比度被抑制，文献[7]提出方法的建筑物对比度虽然明显提高了，但是图中左侧的细节信息被抑制住。文献[7]提出的方法虽然在细节和对比度上都有提高，但是天空区域的噪声也随之明显。相比之下，本文提出的方法建筑物细节和对比度都有明显提高，虽然天空中云层的对比度没有文献[7]提及方法的高，但

是噪声也少。所以，在主观评价上，本文提出的方法有明显的优势。

本文采用信息熵对压缩后的图像效果进行客观评价，信息熵越大，表明图像信息越丰富（如表1所示）。从表中可以看出，对比不同的算法，采用本文算法将14 bit 红外数据压缩为8 bit 图像时，本文算法的客观指标更大，即图像细节更加丰富。



(a) 线性映射 (a) Linear mapping (b) 文献[6]的算法 (b) Literature[6]'s algorithm (c) 文献[7]的算法 (c) Literature[7]' algorithm (d) 本文的方法 (d) our algorithm

图3 不同算法的处理结果

Fig.3 The processing results of different algorithms

本文以线性映射得到的图像作为参考图像,采用峰值信噪比(peak signal noise ratio, PSNR)作为衡量图像噪声程度的客观指标对比了本文算法和其他两种算

法抑制噪声的能力,实验数据如表 2 所示,PSNR 越大,表示图像包含的信息越丰富,噪声越小。

表 1 不同算法在相同场景图像中的信息熵的对比结果

Table 1 Information entropy comparison results that different algorithms in the same scene image

Algorithm	Scene 1	Scene 2	Scene 3	Scene 4	Scene 5
Linear mapping	7.1260	6.2631	7.1262	7.4640	7.2761
Literature[6]'s algorithm	7.2788	6.7646	7.0064	7.4837	7.4046
Literature[7]'s algorithm	7.6616	6.1768	7.3264	7.6890	7.4696
Our algorithm	7.8303	6.7306	7.6266	7.7293	7.7107

表 2 不同算法在相同场景图像中的峰值信噪比的对比结果

Table 2 PSNR comparison results that different algorithms in the same scene image

Algorithm	Scene 1	Scene 2	Scene 3	Scene 4	Scene 5
Literature[6]'s algorithm	19.7842	24.5278	23.7493	19.2759	21.3895
Literature[7]'s algorithm	18.2785	18.7230	22.8438	20.1421	23.9762
Our algorithm	22.2963	23.3482	23.7893	21.5421	24.4664

3 结论

本文针对红外图像压缩过程中存在的技术难点提出了一种基于图像对比度提高的高动态范围压缩技术,该技术通过重新分配高动态范围数据的直方图,用于抑制背景噪声和提高图像的细节信息,再通过直方图分割的方法区分背景区域像素和非背景区域的像素,然后对映射得到的数据,对背景区域的像素和非背景区域的像素采用不同增强因子进行对比度增强。从实验数据对比结果可知,本文提出的方法能较好的提高图像细节和对比度。后续将深入研究,简化算法的复杂度,让其更加高效。

参考文献:

- [1] Silverman J. Display and enhancement of infrared images[C]//*Image Processing and its Applications*, 1992, International Conference on. IET, 1992.
- [2] Rafael C Gonzalez, Richard E Woods. Digital image processing[J]. *Prentice Hall International*, 2008, **28**(4):484 - 486.
- [3] 王炳健, 刘上乾, 周慧鑫, 等. 基于平台直方图的红外图像自适应增强算法[J]. *光子学报*, 2005, **34**(2): 299-301.
WANG BingJian, LIU Shangqian, ZHOU Huixin, et al. Self-adaptive contrast enhancement algorithm for infrared images based on plateau histogram[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(2): 484 - 486.
- [4] 宋岩峰, 邵晓鹏, 徐军. 基于双平台直方图的红外图像增强算法[J]. *红外与激光工程*, 2008(2): 125-128.
SONG YanFeng, SHAO XiaoPeng, XU Jun. Infrared image enhancement algorithm based on dual platform histogram[J]. *Infrared And Laser Engineering*, 2008(2): 125-128.
- [5] ZUO C, CHEN Q, LIU N. Display and detail enhancement for the visualization of high dynamic range infrared images[J]. *Opt. Eng.*, 2011, **50**(12): 127401.
- [6] HUANG J, YONG M, YING Z, et al. Infrared image enhancement algorithm based on adaptive histogram segmentation[J]. *Applied Optics*, 2017, **56**(35): 9686.
- [7] Branchitta F, Diani M, Corsini G, et al. Dynamic-range compression and contrast enhancement in infrared imaging systems[J]. *Optical Engineering*, 2008, **47**(7):076401.1-076401.14.
- [8] Monobe Y, Yamashita H, Kurosawa T, et al. Dynamic range compression preserving local image contrast for digital video camera[J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2005, **51**(1):1-10.
- [9] 王园园, 赵耀宏, 罗海波, 等. 海面红外图像的动态范围压缩及细节增强[J]. *红外与激光工程*, 2019, **48**(1): 307-315.
WANG Yuanyuan, ZHAO Yaohong, LUO Haibo, et al. Dynamic range compression and detail enhancement of sea-surface infrared image[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, **48**(1): 307-315.
- [10] 张菲菲. 梯度域处理框架下的图像能见度增强技术研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2015.
WANG Feifei. Study on image visibility enhancement in the framework of gradient domain processing[D]. Wuhan: Wuhan University, 2015.
- [11] 张临临. 基于图像分层和动态压缩的图像细节增强算法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2012.
ZHANG Linlin. Study on image detail enhancement algorithm based on image stratification and dynamic compression[D]. Xi'an: XIDIAN University, 2012.
- [12] 单瑞卿, 李斌, 韩伟, 等. 高动态范围红外图像的显示与细节增强[J]. *光学技术*, 2019, **45**(4): 475-481.
SHAN Ruiqing, LI Bin, HAN Wei, et al. Display and detail enhancement for high-dynamic-range infrared images[J]. *Optical Technique*, 2019, **45**(4): 475-481.