

文章编号:1007-2780(2024)04-0482-08

用于实时图像增强的灰度等间距 密度均衡改进算法

张艳超*, 高 策, 宋聪聪, 徐嘉兴, 吴 杰
(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要: 实时图像的增强处理,除了保证单帧图像具有较高的对比度,还应考虑处理算法的实时性和图像序列间增强效果的连贯性。灰度等间距密度均衡算法通过去除冗余灰度级后进行有效灰度级等间距重排,可以有效增强图像对比度。本文以灰度等间距密度均衡增强算法为基础,对其有效灰度级有效阈值选取、过度增强等问题进行了相应改进,以满足连续图像序列的实时增强处理需求。实验结果表明,改进算法可以有效避免图像局部变化对整体增强效果的影响。对于 $1\,920 \times 1\,080$ 分辨率的图像,单帧处理时间约为 32 ms。本改进算法对于连续图像序列具有良好的增强效果,且能够较好地满足实时图像增强对于连贯性、实时性、鲁棒性的处理需求。

关 键 词: 实时图像增强;灰度等间距密度均衡;直方图

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/CJLCD.2023-0203

Real-time image enhancement based-on improved algorithm of gray-scale equispacing density equalization

ZHANG Yanchao*, GAO Ce, SONG Congcong, XU Jiaxing, WU Jie

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,
Changchun 130033, China)

Abstract: In the enhancement processing of real-time image, in addition to ensuring the high contrast of single frame image, the real-time performance of the processing algorithm and the coherence of the enhancement effect between image sequences should be considered. Gray-scale equispacing density equalization algorithm can effectively enhance image contrast by removing redundant gray level and rearranging effective gray level equispacing. In this paper, based on the gray-scale equispacing density equalization enhancement algorithm, the effective gray level effective threshold selection, excessive enhancement and other problems are improved accordingly, in order to meet the real-time enhancement processing requirements of continuous image sequences. Experimental results show that the improved algorithm can effectively avoid the influence of local changes on the overall enhancement effect. For $1\,920 \times 1\,080$ resolution images, the processing time of single frame is about 32 ms. The improved algorithm has good enhancement effect on continuous image sequence, and can better meet the processing requirements of

收稿日期:2023-06-08;修订日期:2023-08-21.

基金项目:国家自然科学基金面上项目(No. 51675506)

Supported by the General Program of National Natural Science Foundation of China (No. 51675506)

*通信联系人, E-mail: zhangyanchaomn@126.com

real-time image enhancement for coherence, real-time performance and robustness.

Key words: real-time image enhancement; gray-scale equispacing density equalization; histogram

1 引言

随着监控安防设备的大规模普及,设备的应用场合日益趋于多样化。为了保证不同观测场景下的成像质量,实时图像增强技术在监控设备产品竞争中发挥着越来越重要的作用。相对于单帧图像增强技术,实时图像增强技术在提高图像本身成像质量的基础上,还应考虑连续图像序列间的连贯性、不同观测场景间的算法适应性以及算法的实时性。

图像增强技术通常有两类方法:频率域法和空间域法^[1-3]。频域法是在图像的某种变换域中(通常是频率域)对图像的变换值进行某种运算处理,然后再变换回空间域。频域法需要涉及两次变换域的转换,计算量一般较大。随着成像设备图像分辨率越来越高,常规的频域法渐渐难以满足实时处理要求。空间域法,主要是在空间域中对图像像素灰度值直接进行处理运算。在实时图像增强处理中,空间域法应用较多^[4-5]。

典型的空域增强方法主要有线性变换法、非线性变换法、直方图法以及相关的衍生算法^[6]。线性变换法^[7]的各灰度级保持相同的变化率,难以突出部分重要灰度细节;其衍生的分段线性变换法^[8]虽然可以对需要观察的灰度级范围进行突出处理,但是一般需要对各个分段的灰度级点进行人工设置,适应性差。非线性变换,典型的如对数变换、伽马变换^[9-11],一般是针对图像已知的灰度级分布缺陷进行有针对性的参数设定,灵活性差。典型的直方图均衡化法可以实现图像中各个灰度级的均衡呈现,但是往往会造成无用灰度级和干扰噪声的放大^[12]。

灰度等间距密度均衡方法^[13-14]也是一种直方图增强方法,该方法的基本思想是去掉图像中不存在或像素数较少的灰度级,将其他有效灰度级在灰度映射空间内重新进行等间距重排。该方

法在保证有效灰度级得以充分扩展的同时,保持了原始图像各灰度级的分布比例,因此该方法在红外图像、彩色图像实时增强中均具有较好的表现。但是,该算法存在如下两个缺陷:一是因有效灰度级阈值选取不当而存在的图像增强效果不连贯,二是当图像动态范围较窄时存在的过度增强。本文针对灰度等间距密度均衡方法的缺陷进行了相应的调整,提出了一种用于实时图像增强的灰度等间距密度均衡改进方法,能够较好地满足实时图像增强处理的要求。

2 算法原理

灰度等间距密度均衡算法的基本原理是去掉图像直方图中像素数为0或低于阈值的灰度级,将剩余灰度级在映射灰度范围内进行等间距映射,从而使无效灰度级得到压缩,有效灰度级得到展宽,实现图像细节的展开和图像对比度的增强,变换原理图如图1所示。

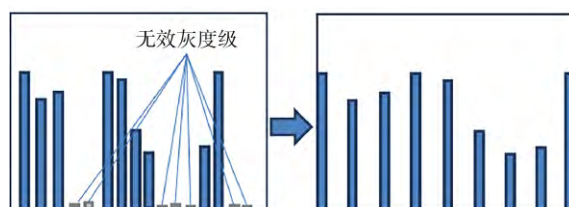


图1 灰度等间距密度均衡变换原理图

Fig. 1 Principle diagram of gray-scale equispacing density equalization

具体实现过程如下:

(1) 对当前帧图像进行直方图 $H(i)$ 统计 ($i \in [0, 2^n - 1]$, n 为图像位深)。

(2) 在 $(0, 2^n - 1)$ 范围内依次遍历每个灰度级 i , 根据灰度级对应的像素数 $H(i)$ 进行灰度级排序映射 $S(i)$, 表达式如式(1)所示:

$$S(i) = \begin{cases} 0, & i = 0 \\ S(i-1), & i \in [1, 2^n - 1] \& H(i) < TH \\ S(i-1) + 1, & i \in [1, 2^n - 1] \& H(i) \geq TH \end{cases}, \quad (1)$$

其中, TH 为判定灰度级是否有效的阈值。即当灰度级 i 对应的像素数大于或等于阈值 TH 时, 将该灰度级置为有效灰度级, 那么灰度级 i 在增强变换后对应的灰度级序号 $S(i)$ 为前一个灰度级 $S(i-1)$ 加 1; 当灰度级 i 对应的像素数小于 TH 时, 将该灰度级置为无效灰度级, 有效灰度级个数保持不变, 该灰度级在增强变换后对应的灰度级序号 $S(i)$ 与前一个灰度级 $S(i-1)$ 保持一致。

(3) 图像有效灰度级个数 C 为 $S(2^n-1)+1$ 。

(4) 计算灰度级 i 在增强后图像的映射灰度值 p , 映射表达式如式(2)所示:

$$p = S(i) * Dis, \quad (2)$$

其中, Dis 为等间距重排后的间隔, 其表达式如式(3)所示:

$$Dis = \frac{2^m - 1}{C - 1}, \quad (3)$$

式中, m 为增强变换后的图像位深, 一般为 8。

(5) 单帧图像增强结束。

3 算法改进

3.1 阈值的自动选取

灰度等间距密度均衡增强算法通过阈值 TH 进行有效与无效灰度级的筛选, 该阈值选取是否合理将直接影响最后的增强效果。

当阈值 TH 选取过低时, 会降低增强算法对图像内微小变化的抵御能力, 实时图像处理过程中会体现出增强效果的不连贯性。图 2 展示了监控设备在重雾条件下进行缓慢周扫的 3 帧原始

图, 图 3 则展示了 3 帧图像对应的增强效果图 ($TH=10$)。从该两组图像的对比效果可以看出, 第 105 帧和第 110 帧图像虽然呈现出了较为明显的增强效果, 但是第 115 帧图像的增强效果却呈现断崖式的提升, 整体上表现为视频的不连贯性。这在连续图像的增强处理中是需要尽量避免的。此类现象的产生是由于视场内新增小目标(图 1 中灰色部分)而导致部分灰度级的引入(图 4), 处理过程中由于阈值设置的不合理没有对该部分灰度级进行有效滤除, 新引入的灰度级与原有灰度级一起参与重排过程中, 使原有灰度级发生了挤压和灰度级偏移, 进而使整体增强效果发生了明显改变, 如图 3、图 5 所示。当阈值 TH 选取过高时, 会导致部分有用信息被滤除, 同样会影响增强效果。



图 2 原始图像

Fig. 2 Original images



图 3 灰度等间距密度均衡算法增强图像

Fig. 3 Images enhanced by gray-scale equispacing density equalization algorithm

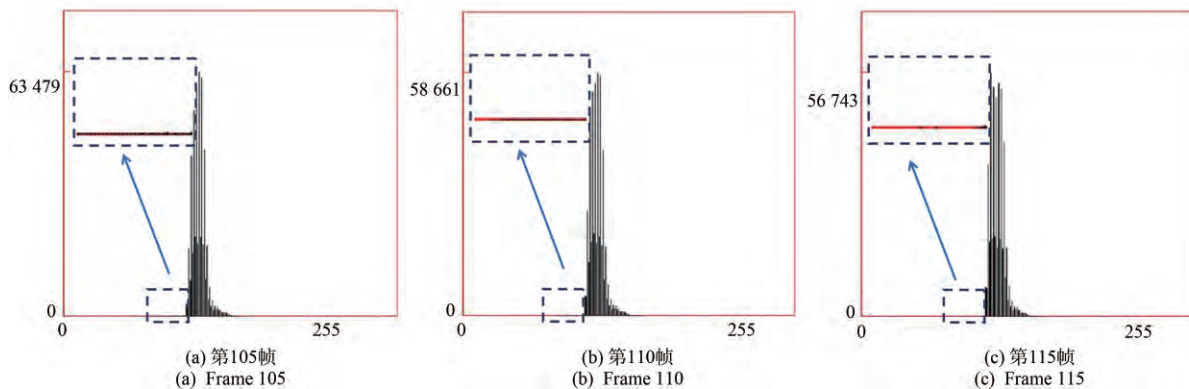


图 4 原始图像的亮度直方图

Fig. 4 Brightness histogram of the original image

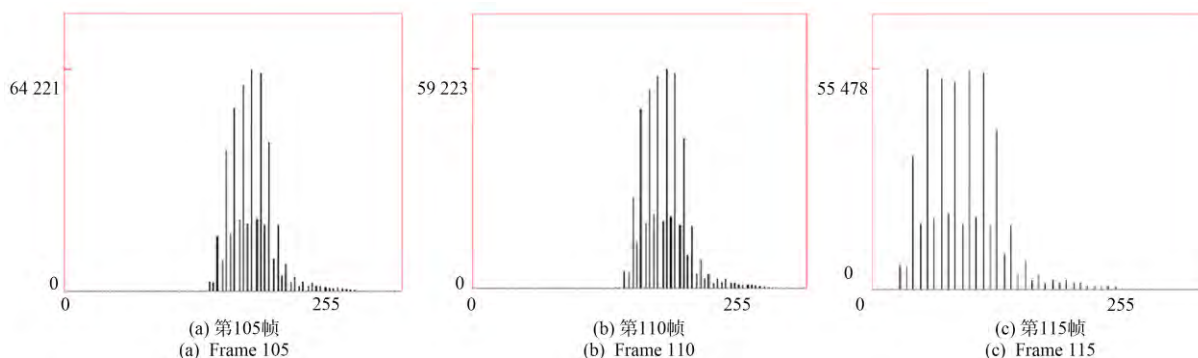


图5 灰度等间距密度均衡算法增强图像的亮度直方图

Fig. 5 Histogram of image brightness enhanced by gray-scale equispacing density equalization algorithm

对于监控设备,尤其是周扫类设备,其观测图像灰度级分布会随着观测时段、场景、天气状况的不同而发生较大的改变,因此阈值TH的合理设置以及自动设置能力对于实时图像增强效果起着决定性的作用。

鉴于此,本文提出了基于迭代的阈值自动计算方法,其基本思想是:通过阈值TH的不断迭代,使有效灰度级所包含的像素数与总像素数的比例保持不变,从而可以自动避免小干扰物引入的灰度级对整体灰度级的挤压,且该准则可以保证不同拍摄场景增强效果的适应性。具体计算过程如下:

(1) 设TH初始值为 t_0 。

(2) 计算该阈值下的有效直方图 $H_{\text{valid}}(i)$,表达式如式(4)所示:

$$H_{\text{valid}}(i) = \begin{cases} 0, & H(i) < TH \\ H(i), & H(i) \geq TH \end{cases} \quad (4)$$

(3) 计算该阈值下所有有效灰度级的像素总和 S_{valid} ,计算方法如式(5)所示:

$$S_{\text{valid}} = \sum_{i=0}^M H_{\text{valid}}(i), \quad (5)$$

其中, M 为 $2^n - 1$, n 为图像位深。

(4) 设图像总像素数为 S_{sum} ,则有效灰度级像素数占比 P_{valid} 为:

$$P_{\text{valid}} = \frac{S_{\text{valid}}}{S_{\text{sum}}} \times 100\% \quad (6)$$

(5) 若 P_{valid} 高于预设比例 P_{Set} ,则 $TH = TH + 1$,跳转至步骤(2)重新计算;若 P_{valid} 达到预设比例 P_{Set} ,则TH即为该帧图像对应的阈值。通常 P_{Set} 设为99%,或可根据具体使用需求进行微量调整。

3.2 过度增强的处理

当图像动态范围较小(即有效灰度级较少)时,若采用原算法进行增强而不进行任何限制,会导致图像灰度级的过度拉伸,使图像内的微小变化过度放大。增强前后的效果对比图如图6所示。

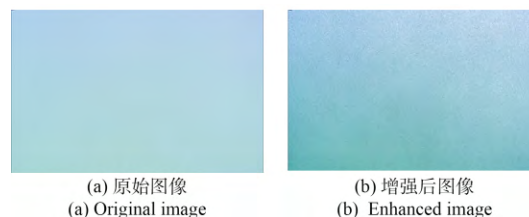


图6 过度增强前后的图像效果对比1

Fig. 6 Comparison 1 of image effects before and after excessive enhancement

因此,应对重排间距Dis进行限制,式(3)应改进为式(7):

$$\text{Dis} = \begin{cases} \frac{2^m - 1}{C - 1}, & \frac{2^m - 1}{C - 1} < D_{\text{Set}} \\ D_{\text{Set}}, & \frac{2^m - 1}{C - 1} \geq D_{\text{Set}} \end{cases}, \quad (7)$$

其中, D_{Set} 为限定阈值,理论范围为 $(1, 2^n - 1)$,一般推荐范围为 $(2, 10)$,可根据具体需要进行参数微调。

上述设定方法虽然可以防止过度拉伸,但是直接将限定后的Dis带入式(2)会使灰度级集中在较低灰度级区域,若原始图像较亮,拉伸后的图像整体变暗,如图7所示。因此,在此基础上还需进行灰度偏置校正以尽量还原图像真实亮度。那么,式(2)应进一步改进为式(8):

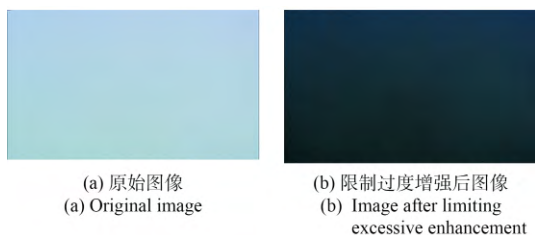


图 7 过度增强前后的图像效果对比 2
Fig. 7 Comparison 2 of image effects before and after excessive enhancement

$$p = S(i) * \text{Dis} + G_{\text{bias}}, \quad (8)$$

其中, G_{bias} 为灰度偏置。 G_{bias} 的计算方法如下:

假定原始图像均值为 G_M , 那么该均值在原始图像中的灰度级相对位置, 应该与增强后中间有效灰度级在增强后图像中的灰度级相对位置近似相等。由此, 可以得到如式(9)所示的等式:

$$\frac{G_M}{2^n - 1} = \frac{G_{\text{bias}} + \frac{C - 1}{2} \times \text{Dis}}{2^m - 1}. \quad (9)$$

由式(9)可以得到 G_{bias} 的表达式, 如式(10)所示:

$$G_{\text{bias}} = \frac{2^m - 1}{2^n - 1} \times G_M - \frac{C - 1}{2} \times \text{Dis}. \quad (10)$$

4 实验结果与分析

4.1 小目标扰动增强效果

按照 3.1 节所述的改进方法, 对图 2 所述的连续 130 帧周扫图像进行了增强处理。其中典型的小目标干扰增强效果图及其对应的直方图如图 8、图 9 所示。与图 3 相比, 采用自动阈值滤除后, 可以有效避免小目标的干扰, 保证了连续图像序列的增强效果连贯性。

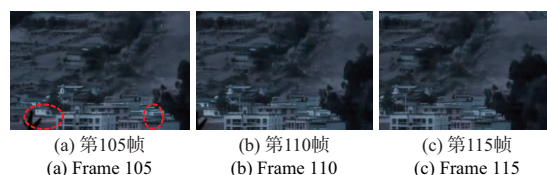


图 8 灰度等间距密度均衡改进算法增强图像
Fig. 8 Image enhancement by improved gray-scale equispacing density equalization algorithm

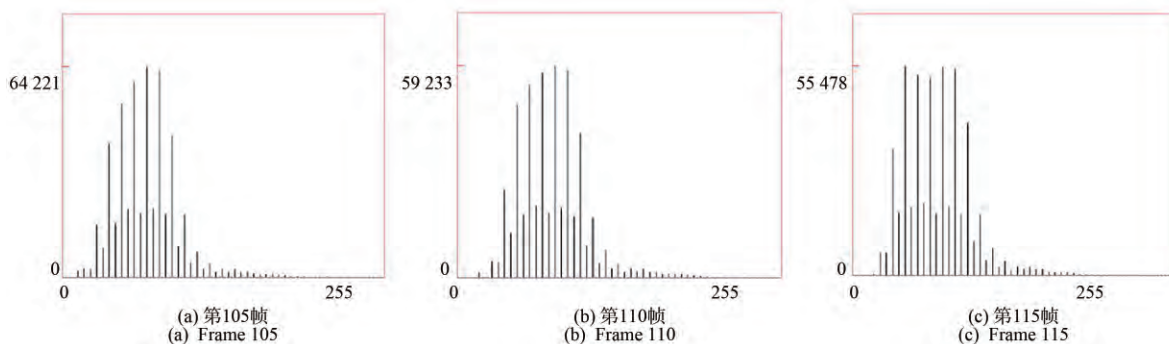


图 9 灰度等间距密度均衡改进算法增强图像的直方图

Fig. 9 Image histogram enhanced by improved gray-scale equispacing density equalization algorithm

此外, 本文还对包含图 2 在内的连续 130 帧图像的原始图像、原增强算法以及本文改进后的增强算法进行了对比度评价, 评价结果如图 10 所示。由于该图像序列为设备周扫过程采集的图像, 图像内容处于连续变化状态, 因此对比度曲线的小幅波动暂不计入分析范围。从图 10 可以得到如下结论:

(1) 原增强算法和改进增强算法相对于原始图像, 其对比度都得到了显著提升, 即取得了较为明显的增强效果。

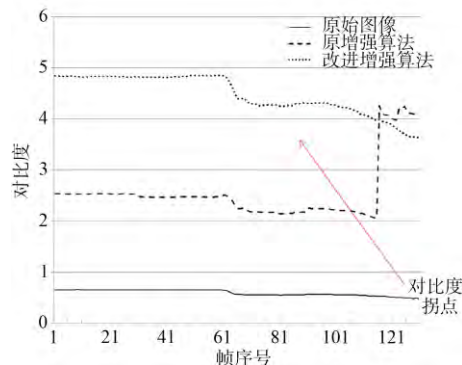


图 10 对比度评价

Fig. 10 Contrast evaluation

(2) 从原始图像队列可以发现,由于在第0帧至第114帧范围内,视场内一直存在近景小目标的扰动,原算法增强图像对比度在该范围内一直处于相对较差的增强效果,而直到第115帧近景小目标完全退出视场后,对比度得到了断崖式提升,从图像上体现为增强效果的大幅跳变。

(3) 改进算法增强的图像在整个图像序列范围内一直保持对比度相对较高且稳定的状态。因此,具有较好的增强效果和连贯性。

4.2 低动态范围增强效果

按照3.2节所述的改进方法,对低动态范围图像进行了过度增强限制和偏置补偿。处理后的图像既有效抑制了过度增强,又使图像亮度得到了近似保真,处理效果如图11所示。

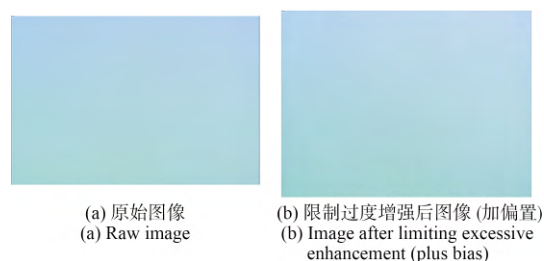


图11 过度增强前后的图像效果对比3

Fig. 11 Comparison 3 of image effects before and after excessive enhancement

4.3 多场景适应性

为了评估改进算法对不同场景增强效果的适应性,图12展示多个不同场景的增强前后效果对比。经过大量实验验证,改进算法对于不同场景均具有较好的算法适应性。

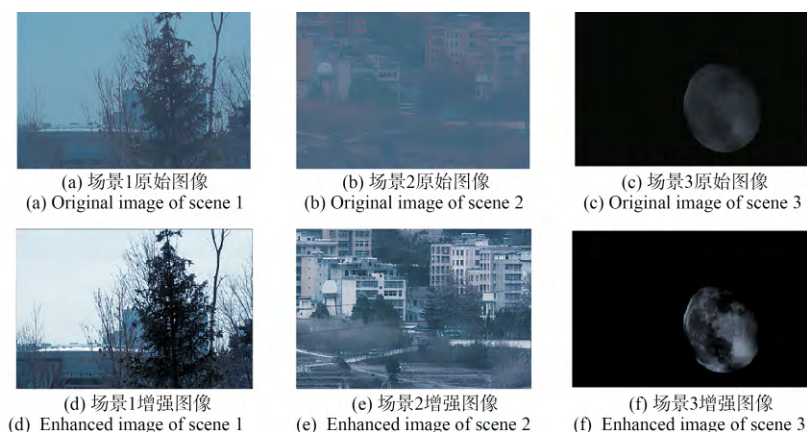


图12 不同场景增强效果对比

Fig. 12 Comparison of enhancement effects in different scenarios

4.4 实时性

实时性是决定算法是否可用于实时图像处理的首要前提,为了满足人眼观察需要,一般要求图像帧频应不小于25 fps,那么用于实时处理的单帧处理时间应不大于40 ms。表1为i5 CPU 2.5 GHz主频硬件平台上的几种典型分辨率图

表1 典型分辨率图像单帧处理时间

Tab. 1 Single frame processing time of typical resolution images

序号	分辨率	位深/bit	耗时/ms
1	320×256	14	<1
2	640×512	14	<2
3	960×540	24	<8
4	1 920×1 080	24	<32

像单帧图像增强处理耗时统计。从表1可以看出,该算法的实时性基本可以满足大部分实时图像增强处理需求。

4.5 不同算法实验对比及分析

为了进一步验证本文算法的有效性,将通过与经典的图像增强算法进行定量比较,主要算法包括对数变换、RetinexNet^[15]、Zero-DCE^[16]、灰度等间距密度均衡方法以及本文的改进算法,采用收集的5 000张图片作为测试集,部分对比结果如图13所示。

使用4种客观无参考图像评价指标定量评估各算法性能,包括亮度失真(Lightness Order Error, LOE)、图像空间质量评估器(Blind Referenceless

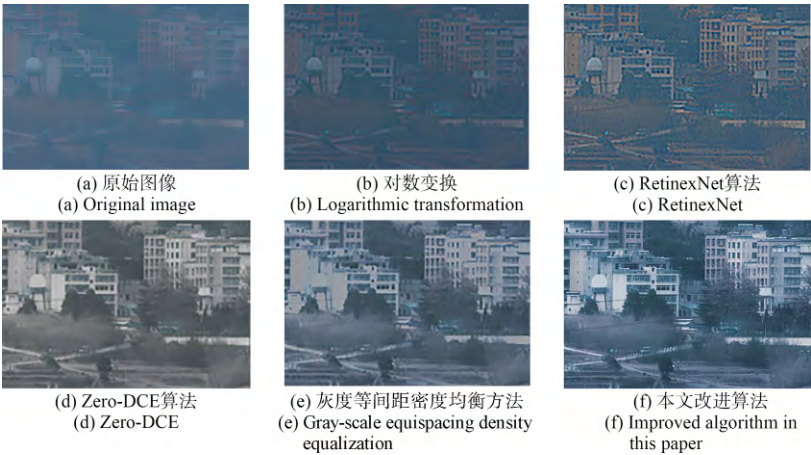


图 13 不同算法增强效果对比

Fig. 13 Comparison of enhancement effects of different algorithms

Image Spatial Quality Evaluator, BRISQUE)、自然图像质量(Natural Image Quality Evaluator, NIQE)以及图像处理时间(Time)。其中 LOE 反映增强后图像自然度的亮度顺序误差, LOE 值越小, 亮度顺序保持得越好; BRISQUE 是基于自然

场景统计的无参考图像评价指标, 值越小, 图像表现的越自然; NIQE 值越小代表图像越符合人眼的自然感知; Time 表示处理一副图像所需要的时间, 值越小表示算法的速度越快。实验结果如表 2 所示。

表 2 不同算法的客观评价指标

Tab. 2 Objective evaluation indexes of different algorithms

增强算法	LOE	BRISQUE	NIQE	Time/s
对数变换	503. 23	35. 21	3. 23	0. 037
RetinexNet	443. 21	25. 34	3. 67	0. 040
Zero-DCE	367. 97	21. 11	3. 11	0. 042
灰度等间距密度均衡方法	310. 54	17. 34	2. 98	0. 032
本文改进算法	215. 34	15. 78	2. 76	0. 018

5 结 论

为了满足实时图像的增强处理需要, 本文对实时性好、增强效果显著的灰度等间距密度均衡图像增强算法进行了进一步改进。为了保证连续图像序列处理效果的连贯性, 避免小目标扰动对整体增强效果的影响, 提出了有效灰度级阈值的自动计算方法。为了避免低动态范围情况下

出现的过度增强问题, 提出了阈值增强限定与亮度补偿方法。经过大量的实验验证, 该算法对于多种不同场景的图像均具有较好的增强效果, 且对于连续图像序列的增强处理效果连续稳定; 对于 $1\,920\times1\,080$ 分辨率及以下的图像, 在 i5 CPU 2. 5 GHz 主频硬件平台上, 单帧增强处理时间不大于 32 ms, 基本可以满足常规监控设备对实时性的要求。

参 考 文 献:

[1] HE K M, SUN J, TANG X O. Single image haze removal using dark channel prior [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2011, 33(12): 2341-2353.

[2] WANG J, PANG Y W, HE Y Q, *et al.* Enhancement for dust-sand storm images [C]. 22nd International Conference on MultiMedia Modeling. Miami: Springer, 2016: 842-849.

- [3] HUANG D M, WANG Y, SONG W, *et al.* Shallow-water image enhancement using relative global histogram stretching based on adaptive parameter acquisition [C]. 24th International Conference on MultiMedia Modeling. Bangkok: Springer, 2018: 453-465.
- [4] GAO G X, LAI H C, JIA Z H, *et al.* Sand-dust image restoration based on reversing the blue channel prior [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2020, 12(2): 3900216.
- [5] DIGNE J. An implementation and parallelization of the scale space meshing algorithm [J]. *Image Processing on Line*, 2015, 5: 282-295.
- [6] 刘跃生,陈新度,吴磊. 混合稀疏迭代最近点配准[J]. 光学精密工程, 2021, 29(9): 2255-2267.
LIU Y S, CHEN X D, WU L. Sparse mixture iterative closest point registration [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2021, 29(9): 2255-2267. (in Chinese)
- [7] 叶震,卞超杰,梅雨晴,等. 基于逐点插入法的定尺度三角剖分算法研究[J]. 河南科技, 2022, 41(6): 11-15.
YE Z, BIAN C J, MEI Y Q, *et al.* Research on scaling triangulation algorithm based on point by point insertion method [J]. *Henan Science and Technology*, 2022, 41(6): 11-15. (in Chinese)
- [8] RUSSAKOVSKY O, DENG J, SU H, *et al.* ImageNet large scale visual recognition challenge [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2015, 115(3): 211-252.
- [9] DEKEL T, GAN C, KRISHNAN D, *et al.* Sparse, smart contours to represent and edit images [C]. 2018 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Salt Lake City: IEEE, 2018: 3511-3520.
- [10] 高仁强,张显峰,孙敏,等. 融合无人机LiDAR和高分辨率光学影像的点云分类方法[J]. 南京信息工程大学学报(自然科学版), 2018, 10(1): 102-112.
GAO R Q, ZHANG X F, SUN M, *et al.* Fusion of high-resolution optical image and unmanned aerial vehicle LiDAR for 3D point cloud classification [J]. *Journal of Nanjing University of Information Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2018, 10(1): 102-112. (in Chinese)
- [11] BOYKO A, FUNKHOUSER T. Extracting roads from dense point clouds in large scale urban environment [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2011, 66(6): S2-S12.
- [12] YANG Z S, JIANG W S, XU B, *et al.* A convolutional neural network-based 3D semantic labeling method for ALS point clouds [J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(9): 936.
- [13] 罗国强. Gamma变换与多尺度细节增强的红外图像增强[J]. 激光与红外, 2023, 53(2): 253-260.
LUO G Q. Infrared image enhancement based on Gamma transformation and multi-scale detail enhancement [J]. *Laser & Infrared*, 2023, 53(2): 253-260. (in Chinese)
- [14] 贺金鑫,赵锐敏,罗文宝,等. 基于图像增强和融合的SAR图像变化检测[J]. 吉林大学学报(信息科学版), 2023, 41(2): 217-226.
HE J X, ZHAO R M, LUO W B, *et al.* Change detection in synthetic aperture radar images based on image enhancement and fusion [J]. *Journal of Jilin University (Information Science Edition)*, 2023, 41(2): 217-226. (in Chinese)
- [15] HASSAN N, ULLAH S, BHATTI N, *et al.* The Retinex based improved underwater image enhancement [J]. *Multimedia Tools and Applications*, 2021, 80(2): 1839-1857.
- [16] GUO C L, LI C Y, GUO J C, *et al.* Zero-reference deep curve estimation for low-light image enhancement [C]. 2020 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Seattle: IEEE, 2020: 1777-1786.

作者简介:



张艳超,女,博士,副研究员,2015年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事图像处理、光电测控技术等方面的研究。E-mail:zhangyanchaomn@126.com