

文章编号:1007-2780(2016)07-0695-08

基于场景复杂度计算的红外图像平台直方图均衡

张云峰*

(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:直方图均衡类算法由于缺乏限制项,增强后的红外图像易出现灰度级合并和过增强,视觉效果不佳。为解决上述问题,提出基于场景复杂度限制型的平台直方图均衡算法。该算法首先提出对图像场景复杂度进行估计,并将 Harris 角点数量作为图像复杂度评价依据。然后建立类似 sigmoid 函数的图像复杂度评价函数,将场景复杂度标准化。最后综合考虑图像复杂度和防止原图均值漂移,依据平台直方图均衡原理获取全局变换函数,重建红外图像。实验结果表明:该方法可有效地依据不同场景实现红外图像增强,不出现过增强和噪声放大。客观评价指标表明,该方法在保持图像均值亮度和图像信息熵方面表现优异。

关键词:红外图像增强;平台直方图均衡;图像复杂度;角点检测;Harris 算法

中图分类号:TP139 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/YJYXS20163107.0695

Adaptive plateau histogram equalization for infrared image based on scene complexity computation

ZHANG Yun-feng*

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

Abstract: Histogram equalization and its improved version may cause tinny gray levels coalition and over-enhancement in the output infrared image without any constraints. In order to solve this problem, we propose plateau histogram equalization based on scene complexity computation. Firstly, Harris algorithm is used to detect corner. Then an evaluation function, which is similar to the sigmoid function, is established to calculate the degree of complexity for an image. Finally, a global transformation function is gained using the theory of plateau histogram equalization. Moreover, the global transformation function achieves enhancement with the constraints of image complexity and mean lighting protecting. Experimental results show that the proposed method can enhance infrared images with different scenes effectively and there exist no over-enhancement and noise amplification in the output infrared images. Objective evaluation illustrates that the proposed method can achieve less mean lighting shift and holding the entropy of original image.

收稿日期:2015-08-13; **修订日期:**2015-11-16.

基金项目:国家自然科学基金(No. 61205143);吉林省科技厅重点项目(No. 20110329)

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61205143); Science and Technology Department of Jilin Province Research Funding(No. 20110329)

* 通信联系人, E-mail: zyfcicomp@sohu.com

Key words: infrared image enhancement; plateau histogram equalization; image complexity; corner detection; harris algorithm

1 引言

红外成像技术依据热辐射成像,可昼夜工作,已被广泛应用于军事,医疗和科学研究等领域。但是,由于热辐射各向同性扩散与红外传感器本身的非线性等原因导致实际采集到红外图像通常是对比度差、纹理细节模糊、可观测性较差。因此,有必要对红外图像进行预处理,提升对比度,增强视觉效果^[1-4]。

常用的红外图像增强算法有线性变换和直方图类增强算法。线性变换算法将依据一定的变换关系将原始灰度重新映射,一般需要多次调整参数才能获取较好的视觉效果。直方图均衡类方法依据原始红外图像累积直方图中灰度概率重新映射灰度。依据概率分布分配灰度会导致像素个数少的灰度被合并,像素个数较多的灰度级与其相邻灰度级之间的差距会放大导致过增强。缺乏限制,直方图均衡算法最终增强效果难以令人满意^[1-6]。不同的限制算法被提出来减少灰度级合并,消除过增强。平台直方图均衡(plateau histogram equalization, PHE)及双平台直方图均衡算法(double plateau histogram equalization, DPHE),通过对直方图统计信息进行修订,以降低灰度级合并和防止过增强发生^[7-9]。局部直方图均衡和自适应对比度限制的直方图均衡,采用分块进行直方图均衡,从统计信息上减小数值累积,建立局部变换函数,防止子块受全局图像影响^[10]。近年多人提出的不同的限制型直方图类算法,概率修订^[11],线性优化问题均衡^[12],通过单独放大灰度差的分层差分表达(Layered Difference Representation, LDR)^[13]等等。对于红外图像,直方图类算法应用较广的是平台直方图均衡算法^[7]和双平台直方图均衡算法^[9],针对上述直方图均衡类算法缺点,本文提出对平台直方图均衡进行改进:依据场景复杂度来限制直方图均衡程度。本文首先采用 Harris 角点对图像场景复杂度进行评价,并建立类似 sigmoid 函数的复杂度评价函数,对图像复杂度参数进行标准化。最后考虑到图像均值漂移,依据平台直方图

均衡原理获取变换函数,实现图像灰度重新映射,实现红外图像增强。

2 平台直方图均衡

平台直方图均衡算法是直方图均衡改进算法,常用来实现红外图像增强^[7]。PHE 采用平台阈值 T 对直方图的统计信息进行修订,将直方图中统计像素个数大于阈值 T 的修改为 T 。对于统计个数小于 T 的保持原数据。转换为概率后具体操作如下:

$$p_m(i)=\begin{cases} P_T & p(i)>P_T \\ p(i) & \text{others} \end{cases}, \quad (1)$$

然后依据修订的直方图灰度像素概率,采用直方图均衡算法得到全局变换函数实现灰度重新映射。由于采用阈值限制了大概率值的存在,灰度级之间对应的概率相当,不会出现灰度之间大的跳变,同时也降低了小概率灰度的合并。但是平台直方图将最后的变换函数灰度级是全部动态范围,上述情况只适合场景信息丰富,动态范围高的红外图像。当图像均匀时,动态范围低并且灰度级之间差距小,经平台直方图均衡处理之后,同样会导致过增强和噪声放大。

3 本文算法

为使红外图像经平台直方图均衡处理后得到有效增强,本文提出基于场景复杂度计算的平台直方图均衡算法,该算法分为 3 个部分:(1)场景复杂度评测,采用检测图像 Harris 角点的数量来估计场景复杂度;(2)建立场景复杂度评价函数,采用类似 sigmoid 函数标准化场景复杂度;(3)获取变换函数重新映射灰度,综合考虑保持原图均值和场景复杂度,生成全局变换函数,重建输出图像。图 1 是本文算法的框架图。

3.1 场景复杂度评测

场景的复杂程度,跟人眼视觉感知有关联^[14-17]。现阶段场景复杂度评价标准多为像素亮度和边缘纹理^[14-15]。实际采集到的红外图像通常是对比度较低,纹理模糊,噪声较大。若以单

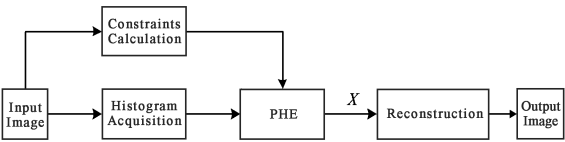


图 1 提出算法框架

Fig.1 Framework of the proposed algorithm

纯的亮度信息或边缘信息评价场景复杂度,场景估计易出现错误。角点是一种局部不变特征,具有丰富的纹理信息和良好的独特性,能够很好地反映场景信息^[18-20]。Harris 算子计算只涉及到一阶导数,因此对图像旋转、灰度变化、噪声影响和视点变换不敏感,它也是比较稳定的一种点特征提取算法,因此本文选取 Harris 角点检测作为图像场景复杂度检测手段^[19]。

Harris 角点基于 Moreavec 算法发展而来,其基本原理是:取目标像素为中心的窗口,计算该窗口沿着任何方向的灰度变化,并用灰度变化度量解析形式表达。假设中心点目标像素点 (x,y) 小窗口在 X 方向移动 u ,在 Y 方向上移动 v ,则灰度变化度量解析表达式为:

$$E_{x,y} = \sum w_{x,y} (I_{x+u,y+v} - I_{x,y})^2 = \sum w_{x,y} \left(u \frac{\partial I}{\partial X} + v \frac{\partial I}{\partial Y} + o(\sqrt{u^2 + v^2}) \right)^2, \tag{2}$$

其中: $E_{x,y}$ 为窗口内灰度变化, $w_{x,y}$ 为窗口函数,一般定义为高斯函数 $w_{x,y} = e^{-(x^2+y^2)/\sigma^2}$, I 是原始图像。忽略无穷小项,则有:

$$E_{x,y} = \sum w_{x,y} (u^2 (I_x)^2 + v^2 (I_y)^2 + 2uv I_x I_y) = Au^2 + 2Cuv + Bv^2, \tag{3}$$

式中: $A = (I_x)^2 \otimes w_{x,y}$, $B = (I_y)^2 \otimes w_{x,y}$, $C = (I_x I_y) \otimes w_{x,y}$ 。将 $E_{x,y}$ 化为二次型:

$$E_{x,y} = \begin{bmatrix} u & v \end{bmatrix} \mathbf{M} \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} \tag{4}$$

其中: $\mathbf{M}$ 为实对称矩阵,为: $\mathbf{M} = \sum w_{x,y}$

$\begin{bmatrix} I_x^2 & I_x I_y \\ I_x I_y & I_y^2 \end{bmatrix}$ 。经对角化处理得:

$$E_{x,y} = R^{-1} \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda_2 \end{bmatrix} R, \tag{5}$$

其中: R 为旋转因子, $\lambda_1 \lambda_2$ 为 $\mathbf{M}$ 的特征值,如果两个特征值 $\lambda_1 \lambda_2$ 都很小,则证明局部自相关函数很平坦,检测区域为平坦区域;如果两个特征值中一

个较大,另一个较小时,则说明 $E_{x,y}$ 垂直山脊的变化很大,而沿着山脊的变化很小,此处为一个边缘,即表明特征点位于“边缘”上;如果两个特征值 $\lambda_1 \lambda_2$ 都很大,则说明局部自相关函数有一个尖峰,此处为一个角点。Harris 的角点响应函数 (CRF) 表达式由此而得到:

$$CRF(x,y) = \det(\mathbf{M}) - k (\text{trace}(\mathbf{M}))^2. \tag{6}$$

图为 2 红外场景 Harris 算法角点检测结果图。



图 2 Harris 算法角点检测结果

Fig.2 Corner detection results of Harris algorithm

3.2 场景复杂度度量

得到图像角点后,需要建立相应的场景复杂度评价函数进行场景复杂度估计。依据实际需要,场景复杂度评价函数应具有以下几个特点:(1)角点数量少的情况下,场景应该判为不复杂;(2)角点数量多的情况下,场景应该判为复杂,并且当角点数量到达一定值后,场景评测值不变;(3)能将角点数量转换为标准值,范围为 $[0,1]$ 之间。sigmoid 函数较好的满足上述条件,但是 sigmoid 函数在中间部分变换过于剧烈并且初始部分变化太缓慢,所以本文建立类似 sigmoid 函数的场景复杂度评价函数 $\beta(N_H)$:

$$\beta(N_H) = \frac{10}{10 + \alpha^{(10 - N_H)}}, \tag{7}$$

式中: N_H 为角点个数, α 为调节曲线变化因子,以 sigmoid 函数调节参数 e 为基准,另外选取 α 值为 1.5,2,5,10,得出曲线如图 3 所示。不同曲线对应分别零值为:

$$\begin{aligned} \beta(0) &= \frac{10}{10 + 1.5^{(10-0)}} = 0.1477, \\ \beta(0) &= \frac{10}{10 + 2^{(10-0)}} = 0.0097, \beta(0) = \frac{10}{10 + e^{(10-0)}} = 4.3470 \times 10^{-4}, \\ \beta(0) &= \frac{10}{10 + 5^{(10-0)}} = 1.0240 \times 10^{-6}, \beta(0) = \frac{10}{10 + 10^{(10-0)}} = 1.0000 \times 10^{-9}. \end{aligned}$$

图 3

中 $\alpha=1.5$ 不能实现标准化; $\alpha=e,5,10$ 初始部分变化过于缓慢,中间变化太剧烈; $\alpha=2$ 变化合理,适合用来估计场景复杂度。综合考虑本文选取 $\alpha=2$ 。即:

$$\beta=\frac{10}{10+2^{(10-N_H)}} \cdot \tag{8}$$

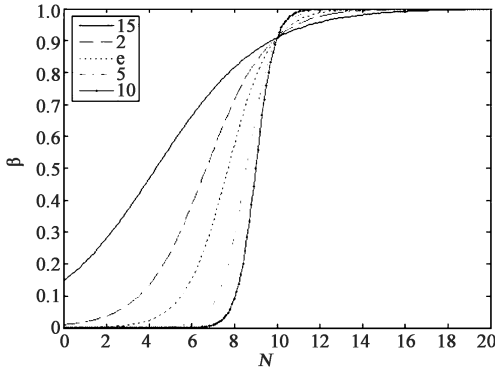


图 3 图像复杂度评价 β 不同曲线

Fig. 3 Different curves of the image complexity evaluation β

本文设定的场景复杂度函数仅显示变量范围 $[0,20]$,实际应用变量在 20 以后的值近似为 1。

变量是角点的数量,本文采用对数运算对角点数量进行修订。对数运算缓解了角点数量的变化,同时与人眼视觉曲线一致,较好地反映场景变化。

$$N_H=\log_2(N+1) \tag{9}$$

其中: N 为实际检测出的角点数量。

3.3 变换函数求取和重新映射

场景复杂度评测完后,需要将场景复杂度信息添加到变换函数中。场景均匀,平台直方图均衡处理时,输出图像灰度范围应该得到限制,而场景复杂的红外图像则要输出图像灰度应该为占据全部动态范围。考虑到场景复杂度,均衡输出灰度范围定义为:

$$L_A=L_0+\beta\cdot(L-L_0) \tag{10}$$

式中: L_0 为原图具有的灰度级个数, L_A 为输出后图像灰度级个数, L 为显示设备可显示最多灰度级个数。同时为防止均匀场景的红外图像经均衡后均值漂移,对原始图像显示均值保留,具体操作如下:

$$B=(L_{\max}+L_{\min})/2-L_A/2 \tag{11}$$

其中: $L_{\max},L_{\min}$ 为原始图像的最大灰度级和最小灰度级, B 为输出图像灰度的基值。

则依据平台直方图均衡原理,全局变换函数为:

$$X(i)=\frac{Cp_m(i)}{Cp_N}\cdot L_A+B \tag{12}$$

式中: $Cp_m(i)$ 为修订后的灰度累积概率, Cp_N 为修订后直方图灰度全部概率累加值。

4 实验与分析

4.1 实验条件

为验证本文算法的有效性,在 Matlab 平台 (CPU 为 Intel i7 四核,主频为 3.4 GHz) 上对进行 3 组实验,分别从主观视觉效果和客观质量评价两方面对其进行分析。本文还与常用红外图像增强算法进行了比较,包括直方图均衡算法 (HE) 和双平台直方图均衡增强算法 (DPHE) [9],本文算法参数选取,除场景复杂度评价函数的调节曲线变化因子可选择符合要求的值外,其余参数均为自适应求取。

本文采用平均绝对亮度均值误差 (AAMBE) [21] 和图像信息熵 E 作为客观评价指标。AAMBE 用来计算增强后图像保持均值亮度的能力,本文用 AAMBE 评价增强图像与原图像相比平均亮度变化,AAMBE 值越小说明保持原图亮度均值能力越好;信息熵 Entropy 评价增强后图像的信息丰富程度,Entropy 值越大说明增强后图像信息丰富。

4.2 实验结果与分析

测试图像 Sky, Sill 和 Buildings 均由前视红外热像仪拍摄得到,分辨率均为 $640\text{ pixel}\times480\text{ pixel}$,图 4(a),图 5(a) 和图 6(a) 均为原始图像,对应子图 (b) 为原始图像 Harris 角点检测结果,对应子图 (c) ~ 图 (e) 为增强图像。直方图均衡算法 HE 耗费少量的时间实现黑白拉伸,但是 HE 常常带来过增强和人工痕迹,DPHE 自适应采用双阈值弥补 HE 缺陷,高阈值限制占高概率的灰度级防止过增强和低阈值用来保护概率较小灰度级防止被合并。DPHE 的变换函数将原始图像灰度级变换到可显示的全部动态范围,而不考虑场景的差异性。本文算法采用对场景复杂度评测来限制均衡输出灰度范围得到视觉效果良好的增强图像。各原始图像的复杂度评价如表 1 所示。图像 Sky 是一幅低复杂度均匀场景图像,图 4(c) 和图 4(d) 是 HE 与 DPHE 增强结果,可以看出尽管 DPHE 处理结果由于 HE

处理结果,但两幅图像都出现过增强,均匀区域噪声放大,视觉效果差,而本文提出算法处理结果图 4(e)较好地保持原始图像的均值亮度,视觉效果良好,无噪声放大。图像 Sill 是一幅中等复杂度场景,如图 5(c)所示 HE 增强后

图像目标区域细节丢失,平滑区噪声放大;图 5(d)中灰度级合并得到抑制,背景平滑区噪声无放大,但是在亮暗交界处过增强现象还是明显可见的。图 5(e)中细节得到增强,无噪声放大和过增强。图 6(a) Buildings 是一幅建筑充满整个

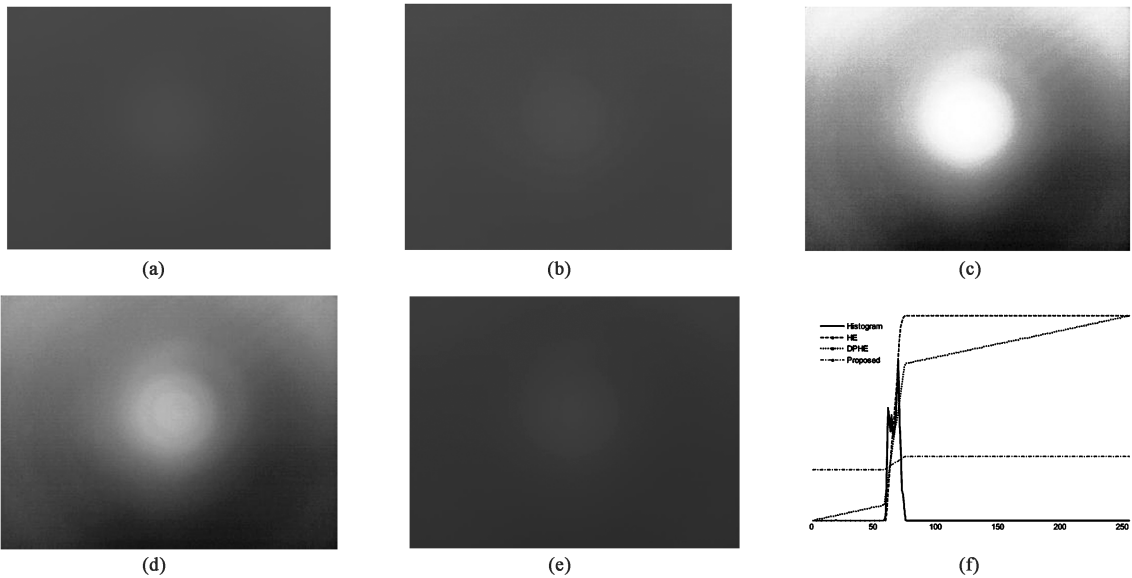


图 4 图像 Sky 对比结果. (a)原始图像, (b)角点检测结果 (c)HE 增强结果, (d)DPHE 增强结果, (e)本文算法增强结果, (f)变换函数及原始直方图.

Fig. 4 Comparison on infrared image Sky. (a) original image, (b)result of corner detection, (c) enhancement results of HE, (d) enhancement results of DPHE, (e) enhancement results of proposed method, (f) transfer functions and the original histogram.

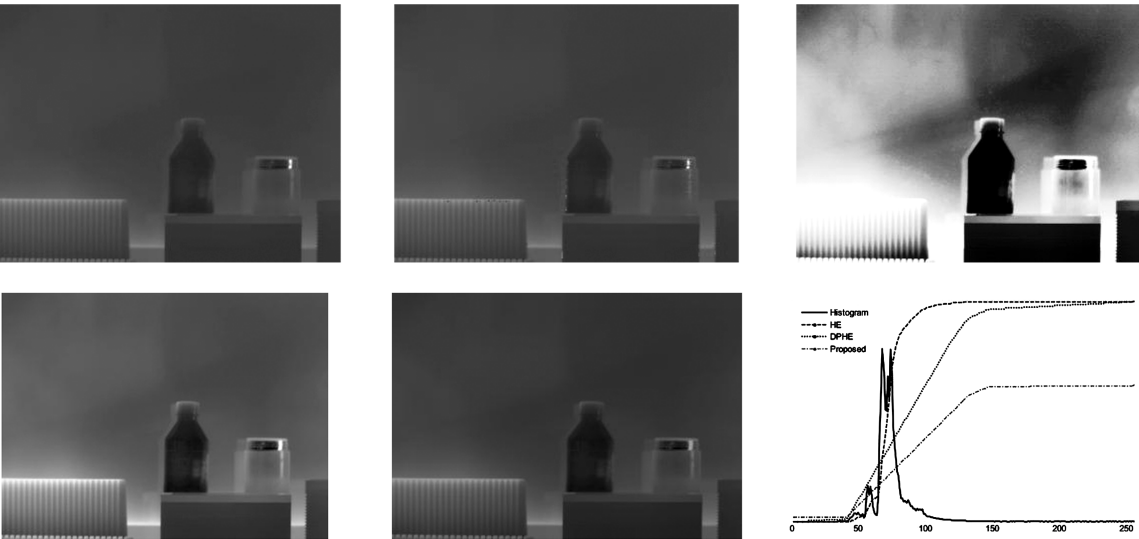


图 5 图像 Sill 对比结果. (a)原始图像, (b)角点检测结果, (c)HE 增强结果, (d)DPHE 增强结果, (e)本文算法增强结果, (f)变换函数及原始直方图.

Fig. 5 Comparison on infrared image Sill. (a) original image, (b)result of corner detection, (c) enhancement results of HE, (d) enhancement results of DPHE, (e) enhancement results of proposed method, (f) transfer functions and the original histogram.

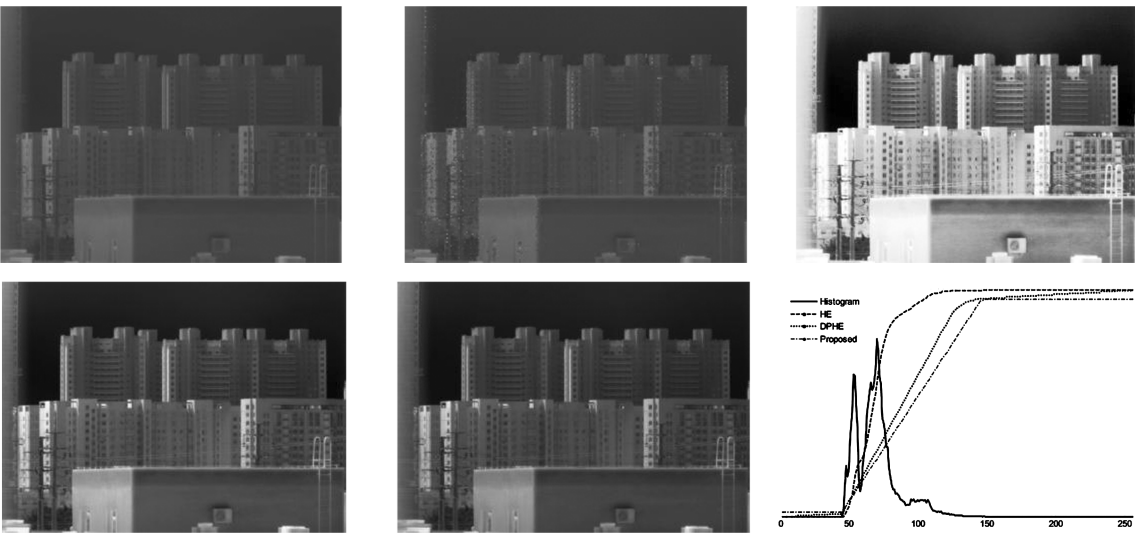


图 6 图像 buildings 对比结果, (a)原始图像, (b)角点检测结果 (c)HE 增强结果, (d)DPHE 增强结果, (e)本文算法增强结果, (f)变换函数及原始直方图.

Fig. 6 Comparison on infrared image buildings. (a) original image, (b) result of corner detection, (c) enhancement results of HE, (d) enhancement results of DPHE, (e) enhancement results of proposed method, (f) transfer functions and the original histogram.

视场的复杂场景,从表 1 中也可以看出该场景的复杂度评测值接近为 1。HE 处理结果图 6(c)中背景与目标黑白拉伸明显,但同样出现过增强和灰度级合并。DPHE 和本文算法都能较好的增强细节,实现黑白拉伸和保持均值亮度。图 4(f)到图 6(f)为直方图均衡类算法变换函数及原始图像直方图分布。图 4(f)中原始直方图占据大约 20 个灰度级, HE 和 DPHE 都是将这 20 个左右灰度级变化到 256 个灰度级,这样均匀场景就会出现过增强。但是本文算法通过对场景复杂度评价来限制均衡程度,将原始图像拉伸到一个限制的灰度范围内,不会出现过增强并且保留了原始图像的均值亮度。图 5(f)也说明了对场景复杂度进行估计后本文算法将原始灰度级均衡到限定的灰度范围,

而 HE 和 DPHE 将原始图像均衡到全部的灰度范围。图 6(f)说明本文算法和 DPHE 将原始复杂场景图像均衡到全部动态范围,虽然原始图像灰度级范围较大,但是 HE 同样导致过增强和合并灰度级,如图 6(f)中所示,原始图像中灰度级大于 110 的像素在输出图像输出均为 255。表 2 是

表 1 三个场景复杂度 β 估计

Tab. 1 Complicacy of three scenes evaluated by β

	Sky	Sill	Buildings
N	0	58	914
N_H	0	5.858 0	9.836 1
β	0.009 7	0.361 6	0.899 3

表 2 不同增强算法评价

Tab. 2 Evaluation of different Enhancement Methods

		Origin	HE	DPHE	Proposed
Sky	AAMBE	--	81,650 4	43,928 4	1,559 0
	E	3,746 4	3,746 3	3,746 4	3,746 3
Sill	AAMBE	--	72,251 5	18,178 6	17,788 9
	E	5,208 4	5,108 6	5,206 1	5,205 2
Buildings	AAMBE	--	70,692 4	19,690 1	16,163 0
	E	5,613 6	5,556 0	5,612 5	5,613 5

各直方图均衡类增强算法客观评测结果。由于本文算法综合考虑场景复杂度计算和原始图像均值亮度保留,在均值亮度评价指标 AAMBE 中表现最优。在增强后图像信息熵 E 的评测中,本文算法处理后图像除对第二个场景评测中信息熵较小外,其余的都能很好的保持原图信息熵。

5 结 论

为减少直方图类增强算法在红外图像增强过程带来的过增强和噪声放大,本文提出场景复

杂度计算的平台直方图均衡算法。该算法首先采取 Harris 角点检测对场景进行评测,建立场景复杂度评价函数自适应估计场景的复杂度,并将计算出来的场景复杂度用来限制均衡程度;最后考虑到均衡类算法会带来均值漂移,建立了具有保持原始图像均值亮度的全局变换函数。实验结果表明:本文算法能有效地实现不同场景红外图像增强,视觉效果良好,无过增强和平滑区噪声放大。客观评价数据表明与其他对比方法相比,本文算法在保持原始图像均值亮度和图像信息熵方面有表现良好。

参 考 文 献:

- [1] 金伟其,刘斌,范永杰,等. 红外图像细节增强技术研究进展[J]. 红外与激光工程,2011,40(12):2521-2527.
JIN W Q, LIU B, FAN Y J, et al. Review on infrared image detail enhancement techniques [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(12): 2521-2527. (in Chinese)
- [2] 朱瑞飞,贾宏光,王超,等. 应用参数化对数模型增强图像细节及对比度[J]. 光学 精密工程,2014,22(4):1064-1070.
ZHU R F, JIA H G, WANG C, et al. Enhancement of image detail and contrast by parameterized logarithmic framework [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(4): 1064-1070. (in Chinese)
- [3] 周妍,李庆武,霍冠英. 基于非下采样 Contourlet 变换系数直方图匹配的自适应图像增强[J]. 光学 精密工程,2014,22(8):2214-2222.
ZHOU Y, LI Q W, HUO G Y. Adaptive image enhancement based on NSCT coefficient histogram matching [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(8): 2214-2222. (in Chinese)
- [4] 王宇庆,王索建. 红外与可见光融合图像的质量评价[J]. 中国光学,2014,7(3):396-401.
WANG Y Q, WANG S J. Quality assessment method of IR and visible fusion image [J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(3): 396-401. (in Chinese)
- [5] CHOI K, KIM C, KANG M H, et al. Resolution improvement of infrared images using visible image information [J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2011, 18(10): 611-614.
- [6] 曹军峰,史加成,罗海波,等. 采用聚类分割和直方图均衡的图像增强算法[J]. 红外与激光工程,2012,41(12):3436-3441.
CAO J F, SHI J C, LUO H B, et al. Image enhancement using clustering and histogram equalization [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(12): 3436-3441. (in Chinese)
- [7] SILVERMAN J. Display and enhancement of infrared images [C]. *Proceedings of International Conference on Image Processing and its Applications*, Maastricht: IEEE, 1992: 345-348.
- [8] VICKERS V E. Plateau equalization algorithm for real-time display of high-quality infrared imagery [J]. *Optical Engineering*, 1996, 35(7): 1921-1926.
- [9] LIANG K, MA Y, XIE Y, et al. A new adaptive contrast enhancement algorithm for infrared images based on double plateaus histogram equalization [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2012, 55(4): 309-315.
- [10] MOHAN S, RAVISHANKAR M. Modified contrast limited adaptive histogram equalization based on local contrast enhancement for mammogram images [M]//DAS V V, CHABA Y. *Mobile Communication and Power Engineering*. Berlin Heidelberg: Springer, 2013, 296: 397-403.
- [11] HUANG S C, CHENG F C, CHIU Y S. Efficient contrast enhancement using adaptive gamma correction with weighting distribution [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2013, 22(3): 1032-1041.
- [12] ARICI T, DIKBAS S, ALTUNBASAK Y. A histogram modification framework and its application for image con-

- trast enhancement [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2009, 18(9): 1921-1935.
- [13] LEE C, LEE C, KIM C S. Contrast enhancement based on layered difference representation of 2D histograms [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2013, 22(12): 5372-5384.
- [14] 乔立永, 徐立新, 高敏. 红外图像复杂度对目标检测性能的影响[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(S1): 253-261.
QIAO L Y, XU L X, GAO M. Influences of infrared image complexity on the target detection performance [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(S1): 253-261. (in Chinese)
- [15] 钱思进, 张恒, 何德全. 基于图像视觉复杂度计算的分类信息隐藏图像库[J]. *解放军理工大学学报: 自然科学版*, 2010, 11(1): 26-30.
QIAN S J, ZHANG H, HE D Q. Image library building in information hiding research [J]. *Journal of PLA University of Science and Technology: Natural Science Edition*, 2010, 11(1): 26-30.
- [16] 杨涛, 张艳宁, 张秀伟, 等. 基于场景复杂度与不变特征的航拍视频实时配准算法[J]. *电子学报*, 2010, 38(5): 1069-1077.
YANG T, ZHANG Y N, ZHANG X W, *et al.* Scene complexity and invariant feature based real - time aerial video registration algorithm [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2010, 38(5): 1069-1077. (in Chinese)
- [17] SEONG Y K, CHOI Y H, CHOI T S. Scene-based watermarking method for copy protection using image complexity and motion vector amplitude [C]. *Proceedings of IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, Montreal: IEEE, 2004, 3: III-409-12.
- [18] HARRIS C G, STEPHENS M. A combined corner and edge detector [C]. *Proceedings of the 4th Alvey Vision Conference*, Manchester, UK: [s. n.], 1998: 147-151.
- [19] 王巍, 唐一平, 任娟莉, 等. 一种改进的 Harris 角点提取算法[J]. *光学 精密工程*, 2008, 16(10): 1995-2001.
WANG W, TANG Y P, REN J L, *et al.* An improved algorithm for Harris corner detection [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, 16(10): 1995-2001. (in Chinese)
- [20] 陈白帆, 蔡自兴. 基于尺度空间理论的 Harris 角点检测[J]. *中南大学学报: 自然科学版*, 2005, 36(5): 751-754.
CHEN B F, CAI Z X. Harris corner detection based on theory of scale-space [J]. *Journal of Central South University: Science and Technology*, 2005, 36(5): 751-754. (in Chinese)
- [21] OOI C H, KONG N S P, IBRAHIM H. Bi-histogram equalization with a plateau limit for digital image enhancement [J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2009, 55(4): 2072-2080.

作者简介: 张云峰(1970—), 男, 研究员, 主要从事实时图像处理的研究. E-mail: zyfcicomp@126.com