

基于去雾模型的红外图像对比度增强

李 毅^{1,2} 张云峰^{1*} 张 强¹ 耿爱辉¹ 陈 娟¹

¹中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 为实现室外模糊红外图像对比度增强,提出一种基于去雾模型的红外图像增强方法。结合红外图像特点,对可见光去雾增强方法进行改进优化。采用三级高斯金字塔分解扩展实现图像快速均值滤波,获取透射率粗估计;通过图像统计信息自适应细化透射率,恢复出无雾图像;针对无雾图像整体亮度较暗现象,进一步采用背景抑制的分段对比度增强。实验结果表明:增强后图像细节信息突出,层次感丰富,人眼视觉效果良好。客观测评结果表明,该算法能有效增强红外图像对比度。嵌入式平台测试耗时28ms,可以实现实时红外图像增强处理。

关键词 图像处理; 红外图像增强; 去雾模型; 均值滤波

中图分类号 TP391

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0113004

Infrared Image Contrast Enhancement Based on Haze Remove Method

Li Yi^{1,2} Zhang Yunfeng¹ Zhang Qiang¹ Geng Aihui¹ Chen Juan¹

¹Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,
Changchun, Jilin 130033, China

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract In order to enhance the outdoor blurred infrared image contrast, an infrared image enhancement based on haze remove method is proposed. The novel algorithm optimizes and improves the visual image haze remove method which combines the characteristics of the infrared images. In order to get the transmission rate coarse estimation, a fast average filtering using three levels Gaussian pyramid operation is presented. The haze free image is recovered through self-adaptive transmission rate calculated with the statistics information of image. To deal with low luminance problem of the whole haze free image, a sectional contrast enhancement way is proposed which is capable of background suppression. Experimental results show that the enhanced infrared image has more detail information and stronger gradient than the original and has a perfect visual effects. The objective evaluation parameters illustrate that the contrast of haze free infrared image increases effectively by the proposed algorithm. The proposed algorithm can realize real time infrared image enhancement processing, as embedded platform test takes 28 ms.

Key words image processing; infrared image enhancement; haze remove method; average filtering

OCIS codes 100.2000; 110.3080; 100.2980; 010.1310

1 引言

红外探测器依靠独特的目标景物热辐射特性成像技术,广泛应用于军事、科研和医疗等领域。但常受自身系统缺陷与外界干扰等因素影响,红外图像表现为边缘模糊,缺乏清晰细节和纹理。因此增强图像细

收稿日期: 2014-06-20; 收到修改稿日期: 2014-08-28

基金项目: 国家自然科学基金(61205143)、吉林省科技厅重点项目(20110329)

作者简介: 李 毅(1988—),男,博士研究生,主要从事实时图像处理方面的研究。E-mail: leey2009@qq.com

导师简介: 陈 娟(1962—),女,研究员,博士生导师,主要从事光电测量、伺服控制等方面的研究。

E-mail: chenjuan@mail.ccit.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: zyfcjomp@sohu.com

节是后端红外图像处理的必要操作步骤^[1-2]。

常见的红外图像增强处理算法有灰度变换和直方图均衡(HE)类算法。灰度变换一般需要人为调整参数才能达到较好的视觉效果。直方图均衡依据像素灰度值的概率重新分配灰度级,能有效提高图像对比度,但HE往往会将代表图像细节占少数的像素点灰度级合并,造成细节信息丢失,并且容易出现过增强。针对HE缺点提出了一些改进算法,如局部直方图均衡、平台直方图均衡(PHE)、对比度限制的直方图均衡以及最近提出的修正对比度限制的直方图均衡等^[1,3-4]。基于可见光与红外图像的融合算法也常被用来增强红外图像^[5-7]。近年来出现的其他红外图像细节增强方法包括:基于对数运算的Retinex模型增强,偏微分增强算法,多尺度小波变换、Contourlet变换和Shearlet变换,动态范围压缩细节增强的双边滤波与动态范围分割(BF&DRP)算法等^[2,8-12]。这些算法通过选取合适参数都能获得较好的结果,但未经优化,复杂度较高,不利于实时处理。

基于单幅图像去雾增强是近年来的研究热点,He等^[13]基于统计规律提出了基于暗通道先验的去雾方法,去雾效果明显,色彩失真少,被认为是目前最好的去雾方法,但该方法中采用软抠图实现透射率的估计,计算复杂度高,无法满足实时性要求。Tarel等^[14]假设环境光在一定区域中逼近最大值,而且局部变化平缓,利用中值滤波的方法估计透射率,提出了一种快速图像去雾算法,该方法操作简单,耗时大大减低,应用较为广泛。但Tarel算法参数较多,并且无自适应处理,针对不同的图像参数需要不断调整才能获取较好结果。同时在景深跳变处易出现光晕现象,对浓雾效果较差。随后,国内外研究人员对上述两种典型去雾增强算法进行了多种改进优化,也取得了较好的去雾增强效果^[15-19]。在低照度和夜晚图像增强方面,基于暗通道去雾算法也取得了较好的视觉效果^[20-21]。

红外图像利用目标景物温差成像,而目标景物各点温度差别较小,表现为像素点邻域像素灰度值相似度高,导致红外图像模糊,细节不清晰,与可见光图像受雾气影响图像相似。因此,本文采用可见光去雾模型实现红外图像增强,提出一种均值滤波估计透射率的红外图像快速去模糊增强算法,同时针对去雾处理后图像亮度较暗情况,对处理后图像进行抑制背景的分段对比度增强,进一步提升图像的亮度与对比度,实现红外图像尤其是室外红外图像快速有效地细节增强,获得了良好的视觉效果。

2 去雾模型

在计算机视觉领域^[13-14],光在雾天传输的物理模型常表示为

$$I(x) = J(x)\exp[-\beta d(x)] + A[1 - \exp[-\beta d(x)]], \quad (1)$$

式中 $I(x)$ 为观察到的有雾图像, $J(x)$ 为待恢复的无雾图像, A 为大气光, x 为图像空间坐标, β 为空间大气散射系数, $d(x)$ 为表示景深的目标景物与成像设备之间的距离函数, $\exp[-\beta d(x)]$ 表示透射率, 用 $t(x) = \exp[-\beta d(x)]$ 替代可表示为

$$I(x) = J(x)t(x) + A[1 - t(x)]. \quad (2)$$

光在雾天传输成像可分为两部分: $J(x)t(x)$ 为目标景物反射光直接衰减项,随景深的增加目标景物反射光衰减; $A[1 - t(x)]$ 为环境光项,是大气光对成像环境的影响,环境光项一般会造成图像的模糊,可认为是图像中呈现的雾气。(2)式中仅 $I(x)$ 为已知项,其他三项均为未知项,因此依照去雾模型实现图像的雾气去除是一个病态问题,恢复出无雾图像需要依赖一些假设与先验。

3 基于去雾模型的红外图像增强算法

由于地表与目标温度高于背景温度,以及红外波段辐射各向同性扩散等原因,造成室外红外图像模糊、对比度低,外加水汽吸收、大气散射等因素使得红外图像进一步模糊,从视觉上看与可见光薄雾图像相似,如图1所示。需采用去雾模型进行红外图像增强处理。

用 $L(x)$ 表示(2)式的环境光项,即有

$$L(x) = A[1 - t(x)], \quad (3)$$

可得出透射率 $t(x)$ 为

$$t(x) = 1 - \frac{L(x)}{A}, \quad (4)$$

即可恢复出无雾图像

$$J(x) = \frac{I(x) - L(x)}{1 - [L(x)/A]}, \quad (5)$$

对(5)式进行观察,可以将去雾模型中环境光 $L(x)$ 作为原始图像的雾气, $1 - \frac{L(x)}{A}$ 项是对去雾气图像的对比度拉伸增强,下面求取环境光 $L(x)$ 和大气光 A 。

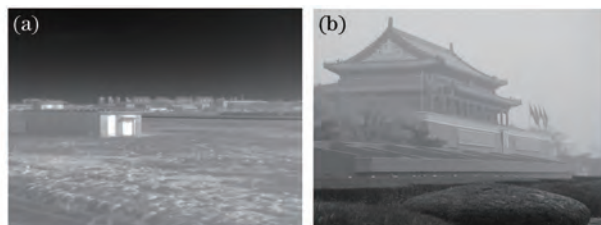


图 1 (a)红外图像; (b)可见光雾图

Fig.1 (a) Infrared image; (b) visual fog image

3.1 透射率随景深自适应调节的环境光估计

透射率 $t(x)$ 与目标成像距离和大气散射有关,透射率大小反映目标景物反射光衰减。由(2)式可知, $I(x) \geq A[1 - t(x)]$, 即有

$$t(x) \leq \left[1 - \frac{I(x)}{A} \right], \quad (6)$$

由雾气分布规律和透射率特点可知,景深变化往往能很好地反映有雾图像的透射率变化,景深突变时对应的透射率分布也会发生急剧的变化。红外模糊图像可看作是含薄雾图像,虽然有一定程度的模糊但灰度级的变化仍能反映景深信息。受此启发,对原图采用均值滤波来近似估计透射率。对 $I(x)$ 进行 $r \times r$ 均值滤波得到 $I_{\text{aver}}(x)$ 为

$$I_{\text{aver}}(x) = \text{avg}_{r \times r}[I(x)], \quad (7)$$

透射率估计可表示为

$$\tilde{t}(x) = 1 - \eta \cdot \frac{I_{\text{aver}}(x)}{A}. \quad (8)$$

为了获取更为合适的透射率,在(8)式中添加景深调整量 η 项。景深调整量 η 越大透射率越小,结果图像雾气少,但图像亮度偏暗,视觉效果较差;反之, η 越小透射率越大,结果图像雾气去除不明显,图像增强效果不明显,不同 η 值的去雾效果如图 2 所示。

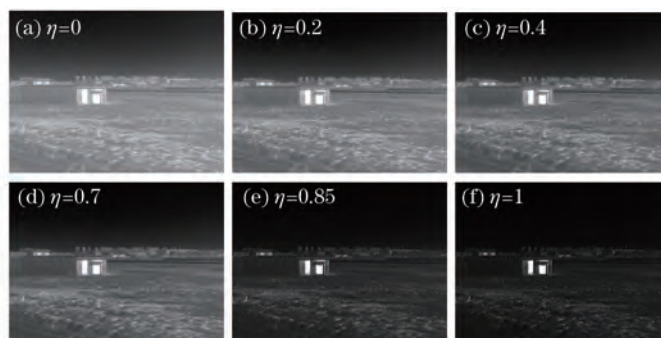


图 2 η 不同取值图像结果

Fig.2 Image results of different η

为了获得恰当的透射率,提出了一种自适应确定 η 的方法。受 Dong 等^[20]提出的区分图像受雾气影响像素点(强度正常像素)方法启发,先统计灰度级小于强度正常像素的阈值 T 和灰度级小于图像均值的像素点个

数 N_T 和 N_{Mean} , 依据 N_T 和 N_{Mean} 比值估计图像雾气浓度, 设置为

$$\eta = \frac{N_{\text{Mean}}}{N_T}, \quad (9)$$

式中 N_{Mean} 数值大说明图像受雾气影响较为严重, 反之图像受雾气影响较小。

透射率较大时, 由去雾模型可知红外图像去雾增强失效, 为确保红外图像得到增强, 因此需要对景深调整量的下限进行设置, 设置下限为 0.15。即

$$\eta = \max\left(\frac{N_{\text{Mean}}}{N_T}, 0.15\right), \quad (10)$$

则联立(6)、(9)、(10)式可知透射率为

$$\tilde{t}(x) = \max\left\{\left[1 - \max\left(\frac{N_{\text{Mean}}}{N_T}, 0.15\right) \cdot \frac{I_{\text{aver}}(x)}{A}\right], \left[1 - \frac{I(x)}{A}\right]\right\}, \quad (11)$$

则环境光可表示为

$$L(x) = \min\left\{\left[\max\left(\frac{N_{\text{Mean}}}{N_T}, 0.15\right) \cdot I_{\text{aver}}(x)\right], I(x)\right\}. \quad (12)$$

考虑到红外图像邻域相似性及算法实用性, 图像均值滤波 $I_{\text{aver}}(x)$ 采用高斯金字塔平滑实现。

$$I_{G_{-n+1}}(i, j) = \sum_{m=-2}^2 \sum_{n=-2}^2 W(m, n) I_{G_{-n}}(2i - m, 2j - n), \quad (13)$$

$$I_{G_{-n+1}}(i, j) = 4 \cdot \sum_{m=-2}^2 \sum_{n=-2}^2 W(m, n) I_{G_{-n}}[(i - m)/2, (j - n)/2]. \quad (14)$$

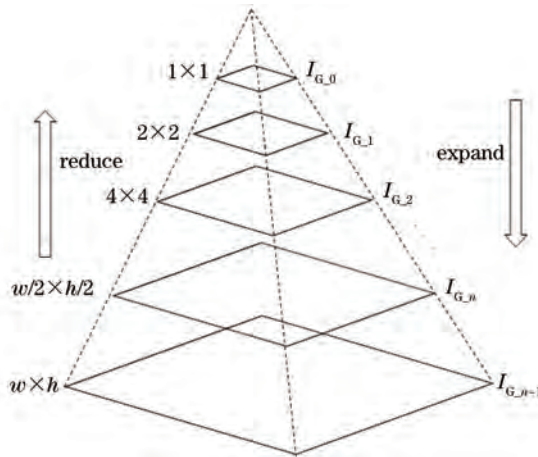


图3 高斯金字塔图结构

Fig.3 Structure of Gaussian pyramidal image

金字塔级数为 $(I_{G,0}, I_{G,1}, I_{G,2}, \dots, I_{G,n}, I_{G,n+1})$, (13)式为高斯金字塔分解, (14)式为高斯金字塔扩展, 其中 $W(m, n)$ 为 $r \times r$ 高斯模板, 具体实现如图3所示, w 和 h 分别代表图像的宽和高, 图中箭头向上指示为金字塔分解, 宽高分辨率逐层减半, $I_{G_{-n+1}}$ 即为原始输入图像 I ; 箭头向下指示为金字塔扩展, 宽高分辨率逐层增倍, $I'_{G_{-n+1}}$ 即为扩展结果图像(金字塔分解和扩展是非可逆过程, 区别于高斯金字塔分解过程, 在金字塔扩展级数右上进行标注)。采用三级金字塔分解得到分解图像 $I_{G_{-n-2}}$, 将得到的分解图像经过三级金字塔扩展得到扩展图像 $I'_{G_{-n+1}}$, $I'_{G_{-n+1}}$ 作为高斯金字塔平滑滤波结果 $I_{G_{\text{aver}}}(x)$ 。

当 $W(m, n)$ 模板较大时, 目标景物与背景之间存在的景深突变被平滑, 导致目标景物与背景交界处出现伪影。图4为不同高斯模板处理结果及局部放大图。



图4 不同高斯模板处理结果及局部放大图

Fig.4 Results of using different Gaussian modules and partial enlarged detail

3.2 大气光估计

针对大气光 A 的估计, He 等^[13]提出基于暗通道理论的整体估算方法。记录暗通道中 0.1% 的最亮像素, 从原图像中取这些像素对应位置像素亮度最大值作为整体大气光。尽管红外图像为单通道图像, 计算暗通道仍然较为耗时, 并且针对目标景物处存在雾气的红外图像, 暗通道计算失效。为避免直接选取图像中最大值作为大气光的不合理性且兼顾时效性, 利用 3.1 节中定义的受雾气影响像素点(强度正常像素), 将这些像素点中灰度级最大的 1% 取均值作为大气光估计。大气光 A 的计算方法为: 1) 统计受雾气影响像素点直方图 $H_r(i)$, 显然 $i \in (T, l-1)$, l 为输出设备可显示的最大灰度级个数。2) 从 $H_r(i)$ 灰度级最大值 $l-1$ 开始计算, 获取累积像素点总数达到全部受雾气影响像素点 1% 对应的灰度级 i_r 。大气光 A 可表示为

$$A = \frac{\sum_{i=i_r}^{l-1} i \cdot H_r(i)}{\sum_{i=i_r}^{l-1} H_r(i)} . \quad (15)$$

3.3 全局对比度增强

与文献[13]算法求得透射率[图 5(a)]相比, 采用均值滤波求得透射率[图 5(b)]细化良好但很大部分数值较小, 去雾处理后必然会导致图像亮度偏暗。如图 5(c)所示, 去雾后图像纹理清晰, 边缘突出, 细节信息增强明显, 由于采用均值估计环境光, 图像去雾处理后整体偏暗, 有必要进行全局对比度增强, 获取更好的视觉效果。分析去雾后图像直方图可知, 图像像素大部分分布在较低灰度级[图 5(d)]。红外图像背景信息像素点在整幅图像中占较大比率, 占灰度级数目较少, 进行图像全局对比度增强时会导致背景所占灰度级增加, 背景中噪声得到增强, 视觉效果变差。采用保持背景不变, 分段增强目标景物对比度的方法, 实现红外图像对比度增强。背景信息灰度级特点: 1) 背景灰度级均值在全局图像均值左侧; 2) 背景均值灰度级应该处在局部最大值附近; 3) 背景灰度级相似度高, 背景均值灰度级 V 左右两侧 $(V-\varepsilon, V+\varepsilon)$ 范围内各灰度级像素值不超过 κ 。检测方法如下: 统计图像直方图, 找出最小灰度级与图像全局均值灰度级之间局部最大值, 从中筛选

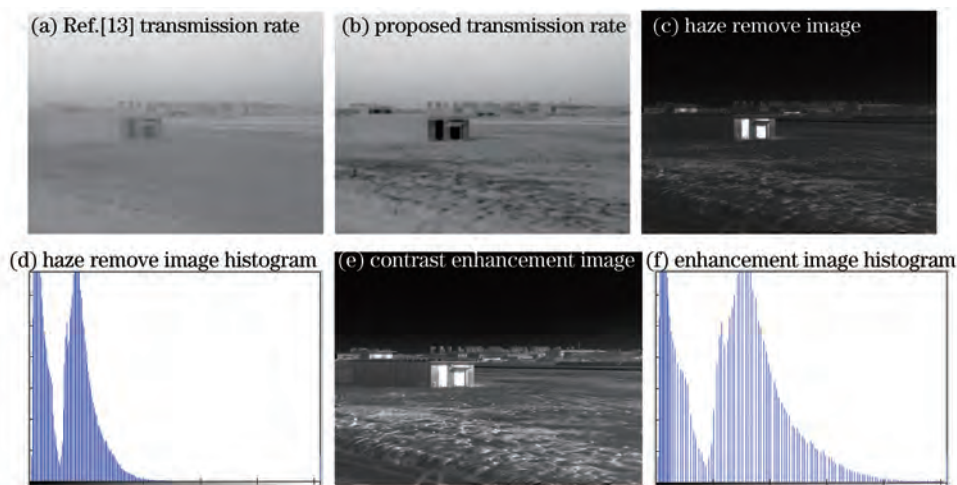


图5 红外图像比较

Fig.5 Comparison of infrared images

出满足局部最大值在 $(-\varepsilon, \varepsilon)$ 范围内像素个数不超过 κ 的灰度级最大点作为背景均值 V_B , $(0, V_B + \varepsilon)$ 为背景占据的灰度级。依据经验选取 $\varepsilon = 9, \kappa = 200$ 。将剩下的灰度级均分为 z 段, 兼顾原始图像动态范围和分段增强实验结果, 选取 $z=4$, 即去除背景灰度级后将剩余的部分合理分为 4 段。重新分配灰度级:

$$Z_i = \frac{n_i}{N - N_B} \cdot [l - (V_B + \varepsilon)], \quad (16)$$

式中 Z_i 表示重新分配的灰度级, $i \in [0, z-1]$, n_i 为第 i 段所有灰度级含有的像素个数, N 、 N_B 分别为图像大小和背景像素个数。图 5(e) 为经对比度增强的图像直方图, 全局亮度有明显的提升, 更有利于人眼视觉观察。图 5(f) 为除背景区域灰度级外, 其他灰度级扩展分布在几乎整个直方图范围。

4 实验结果与分析

实验均在 Windows XP 系统、Intel i7 四核 3.4 GHz 处理器、内存 4 GB 工控机上使用 Matlab 软件实现。实验中使用的图片均由前视红外(FLIR)热像仪拍摄得到。

为验证算法的有效性, 选择平台直方图均衡增强法、文献[3-4]中的修正对比度限制直方图均衡算法、文献[9]平稳小波和 Retinex 红外图像增强算法及文献[13]中 He 等提出的暗通道去雾算法方法与本文算法进行对比。其中, 平台直方图均衡增强法是常用且有效的红外图像增强算法; 修正对比度限制直方图均衡算法(MCLAHE)、平稳小波和 Retinex 增强算法(SWR)为近期提出的红外图像增强算法, MCLAHE 采用自适应修正对比度的局部分块直方图均衡方法实现图像增强。SWR 经小波变换将图像分解为高低频子带图像, 低频子带采用 Retinex 进行细节增强, 对高频子带采用贝叶斯萎缩阈值法去噪, 再经小波变换重构增强图像。暗通道去雾方法是被认为是当前最有效的可见光去雾算法。各算法实验结果如图 6、7 所示。

主观分析了实验结果, 图 6(a)(320 pixel×240 pixel)和图 7(a)(320 pixel×240 pixel)为景深变化明显的室外红外源图像, 图像模糊, 细节信息缺失。图 6(b)和图 7(b)为经平台直方图均衡处理后图像, 尽管在一定程度上减少了灰度级合并, 获得对比度增强, 但无法产生新的灰度级, 对于模糊的红外图像增强效果有限, 图像大部分细节仍处于模糊状态。图 6(c)和图 7(c)为 MCLAHE 处理后图像, 图像对比度有很大提升, 模糊现象得到一定程度地消除, 但图像细节增强不明显, 与平台直方图类似。图 6(d)和图 7(d)为 SWR 增强后图像, 细节信息增强明显, 图像中纹理突出, 但未能有效地消除室外红外图像的模糊现象。图 6(e)和图 7(e)为暗通道去雾算法(文献[13])实现结果, 暗通道算法采用软抠图细化透射率估计, 能够很准确的恢复出无雾图像。但红外图像边缘模糊缺陷没有得到很好地解决, 如图中箭头指向处的边缘不清晰。同时, 暗通道去雾算法计算采用 15×15 最小值滤波方法实现, 对于受雾气影响的复杂场景暗通道计算准确, 雾气去除效果良好, 但对于天空背景中存在的孤立目标区域, 暗通道计算错误, 受背景影响天空孤立目标被当做雾去除, 如图 7(e)天空箭头指向。图 6(f)和图 7(f)是基于去雾模型的增强算法, 雾气模糊有效去除, 图像细节信息突出, 边缘清晰, 视觉效果良好。如箭头指向所示, 图 6(e)中远处高楼轮廓、近处房子墙体和图 7(f)中近地面栅栏, 都得到有效的对比度增强。图 7(f)天空背景孤立目标保持完整, 经去雾处理后目标对比度也得到增强。

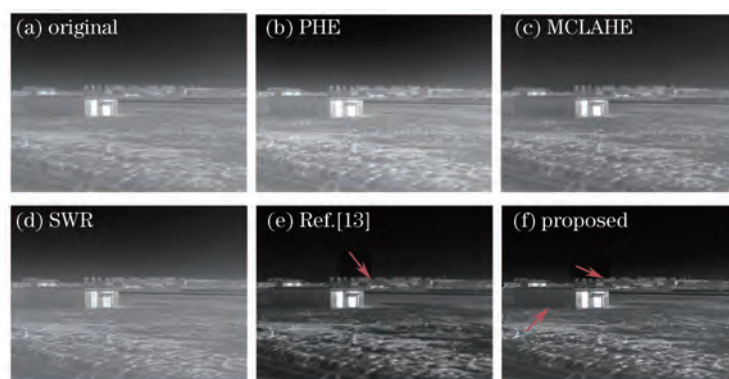


图 6 不同算法处理结果

Fig.6 Results of different algorithms

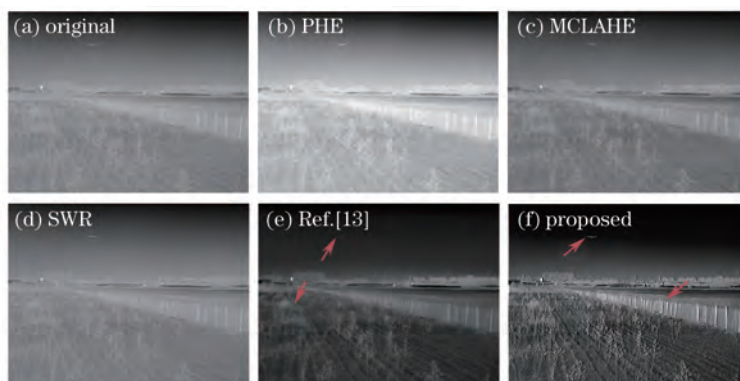


图7 不同算法处理结果

Fig.7 Results of different algorithms

为了客观评价各算法的性能,选择局部对比度评价指标和清晰度评价指标来衡量增强后图像的客观质量,使用各算法运行时间来比较算法的实时性。计算图像局部对比度^[9]是将图像分为尺寸相等的 $N_1 \times N_2$ 块,然后计算各子块局部对比度的累加值。函数定义为

$$C_{\text{avg}} = \frac{1}{N_1 \times N_2} \sum_{i=1}^{N_1} \sum_{j=1}^{N_2} \varphi(i,j), \quad (17)$$

式中 $\varphi(i,j)$ 为子块局部对比度,

$$\varphi(i,j) = \frac{I'_{\max} - I'_{\min}}{I'_{\max} + I'_{\min}}, \quad (18)$$

式中 $I'_{\max}$, $I'_{\min}$ 分别为子块的最大值与最小值,采用 8×8 块计算图像局部对比度。清晰度评价由图像梯度决定,定义式为

$$T = \sum_{i=1}^{w-1} \sum_{j=1}^{h-1} \sqrt{[I(i,j) - I(i-1,j)]^2 + [I(i,j) - I(i,j-1)]^2}. \quad (19)$$

客观评价指标计算值如表1所示。

表1 红外图像增强效果定量评价表

Table 1 Quantitative evaluation table of infrared image enhancement effects

Experimental image	Index evaluation	PHE	MCLAHE	SWR	Ref.[13]	Proposed
Fig.5(a)	Contrast	0.3767	0.3240	0.3054	0.5864	0.6431
	T	4.5652	4.7084	3.4758	6.1249	8.8408
	Time /s	0.0197	0.0414	41.2413	17.0481	0.2216
Fig.6(a)	Contrast	0.2851	0.3074	0.3054	0.5355	0.8917
	T	3.8008	3.2812	3.4758	3.7924	10.4196
	Time /s	0.0197	0.0415	41.2402	18.4631	0.2363

由表1可知,经本文算法处理的图像局部对比度评价指标值和清晰度指标值最大,说明本文算法增强处理后图像细节信息丰富,局部对比度高,边缘清晰有层次感,与人眼视觉主观观测结果一致。从算法实时性指标分析,本文算法耗时仅为文献[13]算法的1.3%。

平台直方图均衡算法耗时最少,但处理结果模糊,视觉效果差;MCLAH算法耗时少,处理后图像对比度较高,但仍存在模糊现象,视觉效果一般;经SWR处理后图像,纹理细节增强较好,但图像模糊现象消除不明显,并且采用计算较复杂的小波变换和Retinex算法会导致整个算法耗时最长。文献[13]算法视觉效果良好,红外图像模糊现象得到有效去除,但算法复杂度高,耗时长。从视觉效果和实用性整体来评测,本文算法优于各比较算法,且思路清晰,操作简单,嵌入式平台测试耗时28 ms,能够胜任实时红外图像增强处理。本文算法对其他室外近距离模糊红外图像,也能获得很好的对比度增强,如图8所示。

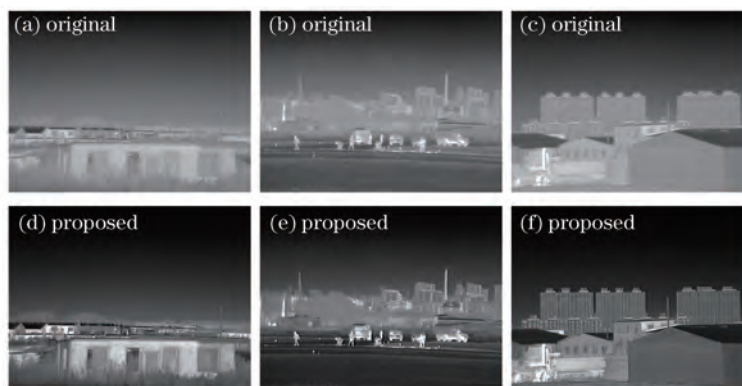


图8 本文算法增强结果

Fig.8 Enhanced results of the proposed algorithm

5 结 论

通过对红外图像特点和可见光去雾模型分析,提出了一种基于去雾模型的红外图像对比度增强算法。该算法利用单通道图像灰度级变化表达景深信息,采用均值滤波估计透射率,大大降低了计算复杂度。针对均值滤波去雾增强后图像亮度较低的缺陷,提出背景抑制的分段对比度增强方法,实验结果表明使用本文算法增强后图像模糊类似雾气现象消失,细节信息丰富,层次感突出,纹理清晰,对比度好,具有良好的视觉效果。同时对本文算法嵌入式平台测试,耗时仅为 28 ms。

参 考 文 献

- 1 Jin Weiqi, Liu Bin, Fan Yongjie, *et al.*. Review on infrared image detail enhancement techniques[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(12): 2521-2527.
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.
- 2 Zhao Wenda, Zhao Jian, Zhao Fan, *et al.*. Variable infrared image enhancement of bimodal Gaussian function specification[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(3): 0309001.
赵文达, 赵 建, 赵 凡, 等. 双峰高斯函数规定化的变分红外图像增强[J]. *中国激光*, 2013, 41(3): 0309001.
- 3 S Mohan, M Ravishankar. Modified Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization Based on Local Contrast Enhancement for Mammogram Images[M]. Berlin: Springer, 2013. 397-403.
- 4 J Zhao, Y Chen, H Feng, *et al.*. Fast image enhancement using multi-scale saliency extraction in infrared imagery[J]. *Optik International Journal for Light and Electron Optics*, 2014.
- 5 Li Dan, Wang Hongtao. Fuzzy image enhancement based on dual chaotic quantum particle swarm algorithm[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(10): 101102.
李 丹, 王洪涛. 基于双混沌量子粒子群算法的模糊图像增强研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(10): 101102.
- 6 Chen Lei, Yang Fengbao, Wang Zhishe, *et al.*. Research on fusion algorithm of infrared and visible imagery based on variational enhancement model[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(4): 041003.
陈 磊, 杨风暴, 王志社, 等. 红外与可见光图像的变分增强融合算法研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(4): 041003.
- 7 Yin Wen, Li Yuanxiang, Zhou Zeming, *et al.*. Remote sensing image fusion based on sparse representation[J]. *Acta Optic Sinica*, 2013, 33(4): 0428003.
尹 雯, 李元祥, 周则明, 等. 基于稀疏表示的遥感图像融合方法[J]. *光学学报*, 2013, 33(4): 0428003.
- 8 Wang Bingjian, Liu Shangqian, Zhou Huixin, *et al.*. Self-adaptive contrast enhancement algorithm for infrared based on plateau histogram[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, 34(2): 299-301.
王炳建, 刘上乾, 周慧鑫, 等. 基于平台直方图的红外图像自适应增强方法[J]. *光子学报*, 2005, 34(2): 299-301.
- 9 Zhan Bichao, Wu Yiquan, Ji Shouxin. Infrared image enhancement method based on stationary wavelet transformation and Retinex [J]. *Acta Optic Sinica*, 2010, 30(10): 2788-2793.
占必超, 吴一全, 纪守新. 基于平稳小波变换和 Retinex 的红外图像增强方法[J]. *光学学报*, 2010, 30(10): 2788-2793.
- 10 Zhao Wenda, Zhao Jian, Han Xizhen, *et al.*. Infrared image enhancement based on variation partial differential equations[J].

- Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays, 2014, 29(2): 281–285.
- 赵文达, 赵 建, 韩希珍, 等. 基于变分偏微分方程的红外图像增强算法研究[J]. 液晶与显示, 2014, 29(2): 281–285.
- 11 Jia Hongguang, Wu Zepeng, Zhu Mingchao, *et al.*. Infrared image enhancement based on generalized linear operation and bilateral filter[J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(12): 3272–3282.
- 贾宏光, 吴泽鹏, 朱明超, 等. 基于广义线性运算和双边滤波的红外图像增强[J]. 光学精密工程, 2013, 21(12): 3272–3282.
- 12 Wu Zepeng, Xuan Ming, Jia Hongguang, *et al.*. Infrared image dynamic compression and contrast enhancement based on optimal mapping curve[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(12): 1209002.
- 吴泽鹏, 宣 明, 贾宏光, 等. 基于最优映射曲线的红外图像动态范围压缩和对比度增强方法[J]. 中国激光, 2013, 40(12): 1209002.
- 13 K M He, J Sun, X Tang. Single image haze removal using dark channel prior[J]. Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transaction on, 2011, 33(12): 2341–2353.
- 14 J P Tarel, N Hautiere. Fast visibility restoration from a single color or gray level image[C]. Proceedings of IEEE, International Conference on Computer Vision, 2009. 2201–2208.
- 15 K B Gibson, T Q Nguyen. Fast single image fog remove using the adaptive wiener filter[C]. 2013 IEEE International Conference on Image Processing(ICIP), 2013. 714–718.
- 16 S Parthasarathy, P Sankaran. A Retinex based haze removal method[C]. Industrial and Information Systems, IEEE, 2012. 1–6.
- 17 Zhang Bingbing, Dai Shengkui, Sun Wanyuan. Fast image haze-removal algorithm based on the prior dark-channel[J]. Journal of Image and Graphics, 2013, 18(2): 184–188.
- 张冰冰, 戴声奎, 孙万源. 基于暗原色先验模型的快速去雾算法[J]. 中国图象图形学报, 2013, 18(2): 184–188.
- 18 Chu Hongli, Li Yuanxiang, Zhou Zeming, *et al.*. Optimized fast dehazing method based on dark channel prior[J]. Acta Electronica Sinica, 2013, 4(4): 791–797.
- 褚宏莉, 李元祥, 周则明, 等. 基于黑色通道的图像快速去雾优化算法[J]. 电子学报, 2013, 4(4): 791–797.
- 19 Shi Defei, Li Bo, Ding Wen, *et al.*. Haze removal and enhancement using transmittance-dark channel prior based on object spectral characteristic[J]. Acta Automatica Sinica, 2013, 39(12): 2064–2070.
- 史德飞, 李 勃, 丁 文, 等. 基于地物波谱特性的透射率-暗原色先验去雾增强算法[J]. 自动化学报, 2013, 39(12): 2064–2070.
- 20 X Dong, G Wang, Y Pang, *et al.*. Fast efficient algorithm for enhancement of low lighting video[C]. Multimedia and Expo (ICME), 2011 IEEE International Conference on, 2011. 1–6.
- 21 X Zhang, P Shen, L Luo, *et al.*. Enhancement and noise reduction of very low light level images[C]. 21st International Conference on Pattern Recognition (ICPR), 2012. 2034–2037.

栏目编辑: 苏 岑