

基于低通滤波和多特征联合优化的夜间图像去雾

杨爱萍*, 赵美琪, 王海新, 鲁立宇

天津大学电气自动化与信息工程学院, 天津 300072

摘要 夜间有雾图像光照不均、对比度较低且色偏严重。现有的去雾算法主要是针对白天图像,并不适用于夜间场景,夜间图像去雾难度较大。该文通过深入分析夜间有雾图像的成像特点,提出了基于低通滤波和多特征联合优化的夜间图像去雾算法。针对夜间图像环境光照不均匀问题,提出先对图像进行低通滤波,然后对其低频分量三通道利用最小-最大值滤波估计局部环境光;针对目前白天去雾算法先验不适用于夜间图像,提出结合图像对比度、饱和度和信息熵特征,构建多特征联合优化函数估计透射率;针对夜间图像存在非一致色偏问题,提出非重叠块局部 Shade of Gray 算法进行颜色校正。实验结果表明:所提算法去雾图像的主观视觉效果较好,且对比度和色偏程度两方面客观评价指标整体优于其他对比算法。该算法能够有效去除夜间图像雾气,提高图像的对比度,恢复更多的细节信息,且颜色自然,视觉效果理想。

关键词 图像处理; 夜间图像去雾; 低通滤波; 局部环境光; 多特征联合优化

中图分类号 TP391

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.1010006

Nighttime Image Dehazing Based on Low-Pass Filtering and Joint Optimization of Multi-Feature

Yang Aiping*, Zhao Meiqi, Wang Haixin, Lu Liyu

School of Electrical and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China

Abstract Nighttime hazy image usually has the non-uniform illumination, low contrast and serious color deviation. The existing dehazing methods are mainly proposed for daytime images, which don't fit well with the conditions of most nighttime hazy scenes. Nighttime image dehazing is more difficult. We explore the imaging characteristics under nighttime conditions and propose a new nighttime image dehazing method based on low-pass filtering and joint optimization of multi-feature. Firstly, in order to handle the non-uniform illumination of nighttime scenes, the image is filtered by the low-pass filtering. And then the minimum-maximum filtering is applied to the low frequency components to estimate the local atmospheric light. Secondly, for the current daytime dehazing algorithm prior is not suitable for nighttime image, an effective transmission estimation method is presented based on the joint optimization of multi-feature which combines contrast, saturation and information entropy. Finally, for the non-uniform color deviation exists in nighttime images, the non-overlapping blocking local Shade of Gray is proposed. Experimental results demonstrate that the proposed algorithm has a good subjective visual effect, and the objective evaluation indexes are superior to other algorithms in contrast and color deviation degree. The proposed algorithm can significantly remove haze, improve the contrast and recover more details with the natural color and better visual effect.

Key words image processing; nighttime image dehazing; low-pass filtering; local atmospheric light; joint optimization of multi-feature

OCIS codes 100.2980; 100.3008; 010.1310; 100.3020

1 引 言

雾、霾等环境下采集到的夜间图像,在空气中悬浮粒子的散射作用下,一方面场景的反射光发生衰

减,另一方面大气环境光的渗入使得图像质量发生严重退化,存在光照不均、对比度降低、色偏严重等问题,从而严重影响视频监控和目标识别等计算机视觉系统发挥性能^[1-2]。相对于白天图像,夜间图像

收稿日期: 2018-05-03; 修回日期: 2018-05-15; 录用日期: 2018-05-25

基金项目: 国家自然科学基金(61372145,61472274,61771329)

* E-mail: yangaiping@tju.edu.cn

去雾更具挑战性。

针对白天图像去雾,目前已经提出了很多方法。根据其是否依赖于大气散射模型^[3]可分为两大类:一类是基于图像增强的方法,如 Retinex 算法^[4-5]和直方图均衡化^[6]等,该类方法不考虑图像退化的原因,直接通过增强图像对比度来弱化雾气的影响,恢复更多的细节信息;另一类是基于物理模型的图像复原方法,其中,单幅图像去雾基于相关先验信息,通过反演大气散射模型来复原图像,已成为当前的研究热点^[7-10]。He 等^[7]提出基于暗原色先验的图像去雾方法;Berman 等^[8]提出基于非局部先验的去雾方法;刘坤等^[9]提出基于稀疏表示模型的去雾方法等。上述方法对白天图像取得了较好的去雾效果,但其均是针对均匀光照条件提出的。夜间图像通常采用人工光源,环境光分布不均,因此上述方法并不适用于夜间图像去雾。

近年来,夜间图像去雾研究逐渐受到关注。Pei 等^[11]以白天灰色图像为目标,通过颜色迁移将夜间有雾图像转化成白天有雾图像,然后基于暗原色先验进行去雾;Zhang 等^[12]先利用 Retinex 算法^[13]对夜间图像亮度进行增强,然后估计入射光的色度校正色偏,最后基于暗原色先验进行去雾;Li 等^[14]将光晕项加入图像成像模型,基于光晕层的相对平滑特性先去除光晕,再利用暗原色先验进行去雾;杨爱萍等^[15]基于 Retinex 算法分离出夜间有雾反射光图像,然后利用暗原色先验对反射光图像进行去雾,并根据相机成像原理求解无雾入射光对象,进而融合反射光-入射光,最终得到夜间无雾图像。以上算法均以暗原色先验理论为基础,但是对于夜晚图像,其光源区域亮度较高,并不满足该先验条件,而其他区域可能是光照不足引起的。因此,暗原色先验对夜间图像并不适用。不同于暗原色先验理论,Meng 等^[16]从几何角度出发,提出基于边界约束的去雾方法,但是夜间图像光照不均匀,无法根据无雾图像的边界约束条件反演透射率;Fattal 等^[17]提出基于颜色线的方法,利用有雾图像与无雾图像在 RGB 空间的色偏来估计透射率,但是夜间图像受到有色光源影响,透射率估计不准确;Tan 等^[18]观察到无雾图像具有更高的对比度,从而提出最大化图像对比度来实现图像去雾,但是该方法未考虑图像成像机理,且对比度出现过增强使得像素溢出,导致复原图像颜色失真。

针对当前算法的不足,本文深入分析夜间有雾

图像的成像特点,提出基于低通滤波的局部环境光估计方法,并利用多特征联合优化来估计透射率。首先,针对夜间图像光照不均匀问题,通过对雾天图像低通滤波提取低频分量,并对其三通道分别利用最小-最大值滤波估计局部环境光;然后以提高图像对比度、饱和度、信息熵等特征为目标,构建多特征联合优化函数来估计透射率,同时解决了像素溢出导致的信息丢失问题;最后,针对夜间图像存在的色偏问题,提出非重叠块局部 Shade of Gray 算法进行颜色校正。

2 夜间有雾图像光学成像模型

Narasimhan 等^[3]基于光的散射机制提出的大气散射模型被广泛应用于雾天图像复原,由文献^[3]可知,相机采集的光照主要由两部分组成:一是直接衰减项,即物体表面的反射光在大气悬浮粒子的散射作用下发生衰减,最终到达相机的部分;二是环境光项,即大气环境光发生散射后叠加到场景反射光成像路径的部分。该模型假设环境光为全局常量,对于白天图像可直接使用,但是夜间图像受到人工光源的影响,光照分布不均,环境光局部可变。因此,将夜间图像成像模型修改为

$$I^c(x) = J^c(x) \cdot t(x) + A^c(x) \cdot [1 - t(x)], \quad (1)$$

式中: $c \in (r, g, b)$ 为图像三个颜色通道中的任一通道; x 为像素所处位置; $I^c(x)$ 为输入的夜间有雾图像; $J^c(x)$ 为待复原的无雾图像; $t(x)$ 为透射率,即光线穿透雾的能力; $A^c(x)$ 为夜间图像环境光,随所处位置 x 的变化而变化。

3 本文算法

由夜间图像成像模型(1)式可知,若求得环境光和透射率即可得到去雾图像。同时,夜间图像受人工光源影响,容易产生颜色失真,还需进行颜色校正。因此,本文算法流程如图 1 所示。主要包括:局部环境光估计、透射率估计和颜色校正。首先,基于低通滤波提取低频分量,并对其三通道进行最小-最大值滤波估计局部环境光;然后,根据夜间图像成像模型设计复原图像的对比度函数、饱和度函数以及信息熵,同时融合像素溢出限制函数,构建多特征联合优化目标函数估计透射率,并基于引导滤波进行优化;最后,对去雾后图像进行颜色校正,得到复原图像。

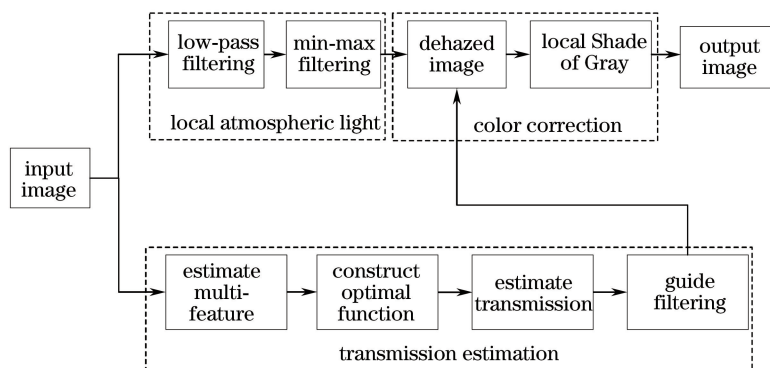


图 1 算法流程图

Fig. 1 Flowchart of the proposed algorithm

3.1 基于低通滤波的局部环境光估计

针对白天有雾图像提出了很多环境光估计方法,主要是将全局雾最浓的点作为环境光^[7,10,19]。但是,夜间图像受到各种人工光源影响,光照是局部变化的,环境光不再是全局常量。因此,提出基于低通滤波的局部环境光估计方法。

由 Retinex 定理^[4-5]可知,在图像成像过程中,入射光分量整体变化比较缓慢,蕴含着输入图像的低频信息,受雾气影响较大。因此,通过低通滤波提取入射光,得到与雾气浓度最相关的低频分量,然后寻找雾最浓的点,准确估计环境光。

由于雾气最浓的点亮度值通常较大,为避免将环境光错误地估计为点光源或白色物体,对低通滤波后的三通道图像分别进行最小值滤波,在每一个局部块中寻找最亮像素点得到环境光,并定义与(255,255,255)距离最小的点为求得的最亮点。利用下式估计局部环境光:

$$A^c(x) = \max_{y \in \Omega(x)} \{ \min_{z \in \omega(y)} \{ \text{lpf} [I^c(z)] \} \}, \quad (2)$$

式中 $\text{lpf}(\cdot)$ 为低通滤波运算,本文实验均采用高斯滤波进行处理。 $\Omega(x)$ 和 $\omega(y)$ 分别为以 y, z 为中心的矩形窗口。进一步,为减少环境光估计出现块效应,利用引导滤波对其细化^[20]。

由(2)式可知,环境光估计的准确性影响着图像去雾的效果。分别利用文献[7]方法、文献[14]方法及本文方法估计出环境光,并基于本文方法对夜间输入图像图 2(a)进行去雾,结果如图 2 所示。可以看出,文献[7]方法将环境光错误地估计为图 2(b)红框内的人工光源,去雾效果较差,如图 2(c)所示;文献[14]方法简单地寻找局部最大值来估计环境光,由于较亮物体和强光源影响,对环境光估计不准确,复原图像整体偏暗,且颜色失真严重,如图 2(e)所示;相比之下,本文方法结果更为准确,复原图像颜色自然,去雾效果较为彻底。

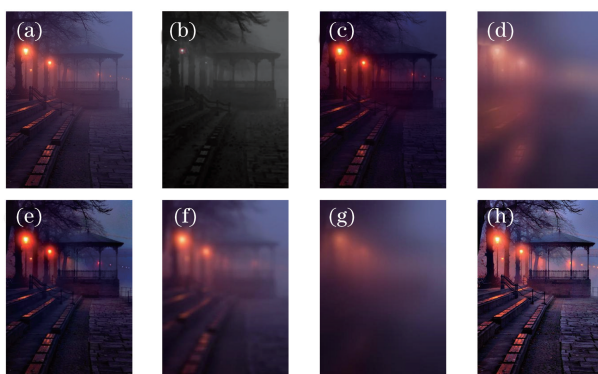


图 2 不同方法估计环境光与去雾效果。(a)输入图像;(b)文献[7]算法环境光;(c)文献[7]算法去雾;

(d)文献[14]算法环境光;(e)文献[14]算法去雾;(f)本文算法低通滤波;(g)本文算法环境光;(h)本文算法去雾结果

Fig. 2 Atmospheric light and dehazed results based on different methods. (a) Input image; (b) atmospheric light of Ref. [7] method; (c) dehazed result of Ref. [7] method; (d) atmospheric light of Ref. [14] method; (e) dehazed result of Ref. [14] method; (f) low-pass filtering of proposed method; (g) atmospheric light of proposed method; (h) dehazed result of proposed method

3.2 多特征联合优化估计透射率

目前常用的暗原色先验等白天去雾假设对夜间图像失效,需要寻找更加适用于夜间图像的透射率估计方法。因此,需要深入分析夜间有雾图像的特点,将图像的对比度、饱和度、信息熵等特征进行联合优化来实现透射率估计。

由于雾的存在,图像灰度分布相对集中,细节等高频分量在雾气遮罩下被削减,对比度下降;且大气粒子在雾的作用下发生散射,颜色衰减严重,有雾区域色彩饱和度降低。去雾算法应保证复原图像对比度提高,同时恢复出真实的色彩和更多的细节信息。因此,本文根据夜间图像成像模型,基于图像的对比度、饱和度和信息熵等特征构建多特征联合优化函数,通过最大化该目标函数来估计透射率,将透射率估计问题转化为目标函数最优值求解。

设图像在局部区域内透射率相同,由(1)式可以得到复原图像表达式:

$$J^c(x) = \frac{I^c(x) - A^c(x)}{t} + A^c(x). \quad (3)$$

1) 对比度函数构建

若图像局部区域灰度分布比较分散,则表明该区域与平均像素值相差较大,呈现出细节信息较丰富,对比度较高;若该区域灰度分布比较集中,则表明对比度较低。令 $\overline{J^c(x)}$ 表示复原图像局部块内的平均值,可将复原图像的对比度 f_c^c 表示为

$$f_c^c = 1 - 1 / \left\{ 1 + \frac{[\overline{J^c(x)} - J^c(x)]^2}{\tau^2} \right\}. \quad (4)$$

进一步,结合(3)式,将其表示为透射率 t 的函数,构建复原图像的对比度函数 $f_c^c(t)$:

$$f_c^c(t) = 1 - 1 / \left\{ 1 + \frac{[I^c(x) - \overline{I^c(x)}]^2}{\tau^2 t^2} \right\}, \quad (5)$$

式中 $\overline{I^c(x)}$ 为有雾图像局部块内的平均值, τ 为常数。由(5)式可知, t 越小,图像对比度越大。

2) 饱和度函数构建

图像受到雾气影响饱和度下降,去雾后图像色彩恢复,饱和度也相应提高。将复原图像的饱和度 f_s 定义为

$$f_s = \frac{\max[J^c(x)] - \min[J^c(x)]}{\max[J^c(x)]}. \quad (6)$$

进一步,结合(3)式,将其表示为透射率 t 的函数,构建复原图像的饱和度函数 $f_s(t)$:

$$f_s(t) = 1 - \frac{\min\{[I^c(x) - A^c(x)]/t + A^c(x)\}}{\max\{[I^c(x) - A^c(x)]/t + A^c(x)\}}. \quad (7)$$

3) 信息熵函数构建

夜间图像含有大量噪声,由于噪声对信息熵影响较小,可利用信息熵统计图像局部区域内的信息量,构建复原图像的信息熵函数 $f_E^c(t)$:

$$f_E^c(t) = - \sum_{i=0}^{255} h_i^c(t) \lg [h_i^c(t)], \quad (8)$$

式中 $h_i^c(t)$ 为透射率 t 取不同值时,复原图像 $J^c(x)$ 等于像素值 i 时所占的概率。

4) 解决像素溢出问题

由(3)式可知,输入 $I^c(x)$ 与输出 $J^c(x)$ 之间为线性函数关系:斜率为 $1/t$ ($0 < t < 1$),且输入与横轴的交点为 $A^c(x)(1-t) > 0$,该值随 t 的减小而增加。

令透射率分别取 t_1 和 t_2 (设 $t_1 > t_2$),可得其对应的线性函数分别为 l_1 和 l_2 ,映射关系如图3所示。以 l_1 为例分析,可以看出,当输入 $I^c(x) \in [\alpha_1, \beta_1]$ 时,输出 $J^c(x) \in [0, 255]$; 当 $I^c(x) \notin [\alpha_1, \beta_1]$ 时,输出 $J^c(x) < 0$ 或 $J^c(x) > 255$,即发生像素溢出现象,导致复原图像信息丢失。因此,图像像素溢出与 t 有关,比较 l_1 与 l_2 可以发现, t 越小,输入图像的有效范围越小,溢出像素数量越多,信息丢失越严重。

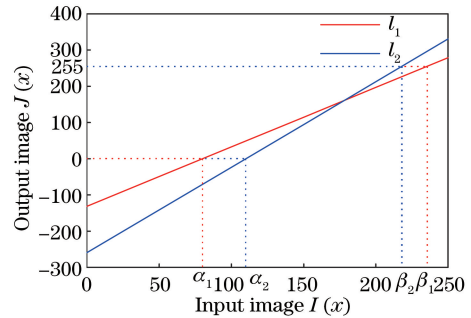


图3 输入图像与输出图像的映射关系

Fig. 3 Mapping relationship between input image and output image

图4为透射率取不同值时图像的去雾效果。可以看出,当透射率减小时,复原图像对比度和饱和度提高,但部分像素由于溢出 $[0, 255]$ 被截断,造成细节信息丢失(如房子周围)。

因此,在提高图像对比度的同时必须考虑像素溢出,本文定义像素溢出限制函数为

$$\delta^c(t) = \begin{cases} 1, & 0 \leq J^c(t) \leq 255 \\ -1, & \text{else} \end{cases}. \quad (9)$$

由(9)式可知,当复原图像的像素值位于 $[0, 255]$ 时,像素未溢出,此时令 $\delta^c(t) = 1$; 当像素值位于 $[0, 255]$ 之外时,像素溢出,造成信息丢失,此时令 $\delta^c(t) = -1$ 。基于 $\delta^c(t)$,可构建多特征联



图 4 不同透射率时图像去雾效果。(a)输入图像;(b) $t=0.1$;(c) $t=0.5$;(d) $t=0.9$

Fig. 4 Dehazed results based on different transmittances. (a) Input image; (b) $t=0.1$; (c) $t=0.5$; (d) $t=0.9$

合优化函数,在最大化目标函数时可以得到透射率的最优估计。

5) 多特征联合优化函数构建

由上述分析可知,估计透射率时,既要提高图像的对比度和饱和度,又要降低像素溢出,恢复更多细节信息。因此,引入(9)式定义的像素溢出限制函数 $\delta^c(t)$,并联合对比度、饱和度和信息熵等特征构建目标函数:

$$\max \sum_{i=\min J^c(x)}^{\max J^c(x)} \sum_{c \in (r,g,b)} \delta^c(t) f_c^c(t) f_s(t) \{-h_i^c(t) \lg [h_i^c(t)]\} \quad (10)$$

由(10)式可知,当图像对比度、饱和度和信息熵增大时,若复原图像位于有效范围 $[0,255]$,则 $\delta^c(t)=1$,表明该像素与图像视觉质量提高成正比,目标函数取值增大;若复原图像超出有效范围 $[0,255]$,则 $\delta^c(t)=-1$,表明该像素溢出导致信息丢失,从而目标函数值减小。因此,最大化目标函数

(10)式可提高复原图像视觉质量,同时减小信息损失,得到最优透射率估计。

6) 透射率求解与优化

本文求解透射率的步骤是:将输入图像分成多个不重叠的局部块,对每个子块单独处理,假设局部块内图像透射率相同,以 $\theta=0.01$ 为迭代步长,将透射率 t 从 $0.1 \sim 1$ 进行迭代,通过夜间去雾模型解出复原图像 $J^c(x)$ 和相关特征函数,并代入多特征联合优化函数(10)式,不断更新 t 值直到目标函数最大,得到该局部块初始透射率。

为避免初始透射率存在块效应,本文采用引导滤波^[19]对其进一步优化,如图5所示。图5(b)为由目标函数求出的初始透射率,图5(c)为引导滤波优化后的透射率,图5(d)为将优化后透射率与局部环境光代入(11)式求出的去雾后图像。可以看出,本文方法能有效去除夜间图像雾气,提高图像对比度。

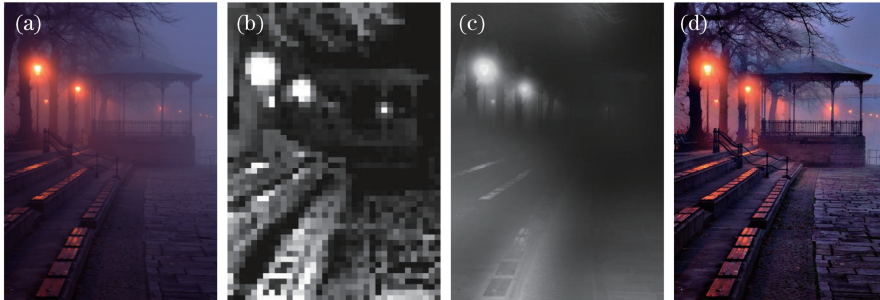


图 5 透射率估计与优化。(a)原始图像;(b)初始透射率;(c)优化透射率;(d)去雾后图像

Fig. 5 Estimation and optimization of transmittance. (a) Original image; (b) initial transmittance; (c) optimized transmittance; (d) dehazed image

3.3 图像复原

根据 3.1 节和 3.2 节求出的局部环境光 $A^c(x)$ 和透射率 $t(x)$,代入本文提出的夜间有雾图像成像模型即可得到去雾后图像 $J^c(x)$:

$$J^c(x) = \frac{I^c(x) - A^c(x)}{\min [t(x), t_0]} + A^c(x), \quad (11)$$

式中 t_0 取值为 0.1。

3.4 非重叠块局部 Shade of Gray 颜色校正

由于夜间图像受到有色光源干扰,需要对去雾后的图像进行颜色校正。常用的颜色恒常性算法如 Shade of Gray 算法^[21]、白平衡^[22]方法均假设图像受到均匀光照,没有考虑到夜间图像的非均匀光照特性。

由理想的朗博特模型^[21]可知,去雾后图像 $J(x)$ 可表示为

$$J(x) = \int_w e(\lambda)R(x, \lambda)\rho(\lambda)d\lambda, \quad (12)$$

式中 w 为整个可见光范围, λ 为光波长, $e(\lambda)$ 为光源的能量分布函数, $R(x, \lambda)$ 为在 x 处对某波段光的反射率, $\rho(\lambda)$ 为相机对光的感光特性。

Shade of Gray 算法^[21]假设场景反射分量的冈可夫斯基范数是无色差的,考虑到夜间图像光照不均匀特性,需要对图像进行局部化处理。若是对每个像素点求其局部块内的光源颜色,则计算时间复杂度过高,因此本文对图像进行非重叠分块,假设在局部块 ϕ 内各像素点色偏一致,得到局部 Shade of

Gray 算法。结合(12)式,可将局部光源颜色 e_ϕ 表示为

$$\left[\frac{\int_\phi J^k(x)dx}{\int_\phi dx} \right]^{\frac{1}{k}} = me_\phi, \quad (13)$$

式中 k 为 k 阶冈可夫斯基范数, $m \in [0, 1]$ 。

在局部块尺寸选择方面,考虑到若局部块尺寸过小,图像的平滑效果较差,细节信息可能丢失。若局部块尺寸过大,则局部光源颜色估计不准确,颜色校正效果不佳。因此,本文选择三个不同尺寸的局部块,依次为小、中、大,分别计算该局部块内的光源颜色,取其平均值作为最后的结果。

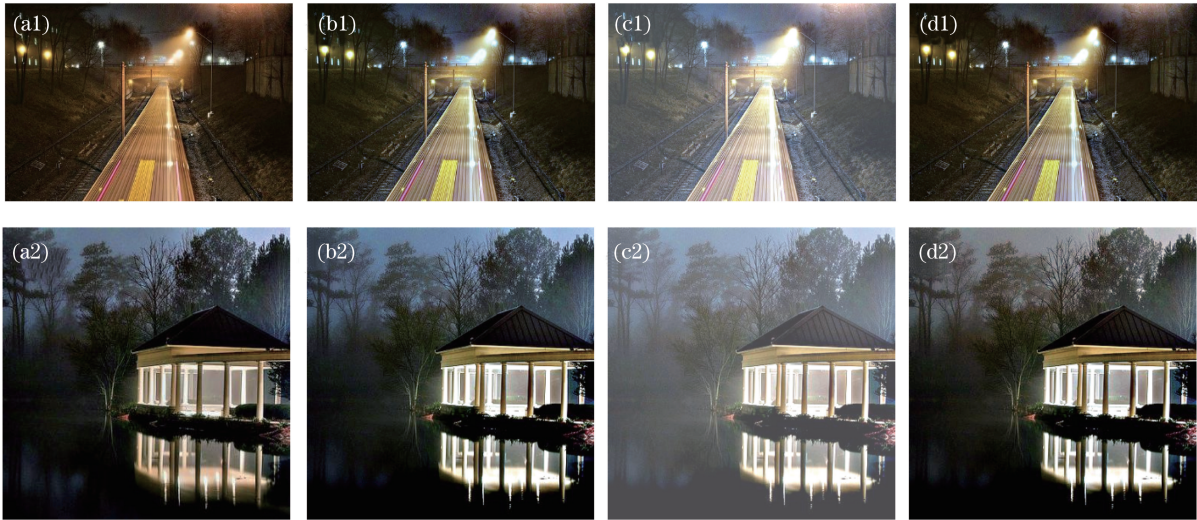


图6 不同方法对夜间图像颜色校正结果。(a1)(a2)原始图像;(b1)(b2) Shade of Gray^[20]算法;(c1)(c2)白平衡^[21]算法;(d1)(d2)本文算法校正后图像

Fig. 6 Color correction of nighttime image by different methods. (a1)(a2) Original images; (b1)(b2) corrected images by Shade of Gray^[20] method; (c1)(c2) corrected images by White balance^[21] method; (d1)(d2) corrected images by proposed method

图6为利用Shade of Gray算法、白平衡方法和本文算法对夜间图像颜色进行校正的结果图。可以看出,本文算法所得的光源颜色估计更加准确,在光源和天空区域颜色校正效果更为自然。

4 实验与结果分析

实验采用 Matlab R2016b 实现算法编程,PC 处理器为 3.4 GHz Intel(R) Core(TM) i7-6700, RAM 为 16 GB。估计环境光时,设置最小滤波窗口为 5×5 ,最大值窗口为 12×12 ;估计透射率时,将

图像划分为 10×10 的局部块;颜色校正过程中,三个非重叠块尺寸分别为 8×8 、 18×18 和 30×30 。

4.1 主观评价

为验证算法的有效性,首先将本文算法与基于图像增强的 Retinex 方法^[13]和直方图均衡化方法^[6]进行对比,实验结果如图7所示。其中,图7(d1)和(d2)是未经颜色校正步骤直接去雾后的图像。可以看出,直方图均衡化方法和 Retinex 方法虽然提高了图像对比度,但是去雾效果不明显,而本文算法对夜间图像去雾效果显著。



图 7 不同方法的去雾结果。(a1)(a2)输入夜间图像;(b1)(b2) Retinex 算法;(c1)(c2)直方图均衡化;(d1)(d2)本文算法
 Fig. 7 Dehazed results of different methods. (a1)(a2) Input nighttime images; (b1)(b2) results of Retinex method;
 (c1)(c2) results of histogram equalization method; (d1)(d2) results of proposed method

为进一步验证本文算法的性能,选取 4 幅典型的夜间有雾图像,如 Pavilion、Train、Building 和 Street,将本文算法与文献[7]方法、目前夜间去雾性能较好的文献[12]方法和文献[14]方法进行对比,实验结果如图 8~11 所示。可以看出,文献[7]方法对夜间图像去雾效果不明显,且去雾后图像整体亮度偏低;文献[12]方法去雾后,图像的亮度和细节方面均有改善,虽然在一定程度上去除了雾气影响,但是远景区域去雾不彻底,同时由于亮度过曝光导致复原图像光源附近细节模糊,部分场景信息丢失,且在天空区域噪声严重;文献

[14]方法对夜晚图像取得了较好的去雾效果,但由于过度抑制光晕,导致光源周围产生黑色伪影,造成图像细节丢失,且天空和部分光源区域色偏明显,颜色失真严重。相比之下,本文算法考虑到夜间图像的特点,采用低通滤波的方法求解夜间不均匀环境光,并构建多特征联合优化函数来估计透射率,更加适用于夜间有雾图像,所得到的复原图像去雾彻底、对比度较好,可以恢复出更多的细节信息,同时利用非局部 Shade of Gray 方法校正夜间图像非一致色偏,复原图像颜色自然,视觉效果较为理想,适用于更多的场景。



图 8 不同方法对 Pavilion 去雾结果。(a) Pavilion 图;(b)文献[7]算法;(c)文献[12]算法;(d)文献[14]算法;(e)本文算法
 Fig. 8 Dehazed results of different methods for Pavilion. (a) Pavilion image; (b) result of Ref. [7] method;
 (c) result of Ref. [12] method; (d) result of Ref. [14] method; (e) result of proposed method

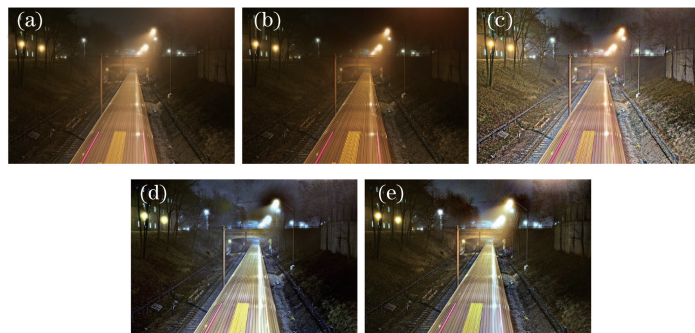


图 9 不同方法对 Train 去雾结果。(a) Train 图;(b)文献[7]算法;(c)文献[12]算法;(d)文献[14]算法;(e)本文算法
 Fig. 9 Dehazed resultsof different methods for Train. (a) Train image; (b) result of Ref. [7] method;
 (c) result of Ref. [12] method; (d) result of Ref. [14] method; (e) result of proposed method

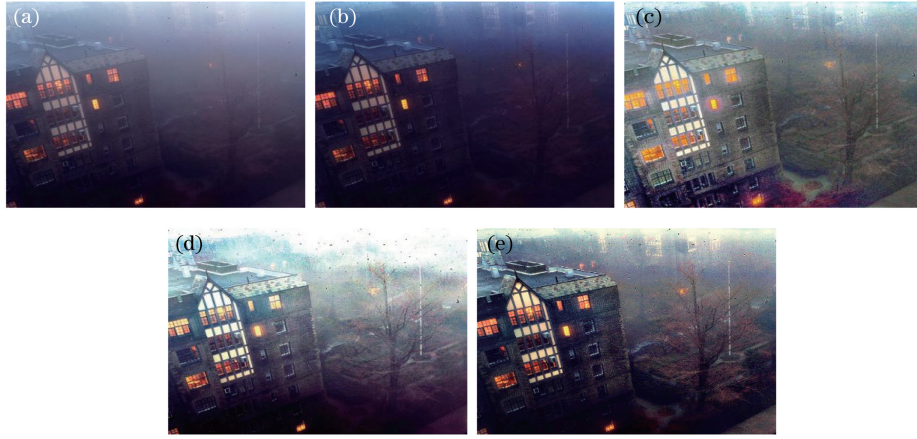


图 10 不同方法对 Building 去雾结果。(a) Building 图;(b)文献[7]算法;(c)文献[12]算法;(d)文献[14]算法;(e)本文算法
Fig. 10 Dehazed results of different methods for Building. (a) Building image; (b) result of Ref. [7] method;
(c) result of Ref. [12] method; (d) result of Ref. [14] method; (e) result of proposed method



图 11 不同方法对 Street 去雾结果。(a) Street 图;(b)文献[7]算法;(c)文献[12]算法;(d)文献[14]算法;(e)本文算法
Fig. 11 Dehazed results of different methods for Street. (a) Street image; (b) result of Ref. [7] method;
(c) result of Ref. [12] method; (d) result of Ref. [14] method; (e) result of proposed method

4.2 客观评价

为进一步验证本文算法的优势,计算并比较去雾后图像的对比度和色偏程度指标^[23]。对比度可以反映图像细节信息的丰富程度,计算图像在 Lab 空间中亮度分量 L 的对比度 C 来表示图像的细节信息, C 越大,图像的对比度越高:

$$C = \sqrt{\frac{1}{N} \left\{ \sum L^2(x) - \frac{1}{N} \left[\sum L(x) \right]^2 \right\}}, \quad (14)$$

式中 $L(x)$ 为像素点 x 处的亮度, N 为像素点的个数。

色偏程度与色度均值及其色度分布特性有关,采用文献[23]方法来计算图像的色偏程度 K , K 越大,图像色偏越严重:

$$K = \frac{100 \sqrt{\mu_a^2 + \mu_b^2}}{\sqrt{\sigma_a^2 + \sigma_b^2} \max\{|\min[(\sigma_L^2 - T_{th}), 1]|, 1\}}, \quad (15)$$

式中 μ_a 、 μ_b 分别为 Lab 空间中 a 、 b 分量的均值, σ_a 、 σ_b 分别为 a 、 b 的均方差, T_{th} 为阈值, σ_L 表示 L 的均方差。

表 1 为几种典型算法下,对 4 幅夜间图像处理后的各指标计算结果,粗黑体显示每组数据的最优值。可以看出,本文算法降低了图像的色偏,说明本文提出的非重叠块局部 Shade of Gray 算法可以有效校正夜间图像非一致色偏,去除图像颜色失真。同时图像的对比度指标较高,说明本文算法可以有效去除夜间图像的雾气,提高对比度,恢复更多的细节信息。

表 1 各方法相关指标对比

Table 1 Comparison of K/C of different methods

| Image | Ref. [7] method | | Ref. [12] method | | Ref. [14] method | | Proposed method | |
|----------|-----------------|-------|------------------|-------|------------------|-------|-----------------|--------------|
| | K | C | K | C | K | C | K | C |
| Pavilion | 1.35 | 21.21 | 1.29 | 19.42 | 1.45 | 37.41 | 1.32 | 41.98 |
| Train | 1.88 | 20.23 | 1.74 | 23.86 | 1.93 | 49.52 | 1.71 | 50.94 |
| Building | 2.67 | 19.74 | 1.61 | 21.23 | 1.76 | 46.29 | 1.50 | 51.86 |
| Street | 1.84 | 16.24 | 1.03 | 25.06 | 0.82 | 29.89 | 0.79 | 34.52 |

5 结 论

目前,雾天图像复原研究取得了显著的成果,但夜间图像成像环境比较复杂,光照不均且色偏严重,大多数方法并不适用于夜间场景,夜间图像去雾难度较大。深入分析了夜间有雾图像的特点,提出了利用低通滤波和多特征联合优化的夜间图像去雾新方法。基于低通滤波的局部环境光估计方法更适用于光照不均的夜间环境,复原图像颜色更为自然;基于图像的对比度、饱和度和信息熵等特征,构建多特征联合优化目标函数,将透射率估计转换为目标函数最优求解,同时还巧妙地解决了像素溢出问题,避免了使用暗原色先验等白天去雾假设;基于非重叠块局部 Shade of Gray 算法有效校正夜间图像非一致色偏。实验结果表明,本文算法对夜间图像去雾彻底,可恢复更多的细节信息,提高对比度,且复原图像颜色较为自然。需要指出的是,由于本文算法未考虑光源光晕影响,在强光源附近图像的细节有待进一步改善。

参 考 文 献

- [1] Wang W C, Yuan X H. Recent advances in image dehazing [J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2017, 4(3): 410-436.
- [2] Guo H, Xu X T, Li B. Study on image dehazing methods based on dark channel prior[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(4): 0410002.
郭翰, 徐晓婷, 李博. 基于暗原色先验的图像去雾方法研究[J]. 光学学报, 2018, 38(4): 0410002.
- [3] Narasimhan S G, Nayar S K. Vision and the atmosphere[J]. International Journal of Computer Vision, 2002, 48(3): 233-254.
- [4] Liu H B, Yang J, Wu Z P, *et al.* A fast single image dehazing method based on dark channel prior and Retinex theory[J]. Acta Automatica Sinica, 2015, 41(7): 1264-1273.
- [5] Li H, Xie W H, Wang X G, *et al.* GPU implementation of multi-scale Retinex image enhancement algorithm [C] // Proceedings of IEEE/ACS 13th International Conference of Computer Systems and Applications, 2016: 1-5.
- [6] Lai Y R, Tsai P C, Yao C Y, *et al.* Improved local histogram equalization with gradient-based weighting process for edge preservation[J]. Multimedia Tools and Applications, 2017, 76(1): 1585-1613.
- [7] 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.
- [8] Berman D, Treibitz T, Avidan S. Non-local image dehazing[C] // Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2016: 1674-1682.
- [9] Liu K, Bi D Y, Wang S P, *et al.* Single image dehazing based on sparse feature extraction[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(3): 0310001.
刘坤, 毕笃彦, 王世平, 等. 基于稀疏特征提取的单幅图像去雾[J]. 光学学报, 2018, 38(3): 0310001.
- [10] Dong Y Y, Bi D Y, He L Y, *et al.* Single image dehazing algorithm based on non-local prior[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(11): 1110001.
董亚运, 毕笃彦, 何林远, 等. 基于非局部先验的单幅图像去雾算法[J]. 光学学报, 2017, 37(11): 1110001.
- [11] Pei S C, Lee T Y. Nighttime haze removal using color transfer pre-processing and dark channel prior[C] // Proceedings of 19th IEEE International Conference on Image Processing, 2012: 957-960.
- [12] Zhang J, Cao Y, Wang Z. Nighttime haze removal with illumination correction[J]. ARX-IV, 2016: 1-14.
- [13] Elad M. Retinex by two bilateral filters [C] // International Conference on Scale-Space Theories in Computer Vision, 2005: 217-229.
- [14] Li Y, Tan R T, Brown M S. Nighttime haze removal with glow and multiple light colors[C] // Proceedings of IEEE International Conference on Computer Vision, 2015: 226-234.
- [15] Yang A P, Bai H H. Nighttime image defogging based on the theory of Retinex and dark channel prior[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(4): 041002.

- 杨爱萍, 白煌煌. 基于 Retinex 理论和暗通道先验的夜间图像去雾算法[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(4): 041002.
- [16] Meng G, Wang Y, Duan J, *et al.* Efficient image dehazing with boundary constraint and contextual regularization[C] // Proceedings of IEEE International Conference on Computer Vision, 2013: 617-624.
- [17] Fattal R. Dehazing using color-lines [J]. ACM Transactions on Graphics, 2014, 34(1): 1-14.
- [18] Tan R T. Visibility in bad weather from a single image [C] // Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2008: 1-8.
- [19] Dai S B, Xu W, Piao Y J, *et al.* Remote sensing image defogging based on dark channel prior [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(3): 0328002. 代书博, 徐伟, 朴永杰, 等. 基于暗原色先验的遥感图像去雾方法 [J]. 光学学报, 2017, 37(3): 0328002.
- [20] He K M, Sun J, Tang X O. Guided image filtering [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2013, 35(6): 1397-1409.
- [21] Finlayson G D, Trezzi E. Shades of gray and color constancy [C] // Proceedings of 12th Color Imaging Conference, 2004: 37-41.
- [22] Fu X Y, Zhuang P X, Huang Y, *et al.* A retinex-based enhancing approach for single underwater image [C] // Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing, 2015: 4572-4576.
- [23] Li F, Wu J Y, Wang Y K, *et al.* A color cast detection algorithm of robust performance [C] // Proceedings of IEEE 5th International Conference on Advanced Computational Intelligence, 2012: 662-664.