

# 基于结构-纹理分层的夜间图像去雾算法

杨爱萍, 王南\*

天津大学电气自动化与信息工程学院, 天津 300072

**摘要** 夜间图像光照不均匀, 存在色偏, 去雾难度较大。目前图像去雾算法主要针对白天场景, 有关夜间图像去雾算法的研究较少。基于结构-纹理分层模型提出新的夜间图像去雾算法, 将夜间有雾图像分解为结构层和纹理层。在结构层采用中值滤波器估计环境光, 利用加权范数  $L_1$  正则化模型对其进行优化, 并进行去雾和颜色校正处理; 在纹理层利用离散余弦变换系数估计透射率。最终融合纹理层与去雾后的结构层得到去雾图像。实验结果表明, 采用该算法对夜间图像去雾后图像细节清晰, 颜色自然, 去雾效果显著。

**关键词** 图像处理; 夜间图像去雾; 结构-纹理分层; 加权范数  $L_1$  正则化模型; 离散余弦变换系数

中图分类号 TP751.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.061001

## Nighttime Image Dehazing Algorithm by Structure-Texture Image Decomposition

Yang Aiping, Wang Nan

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

**Abstract** The non-uniform illumination and color deviation lead to the difficulty in haze removal for nighttime image. The current image dehazing methods are mostly designed for daytime images. There are few studies on nighttime image dehazing. Therefore, we propose a new nighttime image dehazing method based on the structure-texture image decomposition model. Firstly, the haze image is divided into a structure layer and a texture layer. Secondly, to estimate and then optimize the initial atmospheric light, the median filter and the weighted norm  $L_1$  regularization model are introduced in the structure layer. After that, dehazing and color correction are performed. Thirdly, the transmittance is estimated with discrete cosine transform coefficients in the texture layer. Finally, the ultimate haze-free image is recomposed with the texture layer and the haze-free structure layer. The experimental results show that the proposed algorithm is effective in the nighttime haze image processing, generating haze-free images with clear details and natural colors.

**Key words** image processing; nighttime image dehazing; structure-texture image decomposition; weighted norm  $L_1$  regularization model; discrete cosine transform coefficients

**OCIS codes** 100.2000; 100.2980; 150.1135

## 1 引言

在雾、霾天气条件下, 大气中悬浮微粒的散射作用使户外采集图像对比度降低, 图像质量下降, 严重影响了道路监控、环境监测、目标识别等户外计算机视觉系统的应用<sup>[1]</sup>。近年来, 白天图像去雾受到众多国内外学者的关注, 而关于夜间图像去雾的研究

还比较欠缺。夜间图像受人工光照因素等影响, 去雾问题更具挑战性。

现有单幅图像去雾算法大多针对白天场景, 根据其是否依赖于物理模型可分为两类: 一类是基于图像增强的非物理模型方法, 如 Retinex 算法<sup>[2-3]</sup>、直方图均衡化<sup>[4]</sup>和同态滤波算法<sup>[5]</sup>; 另一类是基于物理模型<sup>[6]</sup>的图像复原方法。基于物理模型的去雾

收稿日期: 2017-11-10; 收到修改稿日期: 2017-11-29

基金项目: 国家自然科学基金(61472274)

作者简介: 杨爱萍(1977—), 女, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事视觉计算、压缩感知理论和应用方面的研究。

E-mail: yangaiping@tju.edu.cn

\* 通信联系人。E-mail: 18363127951@163.com

算法稳健性更强,因此受到广泛关注。Tan 等<sup>[7]</sup>根据统计规律,认为无雾图像相对于有雾图像对比度更高,提出最大化局部对比度的图像去雾算法。Fattal 等<sup>[8]</sup>提出场景反射率与场景表面阴影局部不相关的先验信息,使用独立分量分析方法估计透射率。Tarel 等<sup>[9]</sup>根据图像最小值通道的特性,提出基于中值滤波估计大气光项的去雾算法。He 等<sup>[10]</sup>通过对大量户外无雾图像进行特征统计,提出了基于暗通道先验的去雾算法,该算法适用性强且去雾效果显著,是很多去雾算法的理论基础<sup>[11-12]</sup>。上述算法对白天图像有较好的去雾效果,但不适用于夜间图像。

当前,针对夜间图像去雾算法的研究较少。Zhang 等<sup>[13]</sup>通过图像增强与颜色校正,将夜间有雾图像转化为白天有雾图像再进行去雾;Li 等<sup>[14]</sup>根据雾天光源光晕成像原理求解光源光晕层,再对光源光晕去除后的图像去雾;Ancuti 等<sup>[15]</sup>提出基于多尺度融合的图像去雾算法。这些方法对夜间图像均取得了不错的去雾效果,但均采用暗通道先验估计透射率,导致透射率估计不准确。此外,这些算法大多采用局部最大值<sup>[13-14]</sup>方法估计环境光,并没有考虑夜间图像环境光的特点,因此对环境光的估计不准确。为此,本文提出适用于夜间图像的环境光和透射率估计方法。一幅图像由结构信息和纹理细节组成,其中纹理细节在图像中所占比例很小<sup>[16]</sup>。对于夜间图像,去雾过程造成的纹理细节丢失更为严重,因此,夜间图像去雾后的细节保持尤为重要。本文基于文献<sup>[16]</sup>将有雾图像分解为结构层和纹理层的思想,保留纹理层信息,对结构层进行去雾。在去雾过程中,根据夜间有雾图像的特点,提出基于中值滤波和加权范数  $L_1$  正则化模型的环境光估计方法以及基于离散余弦变换(DCT)系数的透射率估计方法。实验结果表明,本文方法可有效实现夜间图像去雾,并能较好地保留图像的细节特征。

## 2 基于结构-纹理分层的图像去雾算法

### 2.1 图像分解模型

有雾图像可分解为表征物体主要结构的结构层  $I_S$  和表征图像细节的纹理层  $I_T$ <sup>[16-17]</sup>:

$$I = I_S + I_T. \quad (1)$$

根据全变差(TV)正则化模型可提取图像的结构层:

$$\min_{I_S} \sum_x (I_{Sx} - I_x)^2 + \beta |\nabla(I_{Sx})|, \quad (2)$$

$$\sum_x |\nabla(I_{Sx})| = \sum_x (|\partial_h I_{Sx}| + |\partial_v I_{Sx}|), \quad (3)$$

式中  $x$  表示图像任意像素点的位置, $\beta$  是正则化系数, $\nabla$ 表示梯度, $\partial_h$ 和 $\partial_v$ 分别表示水平和垂直方向差分。求解(2)式模型可分解出结构层  $I_S$ ,将其代入(1)式可求出纹理层。将有雾图像进行分解,仅对结构层去雾有利于保持图像的细节特征。

### 2.2 结构层去雾与图像融合

Narasimhan 等<sup>[6]</sup>提出的雾天图像成像模型广泛应用于图像去雾领域:

$$I_x^c = J_x^c t_x + A^c (1 - t_x), \quad (4)$$

式中  $c \in \{r, g, b\}$  表示图像的颜色通道, $I_x^c$  表示成像设备采集的有雾图像, $J_x^c$  表示场景反射光, $A^c$  为常数,表示环境光, $t_x$  表示场景透射率。图像去雾便是根据(4)式,由  $I_x^c$  求解  $J_x^c$  的过程:

$$J_x^c = \frac{I_x^c}{t_x} + A^c \left(1 - \frac{1}{t_x}\right). \quad (5)$$

对结构层去雾后,需要将纹理层和结构层融合才能得到最终无雾图像。图像去雾不是线性过程,因此不能将处理后的结构层和纹理层简单叠加。将(5)式去雾过程表示为算子  $f(\cdot)$ ,则  $f(I_x) = f(I_{Sx} + I_{Tx})$ 。由于纹理层  $I_T$  在有雾原图中所占比例远小于结构层,根据泰勒方程可得

$$J_x = f(I_x) = f(I_{Sx} + I_{Tx}) \approx f(I_{Sx}) + f(I_{Sx})' I_{Tx} = J_{Sx} + \frac{1}{t_x} \cdot I_{Tx}, \quad (6)$$

式中  $J_S$  表示去雾后结构层, $f(\cdot)'$  表示算子  $f(\cdot)$  的一阶导数。根据(6)式可将纹理层  $I_T$  与去雾后结构层  $J_S$  融合为最终的无雾图像  $J$ 。

## 3 本文算法

本文在图像分解理论的基础上,提出适用于夜间图像的去雾算法。算法流程如图1所示。主要包含以下步骤:1) 将有雾图像分解为结构层和纹理层;2) 在结构层利用中值滤波和加权  $L_1$  正则化估计环境光;3) 在纹理层基于 DCT 系数估计透射率;4) 对结构层去雾,并进行颜色校正;5) 将纹理层和去雾后的结构层融合作为最终的去雾图像。各流程步骤对应结果如图2所示。

### 3.1 夜间图像去雾模型

根据 Retinex 理论<sup>[2-3]</sup>,场景反射光等于场景表面入射光与反照率的乘积:

$$J_x^c = L_x^c R_x^c, \quad (7)$$

式中  $L_x^c$  和  $R_x^c$  分别表示场景表面入射光和反照率。白天场景的光源为太阳光,光照充足且均匀;夜间场景的光源主要为人工光源,环境光是随  $x$  变化的变

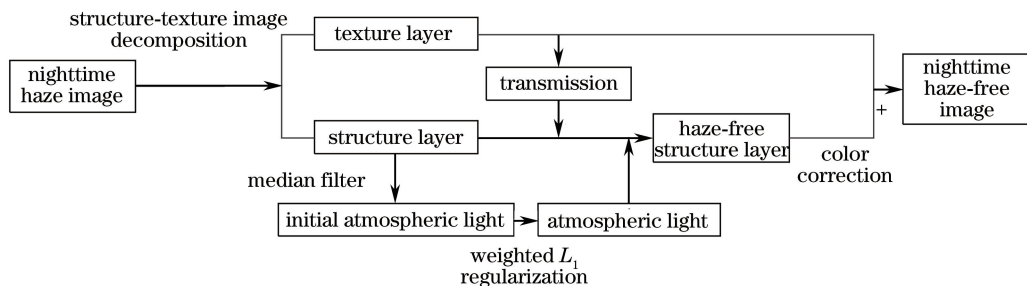


图1 本文算法流程图

Fig. 1 Dehazing process of nighttime haze image in the proposed algorithm

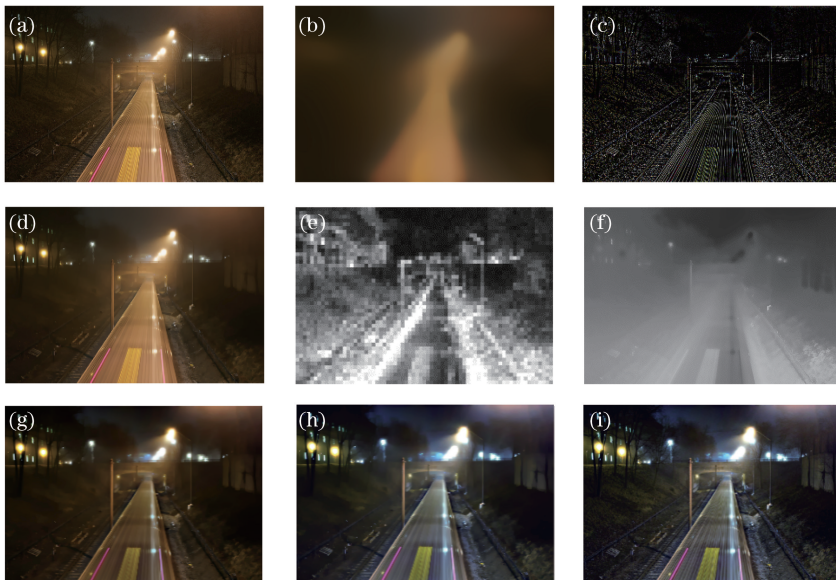


图2 本文算法各步骤结果。(a)夜间有雾图像;(b)环境光;(c)纹理层;(d)结构层;(e)初始透射率;(f)透射率;(g)无雾结构图;(h)无雾结构图颜色校正;(i)最终结果

Fig. 2 Results of steps in the proposed method. (a) Nighttime haze image; (b) atmospheric light; (c) texture layer; (d) structure layer; (e) initial transmission; (f) transmission; (g) haze-free structure layer; (h) haze-free structure layer after color correction; (i) final result

量,将其表示为  $A_x^c$ 。对于一般的夜间场景,可认为  $A_x^c$  等于  $L_x^c$ 。因此,将(7)式代入(4)式可得夜间有雾图像的成像模型:

$$I_x^c = L_x^c R_x^c t_x + A_x^c (1 - t_x) = A_x^c R_x^c t_x + A_x^c (1 - t_x), \quad (8)$$

式中  $A_x^c R_x^c$  为场景反射光,即无雾图像  $J_x^c$ 。对环境光  $A_x^c$  和透射率  $t_x$  进行估计,便可通过该模型求解夜间无雾图像。

### 3.2 环境光估计与优化

由文献[18]可知,(8)式可看作入射图  $A_x^c$  与有雾反照图  $R_x^c t_x + 1 \times (1 - t_x)$  的乘积。根据 Retinex 理论,可采用多尺度高斯滤波(MSR)<sup>[22]</sup>方法对有雾图像进行处理得到入射图,即环境光估计值  $A_x^c$ 。该方法能有效估计白天图像的入射光信息,但不适

用于夜间图像。

夜晚场景的主要光源为路灯、车灯等人造光源,人造光源的辐射强度具有平滑衰减的特点。此外,人造光源本身具有一定形状,且物体遮挡等因素使光源辐射强度发生突变,因此夜间图像环境光具有平滑变化、部分区域存在突变等特点,如图3(a)所示。采用 MSR 方法估计环境光会使环境光所包含的突变信息丢失,不能准确估计环境光。中值滤波器在实现平滑滤波的同时,能较好地保持边缘信息,因此利用中值滤波器分别对有雾图像的 r, g, b 三通道图进行处理以估计环境光:

$$\hat{A}_x^c = \text{med}_d(I_x^c), \quad (9)$$

式中  $\hat{A}_x^c$  为环境光初始估计值,  $\text{med}(\cdot)$  表示中值滤波处理,  $d$  表示滤波窗口直径。由图3(b)可以看



图3 (a)夜间有雾图像;(b)初始环境光;(c)优化环境光

Fig. 3 (a) Nighttime haze image; (b) initial atmospheric light; (c) optimized atmospheric light

出,中值滤波器有效保留了环境光的突变信息。

中值滤波器有良好的边缘保持特性,但其平滑特性一般,求得的环境光存在块效应。因此,本文利用加权  $L_1$  正则化模型对环境光进行优化:

$$\operatorname{argmin}_{A^c} \frac{\lambda}{2} \|A^c - \hat{A}^c\|_2^2 + \sum_{i=1}^9 \|W_i^c \cdot D_i \otimes A^c\|_1, \quad (10)$$

式中第一项为保真项, $\lambda$  为正则化参数;第二项为加权  $L_1$  正则化约束项,实现保边平滑效果; $\cdot$  表示像素点乘; $\otimes$  表示像素卷积; $D_i$  为滤波算子,包括 8 个 Kirsch 算子和 1 个拉普拉斯算子<sup>[19]</sup>;  $W_i$  是权值函数,

$$W_i = \exp[-|(D_i \otimes I_L)|^2 / 2\sigma_w^2], \quad (11)$$

式中  $I_L$  为有雾图像的亮度图,是有雾原图 Lab 空间的亮度通道; $\sigma_w = 0.3$ 。图像 Lab 空间的亮度通道能反映图像的亮度信息,因此,根据亮度图  $I_L$  对正则项加权约束。当  $I_L$  空域平滑时, $W_i$  值较大,约束项起到对  $A^c$  的平滑约束作用;当  $I_L$  存在突变时, $W_i \approx 0$ ,此时约束项不发挥作用, $A^c$  保留环境光初始估计值的边缘信息。环境光优化结果如图 3(c) 所示,可以看出该方法能有效估计夜间图像的环境光,在保留环境光突变信息的同时取得了较好的平滑效果。采用该方法估计图 2(a) 有雾图像的环境光,结果如图 2(b) 所示。

### 3.3 透射率估计与优化

#### 3.3.1 透射率估计

当前的夜间图像去雾算法均采用暗通道先验方法估计透射率,然而暗通道先验并不适用于夜间图像,主要原因如下:1) 夜间图像光照不均匀,光照不足的区域无论是否有雾,暗通道值均较小;2) 夜间图像普遍存在色偏,暗通道值偏小。因此本文根据图像细节丰富程度来估计透射率。随着场景透射率降低,图像对比度降低,细节信息逐渐弱化<sup>[7]</sup>;由图 2(c) 也可以得出相似结论,纹理层的信息随景深增大而逐渐弱化。因此纹理层信息的丰富程度是估计

雾浓度的有效指标。

DCT 系数作为衡量图像对比度的指标已经应用于图像处理领域,Fang 等<sup>[20]</sup> 提出基于 DCT 系数的图像显著区域检测算法,Tang 等<sup>[21]</sup> 提出基于 DCT 系数衡量对比度的压缩域图像增强算法,Tang<sup>[22]</sup> 提出基于 DCT 系数估计局部对比度的 DCT 域图像融合算法。纹理层信息主要为高频信息,因此 DCT 系数中的中、高频成分能反映图像纹理层的细节丰富程度。本文采用分块图像 DCT 系数衡量纹理层的细节丰富程度,从而估计透射率。

将纹理图分为  $8 \times 8$  的图像块,对每个图像块进行 DCT 变换均可得到一个  $8 \times 8$  系数矩阵。根据该 DCT 系数矩阵计算初始透射率的方法为

$$\hat{t}_x = \sum_{a,b} (\mathbf{T}_x)_{a,b}^2 - (\mathbf{T}_x)_{1,1}^2 - (\mathbf{T}_x)_{1,2}^2 - (\mathbf{T}_x)_{2,1}^2, \quad (12)$$

式中  $x$  表示图像块的中心像素点, $\mathbf{T}_x$  表示中心点  $x$  所在图像块的系数矩阵, $a$  和  $b$  共同表示系数矩阵中各系数的位置。由于细节信息的丰富程度主要体现在  $\mathbf{T}_x$  中的高频系数,因此将  $(\mathbf{T}_x)_{1,1}$ ,  $(\mathbf{T}_x)_{2,1}$ ,  $(\mathbf{T}_x)_{1,2}$  以外的所有 DCT 系数的平方和作为  $x$  点透射率估计值。由于透射率所在区间为  $(0, 1]$ ,对上述  $\hat{t}_x$  进行归一化处理。

采用暗通道先验和本文方法估计夜间有雾图像的透射率,结果如图 4 所示。可以看出,通过暗通道先验方法求得的透射率过高;本文方法求得的透射率较为准确,随景深增大透射率逐渐降低,无穷远处透射率接近于零。

#### 3.3.2 透射率优化

通过(12)式可对每个  $8 \times 8$  图像块求出一个透射率值,求得的透射率图存在块效应,如图 2(e) 所示。因此,本文利用引导滤波器<sup>[23]</sup> 对初始透射率进行优化。

假定引导图像  $G$  和滤波器输出  $q$  之间存在局部线性关系,则

$$q_i = a_k G_i + b_k, \quad \forall i \in \omega_k, \quad (13)$$

式中  $\omega_k$  是以像素点  $i$  为中心的邻域, $q_i$  是邻域  $\omega_k$

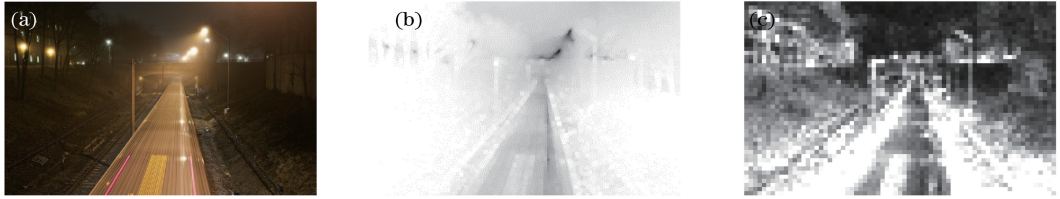


图 4 (a) 夜间有雾图像; (b) 暗通道先验透射率; (c) 本文方法透射率

Fig. 4 (a) Nighttime haze image; (b) transmittance obtained by dark channel priori; (c) transmittance obtained by the proposed method

的局部输出图像,  $a_k$  和  $b_k$  是局部线性系数, 其值在邻域  $\omega_k$  内恒定。根据输入图像  $p$  可求出线性系数:

$$a_k = \frac{1}{|\omega|} \sum_{i \in \omega_k} (G_i p_i - u_k \bar{p}_k) / (\sigma_k^2 + \epsilon), \quad (14)$$

$$b_k = \bar{p}_k - a_k u_k, \quad (15)$$

式中  $u_k$  和  $\sigma_k$  分别为引导图像  $G$  在邻域  $\omega_k$  内的均值和方差,  $\bar{p}_k$  为输入图像  $p$  在邻域  $\omega_k$  内的均值,  $|\omega|$  表示邻域内像素点个数,  $\epsilon$  是防止  $a_k$  过大引入的调节因子。为解决像素点  $i$  在不同邻域内的输出值不同的问题, 将

$$q_i = \bar{a}_i G_i + \bar{b}_i, \quad (16)$$

作为最终的引导滤波方程, 式中  $\bar{a}_i = 1/|\omega| \sum_{i/k \in \omega_i} a_k$ ,

$\bar{b}_i = 1/|\omega| \sum_{i/k \in \omega_i} b_k$ ,  $\omega_i$  是以  $k$  为中心的邻域。对初始透射率进行引导滤波优化, 结果如图 2(f) 所示。

### 3.4 去雾与颜色校正

根据得到的环境光  $A_x^c$  和透射率  $t_x$ , 对结构层去雾:

$$\hat{J}_{S_r}^c = \frac{I_{S_r}^c - A_x^c(1 - t_x)}{t_x}, \quad (17)$$

式中  $\hat{J}_s$  是有色偏的无雾结构图, 如图 2(g) 所示。



图 5 (a) 夜间有雾图像; (b) 文献[4]算法结果; (c) 文献[10]算法结果; (d) 文献[13]算法结果; (e) 文献[14]算法结果; (f) 本文算法结果

Fig. 5 (a) Nighttime haze image; (b) result of algorithm in Ref. [4]; (c) result of algorithm in Ref. [10]; (d) result of algorithm in Ref. [13]; (e) result of algorithm in Ref. [14]; (f) result of the proposed algorithm

夜间图像普遍存在色偏, 为了进一步改善夜间图像去雾效果, 基于直方图规范化<sup>[24]</sup>对去雾后结构图进行颜色校正。具体步骤为: 1) 求色偏图像  $\hat{J}_s$  三通道的直方图; 2) 分别计算 r, g, b 三通道直方图的均值; 3) 取三通道均值之中值对应通道图像为标准图像; 4) 以标准图像的直方图作为标准, 对另外两个通道进行直方图规范化。颜色校正结果如图 2(h) 所示。最后, 将结构层去雾结果与纹理层融合得到最终去雾图像, 如图 2(i) 所示。

## 4 实验与结果分析

在 MATLAB 2016b 中进行算法编程, 处理器为 3.4 GHz Intel(R) Core(TM) i7-6700。实验过程中, 中值滤波窗口直径  $d = 0.04 \times \min(w, h)$ ,  $w$  和  $h$  分别表示有雾图像的长和宽。正则化系数  $\beta = 0.03$ ,  $\lambda = 1$ 。引导滤波中窗口半径为  $0.02 \times \min(w, h)$ , 调节因子为  $\exp(-4)$ 。参数设定值通过多次实验取得, 在上述参数值的基础上进行微调对实验结果影响不大。

为验证本文算法有效性, 将本文去雾结果与经典的图像去雾算法进行比较, 包括直方图均衡化<sup>[4]</sup>、He 算法<sup>[10]</sup>、Zhang 算法<sup>[13]</sup>和 Li 算法<sup>[14]</sup>, 结果如图 5 所示。

可以看出直方图均衡化和 He 算法均不适用于夜间图像, Zhang 算法、Li 算法和本文算法均能取得较好的去雾效果, 相比之下本文算法去雾更彻底, 复原结果颜色真实, 场景深度层次分明。

分别采用文献[13]算法、文献[14]算法和本文算法对不同雾浓度的雾、霾图像进行去雾处理。对夜间薄雾图像的处理结果如图 6 所示。可以看出, 文献[9]算法处理结果存在明显的噪声; 文献[14]算法处理后图像存在色偏, 整体色调不一致; 本文算法处理结果噪声较小, 颜色真实。

对中等雾浓度的夜间图像进行去雾处理, 结果如图 7 和图 8 所示。可以看出, 文献[13]算法去雾结果存在色偏, 且存在较严重的噪声; 文献[14]算法对应的图 7(c)中树叶部分细节信息丢失, 图 8(c)存

在色偏和噪声; 本文算法较好地复原了图像细节信息, 复原图像颜色真实, 细节清晰, 噪声较小。

夜间浓雾图像的去雾结果如图 9 所示。可以看出, 文献[13]算法去雾结果存在严重失真; 文献[14]算法去雾结果与本文算法相似, 但车灯周围产生了黑色暗影, 且未能有效恢复远景区域的景物; 本文算法有效复原了浓雾条件下的夜间图像, 复原结果真实自然, 远景区域的树木轮廓清晰可见。总之, 本文算法对不同雾浓度的夜间图像均有较好的去雾效果。

采用对比度  $C_r$ <sup>[25]</sup> 和细节清晰度  $D_i$ <sup>[26]</sup> 对图 6~9 中各算法结果进行客观评价, 如表 1 所示。可以看出, 本文算法复原结果的对比度和细节清晰度均较高, 说明本文算法能有效保持夜间图像的细节信息, 获得对比度高的清晰无雾图像。

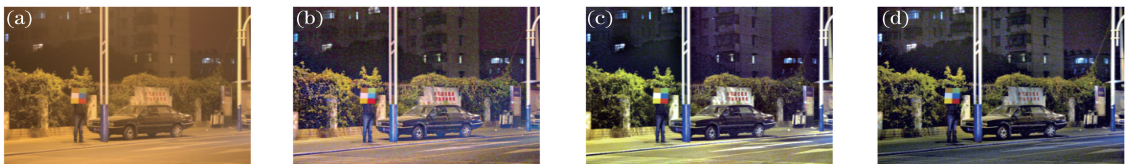


图 6 (a)夜间有雾图像;(b)文献[13]算法结果;(c)文献[14]算法结果;(d)本文算法结果

Fig. 6 (a) Nighttime haze image; (b) result of algorithm in Ref. [13];  
(c) result of algorithm in Ref. [14]; (d) result of the proposed algorithm



图 7 (a)夜间有雾图像;(b)文献[13]算法结果;(c)文献[14]算法结果;(d)本文算法结果

Fig. 7 (a) Nighttime haze image; (b) result of algorithm in Ref. [13];  
(c) result of algorithm in Ref. [14]; (d) result of the proposed algorithm



图 8 (a)夜间有雾图像;(b)文献[13]算法结果;(c)文献[14]算法结果;(d)本文算法结果

Fig. 8 (a) Nighttime haze image; (b) result of algorithm in Ref. [13];  
(c) result of algorithm in Ref. [14]; (d) result of the proposed algorithm

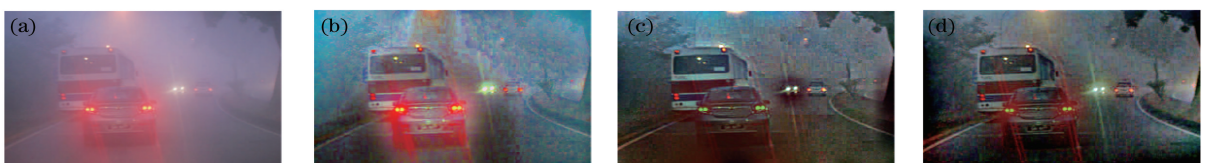


图 9 (a)夜间有雾图像;(b)文献[13]算法结果;(c)文献[14]算法结果;(d)本文算法结果

Fig. 9 (a) Nighttime haze image; (b) result of algorithm in Ref. [13];  
(c) result of algorithm in Ref. [14]; (d) result of the proposed algorithm

表1 图6~9的客观评价结果

Table 1 Evaluation of the results in Figs. 6-9

| Index | Algorithm    | Fig. 6 | Fig. 7 | Fig. 8 | Fig. 9 |
|-------|--------------|--------|--------|--------|--------|
| $C_r$ | In Ref. [13] | 19.42  | 25.06  | 18.77  | 12.91  |
|       | In Ref. [14] | 22.82  | 29.90  | 28.08  | 20.28  |
|       | Proposed     | 45.76  | 35.23  | 38.05  | 39.89  |
| $D_i$ | In Ref. [13] | 0.07   | 0.24   | 0.39   | 0.45   |
|       | In Ref. [14] | 0.18   | 0.25   | 0.40   | 0.35   |
|       | Proposed     | 0.28   | 0.39   | 0.39   | 0.54   |

## 5 结 论

基于结构-纹理分层模型将有雾图像分为结构层和纹理层,并提出相应的夜间图像去雾算法。在去雾过程中,提出基于中值滤波和加权  $L_1$  正则化模型估计环境光;根据纹理层 DCT 系数估计透射率,基于直方图规定化对去雾后的图像进行颜色校正。实验结果表明,本文算法适用性强,对各种雾浓度的夜间图像均有较好的去雾效果,复原图像具有对比度高、细节清晰、视觉效果自然等特点。

## 参 考 文 献

- [1] Li Y M, Ren T T. Image enhancement method based on car secondary safety system in smog days [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(4): 041003.  
李雅梅, 任婷婷. 雾霾天车载辅助安全系统图像增强方法的研究 [J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(4): 041003.
- [2] 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.
- [3] Li H, Xie W H, Wang X G, *et al.* GPU implementation of multi-scale Retinex image enhancement algorithm [C]. *IEEE/ACS International Conference of Computer Systems and Applications*, 2016: 16949127.
- [4] 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.
- [5] Seow M J, Asari V K. Ratio rule and homomorphic filter for enhancement of digital colour image [J]. *Neurocomputing*, 2006, 69(7): 954-958.
- [6] Narasimhan S G, Nayar S K. Vision and the atmosphere [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2002, 48(3): 233-254.
- [7] Tan R T. Visibility in bad weather from a single image [C]. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2008: 10139948.
- [8] Fattal R. Single image dehazing [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2008, 27(3): 72.
- [9] Tarel J P, Hautière N. Fast visibility restoration from a single color or gray level image [C]. *IEEE International Conference on Computer Vision*, 2009: 2201-2208.
- [10] 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.
- [11] Park D, Han D K, Ko H. Single image haze removal with WLS-based edge-preserving smoothing filter [C]. *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*, 2013: 2469-2473.
- [12] 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.
- [13] Zhang J, Cao Y, Wang Z F. Nighttime haze removal based on a new imaging model [C]. *IEEE International Conference on Image Processing*, 2014: 14884672.
- [14] Li Y, Tan R T, Brown M S. Nighttime haze removal with glow and multiple light colors [C]. *IEEE International Conference on Computer Vision*, 2015: 15801609.
- [15] Ancuti C, Ancuti C O, Vleeschouwer C D, *et al.* Night-time dehazing by fusion [C]. *IEEE International Conference on Image Processing*, 2016: 16521507.
- [16] Xu L, Yan Q, Xia Y, *et al.* Structure extraction from texture via relative total variation [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2012, 31(6): 139.
- [17] Li Y, Guo F, Tan R T, *et al.* A contrast enhancement framework with JPEG artifacts suppression [C] // *Computer Vision-ECCV 2014*, 2014, 8690: 174-188.
- [18] 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.
- [19] Meng G F, Wang Y, Duan J Y, *et al.* Efficient image dehazing with boundary constraint and contextual regularization [C]. IEEE International Conference on Computer Vision, 2014: 1414-1484.
- [20] Fang Y M, Chen Z, Lin W S, *et al.* Saliency detection in the compressed domain for adaptive image retargeting [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2012, 21(9): 3888-3901.
- [21] Tang J, Kim J, Peli E. Image enhancement in the JPEG domain for people with vision impairment [J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2004, 51(11): 2013-2023.
- [22] Tang J. A contrast based image fusion technique in the DCT domain [J]. Digital Signal Processing, 2004, 14(3): 218-226.
- [23] 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.
- [24] Shen D G. Image registration by local histogram matching [J]. Pattern Recognition, 2007, 40(4): 1161-1172.
- [25] Li F, Wu J Y, Wang Y K, *et al.* A color cast detection algorithm of robust performance [C]. IEEE 5<sup>th</sup> International Conference on Advanced Computational Intelligence, 2012: 1332-1340.
- [26] Li D P, Yu J, Xiao C B. No-reference quality assessment method for defogged images [J]. Journal of Image and Graphics, 2011, 16(9): 1753-1757.  
李大鹏, 禹晶, 肖创柏. 图像去雾的无参考客观质量评测方法 [J]. 中国图象图形学报, 2011, 16(9): 1753-1757.