

基于 Retinex 理论和暗通道先验的夜间图像去雾算法

杨爱萍, 白煌煌

天津大学电子信息工程学院, 天津 300072

摘要 夜间图像去雾对夜间场景中的视频监控、目标识别等有重要应用价值。目前夜间图像去雾研究较少,且处理结果存在失真度高、细节模糊、稳健性差等缺点。针对以上情况,结合大气散射模型和夜间雾天图像成像特点,提出基于 Retinex 理论和暗通道先验的去雾算法。首先,根据 Retinex 理论求得夜间场景的有雾入射光图像和有雾反射光图像;其次,利用暗通道先验得到场景的无雾反射光图像;然后,分别根据夜间雾天图像和有雾反射光图像求得光源位置和景深,利用相机成像机理求得场景点与各光源的距离之和,进而求得无雾入射光图像;最后,利用 Retinex 理论复原得到夜间无雾图像。实验结果表明,本文算法不仅能彻底去雾,提高图像对比度,更能大幅度降低去雾过程中的颜色失真。

关键词 图像处理;暗通道先验;夜间图像增强;图像去雾;Retinex

中图分类号 TP751.1 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.041002

Nighttime Image Defogging Based on the Theory of Retinex and Dark Channel Prior

Yang Aiping, Bai Huanghuang

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

Abstract Nighttime image defogging is critical for various applications, such as nighttime video surveillance, and target identification. The existing defogging algorithms for nighttime image have many shortcomings, such as high image distortion, fuzzy detail and poor robustness. In order to solve these problems, a new nighttime image defogging algorithm based on the theory of Retinex and dark channel prior is proposed combining with the characteristics of atmospheric scattering model and nighttime image of fog. Firstly, the incidence image affected by haze and the reflection image affected by haze are obtained based on the theory of Retinex. Then, the clear reflection image is obtained by the dark channel prior. After that, the position of the source and the depth of field are obtained according to the nighttime image of fog and the reflection image affected by haze. The sum of the distances between the spot and the source is obtained by using the camera imaging mechanism, and then the fog-free incident light image is obtained. Finally, the theory of Retinex is used to restore the nighttime clear image. Experimental results show that the proposed algorithm not only defogs completely and enhances the image contrast, but also reduces the color distortion greatly.

Key words image processing; dark channel prior; nighttime image enhancement; image defogging; Retinex

OCIS codes 100.2000; 100.2980; 150.1135

1 引言

近年来,户外监控系统、车牌自动拍照系统等图像采集设备均受到各种因素影响,导致图像信息质量下降,在各种因素中,雾天天气是主要影响因素。由于雾气的存在,场景中物体反射到达图像采集设备中的光线减少,且受到雾中颗粒物反射光或散射光的干扰,采集到的图像无法真实反映场景信息,造成视觉系统的性能

收稿日期: 2016-11-22; **收到修改稿日期:** 2016-12-14

基金项目: 国家自然科学基金(61372145,61472274,61201371)

作者简介: 杨爱萍(1977—),女,博士,副教授,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: 18722009631@163.com

无法有效发挥,严重影响了工厂、企业乃至日常生活的方方面面。夜间图像的成像光源主要是人工光源,大气光不满足全局恒定,雾气不仅会影响目标场景反射到达图像采集设备的成像质量,而且会降低人工光源发射到场景点的入射光强度,因此图像的对比度和颜色保真度都大大降低,多数图像出现细节丢失、颜色偏移等现象,计算机视觉系统性能受到严重影响。因此,夜间图像去雾技术具有非常重要的研究意义和应用价值^[1-3]。

现有的图像去雾方法大多针对白天场景而设计,利用大气散射模型和根据先验信息得到模型参数,如大气光值和透射率,求得无雾图像^[4-11],可以较好地复原白天有雾图像,去除雾气对场景反射光的影响,但对于夜间雾天图像,成像机制复杂,这些方法无法去除雾气对入射光的衰减,因此这些方法不适用于夜间雾天图像。目前针对夜间图像的去雾技术研究较少。Pei等^[12]依据目标图像和统计校正对夜间雾天图像进行颜色转换,然后按照暗通道先验方法^[5]去雾,最后通过双边滤波改善图像效果,算法对目标图像依赖性强、稳健性差。Zhang等^[13-14]利用Retinex算法得到入射光亮度图像,利用Gamma校正平衡图像亮度,然后利用入射光颜色特征去除入射光对场景的颜色影响,最后根据局部暗通道先验去雾,由于未考虑入射光的衰减,去雾后图像存在局部失真、细节模糊等现象。Li等^[15]将光晕效应表示为大气点扩散函数,通过改进的大气散射模型和暗通道先验得到无雾图像,能有效消除光晕,但输出图像不自然,且容易出现过增强局部区域的现象。文献^[16]提出多尺度融合的夜间图像去雾算法,通过不同尺度的局部块和暗通道先验求取大气光图,然后利用对比度、饱和度等特征求得权重图,最后根据拉普拉斯金字塔融合大气光图和权重图得到复原图像,复原图像光晕明显,且去雾不彻底。

因此,本文根据夜间雾天图像成像特点和相机成像机理,利用Retinex理论和暗通道先验去雾得到夜间无雾图像。图像去雾分为:1)根据Retinex理论求得有雾入射光图像和有雾反射光图像;2)利用暗通道先验得到场景的无雾反射光图像;3)根据光源特征得到光源位置,并利用有雾反射光图像各场景点的景深,根据相机成像机理求得场景点与各光源的距离之和,进而增强入射光图像;4)利用Retinex理论复原得到夜间无雾图像。

2 雾天图像成像模型

2.1 白天有雾图像成像模型

依据大气散射模型,白天有雾图像的成像过程可以表示为

$$I = Jt + A(1 - t), \quad (1)$$

式中 I 是观察到的雾图像, J 是不受空气介质干扰的实际场景图像, A 是大气光, t 是场景透射率。一般认为 A 全局恒定, t 局部恒定; Jt 称作直接衰减项, $A(1-t)$ 称作大气光成像项,白天图像去雾的目的是从已知图像 I 中恢复 J ,去除雾气对场景反射光的影响。

2.2 夜间雾天图像成像模型

与白天有雾图像不同,夜间雾天图像的成像光源包括自然光源和人工光源,自然光源的光强全局近似恒定,但人工光源发射到达场景点的光强与场景点到光源的距离有关,因此图像的大气光值全局不恒定。此外,雾气对图像质量的影响包括两部分:1)影响目标场景反射到达图像采集设备的成像质量;2)降低人工光源发射到场景点的入射光强度。一般情况下,自然光源光强较弱,人工光源是主要光源,因此,大气光近似

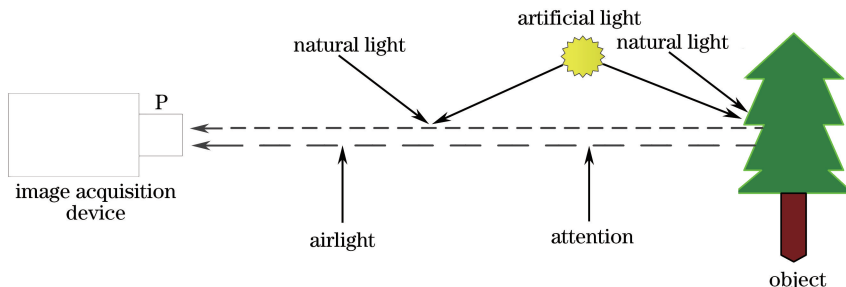


图1 夜间雾天图像成像模型

Fig. 1 Nighttime haze imaging model

等于人工光源发射到达各场景点的入射光大小。根据 Retinex 理论,场景所成像等于入射光与物体表面对照射光的反射比例之积^[17],即

$$J_i^c = A_i^c \times R_i^c, \tag{2}$$

式中 J_i^c 代表 i 点的 c 通道像素值, $c \in \{r, g, b\}$; A_i^c 代表环境光的照射分量; R_i^c 表示携带图像细节信息的目标物体的反射比例。(2) 式描述了夜间无雾图像的成像特性,但对于夜间雾天图像,雾气会降低入射光强度和场景发射光强度,使大气光变为 $A_i^{c'}$, 反射光 J_i^c 变为 I_i^c , I_i^c 为相机采集到的图像,且 J_i^c 变为 I_i^c 的过程近似满足大气散射模型,不同的是大气光全局不恒定^[13], 因此夜间雾天图像成像模型可表示为

$$I_i^c = J_i^c t_i + A_i^{c'}(1 - t_i) = A_i^{c'} R_i^c t_i + A_i^{c'}(1 - t_i). \tag{3}$$

夜间雾天图像去雾的目的是从 I_i^c 中求得 $A_i^c R_i^c$ 。

3 夜间图像去雾算法

根据(3)式可知,夜间图像去雾是一个病态过程,为此,假设透射率 t_i 在景深变化较小处局部恒定。所提夜间图像去雾算法如图 2 所示,各步骤结果如图 3 所示,其中图 3(a)~(i)依次为夜间雾天图像、有雾反射图、有雾入射图、暗通道图像、夜间无雾图像、无雾反射图、景深图、光源位置图、无雾入射图。

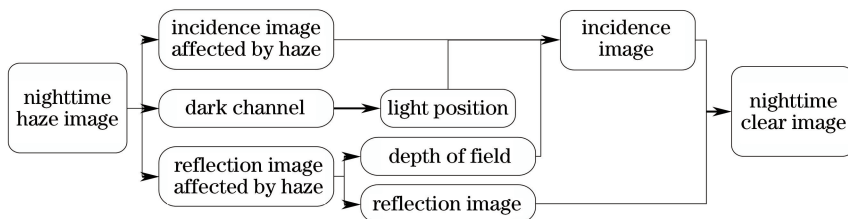


图 2 夜间图像去雾算法流程图

Fig. 2 Defogging process of nighttime haze image

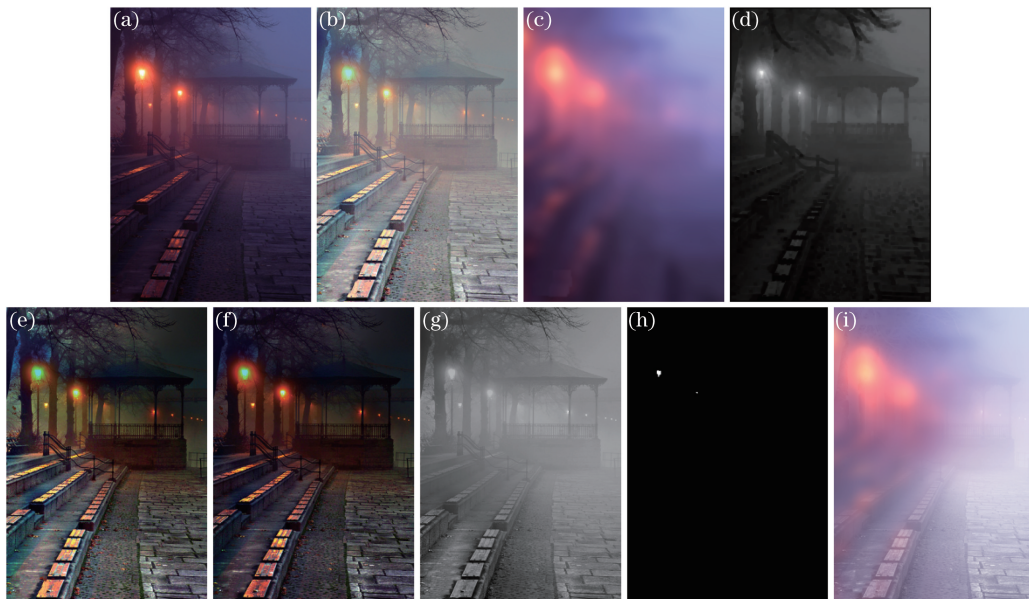


图 3 本文算法各步骤结果图

Fig. 3 Results of each step for the proposed algorithm

3.1 基于 Retinex 理论的图像分离

(3)式可改写为

$$I_i^c = A_i^{c'} \times \tilde{R}_i^c, \tag{4}$$

式中 $\tilde{R}_i^c = R_i^c t_i + 1 \times (1 - t_i)$, 代表有雾反射图; $A_i^{c'}$ 代表有雾入射图。根据 Retinex 理论, $A_i^{c'}$ 可通过对图像 I_i^c 进行高斯模糊得到, 模糊尺寸为 κ , 当 κ 较小时, Retinex 算法能完成动态范围压缩, 增强暗区域细节;

当 κ 较大时,色感一致性较好。多尺度 Retinex(MSR)算法能利用大、中、小三尺度对图像进行处理,充分利用各尺寸模糊的优点,模糊尺寸分别为 κ_1 、 κ_2 和 κ_3 ,然后通过下式求得有雾入射图 $A_i^{\gamma;c}$,表达式为

$$A_i^{\gamma;c} = \sum_{j=1}^3 A_{i;j}^{\gamma;c} / 3, \quad (5)$$

式中 $A_{i;j}^{\gamma;c}$ 表示按照模糊尺度 κ_j 对图像 I_i^c 进行模糊处理后的有雾入射图。最后得到有雾反射图 \tilde{R}_i^c ,表达式为

$$\tilde{R}_i^c = I_i^c / A_i^{\gamma;c}. \quad (6)$$

通过(6)式得到的有雾反射图,如图 3(b)所示。

3.2 基于暗通道先验求取无雾反射图

由 3.1 节得到有雾反射图 \tilde{R}_i^c ,且 $\tilde{R}_i^c = R_i^c t_i + 1 \times (1 - t_i)$,有雾反射图为入射光为白光的场景有雾图像,也即白天有雾图像。暗通道先验^[5]指出对于白天清晰图像,在不包括天空的绝大部分局部区域里,总存在一些亮度很低的像素点。由于这里大气光值为 1,因此,首先对图像 \tilde{R}_i^c 进行归一化,然后根据暗通道先验和大气散射模型,同时考虑到彻底去除雾时图像会显得不真实,得到透射率为

$$t_i = 1 - \omega \min_{c \in \{r, g, b\}} \min_{j \in \Omega(i)} (\tilde{R}_j^c), \quad (7)$$

式中 $\Omega(i)$ 表示以 i 为中心的局部块,大小为 $n \times n$; ω 为调节因子。但由于采用局部处理,透射图存在明显的块效应,这里选用导向滤波^[6]优化透射图 t_i 。当透射率 t_i 接近 0 时,去雾后的图像倾向于包含噪声,因此设置透射率下限为 t_0 。无雾反射图 R_i^c 表达式为

$$R_i^c = \frac{\tilde{R}_i^c - 1}{\max(t_i, t_0)} + 1. \quad (8)$$

将透射图 t_i 和 t_0 代入(8)式求得无雾反射图,如图 3(f)所示。

3.3 基于相机成像机理计算无雾入射图

夜间场景中的雾气会降低光源到达场景点的光强,且光源与场景之间的距离越大,雾气影响越严重,对于归一化图像, $A_i^c \in [0, 1]$,无雾入射图 A_i^c 衰减为有雾入射图 $A_i^{\gamma;c}$, γ 越大衰减越严重。由于夜间光源较多,成像复杂,这里近似认为

$$\gamma \propto \sum_l d_{i,l}, \quad (9)$$

式中 \propto 表示该符号前后对象为成正比关系, $d_{i,l}$ 代表场景点 i 与光源 l 的距离,(9)式表示 γ 正比于所有光源与目标场景 i 的距离之和。因此,需求取光源的位置以及各光源与各场景点的距离。

计算光源位置:归一化的夜间雾天图像,光源及其周围亮度趋向于 1,因此通过对暗通道图像进行阈值分割二值化可粗略求取光源所在区域。此时,某些反光较强区域(伪光源)会误判为光源区域,且此区域面积一般较小,利用数学形态学中的腐蚀等处理,滤除面积较小区域,即可得到精确光源区域图。最后计算各光源所在区域的重心,得到光源精确坐标,图 4 为各步骤图解,其中图 4(a)~(d)分别表示夜间雾天图像、暗通道图像、粗略光源位置图、精确光源位置图。若无光源,则认为图像的成像光源只有自然光,雾气对入射光没有影响, $A_i^c = A_i^{\gamma;c}$,忽略 3.2 节部分。

计算光源到目标场景的距离:夜间雾天图像从雾气的笼罩程度可分为全雾图和非全雾图,设在场景点的反射路径上雾气厚度为 d_1 ,场景点到图像采集设备的距离为 d_2 ,则全雾图中所有场景满足 $d_1 = d_2$,非全雾图中至少有一个场景满足 $d_1 < d_2$ 。一般认为,小场景雾图像属于全雾图,则夜间雾天图像的成像机理及其

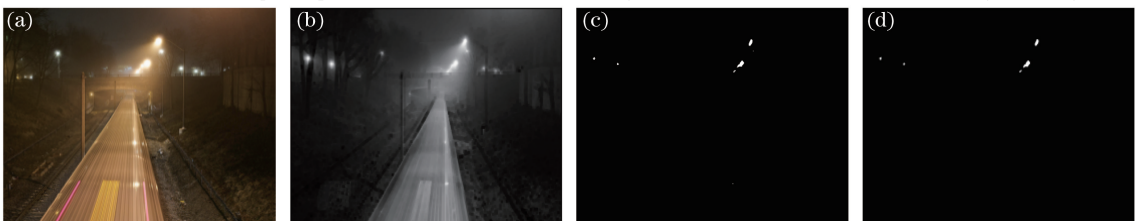


图 4 光源定位图解

Fig. 4 Diagram of light resource location

光路可近似用图 5 表示。其中 G 代表第 l 个人工光源; B 为场景点; E 、 F 代表光源 G 和场景点 B 所成的像; C 在图像上的垂点为 D , DC 近似等于相机焦距; GC 和 CB 近似景深; GB 为光源到场景点的距离, 即 $GB = d_{i,l}$, 根据三角定理, GB 可表示为

$$GB = GC^2 + CB^2 - 2 \times GC \times CB \times \cos \Theta. \quad (10)$$

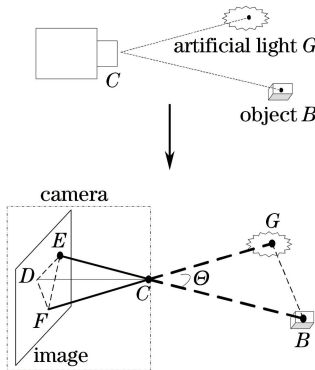


图 5 相机成像机理

Fig. 5 Theory of camera imaging

根据(10)式求 GB 需求 GC 、 CB 和 $\cos \Theta$ 。假设 β 已知, 根据 $t = \exp(-\beta d)$ 和 3.2 节中所得透射率 t_i , 便可得到图像中任意点的景深。 $\cos \Theta$ 可通过(8)式求得, 且 DE 、 DF 、 EF 与单个像素的大小 \bar{s} 有关, DC 与相机焦距有关, $\cos \Theta$ 对图像的影响具有全局性, 因此 \bar{s} 和 DC 可任意设定。 $\cos \Theta$ 的表达式为

$$\cos \Theta = \frac{DE^2 + 2 \times DC^2 + DF^2 - EF^2}{2 \sqrt{DE^2 + DC^2} \sqrt{DF^2 + DC^2}}. \quad (11)$$

如此, 根据(10)~(11)式即可求得各场景景深, 结合各光源位置, 即可求得各光源与目标场景的距离之和 $d_i = \sum_l d_{i,l}$, 之后对 d_i 进行归一化, 得到 γ_i , 然后求取无雾入射图 A_i^c , 表达式为

$$A_i^c = (A^{\gamma_i})^{\frac{1}{\gamma_i}}. \quad (12)$$

利用(12)式得到无雾入射图, 如图 3(i)所示。

3.4 基于 Retinex 理论求取无雾图像

根据 Retinex 理论, 即可求得夜间无雾图像, 表达式为

$$\tilde{J}_i^c = A_i^c \times R_i^c, \quad (13)$$

式中 \tilde{J}_i^c 代表夜间无雾图像; A_i^c 为无雾入射图, 根据 3.1 和 3.3 节求得; R_i^c 为无雾反射图, 根据 3.1 和 3.2 节求得; 去雾结果如图 3(e)所示, 为提高图像视觉效果和信息可视度, 利用 MSR 算法^[17]增强图像 \tilde{J}_i^c 。

4 实验与结果分析

实验中局部块尺寸 $\Omega = 5 \times 5$, $\omega = 0.95$, $t_0 = 0.1$; 对亮度图像进行二值化的阈值为 0.9, 删除伪光源区域的面积阈值为 100, $\bar{s} = 0.3$, $DC = 15$; 导向滤波窗口半径和正则化参数分别为 50 和 10^{-3} , MSR 算法中 $\kappa_1 = 30$, $\kappa_2 = 160$, $\kappa_3 = 1500$ 。为验证本文算法的有效性, 与文献[13]、[15]和[16]进行比较, 并选择对比度 c 、锐度 s 和平均梯度 m ^[15]评价实验结果。

图 6 为文献[13]与本文算法的实验结果。由图 6 可知, 文献[13]的处理结果色彩鲜艳, 但去雾不彻底, 尤其是景深较大处; 而本文方法不仅能彻底去雾, 提高目标场景的亮度和清晰度, 而且细节处理更好。

图 8 为文献[13]、[15]、[16]与本文算法的实验结果。从图 8 可以看出, 文献[13]、[15]、[16]的去雾结果均不彻底, 且文献[13]处理结果细节信息丢失严重, 如光源周围树枝等信息无法被观测者获得; 文献[15]的处理结果不自然, 尤其是光源周围景物; 文献[16]光晕明显; 本文算法去雾更加彻底, 能够复原真实夜间图像, 颜色更加逼真, 且光晕更弱, 增强后图像的信息可视度更高。

利用客观评价标准对图 8 中各算法处理结果进行评价, 结果如表 1 所示, 表 1 中加粗部分为各评价标准



图 6 (a) 夜间雾天图像; (b) 文献[13]的结果; (c) 本文算法处理结果(增强后)
Fig. 6 (a) Nighttime haze image; (b) result of Ref. [13]; (c) result of the proposed algorithm (after enhancement)



图 7 (a) 夜间雾天图像; (b) 文献[15]的结果; (c) 文献[16]的结果; (d) 本文算法处理结果(增强前)
Fig. 7 (a) Nighttime haze image; (b) result of Ref. [15]; (c) result of Ref. [16]; (d) result of the proposed algorithm (before enhancement)

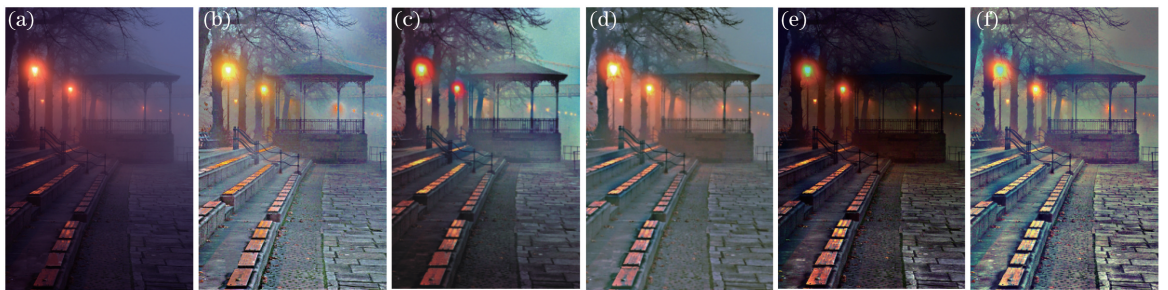


图 8 (a) 夜间雾天图像; (b) 文献[13]的结果; (c) 文献[15]的结果; (d) 文献[16]的结果;
(e) 本文算法结果(增强前); (f) 本文算法结果(增强后)

Fig. 8 (a) Nighttime haze image; (b) result of Ref. [13]; (c) result of Ref. [15]; (d) result of Ref. [16]; (e) result of the proposed algorithm (before enhancement); (f) result of the proposed algorithm (after enhancement)

对应的最高分值。由表 1 可知,与其他算法相比,本文算法在 c 、 s 、 m 三个评价标准下都能取得更高的分值,客观地说明了利用本文算法复原夜间雾天图像,能够得到细节更加清晰、层次感更强的无雾图像。

表 1 利用 c 、 s 、 m 对图 8 的评价结果

Table 1 Evaluation results in Fig.8 based on c , s and m

| Parameter | Original | Ref. [13] | Ref. [15] | Ref. [16] | Proposed algorithm (before enhancement) | Proposed algorithm (after enhancement) |
|-----------|----------|-----------|-----------|-----------|--|---|
| c | 0.1133 | 0.1561 | 0.1777 | 0.1161 | 0.118 | 0.1815 |
| s | 0.1343 | 0.5995 | 0.3034 | 0.3104 | 0.3233 | 0.7058 |
| m | 0.0529 | 0.2443 | 0.093 | 0.0935 | 0.1294 | 0.2546 |

5 结 论

根据夜间图像成像特点可知,雾气不仅会影响目标场景的反射光,使无雾反射图变为有雾反射图,而且会降低光源发射到达目标场景的光强,使无雾入射图变为有雾入射图,进而通过复原入射图和反射图得到夜间无雾图像。实验结果表明,相比其他去雾算法,本文方法去雾更彻底,处理后图像的视觉效果更好,细节清晰度更高,证明了夜间图像成像特点理论分析以及本文去雾算法的正确性。

参 考 文 献

- [1] Wu Di, Zhu Qingsong. The latest research progress of image dehazing[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2015, 41(2): 221-239.
吴迪, 朱青松. 图像去雾的最新研究进展[J]. *自动化学报*, 2015, 41(2): 221-239.
- [2] Li Gun, Wu Jiefu, Lei Zhiyong. Research progress of image haze grade evaluation and dehazing technology[J]. *Laser Journal*, 2014, 35(9): 1-6.
李滚, 吴劼夫, 雷志勇. 图像雾霾等级评价及去雾技术研究进展[J]. *激光杂志*, 2014, 35(9): 1-6.
- [3] Yu Jing, Xu Dongbin, Liao Qingmin. Image defogging: a survey[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2011, 16(9): 1561-1576.
禹晶, 徐东彬, 廖庆敏. 图像去雾技术研究进展[J]. *中国图象图形学报*, 2011, 16(9): 1561-1576.
- [4] He K, Sun J, Tang X. Single image haze removal using dark channel prior[C]. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2010: 1956-1963.
- [5] He K, Sun J, Tang X. Guided image filtering[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2013, 35(6): 1397-1409.
- [6] Tan R T. Visibility in bad weather from a single image[C]. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2008: 1-8.
- [7] Fattal R. Single image dehazing[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2008, 27(3): 1-9.
- [8] 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.
- [9] Gao Yin, Yun Lijun, Shi Junsheng, *et al.* Enhancement dark channel algorithm of fog image based on the TV model[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(8): 0809001.
高银, 云利军, 石俊生, 等. 基于TV模型的暗原色理论雾天图像复原算法[J]. *中国激光*, 2015, 42(8): 0809001.
- [10] Feng Weiyi, Chen Qian, He Weiji, *et al.* A defogging method based on hyperspectral unmixing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(1): 0110002.
冯维一, 陈钱, 何伟基, 等. 基于高光谱图像混合像元分解技术的去雾方法[J]. *光学学报*, 2015, 35(1): 0110002.
- [11] Li Yamei, Ren Tingting. 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.
- [12] Pei S C, Lee T Y. Nighttime haze removal using color transfer pre-processing and dark channel prior[C]. *IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*, 2012: 957-960.
- [13] Zhang J, Cao Y, Wang Z. Nighttime haze removal based on a new imaging model[C]. *IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*, 2014: 4557-4561.
- [14] Zhang J, Cao Y, Wang Z. Nighttime haze removal with illumination correction[J]. *Computer Vision and Pattern Recognition*, 2016.
- [15] 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: 226-234.
- [16] Ancuti C, Ancuti C O, Vleeschouwer C D, *et al.* Night-time dehazing by fusion[C]. *IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*, 2016: 2256-2260.
- [17] Jobson D J, Rahman Z U, Woodell G A. A multiscale retinex for bridging the gap between color images and the human observation of scenes[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1997, 6(7): 965-976.