

基于亮度模型融合的改进暗通道先验图像去雾算法

李雅梅, 张旭佳*, 谢秉旺

辽宁工程技术大学电气与控制工程学院, 辽宁 葫芦岛 125105

摘要 针对暗通道先验在天空区域的失效问题,提出了一种基于亮度模型融合的改进暗通道先验图像去雾算法。首先通过 Canny 算子分割得到天空区域与非天空区域;其次,利用亮度模拟景深,重构亮度透射率,并通过与暗通道透射率的融合构成天空区域透射率,最后的透射率图经由快速引导滤波进行精细化处理;大气光值选择抗干扰能力更强的天空区域中像素强度值前 0.1% 的像素中值;最后,经由大气散射模型恢复出无雾图像。实验结果表明,该算法针对含雾图像能够有效地恢复出图像的细节并抑制光晕现象,明亮度适宜,颜色自然。

关键词 图像处理;亮度模型;融合透射率;大气散射模型

中图分类号 TP391

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.221002

An Improved Dark Channel Prior Image Dehazing Algorithm Based on Fusion Luminance Model

Li Yamei, Zhang Xujia*, Xie Bingwang

Faculty of Electrical and Control Engineering, Liaoning Technical University, Huludao,
Liaoning 125105, China

Abstract An improved dark channel prior image dehazing algorithm based on the fusion luminance model was proposed to deal with the failure of a dark channel prior in the sky. First, sky and non-sky areas were segmented using a Canny operator. Next, luminance transmission was constructed by simulating the depth of the scene using the luminance, which combined with the transmission of the dark channel to form the transmission of the sky area. A fast-guided filter was used to optimize the transmission map. The value of atmospheric light was selected as the median of the top 0.1% of the pixels with strong anti-interference ability. Finally, the haze-free image was restored using the atmospheric scattering model. Experimental results show that the algorithm could effectively recover the details of the image and suppress the halo phenomenon for the haze image including the sky area with appropriate brightness and natural color.

Key words image processing; luminance model; fusion transmission; atmospheric scattering model

OCIS codes 100.2000; 280.1310; 100.2980

1 引言

近年来,由于工业化进程的加速推进以及早期环境保护意识的淡薄,大气污染物结合空气中的水蒸气形成大规模雾霾,导致户外图像采集系统捕捉到的图像亮度欠佳,细节丢失,难以识别,严重影响了特征提取、目标跟踪^[1]等后续的处理工作,造成了巨大的经济损失。因此,图像去雾技术的研究具有

十分重要的实用价值。

图像去雾技术可分为图像增强、图像恢复及基于深度学习的图像去雾算法。图像增强以增强对比度为主要手段,主要算法包括以 Retinex^[2]算法为代表所衍生的一系列算法、直方图均衡化^[3]以及小波变换^[4]等,但图像增强易造成信息消失、引入相应噪声,以及出现过饱和和光晕效应等失真问题。图像恢复是基于雾霾条件下成像的物理本质,从大气散

收稿日期: 2020-02-18; 修回日期: 2020-03-16; 录用日期: 2020-03-27

基金项目: 国家自然科学基金(51974151, 71771111)、辽宁省教育厅基金项目(LJ2019JL013)

* E-mail: liyamei518@163.com

射模型出发,对环境光和透射率通过一定的先验假设来逼近模型参数的真实值,从而实现去雾^[5]。其中:Fattal^[6]假设大气入射光与物体表面投影局部不相关^[7],但该假设要求图像具有丰富的颜色信息,如果颜色单一,去雾效果则不理想甚至出现失效;Meng等^[8]基于大气散射模型对天空边界进行约束,以牺牲少量细节的方法获得了较好的去雾效果,但去雾图像的边缘部分模糊,出现了伪影效应;Sun等^[9]提出局部大气光的估计方法,有效修正了大气光估计不足的问题,但有时会出现颜色失真;Zhu等^[10]通过HSV(Hue, Saturation, Value)颜色空间里V通道和S通道的差值来近似模拟景深,提出了颜色衰减先验算法,该算法去雾效果良好,但因以大量的约束条件为前提,时间复杂度较高,无法应用于实时处理的场景;He等^[11]通过对大量无雾自然图像进行统计,提出了暗通道先验理论,并通过导向滤波^[12]进一步细化透射率,该方法具有很好的普适性。但由于暗通道先验理论在天空区域及大面积亮白区域不成立,因此该算法不适用于天空区域。近年来,随着神经网络的兴起,图像去雾与深度学习的融合也成为了图像去雾领域的一大热点^[13]。Cai等^[14]提出的卷积神经网络DehazeNet将大气散射与人工智能相结合,取得了良好的去雾效果,但由于基于深度学习的算法需要大量的测试数据,应用成本较高,因此对传统方法的研究依旧是当下学者研究的热点。

针对暗通道先验在天空区域的失效问题,本文提出一种基于亮度模型融合的改进暗通道先验图像去雾算法。将暗通道先验失效的天空区域利用Canny边缘检测进行有效分割,由于天空区域的景深无法精准估计,故用亮度代替景深,构造亮度透射率,再与基于暗通道先验估计的透射率构成融合透射率来平滑过渡边缘,最后以快速引导滤波对透射率进行精细化处理,得到边缘细节保持良好的透射率图。大气光值则选取天空区域中像素强度值前0.1%的像素中值,以减少噪声的影响。最后基于大气散射模型恢复出无雾图像。本文算法能够自然地处理含有天空区域的雾图,在避免失真和增强图像的视觉效果方面表现出了良好的性能。

2 暗通道先验去雾算法

Nayer和Narasimhan于1999年改进的大气散射模型,现广泛应用于计算机视觉和计算机图形

学^[15],其模型公式为

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

式中 $I(x)$ 表示图像采集系统采集到的雾天图像, $J(x)$ 表示要恢复的真实场景, $t(x)$ 表示透射率, A 表示大气光强。根据模型,可推导出无雾图像的表达式,为

$$J(x) = \frac{I(x) - A}{t(x)} + A. \quad (2)$$

为了恢复出无雾图像,需要估计出大气光值 A 和透射率 $t(x)$ 。He等^[16]指出:绝大多数不含天空区域的户外无雾图像,总存在大量像素在至少一个颜色通道上的亮度值很小并趋近于0,即

$$J^{\text{dark}}(x) = \min_{y \in \Omega(x)} [\min_c J^c(y)] \rightarrow 0, \quad (3)$$

式中: $\Omega(x)$ 表示以 x 为中心的局部区域, $c \in \{r, g, b\}$ 表示3个颜色通道。(3)式被称为暗通道先验公式。(3)式经过归一化和两侧的暗通道计算后可得

$$t(x) = 1 - \omega \min_{y \in \Omega(x)} \left[\min_c \frac{I^c(y)}{A^c} \right], \quad (4)$$

式中: ω 是用于调整去雾程度的系数,是为保留一定的雾感且保证复原后图像的自然效果而引入的。文献[12]中,取 $\omega = 0.95$ 。该方法对于不含天空区域的雾图,具有良好的去雾效果。但实际应用中,户外图像采集系统采集到的图像很难满足不含天空区域这一特点,更多的是包含天空区域的图像。而由于天空区域的暗通道值并不趋近于0,不满足暗通道先验理论成立的前提条件,故不能对含有天空区域的有雾图像使用暗通道先验的方法进行复原处理,若直接使用暗通道先验的方法进行复原处理则会导致天空区域出现大面积的光晕,出现失真。因此暗通道先验去雾在实际应用中具有一定的局限性。

3 本文算法

针对暗通道先验在天空区域的失效问题,本研究对天空区域及非天空区域图像的特点分析后提出了基于亮度融合透射率的改进暗通道先验的去雾算法。步骤如下:通过Canny边缘检测进行天空分割;对于分割得到的非天空区域采用暗通道先验的方法估算透射率,对于天空区域则融合亮度模型来估算透射率,然后通过快速引导滤波对透射率进行平滑处理;大气光值选取天空区域中像素强度值前0.1%的像素中值;最后基于大气散射模型恢复无雾图像。算法流程如图1所示。

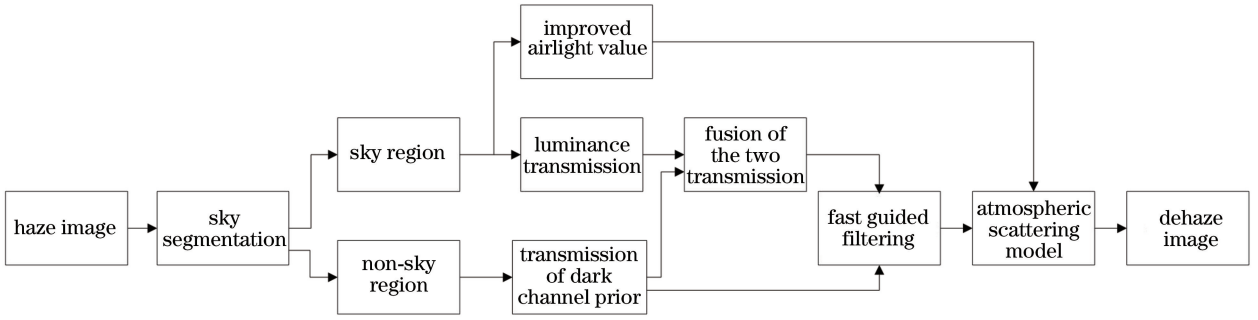


图1 本文算法流程图

Fig. 1 Flowchart of the algorithm

3.1 Canny 算子天空分割

暗通道先验估计出的天空区域透射率低于实际的透射率,导致天空区域出现失真。因此分割天空区域与非天空区域有利于对两部分的透射率进行更好的估算。本研究采用 Canny 边缘检测方法进行分割,分割

示意图如图 2 所示。首先将经过灰度化处理的原始雾图进行直方图均衡化,以此增强图像中的边缘信息;其次将灰度图像进行 Canny 算子边缘检测,提取出边缘特征;最后将 Canny 算子检测出的边缘进行形态学膨胀与腐蚀操作,得到分割的天空部分与非天空部分。



图2 天空分割示意图。(a)含雾图像;(b) Canny 算子检测边缘;(c)天空分割结果

Fig. 2 Results of sky segmentation. (a) Haze image; (b) edge detected by Canny operator; (c) final edge of the sky detected

3.2 基于亮度融合的透射率估计

3.2.1 非天空区域

暗通道先验在不含天空区域的图像中表现出良好的性能,本文在处理非天空区域的透射率时采用 He 等^[11]的方法。非天空区域透射率经过归一化和两侧的暗通道计算后可表示为

$$t'_{\text{no-sky}}(x) = 1 - \omega \min_{y \in \Omega(x)} \left[\min_c \frac{I^c(y)}{A^c} \right]. \quad (5)$$

3.2.2 天空区域

明亮的天空区域,特别是当天空中存在云等特殊纹理时,需要更大的透射率值来保证自然状态。当大气同质时,透射率 $t(x)$ 表示为

$$t(x) = \exp[-\beta d(x)], \quad (6)$$

式中: β 是散射系数, $d(x)$ 是场景深度。由(6)式可知,当雾气浓度不变时,透射率仅与场景深度呈指数相关。但天空区域的景深不能确定,我们无法得到真实的景深。Zhu 等^[15]观察到含雾图像天空区域的亮度(HSL 颜色空间)远大于前景,亮度分布与场景深度呈正比关系,并且人的视觉对亮度的敏感程度远强于对颜色浓淡的敏感强度。故本研究使用亮

度代替景深表征天空区域的特点。基于亮度模型的透射率可表示为

$$t_L(x) = \exp[-\beta L(x)], \quad (7)$$

式中: $t_L(x)$ 是基于亮度模型估计的透射率; $L(x)$ 是修正后的亮度; β 是散射系数,由雾霾程度、物距以及相机角度决定。一般相机角度取 60° 即可捕捉到天空区域。本文取 Mie^[15] 散射模型中 60° 的散射系数。 β 定义为

$$\beta = \begin{cases} 0.3324, \lambda_r = 700 \mu\text{m} \\ 0.3433, \lambda_g = 520 \mu\text{m}, \\ 0.3502, \lambda_b = 440 \mu\text{m} \end{cases} \quad (8)$$

式中: $\lambda_r, \lambda_g, \lambda_b$ 分别为红、绿、蓝三波段波长。

亮度透射率和暗通道透射率利用拉伸函数对齐,即将亮度透射率 $t_L(x)$ 中的亮度 $L(x)$ 拉伸至实际景深的范围。拉伸函数的表达式为

$$L(x) = \frac{l(x)}{l^*} \times D, \quad (9)$$

式中: $l(x)$ 为输入图像的亮度; l^* 为当前亮度范围,设置为实验中亮度的 95%; D 是真实景深范围。虽

然块状的天空区域整体平缓,但若是将天空区域透射率直接定义为一个常数,易造成边缘结合处强度突变,导致视觉效果不佳。为了提高图像边缘的视觉效果,提出亮度融合透射率方法,使边缘过渡相对平滑。定义整图的亮度平均值为 $L_{\text{All-Mean}}$,天空区域亮度的平均值为 $L_{\text{Sky-Mean}}$,将小于等于全图亮度平均值的像素数量定义为 S_{LA} ,将全图中小于等于天空亮度平均值的像素总数定义为 S_{LS} ,定义融合系数为

$$\rho = \frac{S_{\text{LA}}}{S_{\text{LS}}}。 \quad (10)$$

本文认为 ρ 能在一定程度上反映图像中雾气浓度的大小。重新定义天空区域透射率为

$$t'_{\text{sky}}(x) = \rho t_{\text{L}}(x) + (1 - \rho)t'_{\text{no-sky}}(x), \quad (11)$$

式中: $t'_{\text{no-sky}}(x)$ 是暗通道算法估计的透射率。可以判断出:若原图雾气较浓,则图像整体强度变大,亮度越高, $L_{\text{Sky-Mean}}$ 越高, S_{LS} 越大, ρ 越小,故(11)式可以避免透射率在天空区域的突变过大;若原图雾气较薄,则 ρ 也较大,不会对透射率的修复造成过大的影响。为了提高算法的鲁棒性,本研究对 ρ 设置上下边界,以使该融合因子 ρ 对于透射率的边缘都能有融合效果。设置最下边界值为 $\rho_{\text{min}} = 0.4$,最大边界值为 $\rho_{\text{max}} = 0.9$ 。则融合因子为

$$\rho = \min \left[\max \left(\frac{S_{\text{LA}}}{S_{\text{LS}}}, \rho_{\text{min}} \right), \rho_{\text{max}} \right]。 \quad (12)$$



图3 透射率对比。(a)原始雾图;(b)He的方法;(c)本文提出的算法

Fig. 3 Transmission comparison map. (a) Original haze image; (b) He's method; (c) our method

使用上述方法获得精细的透射率及大气光值后,基于大气散射模型反演雾图成像模型,复原出潜在的无雾图,其表达式为

$$J(x) = \frac{I(x) - A}{\max[t(x), t_0]} + A, \quad (13)$$

式中: $t(x)$ 表示优化后的透射率; t_0 表示透射率下限,通常设为 0.1,以避免对去雾图像过度增强。

3.4.2 参数优化

真实景深范围 D 用来调整亮度分布,使其与暗通道先验透射率有一样的取值范围。不同的 D 值对图像的恢复程度具有不同的效果,经大量的图片

上述融合透射率可以避免透射率在天空区域与非天空区域的突变过大。

3.3 改进的大气光值估计

天空区域是图像中最远的区域和最不透明的区域,统计分析表明,大气光值 A 近似于天空中浓雾区域的像素值,因此本文认为大气光值应从天空区域中选择。He 等^[11]根据暗通道先验,选取暗通道图像中亮度较大的前 0.1% 的像素来估计大气光值。然而在实际应用中,最亮的像素点也可能存在于白色景物中,若直接选取全图前 0.1% 的像素均值则可能会导致失真。因此本文提出,在正确分割天空区域后,鉴于中值不会受极端变量的影响,抗干扰能力更强,采用天空区域像素强度值前 0.1% 的所有像素的中值作为大气光值 A ,既避免了因选择白色高亮景物而导致的错误,又提高了抗干扰能力,可以实现颜色的自然恢复。

3.4 优化复原及参数整定

3.4.1 透射率优化及图像复原

选用快速引导滤波器,对初始透射率进行细化,原始雾图作为引导图像,不仅可以使滤波后的图像具有原始图像的梯度,使粗透射率具有更多的边缘信息,还可以节省时间,如图 3 所示,相较于 He 等的透射率,本文算法对天空区域的透射率估计更加准确,且前景景物边缘的纹理效应趋于平滑。

测试发现,当 $D \in (3, 4)$ 之间时复原效果最好,本文设置 $D = 3.5$ 。部分测试分析的实验结果如图 4 所示。

4 实验对比与分析

本文实验环境为 MATLAB2017b,运行环境为 Windows10,计算机配置为 Intel(R)Core(TM)i5-4200H CPU@2.80GHz,实验图像是图像测试库中的代表图像,并与 He 的算法、Tarel 的算法和 Meng 的算法进行对比,从主观和客观两方面分别对去雾效果进行评价。

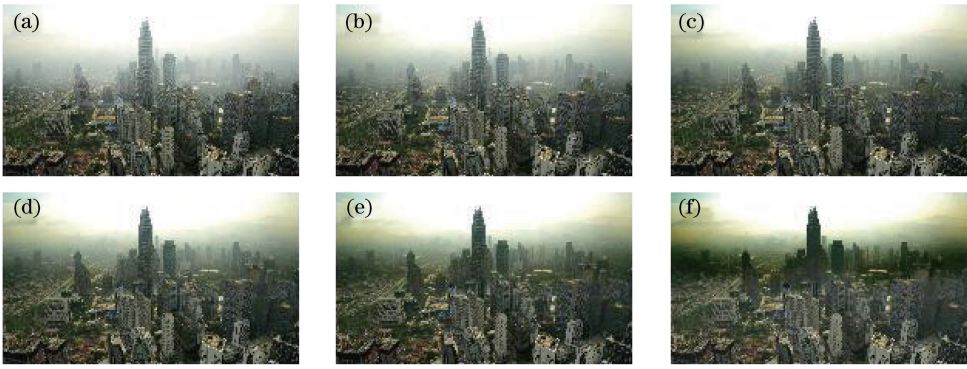


图 4 不同的 D 值对应的复原图像。(a) $D=1$; (b) $D=2$; (c) $D=3$; (d) $D=3.5$; (e) $D=4$; (f) $D=5$

Fig. 4 Recovered images corresponding to the different D . (a) $D=1$; (b) $D=2$; (c) $D=3$; (d) $D=3.5$; (e) $D=4$; (f) $D=5$

4.1 主观评价

主观评价可以直观且快速地分辨出复原图像的优劣。从图 5 可以看出: He 等^[11]的暗通道先验算法在处理含有天空区域的雾图时出现了大面积光晕,图像失真,如第 1 幅图中的天空部分以及第 3 幅图中的天空部分; Meng 等^[8]提出边界约束法,即通过人工选定最亮区域来恢复无雾图像,该方法对不同

场景的适应性增强,但是恢复图像出现了伪影效应,边界不明,如第 4 幅图片中山峦与天空的边界部分; Tarel 等^[17]利用中值滤波优化透射率以期达到更好的去雾效果,但天空区域处理失真严重,不够自然;经过大量含雾图像的测试,可以看出本文提出的算法不仅去雾效果良好,而且在处理天空区域时有效抑制了光晕效应,明亮适宜,更为自然,视觉效果更佳。

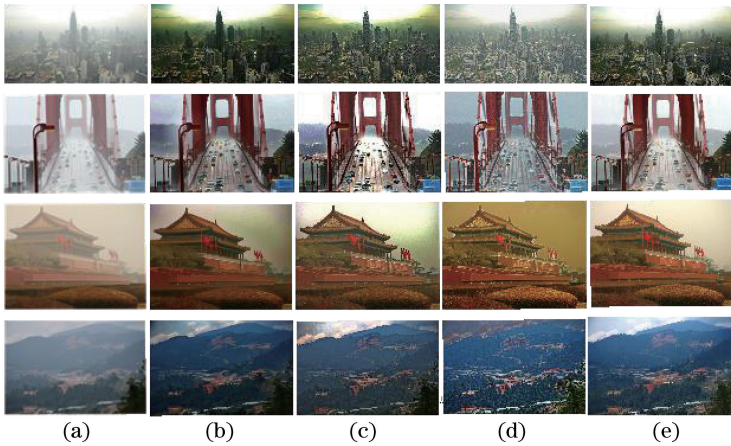


图 5 实验效果对比。(a) 含雾原图; (b) He 的方法; (c) Tarel 的方法; (d) Meng 的方法; (e) 本文提出的方法

Fig. 5 Comparison of experimental results. (a) Haze image; (b) He's method; (c) Tarel's method; (d) Meng's method; (e) our method

4.2 客观评价

主观评价虽然直接有效,但主体的差异性可能导致不同的主观评价。为了进一步验证本文算法的客观有效性,本研究将峰值信噪比 R_{PSN} 、结构相似度 M_{SSI} 以及信息熵 H 作为图像的评价指标进行客观评测分析。峰值信噪比用于评估两者在像素上的差异,值越大,恢复出的图像质量越好,失真越小;结构相似性反映的是图像恢复前后景物结构的相似性,越接近 1,复原图像的质量越好;信息熵描述了图像的平均信息量,当所有像素点集中于某一灰度级时,图像没有细节信息,信息熵最小为 0,反之图

像细节越多,信息熵越大。

从表 1 可以看出(表中粗体表示性能最优项),本文算法的峰值信噪比值整体大于其他 4 种算法, Tarel 等的算法在处理第 1 幅图像时高于本文算法,但 Tarel 处理后的图像去雾不彻底,本文去雾效果更优。从表 2 可以看出,经本文复原后的图像均保持良好的结构相似度,边缘明确,而且对天空区域的恢复性能更优,得益于天空的准确分割和大气光值选取的改进,很好地抑制了伪影的出现,与主观评价一致。从表 3 可以看出,本文算法提供了丰富的细节信息,恢复图像的质量更优。

表1 峰值信噪比比较

Table 1 Comparison of peak signal-to-noise ratio

Image	He's algorithm	Meng's algorithm	Tarel's algorithm	Our algorithm
City	9.2470	10.7944	16.9496	14.2957
Bridge	9.6769	10.9229	12.5436	14.2067
Tiananmen square	11.6869	14.7436	11.8956	15.8250
Mountain	12.0501	14.6966	13.3759	16.1588

表2 结构相似度比较

Table 2 Comparison of structural similarity index

Image	He's algorithm	Meng's algorithm	Tarel's algorithm	Our algorithm
City	0.3451	0.4762	0.5786	0.5539
Bridge	0.3712	0.3689	0.4479	0.6824
Tiananmen square	0.6983	0.8058	0.6127	0.8071
Mountain	0.4421	0.5982	0.4821	0.6091

表3 信息熵比较

Table 3 Comparison of information entropy

Image	Original image	He's algorithm	Meng's algorithm	Tarel's algorithm	Our algorithm
City	7.0400	6.8911	6.8519	7.0755	7.1909
Bridge	7.2615	7.8649	6.7955	7.6140	7.7816
Tiananmen square	7.6423	7.6183	7.4184	7.5419	7.6997
Mountain	7.3753	7.0648	7.1737	7.3183	7.4712

5 结 论

本文算法针对暗通道先验在天空区域的失效问题,结合 Canny 边缘检测的方法将天空与非天空区域分割开来,分别进行了处理,针对天空区域透射率估计不准的情况,提出了基于亮度模型的透射率,并就边界区域容易产生突变的问题提出融合透射率,使得恢复出的图像更加自然。实验结果表明,经由本文算法复原后的图像具有良好的去雾效果,且天空区域明亮自然,图像细节丰富,在客观评价体系中也表现出了优良的性能。尽管本文算法取得了不错的去雾效果,但部分恢复图像在近景区域出现了轻微的过饱和现象,这主要是因为近景区域的透射率估计不精确。提高近景区域透射率的准确性是下一步研究的重点。

参 考 文 献

- [1] Wang Z D, Jing X, Sun G D, et al. Image dehazing of dark channels based on area contrast constraint[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(8): 0810003. 王振东, 靖旭, 孙国栋, 等. 基于区域对比度约束的暗通道图像去雾[J]. 中国激光, 2019, 46(8): 0810003.
- [2] Wang W, Li B, Zheng J, et al. A fast multiscale Retinex algorithm for color image enhancement[C]//

Proceedings of the IEEE Conference on Wavelet Analysis and Pattern Recognition, August 30-31, 2008, Hong Kong, China. New York: IEEE Press, 2008: 80-85.

- [3] Abdullah-Al-wadud M, Kabir M H, Dewan M A A, et al. A dynamic histogram equalization for image contrast enhancement [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2007, 53(2): 593-600.
- [4] Du Y, Guindon B, Cihlar J. Haze detection and removal in high resolution satellite image with wavelet analysis [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2002, 40(1): 210-217.
- [5] Yang Y, Zhang G Q, Li Y F, et al. Adaptive Gaussian attenuation defogging algorithm based on edge preservation [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(8): 081004. 杨燕, 张国强, 李一菲, 等. 基于边缘保持的自适应高斯衰减去雾算法[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(8): 081004.
- [6] Fattal R. Single image dehazing [J]. ACM Transactions on Graphics, 2008, 27(3): 721-729.
- [7] Zhang C, Yang Y. Single image dehazing algorithm based on fusion and Gaussian weighted dark channel [J]. Acta Photonica Sinica, 2019, 48(1): 0110002. 张晨, 杨燕. 基于融合与高斯加权暗通道的单幅图像去雾算法[J]. 光子学报, 2019, 48(1): 0110002.

- [8] Meng G F, Wang Y, Duan J Y, et al. Efficient image dehazing with boundary constraint and contextual regularization [C] // 2013 IEEE International Conference on Computer Vision, December 1-8, 2013, Sydney, NSW, Australia. New York: IEEE Press, 2013: 617-624.
- [9] Sun W, Li D J, Liu H J, et al. Fast single image fog removal based on atmospheric scattering model[J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(4): 1040-1046.
- [10] Zhu Q S, Mai J M, Shao L. A fast single image haze removal algorithm using color attenuation prior[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2015, 24(11): 3522-3533.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] Chen Y, Guo H G, Ai Y P. Single image dehazing method based on multi-scale convolution neural network[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(10): 1010001.
- 陈永, 郭红光, 艾亚鹏. 基于多尺度卷积神经网络的单幅图像去雾方法[J]. 光学学报, 2019, 39(10): 1010001.
- [14] Cai B L, Xu X M, Jia K, et al. DehazeNet: an end-to-end system for single image haze removal [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2016, 25(11): 5187-5198.
- [15] Zhu Y Y, Tang G Y, Zhang X Y, et al. Haze removal method for natural restoration of images with sky[J]. Neurocomputing, 2018, 275: 499-510.
- [16] Hu Y, Wang K Y, Xu N, et al. Image dehazing by the segmenting Median filter and transmission compensation [J]. Journal of Xidian University (Natural Science), 2018, 45(4): 99-105.
- 胡妍, 王柯俨, 许宁, 等. 利用分割中值滤波和透射率补偿的图像去雾[J]. 西安电子科技大学学报(自然科学版), 2018, 45(4): 99-105.
- [17] Tarel J P, Hautière N. Fast visibility restoration from a single color or gray level image [C] // 2009 IEEE 12th International Conference on Computer Vision, September 29-October 2, 2009, Kyoto, Japan. New York: IEEE Press, 2009: 2201-2208.