

天空优化的数字图像暗通道先验去雾算法

曾致远 **, 周亚同 *, 池越, 史芳宁

河北工业大学电子信息工程学院, 天津 300401

摘要 针对暗通道先验去雾算法受限于天空区域, 提出了一种天空优化的暗通道去雾算法。在原有公式的基础上, 根据天空大气光中值及天空区域的占比添加天空区域约束因子, 使其适用于天空区域的处理。同时, 在原含雾图像对透射率做引导滤波的基础上, 利用 K-均值算法聚类分割图像得到天空区域, 将天空区域的平滑结果作为新的引导图像对透射率图进行引导滤波。实验结果表明, 所提出的去雾算法相比于经典暗通道先验去雾算法, 以及现有的一些暗通道先验改进算法, 无论是在天空区域的处理、实际去雾效果, 还是在图像整体视感上都有明显改进。

关键词 图像处理; 图像去雾; 暗通道先验; 天空区域; 引导滤波

中图分类号 TP391.41; TP751.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.081010

Dark Channel Prior Dehazing Algorithm Based on Sky Optimization of Digital Image

Zeng Zhiyuan **, Zhou Yatong *, Chi Yue, Shi Fangning

School of Electronics and Information Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China

Abstract A dark channel prior dehazing algorithm based on sky-potimization is provided to deal with the problem that dark channel prior dehazing algorithm is limited to the sky region. On the basis of the original formula, the sky region constraint factor is added according to the proportion of the light median value of the sky atmospheric component and the sky region, and makes it suitable for the processing of the sky region. At the same time, the sky region is obtained by K-means clustering and segmentation image, and the smoothed result of the sky region is used as a new guide image to guide and filter the transmittance diagram based on the original haze image as the guidance filtering for transmissivity. Experimental results show that the proposed dehaze algorithm is significant improvements whether in the sky region and the actual dehaze effect, or in the overall visual perception of the image compared with the classic dark channel prior dahazing algorithm and other dark channel prior improved algorithm.

Key words image processing; image dehazing; dark channel prior; sky region; guidance filtering

OCIS codes 100.2000; 100.2960; 150.1135

1 引言

雾天环境中拍摄的图像往往模糊不清, 致使细节严重丢失。对数字图像进行快速有效的去雾处理, 能提高图像品质, 因此在户外视频监控、铁路、航空、航海等领域具有重要的应用价值。

早期的图像去雾算法有直方图均衡^[1]和基于 Retinex 理论的图像增强等^[2-3], 这类算法直接对图像进行增强亮度或调整对比度, 但去雾效果不佳。

之后通过调整对比度增强图像的算法^[4]适合于浓雾区域, 但会出现彩色失真与光晕现象。Tan 等^[4]和 Fattal 等^[5]通过对雾天图像退化模型施加适当假设和约束, 取得了一些进展, 但是利用这类方法得到的整体去雾效果同样不佳。文献[6-9]提取出彩色图像的深景从而得到无雾图像, 但需要同一幅图像在不同天气条件下的深景, 实现起来较为困难。Kopf 等^[10]利用三维模型实现去雾, 但这种方法需用户估计深景图, 实用性差。

收稿日期: 2018-02-08; 修回日期: 2018-03-19; 录用日期: 2018-03-21

基金项目: 国家自然科学基金(61401307)、河北省科学技术研究与发展项目(11213565)、河北省引进留学人员资助(CL201707)

* E-mail: zyt@hebut.edu.cn; ** E-mail: zengzhiyuan716@163.com

He 等^[1]提出了一种暗通道先验去雾算法(下文简称 He 算法),其发现非天空区域的 3 个颜色通道的像素最小值总是趋于零。该算法能够实现大部分图像的去雾,但由于采用的 soft matting 技术,导致算法时间复杂度高。2010 年,He 等^[12]采用引导滤波替代 soft matting,使得去雾速度得到提升。

现在仍在不断改进 He 算法,如采用中值滤波^[13]、双边滤波^[14-16]、全局最大滤波^[17]等消除光晕,以及 Kuwahara 边缘-角点保持滤波器估计大气散射光^[18]等,提高了去雾后的保边效果,但均将暗通道先验作为前提。针对暗通道先验去雾算法对明亮区域失效以及 Halo 效应,邓莉^[19]通过模糊逻辑控制器自适应估计明亮区域的容差参数和透射率调整因子,但改善效果欠佳。针对天空区域去雾,黄宇晴等^[20]提出了一种基于图像融合与自动色阶的算法,但实现起来较为复杂。蒋建国等^[21]通过修正暗通道先验公式,来优化天空区域的去雾效果,但该算法中的一些参数是恒定的,使得去雾能力存在着局限性。沈逸云等^[22]通过求解天空区域的大气光值来优化透射率,但同时去雾结果的过渡曝光,削弱了去雾的效果。近年来,研究人员又在细节处^[23]、实时性^[24]、夜间场景^[25]等方面做出了不同程度的改进。

鉴于 He 算法及其改进算法在天空去雾效果上仍有待提升,本文提出一种天空优化的暗通道先验去雾算法。通过对天空区域进行分割,并增加天空约束因子等策略,实现对含天空图像去雾效果的整体优化。实验表明,本文算法无论是从主观上还是客观评价上,均对 He 算法的去雾效果有着不错的提升。

2 传统引导滤波与暗通道先验结合的 He 去雾算法

He 等通过对大量有雾图像的统计发现,采集到的自然场景图像中非天空区域的某个颜色通道中的像素最小值总是趋于零^[11],因此提出了暗通道先验去雾模型。

$$J^{\text{dark}}(x) = \min_{y \in \Omega(x)} [\min_{c \in \{r, g, b\}} J^c(x)] \rightarrow 0, \quad (1)$$

式中 $J^c(x)$ 为无雾图像 RGB3 个颜色通道中的暗原色, $\Omega(x)$ 表示以像素 x 为中心的窗口。再结合大气散射物理模型可得到透射率图 $t(x)$ 的估计值为

$$t(x) = 1 - \omega \min_{x \in \Omega(x)} \left[\min_{c \in \{r, g, b\}} \frac{I^c(x)}{A^c} \right], \quad (2)$$

式中: $I(x)$ 为拍摄的含雾图像; $J(x)$ 为无雾图像; A

为全球大气光成分; ω 是范围在 $[0, 1]$ 的常数因子,可以使得去雾结果保留一定程度的雾,以保证视觉效果的真实性。进一步可求得 $J(x)$ 为

$$J(x) = \frac{I(x) - A}{\max[t(x), t_0]} + A, \quad (3)$$

式中 t_0 为阈值,当 $t(x) < t_0$ 时,使 $t(x) = t_0$,从而避免 $J(x)$ 值偏大。

此外,He 采用引导滤波代替了 soft matting^[12]对透射率 $t(x)$ 进行了优化。引导滤波定义了价值函数为

$$E(a_k, b_k) = \sum_{i \in \omega_k} [(a_k I_i + b_k - p_i)^2 + \epsilon a_k^2], \quad (4)$$

式中系数可由最小二乘法得到:

$$a_k = \frac{\frac{1}{|\omega|} \sum_{i \in \omega_k} I_i p_i - \mu_k p_k}{\sigma_k^2 + \epsilon}, \quad (5)$$

$$b_k = p_k - a_k \mu_k. \quad (6)$$

以原图 I 作为引导图像,可求得输出图像 q 为

$$q_i = \frac{1}{|\omega|} \sum_{k: i \in \omega_k} (a_k I_i + b_k) = \bar{a}_l I_i + \bar{b}_l, \quad (7)$$

式中: i 和 k 为像素索引; a_k 和 b_k 为当窗口中心位于 k 时该线性函数的系数; μ_k 是原图 I 在窗口 ω_k 中的平均值; σ_k^2 是 I 在窗口 ω_k 中的方差, $|\omega|$ 是窗口 ω_k 中像素的数量; p_k 为待滤波图像 p 在窗口 ω_k 中的平均值。

3 天空优化的暗通道先验去雾算法

3.1 去雾原理

在 He 去雾算法中,由于天空区域不符合暗通道先验假设,加之在引导滤波时采用原始含雾图像作为引导,透射率在浓雾区域保留,较多的细节,导致图像在浓雾区域去雾效果不佳。以图 1(a)某原始含雾树林图像为例,利用 He 算法得到的去雾结果如图 1(b)所示,其中红色方框代表处理结果中出现彩色失真的天空区域,蓝色方框代表去雾效果不佳的浓雾区域。

针对上述不足,做了如下改进。

1) 为了获得更加精确的透射率,通过改变 He 算法中将原始含雾图像作为引导图像的做法,采用 K-均值(K-means)聚类进行图像分割。分割出天空区域,对天空区域采用高斯低通滤波做平滑处理,再利用处理结果替代原始含雾图像,并对原透射率进行引导滤波,最终得到更精细的透射率。



图 1 经典 He 算法的含雾树林图像的去雾结果。(a) 原始含雾树林图像;(b) He 算法去雾结果

Fig. 1 Dehazing results of fog forest image in classical He algorithm. (a) Fog forest image;
(b) dehazing result of He algorithm

对于 K -means 聚类,给定样本 X ,其尺寸为 $m \times n$,对于每个像素 $x(i, j)$ 均有 $i, j \leq m, n$, K -means 算法将这 $m \times n$ 个样本聚类成 k 个簇($\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_k$)。随机选取 k 个聚类中心作为 $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_k$,对于每一个样本 $x(i, j)$,根据最近邻(欧氏距离度量)计算其所属分类为

$$c^{(i,j)} = \arg \min_p \|x(i,j) - \mu_p\|^2. \quad (8)$$

对于每一类 p 重新计算该类的质心为

$$\mu_p = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n 1\{c^{(i,j)} = p\} x(i,j)}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n 1\{c^{(i,j)} = p\}}. \quad (9)$$

直至目标函数为

$$J(c, \mu) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \|x(i,j) - \mu_c\|^2. \quad (10)$$

如果小于容忍度,则停止迭代。设置容忍度为 10^{-2} 。为了更为精确的分离出天空区域,将聚类簇数设为 4,表示非天空区域到天空区域有 2 个过渡区域。聚类后再根据像素值的大小,将像素值最大的那一类定为天空区域,其他类为非天空区域,进行二值化处理从而分离出天空区域,图 2 为分割结果。



图 2 有雾图像和 K -means 聚类后经二值化处理得到的分割图

Fig. 2 Fog image and the binarization image after K -means cluster

$$Y = -351.6 + 2.5 \times A_{\text{sky}} + 608.5 \times P_{\text{sky}} - 3.4 \times A_{\text{sky}} \times P_{\text{sky}} \quad (12)$$

回归分析的结果中,决定系数 $R^2 = 0.9598$,十分接近 1,说明模型拟合优度高;另外,F 检验中 P

值为 0.003,小于所设定的显著性水平 0.05,说明 Asky、Psky 和 Y 显著相关。

3.2 去雾流程

基于对本算法的原理分析,具体去雾流程如图 3 所示。

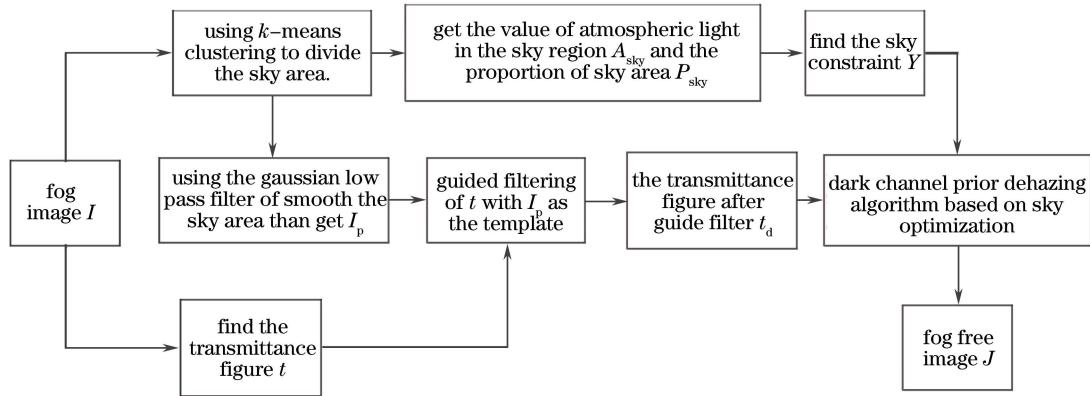


图 3 天空优化的暗通道先验去雾算法流程

Fig. 3 Flow chart of dark channel prior dehazing algorithm based on sky optimization

4 去雾实验结果

4.1 本文算法评价与分析

取多幅含雾图像分别去雾,所有实验在同一台联想牌笔记本电脑上开展,CPU 为 Intel Core m5-6Y54 1.50 GHz,内存为 4 GB,操作系统为 64 位。为定量比较去雾效果,引入均方误差(MSE)和峰值信噪比(PSNR)等指标。其定义分别为

$$M_{\text{SE}} = \frac{1}{mn} \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} \|I(i, j) - J(i, j)\|^2, \quad (13)$$

$$P_{\text{SNR}} = 20 \lg \left(\frac{M_{\text{MAX}}}{\sqrt{M_{\text{SE}}}} \right), \quad (14)$$

式中 m 和 n 代表图像的尺寸为 $m \times n$, M_{MAX} 为含雾图像的像素最大值。

图 4 为原始含雾树林图像经本文算法处理后的去雾结果,与图 1(b)中的原始含雾树林图像相比,图 1(b)中红框标识的天空区域彩色失真得到改善,而蓝框标识的浓雾区域去雾效果更佳,且其整体感觉更加自然。

公路图像的各种去雾结果对比如图 5 所示。通过图 5(c)发现,采用 K -means 聚类能较好地分割出天空区域;对比图 5(b)和(d)发现,本文算法由于采用引导滤波以及引导图像天空平滑处理,因此使透射率图变得清晰,从而得到如图 5(f)所示的较好的去雾效果;对比图 5(e)和(f)发现,本文算法相比 He 算法在天空区域有明显改进,且去雾效果也得到提升。

4.2 不同去雾算法的比较与分析

由于本文算法是针对 He 算法的改进,因此取



图 4 本文算法的含雾树林图像的去雾结果

Fig. 4 Dehazing result of fog forest image with proposed algorithm

几组天空区域占比不同的含雾图像,分别对 He 算法、加权最小二乘改进后的 He 算法、文献[21]算法、文献[22]算法与本文算法进行比较,结果如图 6 所示。

图 6(a)为 3 幅各具特点的含雾图像,其中树林图像天空区域较小,但在深景处有浓雾,建筑图像天空占据了一定比例且整体被薄雾覆盖,小径图像天空区域较大;图 6(b)为 He 算法去雾结果,可以发现 He 算法在天空区域发生了明显的彩色失真,且去雾效果不佳;图 6(c)为加权最小二乘改进 He 算法去雾结果,其利用加权最小二乘优化了透射率,使去雾效果相比 He 算法有所提升,但天空区域的失真并未改善;图 6(d)为文献[21]算法去雾结果,其修正了暗通道先验去雾公式,使之能适应天空区域去雾,但其本身并未对透射率进行很好的优化,因此虽然能使天空区域有所优化,但去雾效果与 He 算法相差不大。另外,将天空约束因子定为常数,决定

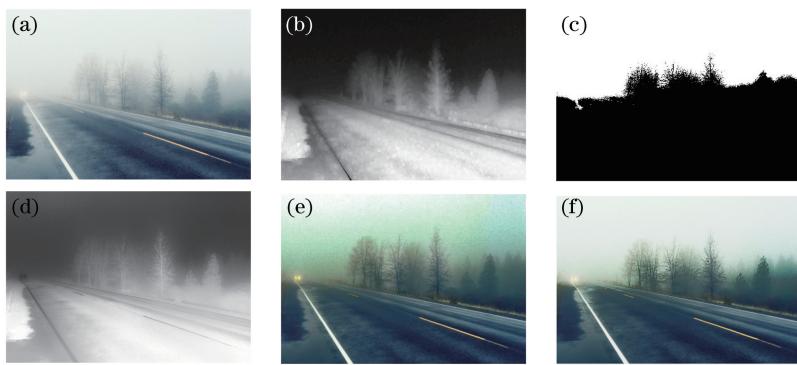


图 5 公路图像的各种去雾结果对比。(a)原始含雾公路图像;

(b)原始透射率;(c)天空分割结果;(d)经本算法优化后的透射率;(e)He 算法去雾结果;(f)本文算法去雾结果

Fig. 5 Comparison of the dehazing result of road images. (a) Original fog road image; (b) original transmission diagram; (c) sky segmentation result; (d) transmission diagram after optimized by proposed algorithm; (e) dehazing result by He's algorithm; (f) dehazing result by proposed algorithm

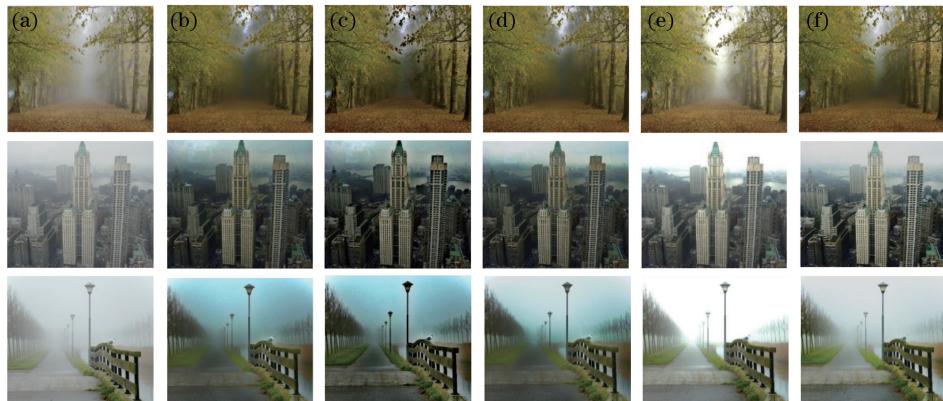


图 6 不同算法结果对比。(a)含雾图像;(b) He 算法;(c)加权最小二乘改进 He 算法;

(d)文献[21]算法;(e)文献[22]算法;(f)本文算法

Fig. 6 Comparison of different algorithms. (a) Haze image; (b) He's algorithm; (c) weighted least squares improved He's algorithm; (d) Ref. [21] algorithm; (e) Ref. [22] algorithm; (f) proposed algorithm

其不具有普适性;图 6(e)为文献[22]算法去雾结果,该算法通过重新估计大气光值,使天空区域较好还原,但不难发现去雾后天空区域亮度偏高,图像中以天空为背景的内容被高亮度覆盖,从而导致去雾效果不佳。图 6(f)为本文算法去雾结果,相比之下,本文算法采用图像自身的特征确定天空约束因子,能很好的处理天空区域,且适用范围广,又通过

结合天空分割和引导滤波的方法优化了透射率,使去雾效果得到很好的提升。

上述树林、建筑、小径、公路 4 幅含雾图像分别采用 He 算法、加权最小二乘改进 He 算法、文献[21]算法、文献[22]算法和本文算法去雾,将去雾后的 M_{SE} 和 P_{SNR} 值列于表 1 中。表中粗体为不同算法对同一幅图像去雾处理后的 P_{SNR} 最大值和 M_{SE} 最小值。

表 1 4 幅图像采用不同算法去雾后的定量评价指标值

Table 1 Quantitative evaluation of four images' dehazing results in different algorithm

Image	P_{sky}	He's algorithm		Weighted least squares improved algorithm		Ref. [21] algorithm		Ref. [22] algorithm		Proposed algorithm	
		M_{SE}	P_{SNR}	M_{SE}	P_{SNR}	M_{SE}	P_{SNR}	M_{SE}	P_{SNR}	M_{SE}	P_{SNR}
Forest	0.12	1775.5	15.6	767.5	19.4	2175.8	14.7	1095	17.7	1452.1	16.5
Building	0.29	3482.7	12.7	1112.8	17.7	3160.1	13.1	6854	9.8	982.6	18.2
Path	0.53	3920.1	12.2	1193.9	17.4	3408.7	12.8	12421	7.2	622.2	20.2
Road	0.49	3038.1	13.3	935.2	18.5	2342.4	14.3	10377	8.0	324.4	23.0

分析表 1 可知:1)本文算法得到的去雾结果 P_{SNR} 值,从整体上看大于其它算法的 P_{SNR} 值,而 M_{SE} 值从整体看小于其他算法的 M_{SE} 值。即本文算法得到的去雾图像整体失真较小;2)针对树林图像这类天空区域较小的图像,本文算法虽然较 He 算法有提升,但优势并不明显。而天空区域面积占比越大,本文算法的优势越明显;3)文献[21]算法由于将天空约束因子定为常数,使得去雾效果稳定性较低。

表 2 4 幅图像采用不同算法的去雾耗时

Table 2 Four images' dehazing time-consuming in different algorithms

Image	Size / (pixel \times pixel)	He's algorithm	Weighted least squares improved algorithm	Ref. [21] algorithm	Ref. [22] algorithm	Proposed algorithm
Forest	433 \times 577	2.62	35.72	3.49	3.44	4.74
Building	766 \times 786	4.32	97.68	5.34	8.60	8.92
Path	1280 \times 1600	13.53	376.13	17.38	23.88	29.41
Road	1080 \times 1920	13.30	328.34	15.12	22.72	27.11

分析表 2 可知:1)对于不同尺寸的图像,所列出的 He 改进算法的耗时均大于原 He 算法,本文算法在所列 He 改进算法中去雾耗时略微偏高,但还是远低于加权最小二乘改进 He 算法;2)加权最小二乘改进 He 算法在优化透射率过程中,由于需求解非线性方程组而使其耗时长,本文算法能较快优化透射率,且效果从整体上优于加权最小二乘改进 He 算法;3)本文算法虽然耗时略高于文献[21]算法与文献[22]算法,但结合去雾的整体效果来看,本文算法是通过牺牲少许时间复杂度,换取去雾效果大幅提升。

5 结 论

提出了一种天空优化的暗通道先验去雾算法。采用天空分割,求出含雾图像的天空大气光中值和天空区域的占比,再引入天空约束因子,优化了 He 算法对天空区域的去雾效果;针对含雾图像,分区域平滑后进行引导滤波,优化了透射率,从而获得了更好的去雾效果。通过理论分析与实验结果对比,得出如下结论:1)本文算法与 He 算法相比,能弥补天空区域的彩色失真,且去雾效果较好;2)与 He 改进算法相比,无论是在天空区域的处理上,还是去雾效果上均有优势,且针对不同类型的含雾图像,本文算法均能展现出较好的去雾性能;3)本文算法在牺牲少量时间复杂度的情况下,大幅提升了去雾效果,且扩大了暗通道先验去雾算法的适用范围。上述结论对于暗通道先验去雾以及其他去雾算法的研究具有一定指导意义。下一步可通过大量实验,进一步得到天空约束因子 Y 与天空大气光中值 A_{sky} 、天空

低,对于不同的图像去雾效果表现时好时坏;4)文献[22]算法的去雾结果虽然得到了明亮的天空区域,但颜色饱和度的过度提升带来了一定程度的颜色失真问题,若用 M_{SE} 和 P_{SNR} 指标评价该算法,可以看出去雾图像整体失真较大。

表 2 给出了 4 幅含雾图像分别采用 He 算法、加权最小二乘改进 He 算法、文献[21]算法、文献[22]算法和本文算法的去雾耗时对比。

表 2 4 幅图像采用不同算法的去雾耗时

Table 2 Four images' dehazing time-consuming in different algorithms

占比 P_{sky} 等参数更精确的函数关系。另外,可借助更精细的手段对含雾图像中天空区域进行分割。

参 考 文 献

- [1] Luo Y X. Study on an image enhancement method of low contrast image in fog day[D]. Tianjin: Tianjin University, 2005.
- [2] Chen W. Research on an image enhancement algorithm based on Retinex theory [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology.
- [3] Chen R. Based on Retinex theory image enhancement algorithm research [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2006.
- [4] Wang R G, Zhu J, Yang wanting T, et al. Local multiscale Retinex algorithm based on illumination segmentation[J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(5): 1181-1186.
- [5] Wang R G, Zhu J, Yang wanting T, et al. Local multiscale Retinex algorithm based on illumination segmentation[J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(5): 1181-1186.
- [6] 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.
- [7] Fattal R. Single image dehazing [J]. ACM Transactions on Graphics, 2008, 27(3): 72.
- [8] Narasimhan S G, Nayar S K. Chromatic framework for vision in bad weather[C] // Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2000: 598-605.

- [7] Narasimhan S G, Nayar S K. Vision and the atmosphere[J]. International Journal of Computer Vision, 2002, 48(3): 233-254.
- [8] Narasimhan S G, Nayar S K. Interactive Deweathering of an image using physical models [C]// Proceedings of IEEE Workshop on Color and Photometric Methods in Computer Vision, 2003: 8799.
- [9] Narasimhan S G, Nayar S K. Contrast restoration of weather degraded images[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2003, 25(6): 713-724.
- [10] Kopf J, Neubert B, Chen B, et al. Deep photo: model-based photograph enhancement and viewing [J]. ACM Transaction on Graphics, 2008, 27(5): 116.
- [11] He K M, Sun J, Tang X O. Single image haze removal using dark channel prior [J]. Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2011, 33(12): 2341-2353.
- [12] He K M, Jian S, Tang X O. Guided image filtering [C]. 11th European Conference on Computer Vision, 2010: 1-14.
- [13] Gibson K B, Vo D T, Nguyen T Q. An investigation of dehazing effects on image and video coding [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2012, 21(2): 662-673.
- [14] Pang C Y, Ji X Q, Sun L N, et al. An improved method of image fast defogging [J]. Acta Photonica Sinica, 2013, 42(7): 872-877.
- [15] Gan J J, Xiao C X. Fast image dehazing based on accurate scattering map [J]. Journal of Image and Graphics, 2013, 18(5): 583-590.
- [16] Sun W. A new single-image fog removal algorithm based on physical model[J]. International Journal for Light and Electron Optics, 2013, 124(21): 4770-4775.
- [17] Zhang B B, Dai S K, Sun W Y. Fast image haze-removal algorithm based on the prior dark-channel [J]. Journal of Image and Graphics, 2013, 18(2): 184-188.
- [18] Wang J D, Zhang W T, Wang Z R, et al. A fast image aerial dehazing algorithm[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2013, 34(3): 636-643.
- 王敬东, 张文涛, 王子瑞, 等. 一种快速航空图像去雾算法[J]. 航空学报, 2013, 34(3): 636-643.
- [19] Deng L. Adaptive image dehazing for bright areas based on global dark channel prior [J]. Optics and Precision Engineering, 2016, 24(4): 892-901.
- 邓莉. 针对明亮区域的自适应全局暗原色先验去雾[J]. 光学精密工程, 2016, 24(4): 892-901.
- [20] Huang Y Q, Ding W R, Li H G. Haze removal method for UAV reconnaissance images based on image enhancement[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2017, 43(3): 592-601.
- 黄宇晴, 丁文锐, 李红光. 基于图像增强的无人机侦察图像去雾方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2017, 43(3): 592-601.
- [21] Jiang J G, Hou T F, Qi M B. Improved image on image haze removal using dark channel prior [J]. Journal of Circuits and Systems, 2011, 16(2): 7-12.
- 蒋建国, 侯天峰, 齐美彬. 改进的基于暗原色先验的图像去雾算法[J]. 电路与系统学报, 2011, 16(2): 7-12.
- [22] Shen Y Y, Shao Y Q, Liu C X, et al. Integration sky detection with texture smoothing for image defogging[J]. Journal of Image and Graphics, 2017, 22(7): 0897-0905.
- 沈逸云, 邵雅琪, 刘春晓, 等. 结合天空检测与纹理平滑的图像去雾[J]. 中国图象图形学报, 2017, 22(7): 0897-0905.
- [23] Liu K, BiD Y, Wang S P, et al. A single image dehazing based on sparse feature [J]. Acta Optics 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.
- [24] Guo H, XuX T, Li B. Study on image dehazing method based on dark channel prior[J]. Acta Optics Sinica, 2018, 38(4): 0410002.
- 郭翰, 徐晓婷, 李博. 基于暗原色先验图像去雾方法的研究[J]. 光学学报, 2018, 38(4): 0410002.
- [25] 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.