

基于边界限制的自适应双边滤波单幅图像去雾算法

胡薇^{1,2}, 高银^{1*}

¹中国科学院海西研究院泉州装备制造研究所, 福建 泉州 362000

²中北大学电气与控制工程学院, 山西 太原 038507

摘要 传统图像去雾算法在处理亮度不均匀区域时可能会出现光晕现象,为了解决该问题,提出了一种基于边界限制的自适应双边滤波去雾方法。通过直方图分析方法,获得了明亮区域分割的阈值点,进而实现对明亮区域的分割,并求取了全局大气背景光的值。构造了自适应边界限制方法,获取了初始透射率图像,通过优化的自适应快速双边滤波方法对透射率图像进行了优化。运用改进的暗原色理论方法,获取最终的去雾结果。通过主观和客观实验分析,可得该方法在视觉效果和效率方面优于当前的去雾方法。

关键词 机器视觉; 图像去雾; 明亮区域分割; 边界约束; 自适应双边滤波

中图分类号 TP751.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.241505

Single Image Dehazing Method Based on Self-Adaptive Bilateral-Filtering with Boundary Restriction

Hu Wei^{1,2}, Gao Yin^{1*}

¹Quanzhou Institute of Equipment Manufacturing, Haixi Institute, Chinese Academy of Sciences, Quanzhou, Fujian 362000, China;

²College of Electrical and Control Engineering, North University of China, Taiyuan, Shanxi 038507, China

Abstract Traditional image dehazing algorithms usually appear halo phenomenon when processing regions with uneven brightness. In order to solve this problem, an adaptive bilateral filtering dehazing method based on boundary constraint is proposed. First, we use the histogram analysis method to obtain the threshold of bright region segmentation, thereby getting the global atmospheric background light. Second, a self-adaptive boundary limitation method is constructed to obtain the initial transmission image. The transmission map is optimized by an improved self-adaptive fast bilateral filtering method. Finally, the improved dark primary color theory method is used to obtain the final dehazing result. Through subjective and objective experimental analysis, we find that the proposed method is relatively superior to current dehazing methods in terms of visual effects and efficiency.

Key words machine vision; image dehazing; sky region segmentation; boundary restriction; adaptive bilateral-filtering

OCIS codes 150.1135; 100.2980; 280.1310;

1 引言

雾是一种自然现象,随着相机的诞生,户外图像的采集一直受其干扰^[1]。在有雾的天气,图像发生对比度改变和颜色退化,户外的交通监控、地形勘探和智能导航等所采集的图像信息被严重干扰和破坏。因此,对于户外活动,雾天图像的复原具

有重要意义。目前,雾天图像处理理论一般分为基于像素、基于邻域和基于变换的理论,主要的图像处理方法分为基于图像增强的方法和基于复原的理论方法。

基于复原的理论方法主要集中在暗原色理论(DCP)方面^[2-6]。He等^[2]基于先验方法提出暗原色先验去雾方法,但是受先验性的限制,复原后的图

收稿日期: 2020-04-09; 修回日期: 2020-05-11; 录用日期: 2020-06-17

基金项目: 泉州市科技计划(2019C009R)

*E-mail: yngaoyin@163.com

像在明亮区域易出现颜色失真、图像整体亮度降低等问题。之后,很多学者对暗原色理论进行不断改进。针对明亮区域的光晕现象,Meng等^[7]运用散射立方的方法替代先验估计,求出初始的暗通道图像,该方法虽然创新性地求取了初始透射率图像,但复原后的图像在明亮区域会出现光晕现象。Gao等^[8]通过对明亮区域进行分割,求取了全局大气背景光,但该处理过程中引入了高斯相对滤波,使得算法复杂度较高。针对复原后图像的亮度损失问题,近年来,图像融合被引入到复原领域,Zhao等^[9]通过融合的方法达到去雾的目的。Hu等^[10]还提出了照明分解算法和光照补偿算法以得到高质量的除雾图像。以上各种理论方法可对暗原色理论进行修正,在特定的雾天环境下可取得较好的效果,但是均存在一定的问题,如算法复杂度高、实时性低、视觉效果不理想等。

为了解决亮度畸变的问题,运用雾天图像的直方图特性对明亮区域进行了分割,以准确获得不同的全局大气背景光。为了减少光晕伪像,提出了一种基于边界限制的快速自适应双边滤波来优化传输。为了减少计算开销,使用图像缩放的方法进行传输。

本文所提出的方法的主要贡献为:1)通过直方图分析的方法有效地获取全局大气背景光,解决图像的亮度失真问题;2)通过构造基于边界限制的快速自适应双边滤波来优化透射率图像,减少光晕现象;3)结合改进的DCP方法改善图像去雾的视觉效果。

2 大气散射模型

在计算机视觉和图形计算领域,DCP理论可以描述为^[2,11]

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

式中: $I(x)$ 为从摄像机观察或接收到的图像; $J(x)$ 为复原后的图像; $t(x)$ 为透射率图像; A 为全局大气背景光。

在DCP模型中,可通过导向滤波对(1)式进行优化:

$$t(x) = 1 - \omega \cdot I_{\min}(x), \quad (2)$$

式中: $I_{\min}(x) = \min_{c \in \{r, b, g\}} [\min_{y \in \Omega(x)} I_c(y)/A]$, 其中 $I_c(y)$ 为单通道RGB图像; ω 为调节复原残留雾气的参数, $\omega \in [0, 1]$ 。

在一幅图像中,最亮的像素点值更加接近于全局大气背景光的像素值, A 为暗原色中亮度为最大亮度 0.1% 的像素的均值。通过求取的全局大气背景光 A 和透射率图像 $t(x)$ 得到无雾的图像为

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

式中: t_0 是容差系数,用于防止分母为 0。

3 本文算法

本文提出了边界限制的自适应双边滤波的方法,以优化透射率图像,解决了图像中明亮区域的光晕现象。为了进一步提高算法的效率,本文优化了DCP模型,进一步提高了复原图像的质量。

3.1 全局大气背景光的获取

为了解决亮度损失的问题,提出了一种新的全局大气背景光估计方法。通过对经典的DCP算法进行分析,发现全局大气背景光值的准确估计影响着复原图像的亮度和图像的视觉感。因此,有效地估计全局大气背景光对于改善雾图像恢复的视觉效果具有很重要的作用。

在对大量的雾天图像进行直方图分析的过程中,研究者发现分割明亮区域的阈值存在于左边第一个波谷的位置,采用局部最小值求取方法获取该阈值,从而可对图像进行分割,并求取全局大气背景光存在的范围。首先,对每个通道图像 $h_c(x)$ 的直方图进行高斯滤波的平滑处理,然后通过局部最小值方法获得阈值:

$$\begin{cases} f_c(x) = h_c(x) * g(x) \\ a_c = \arg \max_{x \in [0, 255]} (x \mid f'_c(x) = 0, f''_c(x) < 0) \end{cases}, \quad (4)$$

式中: $*$ 表示卷积; $g(x)$ 是高斯滤波器; a_c 表示用于分割雾图像的每个通道中明亮区域的阈值, $c \in \{r, g, b\}$ 。对于每个通道,可以利用 a_c 获得相应的分割图像,如图 1 所示。

为了更有效地估算全局大气背景光 A 的范围,设计了新的求 A 的方法。设 A_i 是包含 A_1, A_2, A_3 三种值的全局大气背景光的值:

$$A_i = 255 \left(1 - \frac{N_{ki}}{s_i} \right), \quad i \in \{1, 2, 3\}, \quad (5)$$

式中: s_i 为输入图像中相应通道像素的总和; N_{ki} 为输入图像中亮度区域的像素数。

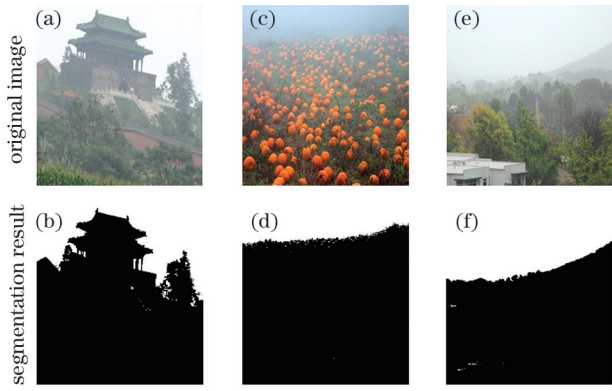


图1 不同类型的明亮区域分割结果。(a)(b)城墙原图与分割结果图；(c)(d)花园原图与分割结果图；(e)(f)山脉原图与分割结果图

Fig. 1 Segmentation results of different types of bright regions. (a)(b) Original image and segmentation result of wall; (c)(d) original image and segmentation result of garden; (e)(f) original image and segmentation result of mountain

3.2 透射率图像的优化

采用固定边界限制求取的初始透射率图像虽然在一定程度上避免了暗通道图像的“阶梯”效应,但如果直接采用该图像去复原,会出现一定的光晕现象,尤其是在浓雾和亮度明显变化的区域^[7]。为了解决这个问题,本文提出了一种基于边界限制的自适应双边滤波方法来优化透射率图像。

为了提高处理的效率,首先将输入图像缩小一半。根据辐射立方体的定义,边界约束定义为

$$t_i(x) = \min \left\{ \max_{c \in [r, g, b]} \left[\frac{A_i - I_c(x) \downarrow^n}{A_i - C_0^c(x)}, \frac{A_i - I_c(x) \uparrow^n}{A_i - C_1^c(x)} \right] \right\}, \quad (6)$$

式中: $t_i(x)$ 是边界约束后的图像,即初始的透射率图像; $C_0^c(x)$ 代表图像中每个通道的最小值, $C_0^c(x) = \min_{c \in [r, g, b]} [I_c(x) \downarrow^n]$; $C_1^c(x)$ 表示图像中每个通道的最大值, $C_1^c(x) = \max_{c \in [r, g, b]} [I_c(x) \downarrow^n]$; $\downarrow n$ 是下采样运算符。

针对边界约束后的初始透射率图形,设计了一种自适应双边滤波的方法,以优化初始透射率图像,其泛函为

$$\tilde{t}(x) = \text{FABF}[t_i(x)], \quad (7)$$

式中:FABF是自适应双边滤波的平滑方法。根据文献[12],定义

$$\tilde{t}(i) = \eta(i)^{-1} \sum_{j \in \Omega} \omega(j) f_i[t_i(i-j) - \theta(i)] \times t_i(i-j), \quad (8)$$

$$\eta(i) = \sum_{j \in \Omega} \omega(j) f_i[t_i(i-j) - \theta(i)], \quad (9)$$

式中: i 和 j 分别为当前的像素点和像素 j 所在窗口中的像素点; $\omega(j)$ 为窗口内的高斯值, $\omega(j) = \exp\left[-\frac{\|j\|^2}{2\rho^2}\right]$,其中 ρ 为窗口的大小; $\theta(i)$ 为窗口的中心; f_i 为高斯函数; $t_i(i-j)$ 为窗口中像素点 j 与当前像素点 i 之间的高斯距离; $\sigma(i)$ 为宽度; Ω 为一个以 $\theta(i)$ 为中心的窗口。窗口通常设置为 $\Omega = [-3\rho, 3\rho]$ 。

$$\varphi_i(t) = \exp\left[-\frac{t^2}{2\sigma(i)^2}\right], \quad (10)$$

式中: $\varphi_i(t)$ 为高斯卷积核。求解该泛函时,采用文献[13]提出的解析逼近方法。

3.3 图像去雾

基于以上求解获得的 A 和 $\tilde{t}(x)$ 以及暗原色理论方法,获得最终的去雾效果。利用暗原色理论模型进行处理后,会造成图像的亮度损失,因此在对透射率图像进行优化后,引入了Gamma校正方法以修正模型:

$$J(x) = [I(x) - A] / \{\max[\tilde{t}(x) \uparrow^n, \tilde{t}_0]\}^\gamma + A, \quad (11)$$

式中: $J(x)$ 是复原后的结果; γ 是Gamma校正参数,其取值在 $[0, 1]$ 范围内; \tilde{t}_0 为容差系数,用于防止优化后图像出现较小的值; $\uparrow n$ 是升采样运算符。

4 实验结果与分析

本文实验平台为3.60 GHz PC, Matlab R2016和Windows7操作系统,为了评估所提方法,将其分别与He等的方法^[2]、Zhao等的方法^[9]、Hu等的方法^[10]进行比较。为了定量评估复原性能,采用了三个客观指标和无参考、全参考图像评价方法来评估相应的结果^[14]。三个客观评价指标分别为新的可见边缘的比率 e 、可见边缘处梯度的平均比率 \bar{r} 和饱和黑色或者白色像素点的百分比 Σ ^[15]。此外,在所提出的方法中使用的参数被初始化为: $\tilde{t}_0 = 0.001$, $\gamma = 0.95$ 。

4.1 算法的主观效果评估

图2是自然场景雾天图像的原图及复原结果。其中图2(a)是原图,图2(b)是He等方法的复原结果,图2(c)是Zhao等方法的复原结果,图2(d)是Hu等方法的复原结果,图2(e)是本文方法的结果。为了更直观地进行描述,把4幅图片分别命名为橘子林、草地、建筑物和树林。

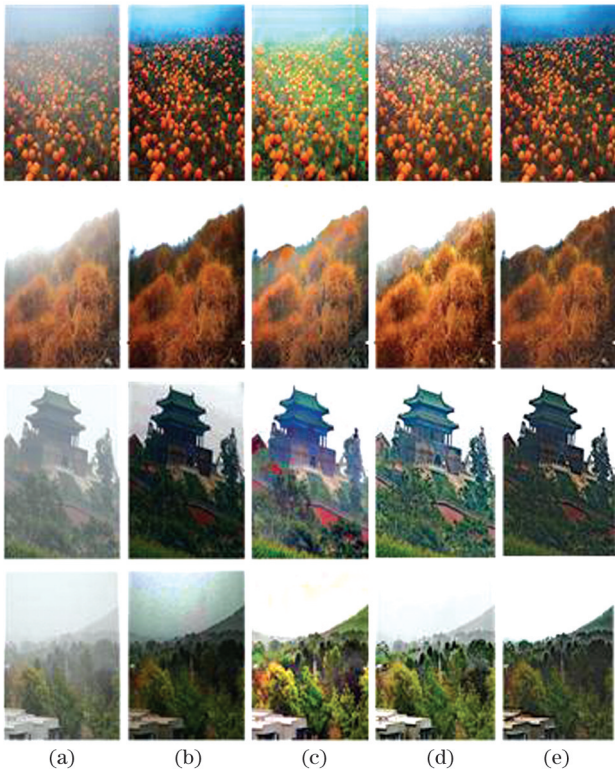


图2 自然图像去雾结果。(a)原图;(b) He 等的方法;
(c) Zhao 等的方法;(d) Hu 等的方法;(e)本文方法
Fig. 2 Dehazing results of natural images. (a) Original
images; (b) He's algorithm; (c) Zhao's
algorithm; (d) Hu's algorithm; (e) proposed
algorithm

图2中,He 等的方法与 Zhao 等的方法能实现去雾效果,但是复原后图像的视觉效果大不相同。He 等的方法可去除大部分雾,但导致图像亮度显著降低,产生颜色畸变现象,例如建筑物和最后一张远处山顶处的明亮区域出现光晕伪影。Zhao 等的方法虽然很大程度地提高了图像的亮度,但光晕问题也没有得到解决,4 幅图像被过度增强,造成了局部颜色畸变严重。Hu 等的方法能去除部分雾,但是对远处的景物进行去雾时出现了伪影,颜色失真。

与以上几种方法相比,本文方法很好地提高了图像的亮度,较亮区域没有出现色彩畸变,并且有效地提高了复原图像的视觉感。

图3是合成图像的去雾结果。其中,图3(a)是原图,图3(b)是 He 等方法的复原结果,图3(c)是 Zhao 等方法的复原结果,图3(d)是 Hu 等方法的复原结果,图3(e)是本文方法的复原结果,图3(f)是真实无雾图像。为了更直观地进行描述,把4 幅图片分别命名为马路、后花园、教堂和草坪。

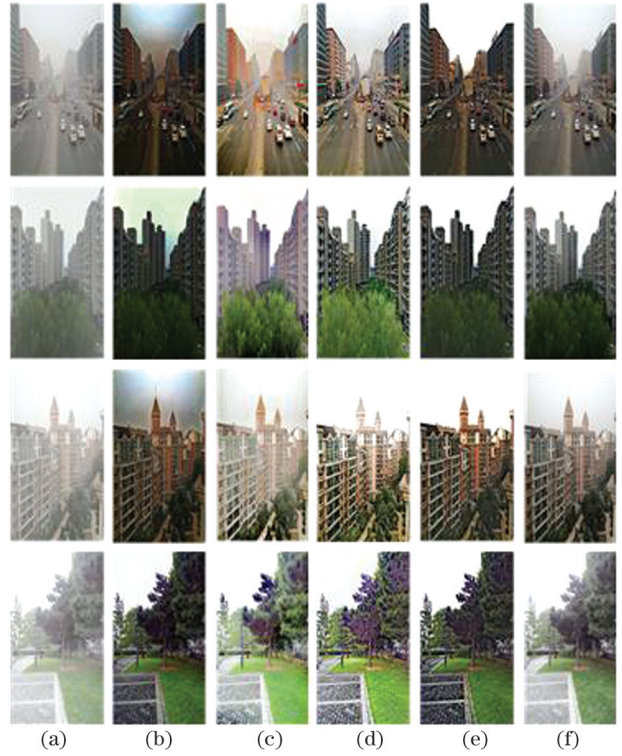


图3 合成图像的去雾结果。(a)原图;(b) He 等的方法;
(c) Zhao 等的方法;(d) Hu 等的方法;(e)本文方法;
(f)真实无雾图像
Fig. 3 Dehazing results of synthetic images. (a) Original
images; (b) He's algorithm; (c) Zhao's algorithm;
(d) Hu's algorithm; (e) proposed algorithm;
(f) dehazed images

在图3中,利用 He 等的方法处理后,图像亮度明显降低,而且出现明显的光晕伪影,这表明 He 等的方法虽然经典,但也存在缺陷。Zhao 等的方法处理合成图像的表现比处理自然图像的表现稍好,但由于增强过度,依然有色彩失真的问题未得到解决,出现图像颜色过亮的现象。Hu 等的方法对教堂图片的增强有点过度。

与其他三种方法的结果相比,本文所得的结果没有出现过饱和现象,图像的对比度得到了较大的提高,图像较为接近人眼可视化效果。正如图3(e)所示,图像中的明亮区域清晰,树木和建筑等的细节都得到适度增强,实现了最佳的视觉效果。本文方法在很好地去雾的同时,可以适度地增强对比度,几乎不会出现光晕现象,且色彩还原度较好,对图片的细节保留得也较好,总体效果比其他三种方法好。

4.2 算法的客观评价

为了对除雾性能进行定量评估,使用三个客观指标^[14-15]来评估图2和图3中的相应结果,如表1

和 2 所示。其中, e 和 \bar{r} 值越大或 Σ 值越低, 说明图像越清晰。NR-FQA (no-reference focus quality assessment) 值越小说明图像视觉效果越好。SSIM 值越接近于 1, 表明该图像越接近于真实无雾图像。

从表 1 可看出, 在 e , \bar{r} 和 Σ 方面, Zhao 等方法得到的结果最差, 且在视觉效果上, 图像增强过度

导致颜色畸变。He 等和 Hu 等方法分别得到 2 组较好的效果。本文方法在 4 类图像上都有很好的处理效果。对于 NR-FQA 值, He 等的方法出现 1 次较好的结果, 其次是 Zhao 等的方法和 Hu 等的方法, 各出现 2 次较好的结果, 本文方法出现了 3 次较好的结果, 这点和主观评价一致。与以上方法相比, 本文方法在清晰度和视觉效果上均排在首位。

表 1 自然图像的算法评估

Table 1 Algorithm evaluation for natural images

Image in figure 2	Algorithm	e	Σ	\bar{r}	NR-FQA
Orange forest	Without algorithm processing	—	—	—	-0.73
	Algorithm in Ref. [2]	0.26	0	2.04	-4.65
	Algorithm in Ref. [9]	0.08	0	1.93	2.89
	Algorithm in Ref. [10]	0.08	0	1.73	1.71
	Proposed algorithm	0.33	0	1.95	-4.09
Grassland	Without algorithm processing	—	—	—	-5.45
	Algorithm in Ref. [2]	0.27	0	1.32	-8.98
	Algorithm in Ref. [9]	-0.01	0.040	1.36	-11.23
	Algorithm in Ref. [10]	0.26	0	1.39	-16.23
	Proposed algorithm	0.26	0	1.47	-9.43
Building	Without algorithm processing	—	—	—	10.15
	Algorithm in Ref. [2]	1.54	0	1.62	-20.70
	Algorithm in Ref. [9]	1.12	0	2.48	-23.07
	Algorithm in Ref. [10]	1.19	0.005	1.77	-20.92
	Proposed algorithm	1.30	0	1.94	-32.02
Forest	Without algorithm processing	—	—	—	20.67
	Algorithm in Ref. [2]	0.81	0	1.63	13.74
	Algorithm in Ref. [9]	0.53	0	2.54	2.23
	Algorithm in Ref. [10]	0.41	0.020	2.13	-9.13
	Proposed algorithm	0.70	0	2.00	-10.87

从表 2 可以看出, 与其他方法相比, 本文方法的 4 个指标均相对较好, SSIM 最大值占比最多, 清晰

度和视觉感值较大。

表2 合成图像的算法评价
Table 2 Algorithm evaluation of synthetic images

Image in figure 3	Algorithm	e	Σ	\bar{r}	SSIM
Road	Without algorithm processing	—	—	—	—
	Algorithm in Ref. [2]	1.01	0.07	1.65	0.66
	Algorithm in Ref. [9]	0.51	0.10	2.09	0.84
	Algorithm in Ref. [10]	0.41	0.03	2.55	0.84
	Proposed algorithm	0.66	0.09	2.45	0.84
Garden	Without algorithm processing	—	—	—	—
	Algorithm in Ref. [2]	0.51	0.02	1.32	0.84
	Algorithm in Ref. [9]	0.40	0.08	1.96	0.80
	Algorithm in Ref. [10]	0.43	0.20	1.62	0.74
	Proposed algorithm	0.36	0.12	1.81	0.90
Church	Without algorithm processing	—	—	—	—
	Algorithm in Ref. [2]	0.32	0	1.53	0.83
	Algorithm in Ref. [9]	0.20	0.06	1.86	0.85
	Algorithm in Ref. [10]	0.15	0.08	1.83	0.83
	Proposed algorithm	0.17	0.09	2.48	0.91
Grassland	Without algorithm processing	—	—	—	—
	Algorithm in Ref. [2]	0.61	0.02	1.85	0.76
	Algorithm in Ref. [9]	0.31	0	2.04	0.87
	Algorithm in Ref. [10]	0.53	0.12	2.29	0.72
	Proposed algorithm	0.54	0.06	2.55	0.85

5 结 论

经典的暗原色理论存在较多的视觉缺陷,针对这些缺陷,提出了基于边界限制的自适应双边滤波单幅图像去雾算法。根据雾天图像的直方图特征,分割出图像中较亮的区域,进而估计出全局大气背景光,从而有效地解决了亮度损失的问题。对于透射率图像优化,设计了边界限制的自适应双边滤波来优化透射率图像,以减少复原后图像的光晕现象。最后,通过优化暗原色理论模型,进一步提高去雾的视觉效果。通过对去雾效果进行主观分析和客观实验分析,证明本文方法解决了复原后图像的色彩失真和亮度较低的问题,提高了单幅雾天图像的视觉效果。

参 考 文 献

[1] Yu J, Liao Q M. Fast single image fog removal using edge-preserving smoothing [C]//2011 IEEE

International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), May 22-27, 2011, Prague, Czech Republic. New York: IEEE Press, 2011: 1245-1248.

[2] 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.

[3] Li H Y, Yun L J, Gao Y. Fog image enhancement algorithm based on boundary-limited weighted least squares filtering [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(3): 0309002.

李红云, 云利军, 高银. 基于边界限制加权最小二乘法滤波的雾天图像增强算法[J]. 中国激光, 2019, 46(3): 0309002.

[4] Jiang Z X, Piao Y. Underwater image color compensation based on electromagnetic theory [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(8): 081006.

蒋泽新, 朴燕. 基于电磁理论的水下图像色彩补偿

- [J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(8): 081006.
- [5] 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.
- [6] Zhang S, Zhan J T, Fu Q, et al. Polarization detection defogging technology based on multi-wavelet fusion [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(12): 122602.
张肃, 战俊彤, 付强, 等. 基于多小波融合的偏振探测去雾技术 [J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(12): 122602.
- [7] 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.
- [8] Gao Y, Su Y J, Li Q M, et al. Single image dehazing via relativity-of-Gaussian [C]//2018 IEEE 4th International Conference on Computer and Communications (ICCC), December 7-10, 2018, Chengdu, China. New York: IEEE Press, 2018: 1665-1669.
- [9] Zhao D, Xu L, Yan Y H, et al. Multi-scale optimal fusion model for single image dehazing [J]. Signal Processing: Image Communication, 2019, 74: 253-265.
- [10] Hu H M, Guo Q, Zheng J, et al. Single image defogging based on illumination decomposition for visual maritime surveillance [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2019, 28(6): 2882-2897.
- [11] He K M, Sun J, Tang X O. Guided image filtering [EB/OL]. [2020-04-09]. <http://kaiminghe.com/eccv10/>.
- [12] Zhang B Y, Allebach J P. Adaptive bilateral filter for sharpness enhancement and noise removal [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2008, 17(5): 664-678.
- [13] Gavaskar R G, Chaudhury K N. Fast adaptive bilateral filtering [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2019, 28(2): 779-790.
- [14] Hautière N, Tarel J P, Aubert D, et al. Blind contrast enhancement assessment by gradient ratioing at visible edges [J]. Image Analysis & Stereology, 2011, 27(2): 87-95.
- [15] Wang Z, Bovik A C, Sheikh H R, et al. Image quality assessment: from error visibility to structural similarity [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2004, 13(4): 600-612.