

doi:10.3788/gzxb20184706.0610004

基于开运算暗通道和优化边界约束的图像去雾算法

杨红, 崔艳

(天津工业大学 理学院, 天津 300387)

摘 要: 将有雾图像分割为非天空区域和天空区域, 对于非天空区域, 提出一种优化的暗原色先验思想, 即开运算暗通道算法; 对于天空区域, 引入具有保边去噪的双边滤波算法, 提出一种改进的边界约束算法. 运用两种算法分别估计两个区域的透射率, 然后利用大气物理散射模型复原各区域, 最后合并两个无雾区域得到去雾图像. 实验结果表明, 该算法很大程度提高了有雾图像尤其是含天空的有雾图像的图片对比度, 改善了颜色失真问题.

关键词: 图像增强; 图像去雾; 天空分割; 暗通道先验; 边界约束; 双边滤波

中图分类号: TP391.41

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2018)06-0610004-7

Image Defogging Algorithm Based on Opening Dark Channel and Improved Boundary Constraint

YANG Hong, CUI Yan

(School of Science, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China)

Abstract: The fog image is divided into non-sky area and sky area. For the non-sky area, a method of optimization of dark channel prior thought, namely the opening dark channel algorithm, is presented. For the sky area, an improved boundary constraint algorithm is put forward by introducing bilateral filter algorithm which has the role of edge-preserving and denoising. The two different algorithms are utilized to estimate the more accurate transmission map in their own areas respectively. Afterwards, the two defog area can be obtained by exploiting the atmospheric physical scattering model. Finally, the haze image is restored by combining the two defog areas. The experimental results show that the proposed algorithm has greatly improve the image contrast and ameliorate the color distortion problem in haze images, especially for haze images which contain the sky area.

Key words: Image enhancement; Image defog; Sky segmentation; Dark-channel prior; Boundary constraint; Bilateral filter

OCIS Codes: 100.0100; 100.2000; 100.2980; 100.3020

0 引言

在恶劣的天气条件下, 由于大气气溶胶(悬浮的水滴、大量颗粒、雾、霾等)的吸收、散射和反射的作用, 来自场景辐射的光线发生衰减, 导致室外捕获的图像严重降质, 图像对比度下降, 颜色失真, 细节缺失, 严重影响智能交通监控系统、卫星遥感系统及人们的日常生活, 需要对获取的图像进行去雾处理. 图像去雾技术大致分为两类, 一类是基于直方图均衡化^[1]小波变换^[2]或 Retinex 算法^[3]的图像增强技术, 另一类是基于物理大气散射模型^[4]算法的图像复原技术. 图像增强的去雾算法不考虑图像退化的原因, 能有效提高图像对比度, 但会丢失部分信息. 图像复原的去雾算法基于一定的物理退化模型, 通过分析求解其逆过程, 针对性强, 更受到研究人员的关注. 比如, TAN R T 等^[5]基于无雾图像比有雾图像有更高对比度的假设提出最大化局

基金项目: 天津市应用基础及前沿技术研究计划重点项目(No.12JCZDJC27800)资助

第一作者: 杨红(1994—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为图像增强与图像复原. Email: yhyc123456@126.com

导师(通讯作者): 崔艳(1963—), 女, 副教授, 主要研究方向为图像处理算法. Email: cuiyan@tjpu.edu.cn

收稿日期: 2017-11-27; **录用日期:** 2018-03-28

<http://www.photon.ac.cn>

部对比度的方法,由于没有严格基于物理模型,复原图像颜色易于过度饱和.FATTAL R 等^[6]通过假设透射率和表面投影局部不相关,利用独立成分分析(Independent Component Analysis, ICA)来恢复图像,该算法基于颜色信息的统计特性,在浓雾天气条件下,颜色信息少,处理效果较差.TAREL J P 等^[7]假设大气耗散函数在某区域中可近似为最大值,且局部变化缓慢,利用中值滤波估计大气耗散函数,该方法计算速度快,但中值滤波器不具有良好的边缘保持能力,去雾效果一般.HE K M 等^[8]通过对大量无雾图像的统计特征观察,提出了基于暗原色先验的图像去雾算法.该算法利用最小值滤波器估计介质透射率函数,之后引入导向滤波^[9]方法细化介质透射率,结合有雾图像的大气物理模型^[4],对大多数图像有良好的去雾效果,但该算法计算复杂度高^[10],处理后的图像偏暗,对于明亮的天空区域会产生严重光晕.针对这一问题,本文根据非天空区域和天空区域的不同特点提出了分别应用于非天空区域的开运算暗通道和天空区域的改进的边界约束去雾算法,以提高图像对比度,改善天空区域颜色失真、天空和景物分界处边缘不连续的问题.

1 暗原色先验

在计算机视觉和计算机图像学中,有雾图像的大气物理模型^[4]描述为

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

式中, $I(x)$ 表示图像采集系统收集的有雾图像, $J(x)$ 为真实的无雾图像, $t(x)$ 为透射率图, A 为大气环境光值.等式右边第一项为直接衰减项,表示物体表面的反射光受到大气的散射作用后进入图像采集系统的部分,随光线传播距离的增加呈指数衰减;第二项为环境光干扰项,来源于大气粒子的散射,随光线传播距离的增加而增加.暗原色先验理论指出,在室外无雾图像的任意局部领域中, RGB 三个颜色通道至少有一个通道的亮度值非常低,以至接近于0.对于任意输入图像 $J(x)$,其暗通道先验^[8]表示为

$$J_{\text{dark}}(x) = \min_{y \in \Omega(x)} \left(\min_{c \in \{r, g, b\}} (J_c(y)) \right) \quad (2)$$

式中, J_c 是 J 的颜色通道, $\Omega(x)$ 是以 x 为中心的邻域,对式(1)左右两端取最小值操作,且假设大气环境光值 A 为正值,得

$$\min_{y \in \Omega(x)} \left(\min_c \frac{I_c(y)}{A_c} \right) = \min_{y \in \Omega(x)} \left(\min_c \frac{J_c(y)}{A_c} \right) + 1 - t(x) \quad (3)$$

实验表明,无雾图像的暗原色 J_{dark} 值非常低且接近于0.由式(3)可求得粗透射率 $\tilde{t}(x)$,为保证复原图像的真实性,引入调整因子 $w \in (0, 1]$,修正后的透射率 $\tilde{t}(x)$ 为

$$\tilde{t}(x) = 1 - w \min_{y \in \Omega(x)} \left(\min_c \frac{I_c(y)}{A_c} \right) \quad (4)$$

其中大气环境光 A 的估计方法为:首先选取 J_{dark} 中亮度最大的0.1%像素,取这些像素在原图 $I(x)$ 中对应最大亮度值作为大气环境光 A 的估计值.利用软抠图算法或导向滤波优化透射率得到 $t(x)$ ^[8].最终复原的无雾图像计算公式为

$$J(x) = \frac{I(x) - A}{\max(t(x), t_0)} + A \quad (5)$$

式中, t_0 为减少复原图像的噪声设置的下限值,取值为0.1.但该算法会使图像整体偏暗,天空区域颜色失真.利用暗通道先验去雾的效果如图1.

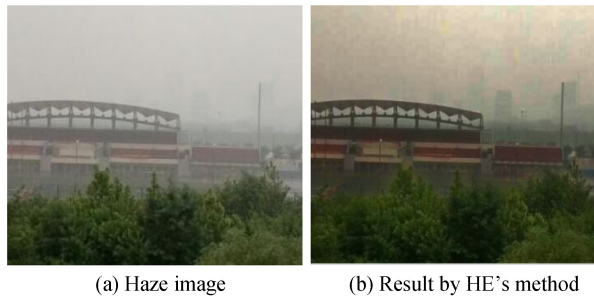


图1 暗通道去雾

Fig.1 Defog by using dark channel algorithm

2 改进的方法

通过分析有雾图像非天空区域和天空区域的特点,在暗原色先验的基础上提出了改进的方法,即在非天空区域使用开运算暗通道法,天空区域引入改进的边界约束,分别估计两个区域的大气环境光 A 和透射率 $t(x)$,利用大气物理模型^[4]导出的无雾图像计算公式式(5)复原图像,合并两个区域的无雾图像得到最终的无雾图像.改进方法的流程如图 2.

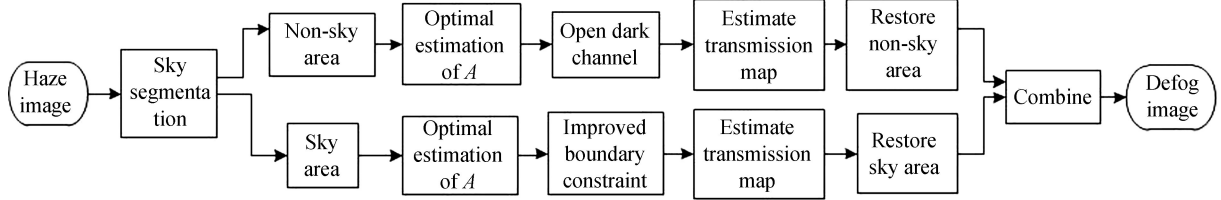


图 2 改进方法的流程

Fig.2 Flow chart of improved method

2.1 天空区域分割

通过对大量有雾图像天空区域的观察,发现天空区域具有梯度变化缓慢、亮度较高等明显特征,设计了结合有雾图像的梯度信息和形态学操作分割天空区域的方法,具体步骤为:

Step1 将输入有雾图像如图 3(a)转化为灰度图 h ,利用 Canny 算子^[11]求其边缘梯度图 t ;

Step2 利用 Otsu 算法寻找灰度图 h 和边缘梯度图 t 的最佳二值化图,分别记为 h_1, t_1 ;

Step3 计算二值图 h_1, t_1 的并运算^[12],得到天空初步分割图如图 3(b);

Step4 利用中值滤波对天空初步分割图去除噪声,滤波窗口大小选择适中,得到天空分割滤波图;

Step5 结合形态学开闭运算优化天空分割滤波图,得到最佳分割图如图 3(c);

Step6 利用四则运算,分割出原始输入图像中非天空区域如图 3(d)和天空区域如图 3(e).

天空分割部分结果如图 3.

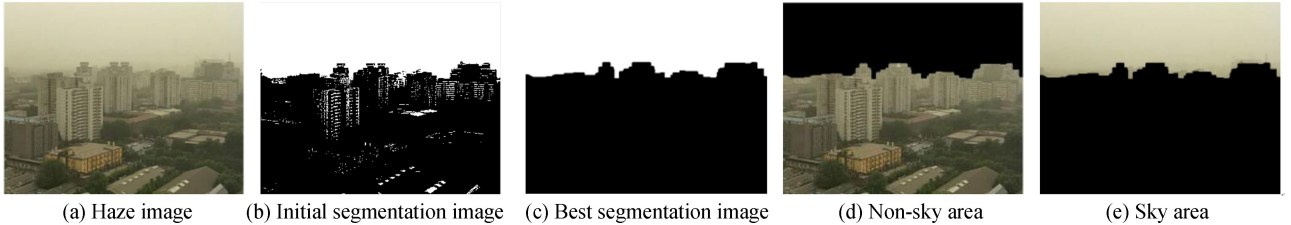


图 3 天空分割结果图

Fig.3 Results of sky segmentation

2.2 开运算暗通道复原非天空区域

针对非天空区域,为了更好地提高图像的结构相似性,提出开运算暗通道算法,由暗通道先验原理可知,任意一幅有雾图像的暗通道可定义为

$$I_{\text{dark}}(x) = \min_{y \in \Omega(x)} \{ \min_{c \in \{r, g, b\}} [I_c(y)] \} \quad (6)$$

而局部领域的最小值操作容易造成景深突变处的暗区域沿着边缘方向扩展,导致恢复的无雾图像在景深突变处出现光晕现象.为了解决这一问题,本文使用形态学开运算代替最小值滤波器,保证边缘区域不扩展.开运算暗通道^[13]对 RGB 颜色通道的最小值进行形态学开运算,计算公式为

$$I_{\text{odark}}(x) = \text{imopen} \{ \min_{y \in s(x)} \{ \min_{c \in \{r, g, b\}} [I_c(y)] \} \} \quad (7)$$

式中, $s(x)$ 为中心在像素 x 的结构元素,大小为输入图像的宽度,高度中较小值的 $1/20$ ^[14].大气环境光 A 的初步估计为 I_{odark} 中非天空区域亮度最大的像素对应的原图中亮度值的平均值^[15].非天空透射率 $t(x)$ 计算为

$$t(x) = 1 - \frac{I_{\text{odark}}(x)}{A_c} \quad (8)$$

然后按照式(5)复原非天空区域的图像.为了测试开运算暗通道的良好性能,对图 3(d)分割出的非天空区域做了如图 4 的实验.

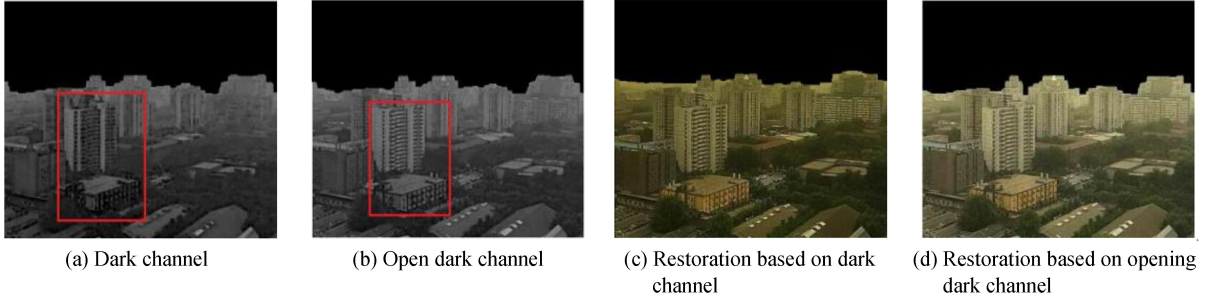


图 4 暗通道和开运算暗通道的对比
Fig.4 Comparisons of dark channel and open dark channel

由图 4 可看出最小值滤波器景深突变处的暗区域沿着边缘方向扩展,而开运算暗通道能减少部分噪声,且有良好的边缘保持性,基本保持原图的特征.

2.3 改进的边界约束复原天空区域

针对天空区域去雾容易出现颜色失真、边界模糊等问题,提出改进的边界约束算法.对有雾图像的大气物理模型进行移项变换等得到

$$t(x) = \frac{|I(x) - A|}{|J(x) - A|} \quad (9)$$

考虑到任何一幅图像的像素值是有界限的,因此设图像 $J(x)$ 的任意邻域 $\Omega(x)$ 内各颜色通道的最小、最大边界值为两个常数向量 C_0 和 C_1 ,即

$$C_0 < J(x) < C_1, \forall x \in \Omega(x) \quad (10)$$

几何学上,边界约束^[16]如图 5.

由边界约束图可知,对每一个像素点 x ,都有对应边界约束点 $J_b(x)$,所以透射率 $t(x)$ 也有边界约束,即

$$0 \leq t_b(x) \leq t(x) \leq 1 \quad (11)$$

$t_b(x)$ 是 $t(x)$ 的最小边界,计算公式为

$$t_b(x) = \min \left\{ \max_{c \in \{r, g, b\}} \left[\frac{A - I(x)}{A - C_0}, \frac{A - I(x)}{A - C_1} \right], 1 \right\} \quad (12)$$

式中,大气环境光 A 为 J_{dark} 中天空区域亮度最大的像素对应的原图中亮度值.结合最大值滤波器和形态学闭运算得到天空区域的透射率为

$$\tilde{t}(x) = \text{imclose} \left[\max_{c \in \{r, g, b\}} t_b(x) \right] \quad (13)$$

然后按照式(5)复原天空区域的图像.

该算法虽然很大程度上改进了天空区域颜色失真问题,但天空区域和非天空区域边界处容易产生光晕,双边滤波器基于局部加权平均的原理,对输入的图像进行平滑的同时,还能有效保持边界细节.本文提出改进的边界去雾算法,即引入双边滤波器进一步优化天空区域的透射率得到 $t(x)$,设透射率图像 $\tilde{t}(x)$ 中各像素点为 p ,坐标为 (x, y) ,灰度值为 T_p , q 表示像素点 p 的局部领域 Ω 中一点,经双边滤波^[17-18]优化得到最终的天空区域透射率 $t(x)$ 为

$$t(x) = \frac{1}{W} \sum_{q \in \Omega} G_{\sigma_d}(\|p - q\|) G_{\sigma_r}(T_p - T_q) \tilde{t}(x) \quad (14)$$

式中, W 为归一化因子,计算公式为

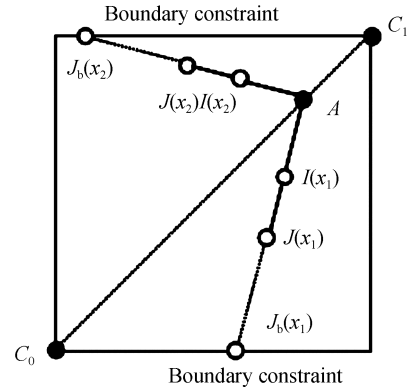


图 5 边界约束图
Fig.5 Boundary constraint map

$$W = \sum_{q \in \Omega} G_{\sigma_d}(\|p - q\|) G_{\sigma_r}(T_p - T_q) \quad (15)$$

$G_{\sigma_d}, G_{\sigma_r}$ 分别表示空间邻近度因子和灰度相似度因子.再按照式(5)复原天空区域的图像,其中大气环境光 A 的初步估计为 I_{odark} 中天空区域亮度最大的像素对应的原图中亮度值的平均值 \tilde{A} .利用自适应校正^[19]公式

$$A = (1 - m/3) \cdot \tilde{A} \quad (16)$$

得到优化估计 A ,其中 m 为天空区域像素数占整幅图的百分比.对分割出的天空区域分别运用暗通道去雾算法、边界约束算法及改进的边界约束算法,结果如图 6.

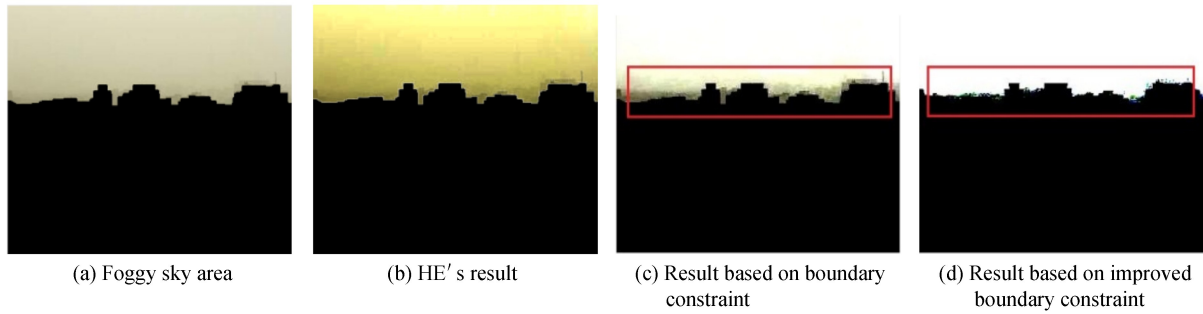


图 6 天空区域去雾效果的对比
Fig.6 Comparisons of defog image in sky area

由图 6 可看出暗通道去雾算法处理天空区域颜色失真,将天空分离开,未引入双边滤波的边界约束算法在边缘处去雾不彻底,引入双边滤波的边界约束去雾算法复原的天空区域明亮平滑而且边缘区域去雾效果显著.

3 实验结果及分析

将非天空去雾和天空区域去雾结果合并得到最终的去雾结果图.对含天空和不含天空的大量有雾图片进行了测试,实验环境为 Matlab2015a,并与 TAREL 的算法^[7]、HE 的算法^[8]及基于天空约束的相关改进算法^[12,15]进行了对比,从主观上和客观上分别对去雾效果进行评价.

3.1 主观评价

由图 7 各算法的去雾结果图像可直观看出 TAREL 的算法^[7]和 HE 的算法^[8]都存在颜色失真问题,且

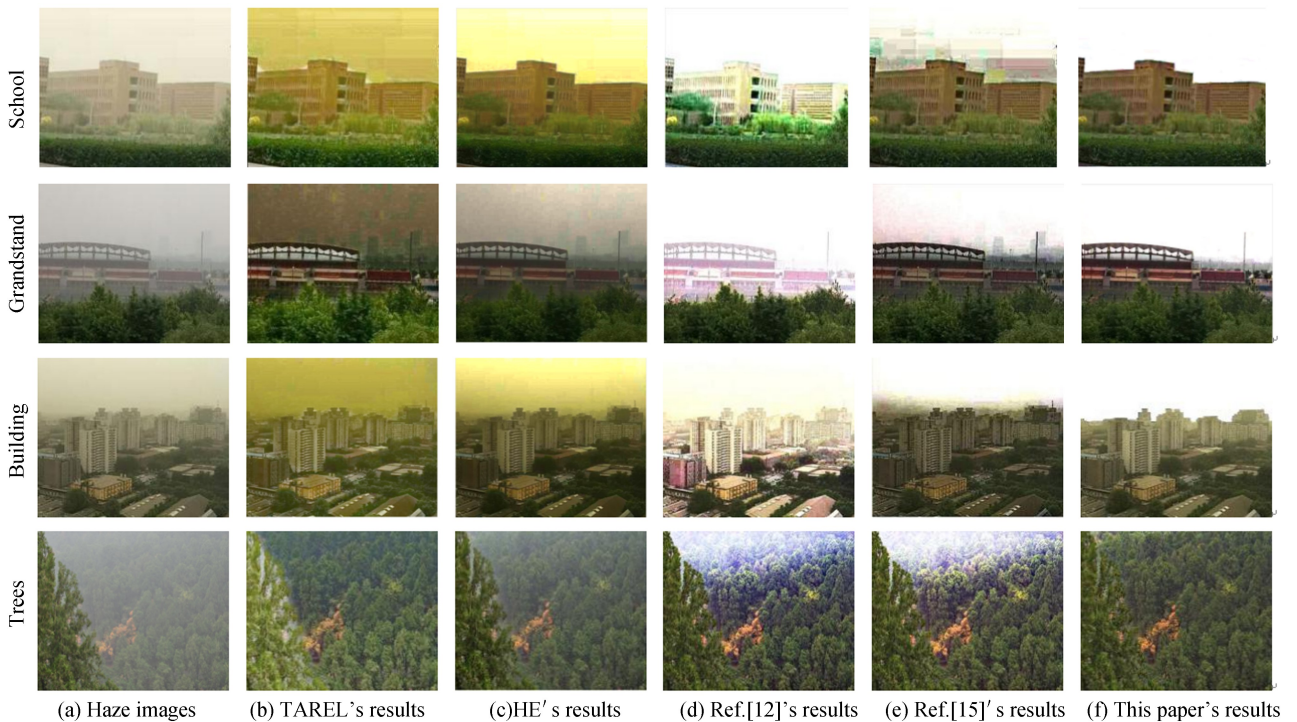


图 7 不同算法去雾结果对比
Fig.7 Comparisons of the defog results among different algorithms

TAREL 的算法^[7]还存在图像边界处处理效果不佳的问题.同时看出基于天空约束的相关算法^[12,15]存在颜色过度鲜明、边界处去雾不彻底等问题.本文算法处理天空区域明亮光滑,较其它算法有显著的改善,对不含天空的区域和图像呈现更加清晰的效果,提高了图像的对比度和可见性.

3.2 客观评价

主观评价基于人眼观察,容易受到个人因素影响,因此计算了图 7 中各图像的平均梯度(Average Gradient, AG)、信息熵(Information Entropy, IE)、复原图像前后的峰值信噪比(Peak Signal to Noise Ratio, PSNR)、结构相似度(Structural Similarity Index Measurement, SSIM)、算法运行时间等参数值,对各去雾算法进行比较.五种图像去雾算法的客观评价参数的计算数值见表 1~3,根据表中的数值分析可知,本文算法在图像所含信息量、清晰度、保真度、结构相似度、运行时间等方面都有不同程度的改善.

表 1 各图像平均梯度和信息熵的对比

Table 1 Comparisons of average gradient and information entropy

Images	Original image		TAREL's method		HE's method		Ref.[12]'s method		Ref.[15]'s method		Proposed method	
	AG	IE	AG	IE	AG	IE	AG	IE	AG	IE	AG	IE
School	2.48	10.22	4.37	11.36	3.71	11.57	4.47	9.80	5.24	12.39	5.27	13.06
Grandstand	3.30	10.58	5.98	12.16	4.13	11.64	5.45	8.64	6.37	11.70	6.78	11.74
Building	4.75	11.12	6.74	12.83	5.64	12.61	7.51	12.35	7.33	11.13	7.67	12.90
Trees	3.71	14.42	6.96	14.78	5.96	13.89	8.16	14.27	7.97	14.09	8.57	14.79

表 2 各图像 PSNR 和 SSIM 的对比

Table 2 Comparisons of PSNR and SSIM

Images	TAREL's method		HE's method		Ref.[12]'s method		Ref.[15]'s method		Proposed method	
	PSNR	SSIM	PSNR	SSIM	PSNR	SSIM	PSNR	SSIM	PSNR	SSIM
School	13.11	0.78	14.47	0.71	14.52	0.68	14.31	0.74	14.81	0.82
Grandstand	10.02	0.54	15.12	0.65	11.94	0.74	14.63	0.73	16.23	0.75
Building	14.35	0.64	16.42	0.80	12.10	0.63	15.06	0.60	16.97	0.83
Trees	14.60	0.65	17.13	0.74	13.21	0.55	14.08	0.63	17.22	0.84

表 3 各图像运行时间的对比

Table 3 Comparisons of running time

Running time/s	TAREL's method	HE's method	Ref.[12]'s method	Ref.[15]'s method	Proposed method
School	6.32	3.06	2.91	2.87	2.82
Grandstand	7.56	3.77	3.43	3.56	3.34
Building	9.63	14.25	8.59	7.98	7.24
Trees	16.59	12.24	14.11	13.42	12.19

4 结论

本文在暗通道先验的基础上提出分割有雾图像的非天空区域和天空区域,分别利用开运算暗通道算法和改进的边界约束算法进行去雾处理,将两个区域的去雾结果合并得到去雾图像.主观评价和客观评价两方面的分析都证明了本文算法很大程度提高了有雾图像的可见度.但本文算法的去雾效果和天空分割的结果是息息相关的,天空分割过程中需手动调整形态学结构元素的大小才能得到最佳分割结果.为了提高算法的实用性,如何自适应地进行天空分割是进一步的研究工作.

参考文献

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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, 2008: 80-85.
- [4] 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.
- [5] TAN R T. Visibility in bad weather from a single image[C]. Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Alaska, Americ, 2008; 2201-2208.
- [6] FATTAL R. Single image dehazing[J]. *Association for Computing Machinery Transactions on Graphics*, 2008, **27**(3): 721-729.
- [7] TAREL J P, HAUTIERE N. Fast visibility restoration from a single color or gray level image[C]. Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision, Kyoto, Japan, 2009; 2201-2208.
- [8] HE K M, SUN J, TANG X O. Single image haze removal using dark channel prior[J]. *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2011, **33**(12): 2341-2353.
- [9] HE K M, SUN J, TANG X O. Guided image filtering[J]. *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2013, **35**(6): 1397-1409.
- [10] SONG Ying-chao, LUO Hai-bo, HUI Bin, *et al.* Haze removal using scale adaptive dark channel prior[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, **45**(9): 286-297.
宋颖超, 罗海波, 惠斌, 等. 尺度自适应暗通道先验去雾方法[J]. *红外与激光工程*, 2016, **45**(9): 286-297.
- [11] CANNY J. A computational approach to edge detection[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1986, **PAMI-8**(6): 679-698.
- [12] LI Jia-yuan, HU Qing-wu, AI Ming-yao, *et al.* Image haze removal based on sky region detection and dark channel prior[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2015, **20**(4): 514-519.
李加元, 胡庆武, 艾明耀, 等. 结合天空识别和暗通道原理的图像去雾[J]. *中国图象图形学报*, 2015, **20**(4): 514-519.
- [13] LIU Yun, LI He-jian, WANG Ming-hui. Single image dehazing via large sky region segmentation and multiscale opening dark channel model[J]. *IEEE ACCESS*, 2017, **5**: 8890-8903.
- [14] LIU Xin, ZHANG He, TANG Yuan-yan, *et al.* Scene adaptive single image dehazing via opening dark channel model[J]. *IET Image Processing*, 2016, **10**(11): 877-884.
- [15] XIAO Jin-sheng, GAO Wei, ZOU Bai-yu, *et al.* Image haze removal based on dark channel prior to sky constraint[J]. *Journal of Electronics*, 2017, **45**(2): 346-352.
肖进胜, 高威, 邹白昱, 等. 基于天空约束暗通道先验的图像去雾[J]. *电子学报*, 2017, **45**(2): 346-352.
- [16] MENG Gao-feng, WANG Ying, DUAN Jiang-yong, *et al.* Efficient Image dehazing with boundary constraint and contextual regularization[C]. Proceeding of the International Conference on Computer Vision, 2013; 617-624.
- [17] XU Yong-long. Image defog algorithm based on bilateral filtering and dark channel and its application[D]. Nanchang: Nanchang Aeronautical University, 2015.
余永龙. 结合双边滤波与暗通道的图像去雾算法及应用研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2015.
- [18] PANG Chun-ying, JI Xiao-qiang, SUN Li-na, *et al.* Atmospheric optical correction and transmission optimization algorithm for robust image defog[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(7): 872-877.
庞春颖, 嵇晓强, 孙丽娜, 等. 一种改进的图像快速去雾新方法[J]. *光子学报*, 2013, **42**(7): 872-877.
- [19] SHEN Yi-yun, LIU Chun-xiao, ZHANG Jin-dong, *et al.* Atmospheric optical correction and transmission optimization algorithm for robust image defog[J]. *Journal of Computer-Aided design & Computer Graphics*, 2017, **29**(9): 1604-1612.
沈逸云, 刘春晓, 张金栋, 等. 鲁棒图像去雾的大气光校正与透射率优化算法[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2017, **29**(9): 1604-1612.

Foundation item: Key Projects of Applied Basic and Frontier Technology Research Program in Tianjin (No.12JCZDJC27800)

引用格式: YANG Hong, CUI Yan. Image Defogging Algorithm Based on Opening Dark Channel and Improved Boundary Constraint[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(6): 0610004

杨红, 崔艳. 基于开运算暗通道和优化边界约束的图像去雾算法[J]. *光子学报*, 2018, **47**(6): 0610004