

doi:10.3788/gzxb20144311.1110003

基于边界邻域最大值滤波的快速图像去雾算法

陈露, 和红杰, 陈帆

(西南交通大学 信号与信息处理四川省重点实验室, 成都 610031)

摘 要:为解决现有去雾算法结果中存在的光晕现象、颜色失真等问题,提出一种基于边界邻域最大值滤波的图像去雾方法.首先通过边缘检测寻找图像边界被低估的暗原色值并对其进行边界邻域最大值滤波,以得到更为准确的透射率图来消除光晕现象;其次对暗原色图乘以一个尺度因子,扩大透射率的取值范围,提高去雾结果的对比度;最后设置两个亮度阈值以及一个平坦阈值,消除图像中高亮度物体的影响,获得更为准确的大气光值,使得去雾结果颜色保真度较高.仿真结果表明,与现有去雾算法相比,本文算法对含高亮度物体以及含细节信息的带雾图像,均可消除光晕现象,获得高对比度及高颜色保真度的去雾结果,同时也提高了算法的处理速度.

关键词:图像处理;图像增强;雾霭;边缘检测;光晕现象;颜色保真度

中图分类号:TP391.4

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2014)11-1110003-6

A Fast Image Defogging Algorithm Based on Edge-maximum Filter

CHEN Lu, HE Hong-jie, CHEN Fan

(Sichuan Key Laboratory of Signal and Information Processing, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: A fast image defogging algorithm based on edge-maximum filter was proposed to address halo effect and color distortion caused by the existing defogging methods. Firstly, an edge-maximum filter was used to recover the undervalued dark pixels obtained by edge detection, which was to receive an accurate transmission map and eliminate the halo effect. Then in order to gain a high contrast dehazing image, all the dark pixels were multiplied by a scaling factor to improve the dynamic ranges of the transmission. Finally, two brightness thresholds and one flat threshold were set to eliminate the influence of high light objects in the image and obtain a more accurate airlight, which keeps a high color fidelity in the dehazing image. The simulation results show that the proposed method, compared with other algorithms, could eliminate the halo effect and achieve the dehazing image with high contrast and high color fidelity, especially for the images containing high light objects or rich details. Meanwhile, the computational speed is also improved.

Key words: Image processing; Image enhancement; Fog; Edge detection; Halo effects; Color fidelity

OCIS Codes: 100.0100; 100.2000; 100.2980; 100.3020

0 引言

由于冬季空气中湿度大、风力小且气温低,经常有雾天出现,在含雾天气下,空气中会漂浮着大量悬浮颗粒,光在大气中传播时受到其影响,导致传到传感器上的图像由光的吸收和散射两部分组成,使得雾天图像模糊不清,对比度下降,给很多基于图像的应用造成

困难,如高速公路上视频监控器无法清楚监测车辆信息.因此,针对图像去雾的研究有重要的应用价值.

基于单一图像的去雾算法已取得了较大进展. Tan^[1] 观察发现无雾图像比有雾图像具有更高的对比度,因此他通过直接扩大图像的局部对比度来增强图像,但得到的去雾图像颜色过饱和,且产生光晕现象. He 等^[2] 提出了基于一种暗原色先验信息的去雾算法,

基金项目:国家自然科学基金(61373180);2014年西南交通大学博士研究生创新基金和中央高校基本科研业务费专项基金

第一作者:陈露(1990-),女,硕士研究生,主要研究方向为数字图像处理. Email:15198014504@163.com

导师(通讯作者):和红杰(1971-),女,教授,博士,主要研究方向为数字图像处理、信息隐藏等. Email:hjhe@swjtu.cn

收稿日期:2014-05-04;**录用日期:**2014-07-03

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

利用暗原色先验信息进行估计景物光的透射率和大气光值,并根据大气模型反解得到无雾图像.为消除因逐块操作带来的光晕现象,He等采用软抠图(Soft matting)方法细化透射率,该方法时间复杂度较高,且对暗原色失效的区域(如大片天空)无法得到较好的去雾效果.汪荣贵等^[3]针对不同景深和雾化区域采用不同尺度的滤波器估算雾天图像的照度分量,实现对雾天图像的增强.方帅等^[4]利用暗原色信息粗略估计大气光传输图,再用拉普拉斯矩阵对传输图进行平滑操作.刘楠^[5]在软抠图的基础上采用加权暗通道算法来细化透射率.这些算法的共同缺点是时间复杂度太高.

近年来,研究者们基于暗原色先验信息的原理,对去雾方法做了很多改进以消除光晕现象并提高算法效率,如采用双边滤波^[6-8]、中值滤波^[9]以及导向滤波器^[10]代替软抠图进行透射率细化.文献^[8]使用双边滤波器的近似算法来快速消除图像边界的光晕现象;张冰冰等^[11]通过对暗原色图像进行全局最大值滤波,来消除光晕现象,该方法使得像素的透射率普遍降低,得到的去雾图像偏暗,在暗原色不满足的区域,导致去雾图像颜色易失真.褚宏莉等^[12]提出采用不同模板获取暗原色图像,以突出图像边界的信息,简化了算法复杂度,但在边界处仍会出现较窄的白边,即光晕现象.

本文首先通过边界检测寻找边界被低估的像素并对其执行边界邻域最大值滤波,以消除光晕现象;然后,通过增大暗原色的动态范围,间接扩大透射率的取值范围,使得去雾图像具有较高的对比度;最后通过定位大气光所在区域,准确计算出大气光值,使得在暗原色不满足区域具有较高的颜色保真度.

1 暗原色先验去雾算法

1.1 去雾基本模型

在计算机视觉和计算机图形学中,大气退化模型广泛运用于带雾图像^[2],其模型为

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

式中, $I(x)$ 是指照相机观测到图像的强度; $J(x)$ 是指景物光线真实的强度; A 为大气光强度; $t(x)$ 是景物光线透射率,可以表示为

$$t(x) = \exp(-\beta d(x)) \quad (2)$$

式中, β 为消光系数,文献^[16]指出 β 的取值范围应该在 $[0,1]$.

基于大气退化模型的去雾方法,通过估计透射率 $t(x)$ 以及大气光强度 A ,然后利用大气退化模型式(1)反解获得去雾图像 $J(x)$,反解公式为

$$J(x) = \frac{I(x) - A}{t(x)} + A \quad (3)$$

由式(3)可知,透射率 $t(x)$ 和大气光 A 的准确估计直接影响去雾图像 $J(x)$ 的质量.

1.2 暗原色先验

暗原色先验知识^[2]是指在绝大多数无雾的、非天空的局部区域,总有某些像素至少在一个通道内具有很低的像素值,它表示为

$$J_{\text{dark}}(x) = \min_{y \in \Omega(x)} \min_c (J^c(y)) \rightarrow 0 \quad (4)$$

式中, $J_{\text{dark}}(x)$ 是无雾图像的暗原色, $\Omega(x)$ 表示 x 一个邻域, c 表示三个通道.对户外无雾图像来说,导致其暗原色趋向于0原因通常包括三个方面:1)图像中物体形成的阴影;2)图像中具有鲜艳颜色的物体;3)图像中具有颜色较暗的物体.

2 改进的去雾算法

针对现有基于暗原色去雾方法易产生光晕现象且在暗原色不满足区域易产生颜色失真,通过优化透射率 $t(x)$ 并改进大气光 A 来解决上述问题,降低时间复杂度.

2.1 改进透射率图像的求解

He^[2]利用暗原色先验信息,对式(1)分别求最小值来粗略的估计透射率,即

$$t(x) = 1 - \omega \min_{y \in \Omega(x)} \min_c \frac{I^c(y)}{A^c} \quad (5)$$

式中, ω 取值为0.95,目的是为了保留部分雾,增加透视感.用式(2)估计透射率^[2],且使用优化后的暗原色 I_{dark} 代替深度图,即

$$t(x) = \exp(-\beta I_{\text{dark}}(x)) \quad (6)$$

式(5)和(6)分别采用线性关系和指数关系来估计透射率,如图1,其中式(5)中滤波窗口大小为 15×15 ,式(6)中 $\beta=0.7$.由图1可以看出,He的方法在暗原色接近1时(如天空、白色物体),透射率趋于0.05,尽管其通过设置一个参量 $t_0=0.1$ 来控制透射率的最小值,但这些区域去雾后仍出现颜色失真问题;其次,文献^[12]求得的透射率动态范围约在 $[0.5,1]$,导致去雾图像对比度不高.为得到满足这两个条件的透射率,对暗原色图像乘以一个尺度因子 a ,来扩大透射率的动态范围.当尺度因子值分别取2,3,4时,透射率范围如图1,可

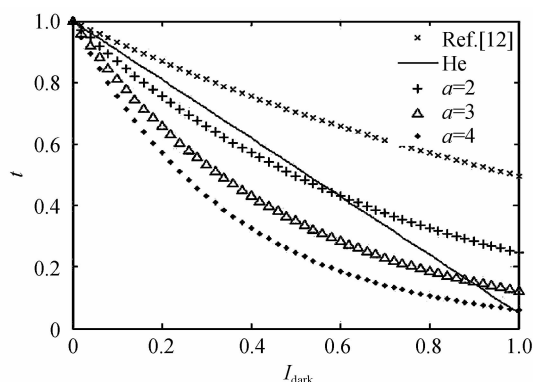


图1 透射率 t 与暗原色 I_{dark} 的关系
Fig. 1 The relationship between I_{dark} and t

以看出当 $a=[2,3]$ 时,能较好地满足这两个条件.

同时,由图 1 还可以看出,透射率的估计值依赖于暗原色.采用逐块操作求取暗原色 I_{dark} 会使边界暗原色 $I_{\text{edge_dark}}(x)$ 被其邻域块内较小的暗原色 $I_{\text{min_dark}}(x)$ 代替,致使边界的暗原色值被低估,从而导致透射率 $t(x)$ 的估计值偏大.由式(3)可知,大气光值 A 一般是一幅图像中较大的像素值,因此, $I(x)-A$ 多数为负值.当 $t(x)$ 被放大时,导致 $J(x)$ 估计偏大,出现光晕现象.为此,本文首先寻找深度不连续区域被低估的暗原色值并进行修正,然后改进透射率的估计方法使其变化范围位于区间 $[0.2,1]$ 之间,为消除光晕现象和减少颜色失真奠定基础.改进的估计透射率 t 的步骤为

1)对带雾图像 I 求取其灰度图像 I_{hui} ,寻找 I_{hui} 边界,利用 canny 算子执行边界检测得到二值图像 B .

2)对二值图像 B 进行执行边界扩充操作,扩充半径选择 $(m-1)/2$,其中, m 为求取暗原色时使用的模板大小,然后,执行形态学膨胀操作得到扩展后的边界图像 B_w .

3)按式(4)求取带雾图像 I 的暗原色图为 I_{min} ,模板的值为 15×15 ;

4)对扩展后的二值图像 B_w 中的每个边界像素点(即 $B_w=1$),求取其邻域内的暗原色图像 I_{min} 最大值,并将其作为新的暗原色值,得到一幅修正后的暗原色图像 I_{dark} ,即

$$I_{\text{dark}} = \max_{x \in (B_w=1)} (I_{\text{min}}(x)) \quad (7)$$

5)将 I_{dark} 乘以一个尺度因子 a ,求得优化后的透射率图 t ,即

$$t(x) = \exp(-\beta a I_{\text{dark}}(x)) \quad (8)$$

为说明细化透射率后的效果,图 2 为与文献[2]、[10]对透射率平滑处理的对比结果.其中,图 2(a)为 Tiananmen 带雾图像,图 2(b)、(c)分别为图 2(a)的暗原色图和粗略透射率的估计图,图 2(d)~(f)分别为本文算法、文献[2]、文献[10]的透射率细化结果.由图 2(d)、(e)可看出,采用导向滤波器和软抠图得到的透射率图层次感较好,细节信息丰富.不过,仔细观察可以发现,图 2(d)和(e)在框内的透射率取值较大,导致雾未去除干净.相应地,由图 2(f)可以看出,本文算法处理后,基本能抓住尖锐边缘的不连续性,勾勒出物体的轮廓.

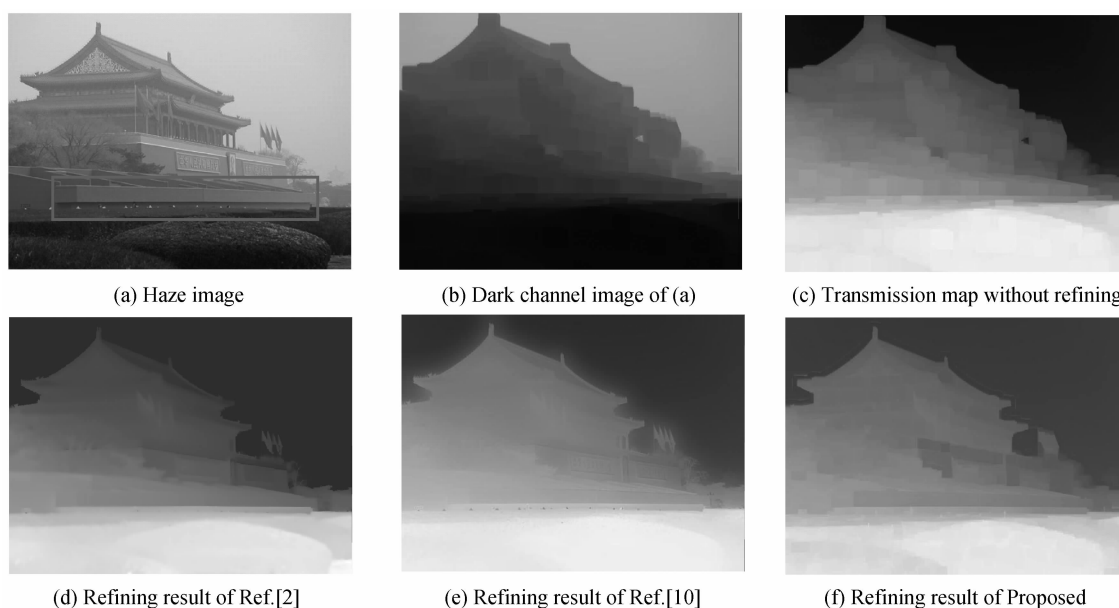


图 2 透射率细化结果

Fig. 2 Results of refining transmission map

表 1 给出了几种算法的时间复杂度比较,文献[2]的软抠图方法运算时间最长,文献[10]是在此基础上进行优化,虽然效率有大幅度提高,但本文算法有更高的效率.

表 1 不同细化方法运行时间的比较

Table 1 Comparison of algorithm time of refining t Fig. 2 (450×600)	Ref. [2]	Ref. [10]	Proposed
Processing time/s	70.2	5.62	3.68

2.2 改进的大气光求解方法

大气光的准确估计会直接影响去雾图像质量.

1)若大气光估计太小则 $I-A$ 为正值,此时,由于透射率 t 趋于最小值导致 $(I-A)/t$ 被放大几倍甚至数十倍,去雾结果接近 255,甚至超过 255 而被截断至 255,导致去雾后的结果变成白色,细节信息缺失;

2)若大气光估计过大,对三个通道方向不一致^[13]的高亮度区域,即有些通道像素值大于 A ,有些小于 A , $I-A$ 时而正,时而负,且无论正负, $(I-A)/t$ 均扩大几倍,导致去雾结果在三个通道的差距被拉大,且大于 A 的分量占主要成分,即颜色出现失真.

为此,估计大气光值时既要避免图像中高亮度物体的影响(高估大气光),又需要求解出的大气光值是雾最浓区域的像素值(避免低估大气光).大气光值通常指无穷远处的图像像素值,对于阴天或者多云的天气,大气光取值为天空区域或者是雾最浓区域的值.通过分析发现,大气光所在区域(d-inf)应具备两个条件:1)平坦区域,即像素在其邻域所含边界像素点与总边缘像素点的比值 N_{edge} 较小, $N_{edge} \in \frac{N_{edge_min}}{\omega}$, $\omega \in [0.9, 1]$,其中, N_{edge_min} 为 N_{edge} 的最小值;2)高亮度区域,即这些区域像素值 I_{d-inf} 普遍偏大,但却不一定是图像中最亮的像素,即 $I_{d-inf} \in \omega I_{min_max}$,其中 I_{min_max} 为最亮的像素值.因此,通过设置两个亮度阈值

$$T_{v1} = 0.75 * I_{min_max} \quad (9)$$

$$T_{v2} = 0.98 * I_{min_max} \quad (10)$$

以及一个平坦阈值

$$T_p = N_{edge_min} / 0.9 \quad (11)$$

来定位大气光 A 所在位置.为降低高亮度平滑物体的影响,在定位大气光所在区域后,分别求取所定位区域中最亮的第 1% 的像素的亮度值作为大气光分量值 A_r , A_g , A_b .文献[14]提到了类似的计算方法,但其亮度阈值与平坦阈值的设置都不具鲁棒性.改进大气光的实现步骤为

1)按式(4)求取带雾图像 I 的暗原色图为 I_{min} ,获得其最大值为 $I_{min_max} = \max(I_{min})$,分别采用式(9)、(10)来设置亮度阈值下限 T_{v1} 和亮度阈值上限 T_{v2} ;

2)统计二值图像 B 中边界像素点的个数

$$N_{edge_sum}(i, j) = \sum_i \sum_j B(i, j) \quad (12)$$

3)求出每个边缘像素点其邻域内的边缘像素点数与 N_{edge_sum} 的比值,得到百分比图像 $N_{edge}(x)$,由式(11)设置平坦阈值 T_p ;

4)大气光所在区域应是满足 $I_{min}(x) > T_{v1}$ 且 $I_{min}(x) < T_{v2}$ 以及 $N_{edge}(x) < T_p$ 这三个条件,从而定位出区域为 air_pos ;

5)最后对 air_pos 中的每个像素求取原带雾图像相应位置的像素值,并对这些像素进行从大到小排序为 I_{air_pos} ,选取第 1% 个 $I_{air_pos}(x)$ 像素值作为大气光值 A .

为验证算法求得的大气光的准确性,选择图 3(a)、3(f)的两幅图像即 Mountain、Road 作为测试图像.其中,图 3(a)含有受太阳光强烈照耀的区域,即高亮度区域,图 3(f)不含高亮度区域,分别与文献[2]及文献[11]、[12]的大气光结果作对比.由大气光特性可知,大气光应在图 3(a)、3(f)中矩形标记区域内.对图 3(a),可以看出,本文算法准确定位出大气光所在区域,如图 3(e)、3(j)所示白色区域,并通过计算定位区域中最亮的 1% 的像素值,可以排除高亮度物体的影响,求得更为准确的大气光值.文献[2]与文献[11][12]的大气光计算结果如图 3(b)~(d)、3(g)~(i),均受到图像的高亮度区域的影响,结果偏大.而对比图 3(f),可以看出,本文算法对于图像中不存在高亮度区域的检测结果也很准确.其中,各类算法求出的大气光值 A 如表 2.

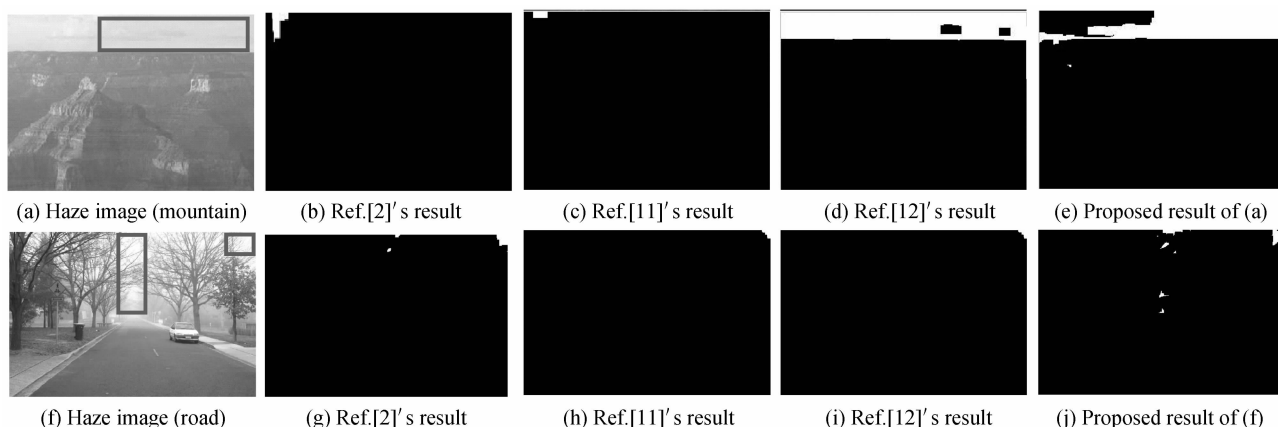


图 3 不同算法所求大气光所在区域
Fig. 3 Comparison of airlight range

表 2 不同算法所求大气光值
Table 2 Comparison of airlight

	Ref. [2]'s airlight	Ref. [11]'s airlight	Ref. [12]'s airlight	Proposed
Mountain	[0.972, 0.929, 0.913]	[0.905, 0.905, 0.905]	[0.922, 0.937, 0.933]	[0.870, 0.894, 0.886]
Road	[1.000, 1.000, 1.000]	[1.000, 1.000, 1.000]	[0.981, 0.990, 0.993]	[0.996, 1.000, 1.000]

3 实验结果与分析

本文实验的测试硬件环境:Inter(R)Core(TM)i3,

CPU213GHz, 内存为 2GB; 软件环境:MATLAB2010b.实验中,选用模板窗口大小为 15×15 .选取具有代表性的图片进行了测试,其中既有大片

天空,又有高亮度区域,同时含大量细节信息的图片,且选择领域内较具代表性的文献[2][8][10]与其对比,并从主观及客观两方面对算法进行评价.选用文献[15]提出的有效细节强度 I_{valid} 、色调还原能力 d_{correl} 及时间效率对去雾结果进行客观评价.其中,有效细节强度体现的是消除光晕以及噪音的能力,越大越好;色调

还原能力则强调的是去雾前后色调的相似程度,越高越好.图 4(a)、4(f)、5(a)、5(f)为带雾原图,图 4(b)~4(d)、4(g)~4(i)、5(b)~5(d)、5(g)~5(i)分别为文献[2][8][11]的去雾结果,4(e)、4(j)、5(e)、5(j)为本文算法的去雾结果.

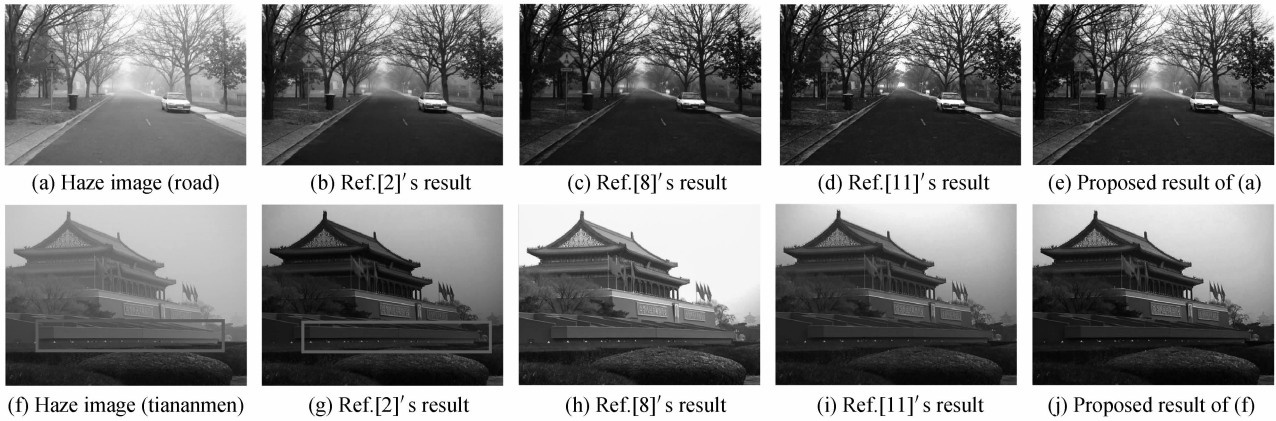


图 4 不同算法去雾结果对比
Fig. 4 Comparison of dehazing results

图 4 是包含大片天空及细节信息的图片,由图 4(e)、4(j)可看出,本文去雾结果在消除光晕现象的同时,颜色保持的较好,尤其是在较远的区域,可以恢复出与原图一致的结果.文献[2]由于透射率的估算错误导致图 4(f)矩形框内雾未被去除,如图 4(g),文献[8][11]在大片天空区域失真严重,且对 4(a)图的处理

后的结果偏向蓝色,如图 4(c)、4(d).图 5 是两幅包含高亮度区域的图片,即太阳光强烈照射区域和明亮光源,可见本文算法在去除光晕现象的同时,颜色恢复的更加接近自然,如图 5(e)、5(j),同样,文献[8][11]在天空区域出现了失真,如图 5(c)、(d)、(h)、(i).

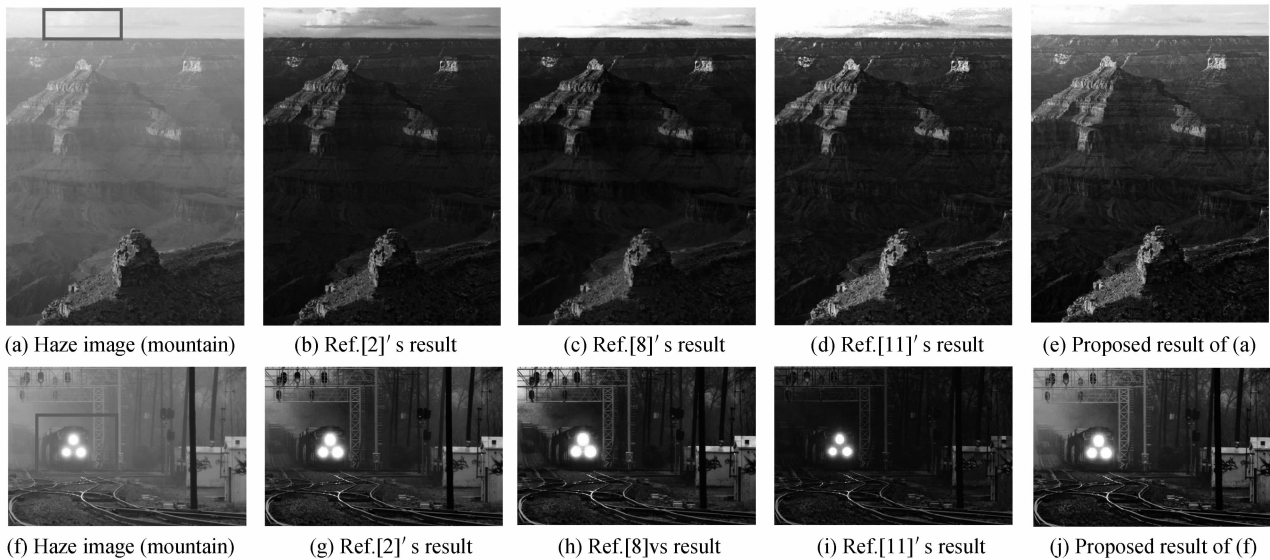


图 5 不同算法去雾结果对比
Fig. 5 Comparison of dehazing results

表 3 是图 4 及图 5 的客观评价结果,可以看出,本文算法的有效细节数高于其它算法,色调还原能力高于文献[8][11],与文献[2]相当,即该算法去雾图像较

好的保持了图像原有颜色.表 4 是各算法的时间指标,本文算法效率要优于文献[2][11],文献[8]的速度略快但去雾结果失真较严重.

表3 不同算法处理结果比较

Table 3 Comparison of different algorithm

Figure	Ref. [2]		Ref. [8]		Ref. [11]		Proposed	
	I_{vaild}	d_{correl}	I_{vaild}	d_{correl}	I_{vaild}	d_{correl}	I_{vaild}	d_{correl}
Mountain	0.639	0.336	0.673	0.252	0.607	0.320	0.676	0.385
Train	0.562	0.441	0.599	0.330	0.728	0.164	0.587	0.460
Road	0.278	0.484	0.319	0.343	0.288	0.356	0.323	0.422
Tiananmen	0.556	0.523	0.332	0.459	0.487	0.417	0.562	0.575

表4 各种算法所用时间对比表

Table 4 Comparison of algorithm time(s)

Figure	Resolution	Ref. [2]	Ref. [8]	Ref. [11]	Proposed
Mountain	600×450	90.17	1.33	7.59	4.80
Train	400×600	74.28	0.92	6.14	4.04
Road	400×600	75.31	0.95	6.13	3.94
Tiananmen	450×600	83.8	0.93	6.95	4.43

4 结论

本文首先通过边界检测查找边界被低估的暗原色像素,对其边界邻域最大值滤波,得到优化的暗原色图来消除光晕现象;之后,扩大透射率的动态范围,使得去雾结果具有较高的对比度;最后通过设置亮度阈值及平坦阈值来准确定位大气光所在区域,选择所在区域最亮的第1%的像素值作为大气光值,有效地克服了图像中高亮度物体的影响,使得在暗原色失效区域仍具有较高的颜色保真度.本文算法在找到可能被低估的暗原色像素并进行放大恢复时,无法准确地恢复被低估像素的暗原色值,导致在处理图像含有细小缝隙时,还存在较少的雾去除.如何准确的检测这些低估的暗原色值,或寻找更快速准确的透射率细化方法,将是后续的工作.

参考文献

- [1] TAN R. Visibility in bad weather from a single image[C]. Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Alaska, USA, 2008: 1-8.
- [2] HE Kai-ming, SUN Jian, TANG Xiao-ou. Single image haze removal using dark channel prior[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2011, **33**(12): 2341-2353.
- [3] WANG Rong-gui, FU Jian-feng, et al. A novel retinex algorithm based on dark channel prior model [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2013, **41**(6): 1188-1192.
汪荣贵,傅剑峰,等.基于暗原色先验模型的Retinex算法[J].电子学报,2013, **41**(6): 1188-1192.
- [4] FANG Shuai, WANG Yong, CAO Yang, et al. Restoration of image degraded by haze[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2010, **38**(10): 2279-2284.
方帅,王勇,曹杨,等.单幅雾天图像复原[J].电子学报,2010, **38**(10): 2279-2284.
- [5] LIU Nan, CHENG Yong-mei. An image dehazing method based on weighted dark channel prior [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(3): 320-325.
刘楠,程咏梅.基于加权暗通道的图像去雾方法[J].光子学报,2012, **41**(3): 320-325.
- [6] PANG Chun-yin, JI Xiao-qiang. An improved method of image fast defogging[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(7): 872-877.
庞春颖,嵇晓强.一种改进的图像快速去雾新方法[J].光子学报,2013, **42**(7): 872-877.
- [7] GAN Jia-jia, XIAO Chun-xia. Fast image dehazing based on accurate scattering map[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2013, **18**(5): 583-590.
甘佳佳,肖春霞.结合精确大气散射图计算的图像快速去雾[J].中国图象图形学报,2013, **18**(5): 583-590.
- [8] SUN Wei. A new single-image fog removal algorithm based on physical model [J]. *International Journal for Light and Electron Optics*. 2013, **124**(21): 4770-4775.
- [9] 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.
- [10] HE Kai-ming, SUN Jian, TANG Xiao-ou. Guided image filtering[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2013, **35**: 1-13.
- [11] ZHANG Bing-bing, DAI Sheng-kui, SUN Wan-yuan. Fast image haze-removal algorithm based on the prior dark-channel [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2013, **18**(2): 184-188.
张冰冰,戴声奎,孙万源.基于暗原色先验模型的快速去雾算法[J].中国图象图形学报,2013, **18**(2): 184-188.
- [12] CHU Hong-li, LI Yuan-xiang, et al. Optimized fast dehazing method based on dark channel prior [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2013, **41**(4): 791-797.
褚宏莉,李元祥,等.基于黑色通道的图像快速去雾优化算法[J].电子学报,2013, **41**(4): 791-797.
- [13] JIANG Jian-guo, HOU Tian-feng, QI Mei-bing. Improved algorithm 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.
- [14] YU Jing, LI Da-peng, LIAO Qing-min. Physics-based fast single image fog removal [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2011, **37**(2): 143-149.
禹晶,李大鹏,等.基于物理模型的快速单幅图像去雾方法[J].自动化学报,2011, **37**(2): 143-149.
- [15] LI Da-peng, YU Jing, XIAO Chuang-bai. No-reference quality assessment method for defogged images [J]. *Journal of Image and Graphics*. 2011, **16**(9): 1753-1757.
李大鹏,禹晶,肖创柏.图像去雾的无参考客观质量评测方法[J].中国图象图形学报,2011, **16**(9): 1753-1757.
- [16] LIU Hong-jun, GONG Ai-ling. Study of defog technology for road scene [J]. *Optical Technique*. 2010, **36**(4): 554-559.
刘红军,宫爱玲.公路场景去雾技术研究[J].光学技术,2010, **36**(4): 554-559.