

基于天空约束暗通道先验的图像去雾

肖进胜¹,高威¹,邹白昱¹,姚远²,章勇勤³

(1. 武汉大学电子信息学院,湖北武汉 430072;2. 华中师范大学物理科学与技术学院,湖北武汉 430079;
3. 西北大学信息科学与技术学院,陕西西安 710127)

摘要: 针对现有暗通道图像去雾算法存在的天空色彩失真,景物边缘光晕效应等问题,本文提出了基于暗通道理论的改进去雾算法. 由于暗原色先验理论不适用于天空区域,本文将引导滤波用于天空区域的细化分割,准确估计包含天空区域图像的大气光照强度,解决了天空色彩失真问题;其次,利用中值滤波得到详细边缘信息,进而得到更为清晰的透射率,有效抑制了景物边缘光晕问题;最后针对去雾后图像偏暗的问题,在 HSV 空间对亮度分量 V 通道进行增强处理. 实验结果表明,针对带雾图像,本文算法能够有效地去雾,改善天空区域色彩失真以及景物边缘光晕问题.

关键词: 图像去雾; 暗通道; 天空分割; 引导滤波

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2017)02-0346-07

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2017.02.012

Image Dehazing Based on Sky-Constrained Dark Channel Prior

XIAO Jin-sheng¹,GAO Wei¹,ZOU Bai-yu¹,YAO Yuan²,ZHANG Yong-qin³

(1. School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China;
2. College of Physical Science and Technology, Central China Normal University, Wuhan, Hubei 430079, China;
3. School of Information Science and Technology, Northwest University, Xi'an, Shaanxi 710127, China)

Abstract: An improved image dehazing algorithm based on dark channel prior is proposed to overcome the color distortion of sky and halo effects. The guided filter is utilized to segment the sky area finely to avoid the sky color distortion, since the defect of the classical dark channel prior theory. The global atmospheric light of image in sky region is estimated accurately. In addition, the detailed edge information can be got by taking advantage of median filter technique. So more effective transmission map estimation will be achieved which effectively inhibited the halo. Last, because the brightness of image after haze removal is lower than the actual scene, histogram equalization is used for channel V of the HSV color space. The experiment results show that the proposed method can not only restore the clean scene from hazy images effectively, but also avoid color distortion of the sky region and halo artifacts.

Key words: image dehazing; dark channel prior; sky segment; guided filter

1 引言

室外场景图像的获取往往会遭受如雾、霾、沙尘等恶劣天气条件的影响. 目前图像去雾算法主要分为基于图像增强的方法和基于图像复原的方法两类^[1]: 第一类方法比较典型的有直方图均衡^[2], Retinex 算法^[3]等等. 这类方法能有效地增强图像对比度,但未从根本上去除雾,而且会丢失某些信息特征. 第二类方法通过建立大气散射模型,并求出其逆过程来恢复出清晰的无雾图像. 这类方法具有较强的针对性,能够更加逼近

真实图像.

近年来,利用图像复原并结合图像增强方法去雾的越来越多. Tan^[4]以最大化有雾图像的对比度来去雾,但可能会过度补偿对比度. Kim^[5]建立一个包括对比度和信息损失的代价函数,虽对天空具有天然免疫力,但会出现光晕效应. 以得到清晰透射率为目的, Fattal^[6]假设透射率与表面阴影局部不相关,估计场景反照率和介质透射率来恢复图像,但对浓雾图像的去雾效果不是很好. Tarel 等人^[7],在图像经过白平衡后,估计大气面纱,再利用中值滤波器进行细化,该算法效果一般. 在

基于先验知识的算法中:He 等人^[8]通过暗原色先验的假设估计透射率,然后利用软抠图细化透射率,最终恢复出无雾图像.Zhang^[9]利用图像滤波方法估计带有暗通道优先的雾层,恢复出对比度高的无雾图像,但景物边缘光晕明显.Huang^[10]则考虑了深度估计和颜色分析,解决了光晕效应和色彩失真,对沙尘暴等恶劣天气也有很好的效果.由于软抠图^[8]算法复杂,He 后来提出引导滤波^[11]细化粗透射率,引导滤波具有较好的边缘保存功能,算法复杂度低,但恢复图像由于透射率不够清晰仍然会出现光晕.

本文受以上算法的启发,针对经典暗原色先验理论不适用于天空区域,引入天空分割,并用引导滤波细化分割边缘,分别估算大气光照强度和透射率;针对透射率不清晰,使恢复图像景物边缘出现光晕效应,引入中值滤波得到详细的边缘信息,最终得到足够清晰的透射率,消除光晕效应;针对恢复出的无雾图像偏暗的现象,在 HSV 空间对亮度分量 V 通道进行增强处理^[12].理论分析和实验数据表明,本文算法明显改善了天空区域色彩失真以及景物边缘光晕效应等问题.

2 暗原色先验

在计算机视觉中,大气物理模型^[8]广泛用于描述雾霾图像的信息:

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

其中: I 是观测到的有雾图像; J 是景物反射光强度(清晰的无雾图像); A 是全局大气光照强度;透射率 t 为 $t = e^{-\beta d(x)}$, β 为大气散射系数, J_c 为景物深度.对于任意的输入图像 J ,其暗通道:

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

式中 J_c 表示彩色图像的每个通道,其中 $c \in \{r, g, b\}$, $\Omega(x)$ 表示以像素 x 为中心的一个窗口.如果 J 是户外的无雾图像,根据暗原色先验理论^[8],除了天空区域, J_{dark} 的强度总是很低并且趋近于0. J_{dark} 称为 J 的暗原色.

假设在每一个窗口内透射率 $t(x)$ 为常数,定义为 $\tilde{t}(x)$,并且 A 值已经给定,然后由式(1)得到:

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

根据前述的暗原色先验理论,无雾图像的暗通道值趋近于0,且 A_c 总是为正,所以由式(3),可得到透射率 $\tilde{t}(x)$ 的预估值.一定的雾存在能让人类感到景深的存在,因此引入一个调整因子 $\omega \in (0, 1]$ 保留一定的雾,修正后的粗透射率为:

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

这里 $\omega = 0.95$.

如果直接用式(4),由于粗透射率在一个窗口中并不总是连续的,He^[8]使用软抠图对粗透射率进行细化,取得了较好的效果.但是由于软抠图算法复杂,He^[11]又提出了一种比双边滤波器具有更好边缘保持功能的引导滤波器.

由于当透射率 t 的值很小时,会导致 J 的值偏大,从而使得图像整体向白场过度,因此设置一阈值 t_0 ,当 t 值小于 t_0 时,令 $t = t_0$,本文中所有效果图均以 $t_0 = 0.1$ 为标准计算.因此,最终的恢复公式如式(5):

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

He 等人所提方法^[11]的部分恢复效果如图1,其中图1(b)是粗透射率经过引导滤波细化后的结果,图1(c)是利用图1(b)中细化透射率恢复出的无雾图像.

在图1(c)中,buildings 天空区域出现了色彩失真和块效应,建筑物边缘则出现了光晕.这是因为暗原色先验理论对明亮的天空区域并不适用,估计出的大气光照和透射率的不准确,导致了色彩失真和光晕效应的出现.为解决此问题,本文将基于引导滤波分割天空,分别估算大气光照和透射率.并利用中值滤波得到透射率详细边缘信息,最终得到更为清晰的透射率.

3 改进的暗原色先验

暗原色先验理论不适用于天空区域,本文利用引

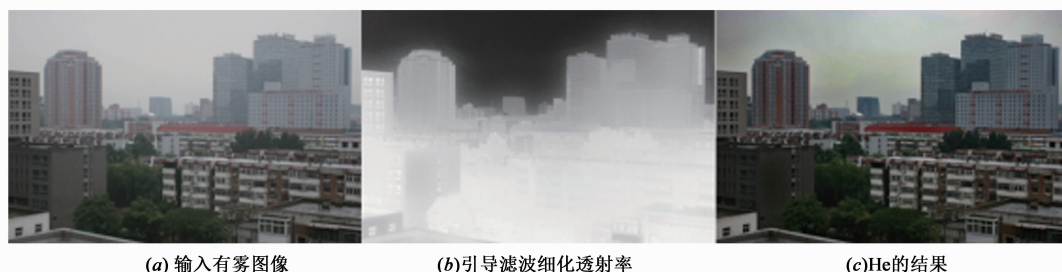


图1 有雾图像buildings的恢复结果

导滤波,它能够很好的保存边缘信息,将其用于天空分割后细化边缘,准确估算出天空区域和非天空区域的大气光照强度和透射率.中值滤波技术能够获取详细的边缘信息,去除粗透射率中的这些信息,可以得到更为清晰地透射率.基于此,本文提出了改进的基于天空约束暗原色先去雾算法,具体流程框图如图2:

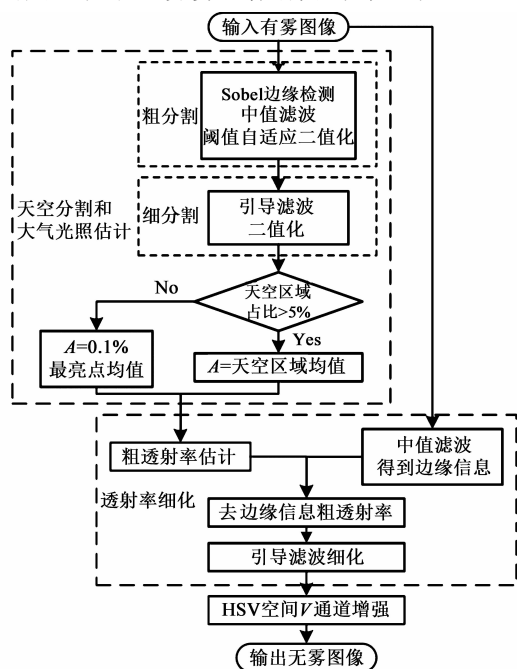


图2 图像去雾算法流程框图



图3 有雾图像buildings的天空分割结果

天空分割以后要分别估计大气光照强度,He^[8]的估计方式对一般无天空区域的有雾图像 I 是合理的,但当输入有雾图像具有天空区域时,这种方式可能会使各通道的 A 值接近255,造成恢复出的无雾图像 J 色彩失真.本文针对此问题,将依据天空区域占图像比例大小,分别对其大气光照强度进行估算.

如果天空区域占图像比例小于5%,选取暗通道 J_{dark} 中前0.1%最亮点所在位置对应输入图像 I 的三个通道 (r, g, b) 内的像素点,累加得到 (S_r, S_g, S_b) ,求平均值作为大气光照强度 A :

$$\begin{cases} A_r = S_r/n \\ A_g = S_g/n \\ A_b = S_b/n \end{cases} \quad (6)$$

图2中,首先输入有雾图像经过粗分割二值化.将输入有雾图像作为引导图像,利用引导滤波对粗分割二值化后的图像进行细分分割二值化,根据天空区域元素所占比例大小,分别估算大气光照强度和透射率.其次利用中值滤波去除透射率的边缘信息.再用引导滤波细化透射率,得到更为清晰的透射率.最后,针对输出图像偏暗,在HSV空间对 V 通道进行增强^[12],从而得到无雾图像.

3.1 天空分割和大气光照估计

图1(c)中天空区域出现色彩失真,根本原因是错误估计大气光照和透射率.为估算准确,将对天空进行分割.首先对输入有雾图像粗分割二值化:先将输入图像转换为灰度图,利用边缘检测Sobel算子求其梯度信息;然后用中值滤波对梯度信息去噪和滤波,滤波半径设为15;最后利用自适应阈值大津算法(经过反复实验发现,阈值只需遍历 $T \in [-1, 6)$ 之间所有整数)确定使类间方差最大的最佳分割阈值,对滤波后的梯度信息二值化区分,得到粗分割二值化图像如图3(b).其次,由于此时分割边缘粗糙,需要对其进行细分分割二值化:首先引导滤波^[11]被运用于细化分割边缘;然后对细化的分割图像再一次进行二值化分割,经反复试验,此时阈值可固定为0.25,得到细分分割二值化图像,如图3(c).

n 为输入图像像素点个数的0.1%.

如果天空区域占图像比例大于5%,直接根据分割后的图像确定天空区域,并在输入有雾图像 I 的三个通道 (r, g, b) 内找到与天空区域对应的像素点,累加得到 (S_r, S_g, S_b) ,取平均值作为大气光照强度 A .此时 A 值有可能接近255,为避免恢复出的无雾图像 J 出现色彩失真,这里对上述 A 值进行适当调整,经反复试验,调整系数取0.8.三个通道的大气光照强度为:

$$\begin{cases} A_r = 0.8 \cdot S_r/N \\ A_g = 0.8 \cdot S_g/N \\ A_b = 0.8 \cdot S_b/N \end{cases} \quad (7)$$

N 为输入图像天空区域像素点个数.

3.2 透射率估计

图 1(c) 中,可明显看到景物边缘存在光晕. 图 1(b) 中,细化透射率景物边缘同样存在着光晕. 究其根本原因:在估计粗透射率时,是利用窗口滑动逐块估计的,当窗口中心滑到景物边缘时,窗口会覆盖到非景物区域. 在细化景物边缘点粗透射率时,用到了局部非景物粗透射率估计做平均,造成细化后的透射率中景物边缘出现光晕,进而影响到恢复出的无雾图像景物边缘也出现光晕.

为消除结果中的光晕和块效应,需消除粗透射率中误估计为景物的边缘信息;中值滤波是一种能够很好的保持边缘信息,同时有效抑制噪声的非线性处理技术. 首先利用它粗糙的计算初始雾层^[9] $M(x)$,令 $I_{\min}(y) = \min_{c \in \{r, g, b\}}(I_c(y))$, I_c 表示输入有雾图像的每个通道,则:

$$M(x) = \underset{y \in \Omega(x)}{\text{median}}(I_{\min}(y)) \quad (8)$$

中值滤波器能够保存边缘信息,而最小值滤波器损失了边缘信息,所以边缘信息(Edge Information, EI)为:

$$EI(x) = \min(M(x), I_{\min}(x)) - \min_{y \in \Omega(x)}(I_{\min}(y)) \quad (9)$$

除去边缘信息的粗透射率:

$$t_c(x) = \bar{t}(x) - EI(x) \quad (10)$$

由于暗原色先验^[8]对天空区域不成立,在带雾的图像中天空的颜色总是同大气光 A 非常接近,对天空区域粗透射率估计 $t_s(x)$ 偏小,所以要对 $t_s(x)$ 做适当调整,同时又要避免透射率过大,设一个阈值 220,调整后粗透射率 $t_s(x)$,整幅图像 Ω ,包含天空区域(Ω_s)和非天空区域(Ω_n),则:

$$t_s(x) = \begin{cases} \min((t_c(x) + 100), 220)/255, & x \in \Omega_s \\ t_c(x)/255, & x \in \Omega_n \end{cases} \quad (11)$$

用引导滤波(Guided Filter, GF)^[11]对 $t_s(x)$ 进行细化,利用其平滑功能,可以将天空和非天空分界部位的不平滑现象一定程度上弥补掉.

$$t(x) = GF(t_s(y)), \quad y \in \Omega(x) \quad (12)$$

最终,各种透射率如图 4. 对比(d)和(e), (d)消除了景物边缘的光晕,且比(e)估计的更准确,更清晰;最后利用公式(6)恢复出无雾图像.

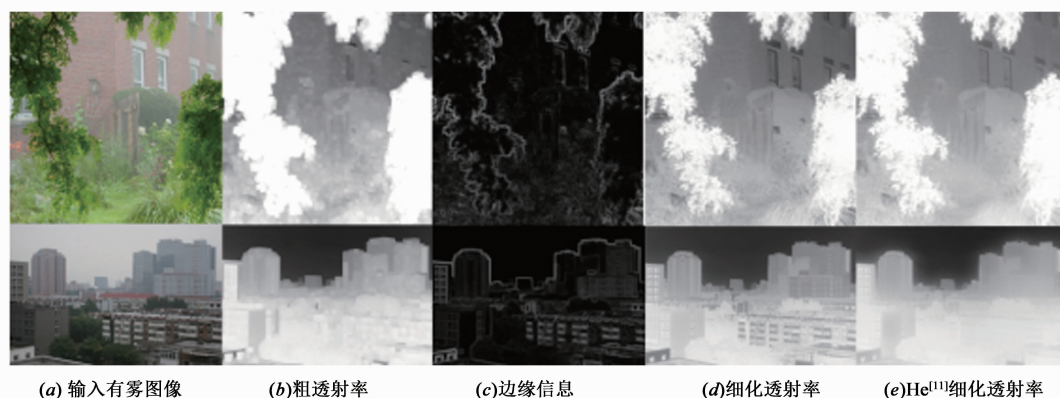


图4 有雾图像house(上)和buildings(下)的透射率计算

4 实验比较与分析

本文对大量图像进行了测试,测试图片来源于 He^[11]、Fattal^[6]、Zhang^[9]、Kim^[5]等人的主页,鉴于篇幅限制,仅选取两幅有天空区域的 buildings 和 street. 四幅不包含天空区域的 house, swan, forest 和 cones. 假设输入有雾图像的尺寸为 $s_x \times s_y$, 最小值滤波的半径 $r_{\min} = \max\{s_x/100, s_y/100, 3\}$, 引导滤波的半径为 r_{\min} 的 4 到 8 倍. 计算机配置: Inter Core i3-2120 (CPU@ 3.30 GHz), 4.00GB 内存. 软件环境 VS2010, 操作系统 Windows 7. 图像效果采用主观效果和客观效果进行评价.

4.1 客观结果比较

本文采用统计的方法^[13]比较不同性能的增强算法. 图 5(a) 展示了这种视觉统计的概念. 它包含图像的

全局平均值和区域标准差的全局平均,分别能评估图像的亮度和对比度,视觉最佳区域(visually optimal region)的范围如图 5(a) 中阴影部分. 这种方法在二维对比度亮度图中可以有效地定量评估图像增强后的质量,二维对比度亮度图如图 5(b): 从图 5(b) 对比结果可以看出,各去雾算法结果与输入有雾图像相比,亮度都有所降低,对比度都有所提高. 本文算法的节点虽然没有达到人类视觉最佳区域,但与其它算法相比,都位于其它算法节点的右上方,倾向于最佳视觉区域. 这说明本文算法较于其它算法效果更好.

一些客观的评价标准用于实验结果的分析. 文献[9]中包含三个指标 e, \bar{r}, σ , 分别代表恢复后的视觉边缘,平均视觉增强,像素完全变黑或完全变白的百分比. 边缘强度^[14]代表了图像边缘信息. 本文就用这四个

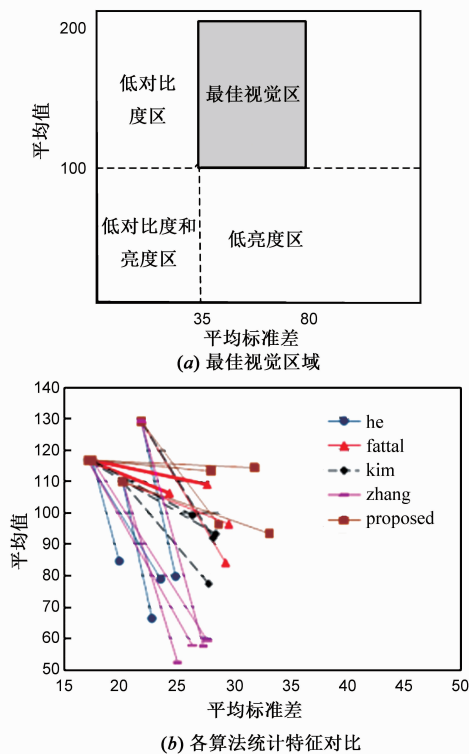


图5 最佳视觉区域以及各算法统计特征对比

客观指标比较输入有雾图像和恢复后的无雾图像,得到了大量的评估和对比结果.表1给出了本文算法和另外四种算法的对比实验结果.

对于这些评估指标,边缘强度, e 和 \bar{r} 越大,复原后图像的视觉更好, σ 越小,表明恢复后既没有饱和也没有模糊视觉边缘,去雾效果更好.由表1可以看出,本文算法所得的客观指标与其它四种算法相比更好或接近最好.表1中 e 出现负值,这是因为 buildings 和 street 景物结构复杂,去雾后部分可见的像素点连成一片区域,导致可见视觉边缘的数目相对原图减少,使得 e 为负值.然而依据图6和8的视觉结果,我们可以发现这些客观指标,即边缘强度^[14]和文献[9]引入的 e, \bar{r}, σ 并不完全符合人类主观感受.从客观指标可以看出,本文提出的去雾算法较经典算法有较大的改善.

4.2 主观效果评价

将本文算法与 He、Fattal、Zhang、Kim 等人算法相比较.结果如图6,图7,图8.

图6是有天空区域的图像.图6(a)为输入有雾图像,场景对比度低,细节模糊,色彩淡化.图6(b)为 He 的结果,相比图6(a),对比度有所增强,景物细节清晰,色彩鲜艳,但天空区色彩失真,景物边缘有光晕效应.图6(c)对比度提高,但图像整体依然模糊.图6(d)对比度有点过增强,天空区域失真严重,景物边缘光晕明显.图6(e)整体对比度提高,亮度增大,但天空区域依然朦胧.图6(f)是本文算法结果,与前者相比,图像更清晰,获得了更好地视觉效果,避免了天空区域的色彩失真以及景物边缘光晕效应.

表1 不同算法效果客观测试

Image/Index	He ^[11]	Fattal ^[6]	Zhang ^[9]	Kim ^[5]	proposed
buildings 边缘强度	53.088	54.706	65.932	74.167	75.526
e	0.097	-0.087	0.168	-0.057	0.062
\bar{r}	1.177	1.126	1.239	1.830	1.487
σ	0.066%	0%	11.863%	3.483%	0%
street 边缘强度	51.645	59.302	69.962	71.070	73.683
e	0.175	-0.002	0.184	0.079	0.188
\bar{r}	1.025	1.301	1.347	1.373	1.466
σ	0.005%	0%	11.173%	0.414%	0.127%
forest 边缘强度	70.153	87.325	86.224	84.892	88.535
e	0.166	0.037	0.056	0.074	0.123
\bar{r}	1.348	1.939	1.450	1.626	1.637
σ	0.084%	0.793%	4.419%	1.803%	0%
cones 边缘强度	63.451	87.699	85.740	87.872	107.754
e	0.222	0.232	0.173	0.121	0.194
\bar{r}	1.300	1.875	1.923	1.869	2.316
σ	0%	0.008%	0.292%	0.090%	0.096%

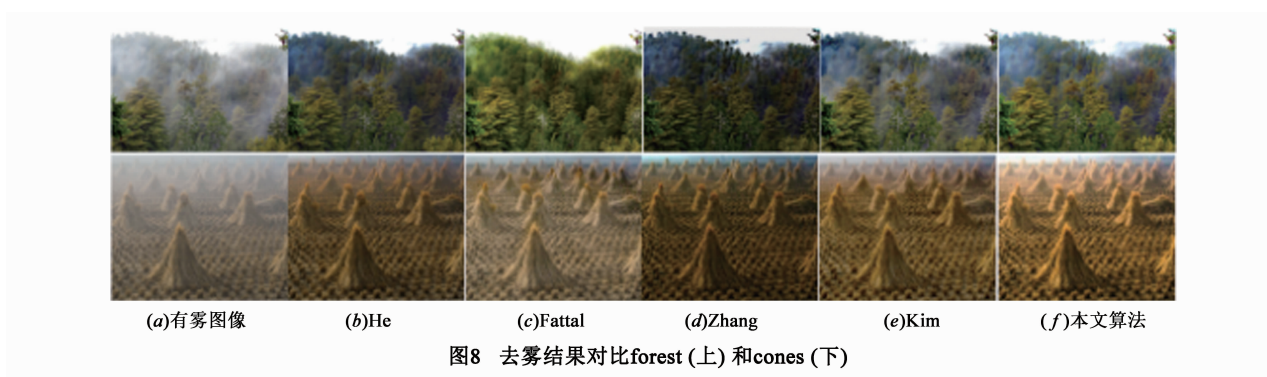
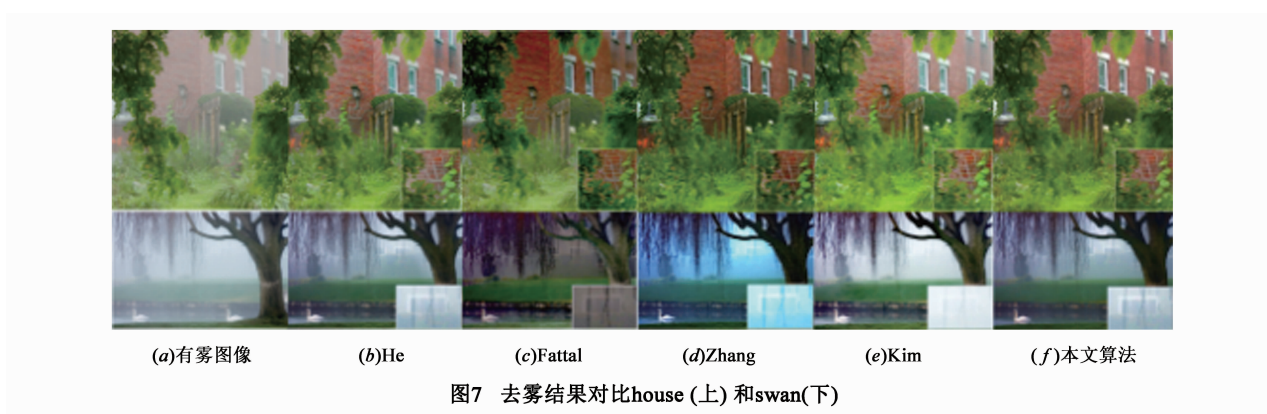


图7,图8是无天空区域的图像,本文算法图7(f)与He算法图7(b)相比去雾效果更明显,避免了house树叶和swan树干周围的光晕;与Fattal算法图7(c)和Zhang算法图7(d)相比视觉效果更好,去雾更彻底,这两种算法效果图均有一定程度的偏色;与Kim算法图7(e)相比,house墙体去雾效果更好,swan远端可明显看到空调。

综上所述,本文算法适用于各种各样的户外雾霾化图像,并且可去除更多的雾和恢复更多细节,具有更好的去雾能力。

5 结论

由于经典的暗原色先验理论不适用于天空区域,会造成天空色彩失真,且软抠图算法复杂,恢复图像由于透射率不够细化出现光晕.本文针对天空色彩失真,引入天空分割,并用引导滤波细化分割边缘,分别估算大气光照强度和透射率;针对透射率不清晰,景物边缘出现光晕效应,引入中值滤波得到详细的边缘信息,去除这些信息,最终得到足够清晰的透射率,消除光晕效应;针对恢复出的无雾图像偏暗的现象,在HSV空间对亮度分量V通道进行增强处理.理论分析和实验数据

表明,本文算法明显改善了天空区域色彩失真以及景物边缘光晕效应等问题,且去雾后的图像清晰度,对比度,色彩鲜艳度都比原来有所增强,算法效率也有所提高.

参考文献

- [1] 吴迪,朱青松. 图像去雾的最新进展[J]. 自动化学报, 2015,41(2):221-239.
D Wu, Q Zhu. The latest research progress of image dehazing[J]. Acta Automatica Sinica, 2015, 41(2):221-239. (in Chinese)
- [2] 吴成茂. 直方图均衡化的数学模型研究[J]. 电子学报, 2013,41(3):598-602.
C Wu. Studies on mathematical model of histogram equalization[J]. Acta Electronica Sinica, 2013, 41(3):598-602. (in Chinese)
- [3] 汪荣贵,傅剑峰,杨志学,沈法琳,查炜. 基于暗原色先验模型的 Retinex 算法[J]. 电子学报, 2013,41(6):1188-1192.
R Wang, J Fu, Z Yang, F Shen, W Zha. A novel retinex algorithm based on dark channel prior model[J]. Acta Electronica Sinica, 2013, 41(6):1188-1192. (In Chinese)
- [4] R T Tan. Visibility in bad weather from a single image [A]. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition[C]. USA:IEEE, 2008. 1-8.
- [5] J H Kim, W D Jang, J Y Sim, C-SKim. Optimized contrast enhancement for real-time image and video dehazing[J]. Journal of Visual Communication and Image Representation, 2013, 24(3):410-425.
- [6] R Fattal. Single image dehazing[J]. ACM Transactions on Graphics (TOG), 2008, 27(3):Article No. 72.
- [7] J Tarel, N Hautiere, L Caraffa, A Cord, H Halmaoui, D Gruyer. Vision enhancement in homogeneous and heterogeneous fog [J]. IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine, 2012, 4(2):6-20.
- [8] K He, J Sun, X Tang. Single image haze removal using dark channel prior[J]. IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2011, 33(12):2341-2353.
- [9] Y Zhang, Y Ding, J Xiao, J Liu, Z Guo. Visibility enhancement using an image filtering approach [J]. EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 2012, 2012(220):1-6.
- [10] S C Huang, B H Chen, W J Wang. Visibility restoration of single hazy images captured in real-world weather conditions[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2014, 24(10):1814-1824.
- [11] K He, J Sun, X Tang. Guided image filtering [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2013, 35(6):1397-1409.
- [12] J Xiao, H Peng, Y Zhang, C Tu, Q Li. Fast image enhancement based on color space fusion [J]. Color Research Application, 2016, 41(1):22-31.
- [13] Z Zhou, N Sang. A parallel nonlinear adaptive enhancement algorithm for low- or high-intensity color images [J]. EURASIP Journal on Advances in Signal Processing 2014, 2014(70):1-14.
- [14] 涂超平,肖进胜,杜康华,易本顺. 基于各向异性热扩散方程的多聚焦图像融合算法[J]. 电子学报, 2015, 43(6):1192-1199.
C Tu, J Xiao, K Du, B Yi. Multi-focus image fusion algorithm based on the anisotropic thermal diffusion equation [J]. Acta Electronica Sinica, 2015, 43(6):1192-1199. (in Chinese)

作者简介



肖进胜 (通信作者) 男, 1975 年 7 月出生于湖北武汉, 博士, 武汉大学电子信息学院副教授, 主要研究方向: 视频图像处理, 计算机视觉, 多媒体网络通信.

E-mail: xiaoj@s@whu.edu.cn



高 威 男, 1991 年 5 月出生于湖北枣阳, 武汉大学电子信息学院硕士生, 主要研究方向: 视频图像处理.

E-mail: w_gao@whu.edu.cn

邹白昱 男, 1993 年 9 月出生于湖北武汉, 武汉大学电子信息学院硕士生, 主要研究方向: 视频图像处理.

姚 远 男, 1974 年生, 工学博士, 博士后, 华中师范大学物理科学与技术学院副教授, 硕士生导师, 主要从事信息处理、嵌入式系统应用等领域的研究.

章勇勤 男, 1984 年生, 工学博士, 博士后, 西北大学信息科学与技术学院讲师, 硕士生导师, 主要从事图像处理、图像复原等领域的研究.