

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.201508054



结合天空分割修正的快速去雾方法

刘子兵, 戴声奎

(华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 针对目前去雾算法对高亮天空区域处理不理想,以及去雾后的图像整体视觉效果较差的问题,提出一种结合天空区域分割修正的快速雾天图像复原方法. 首先,对输入图像进行白平衡处理;其次,根据大气散射物理特性和光学成像特性对大气耗散函数做初始估计,判断是否存在天空区域,若存在天空区域,结合对比度增强调整,Otsu 算法(大津法)分割出天空区域,修正天空区域的大气耗散函数;最后,由大气散射模型得到复原图像,并对复原图像做亮度调整. 实验结果表明:该算法具有较强的场景适应能力,能很好地处理天空区域;复原图像具有较好视觉效果,而且执行速度更快.

关键词: 图像复原; 去雾; 图像分割; 大气散射模型; 大气耗散函数

中图分类号: TP 391. 41 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2018)01-0133-06

Fast Dehaze Algorithm Based on Sky Region Segmentation and Modification

LIU Zibing, DAI Shengkui

(College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: In order to overcome the existing dehaze algorithms defects, such as bad effects in bright sky area and poor visual effects to dehaze images, a fast dehaze method is proposed based on sky region segmentation and modification. Firstly, the white balance processing is used for input images. Secondly, based on the physical property of the atmospheric scattering model and optical imaging, atmospheric veil is roughly estimated, and then determines whether or not there exists sky region. If sky region exists, sky region is segmented by contrast adjustment procedure and the Otsu algorithm, and then atmospheric veil of the sky region is modified properly. Finally, haze-free images are restored by atmospheric scattering model, and a post-processing procedure is adopted to adjust the brightness of the restored images. Experimental results yield that the proposed method not only has robust scene adaptability and achieves good restore performance in sky area, but also maintains good visual effects and ensures the faster performance.

Keywords: image restoration; haze removal; image segmentation; atmospheric scattering model; atmospheric veil

雾天场景下,大气中悬浮的颗粒物对光线的散射效应导致成像设备成像质量的严重退化,影响了主观视觉效果及后期分析处理. 因此,去雾技术具有重要的研究价值和意义. 近年来,基于先验假设的单幅图像去雾方法成为了研究的热点^[1]. Fattal^[2]采用独立成分分析方法(ICA)估计场景的反射系数,该方法需要对场景颜色信息统计. 因此,不能处理灰度图像. He 等^[3]提出了暗通道先验规律,极大提升去雾的有效性,但算法复杂度太高,实时性较差. 引导滤波器的提出和应用^[4-5]大幅降低了透射率修复的计算

收稿日期: 2015-08-30

通信作者: 戴声奎(1971-),男,副教授,博士,主要从事图像去雾、图像处理、计算机视觉、模式识别的研究. E-mail: d. s. k@hqu. edu. cn.

基金项目: 中央高校基本科研专项基金资助项目(JB-ZR1145);福建省科技计划重点资助项目(2013H0030)

复杂度,然而滤波半径和正则化参数设置如果不恰当,易产生光晕效应.王伟鹏等^[6]采用快速双边滤波来细化透射率,没有光晕效应,但实时性仍然不够高. Yu 等^[7]通过对大气光照进行白平衡处理,利用快速双边滤波估计大气耗散函数,通过求解简化的退化物理模型实现图像去雾,然而该方法不能有效处理白色物体.针对当前算法对天空等高亮区域处理的不足,本文从大气散射模型出发,提出一种结合天空区域分割修正的去雾方案.

1 大气散射模型

Koschmieder 等通过对不同天气条件下的大气粒子的散射特性进行深入研究,提出了雾霾天气的大气散射模型,该模型描述了雾霾天气图像退化过程,即

$$L(x) = L_0(x)t(x) + A(1 - t(x)).$$
 (1)

式(1)中: $L(x)$ 为有雾图像; $L_0(x)$ 为无雾图像; $t(x)$ 为光线传输透射率,描述光线通过大气传输后没有被散射部分的比例; A 为全局大气光强度值.

在大气粒子分布均匀时,透射率 $t(x)$ 可以表示为

$$t(x) = e^{-\beta d(x)}.$$
 (2)

式(2)中: β 为散射系数; $d(x)$ 为场景深度.

去雾的目的是恢复出 $L_0(x)$,然而,式(1)中只有 $L(x)$ 为已知量.因此,这是一个欠约束问题.为了简化描述上述方程,引入大气耗散函数,即

$$V(x) = A(1 - \exp(-\beta d(x))).$$
 (3)

大气散射模型式(1)可以等价为以下形式,即

$$L(x) = L_0(x)(1 - V(x)/A) + V(x).$$
 (4)

大气耗散函数 $V(x)$ 和大气照射光强度 A 可以复原无雾图像 $L_0(x)$. 根据对大气散射物理模型属性分析,Tarel 等^[8]提出大气耗散函数应该满足两个约束条件. 1) 大气耗散函数的取值应该为正值. 2) 大气耗散函数的取值不大于该像素点的 RGB 通道中最小颜色分量灰度值.

2 基于 Otsu 天空分割修正的去雾方法

2.1 大气光强度值 A 估计

根据大气耗散函数的物理特性及暗通道先验信息^[3],可以用有雾图像三通道的最小颜色分量对雾气质量浓度进行初步估计,即

$$V_m(x,y) = \min_{c \in \{R,G,B\}} L^c(x,y).$$
 (5)

为了进一步排除小块白色物体的干扰,对 $V_m(x,y)$ 做形态学腐蚀操作,得到 $V_{er}(x,y)$. 在 $V_{er}(x,y)$ 中选取最亮的前 0.2% 像素点作为大气光候选点,对应有雾图像的相同位置的三颜色通道的平均值分别为 A_R, A_G, A_B ,则大气光值 A 的估计为

$$A = (A_R + A_G + A_B)/3.$$
 (6)

2.2 白平衡处理

由雾天图像降质物理模型的特性及 Retinex 理论^[9],雾天场景中引起光学成像系统色偏的主要是由大气粒子对不同波长的光线散射能力不同而引起的,文献[10]采用白点算法进行白平衡校正,当最亮点不是大气光强度值时,不能有效实现白平衡校正.利用大气光候选点的 RGB 颜色比例信息来实现白平衡处理,方法为

$$L_{wb}^c(x,y) = L^c(x,y) \cdot A/A_c.$$
 (7)

式(7)中: $L_{wb}^c(x,y)$ 为白平衡校正输出.

2.3 大气耗散函数估计

2.3.1 大气耗散函数初步估计和天空分割修正 根据大气耗散函数的物理特性及暗通道先验信息^[11],利用白平衡校正后的有雾图像的最小颜色通道分量对大气耗散函数做初步估计,即

$$V_{min}(x,y) = \min_{c \in \{R,G,B\}} L_{wb}^c(x,y).$$
 (8)

文献[12]指出对于不满足暗通道先验的高亮白色区域,需要增加其透射率才能获得正确的恢复结果,明亮的天空区域便是不满足暗通道先验.根据式(2),(3)大气耗散函数与透射率的关系,需要衰减天空区域的大气耗散函数.

为了分割出天空区域,天空区域应该满足两个条件:1) 天空区域位置靠上;2) 整体亮度值较高,选取 $V_{\min}(x,y)$ 中位置靠上的 20% 区域 $V_{\text{up}}(x,y)$ 分析.计算 $V_{\text{up}}(x,y)$ 亮度均值 M .统计亮度值位于 $[\lambda \times A, A]$ 的大气光像素比例 K , λ 表示亮度判定范围,文中选取 0.98.

天空是否存在的判决规则为

$$\text{isSky} = \begin{cases} 1, & M > M_{\text{th}}, \quad K > K_{\text{th}}, \\ 0, & \text{其他.} \end{cases} \quad (9)$$

式(9)中: $M_{\text{th}}, K_{\text{th}}$ 分别为亮度判断阈值和大气光像素比例阈值, $M_{\text{th}}, K_{\text{th}}$ 分别选取 190.0 和 0.2.

如果存在天空区域($\text{isSky}=1$),就需要尽可能准确地分割出天空区域,但由于雾气的影响,有雾图像中天空区域和非天空区域的亮度值差别不明显,很难用阈值分割出天空区域.为了增大天空区域与非天空区域的亮度差异,提出一种简单但是有效的对比度调整方案,即

$$L_{\text{gray}}(x,y) = V_{\min}(x,y) \prod_{c \in \{R,G,B\}} \left(\frac{L_{\text{wb}}^c(x,y)}{\max(L_{\text{wb}}^c(x,y))} \right). \quad (10)$$

式(10)中: $L_{\text{gray}}(x,y)$ 为对比度调整后的亮度图像.

对 $L_{\text{gray}}(x,y)$ 采用 Otsu^[9] 法分割,得到背景部分即是天空区域,其对应自适应分割阈值 t^* .

$$\text{SkyArea}(x,y) = \begin{cases} 1, & L_{\text{gray}}(x,y) > t^*, \\ 0, & \text{其他.} \end{cases} \quad (11)$$

对于天空区域,为了衰减其大气耗散函数,将初始估计大气耗散函数 $V_{\min}(x,y)$ 的 Otsu 分割阈值作为天空区域大气耗散函数值的修正依据,修正方法为

$$V_{\text{fix}}(x,y) = \begin{cases} \text{th} \times \eta, & \text{SkyArea}(x,y) = 1, \\ V_{\min}(x,y), & \text{其他.} \end{cases} \quad (12)$$

式(12)中: $V_{\text{fix}}(x,y)$ 是修正后大气耗散函数; th 为 $V_{\min}(x,y)$ 的 Otsu 分割阈值; η 为衰减修正系数 $\eta = (255 - A)/255$ 自适应求取.

为了保证修正的天空和非天空区域过渡自然,对修正的大气耗散函数做高斯平滑处理.天空修正和 BEEPS 滤波,如图 1 所示. Tarel 等^[8]指出大气耗散函数在局部应该具有平滑性,没有景深跳变的区域,纹理信息应该滤除;而对于景深跳变的区域,应该保护跳变边缘.因此,修正后的大气耗散函数需要进一步精细化处理以滤除局部纹理信息.

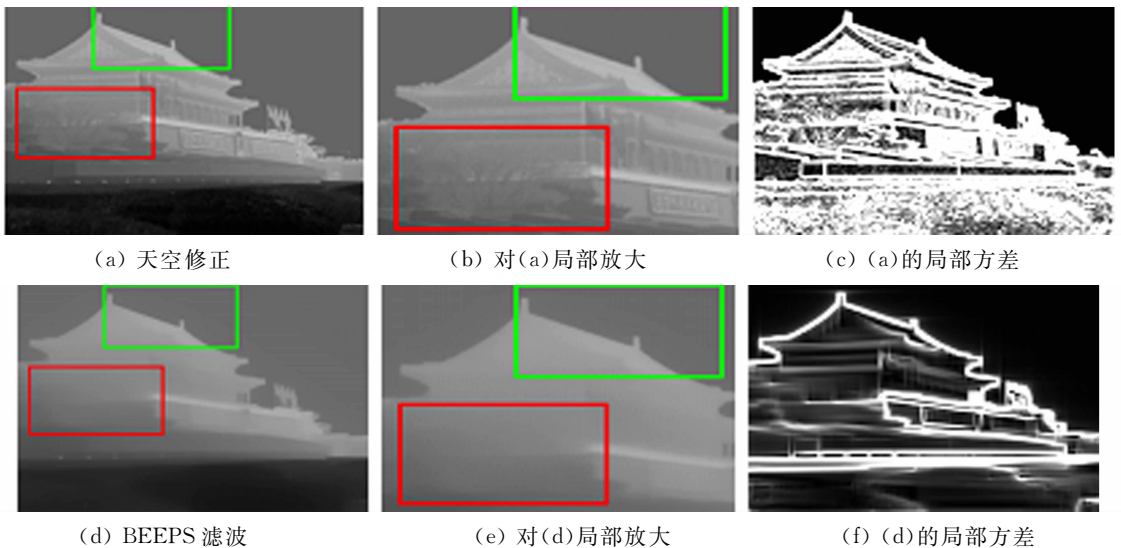


图 1 天空修正和 BEEPS 滤波

Fig. 1 Sky region modification and BEEPS filtering

2.3.2 大气耗散函数精细化处理 在保护景深跳变的边缘信息的前提下,进一步滤除局部纹理信息,

使用双指数边缘保持平滑滤波器(bi-exponential edge-preserving smoother,BEEPS)^[13]来精细化大气耗散函数。

对修正的大气耗散函数进行双指数边缘保持滤波,便得到精细化的大气耗散函数 $V(x,y)$,即

$$V(x,y) = \text{BEEPS}(V_{\text{fix}}(x,y)). \tag{13}$$

2.4 雾天图像复原和亮度调整

在求得大气光强度值 A 和大气耗散函数 $V(x,y)$ 的前提下,可以依据大气散射模型式(4)直接恢复出无雾图像,即

$$L_0(x,y) = \frac{A(L(x,y) - W \times V(x,y))}{A - W \times V(x,y)}. \tag{14}$$

式(14)中: W 为去雾程度控制参数,为了保持景深透视感,需要保留一些远处的雾气, W 取 0.92. 为了更好地增强雾天图像复原结果,通过实验分析提出一种非线性映射的亮度调整方法. 其调整函数为

$$L_{\text{enhance}}(x,y) = \frac{L_0(x,y)(255 - \gamma L_0(x,y))}{1 - \gamma}. \tag{15}$$

式(15)中: $L_{\text{enhance}}(x,y)$ 为亮度调整后的图像; γ 为调整系数,取值越大调整能力越强, $\gamma = \min(0.5, \text{mean}(V(x,y)/255))$ 自适应求取, $\text{mean}()$ 表示求均值运算. 直接去雾和亮度调整后的效果,如图 2 所示.



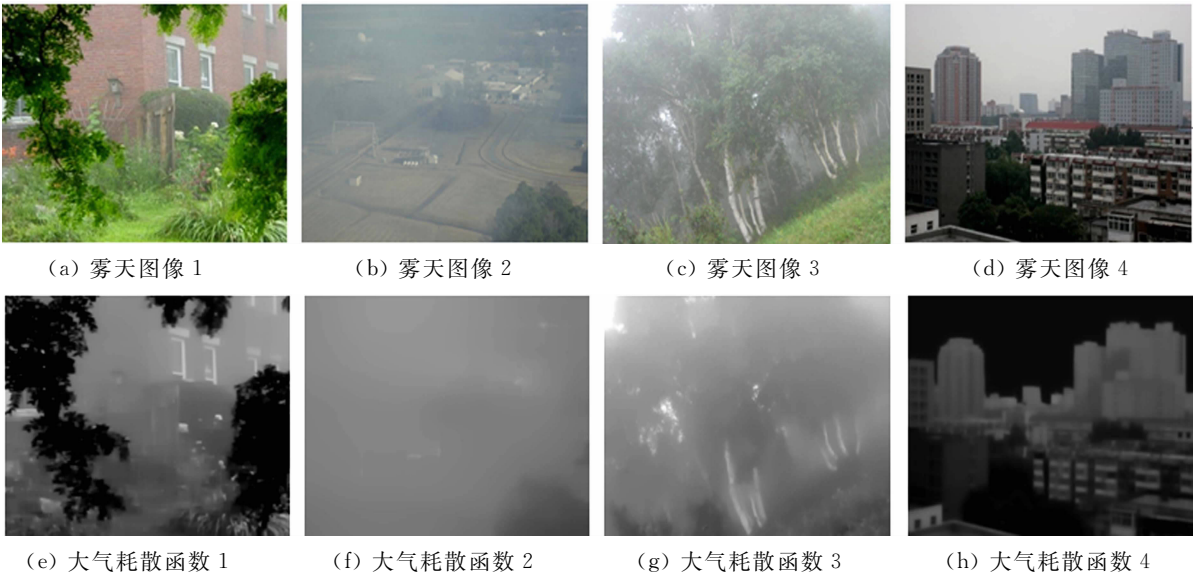
图 2 亮度调整方法去雾效果

Fig. 2 Haze removal result using brightness adjustment

3 实验结果与比较

3.1 实验系统

为验证算法的有效性,使用的测试图片均来源于互联网,所使用的实验硬件平台为 3.30 GHz Intel i5-4590 CPU,内存为 4 GB 的普通 PC 机,软件编程平台为 Matlab 2015a. 在不同场景下获取的大气耗散函数和复原结果,如图 3 所示.





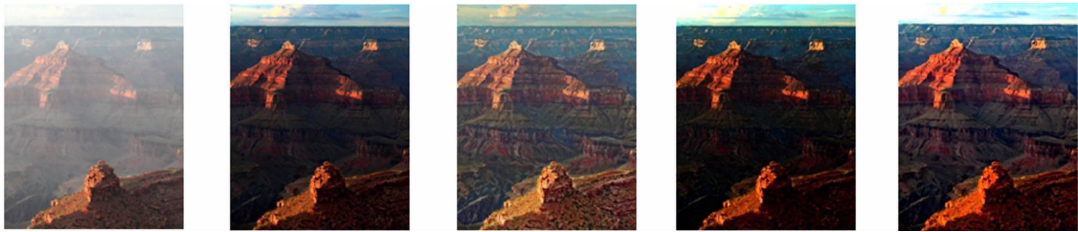
(i) 去雾图像 1 (j) 去雾图像 2 (k) 去雾图像 3 (l) 去雾图像 4

图 3 文中算法去雾结果

Fig. 3 More results using our method

3.2 主观评价

实验结果对比,如图 4 所示.由图 4 可知:文中效果和 He 方法效果接近,文中方法在局部细节上要优于 He 方法^[3];Tarel 方法^[8]由于采用中值滤波估计大气耗散函数,复原后的结果色彩失真严重,视觉效果较差;Sun 方法^[14]复原结果出现了色偏现象.



(a) 有雾图像 1 (b) He 方法 1^[3] (c) Tarel 方法 1^[8] (d) Sun 方法 1^[14] (e) 文中结果 1



(f) 有雾图像 2 (g) He 方法 2^[3] (h) Tarel 方法 2^[8] (i) Sun 方法 2^[14] (j) 文中结果 2

图 4 实验结果对比

Fig. 4 Comparison of experimental results

3.3 客观评价

为了客观地验证文中方法优势,采用 Hautiere 等^[15]提出的可见边梯度评估方法和灰度熵 E 对图 4 的复原结果作分析比较.可见边梯度方法包含两个评价参数:新增可见比之 e 和平均梯度比 \bar{r} .它们分别用来衡量新增边缘和梯度变化情况,通常 e 和 \bar{r} 越大,说明复原图像细节越丰富,清晰度越高.

上述评价参数的实验结果比较,如表 1 所示.

表 1 实验结果比较

Tab. 1 Comparison of experimental results

图像	指标				图像	指标			
	方法	e	\bar{r}	E		方法	e	\bar{r}	E
有雾 图像 1	He ^[3]	1.808	1.952	6.778	有雾 图像 2	He ^[3]	0.505	2.743	7.112
	Tarel ^[6]	1.994	2.432	7.001		Tarel ^[6]	0.603	2.624	6.953
	Sun ^[7]	1.854	2.323	6.776		Sun ^[7]	0.421	2.121	7.115
	文中	1.943	2.545	7.223		文中	0.514	2.913	7.343

由表 1 可知:复原图像具有最高灰度熵,表明复原的图像整体亮度分布更均匀,亮度信息最丰富,整体对比度较好.从细节恢复能力指标 e 和 \bar{r} 上分析,由于 Tarel 方法产生了很多伪边缘,所以导致其新增可见边之比 e 过高,本方法与 He 方法的新增可见边之比 e 值较为接近,并且文中方法的平均梯度 \bar{r} 较高,说明细节信息丰富.综合整体分析比较,算法仍具有较大优势.

对比上述算法运行速度,在相同的硬件平台上处理不同分辨率的图像平均耗时,如表 2 所示.由表 2 可知:文中算法执行速度至少是其余 3 种算法的 4 倍以上,因此,具有更高的执行效率和实时性.

表 2 算法耗时比较
Tab.2 Comparison of running time

图像分辨率/px×px	t/s			
	He ^[3]	Tarel ^[8]	Sun ^[14]	文中
480×320	6.37	1.33	0.55	0.13
600×400	12.41	2.27	0.91	0.21
1 280×720	52.15	6.22	3.52	0.85

4 结束语

提出一种结合天空分割修正的快速去雾方案,复原图像没有边缘光晕效应.对于存在高亮的天空区域,结合对比度调整算法和大津法分割,修正天空区域的大气耗散函数,经过双指数边缘保持滤波,得到更准确的大气耗散函数.最后,提出一种非线性的亮度提升方法,在提升整体亮度的同时保持全局的对比度,很好地改善了视觉效果.然而,由于大津法只是运用了亮度信息进行图像分割,文中方法的局限在于当非天空区域拥有与天空区域同等亮度的大面积白色物体时,天空分割会不够准确,接下来的工作将是针对这一现象,增加图像分割的特征信息,使天空分割更加准确,进一步提高复原效果.

参考文献:

[1] 吴迪,朱青松. 图像去雾的最新研究进展[J]. 自动化学报, 2015, 41(2): 221-239. DOI: 10. 16383/j. aas. 2015. c131137.

[2] FATTAL R. Single image dehazing[J]. ACM Transactions on Graphics, 2008, 27(3): 1-9. DOI: 10. 1145/1399504. 1360671.

[3] HE Kaiming, SUN Jian, TANG Xiaou. Single image haze removal using dark channel prior[C]//IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Miami: IEEE Press, 2009: 1956-1963. DOI: 10. 1109/CVPRW. 2009. 5206515.

[4] HE Kaiming, SUN Jian, TANG Xiaou. Guided image filtering[C]//Proceeding of the 11th European Conference on Computer Vision. Heraklion: Springer, 2010: 1-14. DOI: 10. 1109/TPAMI. 2012. 213.

[5] 王伟鹏,戴声奎,项文杰. 一种雾天退化场景快速复原方法[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2015, 36(2): 156-160. DOI: 10. 11830/ISSN. 1000-5013. 2015. 02. 0156.

[6] 王伟鹏,戴声奎. 引导滤波在雾天图像清晰化中的应用[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2015, 36(3): 263-268.

[7] 禹晶,李大鹏,廖庆敏. 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.

[8] TAREL J P, HAUTIERE N. Fast visibility restoration from a single color or gray level image[C]//Proceedings of the IEEE 12th International Conference on Computer Vision. Kyoto: IEEE Press, 2009: 2201-2208.

[9] LAND E H. The Retinex theory of color vision [J]. American Scientist, 1977, 237(6): 108-128.

[10] 刘言,张红英,吴亚东,等. 基于半逆法的一种快速单幅图像去雾算法[J]. 图学报, 2015, 36(1): 68-76.

[11] 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(2): 7-12.

[12] OTSU N. A threshold select ion method from gray-level histograms[J]. IEEE Transactions on System Man and Cybernetic, 1979, 9(1): 962-926.

[13] THEVENAZ P D, SAGE M U. Bi-exponential edge-preserving smoother[J]. IEEE Transactions on Image Process-ing, 2012, 21(9): 3924-3936.

[14] SUN Wei. A new single-image fog removal algorithm based on physical model[J]. Optic-International Journal for Light and Electron Optics, 2013, 124(21): 4770-4775.

[15] HAUTIERE N, TAREL J P, AUBERT D, et al. Blind contrast enhancement assessment by gradient ratioing at vis-ible edges[J]. Image Analysis and Stereology Journal, 2008, 27(2): 87-95.

(责任编辑: 陈志贤 英文审校: 吴逢铁)