

文章编号 1004-924X(2013)04-1040-07

基于大气散射模型的单幅图像快速去雾

孙 伟^{1*}, 李大健², 刘宏娟², 贾 伟²

(1. 西安电子科技大学 机电工程学院, 陕西 西安 710071; 2. 西北工业大学 第 365 研究所, 陕西 西安 710065)

摘要:根据大气散射物理模型及光学反射成像模型, 总结并分析了影响单幅图像去雾效果的 3 大因素, 以实现雾霾图像的快速去雾。基于光学原理, 解释了暗影通道现象, 从新的角度推导出了大气散射模型中各参数的求法。利用灰度开运算去除白色目标的干扰获得精确的环境光亮度, 基于快速联合双边带滤波精确计算了大气散射函数, 最后由光学反射模型计算了场景目标的反射率并有效截断至 $[0, 1]$ 区间。本方法可以消除天空及环境光线的影响, 能真实复原场景的色彩和清晰度。仿真结果表明, 对分辨率为 576×768 的图像处理时间仅为 0.517 s, 且视觉效果和客观指标比现有算法均有不同程度的提高。与现有图像去雾算法相比, 本文提出的参数计算方法提高了运算速度、场景适应能力和复原效果。

关键词:光学成像模型; 大气散射物理模型; 快速联合双边滤波; 暗影通道; 图像去雾

中图分类号: TP751.2 文献标识码: A doi:10.3788/OPE.20132104.1040

Fast single image fog removal based on atmospheric scattering model

SUN Wei^{1*}, LI Da-jian², LIU Hong-juan², JIA Wei²

(1. School of Mechano-electronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China;

2. The 365 Institute, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710065, China)

* Corresponding author, E-mail: sunweitom@yanhoo.com.cn

Abstract: Based on the physical model of atmospheric scattering and an optical reflectance imaging model, three major factors influencing the fog removal for a single image were discussed in detail. The dark channel phenomenon was explained by the optical model, and the method to solve the parameters of atmospheric scattering model was rigorously derived from a new view. The gray-scale opening operation was used to eliminate the interference from a white object to obtain the global atmospheric light and the fast joint bilateral filtering technique was proposed to greatly improve the speed and accuracy of atmospheric scattering function solving. Finally, the scene albedo was recovered by inverting this model. Experiments show that the method can remove effectively the effect of lights from sky and environments and can recover the color and definition of original scenes. The simulation results indicate that the processing time for an image of 576×768 spends only by 1.7 s. As compared with the existing algorithm, obtained results on a variety of outdoor foggy images demonstrate that the proposed method achieves good restoration for contrast and color deity, and improves image visibility greatly.

收稿日期: 2012-10-29; 修订日期: 2012-11-26.

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目 (No. 61201290); 中央高校基础科研业务费专项资金资助项目 (No. K50511040008)

Key words: optical imaging model; atmospheric scattering model; fast joint bilateral filtering; dark channel; image fog removal

1 引言

目前,国内外学者对去雾算法的研究主要集中在单幅图像的去雾方法^[1-2]。近来,基于先验知识或假设的单幅图像去雾技术取得重大突破。Tan^[3]通过最大化局部对比度来达到去雾的效果,但该方法仅关注提高客观对比度,并没有从物理上求解场景反射率,复原的结果颜色过于饱和且有光晕伪影,视觉效果不理想。Fattal^[4]通过假设透射率和表面投影在局部是不相关的,采用独立分量分析(ICA)的方法和 MRF 模型来恢复图像,该方法是基于颜色统计,无法处理浓雾下的图像和灰度图像。Tarel^[5]利用滤波的方法对大气散射函数进行估计,最后经过色度调和获得恢复图像,该方法对颜色鲜艳的图像恢复效果较好,由于其本质上使用了大气散射物理模型,并没有严格估计环境光参数,因此整体效果偏暗,而且色度调和的引入,会造成颜色的失真,易引起 Halo 效应。He^[6]提出了一种基于统计暗影先验的图像去雾方法,首次获得了清晰和鲜艳的图像,为单幅图像去雾的研究打开了一片新天地;然而对暗影现象的原理并未深入分析,并且在存在较大面积的白色区域时,后续大气散射函数的估计对滤波算法要求很高;另外,He 提出的环境光的估计方法缺少有力的理论支持,需要改进。

总结以上方法,本文对 He 的方法在原理上深入剖析,并严格推导出散射模型中各参数的求解方法,解决了单幅图像去雾算法中的理论问题并给出了实施方法。文中从新的角度上阐述了暗影通道的物理原理,深入研究了影响图像去雾效果的 3 个关键因素:(1)环境光亮度的精确估计。主要研究如何去除白色区域以及大面积天空下的环境光亮度修正;(2)大气散射函数的精确估计,通过对低反射率目标的亮度估计,去除高反射率目标的影响,通过快速联合双边带滤波快速算法,获得精确的大气散射函数估计;(3)去除环境光照的影响,对复原的场景辐射率进一步计算目标的

反射率,并截断至 $[0,1]$ 区间。通过以上 3 个方面的研究,本文可以快速复原图像的色彩及亮度。

2 大气散射模型分析

2.1 图像退化的物理模型

Narasimhan 大气散射模型被广泛地应用于去雾技术的研究,如图 1 所示,该模型描述如下: $L(x, y) = L_0(x, y)e^{-kd(x, y)} + A(1 - e^{-kd(x, y)})$, (1) 式中: $L(x, y)$ 是观察到的输入图像, $L_0(x, y)$ 为场景的反射光线强度, k 为大气散射系数, $d(x, y)$ 是场景深度, $e^{-kd(x)}$ 为透射分布率, A 是环境光线亮度,一般为全局常量。

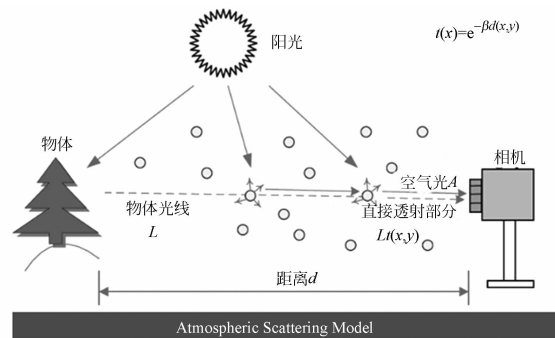


图 1 大气散射模型

Fig. 1 Atmospheric scattering model

$L_0(x, y)$ 即是所要复原的图像,由式(1)知,图像复原公式如下:

$$L_0(x, y) = \frac{L(x, y) - A(1 - e^{-kd(x, y)})}{e^{-kd(x, y)}}, \quad (2)$$

式中:令 $V(x) = A(1 - e^{-kd(x)})$, 称为大气散射函数。因此,只需估计出 A 和 $V(x)$ 即可求得 $L_0(x, y)$ 。由于其深度信息 d 未知, $L_0(x, y)$ 无法由方程解析求出。

2.2 模型参数估计

根据 Land 成像模型, $L_0(x, y) = \rho(x, y) * A$, $\rho(x, y)$ 为目标反射系数, $\rho(x, y) \rightarrow 0$ 时,由(1)得:

$$L(x, y) = A(1 - e^{-kd(x, y)}), \quad (3)$$

当 $d(x, y) \rightarrow \infty$ 时,由式(3)可得:

$$L_0(x, y) \rightarrow 0, L(x, y) \rightarrow A, \quad (4)$$

式(3)、(4)是求解 $L_0(x, y)$ 的约束条件。当 $\rho(x, y) \rightarrow 0$ 以及 $d(x, y) \rightarrow \infty$ 时,可以求解 A 。

基于目标对光线的吸收/反射特性,自然界中目标成像的颜色,是由物体吸收白光中特定频率的光而反射其余的光而形成。本文假设成像的色彩是由物体对光的 RGB 三分量不同吸收/反射特性生成,对于颜色鲜艳的彩色目标或较暗的灰度的目标,必定至少对其中一个分量反射系数较小。

本文用 $L(x, y)$ 的最小颜色分量作为图像中的低反射率分量,对 $V(x, y)$ 进行初步估计,即:

$$V_{dc}(x, y) = \min_{c \in \{R, G, B\}} L(x, y) = A(1 - e^{-kd(x, y)}), \quad (5)$$

当构图不够理想,对于(5)式来说, $\rho(x, y) \rightarrow 0$ 的条件并不一定是每个点均满足,或者在图像中无满足该条件的点,因此需要对 $V_{dc}(x, y)$ 的结果进一步滤波,获得较精确的 $V(x, y)$ 估计。

3 基于大气散射模型的去雾算法

基于大气散射模型,本文的算法可分为 3 个步骤:(1)去除背景干扰并估计环境光亮度;(2)利用快速双边滤波估计大气散射函数;(3)利用成像模型,计算出物体的 3 个分量的反射系数。

3.1 A 值的估计

由式(3)、(4)可得,当 $\rho(x, y) \rightarrow 0$ 以及 $d(x, y) \rightarrow \infty$ 时,可以根据式(1)求得 A 。由于图像中有白色目标,其最小分量反射系数 $\rho(x, y) \rightarrow 1$,并不满足式(3)(4)给出的条件。因此,为了去除白色目标的影响,本文对灰度图 $V_{dc}(x, y)$ 进行灰度腐蚀和膨胀运算,除去图像中白色物体部分,保持整体的灰度级和较大的明亮区域不变。

定义 $V_{dc}(x, y)$ 灰度开运算后为 $V'_{dc}(x, y)$,此时已经去除了 $\rho(x, y)$ 较大的物体影响。本文选取 $V'_{dc}(x, y)$ 中灰度值最大的值作为 A 的估计值,即

$$A = \max V'_{dc}(x, y), \quad (6)$$

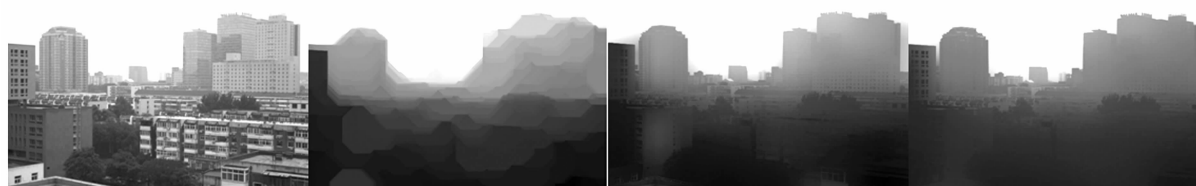
天空属于发光目标,并不满足 $\rho(x, y) \rightarrow 0$ 成像条件,因此需要对(6)式进一步修正:

$$A = \max V'_{dc}(x, y) - \sigma, \quad (7)$$

根据实验统计结果,一般取 $\sigma = 30$ 。

3.2 V(x, y) 的估计

根据(5)式,我们完成了 $V(x, y)$ 的初步估计 $V_{dc}(x, y)$,如图 2(a)所示。如图 2(b)所示,去除了白色目标的影响,但也对目标的边缘造成了模糊。而我们希望保留 $V_{dc}(x, y)$ 的区域边缘特性,灰度的变化符合 $V'_{dc}(x, y)$ 函数,因此联合双边带滤波算法成为本文的首选。



(a) RGB 分量最小值 (b) 对(a)灰度开运算 (c) 对(a)和(b)联合双边滤波 (d) (c)的近似结果
(a) Minimum of RGB (b) Opening operation results for (a) (c) Joint bilateral filtering for (a) and (b) (d) Approximate results of (c)

图 2 联合双边带滤波结果

Fig. 2 Results of joint bilateral filtering

3.2.1 双边滤波器基本原理

双边滤波器是边缘保持滤波器,对于灰度图像 I_p 和 I_q ,联合双边带滤波定义为:

$$I_p^b = \frac{1}{W_p^b} \sum_{q \in S} G_{\alpha}(\|p - q\|) G_{\sigma}(|I_p - I_q|) I_q, \quad (8)$$

在式(8)中,引入另外一个维度 ζ ,定义每个点的坐标 (x, y, ζ) ,同时引入 $\sigma(\cdot)$ 函数,定义权重 $W_q=1$,则式(8)可以变形为:

$$\begin{pmatrix} W_p^b I_p^b \\ W_p^b \end{pmatrix} = \sum_{q \in S} \sum_{j \in R} G_{\sigma_s}(\|p - q\|) G_{\sigma_r}(|I_p - j|) \sigma(j - I_q) \begin{pmatrix} W_q I_q \\ W_q \end{pmatrix}. \quad (9)$$

通过(9)式计算 I_p^b ,文献[7]中 Paris 等给出了 I_p^b 的计算方法。

3.2.2 联合双边滤波快速算法

本文通过联合三维直方图实现滤波运算。定义区域 S ,对于任意一点 I_p ,另一幅图像为 I_q ,其局部改进三维直方图为 $H(I_p)$, (p, I_p) 为其变量

$$H(I_p) = \sum_{q \in S} \sigma(I_q - I_p) I_q.$$

则点 I_p 的改进直方图的运算结果为:

$$H(I_p) \otimes G_{\sigma_r}(I_p) \otimes G_{\sigma_s}(I_p) = \sum_{j \in R} \sum_{q \in S} \sigma(I_q - j) G_{\sigma_r}(|I_p - j|) G_{\sigma_s}(\|p - q\|) I_q. \quad (10)$$

比较式(8)(9)(10)可知,完全可以通过联合直方图来计算联合双边带滤波,并且,在图像降采样的情况下^[7-8],联合直方图可以保留区域的灰度信息,提高最终通过插值计算获得的复原图像的精度。

3.2.3 $V(x, y)$ 滤波的实现

由于 $V_{dc}'(x, y)$ 的边缘模糊, $V_{dc}'(x, y)$ 和 $V_{dc}(x, y)$ 的联合双边带滤波的输出结果也会产生一定程度的边缘模糊,进而造成复原图像的边缘 Halo 效应^[9]。为了达到 $V(x, y)$ 的局部平滑及边缘清晰的效果,本文采用一种联合双边带滤波的近似算法^[7-8],实现过程如下:

1. 降采样:将 $V_{dc}(x, y)$ 和 $V_{dc}'(x, y)$ 作为输入图像,并对 $V_{dc}(x, y)$ 的空间分辨率以及幅度分辨率分别进行 α, β 倍降采样,得到三维空间 (x_d, y_d, I_d) , x_d, y_d, I_d 分别为采样后的空间坐标及灰度值。

2. 联合直方图:遍历 $V_{dc}(x, y)$ 图像的每个像素 I_d ,构造三维数组 $I(x_d, y_d, I_d)$,将对应 $V_{dc}'(x, y)$ 的值累加即 $I(x_d, y_d, I_d) = I(x_d, y_d, I_d) + V_{dc}'(x, y)$;

3. 滤波:对 $I(x_d, y_d, I_d)$ 进行三维高斯滤波,

得到 $I_G(x_d, y_d, I_d)$;

4. 插值:对 $I_G(x_d, y_d, I_d)$ 和进行三维线性插值运算,求解 $V(x, y)$ 。

在本算法中,为了保留图像的幅度分辨率信息,降采样运算主要在空间分辨率进行。将区域 Ω 降采样为一个点 (x, y) ,计算区域 Ω 的局部三维联合直方图 (x, y, ζ) (ζ 为区域 Ω 的灰度值), (x, y, ζ) 的值为基于 ζ 坐标的灰度分布。如果降采样区域 Ω 过小,在图像的边界部分,区域 Ω 在两副滤波输入图像中的差别较大,导致联合三维直方图倾向于反应 $V_{dc}'(x, y)$,导致最终的边界模糊。而采用较大的区域,边界模糊对直方图统计的影响会降低。通过运算,选择合适的降采样参数,可以避免全面平滑带来错误的晕轮效应,而且保留更多的细节信息同时,获得平滑的滤波效果,如图 2 所示。

4 实验分析

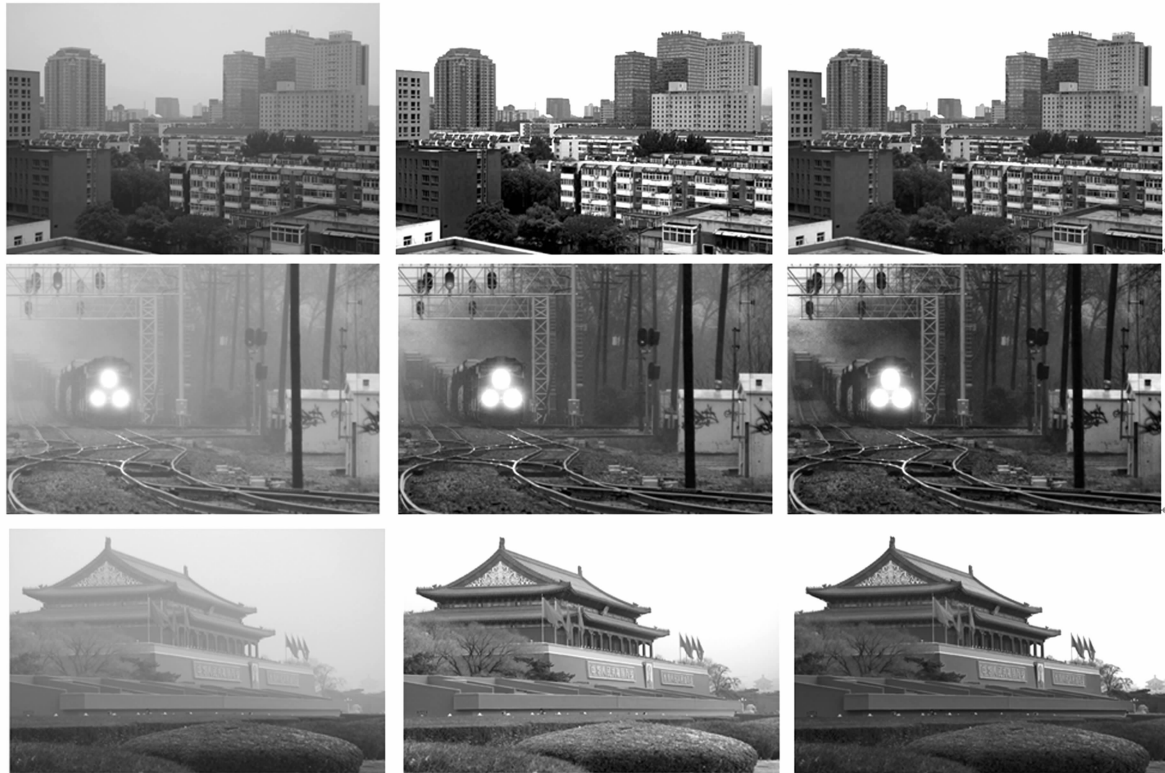
为了验证本文提出算法的有效性,选择比较有代表性的 Scene, Train, Tiananmen 共 3 组典型图像进行复原实验,其中既包含大面积天空区域,也包含目标的细节信息,既有光源目标,也有严重的偏色。下面给出实验结果及分析。

4.1 主观评价

图 3 给出部分户外场景的实验结果。图 3(c) 为本文算法恢复结果,可以看出,本方法有效的去除了图像中的雾霾,再现了场景的对比度和颜色,提高了图像的视见度,其中图 3(a) 为原始雾霾图像。

图 3(b) 为 He 的算法恢复结果^[14],本文算法与 He 算法对图像的色度和亮度均恢复良好,但本文算法对天安门图像的恢复色度及清晰度均有一定提高。从细节分析,与 He 的算法比较,本文算法对第一组图像的与天空交界处恢复的较彻底,而 He 的恢复结果在右上角处偏黄;第二和第三组清晰度和 He 比较有一定提高,色度恢复良好,例如第三组右下方的小亭子本文算法恢复的清晰可辨。图 4 中可以看出, Tarel 算法颜色显得过饱和,且在景深突变的边界处易产生 Halo

效应。第二组图像 He 的方法复原的图像色彩稍淡,第一组图像的右上角远处目标不够清晰。



(a) 雾天图像 (b) He 算法 (c) 本文算法
 (a) Hazing images (b) He algorithm (c) Restored images by proposed algorithm

图 3 图像恢复结果(从上到下图像分别为 Scene, Train, Tiananmen)

Fig. 3 Restored images by proposed algorithms(images named Scene, Train, Tiananmen from top to bottom)



(a) 原图像 (b) He 算法结果 (c) Teral 算法结果 (d) 本文算法结果
 (a) Original image (b) He's results (c) Teral's results (d) Proposed algorithm results

图 4 实验比较(从上到下为 ny12, ny17)

Fig. 4 Comparison of different algorithms(Images named ny12, ny17 from top to bottom)

4.2 客观评价

4.2.1 时间复杂度

He 所用的 SoftMatting 算法^[6]是一个大规模稀疏线性方程组的求解问题,具有很高的时间复杂度和空间复杂度。对于一副大小为 $S_x \times S_y$, Tarel 算法的时间复杂度为 $O(S_x S_y S_v^2 \ln S_v)$, 其中 s_v 为 中值滤波的模版尺寸。在 Teral 算法中,中值滤波的模版尺寸一般取值较大,如图 4 中的图例, s_v 的取值为图像较长边的 1/25。而本文算法所用联合双边滤波器的时间复杂度为 $O(S_x S_y)$, 是图像像素数的线性函数,具有很高的执行效率。

4.2.2 可见边梯度

目前,在图像去雾领域的盲评方法主要是由 Hautiere 等人提出的可见边梯度法^[12-13]。一般情况下, e 和 \bar{r} 较大,表明处理后的图像边缘强度较大,数量较多,即:

$$e = \frac{n_r - n_0}{n_0} \quad \bar{r} = \frac{\bar{g}_r}{\bar{g}_0}$$

其中: n_0 和 n_r 分别表示原图像 $L(x, y)$ 和恢复图像 $L_0(x, y)$ 中可见边的数目; \bar{g}_r 表示原图像的平均梯度, \bar{g}_0 表示恢复图像的平均梯度。使用 Intel (R) Core(TM) i5 CPU650@3.20GHz, 2.99GB 内存。比较结果如表 1 所列。

表 1 不同算法处理结果比较

Tab. 1 Result obtained different algorithms

名称	算法	时间	e	\bar{r}
576×768	He	13.602 7	0.06	1.342 4
	Ny12	2.802 0	0.07	1.456 7
	Fattal	2.913 0	-0.06	1.320 3
1 024×768	本文算法	1.703 4	0.09	1.445 7
	He	13.676 8	0.12	1.273 1
	Ny17	3.100 2	0.39	1.314 2
	Fattal	3.246 5	-0.12	1.563 2
	本文算法	2.455 3	0.19	1.828 2

参考文献:

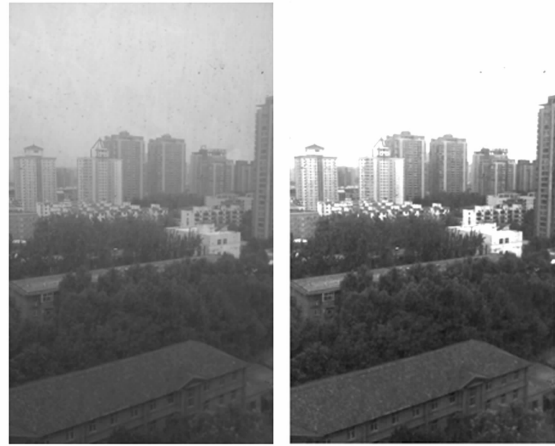
[1] NAYAR S K, NARASIMHAN S G. Vision in bad weather [C]. *Proceedings of the 7th IEEE International Conference on Computer Vision, Kerkyra, Greece: IEEE-ICCV*, 1999:820-827.

[2] 郭 璠, 蔡 自 兴, 谢 斌, 等. 图像去雾技术研究综述与

展望[J]. *计算机应用*, 2010, 90(9):2471-2412.

GUO F, CAI ZX, XIE B, et al.. Review and prospect of image dehazing techniques [J]. *Journal of Computer Application*, 2010, 90(9): 2471-2412. (in Chinese)

[3] TAN K, OAKLEY P J. Physics-based approach to color image enhancement in poor visibility conditions [J]. *Optical Society of America*, 2001, 18(10):



(a) 原图像 (b) 本文算法复原结果
(a) Original image (b) Restored image

图 5 污染图像复原

Fig. 5 Restored results of stained image

5 结 论

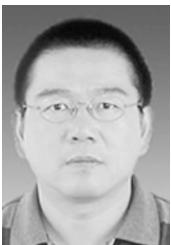
本文提出的算法基于大气散射模型原理进行单幅图像去雾,可自动恢复场景反射系数,无需场景的其他附加信息。该方法适用范围广,恢复的图像具有细节信息丰富、自然逼真等特点,可在大幅提高处理速度的同时获得良好的恢复图像质量。本文算法在估计环境光亮度时进行了数值修正,消除了图像中白色物体及天空表现出的光源特性对估计环境光亮度的影响。本文算法的主要局限是结构元素的尺寸应大于图像中白色物体的尺寸,且在极限情况下会失效,导致色偏。下一步的工作主要研究如何更加有效的自动估计环境光的值,保证场景还原的色彩逼真度及清晰度。

- 2460-2467.
- [4] FATTAL R. Single image dehazing[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2008, 27(3): 1-9.
- [5] TAREL J P, HAUTIERE N. Fast visibility restoration from a single color or gray level image[C]. *Proceedings of the 12th IEEE International Conference on Computer Vision, Kyoto, Japan; IEEE-ICCV*, 2009: 2201-2208.
- [6] HE KM, SUN J, TANG X. Single image haze removal using dark channel prior[C]. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Miami, USA; IEEE-CVPR*, 2009: 1956-1963.
- [7] PARIS M, FREDO D. A fast approximation of the bilateral filter using a signal processing approach [C]. *Graz, Austria; Springer Verlag, Heidelberg, D-69121, Germany*, 2006: 568-580.
- [8] CHEN J W, PARIS S, DURAND F. Real-time edge-aware image processing with the bilateral grid [C]. *Proc. of ACM, SIGGRAPH' 07. [S. l.]: ACM Press*, 2007.
- [9] NAMER E, SCHECHNER Y Y. Advanced visibility improvement based on polarization filtered images [C]. *Proceedings of the Polarization Science and Remote Sensing II, San Diego, USA; SPIE*, 2005: 36-45.
- [10] 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): 143-49.
- YU J, LI D P, LIAO Q M. Physics-based fast single image fog removal [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2011, 37(2): 143-49. (in Chinese)
- [11] 方帅, 王勇, 曹洋, 等. 单幅雾天图像复原 [J]. *电子学报*, 2010, 38(10): 2279-2284.
- FANG S, WANG Y, CAO Y, et al. Restoration of image degraded by haze [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2010, 38(10): 2279-2284. (in Chinese)
- [12] HAUTIERE N, TAREL J P, AUBERT D, et al. Blind contrast enhancement assessment by gradient ratioing at visible edges [J]. *Image Analysis and Stereology Journal*, 2008, 27(2): 87-95.
- [13] KOHLER R. A segmentation system based on thresholding [J]. *Computer Graphics and Image Processing*, 1981, 15(4): 319-338.
- [14] <http://research.microsoft.com/en-us/um/people/kahe/cvpr09/index.html> [OL].

作者简介:



孙伟(1980—),男,安徽砀山人,博士,副教授,主要从事高性能视觉信息计算及嵌入式系统设计方面的研究。E-mail: sunweitom@yahoo.com.cn



李大健(1966—),男,河南漯河人,高级工程师,研究方向为无人机控制与导航、信息处理。E-mail: lidajian66@sina.com



刘宏娟(1987—),女,助理工程师,硕士,主要研究方向为无人机任务规划与控制、侦察信息处理等。E-mail: creative1987@126.com



贾伟(1980—),男,工程师,硕士,主要研究方向为无人机任务规划与控制、侦察信息处理等。E-mail: hello.jiawei@163.com

(版权所有 未经许可 不得转载)