

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.201509026



# 大气光幕融合的去雾新方法

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:** 针对雾天场景成像设备采集的图像存在对比度低、细节不清晰的问题, 提出一种结合大气光幕融合的去雾场景复原算法。首先, 基于不同场景深处大气光幕的物理特性和光学成像特性, 获取远景雾气分布的近似估计。其次, 通过像素级融合和滤波的方法得出准确的全局大气光幕。最后, 通过反演大气散射模型得到复原图像, 并进行亮度和色调调整。该方法可以有效避免过度去雾现象和光晕效应等不足, 能快速复原场景的对比度和颜色。实验结果表明: 该算法简单高效, 具有较强场景适应能力, 并保证实时性。

**关键词:** 图像复原; 图像去雾; 大气散射模型; 大气光幕; 图像融合

中图分类号: TP 391.41

文献标志码: A

文章编号: 1000-5013(2018)02-0246-06

## Novel Haze Removal Method Based on Atmospheric Veil Fusion

LIU Zibing, DAI Shengkui

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

**Abstract:** In order to enhance contrast and detail information of haze image captured by the imaging system, a haze scene restoration algorithm based on atmospheric veil fusion is proposed. Firstly, the haze density distribution of distant area is roughly estimated based on the physical properties of the atmospheric veil in different depth and the optical reflectance imaging. Then, the global atmospheric veil is accurately estimated by using image fusion and filtering on the pixel level. Finally, the restored image is obtained through the inversion of the atmospheric scattering model, and the brightness and chroma of the images are adjusted via tone mapping. This method can avoid over defogging or halo artifacts and achieving a satisfactory restoration for better contrast and color fidelity. The experimental results yield that the proposed method is not only very simple and efficient, but also has robust scene adaptability and achieves real-time performance.

**Keywords:** image restoration; haze removal; atmospheric scattering model; atmospheric veil; image fusion

大气中无时无刻都悬浮着大量的颗粒物, 各种颗粒物和小水滴对光线的散射效应严重干扰了各种户外机器视觉系统的工作。因此, 快速高效的去雾技术研究仍是当今的热点和难点。目前, 雾天图像清晰化的实现方法主要分为两类: 基于图像增强和基于图像复原。He 等<sup>[1-2]</sup>对大量的户外无雾图像进行分析, 提出一种暗通道先验的统计规律估计场景透射率, 此方法能实现大部分户外图像的去雾操作, 但由于采用高复杂度的软抠图算法, 算法实时性不佳。Tarel 等<sup>[3-4]</sup>采用中值滤波估计大气光幕, 算法执行速度较快, 但由于中值滤波不能很好地处理边缘区域, 去雾结果容易产生色调失真。Kim 等<sup>[5]</sup>在去雾过程中, 通过最小化代价函数实现整体去雾的平衡, 但不恰当的正则化参数设置会出现光晕现象。王伟鹏等<sup>[6]</sup>用快速双边滤波结合局部均值和局部标准差估计雾气分布, 但由于双边滤波的梯度反转效应, 复原

收稿日期: 2015-09-19

通信作者: 戴声奎(1971-), 男, 副教授, 博士, 主要从事图像处理、视频分析和模式识别的研究。E-mail: d. s. k@hqu.edu.cn.

基金项目: 福建省科技计划重点项目(2013H0030); 中央高校基本科研业务基金资助项目(JB-ZR1145)

结果会在边缘处产生失真. 本文提出一种新的基于图像融合的大气光幕估测方案.

## 1 大气散射模型

Narasimhan 等<sup>[7-8]</sup>提出雾霾天气下的成像模型,该模型描述雾霾天气图像退化的过程,即

$$L(x) = L_0(x)\exp(-\beta d(x)) + A(1 - \exp(-\beta d(x))). \quad (1)$$

式(1)中: $L(x)$ 为成像设备采集得到的有雾图像强度; $L_0(x)$ 为同一场景下没有雾气干扰的场景反射率,即没有雾气图像; $\exp(-\beta d(x))$ 为光线传输的透射率,描述光线经过大气传输后没有被散射部分的比例,其中, $\beta$ 为大气中粒子对光线的散射系数; $d(x)$ 为场景深度; $A$ 为全局大气光强度值,为环境光的辐射强度.

去雾的目的是要从  $L(x)$  中恢复出  $L_0(x)$ , 然而, 式(1)中只有  $L(x)$  为已知量. 因此, 这是一个不定问题, 不能直接求解得到无雾图像  $L_0(x)$ . 引入大气光幕, 式(1)简化为

$$V(x) = A(1 - \exp(-\beta d(x))). \quad (2)$$

因此, 大气散射模型式(1)可以等价于

$$L(x) = L_0(x)\left(1 - \frac{V(x)}{A}\right) + V(x). \quad (3)$$

估计出大气光幕  $V(x)$  和大气照射光强度  $A$ , 可以复原无雾图像  $L_0(x)$ .

## 2 结合不同景深大气光幕估计的去雾方法

### 2.1 大气光幕 $V(x, y)$ 的约束条件

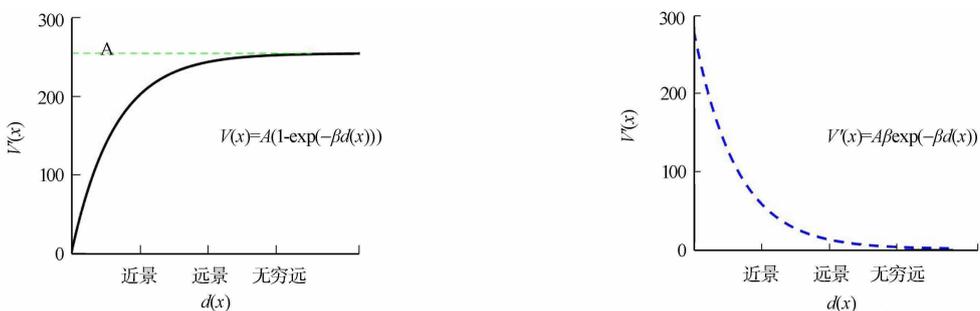
根据对大气散射物理模型属性分析, Tarel 等<sup>[3-4]</sup>提出大气光幕应该满足两个约束条件: 1) 大气光幕的取值为正值; 2) 大气光幕的取值不大于该像素点的 R, G, B 通道中最小颜色分量灰度值.

结合式(2), 大气光幕函数对距离求导, 得到其变化率与距离的关系为

$$V'(x) = A\beta\exp(-\beta d(x)). \quad (4)$$

式(4)中: $A$ 为大气照射光强度, 是一个常量; $\beta$ 为大气中粒子对光线的散射系数, 当大气中粒子分布均匀同质时,  $\beta$ 是一个常量.

大气光幕是关于景深距离  $d(x)$  的单调递增函数, 而且是呈指数级数增长. 大气光幕与景深距离的关系, 如图 1 所示.



(a) 大气光幕与距离的关系

(b) 大气光幕变化率与距离的关系

图 1 大气光幕与景深距离的关系

Fig. 1 Relationship of atmospheric veil to scene depth

由图 1 可知: 当距离超过一定限度后, 大气光幕值(图 1(a)实线)几乎不变; 大气光幕变化率(图 1(b)虚线)趋近于零. 真实成像环境中的天空和地平线等都属于无穷远, 所以远景的大气光幕值具有值域的相似性, 也即是具有足够平滑的性质.

### 2.2 大气光幕 $V(x, y)$ 估计

2.2.1 远景大气光幕估计 由 Retinex 理论可知, 物体所呈现的颜色是由其对不同波长光的反射能力决定的, 并且颜色信息丰富的物体, 其中, 至少有 1 个颜色分量的反射系数较低, 亮度较低. 由此特性, 可用有雾图像 3 颜色通道中的最小分量对大气光幕作初步估计, 即

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

大气光幕的估计,如图2所示.由式(5)得到的大气光幕包含很多纹理细节,如图2(a)所示.为了消除纹理信息的影响和保证远景值域的相似性,对 $V_m(x, y)$ 做大尺寸均值滤波,即

$$V_{\text{mean}}(x, y) = \text{meanfilter}(V_m(x, y)). \quad (6)$$

式(6)中:meanfilter为均值滤波器.由于均值滤波不具有边缘保持特性,为保证整体大气光幕的平滑,不出现块效应,需要大尺寸的均值滤波.文中滤波半径尺寸为 $r=0.5 \times \min(h, w)$ ,其中, $h$ 和 $w$ 分别为图像的高和宽.然而,大尺寸的均值滤波会弱化远景的大气光幕的亮度值,如图2(b)所示.为了实现有效的去雾,需要修复提亮此部分区域的亮度值.与均值滤波结果相比, $V_m(x, y)$ 在远景处的大气光幕亮度值较高,因此,采用两者加权融合的方法得到远景的大气光幕 $V_{\text{far}}(x, y)$ ,即

$$V_{\text{far}}(x, y) = k \times V_{\text{mean}}(x, y) + (1 - k) \times V_m(x, y). \quad (7)$$

式(7)中: $k$ 为加权因子. $k$ 越大,远景处的大气光幕亮度值越低,去雾程度越弱; $k$ 越小,远景处的大气光幕亮度值越高,去雾程度越强.通过大量实验综合分析, $k=0.6$ .加权融合结果,如图2(c)所示.



(a) R,G,B分量最小值 (b) 大尺寸均值滤波 (c) 加权融合 (d) 近远景融合 (e) 平滑细节滤波

图2 大气光幕的估计

Fig. 2 Estimation of atmospheric veil

2.2.2 近远景大气光幕融合 由于近景的大气光幕分布能由3颜色通道的最小分量 $V_m(x, y)$ 近似估计,所以为融合远景和近景的大气光幕,采用像素级的最小值运算,融合方法为

$$V_{\text{out}}(x, y) = \min(V_{\text{far}}(x, y), V_m(x, y)). \quad (8)$$

式(8)中: $\min$ 为矩阵同等位置像素值取最小值运算,用于修复近处景色的大气光幕.

Tarel等<sup>[3-4]</sup>指出大气光幕只有在景深突变的边缘处发生突变,而与景深跳变无关的场景纹理应该不影响大气光幕分布.

为了平滑与景深无关的细节纹理,Ttevenaz等<sup>[9]</sup>使用双指数滤波产生与双边滤波同样的边缘保持平滑的效果,而且没有双边滤波的边缘梯度反转效应,计算复杂度和空间复杂度均大幅降低.将图像的每一行当做1维离散序列处理,1次滤波过程分别由1次正向单步滤波和反向单步滤波构成.

对具有 $n$ 个元素的离散的序列 $x[n]$ ,1次滤波有以下3个过程.

1) 正向单步滤波结果为

$$\varphi[n] = (1 - \delta[n]\lambda)x[n] + \delta[n]\lambda\varphi[n-1], \quad \delta[n] = R(x[n], \varphi[n-1]). \quad (9)$$

2) 反向单步滤波结果为

$$\phi[n] = (1 - \rho[n]\lambda)x[n] + \rho[n]\lambda\phi[n-1], \quad \rho[n] = R(x[n], \phi[n-1]). \quad (10)$$

3) 最终滤波输出为

$$y[n] = \frac{\varphi[n] + \phi[n] + (\lambda - 1)x[n]}{\lambda + 1}. \quad (11)$$

式(9),(10)中: $R$ 为指数权重分配函数,即

$$R(u, v) = \exp \frac{(u - v)^2}{2\sigma^2}. \quad (12)$$

$\lambda$ 和 $\sigma$ 为控制滤波强度系数,其值越大,滤波平滑程度越强,边缘保持能力越弱.

对于二维图像,其滤波计算过程如下.首先,对图像数据进行1次先水平后垂直的滤波计算,得到第

1 次滤波结果;再对原始图像数据进行 1 次先垂直后水平的滤波计算,得到第 2 次滤波结果;最后,两次滤波结果取平均值即为最终滤波结果,因此,大气光幕计算为

$$V(x, y) = 0.5 \times (\text{BF}_{\text{H-V}}(V_{\text{out}}(x, y)) + \text{BF}_{\text{V-H}}(V_{\text{out}}(x, y))). \quad (13)$$

式(13)中: $V(x, y)$ 为滤波得到的大气光幕,如图 2(e)所示; $\text{BF}_{\text{H-V}}$ 为先水平后垂直运算的双指数滤波算子; $\text{BF}_{\text{V-H}}$ 为先垂直后水平运算的双指数滤波算子。

### 2.3 大气光强度值 $A$ 估计

大气光强度值  $A$  近似等于雾气最浓区域的像素亮度值。He 等<sup>[1]</sup>选取通道图像中 0.1%亮度的像素点作为大气光位置,将对应雾图像的相同位置的最大像素值作为大气光值,但是如果该点为噪声点,则会导致误差。为排除单个随机噪声点的误差,选取大尺寸均值滤波后的图像  $V_{\text{mean}}(x, y)$  中亮度值最高的 0.2%的像素坐标作为大气光位置  $(x', y')$ ,再从原彩色雾气图像中相同位置求取亮度均值得到 3 通道的大气光值,即

$$A_c = \text{mean}_{c \in \{R, G, B\}} L^c(x', y'). \quad (14)$$

### 2.4 雾天图像复原和曝光调整

在得到大气光值  $A$  和大气光幕  $V(x, y)$  后,根据大气散射模型即可反演出无雾图像  $L_0(x, y)$ ,即

$$L_0(x, y) = A \times \frac{L(x, y) - W \times V(x, y)}{A - W \times V(x, y)}. \quad (15)$$

式(15)中: $W$  是去雾控制参数,  $W \in [0, 1]$ 。因此,为了保证一定的景深透视感,需要在较远的景深区域保留一些雾气,  $W = 0.92$ ,表示去除 92%的雾气。

根据韦伯费希纳定律,人眼对客观亮度的主观感受近似呈对数曲线的特性,因此,人眼对弱光照图像的亮度变化更为敏感,暗部区域的曝光正常与否影响图像整体的主观亮度感受。为提亮暗部区域,自适应的亮度调整策略为

$$L_E(x, y) = L_0(x, y)^\gamma. \quad (16)$$

式(16)中: $L_0(x, y)$ 为调整输入,归一化到  $[0, 1]$ ;  $L_E(x, y)$ 为调整输出; $\gamma$  为增强系数。依据相机自动曝光法则,对于 8 比特量化的数字图像,当成像亮度均值为 128 时,图像整体曝光较为准确,依据上述准则,自适应增强系数为

$$\gamma = (\text{mean}(\text{light}(x, y)) / Q)^\beta. \quad (17)$$

式(17)中: $\text{mean}$  为求均值; $\text{light}$  为去雾后图像的亮度分量,  $\text{light}(x, y) = \max_{c \in \{R, G, B\}} L_0^c(x, y)$ ;  $Q$  为曝光参考值;对于 8 比特量化的图像  $Q = 128$ ;  $\beta$  为曝光控制参数,为了控制过增强现象,  $\beta = 0.5$ 。

## 3 实验结果与分析

### 3.1 进一步优化的算法

为了提高算法的高效性,结合大气光幕的物理特性,在远景大气光幕的估计过程中,由于盒式滤波能快速地求解图像局部矩形内像素累加和,文中选取复杂度为  $O(1)$  的盒式滤波加速均值滤波运算。考虑到远景大气光幕值域的低频性,为了进一步降低计算量,在大气光幕估计的过程中引入采样插值运算。通过大量图片的统计实验,选取采样插值因子  $s = \min(1, 400 / \max(h, w))$ ,其中,  $h$  和  $w$  为图像高和宽分辨率,即对于图像最短边尺寸大于 400 px 的图像才进行采样操作。

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 的普通 PC 机,软件编程平台为 Matlab 2015a。在自然风光、灰霾图像、城市建筑等不同雾天场景中获取的大气光幕和去雾效果,如图 3 所示。由图 3 可知:该方法适用场景广泛,恢复效果较好。



(a) 雾天图像 1

(b) 雾天图像 2

(c) 雾天图像 3

(d) 雾天图像 4

(e) 雾天图像 5



图3 文中更多去雾结果

Fig. 3 More haze removal results using our method

### 3.2 主观评价

3组图片去雾效果,如图4所示.由图4可知:文中方法与Kim方法<sup>[5]</sup>的结果较为相似;He方法<sup>[1-2]</sup>和Kim方法<sup>[5]</sup>在修复投射率时,均使用引导滤波器<sup>[2]</sup>,在景深突变处易引入光晕效应(第1组图树枝缝隙处);Tarel方法<sup>[4]</sup>对局部区域的大气光幕估计不准确,复原结果颜色失真,出现色调偏差.因此,文中方法整体主观复原效果比其余3种算法好.

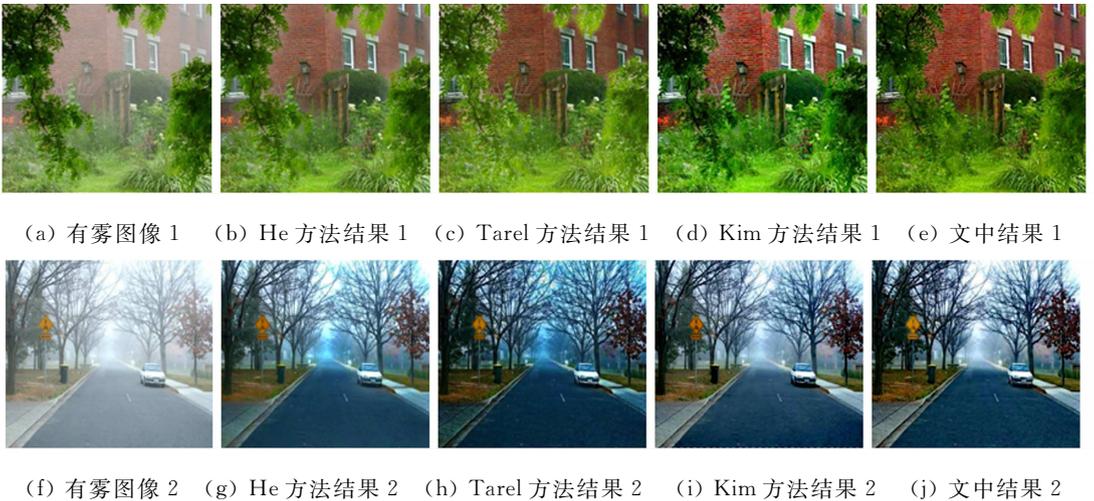


图4 实验结果对比

Fig. 4 Comparison of experimental results

### 3.3 客观评价

为客观评价各种算法优劣,采用Hautiere等<sup>[10]</sup>提出的基于可见边梯度的盲评价体系方法.该方法通过新增可见边之比 $e$ 和平均梯度比 $\bar{r}$ 衡量复原图像的边缘强度,通常 $e$ 和 $\bar{r}$ 越大,则复原图像的细节清晰度越高.对图4进行测试,得到的实验结果比较如表1所示.

由表1可知:文中的 $e$ 和 $\bar{r}$ 指标超过He方法<sup>[2]</sup>和Kim方法<sup>[5]</sup>的结果,由于Tarel方法<sup>[4]</sup>复原结果出现伪边缘,所以导致其部分 $e$ 和 $\bar{r}$ 指标较高.因此,文中算法的优势较大.

表1 实验结果比较

Tab. 1 Comparison of experimental results

图像	指标	He方法	Tarel方法	Kim方法	文中方法
有雾图像1	$e$	0.145	0.272	0.102	0.156
	$\bar{r}$	1.249	1.379	1.471	1.705
有雾图像2	$e$	0.314	0.784	0.456	0.668
	$\bar{r}$	1.474	1.880	2.098	2.251

对比上述算法运行速度,在相同的硬件平台上,选取分辨率为600 px×400 px,1 280 px×720 px

和 2 048 px×1 536 px 的 3 组实验图像,每组 30 张,分别处理后得到平均耗时,如表 2 所示.由表 2 可知:He 方法的透射率修复部分使用引导滤波<sup>[2]</sup>,Tarel 方法<sup>[4]</sup>,Kim 方法<sup>[5]</sup>均使用默认参数,文中算法执行速度至少是其余 3 种算法的 4 倍以上.特别是对高分辨率图像,文中算法优势明显,具有更高的执行效率和实时性.

表 2 文中算法与 Tarel 算法和 Kim 算法的运行时间比较

Tab. 2 Comparison of run time algorithm in this paper with Tarel's and Kim's

图像尺寸	Tarel 算法	Kim 算法	文中算法
600 px×400 px	1.42	0.21	0.04
1 280 px×720 px	4.73	0.83	0.18
2 048 px×1 536 px	13.84	2.87	0.64

## 4 结论

根据图像大气光幕的物理特性,提出一种简单高效的基于大气光幕融合的去雾方案.对于远景的大气光幕采用大尺寸均值滤波估计,并用盒式滤波和采样插值加速运算,结合近景大气光幕的特点,通过像素级的最小值运算融合近远景大气光幕.为滤除非景深跳变的纹理信息的干扰,文中采用快速双指数滤波对融合的大气光幕做边缘保持平滑处理,得到更为精细的大气光幕.最后,通过大气散射物理模型反演,求得无雾图像,并根据相机曝光法则对图像做曝光调整.

相比现有的方法,文中方法具有更快的执行速度和更好的复原效果.然而,文中方法的局限在于弱化亮区部分的去雾能力,容易导致局部去雾不彻底的现象,如何自适应控制去雾相关参数以实现去雾的最优化,这是下一步研究需要解决的问题.

### 参考文献:

- [1] HE Kaiming, SUN Jian, TANG Xiaoou. 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.
- [2] HE Kaiming, SUN Jian, TANG Xiaoou. Guided image filtering[C]// Proceeding of the European Conference on Computer Vision. Heraklion; Springer, 2010; 1-14. DOI:10.1109/TPAMI.2012.213.
- [3] TAREL J P, HAUTIERE N. Fast visibility restoration from a single color or gray level image[C]// Proceedings of IEEE 12th International Conference on Computer Vision, Washington D C; IEEE Press, 2009; 2201-2208. DOI:10.1109/ICCV.2009.5459251.
- [4] TAREL J P, HAUTIERE N, CORD A, *et al.* Improved visibility of road scene images under heterogeneous fog[C]// Intelligent Vehicles Symposium (IV). [S. l.]; IEEE Press, 2010; 478-485. DOI:10.1109/IVS.2010.5548128.
- [5] KIM J H, JANG W D, SIM J Y, *et al.* Optimized contrast enhancement for real-time image and video dehazing[J]. Journal of Visual Communication and Image Representation, 2013, 24(3): 410-425. DOI:10.1016/j.jvcir.2013.02.004.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] NARASIMHAN S G, NAYAR S K. Vision and the atmosphere[J]. International Journal of Computer Vision, 2002, 48(3): 233-254.
- [9] TTÉVENAZ P, SAGE D, UNSER M. Bi-exponential edge-preserving smoother[J]. IEEE Transactions on Image Processing a Publication of the IEEE Signal Processing Society, 2012, 21(9): 3924-3936.
- [10] 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.

(责任编辑: 陈志贤 英文审校: 吴逢铁)