

# 一种包含天空区域的图像去雾方法

郭彤颖<sup>\*\*</sup>, 李娜<sup>\*</sup>, 孙亮亮, 王海忱

沈阳建筑大学信息与控制工程学院, 辽宁 沈阳 110168

**摘要** 针对大多数去雾算法对含有大面积天空区域的图像去雾效果不佳的问题, 提出一种改进的暗通道先验去雾方法。首先, 根据图像梯度信息分割出天空区域, 在天空区域分割的基础上, 结合大气光参考像素的高亮度和平滑性设定判别公式, 合理地估计大气光值。其次, 根据暗通道值的不同, 采用分段线性函数对可调参数进行动态修正, 解决过度去雾造成的局部阴影。然后, 将亮通道模型和改进的暗通道先验模型估计的透射率进行融合, 并采用导向滤波进行边缘优化。最后, 结合大气散射模型, 通过亮度补偿和对比度拉伸得到去雾图像。实验结果表明, 改进方法能够有效地改善图像失真, 增强图像的对比度和细节, 尤其在保持天空区域的视觉真实性方面具有优势。

**关键词** 图像处理; 图像去雾; 天空识别; 暗通道先验; 亮通道; 透射率融合

中图分类号 TP391.4

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.0210009

## A Defogging Method Containing Images of Sky

Guo Tongying<sup>\*\*</sup>, Li Na<sup>\*</sup>, Sun Liangliang, Wang Haichen

School of Information and Control Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, Liaoning 110168, China

**Abstract** To address the poor performance of most defogging algorithms on images with large areas of sky, an improved dark channel *a priori* defogging method is proposed. First, segment the sky area according to the image gradient information, and based on the sky area segmentation, combine the high brightness and smoothness of the atmospheric light reference pixels to set the discriminant formula and reasonably estimate atmospheric light values. Second, a piecewise linear function is used to dynamically modify the adjustable parameters in response to the value of the dark channel to solve the local shadow caused by excessive defogging. Then, the transmittance estimated by the bright channel model and improved dark channel *a priori* model are fused and guided filtering is used for edge optimization. Finally, the defogging image is obtained by combining brightness compensation and contrast stretching using the atmospheric scattering model. The experimental results show that the improved method effectively reduces image distortion, improves image contrast and details, and has advantages in preserving the visual authenticity of the sky area.

**Key words** image processing; image defogging; sky recognition; dark channel *a priori*; bright channel; transmittance fusion

## 1 引言

近年来, 图像处理广泛应用于导航、航空和交通等实际应用领域<sup>[1]</sup>, 以及日常生活中拍摄图像处理等方面<sup>[2]</sup>。由于冬季雾霾的影响, 拍摄的户外图

像的对比度和逼真度通常较差, 给图像处理增加了难度。去雾后的图像, 视觉上更舒适, 包含更多的细节信息。因此, 对图像去雾技术的研究具有十分重要的实用价值<sup>[3]</sup>。

为了解决雾霾天气下图像模糊的问题, 在图像

收稿日期: 2021-01-18; 修回日期: 2021-02-26; 录用日期: 2021-03-11

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(61873174)、辽宁省自然科学基金(2019-ZD-0681)

通信作者: \*1210987670@qq.com; \*\*tyhchguo@126.com

去雾方面发展了相应的算法<sup>[4]</sup>。图像去雾方法主要包括图像增强方法、图像复原方法和基于深度学习的图像去雾方法。图像增强去雾方法通过提高对比度来增强图像的视觉效果,常用的方法有 Retinex<sup>[5]</sup>、自适应直方图均衡化(CLAHE)<sup>[6]</sup>、小波变换<sup>[7]</sup>等,但是这些方法只是增强了视觉效果,并不是真正的去雾<sup>[8]</sup>,并且图像增强易造成信息的丢失和相应噪声的引入,并出现过饱和与光晕效应等失真问题<sup>[9]</sup>。

图像复原去雾方法根据模糊图像退化的过程建立退化模型,通过逆运算来补偿模糊图像中丢失的信息<sup>[10]</sup>。这些方法具有很强的针对性,能获得较好的去雾效果,因此受到了国内外学者的青睐。Fattal<sup>[11]</sup>在假设大气透射率与图像局部阴影不相关的情况下,对场景的反照率进行估算,进而推导出介质的透射率,但该方法在浓雾场景下的处理效果不好。Tarel等<sup>[12]</sup>提出了一种使用中值滤波器估计消散函数进行快速去雾的方法,但如果无法获得场景的深度信息,会导致图像残留少量雾气。Meng等<sup>[13]</sup>结合上下文正则化加权 L1 范数和图像去雾固有边界约束来估计优化的透射率,但在图像明亮区域会出现光晕。Berman等<sup>[14]</sup>提出一种基于模糊线估计图像透射率的方法,并利用正则化方法进行优化,但在图像明亮区域仍然会出现光晕现象。Kopf等<sup>[15]</sup>根据已知图像的深度和纹理信息,利用现有的数字地形重建三维场景,然后基于退化模型还原去雾,然而该方法需要在已知场景深度的前提下进行,这严重限制了该算法在实时系统中的应用。He等<sup>[16]</sup>提出的暗通道先验(DCP)方法可以实现前景区域的高效去雾。另外,He等<sup>[17]</sup>在此基础上进一步研究,提出了很多方案来优化透射率和运算速度,但由于暗通道先验方法会使亮区域的透射率被严重低估,该算法用于天空区域时会造成色彩失真。因此,对含有大面积天空的降质图像进行去雾成为一个迫切而实用的研究课题。近年来,随着人工智能技术的发展,基于深度学习的图像去雾方法成为一大热点,赵建堂<sup>[18]</sup>利用卷积神经网络,通过学习雾天图像与清晰图像各通道之间的映射关系实现去雾;Cai等<sup>[19]</sup>利用卷积神经网络将大气散射模型与人工智能技术相结合,取得了优良的天空区域去雾效果。但是,基于深度学习的去雾方法需要对大量数据进行训练测试,算法的复杂度和成本均较高,因此对传统方法的改进研究依然十分必要。

根据以上分析,针对暗通道先验方法在天空区

域的失效问题,本文对该算法进行深入理解与分析,提出一种改进的暗通道先验去雾(L-DCP)方法。本文算法的改进主要体现在以下 3 个方面: 1) 根据图像梯度信息分割出天空区域,在天空分割的基础上,结合天空区域和设定判别公式合理选择大气光,有效地避免了明亮区域的干扰;2) 采用分段线性函数对可调参数进行动态修正,根据暗通道值的大小合理地保留雾霾,避免前景区域过度去雾造成图像局部阴影;3) 将亮通道模型和改进 DCP 模型估计的透射率进行融合,其中亮通道模型作用于天空区域,改进的 DCP 模型作用于前景区域,有效地恢复了前景的细节信息和解决了天空失真的问题。

## 2 理论基础

### 2.1 大气散射模型

在计算机视觉及图形学中,广泛用于描述雾化图像形成的模型<sup>[20]</sup>为

$$I^\lambda(x) = J^\lambda(x)t(x) + A^\lambda[1 - t(x)], \quad (1)$$

式中: $x$ 表示像素坐标; $I^\lambda(x)$ 表示雾霾图像; $J^\lambda(x)$ 表示去雾后的图像; $\lambda$ 表示 R、G、B 三通道; $A^\lambda$ 表示三通道上具有固定强度的大气光值; $t(x)$ 表示没有被相机散射和收集的场景亮度的透射率,取值介于 0 和 1 之间。

根据(1)式,观察到的图像由前向散射分量  $J^\lambda(x)t(x)$  和后向散射分量  $A^\lambda[1 - t(x)]$  组成,在有雾图像  $I^\lambda(x)$  已知的情况下求解去雾后的图像  $J^\lambda(x)$ , 则变成对大气光值  $A^\lambda$  和图像透射率  $t(x)$  的估计。

### 2.2 暗通道先验去雾理论

根据暗通道先验算法,对于无天空的清晰图像,在一个小区域中至少有一个颜色通道具有非常低的强度<sup>[21]</sup>。其暗通道可以定义为

$$J_{\text{dark}}(x) = \min_{\lambda \in \{R, G, B\}} \left\{ \min_{x \in \Omega(x)} [J^\lambda(x)] \right\} \rightarrow 0, \quad (2)$$

式中: $\Omega(x)$ 表示以像素点  $x$  为中心的一块小区域; $J^\lambda = (J^R, J^G, J^B)$ ;  $J_{\text{dark}}(x)$  是图像  $J$  对应的暗通道。

由(1)式变形可以得到

$$\min_{\lambda \in \{R, G, B\}} \left[ \min_{x \in \Omega(x)} \frac{I^\lambda(x)}{A^\lambda} \right] = t(x) \min_{\lambda \in \{R, G, B\}} \left[ \min_{x \in \Omega(x)} \frac{J^\lambda(x)}{A^\lambda} \right] + 1 - t(x) \quad (3)$$

结合(2)式和(3)式可以得到

$$t(x) = 1 - \omega \min_{\lambda \in \{R, G, B\}} \left\{ \min_{x \in \Omega(x)} \left[ \frac{I^\lambda(x)}{A^\lambda} \right] \right\} \quad (4)$$

为了防止过度去雾,使图像恢复得更自然,通常在(4)式中引入一个恒定参数  $\omega$ ,使其保留一定量的雾,以改善深度感知效果,从而保持图像的真实性。本研究最终使用的图像去雾方程为

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

根据常识,图像的大气透射率不应该为 0,所以实验中  $t_0$  取 0.1。原始暗通道先验算法<sup>[16]</sup>选取的大

气光值  $A^\lambda$  是利用暗通道中最亮的 0.1% 的像素对输入图像的像素对大气光进行估计。

### 3 本文算法

#### 3.1 天空识别

考虑到天空较平滑,非天空区域的纹理和细节较丰富,两部分区域的梯度特征差异较大,因此可以通过梯度信息来对有雾图像进行区域分解。本文方法采取以下几个步骤进行天空识别(图 1)。

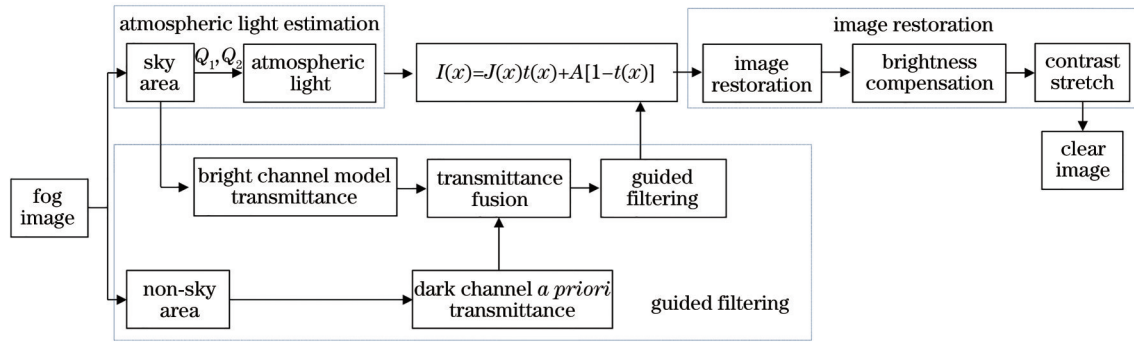


图 1 本文算法流程图

Fig. 1 Flow chart of proposed algorithm

1) 获取有雾图像 R、G、B 三通道的梯度图,将相同像素点位置的梯度值相加后,基于阈值进行二值化分割,将大于阈值的像素点赋值为 1,小于阈值的像素点赋值为 0,得到天空区域的候选图。经反复实验,发现阈值为 2 时,可以使天空与前景的交界处能够被清晰地检测出来。

2) 对于得到的候选图,通过边界跟踪算法将最大的白色连通区域标记为天空。

3) 对处理后的图像进行填充操作,去除天空的噪声。

#### 3.2 改进大气光估计

在已有的暗通道先验方法研究<sup>[2, 22]</sup>中,通常选择暗通道中最亮的 0.1% 的像素对应有雾图像各通道的平均值或最大值近似为  $A^\lambda$ 。这种选取大气光的方法相比于直接采用输入图像中最亮的像素进行估计的方法,在一定程度上避免了高亮物体的干扰<sup>[16]</sup>,所得到的结果更加准确,但是在一些特殊情况下,这种方法仍很难避免图像中明亮区域的像素被视为大气光参考像素。考虑到在含有大面积天空的降质图像中,大气光像素通常出现在天空区域,一些科研人员<sup>[4, 23]</sup>利用基于天空区域的暗通道估计大气光值,在很大程度上避免了前

景区域高亮物体的干扰,但只考虑大气光像素的亮度信息,其获得的位置并不精准。根据文献<sup>[24]</sup>,与大气光相关的像素不仅位于图像的亮区,而且周围较平滑。因此,本文结合天空识别方法,并设定亮度判别公式和平滑度判别公式,选取大气光参考像素的位置。

1) 大气光像素的亮度高,即三个通道的所有像素值都比较大,因此使用(6)式选取有雾图像天空区域亮度值前 1% 的像素:

$$Q_1 = \frac{1}{3} \sum_{\lambda \in \{R, G, B\}} I^\lambda(i, j) \quad (6)$$

2) 考虑到大气光像素的周围区域较平滑,在满足(6)式的像素点中,选取使(7)式取得较小值的前 1/10 像素。

$$Q_2 = \frac{1}{3} \sum_{\lambda \in \{R, G, B\}} \left[ |I^\lambda(i, j) - I^\lambda(i + 1, j)| + |I^\lambda(i, j) - I^\lambda(i, j + 1)| \right] \quad (7)$$

3) 步骤 2) 中得到的像素点即为选定的大气光参考像素。对选定的大气光参考像素求不同通道的平均值,即为大气光值。

图 2 给出了利用 He 的算法和本文算法得到的两组实验结果,每一行代表一组实验结果,图像中

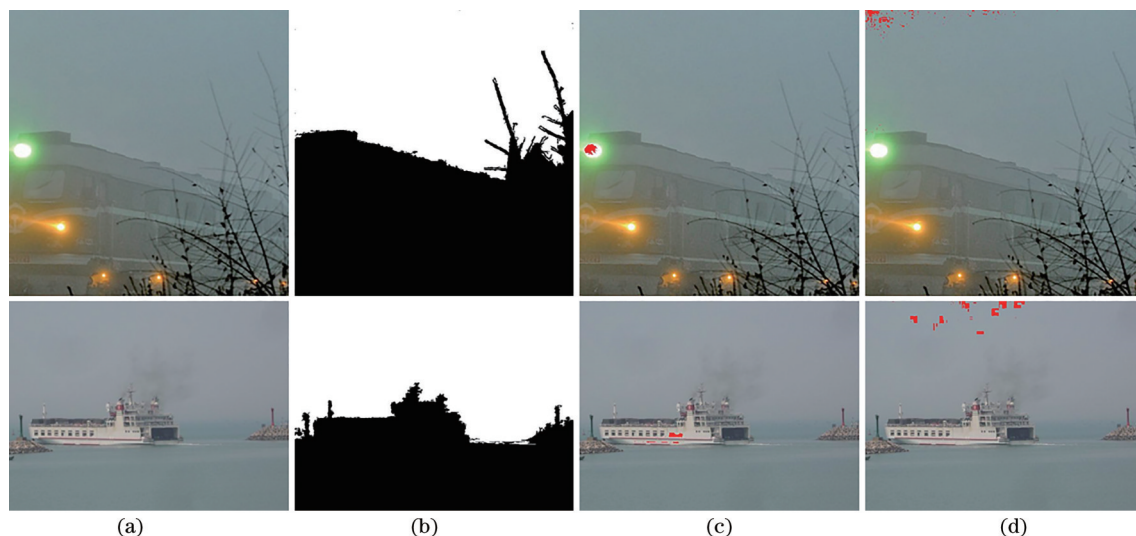


图 2 大气光参考像素估计结果。(a)原始雾图;(b)天空识别结果;(c) He 的算法的提取结果;(d)本文算法的提取结果  
Fig. 2 Atmospheric light reference pixel estimation results. (a) Original haze images; (b) results of sky recognition; (c) extraction results of He's algorithm; (d) extraction results of proposed algorithm

的红色像素点均为获取的大气光参考像素。在第一组实验中,利用 He 的算法选择的所有参考像素都落在车灯上,而利用本文算法选择的参考像素全部落在天空区域。在第二组实验中,选择了一幅有大面积白色物体的有雾图像,以验证白色物体对参考像素选择的影响。结果表明,He 的算法选择的参考像素全部落在白色的船上,而本文算法选择的参考像素全部落在天空区域。

图 3 所示分别为利用两种算法得到的去雾图像。从第一组图像可以看出,He 的算法的去雾图像右边的树枝去雾不彻底,并且去雾后的图像整体偏暗,原因是大气光参考像素全部选取在车灯上,3 个通道的大气光值均被估高。He 的算法的第二组去雾图像出现了严重的色偏,这是因为蓝色通道的大气光值被低估,采用大气散射模型推导后,造成了蓝色分量偏多,以致于去雾图像偏离了原始场景。

### 3.3 透射率融合及修正

在原始的暗通道先验方法中,假设无雾图像经过大气光归一化后的暗通道值近似为 0<sup>[16]</sup>。然而,天空的暗通道值远远大于 0,这就是使用原始暗通道先验法恢复的颜色在天空区域偏离原始场景,恢复图像出现颜色失真和光晕,看起来不自然的原因,因此这一假设不适用于含有大面积天空区域的图像处理。在现实中,天空区域的去雾需要较大的透射率<sup>[4]</sup>来保持自然性。与暗通道方法的思想相似,亮通道方法的基本思想是,在一个很小的图像区域至少有一个颜色通道具有较大的强度。对于

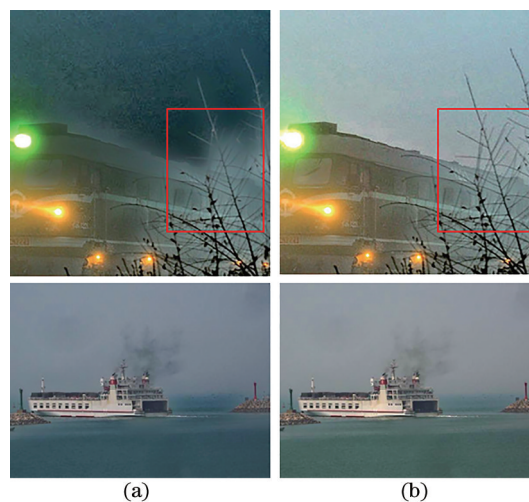


图 3 不同算法的去雾效果对比。(a) He 的算法;(b)本文算法  
Fig. 3 Comparison of defogging effects under different algorithms. (a) He's algorithm; (b) proposed algorithm

任意图像  $I$ , 基于亮通道模型得到的透射率  $t_{\text{Bri}}(x)$  表达式为

$$t_{\text{Bri}}(x) = \max_{\lambda \in \{R, G, B\}} \left\{ \max_{x \in \Omega(x)} [I^\lambda(x)] \right\}. \quad (8)$$

因此,本文采用亮通道模型估计天空区域  $I_{\text{sky}}$  的透射率。实验结果表明,将亮通道模型估计的透射率用于天空区域的去雾,可取得较好的效果。然而,它不能很好地恢复前景。暗通道先验方法对于非天空图像具有较好的去雾效果。利用暗通道先验方法对非天空区域  $I_{\text{no-sky}}$  的透射率  $t_{\text{DCP}}(x)$  进行粗略估计,表达式为

$$t_{\text{DCP}}(x) = 1 - \omega \min_{\lambda \in \{R, G, B\}} \left\{ \min_{x \in \Omega(x)} \left[ \frac{I^\lambda(x)}{A} \right] \right\}. \quad (9)$$

采用亮通道模型和暗通道先验模型融合的方式来估计图像的整体透射率,其中暗通道先验模型用于前景透射率估计,亮通道模型用于天空透射率估计。图 4(g)所示为透射率融合后的去雾结果,可以看到,该融合方法解决了图 4(f)中出现的天空失真问题。但是,从图 4(f)中观察到利用暗通道先验方法去雾时在前景中残留的局部阴影。为调节这一现象,在进行前景区域去雾时,通常引入一个参数  $\omega$ 。文献[3]中将  $\omega$  取为 0.95,原因是防止过度去雾,保持视觉真实性。但是,将该参数设置为一个固定的值,缺乏理论依据,显然是不合理的。He 等<sup>[17]</sup>认为雾霾图像的暗通道值接近于雾霾的密

度,参数  $\omega$  对应于去雾的程度。大多数情况下都需要彻底去雾,仅在暗通道值过小时,需要保留较多的雾,因此暗通道值与  $\omega$  参数之间不是单纯的线性关系。综上所述,本文根据暗通道值,用一个分段线性的映射区间表示该参数,如图 5 所示。如果暗通道的值在 0.4~1 的范围内,该区间被定义为浓雾区间,说明该处的雾偏多,为保证去雾较彻底,又能保证视觉真实性,将对应的  $\omega$  映射到 0.8~1 的范围内。如果暗通道的值在 0~0.4 的范围内,该区间被定义为薄雾区间,说明该处的雾偏少,为保证不过度去雾,又能保证图像清晰,将对应的  $\omega$  映射到 0~0.8 的范围内。参数修正后的复原图像如图 4(h)所示,线框里的楼宇和树的颜色相较于图 4(g)得到优化。

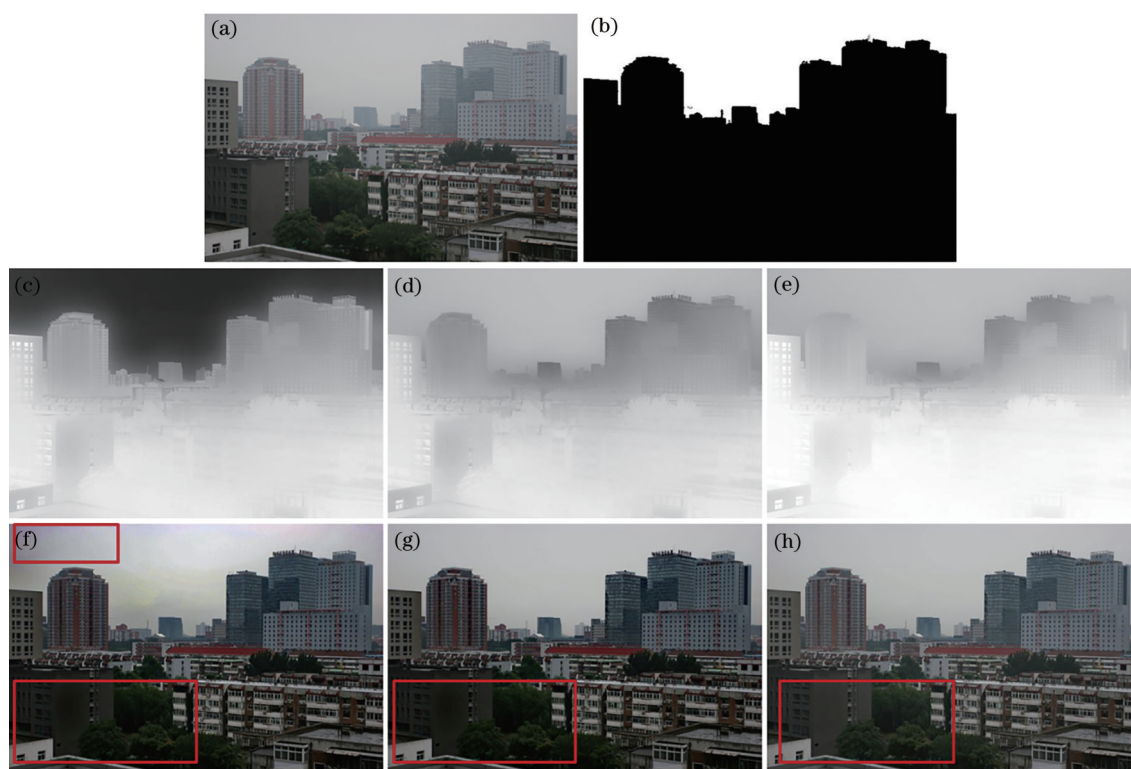
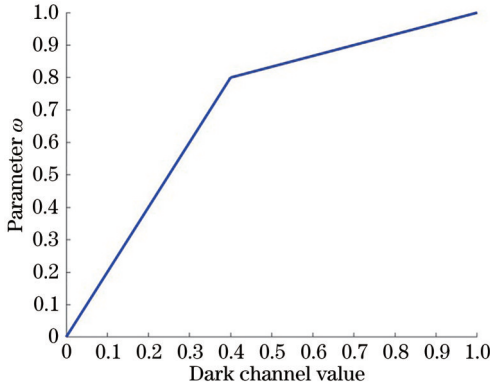


图 4 透射率优化结果。(a)原始雾图;(b)天空识别结果;(c)暗通道先验模型的透射率;(d)亮通道模型的透射率;(e)参数修正后的透射率;(f)对应图 4(c)的透射率去雾结果;(g)对应图 4(d)的透射率去雾结果;(h)对应图 4(e)的透射率去雾结果  
Fig. 4 Transmittance optimization results. (a) Original haze image; (b) result of sky recognition; (c) transmittance based on dark channel *a priori* model; (d) transmittance based on bright channel model; (e) transmittance after parameter modification; (f) defogging result corresponding to the transmittance of Fig. 4(c); (g) defogging result corresponding to the transmittance of Fig. 4(d); (h) defogging result corresponding to the transmittance of Fig. 4(e)

综上所述,融合后图像的透射率  $t_{\text{mix}}(x)$  为

图 5 参数  $\omega$  修正图Fig. 5 Parameter  $\omega$  correction

$$t_{\text{mix}}(x) = \begin{cases} \max_{\lambda \in \{R, G, B\}} \left\{ \max_{x \in \Omega(x)} [I^\lambda(x)] \right\}, & x \in I_{\text{sky}} \\ 1 - \omega \min_{\lambda \in \{R, G, B\}} \left\{ \min_{x \in \Omega(x)} \left[ \frac{I^\lambda(x)}{A} \right] \right\}, & x \in I_{\text{no-sky}} \end{cases}, \quad (10)$$

计算暗通道和亮通道时,巧妙地运用了形态学开运算和闭运算,大大加快了获取透射率的速度。利用(10)式得到最终融合图像的透射率后,采用He等<sup>[17]</sup>提出的导向滤波优化融合图像的透射率。

由于本文主要对含大面积天空区域的图像去雾,天空区域一般出现在图像的上方,天空的透射率要高于前景区域的透射率,因此利用行平均值可以直观地展示图像透射率改进后的变化。图6集中展示了4个模型从天空到前景垂直方向的平均透射

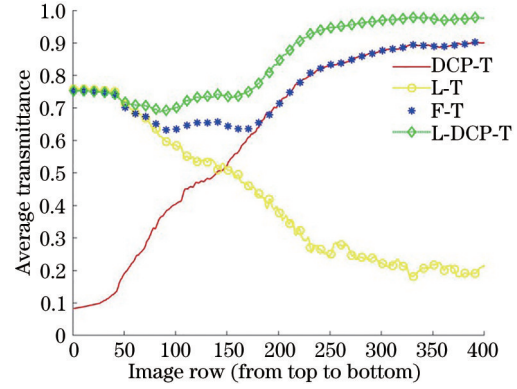


图 6 4 个模型对图 4(a) 的透射率曲线

Fig. 6 Transmittance curves of four models on Fig. 4(a)

率值[暗通道先验模型透射率(DCP-T)、亮通道模型透射率(L-T)、融合透射率(F-T)、融合后修正透射率(L-DCP-T)]的变化。可以看到,本文方法融合了亮通道模型在天空区域的效果,以及暗通道先验模型在前景区域的效果,最后修正参数 $\omega$ ,所得到的前景透射率有所提高。通过以上方法,避免了天空的色彩失真,调节了暗通道先验模型在前景造成的局部阴影,同时保持了良好的去雾效果。

改进的大气透射率估计算法的整体流程的MATLAB伪代码如图7所示。第1行是初始化,已知暗通道 $I_{\text{dark}}(x)$ 和从2.2节估计出的全局大气光值 $A^\lambda$ ;第5行是利用亮通道模型估计天空区域的透射率;第7行和第9行是估计前景的透射率,当暗通道的值小于0.4时,用第7行公式计算,否则采用第

---

**algorithm:** Accurately estimate transmittance

---

1. **initialization:** Dark channel  $I_{\text{dark}}(x)$ , Global atmospheric light  $A$
  2. for  $i=1:\omega$                    %  $\omega$  is the width of the foggy image
  3.   for  $j=1:h$                    %  $h$  is the length of the foggy image
  4.     if  $I(i, j) \in I_{\text{sky}}$
  5.        $t(x) = \max_{\lambda \in \{R, G, B\}} \{ \max_{x \in \Omega(x)} [I^\lambda(x)] \}$    %  $t(x)$  is the transmittance at pixel point  $(i, j)$
  6.     else if  $I(i, j) \notin I_{\text{sky}} \& I_{\text{dark}}(x) < 0.4$
  7.        $t(x) = 1 - 2I_{\text{dark}}(x) \times \min_{\lambda \in \{R, G, B\}} \{ \min_{x \in \Omega(x)} [ \frac{I^\lambda(x)}{A} ] \}$
  8.     else
  9.        $t(x) = 1 - \left( \frac{1}{3} I_{\text{dark}}(x) + \frac{2}{3} \right) \times \min_{\lambda \in \{R, G, B\}} \{ \min_{x \in \Omega(x)} [ \frac{I^\lambda(x)}{A} ] \}$
  10.    end
  11.    end
  12.    end
  13. end
- 

图 7 估计透射率的算法流程

Fig. 7 Algorithm flow for estimating transmittance

9 行公式计算。

### 3.4 图像复原

将上述求得的大气光值  $A^\lambda$  和透射率  $t_{\text{mix}}(x)$  通过雾化模型用于无雾图像恢复, 为防止透射率过小, 设定一个下限  $t_0=0.1$ 。去雾后的图像  $J^\lambda(x)$  为

$$J^\lambda(x) = \frac{I^\lambda(x) - A^\lambda}{\max [t_{\text{mix}}(x), t_0]} + A^\lambda. \quad (11)$$

由于利用暗通道先验算法去雾后图像整体偏暗, 因此将去雾后的图像映射到 HSV 空间, 并将亮度  $V$  的分量增大 1.2 倍, 以此来进行亮度补偿。为了使图像的整体对比度更高, 再将 0.2~0.9 之间的灰度扩展到 0~1 范围, 进行对比度拉伸。

## 4 分析与讨论

### 4.1 实验结果

为了分析去雾方法的有效性, 搭建了实验平台, 编写了程序进行验证。实验硬件平台为联想笔记本电脑, Intel(R) Core(TM) i7-6500 U CPU@2.50 GHz, 16 GB RAM, 测试软件为 Windows 10

环境下的 MATLAB 2014b。除了硬件平台, 收集了大量不同场景中含有天空的雾天降质图像来验证所提出的去雾方法, 都取得了良好的效果。对比方法的参数全部依据相关文献<sup>[13-14,16,25]</sup>进行设置。

图 8 所示为所提出的 L-DCP 方法与现有的 4 种去雾方法的可视化效果对比。可以看到: 第 2 列图像是文献[16]提出的暗通道先验方法的可视化效果, 去雾后前景去雾效果良好, 但天空出现了明显的色偏, 且整体图像偏暗, 主要原因是基于该方法估计的天空透射率是无效的, 以及大气光值选取不准确; 第 3 列图像是文献[14]提出的基于模糊线先验去雾方法的可视化效果, 图像的整体亮度被提高, 因此对于天空区域的处理效果很不自然; 第 4 列图像是文献[13]算法的处理结果, 对前景区域的处理效果良好, 但是在天空区域出现了明显的光晕、阴影以及块效应, 影响了人们的视觉感知; 第 5 列图像是文献[25]算法的处理结果, 图像整体灰

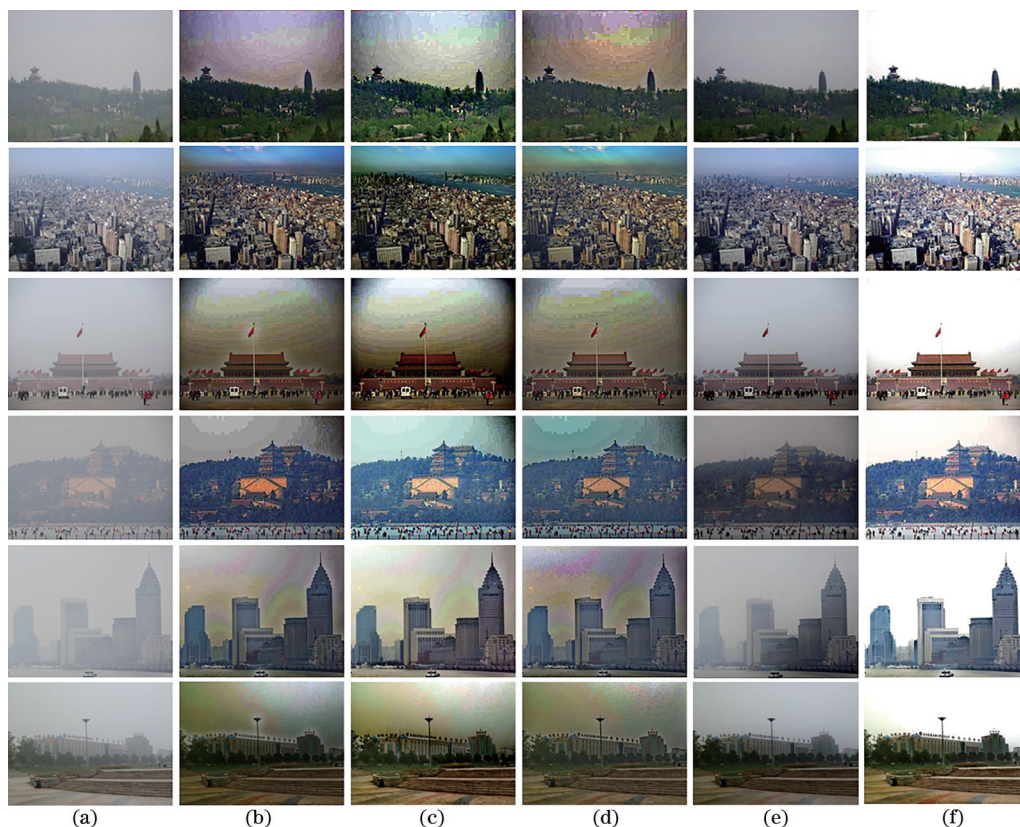


图 8 不同方法的去雾效果比较。(a)原始图像;(b)文献[16]方法的去雾效果;(c)文献[14]方法的去雾效果;(d)文献[13]方法的去雾效果;(e)文献[25]方法的去雾效果;(f)本文方法的去雾效果

Fig. 8 Comparison of different methods of defogging effects. (a) Original images; (b) defogging effects using method in Ref. [16]; (c) defogging effects using method in Ref. [14]; (d) defogging effects using method in Ref. [13]; (e) defogging effects using method in Ref. [25]; (f) defogging effects using proposed method

暗,明亮的天空被处理成暗沉色彩;本文方法恢复了大部分场景的细节,并保持了图像的原始颜色,

#### 4.2 客观评价

除了主观视觉评价外,还使用 3 个量化指标来评估本文算法的有效性。峰值信噪比(PSNR)和结构相似性(SSIM)用于表征信号失真程度,理论上,较大的值对应于较小的图像失真<sup>[8]</sup>。另一个量化指标是平均梯度(AG),它反映了图像对比度,较大的值对应于较高的图像分辨率<sup>[26]</sup>。选用平均梯度这个指标来描述图像的细节信息。

##### 1) 峰值信噪比( $R_{\text{PSNR}}$ )

$$R_{\text{PSNR}} = 10 \cdot \lg \left( P_{\text{max-}J}^2 / \eta_{\text{MSE}} \right), \quad (12)$$

式中: $P_{\text{max-}J}$ 为无雾图像像素的最大值,通常等于 255; $\eta_{\text{MSE}}$ 为图像之间的均方差。

##### 2) 结构相似性( $S_{\text{SSIM}}$ )

$$S_{\text{SSIM}} = \frac{(2\mu_I\mu_J + c_1)(2\sigma_{IJ} + c_2)}{(\mu_I^2 + \mu_J^2 + c_1)(\sigma_I^2 + \sigma_J^2 + c_2)}, \quad (13)$$

式中: $\mu_I$ 和 $\mu_J$ 分别为有雾图像 $I$ 和去雾图像 $J$ 的像素均值; $\sigma_I$ 和 $\sigma_J$ 分别为对应的标准差; $\sigma_{IJ}$ 为协方差; $c_1$ 和 $c_2$ 为防止分母为 0 而设的极小常数。

不但解决了天空区域的颜色失真,而且前景区域纹理清晰,图像的整体处理效果最佳。

##### 3) 平均梯度( $G_{\text{AG}}$ )

$$G_{\text{AG}} = \frac{1}{\sqrt{2}mn} \sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n \sqrt{(J_{ij}^x)^2 + (J_{ij}^y)^2}, \quad (14)$$

式中: $m \times n$ 为图像的大小; $J_{ij}^x$ 为水平方向的梯度; $J_{ij}^y$ 为垂直方向的梯度。

表 1 所示为各方法对图 8 中的 6 种情境下的图像去雾效果的量化指标平均值。本文方法的峰值信噪比和结构相似性都取得了最高值,证明本文方法的处理效果最接近于真实效果,然而平均梯度却不是最高的,这是因为本文方法既不会过度锐化边缘,也不会天空区域出现明显的块效应和光晕。本文使用的数据均为含有大面积天空区域的雾天降质图像,天空本来就是平滑的,不会出现过多的细节纹理,但会拉低图像整体的平均梯度值。因此,本文方法的平均梯度值不是很高,这是合理的。本文方法在保持天空区域平滑的前提下,仍能得到一个优异的平均梯度值,间接证明了本文方法在前景区域的纹理复现中也取得很好的效果。

表 1 不同方法的量化评估结果

Table 1 Quantitative evaluation results of different methods

Index	Method in Ref. [16]	Method in Ref. [14]	Method in Ref. [13]	Method in Ref. [25]	Proposed method
PSNR	11.180	12.167	11.650	13.934	<b>14.535</b>
SSIM	0.506	0.377	0.441	0.724	<b>0.726</b>
AG	0.045	<b>0.060</b>	0.052	0.033	0.054

## 5 结 论

图像去雾技术在视频监控、目标检测、导航追踪、日常审美等应用中发挥了重要作用。本文基于大气散射模型,提出了一种改进暗通道先验的雾天降质图像恢复方法,并结合天空识别设定判别公式,估计大气光值。对可调参数进行动态修正,有效降低了前景区域的局部阴影,并针对天空区域的特点,提出了一种估计天空透射率的新模型。实验结果表明,本文算法能有效地复原雾霾天气下的降质图像。与 4 种经典的算法相比,本文算法的主观视觉质量优于其他算法,复原图像自然,尤其在保持天空图像自然性方面具有优势。3 个量化指标——峰值信噪比、结构相似性和平均梯度较原始的暗通道先验算法有了明显提升。

本文定义的判别公式和提出的对可调参数进行动态修正的方法,也可用于不含天空的模糊图像复

原,具有普适性。将本文方法应用到去除海雾的领域,进行海上目标检测与识别,是下一步的研究任务。

## 参 考 文 献

[1] Das M K, Dinulal P, Koshy G, et al. Image dehazing using improved dark channel prior and relativity of Gaussian[J]. Procedia Computer Science, 2019, 165: 442-448.

[2] Huang C Q, Yang D, Zhang R L, et al. Improved algorithm for image haze removal based on dark channel priority[J]. Computers & Electrical Engineering, 2018, 70: 659-673.

[3] Wang Z D, Jing X, Sun G D, et al. Image dehazing of dark channels based on area contrast constraint[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(8): 0810003. 王振东, 靖旭, 孙国栋, 等. 基于区域对比度约束的暗通道图像去雾[J]. 中国激光, 2019, 46(8): 0810003.

[4] Zhu Y Y, Tang G Y, Zhang X Y, et al. Haze



- removal method for natural restoration of images with sky[J]. *Neurocomputing*, 2018, 275: 499-510.
- [5] Wang W, Li B, Zheng J, et al. A fast multi-scale Retinex algorithm for color image enhancement[C]//2008 International Conference on Wavelet Analysis and Pattern Recognition, August 30-31, 2008, Hong Kong, China. New York: IEEE Press, 2008: 80-85.
- [6] Abdullah-Al-Wadud M, Kabir M H, Dewan M A A, et al. A dynamic histogram equalization for image contrast enhancement[J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2007, 53(2): 593-600.
- [7] Du Y, Guindon B, Cihlar J. Haze detection and removal in high resolution satellite image with wavelet analysis[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2002, 40(1): 210-217.
- [8] Ma N J, Xu J B, Li H C. A fast video haze removal algorithm via dark channel prior[J]. *Procedia Computer Science*, 2018, 131: 213-219.
- [9] Li Y M, Zhang X J, Xie B W. An improved dark channel prior image dehazing algorithm based on fusion luminance model[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(22): 221002.  
李雅梅, 张旭佳, 谢秉旺. 基于亮度模型融合的改进暗通道先验图像去雾算法[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(22): 221002.
- [10] Liu H B, Yang J, Wu Z P, et al. A fast single image dehazing method based on dark channel prior and Retinex theory[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2015, 41(7): 1264-1273.  
刘海波, 杨杰, 吴正平, 等. 基于暗通道先验和 Retinex 理论的快速单幅图像去雾方法[J]. *自动化学报*, 2015, 41(7): 1264-1273.
- [11] Fattal R. Single image dehazing[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2008, 27(3): 1-9.
- [12] Tarel J P, Hautière N. Fast visibility restoration from a single color or gray level image[C]//2009 IEEE 12th International Conference on Computer Vision, September 29-October 2, 2009, Kyoto, Japan. New York: IEEE Press, 2009: 2201-2208.
- [13] Meng G F, Wang Y, Duan J Y, et al. Efficient image dehazing with boundary constraint and contextual regularization[C]//2013 IEEE International Conference on Computer Vision, December 1-8, 2013, Sydney, NSW, Australia. New York: IEEE Press, 2013: 617-624.
- [14] Berman D, Treibitz T, Avidan S. Non-local image dehazing[C]//2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), June 27-30, 2016, Las Vegas, NV, USA. New York: IEEE Press, 2016: 1674-1682.
- [15] Kopf J, Neubert B, Chen B, et al. Deep photo: Model-based photograph enhancement and viewing [C]//ACM SIGGRAPH Asia 2008 papers on SIGGRAPH Asia '08, December 10-13, 2008, Singapore. New York: ACM Press, 2008: 1-10.
- [16] He K M, Sun J, Tang X O. Single image haze removal using dark channel prior[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2011, 33(12): 2341-2353.
- [17] He K M, Sun J, Tang X O. Guided image filtering [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2013, 35(6): 1397-1409.
- [18] Zhao J T. Single-image defogging algorithm based on deep learning[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(11): 111005.  
赵建堂. 基于深度学习的单幅图像去雾算法[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(11): 111005.
- [19] Cai B L, Xu X M, Jia K, et al. DehazeNet: an end-to-end system for single image haze removal[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2016, 25(11): 5187-5198.
- [20] 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.
- [21] Salazar-Colores S, Cruz-Aceves I, Ramos-Arreguin J M. Single image dehazing using a multilayer perceptron[J]. *Journal of Electronic Imaging*, 2018, 27(4): 043022.
- [22] Han H N, Qian F, Lü J W, et al. Aerial image dehazing using improved dark channel prior[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(6): 1387-1394.  
韩昊男, 钱锋, 吕建威, 等. 改进暗通道先验的航空图像去雾[J]. *光学精密工程*, 2020, 28(6): 1387-1394.
- [23] Yuan X Y, Ju M Y, Gu Z F, et al. An effective and robust single image dehazing method using the dark channel prior[J]. *Information*, 2017, 8(2): 57.
- [24] Zhao J W, Shen Y Y, Liu C X, et al. Dark channel prior-based image dehazing with atmospheric light validation and halo elimination[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2016, 21(9): 1221-1228.  
赵锦威, 沈逸云, 刘春晓, 等. 暗通道先验图像去雾的大气光校验和光晕消除[J]. *中国图象图形学报*, 2016, 21(9): 1221-1228.
- [25] Salazar-Colores S, Moya-Sánchez E U, Ramos-Arreguin J M, et al. Fast single image defogging