

# 区域透射率融合的暗通道图像去雾方法

谢斌, 杨俊霞\*, 吕志铭, 沈建豪

江西理工大学信息工程学院, 江西 赣州 341000

**摘要** 针对传统基于暗通道先验的去雾方法容易导致边缘区域和天空区域分别出现伪影和颜色失真的问题, 提出了一种基于区域透射率融合的暗通道图像去雾方法。首先, 将含雾图像分为非天空、天空及过渡边缘等 3 个区域。其次, 在暗通道结合块透射率估计和点透射率估计分别对非天空区域和过渡边缘区域进行融合, 并利用梯度域引导滤波进行平滑处理, 得到融合后的暗通道透射率。然后, 合成天空区域的亮度透射率和暗通道融合透射率, 以获得最终的透射率。最后, 利用得到的透射率和改进后的大气光值对图像进行复原, 得到去雾结果图像。实验结果表明, 与传统暗通道方法相比, 所提方法明显更优, 其在有效抑制边缘伪影的同时能够较好地保留含雾图像的颜色特征。所提方法得到的去雾图像在主观评价和客观评价方面均能取得更好的结果。

**关键词** 图像处理; 透射率融合; 暗通道先验; 大气散射模型; 引导滤波; 图像去雾

中图分类号 TN391.41

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP212787

## Dark Channel Image Defogging Method Based on Regional Transmittance Fusion

Xie Bin, Yang Junxia\*, Lü Zhiming, Shen Jianhao

College of Information Engineering, Jiangxi University of Science and Technology,  
Ganzhou 341000, Jiangxi, China

**Abstract** In order to solve the problem that the traditional defogging method based on the dark channel priori is easy to cause artifact and color distortion in the edge region and the sky region, a dark channel image defogging method based on regional transmittance fusion is proposed. First, the fog image is divided into three regions: non sky, sky, and transition edge. Then, the non-sky region and transition-edge region are fused in the dark channel combined with block transmittance estimation and point transmittance estimation, and the fused dark channel transmittance is obtained using gradient domain guided filtering. Next, the luminance transmittance of the sky region and the dark channel fusion transmittance are synthesized to obtain the final transmittance. Finally, the image is restored using the obtained transmittance and the improved atmospheric light value to obtain the defogging result image. Experimental results show that the proposed method is significantly better than the traditional dark channel method. It can effectively suppress edge artifacts and preserve the color features of foggy images. Compared with the traditional methods, the defogged images obtained by the proposed method can achieve better results in both subjective and objective evaluation.

**Key words** image processing; transmittance fusion; dark channel a priori; atmospheric scattering model; guided filtering; image defogging

## 1 引言

随着计算机的普及和数字信息处理技术的高速发展, 人们对图像质量的要求不断提高。数字图像因其记录快捷、信息量大及传输便利等优点成为计算机时

代最重要的信息载体。然而, 数字图像在获取过程中常常受到雾霾的影响, 得到的图像存在不同程度模糊不清的问题, 如此将影响特征提取、目标识别和分类<sup>[1-4]</sup>等后续图像处理操作。因此, 图像去雾在计算机视觉领域中是一个重要的问题, 受到人们的广泛关注。

收稿日期: 2021-10-25; 修回日期: 2021-12-06; 录用日期: 2021-12-21; 网络首发日期: 2022-01-09

基金项目: 国家自然科学基金(61741109)、江西省教育厅科学技术研究项目(GJJ180441)、江西理工大学博士启动基金(20520010058)、江西省自然科学基金(20192BAB207036)

通信作者: \*1249367925@qq.com

早期常常采用图像增强的方法如直方图均衡<sup>[5]</sup>、同态滤波<sup>[6]</sup>及小波变换<sup>[7]</sup>来对含雾图像进行去雾处理。然而,上述方法容易存在去雾不彻底、色彩失真及细节模糊等问题,主要原因在于该类方法没有充分考虑含雾图像的形成机理。为了克服上述图像增强方法的局限性,提高图像的去雾效果,该领域的众多研究人员进行了大量有意义的工作。

目前,主流的去雾方法是基于物理模型的复原方法,通过大气散射模型<sup>[8]</sup>反向推理图像退化的过程,然后在此基础上恢复出无雾图像。文献<sup>[9]</sup>假定图像的透射率与物体的表面阴影不相关,并在此条件下通过场景反射率和介质传输率估计提出了一种新的去雾方法,该方法依赖于大量含雾图像的数理统计,并且选择的含雾图像需要具有鲜明的色彩。因此,该方法对于含有少量雾气的图像具有较好的去雾效果,但对于浓雾的去雾效果并不理想。为了得到更好的去雾效果,He等<sup>[10]</sup>提出了经典的暗通道先验理论,并利用该理论对含雾图像进行透射率估计,最后通过大气散射模型恢复出图像,该方法实现了更好的去雾效果。然而,使用该方法获得的图像容易出现伪影和色彩失真的问题。

为了进一步提升去雾效果,部分学者将暗通道理论引入去雾方法中。文献<sup>[11]</sup>提出了一种基于大气耗散函数估计的方法,该方法通过中值滤波优化图像透射率来取得较好的去雾效果,但是容易在图像的边缘区域产生伪影。为此,Meng等<sup>[12]</sup>在文献<sup>[11]</sup>方法的基础上进一步考虑边界约束条件并得到更好的效果。虽然文献<sup>[12]</sup>方法在去雾的同时能够更好地保持图像的边缘,但是对浓雾图像的处理效果仍然不够理想。值得注意的是,随着科技的发展和硬件条件的提高,基于深度学习的图像去雾方法<sup>[13-14]</sup>不断涌现,这类方法主要利用神经网络提取含雾图像的各种特征进行透射率估计,从而达到提高图像质量的目的。例如,Cai等<sup>[13]</sup>提出了一个可训练的端到端系统,该系统通过结合卷积神经网络(CNN)强大的特征提取功能和暗通道先验去雾理论,取得了较传统方法更好的去雾效果。然而,基于深度学习方法的学习网络通常较为复杂,样本数据库的建立需要花费大量的人力物力且去雾时间较长。

近年来,基于图像融合的方法由于能够较好地提取图像的特征信息引起人们的关注。文献<sup>[15]</sup>提出了一种基于人工多次曝光的图像融合去雾方法,该方法基于一组 gamma 校正欠曝光图像,并通过分析全局和局部曝光度来构建像素权重图,以指导融合过程。虽然该方法较好地提高了图像的去雾性能和鲁棒性,但容易出现严重的图像信息失真问题。为此,Zhao等<sup>[16]</sup>通过对像素级和分块级的透射率进行多尺度融合,较好地改善了图像的去雾效果。但是,当含雾图像中存在大片天空区域或白色区域时该方法的去雾效果不尽如人意,容易使结果图像出现不自然的“伪彩色”。为

了解决这一问题,Zhu等<sup>[17]</sup>结合亮度模型和暗通道先验理论提出了一种新的去雾方法,该方法虽然在一定程度上改善了天空色彩,但是容易丢失图像的边缘细节。

针对上述问题,本文提出了一种新的去雾方法,可在有效抑制边缘伪影的同时更多地保留图像的颜色特征。将含雾图像分解成非天空区域(透射率较高的区域)、过渡边缘区域(透射率突变较为明显的区域)和天空区域(透射率较低的区域)。考虑到上述3个区域的不同特点,对非天空区域使用暗通道块透射率估计,对边缘区域使用暗通道点透射率估计,然后将其进行多尺度融合,得到非天空区域和边缘区域融合后的暗通道透射率,以有效抑制结果图像的伪影。另外,借助亮度模型<sup>[17]</sup>代替景深信息,用于天空区域透射率的估计,以提高图像天空区域去雾效果,达到抑制颜色失真的目的。最后,将带有亮度信息的透射率和经过多尺度融合的暗通道透射率进行合成,得到最终的优化透射率。实验结果表明,与传统的图像去雾方法比较,所提方法得到了质量明显更好的图像。

## 2 相关工作介绍

### 2.1 大气散射模型

一般而言,含雾图像的成像机理与大气散射模型之间存在着极其密切的关系。在计算机视觉领域中,被广泛使用的雾霾成像大气散射模型<sup>[8]</sup>为

$$\begin{cases} I(x) = J(x)t(x) + A[1 - t(x)] \\ t(x) = \exp[\beta d(x)] \end{cases}, \quad (1)$$

式中: $x$ 为图像像素点; $I(x)$ 为原始含雾图像; $J(x)$ 为无雾图像; $A$ 为大气光值; $t(x)$ 为空气介质的透射率且 $t(x) \in (0, 1)$ ; $\beta$ 为大气散射系数; $d(x)$ 为场景深度,表示目标物体到相机的距离。

### 2.2 经典的暗通道先验去雾方法

由暗通道先验理论<sup>[10]</sup>可知,无雾图像中大部分像素的RGB颜色通道中至少有一个通道具有非常低的像素值,且接近于零,即

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

式中: $J^c(y)$ 表示结果图像的像素 $y$ 在 $c \in \{R, G, B\}$ 通道的值; $\Omega(x)$ 表示以像素 $x$ 为中心的矩形窗口; $J^{\text{dark}}(x)$ 表示像素 $x$ 对应的暗通道值。

在式(1)的基础上,暗通道先验理论假设在一定大小的矩形窗口 $\Omega(x)$ 中透射率 $t(x)$ 为定值,用 $t_p(x)$ 表示,并且假设大气光值 $A$ 已给定。对式(1)两边进行最小化运算,有

$$\min_{y \in \Omega(x)} \left[ \min_c \frac{I^c(y)}{A^c} \right] = t_p(x) \min_{y \in \Omega(x)} \left[ \min_c \frac{J^c(y)}{A^c} \right] + 1 - t_p(x), \quad (3)$$

式中: $A^c$ 为大气光在 $c$ 通道的值; $I^c(x)$ 为含雾图像在 $c$

通道的值。利用式(2)和式(3)可得,暗通道的块透射率  $t_p(x)$  为

$$t_p(x) = 1 - \min_{y \in \Omega(x)} \left[ \min_c \frac{I^c(y)}{A^c} \right] \quad (4)$$

为了使复原的图像看起来更加自然,He 等<sup>[10]</sup>在式(4)的基础上引入调整因子  $\omega$  (通常取 0.95) 并重新定义透射率  $t_p(x)$ :

$$t_{pa}(x) = 1 - \omega \min_{y \in \Omega(x)} \left[ \min_c \frac{I^c(y)}{A^c} \right] \quad (5)$$

文献[10]方法虽然较传统去雾方法有更好的效果,但是仍然存在两个方面的问题:1)容易出现伪影。文献[10]假定矩形窗口  $\Omega(x)$  中的透射率基本保持不变,而图像边缘区域的透射率通常存在明显的突变现象。因此,该方法对边缘区域透射率的估计往往存在较大的误差,容易导致去雾结果图像在边缘区域出现明显的伪影。2)容易出现色彩失真。如前文所述,文献[10]方法是基于暗通道先验理论设计的,由于图像的非天空区域其暗通道强度趋近于零,该方法能够取

得相对较好的去雾效果。然而,富含天空区域的图像通常存在大面积的明亮区域,其对应的暗通道强度较大(不趋近于零),因此在天空区域应用暗通道理论进行去雾时其效果并不尽如人意,容易导致结果图像在天空区域出现颜色失真的问题。

为了解决对图像天空区域透射率估计不足的问题,Zhu 等<sup>[17]</sup>提出的去雾方法对天空区域透射率进行了较好的修正,但是其去雾效果与文献[10]方法一样容易存在边缘区域模糊的问题。图1为文献[10]方法与文献[17]方法的边缘失真图,其中图1(a)为含雾图像,图1(b)和图1(c)分别为文献[10]方法和文献[17]方法的结果图像,图1(d)~(f)分别为图1(a)~(c)矩形框区域的局部放大图。从图1(b)可以看出,相对于图1(a)含雾图像而言,文献[10]方法所得图像在非天空区域的去雾效果较为理想,但是在边缘区域却出现了明显的伪影[如图1(e)所示]。同时,从图1(c)可以看出,矩形框区域周围比较阴暗,很多细节信息没有得到有效保持,并且矩形框区域内出现了重影及边缘细节模糊的问题[如图1(f)所示]。

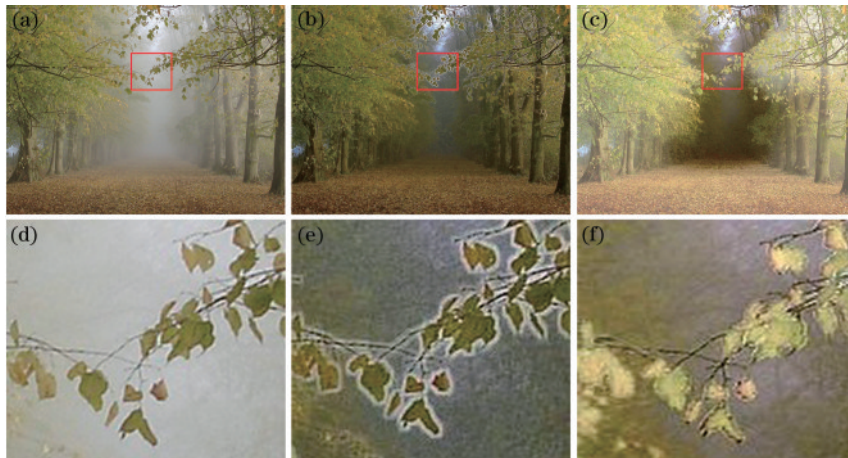


图1 边缘失真图。(a)含雾图像;(b)文献[10]方法图像;(c)文献[17]方法图像;(d)图1(a)的局部放大;(e)图1(b)的局部放大;(f)图1(c)的局部放大

Fig. 1 Edge distortion maps. (a) Foggy image; (b) image of reference [10] method; (c) image of reference [17] method; (d) partial magnification of Fig. 1(a); (e) partial magnification of Fig. 1(b); (f) partial magnification of Fig. 1(c)

另外,为了解决对图像边缘区域透射率估计不足的问题,Zhao 等<sup>[16]</sup>提出的去雾方法对边缘区域透射率

进行了较好的修正,但是其去雾效果与文献[10]方法一样容易存在天空区域出现色彩失真的问题。图2为



图2 天空失真图。(a)含雾图像;(b)文献[10]方法图像;(c)文献[16]方法图像

Fig. 2 Sky distortion maps. (a) Foggy image; (b) image of reference [10] method; (c) image of reference [16] method

文献[10]方法与文献[16]方法的实验结果,其中图 2(a)为原始含雾图像,图 2(b)和图 2(c)分别为图 2(a)经过文献[10]方法和文献[16]方法处理的图像。

从图 2(b)可以看出,文献[10]方法所得图像在非天空区域和天空区域的交界处出现了明显的伪影,并且天空区域的颜色与原始场景发生了严重的偏离。从图 2(c)可以看出,与图 2(b)相比,文献[16]方法所得

图像较好地解决了文献[10]方法在边缘区域出现的伪影问题,但是在天空区域仍然存在明显的色彩失真。

### 3 所提方法

针对传统方法容易导致边缘区域存在伪影和天空区域出现颜色失真等问题,本研究结合暗通道理论、区域透射率融合和亮度模型提出了一种新的去雾方法,其具体流程如图 3 所示。

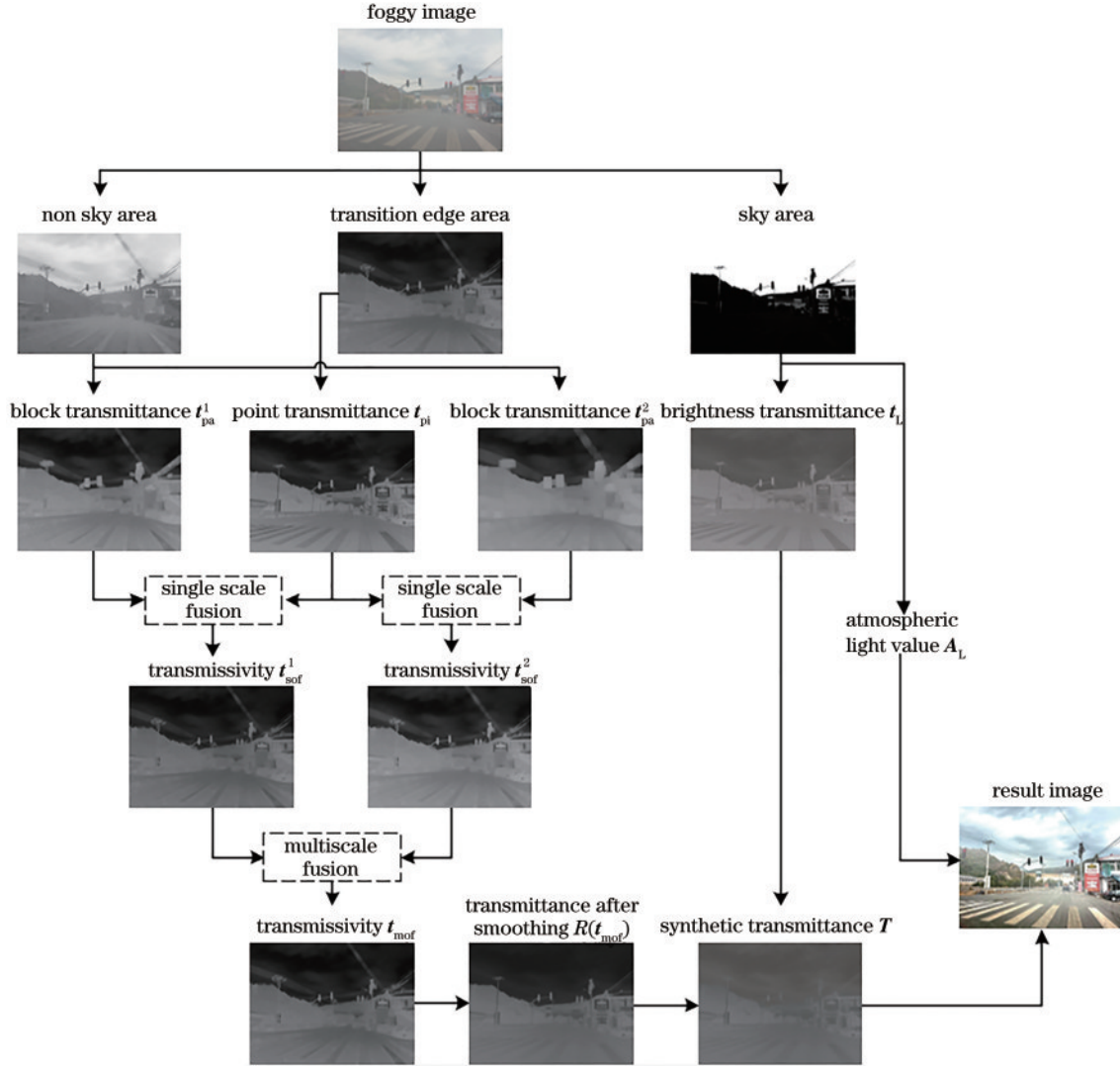


图 3 所提方法图像去雾流程示意图

Fig. 3 Flow chart of proposed method image defogging

1) 依据含雾图像的透射率分布特点将其分为非天空区域、过渡边缘区域和天空区域;

2) 对包含纹理较多的非天空区域采用暗通道块透射率估计得到不同尺度的块透射率  $t_{pa}^1$  和  $t_{pa}^2$ , 对容易发生突变的边缘区域采用暗通道点透射率估计得到对应的点透射率  $t_{pi}$ , 然后将点透射率  $t_{pi}$  分别与块透射率  $t_{pa}^1$  和  $t_{pa}^2$  进行单尺度融合得到融合后的透射率  $t_{sof}^1$  和  $t_{sof}^2$ ;

3) 将透射率  $t_{sof}^1$  和  $t_{sof}^2$  通过多尺度融合得到融合后的透射率  $t_{mof}$ 。为了消除可能出现的噪声,利用梯度域

引导滤波<sup>[18]</sup>对  $t_{mof}$  进行平滑处理,得到平滑处理后的透射率  $R(t_{mof})$ ;

4) 另外,对于平滑的天空区域采用能有效保持色彩特征的亮度透射率估计,得到其对应的亮度透射率  $t_L$ 。然后,将其与平滑处理后的透射率  $R(t_{mof})$  进行融合得到合成的透射率  $T$ ;

5) 由天空区域得到  $A_L$ , 并将  $A_L$  与合成的透射率  $T$  一起代入式(1)得到最后的结果图像。

### 3.1 区域透射率估计

暗通道方法对于过渡边缘区域和天空区域容易出现透射率误判,因而去雾效果不佳<sup>[16-17]</sup>。为了得到更好的去雾效果,将含雾图像分解为如下 3 个区域,并利用不同的策略来进行透射率估计。

#### 3.1.1 非天空区域

在该区域的图像特征与暗通道理论<sup>[10]</sup>的假设一致。因此,采用式(5)所示的经典暗通道方法来获得非天空区域的块透射率  $t_{pa}(x)$ 。需要说明的是  $t_{pa}(x)$  为式(5)中矩形窗口  $\Omega(x)$  为  $N \times N (N > 1)$  大小时得到的透射率(称为块透射率),主要作用在非天空区域。

#### 3.1.2 过渡边缘区域

利用暗通道方法求得的过渡边缘区域透射率往往存在较为明显的突变,因而该区域并不能完全符合暗通道理论的设定。若采用该方法对过渡边缘区域进行透射率估计容易导致结果图像在该区域出现不同程度的伪影。为了解决这一问题,将暗通道点透射率<sup>[16]</sup>引入去雾方法中,以较好地抑制过渡边缘区域可能出现的伪影。暗通道的点透射率用  $t_{pi}(x)$  表示,它是式(5)中的矩形窗口  $\Omega(x)$  为  $1 \times 1$  大小时得到的透射率。暗通道点透射率  $t_{pi}(x)$  以点为单位进行透射率估计,可以更充分地保留图像的边缘细节信息,因此可以较好地克服暗通道块透射率带来的伪影问题。

#### 3.1.3 天空区域

一般而言,含雾图像的天空区域并不符合暗通道理论的先验假设,因此传统暗通道方法容易在天空区域出现色彩失真的问题。通常含雾图像的亮度分布与场景深度信息密切相关,因此可以用图像的亮度变化来模拟场景深度变化<sup>[17]</sup>。为此,借鉴文献<sup>[17]</sup>的思想,采用亮度模型对天空区域进行透射率估计,即

$$t_L(x) = \exp[-\beta \tilde{L}(x)], \quad (6)$$

$$\tilde{L}(x) = \frac{\tau}{L^*} I(x), \quad (7)$$

式中:  $t_L(x)$  为亮度透射率,其在天空区域的取值可以近似地看作为天空区域的透射率<sup>[17]</sup>;  $\tilde{L}(x)$  为修正的亮度;  $I(x)$  为含雾图像的亮度;  $\tau$  为修正系数,通常取 3.4;  $L^*$  为含雾图像亮度的最大值。

### 3.2 区域透射率融合模型的建立

如前文所述,为了得到更好的去雾效果,分别对含雾图像的非边缘区域、过渡边缘区域和天空区域进行暗通道块透射率估计、暗通道点透射率估计和亮度透射率估计。并在此基础上,提出了一种新的区域透射率融合方法,该方法包括两个步骤:1)将边缘区域暗通道的点透射率与非天空区域暗通道的块透射率多尺度融合;2)将第1步的结果与天空区域亮度透射率融合。

#### 3.2.1 非天空区域与边缘区域透射率融合模型

为了弥补暗通道块透射率方法<sup>[10]</sup>存在的伪影问题及暗通道点透射率方法<sup>[16]</sup>存在的过饱和问题,提出了

一种非天空区域暗通道块透射率和边缘区域暗通道点透射率相结合的单尺度透射率融合模型,即

$$\min_{t_{\text{sof}}} \|C \cdot t_{\text{sof}} - t_{\text{pi}}\|_2^2 + \|(1-C) \cdot t_{\text{sof}} - t_{\text{pa}}\|_2^2 + \lambda_l \|1 - t_{\text{sof}}\|_2^2, \quad (8)$$

式中:  $t_{pi}(x)$  为暗通道点透射率;  $t_{pa}(x)$  为暗通道块透射率;  $\lambda_l$  为惩罚项参数,通常取  $10^{-6}$ ;  $C$  为  $t_{pi}(x)$  的权重值(即含雾图像边缘区域对应的透射率);  $t_{sof}(x)$  为所求的单尺度融合透射率。由式(8)可知,在优化过程中:第1项能够让边缘区域内的单尺度融合透射率  $t_{sof}(x)$  靠近暗通道点透射率  $t_{pi}(x)$ ,以此来保留含雾图像的边缘细节信息;第2项能够让非天空区域内的单尺度融合透射率  $t_{sof}(x)$  靠近暗通道块透射率  $t_{pa}(x)$ ,以此来保留含雾图像非天空区域的局部信息。另外,第3项为  $L_2$  正则项,在式(8)的最小化过程中该项可以使单尺度融合透射率  $t_{sof}(x)$  更加接近于 1(即最优的透射率)。对式(8)求导并令结果等于 0,可得

$$t_{\text{sof}}(x) = \frac{C \cdot t_{\text{pi}}(x) + (1-C) \cdot t_{\text{pa}}(x) + \lambda_l}{C^2 + (1-C)^2 + \lambda_l}. \quad (9)$$

需要说明的是,借助文献<sup>[18]</sup>,所提分割方法可以快速便捷地得到权重  $C$ 。另外,由于式(9)中的暗通道块透射率  $t_{pa}(x)$  是仅使用一个尺度矩形窗口得到的,因此  $t_{sof}(x)$  称为单尺度融合透射率。

暗通道点透射率和暗通道块透射率分别用来描述图像边缘区域的细节信息和图像非天空区域的局部信息。因此,融合后的单尺度透射率  $t_{sof}(x)$  能够更好地兼顾图像边缘区域的细节信息和非天空区域的局部信息。由于充分考虑了含雾图像边缘区域的细节信息,因此相对于传统方法<sup>[10]</sup>而言,由式(9)得到的透射率能够更好地体现含雾图像的特征。尤其是当含雾图像的场景比较简单的时候,单尺度融合透射率可以较好地抑制边缘区域的伪影。然而,当含雾图像的场景比较复杂时,单尺度融合透射率的效果则不够理想,容易导致结果图像出现局部细节模糊的问题。这主要是因为单尺度暗通道块透射率并不足以很好地描述图像的局部信息。

为此,在式(5)中选取不同大小的矩形窗口  $\Omega^j(x)$  ( $j = 1, \dots, k$ ) 分别得到不同尺度的块透射率  $t_{pa}^j(x)$ ,然后分别将  $t_{pa}^j(x)$  与  $t_{pi}(x)$  进行融合得到不同尺度的融合透射率  $t_{sof}^j(x)$ ,最后由所有  $t_{sof}^j(x)$  加权得到多尺度融合透射率  $t_{\text{mof}}(x)$ ,即

$$t_{\text{mof}}(x) = \sum_{j=1}^k v^j t_{sof}^j(x), \quad (10)$$

式中:  $v^j$  为权重系数,且满足  $\sum_{j=1}^k v^j = 1$  (权重  $v^j$  由文献<sup>[16]</sup>获得)。需要说明的是,在求取不同尺度的块透射率  $t_{pa}^j(x)$  时,矩形窗口  $\Omega(x)$  的大小选取原则如下:

$$\Omega^j = [2j \cdot \log_{10}(\omega \times h)] - 1, j = 1, 2, \dots, k, \quad (11)$$

式中:  $[\cdot]$  为向下取整函数;  $\omega$  和  $h$  分别为含雾图像的宽

和高;  $\Omega^j$  为第  $j$  个尺度时矩形窗口  $\Omega(x)$  的大小, 通过大量实验发现,  $k$  取 2 时能够得到较好的去雾效果。另外, 为了抑制可能出现的噪声, 采用梯度域引导滤波<sup>[19]</sup>对  $t_{\text{mof}}(x)$  进行平滑处理, 得到平滑处理后的透射率  $R[t_{\text{mof}}(x)]$ 。

为了验证所提暗通道非天空区域与边缘区域透射率融合方法(简称透射率融合方法)的有效性, 图 4 比较了 He 等<sup>[10]</sup>方法和所提透射率融合方法的实验结果。其中图 4(a)为原始含雾图像, 图 4(b)为 He 等<sup>[10]</sup>方法的结果图像, 图 4(c)为所提透射率融合方法的结果图像, 图 4(d)~(f)分别为图 4(a)~(c)矩形框区域的局部放大图。由图 4 可知, 相较于 He 等<sup>[10]</sup>方法, 所提透射率融合方法得到的结果图像整体视觉效果明显更优, 且图像细节信息得到了更好地保持。以图 4 放大

区域为例, 通过对比图 4(e)和图 4(f)可以发现, He 等<sup>[10]</sup>方法所得结果中出现了大量的伪影, 主要原因在于 He 等<sup>[10]</sup>方法对边缘区域透射率估计不准确。而所提透射率融合方法则较好地克服了伪影问题, 在有效去雾的同时较好地保持了图像的细节信息。这主要是因为相比于 He 等<sup>[10]</sup>方法, 所提透射率融合方法结合了暗通道块透射率和暗通道点透射率的优点, 不仅在非天空区域有较好的去雾效果, 而且对边缘区域的细节更丰富。

然而, 所提透射率融合方法在处理天空区域较多的含雾图像时, 容易出现一定程度的色彩失真问题, 这主要是暗通道先验假设不适用于天空区域造成的。为了解决这一问题, 对得到的透射率  $R[t_{\text{mof}}(x)]$  进行进一步的融合处理, 以期获得更好的去雾效果。

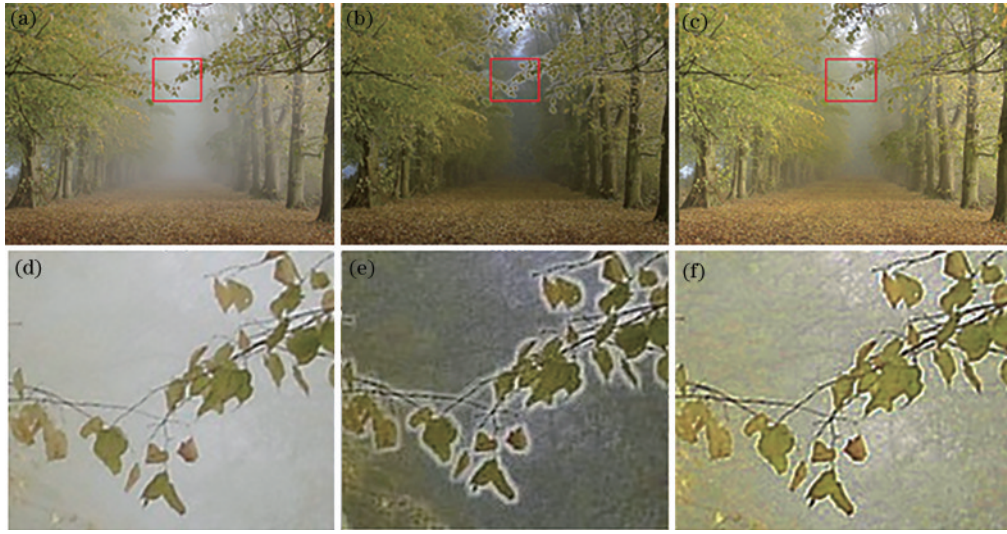


图 4 暗通道去雾比较。(a)原始含雾图像;(b)文献[10]方法;(c)透射率融合方法;(d)图 4(a)的局部放大;(e)图 4(b)的局部放大;(f)图 4(c)的局部放大

Fig. 4 Comparison of fog removal in dark channel. (a) Original foggy image; (b) reference [10] method; (c) transmission fusion method; (d) partial enlargement of Fig. 4 (a); (e) partial enlargement of Fig. 4 (b); (f) partial magnification of Fig. 4 (c)

### 3.2.2 天空区域亮度透射率融合模型

如第 3.1 小节所述, 含雾图像的亮度分布通常与场景深度信息密切相关, 并且可以利用亮度透射率对天空区域的透射率进行估计<sup>[17]</sup>。因此, 为了解决传统方法容易在天空区域出现色彩失真的问题, 结合亮度模型, 设计了一种基于前景区域透射率(即非天空区域和过渡边缘区域)和天空区域透射率的融合模型, 即

$$T(x) = \omega(x)R[t_{\text{mof}}(x)] + [1 - \omega(x)]t_L(x), \quad (12)$$

式中:  $T(x)$  为最终合成透射率;  $R[t_{\text{mof}}(x)]$  是由第 3.2.1 小节得到的透射率估计值(主要用于前景区域的透射率获取);  $t_L(x)$  是由亮度模型式(6)估计的透射率值(主要用于天空区域的透射率获取);  $\omega(x)$  和  $1 - \omega(x)$  分别是透射率  $R[t_{\text{mof}}(x)]$  和  $t_L(x)$  的权重。

一般而言, 在天空区域的暗通道透射率普遍较低, 而前景区域暗通道透射率值相对较高。文献[20]指出

可以利用暗通道透射率  $t_{\text{pa}}(x)$  近似地获得含雾图像在天空区域和前景区域对应的权重[称为透射率权重图  $\omega(x)$ ]。即在透射率权重图中, 透射率接近 0 的区域可视为天空区域, 而透射率接近 1 的区域则视为前景区域。然而, 含雾图像仍然有部分像素的暗通道透射率值并不接近于 0 或 1, 它们的存在可能会影响前景区域和天空区域的判定, 从而造成最后的去雾效果不佳。为此, 引入 Sigmoid 函数来对暗通道透射率  $t_{\text{pa}}(x)$  进行适当调整, 从而得到更加合适的透射率权重图  $\omega(x)$ 。利用 Sigmoid 函数调整权重的公式为

$$\omega(x) = \frac{1}{1 + \exp\{-\theta_1[t_{\text{pa}}(x) - \theta_2]\}}, \quad (13)$$

$$\theta_1 = \frac{20}{\max[t_{\text{pa}}(x)] - \min[t_{\text{pa}}(x)]}, \quad (14)$$

$$\theta_2 = -10 - \theta_1 \min[t_{\text{pa}}(x)]. \quad (15)$$

通过以上方式得到的合成透射率  $T(x)$  能够较好地避免融合透射率  $R[t_{\text{mof}}(x)]$  在天空区域估计的不足而导致天空色彩失真的问题。

为了验证本小节所提天空区域亮度透射率融合方法(简称亮度融合方法)的有效性,图 5 给出了 He 等<sup>[10]</sup>方法、第 3.2.1 节所提透射率融合方法、Zhu 等<sup>[17]</sup>方法及本小节所提亮度融合方法的实验比较。其中图 5(a)为原始含雾图像,图 5(b)~(e)分别为 He 等<sup>[10]</sup>方法、透射率融合方法、Zhu 等<sup>[17]</sup>方法、本小节所提亮度融合方法的结果图像,图 5(f)~(i)分别为图 5(b)~(e)中矩形红框区域的局部放大图。由图 5 可知,相较于 He 等<sup>[10]</sup>方法、透射率融合方法和 Zhu 等<sup>[17]</sup>方法,本小节所提透射率融合方法得到的结果图像整体去雾效果明显更优,且图像天空色彩和细节信息都得到了更好保持。以图 5 红框放大区域为例,对比图 5(f)~(i)可以发现,He 等<sup>[10]</sup>方法结果中在天空

与非天空交接处出现了大量的伪影,并且天空区域存在明显的色彩失真。这主要是因为 He 等<sup>[10]</sup>方法提出的暗通道理论假设并不能很好地适用于边缘区域和天空区域。透射率融合方法则较好地改善了 He 等<sup>[10]</sup>方法的伪影问题,但是在天空区域色彩失真较为严重,这主要是因为该方法使用的透射率融合模型对边缘区域透射率有较好的改进,但未对天空区域透射率进行较好修正。而 Zhu 等<sup>[17]</sup>方法较好地改善了 He 等<sup>[10]</sup>方法和透射率融合方法在天空区域的色彩失真问题,但是该方法同 He 等<sup>[10]</sup>方法一样在天空与非天空交界处出现伪影,这主要是因为该方法只对天空区域透射率估计问题加以改进,而过渡边缘区的透射率估计未充分考虑。相对于上述方法,本小节所提亮度融合方法不仅较好地克服了伪影问题,而且还有效地改善了天空区域色彩失真的问题。这主要是由于本小节所提亮度融合方法结合了透射率融合方法和亮



图 5 亮度融合方法去雾比较。(a)原始含雾图像;(b)文献[10]方法;(c)透射率融合方法;(d)文献[17]方法;(e)亮度融合方法;(f)图 5(b)的局部放大;(g)图 5(c)的局部放大;(h)图 5(d)的局部放大;(i)图 5(e)的局部放大

Fig. 5 Comparison of brightness fusion methods for defogging. (a) Original foggy image; (b) reference [10] method; (c) transmission fusion method; (d) reference [17] method; (e) brightness fusion method; (f) partial enlargement of Fig. 5(b); (g) partial magnification of Fig. 5(c); (h) partial magnification of Fig. 5(d); (i) partial magnification of Fig. 5(e)

度透射率估计方法的优点,不仅在非天空区域有较好的去雾效果,而且在过渡边缘区域的细节和天空区域的色彩更丰富。

### 3.3 大气光估计和图像恢复

在基于大气散射模型的去雾过程中,大气光值为另一个待求参数。传统暗通道方法<sup>[10]</sup>通常采用暗通道图中最大的 0.1% 像素,并将这些像素在含雾图像中对应位置的亮度值作为大气光值。类似的方法被很多学者采用<sup>[11,16]</sup>。虽然该方法在一般情况下能够取得较好的效果,但是当含雾图像包含较为明亮的物体时非常容易出错定位和大气光值偏大等问题,从而对去雾效果产生不利影响。为此,仅在天空区域进行大气光估计,以避免因明亮物体而导致大气光值的误判。具体而言,使用第 3.2.2 小节基于暗通道透射率的分

割方法得到平滑的天空区域,并选择该区域中最亮的 0.1% 像素平均值作为大气光值  $A_L$ 。如此不仅可以避免大气光估计错误定位的问题,而且还能够较好地减小噪声对大气光值估计的干扰。

为了验证本小节所提大气光估计方法的有效性,图 6 展示了部分实验结果。图 6(a)为含雾图像,图 6(b)为使用文献[10]中的大气光值估计方法所得结果图像,图 6(c)为使用所提大气光值估计方法所得结果图像。需要说明的是,为了保证实验的公正性,图 6(b)和图 6(c)均是使用所提透射率估计方法。由图 6 可知,采用 He 等<sup>[10]</sup>方法大气光估计得到的结果图像整体偏暗,天空区域出现了轻微的色彩偏移。相较而言,所提大气光估计方法得到的结果图像其细节保留效果较好,且图像的整体色彩更加自然。



图 6 大气光结果图像比较。(a)含雾图像;(b)文献[10]方法;(c)所提方法

Fig. 6 Image comparison of atmospheric light results. (a) Foggy image; (b) reference [10] method; (c) proposed method

另外,在得到最终的合成透射率  $T(x)$  和改进的大气光值  $A_L$  后,由式(1)大气散射模型可以得到最后的去雾结果图像  $J(x)$ ,即

$$J(x) = \frac{I(x) - A_L}{\max[T(x), t_0]} + A_L, \quad (16)$$

式中:  $t_0$  是一个常数,通常为 0.1,其作用是避免当  $T(x)$  太小时出现  $J(x)$  值偏大而影响图像去雾效果的问题。

## 4 实验结果

为了验证所提方法(区域透射率融合的暗通道图像去雾方法)的有效性,使用了不同类型的含雾图像进行了实验验证,并将所提方法与 He 等<sup>[10]</sup>方法、Zhao 等<sup>[16]</sup>方法、Zhu 等<sup>[17]</sup>方法和 Zhu 等<sup>[15]</sup>方法进行了比较。实验平台为 MATLAB R2019a,使用的硬件为 Intel Core i5-7300 HQ、2.5 GHz CPU、8 GB 内存。

### 4.1 视觉效果比较

为了验证不同方法对含雾图像细节信息的保持能力,图 7 采用富含大量细节信息且具有不同雾气浓度的含雾图像进行了实验比较。图 7(a)为含雾图像,图 7(b)~(f)分别为 He 等<sup>[10]</sup>方法、Zhao 等<sup>[16]</sup>方法、Zhu 等<sup>[17]</sup>方法、Zhu 等<sup>[15]</sup>方法及所提方法的去雾结果图像。由图 7(b)~(f)可以看出:文献[10]所得结果图像整体亮度偏弱,并且在部分物体的边缘出现了明显的伪影(Image 1~Image 3);文献[16]方法虽然有效抑制了伪影问题,但是与原始含雾图像相比,该方法所得结

果图像出现了明显的色彩偏离(Image 2、Image 3);文献[17]方法所得结果图像整体偏暗(Image 2、Image 3),而且细节信息出现了严重丢失(Image 1~Image 3);文献[15]方法所得结果图像同样出现了细节信息严重丢失的问题(Image 1~Image 3);相对而言,所提方法所得结果图像的整体色彩与原始含雾图像更加接近,并且细节信息得到了较好保持。

另外,为了验证不同方法的整体去雾效果和对天空区域的色彩保持能力,采用富含天空区域且具有不同雾气浓度的含雾图像进行了实验对比。图 8(a)为含雾图像,图 8(b)~(f)分别为 He 等<sup>[10]</sup>方法、Zhao 等<sup>[16]</sup>方法、Zhu 等<sup>[17]</sup>方法、Zhu 等<sup>[15]</sup>方法及所提方法的结果图像。由图 8(b)~(f)可知:文献[10]方法所得结果图像整体色彩偏暗,并且还存在着去雾效果不佳(Image 3、Image 5)和天空区域色彩保持能力不足(Image 1~Image 5)的问题;文献[16]方法所得结果图像虽然去雾效果相对较好,但是其整体色彩与原始含雾图像偏离较大,尤其是天空区域出现了严重的色彩失真问题(Image 1~Image 5);文献[17]方法所得结果图像虽然对天空色彩失真的问题有所改善,但是该方法还存在着物体边缘伪影(Image 1、Image 2 中的矩形区域)和去雾效果不佳(Image 3、Image 5)的问题;文献[15]所得结果图像整体去雾性能较好,但是在天空区域仍然存在色彩失真(Image 5)及细节信息丢失(Image 1~Image 4 矩形区域)等问题;相对而言,所提方法在不同雾气浓度下,不但去雾效果明显更好,而且天空色彩得到了有效地保持,其整体效果最优。



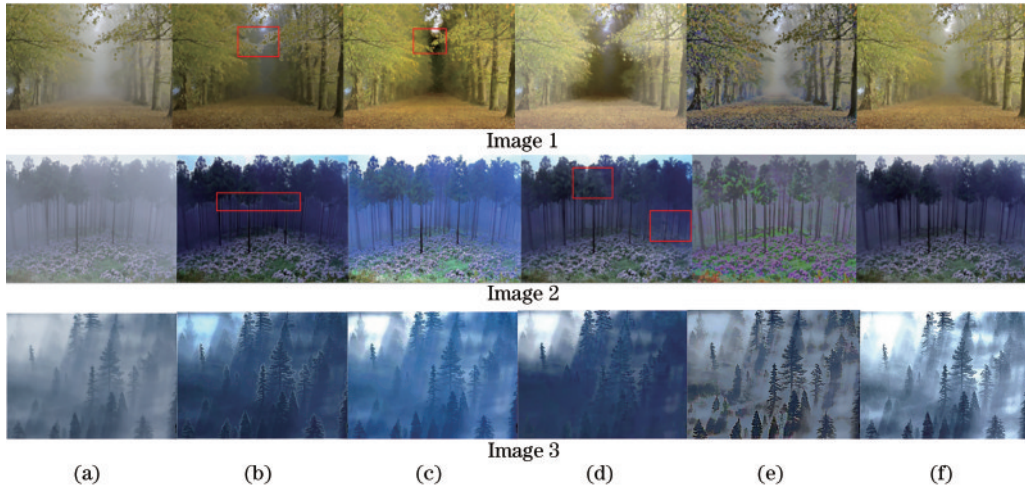


图 7 细节保持能力比较。(a)含雾图像;(b)文献[10]方法;(c)文献[16]方法;(d)文献[17]方法;(e)文献[15]方法;(f)所提方法  
Fig. 7 Comparison of detail retention ability. (a) Foggy images;(b) reference [10] method; (c) reference [16] method; (d) reference [17] method; (e) reference [15] method; (f) proposed method

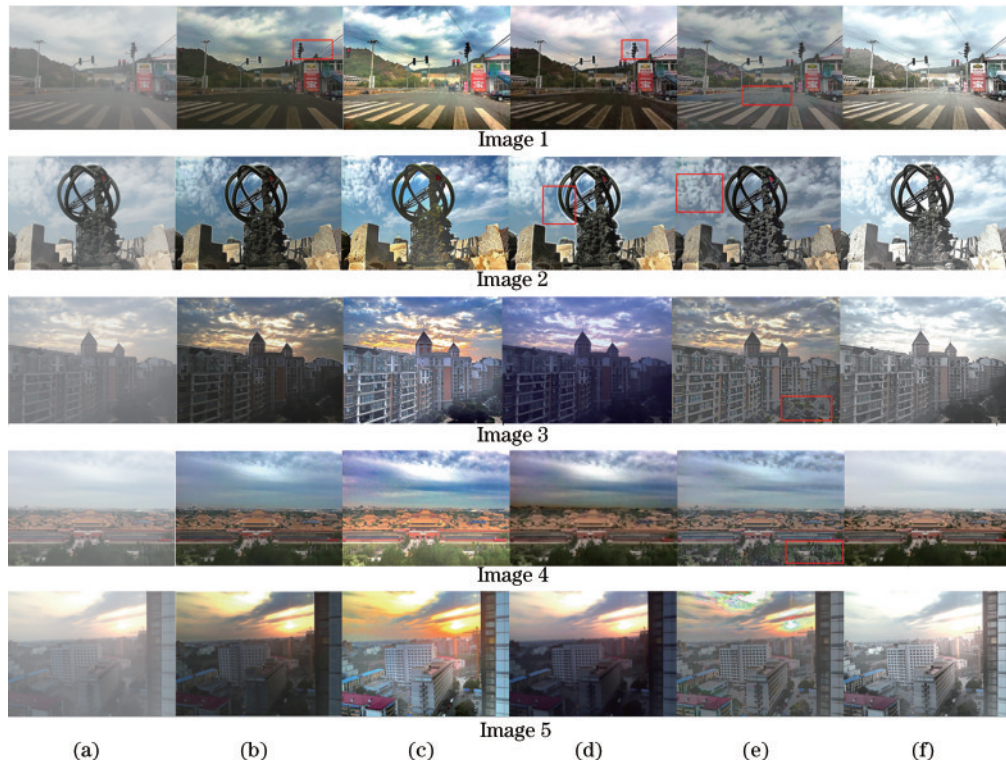


图 8 整体去雾效果和天空色彩保持能力比较。(a)含雾图像;(b)文献[10]方法;(c)文献[16]方法;(d)文献[17]方法;(e)文献[15]方法;(f)所提方法  
Fig. 8 Comparison of fog removal effect and sky color retention ability. (a) Foggy images; (b) reference [10] method; (c) reference [16] method; (d) reference [17] method; (e) reference [15] method; (f) proposed method

#### 4.2 客观分析

为了更加全面地评价不同方法的去雾效果,进一步采用了去雾领域常用的客观评价指标如峰值信噪比(PSNR)、结构相似度(SSIM)和平均梯度( $r$ )对不同方法的结果图像进行了评价。一般而言,PSNR、SSIM和 $r$ 主要从图像质量、结构保持能力和细节保持能力来对去雾方法进行评价,它们的具体计算公式为

$$R_{\text{PSNR}} = 10 \log_{10} \frac{\max_{\substack{1 \leq i \leq w \\ 1 \leq j \leq h}} |I_{ij}|^2}{\frac{1}{wh} \sum_{i=1}^w \sum_{j=1}^h [I_{ij} - J_{ij}]^2}, \quad (17)$$

$$R_{\text{SSIM}} = \frac{(2\mu_I \mu_J + C_1)(2\sigma_{IJ} + C_2)}{(\mu_I^2 + \mu_J^2 + C_1)(\sigma_I^2 + \sigma_J^2 + C_2)}, \quad (18)$$

$$r = \frac{1}{\sqrt{2} wh} \sum_{x=1}^w \sum_{y=1}^h \sqrt{(J_x)^2 + (J_y)^2}, \quad (19)$$

式中:  $I$  与  $J$  分别为含雾图像和结果图像;  $\mu_I$  和  $\mu_J$  分别为  $I$  与  $J$  的均值;  $\sigma_I$  和  $\sigma_J$  分别为  $I$  与  $J$  的标准差;  $\sigma_{IJ}$  为  $I$  与  $J$  的协方差;  $C_1$  和  $C_2$  为常数, 通常取  $C_1 = 0.001$ 、 $C_2 = 0.002$ ;  $J_x$  为结果图像水平方向的梯度;  $J_y$  为结果图像垂直方向的梯度。表 1~3 给出了图 8 和图 9 实验中不同方法的 PSNR、SSIM 和  $r$  值。由表 1~3 可以看出,

相对于 He 等<sup>[10]</sup>方法、Zhao 等<sup>[16]</sup>方法、Zhu 等<sup>[17]</sup>方法和 Zhu 等<sup>[15]</sup>方法, 所提方法在 PSNR、SSIM 和  $r$  等方面都取得了较好的效果。表 1~3 结果进一步验证了所提方法的有效性。表 4 为运行时间对比, 结果表明几种经典的方法均都比较耗时, 而所提方法耗时相对较少。综合考虑, 所提方法具有一定的优越性。

表 1 不同方法的 PSNR 比较结果

Table 1 Comparison results of PSNR of different methods

unit: dB

Foggy image	He et al <sup>[10]</sup>	Zhao et al <sup>[16]</sup>	Zhu et al <sup>[17]</sup>	Zhu et al <sup>[15]</sup>	Proposed method
7(Image 1)	15.173	14.598	12.649	19.109	19.646
7(Image 2)	13.097	18.386	12.751	17.301	18.825
7(Image 3)	11.471	18.393	13.847	18.168	18.416
8(Image 1)	11.798	15.811	11.892	15.242	16.812
8(Image 2)	12.689	17.065	16.412	14.042	18.102
8(Image 3)	9.978	14.363	10.329	15.324	19.032
8(Image 4)	11.360	15.217	13.217	13.238	18.958
8(Image 5)	9.792	16.184	9.270	14.880	18.230

表 2 不同方法的 SSIM 比较结果

Table 2 Comparison results of SSIM of different methods

Foggy image	He et al <sup>[10]</sup>	Zhao et al <sup>[16]</sup>	Zhu et al <sup>[17]</sup>	Zhu et al <sup>[15]</sup>	Proposed method
7(Image 1)	0.689	0.651	0.722	0.710	0.885
7(Image 2)	0.654	0.659	0.723	0.768	0.795
7(Image 3)	0.646	0.773	0.701	0.674	0.794
8(Image 1)	0.688	0.540	0.607	0.688	0.705
8(Image 2)	0.704	0.717	0.754	0.742	0.797
8(Image 3)	0.591	0.424	0.629	0.806	0.874
8(Image 4)	0.621	0.702	0.803	0.815	0.856
8(Image 5)	0.675	0.639	0.612	0.740	0.824

表 3 不同方法的  $r$  比较结果

Table 3 Comparison results of  $r$  of different methods

Foggy image	He et al <sup>[10]</sup>	Zhao et al <sup>[16]</sup>	Zhu et al <sup>[17]</sup>	Zhu et al <sup>[15]</sup>	Proposed method
7(Image 1)	10.861	14.498	9.480	14.804	15.629
7(Image 2)	12.116	18.983	10.882	8.575	19.906
7(Image 3)	4.175	4.951	3.550	4.359	6.847
8(Image 1)	5.265	9.434	5.633	4.380	10.279
8(Image 2)	8.813	9.936	8.914	9.139	10.946
8(Image 3)	5.733	6.855	4.218	5.126	7.321
8(Image 4)	6.175	9.717	6.385	6.027	11.787
8(Image 5)	4.159	7.147	3.798	3.883	8.662

表 4 不同方法的运行时间比较结果

Table 4 Comparison results of running time of different methods

Foggy image	He et al <sup>[10]</sup>	Zhao et al <sup>[16]</sup>	Zhu et al <sup>[17]</sup>	Zhu et al <sup>[15]</sup>	Proposed method
7(Image 1)	1.089	0.867	0.759	1.301	0.701
7(Image 2)	0.356	0.357	0.436	0.334	0.232
7(Image 3)	0.210	0.272	0.271	0.217	0.213
8(Image 1)	0.346	0.211	0.136	0.332	0.153
8(Image 2)	0.751	0.227	0.863	0.592	0.188
8(Image 3)	0.216	0.215	0.205	0.308	0.156
8(Image 4)	0.345	0.212	0.363	0.284	0.098
8(Image 5)	0.330	0.239	0.292	0.460	0.214

## 5 结 论

针对传统方法在边缘区域和天空区域透射率估计不足及容易出现伪影和色彩偏离的问题,提出了一种基于区域透射率融合的去雾新方法。该方法通过暗通道块透射率和点透射率进行多尺度融合来修正由暗通道块透射率在边缘区域估计不足带来的伪影问题。其次,在暗通道融合透射率的基础上引入亮度模型对天空区域透射率进行修正,以让结果图像更好地保持天空区域的色彩。实验结果表明,相对于传统方法,所提方法具有更好的边缘细节和色彩信息保持能力,所得结果图像更加清晰自然。近年来,由于具有良好的特征提取能力和较高的可移植性等优点,深度学习技术被应用于去雾领域。然而,此类方法往往具有网络结构较为复杂、样本数据集较大和运行时间较长等缺点。因此,如何结合深度学习技术设计出结构简单、效率更高的去雾方法将是以后工作的重点。

### 参 考 文 献

- [1] Han Y, Xu C, Baciú G, et al. Cartoon and texture decomposition-based color transfer for fabric images[J]. *IEEE Transactions on Multimedia*, 2017, 19(1): 80-92.
- [2] Mao D, Zheng Y, Zeng C, et al. Generation of polarization and phase singular beams in fibers and fiber lasers[J]. *Advanced Photonics*, 2021, 3(1): 014002.
- [3] Park J, Brady D J, Zheng G A, et al. Review of bio-optical imaging systems with a high space-bandwidth product[J]. *Advanced Photonics*, 2021, 3(4): 044001.
- [4] Duan Y, Zhang X W, Ding Y M, et al. Single-cavity bi-color laser enabled by optical anti-parity-time symmetry [J]. *Photonics Research*, 2021, 9(7): 1280-1288.
- [5] Kim T K, Paik J K, Kang B S. Contrast enhancement system using spatially adaptive histogram equalization with temporal filtering[J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 1998, 44(1): 82-87.
- [6] Seow M J, Asari V K. Ratio rule and homomorphic filter for enhancement of digital colour image[J]. *Neurocomputing*, 2006, 69(7/8/9): 954-958.
- [7] Russo F. An image enhancement technique combining sharpening and noise reduction[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2002, 51(4): 824-828.
- [8] Cantor A. Optics of the atmosphere: scattering by molecules and particles[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1978, 14(9): 698-699.
- [9] Fattal R. Single image dehazing[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2008, 27(3): 1-9.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 刘宇航, 吴帅. 基于多尺度融合和对抗训练的图像去雾算法[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(6): 061015.
- [15] Liu Y H, Wu S. Image dehazing algorithm based on multi-scale fusion and adversarial training[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(6): 061015.
- [16] Zhu Z Q, Wei H Y, Hu G, et al. A novel fast single image dehazing algorithm based on artificial multiexposure image fusion[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2021, 70: 1-23.
- [17] Zhao D, Xu L, Yan Y H, et al. Multi-scale Optimal Fusion model for single image dehazing[J]. *Signal Processing: Image Communication*, 2019, 74: 253-265.
- [18] 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.
- [19] Tang K T, Yang J C, Wang J. Investigating haze-relevant features in a learning framework for image dehazing[C]//2014 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, June 23-28, 2014, Columbus, OH, USA. New York: IEEE Press, 2014: 2995-3002.
- [20] Kou F, Chen W H, Wen C Y, et al. Gradient domain guided image filtering[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2015, 24(11): 4528-4539.
- [21] Hu X J, Wang J, Zhang C L, et al. Deep learning-enabled variational optimization method for image dehazing in maritime intelligent transportation systems[J]. *Journal of Advanced Transportation*, 2021, 2021: 6658763.