

夜间图像去雾算法研究现状与展望

刘霞^{1,2}, 侯昌伦^{1,2*}

¹杭州电子科技大学电子信息学院, 浙江 杭州 310018;

²杭州电子科技大学碳中和新能源光电研究院, 浙江 杭州 310018

摘要 夜间图像去雾技术已经成为图像处理技术领域的重要研究内容,在目标跟踪探测、视频监控、遥感等方面有着重要的意义。夜间有雾图像通常具有对比度低、光照不均匀、颜色偏移等特点,这些特点使得夜间图像去雾面临着极大的挑战。通过调研近年来夜间图像去雾算法的国内外研究现状,从物理模型、非物理模型和深度学习的角度对其中比较经典的算法进行了归纳总结,详细阐述了算法的流程以及优缺点。最后,对夜间去雾算法的未来研究方向进行了展望。

关键词 图像去雾; 深度学习; 大气散射模型; 物理模型; 非物理模型

中图分类号 TP751.1

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP230991

Research Status and Prospect of Night Image Dehazing Algorithm

Liu Xia^{1,2}, Hou Changlun^{1,2*}

¹School of Electronics and Information, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, Zhejiang, China;

²Institute of Carbon Neutrality and New Energy, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, Zhejiang, China

Abstract Night image dehazing technology has become an important research content in the field of image processing technology. It has important significance for target tracking detection, video surveillance, remote sensing and so on. Haze images at night usually have the characteristics of low contrast, uneven illumination, color offset, etc., which makes haze removal for night images face great challenges. Through summarizing the research status of night image de-fogging algorithms at home and abroad in recent years, the classical algorithms from the perspective of the physical model, non-physical model and deep learning are summarized, and the algorithm process, advantages and disadvantages are elaborated. Finally, the future research direction of the night fog removal algorithm is prospected.

Key words image dehazing; deep learning; atmospheric scattering model; physical model; non-physical model

1 引言

随着计算机视觉的飞速发展,恶劣天气下的图像处理已经成为该领域重要的研究方向。在雾、霾等天气条件下,大气介质中存在大量的气溶胶粒子,在此环境中拍摄的图像由于受到气溶胶粒子的吸收和散射作用会产生对比度下降、颜色失真等退化现象。尤其在夜间捕获的图像,不仅会受到弱光的影响,还会受到诸如辉光、眩光、泛光灯等人造光效应的影响。人工光源发出的光经过飘浮在空中的颗粒或水滴散射,不仅会造成图像细节丢失、颜色偏移等现象,还会导致光源周围产生光晕现象。因此,夜间图像去雾的研究面临着巨大的挑战,是图像去雾技术研究的难点。

随着对有雾图像以及去雾算法的深入研究,出现了许多针对白天有雾图像的去雾算法:直方图均衡化去雾算法、Retinex 去雾算法、暗通道先验(DCP)去雾算法、基于卷积神经网络(CNN)的去雾算法以及基于这些算法的改进算法^[1-7]等。

早期也出现了一些针对低照度图像处理的研究^[8],以上这些算法对白天有雾图像以及低照度图像都有不同程度的去雾效果,但是如果直接将这些方法用于夜间有雾图像,则去雾效果不明显。本文从物理模型、非物理模型和深度学习的角度^[9]对已有算法进行归纳总结。基于物理模型的去雾算法本质上就是基于大气散射模型,根据已知的有雾图像估计有关的未知参数进而获取无雾图像。有些算法是在大气散射模

收稿日期: 2023-03-30; 修回日期: 2023-04-11; 录用日期: 2023-04-27; 网络首发日期: 2023-05-07

通信作者: hou_cl@hdu.edu.cn

型基础上进行预处理,还有部分算法是在该模型基础上建立适用于夜间去雾的新模型,然后得到复原后的图像。基于非物理模型的去雾算法通过增强图像细节使图像更加清晰,它可以提升图像对比度,获得更多细节。具体算法包括:直方图均衡化、Retinex 算法、同态滤波算法等。基于深度学习的去雾算法根据有雾图像先验知识建立一个学习模型,然后利用神经网络强大的学习能力去估计其中的一些重要参数,进而获得清晰的复原图像。近几年,随着人工智能时代的到来,出现了越来越多的深度学习模型,这些模型已经被广泛应用于图像去雾领域,然而,与传统算法相比,深度学习严重依赖数据,白天雾霾图像的合成相对容易,而夜间雾霾图像的合成质量很差,因此基于深度学习的夜间去雾算法较少。本文在此分类基础上对近 10 年夜间去雾技术的相关研究进行归纳和总结,详细阐述了现有方法的优势和不足,并对未来的研究方向进行了展望。

2 基于物理成像模型的去雾算法

2.1 夜间有雾图像成像模型

大气散射模型由 McCartney 提出,之后又由 Narasimhan 等^[10]进行了进一步总结,如图 1 所示。其数学表达形式为

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

式中: $I(x)$ 为有雾图像; $J(x)$ 为复原图像; A 为大气光; $t(x)$ 为透射率函数; x 为像素的坐标。大气散射模型主要适用于以阳光为主要光源的白天有雾场景,此时的大气光值为常量。由于夜间有雾场景中的光照条件比较复杂,光线主要由人工光源提供,夜间的环境光是在空间变化的大气光 $A(x)$,根据上述分析,夜间有雾图像的形成可以表示为

$$I(x) = J(x)t(x) + A(x)[1 - t(x)]. \quad (2)$$

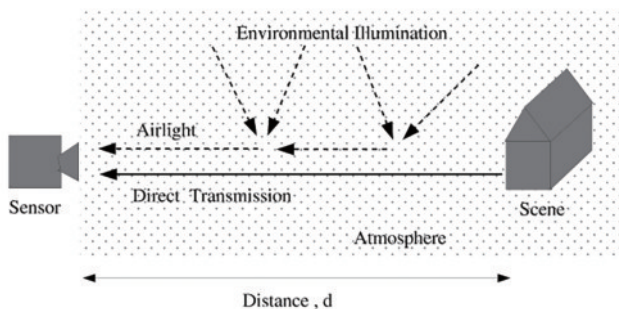


图 1 有雾条件下的大气散射模型^[10]

Fig. 1 Atmospheric scattering model with fog^[10]

2.2 基于 DCP 的夜间图像去雾算法

He 等^[7]提出的 DCP 理论是对无雾图像的一种统计。DCP 理论指出,在无雾环境下,大多数非天空局部区域中会存在一些至少有一个颜色通道的亮度值非

常低的像素点,其最小强度值几乎等同于 0。对于任意图像 J ,其暗通道 J_{DCP} 可描述为

$$J_{DCP}(x) = \min_{y \in \Omega(x)} \left[\min_{c \in \{r, g, b\}} J_c(y) \right] \rightarrow 0, \quad (3)$$

式中: c 为图像的颜色通道; r, g, b 分别为红、绿、蓝颜色通道; J_c 为 J 的一个颜色通道; $\Omega(x)$ 为以 x 像素点为中心的局部区域; y 为 $\Omega(x)$ 内的任一像素点。除了天空区域外, J_{DCP} 的强度值很低且趋于 0,根据 DCP 理论以及大气光值可以得到透射率的预估值。

基于 DCP 理论的算法是目前发展最快、最常用的去雾方法,在此基础上,出现了一系列针对夜间有雾图像的改进算法。夜间有雾图像可能会出现局部亮度过低以及颜色失真等现象,针对该现象 Pei 等^[11]根据 Reinhard 等^[12]提出的颜色转移方法对输入的图像进行颜色校正,然后通过改进的 DCP 方法和双边滤波器(BFLCC)^[13]对输出图像进一步处理,该算法可以获得图像的细节,但容易产生颜色失真现象。而 Zhang 等^[14]则是根据 Elad 等^[15]的方法(使用引导滤波器代替双边滤波器^[16])对入射光进行光补偿并对其颜色特性进行颜色校正,该方法具有良好的色彩再现能力,但是没有考虑入射光的衰减可能会导致复原图像出现光晕明显,颜色失真等问题。针对图像中存在的光晕问题, Li 等^[17]通过添加大气点扩散函数(PSF)^[18]对光晕进行模拟,利用 Li 等^[19]提出的相对平滑约束层次分解法去除有雾图像中的光晕项,该方法能有效地去除光晕,但输出图像容易出现局部区域过增强。Zhang 等^[20]使用伽马校正对估计大气光后的图像进行整体亮度的增强并对其进行颜色校正,实现颜色平衡。该算法能够实现光照平衡,但某些区域缺乏颜色信息,导致最终去雾结果颜色失真。受大气照明先验(AIP)^[21]的启发, Wang 等^[22]提出了一种新的去雾先验条件即灰色雾线先验(GHLP)。该先验条件证明,雾集中在 RGB 颜色空间中的雾线(即灰色分量)上,与颜色分量的相关性较小。该方法通过去除颜色分量中的辉光并增强灰色分量中的辉光达到颜色校正的效果,相比较之前的颜色校正,该方法可以防止去雾过程中的颜色和噪声伪影,具有良好的去雾效果,获得的图像质量更高。

分析以上几种基于 DCP 理论的去雾方法可以看出,该类方法对夜间有雾图像都有明显的去雾效果,但是复原后的图像会出现颜色失真等现象。虽然在去雾之前都对图像进行了颜色校正或者光晕的去除处理,但是都未能很好地得到颜色信息特征。除此之外,针对大气光值的估计,这些方法没有给出合适的解决方法,可能会导致图像某些局部区域过增强,影响图像质量。由此可见,针对某个参数估计方法的改进并不能满足去雾算法的需求,需要多方面的考虑,同步进行改进才能达到更好的去雾效果。

2.3 基于改进的 DCP 夜间图像去雾算法

图像去雾的关键是估计大气光值和透射率,现有的估计透射率的方法都是通过 DCP 进行的,而针对大气光值的估计出现了许多不同的方法。Zhang 等^[23]提出了最大反射先验,可以直接估计大气光值并计算出透射率的估计值。使用引导滤波器^[24]对其进行优化,就可以得到复原图像,该算法颜色校正的效果很好,但不适用于对象颜色唯一的场景。杨爱萍等^[25-26]提出通过低通滤波对环境光进行估计,但是他们对传输率的估计以及颜色校正采用了不同的方法:2018 年通过 DCP 理论估计传输率并对其进行引导滤波优化,最后通过直方图进行颜色校正^[25];同年通过构建多特征联合优化函数对透射率进行估计,最后采用 Shade of Gray^[27]算法对颜色进行校正^[26]。Yang 等^[28]将光晕去除后利用基于 SLIC 的超像素分割方法^[29]对无光晕有雾图像进行分割,使用加权引导图像过滤器(WGIF)对每个超级像素中最亮的像素值进行细化得到大气光值,透射率也通过基于超像素的方法来估计。该方法可以更准确地估计相机附近白色物体中所有像素的透射图,但算法的运行时间相对较慢。Hong 等^[30]使用白斑假设估计大气光颜色^[31],对有雾图像进行颜色效果去除后估计大气光值,然后使用图像块的结构信息来确定每个像素中的透射率,并设置透射值的候选,最后基于每个图像像素候选的加权求和来获得最终透射值。

通过对以上方法的分析可以看出,大气光值和透射率估计方法的改进对于图像的去雾起到了更好的效果,现有方法不再局限于对整个图像进行处理,而是通过图像分割^[32]、图像分解等方法对局部区域分别进行处理,并将颜色校正放在图像去雾后进行。但随着处理过程的增加,算法的运行时间也会随之增加,对图像的实时处理效果不太理想。

2.4 基于 DCP 和 Retinex 理论的夜间图像去雾算法

随着图像处理技术的发展,Retinex 理论^[33]也被应用于图像去雾。杨爱萍等^[34]和徐兴贵等^[35]都是基于 Retinex 理论和 DCP 理论进行去雾的,不同的是前者基于 Retinex 理论将图像分解为入射光图像和反射光图像,然后利用 DCP 和相机成像机理分别对入射光图像和反射光图像进行透射率的估计;而后者直接通过 DCP 理论估计透射率,然后根据有雾图像的透射率映射得到的环绕函数求取大气光值,最后基于 Retinex 原理对图像进行去雾处理。Pei 等^[36]基于 Retinex 理论以及自适应 DCP 方法^[37]得到优化后的传输透射率进而得到复原后的图像,该算法能提高光线较亮区域的可见度,但得到的复原图像光晕明显、去雾不彻底。Yu 等^[38]分析 Retinex 可以增强图像的对比度和图像的细节信息,大气散射模型可以描述有雾图像的成像原理,从根本上恢复无雾图像,故可以将这两个模型合并为一个模型进行图像去雾。该方法可以增强图像的对比度,

恢复原始图像中的局部细节信息,使其更加清晰自然。

使用大气散射模型去雾后的图像会出现对比度低以及细节信息严重丢失等问题,但基于 Retinex 和 DCP 理论去雾的方法,不仅可以得到复原后的图像,同时可以增加图像的对比度。但这些方法没有考虑到夜间有雾图像的成像特点,可能会使得复原图像出现颜色失真、光晕明显等现象,影响图像的去雾效果。

2.5 其他夜间图像去雾算法

图像融合方法将多源信道采集到的关于同一目标的图像数据经过一系列的图像处理,最大限度地提取图像中的有用信息,最后形成高质量图片。近几年,图像融合技术的发展十分迅速,对有雾图像的复原也做出了重大贡献。Ancuti 等^[39-40]将这种技术应用到夜间去雾:2016 年通过导出局部对比度、饱和度、显著性权重图以确保在融合过程中强调高对比度或高显著性区域;2020 年通过 Koschmieder^[41]提出的反转简化的光透射模型来消除雾霾对图像的影响。这些算法较前述算法,计算效率和输出图像质量都有显著的提升,但是没有考虑到夜间有雾图像的光源问题,导致复原后的图像出现颜色失真、光晕等现象。

夜间有雾图像由于光照的不均匀会出现亮度不同的区域,基于此现象,可以将图像分为光源区域和非光源区域,对这些区域分别进行处理可以达到更好的去雾效果。Yu 等^[42]和 Tan 等^[43]都是基于此方法对图像进行处理的,前者只针对透射率的估计进行了分区域的处理,而后者则是分别估计光源区域和非光源区域的透射率和大气光值。这些算法在保持光源区域的边缘方面显示出优势,但都不适合复杂的夜间场景。吕建威等^[44]提出了基于通道差异的光源阈值分割方法,该方法在一定程度上提高了大气光的估计精度。

以上方法并没有明确如何处理天空区域图像, Yang 等^[45]提出基于 Retinex 理论实现颜色一致性,使用有效的 ADMM^[46]求解以及基于梯度图的新方法检测天空区域,利用双模亮度模型来估计透射率并利用变分正则化模型对其进行细化,该算法可以有效地保留细节,并减少生成的图像中的光晕伪影和噪声。

2.6 研究现状分析

基于物理模型的去雾算法是基于相机成像原理以及大气散射模型,通过已有的先验知识对有雾图像进行去雾处理。夜间有雾图像通常具有对比度低、光照不均匀、颜色偏移等特点,基于这些特点,研究者在 DCP 理论的基础上提出了改进方法,包括大气光值的估计方法、光源与非光源区域的分割方法、图像的颜色校正方法、复原图像对比度增强的方法以及大气光值和透射率的细化方法,这些方法都有一定程度的去雾效果,但是不同的去雾算法都有不同的适用场景。基于对以上去雾算法的分析,可以看出用多种去雾方法结合的改进算法进行图像去雾的效果更好,但是同时也会出现新的问题,算法的复杂度增加,实时性就会变差。

3 基于非物理成像模型的去雾算法

基于非物理模型的去雾方法不分析降低图像质量的物理成因,而是通过图像的增强达到视觉上图像质量的改善。图像可以看成是若干部分的线性组合,基于线性分解模型^[47],可以将图像分解为结构层、细节层、噪声层、辉光层等 4 部分。Liu 等^[48]去除辉光层后,通过反转物理模型来恢复结构层,并以多尺度梯度增强方式显示细节层,然后将去雾的结构层和增强的细节层集成到无雾图像中。该方法得到的复原图像具有更少的噪声和更多的细节,但是图像整体偏暗。

同态滤波可以解决光照不均匀导致的图像对比度低、颜色失真等问题。程鸿等^[49]利用传递函数为高斯低通滤波函数的同态滤波对图像进行处理。由于夜间图像整体偏暗,利用 Matlab 自带的限制对比度自适应直方图均衡(CLAHE)算法可以获得更多的图像细节。最后,利用白平衡算法对去雾后的图像进行颜色校正,该算法利用数学的方法提升图像的视觉效果,但没有很好地抑制光晕。

基于非物理模型的去雾算法本质上都是基于图像

增强进行的,现有的基于非物理模型的去雾算法较少,但是基于 Retinex 和 DCP 理论相结合的去雾算法展现出了比较好的去雾效果,证明多种去雾方法结合,其效果是优于单独去雾方法的,其场景适用性也更强。

4 基于深度学习的去雾算法

早期基于深度学习的图像去雾算法,都是基于 CNN 对有雾图像的透射率进行估计,然后根据大气散射模型恢复无雾图像。现有的基于深度学习的夜间去雾算法比较少,故对早期几种算法进行详细的描述。

夜间图像存在不同颜色且分布不均匀的可见光源,这些光源会在夜间场景中产生明显的光晕。为解决这一问题,Kuanar 等^[50]提出了一种基于深度学习的去雾-去光晕迭代体系结构(图 2),该结构分为两部分:一部分基于 CNN 的去光晕模型,通过扩展卷积提取特征,能够显著地消除辉光效应;另一部分是一个单独的去雾网络,该网络包含了一个基于语境扩展框架^[51]的递归结构,可以从透射率中估计环境光,从而得到复原图像。该算法很好地去除了夜间图像的光晕效果,但得到的复原图像偏暗。

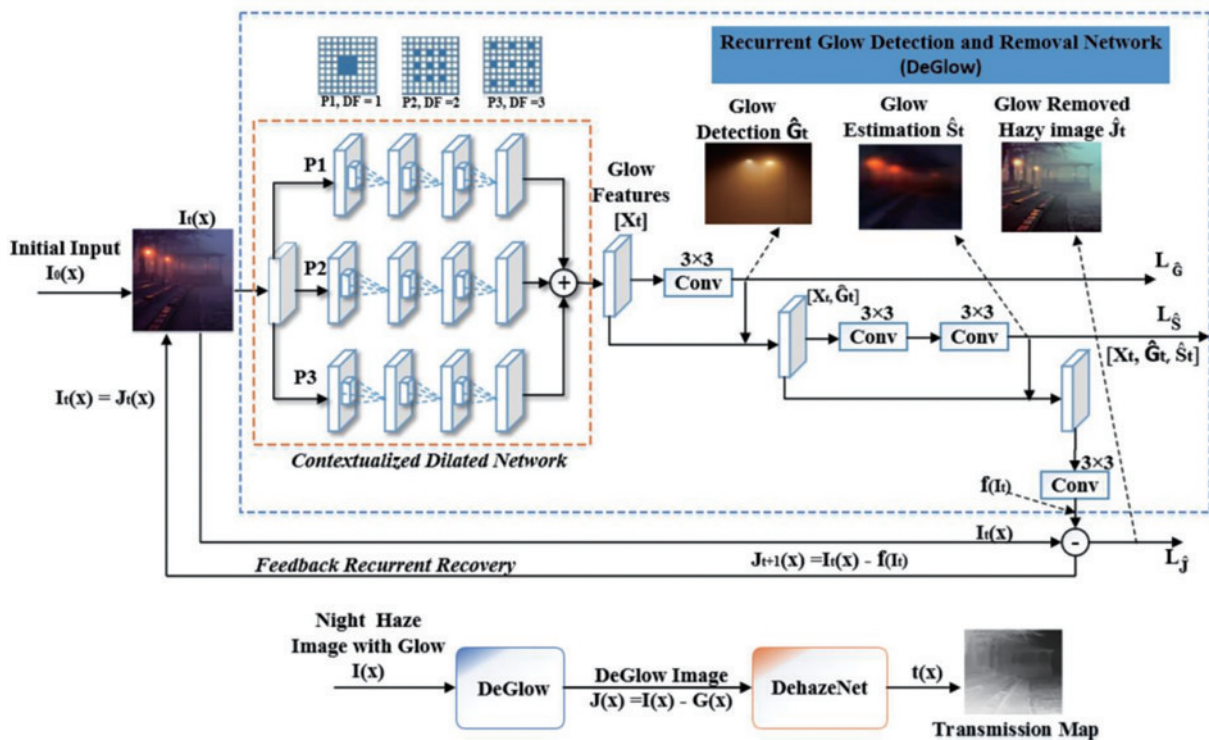


图 2 DeHaze-DeGlow 网络结构^[50]
Fig. 2 DeHaze-DeGlow network structure^[50]

CNN 强大的表达和泛化能力依赖于大规模的训练数据集,现有的数据集可以在真实的日间有雾图像中获得相对满意的去雾结果,然而,由于光照差异,用于白天数据训练的模型不能很好地应用到夜间去雾,缺乏夜间有雾图像的大规模训练数据集是阻碍神经网络模型达到满意去雾效果的主要原因之一。Tang

等^[52]提出了一种新的方法合成夜间交通环境去雾数据集 NTHAZE 以及基于数据集的端到端的夜间去雾网络 NDPC-Net,它避免了逆重建中应用大气散射模型来求解的病态问题。夜间去雾网络 NDPC-Net(图 3)包括一个嵌套数字显示单元(DDU)网络块和一个金字塔卷积块。前者提取不同复杂度的有雾图像特征,

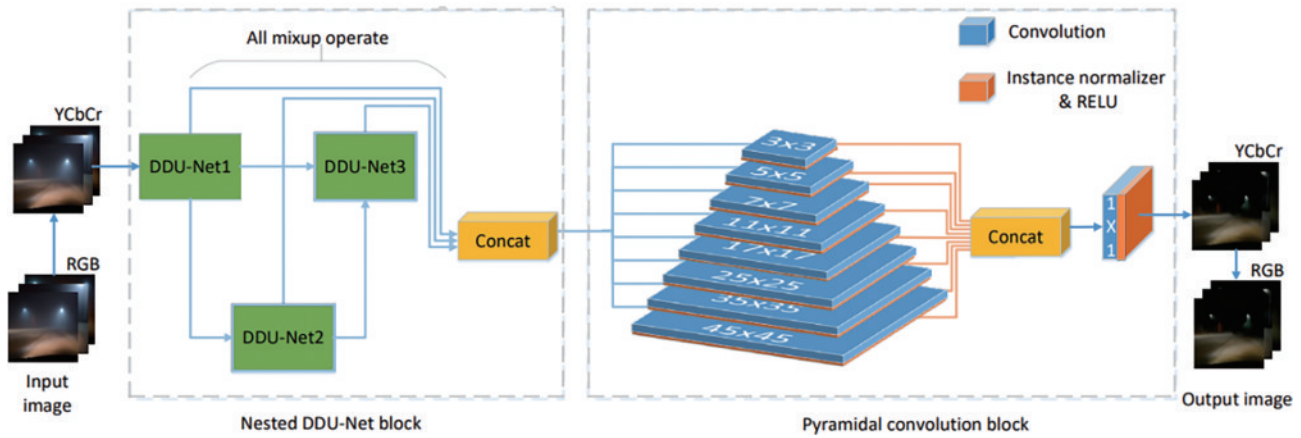


图 3 NDPC-Net 结构^[52]

Fig. 3 NDPC-Net structure^[52]

后者保留和恢复不同尺度的空间特征。数据集的合成是针对夜间交通环境问题的,这就导致其应用的局限性。该算法可以有效去除光晕的影响,使整个图像的颜色都比较自然。

现有的夜间除雾方法使用先验知识,恢复真实场景的稳定性不高,无法获得高质量的无雾图像,为此, Yang 等^[53]提出了一种弱监督图像转换方法,结合雾霾天气的成像机制与生成式对抗网络(GAN),利用半监督训练方法构建深度学习夜间图像恢复框架,实现从雾霾域到清晰域的图像转换。总体网络结构框架如图 4 所示。

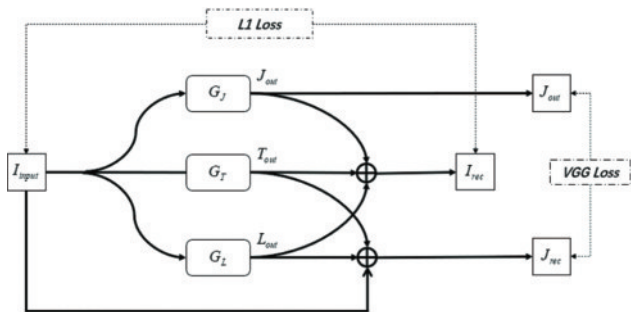


图 4 NightDNet 结构^[53]

Fig. 4 NightDNet structure^[53]

框架的主要结构是一种解耦融合结构,输入的有雾图像通过特定的 GAN,生成了无雾图像、透射图和大气光,然后利用大气散射模型,对特定部位进行融合分裂,恢复图像缺陷。该方法没有合成有雾图像,而是直接使用公开的、真实的夜间户外图像进行除雾。该网络框架基于深度学习,结合夜间大气成像模型,采用半监督训练来实现训练,不仅可以生成真实的无雾夜间图像,而且大大降低了训练的难度。

随着深度学习的飞速发展,学习模型不断更新,出现了深度多补丁分层网络(DMPHN)^[54],它是在真实的白天有雾图像去雾数据集上训练的。Kis 等^[55]为将该方法应用到夜间有雾图像,首先采用一种有效的颜

色校正^[56]策略作为预处理步骤,然后利用 DMPHN 对图像进行去雾处理,得到复原图像。该方法用到的数据集是由白天有雾图像经过颜色转换得到的,得到的复原图像会出现颜色失真、光晕明显等问题。

现有的基于深度学习的去雾算法都是基于夜间大气成像模型进行的。根据对以上算法的分析,基于深度学习的去雾方法在图像去雾方面起到了一定的效果。但是目前没有夜间有雾图像数据集,上面这些算法有的基于白天有雾图像数据集进行处理,有的则将白天有雾图像数据集进行颜色转换,将其假定为夜间有雾图像数据集进行处理,这就导致得到的复原图像可能会出现偏暗、颜色失真等现象。可以看出目前基于深度学习的夜间去雾算法最大的问题在于如何获得夜间有雾图像数据集。

5 结束语

目前为止,夜间图像去雾算法主要基于物理模型、非物理模型和深度学习三个角度。基于物理模型的去雾算法是在大气散射模型的基础上进行不断改进,根据夜间有雾图像特点,建立的更适用于夜间的成像模型。算法通过图像分割、图像分解、图像融合、去除光晕等技术取得了不错的去雾效果。基于非物理模型的去雾算法直接对图像进行增强,通过同态滤波、Retinex 理论等方法使得图像对比度有了一定程度的增强。基于深度学习的算法则是利用神经网络的强大学习能力进行建模,但是目前已有的数据集都是白天有雾图像,数据集质量一般,如果有更好质量的数据集,这些算法将会具有更好的鲁棒性,但是训练模型需要消耗大量的时间和资源。对于夜间有雾图像的处理,这三类算法都有各自的优势与不足,且都有一定的复原效果。

算法复杂度是去雾算法的关键评估指标,但是很难直接分析上述算法的时间复杂性,因此可以对算法的执行时间进行评估。对于分辨率为 520 pixel ×

480 pixel 的夜间有雾图像, Zhang 等^[14]、Li 等^[17]、Zhang 等^[23]、Wang 等^[22]提出的不同去雾算法花费的时间分别是 7.64、11.72、1.59、4.12 s, 相比较而言, 最大反射先验算法的效率优于其他几种算法, 其实时性较好, 但是如何提高算法的实时性仍是未来研究的重点之一。

目前夜间图像去雾算法还存在以下难点和重点:

1) 更真实的夜间有雾图像数据集。深度学习对数据集的要求很高, 但是目前使用的数据集都是人工合成的, 虽然一定程度上可以模拟自然环境, 但仍存在一些差距。因此, 目前亟需更真实的夜间有雾图像数据集来提高深度学习去雾算法的稳定性。

2) 更适用于夜间去雾的成像模型。由于夜间存在各种颜色的人造光源, 成像模型要比白天复杂得多, 因此, 目前需要探索更加适用于夜间图像的成像模型。

3) 夜间有雾视频的去雾算法。目前已有的算法主要是对单张图像进行处理, 不适用于视频处理。因此, 怎样对夜间视频进行去雾处理, 还需要进一步的研究。

4) 训练速度更快、鲁棒性更好的去雾算法。随着深度学习的深入研究, 出现了越来越多新的模型, 如何使用这些模型对夜间图像进行处理, 提高训练速度以及算法的鲁棒性已经成为今后研究的重点。

参 考 文 献

- [1] Sarkar M, Sarkar P R, Mondal U, et al. Empirical wavelet transform-based fog removal via dark channel prior[J]. IET Image Processing, 2020, 14(6): 1170-1179.
- [2] Zhou J C, Zhang D H, Zou P Y, et al. Retinex-based Laplacian pyramid method for image defogging[J]. IEEE Access, 2019, 7: 122459-122472.
- [3] Ma R Q, Zhang S J. Color image defogging in dark channel prior based image local features[J]. DEStech Transactions on Computer Science and Engineering, 2018(CCNT): 432-436.
- [4] Santra S, Mondal R, Chanda B. Learning a patch quality comparator for single image dehazing[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2018, 27(9): 4598-4607.
- [5] Tan R T. Visibility in bad weather from a single image [C]//2008 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, June 23-28, 2008, Anchorage, AK, USA. New York: IEEE Press, 2008.
- [6] Fattal R. Single image dehazing[J]. ACM Transactions on Graphics, 2008, 27(3): 1-9.
- [7] 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.
- [8] Zhang X P, Sim T, Miao X P. Enhancing photographs with near infra-red images[C]//2008 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, June 23-28, 2008, Anchorage, AK, USA. New York: IEEE Press, 2008.
- [9] 郑凤仙, 王夏黎, 何丹丹, 等. 单幅图像去雾算法研究综述[J]. 计算机工程与应用, 2022, 58(3): 1-14.
- [10] Zheng F X, Wang X L, He D D, et al. Survey of single image defogging algorithm[J]. Computer Engineering and Applications, 2022, 58(3): 1-14.
- [11] Narasimhan S G, Nayar S K. Chromatic framework for vision in bad weather[C]//Proceedings IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. CVPR 2000 (Cat. No. PR00662), June 15, 2000, Hilton Head, SC, USA. New York: IEEE Press, 2002: 598-605.
- [12] Pei S C, Lee T Y. Nighttime haze removal using color transfer pre-processing and dark channel prior[C]//2012 19th IEEE International Conference on Image Processing, September 30-October 3, 2012, Orlando, FL, USA. New York: IEEE Press, 2013: 957-960.
- [13] Reinhard E, Adhikhmin M, Gooch B, et al. Color transfer between images[J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 2002, 21(5): 34-41.
- [14] Schettini R, Gasparini F, Corchs S, et al. Contrast image correction method[J]. Journal of Electronic Imaging, 2010, 19(2): 023005.
- [15] Zhang J, Cao Y, Wang Z F. Nighttime haze removal based on a new imaging model[C]//2014 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP), October 27-30, 2014, Paris, France. New York: IEEE Press, 2015: 4557-4561.
- [16] Elad M. Retinex by two bilateral filters[M]//Kimmel R, Sochen N A, Weickert J. Scale space and PDE methods in computer vision. Lecture notes in computer science. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2005, 3459: 217-229.
- [17] Tomasi C, Manduchi R. Bilateral filtering for gray and color images[C]//Sixth International Conference on Computer Vision (IEEE Cat. No. 98CH36271), January 7, 1998, Bombay, India. New York: IEEE Press, 2002: 839-846.
- [18] Li Y, Tan R T, Brown M S. Nighttime haze removal with glow and multiple light colors[C]//2015 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV), December 7-13, 2015, Santiago, Chile. New York: IEEE Press, 2016: 226-234.
- [19] Narasimhan S G, Nayar S K. Shedding light on the weather[C]//2003 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2003. Proceedings, June 18-20, 2003, Madison, WI, USA. New York: IEEE Press, 2003.
- [20] Li Y, Brown M S. Single image layer separation using relative smoothness[C]//2014 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, June 23-28, 2014, Columbus, OH, USA. New York: IEEE Press, 2014: 2752-2759.
- [21] Zhang J, Cao Y, Wang Z F. Nighttime haze removal with illumination correction[EB/OL]. (2016-06-05)[2023-02-05]. <https://arxiv.org/abs/1606.01460>.
- [22] Wang A N, Wang W H, Liu J L, et al. AIPNet: image-to-image single image dehazing with atmospheric illumination prior[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2019, 28(1): 381-393.
- [23] Wang W H, Wang A N, Liu C. Variational single

- nighttime image haze removal with a gray haze-line prior[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2022, 31: 1349-1363.
- [23] Zhang J, Cao Y, Fang S, et al. Fast haze removal for nighttime image using maximum reflectance prior[C]//2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), July 21-26, 2017, Honolulu, HI, USA. New York: IEEE Press, 2017: 7016-7024.
- [24] 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.
- [25] 杨爱萍, 王南, 庞彦伟, 等. 人工光源条件下夜间雾天图像建模及去雾[J]. *电子与信息学报*, 2018, 40(6): 1330-1337.
- Yang A P, Wang N, Pang Y W, et al. Nighttime haze removal based on new imaging model with artificial light sources[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2018, 40(6): 1330-1337.
- [26] 杨爱萍, 赵美琪, 王海新, 等. 基于低通滤波和多特征联合优化的夜间图像去雾[J]. *光学学报*, 2018, 38(10): 1010006.
- Yang A P, Zhao M Q, Wang H X, et al. Nighttime image dehazing based on low-pass filtering and joint optimization of multi-feature[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(10): 1010006.
- [27] Finlayson G D, Rey P A T, Trezzi E. General Bp constrained approach for colour constancy[C]//2011 IEEE International Conference on Computer Vision Workshops (ICCV Workshops), November 6-13, 2011, Barcelona, Spain. New York: IEEE Press, 2012: 790-797.
- [28] Yang M M, Liu J C, Li Z G. Superpixel-based single nighttime image haze removal[C]//*IEEE Transactions on Multimedia*, March 28, 2018, New York: IEEE Press, 2018: 3008-3018.
- [29] Achanta R, Shaji A, Smith K, et al. SLIC superpixels compared to state-of-the-art superpixel methods[C]//*IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, May 29, 2012, New York: IEEE Press, 2012: 2274-2282.
- [30] Hong S, Kim M, Lee H, et al. Nighttime single image dehazing based on the structural patch decomposition[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 82070-82082.
- [31] Banić N, Lončarić S. Improving the white patch method by subsampling[C]//2014 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP), October 27-30, 2014, Paris, France. New York: IEEE Press, 2015: 605-609.
- [32] 方帅, 赵育坤, 李心科, 等. 基于光照估计的夜间图像去雾[J]. *电子学报*, 2016, 44(11): 2569-2575.
- Fang S, Zhao Y K, Li X K, et al. Nighttime haze removal based on illumination estimation[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2016, 44(11): 2569-2575.
- [33] Rahman Z, Jobson D J, Woodell G A. Multi-scale retinex for color image enhancement[C]//*Proceedings of 3rd IEEE International Conference on Image Processing*, September 19, 1996, Lausanne, Switzerland. New York: IEEE Press, 2002: 1003-1006.
- [34] 杨爱萍, 白煌煌. 基于 Retinex 理论和暗通道先验的夜间图像去雾算法[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(4): 041002.
- Yang A P, Bai H H. Nighttime image defogging based on the theory of Retinex and dark channel prior[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(4): 041002.
- [35] 徐兴贵, 杨平, 刘永利. 基于全尺度 Retinex 算法的夜间图像去雾[J]. *微电子学与计算机*, 2017, 34(7): 132-136.
- Xu X G, Yang P, Liu Y L. Night image dehazing based on full-scale Retinex algorithm[J]. *Microelectronics & Computer*, 2017, 34(7): 132-136.
- [36] Pei T Y, Ma Q Y, Xue P F, et al. Nighttime haze removal using bilateral filtering and adaptive dark channel prior[C]//2019 IEEE 4th International Conference on Image, Vision and Computing (ICIVC), July 5-7, 2019, Xiamen, China. New York: IEEE Press, 2020: 218-222.
- [37] Xie B, Guo F, Cai Z X. Improved single image dehazing using dark channel prior and multi-scale retinex[C]//2010 International Conference on Intelligent System Design and Engineering Application, October 13-14, 2010, Changsha, China. New York: IEEE Press, 2011: 848-851.
- [38] Yu H, Li C Y, Liu Z H, et al. A novel nighttime dehazing model integrating retinex algorithm and atmospheric scattering model[C]//2022 3rd International Conference on Geology, Mapping and Remote Sensing (ICGMRS), April 22-24, 2022, Zhoushan, China. New York: IEEE Press, 2022: 111-115.
- [39] Ancuti C, Ancuti C O, De Vleeschouwer C, et al. Night-time dehazing by fusion[C]//2016 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP), September 25-28, 2016, Phoenix, AZ, USA. New York: IEEE Press, 2016: 2256-2260.
- [40] Ancuti C, Ancuti C O, De Vleeschouwer C, et al. Day and night-time dehazing by local airlight estimation[C]//*IEEE Transactions on Image Processing*, April 23, 2020, New York: IEEE Press, 2020: 6264-6275.
- [41] Koschmieder H. Theorie der horizontalen sichtweite[EB/OL]. [2023-02-03]. https://doi.org/10.1007/978-3-663-04661-5_2.
- [42] Yu T, Song K, Miao P, et al. Nighttime single image dehazing via pixel-wise alpha blending[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 114619-114630.
- [43] Tan L, Wang S, Zhang L B. Nighttime haze removal using saliency-oriented ambient light and transmission estimation[C]//2021 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP), September 19-22, 2021, Anchorage, AK, USA. New York: IEEE Press, 2021: 1764-1768.
- [44] 吕建威, 钱锋, 韩昊男, 等. 结合光源分割和线性图像深度估计的夜间图像去雾[J]. *中国光学*, 2022, 15(1): 34-44.
- Lü J W, Qian F, Han H N, et al. Nighttime image dehazing with a new light segmentation method and a linear image depth estimation model[J]. *Chinese Optics*, 2022, 15(1): 34-44.
- [45] Yang C H, Lin Y H, Lu Y C. A variation-based nighttime image dehazing flow with a physically valid illumination estimator and a luminance-guided coloring

- model[J]. *IEEE Access*, 2022, 10: 50153-50166.
- [46] Boyd S, Parikh N, Chu E, et al. Distributed optimization and statistical learning via the alternating direction method of multipliers[J]. *Foundations and Trends® in Machine Learning*, 2011, 3(1): 1-122.
- [47] Liu Y, Wang A Z, Zhou H, et al. Single nighttime image dehazing based on image decomposition[J]. *Signal Processing*, 2021, 183: 107986.
- [48] Liu Y, Yan Z S, Wu A M, et al. Nighttime image dehazing based on variational decomposition model[C]//2022 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW), June 19-20, 2022, New Orleans, LA, USA. New York: IEEE Press, 2022: 639-648.
- [49] 程鸿, 龙伟, 李炎炎. 基于非物理模型的夜间图像去雾[J]. *计算机应用与软件*, 2020, 37(12): 204-208, 272.
Cheng H, Long W, Li Y Y. Nighttime image dehazing based on non-physical model[J]. *Computer Applications and Software*, 2020, 37(12): 204-208, 272.
- [50] Kuanar S, Rao K R, Mahapatra D, et al. Night time haze and glow removal using deep dilated convolutional network[EB/OL]. (2019-02-03) [2023-02-06]. <https://arxiv.org/abs/1902.00855>.
- [51] Yu F, Koltun V. Multi-scale context aggregation by dilated convolutions[EB/OL]. (2015-11-23)[2023-02-03]. <https://arxiv.org/abs/1511.07122>.
- [52] Tang C M, Yao W Z. NDPC-Net: a dehazing network in nighttime hazy traffic environments[C]//2022 IEEE 4th International Conference on Power, Intelligent Computing and Systems (ICPICS), July 29-31, 2022, Shenyang, China. New York: IEEE Press, 2022: 312-317.
- [53] Yang C H, Ke X X, Hu P, et al. NightDNet: a semi-supervised nighttime haze removal frame work for single image[C]//2021 3rd International Academic Exchange Conference on Science and Technology Innovation (IAECST), December 10-12, 2021, Guangzhou, China. New York: IEEE Press, 2022: 716-719.
- [54] Zhang H G, Dai Y C, Li H D, et al. Deep stacked hierarchical multi-patch network for image deblurring [C]//2019 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), June 15-20, 2019, Long Beach, CA, USA. New York: IEEE Press, 2020: 5971-5979.
- [55] Kis A, Ancuti C O. Night-time image dehazing using deep hierarchical network trained on day-time hazy images [C]//2022 International Symposium ELMAR, September 12-14, 2022, Zadar, Croatia. New York: IEEE Press, 2022: 199-202.
- [56] Oliveira M, Sappa A D, Santos V. Unsupervised local color correction for coarsely registered images[C]//CVPR, June 20-25, 2011, Colorado Springs, CO, USA. New York: IEEE Press, 2011: 201-208.