



计算机工程与应用
Computer Engineering and Applications
ISSN 1002-8331,CN 11-2127/TP

《计算机工程与应用》网络首发论文

题目: 单幅图像去雾算法研究综述
作者: 郑凤仙, 王夏黎, 何丹丹, 李妮妮, 付阳阳, 袁绍欣
网络首发日期: 2021-11-01
引用格式: 郑凤仙, 王夏黎, 何丹丹, 李妮妮, 付阳阳, 袁绍欣. 单幅图像去雾算法研究综述[J/OL]. 计算机工程与应用.
<https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2127.TP.20211101.0910.002.html>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

单幅图像去雾算法研究综述

郑凤仙, 王夏黎, 何丹丹, 李妮妮, 付阳阳, 袁绍欣

长安大学 信息工程学院, 西安 710064

摘要: 随着图像处理技术和计算机视觉技术的蓬勃发展, 对特殊天气下的场景检测和图像处理成为该领域的重要研究方向。其中在雾天拍摄的图像容易受雾或霾的影响, 导致图片细节模糊、对比度低以至于丢失图像重要信息, 为解决此类问题图像去雾算法应运而生。图像去雾算法是以满足特定场景需求、突出图片细节并增强图片质量为目的的一种图像分析与处理方法。为了研究图像去雾算法的发展过程、现状以及未来, 首先根据原理不同将去雾算法分为基于物理模型去雾算法、基于非物理模型去雾算法和基于深度学习去雾算法三大类。其次, 对其中经典算法从内容、发展和优缺点等方面进行介绍; 并对算法进行实验分析与比较。最后展望了去雾算法的未来研究的重难点。

关键词: 图像去雾; 图像处理; 物理模型; 非物理模型; 深度学习

文献标志码: A 中图分类号: TP391.41 doi: 10.3778/j.issn.1002-8331.2106-0134

Survey of Single Image Defogging Algorithm

ZHENG Fengxian, WANG Xiali, HE Dandan, LI Nini, FU Yangyang, YUAN Shaoxin

School of Information Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China

Abstract: With the vigorous development of image processing technology and computer vision technology, scene detection and image processing under special weather have become an important research direction in this field. And images taken in a foggy day are easily affected by fog or haze, resulting in blurry details and low contrast, so that important image information is lost. In order to solve such problems, image defogging algorithms came into being. The image defogging algorithm is an image analysis and processing method for the purpose of meeting the needs of specific scenes, highlighting the details of the picture, and enhancing the quality of the picture. In order to study the development process, current situation and future of image defogging algorithms, In this paper, according to different principles, the defogging algorithms are divided into three categories: defogging algorithms based on physical models, defogging algorithms based on non-physical models, and defogging algorithms based on deep learning. Then it introduces the content, development, advantages and disadvantages of the classic algorithms among them; and conducts experimental analysis and comparison on them. At the end of the article, the important and difficult points of the future research of the dehazing algorithm are prospected.

Key words: image defogging; image processing; physical model; non-physical model; deep learning

基金项目: 国家重点研发计划(2020YFB1600400)。

作者简介: 郑凤仙(1997-),女,硕士,研究方向为数字图像处理,E-mail: 1905368249@qq.com;王夏黎(1965-),男,副教授,研究方向为计算机视觉、数字图像处理等,E-mail: xlwang@chd.edu.cn;何丹丹(1995-),男,硕士,研究方向为数字图像处理,E-mail: 1962940297@qq.com;李妮妮(1996-),女,硕士,研究方向为数字图像处理,E-mail: 2453277077@qq.com;付阳阳(1995-),女,硕士,研究方向为计算机视觉,E-mail: 1607496964@qq.com;袁绍欣(1972-),男,副教授,研究方向为交通数据建模分析、工作流中间件平台及其应用研究等,E-mail: shxyuan@chd.edu.cn。

引言

随着计算机视觉的发展,图像处理技术在生活和科研领域应用广泛。同时伴随神经网络和深度学习技术的革新,高质量图像已经成为系统正常且高效运行的关键。卷积神经网络和深度学习算法也在图像处理方面表现出优秀的学习能力,在目标检测、目标跟踪、自动驾驶、无人机检测等研究领域得到广泛研究与应用^[1-3]。在雾或霾等天气情况下,室外空气中存在大量的微小悬浮颗粒会对光产生折射和散射,经折射和散射后的光线与待观察目标反射后的光线混合,造成户外图像采集设备捕获的图像清晰度和对比度大幅度下降,甚至会造成图像色彩偏移,细节大量丢失的现象,从而无法获取真实的图像信息^[4-6]。因此,需要对此类图像进行去雾,增强图像信息,保证系统正常运行。

近年来,众多科研机构从多个方向对带雾图像和去雾算法进行研究,出现了众多去雾算法。根据输入图像个数的不同可以分为单幅或多幅图像去雾算法。多幅图像去雾算法数据获取困难,因此实际应用较少。单幅图像去雾算法应用广泛,例如:直方图均衡化,基于暗通道先验,滤波和深度学习算法等^[7]。从图像处理原理角度出发可将算法分为三类。此三类算法分别为:基于物理模型、基于非物理模型和基于深度学习去雾算法。

基于物理模型的去雾算法主要考虑雾的成像原理,考虑光的散射和衰减然后建立模型。大气散射模型主要由入射光衰减模型和大气光成像模型构成,通过对捕获的图像光线进行分析根据光的散射作用和大气光学模型对获取图像的过程进行建模从而分解出其中的去雾图像。其中比较经典的是 HE 等人在 2009 年提出的基于暗通道先验的图像去雾算法^[7]。通过对 5000 多张清晰图像和有雾图像进行图像特征的统计分析,提出了暗原色先验理论,找到了清晰图像和大气物理模型的映射关系。是目前最稳定的去雾算法。

基于非物理模型的去雾算法通过增强图像细节,强化图像边缘,从而得到更多细节信息达到去雾效果。具体算法包括:直方图均衡化、色阶增强算法、Retinex 算法、小波和曲波变换等。Retinex 去雾算法最大的特点是颜色的常恒性,即认为人眼感知到的物体的颜色和亮度只与光和物体的相互作用有关。直方图均衡化算法通过均匀化图像灰度分布,增强视觉对比度达到去雾目的。小波变换是通过将原始信号分解为具有不同频率特征和方向特征的子信号,通过局部特征对图像进行局部化处理使得图像在多个尺度

增强进而放大有用信息达到增强图像的目的。

基于深度学习的去雾算法使用 CNN 网络建立一个深度学习模型,利用神经网络的学习能力估计出一些参数从而达到去雾目的。目前有两种基于深度学习的去雾算法研究广泛。一种是利用深度学习方法估计大气物理模型的一些参数从而还原图像。如 DehazeNet 等去雾模型将暗通道先验、最大对比度、颜色衰减和色度不一致四种方法结合设计网络,估计雾霾参数,从而得到清晰图像。一种是利用对抗神经网络直接寻找带雾图像和清晰图像的关系建立模型进行图像还原吗,如 GCANet 等去雾模型直接输入雾霾图像经过编码和解码网络还原出清晰图像。

1 物理模型去雾算法

1.1 大气散射模型

大气散射模型由大气散射理论^[8]发展而来。该模型在 1976 年由 McCartney 正式提出,之后又由 Narasimhan 等人进行了进一步总结^[9]。大气散射模型如图 1 所示。该模型认为入射光衰减和散射介质影响是导致图像质量下降的主要因素。

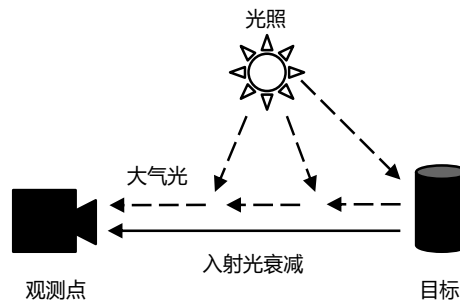


图 1 大气散射模型

Fig.1 Atmospheric scattering model

大气散射模型的数学描述如公式(1)所示:

$$I(x) = J(x)t(x) + A_{\infty}(1-t(x)) \quad (1)$$

其中,大气透射率为 $t(x) = e^{-\beta d(x)}$,观察目标的反射光为 $J(x) = L_{\infty}\rho(x)/d^2$,大气光系数为 A_{∞} 。可以看出, $J(x)$ 即为所求去雾后的图像,只需估计出大气光系数 A_{∞} 和透射率 $t(x)$ 即可计算得出去雾图像。

1.2 基于暗通道先验的去雾算法

He 等在 2009 年提出的基于暗通道先验的去雾算法^[10]是第一个将暗通道先验与大气散射模型结合进行去雾的方法。其数学表达式为:

$$J^{dark}(x) = \min_{y \in \Omega(x)} (\min_{C \in \{R, G, B\}} J^C(y)), J \rightarrow 0 \quad (2)$$

其中, C 为 R, G, B 3 个通道的某一通道。由矩形

区域 $\Omega(x)$ 中最小灰度值代替中心点像素灰度值便可得到暗通道图像。假设透射率为一个定值, 根据公式(1)对公式(2)进行归一化, 并引入暗通道先验理论可以估计出 t_0 和 A^c 的值。

暗通道先验算法以稳定、高效的特点成为目前发展最快、应用最广泛的图像去雾算法。因此后续出现了一系列的改进算法^[10-26]。针对强光图像容易失真的问题, 赵锦威等^[13]通过支持向量机的方式和块偏移方式计算更准确的透射率, 从而减少光晕像素量, 但对于色彩分布不均的图像容易产生色彩偏差以及块状效应。陈高科等^[14]通过高斯函数、光晕算子和形态学膨胀描述大气光值, 消除强光的干扰, 但对大面积白色区域去雾效果容易产生较大偏差。直到 2019 年杨燕等^[15]提出的自适应线性透射率估计算法能够准确估计大气光的透射率, 去雾效果良好, 但是算法在浓雾图像表现方面局限性较大。后续更有文献^[16-26]中提及的将滤波算法、图像分割算法与暗通道结合的方式将图像分为不同区域分别进行去雾然后再进行归一化整合。如 JIANG 等^[20]在 2020 年提出的在 HIS 颜色空间利用光强分量和引导滤波消除图像去雾产生的天空颜色失真问题, 但是合成图像切割边界明显。LI 等^[21]在 2021 年提出的基于阈值的天空区域分割算法, 算法对天空区域进行较好还原, 但是算法复杂度过高。Sabir 等^[25]和李娜等^[26]在 2021 年设计的实时性去雾算法对视频去雾的发展产生了重要影响, 但是其去雾算法的质量相对于其他算法有明显的下降。

分析基于暗通道的去雾算法的发展可以看出, 此类算法对天空区域去雾效果无法达到正常去雾要求, 容易产生光晕和颜色失真等现象, 并且算法的使用对光强有着较高的要求。后续的改进算法也主要针对这些方面。针对强光与弱光的改进算法主要使用更加精准估算透射率来达到目的, 但是对于色彩不均和带有浓雾或团雾的图像容易产生块状效应。对于去除天空区域影响的分割类算法虽然可以使天空区域的还原程度更高, 但是同时也会对图像的完整性和连续性产生较大影响, 在归一化时无法有效还原切割点附近图像的连续性。对于实时性算法而言, 虽然算法的时间复杂度有一定程度的降低, 但是图像的质量更加难以保证。可以看出针对单个问题的改进并不能满足该领域对去雾算法的需求。

1.3 基于物理模型补充算法

基于物理模型的去雾算法因有科学理论支撑在去雾算法研究方面百花齐放。基于物理模型的图像去雾

算法基本是以大气散射模型作为理论基础, 通过不同先验理论或方法估算模型的各个参数, 从而通过带入参数计算得到去雾图像。目前除了暗通道先验算法还有颜色衰减先验去雾算法^[27-35]、交互式去雾算法^[36-40]、基于偏振特性的图像去雾算法^[41-46]等。

颜色衰减先验的算法是基于物理模型去雾算法中除基于暗通道先验方法之外应用最多的算法。其根本依据是室外图像的亮度和饱和度之差与雾浓度呈现正相关。由此规律可以得到大雾图像的透射率从而得到去雾图像。如黄鹤等^[34]利用 HSV 颜色空间计算像素衰减率, 然后利用多级权重求出大气透射率, 从而对图像进行增强, 但是图像边缘不符合先验假设规律, 去雾效果不好。YANG 等^[35]利用图像亮度和饱和度的线性关系使用机器学习的方法求取景深信息, 然后利用大气散射模型还原图像, 达到一定的去雾效果, 但是算法不稳定。使用该方法复原的清晰图像色彩自然, 但在景深变化处容易出现雾残留等问题。

交互式去雾算法采用交互方式, 通过附加一些主观判断作为先验信息, 从图像中估计出景物深度进行对比度增强, 实现了图像去雾。如芮义斌等^[36]利用天空区域最大亮度作为天空辐射强度, 并使用消失点估计景深进行图像还原。但是交互式去雾算法在实际中应用较少, 主要原因是场景深度信息在实际中是未知的, 估算方法目前不够完善容易产生较大的偏差。

基于偏振特性的图像去雾算法不考虑先验信息的影响, 通过不同光照下的多幅图像来估计模型参数从而得到去雾图像。如代晴晴等^[46]设计了一种自动估计参数的偏振特性去雾算法, 使用不同光学特征的 3 幅图像自动估算参数从而得到去雾图像。基于大气光偏振特性的去雾方法运用广泛, 可实现各种类型的有雾图像进行去雾。与交互式去雾方法类似, 基于偏振特性的图像去雾算法计算过程中同样需要估计未知大气条件标定信息, 估计成本过大、过程繁琐导致实际运用难度较大。

1.4 研究现状分析

基于物理模型的去雾算法基于图像的成像原理和雾天光线衰减原理, 通过利用大量实验得到的先验知识进行降质图像还原。基于暗通道先验和颜色衰减先验的去雾算法目前应用广泛。

基于对基于物理模型的代表算法的发展进行分析得出算法目前的适用场景和局限性。基于暗通道的去雾算法去雾效果依赖于图像的结构特征, 适用于俯视角度拍摄的薄雾图像, 并且后续处理对图像的颜色还原程度要

求不高的情况。而对包含强光、浓雾、团雾等元素的图像还原性较差。基于颜色衰减先验的算法依赖于图像的颜色饱和度,适用于背景鲜艳的薄雾图像或者带有少量的团雾图像,对于颜色失真严重并且图像梯度结构不明显的图像算法表现较差。基于偏振特性和交互式去雾算法因其自身对景深信息和大气信息的依赖程度较高,所以去雾效果并不理想,实际应用较少。

总体而言,基于物理模型的去雾算法的视觉效果较好,去雾过程没有增加多余噪声,但是场景限制严重。而为了达到更好去雾效果,摆脱基于单个先验知识的局限性,研究人员开始采用多种去雾方法相结合的去雾算法,打开了图像去雾领域的新篇章。如2020年徐浩等^[47]人利用超像素分割和暗通道先验获得不规则区域代替固定窗口避免了块效应问题,弥补了暗通道先验算法对团雾图像还原效果差和分割线连续性的问题。2021年庄秀玲等^[48]引入导向滤波精细化透射率图和加权最小二乘法保留边界信息,解决了图像边缘白色光晕和填充区域失真问题。可以看出多种方法结合的改进去雾算法优于基于单种去雾算法的改进算法,但是同时增加了算法的复杂度,实时性较差。

2 非物理模型去雾算法

2.1 直方图均衡化算法

直方图是图像中各级灰度值出现频率的统计图,可以直观展示图像灰度级分布、对比度和明暗情况。该算法主要是通过非线性变换使图像灰度值集中部分对比度增强,灰度值稀疏部分对比度减弱使得图像整体灰度值分布平缓,从而实现去雾效果。算法首先统计各灰度级出现的频率并计算其分布函数,然后将结果进行非线性变换重新将灰度值重新映射到(0,255)之间。其线性变换过程为:

$$h(v) = \text{round} \left(\frac{s_x - s_{\min}}{N - s_{\min}} \times (L - 1) \right) \quad (3)$$

其中, L 为图像最大灰度级, s_x 为灰度分布函数。

传统的直方图均衡化算法虽然能达到一定的去雾效果但是存在局部过度增强和光晕现象。为此提出了基于局部的直方图均衡化算法,但是这类算法同样存在算法复杂度高、色差严重等问题。目前自适应直方图均衡化在去雾算法中应用广泛。如基于插值直方图均衡化算法^[49-53]、局部非重叠子块的直方图均衡化算法^[54]以及近年来发展迅速的自适应直方图均衡化算法(CLAHE)^[55],能有效提高算法的效率和效果。但是基于直方图均衡化的去雾算法相对较少,主要是因

为直方图均衡化算法只基于图像的灰度分布特征,需要人为调整参数,而且去雾过程容易产生其他噪声影响。可以看出直方图均衡化算法在去雾方面的主要问题是算法鲁棒性差,不够灵活,而且容易产生所需细节外的噪点,这也是直方图均衡化算法发展的难题。该算法未来的研究方向是使得算法能更灵活的适用于差距比较大的图像,但是同时算法的复杂程度也会进一步增加。

2.2 Retinex 去雾算法

Retinex 理论^[56]最早由 Land 等人提出,它是以人类的视觉特性描述自然界物体恒常性的模型,即物体的色彩不受非均匀光照等大气因素的影响具有一致性。基于 Retinex 理论,光线首先由光源发出然后经过带观测物体反射,最后射入相机中,其光照模型如图4所示。

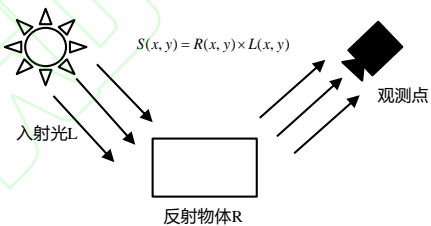


图2 Retinex 成像模型

Fig.2 Retinex imaging model

根据 Retinex 理论可以得到观测点成像的数学表达式为:

$$S(x, y) = R(x, y) \times L(x, y) \quad (4)$$

其中 $S(x, y)$ 表示观测点最终观测结果, $L(x, y)$ 表示入射光图像, $R(x, y)$ 表示带观测物体的反射性质。

单尺度 Retinex 算法(Single Scale Retinex, SSR)是 Retinex 理论中最有代表性的方法,算法核心和难点是采用高斯模糊来评估 $L(x, y)$ 。SSR 算法假设光照平滑变化但是实际中光照在物体边缘处变化是非平滑的,因此 SSR 算法虽能复原带雾图像,但是容易产生光晕影响。为此 Jobson 等人提出多尺度 Retinex (Multi-Scale Retinex, MSR) 算法^[57],该算法通过对多尺度所得 $r(x, y)$ 取加权均值作为最终结果,最经典的算法是取3尺度等权重即权重取1/3。

但是 MSR 算法在解决光晕影响的同时也会产生颜色失真的问题,针对这项不足,Jobson 等人提出带色彩恢复的多尺度 Retinex 算法^[58] (Multi-Scale Retinex with Color Restore, MSR-CR),此算法引入了色彩恢复因子,对色彩失真图像进行恢复弥补了 MSR 的不足。由于 Retinex 系列算法在提高图像的可用信息

量方面产生了较好的效果,后续出现众多改进算法。可以看出 Retinex 算法在发展过程中对颜色的恢复和图像特征的还原都取得成功的进展,尤其是 MSRCR 算法对薄雾和部分团雾图像都能进行较完整的还原,并且图像的视觉效果良好,但是算法复杂度过高。之后有研究人员将下采样引入 Retinex 算法如文献[59-64],降低了还原图像的时间成本,但是同时图像还原效果受到影响。

2.3 小波和同态滤波算法

小波变换具有多分辨率的特点,用不同的尺度将原始图像信号进行局域分解,进而得到图像的低频和高频特征,并且具有完善的重构能力。因为雾霾主要影响的是图像信号的低频部分,所以在使用小波变换进行去雾时需要抑制图像的低频信号部分,相对增强图像的高频信号,从而达到去雾的目的。因为小波变换需要对图像信号进行多尺度处理,所以直接使用小波变换对 RGB 各通道进行处理然后归一融合难免产生失真,所以利用小波去雾主要对图像在 HSV 空间的亮度信息进行小波变换。比如 ZHOU 等^[65]和 LIU 等^[66]基于小波变换原理使用小波变换对图像高低频亮度分别进行增强和抑制,然后进行颜色恢复,从而达到去雾目的。以及文献[67]和 [68]通过小波变换对低频光谱进行近似去雾保留高频区域,进行图像去雾。

同态滤波同样对图像信号进行分解,主要解决照度不均或者灰度范围过大影响图像对比度低、颜色失真等问题。与小波变换不同的是同态滤波结合频率过滤和灰度变换两种技术,把图像的照度反射模型作为频域处理的基础,对图像灰度范围进行调整,增强图像暗区域细节信息。比如 ZHANG 等^[69]基于同态滤波原理,对图像中低频亮度区域抑制处理,对高频亮度进行增强,从而增强图像细节,达到去雾效果。

在图像去雾算法中单独的小波变换和同态滤波一般很难达到理想效果,所以往往将小波变换或者同态滤波方法与其他去雾算法相结合,从而在保证视觉效果的同时,得到更多图像信息和轮廓信息。如文献[70-75],利用小波变化和同态滤波结合图像颜色和梯度特征等信息设计去雾算法,比单独使用小波变化和同态滤波算法得到的去雾效果好,并且可以适用于多个场景。

2.4 研究现状分析

基于非物理模型的去雾算法主要利用图像本身的数学特征和统计特征进行还原。无论是基于直方图均衡化的算法、Retinex 去雾算法还是小波变换和同态滤波算法其本质都是经过一定的统计和变换将原图像

的细节特征进行放大,其本质都属于图像增强手段。

其中直方图均衡化算法是运算效率最高,原理最简单的方法,而且能够增强图像亮度和对比度。但是算法鲁棒性差,不够灵活,而且容易产生额外噪声。该算法适用于需要亮度增强或分辨率较高的薄雾图像。但是对团雾图像进行增强时限制较大。未来的研究方向是使得算法能更灵活的适用于差距比较大的图像,但是同时算法的复杂程度也会进一步增加。Retinex 算法目前发展比价完善,尤其是 MSRCR 算法在团雾、浓雾和光线较暗的情况都有良好表现,并且视觉效果较好。但是 Retinex 系列算法时间和空间复杂度较高,无法在要求实时性的场景下使用。虽然目前已经出现了一系列改进算法。但是并不能有效解决实时性的问题。小波变换和同态滤波算法都是以数学函数为基础,将图像看成信号,然后对其进行分解,从而选出需要的部分。此类算法依赖于参数选择,在不同光强和背景条件下的条件参数不同,此种方式一般不能单独应用于图像去雾领域。

与基于物理模型的去雾算法类似,多种算法结合的去雾算法,能有效弥补单个算法的不足。比如 JI 等^[76]通过修改光照分量来增强图像整体的对比度,并利用非线性函数对反射分量校正,提高了 Retinex 算法的运算效率。YANG 等^[77]、LI 等^[78]和 LIU 等^[79]提出的基于 Retinex 和暗通道先验结合的去雾算法,不仅对于正常光照下的带雾图像有较好的恢复作用同时还可以有效还原雾霾图像。高古学等^[80]将自适应直方图均衡化算法与 MSRCR 算法结合,针对沙尘图像有较好的恢复作用。可以看出,基于直方图均衡化算法和滤波算法主要作为辅助算法与其他去雾算法结合使用,以提高其他算法的鲁棒性和多场景适用性。并且为了提高去雾算法多场景适用性研究人员将先验知识与图像增强相结合,除了上述改进方法外更是出现了结合多种先验知识和增强手段的去雾算法。

3 深度学习去雾算法

3.1 DehazeNet 去雾算法

深度学习算法因为其强大的学习能力和算法准确率搞的特点在计算机视觉的各个领域得到广泛应用。CAI 等提出了一种名为 DehazeNet^[81]的 End-to-End 去雾系统,将有雾图像作为输入,其以透射图作为输出,然后利用大气散射模型进行图像的还原。DehazeNet 算法结合暗通道先验去雾算法、最大对比度去雾算法、颜色衰减先验算法和基于色度不一致的去雾算法四种传统算法的特征进行网络结构设计。网

络结构如图 3 所示。模型分为四个部分分别为：特征提取、多尺度映射、局部极值和非线性回归。

DehazeNet 算法将传统去雾算法与深度学习算法相结合，为图像去雾的研究开创了新思路。以其为代表的基于大气散射模型的深度学习算法近年来发展迅速。首先，DehazeNet 算法出现了一系列改进算法如文献[82-88]所列，主要将滤波算子或者混合学习的方式与传统 DehazeNet 算法相结合，使训练模型输出更加接近真实效果。其次，ZHANG 等^[89]在 2018 年提出的 DCPDN 算法，采用阶段式训练和与生成器和判

别器原则将语义分割知识应用于去雾领域，为深度学习去雾模型的发展做出了重要贡献。基于大气物理模型的去雾模型在视觉和天空给区域改进较大，相对于传统的基于物理模型的去雾算法效果显著，但是参数数量激增和大气因素的不确定性导致图像亮度会相对变暗实时性差。后续发展多引入残差网络对此类模型进行优化。如李硕士等^[90]2021 年提出基于自适应机制的连接模块增强对图像像细节的还原能力。同年杨振舰等^[91]利用残差模块和空洞卷积改善还原过程中颜色失真和去雾不彻底的问题。

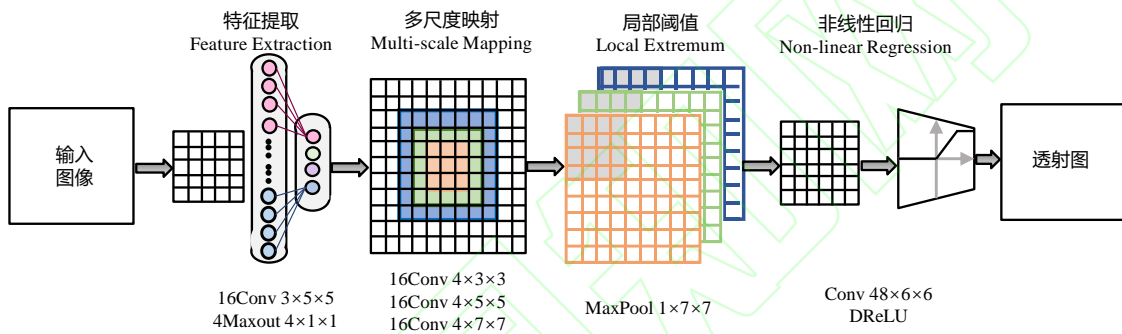


图 3 DehazeNet 网络结构图

Fig.3 Dehazenet network structure diagram

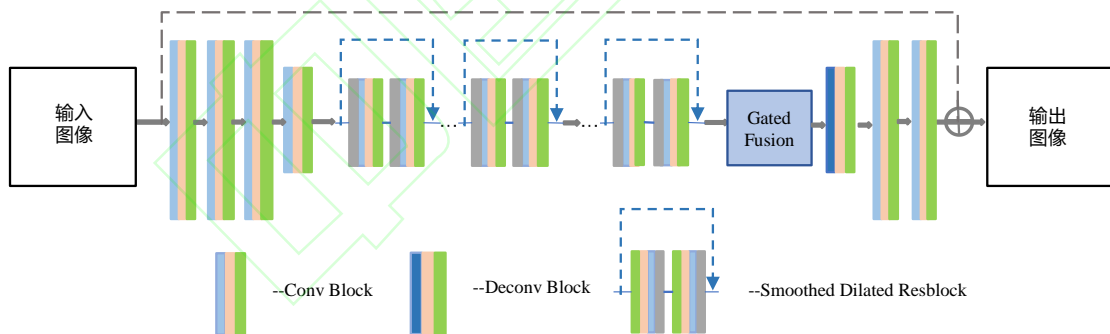


图 4 GCANet 的网络结构图

Fig.4 Network structure diagram of gcanet

3.2 GCANet 算法

因为生成对抗神经网络 (GAN) 的出现，其采用无监督的学习方式进行训练，能够生成清晰真实的样本，避免了损失函数设计的困难。CHEN 等^[92]提出了一种基于 GAN 的去雾算法名为 GCANet (Gated Context Aggregation Network)。GCANet 是一个端到端的模型，重点在于利用平滑卷积代替了扩展卷积从而解决了网格伪影的问题。

GCANet 的网络结构如图 4 所示。该网络主要利用三个卷积模块作为编码部分，在编码和解码之间加入数个平滑卷积层，使得输入特征层和输出特征层保

持局部相关性。GCANet 直接使用以有雾图像作为输入，去雾图像作为输出直接得到清晰图像，为去雾算法的发展产生重要影响。后续出现了一系列的基于图像信息的去雾模型。Li 等^[93]提出的 AODNet 采用轻量卷积神经网络结合大气散射模型直接生成清晰图像。Ren 等^[94]提出一种基于门限融合网络的去雾算法，对图像还原产生的光晕抑制效果明显。之后更是出现了一系列改进算法。2021 年肖进胜等^[95]以 GAN 模型为基础设计了沙漏型生成器网络结构完成有雾图像和无雾图像的转换。同年，GEN 等^[96]通过结合周期一致性和感知损失来增强 CycleGAN 公式，以提高纹理信息恢复的质量，并生成视觉上更好的无雾图

像。Mehta 等^[97]结合图像光谱理论和对抗网络产生更好的视觉效果。可以看出,摆脱假设先验条件只依赖图像自身结构是此类模型的主要特点。模型不需要通过大量的计算得到假设的条件参数,极大减少了计算过程中的误差。但是由于去雾场景的复杂性和对样本的依赖性模型参数进一步增加,并且数据集成为此类算法发展的最大限制条件。

3.3 研究现状分析

基于深度学习的去雾算法当前主要有两个研究方向,一是以大气散射模型为基础,通过神经网络估计或者还原其中的某些参数从而在原模型中求解得到清晰图像,二是直接使用以有雾图像作为输入,去雾图像作为输出的端到端的 CNN 神经网络模型,直接得到清晰图像。

前者利用深度学习算法可以将多种先验条件与图像增强算法结合,增强了图像还原视觉效果,相对于基于单个先验知识的去雾算法图像亮度明显增强,具体分析主要在第 4 章实验分析体现。大气散射模型参数和假设先验规律的限制,通常需要多种假设先验和参数共同计算才能得到优于传统基于大气模型去雾算

法的效果。但是参数量也成倍增加,同时因当前去雾数据集场景的限制,算法的稳定性也需要进一步提高。而后者摆脱了模型对先验条件的依赖减少了大量的参数,但是同时对数据的要求也更加高,限制了模型的应用场景。端到端的图像还原模型是目前研究的热点,后续也出现了一些结合性去雾模型。如 2020 年黄文君等^[98]利用模糊图像的低秩特性和字典矩阵的表达方式对浓雾图像还原效果优于其他算法。同年孙斌等^[99]结合 FC-DenseNet 模型和对抗网络 WGAN 模型,对真实雾天图像的还原效果优于其他算法。刘广洲等^[100]采用多层密集连接网络避免梯度消失现象。除此以外双目视觉和语义分割知识也被应用于图像去雾领域如文献^[101-107]所列。如 2021 年 DONG 等^[102]提出的基于 U-Net 的多尺度图像增强网络提高了还原图像的效率。可以看出目前基于深度学习的去雾算法主要针对多场景适用性、对浓雾图像和团雾图像的还原效果,以及如何模拟真实雾天图像进行改进,而且模型越来越注重实用性,向着轻量级网络靠拢。

表 1 去雾算法对比分析

Table 1 Comparative analysis of defogging algorithms

类型	代表算法	原理机制	适用场景	优点	局限性	文献
物理模型	暗通道先验算法	利用暗通道图像保留图像原有明暗属性的规律估计透射率	光照适中的薄雾图像	还原图像视觉效果较好,算法效果稳定,计算效率高,不会产生额外噪点。	还原图像整体变暗,天空或河流区域容易出现颜色失真产生光晕对浓雾图像还原效果差。	[10]
	颜色衰减先验算法	根据亮度和饱和度呈现正相关的规律估计透射率	背景清晰、颜色饱和和度大的薄雾图像	还原图像色彩饱和,颜色自然,算法计算效率高。	在景深变化区域容易出现雾残留的现象,对团雾图像还原效果差。	[27]、[28]
非物理模型	直方图均衡化算法	拉伸图像灰度直方图增加灰度值波动范围从而进行图像增强。	颜色较暗的薄雾图像	还原前后图像对比度变化明显,算法复杂度低。	容易产生额外的噪点,对团雾周围增强效果差。	[56]
	Retinex 系列算法	利用自然界物体色彩恒常性原理和高斯函数增强图像。	航拍俯视角度的图像	增强后的图像视觉效果好,去雾彻底,能保持图像原有的亮度。	算法复杂度高,对光晕有一定抑制作用但是容易出现颜色失真。	[57]、[58]、[59]
	小波变换和同态滤波算法	将图像信号进行局域分解,进行信号过滤选择所需频率范围,增强图像。	背景突出或明暗变化明显的图像	可以认为调整图像输出频域,针对性获取某些细节。	去雾效果不明显,容易出现雾残留现象。	[66]、[70]
深度学习模型	DehazeNet 算法	结合暗通道先验去雾算法、最大对比度去雾算法、颜色衰减先验算法和基于色度不一致的去雾算法的特征进行网络结构设计。	深度信息较一致的薄雾图像	还原后的图像细节恢复完好,避免图像过饱和。	对景深变化处还原效果不好,容易丢失信息。算法参数较多,效率低下。	[82]
	GCANet 算法	采用无监督学习方式加入平滑卷积层,直接学习真实图像和带雾图像的规律直接还原图像。	浓雾和团雾图像	进行端到端的图像还原,不依赖先验知识。解决了网格伪影的问题。	对数据集要求高应用场景受限	[93]

4 去雾算法综合评价与分析

基于对去雾算法的分类思路和经典算法的介绍,可以对不同去雾算法从原理、适用场景、优势以及局限性进行归纳介绍,如表 1 所示。本章将进一步对算法的特点等内容进行实验验证和量化分析。

4.1 数据集介绍

在去雾算法发展的过程中出现了一系列去雾算法数据集,从数据集的来源可以分为人工合成和真实雾天数据集。人工合成数据集通常利用各种场景的高清图像以及它们的深度图。然后基于图像的深度信息和雾天图像的统计特征或者雾介质模型对高清图像进行模糊处理,创建相应的带雾场景图像,这也是目前在去雾算法领域应用最多的数据集创建方式。常见的人工合成去雾数据集有 NYU Depth、RESIDE、RESIDE-beta、Middelbury 和 D-HAZY 数据集。其中 D-HAZY 数据集是在 NYU Depth 和 Middelbury 数据集的基础上利用雾介质模型创建相应的朦胧场景。是目前使用最广泛的去雾数据集。目前计算机视觉的权威机构并没有公开真实雾天数据集。大气光照和场景变化的限制采集真实雾天数据集变得及其困难,目前所能搜集到的真实雾天图像数据存在数据量小,静态场景居多以及朦胧图像与清晰图像场景匹配度低等缺陷,单独应用此类数据集无法进行去雾算法的测试分析。一般会在现有人工合成数据集中添加一些真实场景的朦胧图像以检测算法的精确性和鲁棒性。本文实验采用使用最广泛的 D-HAZY 数据集。

4.2 评估标准

本文采用主观评估和客观评估两种评估方式对典型去雾算法进行评估。主观评估是依靠人的视觉系统给予图像变化的主观评价,往往带有个人主观色彩。客观评估利用数学模型建立不同的评价指标对图像的亮度、信息量和色彩饱和度等进行评估,有效避免了主观评估的缺陷。客观评估主要分为全参考评估、减参考评估和无参考评估。全参考评估以原始图像作为依据,将还原后的图像与原始图像的各项指标进行对比从而得出图像评分。常用的全参考评估方法有均方差法(Mean Squared Error, MSE)、峰值信噪比(PEAK Signal to Noise Ratio, PSNR)和结构相似度(SSIM)等。减参考图像评价方法则利用原始图像部分信息与还原图像进行对比从而计算还原程度。常用 Gaussian 分布、Laplace 分布和小波系数等特征建立评估模型,不仅考虑图像的数据特征还要考虑评估标准的准确性,是一种较难控制的评估标准。无参考图像质量评估不会依据原始图像,模拟视觉系统直接对单一图像进行评估。无参考评估主要利用自然统计特性对图像进行评估。常用的无参考评估指标有图像信息熵、Brenner 梯度函数、Tenengrad 梯度函数和 Laplacian 梯度函数。由于减参考评估的场景依赖和不方便控制的特点,本文采用全参考评估和无参考评估两种方式对还原图像进行评估。具体评估指标包括 MSE、SSIM、Tenengrad 梯度函数和图像信息熵。四种评价指标及其的意义和特点如表 2 所示。

表 2 四种客观评估指标

Table 2 Four objective evaluation metrics

指标	计算方式	含义
MSE	$MSE = \frac{1}{MN} \sum_{0 \leq y \leq N} \sum_{0 \leq x \leq M} (f(x, y) - g(x, y))^2$, 其中 $M \times N$ 表示图像分辨率, $f(x, y)$ 表示原始图像像素, $g(x, y)$ 表示待测图像。	表示图像相对于原图像的偏移程度,数值越大偏移程度越大。
SSIM	$SSIM = [l(x, y)]^\alpha [c(x, y)]^\beta [s(x, y)]^\gamma$, 其中 $l(x, y)$ 为亮度比较函数, $c(x, y)$ 为对比度比较函数, $s(x, y)$ 为结构比较函数。	表示两幅图像的相似程度,从亮度、对比度和结构对比度三个方面进行对比,结果越接近于 1 表示图像越相似。
信息熵	$H = -\sum_{i,j} \frac{f(i,j)}{N^2} \lg \frac{f(i,j)}{N^2}$, 其中 $f(i, j)$ 表示邻域灰度均值和像素灰度组成的二元组, N 为图像尺度。	表示图像的信息量多少。数值越大,图像所含信息量越大。
Tenengrad 梯度函数	$Ten = 1/n \sum_x \sum_y G_x \times I(x, y) + G_y \times I(x, y)^2$ 其中, G_x , G_y 为 sobel 卷积核, $S(x, y)$ 为点 (x, y) 的梯度。	从水平和垂直方向的梯度值对图像进行质量评估,返回结果越大图像质量越好。

4.3 实验结果与分析

对上述的基于暗通道先验去雾算法、直方图均衡化算法、MSR 算法、MSRCR、小波变换算法、DehazeNet 算法和 GCANet 算法进行了测试实验, 选择了 3 张特征明显的带雾图像进行试验验证。实验效果图如图 5、图 6 和图 7 所示。

4.3.1 算法时长评估

试验计算机采用 Intel Core i5-10400F(单核主频 2.90 GHz)的 CPU 和 16 GB 内存, 以及 NVIDIA GeForce GTX 1660s 的 GPU。在此设备上进行 7 种算法的验证试验。算法所用时长如表 3 所示。

从表 3 可以看出基于物理模型和非物理模型的去雾算法在算法时长方面平均表现优于基于深度学习的去雾算法, 尤其表现在高分辨率图像上。但是 GCANet 算法在实时性方面具有良好的表现, 明显优于 MSR 算法和 MSRCR 算法。主要原因是 MSR 和 MSRCR 算法采用多尺度以及多个高斯卷积核进行计算, 增加了算法的时间复杂度。但是对于其他算法, 基于深度学习的算法明显在实时性方面较差, 其主要原因是基于深度学习的算法在计算过程中需要巨大的参数数量, 从而导致计算时间较长。

4.3.2 算法精度评估

对实验包含的 7 种算法的去雾效果进行主观评估, 则由图 5、图 6 和图 7 可以得到如下结论。基于暗通道的去雾算法虽然可以使图像在视觉效果上更加清晰, 但是在有天空背景的图像上容易产生光晕, 如图 6(b)所示, 不适用于亮度较低和仰视角度的带雾图像。基于小波滤波的去雾算法保持了良好的图像亮度, 但是图像对比度增加过于明显, 视觉效果一般。基于 MSR 的算法在去雾图像模糊方面表现不错, 但是结果图像会产生色差导致视觉效果较差, 如图 5(d)和图 6(d)所示, 但是对团雾处理效果较好, 如图 7(d)所示。基于 MSRCR 的算法在 MSR 算法的基础上对色彩进行了还原, 并且图像的亮度和对比度都具有明显的改善如图 5(e)、图 6(e)和

图 7(e)所示。基于直方图均衡化的去雾算法虽然增强了图像的对比度, 但是会产生较多的噪声对后续图像处理工作将产生较大影响, 在图 7(f)上表现明显。基于深度学习的去雾算法在图像去雾方面都表现良好, 相对于其他算法在色彩饱和度, 和视觉效果方面具有较大优势。其中, DehazeNet 去雾算法会使得图像亮度稍微减弱如图 5(g)、图 6(g)、图 7(g)所示。

利用全参考评估指标和无参考评估指标对 7 种算法进行评估。对实验结果进行可视化如图 8、图 9、图 10 和图 11 分别为 MSE、SSIM、图像信息熵和 Tenengrad 梯度函数这 4 种指标在 3 张图像上的评估结果折线图。关于去雾后的图像与原始图像进行对比分析, 可以从图 8 和图 9 可以得出 MSRCR 方法的稳定性最好, 在三张测试图像上都有较明显的表现。7 种去雾算法在薄雾俯视图上表现最好相对原图像的偏移程度较大, 图像相似度较低。而在带有团雾的图像中 7 种算法均表现较差, 结构相似程度和均方差都没有太大的变化。其主要原因可能是在团雾图像中雾对图像信息的遮挡呈现无规律的特点, 并且某些地方遮挡严重造成图像信息损失严重。对单幅图像进行质量评估可以从图 10 和图 11 看出小波变换和直方图均衡化是除了深度学习方法外, 图像质量改变最明显的方法。但是从主观评价可以看出这两类算法都放大了图像噪声, 增加了一部分无用细节。基于深度学习的方法在增强图像的信息和改变图像的梯度结构方面都具有良好的表现, 其中 GCANet 方法对图像质量的提升明显优于 DehazeNet, 其主要是因为 GCANet 方法在计算过程没有使用先验信息作为参考, 图像原本的亮度并没有降低。MSR 图像去雾方面表现得不够稳定, 容易产生色差, 丢失关键信息。而 MSRCR 则表现优于 MSR, 相对于 MSR 能在去雾过程中保留更多的图像信息。综上, 经过主观和客观两个方面对 7 个典型去雾算法进行分析, 可以得出基于深度学习的算法是目前最稳定的, 也是效果最后的去雾算法, 同时也是去雾算法当前研究的主流算法。





图5 各算法薄雾图像去雾示例图

Fig.5 Examples of haze image defogging with different algorithms

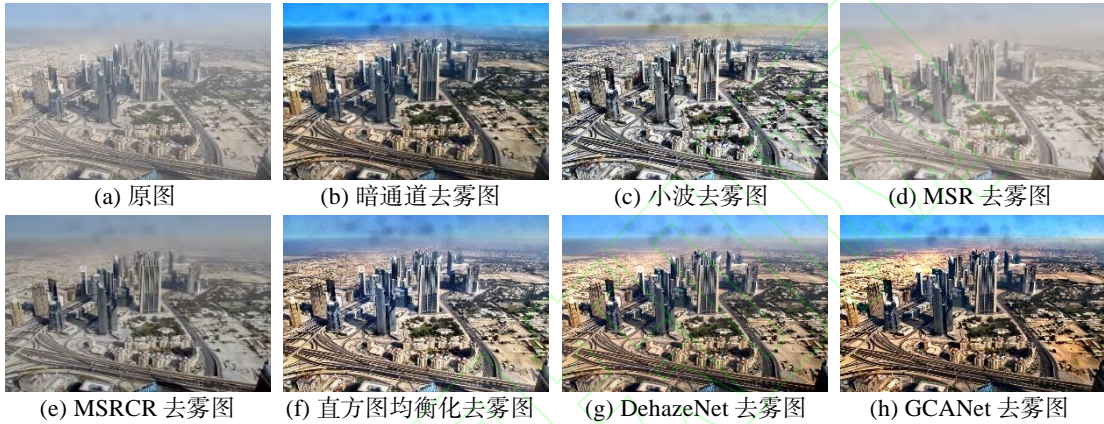


图6 各算法俯视薄雾图像去雾示例图

Fig.6 An example of mist removal from the top view of mist image by each algorithm

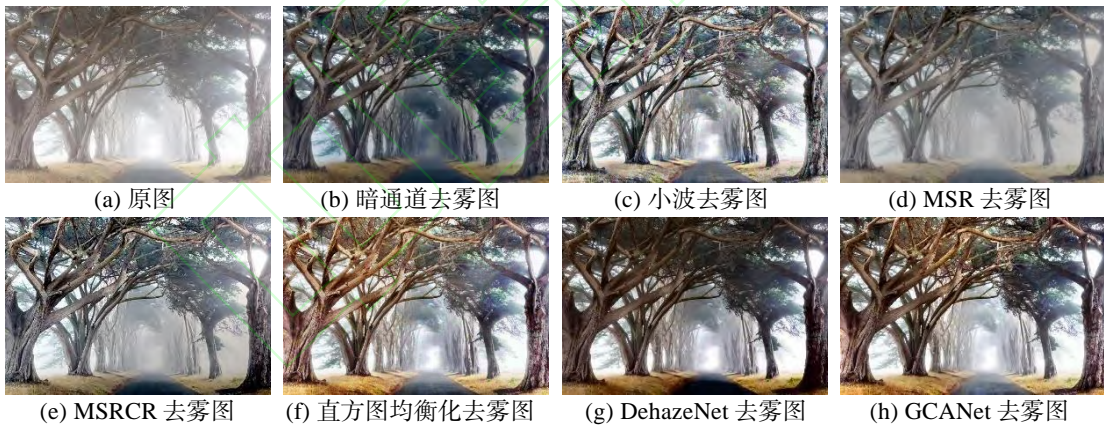


图7 各算法团雾图像去雾示例图

Fig.7 Sample image of each algorithm for cloud image defogging

表3 不同算法的处理时长

Table 3 The computation time of different algorithms

图像	分辨率	暗通道(s)	小波变换(s)	MSR(s)	MSRCR(s)	均衡化(s)	DehazeNet(s)	GCANet(s)
1	1024×1024	0.325	1.763	5.147	5.241	1.047	9.836	2.678
2	512×512	0.198	1.052	3.286	3.302	0.436	3.146	1.352
3	256×256	0.158	0.413	1.853	1.851	0.207	1.218	0.108

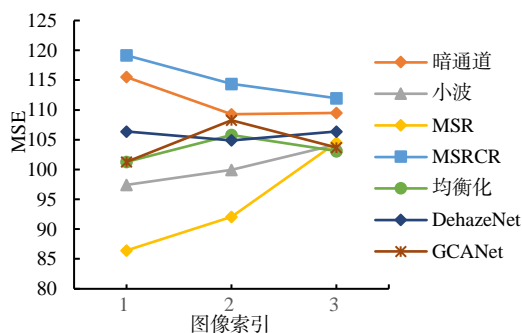


图8 MSE 指标折线图

Fig.8 MSE metric line chart

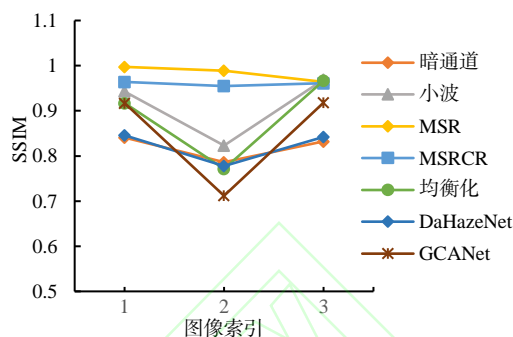


图9 SSIM 指标折线图

Fig.9 SSIM metric line chart

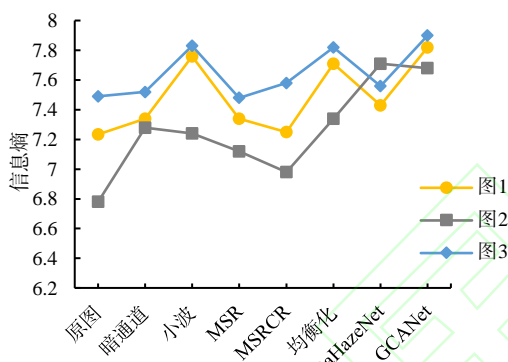


图10 信息熵指标折线图

Fig.10 Entropy metric line chart

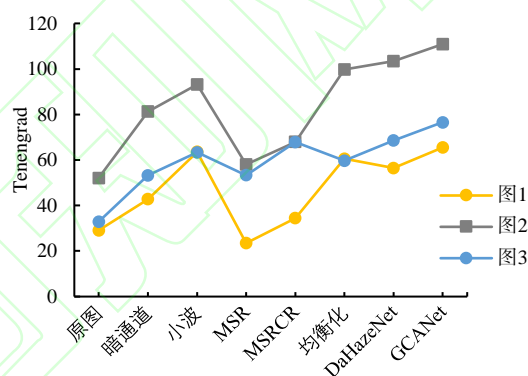


图11 Tenengrad 指标折线图

Fig.11 Tenengrad metric line chart

5 结论与展望

本文去雾算法主要从物理模型、非物理模型和深度学习算法三个方面进行研究的。基于雾模型的图像去雾算法主要基于大气散射模型，主要考虑在成像过程中雾或霾对图像质量的影响，然后通过损失参数对图像进行还原。非物理模型直接分析图像信息和细节，通过不同的方法直接对图像进行增强，从而使图像变得清晰。基于深度学习的方法则利用神经网络搭建深度学习模型，要么基于大气模型估计其中参数，要么直接寻找带雾图像与清晰图像的对应关系进行图像还原。此三类去雾算法对雾天图像都有着不同程度的复原作用，其中某些算法已经得到了广泛的应用，但是目前去雾算法还存在以下的研究重点和难点：

(1) 设计时间复杂度和空间复杂度低的算法。虽然目前的算法对单张带雾图像有较好的还原效果，但是算法复杂度高，运行效率慢，不适用真实场景和视频去雾。所以设计高效率的去雾算法是整个去雾领域研究的难点。目前针对视频的去雾算法主要基于暗

通道算法。而且为了满足算法的实时性要求，通常要对原有图像进行下采样处理，容易丢失图像信息。针对此问题，今后可以设计轻量级深度学习模型，或者根据不同情况对现有模型进行压缩，同时采用多种算法结合的方式进行图像去雾，将有效避免此类问题。

(2) 制作大量真实户外场景下的雾天数据集困难。深度学习算法有很强的学习能力但是其对数据集的要求很高，目前应用比较广泛的去雾数据集主要基于室内场景，还没有室外场景下高质量的数据集，这也是深度学习去雾算法发展的限制，也是待突破的难点。针对室外数据集采集的情况目前只能依靠大量人力和物力解决，未来可以利用人工智能模拟真实户外情况，使得模拟效果与真实情况的差距不会影响实验结果就可以节省大量人力物力。针对数据不足的问题一方面可以采用已有的图像处理技术对现有数据集进行镜像，旋转等变换进行数据集扩展。一方面可以改进迁移学习和自监督学习方式将其应用于图像去雾的深度学习模型中，从而解决样本的问题。

(3) 提升模型的训练速度和鲁棒性。深度学习

的快速发展使得基于深度学习的去雾算法百花齐现,但是同样存在去雾效率低、适用场景单一的问题。目前大多数学者更加关注模型的去雾效果和视觉效果,如何进一步提高模型的训练效率和算法的鲁棒性也是今后研究的重点。针对模型的训练速度同样可以引入迁移学习和监督学习,改善训练数据的质量,从而提升模型训练速度。针对算法的鲁棒性问题可以采用深度学习和图像处理多种算法相结合的方式,对不同的样本选择最适用的处理流程,增加算法的鲁棒性。

参考文献:

- [1] 何新宇,赵时璐,张震,赵天宇. 机器视觉的研究及应用发展趋势[J]. 机械设计与制造, 2020,10(65):281-283+287.
- [2] Karkera T, Singh C. Autonomous Bot Using Machine Learning and Computer Vision[J]. SN Computer Science, 2021, 2(4): 1-9.
- [3] ZHANG X, XU S. Research on Image Processing Technology of Computer Vision Algorithm[C]// 2020 International Conference on Computer Vision, Image and Deep Learning (CVIDL), Chongqing, China, Jul 10-12, 2020. IEEE, 2020: 122-124.
- [4] 禹凤. 图像和视频去雾技术的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2017.
- [5] LIU Q, ZHANG H, LIN M, et al. Research on image dehazing algorithms based on physical model. IEEE, 2011[C]// 2011 International Conference on Multimedia Technology, Hangzhou, China, Jul 26-28, 2011. IEEE, 2011: 467-470.
- [6] Parihar A S, Gupta Y K, Y Singodia, et al. A Comparative Study of Image Dehazing Algorithms[C]// 2020 5th International Conference on Communication and Electronics Systems (ICCES), Coimbatore, Jun 10-12, 2020. IEEE, 2020: 766-771.
- [7] 郭璠,蔡自兴,谢斌,唐璠. 图像去雾技术研究综述与展望[J]. 计算机应用, 2010,30(9): 2417-2421.
- [8] GUO F, CAI Z X, XIE B, TANG J. Review and prospect of image dehazing techniques[J]. Journal of Computer Applications, 2010, 30(9): 2417-2421.
- [9] R. Hide. Optics of the Atmosphere: Scattering by Molecules and Particles[J]. Physics Bulletin, 1977, 24(7): 779-779.
- [10] S. K. Nayar and S. G. Narasimhan. Vision in bad weather[C]// Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on Computer Vision, Piscataway, IEEE, 1999: 820-827.
- [11] 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, 2010, 33(12): 2341-2353.
- [12] Cao N, Lyu S, Hou M, et al. Restoration method of sootiness mural images based on dark channel prior and Retinex by bilateral filter[J]. Heritage Science, 2021, 9(1).
- [13] Wang M W, Zhu F Z, Bai Y Y. An improved image blind deblurring based on dark channel prior[J]. Optoelectronics Letters, 2021, 17(1): 40-46.
- [14] 赵锦威,沈逸云,刘春晓,欧阳毅. 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.
- [15] ZHAO J W, SHEN Y Y, LIU C X, OUYANG Y. Dark channel prior-based image dehazing with atmospheric light validation and halo elimination[J]. Journal of Image and Graphics, 2016, 21(9): 1221-1228.
- [16] 陈高科,杨燕,张宝山. 结合透射率和大气光改进的暗原色先验去雾算法[J]. 计算机应用, 2017,37(5): 1481-1484+1502.
- [17] CHEN G K, YANG Y, ZHANG B S. Improved dark channel prior dehazing algorithm combined with atmospheric light and transmission[J]. Journal of Computer Applications, 2017,37(5): 1481-1484+1502.
- [18] 杨燕,李一菲,岳辉. 一种自适应线性透射率估计去雾算法[J]. 应用光学, 2019,40(3): 447-453.
- [19] YANG Y, LI Y F, YUE H. Adaptive linear transmission estimation dehazing algorithm[J]. Journal of Applied Optics, 2019, 40(3): 447-453.
- [20] Pan Y, Chen Z, Li X, et al. Single-Image Dehazing via Dark Channel Prior and Adaptive Threshold[J]. International Journal of Image and Graphics, 2021: 2150053.
- [21] ZHU M, HE B, WU Q. Single Image Dehazing Based on Dark Channel Prior and Energy Minimization[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2017, 25(2): 174-178.
- [22] Colores S S, Arreguin J M R, Ortega J C P, et al. Efficient single image dehazing by modifying the dark channel prior[J]. EURASIP Journal on Image and Video Processing, 2019, 2019(1): 1-8.
- [23] JIANG Z Y, SUN X D, WANG X C, et al. Image Defogging Algorithm Based on Sky Region Segmentation and Dark Channel Prior[J]. Journal of Systems Science and Information, 2020, 8(5): 92-102.
- [24] LI W, Jie W, Mahmoudzadeh S. Single Image Dehazing Algorithm Based on Sky Region Segmentation[J]. Lecture Notes in Computer Science, 2021, 8(3): 489-500.
- [25] Shiao Y H, Kuo Y T, Chen P Y, et al. VLSI Design of an Efficient Flicker-Free Video Defogging Method for Real-Time Applications[J]. IEEE Transactions on Circuits & Systems for Video Technology, 2019, 19(1): 238-251.
- [26] Jackson J, She K, Agyekum K O, et al. A Fast Single-Image Dehazing Algorithm Based on Dark Channel Prior and Rayleigh Scattering[J]. IEEE Access, 2020, 2(8): 73330-73339.
- [27] WANG Y, Huang T Z, Zhao X L, et al. A convex single image dehazing model via sparse dark channel prior[J]. Applied Mathematics and Computation, 2020, 375: 125085.
- [28] Sabir A, Khurshid K, Salman A. Segmentation-based image defogging using modified dark channel prior[J]. EURASIP Journal on Image and Video Processing, 2020, 2020(1): 1-14.
- [29] 李娜,邓家先,崔亚妮,陈襄丹. 基于暗通道先验的红外图像清晰化及 FPGA 实现[J]. 红外与激光工程, 2021,50 (3): 119-128.

- LI N, DENG J X, CUI Y N, CHEN B D. Stable mode-locked Yb-fiber laser with a 6MHz repetition rate tuning range[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50 (3): 119-128.
- [27] Liu F, Cao L, Shao X P, et al. Polarimetric dehazing utilizing spatial frequency segregation of images[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(27): 8116-8122.
- [28] Wan Z, Zhao K, Chu J. A Novel Attitude Measurement Method Based on Forward Polarimetric Imaging of Sky-light[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2021, 70(99): 1-9.
- [29] Kansal I, Kasana S S. Improved color attenuation prior based image de-fogging technique[J]. *Multimedia Tools and Applications*, 2020, 79(11): 12069-12091.
- [30] Zhang B, Wang M, Shen X. Image Haze Removal Algorithm Based on Nonsubsampled Contourlet Transform[J]. *IEEE Access*, 2021, 9(99): 21708-21720.
- [31] Tufail Z, K Khurshid, Salman A, et al. Improved Dark Channel Prior for Image Defogging using RGB and YCbCr Color Space[J]. *IEEE Access*, 2018, 6(1):32576-32587.
- [32] Mandal G, De P, Bhattacharya D. A real-time fast defogging system to clear the vision of driver in foggy highway using minimum filter and gamma correction[J]. *Sadhana: Published by the Indian Academy of Sciences*, 2020, 45(2): 253-257.
- [33] Ren W, Pan J, Zhang H, et al. Single Image Dehazing via Multi-scale Convolutional Neural Networks with Holistic Edges[J]. *International Journal of Computer Vision*, 2020, 128(1): 240-259.
- [34] 黄鹤, 胡凯益, 郭璐等. 改进的海雾图像去除方法[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2021, 53(8): 81-91.
- HUANG H, HU K Y, GUO L et al. Improved defogging algorithm for sea fog[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2021, 53(8): 81-91.
- [35] YANG A P, WANG Q, JI Z, WANG J. Single underwater image restoration based on adaptive color correction and adaptive transmission fusion[J]. *Journal of Electronic Imaging*, 2020, 29(4): 43006-43006.
- [36] 芮义斌, 李鹏, 孙锦涛, 谢仁宏. 一种交互式图像去雾方法[J]. *计算机应用*, 2006(11): 2733-2735.
- RUI Y B, LI P, SUN J T, XIE R H. Interactive defogging method for image[J]. *Computer Applications*, 2010, 33(12): 2341-2353.
- [37] 郭珈, 王孝通, 杨常青. 海上监测图像去雾增强的交互式方法[J]. *中国航海*, 2010, 33(4): 10-13.
- GUO J, WANG X T, YANG C Q. Interactive Defogging Method for Monitoring Images at Sea[J]. *NAVIGATION OF CHINA*, 2010, 33(4): 10-13.
- [38] MA R, ZHANG S. An improved color image defogging algorithm using dark channel model and enhancing saturation[J]. *Optik International Journal for Light & Electron Optics*, 2019, 180: 997-1000.
- [39] JIN X, Chen Z, Lin J, et al. AI-GAN: Signal DeInterference via Asynchronous Interactive Generative Adversarial Network[C]// 2019 IEEE International Conference on Multimedia and Expo (ICME), Shanghai, Jul 8-12, 2019. IEEE, 2019: 228-233.
- [40] Husain N A, Rahim M, Kari S, et al. VRHAZE: The Simulation of Synthetic Haze Based on Visibility Range for Dehazing Method in Single Image[C]// 2020 6th International Conference on Interactive Digital Media (ICIDM), Bandung, Dec 14-15, 2020. IEEE, 2020: 1-7.
- [41] Schechner Y Y, Narasimhan S G, Nayar S K. Instant dehazing of images using polarization[C]// 2001 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, CVPR 2001, IEEE, 2001: 1-1.
- [42] Schechner Y Y, Narasimhan S G, Nayar S K. Polarization-based vision through haze[J]. *Applied Optics*, 2003, 42(3): 511-525.
- [43] 梁健, 巨海娟, 张文飞, 等. 偏振光学成像去雾技术综述[J]. *光学学报*, 2017, 37(4): 9-21.
- LIANG J, JU H J, ZHANG W F, et al. Review of Optical Polarimetric Dehazing Technique[J]. *ACTA OPTICA SINICA*, 2017, 37(4): 9-21.
- [44] Zhao Y Q, Pan Q, Zhang H C. New polarization imaging method based on spatially adaptive wavelet image fusion[J]. *Optical Engineering*, 2006, 45(12): 1-7.
- [45] Liang J, Ren L Y, Ju H J, et al. Polarimetric dehazing method for dense haze removal based on distribution analysis of angel of polarization[J]. *Journal of Applied Physics*, 2015, 23(20): 36146-26157.
- [46] 代晴晴, 范之国, 宋强, 等. 全局参数自动估计的彩色图像偏振去雾方法[J]. *应用光学*, 2018, 39(4): 511-517.
- DAI Q Q, FAN Z G, SONG Q, et al. Polarization defogging method for color image based on automatic estimation of global parameters[J]. *Journal of Applied Optics*, 2018, 39(4): 511-517.
- [47] 徐浩, 谭一博, 刘博文, 王国宇. 基于超像素和暗通道先验的图像去雾复原方法[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2020, 50(10): 118-124.
- XU H, TAN Y B, LIU B W, WANG G Y. Image Dehazing Method Based on Superpixels and Dark Channel Prior[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2020, 50(10): 118-124.
- [48] 庄秀玲, 谭福奎, 李震, 李良荣. 基于暗通道先验和优化自动色阶的图像去雾算法[J]. *计算机应用与软件*, 2021, 38(7): 190-195.
- ZHUANG X L, TAN F K, LI Z, LI L R. Image Defogging Algorithm Based on Dark Channel Prior and Optimized Auto-color[J]. *Computer Applications and Software*, 2021, 38(7): 190-195.
- [49] ZOU X, Liu Y, TAN Z F, et al. A fog-removing treatment based on combining high-frequency emphasis filtering and histogram equalization[J]. *Key Engineering Materials*, 2011, 39(12): 2198-2202.
- [50] Haller and S. Nedevschi. Design of interpolation functions for subpixel-accuracy stereo-vision systems.[J]. *IEEE transactions on image processing: a publication of the IEEE Signal Processing Society*, 2012, 21(2): 889-898.
- [51] Sengupta Debapriya, Biswas Arindam, Gupta Phalguni. Non-linear weight adjustment in adaptive gamma correction for image contrast enhancement[J]. *Multimedia Tools and Applications*, 2020, 80(3): 1-28.
- [52] 徐建东. 一种直方图均衡插值的图像细节增强方法[J]. *江苏理工学院学报*, 2020, 26(2): 23-29.
- XU J D. Method of Image Detail Enhancement Using Histogram Equalization and Interpolation[J]. *Journal of Jiangsu University of Technology*, 2020, 26(2): 23-29.
- [53] Dar K A, Mittal S. An Enhanced Adaptive Histogram

- Equalization Based Local Contrast Preserving Technique for HDR Images[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2021, 1022(1): 012119.
- [54] Kim J. Y., Kim L. S., Hwang S. H. An advanced contrast enhancement using partially overlapped sub-block histogram equalization[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2001, 11(4): 475-484.
- [55] Soni B., Mathur P. An Improved Image Dehazing Technique using CLAHE and Guided Filter[C]// 2020 7th International Conference on Signal Processing and Integrated Networks (SPIN), Noida, Feb 27-28, 2020. IEEE, 2020: 902-907.
- [56] Land E. Lightness and Retinex Theory[J]. Journal of the Optical Society of America, 1971, 61(1): 1-11.
- [57] Jobson D. J., Rahman Z. Properties and performance of a center/surround Retinex[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1997, 6(3): 451-462.
- [58] Jobson D. J., Rahman, et al. A multiscale retinex for bridging the gap between color images and the human observation of scenes[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1997, 6(7): 965-976.
- [59] 李梦蕊, 柳晓鸣, 常婧. 基于颜色衰减先验的自适应 Retinex 去雾算法[J]. 计算机仿真, 2021, 38(1): 354-358.
- [60] LI M R, LIU X M, CHANG J. An adaptive Retinex of Image Haze Removal Based on Color Attenuation Prior[J]. Computer Simulation, 2021, 38(1): 354-358.
- [61] Ziaur R and Daniel J. Jobson and Glenn A. Woodell. Retinex processing for automatic image enhancement[J]. Journal of electronic imaging, 2004, 13(1): 100-110.
- [62] Zhou J, Zhang D, Zou P, et al. Retinex-Based Laplacian Pyramid Method for Image Defogging[J]. IEEE Access, 2019, 7: 122459-122472.
- [63] Zhang W, Dong L, Pan X, et al. Single Image Defogging Based on Multi-Channel Convolutional MSRCR[J]. IEEE Access, 2019, 7(1): 72492-72504.
- [64] Yao L P, Pan Z L. The Retinex-based image dehazing using a particle swarm optimization method[J]. Multimedia Tools and Applications, 2020(1): 1-18.
- [65] 周树道, 王敏, 黄峰, 等. 基于亮度小波变换和颜色改善的彩色图像去雾研究[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2011, 16(4): 59-62.
- ZHOU S D, WANG M, HUANG F, et al. Color Image Defogging Based on Intensity Wavelet Transform and Color Improvement[J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2011, 16(4): 59-62.
- [66] LIU F, CAO L, SHAO X, et al. Polarimetric dehazing utilizing spatial frequency segregation of images[J]. Applied Optics, 2015, 54(27): 8116-22.
- [67] Kaplan N H, Ayten K K, Dumlu A. Single image dehazing based on multiscale product prior and application to vision control[J]. Signal, Image and Video Processing, 2017, 11(8): 1389-1396.
- [68] Khan H, Sharif M, Bibi N, et al. Localization of Radiance Transformation for Image Dehazing in Wavelet Domain[J]. Neurocomputing, 2019, 381: 141-151.
- [69] ZHANG W, Gao S, Jing C, et al. Single Image Dehazing Method under the Influence of Un-uniform Illumination[C]// Dependable, Autonomic & Secure Computing, Intl Conf on Pervasive Intelligence & Computing, Intl Conf on Big Data Intelligence & Computing & Cyber Science & Technology Congress, Auckland, Aug 8-12, 2016. IEEE, 2016: 233-238.
- [70] 李开伟, 张立亭, 等. 基于改进同态滤波的无人机影像清晰化[J]. 计算机与数字工程, 2018, 46(7): 1446-1451.
- LI K W, ZHANG L T, LIAO Q Q. Clarity of UAV Image Using Improved Homomorphic Filtering[J]. Computer & Digital Engineering, 2018, 46(7): 1446-1451.
- [71] Lü X, Liu Y, Lü Q, et al. Real-Time Domain Transform Recursive Filtering Dehazing Method Based on Polarization Image[C]// 2019 12th International Congress on Image and Signal Processing, BioMedical Engineering and Informatics (CISP-BMEI), Suzhou, China, Oct 19-21, 2019. IEEE, 2019: 1-6.
- [72] Singh D, V Kumar. Single image defogging by gain gradient image filter[J]. Science China(Information Sciences), 2019, 62(7): 225-227.
- [73] Liang J, Ju H, Ren L, et al. Generalized Polarimetric Dehazing Method Based on Low-Pass Filtering in Frequency Domain[J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2020, 20(6): 1729.
- [74] Fan Y, Zhang L, Guo H, et al. Image Processing for Laser Imaging Using Adaptive Homomorphic Filtering and Total Variation[J]. Photonics, 2020, 7(2): 30.
- [75] Chen Z, Ou B. Visibility Detection Algorithm of Single Fog Image Based on the Ratio of Wavelength Residual Energy[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2021, 2021(8): 1-13.
- [76] JI X Q, CHENG J Z, DU H, ZHANG T T. An Optimization Algorithm of Image Defogging Based on Retinex[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 644(650): 4431-4434.
- [77] 杨爱萍, 白煌煌. 基于 Retinex 理论和暗通道先验的夜晚图像去雾算法[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(4): 147-153.
- 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): 147-153.
- [78] LI Z, LI G, NIU B, et al. Sea Cucumber Image Dehazing Method by Fusion of Retinex and Dark Channel[J]. IFAC-Papers On Line, 2018, 51(17): 796-801.
- [79] LIU X, LIU C, LAN H, et al. Dehaze Enhancement Algorithm Based on Retinex Theory for Aerial Images Combined with Dark Channel[J]. Open Access Library Journal, 2020, 7(4): 1-12.
- [80] 高古学, 赖惠成, 刘月琴. 结合 CLAHE 和改进 MSRCR 的沙尘图像增强[J]. 计算机仿真, 2020, 37(8): 157-161+430.
- GAO G X, LAB H C, LIU Y Q. Sand-dust Image Enhancement Combining CLAHE with Improved MSRCR[J]. Computer Simulation, 2020, 37(8): 157-161+430.
- [81] Cai B, XU X, 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.
- [82] Yeh Chia-Hung, Huang Chih-Hsiang, Kang Li-Wei. Multi-Scale Deep Residual Learning-Based Single Image Haze Removal via Image Decomposition[J]. IEEE transactions on image processing: a publication of the IEEE Signal Processing Society, 2019, 29(1): 3153-3167.
- [83] YUAN K, LU W, WEI J, et al. Single Image Dehazing via NIN-DehazeNet[J]. IEEE Access, 2019, 7: 181348-181356.
- [84] 郭青山, 黄玉清. 基于 DehazeNet 与边缘检测均值引导滤波

- 波图像去雾算法[J].传感器与微系统, 2020,39(1): 150 - 153.
- GUO Q S, HUANG Y Q. Image dehazing algorithm based on DehazeNet and edge detection mean-guided filtering[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2020, 39(1): 150-153.
- [85] W. Chen, H. Fang, J. Ding and S. Kuo. PMHLD: Patch Map-Based Hybrid Learning DehazeNet for Single Image Haze Removal[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2020, 29(1): 6773-6788.
- [86] WANG J, LI C, XU S. An ensemble multi-scale residual attention network (EMRA-net) for image Dehazing[J]. Multimedia Tools and Applications, 2021: 1-21.
- [87] Bhola A, Sharma T, Verma N K. DCNet: Dark Channel Network for single-image dehazing[J]. Machine Vision and Applications, 2021, 32(3).
- [88] YANG S, SUN Z Y, JIANG Q, et al. A Mixed Transmission Estimation Iterative Method for Single Image Dehazing[J]. IEEE Access 2021, 9(1): 63685-63699.
- [89] ZHANG H, Patel V M. Densely Connected Pyramid Dehazing Network[C]//2018 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, CVPR 2018, IEEE, 2018: 3194-3203.
- [90] 李硕士,刘洪瑞,甘永东等.基于残差密集块与注意力机制的图像去雾网络[J].湖南大学学报(自然科学版),2021,48(6): 112-118.
- LI S S, LIU H R, GAN Y D et al. Image Dehazing Network Based on Residual Dense Block and Attention Mechanism[J]. Journal of Hunan University(Natural Sciences),2021,48(6): 112-118.
- [91] 杨振舰,尚佳美,张众维等. 基于残差注意力机制的图像去雾算法[J].西北工业大学学报,2021,39(4): 901-908.
- YANG Z J, SHANG J M, ZHANG Z W et al. A new end-to-end image dehazing algorithm based on residual attention mechanism[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2021,39(4): 901-908.
- [92] CHEN D D, HE M M, FAN A N, et al. Gated Context Aggregation Network for Image Dehazing and Deraining[C]//2018 IEEE Winter Conference on Applications of Computer Vision, Piscataway, IEEE, 2019: 1375-1383.
- [93] LI B Y, PENG X L, WANG Z Y, et al. Feng. AOD-Net: All-in-One Dehazing Network [C]//2017 IEEE International Conference on Computer Vision, ICCV 2017, IEEE 2017: 4780-4788.
- [94] Ren W, Ma L, Zhang J, et al. Gated Fusion Network for Single Image Dehazing[C]//2018 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, CVPR 2018, IEEE, 2018: 3253-3261.
- [95] 肖进胜,申梦瑶,雷俊峰等.基于生成对抗网络的雾霾场景图像转换算法[J].计算机学报,2020,43(1):165-176.
- XIAO J S, SHEN M Y, LEI J F et al. Image Conversion Algorithm for Haze Scene Based on Generative Adversarial NetWorks[J]. ,2020,43(1): 165-176.
- [96] Engin D, Gen A, Ekenel H K. Cycle-Dehaze: Enhanced CycleGAN for Single Image Dehazing[C]// 2018 IEEE/ CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW), Salt Lake City, Jun 18-22, 2018. IEEE, 2018: 938-9388.
- [97] Mehta, H. Sinha, P. Narang and M. Mandal. HiDeGan: A Hyperspectral-guided Image Dehazing GAN[C]// 2020 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW), Seattle, Jun 14-19, 2020. IEEE, 2020: 846-856.
- [98] 黄文君,李杰,齐春. 低秩与字典表达分解的浓雾霾场景图像去雾算法[J]. 西安交通大学学报, 2020, 54(4):124-131.
- HUANG W J, LI J, QI C. A Defogging Algorithm for Dense Fog Images via Low-Rank and Dictionary Expression Decomposition[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2020, 54(4): 124-131.
- [99] 孙斌, 睢青青, 桑庆兵. 结合 FC-DenseNet 和 WGAN 的图像去雾算法[J]. 计算机科学与探索, 2020, 14(8): 1380-1388.
- SUN B, JU Q Q, SANG Q B. Image Dehazing Algorithm Based on FC-DenseNet and WGAN[J]. Journal of Frontiers of Computer Science and Technology, 2020, 14(8): 1380-1388.
- [100] 刘广洲, 李金宝, 任东东, 舒明雷. 密集连接扩张卷积神经网络的单幅图像去雾[J]. 计算机科学与探索, 2021, 15(1): 185-194.
- LIU G Z, LI J B, REN D D, SHUM L. Single Image Dehazing Method Based on Densely Connected Dilated Convolutional Neural Network[J]. Journal of Frontiers of Computer Science and Technology, 2021, 15(1): 185-194.
- [101] DONG H, PAN J S, XIANG L, et al. Multi-scale boosted dehazing network with dense feature fusion[C]//IEEE/ CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2020: 2154-2164.
- [102] ZHANG S, REN W, YAO J. Feed-Net: Fully End-to-End Dehazing[C]// 2018 IEEE International Conference on Multimedia and Expo (ICME), San Diego, Jul 23-27, 2018. IEEE Computer Society, 2018: 1-6.
- [103] XU L, ZHAO D, YAN Y, et al. IDeRs: Iterative dehazing method for single remote sensing image[J]. Information Sciences, 2019, 489: 50-62.
- [104] REN W, PAN J, ZHANG H, et al. Single Image Dehazing via Multi-scale Convolutional Neural Networks with Holistic Edges[J]. International Journal of Computer Vision, 2020, 128(1): 240-259.
- [105] Sharma T, Agrawal I, Verma N K. CSIDNet: Compact single image dehazing network for outdoor scene enhancement[J]. Multimedia Tools and Applications, 2020, 79(8): 30769-30784.
- [106] WU Q, REN W, X C. Learning Interleaved Cascade of Shrinkage Fields for Joint Image Dehazing and Denoising[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2019, 29: 1788-1801.
- [107] LIU W, HOU X, DUAN J, et al. End-to-End Single Image Fog Removal Using Enhanced Cycle Consistent Adversarial Networks[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2020, 29(99): 7819-7833.