

偏振暗通道融合去雾方法

朱思睿¹, 王 霞^{1*}, 焦岗成², 何惠洋², 张 鑫¹

(1. 北京理工大学 光电学院 光电成像技术与系统教育部重点实验室, 北京 100081;
2. 微光夜视技术重点实验室, 陕西 西安 710065)

摘 要: 雾霾天气下, 受粒子散射影响, 传统相机采集图像模糊失真。偏振成像作为一种新型光电成像技术, 能够利用偏振信息提取目标形状、纹理等细节信息, 在去雾领域广受关注。现有的偏振去雾算法大多需要提取天空区域, 提取过程复杂也易引入伪影, 且计算出的偏振度与偏振角图像受微粒散射效应影响, 信息损失严重。针对上述问题, 提出了一种基于偏振暗通道的融合去雾方法。通过计算偏振暗通道估计大气光与透过率函数, 结合雾霾成像模型对图像进行恢复, 并使用全局自适应灰度映射方法恢复去散射后的亮度损失。同时针对图像细节模糊问题, 引入局部直方图均衡化方法对强度图像对比度进行提升, 最后, 使用小波融合综合提取两种方法的优势, 对高频分量采用局部显著性融合, 低频分量采用加权平均值融合。基于雾天偏振图像的处理结果表明, 文中方法去雾效果与现有几种去雾方法相比, 几项图像评价指标均具有显著提升, 其中平均梯度 (AG) 提升了 2.23, 信息熵 (Entropy) 提升了 0.12。从主观效果可以看出, 文中所提出的融合去雾方法可以更好地去除雾霾散射影响, 从而获得质量较高且细节保留较好的去雾图像。

关键词: 图像去雾; 偏振去雾; 暗通道先验; 图像融合; 灰度映射

中图分类号: TP391.4 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20240195

0 引 言

为实现恶劣雾霾天气条件下的清晰成像, 图像去雾成为目前研究的热点问题, 其通常用于改善视觉质量、提高图像可见度以及在特定环境中进行光学分析, 广泛应用于遥感、目标识别、国防军事及自动驾驶等领域^[1]。

现有的去雾方法可以分为以下几大类: 基于先验与假设的复原算法^[2-4]、图像增强算法^[5-7]以及深度学习去雾算法^[8-11]。

基于先验与假设的复原算法效果通过建立先验与物理模型进行去雾推导, 效果通常取决于先验有效性, 且在一些场景中去雾效果并不完全。图像增强算法通常没有考虑退化机制, 产生过增强或增强不足的现象, 导致信息丢失、饱和度过高等问题。深度学习去雾算法作为近年来新兴起的图像去雾方法, 去雾效果显著, 但其需要大量的模糊图像以及对应的真值图

像作为数据集, 且泛化能力不足。

近年来, 偏振成像在图像去雾领域引起了广泛关注, 其在获取强度信息的同时也获取到了偏振信息。SCHECHNER 等^[1]提出大气光与目标信息光存在偏振特性的差异, 通过获取偏振差分图像, 估算大气光偏振信息, 结合雾天成像模型进行去雾。MENG 等^[12]通过测量全 Stokes 矢量提取最亮与最暗图像, 并提出了四分暗通道均值比较法, 有效提升了暗通道去雾质量。YOU 等^[13]通过提取天空区域, 估计大气光偏振度与偏振角, 进而计算各像素点大气光强, 并通过暗通道获得的无穷远处大气光强, 代入大气退化模型进行图像恢复。WANG 等^[14]结合暗通道先验原理, 计算偏振强度最小通道获取偏振暗通道, 进而估算大气光强并优化透过率, 实现了偏振图像的增强。WU 等^[15]利用圆偏光在米氏散射介质中的良好保偏特性, 简化了散射光偏振度估计, 并有效提高了去雾效果。

现有的偏振去雾方法大多需要对天空区域进行

收稿日期: 2024-05-07; 修订日期: 2024-06-20

作者简介: 朱思睿, 男, 硕士生, 主要研究方向为透散射偏振成像。

导师(通讯作者)简介: 王霞, 女, 副教授, 博士, 主要研究方向为微光与超宽波段成像。

处理^[16],用于估计大气光偏振度等信息,这未免会使计算复杂性增加,提取过程中也易产生边界效应,导致出现伪影或失真。且计算的偏振度、偏振角图像受环境因素影响,易产生噪声而导致部分区域细节模糊。同时,去雾算法的目标是通过减少或消除雾霾引起的光散射效应,以恢复原始图像中由于散射效应而丢失的细节,但其往往也会造成图像的亮度损失,导致图像灰暗、视觉质量下降。为解决上述问题,文中提出了一种偏振融合去雾算法,基于偏振暗通道的思想估计大气光与透过率函数,结合大气去雾模型进行偏振去雾处理,并采用全局自适应灰度映射方法恢复图像亮度。为进一步分析雾霾对图像退化影响,采取人工造雾的方式采集同一场景下的真值与雾霾图像,对比发现存在图像细节模糊的问题。因此,引入局部直方图均衡化方法增强图像对比度,将偏振去雾的结果与局部直方图均衡化所得结果进行小波变换融合,

得到细节保留较好且对比度较高的去雾图像。

1 偏振融合去雾算法模型

1.1 算法流程

文中算法流程如图 1 所示,首先使用 FLIR 生产的 BFS-U3-51 S5 P-C 分焦平面相机采集雾霾偏振图像。其传感器相邻四个像素分布着四个不同方向的纳米级偏振滤波器,可同时采集 0° 、 45° 、 90° 、 135° 四个方向的偏振图像,图像分辨率大小为 $2448 \text{ pixel} \times 2048 \text{ pixel}$ 。采集雾霾图像后,一方面结合暗通道先验思想,获取偏振暗通道图像估算大气光与透过率,进而计算出目标图像,引入全局自适应灰度映射方法恢复图像亮度,获得偏振暗通道去雾图像。另一方面通过计算 Stokes 矢量获取强度图像,对强度图像进行局部直方图均衡化处理,获得对比度增强图像。最后,将两种处理方法所得图像结果采取小波变换进行高

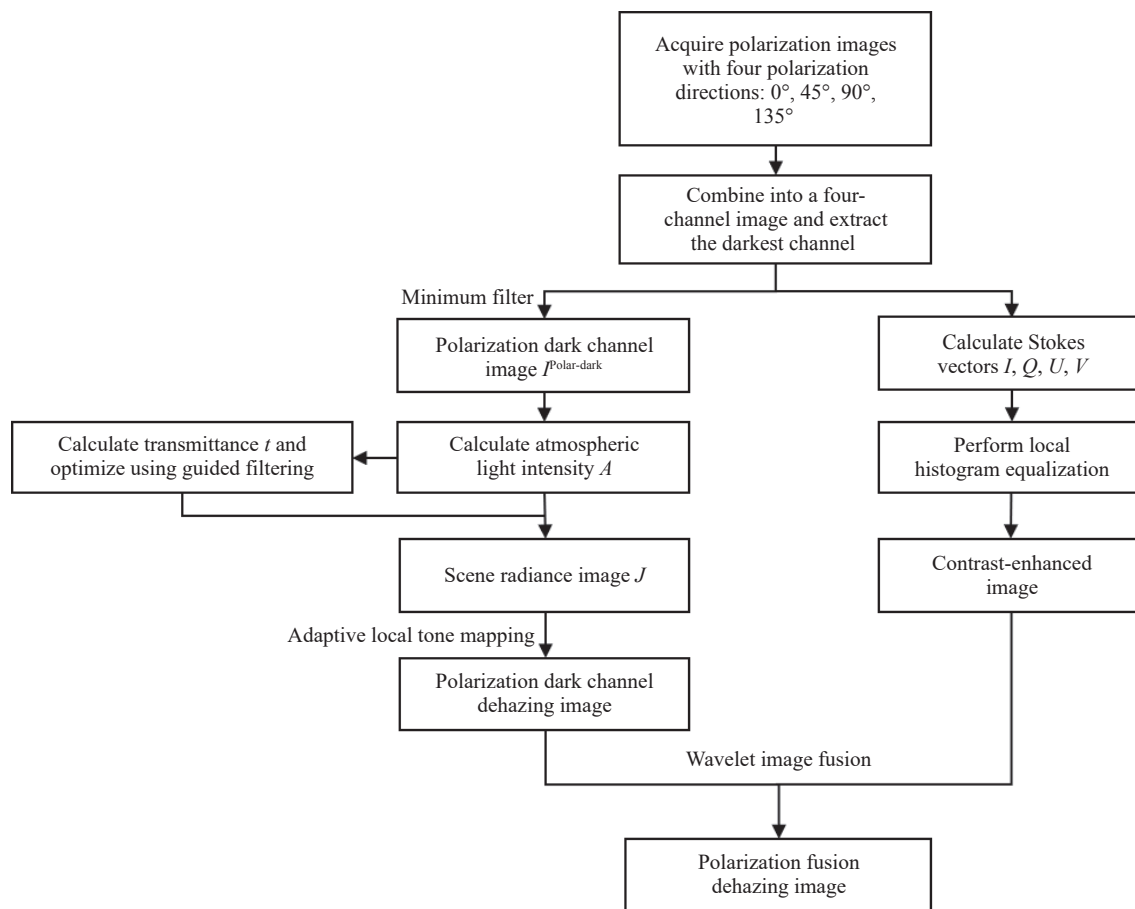


图 1 偏振融合去雾算法流程图

Fig.1 Flowchart of polarization fusion dehazing algorithm

低频的进一步融合, 获得偏振融合去雾图像。

1.2 雾霾成像模型

在雾天环境下成像探测器得到的总光强共包含两部分^[17]: 一部分是景物辐射和反射光强在经过大气衰减之后到达成像系统接收面的光; 另一部分是太阳光经过空气中微粒散射后到达成像系统的杂散光, 如公式 (1) 所示:

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

式中: $I(x)$ 表示观测强度; $J(x)$ 表示场景亮度; A 表示大气光; $t(x)$ 为介质透射率。等式右边第一项 $J(x)t(x)$ 表示场景亮度在介质中衰减后的亮度, 也可称为直接照明。第二项 $A(1 - t(x))$ 则表示空气照明光。当介质均匀时, 透过率 $t(x)$ 随场景深度呈指数衰减:

$$t(x) = e^{-\beta d(x)} \quad (2)$$

式中: β 表示大气的散射系数; d 表示场景深度。

因此, 去雾的目标是从已知的 $I(x)$ 中恢复出 $J(x)$ 、大气光 A 和介质透射率 $t(x)$ 。

1.3 偏振暗通道去雾

由 HE^[18] 提出的暗通道先验方法中, 通过获取 r 、 g 、 b 三个通道中的最小值计算暗通道 $J^{\text{dark}}(x)$, 进而从有雾图像中获取大气光 A 与介质透射率 $t(x)$ 。其核心思想是寻找图像中某个窗口内的最小值, 这不受图像的颜色通道数量的限制。而偏振图像可以获取强度图像无法捕捉的偏振信息, 由于雾霾颗粒的散射作用, 散射光往往呈现出特定的偏振状态, 通过改变偏振检偏角度, 利用偏振特性进行去雾, 可获得更高质量的去雾图像。

因此, 文中将分焦平面相机获取的偏振图像提取出的四张不同偏振方向图像, 组合为四通道图像, 取每个像素中四通道的最小值计算偏振暗通道 $J^{\text{Polar-dark}}$, 尽可能保留图像的偏振信息。偏振暗通道中 $J^{\text{Polar-dark}}(x)$ 的获取如公式 (3) 所示:

$$J^{\text{Polar-dark}}(x) = \min_{y \in \Omega(x)} \left(\min_{c \in \{0.45, 90, 135\}} J^c(y) \right) \quad (3)$$

式中: $J^c(y)$ 表示四通道偏振图像场景亮度; $\Omega(x)$ 为一个以 x 为中心的矩形窗口。

从偏振暗通道图中按照亮度的大小取前 0.1% 的像素, 记录这些像素位置, 在原始有雾图像 I 中寻找对应的具有最高亮度的点的值, 作为大气光 A 值。对雾

霾成像模型进行归一化, 两边同时除以每个通道的大气光值:

$$\frac{I^c(x)}{A^c} = t(x) \frac{J^c(x)}{A^c} + 1 - t(x) \quad (4)$$

假设在图像中一定大小的矩形窗口 $\Omega(x)$ 内, 介质透过率 $t(x)$ 为定值, 文中窗口设置为 7×7 , 对上式两边作最小化运算:

$$\min_{y \in \Omega(x)} \left(\min_c \frac{I^c(y)}{A^c} \right) = \tilde{t}(x) \min_{y \in \Omega(x)} \left(\min_c \frac{J^c(y)}{A^c} \right) + 1 - \tilde{t}(x) \quad (5)$$

根据暗通道先验中 $J^{\text{Polar-dark}}(x)$ 可近似为 0, 则有:

$$J^{\text{Polar-dark}}(x) = \min_{y \in \Omega(x)} (\min_c J^c(y)) = 0 \quad (6)$$

且大气光 A^c 始终为正值, 则有:

$$\min_{y \in \Omega(x)} \left(\min_c \frac{J^c(y)}{A^c} \right) = 0 \quad (7)$$

将公式 (7) 代入公式 (5) 中, 即可计算介质透过率的估计值为:

$$\tilde{t}(x) = 1 - \min_{y \in \Omega(x)} \left(\min_c \frac{I^c(y)}{A^c} \right) \quad (8)$$

为进一步细化透过率函数, 使用原图像作为引导图像, 对 $\tilde{t}(x)$ 进行导向滤波处理。最后将所得到的 A 与 $t(x)$ 代入公式 (1) 中, 求得 $J(x)$, 进而获得复原图像。

1.4 灰度映射

前文中提出的偏振暗通道去雾方法具有较好的实时性与去雾效果, 但由于去雾过程中减少了光的散射效应, 从而引起图像强度退化, 即图像中的亮度差异减小, 整体看起来较为暗淡。为保持图像的视觉质量, 文中引入了全局自适应灰度映射方法^[19], 全局自适应原理如公式 (9) 所示:

$$L_g(x, y) = \frac{\log(L_w(x, y) / \bar{L}_w + 1)}{\log(L_{w\max} / \bar{L}_w + 1)} \quad (9)$$

式中: $L_g(x, y)$ 表示全局自适应处理后的结果; $L_w(x, y)$ 为输入图像的强度值; $L_{w\max}$ 为输入图像强度的最大值; $\bar{L}_w$ 为输入图像的强度值的对数平均值, 其计算公式如公式 (10) 所示:

$$\bar{L}_w = \exp\left(\frac{1}{m \times n} \sum \log(\sigma + L_w(x, y))\right) \quad (10)$$

式中: $m \times n$ 表示图像的尺寸; σ 设置为 0.001, 避免对亮度为 0 的纯黑色像素进行对数计算时数值溢出。灰度映射处理效果如图 2 所示。



图 2 去雾与灰度映射。(a) 有雾图; (b) 偏振去雾; (c) 灰度映射

Fig.2 Dehazing and tone mapping. (a) Hazy image; (b) Polarization dehazing; (c) Tone mapping

1.5 雾霾图像分析

雾霾对图像的影响是一个复杂的过程,其涉及光传播、散射和吸收等多种物理现象,导致图像退化失真。为进一步提升去雾效果,需对退化图像进行分析。文中设计了雾霾图像采集实验,以分析雾霾图像与真值图像之间的变化与差异。在封闭的透明方箱中放置目标物,使用艺骁生产的 LED-500 油滴造雾机

人工模拟雾霾影响,排烟量为 $6000 \text{ ft}^3/\text{min}$,并通过分焦平面偏振相机采集图像,所得图像及其强度分布三维图如图 3 所示。

对实验图像分析可知,真值图像中目标部分的图像梯度变化明显,轮廓清晰,而背景部分的灰度变化则相对平缓。然而,受到雾霾的散射效应影响,图像整体特性趋于平滑,且灰度范围缩减,导致图像对比度减弱、细节模糊、部分信息丢失。值得注意的是,雾霾影响导致的信息损失是不可逆的,经过偏振暗通道去雾处理后,虽恢复了一部分细节信息,但对比度提升有限。若使用基于图像平滑的去噪算法固然可以有效减少图像中的噪声,却会使细节进一步丢失而导致图像模糊。为进一步提升图像质量,应采用对比度增强方法,提高图像的清晰度和对比度。

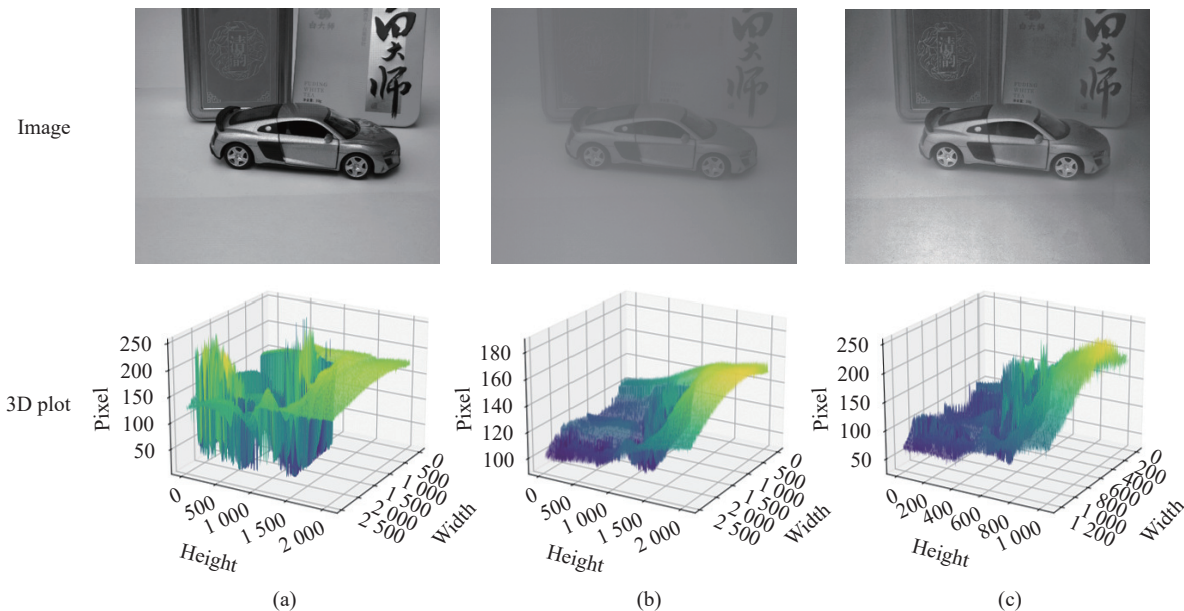


图 3 实验图像及其灰度分布三维图。(a) 真值图像; (b) 雾霾图像; (c) 偏振暗通道去雾图像

Fig.3 Experimental image and grayscale distribution three-dimensional plot. (a) Ground truth image; (b) Hazy image; (c) Polarization dark channel dehazing image

1.6 对比度增强

根据上文图像分析结果可知,雾霾散射导致了图像部分信息的丢失,采用偏振暗通道去雾方法能够恢复一定的细节信息,但对图像梯度的恢复有限,需要引入对比度增强方法对去雾效果进一步优化。文中引入了局部直方图均衡化方法,作为经典的图像增强算法,该方法将图像划分为多个局部区域,并对每一区域内的像素执行直方图均衡化操作,通过增强图像

的对比度和亮度分布,强化图像的局部细节和结构,从而改善图像的视觉效果^[20]。

为还原场景的亮度分布,文中通过计算 Stokes 矢量获取强度图像来使用直方图均衡化,计算公式如下:

$$S = \begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_0(x,y) + I_{90}(x,y) \\ I_0(x,y) - I_{90}(x,y) \\ I_{45}(x,y) - I_{135}(x,y) \\ I_R(x,y) - I_L(x,y) \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中: I 表示目标强度; Q 表示水平和垂直线偏振方向强度差; U 表示对角线方向辐射强度差; V 代表右旋圆偏振光和左旋圆偏振光强度之差。

在实验中, 因为不涉及偏振度与偏振角的计算, 因此只需采用目标强度 I 。对计算所得强度图像进行局部直方图均衡化处理, 局部窗口值设置为 3×3 , 处理结果如图 4 所示。图像存在过度增强、亮度分布不均匀以及边缘伪影等现象, 但整体对比度得到显著提升, 纹理特征更为明显。

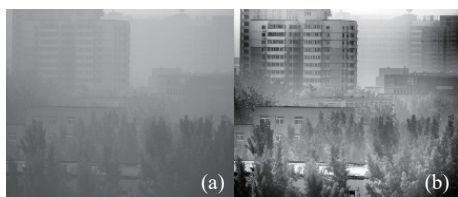


图 4 局部直方图均衡化处理。(a) 强度图; (b) 增强图

Fig.4 Local histogram equalization processing. (a) Intensity image; (b) Enhanced image

1.7 小波图像融合

前文的偏振暗通道去雾方法有效利用了偏振信息去除雾霾, 恢复出图像的清晰细节, 且图像整体质量较高, 但对对比度提升有限。局部直方图均衡化方法显著提升了图像对比度, 但存在图像部分失真等问题。

因此, 结合上述两种方法, 可以在去除雾霾的同时进一步增强图像的对比度和细节, 从而获得更为清晰、明亮的图像效果。

基于小波变换的图像融合是一种常用的图像融合处理技术, 其在不同的尺度和方向上分析图像的特征, 最大限度地提取各自信道中的有益信息, 并将其综合以生成高质量的图像, 因此文中使用 Daubechies 小波对局部直方图均衡化处理图像与偏振暗通道去雾处理图像进行二维小波分解。对低频分量采用加权平均融合策略, 确保二者图像的全局结构和主要特征得到保留。对高频分量采用局部显著性融合策略, 基于显著性图生成权重掩码, 并使用局部滤波对权重掩码进行处理, 进而确定最终的融合系数。高频分量中包含更多的细节和纹理信息, 使用局部显著性策略融合高频系数可以确保融合结果更为细致和丰富。

图 5 展示了融合后的效果, 右下角为图中方框区

域的放大效果, 可以看出楼体的细节凸显更多, 灰度分布也更为均匀。融合图像保留了偏振暗通道优秀的去雾效果, 改善了局部直方图均衡化增强后的边缘伪影以及部分失真, 提高去雾图像的视觉质量。

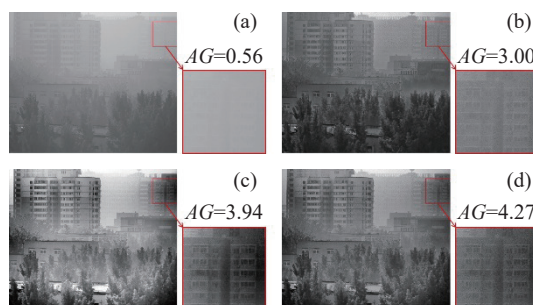


图 5 融合去雾效果。(a) 有雾图; (b) 偏振暗通道去雾; (c) 局部直方图均衡化; (d) 融合图像

Fig.5 Fusion dehazing effects. (a) Hazy image; (b) Polarization dark channel dehazing; (c) Local histogram equalization; (d) Fused image

2 实验结果与分析

在文中算法验证中采用了两组图像数据集, 第一组为 2023 年 9 月拍摄的真实雾天场景下的偏振图像, 用于算法在实际应用环境下的验证。第二组为室内环境采集的模拟雾天环境的偏振图像, 通过人工调整雾霾浓度, 开展不同雾霾等级下的比较分析。所用设备为 FLIR 生产的 BFS-U3-51S5P-C 分焦平面偏振相机, 图像像素数为 $2448 \text{ pixel} \times 2048 \text{ pixel}$, 像元尺寸为 $3.45 \mu\text{m}$ 。共拍摄 40 组不同场景的真实雾天图像和 20 组不同目标物的模拟雾天图像作为算法测试集。文中实验采用的 CPU 为 Intel(R) Core(TM) i7-10700, 处理一张测试集图像的平均时间约为 0.32 s。

为证明该算法的效果优越性, 选用的对比算法包括 Retinex 增强算法^[21]、WANG 的基于暗通道的偏振去雾算法^[14]、基于深度学习 C2Pnet^[8]和 D-former^[9]。真实雾天场景去雾效果如图 6 所示, Retinex 算法作为一种图像增强算法, 通过自适应对比度增强和光照恢复进行去雾, 有效地改善图像质量, 但其在处理复杂场景以及天空区域时表现不佳。WANG 的算法计算偏振暗通道进行去雾, 有效减少了雾霾效应, 远近处的场景细节恢复效果均较好。但该算法并未对去除散射效应后的亮度进行补偿, 导致图像较为灰暗, 且

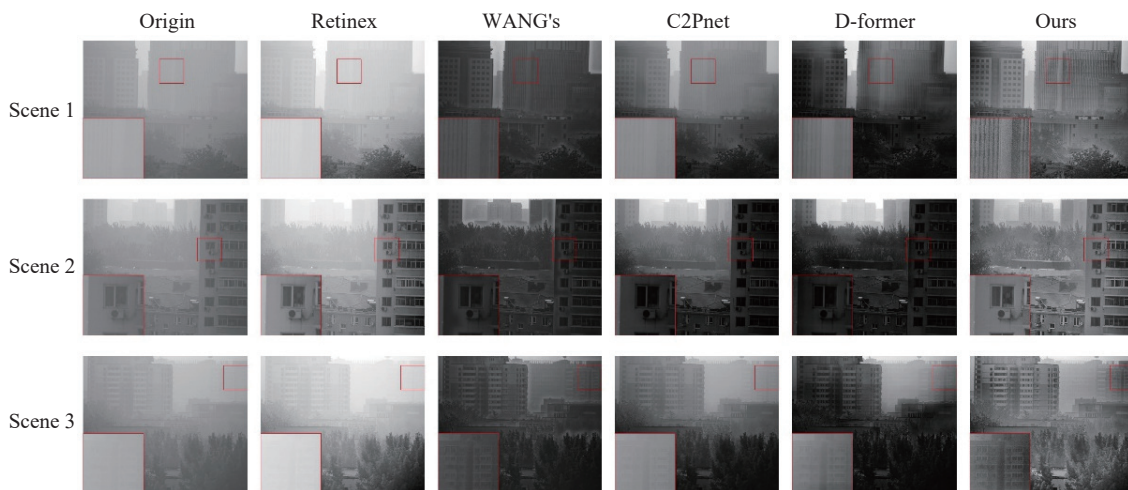


图 6 真实雾天场景去雾效果对比

Fig.6 Comparison of dehazing effects in real hazy scenes

场景深度交界的边缘处会出现光晕。C2Pnet 对近处的场景去雾效果较好,但远处的场景依旧模糊。D-former 方法整体去雾效果较为优越,且环境适应性较好,但依旧存在部分光照不均匀的问题。文中算法无论在近处还是远处都可以进行较高质量的去雾,细节信息恢复较多,且图像视觉质量较高。

为验证算法在不同雾霾浓度下的去雾效果,同样使用上述算法对模拟雾天图像进行处理,去雾效果如图 7 所示。由于人工搭建的场景中并不包含天空区域,且场景较为单一,因此 Retinex 算法表现有所提升。WANG 的算法对于目标物去雾效果较好,但目标边缘的光晕更为明显,且背景区域过于灰暗。C2Pnet 与 D-former 对近处目标的去雾效果依旧明显,但对远处目标和背景区域仍存在部分模糊现象,且随雾霾浓度增加而更为严重。由于人造场景中大气光受反射影响严重,从而导致其分布不均匀,经文中算

法处理的图像背景区域存在一定噪声与伪影现象,但整体去雾效果依旧表现优秀,在薄雾和浓雾情况均保持良好的去雾性能。综合分析上述去雾算法结果可以得出,去雾精度主要受雾霾浓度、场景深度以及大气光分布影响。WANG 的算法与文中算法作为偏振去雾算法,利用了偏振信息的独特优势,能够有效消除雾霾所引起的散射效应,并充分挖掘图像的边缘特征,对于远处场景以及细节区域有着更好的复原效果。

为了更加客观地评价去雾图像效果。采用对比度 (Contrast)、熵增强度量 (EME)、平均梯度、局部标准差 (L_{SD})、信息熵^[22]这五种常用的图像质量评估指标对不同方法的图像进行定量比较,取各组数据集图像的各项指标平均值,结果见表 1、表 2。

总体来看,经文中算法处理后的图像质量得到了显著提升,对比度提升尤为明显,这表示图像结构更

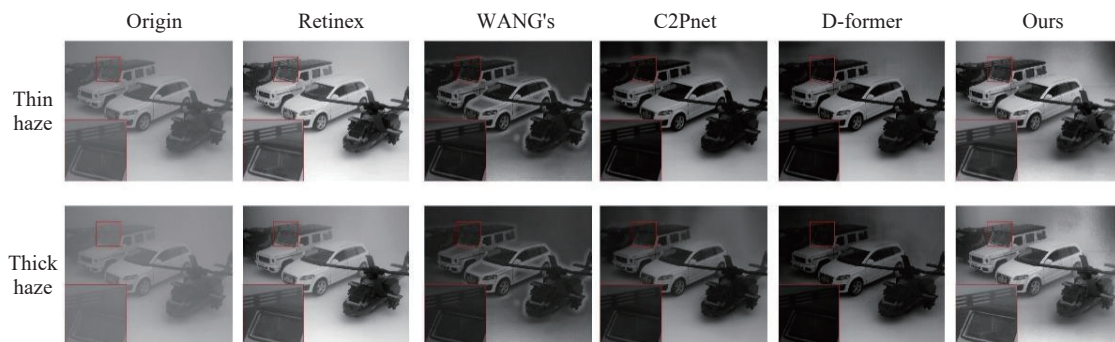


图 7 模拟雾天场景去雾效果对比

Fig.7 Comparison of dehazing effects in simulated hazy scenes

表 1 真实雾天场景效果评估

Tab.1 Evaluation of dehazing effects in real hazy scenes

Method	Contrast	EME	AG	L_{SD}	Entropy
Origin	3.71	0.48	0.87	1.97	6.50
Retinex	10.14	0.87	1.48	3.41	7.02
WANG's	21.48	2.44	2.07	4.41	6.73
C2Pnet	10.33	1.91	1.51	3.34	7.12
D-former	17.27	3.41	1.72	4.15	7.09
Ours	98.42	3.84	4.30	8.47	7.24

表 2 模拟雾天场景效果评估

Tab.2 Evaluation of dehazing effects in simulated hazy scenes

Method	Contrast	EME	AG	L_{SD}	Entropy
Origin	1.76	0.35	0.56	1.16	6.04
Retinex	7.43	0.79	1.09	2.53	6.98
WANG's	12.43	1.88	1.45	2.86	6.75
C2Pnet	4.91	1.60	0.99	2.09	7.16
D-former	4.90	2.00	0.98	2.17	7.29
Ours	89.14	3.76	3.71	6.72	7.41

加清晰, 动态范围较高。熵增强度量作为局部的对比度评价方法, 反映出去雾图像包含更多的有效信息, 细节更加清晰。平均梯度与局部标准差也有较为显著的改善, 表明算法有效地减少了模糊和噪声, 边缘和细节得到有效增强。信息熵相较其他算法也有一定增加, 其进一步反映了图像复杂性和丰富性的恢复。这些定量评估结果都支持文中算法在图像去雾方面的有效性和优越性, 为实际应用提供了有力的技术支持。

3 结 论

文中通过提取偏振暗通道, 利用偏振特性的差异估算大气光强与透过率进行图像去雾, 并针对图像退化问题引入了全局自适应灰度映射方法, 获得清晰且细节恢复较好的去雾图像。此外, 通过开展雾霾成像实验, 分析了雾霾对真值图像的灰度分布影响, 并引入了局部直方图均衡化方法对图像进行对比度增强。最后, 文中采用小波融合的方法, 综合利用偏振暗通道与局部直方图均衡化的优势, 获得细节恢复丰富且动态范围较高的融合去雾图像。实验结果表明,

该方法在去雾方面表现出色, 能显著提高原图像的对比度、平均梯度、局部标准差以及信息熵等, 并且可以适用于多种雾天场景, 具有实际应用价值。但在如夜间场景等非均匀光照情况下的算法处理效果仍有待提升, 且目前使用的方法仅应用于灰度图像, 颜色信息结合偏振暗通道的方法还有待深入研究。未来将进一步探索和改进算法, 以适应如夜间、水下等复杂散射场景, 提高算法的鲁棒性和普适性。

参考文献:

- [1] AGRAWAL S C, JALAL A S. A comprehensive review on analysis and implementation of recent image dehazing methods [J]. *Arch Computat Methods*, 2022, 29: 4799-4850.
- [2] BERMAN D, TREIBITZ T, AVIDAN S. Single image dehazing using haze-lines [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2018, 42(3): 720-734.
- [3] GU Z, JU M, ZHANG D. A single image dehazing method using average saturation prior [J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2017, 2017(1): 1-17.
- [4] SONG Yingchao, LUO Haibo, HUI Bin, et al. Haze removal using scale adaptive dark channel prior [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(9): 0928002. (in Chinese)
- [5] LIU C, ZHAO J, SHEN Y, et al. Texture filtering based physically plausible image dehazing [J]. *The Visual Computer*, 2016, 32: 911-920.
- [6] MI Z, ZHOU H, ZHENG Y, et al. Single image dehazing via multi-scale gradient domain contrast enhancement [J]. *IET Image Process*, 2016, 10(3): 206-214.
- [7] MA Wenjun, LIU Jinhu, WANG Xiaopeng, et al. Adaptive image defogging algorithm combined with lab space and single scale retinex [J]. *Journal of Applied Optics*, 2020, 41(1): 100-106. (in Chinese)
- [8] ZHENG Y, ZHAN J, HE S, et al. Curricular contrastive regularization for physics-aware single image dehazing[C]// Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2023: 5785-5794.
- [9] SONG Y, HE Z, QIAN H, et al. Vision transformers for single image dehazing [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2023, 32: 1927-1941.
- [10] DUDHANE A, PATIL P W, MURALA S. An end-to-end network for image de-hazing and beyond [J]. *IEEE Transactions on Emerging Topics in Computational Intelligence*, 2022, 6(1): 159-170.

- [11] SCHECHNER Y Y, S G NARASIMHAN S G, NAYAR S K. Polarization-based vision through haze [J]. *Applied Optics*, 2003, 42(3): 511-525.
- [12] MENG Yufei, WANG Xiaoling, LIU Chang, et al. Dehazing of dual angle polarization image based on mean comparison of quartering dark channels [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(4): 0411001. (in Chinese)
- [13] YOU Jiang, LIU Pengzu, RONG Xiaolong, et al. Dehazing and enhancement research of polarized image based on dark channel priori principle [J]. *Laser & Infrared*, 2020, 50(4): 493-500. (in Chinese)
- [14] WANG Chuning, ZHAO Kaichun. Polarization image defogging based on dark channel prior principle [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2023, 31(23): 3474-3481. (in Chinese)
- [15] WANG Hui, WANG Jin, LI Xiaobo, et al. Optimization for a polarimetric dehazing method based on the circularly polarized light [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(11): 1126001. (in Chinese)
- [16] LIANG Jian, JU Haijuan, ZHANG Wenfei, et al. Review of optical polarimetric dehazing technique [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(4): 400001. (in Chinese)
- [17] MCCARTNEY E J. Optics of the atmosphere: scattering by molecules and particles [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1978, 14(9): 698-699.
- [18] HE K, SUN J, TANG X. Single image haze removal using dark channel prior [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2010, 33(12): 2341-2353.
- [19] AHN H, KEUM B, KIM D, et al. Adaptive local tone mapping based on retinex for high dynamic range images[C]//2013 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE), IEEE, 2013: 153-156.
- [20] 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.
- [21] LAND E H, MCCANN J J. Lightness and retinex theory [J]. *JOSA*, 1971, 61(1): 1-11.
- [22] WU Jing, SONG Wenjie, GUO Cuixia, et al. Image dehazing based on polarization optimization and atmosphere light correction [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2023, 31(12): 1827-1840. (in Chinese)

Polarization dark channel-based fusion dehazing method

ZHU Sirui¹, WANG Xia^{1*}, JIAO Gangcheng², HE Huiyang², ZHANG Xin¹

(1. Key Laboratory of Optoelectronic Imaging Technology and System, Ministry of Education, School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. Science and Technology on Low-Light-Level Night Vision Laboratory, Xi'an 710065, China)

Abstract:

Objective In hazy weather conditions, images captured by conventional cameras often suffer from blurring and distortion due to the effects of particle scattering. Image dehazing has emerged as a focal research area to achieve clear imaging under these adverse conditions. This technique is primarily employed to enhance visual clarity, improve image visibility, and facilitate optical analysis in specialized environments. It finds extensive applications in remote sensing, target recognition, defense and military sectors, as well as autonomous driving technologies. Polarization imaging technology, as an emerging optical-electronic imaging technique, captures both intensity and polarization information, providing distinct advantages in extracting target shapes and texture details, which has garnered widespread attention in the field of dehazing. Existing polarization dehazing algorithms often require the extraction of sky regions, a process that is intricate and prone to introducing artifacts. Moreover, the calculated polarization degree and polarization angle images are significantly affected by particle scattering effects, leading to substantial information loss. To address the aforementioned challenges, this paper proposes a fusion dehazing algorithm based on polarization dark channel.

Methods A fusion dehazing algorithm utilizing polarization information is built in this paper. Based on the

principle of dark channel prior, the polarization dark channel is extracted to estimate the atmospheric light and transmission rate for obtaining the scene image. Subsequently, a global adaptive tone mapping method is employed to restore the image brightness. Additionally, hazy images and ground truth images were collected through artificial hazing experiments. An analysis of the effects of haze scattering revealed the issue of blurred image details. Therefore, a local histogram equalization method is introduced to enhance image contrast. Finally, the results of polarization dehazing were fused with those obtained from local histogram equalization using wavelet transform. The high-frequency components were fused using local saliency fusion, while the low-frequency components were fused using weighted average fusion. Various image evaluation metrics are then computed to assess the effectiveness of the algorithm.

Results and Discussions The images used for algorithm validation consist of 40 sets of real hazy scenes and 20 sets of simulated hazy scenes. The contrast algorithms selected include the Retinex enhancement algorithm, WANG's polarization dehazing algorithm based on dark channel prior, and deep learning-based methods C2Pnet and D-former. Subjectively, the algorithm proposed in this paper achieves high-quality dehazing for both near and distant scenes, with significant detail recovery and superior visual image quality. Objectively, the proposed algorithm shows a significant improvement in contrast. The enhancements in average gradient and local standard deviation are also notable, indicating that the algorithm effectively reduces blur and noise and enhances edges and details. There is also a noticeable increase in information entropy, further reflecting the recovery of image complexity and richness. In summary, the algorithm presented in this paper demonstrates significant effectiveness and superiority, meeting the requirements for clear imaging in hazy conditions.

Conclusions A wavelet fusion dehazing algorithm based on the polarization dark channel prior is proposed. The algorithm has a simple structure, does not require sky region extraction, and is applicable to a broad range of scenarios. Additionally, it provides stable dehazing effects and produces high-quality images. A global adaptive tone mapping method is introduced to solve the image degradation problem. Through the design of a haze imaging experiment, the impact of haze on the grayscale distribution of ground truth images is analyzed. Consequently, the local histogram equalization method is introduced to enhance image contrast. Finally, by employing wavelet image fusion and integrating the advantages of polarization dark channel and local histogram equalization, fusion dehazing images with rich detail recovery and a high dynamic range are obtained. The experimental results indicate that the polarization dehazing algorithm proposed in this paper can effectively restore real hazy weather scenes.

Key words: image dehazing; polarization dehazing; dark channel prior; image fusion; tone mapping

Funding projects: Science and Technology Foundation of State Key Laboratory of Low-Light-Level Night Vision Technology (J20220101)