

文章编号 1004-924X(2023)23-3474-08

基于暗通道先验原理的偏振图像去雾

王楚宁, 赵开春*

(清华大学 精密仪器系, 北京 100084)

摘要: 雾霾天气下大气粒子对光的散射作用会导致成像质量下降, 影响目标探测以及关键信息提取。针对目前偏振去雾算法存在的不足, 提出一种基于偏振暗通道的去雾方法。通过 4 个不同角度的偏振光强解算偏振信息, 从而得到任意角度的偏振光强, 然后, 结合暗通道先验原理定义偏振图像暗通道, 从中获取无穷远处大气光强度信息, 计算得到大气传输率, 最后构建大气散射模型, 得到去雾图像。实验结果表明: 该方法处理后的去雾图像的灰度方差、平均梯度和图像熵几项评价指标均比原图像显著提高, 灰度方差提升了 25%, 平均梯度提升了 30%, 图像熵提升了 5%。该方法能够有效改善雾霾天气下的图像质量, 提高图像清晰度, 且图像的细节更为丰富。

关键词: 偏振图像; 图像去雾; 暗通道; 先验原理

中图分类号: TP394.1; TH691.9 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/OPE.20233123.3474

Polarization image defogging based on dark channel prior principle

WANG Chuning, ZHAO Kaichun*

(Department of Precision Instrument, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

* Corresponding author, E-mail: kaichunz@mail. tsinghua. edu. cn

Abstract: In hazy weather, the image quality is decreased owing to the scattering effect of atmospheric particles on light, which can affect target detection and key information extraction. In response to the shortcomings of current polarization defogging algorithms, this study proposes a defogging method based on polarization dark channel. First, polarization information is calculated through the polarized light intensity of four different angles, to obtain the polarized light intensity of any angle. Thereafter, based on the dark channel prior principle, the dark channel of the polarized image is defined. The atmospheric light intensity at infinity is obtained, and the atmospheric transmission rate is calculated. Finally, the atmospheric scattering model is constructed to obtain a defogging image. The experimental results demonstrate that the evaluation indicators of grayscale variance, average gradient, and image entropy of the defogged image processed by this method are significantly improved compared to those of the original image. The grayscale variance, average gradient, and image entropy are increased by 25%, 30%, and 5%, respectively. This method can effectively improve the quality and clarity of images in hazy weather and enrich image details.

Key words: polarization image; image defogging; dark channel; prior principle

收稿日期: 2023-04-12; 修订日期: 2023-05-09.

基金项目: 教育部联合基金资助项目 (No. 6141A02022606)

1 引 言

雾霾天气下能见度大幅度降低,普通相机拍摄的图像对比度降低,细节可见性差,影响图像后续的处理和应用^[1]。目前,对雾霾天气下图像去雾增强的方法主要有两种思路,第一种是图像处理去雾技术,通过处理普通光学传感器采集的图像,提高图像对比度,达到图像增强或复原的目的,但是去雾的效果有限,图像可能会失真,进而造成部分细节信息丢失,目标的识别率和准确度无法达到实用需求。第二种是光学去雾技术,用改造后的光学系统采集多幅图像,根据反射光的特征分离来自目标的反射光和大气反射光,从而复原图像。随着偏振成像的发展,偏振光学去雾技术成为当前的研究热点^[2],利用大气和目标偏振特性的差异,基于大气衰减模型进行去雾重构^[3],去雾效果好,算法实现较为容易,广泛应用于交通检测中的车辆信息监测和道路监控系统等领域。

2003年,Schechner等首次提出了利用偏振光学的去雾算法,通过偏振片获取两幅正交偏振角度下的图像,手动选取天空区域估算大气光强,根据大气偏振特性估算场景深度,不依赖天气的变化,可以实时去雾^[4-5]。2009年,Kaiming等首次提出暗通道的概念,基于彩色图像提出暗通道先验理论,结合雾霾天气大气成像模型,基于暗通道估计全局参数无穷远处大气光强,逐像素点计算大气传输率并提出导向滤波的方法对其进行优化,即可实现针对单个图像的去雾处理,这种方法简单有效,复原效果好^[6]。2011年,周浦城等定义偏振图像暗通道,提出一种自适应图像复原方法,自动提取天空区域获取大气光强并基于最小归一化互信息原则进行优化,根据大气光强的变化规律对其进行修复实现去雾^[7]。2020年,张力通过合成最亮图和最暗图,利用天空区域偏振角分布,选取概率最大的角度值作为大气光偏振角,从而估算大气光偏振度,实现图像去雾^[8]。2022年,姜雨彤等提出适应性双通道先验方法,以校正亮暗双通道方法对白色和黑色像素点的透射率和大气光值的错误估计结果^[9]。同年,傅妍芳等提出了常微分方程(Ordinary Differential Equation, ODE)启发的多级特征逐步细

化及边缘增强的去雾网络,该网络的去雾精度较高^[10]。

然而,传统方法存在需要人工交互选取天空区域,在无天空区域或天空区域有干扰时影响参数估计,复原图像存在失真或噪声等问题。因此,本文提出一种基于暗通道先验原理的偏振图像去雾方法,利用偏振相机获取4个偏振方向的偏振光强信息,根据大气物理退化模型和暗通道先验原理估算无穷远处的大气光强,无需手动选取天空区域,计算大气传输率并经过导向滤波优化,最终复原图像,实现了较好的去雾效果。

2 原 理

雾霾天气时在空气中漂浮着大量微小颗粒,大气光在传播过程中,由细小颗粒产生多次散射,是部分偏振光,偏振信息与大气中的微粒和成像距离有关。而经过目标反射的光与大气散射光不同,它的偏振信息不仅与大气微粒有关,还与目标反射面的物理性质有关,所以二者的偏振信息存在差异^[11-12]。雾天偏振成像模型如图1所示。

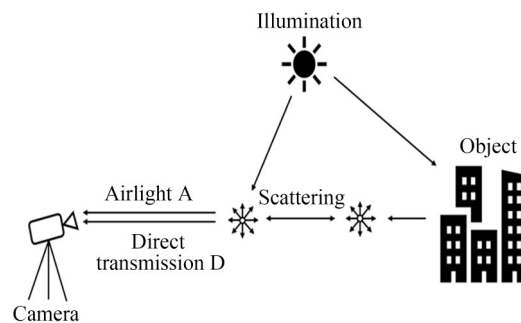


图1 雾天偏振成像模型

Fig. 1 Polarization imaging model in hazy weather

系统采集到的光由两部分组成,大气光强和目标光强,总偏振光由大气偏振光和目标偏振光组成,可表示为:

$$I = D + A, \quad (1)$$

$$I_p = D_p + A_p, \quad (2)$$

其中: D 表示目标光强, A 表示大气光强, I_p 表示总偏振光强, D_p 表示目标偏振光强, A_p 表示大气偏振光强。

根据大气散射模型^[13],来自目标的直接透射

光由于空气中雾霾粒子的散射和吸收作用,在传播过程中呈指数衰减,到达光学系统的目标光强 D 可以由衰减模型表示:

$$D(x, y) = J(x, y)t(z(x, y)), \quad (3)$$

其中: $J(x, y)$ 为目标光强, $t(z(x, y))$ 为大气传输率,与传输距离有关,随传输距离的增加呈现指数衰减, $z(x, y)$ 表示像素点 (x, y) 的图像深度。

另一部分大气光强 A 由太阳光经过雾霾粒子的散射形成,在传播过程中呈指数增加,可以由大气光模型表示:

$$A(x, y) = A_{\infty}(1 - t(z(x, y))), \quad (4)$$

其中 A_{∞} 表示无穷远处的大气光强,是全局参量。

联立上述式子可以得到目标光强 J 的表达式:

$$J(x, y) = \frac{I(x, y) - A_{\infty}}{t(z(x, y))} + A_{\infty}, \quad (5)$$

其中 $I(x, y)$ 已知,估算出无穷远处大气光强 A_{∞} 和大气传输率 $t(z(x, y))$,即可恢复出去雾图像 $J(x, y)$ 。

3 去雾算法描述

偏振去雾算法流程如图 2 所示。首先,利用偏振相机获取 $0^{\circ}, 45^{\circ}, 90^{\circ}, 135^{\circ}$ 偏振角度的图像,

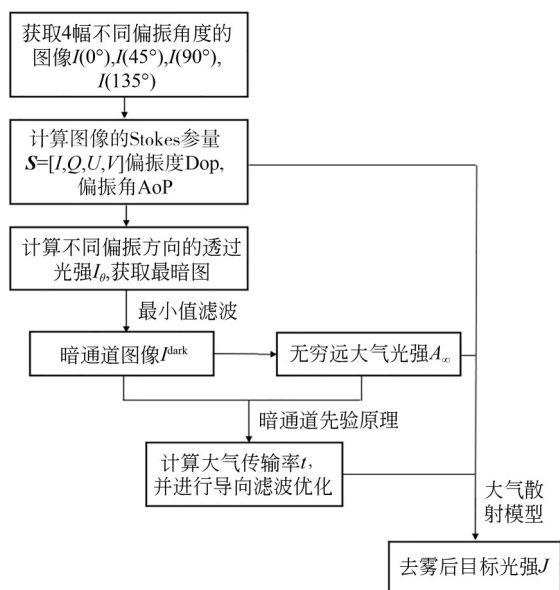


图 2 偏振去雾算法流程

Fig. 2 Flow chart of polarization defogging algorithm

计算 Stokes 参量、偏振度以及偏振角图像,从而计算不同偏振角度的透过光强 I_{θ} ,通过最小值滤波处理得到暗通道图像 I^{dark} ,根据暗通道先验原理估算出无穷远处的大气光强 A_{∞} ,并计算得到大气传输率 t ,对 t 进行优化后,计算去雾后的目标光强 J 。

3.1 偏振特征提取

分焦平面相机采集到的灰度图像尺寸为 1024×1224 ,首先进行子图分割,得到 $0^{\circ}, 45^{\circ}, 90^{\circ}, 135^{\circ}$ 四个角度的偏振光强,然后进行偏振信息的解算。Stokes 参量如下:

$$\begin{cases} I = \frac{1}{2}(I_0 + I_{45} + I_{90} + I_{135}) \\ Q = I_0 - I_{90} \\ U = I_{45} - I_{135} \\ V = I_r - I_l \end{cases}, \quad (6)$$

其中: $I_0, I_{45}, I_{90}, I_{135}$ 分别表示 $0^{\circ}, 45^{\circ}, 90^{\circ}, 135^{\circ}$ 相位的偏振光强, I_r 表示右旋圆偏振光强, I_l 表示左旋圆偏振光强, V 表示圆偏振分量。偏振光的圆偏振信息极少,可以忽略 ($V=0$)。

偏振度和偏振角的计算公式为:

$$DoP = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2}}{I}, \quad (7)$$

$$AoP = \frac{1}{2} \arctan \frac{U}{Q}. \quad (8)$$

3.2 暗通道先验原理

本文选用的偏振去雾算法基于暗通道去雾理论,一幅彩色图像的暗通道可以表示为:

$$J^{\text{dark}}(x) = \min_{y \in \Omega(x)} \left(\min_{c \in \{r, g, b\}} J^c(y) \right), \quad (9)$$

其中 $J^c(y)$ 表示 RGB 通道, $\Omega(x)$ 表示以像素点 x 为中心的一个正方形窗口。

暗通道先验理论^[5]描述的是在绝大多数的非天空的户外无雾图像的局部区域里,某些像素总会有至少一个颜色通道有很低值,换句话说,该区域光强度的最小值是一个很小的数。那么假设雾气是均匀分布的,雾气最浓的地方对应图像上无穷远处的天空区域,找到该区域便可实现大气光信息的自动获取。

暗通道中至少有一个颜色通道强度值很低的原因主要有:(1)影子,自然环境中树木、山体、岩石等的投影,或者城市中楼房、建筑物、车辆等的阴影;(2)当物体颜色比较鲜艳时,比如绿色植

物,红色花朵,蓝色湖面等,其RGB通道中会有某个通道的强度值较低;(3)物体本身颜色较暗,比如深褐色的树干和深灰色的石头等。

彩色图像可以得到RGB三通道不同颜色的光强度信息,从而获取暗通道图像。偏振图像通过对偏振信息的解算,得到光的偏振态信息,由Stokes参量即可计算出 θ 偏振角度下的透过光强。 I^{θ_i} 表示 θ_i 角度下的偏振光强,其计算公式如下:

$$I^{\theta_i} = \frac{1}{2}(I + Q\cos(2\theta_i) + U\sin(2\theta_i)). \quad (10)$$

定义偏振图像的暗通道 I^{dark} 为局部区域内不同偏振角度下偏振光强的最小值,计算公式如下:

$$I^{\text{dark}}(x, y) = \min_{\theta_i \in \{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_i\}} \left(\min_{(s, t) \in W(x, y)} (I^{\theta_i}(s, t)) \right), \quad (11)$$

其中: $I^{\theta_i}(s, t)$ 表示 θ_i 方向的透过光强, $W(x, y)$ 表示以像素点 (x, y) 为中心的正方形窗口。

3.3 无穷远处大气光强估计

对无穷远处大气光强 A_{∞} 的估算,根据亮度对暗通道图像进行排序,记录前0.1%亮度值的像素点位置,在原始有雾图像 I 中寻找相应位置的点,选择其中亮度最大的值作为 A_{∞} 。

3.4 大气传输率计算

由雾天偏振成像模型有:

$$I(x) = J(x)t(x) + A(1 - t(x)). \quad (12)$$

对式(12)两边同时除以 A 并求两次最小值运算有:

$$\min_{y \in \Omega(x)} \left(\min_c \frac{I^c(y)}{A^c} \right) = \tilde{t}(x) \min_{y \in \Omega(x)} \left(\min_c \frac{J^c(y)}{A^c} \right) + 1 - \tilde{t}(x). \quad (13)$$

根据前述的暗通道先验原理有:

$$J^{\text{dark}}(x) = \min_{y \in \Omega(x)} \left(\min_c J^c(y) \right) = 0. \quad (14)$$

代入可得:

$$\tilde{t}(x) = 1 - \min_{y \in \Omega(x)} \left(\min_c \frac{I^c(y)}{A^c} \right). \quad (15)$$

引入修正因子 ω ,保留一定程度的雾,即:

$$\tilde{t}(x) = 1 - \omega \min_{y \in \Omega(x)} \left(\min_c \frac{I^c(y)}{A^c} \right). \quad (16)$$

代入 $I(x, y)$ 、无穷远处大气光强 A_{∞} 和大气

传输率 $t(z(x, y))$,得到去雾图像,即:

$$J(x, y) = \frac{I(x, y) - A_{\infty}}{t(x, y)} + A_{\infty}. \quad (17)$$

4 实验及结果分析

为了验证本文所提方法的可行性和去雾效果,采用大恒图像的相机(水星一代MER-502-79U3M-POL工业数字相机)组装镜头(HN-7528-2M-C2/3X)拍摄的图像进行测试。偏振相机拍摄的场景一的原始图像经过逐像素点分割后得到4幅子图,对应 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ 偏振角度的偏振光强,如图3所示。

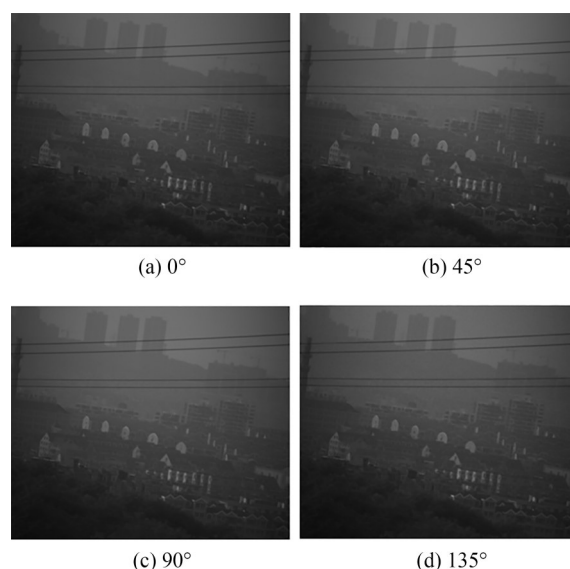


图3 雾天条件下的4幅不同偏振方向的图像

Fig. 3 Four images with different polarization directions in hazy weather

解算出Stokes参量 I, Q, U 图像如图4所示。计算出偏振角和偏振度,如图5所示。

通过Stokes参量计算其他角度的偏振光强,在偏振角最小值和最大值之间等间距取100个角

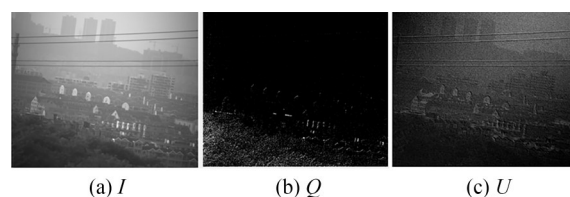


图4 Stokes参量的解算结果

Fig. 4 Calculation results of stokes parameter

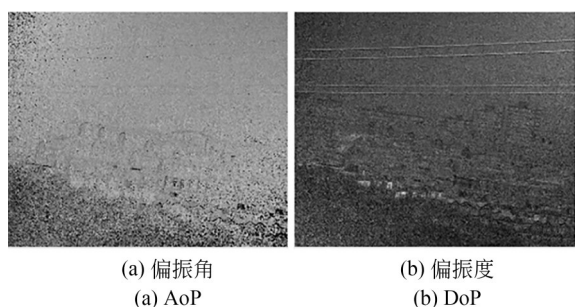


图 5 偏振角和偏振度的解算结果

Fig. 5 Calculation results polarization angle and polarization degree

度计算,得到三维矩阵 $I_\theta(i,j,k)$, (i,j) 表示图像像素位置, k 表示角度,然后筛选每个像素位置偏振光强的最小值,作为最暗图。运用 `ordfilt2` 函数对最暗图进行最小值滤波,得到暗通道图像,如图 6 所示。窗口半径越大,窗口内包含暗通道的概率越大,本文取窗口尺寸为 16×16 像素,即最小值滤波函数 `ordfilt2` 的半径为 16 像素。



图 6 暗通道图

Fig. 6 Dark channel image

对暗通道光强进行排序,取前 0.1% 的像素,对应位置的原图光强取平均值作为无穷远处的大气光强,即 $A_{\text{far}} = 0.7608$ 。针对不同的雾气浓度,通过调整修正因子 ω 进行一定程度的保留,本文取 $\omega = 0.9$,计算得到的初始大气传输率图像如图 7(a) 所示。运用 `guidedfilter` 函数进行导向滤波^[14],以 I 作为引导图,初始大气传输率图作为滤波输入图,导向滤波半径应大于最小值滤波的半径,否则在透射率图中基本看不到细节信

息,去雾后的图像边缘不明显。本文滤波半径 $r = 30$ 。为了防止计算中除以 0 的错误以及某些计算结果过大,设置正则化参数 $\text{eps} = 10^{-3}$,得到优化后的大气传输率图像,如图 7(b) 所示。

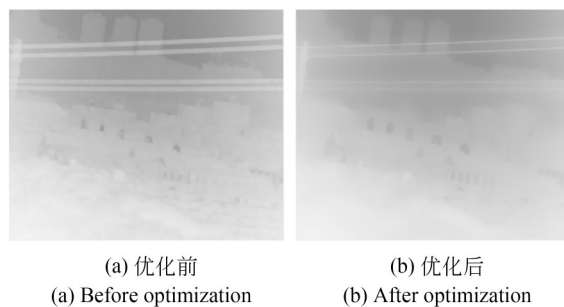


图 7 大气传输率图像

Fig. 7 Atmospheric transport rate images

t 值过小时,由:

$$J(x,y) = \frac{I(x,y) - A_\infty}{t(z(x,y))} + A_\infty. \quad (18)$$

计算出的去雾图像 J 存在亮度过大,整体向白场过渡的问题,故一般设置一个阈值 t_0 ,当 $t < t_0$ 时,令 $t = t_0$,本文取 $t_0 = 0.1$ 。最终得到的去雾图像如图 8 所示,通过对比可以看出,经过去雾处理后图像清晰度有了显著的改善,图像细节得到了较好的恢复。图 8(b) 为去雾处理前后的灰度分布直方图,可以看出,有雾时由于雾霾粒子的散射作用,灰度分布比较集中,去雾后图像的灰度分布更均匀。图 8(c) 是图像近处局部景物在去雾前后的对比结果,建筑物从模糊变得清晰,窗户细节更清晰,建筑物墙面对比度得到了提升。图 8(d) 是图像远处局部景物在去雾前后的对比结果,大楼的轮廓,远处的吊车形状变得更加明显,立体感更强。图 8(e) 和图 8(f) 分别为树林和电塔局部场景去雾前后的效果,直观体现了本文方法对细节的恢复效果。

为进一步验证本文算法不需要手动提取天空区域就能实现较好且稳定的去雾复原效果,选取 Schechner 算法^[5] 和张力算法^[8] 对多幅图像进行处理,去雾结果对比如图 9 所示。在手动提取天空区域的情况下,天空区域的选取会影响去雾结果,天空部分会过曝,存在黑色区域,影响图像质量。张力算法^[8] 有一定的去雾效果,但树林区域较为朦胧,细节不明显。相比之下,本文方法

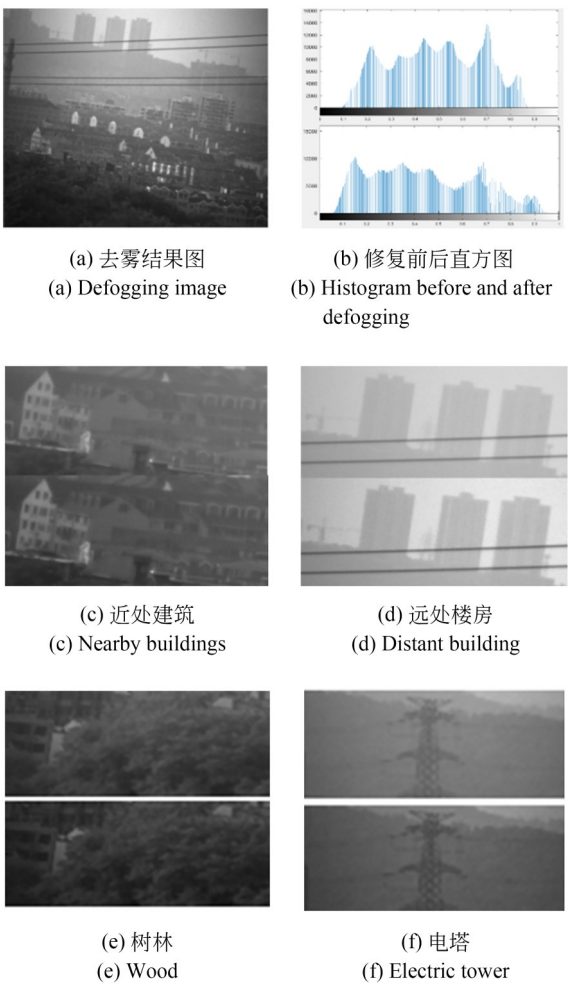


图 8 去雾结果
Fig. 8 Defogging results

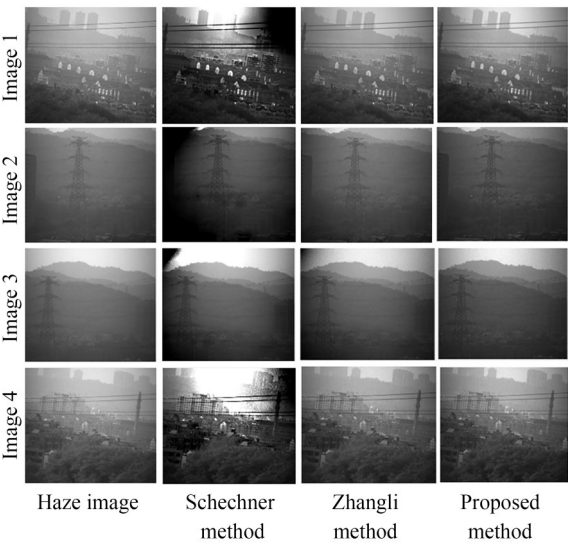


图 9 去雾效果对比
Fig. 9 Comparison of defogging effects

恢复出的近处建筑物细节更丰富,电线、树木等特征更清晰。

为了定量描述去雾前后的图像质量,采用灰度方差(var)、平均梯度(MG)和图像熵(com)3项评价指标进行分析。

灰度方差反映了图像中各像素灰度值偏离图像平均值的程度,灰度方差越大,说明图像像素的灰度分布越广泛,视觉效果越好,计算公式为:

$$\sigma^2=\sum_{k=0}^{L-1}(z_k-m)^2p(z_k), \tag{19}$$

其中 $m=\sum_{k=0}^{L-1}z_kp(z_k)$,即平均灰度。

平均梯度表示图像灰度的变化率,反映了图像的清晰度和纹理变化。平均梯度越大,图像越清晰,计算公式为:

$$G(x)=\frac{1}{M\times N}\sum_{i=1}^M\sum_{j=1}^N\sqrt{\frac{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2+\left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2}{2}}, \tag{20}$$

其中: $M\times N$ 表示图像的尺寸, $\frac{\partial f}{\partial x}$ 表示水平方向的梯度, $\frac{\partial f}{\partial y}$ 表示垂直方向的梯度。

图像熵是衡量图像信息丰富程度的重要指标,图像熵越大,图像的信息越丰富,图像质量越好。图像熵表示为图像灰度级集合的比特平均数,计算公式为:

$$H(x)=-\sum_{i=1}^n P(a_i)\times\log P(a_i), \tag{21}$$

其中 $P(a_i)$ 为每一灰度级出现的概率,对数一般取2为底。

表1列出了不同方法处理场景一的去雾结

表 1 不同去雾方法的性能比较			
Tab.1 Performance comparison of different defogging methods			
方 法	灰度方差	平均梯度	图像熵
原图像	2 386.034 2	4.186 7	7.257 7
文献[5]	3 791.876 0	9.757 2	7.013 1
文献[8]	2 162.701 4	4.783 1	7.452 7
本文方法	2 984.117 2	5.441 0	7.611 4
直方图均衡化方法	1 742.727 7	9.676 7	7.323 3

果,对比表中的评价指标可知,相比于原始图像,本文方法的灰度方差、平均梯度和图像熵 3 项指标均有明显提升。其中,灰度方差提升了 25%,平均梯度提升了 30%,图像熵提升了 5%。虽然文献[5]方法的灰度方差和平均梯度提升很大,但是通过图 9 可以看出,去雾图像有一定程度的失真,图像熵相比原图像下降说明细节丢失,信息丰富程度变差。本文方法的各项评价指标均有提升,提升效果约是张力方法的两倍。结果表明,采用本文方法进行去雾处理后,图像的清晰度有了较大提升,视觉效果得到优化,目标的细节和特征被保留下来并得到增强,图像质量最好。

参考文献:

- [1] 吕建威,钱锋,韩昊男,等. 结合天空分割和雾气浓度估计的图像去雾[J]. 光学 精密工程, 2022, 30(4):464-477.
LÜ J W, QIAN F, HAN H N, *et al.* Single image dehazing with sky segmentation and haze density estimation[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2022, 30(4): 464-477. (in Chinese)
- [2] 张晶晶,陈自红,张德祥,等. 基于暗原色先验原理的偏振图像浓雾去除算法[J]. 计算机应用, 2015, 35(12):3576-3580.
ZHANG J J, CHEN Z H, ZHANG D X, *et al.* Polarized image dehazing algorithm based on dark channel prior [J]. *Journal of Computer Applications*, 2015, 35(12):3576-3580. (in Chinese)
- [3] MCCARTNEY E J, HALL F F Jr. Optics of the atmosphere: scattering by molecules and particles [J]. *Physics Today*, 1977, 30(5): 76-77.
- [4] SCHECHNER Y Y, NARASIMHAN S G, NAYAR S K. Instant dehazing of images using polarization[C]. *Proceedings of the 2001 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. CVPR 2001. Kauai, HI, USA. IEEE Comput. Soc.*, 2001. DOI: 10.1109/CVPR.2001.990493.
- [5] SCHECHNER Y Y, NARASIMHAN S G, NAYAR S K. Polarization-based vision through haze[J]. *Applied Optics*, 2003, 42(3): 511.
- [6] HE K M, SUN J, TANG X O. Single image haze

5 结 论

本文通过提取偏振图像的暗通道,基于大气物理退化模型,不需要手动提取天空区域,自动获取无穷远处的大气光强信息,计算得到大气传输率并进行优化,实现了偏振图像的去雾增强。实验结果表明,本方法具有较好的去雾复原效果,显著提高了原图像的灰度方差、平均梯度和图像熵,灰度方差提升了 25%,平均梯度提升了 30%,图像熵提升了 5%,改善了图像的清晰度。本文的去雾模型比较简单,没有考虑空气中微小颗粒对光进行多次散射现象的影响,在复杂场景下算法的稳定性有待验证,未来需要进一步优化。

- removal using dark channel prior[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2011, 33(12): 2341-2353.
- [7] 周浦城,薛模根,张洪坤,等. 利用偏振滤波的自动图像去雾[J]. 中国图象图形学报, 2011, 16(7): 1178-1183.
ZHOU P CH, XUE M G, ZHANG H K, *et al.* Automatic image dehaze using polarization filtering [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2011, 16(7): 1178-1183. (in Chinese)
- [8] ZHANG L, YIN Z J, ZHAO K C, *et al.* Lane detection in dense fog using a polarimetric dehazing method[J]. *Applied Optics*, 2020, 59(19): 5702-5707.
- [9] 姜雨彤,杨忠琳,朱梦琪,等. 适应性双通道先验的图像去雾方法[J]. 光学 精密工程, 2022, 30(10): 1246-1262.
JIANG Y T, YANG ZH L, ZHU M Q, *et al.* Image dehazing method based on adaptive bi-channel priors [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2022, 30(10): 1246-1262. (in Chinese)
- [10] 傅妍芳,尹诗白,邓葳,等. 多级特征逐步细化及边缘增强的图像去雾[J]. 光学 精密工程, 2022, 30(9):1091-1100.
FU Y F, YIN SH B, DENG ZH, *et al.* Multi-level features progressive refinement and edge enhancement network for image dehazing[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2022, 30(9):1091-1100. (in Chinese)
- [11] 游江,刘鹏祖,容晓龙,等. 基于暗通道先验原理的偏振图像去雾增强算法研究[J]. 激光与红外,

- 2020, 50(4):493-500.
- YOU J, LIU P Z, RONG X L, *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)
- [12] 汪杰君, 杨杰, 张文涛, 等. 雾天偏振成像影响分析及复原方法研究[J]. *激光技术*, 2016, 40(4): 521-525.
- WANG J J, YANG J, ZHANG W T, *et al.* Analysis and restoration research of fog polarization imaging[J]. *Laser Technology*, 2016, 40(4): 521-525. (in Chinese)
- [13] CANTOR A. Optics of the atmosphere: scattering by molecules and particles[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1978, 14(9): 698-699.
- [14] 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.

作者简介:



王楚宁(2000—),女,辽宁大连人,硕士研究生,2022年于清华大学获得学士学位,主要从事仿生偏振导航传感器的相关研究。E-mail: wcn22@mails.tsinghua.edu.cn

通讯作者:



赵开春(1973—),男,辽宁大连人,博士,副研究员,清华大学精密仪器系教师,研究领域为仿生微纳光栅阵列器件的设计、制备与测试,仿生导航传感器系统的设计、构建与环境试验,微小卫星的姿态测量与控制技术。E-mail: kaichunz@mail.tsinghua.edu.cn