

四分暗通道均值比较法的双角度偏振图像去雾

孟宇飞^{1,2}, 王晓玲¹, 刘畅^{2*}, 周哲海¹

¹北京信息科技大学仪器科学与光电工程学院, 北京 100192;

²北京信息科技大学应用数学研究所, 北京 100085

摘要 雾天环境下拍摄图像时,雾、霾等介质导致图像模糊、对比度低、色彩暗淡。结合大气散射模型与偏振光原理,实现了利用斯托克斯参数获取亮度最大和亮度最小的双角度偏振图像,并通过新提出的四分图像暗通道均值比较法,准确估计出场景中无穷远处大气光强值,最终将有雾图像恢复到无雾图像。所提方法在薄雾和浓雾环境下均取得了较好的实验结果,在两种环境下图像 NRSS(no reference structural similarity)和平均梯度均有较大提升。

关键词 成像系统; 偏振成像; 斯托克斯参数; 四分法

中图分类号 TP391

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.0411001

Dehazing of Dual Angle Polarization Image Based on Mean Comparison of Quartering Dark Channels

Meng Yufei^{1,2}, Wang Xiaoling¹, Liu Chang^{2*}, Zhou Zhehai¹

¹*School of Instrument Science and Opto Electronic Engineering, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100192, China;*

²*Institute of Applied Mathematics, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100085, China*

Abstract When taking images in foggy environment, fog, haze, and other media lead to image blur, low contrast, and dim color. In this paper, the atmospheric scattering model and the principle of polarized light are combined to obtain the dual angle polarized image with the maximum brightness and the minimum brightness by using the Stokes parameters. The atmospheric light intensity at infinity in the scene is accurately estimated by the new method of comparing the mean value of the dark channel of the quartered image, and finally the foggy image is restored to the image without fog. The experimental results show that the image NRSS (no reference structural similarity) and mean gradient are greatly improved in both mist and dense haze environments.

Key words imaging systems; polarization imaging; Stokes parameters; quartering method

1 引言

在雾和霾天气中,前者是天气骤然变冷后空气

中的水蒸气凝结而成,后者是由大气污染颗粒和气溶胶悬浮在天空中导致,在这两种天气下,光经过雾或霾的无数次反射、折射、散射后,到达摄像机的

收稿日期: 2021-03-01; 修回日期: 2021-03-10; 录用日期: 2021-03-18

基金项目: 国家自然科学基金(61931003,61801031,61871042)、北京长城学者支持计划(CIT&TCD20190323)、北京青年拔尖人才支持计划

通信作者: liuchang@bistu.edu.cn

大气光和景物原始反射光叠加会导致拍摄的图像模糊不清、对比度差;这严重影响了人们对场景的观测结果。因此,图像去雾的研究对于复原场景细节、提升图像对比度具有十分重要的意义。

图像去雾分为两类:基于物理退化模型复原的方法和图像增强的方法。偏振去雾法是基于物理退化模型复原法^[1]的典型方法。2001年,Schechner等^[2-4]首次利用光的偏振特性获取亮度最大和亮度最小的两幅偏振图像,实现了图像去雾,但该方法获取最好、最差双图像和无穷远处大气光强依赖于人工判断,因此估计精度较低。图像增强的方法不考虑物理退化模型,包括暗通道法^[5]、基于小波的变换法^[6]、直方图均衡化等^[7]。2009年,He等^[8]提出用暗通道估计无穷远处大气光强,实现了单图像去雾。Wang等^[9]在此方法基础上加入了V变换,虽然该方法与之前方法相比,较为准确地估计出无穷远处的大气光强,但这种方法会受到纯白色场景或建筑物的干扰,若是场景内白色建筑物数量较多而天空区域较少,在估计无穷远处大气光强选择估计区域时往往会把场景内的白色建筑物误选为天空区域,从而影响估计的准确度。虽然小波变换和曲波变换也有去雾效果,但是通过算法使图像增强的手段仅能使图像色彩变得鲜艳,然而最终输出的图像会出现细节丢失的现象。2016年,夏璞等^[10]结合光的偏振原理与光谱原理,进一步提升了图像去雾的清晰度。2020年,张一鹏等^[11]将偏振成像应用到了近地面遥感领域,但这种方法对所用的图像获取设备的精度要求高,且在低亮度下进行光谱分析容易出现较大误差。

针对以上去雾图像处理中存在的问题,本文提出一种新的双角度偏振图像去雾方法,在估计无穷远处大气光强方面采用四分暗通道均值比较法。

该方法结合了图像暗通道理论,通过对场景暗通道图像进行四分均值比较来寻找最大光强区域,这样不仅排除了高亮纯白场景对估计值的干扰,而且可保证识别全部的天空区域。在双角度偏振图像获取方面,通过利用偏振光的斯托克斯参数信息,结合偏振片的穆勒矩阵原理,计算出了相机镜头前偏振片旋转的角度,从4幅不同角度的斯托克斯偏振图像中计算出亮度最大和亮度最小的双角度偏振图像,避免人为分辨最大亮度和最小亮度图像产生的误差。在图像去雾效果评价方面,使用无参考的图像质量评价方法^[12]和平均梯度法^[13],使得最终去雾图像的对比度能够有较大提升。

2 模型与算法原理

2.1 大气散射模型

大气散射模型是分析光在大气中的传播和退化过程的一种物理模型,如图1所示,模型假设大气中的雾是均匀的,将到达摄像机的光分为两部分:一部分为大气散射光,另一部分为景物直接反射光。到达摄像机的总光强可表示为^[2-3]

$$I = Lt + A_{\infty}(1 - t), \quad (1)$$

式中: I 是到达摄像机的总光强; L 是景物的原始反射光强; t 是透射率,由朗伯比尔定律导出; A_{∞} 为无穷远处大气光强; A 是天空中的大气光强,这部分光由无穷远处大气光强 A_{∞} 经过大气颗粒或水雾的多次反射衰减到达摄像机,可表示为

$$A = A_{\infty}(1 - t). \quad (2)$$

该模型去雾的本质就是去除大气光(干扰光)、计算出原景物反射光,并对透射率进行补偿,以增大图像对比度。由(1)式可得

$$L = \frac{I - A_{\infty}(1 - t)}{t}. \quad (3)$$

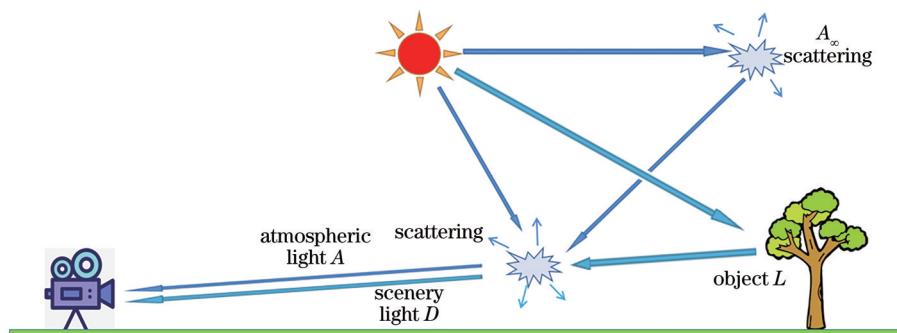


图1 大气散射模型

Fig. 1 Atmospheric scattering model

2.2 双角度偏振图像去雾原理

基于大气散射模型^[1,14]和偏振光的相关知识,可知整个过程中到达相机的光可分解为两部分:大气散射光 A 和景物反射光 Lt 。大气光部分经多次散射成为部分偏振光,若以太阳、景物、相机三点为基准组成一个参考基准平面(入射光平面),在相机镜头前加装可旋转的偏振片采集图像,经过偏振片后垂直于入射光平面的大气光强度 A^\perp 大于平行于入射光平面的大气光强度 A^\parallel ,而景物反射光中只有单次反射光表现为自然光,经过偏振片后光强降低为原来的一半,即 $Lt/2$ 。导致图像模糊的因素是大气光的干扰。因此,偏振角度平行于入射光平面时,接收大气光强度最低、图像亮度最低,将偏振图像记为 I^\parallel ;偏振方向垂直于入射光平面时,接收大气光强度最高、图像亮度最高,将偏振图像记为 I^\perp 。双角度偏振图像 I^\perp 和 I^\parallel 分别为

$$I^\perp = A^\perp + \frac{Lt}{2}, \quad (4)$$

$$I^\parallel = A^\parallel + \frac{Lt}{2}. \quad (5)$$

将(4)、(5)式相加,可以得到相机镜头前没有加装偏振片时到达探测器的原始图像光强。

这张图像的大气光偏振度可以表示为

$$P_A = \frac{A^\perp - A^\parallel}{A^\perp + A^\parallel} = \frac{I^\perp - I^\parallel}{A}, \quad (6)$$

$$A = A^\perp + A^\parallel. \quad (7)$$

通过(6)、(7)式可以得到

$$A^\perp = \frac{A(1 + P_A)}{2}, \quad (8)$$

$$A^\parallel = \frac{A(1 - P_A)}{2}. \quad (9)$$

综上所述,可以得到景物原始反射光强为

$$L = \frac{I - A}{t} = \frac{I - A}{1 - A/A_\infty}. \quad (10)$$

3 大气未知参数的估计与双角度偏振图像的获取

计算景物原始反射光强时,若已知的参数只有双角度偏振图像 I^\perp 和 I^\parallel ,通过将其相加就可知不加偏振片时到达摄像机的总光强;未知参数有透射率 t 、大气光强 A 和无穷远处大气光强 A_∞ 。若获得这三个未知参量中的两个,就能通过(2)式计算出剩余的那个量。由于到达相机探测器探元的光强大小不同,且反射点光源的光强和传输距离未知,不能直接估计透射率 t ,因此先估计大气光强 A 、无穷远处大

气光强 A_∞ ,将估计值代入公式计算出透射率 t 。

3.1 大气光强的估计

通过(2)、(6)式计算无穷远处大气光偏振度:

$$P_\infty = \frac{A_\infty^\perp - A_\infty^\parallel}{A_\infty^\perp + A_\infty^\parallel} = \frac{A^\perp - A^\parallel}{A^\perp + A^\parallel} = P_A. \quad (11)$$

根据(11)式,要计算大气光 A ,就必须得到大气光的偏振度。大气散射模型基于一个假设:天空中雾气是均匀的大气光,透射率随着大气光学厚度的增加而线性减小;在图像的天空区域,大气光强 A 等于到达相机的光强 I ,无穷远处大气光属于大气光中最亮的部分,从无穷远处经雾气衰减散射传播到相机,且偏振度固定不变,只与雾或霾的浓度有关,可以用无穷远处大气光强的偏振度 P_∞ 代替全局偏振度 P_A ,所以只需要估计出无穷远处的大气光强 A_∞ ,就可以通过计算得到未知的三个参数。

3.2 无穷远处大气光强的估计

暗通道法估计无穷远处大气光强是基于一个先验知识:在图像非天空区域场景中,如果对单个像素提取 r 、 g 、 b 通道的亮度值,这个像素中最少有一个通道的亮度极低且接近于零,具有这种现象的单通道像素定义为暗通道像素,并规定^[18]

$$J_{\text{dark}}(x) = \min \left\{ \min [J_c(y)] \right\}, \quad c \in \{r, g, b\}, \quad y \in \Omega(x), \quad (12)$$

式中: $J_{\text{dark}}(x)$ 为暗通道像素强度; $J_c(y)$ 为划定区域中强度最低的像素; $\Omega(x)$ 为划定的区域。暗通道先验知识指出:

$$J_{\text{dark}}(x) \rightarrow 0. \quad (13)$$

由(12)式可知,在以 x 为中心、大小为 $\Omega(x)$ 的窗口中选择像素强度值最低的像素 $J_c(y)$,分别提取 r 、 g 、 b 通道的像素值进行比较,像素强度最低的一个通道即为 $J_{\text{dark}}(x)$ (暗通道)。对整幅图像的每个像素采取以上相同操作后,即可得到一幅由 r 、 g 、 b 三个通道中最低亮度像素组成的暗通道图像,然后取暗通道图像中前 1% 亮度像素的平均值作为无穷远处大气光强 A_∞ 的值。

暗通道估计方法避免了用人工框选方式选取无穷远处大气光强,减小了人眼判断可能带来的误差。但是,这种方法使用场景有限,在场景中天空区域较少且无穷远处大气光强亮度不高、场景中白色建筑较多的情况下,暗通道方法也可能出现选取的暗通道图像中建筑物像素亮度过高的现象;前 1% 亮度像素的

寻找是采用逐像素比较方式实现的,该方法的计算量大,程序处理耗时长,为计算机带来了计算负担。

本文采用一种新的综合性方法:四分暗通道均值比较法。该方法先对要去雾的图像进行一步最小值滤波的操作,可以减小高亮噪声对后期估计的影响;提取待去雾图像的暗通道图后,对图像进行四分法,计算每一部分的均值并比较光强。如图 2(a)所

示,先设定一个像素宽度最小值,然后将暗通道图像平均分成 4 块区域,计算每一块区域像素强度的平均值,选取平均值最大的一个区域再次进行四分均值比较操作,以此类推,直到该窗口像素个数最小值小于之前设定的值后停止四分操作,记录该窗口坐标位置,在原始图像上找到对应位置,取该位置像素的平均值作为无穷远处大气光强 A_∞ ,如图 2(b)所示。

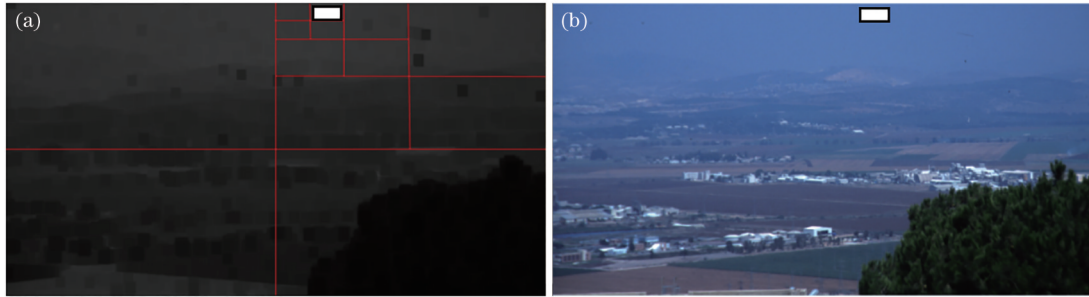


图 2 四分暗通道均值比较法操作流程及结果。(a)暗通道四分;(b)原图同位置

Fig. 2 Operation flow of mean comparison method of quarter dark channel method and corresponding result. (a) Quarter dark channel method; (b) the same position of original image

四分暗通道均值比较法先提取图像的暗通道,大部分非白色区域的暗通道亮度接近于 0,因此排除了场景中非白色高亮度物体对实验过程的干扰;之后采用四分法对暗通道图像进行处理,以减小场景中白色高亮物体对实验结果估计的影响,确保最后所选区域位置在天空区域,从而使得估计结果更加准确。

3.3 双角度偏振图像的获取

获取双角度偏振图像的方法包括人工旋转偏振片判断法和定角度拍摄图像比较法^[15]。人工旋转偏振片判断法的精度低,定角度拍摄图像比较法的过程繁琐且计算量大,不符合去雾过程简单有效的思想。本文基于斯托克斯参数与穆勒矩阵的关系计算出拍摄双图像时偏振片所需要旋转的角度,斯托克斯公式如下:

$$\begin{cases} S_0 = I_0 + I_{90} \\ S_1 = I_0 - I_{90} \\ S_2 = I_{45} - I_{135} \end{cases}, \quad (14)$$

式中: S_0 为总光强; S_1 为偏振片旋转 0° 和 90° 时相机接收到的光强差; S_2 为偏振片透振方向旋转 45° 与 135° 时相机接收到的光强差。通过这些斯托克斯参数,可以计算得到相机接收到的任意一束光的所有偏振信息。

由偏振片的穆勒矩阵可知,旋转任意角度 θ 的线偏振片的穆勒矩阵^[16]为

$$M_p = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & \cos 2\theta & \sin 2\theta & 0 \\ \cos 2\theta & \cos^2(2\theta) & \sin 2\theta \cos 2\theta & 0 \\ \sin 2\theta & \sin 2\theta \cos 2\theta & \sin^2(2\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (15)$$

S_0, S_1, S_2 通过偏振片后分别变为 S'_0, S'_1, S'_2 , 因此,一束通过任意角度偏振片到达 CCD 的光的总强度可以表示为

$$I = S'_0 = \frac{1}{2} (S_0 + S_1 \cos 2\theta + S_2 \sin 2\theta). \quad (16)$$

根据偏振角计算公式,计算出亮度最大和最小的两幅图像对应的偏振片旋转角度:

$$\begin{cases} \theta^+ = \frac{1}{2} \arctan \left(\frac{S_2}{S_1} \right) \\ \theta'' = \theta^+ + \frac{\pi}{2} \end{cases}. \quad (17)$$

将(17)式计算出的双角度代入(16)式,就可以计算出双角度偏振图像对应的光强值。

4 实验与结果分析

4.1 薄雾去雾实验

在有雾或霾场景下用镜头前装有可旋转偏振片的相机采集数据,所使用的相机参数为:镜头直径为 49 mm,焦距为 25 mm,偏振片厚度为 2 mm,正交透过率小于 0.2%,消光比为 500:1。图像采集方式是同轴分时序采集方法,相机角度固定不变,省

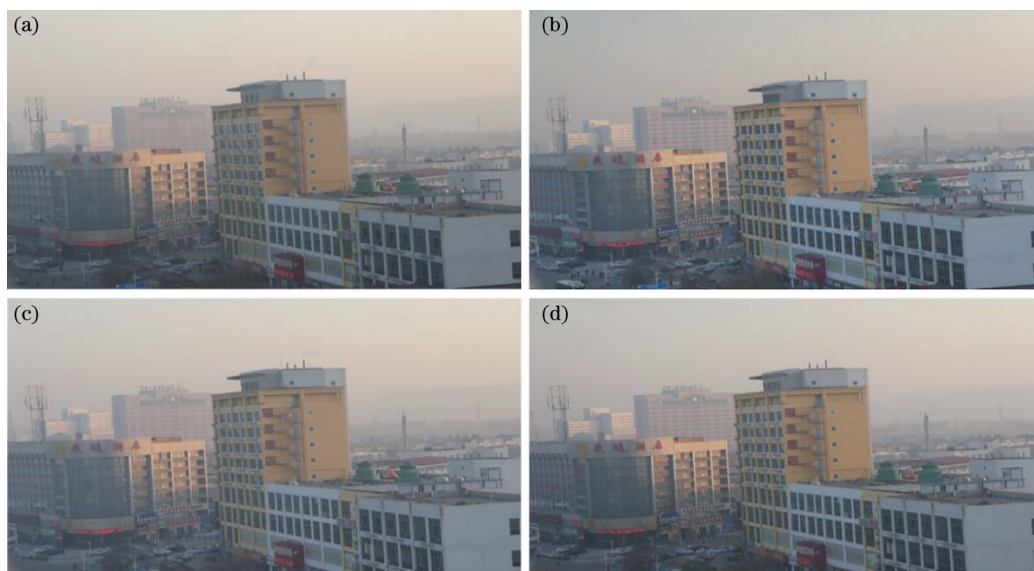


图 3 偏振片旋转 4 个固定角度拍摄的偏振图像。(a) 0° ; (b) 45° ; (c) 90° ; (d) 135°

Fig. 3 Polarization images captured when polarizer rotates four fixed angles. (a) 0° ; (b) 45° ; (c) 90° ; (d) 135°

去了图像配准这一过程,图 3(a)~(d)为清晨薄雾环境下偏振片旋转 4 个角度采集的偏振图像。

本文所用平台为 MATLAB (2018a), 基于 (14)~(17) 式, 在程序中输入采集的 4 幅图像进行双角度偏振图像计算, 得出亮度最大和最小的两幅图像, 将两幅图像光强值叠加, 计算出原始图像, 然后提取原始图像暗通道进行四分均值比较, 以估计无穷远处的大气光强, 最后利用去雾算法还原出景物的原始反射光。

图 4 为场景 1 在薄雾下各阶段的输出图像, 图 4(a) 是亮度最小的图像 I^\perp , 图 4(b) 是亮度最大

的图像 I^\parallel , 图 4(c) 是合成的原始图像, 图 4(d) 是原始图像输出的暗通道图, 图 4(e) 是对原图像大气光的估计图像, 图 4(f) 是最终输出的去雾图像。根据图 4, 去雾后图像的对比度有了很大提升, 图中左上角模糊楼房得到了很好的还原, 图右边低矮房子轮廓也清晰可见。图 5 为场景 2 的去雾效果对比图。图 5(a) 是合成的原始带雾图, 图 5(b) 是本文方法的去雾效果图, 图 5(c) 是单图像暗通道法的去雾效果, 图 5(d)~(f) 是对应框选部分的放大对比。

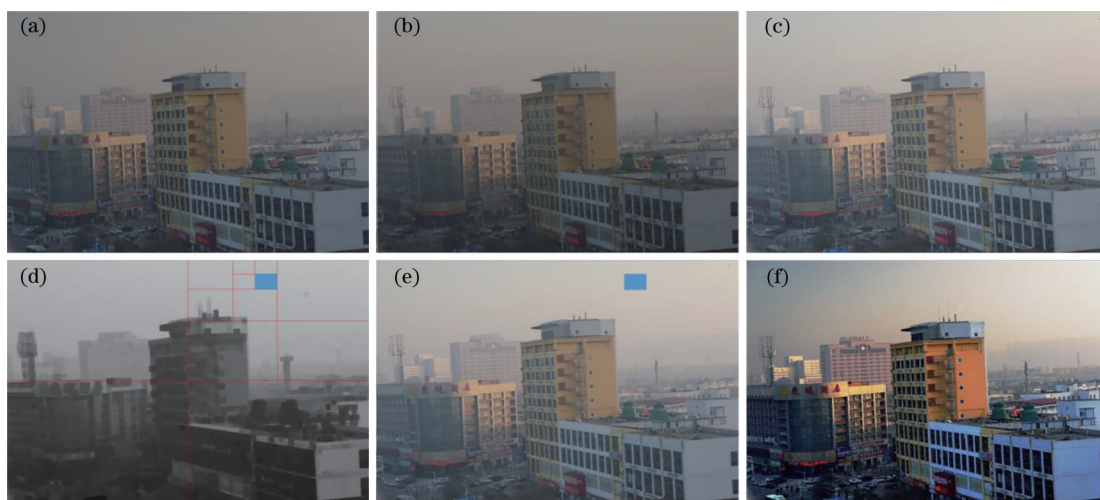


图 4 场景 1 在薄雾下各个阶段的输出图像。(a) I^\perp ; (b) I^\parallel ; (c) 单图像暗通道法的去雾图; (d) 四分暗通道过程; (e) A_∞ 的选取; (f) 去雾图

Fig. 4 Output images at each stage in mist for scene 1. (a) I^\perp ; (b) I^\parallel ; (c) dehazing image obtained by single image dark channel method; (d) quarter dark channel process; (e) selection of A_∞ ; (f) dehazing image

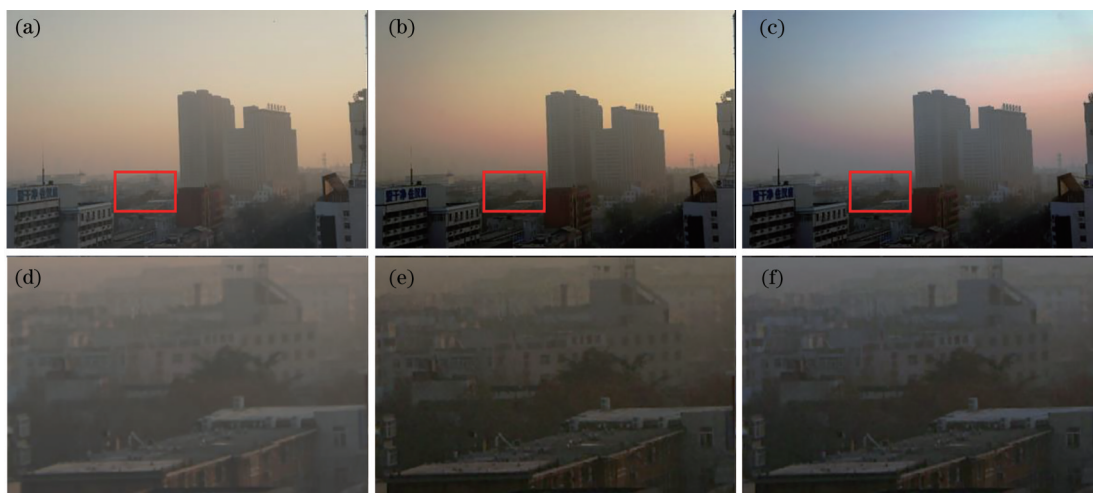


图 5 场景 2 在薄雾中的去雾效果图。(a)合成的原始带雾图;(b)四分暗通道均值比较法的去雾图;(c)单图像暗通道方法的去雾图;(d)~(f)图 5(a)~(c)的局部放大图

Fig. 5 Dehazing effect in mist for scene 2. (a) Synthetic original hazed image; (b) hazed image obtained by quarter dark channel mean comparison method; (c) hazed image obtained by single image dark channel method; (d)~(f) local enlarged images of Figs. 5(a)~5(c)

4.2 浓雾去雾实验

接下来对浓雾环境进行去雾操作,图 6(a)是在浓雾下拍摄的场景 3 的原始图,图 6(b)是去雾图。可以看到:虽然景物部分去雾效果很好,但放大图像[图 6(c)]中远处天空部分出现了噪点,这是因为在浓雾天气下的远处天空中透射率接近于 0 时,相机接收的光线较暗,去雾算法中估计出的无穷远处大气光强偏振度 P_∞ 小于该区域中天空部分全局偏振度 P ,这使得该区域某些位置的光强估计值超出

了图像显示范围,产生了色彩偏移。为了避免这种现象,这里采用的方法是保留一部分雾气,对 P_∞ 加一个补偿值 ϵ ,令

$$P'_\infty = \epsilon P, \quad (18)$$

式中: $1 \leq \epsilon \leq 1/P_\infty$ 。当 $\epsilon = 1$,相当于对场景部分直接用无穷远处大气散射光的偏振度进行去雾处理;当 $\epsilon = 1/P_\infty$,将无穷远处大气光视为完全偏振光,此时计算区域为只有大气光的天空区域,有 $L_t = I = A$ 。

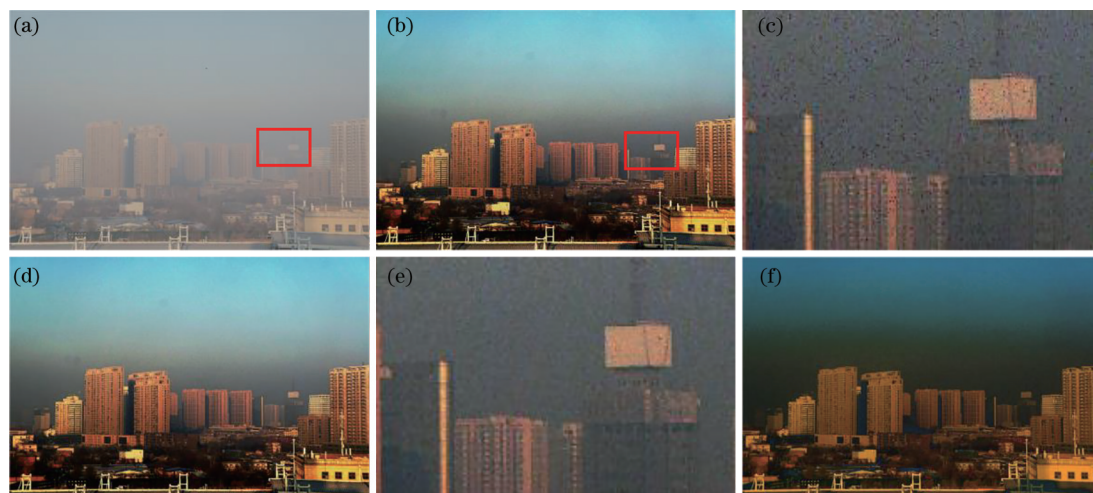


图 6 在浓雾下对场景 3 的去雾效果图。(a)合成的浓雾图;(b)初步去雾效果;(c)去雾局部放大;(d)修正后去雾效果图;(e)修正后局部放大;(f)单图像暗通道去雾

Fig. 6 Dehazing effect under dense haze for scene 3. (a) Synthetic dense haze image; (b) preliminary defogging effect; (c) dehazing local magnification; (d) corrected dehazing effect; (e) local amplification after correction; (f) single image dark channel dehazing

图 6(d)是将无穷远处大气光视作完全偏振光后的去雾图,噪点得到了很好的抑制,图 6(e)为修正后的局部放大图。图 6(f)是单图像暗通道法得到的去雾图。

接下来采用加入了校正参数的去雾方法对浓

雾下的场景 4 进行去雾,得到的结果如图 7 所示。可以看出,对于局部放大的汽车部分,本文方法对车子的白色还原更加准确,单图像暗通道去雾法没有还原出下方的闪光车灯,这说明本文算法对场景 4 的适应性更好。

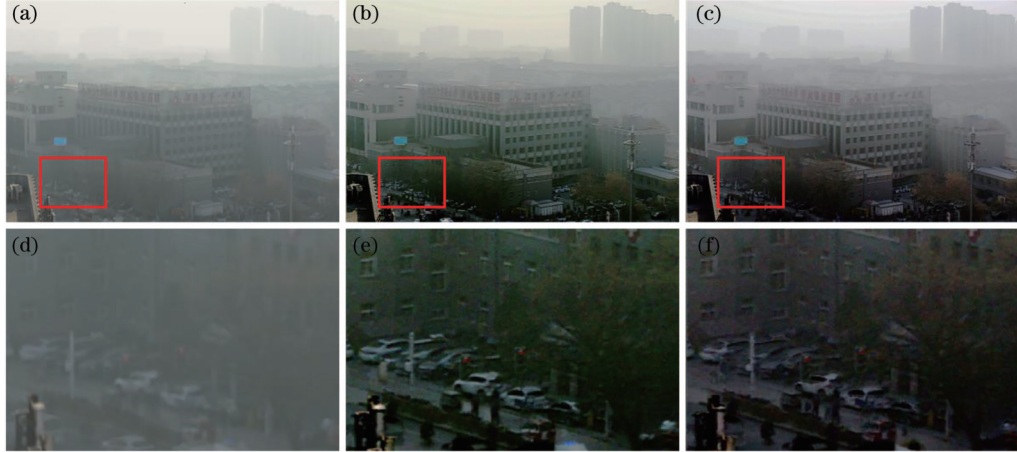


图 7 在浓雾下对场景 4 的去雾效果图。(a)带雾图;(b)本文方法的去雾图;(c)单图像暗通道方法的去雾图;
(d)~(f)图 7(a)~(c)框选部分的放大图

Fig. 7 Dehazing effect under dense haze for scene 4. (a) Image with haze; (b) dehazing image obtained by proposed method; (c) dehazing image obtained by single image dark channel method; (d)~(f) enlargement images of selected boxes in Figs. 7(a)~(c)

4.3 结果比较分析

4.1 节直观展示了去雾结果。本文还采用无参考的图像质量评价方法,对去雾结果进行定量的分析。NRSS(no reference structural similarity)的计算式为^[12]

$$R_{NRSS} = 1 - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N SSIM(x_i, y_i), \quad (19)$$

式中:SSIM(x_i, y_i)为结构相似性值; N 为人为场景划分区域数。

首先对获得的去雾图像 I_L 进行低通滤波,得到

参考图像 I_R , 然后利用 Sobel 算子^[13]计算出两幅图像的像素梯度,所谓像素梯度就是两个相邻像素之间的像素值之差的导数。不同景物边缘差值越大,说明像素梯度越大,图像对比度越高。将图像 I_L 分成若干个区域,本文是将图像以 8×8 分块,区域之间的距离是 4,计算每个区域的方差,选取其中方差最大的前 64 个区域并在 I_R 中找到相同区域,利用(19)式计算该图像的 NRSS。

表 1 是在薄雾下对场景 1、2 的去雾效果对比,表 2 是在浓雾下对场景 3、4 的去雾效果对比。

表 1 薄雾去雾效果

Table 1 Effect of dehazing in mist

Image (mist)	Image with haze	Single image dark channel	Dual images based on quarter dark channel
NRSS (scene 1)	0.10395	0.11901	0.11809
NRSS (scene 2)	0.01445	0.05034	0.05541
Mean gradient (scene 1)	0.0190	0.0402	0.0517
Mean gradient (scene 2)	0.0087	0.0141	0.0151

图 8 为用本文算法对场景 1 和场景 3 去雾前后的灰度分布直方图,可以看出去雾的效果。去雾前,由于雾的存在,图像对比度低,即像素强度分布在偏白色区域且较为集中,转为灰度图后灰度值在

该位置集中、其他位置分布较少;而去雾后,由于没有了雾气,图像对比度较高,灰度分布直方图将会变得均衡化。

由上述比较可知,暗通道四分均值比较法无论

表 2 浓雾去雾效果

Table 2 Effect of dehazing in dense haze

Image (dense haze)	Image with haze	Single image dark channel	Dual images based on quarter dark channel
NRSS (scene 3)	0.067123	0.097424	0.099112
NRSS (scene 4)	0.24001	0.06807	0.065991
Mean gradient (scene 3)	0.0127	0.0395	0.0684
Mean gradient (scene 4)	0.0066	0.0187	0.0204

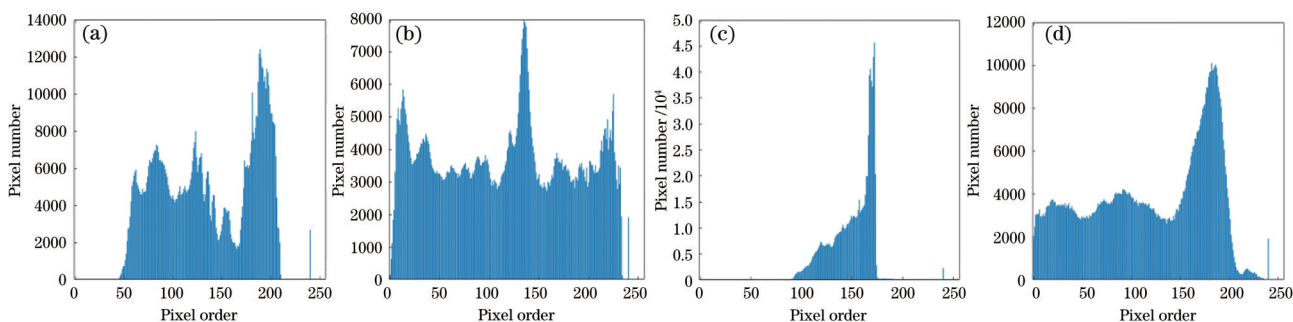


图 8 去雾前后图像灰度直方图对比。(a)场景 1 去雾前;(b)场景 1 去雾后;(c)场景 3 去雾前;(d)场景 3 去雾后

Fig. 8 Comparison of image gray histograms before and after dehazing. (a) Before dehazing of scene 1; (b) after dehazing of scene 1; (c) before dehazing of scene 3; (d) after dehazing of scene 3

是在薄雾天气下还是在浓雾天气下均有不错的图像去雾效果,但浓雾场景下的图像去雾效果更加明显;在 NRSS 数值上,暗通道四分均值比较法和单图像暗通道去雾法的 NRSS 与去雾前的 NRSS 相比均有明显提升;在平均梯度数值上,暗通道四分均值比较法与单图像暗通道去雾法得到的图像平均梯度值相比薄雾和浓雾情况下的图像平均梯度值都有较大提升,特别是在场景 3 下,本文算法去雾后的图像平均梯度大小比单图像暗通道法提高了 73.2%,这说明使用四分暗通道均值比较法获得的图像对比度更高,去雾效果更好。在估计无穷远处大气光强的应用场景上,暗通道四分均值比较法克服了场景中有大亮白色场景建筑物的情形,使得估计值更为准确,该方法的适用范围更加广泛。

5 结 论

通过获取 0° 、 45° 、 90° 、 135° 4 个角度的偏振图像,计算出了偏振去雾所需要的亮度最大和亮度最小的双角度偏振图像。在无穷远处大气光强的估计方面,引入四分暗通道均值比较法,以暗通道法为基础,将暗通道图与四分均值比较法相结合,拓宽了该方法的应用范围,而且使得估计结果更加准确,这为估计无穷远处大气光强提供了一种新思路。四分暗通道均值比较法在薄雾和浓雾环境下

均取得了较好的实验结果,得到的图像梯度相比原图像提升了 70% 以上, NRSS 提升了 14% 以上。

本文算法的去雾效果明显,但在低亮度雾或霾天气下,本文算法对像素强度较低区域的还原不够明显,如浓雾实验环境下的去雾图像中出现了中部天空区域和低矮建筑区域亮度过低的现象。目前正在考虑使用低亮度场景识别方案并进行进一步的亮度补偿来解决这个问题,这将给今后的研究提供了一个新的思路和研究方向。基于大气散射模型的图像去雾技术发展到今天,虽然各种手段层出不穷,但所用物理模型和基本算法较少,如果要对不同的天气状况针对性地进行去雾,还需要从散射介质传播过程出发,结合天气状况建立更适用的大气光散射衰减模型。

参 考 文 献

- [1] 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: 1-8.
- [2] 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, December 8-14, 2001,

- Kauai, HI, USA. New York: IEEE Press, 2001.
- [3] Schechner Y Y, Narasimhan S G, Nayar S K. Polarization-based vision through haze[J]. Applied Optics, 2003, 42(3): 511-525.
- [4] Schechner Y Y, Karpel N. Recovery of underwater visibility and structure by polarization analysis[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2005, 30(3): 570-587.
- [5] Zhang B B, Dai S K, Sun W Y. Fast image haze-removal algorithm based on the prior dark-channel[J]. Journal of Image and Graphics, 2013, 18(2): 184-188. 张冰冰, 戴声奎, 孙万源. 基于暗原色先验模型的快速去雾算法[J]. 中国图象图形学报, 2013, 18(2): 184-188.
- [6] Wang Z, Feng Y. Fast single haze image enhancement[J]. Computers & Electrical Engineering, 2014, 40(3): 785-795.
- [7] Sim K S, Tso C P, Tan Y Y. Recursive sub-image histogram equalization applied to gray scale images[J]. Pattern Recognition Letters, 2007, 28(10): 1209-1221.
- [8] 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, 2009, 33(12): 2341-2353.
- [9] Wang X C, Sun X D, Song R X. Single image dehazing with V-transform and dark channel prior[J]. Journal of Systems Science and Information, 2020, 8(2): 185-194.
- [10] Xia P, Liu X B. Real-time static polarimetric image dehazing technique based on atmospheric scattering correction[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2016, 39(6): 33-36, 71. 夏璞, 刘学斌. 大气散射校正静态实时偏振图像去雾技术[J]. 北京邮电大学学报, 2016, 39(6): 33-36, 71.
- [11] Zhang Y P, Hu X Q, Yin D K, et al. Onboard polarization calibration technique of multi-angle polarization imager based on Sun glint from ocean[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(15): 1528002. 张一鹏, 胡秀清, 殷德奎, 等. 基于海洋耀斑的多角度偏振成像仪在轨偏振定标技术[J]. 光学学报, 2020, 40(15): 1528002.
- [12] Xie X F, Zhou J, Wu Q Z. No-reference quality index for image blur[J]. Journal of Computer Applications, 2010, 30(4): 921-924. 谢小甫, 周进, 吴钦章. 一种针对图像模糊的无参考质量评价指标[J]. 计算机应用, 2010, 30(4): 921-924.
- [13] Wang S P, Albrecht B A. A mean-gradient model of the dry convective boundary layer[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1990, 47(1): 126-138.
- [14] Chen Y, Lu C T. Single image dehazing based on superpixel segmentation combined with dark-bright channels[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(16): 161023. 陈永, 卢晨涛. 基于超像素分割和暗亮通道结合的单幅图像去雾[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(16): 161023.
- [15] Zhang Y M. Research on all Stokes polarization imaging technology[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2015. 张玉梅. 全 Stokes 偏振成像技术的研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2015.
- [16] Su Y, Zhang C, Wang Y M, et al. Optimization of incident light polarization state in pressure sensing based on fiber polarization properties[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(14): 1406001. 苏洋, 张超, 王艺敏, 等. 基于光纤偏振特性的压力传感中最佳入射光偏振态的确定[J]. 光学学报, 2020, 40(14): 1406001.