

## 基于距离加权色偏估计的低质图像增强

曹思颖<sup>1,2</sup>, 张弦<sup>1</sup>, 蒲恬<sup>1,2</sup>, 彭真明<sup>1,2</sup>

(1. 电子科技大学信息与通信工程学院, 成都 611731; 2. 电子科技大学成像探测与智能感知实验室, 成都 610054)

**摘要:** 有色雾、烟、尘等恶劣大气条件下的低质图像具有低可见度和颜色偏移的特点, 给人类观察和计算机视觉应用带来困难。当前针对此类图像的增强算法通常忽略了景物与相机的距离对色偏的影响, 为了在增强可见度时更好地恢复图像颜色, 本文提出低质图像成像可见度下降及色偏与景物距离的关系模型和求解方法。该方法首先通过图像的局部亮度估算距离, 然后通过距离估算图像的色偏矩阵, 再求解退化模型得到可见度与颜色得到恢复的图像, 最后将恢复的图像与限制对比度自适应直方图均衡(Contrast limited adaptive histogram equalization, CLAHE)增强图像进行距离加权融合, 得到进一步细节增强的图像。实验表明, 本文提出的方法与同类方法相比, 在达到高图像质量评价指标的同时, 明显具有更好的颜色恢复结果。

**关键词:** 图像复原; 色偏校正; 距离估计; 色偏模型; 低质图像

**中图分类号:** TP751      **文献标志码:** A

## Low-Quality Image Enhancement Based on Distance Weighted Color Cast Estimation

CAO Siying<sup>1,2</sup>, ZHANG Xuan<sup>1</sup>, PU Tian<sup>1,2</sup>, PENG Zhenming<sup>1,2</sup>

(1. School of Information and Communication Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China; 2. Laboratory of Image Detection and Intelligent Perception, School of Information and Communication Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

**Abstract:** Low-quality images under harsh atmospheric conditions such as colored fog, smoke and dust are characterized by low visibility and color cast, which bring difficulties to human observation and computer vision applications. Current enhancement algorithms for such images usually ignore the influence of the distance from the scene to the camera on the color cast. In order to better restore color while enhancing visibility, a relationship model between visibility reduction, color cast and distance and its solution method are proposed. First, the distance is estimated by the local brightness of the image, and the color cast matrix of the image is estimated by the distance. Then, the visibility and color restored image is obtained by solving the degradation model. Finally, the restored image is fused with a contrast limited adaptive histogram equalization (CLAHE) enhanced image by distance weighting for further detail enhancement. Experiments show that, compared with similar methods, the proposed method achieves high image quality evaluation indexes and has significantly better color recovery results.

**Key words:** image restoration; color cast correction; distance estimation; color cast model; low-quality image

## 引言

图像的成像质量直接影响目标检测、目标识别和目标跟踪等常见应用的性能。户外可见光图像处理是计算机视觉的重要部分,在恶劣的大气条件下,可见光图像呈现可见距离下降、对比度降低、光照不均、颜色发生偏移以及图像细节模糊等特点<sup>[1-3]</sup>,这样的图像给图像处理应用带来困难。因此,雾、烟、尘等恶劣大气条件下的图像增强被广泛关注和研究。这些条件下图像的退化可以与白色雾天气图像相类比,空气中大量颗粒对光的吸收和散射使得图像的对比度与细节信息随着距离显著下降。与白雾天气图像不同,由于有色烟、尘等的颗粒对光的某些波段吸收更快,会使得图像发生色偏。以沙尘图像为例,图像整体偏向黄色,且这样的色偏影响随景物距离增加。此外,由于沙尘颗粒明显大于雾颗粒,成像时引入更大的噪声干扰,且干扰随距离增强。

目前可用于对带大气色偏的低质图像进行增强的方法可以分为2个主要类型。第1类是根据图像本身的灰度分布等信息进行增强的方法,包括直方图均衡、伽马校正等<sup>[4]</sup>早期方法和以Retinex理论<sup>[5]</sup>为基础的光照不均图像增强方法等<sup>[6-10]</sup>,这类方法通常运算复杂度较低、单帧运算速度快,但由于没有考虑图像降质的物理模型,对降质程度随景物距离变化的雾等要素的去除能力有限。第2类是通过求解图像退化的物理模型<sup>[11]</sup>来得到复原图像的方法<sup>[12]</sup>,当前这类方法通常是在雾天气图像增强中的暗通道先验<sup>[13]</sup>方法上的改进,通过暗通道先验计算大气透射率图,然后通过引导滤波<sup>[14]</sup>等方法细化透射率图,最后解退化模型得到增强图像<sup>[15-20]</sup>,这类方法对白雾的去除效果较好,但由于没有对颜色的针对性校正,直接用于带色偏的图像时容易产生颜色失真。也有很多研究将增强分解为2个步骤:颜色校正和可见度恢复。先通过第1类方法或基于灰色世界假设<sup>[21]</sup>进行颜色校正使图像恢复成类似白雾天气下图像,再通过去雾算法进行增强<sup>[22-27]</sup>,这类方法部分解决了图像色偏的问题,但由于没有考虑图像色偏的物理模型,对颜色的校正能力有限。当前对带有大气色偏的低质图像增强算法普遍忽略了图像降质原理中的一个基本事实,即图像的色偏不是图像的全局属性,这种色偏效应随着景物距离增加。要得到色彩更加真实的图像,必须考虑距离的影响。

本文主要研究以沙尘图像为代表的带大气色偏和强干扰的低质图像增强方法。为了同时去除基于景物距离的色偏和雾退化效果,本文提出图像依据景物距离退化的模型,说明图像的景物距离可以通过其局部亮度进行估计,根据距离可以估算出图像的色偏矩阵,求解退化模型消除色偏对图像的影响并得到复原图像。最后通过限制对比度自适应直方图均衡(Contrast limited adaptive histogram equalization, CLAHE)<sup>[28]</sup>增强图像进行距离加权的细节增强,得到可见度、颜色、细节得到恢复的图像。本文中的距离特指成像时图像中各像素点所代表的区域中景物到相机的距离。

## 1 研究背景

### 1.1 大气散射模型

有大气色偏的图像可以近似看作在有色雾影响下退化的图像。在计算机视觉和计算机图形学中,通常通过大气散射模型来描述雾对图像的影响,表达式为

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

式中: $x$ 为图像任意点的坐标; $I(x)$ 为退化后的图像; $J(x)$ 为无雾干扰的理想原始图像; $A(x)$ 为大气光矩阵; $t(x)$ 为透射率矩阵。 $t(x)$ 有多种估算形式,其中几种常用形式为

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

$$t(x) = \frac{d_{\max} - d(x)}{d_{\max} - d_{\min}} \quad (3)$$

式中: $d(x)$ 表示景物距离的矩阵; $d_{\max}$ 和 $d_{\min}$ 表示 $d(x)$ 的最大值和最小值。

## 1.2 基本假设

对有大气色偏的图像,为了估算图像的色偏,需要增加4个额外假设。

(1)灰色世界假设。灰色世界假设下,可见光自然图像的各种颜色是均匀分布的,体现为图像的RGB三个通道的均值相等,表达式为

$$\mu_{J_r} = \mu_{J_g} = \mu_{J_b} \quad (4)$$

式中: $\mu$ 表示均值; $J_r$ 、 $J_g$ 、 $J_b$ 分别表示图像 $J$ 的3个通道。

(2)自然图像色彩动态范围饱满。在灰色世界假设的基础上,假设自然图像色彩丰富、鲜艳,体现为图像RGB三个通道的像素值能达到相同的上下限。假设图像最小、最大值分别为0和1,则有

$$\begin{aligned} \min(J_r) &= \min(J_g) = \min(J_b) \\ \max(J_r) &= \max(J_g) = \max(J_b) \end{aligned} \quad (5)$$

(3)大气光颜色单调均匀。假设图像退化过程中,大气光是单色的且在全视场上均匀分布,表现为式(1)所示退化模型的大气光的各通道为定值,表达式为

$$\begin{cases} A_r(x) = a_r \\ A_g(x) = a_g \\ A_b(x) = a_b \end{cases} \quad (6)$$

式中: $A_r(x)$ 、 $A_g(x)$ 、 $A_b(x)$ 分别表示大气光矩阵 $A(x)$ 的3个通道的像素值; $a_r$ 、 $a_g$ 、 $a_b$ 为常数。

(4)在图像的一个足够大的小区域内,假设(1~3)也成立。

在以上4个假设下,可以根据景物距离估算图像的色偏,并通过解退化模型去除色偏和雾效果的影响。

## 2 本文方法

### 2.1 图像退化模型

有色雾、烟、尘等条件下的图像的一个重要特点是通常有严重色偏,为了估计并消除这种影响,提出一种带有色偏描述的图像退化模型,表达式为

$$I(x) = [J(x)t(x) + a_r(1 - t(x))] + X(x)(1 - t(x)) \quad (7)$$

$$X: \begin{cases} X_r(x) = 0 \\ X_g(x) = a_g - a_r \\ X_b(x) = a_b - a_r \end{cases} \quad (8)$$

式(7)是以R通道为参考通道的带色偏的图像退化模型,可以以任意通道作为参考通道。 $a_r$ 、 $a_g$ 、 $a_b$ 为常数,定义同式(6)。 $X(x)$ 是色偏矩阵,在以R通道为参考通道的情况下,定义为式(8)。简便起见,取 $t(x)$ 为式(3)形式,并设 $d_{\max}$ 和 $d_{\min}$ 分别为1和0,可得到

$$I(x) = J(x)(1 - d(x)) + A(x)d(x) \quad (9)$$

$$I(x) = J(x)(1 - d(x)) + a_r d(x) + X(x)d(x) \quad (10)$$

式(10)表明,带色偏的低质图像的退化过程可以分解为基于景物距离的白色雾退化过程与色偏退化过程的叠加,且色偏退化过程与景物距离 $d(x)$ 有关,如图1所示。取图中内容相似、距离不同的区域如红框所示,对这些区域分别计算3通道灰度分布直方图,并计算区域A和B的3通道均值的标准差分别为0.188 3、0.337 9。根据灰色世界假设,可知随景物距离增加,色偏程度提高。

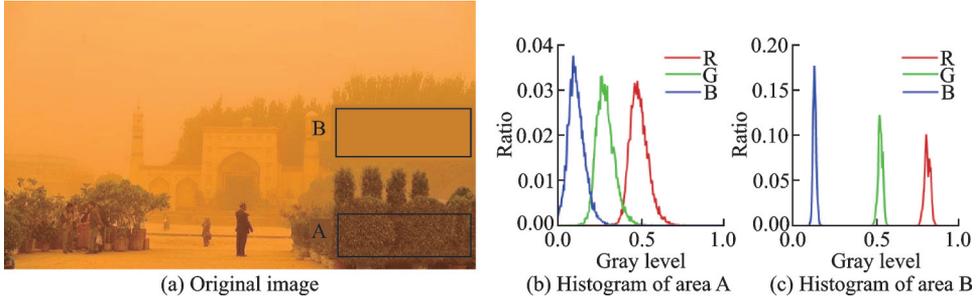


图1 景物距离对色偏的影响

Fig.1 Influence of distance on color cast

## 2.2 色偏估计

对色偏的估计就是对式(10)中  $X(x)d(x)$  值的估计。待恢复图像  $I(x)$  的通道间的均值差表达式为

$$\frac{1}{n} \sum (I_2(x) - I_1(x)) = \frac{1}{n} \sum ((J_2(x) - J_1(x))(1 - d(x))) + \frac{1}{n} \sum ((a_2 - a_1)d(x)) \quad (11)$$

式中下标 1 和 2 表示任意两个通道。根据式(4),  $J(x)$  的任意通道均值相等, 可得

$$\begin{cases} \mu_{I_g} - \mu_{I_r} = (a_g - a_r)\mu_d \\ \mu_{I_b} - \mu_{I_r} = (a_b - a_r)\mu_d \end{cases} \quad (12)$$

式中  $\mu_d$  为  $d(x)$  的均值。进而得到  $X(x)d(x)$  的估计形式为

$$X(x)d(x): \begin{cases} X_r(x)d(x) = 0 \\ X_g(x)d(x) = (\mu_{I_g} - \mu_{I_r}) \frac{d(x)}{\mu_d} \\ X_b(x)d(x) = (\mu_{I_b} - \mu_{I_r}) \frac{d(x)}{\mu_d} \end{cases} \quad (13)$$

式(13)表明, 图像的色偏量可以用景物距离加权的通道均值差表示。

## 2.3 景物距离估计

为了求解退化模型, 需要估计图像中景物的距离。结合式(5)与式(9), 可知退化图像  $I$  的最小值是  $A_x d_{\min}$ , 其中  $x$  为  $A$  的各通道, 且根据式(6),  $A$  的各通道分别为定值。因此通过图像的小区域内 3 通道均值的最小值来计算距离的估计值  $d'(x)$ 。

首先求输入图像的通道均值  $I_{\text{avg}}(x)$ , 表达式为

$$I_{\text{avg}}(x) = \frac{1}{3} (I_r(x) + I_g(x) + I_b(x)) \quad (14)$$

式中  $I_r(x)$ ,  $I_g(x)$ ,  $I_b(x)$  分别表示图像 RGB 三个通道的值, 式(14)等价于求图像  $I(x)$  在 HSV 空间中的 V 通道值。对  $I_{\text{avg}}(x)$  进行最小值滤波得到距离的粗估计  $d'_c(x)$  为

$$d'_c(x) = \min_{t \in S(x, s_w, s_h)} \{I_{\text{avg}}(t)\} \quad (15)$$

式中  $S(x, s_w, s_h)$  表示  $d'_c(x)$  以  $x$  为中心、长宽分别为  $s_w$  和  $s_h$  的窗口, 本文中  $s_w$  和  $s_h$  取为图像  $I(x)$  的长宽最小值的 0.125 倍。对  $d'_c(x)$  进行引导滤波得到距离的精估计  $d'(x)$ , 表达式为

$$d'(x) = G(d'_c(x), I(x), s_g) \quad (16)$$

式中右侧表示对  $d'_c(x)$  进行以  $I(x)$  为引导图、滤波窗口长宽为  $s_g$  的引导滤波, 本文中  $s_g$  取为图像  $I(x)$

的长宽最小值的0.04倍。引导滤波的详细过程见文献[14]。

这样估算的距离可以认为与真实距离相差一个常数倍率 $k$ ,即

$$d'(x) = kd(x) \quad (17)$$

$d'(x)$ 结果如图2所示,计算步骤如下:

输入:原始图像,滤波窗口大小 $s_w, s_h, s_g$

输出: $d'(x)$ 的估计值

(1)按式(14)求原始图像的3通道均值 $I_{\text{avg}}(x)$ ;

(2)按式(15)对 $I_{\text{avg}}(x)$ 进行最小值滤波得到距离的粗估计结果

$d'_c(x)$ ;

(3)按式(16)对 $d'_c(x)$ 进行引导滤波得到距离的细化结果 $d'(x)$ 。

## 2.4 解退化模型

根据式(10),只要解出 $J(x)$ 即可得到复原图像,即

$$J(x) = \frac{[I(x) - X(x)d(x)] - a_r d(x)}{1 - d(x)} \quad (18)$$

式(18)可以看作先通过 $I(x) - X(x)d(x)$ 修正图像的颜色

偏,然后对图像进行白雾的去雾过程,因此 $a_r$ 可以看作颜色校正后的白雾图像的大气光值。参考暗通道先验算法中大气光的求法,取图像距离估计矩阵 $d'(x)$ 中距离值最大的5%的点的3通道均值作为大气光值 $a_r$ ,且限制 $a_r$ 的最大值为0.9防止过度增强。 $X(x)d(x)$ 的值可由式(13,17)求出。对于 $d(x)$ ,由于精确估计图像中景物的距离非常困难,式(17)中的 $k$ 值难以精确确定,且 $k$ 的取值影响白雾的去除程度,因此重新定义 $k$ 为距离的置信度,经过测试, $k=0.65$ 时通常可以获得较好效果。

根据式(5), $J(x)$ 的最大、最小值分别为1和0。设式(18)等号右侧解得的结果为 $J'(x)$ ,有

$$J(x) = \frac{J'(x) - J'_{\min}}{J'_{\max} - J'_{\min}} \quad (19)$$

式中: $J'_{\max}$ 和 $J'_{\min}$ 分别表示图像 $J'(x)$ 所有通道中的最大值与最小值,实际求取时通常需要去掉 $J'(x)$ 中灰度值最大和最小的 $pn$ 个像素, $n$ 为总像素数, $p$ 通常取0.001。

## 2.5 细节增强

对式(19)解得的恢复图像 $J(x)$ 可以进行进一步细节增强。考虑到图像噪声随景物与相机间距离增大而增强,因此图像细节的置信度随距离增加而降低,细节增强公式为

$$J_f(x) = J(x)d'(x) + F(J(x))(1 - d'(x)) \quad (20)$$

式中: $J_f(x)$ 为最终增强结果; $F(\cdot)$ 表示细节增强算法。本文选用CLAHE算法,首先对图像进行分块并计算各块直方图,然后限制直方图裁剪的最大灰度值并计算累积分布函数,最后通过插值来获取各像素的灰度分配,能在抑制噪声放大的同时按局部信息提升图像细节对比度。

## 3 实验验证

为了测试本文提出的方法的有效性,从网络收集了100幅以沙尘图像为主的各类场景与颗粒浓度下的低质图像作为测试集,并在这些图像上将本文算法与6种具有代表性的方法进行对比。对比方法分别是:GW<sup>[21]</sup>+DCP<sup>[13]</sup>方法、HRDCP方法<sup>[23]</sup>、BCC方法<sup>[24]</sup>、RBCP方法<sup>[25]</sup>、AARNCB方法<sup>[26]</sup>、DIEDC方法<sup>[27]</sup>。其中,GW+DCP方法是颜色校正、去雾两步去有色雾、烟、尘方法的代表和基准;HRDCP通过GW进行色彩校正,再通过减弱光环效应的DCP进行去雾;BCC方法注意到色偏图像B

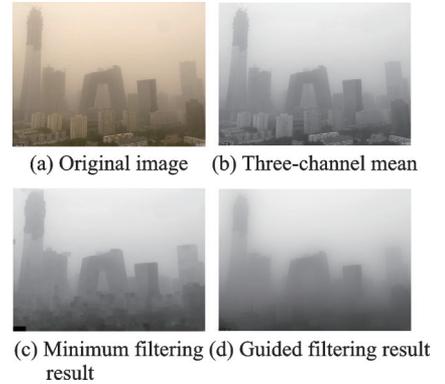


图2  $d'(x)$ 估算结果

Fig.2 Estimate of  $d'(x)$

通道值整体偏小且不满足DCP假设,因此通过对B通道施加补偿,然后进行白平衡和改进的引导滤波进行图像增强;RBCP同样注意到了B通道偏小的特点,提出将反转B通道代入DCP的方法对降质模型进行求解;AARNCB方法是一种基于加权最小二乘滤波的DCP和自适应颜色校正的色偏图像去雾方法;DIEDC方法在Lab空间对图像进行颜色校正,然后使用减弱光环效应的DCP进行增强。

### 3.1 参数设置

实验中,式(15)的最小值滤波中 $s_w$ 和 $s_h$ 取输入图像 $I(x)$ 的长宽最小值的0.125倍;式(16)的引导滤波中 $s_g$ 取为输入图像 $I(x)$ 的长宽最小值的0.04倍;解退化模型时,置信度 $k$ 取0.65;求取式(19)中 $J'_{\max}$ 和 $J'_{\min}$ 时,去掉的 $J'(x)$ 中灰度值最大和最小的 $0.001n$ 个像素, $n$ 为总像素数。

### 3.2 定性比较

在数据集中所有100幅图像上运行本文算法与上述5种算法进行对比,挑选出具有代表性的7组图像如图3所示。图3中,颗粒的浓度导致的色偏依次提升。GW+DCP方法不能较好地修正色偏,处理结果颜色很暗且在天空处产生光环效应。HRDCP方法的结果有较严重的颜色失真,容易在物体边缘产生光环效应,并且图像噪声被过度增强。BCC方法能够较好地校正图像的色偏,但结果与本文方法相比,对雾效的去除能力较弱,细节更模糊,对比度更低。RBCP方法在图像色偏较大时天空区域失真为黄色。AARNCB方法稳定性较弱,在不同场景中输出结果整体明暗程度不一,且对色偏的修正不稳定:在场景2、4、6中偏黄,场景3、5中偏紫,该方法在未展示在图3中的更多场景的测试中,通常如场景5产生明显的近景呈紫色失真。DIEDC方法由于原文中使用了2次亮度提升操作,测试结果整体呈现过度曝光,算法参数稳定性不足,在场景4、6中偏黄,在场景5中偏紫,在更多测试中通常如场景5、6在近景产生绿、蓝色失真。本文方法与其他方法相比更加稳定,结果更符合人眼对图像的理解,在各种色偏和颗粒浓度的条件下均能较好地去除雾效应,并得到颜色自然的图像。

为了分析本文方法对细节增强的能力,对图3中第2、3、5幅图的原图和处理结果的局部进行放大如图4所示,其中从上至下分别为原图、原图局部放大、细节增强前、细节增强后。对比可知,原图中模

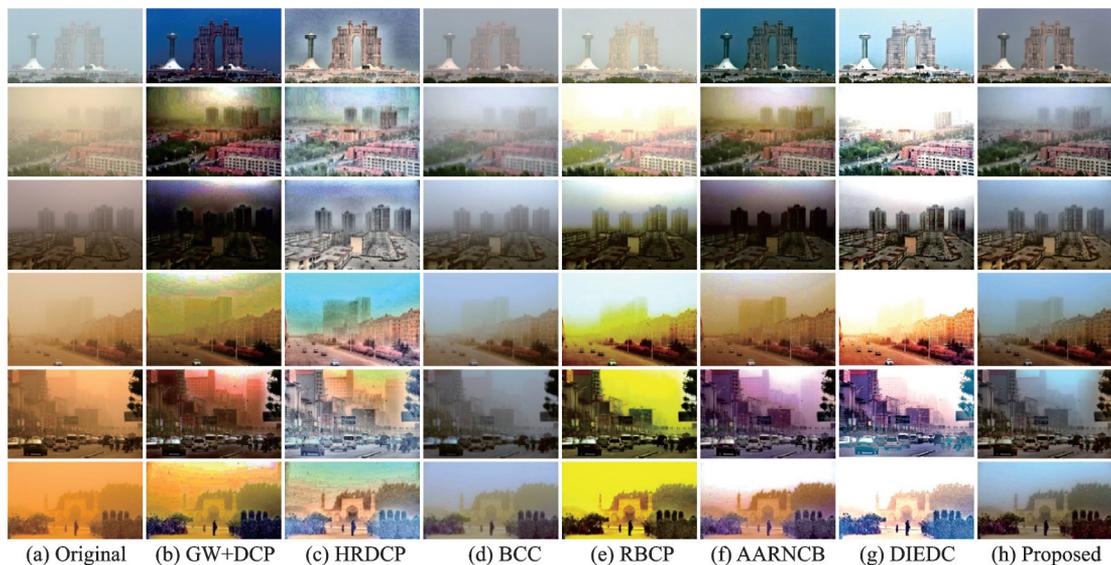


图3 定性对比

Fig.3 Qualitative comparison

糊、对比度低的细节被增强。对比细节增强前后的图像可知,细节增强前局部偏暗的问题被修正,图像细节的清晰度和颜色丰富度被进一步提升。

### 3.3 定量评价

为了量化评价本文方法处理结果的有效性,采用3种无参考评价指标进行测试:自然图像质量评估方法(Natural image quality assessment, NIQE)<sup>[29]</sup>、基于感知的图像质量评估方法(Perceptual image quality assessment, PIQE)<sup>[30]</sup>、盲/无参考图像空间质量评估方法(Blind/referenceless image spatial quality evaluator, BRISQUE)<sup>[31]</sup>。NIQE通过从待测图像中提取基于场景统计信息的特征,并计算这些特征与自然图像中提取的统计特征的距离来得到质量评分。PIQE首先将图像分块,计算各块的活跃度,对活跃块计算块效应、模糊和噪声3类失真,并累积得到图像的最终质量评分。BRISQUE通过从待测图像中提取基于场景统计信息的特征,并输入到被训练于根据这些特征预测图像质量的支持向量机中,并由支持向量机输出图像质量评分。3种指标的结果中,更小的值代表更高的图像质量。在数据集中所有图像上测试本文算法与6种代表性算法,取测试结果的平均值如表1所示。结果显示,本文方法在3个指标上都得到了更好的结果,BRISQUE和NIQE指标评价图像的亮度分布与自然图像的相似度,更低的数值说明本文的结果更加自然。PIQE指标较低说明本文结果的图像块效应、模糊、噪声3类失真都更少。

为了验证本文方法细节增强部分的有效性,采用图像细节评价中常用的2种无参考评价指标进行消融实验:平均梯度 $G$ 和熵 $E$ 。其中图像梯度能表示图像局部灰度值变化的程度,细节清晰的图像平均梯度较大;熵是信息论中衡量数据信息量的指标,细节清晰的图像信息量较大、熵值较大。平均梯度和熵的计算公式为

$$G = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \sqrt{\Delta x F(i, j)^2 + \Delta y F(i, j)^2} \quad (21)$$

$$E = - \sum_{i=0}^{255} p_i \lg p_i \quad (22)$$

式中: $\Delta x F(i, j)$ 、 $\Delta y F(i, j)$ 表示 $x$ 、 $y$ 方向梯度; $M$ 、 $N$ 表示图像长和宽;将图像灰度平分为256级后计算熵; $p_i$ 表示对应灰度级的出现概率。

在测试集中所有图像上对原图和细节增强前后的图像进行测试如表2所示。结果显示,通过细节增强,图像的平均梯度和熵值都得到了提升,图像细节得到了有效增强。



图4 细节增强效果分析

Fig.4 Analysis of detail enhancement

表1 定量评价

Table 1 Quantitative evaluation

指标	NIQE	PIQE	BRISQUE
输入图像	3.515 0	43.043 0	31.345 4
GW+DCP	3.496 4	43.376 4	27.097 4
HRDCP	3.806 8	41.158 7	26.174 5
BCC	3.372 1	41.748 0	31.595 3
RBCP	4.503 5	46.511 1	35.033 9
AARNCB	3.473 6	43.088 8	27.964 7
DIEDC	4.207 7	42.209 3	36.570 9
本文方法	3.355 2	41.143 2	25.574 5

表2 细节增强效果消融实验

Table 2 Ablation experiments of detail enhancement

指标	原图	细节增强前	细节增强后
平均梯度	0.010 5	0.028 3	0.032 3
熵	6.412 4	7.492 9	7.544 0

## 4 结束语

本文提出了一种基于距离加权色偏估计的低质图像增强方法。有色雾、烟、尘等条件下的图像是具有大气色偏和雾效应的图像,当前的针对此类图像的增强算法通常忽略了景物与相机的距离对色偏的影响。本文构建了一种强调景物距离的图像退化模型,通过图像的局部亮度估计景物距离,根据距离计算图像的色偏矩阵并通过解退化模型完成图像增强过程,算法最后通过距离加权的 CLAHE 增强图像的细节。定性和定量分析表明,本文方法与同类方法相比,结果具有更自然的颜色和更低的失真,并且在不同场景下具有更强的自适应性能。

### 参考文献:

- [1] HUANG S C, CHEN B H, WANG W J. Visibility restoration of single hazy images captured in real-world weather conditions [J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2014, 24(10): 1814-1824.
- [2] 彭真明, 陈颖频, 蒲恬, 等. 基于稀疏表示及正则约束的图像去噪方法综述[J]. *数据采集与处理*, 2018, 33(1): 1-11.  
PENG Zhenming, CHEN Yinpin, PU Tian, et al. Image denoising based on sparse representation and regularization constraint: A review[J]. *Journal of Data Acquisition and Processing*, 2018, 33(1): 1-11.
- [3] PENG Y T, LU Z, CHENG F C, et al. Image haze removal using airlight white correction, local light filter, and aerial perspective prior[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2019, 99: 1.
- [4] 祝培, 朱虹, 钱学明, 等. 一种有雾天气图像景物影像的清晰化方法[J]. *中国图象图形学报*, 2004(1): 124-128.  
ZHU Pei, ZHU Hong, QIAN Xueming, et al. An image clearness method for fog [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2004(1): 124-128.
- [5] LAND E H. Recent advances in Retinex theory[J]. *Vision Research*, 1986, 26(1): 7-21.
- [6] 谢凤英, 汤萌, 张蕊. 基于 Retinex 的图像增强方法综述[J]. *数据采集与处理*, 2019, 34(1): 1-11.  
XIE Fengying, TANG Meng, ZHANG Rui. Review of image enhancement algorithms based on Retinex[J]. *Journal of Data Acquisition and Processing*, 2019, 34(1): 1-11.
- [7] TENG L, XUE F, BAI Q. Remote sensing image enhancement via edge-preserving multiscale Retinex[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2019, 11(2): 1-10.
- [8] 李忠海, 宋笑宇, 陈灿灿, 等. 基于 Retinex 算法的亮度分层图像增强算法[J]. *数据采集与处理*, 2019, 34 (1): 41-49.  
LI Zhonghai, SONG Xiaoyu, CHEN Cancan, et al. Brightness level image enhancement algorithm based on Retinex algorithm [J]. *Journal of Data Acquisition and Processing*, 2019, 34 (1): 41-49.
- [9] ZHOU J, ZHANG D, ZOU P, et al. Retinex-based laplacian pyramid method for image defogging[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 122459-122472.
- [10] 蒲恬, 张子夜, 彭真明. 保持自然度的非均匀光照图像增强的 Retinex 算法[J], *数据采集与处理*, 2021, 36(1): 76-84.  
PU Tian, ZHANG Ziyue, PENG Zhenming. Enhancing uneven lighting images with naturalness preserved Retinex algorithm [J]. *Journal of Data Acquisition and Processing*, 2021, 36(1): 76-84.
- [11] BERMAN D, AVIDAN S. Non-local image dehazing[C]//*Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. Las Vegas, USA: IEEE, 2016: 1674-1682.
- [12] TAREL J P, HAUTIERE N. Fast visibility restoration from a single color or gray level image[C]//*Proceedings of 2009 IEEE 12th International Conference on Computer Vision*. Kyoto, Japan: IEEE, 2009: 2201-2208.
- [13] HE K, SUN J, TANG X. Single image haze removal using dark channel prior[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence*, 2011, 33(12): 2341-2353.
- [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.
- [15] LI C, FAN T, MA X, et al. An improved image defogging method based on dark channel prior[C]//*Proceedings of 2017 2nd International Conference on Image, Vision and Computing (ICIVC)*. Chengdu, China: IEEE, 2017: 414-417.
- [16] 肖进胜, 高威, 邹白昱, 等. 基于天空约束暗通道先验的图像去雾[J]. *电子学报*, 2017, 45(2): 346-352.  
XIAO Jinsheng, GAO Wei, ZOU Baiyu. Image dehazing based on sky-constrained dark channel prior[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2017, 45(2): 346-352.
- [17] MA X, SHAO L M, XU G L, et al. Intelligent defogging method based on clustering and dark channel prior[C]// *Proceedings*

- of 2018 IEEE 3rd International Conference on Image, Vision and Computing (ICIVC). Chongqing, China: IEEE, 2018: 149-156.
- [18] TUFAIL Z, KHURSHID K, 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.
- [19] WANG T, TANG Y. Fast image defogging algorithm design based on dark channel prior[C]//Proceedings of 2019 3rd International Conference on Circuits, System and Simulation (ICCS). Nanjing, China: IEEE, 2019: 255-259.
- [20] 杨红, 崔艳. 基于开运算暗通道和优化边界约束的图像去雾算法[J]. 光子学报, 2018, 47(6): 244-250.  
YANG Hong, CUI Yan. Image defogging algorithm based on opening dark channel and improved boundary constraint[J]. Acta Photonica Sinica, 2018, 47(6): 244-250.
- [21] AGARWAL V, ABIDI B, KOSCHAN A, et al. An overview of color constancy algorithms[J]. Journal of Pattern Recognition Research, 2006, 1(1): 42-54.
- [22] DHAREJO F A, ZHOU Y C, DEEBA F, et al. A color enhancement scene estimation approach for single image haze removal [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2019 (99): 1-5.
- [23] SHI Z, FENG Y, ZHAO M, et al. Let you see in sand dust weather: A method based on halo-reduced dark channel prior dehazing for sand-dust image enhancement[J]. IEEE Access, 2019, 7(99): 116722-116733.
- [24] CHENG Y, JIA Z, LAI H, et al. A fast sand-dust image enhancement algorithm by blue channel compensation and guided image filtering[J]. IEEE Access, 2020, 8: 196690-196699.
- [25] GAO G X, LAI H C, JIA Z, et al. Sand-dust image restoration based on reversing the blue channel prior[J]. IEEE Photonics Journal, 2020. DOI: 10.1109/JPHOT.2020.2975833.
- [26] DHARA S K, ROY M, SEN D, et al. Color cast dependent image dehazing via adaptive airlight refinement and non-linear color balancing[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2020, 31(5): 2076-2081.
- [27] 孙启隆, 于萍, 司振惠, 等. 基于暗通道的沙尘图像增强算法[J]. 吉林大学学报(理学版), 2021, 59 (5): 1179-1187.  
SUN Qilong, YU Ping, SI Zhenhui, et al. Dust image enhancement algorithm based on dark channel[J]. Journal of Jilin University (Science Edition), 2021, 59 (5): 1179-1187.
- [28] ZUIDERVELD K. Contrast limited adaptive histogram equalization[J]. Graphics Gems, 1994. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-336156-1.50061-6>.
- [29] MITTAL A, SOUNDARARAJAN R, BOVIK A C, et al. Making a 'completely blind' image quality analyzer[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2013, 20(3): 209-212.
- [30] VENKATANATH N, PRANEETH D, CHANDRASEKHAR B, et al. Blind image quality evaluation using perception based features[C]// Proceedings of 2015 Twenty First National Conference on Communications (NCC). IIT Bombay, India: IEEE, 2015: 1-6.
- [31] MITTAL A, MOORTHY A K, BOVIK A C. No-reference image quality assessment in the spatial domain[J]. IEEE Transactions on Image Processing A Publication of the IEEE Signal Processing Society, 2012, 21(12): 4695.

## 作者简介:



曹思颖(1989-),男,博士研究生,研究方向:图像增强、红外目标检测、红外目标识别等,E-mail: caosiy-ing3008@163.com。



张弦(2002-),女,学士,研究方向:图像处理、信号与信息处理、红外目标检测等。



蒲恬(1973-),男,博士,讲师,研究方向:图像增强、基于视觉神经网络的图像处理、多源信息融合、智能信息处理等。



彭真明(1966-),通信作者,男,教授,博士生导师,研究方向:信号与信息处理、图像处理与分析、模式识别与机器视觉等,E-mail: zmpeng@uestc.edu.cn。