ISSN 1004-9037,CODEN SCYCE4
Journal of Data Acquisition and Processing Vol. 41,No. 1,Jan. 2026,pp. 174－186
DOI:10. 16337/j. 1004-9037. 2026. 01. 012

http://sjcj. nuaa. edu. cn
E-mail:sjcj@nuaa. edu. cn
Tel/Fax:＋86-025-84892742

基于色偏校正和天空分割的沙尘图像增强方法

牛宏侠[1,2]，宋丁鑫[1,2]，侯　涛[1]

(1.兰州交通大学自动化与电气工程学院,兰州 730070;2. 兰州交通大学甘肃省高原交通信息工程及控制重点实验室,兰州 730070)

摘　要: 针对沙尘图像目前存在的颜色偏移、清晰度低以及暗通道先验方法在处理图像天空区域时效果不好等问题,提出一种基于色偏校正和天空分割的沙尘图像增强方法。首先,结合通道补偿和灰度世界算法校正沙尘图像色偏。其次,提出了一种基于天空分割的去雾方法。通过信息熵确定图像的分割阈值,利用阈值将图像分割为天空区域和非天空区域;并利用融合窗口对暗通道进行优化;然后,引入自适应调节因子对透射率进行调节,利用大气散射模型还原图像。最后,在HSV(Hue, saturation, value)空间中利用自适应饱和度增强算法和自适应伽马矫正对图像饱和度和亮度进行调整。实验结果表明:所提方法可以校正沙尘图像的色彩偏移现象,提高图像的清晰度,同时可以提高天空区域的恢复效果。本文方法在平均梯度、标准差和信息熵3个量化指标上分别提高了2.27%、4.34%和0.25%。

关键词: 图像处理;沙尘图像;色偏校正;天空分割;图像去雾

中图分类号: TP394.1　　**文献标志码:** A

引用格式: 牛宏侠,宋丁鑫,侯涛. 基于色偏校正和天空分割的沙尘图像增强方法[J]. 数据采集与处理,2026,41(1):174-186. NIU Hongxia,SONG Dingxin,HOU Tao. Sand-dust image enhancement method based on color cast correction and sky segmentation[J].Journal of Data Acquisition and Processing,2026,41(1):174-186.

引　　言

在沙尘天气中,空气中含有的大量沙尘颗粒会对大气中的蓝光和绿光进行散射和吸收,导致成像设备获取的图像存在严重色偏和清晰度低的问题,进而会影响有关设备系统的性能。因此研究沙尘降质图像的增强方法具有很强的实际意义。沙尘图像增强方法主要目标是去除沙尘图像的色偏,提高图像的清晰度。目前这些方法大都可以分为3类:图像增强、图像复原以及深度学习的方法。

基于图像增强的方法主要通过直方图均衡化[1]、灰度世界[2]、Retinex[3-4]等方法直接对图像进行增强。文献[5]提出了基于融合的方法对沙尘图像进行增强,该方法首先采用统计策略进行色偏校正,之后计算清晰度、色度和突出度3种加权图像,再将输入图与权重图融合来获得增强图像。文献[6]提出在HSI(Hue, saturation, intensity)空间提高饱和度与对比度的去沙尘增强算法,首先通过绿色通道进行颜色校正,之后在HSI空间中对S通道进行自适应饱和度校正,对I通道利用限制对比度自适应直方图均衡化(Contrast limited adaptive histogram equalization, CLAHE)算法提高对比度,但该方法处理含有大片天空区域的图像时会产生光晕现象。文献[7]提出一种基于RGB(Red, green, blue)色彩平衡方法的沙尘降质图像增强算法,该算法首先利用保持颜色分量均值的RGB色彩平衡方法和带色彩恢复的

基金项目: 甘肃省高校产业支撑计划项目(2023CYZC-32);甘肃省自然科学基金(23JRRA850);甘肃省重点研发计划-工业类项目(23YFGA0049);兰州市人才创新创业项目(2023-RC-13)。
收稿日期: 2025-01-16;**修订日期:** 2025-03-28

多尺度视网膜(Multi-scale Retinex with color restore, MSRCR)算法来校正图像色偏,之后利用相对全局直方图拉伸(Relative global histogram streching,RGHS)算法并结合Lab颜色空间来增强图像,但该算法在去除沙尘方面有待提高。文献[8]提出蓝色通道补偿和引导滤波的沙尘图像增强方法,该方法可以校正图像色偏并增强图像的细节信息。文献[9]提出一种色彩校正和光照补偿的增强方法,使用颜色校正和拉伸算法校正沙尘图像的色偏,之后使用光照补偿算法对图像增强,使图像更加清晰。

基于图像复原的方法则是利用大气散射模型等物理模型来复原清晰图像[10]。文献[11]首先对沙尘图像进行色偏校正,之后在利用暗通道原理并结合亮通道对透射率和大气光值进行优化,从而恢复图像。文献[12]首先在Lab空间用灰度世界算法调整色差,之后利用伽马校正和暗通道去雾算法增强图像,最后将亮度补偿后的图像与对比度增强的图像进行融合。文献[13]提出了红色通道的校正模块和蓝色通道的去沙模块来复原沙尘图像。文献[14]提出了一种自适应色彩校正和饱和度先验的沙尘图像复原方法,通过通道补偿和色彩偏移方法实现图像色偏校正并通过大气散射模型复原图像。

此外,随着深度学习的发展,基于深度学习的沙尘图像处理也得到了人们的关注。但是,目前针对沙尘图像的数据集较少,因此也影响了深度学习在沙尘图像处理方面的发展。文献[15]提出了一种基于端到端循环生成对抗网络的去沙尘方法,设计了一种包含沙尘引导合成模块和清晰引导合成模块的联合优化的引导模块,并通过相应的判别器对生成器进行联合引导,减少颜色失真和伪影,从而显著提升图像质量。文献[16]提出了一种基于灰度补偿的图像预处理模块与特征融合网络结合的沙尘图像修复框架,首先通过图像预处理模块得到色偏校正图像与对比度增强图像,之后利用特征融合网络融合预处理后的图像。文献[17]设计了无配对图像的学习算法,并在Retinex模型上进行了图像去沙尘学习。该算法有效地去除了图像中的沙尘,但仍然存在伪影问题,尤其是在天空区域。文献[18]提出一种潜在内容引导的对抗性沙尘图像重建策略,在学习线和引导线之间交替训练骨干网络,优化提取器以准确捕获输入图像的潜在内容,并使重构器能够根据提取的内容重建目标图像。此外,设计了一个Desandformer模块,以增强模型提取和利用潜在特征的能力。但是,针对沙尘图像的深度学习方法大都依赖自己合成的数据集,使其鲁棒性较差,对真实沙尘图像处理效果不理想。

针对沙尘图像色偏以及图像天空区域效果不理想的问题,本文提出了一种基于色偏校正和天空分割的沙尘图像增强方法,主要研究内容和贡献如下:

(1)根据沙尘图像特性以及互补色原理,设计了沙尘图像色彩通道补偿方法,优化了传统色偏校正方法在沙尘图像色偏校正中存在的问题。

(2)在图像天空分割中提出了一种基于图像信息熵的图像分割方法,利用图像信息熵分割图像天空区域。在暗通道去雾中,采用融合方法改进图像暗通道,并设计透射率调节因子对图像透射率进行调节,提高图像天空区域的恢复效果。通过天空分割的去雾方法,提高了图像清晰度,消除了沙尘图像色偏校正后存在的雾霾影响。

(3)引入自适应饱和度算法和自适应伽马校正提高图像的饱和度和亮度,消除经过暗通道去雾后图像较暗的问题。

1 暗通道理论

1.1 大气散射模型

大气散射模型描述了图像的形成过程,根据大气散射模型可以将有雾图像表示为

$$I(x)=J(x)t(x)+A(1-t(x)) \tag{1}$$

式中:$I(x)$为已经拍摄得到的有雾图像,$J(x)$为清晰图像,A为大气光值,$t(x)$为透射率。由式(1)可以看出,只需估计出全局大气光值A和透射率$t(x)$,便可以逆向求出无雾图像$J(x)$。

1.2 暗通道先验理论

He等[19]通过对大量自然场景图像的观察和研究得出了暗通道先验理论,该理论认为无雾的清晰图像中的3个颜色通道的像素强度中至少有1个通道的像素强度趋向于零,即

$$J^{\text{dark}}(x)=\min_{y\in\Omega(x)}\left(\min_{c\in\{R,G,B\}}(J^c(y))\right)\to 0 \tag{2}$$

式中:$J^{\text{dark}}(x)$为清晰图像$J(x)$的暗通道图像,$\Omega(x)$表示像素x为中心的邻域窗口,$J^c(y)$表示无雾的清晰图像$J(x)$的c通道,其中c代表清晰图像的R、G、B三通道。

基于暗通道先验理论,求出透射率$t(x)$为

$$t(x)=1-\min_{y\in\Omega(x)}\left(\min_{c\in\{R,G,B\}}\frac{I^c(y)}{A}\right) \tag{3}$$

式中$I^c(y)$为有雾图像的c通道。在实际的生活中,图像中保留一部分的雾气更符合人眼观测东西的视觉效果,因此在式(4)中加入参数ω,即

$$t(x)=1-\omega\min_{y\in\Omega(x)}\left(\min_{c\in\{R,G,B\}}\frac{I^c(y)}{A}\right) \tag{4}$$

式中ω取值0.95。在暗通道先验理论中大气光值A通常为常数,以暗通道图像亮度前0.1%的像素点所对应的有雾图像像素点的最大值作为大气光值。

至此得到了大气光值A和透射率$t(x)$,将其代入式(1)便可以得到去雾后的清晰图像$J(x)$为

$$J(x)=\frac{I(x)-A}{\max(t(x),t_0)}+A \tag{5}$$

式中t_0是为了防止$t(x)$为0,文中取0.1。

2 本文算法

2.1 沙尘图像特点

在沙尘天气中,大气中的绿光和蓝光被沙尘颗粒散射和吸收,导致沙尘图像绿色通道和蓝色通道都有不同程度的减少,使图像产生不同程度的色偏现象,并在直方图中表现为偏移性、集中性以及有序性。图1展示了正常图像与部分沙尘图像的颜色直方图对比,可以看出,清晰图像红色、绿色和蓝色通道基本重合,沙尘图像直方图中红色通道较强,而绿色和蓝色通道则由于绿光和蓝光的衰减分别有不同程度的减弱,并且图像色偏越严重,绿色和蓝色通道衰减越严重。

2.2 沙尘图像色偏校正

沙尘图像增强的首要目标是消除图像色偏。由于沙尘图像中蓝色分量衰减程度较高,直接利用经典的偏色校正算法会对图像蓝色分量过度补偿,使图像出现严重的蓝色伪影。为了避免出现蓝色伪影,首先要对图像损失的蓝色和绿色通道进行补偿。

在色彩学原理中,蓝色的补偿色是黄色[20],因此本文根据色彩学原理以及沙尘图像直方图的特性对图像通道进行补偿调整。在沙尘图像的通道补偿中保持红色通道不变,利用黄色通道补偿蓝色通道,绿色通道则使用红色通道进行补偿。沙尘图像通道补偿方法为

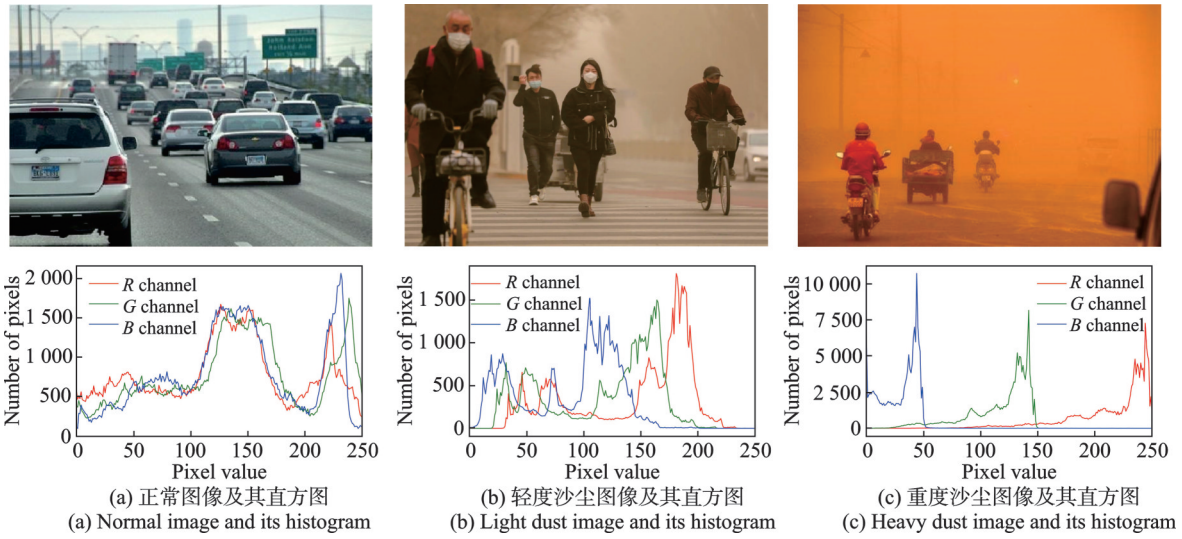


图1 不同图像直方图对比

Fig.1 Histogram comparison of different images

$$B_c = B + \left(\frac{r+g}{2} - b\right) \times (1-B) \times \frac{R+G}{2} \tag{6}$$

$$G_c = \boldsymbol{G} + (r-g) \times (1-G) \times R \tag{7}$$

式中:B_c和G_c分别为补偿后的蓝色和绿色通道;B、G、R分别为沙尘图像的蓝色、绿色和红色通道;b、g、r分别为B、G、R的平均值;$(R+G)/2$代表图像的黄色通道。

在补偿了沙尘图像蓝色和绿色通道的衰减后,进一步使用灰度世界算法校正图像的色偏。色偏校正效果如图2所示。

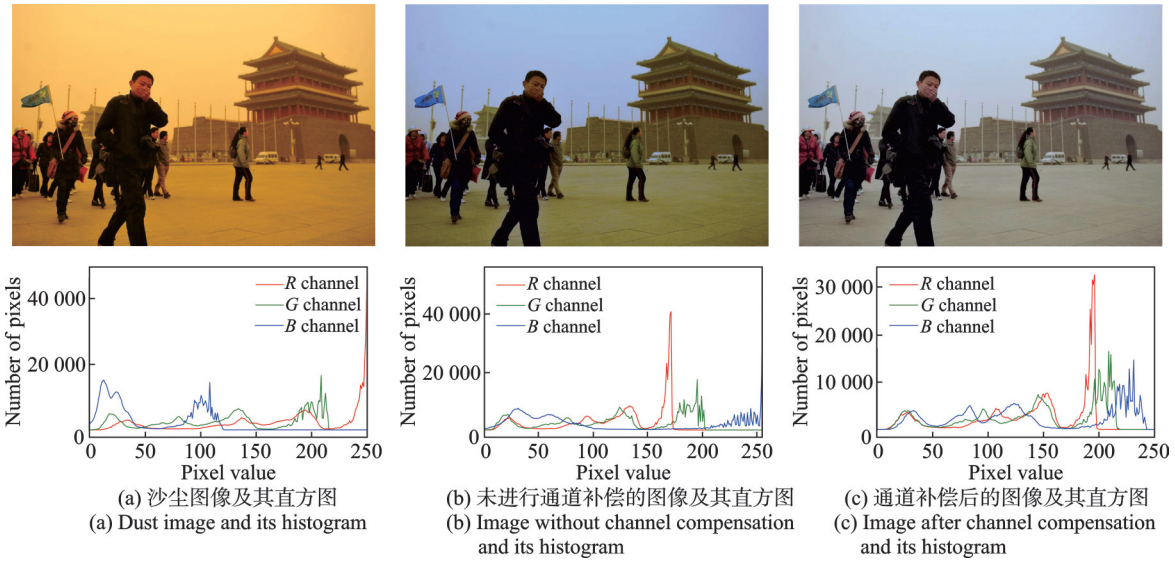


图2 沙尘图像色偏校正结果

Fig.2 Color deviation correction results of sand-dust image

图2(a)为初始沙尘图像,可以看到图像具有严重的黄色色偏,图像直方图也具有明显的偏移性。图2(b)为直接利用色偏校正算法对沙尘图像处理后的结果,处理后的图像具有明显的蓝色伪影,其颜色直方图中可以看到蓝色通道出现了过度补偿的现象,即蓝色通道大部分集中在较高像素值范围。图2(c)为经过通道补偿后的色偏校正效果,可以看出该方法有效地去除了沙尘图像的黄色色偏并且避免了图像蓝色伪影的出现,从颜色直方图中可以看出,通道补偿后的图像直方图较为集中,大大改善了沙尘图像直方图中存在的红、绿和蓝色通道的偏移性,也改善了仅蓝色通道像素值较大的问题。

经过色偏校正处理后的图像已经基本消除了沙尘图像的黄色色偏,但图像仍存在雾霾效果的影响,图像的细节和对比度较低,需要进一步提升图像质量。

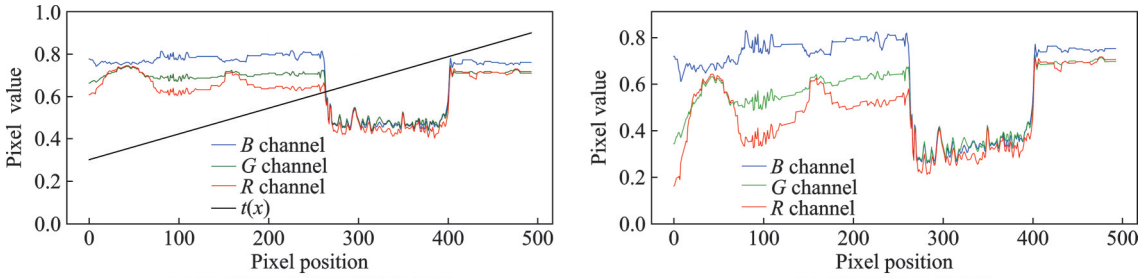
2.3 基于天空分割的去雾算法

由于图像的天空区域较为明亮,天空区域的像素值较高,导致暗通道先验算法并不适用于天空区域,即天空区域暗通道$J^{\mathrm{dark}}(x)>0$。由式(1)和式(3)可以得到天空区域透射率$t(x)$为

$$t(x)=\frac{\min\limits_{y\in\Omega(x)}\left(\min\limits_{c\in\{R,G,B\}}I^{c}(y)\right)-A}{\min\limits_{y\in\Omega(x)}\left(\min\limits_{c\in\{R,G,B\}}J^{\mathrm{dark}}(x)\right)-A}>1-\min_{y\in\Omega(x)}\left(\min_{c\in\{R,G,B\}}\frac{I^{c}(y)}{A}\right)\tag{8}$$

由式(8)可知,由暗通道先验理论所得的天空区域透射率要小于天空区域真实透射率。

图3展示了不同透射率对图像像素值的影响。图3(a)展示了初始图像不同位置下R、G、B三通道的值,黑色线条则代表不同位置对应的透射率,图3(b)展示了利用图3(a)中的透射率并经大气散射模型复原后的图像像素值。从图3中可以看出,原始图像中R、G、B像素差值较小,而经过较小透射率复原后的图像会使R、G、B像素差值大大增大,导致图像复原较差,出现光晕等问题。由式(8)可知,图像天空区域透射率较小,传统的基于暗通道先验(Dark channel prior, DCP)的方法会使图像天空区域恢复效果较差。因此,需要对天空区域分割并对其透射率进行优化。



(a) 初始图像的像素值及透射率
(a) Pixel value and transmittance of initial image

(b) 复原图像的像素值
(b) Restoring the pixel value of the image

图3 不同透射率对像素的影响

Fig.3 Influence of different transmittances on pixels

2.3.1 基于熵的天空分割方法

由于天空等平滑区域中图像的像素值变化较小,因此细节信息较少。将局部信息熵应用到图像中,可以得到图像的信息熵图。在细节信息较少的天空地区,图像的信息熵较低,图像信息熵图较暗;而在细节信息较高的区域熵值高,图像信息熵图较亮。因此,本文利用这一特点对输入的图像进行分

割,提出一种基于信息熵的图像分割方法,具体过程如下:

(1)将图像的最小像素值设为初始分割阈值f,大于f的部分为图像前景,小于f的部分为图像背景。

(2)分别计算图像前景和背景的信息熵,记为E_1和E_2,表达式为

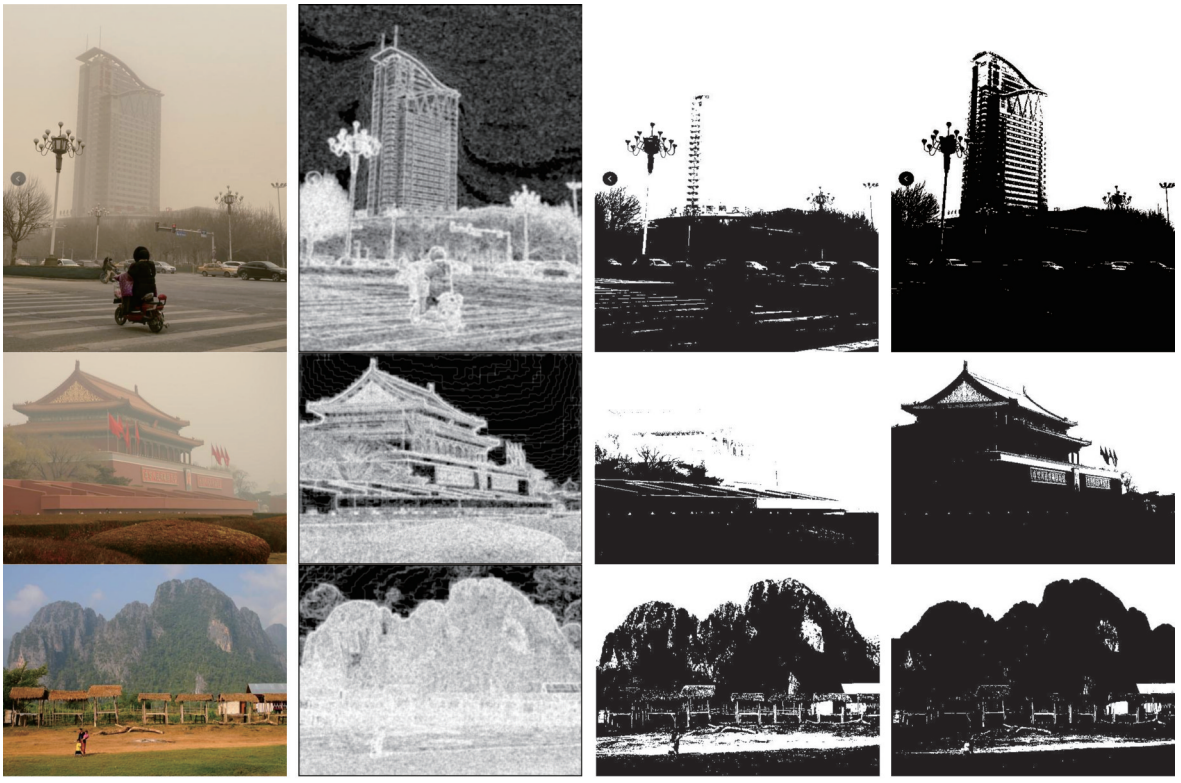
$$E_1=-P_x\log_2 P_x \tag{9}$$

$$E_2=-\sum_{f}^{L-1}P_x\log_2 P_x \tag{10}$$

式中:E_1为前景信息熵,E_2为背景信息熵,f为图像分割阈值,L为图像的灰度级,P_x为像素值x出现的概率。

(3)比较前景信息熵E_1和背景信息熵E_2,如果E_1小于E_2,则另分割阈值$f=f+1$。

(4)重复步骤(2)和(3),直到E_1大于E_2,并且E_2趋向于0为止,此时记像素f为图像的分割阈值。通过对不同E_2的值进行实验,最终确定其范围为4~5,图像分割效果较好。图像分割结果如图4所示,其中图4(c)为使用传统的最大类间方差法(OSTU方法)的分割结果。



(a) 原始图像 (a) Original image
(b) 图像信息熵 (b) Image information entropy
(c) OSTU分割结果 (c) OSTU segmentation result
(d) 本文方法分割结果 (d) Segmentation result of ours

图4 不同方法对图像的分割效果

Fig.4 Image segmentation effects of different methods

从图4中可以看出,图4(c)中OSTU方法会将图像中部分非天空区域识别为天空进行分割,图像分割结果不够精确。图4(d)中本文基于信息熵的图像分割结果改善了OSTU算法分割缺陷,大大减少了将非天空区域误识别天空区域的现象,对图像的分割结果更加准确。

2.3.2 暗通道优化

在暗通道先验理论中认为透射率在一个固定窗口中是相同的。但实际上,在同一窗口中的透射率并不一定相等。因此,使用不同大小的窗口最终会影响暗通道理论估计透射率的结果。在利用暗通道估计透射率中选用较大的滤波窗口时,滤波窗口中包含的暗通道像素较多,暗通道效果较好,但极大可能包含景深不同或包含深度不同的边缘区域而使同一窗口下的透射率不一致,使去雾效果不明显,如图5(a)黄色区域;当透射率估计中选用较小窗口时,图像包含暗通道像素概率减小,使图像暗通道变差,并会导致去雾图像过度增强,如图5(b)红色区域。因此,采用透射率优化的方法,在非边缘等平滑区域中,滤波窗口采用较大窗口,对图像边缘区域则采用较小的滤波窗口。暗通道优化后的透射率为

$$t(x)=\begin{cases}1-\omega\min\limits_{y\in\Omega_3(x)}\left(\min\limits_{c\in\{R,G,B\}}\dfrac{I^c(y)}{A}\right) & \text{边缘区域}\\ 1-\omega\min\limits_{y\in\Omega_{15}(x)}\left(\min\limits_{c\in\{R,G,B\}}\dfrac{I^c(y)}{A}\right) & \text{非边缘区域}\end{cases}\tag{11}$$

式中:$\Omega_3(x)$为小滤波窗口,大小为3×3;$\Omega_{15}(x)$为大滤波窗口,大小取为15×15。采用改进后的暗通道图像去雾效果如图5(c)所示,可以看到图像去雾效果较好,并避免了去雾后图像的过度增强。

(a) 大滤波窗口 (a) Big window　(b) 小滤波窗口 (b) Small window　(c) 改进滤波窗口 (c) Improved window

图5 不同暗通道去雾效果

Fig.5 Defogging effects of different dark channels

2.3.3 透射率调整

由于暗通道理论的先验假设中认为无雾的清晰图像中至少有1个通道的像素值趋向于零,但图像的天空区域像素值都比较大,其暗通道并不等于零,因此暗通道原理对天空区域并不成立。此时若直接利用暗通道理论则更容易使天空区域恢复效果较差。由此,本文提出一种利用天空区域分割阈值的调节因子来调节透射率,自适应调节因子α为

$$\alpha=\frac{255-f}{I_{\max}|I-A|}\tag{12}$$

式中:$I_{\max}$为图像最大值,I为雾霾图像。调整后的透射率$\tilde{t}(x)$为

$$\tilde{t}(x)=\alpha\times t(x)\tag{13}$$

最后采用调整后透射率并利用大气散射模型恢复去雾图像,如图6所示。其中图6(c)为本文改进暗通道后的去雾图像,可以看到对天空区域恢复效果要优于图6(b)的传统暗通道方法。

2.4 图像饱和度以及亮度调节

透射率差补偿后的图像缓解了色彩失真和光晕现象,但图像整体偏暗、对比度较低的问题还没有解决。因此,针对上述问题,本文将图像转到HSV空间进行处理。在HSV空间中,可以更加直观地对饱和度和亮度进行调整,通过对S通道进行自适应饱和度增强以及V通道分别通过自适应伽马校正来增强图像亮度,调整结果如图6(d)所示。

(a) 雾图 (a) Haze image　(b) 暗通道方法 (b) DCP method　(c) 本文方法 (c) Ours　(d) 饱和度及亮度增强图像 (d) Saturation and highlight enhanced image

图6 不同方法去雾效果对比

Fig.6 Comparison of dehazing effects of different methods

2.4.1 饱和度调整

本文利用自适应饱和度增强方法对S通道进行饱和度全局自适补偿,对饱和度进行增强的同时可以避免图像过度饱和,具体方式为

$$S'(i,j)=\frac{S(i,j)-S_{\min}}{S_{\max}-S_{\min}}\times S_{\max} \tag{14}$$

式中:$S(i,j)$为HSV中S分量;$S_{\max}$和$S_{\min}$分别为S分量的最大值和最小值。

2.4.2 自适应伽马校正调整亮度

自适应伽马校正可以根据图像中不同的亮度选取不同的伽马值,避免了伽马校正中因人为固定伽马值而出现的图像亮度过度增强的问题。因此,本文通过对V通道引入自适应伽马校正来增强图像的亮度,自适应伽马校正过程为

$$\begin{cases} I'(x,y)=I_{\max}\times\left(\dfrac{I(x,y)}{I_{\max}}\right)^{\gamma} \\ \gamma(l)=1-\mathrm{CDF}(l) \end{cases} \tag{15}$$

式中:$I(x,y)$为图像像素值,l为图像的像素值,CDF(l)为图像的累计分布函数。

3 实验结果与分析

本文使用的沙尘图像均来自网络中下载,共计2 000张。实验在装有Win11系统的普通计算机下进行,计算机硬件为12th Gen Intel(R) Core(TM) i7-12700H @1.50 GHz CPU,16 GB RAM,编程语言为Python。

3.1 主观分析

本文选取HRDCP[21]、NGT[22]、SCB[23]、CBCS[24]以及AoSR[25]五种去沙尘图像算法与本文算法进

行主观对比实验，结果如图7所示，为方便描述沙尘图像从上到下分别定为Image 1～Image 6。从实验结果可以看出，用HRDCP处理后，图像的对比度和亮度有了明显提高，但图像的色偏没有得到完全校正，并且存在过度曝光现象；NGT方法处理的结果使图像亮度偏暗，对比度较低并且色彩饱和度也比较低；SCB方法处理的结果没有明显的色偏，并且清晰度也有一定的提高，但是图像的部分细节和色彩饱和度仍有些不足；CBCS方法处理后色偏得到缓解但整体亮度较暗；经过AoSR算法处理后图像的亮度和色彩饱和度得到了提高，但对沙尘图像的色偏校正不够彻底；经本文方法处理后的图像色偏基本解决，色彩饱和度以及清晰度有了较大的提升。

(a) 沙尘图像 (a) Dust image　(b) HRDCP方法 (b) HRDCP method　(c) NGT方法 (c) NGT method　(d) SCB方法 (d) SCB method　(e) CBCS方法 (e) CBCS method　(g) AoSR方法 (g) AoSR method　(f) 本文方法 (f) Ours

图7　不同算法的处理结果对比

Fig.7　Comparison of processing results of different algorithms

3.2　客观分析

主观分析可以直观、快速地判断沙尘图像的恢复效果，但由于受人主观因素的影响，导致对沙尘图像恢复效果的评价不够准确。因此为了更加准确地验证算法对沙尘图像的恢复质量，本文选用无参考图像空间质量评估指标BRISQUE[26]和基于熵的无参考图像质量评价指标ENIQA[27]进行客观分析。其中，BRISQUE指标可以量化图像的清晰度和失真程度，数值越小，代表图像清晰度越高，失真度越小。ENIQA指标可以评价图像的色彩信息和二维熵，指标越低，代表沙尘图像恢复效果越好。此外，本文还选用了平均梯度(Average gradient, AG)、标准差(Standard deviation, SD)以及信息熵(Information entropy, EN)三种常用的图像评价指标进行评估。这3种指标越高，图像质量越好。表1～5分别为不同方法的BRISQUE、ENIQA、AG、SD和EN的对比结果。

表1 不同方法的BRISQUE指标比较

Table 1 Comparison of BRISQUE for different methods

Image	HRDCP	NGT	SCB	CBCS	AoSR	Ours
Image 1	24.47	12.43	15.78	19.52	12.91	24.60
Image 2	38.14	39.04	34.57	32.40	32.79	12.12
Image 3	41.75	17.17	40.08	42.08	31.50	27.52
Image 4	22.91	13.74	17.03	17.86	16.78	12.82
Image 5	23.64	29.54	26.51	29.85	24.88	19.26
Image 6	29.45	29.73	24.79	27.07	24.13	23.34
Average	30.06	23.61	26.45	28.13	23.83	19.94

表2 不同方法的ENIQA指标比较

Table 2 Comparison of ENIQA for different methods

Image	HRDCP	NGT	SCB	CBCS	AoSR	Ours
Image 1	0.16	0.12	0.17	0.18	0.15	0.12
Image 2	0.19	0.24	0.21	0.21	0.17	0.09
Image 3	0.38	0.29	0.32	0.27	0.37	0.36
Image 4	0.06	0.12	0.10	0.18	0.08	0.01
Image 5	0.24	0.32	0.26	0.25	0.25	0.21
Image 6	0.13	0.15	0.11	0.11	0.11	0.10
Average	0.19	0.21	0.20	0.20	0.19	0.15

表3 不同方法平均梯度比较

Table 3 Comparison of AG for different methods

Image	HRDCP	NGT	SCB	CBCS	AoSR	Ours
Image 1	9.68	3.63	3.31	6.72	3.03	8.60
Image 2	8.18	4.50	3.82	6.44	4.02	7.15
Image 3	14.83	9.38	7.14	9.86	5.82	12.07
Image 4	12.46	5.39	4.69	8.52	3.54	10.92
Image 5	9.27	3.15	5.72	8.62	2.42	10.73
Image 6	1.89	1.17	1.30	6.39	3.09	8.10
Average	9.38	4.54	4.33	7.76	3.65	9.60

表4 不同方法标准差比较

Table 4 Comparison of SD for different methods

Image	HRDCP	NGT	SCB	CBCS	AoSR	Ours
Image 1	46.85	35.08	62.17	47.77	54.85	60.62
Image 2	65.48	75.07	74.02	69.08	64.77	82.97
Image 3	60.86	59.73	67.68	55.04	51.13	69.97
Image 4	56.23	49.88	62.33	58.04	46.64	76.50
Image 5	41.88	30.41	51.35	51.13	70.62	64.69
Image 6	40.12	39.33	66.30	36.25	50.74	45.76
Average	51.91	48.25	63.98	52.88	56.46	66.75

表5 不同方法信息熵比较

Table 5 Comparison of EN for different methods

Image	HRDCP	NGT	SCB	CBCS	AoSR	Ours
Image 1	7.24	7.02	7.70	7.24	7.56	7.50
Image 2	7.54	7.58	7.39	7.42	7.32	7.61
Image 3	7.50	7.55	7.53	7.36	7.16	7.65
Image 4	7.33	7.32	7.58	7.33	7.21	7.64
Image 5	7.24	6.94	7.59	7.44	7.59	7.80
Image 6	6.45	6.41	7.24	6.88	7.16	6.92
Average	7.22	7.14	7.50	7.28	7.33	7.52

表1给出了不同方法处理后图像的BRISQUE指标。对于BRISQUE指标,除本文方法在图像Image 1和Image 3效果低于NGT方法,在图像Image 1低于AoSR方法外,均优于其他方法。并且本文方法处理后图像的BRISQUE指标均值优于其他4种方法,表明本文方法处理后的沙尘图像清晰度较高。表2给出了图像的ENIQA指标对比。对于ENIQA指标,除CBCS方法在Image 3上略优于本文方法外,其他方法结果均比本文方法要差。表3为图像AG的对比结果。可以看到,HRDCP方法在Image 1~4上高于本文方法,但本文方法要优于另外4种方法,且AG均值为最优。从表4中SD对比结果来看,HRDCP、NGT和CBCS方法均没有产生较好的SD指标,SCB和AOSR方法只表现出2个较优的SD指标,而本文方法则产生了4个较优的SD指标,说明经本文方法处理的图像在SD指标上表现良好。从表5中EN对比结果来看,除经SCB方法和AoSR方法处理的Image 1和Image 6外,本文方法在EN指标上表现最好,且EN均值最高,表明经本文方法处理的图像携带的信息量最多。

综上所述,本文所提出方法在客观指标和主观性能上均表现比较出色,可以有效地校正沙尘图像的色偏,改善图像恢复效果,能够得到清晰度、对比度和色彩饱和度更好的清晰图像,证明了该方法的

有效性。下面对算法的效率进行对比,不同算法的运行时间如图8所示。由于AoSR算法为深度学习算法,因此没有与其运行时间进行对比。从图8中可以看出,本文方法的运行效率对比HRDCP方法和NGT方法有了较大提升,但要略逊色于SCB和CBCS方法,这主要是由于本文在计算自适应伽马校正参数时逐像素处理步骤消耗了时间。

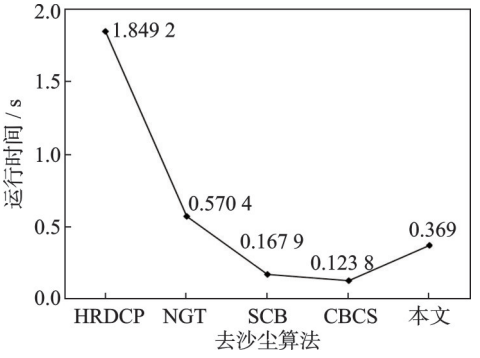


图8 不同去沙尘算法运行时间

Fig.8 Running time of different dust removal algorithms

4 结束语

本文提出一种基于色偏校正和天空分割的沙尘图像增强方法。首先,结合通道补偿和灰度世界方法校正沙尘图像色偏。之后,利用图像信息熵分割图像天空区域,并通过融合滤波窗口方法和透射率自适应调节因子改进暗通道去雾方法。最后,引入自适应饱和度增强方法和伽马校正方法增强图像饱和度和亮度。实验结果表明,本文方法可以有效校正沙尘图像色偏,提高了图像天空区域的改善效果,提高了图像质量。在5种量化指标中,本文方法较其他沙尘图像增强方法均有所提升。但本文方法在处理一张沙尘图像时,对于由于沙尘浓度的不同而出现不同程度的色偏现象,处理效果仍有待提升。

参考文献:

[1] 智宁, 毛善君, 李梅. 沙尘降质图像清晰化算法[J]. 中国图象图形学报, 2016, 21(12): 1585-1592.
ZHI Ning, MAO Shanjun, LI Mei. Visibility restoration algorithm of dust-degraded images[J]. Journal of Image and Graphics, 2016, 21(12): 1585-1592.

[2] LIU C, CHEN X, WU Y. Modified grey world method to detect and restore colour cast images[J]. IET Image Processing, 2019, 13(7): 1090-1096.

[3] WANG J, PANG Y, HE Y, et al. Enhancement for dust-sand storm images[C]//Proceedigns of Multi-media Modeling. Cham: Springer, 2016: 842-849.

[4] 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 Ziye, PENG Zhenming. Enhancing uneven lighting images with naturalness preserved Retinex algorithm [J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2021, 36(1): 76-84.

[5] FU X, HUANG Y, ZENG D, et al. A fusion-based enhancing approach for single sandstorm image[C]//Proceedigns of 2014 IEEE 16th International Workshop on Multimedia Signal Processing (MMSP). Jakarta, Indonesia: IEEE, 2014: 1-5.

[6] 牛宏侠, 王春智. 基于HSI空间的沙尘图像增强算法[J]. 北京交通大学学报, 2022, 46(5): 1-8.
NIU Hongxia, WANG Chunzhi. Sand-dust image enhancement algorithm based on HSI space[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2022, 46(5): 1-8.

[7] 丁元, 邬开俊. 基于RGB色彩平衡方法的沙尘降质图像增强[J]. 光学精密工程, 2023, 31(7): 1053-1064.
DING Yuan, WU Kaijun. Sand-dust image enhancement using RGB color balance method[J]. Optics and Precision Engineering, 2023, 31(7): 1053-1064.

[8] SEKHAR D B V D S, MALEMPATI S N, KOSURI S K, et al. Fast sand-dust image enhancement algorithm by blue channel compensation and guided image filtering[J]. International Journal of Information Technology, Research and Applications, 2024, 3(3): 23-32.

[9] NI D, XUE Y. A fast sand-dust video quality improvement method based on color correction and illumination compensation[J]. Scientific Reports, 2025, 15: 7002.

[10] 孙景荣, 陈哲哲, 王健凯, 等. 结合图像纹理的自适应透射率修正去雾算法[J]. 数据采集与处理, 2024, 39(2): 395-405.

SUN Jingrong, CHEN Zhezhe, WANG Jiankai, et al. Adaptive transmissivity correction algorithm for defogging combining image texture information[J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2024, 39(2): 395-405.

[11] 唐立, 张育, 任佳. 基于颜色校正和明暗通道的沙尘降质图像增强算法[J]. 海南大学学报(自然科学版), 2020, 38(1): 38-45.
TANG Li, ZHANG Yu, REN Jia. Dust image enhancement algorithm based on color correction and bright and dark channel [J]. Natural Science Journal of Hainan University, 2020, 38(1): 38-45.

[12] 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.

[13] SHI F, JIA Z, LAI H, et al. Sand dust images enhancement based on red and blue channels[J]. Sensors, 2022, 22(5): 1918.

[14] ZHOU S, SHI F, JIA Z, et al. Robust sandstorm image restoration via adaptive color correction and saturation line prior-based dust removal[J]. Applied Sciences, 2025, 15(5): 2594.

[15] GAO G, LAI H, JIA Z, et al. Unsupervised image dedusting via a cycle-consistent generative adversarial network[J]. Remote Sensing, 2023, 15(5): 1311.

[16] 丁伯圣, 张睿恒, 徐立新, 等. 基于灰度补偿和特征融合的沙尘图像修复方法[J]. 兵工学报, 2023, 44(10): 3115-3126.
DING Bosheng, ZHANG Ruiheng, XU Lixin, et al. Sand-dust image restoration using gray compensation and feature fusion [J]. Acta Armamentarii, 2023, 44(10): 3115-3126.

[17] MENG X, HUANG J, LI Z, et al. DedustGAN: Unpaired learning for image dedusting based on Retinex with GANs[J]. Expert Systems with Applications, 2024, 243: 122844.

[18] SI Y, LI C, YANG F. LGASR: Latent-content guided adversarial sand-dust image reconstruction strategy[J]. The Journal of Supercomputing, 2024, 81(1): 168.

[19] HE K, SUN J, TANG X. Single image haze removal using dark channel prior[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2011, 33(12): 2341-2353.

[20] HUA Z, QI L, GUAN M, et al. Colour balance and contrast stretching for sand-dust image enhancement[J]. IET Image Processing, 2022, 16(14): 3768-3780.

[21] 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: 116722-116733.

[22] SHI Z, FENG Y, ZHAO M, et al. Normalised gamma transformation-based contrast-limited adaptive histogram equalisation with colour correction for sand-dust image enhancement[J]. IET Image Processing, 2020, 14(4): 747-756.

[23] PARK T H, EOM I K. Sand-dust image enhancement using successive color balance with coincident chromatic histogram[J]. IEEE Access, 2021, 9: 19749-19760.

[24] HUA Z, QI L, GUAN M, et al. Colour balance and contrast stretching for sand-dust image enhancement[J]. IET Image Processing, 2022, 16(14): 3768-3780.

[25] LU Y, YANG D, GAO Y, et al. AoSRNet: All-in-one scene recovery networks via multi-knowledge integration[J]. Knowledge-Based Systems, 2024, 294: 111786.

作者简介:

牛宏侠(1978-),**通信作者**,女,副教授,研究方向:模式识别与数字图像处理,E-mail:nhx56055@mail.lzjtu.cn。

宋丁鑫(2000-),男,硕士研究生,研究方向:图像处理。

侯涛(1975-),男,教授,研究方向:智能信息处理与智能控制。

(编辑:张黄群)

Sand-Dust Image Enhancement Method Based on Color Cast Correction and Sky Segmentation

NIU Hongxia[1,2*], SONG Dingxin[1,2], HOU Tao[1]

(1. School of Automation and Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 2. Key Laboratory of Plateau Traffic Information Engineering and Control of Gansu Province, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: To address problems of color cast, low sharpness, and poor performance of dark channel prior methods in processing sky regions in sand dust images, a sand dust image enhancement method based on color cast correction and sky segmentation is proposed. First, color cast in sand dust images is corrected by combining color channel compensation and the gray world algorithm. Second, a dehazing method based on sky segmentation is proposed. The image segmentation threshold is determined by information entropy, and the image is segmented into sky and non-sky regions using this threshold. A fusion window is then used to optimize the dark channel. Next, an adaptive adjustment factor is introduced to adjust the transmittance, and an atmospheric scattering model is used to restore the image, achieving the effect of removing haze. Finally, in the hue, saturation, value (HSV) space, global adaptive saturation compensation is performed on the S channel through adaptive saturation enhancement, while the V channel is enhanced with adaptive gamma correction. The proposed method improves the average gradient, standard deviation, and information entropy by 2.27%, 4.34%, and 0.25%, respectively. Experimental results show that the proposed method can correct the color cast phenomenon in sand dust images, improve image quality, and enhance the improvement effect on sky regions.

Highlights:

1. Based on the characteristics of sand dust images and the principle of complementary colors, a color channel compensation method for dust images is designed, optimizing the problems existing in traditional color cast correction methods for dust image color cast correction.

2. In image sky segmentation, an image segmentation method based on image information entropy is proposed, utilizing image information entropy to segment the image sky region. In dark channel dehazing, a transmittance adjustment factor is designed to adjust the image transmittance, improving the recovery effect of the image sky region.

3. An adaptive saturation algorithm and adaptive gamma correction are introduced to improve image saturation and brightness, eliminating the problem of a dark image after dark channel dehazing.

Key words: image processing; sand-dust image; color cast correction; sky segmentation; image dehazing

---

Foundation items: Gansu Provincial Higher Education Industry Support Program Project (No.2023CYZC-32); Natural Science Foundation of Gansu Province (No. 23JRRA850); Key Research and Development Program of Gansu Province-Industrial Project (No. 23YFGA0049); Lanzhou Talents Innovation and Entrepreneurship Program (No.2023-RC-13).

Received: 2025-01-16; **Revised:** 2025-03-28

***Corresponding author, E-mail:** nbx56055@mail.lzjtu.cn.