

结合图像纹理的自适应透射率修正去雾算法

孙景荣^{1,2}, 陈哲哲¹, 王健凯¹, 宋诗斌³, 赵静⁴

(1. 西安电子科技大学空间科学与技术学院, 西安 710071; 2. 近地面探测技术重点实验室, 无锡 214000; 3. 山东科技大学电气与自动化工程学院, 青岛 266590; 4. 中咨泰克交通工程集团有限公司, 北京 100083)

摘要: 图像去雾算法在户外智能监控及交通导航等领域普遍应用, 通过去雾后提高图像的清晰度以提高目标的识别效果。暗通道及其改进算法在天空等景深灰色较亮区域的透射率估计存在偏差, 易导致图像失真、细节模糊等问题, 对智能交通领域图像识别有严重影响。本文提出了自适应透射率去雾方法对透射率进行补偿, 采用对数变换获得对数补偿算子调节景深区域透射率, 根据图像信息丰富程度计算出暗通道的置信度, 结合图像纹理信息构造出纹理补偿算子, 通过自适应透射率补偿参数调整灰色亮部区域的初始透射率, 可有效改善图像去雾后失真等问题。本算法的平均梯度、信噪比、信息熵等客观指标较其他去雾算法均有所提高, 图像中灰色亮部区域透射率补偿效果良好, 复原图像细节清晰自然、亮度适中, 有效提升了图像质量。

关键词: 透射率; 对数变换; 图像纹理信息; 图像去雾; 图像处理

中图分类号: TP391.41 **文献标志码:** A

Adaptive Transmissivity Correction Algorithm for Defogging Combining Image Texture Information

SUN Jingrong^{1,2}, CHEN Zhezhe¹, WANG Jiankai¹, SONG Shibin³, ZHAO Jing⁴

(1. School of Aerospace Science and Technology, Xidian University, Xi'an 710071, China; 2. The Science and Technology on Near-Surface Detection Laboratory, Wuxi 214000, China; 3. College of Electrical Engineering and Automation, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China; 4. Zhong-Tec Traffic Engineering Group Co. Ltd., Beijing 100083, China)

Abstract: Image defogging algorithm is widely used in outdoor intelligent monitoring and traffic navigation fields. After defogging, the image clarity is improved to enhance the recognition effect of the target. Dark channel and its improved algorithm have errors in transmittance estimation in bright gray areas such as sky, and are prone to distortion and blurred image details, which will affect image recognition in intelligent transportation field. An adaptive transmittance defogging method is proposed to compensate the transmissivity. Logarithmic transformation is used to obtain logarithmic compensation operator to adjust the transmissivity in the depth of field area. The confidence of dark channel is calculated according to the richness of image information, and the texture compensation operator is constructed combining the image texture information. It can effectively improve the image distortion after defogging. Compared with other defogging algorithms, the proposed algorithm has improved the average gradient, signal-to-noise ratio (SNR), information entropy and other objective indicators. The image quality has been effectively improved with good transmission compensation effect for the gray bright area, clear and natural image

基金项目: 国家自然科学基金(62071363); 山东省机器人与智能技术重点实验室开放课题(2021001); 近地面探测技术重点实验室项目(6142414211202); 交通运输行业重点科技项目(zzkj-2022-10)。

收稿日期: 2023-03-08; **修订日期:** 2023-06-08

details and moderate brightness.

Key words: transmissivity; logarithmic transformation; image texture information; image defogging; image processing

引言

雾霾天气下拍摄图像的边缘处易模糊,色彩易出现失真等,所得图像在交通应用领域价值降低,去雾算法研究可改善此状况^[1]。去雾算法一般应用在户外智能监控、目标跟踪和交通导航等领域,去雾后可提高图像的清晰度,从而提升目标的识别效果。

近年来国内外学者采取基于雾霾成像的物理本质^[2]的方法对降质图像进行去雾处理,可降低雾霾在图像中的影响。基于暗通道先验方法从雾霾图像中估计出大气光值和透射率,细化图像的透射率,提高图像去雾后效果,但时间和空间效率过低^[3-4],且仍存在灰色亮部区域透射率不足^[5]的问题。因为暗通道中有雾图像的较亮区域对应像素的3个通道的灰度值较大,无法满足暗通道的先验假设,故此场景中灰色亮部区域亮度较高、饱和度较低^[6-7]。若同时在去雾图像中忽略大气光值的影响,当透射率求解偏差,会影响大气光值估计进而影响去雾图像质量^[8-9]。文献[10-11]算法对灰色亮部区域场景去雾处理后对应的透射率不足,部分复原图像会出现颜色偏暗、细节模糊及饱和度过高等现象。文献[12-13]算法复原结果的信息熵与平均梯度较低,在复原图像时容易丢失细节信息,去雾效果不稳定。

针对上述去雾算法在亮部区域透射率补偿不足从而导致算法失效的问题,本文提出结合图像纹理信息的去雾方法对透射率进行自适应修正,采用对数变换获得对数补偿算子调节景深区域透射率,结合图像纹理信息构造出纹理补偿算子,通过补偿参数自适应调整透射率,可有效改善去雾结果灰色亮部区域失真等问题。

1 大气散射模型

大气散射模型^[14]描述了雾霾环境场景下图像的形成过程,具体可表示为

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

式中: $I(x)$ 与 $J(x)$ 分别为有雾和无雾图像; A 为大气光强; $t(x)$ 为透射率。

本文提出结合图像纹理的自适应透射率修正去雾算法。有雾图像经过暗通道先验得到图像的粗透射率,根据六角锥体颜色模型(Hue saturation value, HSV)通道图像信息的丰富程度计算出暗通道的置信度,对图像纹理信息进行引导滤波,结合图像纹理信息^[12]构造出纹理补偿算子。通过对数变换构造出对数补偿算子估计获得景深区域^[15]的透射率,按照信息熵最大原则,引入自适应透射率补偿参数 μ 控制纹理补偿算子,用于调节景深对应透射率的大小,实现对初始透射率的优化。采用基于局部灰度像素策略的大气光估计^[16]避免图像失真等问题^[17],具体算法原理如图1所示。

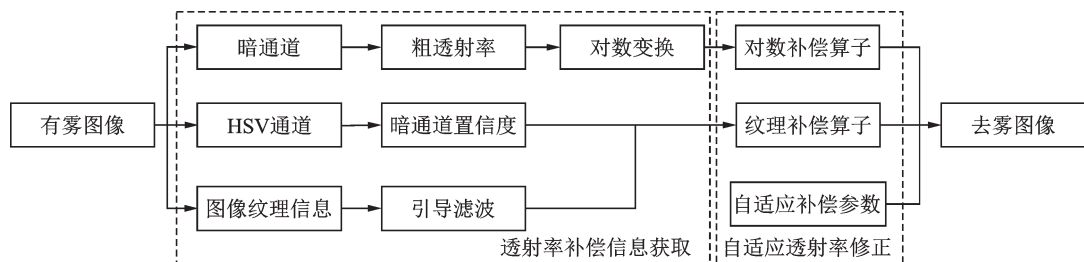


图1 算法流程示意图

Fig.1 Algorithm flow diagram

2 自适应透射率补偿

透射率估计方法存在色偏、晕影及去雾不足等问题,严重影响成像效果及图像处理的识别精度。

为改善复原图像失真,本文结合图像纹理信息自适应的对透射率进行补偿。利用对数补偿算子改善天空等景深区域,根据图像信息的丰富程度计算出暗通道的置信度,结合图像纹理信息构造出纹理补偿算子,通过自适应透射率补偿参数用于调整灰色亮部区域的初始透射率。

2.1 基于图像纹理的透射率补偿信息获取

对原始雾天图像 $I(x)$ 进行逐像素最大值通道滤波, $\max_{c \in \{r, g, b\}} I^c(x)$ 代表逐像素取最大值。

$$I^{\max}(x) = \max_{c \in \{r, g, b\}} I^c(x) \tag{2}$$

将最大值通道 I^{\max} 进行闭运算后,通过引导滤波得大气光值 $A(x)$,如式(3)所示,引导滤波可消除闭运算导致的纹理效应,恢复边缘信息。

$$A(x) = \text{guide}\left(\text{Closing Operation}\left(I^{\max}(x)\right)\right) \tag{3}$$

线性法获取的透射率景深部分模糊,采用对数变换获得对数补偿算子可调节景深区域透射率,改善透射率过亮等问题,因此本文采用对数变换获取初始透射率。将对数变换代入粗透射率可得对数补偿算子 $t_d^{[18]}$,已知大气光值,式(1)经简化可得

$$t(x) = \frac{|A - I^{\text{dark}}(x)|}{|A - J^{\text{dark}}(x)|} \tag{4}$$

式中

$$\begin{cases} I^{\text{dark}}(x) = \min_{c \in \{r, g, b\}} I^c(x) \\ J^{\text{dark}}(x) = \min_{c \in \{r, g, b\}} J^c(x) \end{cases} \tag{5}$$

通过 $k(k > 0)$ 调节图像的灰度范围,保证对数变换准确性。像素灰度值在 $k < 1$ 时均被压缩,如选取 $k_1 = 0.7$ 所示曲线,有雾区域像素灰度值在 $k > 1$ 时压缩,选取 $k = 1.5$ 调节图像的灰度范围使得图像去雾质量最佳,如图2所示。

经对数变换后,复原图像 J 为

$$J^{\text{dark}}(x) = \lg\left(\frac{I^{\text{dark}}(x) - \text{RGB}_{\min}}{\text{RGB}_{\max} - \text{RGB}_{\min}} I^{\text{dark}}(x) + k\right) \tag{6}$$

式中 RGB_{\min} 与 RGB_{\max} 可分别表示为

$$\begin{cases} \text{RGB}_{\min} = \min\left(\min_{c \in \{r, g, b\}} I_s^c(x, y)\right) \\ \text{RGB}_{\max} = \max\left(\max_{c \in \{r, g, b\}} I_s^c(x, y)\right) \end{cases} \tag{7}$$

根据已知大气光 A^c ,将式(5,6)代入式(4)可得

$$t_d(x) = \frac{\left|A^c - \min_{c \in \{r, g, b\}} I_s^c(x)\right|}{\left|A^c - \lg\left(\frac{\min_{c \in \{r, g, b\}} I_s^c(x) - \text{RGB}_{\min}}{\text{RGB}_{\max} - \text{RGB}_{\min}} \min_{c \in \{r, g, b\}} I_s^c(x) + k\right)\right|} \tag{8}$$

为得到图像的饱和度和亮度通道,将雾图 I 从 RGB 转换为 HSV,即

$$[H, S, V] = \text{rgb2hsv}(I) \tag{9}$$

式中 H, S 和 V 分别为图像的色相通道、饱和度通道和明度通道。

暗通道先验法在进行最小值滤波时的窗口大小为 $\Omega(x)$,当 $\Omega(x)$ 大于灰色亮部区域时,仍能在

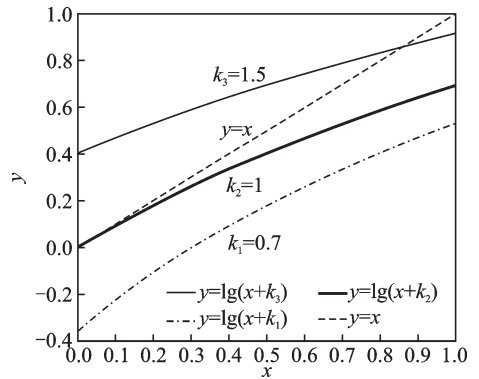


图2 不同参数 k 对比曲线图

Fig.2 Comparison curves of different parameters k

$\Omega(x)$ 内找到灰度值很低的像素点。为排除这些区域对暗通道置信度结果的干扰,让 S 和 V 通道通过最大和最小值滤波,分别可表示为

$$S_{\max}(x) = \min_{y \in \Omega(x)} S(y) \quad (10)$$

$$V_{\min}(x) = \min_{y \in \Omega(x)} V(y) \quad (11)$$

式中最大、最小值滤波后高亮度和低饱和度保持在灰色亮部区域。暗通道置信度使用二维高斯函数将饱和度和亮度相互结合,可表示为

$$C(x) = 1 - \exp\left(-\frac{(V_{\min}(x) - 1)^2}{c} - \frac{(S_{\max}(x))^2}{c}\right) \quad (12)$$

式中: $C(x)$ 为暗通道置信度; c 为与大气光值 $A(x)$ 有关的自适应参数, $c = \max\left(0.05, \min\left(0.01, \left(1 - \frac{A(x)}{255}\right) * 0.2\right)\right)$,取值区间为 $[0.01, 0.05]$, c 与大气光值 $A(x)$ 成反比。

对置信度进行修正可解决亮度和饱和度等问题,但直接利用饱和度和亮度的暗通道置信度算法^[19]处理图像会有块状效应,细节信息损失较多,如图3所示。

2.2 自适应透射率修正

本文提出基于图像纹理信息的暗通道置信度修正算法对透射率信息进行校正。将边缘增强后的暗通道图像减去原始暗通道图像^[20]获取纹理信息,对去雾图像景深信息缺失的情况进行补偿。具体过程如下:

(1)暗通道图像增强:对原始暗通道图进行引导滤波处理,可得边缘增强后的暗通道图像 D'

$$D' = \text{guidefilter}(\text{rgb2gray}(I), J^{\text{dark}}) \quad (13)$$

式中: $\text{rgb2gray}(I)$ 为引导滤波的引导图像; J^{dark} 为引导滤波的被滤波图像。

(2)纹理信息提取:将边缘增强后的暗通道图像与原始暗通道图像相减,可得如式(14)所示的图像纹理信息 Δd 。

$$\Delta d = |D' - J^{\text{dark}}| \quad (14)$$

可看出,近景区域纹理信息明显,故 Δd 较大,而灰色景深亮部区域几乎没有纹理, Δd 也较小,结果如图4所示。

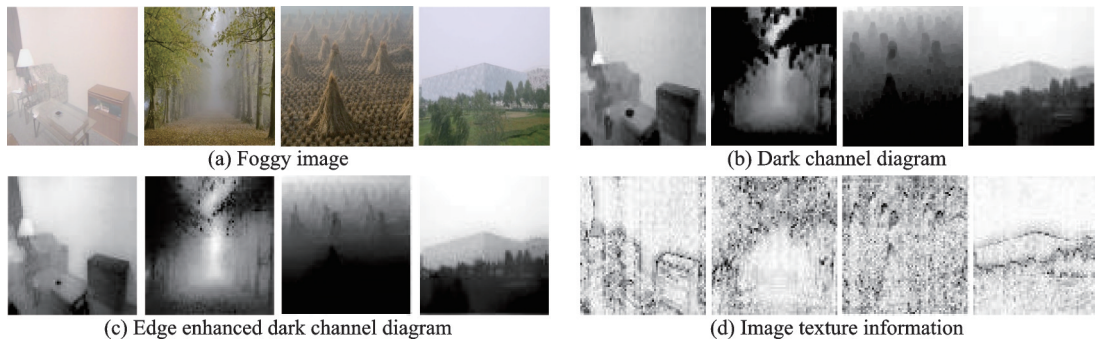


图3 不同场景有雾图像的暗通道置信度示意图
Fig.3 Dark channel confidence diagram of different scenes with foggy images



图4 有雾图像的透射率补偿算子解算过程示意图

Fig.4 Schematic diagram of transmission compensation operator solution for foggy images

(3)计算纹理补偿算子:为减弱暗通道置信处理对于近景的过增强,同时增强对景深区域暗通道置信度的信息量,将暗通道置信度 $C(x)$ 和图像纹理信息 Δd 分别取反后相乘,得到纹理补偿算子 t_c ,如式(15)所示,透射率补偿信息如图5所示。

$$t_c = \Delta d * (-C(x)) \quad (15)$$

纹理补偿信息深度随场景改变^[21],当补偿量过小时,图像失真问题没有得到解决;当补偿量过多时,图像去雾效果不彻底。因此引入自适应透射率补偿参数 μ 去控制纹理补偿信息对透射率的调节量,即

$$t_a = t_0 + \mu * t_c * t_d \quad (16)$$

式中: t_a 为修正后的透射率,当透射率接近0时,复原出的图像容易失真,同时为避免式(17)计算中分母出现零值,设置 t_0 为人工规定透射率下限, t_d 为对数补偿算子。

根据求解出的优化透射率 t_a ,结合大气光值 A 实现对高速道路雾天图像的清晰化去雾的输出,即

$$J(x, y) = \frac{I(x, y) - A}{\max(t_a, t_0)} + A \quad (17)$$

信息熵^[22]是用来评价图像质量的重要指标,通过信息熵极大值法确定 μ 的取值,其与图像包含信息成正相关^[23],图6为不同图像对应的 μ -信息熵图,横坐标为 μ ,纵坐标为对应的信息熵。

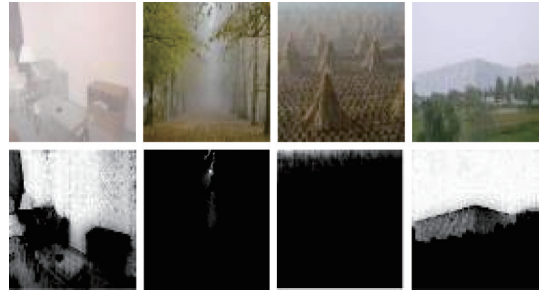


图5 透射率补偿信息示意图

Fig.5 Transmission compensation information diagram

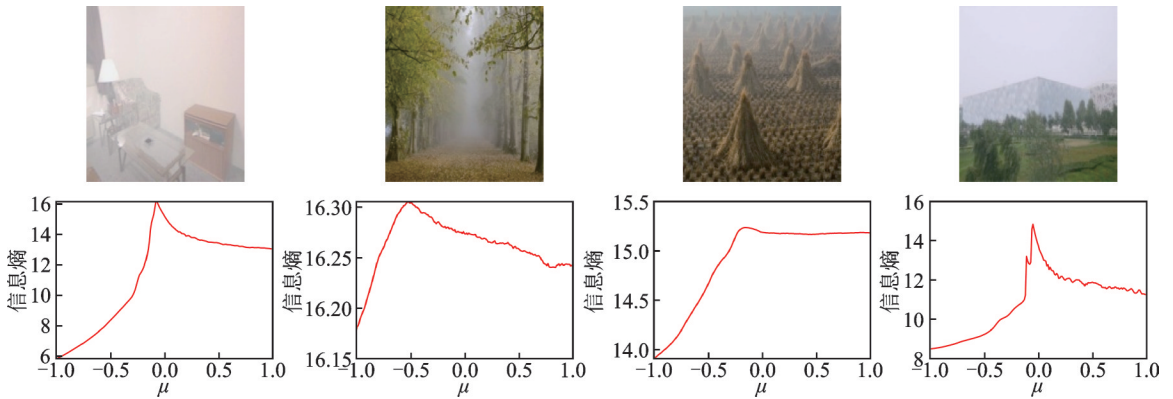


图6 μ -信息熵示意图

Fig.6 μ -information entropy diagram

如图6所示, μ -信息熵折线图近似开口朝下的二次函数, $\mu \in [-1, 1]$, 总可找到一个 μ_{max} 使对应的信息熵值最大。其中图像中灰色亮部区域决定 μ_{max} 取值,灰色亮部区域中的信息要素越少, μ_{max} 的取值就越大,反之亦然。但直接将信息熵最大时对应的 μ_{max} 值代入式(16)进行计算,复原出的图像在视觉上会出现严重失真,如图7所示。

为改善直接带入信息熵出现图7中的失真现象^[24],通过对不同图像进行处理得到最佳的 μ_1 值,再将 μ_1 与客观指标得到的 μ_{max} 进行对应,数据如表1所示。根据表1数据采用最小二乘法构造拟合函数,将信息熵值最大时对应的 μ_{max} 代入式(18)可得正确补偿值 μ_1 。

$$\mu_1 = 2.164 * \mu^2 + 2.638 * \mu + 0.4922 \quad (18)$$

图7 固定 μ 的去雾结果示意图Fig.7 Schematic diagram of defogging results for fixed μ 表1 不同图像对应的 μ_{\max} 与 μ_1 Table 1 μ_{\max} and μ_1 corresponding to different images

序号	μ_{\max}	μ_1
1	-0.34	-0.1
2	-0.07	0.3
3	-0.69	-0.3
4	-0.14	-0.1
5	-0.06	-0.3
6	-0.18	0.3
7	-0.09	0.1
8	-0.29	0.0

自适应补偿后的透射率如图8所示,引入自适应透射率补偿参数 μ 去控制纹理补偿算子用于控制景深对数透射率的大小,实现了对初始透射率的有效补偿。从图8(b)可以发现,补偿后的透射率近景与景深层次纹理细节突出,饱和度适中,提高了复原图像的色彩保真度。通过采用引导滤波对 t_a 进行平滑处理,避免图像景深边缘处产生的光晕效应,如图8(c)所示。

3 实验结果与分析

3.1 主观评价

本文选取部分室内、景深等8幅雾霾图像进行验证,图9为不同算法去雾效果对比图。通过观察,文献[12]算法处理后会使其所对应的透射率降低,造成算法去雾过度,进而出现明显的偏色、光晕现象,影响图像的质量。如图9(a)中1~2行的图像在茶几的边缘及树叶的相接处有明显的白色光圈;在处理包含天空区域或过曝光时,由于暗通道先验法的失效会引起图像偏色,如图9(a)中5~6图像中的中山峰以及天空区域等。文献[10]算法在暗通道中融入了边界约束条件,消除了晕影效应。如图9(b)中1~3行图像所示。但对于存在天空区域场景时会存在透射率普遍偏小且并未进行优化处理。如图9(b)中4~6行图像中的天空区域及树林中的行人等。文献[13]算法对灰色亮部区域的失真以及去雾程度进行了修正,室内场景图像去雾效果较好,如图9(c)中第1行图像所示。但所使用的基于HSV空间的大气光估计值在复杂光照场景下并不准确,导致复原图像局部区域存在偏暗、去雾不足的不稳定现象,如图9(c)中4~6行图像所示。由于过度去雾导致景深处的银杏树桩消失,如图9(c)中第2行图像所示。文献[11]算法通过人眼观察时虽然在整体上的去雾程度较前3种算法有所提升,但透射率不足,部分复原图像出现颜色偏暗,细节模糊等现象,如图9(d)中第3、6行图像所示。相比之下,本文算法去雾后改善了图像细节缺失,灰色亮部区域失真更少,图像整体亮度温和,如图9(e)中第6行图像所示;天空区域的处理也较为自然,如图9(e)中4~5行图像

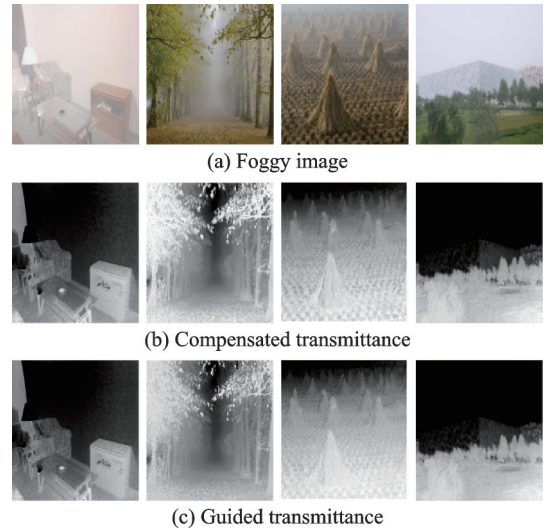


图8 自适应透射率对比示意图

Fig.8 Schematic diagram of adaptive transmissivity comparison

所示,对图像中景深处物体去雾效果较好,如图 9(e)中 1~3 行图像所示,主观视觉上观感更自然。



图9 不同算法去雾结果对比示意图

Fig.9 Comparison diagram of defogging results of different algorithms

3.2 客观评价

本文采用客观评价指标评估复原后图像失真程度,采用信息熵和平均梯度评估去雾图像清晰度。峰值信噪比^[25]用于评价图像失真情况。信息熵值越大,图像信息越丰富。平均梯度^[26]是对应梯度图上所有点的均值,其值越大,图像细节越丰富。

平均梯度:图像的平均梯度可以反映图像的清晰度,可表示为

$$G = \frac{1}{M \times N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \sqrt{\frac{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2}{2}} \quad (19)$$

式中: $M \times N$ 代表图像大小; $\frac{\partial f}{\partial x}$ 和 $\frac{\partial f}{\partial y}$ 分别为图像在水平和垂直方向的梯度。

信息熵:信息熵反映图像平均信息量,可表示为

$$H = - \sum_{i=0}^{255} p_i \lg p_i \quad (20)$$

式中 p_i 为图像中灰度值为 i 的像素所占比例。

峰值信噪比:峰值信噪比用于评价图像质量,可表示为

$$\text{PSNR} = 10 \times \lg \frac{(2^n - 1)^2}{\text{MSE}} \quad (21)$$

式中 n 为比特数。

图10为各算法处理的客观评价指标。从图10(a)可见,本文算法比文献[13]算法PSNR值更大,失真量更少。文献[12]算法在复原过程中引入外部信息较少导致复原图像修改较少,造成该算法PSNR值相对更高,但从视觉上看图像失真较为严重。从图10(b,c)可见,与文献[12-13]算法相比,本文算法复原结果的信息熵与平均梯度较高,在复原图像时细节信息保持更好。从图10中可知,文献[13]算法与本文算法去雾后的客观参数曲线较接近,但在处理含大片天空区域的雾图时去雾效果不稳定;文献[10,12]算法去雾效果在室内、景深以及含有少许天空区域的场景下近似程度最高;而文献[11]算法虽然曲线波动程度不大,但各项客观指标均不佳。本文算法在平均梯度、信息熵、峰值信噪比等指标均优于对比算法,在平均梯度上平均提高9.53%,信息熵上平均提高4.06%,信噪比上平均提高5.67%,本文算法较其他算法,有效改善了图像失真,丰富了图像的边缘结构信息量,且局部对比度较高,复原后的图像纹理细节清晰可见,便于观察,整体处理效果较好,更适于智能交通系统。具体客观指标数值如表2所示。

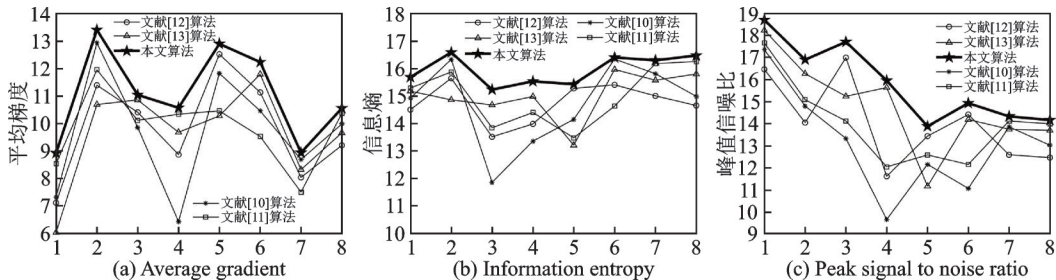


图10 各算法去雾客观评价指标示意图

Fig.10 Schematic diagram of objective evaluation indexes of each algorithm for defogging

表 2 不同算法的客观指标对比

Table 2 Comparison of objective indicators of different algorithms

指标	算法	图像1	图像2	图像3	图像4	图像5	图像6	图像7	图像8
平均梯度	文献[12]算法	7.110 1	11.391 0	10.403 9	8.863 9	12.518 2	11.127 6	8.031 1	9.200 4
	文献[10]算法	7.312 7	12.931 4	9.852 4	6.421 6	11.821 7	10.452 8	8.685 0	9.977 6
	文献[13]算法	6.024 6	10.687 0	10.854 9	9.675 6	10.272 3	11.790 1	8.315 8	9.657 9
	文献[11]算法	8.530 0	11.954 1	10.111 2	10.337 1	10.452 8	9.521 4	7.497 5	10.363 0
	本文算法	8.917 4	13.405 1	11.038 3	10.567 2	12.897 2	12.231 4	8.932 0	10.552 0
信息熵	文献[12]算法	14.495 6	15.642 1	13.505 0	13.977 0	15.272 0	15.401 8	14.997 8	14.647 2
	文献[10]算法	14.920 2	16.331 5	11.846 7	13.349 7	14.141 6	16.341 1	15.807 3	14.982 1
	文献[13]算法	15.171 2	14.853 1	14.666 0	14.975 8	13.201 4	15.961 1	15.571 2	15.796 8
	文献[11]算法	15.284 6	15.872 7	13.837 1	14.392 8	13.470 7	14.625 7	16.177 5	16.253 3
	本文算法	15.682 1	16.585 1	15.227 0	15.529 6	15.424 1	16.399 8	16.294 6	16.471 6
峰值信噪比	文献[12]算法	16.452 0	14.042 0	16.980 0	11.618 0	13.433 0	14.408 2	12.589 7	12.465 1
	文献[10]算法	17.344 1	14.792 1	13.328 4	9.667 4	12.157 9	11.070 3	13.854 7	13.023 5
	文献[13]算法	18.213 5	16.253 9	15.231 2	15.627 2	11.170 3	14.183 6	13.744 1	13.695 5
	文献[11]算法	17.645 7	15.076 3	14.118 4	12.044 7	12.583 9	12.152 8	14.116 6	13.988 9
	本文算法	18.682 4	16.885 9	17.690 3	15.944 0	13.876 2	14.920 2	14.325 8	14.157 4

3.3 处理时间对比

本文在同样的实验环境下客观对比了文献[10-13]算法与本文算法去雾平均运行时间,结果如表3所示。从表3可得,本文算法在平均运行处理速度上均优于对比算法,虽然本文算法处理速度与文献[11]算法相近,但是本文算法在平均梯度、信息熵、峰值信噪比等客观指标均高于文献[11]算法。

表 3 不同算法的平均运行时间

Table 3 Average running time of different algorithms

算法	文献[12]算法	文献[10]算法	文献[13]算法	文献[11]算法	本文算法
平均耗时/s	11.995 6	7.693 5	6.396 5	4.593 1	4.396 5

4 结束语

针对灰色亮部区域透射率估计不足造成光亮区域色彩畸变失真等问题,本文提出了一种自适应去雾方法,通过对数变换估计出初始透射率,通过透射率暗通道置信度和图像纹理信息及引入自适应透射率补偿参数 μ 去控制纹理补偿算子用于控制景深对应透射率的大小,改善了图像景深局部区域颜色失真等问题。所提去雾算法与其他改进暗通道先验算法相比性能更优,较好地改善了暗通道先验法在灰色明亮区域失效导致的复原结果失真等问题,去雾后图像细节和纹理更加明显,对比度适中,有效提升了图像的可见性。

参考文献:

[1] TANG H, LI Z, ZHONG R, et al. Sky-preserved image dehazing and enhancement for outdoor scenes[C]//Proceedings of 2021 IEEE 4th International Conference on Electronics Technology (ICET). [S.l.]: IEEE, 2021: 1266-1271.
 [2] MEI W, LI X. Single image dehazing using dark channel fusion and haze density weight[C]//Proceedings of IEEE 9th

- International Conference on Electronics Information and Emergency Communication (ICEIEC). [S.l.]: IEEE, 2019: 579-585.
- [3] HE K M, SUN J, TANG X O. Single image haze removal using dark channel prior[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence*, 2011, 32(12): 2341-2353.
- [4] 高涛, 刘梦尼, 陈婷, 等. 结合暗亮通道先验的远近景融合去雾算法[J]. *西安交通大学学报*, 2021, 55(10): 1-9.
GAO Tao, LIU Mengni, CHEN Ting, et al. A far and near scene fusion defogging algorithm based on the prior of dark-light channel[J]. *Journal of Xi'an Jiao Tong University*, 2021, 55(10): 1-9.
- [5] 胡妍, 王柯俨, 许宁, 等. 利用分割中值滤波和透射率补偿的图像去雾[J]. *西安电子科技大学学报*, 2018, 45(4): 99-105.
HU Yan, WANG Keyan, XU Ning, et al. Image dehazing by the segmenting median filter and transmission compensation[J]. *Journal of Xidian University*, 2018, 45(4): 99-105.
- [6] HE K M, SUN J, TANG X O. Single image haze removal using dark channel prior[C]//*Proceeding of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Miami, USA : IEEE, 2009: 1956-1963.
- [7] PAN Y, CHEN Z, LI X, et al. Single-image dehazing via dark channel prior and adaptive threshold[J]. *International Journal of Image and Graphics*, 2021, 21 (4): 2150053.
- [8] REN W, LIU S, ZHANG H, et al. Single image dehazing via multi-scale convolutional neural networks[C]//*Proceedings of European Conference on Computer Vision*. [S.l.]: [s.n.], 2016: 154-169.
- [9] BERMAN D, TREIBITZ T, AVIDAN S. Non-local image dehazing[C]//*Proceedings of 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. [S.l.]: IEEE, 2016.
- [10] MENG G F, WANG Y, DUAN J Y. Efficient image dehazing with boundary constraint and contextual regularization[C]//*Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision*. [S.l.]: IEEE, 2013: 617-624.
- [11] 杨燕, 姜沛沛, 岳辉. 基于线性变换的自适应透射率去雾算法[J]. *工程科学与技术*, 2020, 52(5): 194-200.
YANG Yan, JIANG Peipei, YUE Hui. Image defogging algorithm for adaptive transmission based on linear transformation[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2020, 52(5): 194-200.
- [12] 黄鹤, 李昕芮, 宋京, 等. 多尺度窗口的自适应透射率修复交通图像去雾方法[J]. *中国光学*, 2019, 12(6): 1311-1320.
HUANG He, LI Xinrui, SONG Jing, et al. A traffic image dehaze method based on adaptive transmittance estimation with multi-scale window[J]. *Chinese Optics*, 2019, 12(6): 1311-1320.
- [13] 王硕, 陈金玉. 自适应校正透射率的暗通道先验去雾算法[J]. *计算机工程与应用*, 2021, 57(13): 207-211.
WANG Shuo, CHEN Jinyu. Dark channel prior defogging algorithm for adaptive correction transmittance[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2021, 57(13): 207-211.
- [14] NARASIMHAN S G, NAYAR S K. Contrast restoration of weather degraded images[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2003, 25(6): 713-724.
- [15] WANG Shiqi, YANG Tingping, SUN Wenxue, et al. Adaptive bright and dark channel combined with defogging algorithm based on depth of field[J]. *Journal of Sensors*, 2022, 2022: 53330876.
- [16] SUN Wei, WANG Hao, SUN Changhao, et al. Fast single image haze removal via local atmospheric light veil estimation[J]. *Computers & Electrical Engineering*, 2015, 46(C): 371-383.
- [17] XIE B, YANG J, SHEN J, et al. Image defogging method combining light field depth estimation and dark channel[C]//*Proceedings of 2021 IEEE International Conference on Consumer Electronics and Computer Engineering (ICCECE)*. [S.l.]: IEEE, 2021: 745-749.
- [18] 孙景荣, 谢林昌, 杜梦欣, 等. 一种非线性变换的自适应透射率去雾算法[J]. *西安电子科技大学学报*, 2022, 49(1): 208-215.
SUN Jingrong, XIE Linchang, DU Mengxin, et al. An adaptive transmittance dehazing algorithm based on non-linear transformed[J]. *Journal of Xidian University*, 2022, 49(1): 208-215.
- [19] BO L, WANG S, JIN Z, et al. Single image haze removal using content-adaptive dark channel and post enhancement[J]. *IET Computer Vision*, 2014, 8(2): 131-140.
- [20] ZHANG L B, WANG S, WANG X H. Single image dehazing based on bright channel prior model and saliency analysis

- strategy[J]. IET Image Processing, 2021, 15(5): 1023-1031.
- [21] ZHOU Shuyi, LIU Xiaoyan, DUAN Jiayu, et al. A novel model-based defogging method for particle images with different fog distributions[J]. IEEE Transactions of Instrumentation and Measurement, 2022, 71: 5008719.
- [22] 李晓晶. 图像质量评价与图像增强技术研究[D]. 南京:南京理工大学, 2008.
LI Xiaojing. Image quality evaluation and image enhancement technology[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2008.
- [23] WU H, et al. Contrastive learning for compact single image dehazing[C]//Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. [S.l.]: IEEE, 2021: 10551-10560.
- [24] YU X, YU H. Single image dehazing based on the fusion of multi-branch and attention mechanism[C]//Proceedings of 2022 International Conference on Big Data, Information and Computer Network (BDICN). [S.l.]: [s.n.], 2022: 675-679.
- [25] HORÉ A, ZIOU D. Image quality metrics: PSNR vs. SSIM[C]//Proceedings of 20th International Conference on Pattern Recognition, ICPR 2010. Istanbul, Turkey: IEEE, 2010.
- [26] WANG Wencheng, YUAN Xiaohui. Recent advances in image dehazing[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2017, 4(3): 410-436.

作者简介:



孙景荣(1975-),女,教授,研究方向:低照度图像处理与分析、信号检测与信息处理,E-mail: jrsun@xid-ian.edu.cn。



陈哲哲(1997-),男,硕士研究生,研究方向:图像处理、计算机视觉。



王健凯(1998-),男,硕士研究生,研究方向:图像处理。



宋诗斌(1988-),通信作者,男,博士,讲师,研究方向:智能机器人视觉技术、机器人定位导航,E-mail:shb-song_skd@sdust.edu.cn。



赵静(1981-),女,工程师,研究方向:智能交通、交通规划。

(编辑:王静)