

基于雾线暗通道先验改进的图像去雾算法

袁小平, 陈艳宇*, 石慧

中国矿业大学信息与控制工程学院, 江苏 徐州 221116

摘要 针对现有图像去雾算法中大气光值和透射率估计不准确导致图像去雾后失真的问题, 提出了一种基于雾线暗通道先验改进的图像去雾算法。首先, 根据 HSV 空间雾浓度与亮度和饱和度差值的关系计算图像的全局相对雾浓度, 并结合暗通道图对应的高像素值来设置能够自动选择合适的大气光值的权重系数; 其次, 利用暗通道先验得到的粗略透射率值对每条雾线中最大半径透射率进行修正, 然后引入容差参数对明亮像素的透射率进行优化, 引入快速引导滤波对透射率图进行进一步优化; 最后, 根据大气散射模型获得最终的无雾图像。实验结果表明, 所提去雾算法在主观视觉效果和客观数据上均优于其他算法。

关键词 图像处理; 雾线暗通道先验; 雾浓度; 容差参数; 明亮像素; 大气散射模型

中图分类号 TP751

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.0810014

Improved Image Dehazing Algorithm Based on Haze-line and Dark Channel Prior

Yuan Xiaoping, Chen Yanyu*, Shi Hui

College of Information Science and Control Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China

Abstract To address the problem of image dehazing distortion caused by inaccurate estimation of atmospheric light value and transmission in existing image dehazing algorithms, an improved image dehazing algorithm based on dark channel prior and haze-line prior is proposed. First, we compute the global relative haze concentration of the image using the relationship between haze concentration and the difference in brightness and saturation in HSV space and combine the high-pixel value corresponding to the dark channel map to set the weight coefficient that can automatically select the appropriate atmospheric light value. Second, we use the rough transmittance value obtained by the dark channel prior to correct the maximum radius transmittance in each haze-line, and then introduce a tolerance parameter to optimize the transmittance of bright pixels. Next, fast guiding filtering is introduced to further optimize the transmittance maps. Finally, the final haze-free image based on the atmospheric scattering model is obtained. The experimental results show that the image dehazing algorithm proposed in this research outperforms the current algorithms in terms of subjective visual effect and objective data.

Key words image processing; haze-line and dark channel prior; haze concentration; tolerance parameter; light pixel; atmospheric scattering model

1 引言

雾是一种不可抗的自然现象, 采集图像也是人

们日常生活或者科研中不可或缺的一部分。但是在有雾天气采集图像时, 自然光线会受到大气中悬浮颗粒的散射^[1], 导致最终采集到的图像观感不清

收稿日期: 2021-01-19; 修回日期: 2021-04-06; 录用日期: 2021-04-29

通信作者: *2739687299@qq.com

晰,亮度、对比度和颜色等特征都有所衰减,无法达到人们日常生活和科研中的图像质量要求,因此图像去雾技术的研究具有很大的必要性和现实意义。

现有图像去雾算法的研究主要有三个方向:基于图像增强的去雾算法、基于图像复原的去雾算法和基于深度学习的图像去雾算法。基于图像增强的图像去雾代表算法有直方图均衡化去雾算法^[2]、基于 Retinex 理论的去雾算法^[3]和小波变换去雾算法^[4]。基于图像复原的去雾算法^[5]从有雾图像形成的本质物理因素出发,通过大量的观察实验得到的先验知识求解大气散射模型^[6]中其他未知量的值,从而得到去雾后的图像。Fattal^[7]将图像表面阴影与介质投射函数之间呈现的不相关性作为先验信息,从而获取图像景深信息^[8]实现去雾,这类方法不适合灰度图像和雾浓度较高的图像。He 等^[9]提出一种基于暗通道先验原理的去雾算法,这种算法对彩色图像和灰度图像都适用,但是对于明亮区域不适用,会估值不准确,并且最小值滤波时滤波窗口的选取会使图像出现块效应。Berman 等^[10]根据有雾图像中相同颜色的像素会形成一条雾线的先验知识,经过建模、霍夫投票和透射率正则化^[10]等方法恢复出无雾图像,但是此方法对建模的准确性依赖较高,不适合颜色信息较少和雾较浓的图像。针对以上问题,学者们相继提出了改进算法并取得了良好的效果。孙小明等^[11]提出一种基于分块思想的空间自适应估计透射率算法。Zhao 等^[12]提出一种基于图像融合的去雾算法。杨爱萍等^[13]提出了一种基于透射率融合与多重导向滤波的单幅图像去雾算法。胡妍等^[14]提出一种基于分割中值滤波和透射率补偿的去雾算法。近几年来,深度学习在图像去雾领域也有了较好的应用和发展。Cai 等^[15]将大气散射和人工智能相结合,提出卷积神经网络 Dehaze Net 来进行去雾,虽然获得比较不错的效果,但是该类算法需要大量的测试数据进行训练,导致去雾成本太高,应用性不广。所以当下的研究热点依然是传统的基于图像增强的去雾算法或者基于图像复原的去雾算法。

针对现有图像去雾算法中大气光值和透射率估计不准确导致图像去雾后失真的问题,本文提出了一种基于雾线暗通道先验改进的图像去雾算法。根据 HSV 空间雾浓度与亮度和饱和度差值的关系计算图像的全局相对雾浓度,结合暗通道图对应的高像素值,设置权重系数自动选择合适的大气光

值;利用暗原色先验得到粗略透射率值,对每条雾线中最大半径透射率值进行修正,然后引入容差参数对明亮像素的透射率进行优化,再使用快速引导滤波对透射率图进行进一步细化;最后根据大气散射模型,获得最终的无雾图像。

2 理论基础

2.1 大气散射模型

在基于图像复原的去雾算法研究中,大气散射模型^[16]为

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

式中: x 代表图像中的单个像素; $I(x)$ 代表有雾图像; $J(x)$ 代表清晰无雾图像; A 为大气光值; $t(x)$ 为透射率或者介质传输图。这是一种被广泛应用的物理模型,它解释了有雾图像形成的物理本质,为图像去雾领域的研究学者提供了一个很好的方向。

图像去雾的目标就是通过一定的手段获得大气光值 A 和透射率 $t(x)$, 然后代入大气散射模型即可得到无雾图像 $J(x)$:

$$J(x) = [I(x) - A] / t(x) + A. \quad (2)$$

2.2 暗通道先验

He 等^[9]通过对大量无雾图像进行观察发现,在非天空区域中,总会存在一部分局域图像,其像素中的 R、G、B 三个通道至少有一个通道的值接近于零。

暗通道表达式为

$$J^{\text{dark}}(x) = \min_{y \in \Omega(x)} \left\{ \min_{c \in \{r, g, b\}} [J^c(y)] \right\} \rightarrow 0, \quad (3)$$

式中: $\Omega(x)$ 是以像素点 x 为中心选取特定窗口的邻域范围; J^c 代表无雾图像中像素点的三通道像素值; J^{dark} 代表无雾图像的暗通道图。

对大气散射模型(1)式进行最小值处理,即可得到透射率表达式:

$$t(x) = 1 - \omega \min_{y \in \Omega(x)} \left\{ \min_{c \in \{r, g, b\}} [I^c(y) / A^c] \right\}. \quad (4)$$

为了保留少许的雾使图像看起来更加自然,引入参数 ω 对 $t(x)$ 进行适当修正,取值区间为 $(0, 1)$, 在 He 等^[9]算法中选择 0.95。

然后取暗通道图中前 0.1% 亮度对应的最大像素值作为大气光值,最后将求得的大气光值和透射率代入(2)式,即可恢复出无雾图像。

2.3 雾线先验

Berman 等^[10]提出基于雾线的图像去雾算法。该算法在 RGB 坐标空间中由小于像素两个数量级的颜色簇来表示无雾图像。在有雾图像中,这些颜色簇会因为雾的存在变成原像素与大气光的凸组合,每个颜色簇都可以在 RGB 三维坐标空间中建模成一条直线,称之为雾线。这些直线都经过一点即大气光值,并且每条雾线中距离大气光值最远的像素点为无雾像素点。

将图像中每一个像素点都用 RGB 空间中的向量表示,则以 A 为中心点,其他像素点可以表示为

$$I_A(x) = [r(x), \theta(x), \varphi(x)], \quad (5)$$

式中: $I_A(x)$ 代表像素点与大气光值的差向量; $r(x)$ 是有雾图像建模后像素点与大气光值 A 的距离; $\theta(x), \varphi(x)$ 代表有雾图像建模后在 RGB 空间中像素点相对于大气光值 A 的角度。

$$t(x) = r(x) / \max_{x \in H} [r(x)], \quad (6)$$

式中: H 代表雾线; $\max_{x \in H} [r(x)]$ 代表每条雾线上的最大半径。最后将已知的大气光值和求得的透射率代入到(2)式,即可求出最终无雾图像。

3 所提算法内容

所提算法的流程如图 1 所示,主要有以下内容:

- 1) 根据图像在 HSV 空间中雾浓度与亮度和饱和度差值的关系,结合暗通道图对应的高像素值,设置权重系数,自适应调节大气光值;
- 2) 根据暗原色先验得到的粗略透射率值,对每条雾线中的最大半径透射率进行修正;
- 3) 引入容差参数对亮像素的透射率进行进一步修正;
- 4) 以原有雾图像为引导图,使用快速引导滤波进一步细化透射率;
- 5) 将大气光值和透射率代入大气散射模型中,得到去雾后图像。

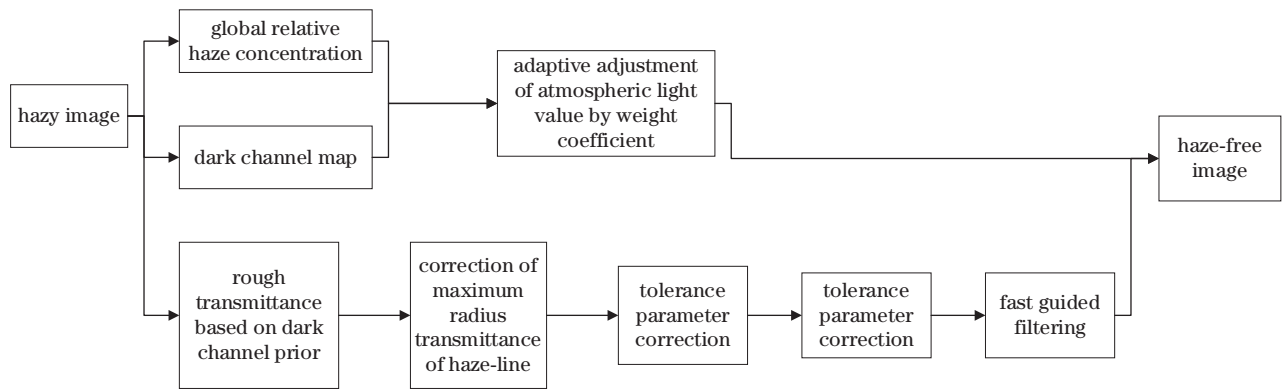


图 1 所提算法流程

Fig. 1 Flowchart of the proposed algorithm

3.1 大气光修正

大气光值 A 代表的物理意义是无穷远处的大气光值,往往比图像中的像素值要大,在有雾图像中经常存在于雾最浓的区域,因此天空区域的像素值非常接近大气光值。目前已有的算法常常直接选取有雾图像中一部分最亮的像素值来确定大气光值。但是当图像中含有高亮区域时,选取的大气光值将会落到这些高亮区域而不是理想中雾最浓的区域,将一个偏离大气光值的像素值代入公式中求解无雾图像,最终的去雾结果产生离谱的偏差,得不到想要的图像处理效果。

在 He 等^[9]的暗原色先验去雾算法中,选取暗通道图中前 0.1% 亮度对应的原始像素最大值作为大气光值,当图像中有高亮非天空区域时会对估值产生严重干扰。大气光值具有 3 个特点:亮度较大、景

深较大、雾最浓,所以仅仅靠亮度无法排除高亮非天空区域的影响,需要结合图像雾浓度才能更加准确地估计出大气光值。

Zhu 等^[17]通过对很多图像的远景、中景、近景进行分析发现,雾的浓度与亮度和饱和度之差成正比,景深与雾浓度成正比。首先将图像转换到 HSV 颜色空间,计算每个像素的亮度与饱和度之差,以最小的非零差值作为基准进行归一化处理,得到图像的全局相对雾浓度图,归一化之后的值越大代表雾浓度越大。

$$w(x) = V(x) - S(x), \quad (7)$$

$$W(x) = w(x) / w(x)_{\min}, \quad (8)$$

式中: $w(x)$ 是像素点的亮度与饱和度的差值; $V(x)$ 代表像素点的亮度; $S(x)$ 代表像素点的饱和

度; $W(x)$ 代表像素点归一化雾相对浓度; $w(x)_{\min}$ 取非零最小值。

取相对雾浓度图 $W(x)$ 中前 0.1% 对应的原始像素 x_w 和暗通道图中前 0.1% 的值对应的原始像素 $x_{j\text{dark}}$ 。

1) 当 x_w 和 $x_{j\text{dark}}$ 无重叠像素, 则说明图像亮度最亮的像素点不符合雾最浓和景深较大的特点, $x_{j\text{dark}}$ 定位在了图像中明亮非天空区域, 不符合大气光值的特点;

2) 当 x_w 和 $x_{j\text{dark}}$ 完全重叠, 则说明图像亮度最亮的像素刚好雾最浓, 并且景深较大, $x_{j\text{dark}}$ 定位的像素完全符合大气光值的特点;

3) 当 x_w 和 $x_{j\text{dark}}$ 有部分重叠时, 则说明图像亮度最亮的像素有部分符合大气光值雾浓度和景深较大的特点。

基于以上特点, 通过设置权重系数来自动选择合适的大气光值, 即

$$A = (1 - b) \cdot \bar{x}_w + b \cdot \bar{x}_{j\text{dark}}, \quad (9)$$

$$b = \text{count}(x_w \cap x_{j\text{dark}}) / \text{count}(x_w), \quad (10)$$

式中: \bar{x}_w 是 x_w 的均值; $\bar{x}_{j\text{dark}}$ 是 $x_{j\text{dark}}$ 的均值; b 为权重系数; $\text{count}(x_w \cap x_{j\text{dark}})$ 为 x_w 与 $x_{j\text{dark}}$ 重叠的像素数量; $\text{count}(x_w)$ 为 x_w 的总数量。权重系数 b 的值与重叠像素的总数量有关, 由此可以根据图像情况的不同自适应调整大气光值, 具有更好的准确性和鲁棒性。

文献[18]使用了一组不同的 40 幅图像来定量评估估计的大气光值的性能, 其中包括 35 幅已知大气光值的原始图片和 5 幅从原始图片中裁剪下来的图片。本文使用其中的 35 幅原始图像进行实验, 图 2 为所提方法与 He 等^[9]提出的大气光值估计方法对其中几张图像的最终效果对比。

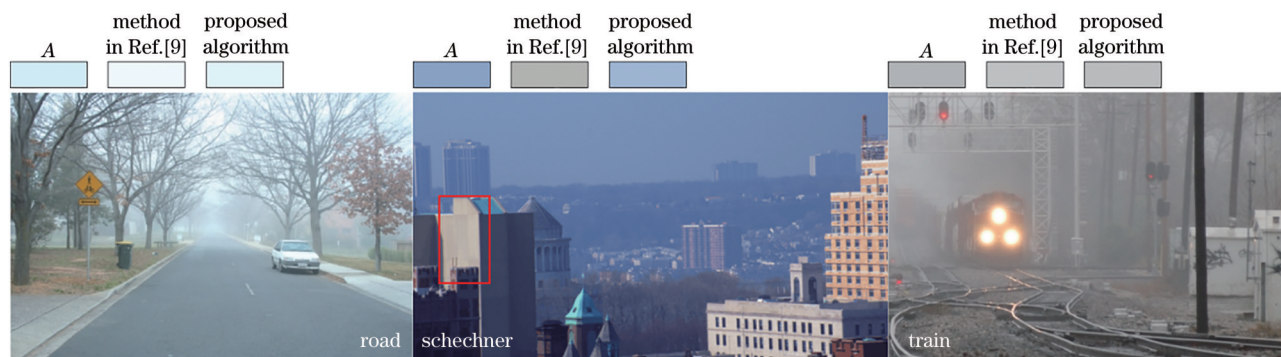


图 2 大气光值对比

Fig. 2 Comparison of atmospheric light value

从对比结果可以看出, 所提大气光值估计算法比 He 等提出的算法要更接近真实大气光值, 尤其在 schechner 这幅图中, 图像中方框里是阳光照射的明亮墙体, He 算法只考虑亮度大小, 将估计值定位在了明亮墙体上, 远远偏离真实值。这也证实了所

提大气光值估计算法的抗干扰性和准确性。

3.2 基于雾线暗通道先验的透射率优化

3.2.1 暗通道先验透射率分析

暗通道算法是一种局部的处理方法, 由图 3 可以看出, 因为暗通道算法原理的原因, 图像中每个



图 3 暗通道先验去雾。(a) 原图; (b) 透射率图; (c) 去雾后图像

Fig. 3 Image dehazing based on dark channel prior. (a) Original image; (b) transmission map; (c) dehazed image

像素点的透射率都要经过(3)式中 $\Omega(x)$ 窗口最小值化处理这个步骤。在这个步骤中,当窗口全部位于像素值变化平缓的区域,窗口最小值化处理后没有影响;但是当窗口包含图像的边缘并且边缘两侧像素值相差较大时,最小值化处理后会使得所求中心像素值偏小,从而导致后续步骤中求出的像素点透射率值跟实际值差别较大,最终使得去雾后的图像出现边缘效应和块效应。

暗通道原理在图像含有大片明亮区域时并不成立,即最小值处理时等式中无雾图像的暗通道不为 0,但是在实际算法中按照值为 0 处理,导致在明亮区域的透射率值偏低,这样恢复出来的图像也会不符合实际无雾图像,去雾后图像的天空区域出现较严重失真,如图 3(c)所示。

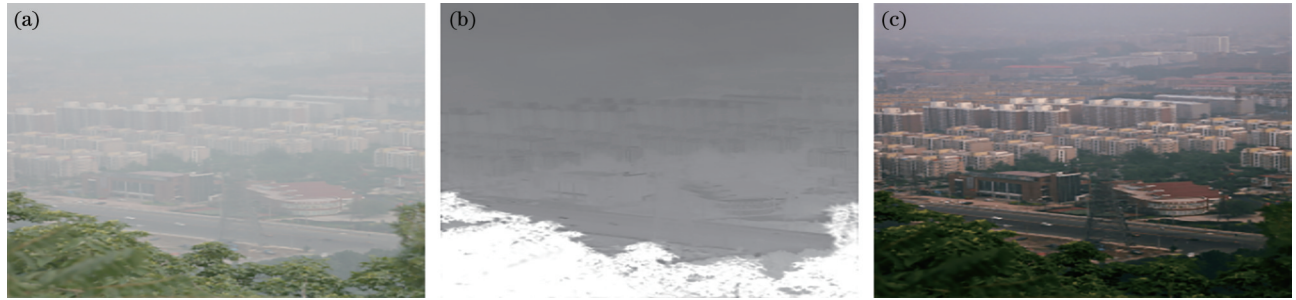


图 4 雾线先验去雾。(a)原图;(b)透射率图;(c)去雾后图像

Fig. 4 Image dehazing based on haze-line prior. (a) Original image; (b) transmission map; (c) dehazed image

3.2.3 透射率优化

根据雾线先验原理将有雾图像分成 N 个颜色簇,则在 RGB 空间内这些颜色簇的像素可以建模成经大气光值的 N 条直线,并且像素点透射率 $t(x)$ 与大气光值成正比。(6)式假设每条雾线中距离大气光值最大的像素点为无雾像素点,即该像素点的 $t(x)$ 为 1,但是在实际有雾图像中,并不能保证每条雾线中距离大气光值最大的像素点就是无雾像素,当雾较浓并且分布于整幅图像时偏差更大。

在大气光值附近的像素值接近于大气光值时,代表图像中明亮区域,区域不符合暗原色先验原理,即用 He 方法得到的 $t(x)$ 比实际值小;越远离大气光值的像素值越小,代表图像中的暗区域,比较符合暗通道原理,得到的透射率值比较准确。因此每条雾线中远离大气光值的像素透射率可以被暗通道方法较准确地估计出,可以对每条雾线中的最大半径透射率进行修正,得到 $t_1(x)$ 。

$$t_1(x) = \left[r(x) / r(x)_{\max} \right] \cdot t(x)_{r(x)_{\max}}, \quad (11)$$

式中: $t(x)_{r(x)_{\max}}$ 代表在雾线图中每条雾线上距离大

3.2.2 雾线先验透射率分析

雾线去雾算法是一种基于像素点本身的全局处理方法,根据颜色将图像中的所有像素聚类成以大气光值 A 为交点的一条雾线。但是这种方法依赖图像颜色的聚类和建模的准确性,当雾浓度较高或者图像某些颜色簇较小时,基于此先验求出的每条雾线中的像素与大气光值的最大距离就不再准确,使得像素点的透射率偏离真实值;并且基于颜色将像素分成颜色簇独立计算透射率,其中的误差可能会导致相邻像素点的透射率差别较大,去雾后的图像增加了噪声并且失真。图 4 为雾线去雾算法去雾后的效果图,可以明显看到透射率图存在较多噪声点,去雾后图像失真并且远处的雾仍然较浓。

气光值最远的像素点对应的暗通道透射率值; $r(x)_{\max}$ 代表每条雾线的最大半径。

引入文献[19]中提到的容差参数,与雾线图中像素点到大气光值的距离作对比,圈出明亮区域像素点,然后对 $t_1(x)$ 进行容差参数修正,得到 $t_2(x)$ 。

$$t_2(x) = \begin{cases} \frac{K}{|A - I(x)|} \times t_1(x), & |A - I(x)| \leq K \\ t_1(x), & |A - I(x)| > K \end{cases}, \quad (12)$$

式中: $|A - I(x)|$ 代表像素点到大气光值的距离; K 代表容差参数。当像素点到大气光值的距离小于容差参数时,则对这些像素点进行透射率修正;反之,则不进行改变。

最后使用快速引导滤波器,以原有雾图像为引导图进一步细化透射率图,这样可以使 $t_2(x)$ 在原有基础上获得更多的边缘信息,使最终恢复出来的图像能展示更多原始图像的梯度信息。由图 5 可以看出,相比 He 算法和 Berman 算法,所提算法修正后的透射率图更加平滑自然。

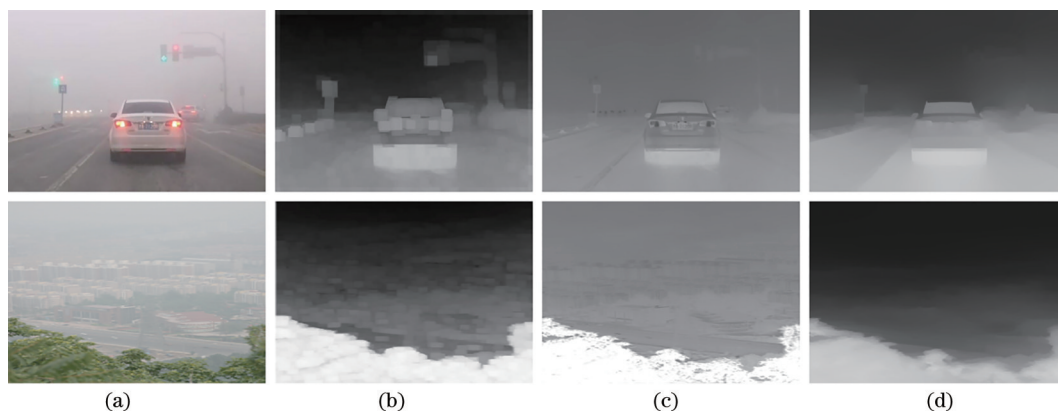


图 5 透射率图对比。(a)原有雾图像;(b) He算法;(c) Berman算法;(d)所提算法

Fig. 5 Comparison of transmission maps. (a) Original hazy images; (b) He's algorithm; (c) Berman's algorithm; (d) proposed algorithm

4 实验对比分析

在一般计算机 Windows 10 系统中使用 MATLAB R2018a 进行编程,处理器为 Intel core i7, 8750H。 $\Omega(x)$ 取 15×15 , K 取 80,其他参数的值在文中已经给出。最后将根据所提算法求得的 A

和 $t_2(x)$ 代入(2)式中,即可得到去雾后图像。

4.1 主观评价

对所提算法在不同图像的去雾结果分别与 He 算法、Berman 算法、Zhu 算法进行主观比较,直观快速地分辨出无雾图像的好坏。从图 6 可以看出:He 等提出的暗原色先验算法恢复出的这六张图像均



图 6 去雾算法效果对比。(a)原有雾图像;(b) He算法;(c) Berman算法;(d) Zhu算法;(e)所提算法

Fig. 6 Effect comparison of dehazing algorithms. (a) Original hazy images; (b) He's algorithm; (c) Berman's algorithm; (d) Zhu's algorithm; (e) proposed algorithm

具有块效应,图像不清晰,并且在处理不符合暗原色先验的明亮天空区域时会出现光晕,如第 1 张和第 6 张图像的天空部分;Berman 等提出的基于雾线的去雾算法是一种全局的像素级图像去雾算法,对于色彩丰富、雾浓度不高的图像处理效果较好,对于其他图像会增加图像的噪声并且引起图像失真,如第 1 张和第 5 张图;Zhu 等提出的基于颜色衰减先验的去雾算法利用雾浓度和亮度与饱和度差值的关系来估计场景深度,但是实验发现场景深度估值不总是准确的,会导致去雾不足或者去雾过度,如第 2、3、5、6 张图;所提算法去雾后的图像更加清晰自然,整体亮度适宜,视觉效果更佳。

4.2 客观评价

主观评价依据人眼视觉感知,虽然直观有效,但是缺乏统一性,会因为评价主体的差异导致评价结果差异。为了进一步验证所提算法的优势,采用峰值信噪比(PSNR)、信息熵(H)、结构相似性(SSIM)指标。峰值信噪比是一个衡量图像失真或是噪声水平的客观标准,数值越大表示图像失真越小;信息熵表示图像的平均信息量,图像细节越多,信息熵越大;结构相似性的取值范围为[0,1],值越大,表示图像失真越小。由表 1~3 可以看出,所提算法在峰值信噪比、信息熵、结构相似性指标上都

表 1 PSNR 对比

Table 1 Comparison of PSNR

Image	He's algorithm	Berman's algorithm	Zhu's algorithm	Proposed algorithm
1	11.6031	12.3594	13.5816	15.5421
2	10.6534	10.4991	15.9862	16.1926
3	13.9236	13.4365	17.7805	18.4362
4	11.4044	11.5366	16.7413	17.4580
5	10.0521	13.0753	14.0256	14.7548
6	12.1982	10.9148	15.0468	16.3734

表 2 H 对比

Table 2 Comparison of H

Image	He's algorithm	Berman's algorithm	Zhu's algorithm	Proposed algorithm
1	12.8587	13.4947	12.6294	15.5487
2	13.7886	14.7675	11.9447	16.1392
3	14.8613	15.1523	14.4175	17.2534
4	14.3259	12.9087	11.8216	15.3032
5	13.3074	13.1335	11.6572	14.4581
6	15.0924	14.2936	12.9978	15.8976

表 3 SSIM 对比

Table 3 Comparison of SSIM

Image	He's algorithm	Berman's algorithm	Zhu's algorithm	Proposed algorithm
1	0.6315	0.5946	0.7003	0.7571
2	0.4940	0.4702	0.7921	0.8673
3	0.6429	0.5311	0.8058	0.8311
4	0.7228	0.7527	0.8242	0.9228
5	0.6955	0.8163	0.7566	0.8582
6	0.8164	0.7539	0.8321	0.8537

优于其他三种现有算法,与主观评价保持一致,所提算法去雾后,图像噪声更少,更加清晰,失真更小。

5 结 论

所提算法针对暗通道去雾算法中大气光值估计不准确的问题,结合 HSV 空间归一化雾浓度图和暗通道图设置权重系数,自动选择最合适的大气光值;针对暗通道去雾算法中窗口选择导致的局部块效应和雾线算法中的缺陷引入的全局噪声,用暗通道估计的粗略透射率值对每条雾线中最大半径透射率进行修正;针对明亮区域估值偏小导致图像失真问题,引入容差参数优化明亮像素的透射率;最后利用快速引导滤波得到进一步细化的透射率图,根据大气散射模型获得最终的无雾图像。通过与几种经典算法进行实验结果的主观和客观分析对比,证明所提算法不仅具有更好的直观视觉效果,在客观指标上也表现良好,提高了去雾后图像的质量。

参 考 文 献

- [1] Yu J, Liao Q M. Fast single image fog removal using edge-preserving smoothing[C]//2011 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), May 22-27, 2011, Prague, Czech Republic. New York: IEEE Press, 2011: 1245-1248.
- [2] Wang Z Y, Huang M W, Hu P, et al. Image enhancement based on histograms and its realization with MATLAB[J]. Computer Engineering & Science, 2006, 28(2): 54-56.
汪志云,黄梦为,胡钊,等.基于直方图的图像增强及其 MATLAB 实现[J].计算机工程与科学,2006,28(2): 54-56.
- [3] Provenzi E, Fierro M, Rizzi A, et al. Random spray

- retinex: a new retinex implementation to investigate the local properties of the model[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2007, 16(1): 162-171.
- [4] Ma Y F, He W Z. Foggy day image enhancement method based on wavelet transform[J]. *Computer Applications and Software*, 2011, 28(2): 71-72, 95.
马云飞, 何文章. 基于小波变换的雾天图像增强方法[J]. *计算机应用与软件*, 2011, 28(2): 71-72, 95.
- [5] Liu H B, Yang J, Wu Z P, et al. A fast single image dehazing method based on dark channel prior and retinex theory[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2015, 41(7): 1264-1273.
刘海波, 杨杰, 吴正平, 等. 基于暗通道先验和 Retinex 理论的快速单幅图像去雾方法[J]. *自动化学报*, 2015, 41(7): 1264-1273.
- [6] Huang H, Li X R, Song J, et al. A traffic image dehaze method based on adaptive transmittance estimation with multi-scale window[J]. *Chinese Optics*, 2019, 12(6): 1311-1320.
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.
- [7] Fattal R. Single image dehazing[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2008, 27(3): 1-9.
- [8] He J M, Qiu J, Liu C. Fusing feature point density and edge information for scene depth estimation[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(7): 071101.
何建梅, 邱钧, 刘畅. 融合特征点密度与边缘信息的场景深度估计[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(7): 071101.
- [9] 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.
- [10] Berman D, Treibitz T, Avidan S. Non-local image dehazing[C]//2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), June 27-30, 2016, Las Vegas, NV, USA. New York: IEEE Press, 2016: 1674-1682.
- [11] Sun X M, Sun J X, Zhao L R, et al. Improved algorithm for single image haze removing using dark channel prior[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2014, 19(3): 381-385.
孙小明, 孙俊喜, 赵立荣, 等. 暗原色先验单幅图像去雾改进算法[J]. *中国图象图形学报*, 2014, 19(3): 381-385.
- [12] Zhao D, Xu L, Yan Y H, et al. Multi-scale optimal fusion model for single image dehazing[J]. *Signal Processing: Image Communication*, 2019, 74: 253-265.
- [13] Yang A P, Wang H X, Wang J B, et al. Image dehazing based on transmission fusion and multi-guided filtering[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(12): 1210001.
杨爱萍, 王海新, 王金斌, 等. 基于透射率融合与多重导向滤波的单幅图像去雾[J]. *光学学报*, 2018, 38(12): 1210001.
- [14] Hu Y, Wang K Y, Xu N, et al. Image dehazing by the segmenting median filter and transmission compensation[J]. *Journal of Xidian University*, 2018, 45(4): 99-105.
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.
- [15] Cai B L, Xu X M, Jia K, et al. DehazeNet: an end-to-end system for single image haze removal[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2016, 25(11): 5187-5198.
- [16] Wu D, Zhu Q S. The latest research progress of image dehazing[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2015, 41(2): 221-239.
吴迪, 朱青松. 图像去雾的最新研究进展[J]. *自动化学报*, 2015, 41(2): 221-239.
- [17] Zhu Q S, Mai J M, Shao L. A fast single image haze removal algorithm using color attenuation prior[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2015, 24(11): 3522-3533.
- [18] Bahat Y, Irani M. Blind dehazing using internal patch recurrence[C]//2016 IEEE International Conference on Computational Photography (ICCP), May 13-15, 2016, Evanston, IL, USA. New York: IEEE Press, 2016.
- [19] Song D C, Xu G Q, Lu J Y. Improved image defogging based on priori dark color[J]. *Journal of Wuhan Institute of Technology*, 2014, 36(12): 68-71.
宋得成, 徐国庆, 鲁建勇. 暗原色先验图像去雾改进算法[J]. *武汉工程大学学报*, 2014, 36(12): 68-71.