

改进暗通道先验的雾霾天图像复原算法

王伟鹏

(闽南科技学院 光电信息学院,福建 泉州 362332)

摘要:为解决暗通道先验在雾霾天图像复原过程中存在的不足,提出了一种改进的快速算法,即采用自适应邻域求取原图像的暗通道,解决了固定邻域在局部区域的错误估计问题;结合极大值滤波与双边滤波计算透射率,有效降低了运算量和运行时间;最后利用区域像素的平均值替代单个最大值,获取更加准确的空气光亮度,从而使改进算法对雾霾去除的视觉效果更加出众,并大幅度地降低了算法的执行时间。

关键词:暗通道先验;雾霾;图像去雾;图像复原;图像增强

中图分类号:TP391.4

文献标志码:A

文章编号:1671-5322(2021)01-0042-06

户外机器设备捕获的光学影像易受恶劣天气的影响,特别是雾霾天气,容易导致影像系统采集的数字图像存在模糊不清、细节对比度与饱和度不足等缺陷,甚至会造成影像系统出现故障,因此对雾霾天气采集的图像进行复原处理具有重要意义。

图像去除雾霾的算法主要分成两类:一是非模型的增强方法^[1-4],二是基于模型的复原方法^[5-8]。经典的增强方法主要有 Retinex 算法^[1-2]、直方图均衡^[3]和同态滤波等,这类方法一般通过提升图像对比度达到突出目标和细节的目的,而不考虑图像质量受损的因素。基于模型的方法是当前研究的热点与难点,He 等^[5]通过观察和统计大量测试图片得到暗通道先验理论,并将暗通道作为雾霾影响程度的初步估计,以此获取空气光亮度和粗略透射率,再利用软抠图进行优化从而得到精细结果。该算法对一般的雾霾图像能够获得出众的主观效果,但其运算量较大,占用的时间和内存较多,并且局部参数设置和计算方式存在一定的局限,难以推广到实际应用当中。SALAZAR-COLORES 等^[9]在暗通道先验的基础上简化了透射率细化步骤,并使用缩放图像计算透射率与空气光亮度,这不仅提高了运行速度,而

且消除了边缘伪影现象。韩昊男等^[10]采用四叉树分割理论对空气光的获取进行改进,并结合自适应加权与引导滤波优化透射率。本文在暗通道先验的基础上,提出一种改进的快速算法,并通过实验证明了改进算法的优势。

1 雾霾天成像退化模型

雾霾天气下,由自然场景到达图像采集设备的光路传播过程中,容易受到环境中气溶胶颗粒等介质的影响而出现散射现象,导致图像的色彩饱和度与对比度不足,图像细节由于水蒸气和灰尘的干扰而退化,并且退化程度与场景距离相关。为了从根本上消除雾气影响,建立成像退化模型^[11]如下:

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

式中: $I(x)$ 表示观测点采集的雾天图像; $J(x)$ 表示去雾图像; $t(x)$ 表示与图像深度相关的透射率; A 表示空气光亮度。

从数学方程的角度看,去雾复原是从 $I(x)$ 中估 $t(x)$ 和 A ,从而获取 $J(x)$ 的过程。

2 改进算法

2.1 自适应邻域的暗通道先验

暗通道先验假设的原理可以概括为:在不含

收稿日期:2020-07-14

基金项目:福建省教育厅中青年教师教育科研项目(JAT191032)。

作者简介:王伟鹏(1989—),男,福建泉州人,讲师,硕士,主要研究方向为图像处理与机器视觉。

有天空等大面积明亮区域的清晰图像中,大多数局部区域至少有一个颜色分量值很小的像素。暗通道可用数学公式描述如下:

$$J_{\text{dark}}(x) = \min_{x \in \Omega(x)} \left(\min_{c \in \{R, G, B\}} (J^c(x)) \right) \quad (2)$$

式中: J_{dark} 为图像 J 的暗通道,其强度值一般很小且逼近于零; J^c 是清晰图像 J 的 RGB 颜色分量之一; $\Omega(x)$ 是以 x 为中心的邻域。

暗通道算法^[5]中 $\Omega(x)$ 的邻域窗口为固定值 $15 \text{ pix} \times 15 \text{ pix}$,然而固定大小的窗口搜索难以适应不同分辨率下的景物特征,导致局部暗通道估

计失效,特别是针对高分辨率的图像。本文提出一种适应性分辨率的改进方法,即根据原始图像尺寸的 4% 设置邻域窗口的大小,方法如下:

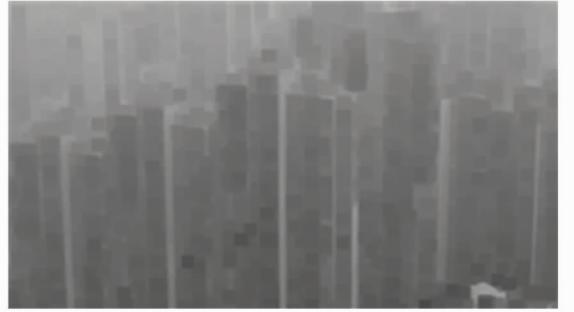
$$k = \min(m, n) \times 4\% \quad (3)$$

式中: m 和 n 分别表示图像的宽度和高度, pix 。

按照公式(3),当图像分辨率为 $600 \text{ pix} \times 400 \text{ pix}$ 时, $k = 16 \text{ pix}$,邻域大小即为 $16 \text{ pix} \times 16 \text{ pix}$,效果如图 1a 所示;当图像分辨率为 $1280 \text{ pix} \times 720 \text{ pix}$ 时,其邻域大小为 $29 \text{ pix} \times 29 \text{ pix}$,效果如图 1b 所示。



a 邻域 $16 \text{ pix} \times 16 \text{ pix}$



b 邻域 $29 \text{ pix} \times 29 \text{ pix}$

图 1 自适应邻域的暗通道先验

Fig 1 Dark channel prior of adaptive neighborhood

由于改进方法可以自适应分块,因此可以获得更准确的暗通道值。

2.2 改进透射率的计算

根据成像退化模型与暗通道假设即可估计透射率 $t(x)$ 。假设空气光亮度 A 是已知的,对式(1)左右两端执行极小值运算,获取暗通道,即

$$\begin{aligned} & \min_{x \in \Omega(x)} \left(\min_{c \in \{R, G, B\}} (I^c(x)) \right) = \\ & \tilde{t}(x) \cdot \min_{x \in \Omega(x)} \left(\min_{c \in \{R, G, B\}} (J^c(x)) \right) + A(1 - \tilde{t}(x)) \end{aligned} \quad (4)$$

式中,清晰图像 J 的暗通道逼近于零。消除等式右侧的第一项,获取透射率的粗略估计,即

$$\tilde{t}(x) = 1 - \min_{x \in \Omega(x)} \left(\min_{c \in \{R, G, B\}} \left(\frac{I^c(x)}{A} \right) \right) \quad (5)$$

由于场景中存在远近景交界的深度突变区域,局部透射率并非恒定值,因此式(5)的结果中容易出现边缘 Halo 现象和块效应现象。为了消除这种现象,He 等^[5]利用软抠图算法对该问题进行修复,但是修复步骤复杂且运算量较大。考虑到由于边缘像素的暗通道被低估才导致 Halo 现象的产生,本文提出一种基于极大值运算的快速改进算法,即:

$$\tilde{t}(x) = 1 - \omega \cdot \max_{x \in \Omega(x)} \left(\min_{x \in \Omega(x)} \left(\min_{c \in \{R, G, B\}} \left(\frac{I^c(x)}{A} \right) \right) \right) \quad (6)$$

式中:极大值运算所采用的邻域窗口 Ω 与极小值一致,并对深度突变处的远景暗通道值进行了提升; $\omega \in [0, 1]$ 为调节参数,目的是使场景中存留一小部分雾气,使视觉呈现更加真实。经过大量实验测试,取经验值 $\omega = 0.92$ 时整体效果较好。

为了进一步克服 $\tilde{t}(x)$ 中的块效应,使用快速双边滤波器(BF)^[12]进行平滑处理,如图 2a 所示。该滤波器由空域 S 和值域 R 两个权重构成,具有保持边缘的非线性平滑效果,其滤波过程中的邻域窗口内权重与中心位置的像素距离和灰度差有关,计算式如下:

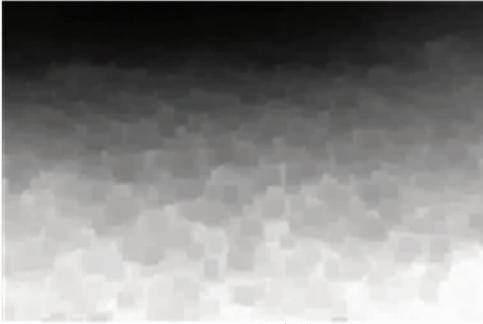
$$f_{\text{BF}}(I)_p = \frac{\sum_{q \in S} (\sigma_s(|p - q|) \sigma_r(|I_p - I_q|) I_q)}{\sum_{q \in S} (\sigma_s(|p - q|) \sigma_r(|I_p - I_q|))} \quad (7)$$

式中: S 为以像素点 p 为中心的邻域窗口; I_p 和 I_q 分别为像素 p 和 q 的灰度值; σ_s 和 σ_r 分别为空域 S 和值域 R 的核函数。

利用双边滤波对 $\tilde{t}(x)$ 修复,结果如图 2b 所示。修复原理如下:

$$t(x) = f_{BF}(\tilde{t}(x)) \quad (8)$$

对比粗估计可以看出,修复结果显著消除块效应现象,且结构边缘基本维持不变。



a 粗估计 $\tilde{t}(x)$



b 修复 $t(x)$

图 2 改进透射率

Fig 2 Improved transmittance

2.3 复原清晰图像

基于 He 等^[5]方法估计空气光 A 时,取暗通道中强度值靠前的 0.1% 像素,对应于雾天图像中相同位置里的最大值作为 A 的估计。该方法的局限在于仅取单个最大值容易导致误差,因为高亮像素是噪声的可能性较大。本文提出相应的改进方法,是取相同位置中全体像素的均值作为空气光 A ,这样可有效排除个别噪声的干扰。

图 3 为空气光改进前后的对比。改进前,3 个颜色通道的空气光为 (219, 218, 220),复原结果如图 3b 所示,整体色调偏蓝色,与原图差异较大;改进后的空气光为 (191, 199, 205),复原结果如图 3c 所示,相比改进前色彩更为纯正,缩小了与实际场景之间的差异。

最后将 $t(x)$ 和 A 代入成像退化模型,得到去雾后的表达式,即

$$J(x) = \frac{I(x) - A}{\max(t(x), t_0)} + A \quad (9)$$



b 改进前的复原结果



c 改进后的复原结果

图 3 改进空气光前后的结果对比

Fig 3 Comparison of the results before and after the improvement of air light

式中,为避免个别像素的透射率趋于零而产生噪声现象,取下限值 $t_0 = 0.01$ 。

3 实验与分析

3.1 实验结果比较

选取含自然风光、人工建筑等不同场景的有雾图片,通过改进前后的效果对比验证改进方法的有效性。图 4 为自然场景下的复原结果比较,



a 雾霾天图像

其中图 4a 为自然场景下的薄雾图像,图 4b 为暗通道算法的复原结果,图 4c 为改进算法的复原结果。由图 4b 可以看出,远景处出现轻微的色偏现象,这是由于获取了不够精确的空气光亮度造成的;图 4c 改进算法后克服了色偏现象,远处色调与原图基本相同。图 5 为建筑群的复原结果比较,其中图 5a 为浓雾下的建筑群场景,图 5b 为暗通道算法的复原结果,图 5c 为改进算法的复原结果。由图 5b 可以看出,暗通道算法在远处的去雾效果较差(图 5b 左上角);图 5c 改进算法后清晰程度更高,去雾更彻底。图 6 为混合自然风景与楼房建筑的复原结果比较,其中图 6a 为混合自然风景与楼房建筑的图像,图 6b 为暗通道算法的复原结果,图 6c 为改进算法的复原结果。由图 6b、图 6c 可以看出,暗通道算法与改进算法中的雾霾基本消除,视觉效果上较为相似,但对比局部细节可知,图 6c 的对比度提升更为明显。

3.2 实验结果分析

为了从原理上阐明两种算法结果不同的原因,采用标准差和平均梯度对图 4 ~ 图 6 中的两种算法进行分析,结果如表 1 所示。由表 1 可以看出,改进算法的标准差和平均梯度两项指标均比暗通道算法高,而执行时间却显著减少,表明改进算法具有更好的复原效果,且时间成本更低,意味着改进算法具有更高的实时性和实用性。



c 改进算法

图 4 自然场景下的复原结果比较
Fig 4 Comparison of restoration results about natural scenes



a 雾霾天图像



b 暗通道算法



c 改进算法

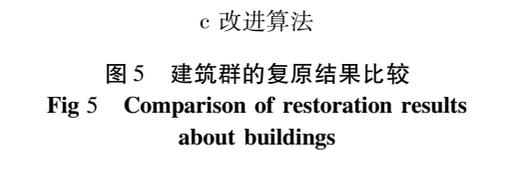
图 5 建筑群的复原结果比较
Fig 5 Comparison of restoration results about buildings



a 雾霾天图像



b 暗通道算法





a 雾霾天图像



b 暗通道算法



c 改进算法

图 6 混合自然风景与楼房建筑的复原结果比较

Fig 6 Comparison of restoration results mixed natural scenes and buildings

表 1 客观指标评价
Table 1 Objective indicators evaluation

图像	分辨率/(pix × pix)	算法	标准差	平均梯度	执行时间/s
图 4	600 × 400	暗通道算法	47.215 1	8.669 4	7.061
		改进算法	55.503 5	12.158 1	0.287
图 5	1 280 × 720	暗通道算法	30.379 1	3.528 9	26.415
		改进算法	38.842 5	4.654 9	0.889
图 6	680 × 460	暗通道算法	41.896 3	14.552 7	9.274
		改进算法	43.054 1	16.593 9	0.352

4 结论

针对暗通道先验在雾霾天图像复原过程中存在的不足,提出改进与优化算法,即利用适应性的邻域窗口替代原算法中的固定窗口,使局部暗通

道值更加准确;极大值滤波与双边滤波的有效结合,提高了透射率的计算效率;对空气光进行区域均值估计,有效地避免了噪声的干扰。最后仿真实验验证了改进算法的有效性,在视觉效果略优于原算法的同时,大幅度降低了算法的执行时间。

参考文献:

[1] 郭瑞,党建武,沈瑜,等.改进的单尺度 Retinex 图像去雾算法[J].兰州交通大学学报,2018,37(6):69-75.
 [2] 高原原,胡海苗.基于多子块协同单尺度 Retinex 的浓雾图像增强[J].北京航空航天大学学报,2019,45(5):944-951.
 [3] 赵春丽,董静薇,徐博,等.融合直方图均衡化与同态滤波的雾天图像增强算法研究[J].哈尔滨理工大学学报,2019,24(6):93-97.
 [4] 张肃,战俊彤,付强,等.基于多小波融合的偏振探测去雾技术[J].激光与光电子学进展,2018,55(12):474-483.

- [5] 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, 2011, 33(12):2341-2353.
- [6] 袁桂霞,周先春. 基于B通道补偿的景深估计的图像去雾算法[J]. 控制工程, 2019, 26(12):2252-2257.
- [7] 郭翰,徐晓婷,李博. 基于暗原色先验的图像去雾方法研究[J]. 光学学报, 2018, 38(4):113-122.
- [8] 程磊,刘勇军. 基于改进暗通道算法的图像去雾研究[J]. 计量学报, 2019, 40(2):220-224.
- [9] SALAZAR-COLORES S, RAMOS-ARREGUIN J M, PEDRAZA-ORTEGA J C, et al. Efficient single image dehazing by modifying the dark channel prior[J]. EURASIP Journal on Image and Video Processing, 2019, 2019(1):1-8.
- [10] 韩昊男,钱锋,吕建威,等. 改进暗通道先验的航空图像去雾[J]. 光学精密工程, 2020, 28(6):1387-1394.
- [11] 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.
- [12] CHEN J W, PARIS S, DURAND F. Real-time edge-aware image processing with the bilateral grid[J]. ACM Transactions on Graphics, 2007, 26(3):103-111.

Image Restoration Algorithm in Haze Days Based on Improved Dark Channel Prior

WANG Weipeng

(College of Optoelectronic Information, Minnan Science and Technology University, Quanzhou Fujian 362332, China)

Abstract: In order to solve the deficiency of dark channel prior in the process of image restoration in haze days, an improved fast algorithm was proposed, that is, an adaptive neighborhood was used to obtain the dark channel of the original image, which solved the problem of error estimation of fixed neighborhood in local area. Combining the maximum filtering and bilateral filtering to calculate the transmittance, the amount of calculation and running time are effectively reduced. Finally, the average value of regional pixels is used to replace the single maximum value to obtain more accurate air brightness, so that the visual effect of the improved algorithm for haze removal is more outstanding, and the execution time of the algorithm is greatly reduced.

Keywords: dark channel prior; haze; image defogging; image restoration; image enhancement

(责任编辑:李华云)