

基于自适应指数加权移动平均滤波的快速去雾算法

梅康^{1,2**}, 刘小勤^{1*}, 沐超¹, 秦晓琪^{1,2}

¹中国科学院安徽光学精密机械研究所中国科学院大气光学重点实验室, 安徽 合肥 230031;

²中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026

摘要 经典的暗原色先验去雾算法易丢失图像细节信息, 基于保边滤波的去雾算法虽可以有效保护图像细节, 却耗时较长。针对以上问题, 提出一种能够很好地保护图像边缘细节且耗时较短的自适应指数加权移动平均滤波算法, 并与改进的暗通道结合, 实现快速去雾。首先, 对暗通道加以改进并求得透射率粗分布; 再利用自适应指数加权移动平均滤波算法对透射率进行优化; 之后修复明亮区域透射率, 避免颜色失真; 最后通过变换大气散射模型求解得到去雾图像。实验结果表明: 本文算法具有很快的执行速度, 且经本文算法处理后的去雾图像质量较高, 在有效边缘强度、色彩还原能力、结构信息这三个无参考客观评价指标下均表现不错。

关键词 图像处理; 去雾; 指数加权移动平均; 暗通道; 大气散射模型

中图分类号 O435.1; TP391.4

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.0109001

Fast Defogging Algorithm Based on Adaptive Exponentially Weighted Moving Average Filtering

Mei Kang^{1,2**}, Liu Xiaoqin^{1*}, Mu Chao¹, Qin Xiaoqi^{1,2}

¹Key Laboratory of Atmospheric Optics, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China;

²University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China

Abstract The classical dark channel prior defogging algorithm easily loses image details. Alternatively, the defogging algorithm based on edge-preserving filtering can effectively protect image details; however, it is time-consuming. Aiming at the aforementioned problems, this paper proposed an adaptive exponentially weighted moving average filtering algorithm that protected image edge details while taking less time. Combined with an improved dark channel, this method achieved fast and precise defogging. First, the improved dark-channel algorithm was applied to obtaining a rough distribution of atmospheric transmittance. Second, the transmittance was optimized by employing the adaptive exponentially weighted moving average filtering algorithm. Subsequently, the transmittance of the bright region was repaired to avoid color distortion. Finally, the defogged image was processed using the transformation of the atmospheric scattering model. The experimental results show that the proposed algorithm has a high execution speed; moreover, the defogged image processed using the proposed algorithm has good performance under the following three nonreference objective evaluation indexes: effective edge intensity, color reproduction ability, and structural information.

Key words image processing; defogging; exponentially weighted moving average; dark channel; atmospheric scattering model

OCIS codes 100.2980; 070.4560; 010.1290; 010.3640

1 引言

有雾天气下, 户外图像采集设备将会受到影响,

使获取到的有雾图像对比度较低、层次感不强、质量退化严重, 进而导致一些与图像相关的系统(室外监控系统、交通导航系统、卫星遥感系统等)性能下降。

收稿日期: 2019-07-11; 修回日期: 2019-08-02; 录用日期: 2019-09-26

基金项目: 国家自然科学基金(61605223, 41576185)

* E-mail: xqliu@aiofm.ac.cn; ** E-mail: meikang@mail.ustc.edu.cn

为提高雾天条件下的系统性能,可对系统获取到的有雾图像进行去雾处理。

目前,针对图像去雾,主要采用图像增强和图像复原两类方法^[1]。图像增强方法不考虑雾天图像的退化机制,从主观的视觉感受出发,利用图像增强手段,提高图像的视觉效果。该类算法主要有直方图均衡、小波变换、同态滤波以及 Retinex 算法,但这些算法并非真正意义上的去雾,容易造成一定的信息损失。图像复原方法则利用已知的先验知识,变换大气散射模型,反演得到最终的去雾图像,恢复后的图像信息丢失少,具有较好的去雾效果。Tan 等^[2]以马尔可夫随机场实现复原图像局部对比度的最大化,该方法虽能取得较好的视觉效果,但复原图像颜色往往过于饱和,色调较深,且易产生光晕伪影。Fattal^[3]假设物体表面色度与传输率是局部不相关的,据此估计透射率,但在浓雾条件下,该假设失效,难以达到理想的去雾效果。He 等^[4]对大量户外无雾图像进行统计分析,发现暗原色先验的统计规律,并以此构建去雾算法,能达到良好的去雾效果,但是该算法使用了软抠图法对透射率进行优化,会极大占用计算机内存并且时间复杂度也很高,难以达到实时去雾的目的,后来虽然采用了导向滤波^[5]替代软抠图法,提高了算法的速度,但是在边缘处容易产生去雾不彻底的现象。

近年来,基于目标分割、检测、识别的系统被广泛应用在各个行业,这些系统的性能在很大程度上依赖于成像设备获取的图像中结构边缘的质量,而雾的存在会模糊图像的结构边缘,使得系统性能下降。为减轻雾对上述系统性能的影响,人们尝试对有雾图像进行去雾处理,提高图像清晰度,以改善系统性能。但一些传统的去雾算法并未充分考虑对图像结构边缘的保护,经去雾处理后,图像结构边缘的质量反而可能下降,并不能提高上述系统性能,因此,为在去雾过程中有效地保护图像结构边缘,使去雾图像结构边缘清晰可见,一些保边滤波算法相继被应用到图像去雾中。Yu 等^[6]结合暗通道去雾算法,首先求解有雾图像中各像素点 RGB 三通道内的最小值,得到最小值通道图,并在此基础上求解透射率粗分布,之后用双边滤波算法对透射率进行优化,最后反演出去雾图像。但双边滤波算法需要同时计算二维空间内的空间邻近度因子和亮度相似因子,前者由像素空间距离决定,后者由像素间亮度值决定,算法时间复杂度较高。陆海俊等^[7]则利用均值漂移滤波对粗透射率分布进行优化,然而,均值漂移

滤波需要进行迭代求解,耗时亦较长。李红云等^[8]采用边界限制加权最小二乘法滤波优化粗透射率,该方法在一定程度上提高了算法效率,但所需设置的参数较多,不易广泛应用。

针对以上问题,本文提出一种能够保护图像边缘的自适应指数加权移动平均滤波算法,与暗通道去雾算法结合,实现快速去雾。首先,对传统暗通道求解方法中的最小值滤波进行阈值限制,防止边缘信息受损;其次,以二叉树搜索法代替 He 等^[4]中的大气光学值求解法,避免受到图像中白色区域的干扰;接着,求解得到大气透射率的粗分布,并应用本文自适应指数加权移动平均滤波算法对其进行优化;之后,针对图像中的明亮区域,构建一个明亮区域隶属度函数,修复明亮区域的透射率;最后,利用大气散射模型进行反演求解,得到清晰无雾的复原图像。

2 暗原色先验去雾模型

有雾环境下,Narasimhan 等^[9]在 McCartney^[10]的基础上推导出大气散射模型的成像方程,即

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

$$t(x) = \exp[-\rho d(x)], \quad (2)$$

式中: I 表示含雾原始图像; J 表示去雾后的图像; A 表示大气光学值; t 表示透射率分布,当大气传输介质均匀时, t 可由(2)式描述; ρ 表示大气散射系数; d 表示图像中物体与成像设备的距离,即场景深度。

观察(1)、(2)式,可知要想从 I 中恢复得到无雾图像 J ,需要分别求解出 A 和 t 两个未知量,而 t 与场景深度 d 相联系。仅仅通过单幅图像获取场景深度是很困难的,所以,只能根据一些先验知识或者合理假设来得到方程的解。

He 等^[4]在统计 5000 多幅户外无雾照片后,发现暗原色先验的统计规律,即在无雾条件下,获取到的图像在每一个像素点的邻域 Ω 中,存在一个最暗的像素点,在该像素点的 RGB 三通道中,最小值趋近于 0。

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

式中: Ω 表示像素点 x 的邻域; y 表示邻域中的一个像素点,通常可选取 7×7 或者 15×15 的方形矩阵作为 x 的邻域 Ω ; J^c 表示无雾图像 J 的 c 通道; J^{dark} 表示无雾图像的暗通道图,值接近于 0。

对(1)式两边求取局部最小值,并将(3)式代入其中,可以得到透射率 t 的表达式,即

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

在实际成像过程中,不能完全保证空气洁净,不可避免地会存在一些尘粒,从而对成像造成影响,因此,为了让图像看起来更加真实自然,可以在(4)式中引入一个常量系数 w 。

$$t(x) = 1 - w \times \min_{y \in \Omega(x)} \left[\min_{c \in (r, g, b)} \frac{I^c(y)}{A} \right], \quad (5)$$

w 控制着去雾程度,取值介于 0 到 1 之间,在 He 等^[4]的论文中, w 的取值为 0.95。

上述过程中,还有一个未知量 A 待求解,通常可简单地从有雾图像的暗通道图中选取亮度最高的前 0.1% 像素,再求解这些像素点对应有雾图像 I 像素值的平均值,将此平均值作为 A 的估计。最终,求解得到去雾图像为

$$J(x) = \frac{I(x) - A}{\max[t(x), t_0]} + A, \quad (6)$$

为防止(6)式分母为 0,需要设置透射率下限 t_0 , He 等^[4]的论文中, t_0 为 0.1。

3 自适应指数加权移动平均滤波算法介绍

图像滤波可以减弱噪声,增强图像清晰度。传统的一些滤波算法,如均值滤波、中值滤波、高斯滤

波等,虽然可以在一定程度上减少噪声,却不能区分噪声和边缘,容易模糊图像边缘,而一幅具有清晰结构边缘的去噪图像,对图像分割、识别等后续处理均有很强的实际效益。

基于边缘结构保持的图像滤波算法主要有双边滤波^[11]、各项异性扩散滤波^[12]、非局部均值滤波^[13]、加权最小二乘法滤波^[14]等。这些算法均能在一定程度上保护边缘,但时间耗费相对较长。对此,本文提出一种基于自适应指数加权移动平均(AEWMA)的快速保边滤波算法。

3.1 指数加权移动平均法

指数加权移动平均(EWMA)法是由加权移动平均(WMA)法演化而来,WMA 对已知数据分别赋予不同的权重,按此权重求得移动平均值,并以此值为基础,确定预测值。EWMA 则是指各数的加权系数随时间呈指数递减,主要优点是不需要保存过去的数值,只占用极少的内存。EWMA 公式为

$$v_t = \beta v_{t-1} + (1 - \beta) \theta_t, \quad (7)$$

$$v_0 = \theta_1, \quad (8)$$

式中: v_t 表示当前时刻的预测值; v_{t-1} 表示上一时刻的预测值; θ_t 表示当前时刻实际值; β 表示加权下降的速率,为一个常数值,值越小权重下降越快; v_0 一般被初始化为初始时刻的实际值 θ_1 。

图 1 为阶跃曲线受均值为 0 的白噪声污染后

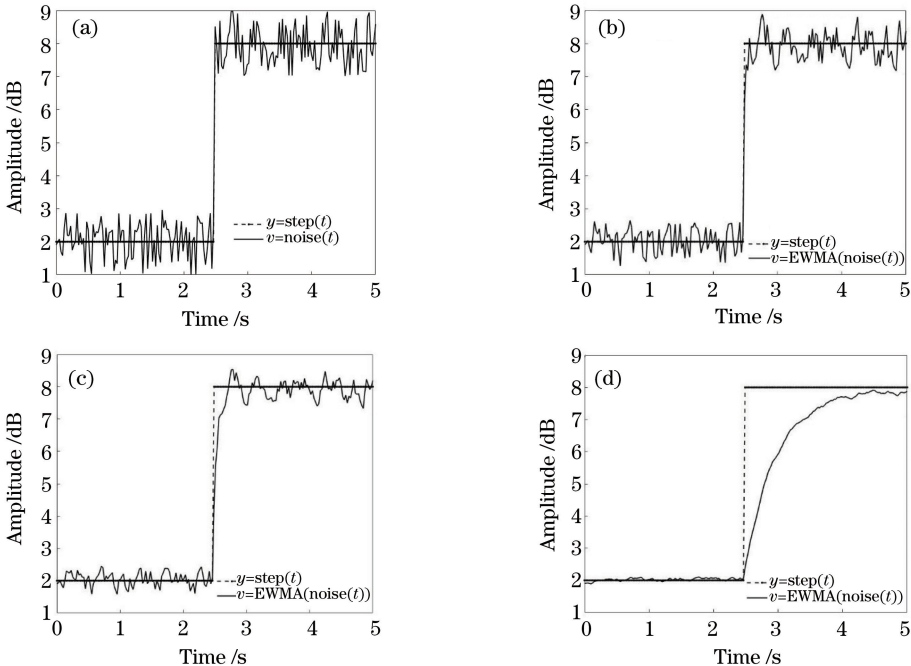


图 1 EWMA 法。(a) $\beta=0$;(b) $\beta=0.35$;(c) $\beta=0.65$;(d) $\beta=0.95$

Fig. 1 EWMA algorithm. (a) $\beta=0$; (b) $\beta=0.35$; (c) $\beta=0.65$; (d) $\beta=0.95$

经不同 β 值的 EWMA 算法处理后的结果。四幅图中,点线皆为未受噪声影响的原始阶跃曲线,图 1(a)中实线是加上噪声后的噪声曲线(β 为 0 相当于未对数据进行处理),图 1(b)~(d)中实线分别是在不同 β 值下经过 EWMA 算法处理后的拟合曲线。从图中可以看出, β 取值越大,EWMA 算法平滑效果越好,边缘保持性越差,如图 1(d)所示,函数阶跃点的左边虽然能很好地与原始曲线拟合,但是阶跃点的右边却与原始曲线偏离过大。

3.2 自适应指数加权移动平均法

据以上讨论可知,EWMA 法是将过去一段时间内的数据加以不同的权重求平均,越靠近当前时刻权重越大,但其并未考虑前后数据之间的差异,若是直接应用到图像滤波中,不能起到保护边缘的作用。对此,本文提出 AEWMA 法,通过构建一个高斯函数,自适应地选取 β 值。

$$\begin{cases} v_i = \beta v_{i-1} + (1 - \beta)\theta_i \\ \beta = \exp[-(v_{i-1} - \theta_i)^2 / \sigma] \end{cases} \quad (9)$$

式中: σ 表示高斯函数的标准差; β 不再是一个常数

值,而是一个变量,其值的大小取决于上一时刻预测值 v_{i-1} 与当前时刻实际值 θ_i 的差异。由高斯函数性质可知:差异越大, β 取值越小,则当前时刻预测值 v_i 越接近于 θ_i ;差异越小, β 越大, v_i 越接近 v_{i-1} 。

图 2 为 AEWMA 算法在不同参数 σ 时,处理带有噪声的阶跃曲线的对比结果,阶跃曲线如图 1(a)中实线所示。可以明显得出: σ 较小时,AEWMA 算法的平滑特性较差,如图 2(a)所示; σ 较大时,AEWMA 算法不仅平滑特性好,且能有效地保持原始曲线的边缘结构,如图 2(c)所示,拟合曲线基本与原始曲线重合;但当 σ 取值过大时,拟合曲线将偏离原始曲线,如图 2(d)所示;最后再对比图 1(d)和图 2(c),在函数阶跃点的左侧,两幅图的拟合曲线的平滑效果相差不多,但在阶跃点的右侧,图 1(d)中拟合曲线开始偏离原始曲线,而图 2(c)则克服了该缺点,能很好地与原始曲线保持一致。由此可知,较之 EWMA 算法,AEWMA 算法拥有更好的结构保持特性,且能有效平滑噪声。

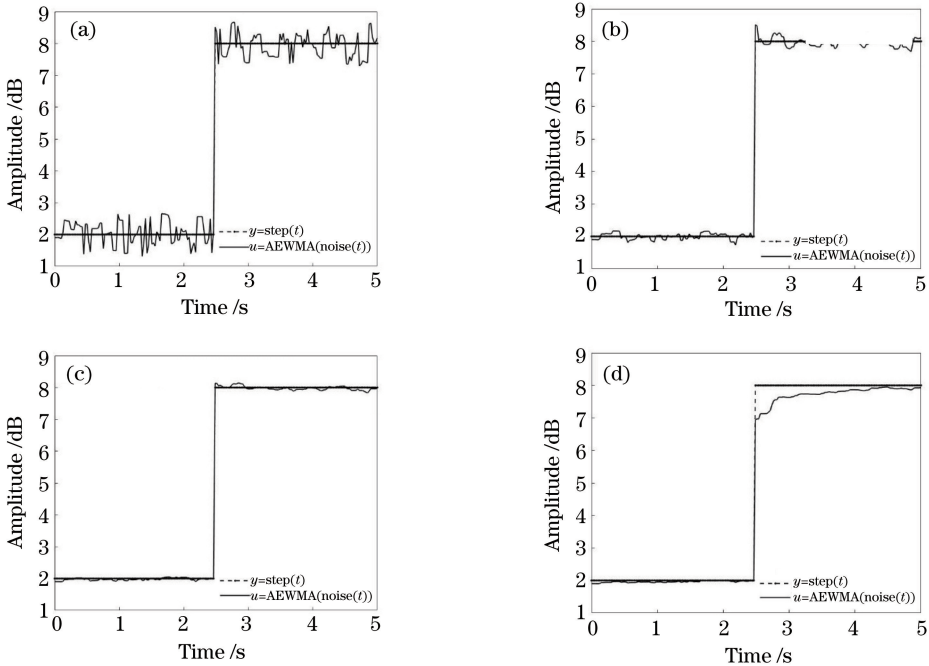


图 2 AEWMA 法。(a) $\sigma=1$;(b) $\sigma=5$;(c) $\sigma=15$;(d) $\sigma=30$

Fig. 2 AEWMA algorithm. (a) $\sigma=1$; (b) $\sigma=5$; (c) $\sigma=15$; (d) $\sigma=30$

3.3 图像滤波

上述的 AEWMA 算法是针对一维数据的,而图像是一个二维矩阵,因此,若要将 AEWMA 算法应用到图像滤波中,可将图像的每一行、每一列分别视作一维数据,在此基础上运用 AEWMA 算法,步骤如下。

1) 用 AEWMA 算法对原始图像的偶数行以从左到右的顺序进行处理,对奇数行以从右到左的顺序进行处理,得到输出数据 O_1 。再用 AEWMA 算法对原始图像的偶数列以从上到下的顺序进行处理,对奇数列以从下到上的顺序进行处理,得到输出 O_2 。

2) 用 AEWMA 算法对 O_1 的偶数列以从上到

下的顺序进行处理,对奇数列以从下到上的顺序进行处理,得到输出 O_3 ,再将 O_1 上下翻转,重复上述处理过程得到 O_4 。

3) 用 AEWMA 算法对 O_2 的偶数行以从左到右的顺序进行处理,对奇数行以从右到左的顺序进行处理,得到输出 O_5 ,再将 O_2 左右翻转,重复上述处理过程得到 O_6 。

4) 求取 O_3 、 O_4 、 O_5 、 O_6 的平均值,得到最终输出结果 O 。

为验证 AEWMA 算法在图像滤波中的有效

性,本文分别从主观效果、客观质量 PSNR 和时间开销三个方面与双边滤波(bilateral filter)、加权最小二乘法滤波(WLS filter)比较。

图 3(a)由一幅清晰图像加上均值为 0 的高斯白噪声形成,图 3(b)~(d)均是分别调节各自滤波器参数,在达到一个比较好的主观效果时的滤波图。其中 AEWMA 算法的 σ 经过调节,在取值为 0.025 时滤波图具有较好的主观效果。通过主观对比,经本文 AEWMA 滤波算法处理过后的图像具有更好的清晰度。



图 3 不同滤波器对比图。(a)噪声图;(b)双边滤波;(c) WLS 滤波;(d) AEWMA 滤波

Fig. 3 Comparison of different filters. (a) Noise image; (b) bilateral filter; (c) WLS filter; (d) AEWMA filter

滤波性能通常是计算开销和图像质量的权衡,表 1 中为在八核 1.80 GHz Intel Core(TM) i7-8550U 处理器、16G 内存,操作系统为 Windows10,使用 Matlab (R2018b)软件对图 3(a)进行不同滤波处理之后的性能对比结果,滤波结果即为图 3(b)~(d)三幅图像。从表 1 数据可知,各滤波算法的 PSNR 大致相同,但

本文 AEWMA 滤波算法耗时最少,在 $512 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$ 的图像大小情况下,耗时仅约为 WLS 滤波器的 1/10。因为 AEWMA 滤波算法只需要对图像中的像素点进行 6 次遍历,每次遍历时,每个像素点的预测值仅依赖于当前像素点的值和上一像素点的预测值,所以节省了时间和空间。

表 1 不同滤波器的指标对比

Table 1 Comparison of indexes of different filters

Image (size: $512 \text{ pixel} \times 521 \text{ pixel}$)	Noise image	Bilateral filtered image	WLS filtered image	AEWMA filtered image
PSNR /dB	26.9876	32.6219	31.9278	32.4909
Time /s		3.86340	0.79045	0.08148

4 基于 AEWMA 滤波的去雾算法

暗原色先验去雾简单易行,但在景物边缘处会产生 Halo 效应,基于保边滤波的去雾算法虽然可以消除此效应,耗时却较长,此外,暗原色先验去雾在明亮区域会产生颜色失真。对此,本文在 AEWMA 滤波算法的基础上,结合暗原色先验规律进行图像去雾,这不仅能消除 Halo 效应和颜色失真,而且能极大提高算法的效率。本文去雾算法主要步骤如下:1)改进暗通道;2)二叉树法求取大气光学值;3)求解透射率分布并对其进行优化;4)修正图像明亮区域的透射率;5)复原图像。

4.1 暗通道的改进

Halo 效应是暗原色先验去雾的一大缺陷,产生

原因是在求解暗通道时采用最小值滤波,在场景深度变化剧烈的边缘处,求解的暗通道值小于实际值,导致该区域内透射率偏大,最终使得该区域去雾不彻底,产生 Halo 效应。

从图 4(a)中可以观察到,在树叶与砖墙的交界处附近,砖墙处像素点 x 的邻域内包含前景雾树叶,而树叶这块区域内的暗通道值很低,结果使 x 点的暗通道值被误判,得到一个与真实值小很多的值,反映到去雾图 4(c)上,表现为该点去雾不彻底,有白雾残留。为解决这个问题,本文对邻域内最小值进行阈值限制,假设阈值为 K ,当像素邻域值与当前点像素值之差大于 K 时,认定此邻域像素与当前点处于不同的景深处,应在求解邻域最小值时剔除该点,具体步骤如下。

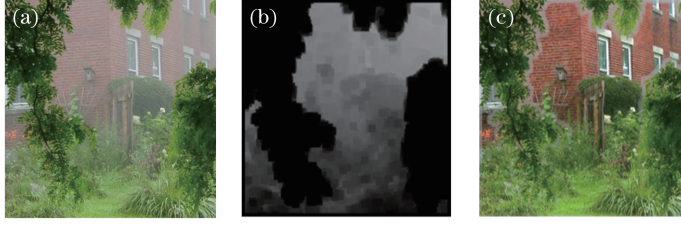


图 4 暗通道先验去雾过程图。(a)有雾图像;(b)暗通道图;(c)去雾图

Fig. 4 Image defogging process based on dark channel prior. (a) Fog image; (b) dark-channel image; (c) defogged image

1) 选取初始滤波半径 r , 求图像 I 中每个像素点 RGB 三通道中的最小值, 得到最小值通道图

$$d_{\text{channel}}(x, y) = \min_{c \in \{r, g, b\}} [I^c(x, y)]. \quad (10)$$

2) 在最小值通道图基础上, 求取每个像素点在以半径 r 为邻域 Ω 内最小值与当前值之差, 得到差值图 d_{diff} :

$$d_{\text{diff}}(x, y) = |\min_{(x, y) \in \Omega(x, y)} [d_{\text{channel}}(x, y)] - d_{\text{channel}}(x, y)|. \quad (11)$$

3) 判断该差值是否小于阈值 K , 如果小于, 则认为邻域 Ω 内最小值点与当前点处在同一景深内, 其暗通道值可取最小值, 否则, 缩小邻域半径为 r 的 $1/2$, 重复步骤 2), 直到 r 小于 1。最终得到改进的

暗通道图 $d_{\text{dark}}(x, y)$ 为

$$d_{\text{dark}}(x, y) = \begin{cases} \min_{(x, y) \in \Omega(x, y)} [d_{\text{channel}}(x, y)], & d_{\text{diff}}(x, y) \leq K \\ r = \text{floor}(r/2), & d_{\text{diff}}(x, y) > K \end{cases} \quad (12)$$

图 5 为在不同参数下的改进暗通道图。通过观察可知: K 取值过小时, 滤波效果十分微弱; K 取值过大则会导致在边缘处出现伪边缘, 同时丢失细节信息。经过实验, 发现 K 取值为 35 时, 滤波效果良好, 且能有效保护边缘; 另一方面, 随着滤波半径 r 的增大, 滤波效果趋于相同, 而较大的 r 会使算法的时间复杂度上升, 因此 r 取值为 5 较为合适。

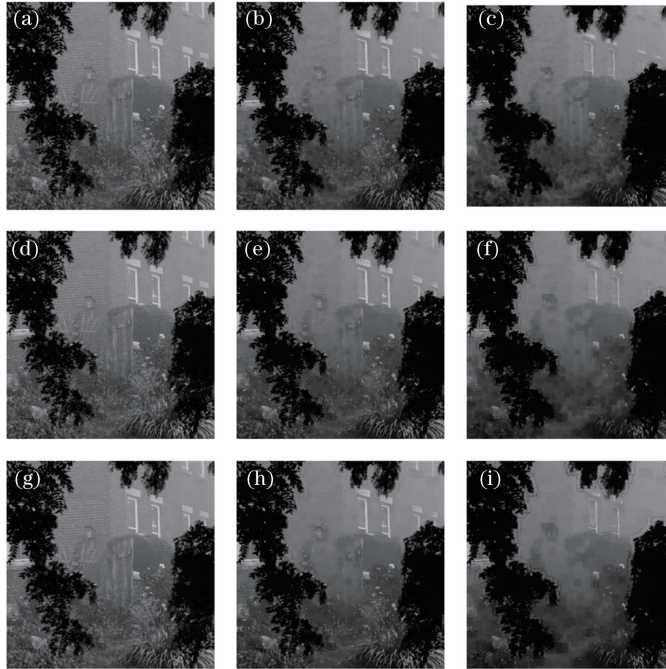


图 5 不同参数下的改进暗通道对比图。(a)~(c) $r=3$ 时, $K=15, 35, 65$ 的结果图; (d)~(f) $r=5$ 时, $K=15, 35, 65$ 的结果图; (g)~(i) $r=7$ 时, $K=15, 35, 65$ 的结果图

Fig. 5 Comparison of improved dark-channel images under different parameters. (a)-(c) Results obtained when $r=3$ and $K=15, 35, \text{ and } 65$, respectively; (d)-(f) results obtained when $r=5$ and $K=15, 35, \text{ and } 65$, respectively; (g)-(i) results obtained when $r=7$ and $K=15, 35, \text{ and } 65$, respectively

4.2 求解大气光学值

雾的存在会使整幅图像看起来呈灰白色,这主要是因为大气中颗粒物会将场景反射出来的各个波长的光均等散射,这种散射程度与场景深度呈正相关,场景深度越深,景物越模糊,其像素值也越大。所以通常情况下可以选取图像中最大的值作为大气光学值 A 的估计,但当图像中存在亮度高于 A 的物体时,该方法失效。针对这个问题, Kim 等^[15]提出一种基于二叉树搜索的大气光学估计方法,其主要步骤如下:

- 1) 输入有雾图像,将有雾图像转换成灰度图,将灰度图分为四个矩形区域;
- 2) 将每个区域的平均像素值减去该区域的标准差,得到该区域的得分 score;
- 3) 将 score 最高的区域划分为四个小区域;
- 4) 重复步骤 2)~3),直到最高 score 区域的大小小于预先设定的阈值;
- 5) 取该区域的最亮点。

但这种方法仍然无法避免光照、明亮或平滑物体的影响,于是,苏畅等^[16]将 KIM 方法步骤 1)中的灰度图替换成景深阶跃图。

$$I^{\text{depth}}(x) = l_{\text{light}}(x) - d_{\text{dark}}(x),$$

$$\text{其中} \begin{cases} l_{\text{light}}(x) = \max_{y \in \Omega(x)} \left(\max_{c \in (r, g, b)} \frac{I^c(y)}{A} \right) \\ d_{\text{dark}}(x) = \min_{y \in \Omega(x)} \left(\min_{c \in (r, g, b)} \frac{I^c(y)}{A} \right) \end{cases}, \quad (13)$$

式中: $I^{\text{depth}}(x)$ 表示有雾图像的景深阶跃图; $l_{\text{light}}(x)$ 、 $d_{\text{dark}}(x)$ 分别表示有雾图像的亮通道图像和暗通道图像。图 6 给出了两种算法估计出的 A 值所在区域。通过观察可知: Kim 算法采取右下方某一区域内的最大值作为 A 的估计,结果显然不正确;而苏畅算法将左上方某一区域内的最大值作为 A 的估计,恰好使 A 值落在天空区域,因而具有更好的稳健性。因此,本文将采用苏畅提出的算法求解大气光学值。

4.3 求解透射率分布

4.3.1 优化透射率

通过求解得出改进的暗通道和大气光学值 A 后,便可以依据(5)式和(12)式推导出透射率的粗略分布。

$$t = \max\left(1 - \frac{d_{\text{channel}}}{A}, 0\right). \quad (14)$$

根据先验知识,透射率 t 不可能为负数,所以在

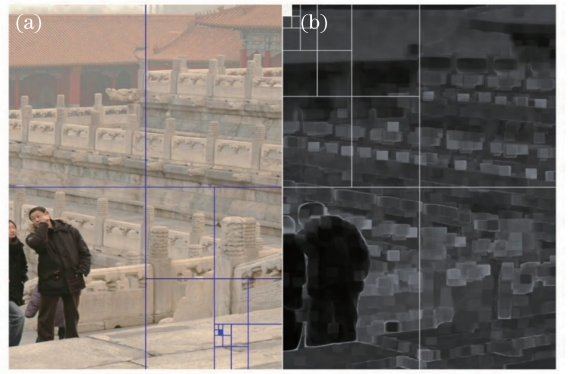


图 6 估计大气光。(a) Kim 算法;(b)苏畅算法

Fig. 6 Atmospheric light estimation.

(a) Kim's algorithm; (b) Su Chang's algorithm

(14)式中对透射率设置一个下限值 0。由此求解得出的透射率分布相对粗糙,易出现块状效应,且在边缘附近有伪轮廓出现。而根据(2)式,透射率反映图像的深度信息,在一个局部区域内透射率变化应趋于平缓,为使透射率分布更加合理,可利用本文 AEWMA 滤波算法对透射率进行平滑滤波,由前面 3.3 节讨论可知, σ 取值 0.025 较为适宜。

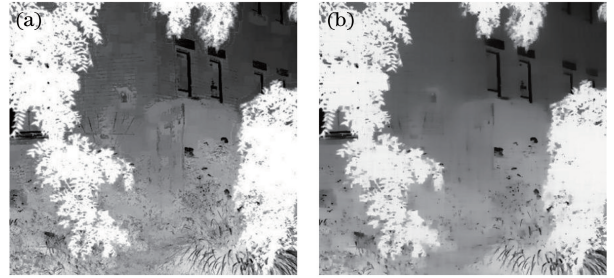


图 7 透射率分布图。(a)粗级透射率;(b)优化后透射率
Fig. 7 Images of transmittance distributions. (a) Coarse transmittance; (b) optimized transmittance

从图 7 可以看出,优化后的透射率分布消除了块状效应和伪边缘,局部区域内透射率变化趋于平缓,且边缘得到了很好的保护。

4.3.2 修正明亮区域透射率

以上述步骤处理得到的透射率分布求解去雾图像,往往会在图像的明亮区域内(包括天空区域以及白色区域)产生颜色失真,因为在无雾图像的明亮区域内,暗原色先验原理失效。此时,有雾图像明亮区域的暗通道值趋向于一个比较大的值,导致透射率估计值趋向 0,相对于实际值偏小很多。针对这个问题,本文引入一个变量 δ 来描述像素点隶属明亮区域的程度。

$$S = \frac{\min_{c \in (r, g, b)} I^c}{\max_{c \in (r, g, b)} I^c}, \quad (15)$$

$$D(x) = \frac{d_{\text{dark}}(x)}{A}, \quad (16)$$

$$\delta(x) = \min[(S \times D)^6, 1], \quad (17)$$

式中: S 表示像素点 RGB 三通道中最小值与最大值之比。一幅图像中,明亮区域内像素点 RGB 三个通道的值往往相差不大, S 较大,趋近 1,而在暗区域内, S 较小。另外,变量 D 可在一定程度上表示像素点与大气光点的相对距离,暗区域内,暗通道值趋近于 0, D 逼近 0;而在明亮区域内,暗通道值较大, D 接近 1。因此,综合考虑 S 和 D 后, δ 可以在一定程度上表示像素点隶属明亮区域的程度。基于此,可对透射率进行修正,即

$$t \sim = t + a\delta, \quad (18)$$

式中: t 表示(14)式中的透射率经 AEWMA 算法平滑后的透射率分布; $t \sim$ 表示对明亮区域进行修正后的透射率分布; a 表示修正系数,可以控制明亮区域的去雾程度。 a 取值过小时,明亮区域的透射率未得到有效增强,最终会导致颜色失真; a 取值过大时,明亮区域透射率将趋近于 1,不符合(2)式所描述的透射率随距离的增加而减小这个事实,最终使明亮区域去雾效果不佳。

4.4 图像复原

根据(6)式及以上讨论,可求解得到复原的无雾图像为

$$J(x) = \frac{I(x) - A}{t \sim (x)} + A. \quad (19)$$

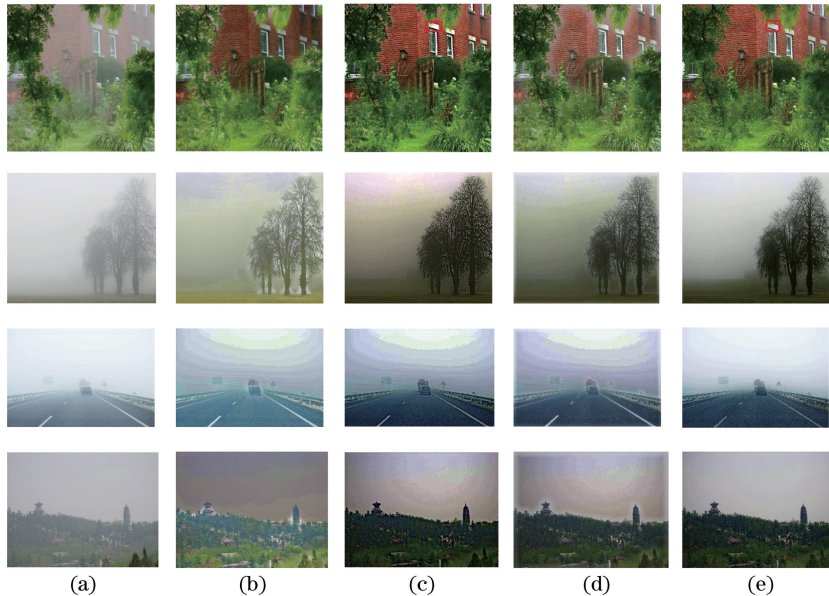


图 8 四组实验效果对比图。(a) 原始图像;(b) Tarel 算法;(c) 双边滤波算法;(d) 导向滤波算法;(e) 本文算法

Fig. 8 Comparison of results of four-group experiments. (a) Original image; (b) Tarel algorithm; (c) bilateral filtering algorithm; (d) guide filtering algorithm; (e) proposed algorithm

5 实验结果分析

运行算法的计算机配置为八核 1.80 GHz Intel Core(TM)i7-8550U 处理器、16G 内存,操作系统为 Windows10,使用 Matlab(R2018b)软件。选取的实验对象是不同场景下的 50 张图像,本文从中选取 4 幅具有代表性的图像,分别用 Tarel 算法^[17]、双边滤波算法^[6]、导向滤波算法^[5]和本文算法对其进行去雾,之后再从主观和客观这两个方面比较算法的性能。由 4.1 节讨论可知, K 取值 35, r 取值 5 时,阈值限制后的最小值滤波能够较好地保护边缘,同时由 3.3 节讨论可知, σ 取值 0.025 较为适宜。因此本文算法参数设置为 $\sigma=0.025, K=35, r=5$ 。 a 是一个需要调节的参数,针对不同场景的照片, a 取值略有差异。本文通过手动调节 a 值,使用不同 a 值对同一幅有雾图像进行去雾处理,观察其去雾效果,进行多组实验后,发现 a 取值在 0.3 到 0.6 之间较为合适。

图 8 四行图像中,第一行是没有天空区域的有雾近景图像,Tarel 算法和导向滤波算法均会在树叶边缘产生 Halo 效应,去雾不彻底,双边滤波算法虽然能很好地解决 Halo 效应,但在明亮区域(方框线内)会产生颜色失真。第二行到第四行都是具有天空区域的有雾图像,不过雾的浓度有所差异,从处理结果上看,Tarel 算法、双边滤波算法和导向滤波算法均会在天空区域产生颜色失真和光晕现象,

且在第三行图像中, Tarel 算法对近景物公路的去雾效果不佳。本文算法则对图 8 的四行图像均能达到良好的去雾效果, 不仅消除了 Halo 效应, 且在一定程度上避免了颜色失真和光晕现象, 具有更好的稳健性。此外, 本文也从时间复杂度上对三种去雾算法进行对比。根据表 2 所给出的数据, 可发现, 双边滤波算法耗时最长, 本文算法耗时最短, 本文算法在效率

上是导向滤波算法的 2 倍, 其原因是该去雾算法采用的滤波算法为本文 AEWMA 算法, 通过之前的分析, 可知该滤波算法具有很高的执行速度。

最后, 本文选取有效边缘强度、色彩还原能力、结构信息这三个无参考客观指标^[18], 对图 8 的第一行第一列图像和第二行第一列图像经不同去雾算法处理后的结果进行评价。

表 2 不同去雾算法耗时对比

Table 2 Comparison of time consumption of different defogging algorithms

Image size /pixel	Tarel algorithm	Bilateral filtering algorithm	Guide filtering algorithm	Proposed algorithm
440×440	1.3390	2.4920	0.4512	0.2010
600×400	1.5830	3.1510	0.5723	0.2480

表 3 去雾图像质量客观评价

Table 3 Objective evaluation of defogged image quality

Image	Defogging algorithm	Detail performance	Color performance	Structure information
The first row, the first column (Fig. 8)	Tarel algorithm	0.3693	0.5383	0.7327
	Bilateral filtering algorithm	0.3699	0.5546	0.7755
	Guide filtering algorithm	0.3402	0.5089	0.7903
	This paper's algorithm	0.3854	0.5564	0.7637
The second row, the first column (Fig. 8)	Tarel algorithm	0.2599	0.6699	0.8012
	Bilateral filtering algorithm	0.4843	0.5759	0.6634
	Guide filtering algorithm	0.4262	0.5506	0.7288
	This paper's algorithm	0.5250	0.8001	0.7873

三个无参考客观评价指标均值越大, 则性能越好。其中, 细节强度越大代表图像边缘对比度越高; 色调还原程度描述有雾图像和去雾图像的直方图相似程度; 结构信息则反映去雾图像的结构保持能力。从表 3 中给出的数据可以发现在无天空区域的近景图中, 三种去雾算法的整体性能相差不大, 而在有天空区域的图像中, 本文算法明显表现更好。综合以上主观评价和客观评价可知, 本文算法整体性能较高。

算法的 2 倍; 去雾后的图像具有良好的视觉效果, 在客观评价指标下综合性能较优, 能够更好地应用到实时去雾的系统中。然而, 本文算法仍有需要改进的部分, 如算法中针对明亮区域透射率的修正参数不能自适应选取, 有待下一步研究。

参 考 文 献

6 结 论

针对传统去雾算法计算开销较大、去雾不彻底、易在明亮区域产生颜色失真等问题, 提出一种基于自适应指数加权移动平均滤波的快速去雾算法。该算法通过对暗原色先验去雾算法中的暗通道加以阈值限制, 使求解得到的暗通道图能够良好地保持原图的边缘信息; 利用 AEWMA 算法的保边平滑特性对粗分布的透射率进行优化处理, 使透射率分布更加合理; 同时定义一个明亮区域的隶属度函数, 对该区域内的透射率进行修复, 避免颜色失真现象。通过主观评价和客观评价的结果表明: 本文去雾算法具有很快的执行速度, 时间效率是导向滤波去雾

[1] 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.

[2] Tan K, Oakley J P. Physics-based approach to color image enhancement in poor visibility conditions [J]. Journal of the Optical Society of America A, 2001, 18(10): 2460-2467.

[3] Fattal R. Single image dehazing [J]. ACM Transactions on Graphics, 2008, 27(3): 72.

[4] He K M, Sun J, Tang X O. Single image haze removal using dark channel prior [C] // 2009 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, June 20-25, 2009, Miami, FL, USA. New York: IEEE, 2009: 1956-1963.

[5] 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.
- [6] 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, 2011: 1245-1248.
- [7] Lu H J, Wang R G, Yang J, et al. An image haze removal algorithm using dark channel prior based on mean shift [J]. Journal of Hefei University of Technology(Natural Science), 2016, 39(9): 1205-1210.
陆海俊, 汪荣贵, 杨娟, 等. 基于均值漂移的暗原色先验图像去雾算法[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2016, 39(9): 1205-1210.
- [8] Li H Y, Yun L J, Gao Y. Fog image enhancement algorithm based on boundary-limited weighted least squares filtering [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(3): 0309002.
李红云, 云利军, 高银. 基于边界限制加权最小二乘法滤波的雾天图像增强算法[J]. 中国激光, 2019, 46(3): 0309002.
- [9] Narasimhan S G, Nayar S K. Removing weather effects from monochrome images[C]//Proceedings of the 2001 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. CVPR 2001, December 8-14, 2001, Kauai, HI, USA. New York: IEEE, 2001: 186-193.
- [10] McCartney E J. Optics of the atmosphere: scattering by molecules and particles [M]. New York: John Wiley and Sons, Inc., 1976: 23-32.
- [11] Tomasi C, Manduchi R. Bilateral filtering for gray and color images[C]//Sixth International Conference on Computer Vision (IEEE Cat. No. 98CH36271), January 7-7, 1998, Bombay, India. New York: IEEE, 1998: 839-846.
- [12] Perona P, Malik J. Scale-space and edge detection using anisotropic diffusion[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1990, 12(7): 629-639.
- [13] Buades A, Coll B, Morel J M. Neighborhood filters and PDE's[J]. Numerische Mathematik, 2006, 105(1): 1-34.
- [14] Farbman Z, Fattal R, Lischinski D, et al. Edge-preserving decompositions for multi-scale tone and detail manipulation [J]. ACM Transactions on Graphics, 2008, 27(3): 67.
- [15] Kim J H, Jang W D, Sim J Y, et al. Optimized contrast enhancement for real-time image and video dehazing[J]. Journal of Visual Communication and Image Representation, 2013, 24(3): 410-425.
- [16] Su C, Bi G L, Jin L X, et al. Dehazing algorithm based on dark-channel image centroid offset[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(5): 0533001.
苏畅, 毕国玲, 金龙旭, 等. 基于暗通道图像质心偏移量的去雾算法[J]. 光学学报, 2019, 39(5): 0533001.
- [17] Tarel J P, Hautiere N. Fast visibility restoration from a single color or gray level image[C]//2009 IEEE 12th International Conference on Computer Vision, September 29-October 2, 2009, Kyoto, Japan. New York: IEEE, 2009: 2201-2208.
- [18] Li D P, Yu J, Xiao C B. No-reference quality assessment method for defogged images[J]. Journal of Image and Graphics, 2011, 16(9): 1753-1757.
李大鹏, 禹晶, 肖创柏. 图像去雾的无参考客观质量评测方法[J]. 中国图象图形学报, 2011, 16(9): 1753-1757.