基于新的中值引导滤波的交通视频去雾算法

黄鹤^{1,2}, 宋京¹, 郭璐³, 王萍¹, 王会峰^{1,2}

1. 长安大学 电子与控制工程学院, 陕西 西安 710064;
2. 陕西省道路交通智能检测与装备工程技术研究中心, 陕西 西安 710064;
3. 西北工业大学 第 365 研究所, 陕西 西安 710065

摘 要:针对现有改进双边滤波算法处理雾霾天气下交通图像过程中边缘保持效果不理想且容易出现噪声斑块的问题,提出了一种基于新的中值引导滤波的去雾算法。首先,在快速引导滤波基础上改进,利用引导图像在滤波窗口的中值重新定义以像素 k 为中心的窗口系数 a_k 和 b_k ,并应用在对滤波框内临近像素点上,避免了对引导图像和滤波图像求方差和协方差,进一步提升计算速度。去雾阶段则将含雾图像转化到 RGB 颜色空间,获取暗通道值、大气光值以及粗透射率,利用中值引导滤波算法对粗透射率进行优化,得到透射率的精确值,根据模型方程反向求解获得去雾图像。实验结果证明,与传统方法相比,新算法去雾效果强化了对边缘的检测和保持能力,更好保持了图像细节。同时,运算效率较同类算法提升较大,实时性较高,可用于交通视频处理。

关 键 词:中值引导滤波;图像处理;透射率;去雾;视频

中图分类号:TP391.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-2758(2018)03-0414-06

雾霾天气下,图像采集设备受大气中悬浮的小水滴、灰尘对光线散射、折射等影响,使采集到的图像信息受到很大程度衰减,这限制了交通信息监控等国计民生行业的发展。含雾交通图像的对比度和颜色饱和度都比较低,图像灰白不清,导致单幅图像去雾时已知信息过少,处理难度增大。因而,图像去雾是一项非常具有挑战性的难题。

目前,国内外图像去雾的主流方法从原理上大致可分为 2 类:基于图像增强的去雾方法和基于物理模型的图像复原方法。前者的缺点是未考虑导致图像降质的因素,仅通过提升图像对比度实现去雾,并没有从本质上去除,效果并不理想^[1-2]。在基于物理模型的图像复原方法研究过程中,Oakley 等人建立了一个多参数统计退化模型^[3],考虑外界天气条件对成像的影响,利用统计模型估计参数,对灰度场景进行可见性复原。Tan 等人对统计退化模型进行了改进^[4],将其用于彩色雾天图像的可见性复原。这些方法都是建立在已知图像场景深度的基础

上,一般情况下含雾图像的详细深度信息都要依靠高精度测距设备才能获得,因此,实际应用有一定的局限性。Nayar 和 Narasimhan 等人通过获取图像的辅助信息,从多个角度研究了场景深度的获取方法,进而恢复出图像^[5]。这类方法在使用中要求提供多幅不同天气条件下的同一场景退化图像作为辅助信息,实际应用也受到局限。近年来,很多学者转向研究依托先验知识或者假设的单幅图像去雾方法^[6]。He 等人统计分析大量图像后,发现在不含有天空的清晰图像区域中,取局部区域像素 R, G, B 的最小值,该值总是趋向于 0,将其定义为暗通道^[7]。利用暗通道作为先验信息估计大气光和透射率,同时通过软抠图对获取的透射率粗估计滤波,得到精确透射率,再利用雾霾天气下成像模型来恢复出清晰图像。一般情况下,此方法得到的去雾效果较好,但暗通理论不适用图像中天空等明亮区域,且软抠图的计算量过大。后来,He 等人又提出了引导滤波算法^[8],对透射率图像进行滤波处理,相对于软抠

图和双边滤波,引导滤波的时效性有了较大提高,但仍有进一步的提升空间。

因此,本文在引导滤波算法的基础上改进,提出了一种基于新的中值引导滤波的去雾算法。该算法不仅保留传统引导滤波算法平滑图像和保持引导图像特征的优点,且较大的提升了运算效率,实时性得到保证,适用于视频处理。

1 雾天交通图像降质模型

雾霾天气下,空气中悬浮微粒会对光线造成散射和折射,使采集的图像模糊不清且含有较多噪声。在分析含雾图像时,要充分考虑空气介质对成像的影响,即入射光衰减和大气光成像过程,并建立模型,才能对雾天图像的降质原理进行分析。建立的降质模型如图 1 所示^[9],通过分析该模型可以得到雾霾颗粒对光线及成像的影响。

图 1 雾霾颗粒对成像影响示意图

$$L(x,y)=L_0(x,y)e^{-kd(x,y)}+L_s(1-e^{-kd(x,y)}) \quad (1)$$

公式(1)由入射光衰减模型和大气光成像模型组成,其中, $L(x,y)$ 是可见光镜头采集的雾天降质图像, $L_0(x,y)e^{-kd(x,y)}$ 为入射光衰减模型, $L_s(1-e^{-kd(x,y)})$ 为大气光成像模型。由于大气微粒的散射作用导致一部分入射光线无法到达镜头,造成入射光衰减。在入射光衰减模型中, $L_0(x,y)$ 表示该点的场景反射光强度,即固有未衰减时光的强度。 $d(x,y)$ 为场景深度,可见入射光衰减率与场景点到接收装置的距离有关。 k 为大气散射系数,其与波长 λ 和大气中微粒大小 γ 关系如公式(2)所示。

$$k(\lambda)\propto\frac{1}{\lambda^\gamma} \quad (2)$$

在大气光成像模型中, L_s 为环境光亮度, $e^{-kd(x,y)}$ 为透射率分布。通过模型分析可以看出导致雾霾天图像降质的原因是由于雾霾颗粒(1~10

μm)的尺寸远远大于纯空气微粒($10^{-4}\mu\text{m}$ 左右),使得此时公式(2)中相对于波长,决定大气散射系数的因子变成微粒的大小,此时可认为大气对不同颜色的可见光散射系数近似,即所有可见光等量散射,所以看到的雾霾为灰白色,雾霾天气下得到的图像也就变得灰白不清。此外,由于雾霾微粒影响光线散射,从入射光衰减模型 $L_0(x,y)e^{-kd(x,y)}$ 可以看出图像固有亮度受到景深影响呈指数衰减,导致雾天图像亮度降低,同时雾霾微粒对光线散射和折射也会产生较多噪点,导致获取图像质量较差。

2 引导滤波器

去雾中引导滤波器的工作流程是:将含雾的待处理图像作为引导图像,利用其边缘轮廓信息,将透射率的粗估计作为待滤波图像,得到精细化后的透射率。用数学公式表示引导滤波时,首先定义一个局部线性滤波器,像素点滤波结果可表示为

$$q_i=\sum_jW_{ij}(I)p_j \quad (3)$$

式中, I 为输入引导图像, P 为输入待滤波图像, P_j 为待滤波图像中的像素点, q 为输出的滤波图像, q_i 代表输出像素点, i,j 为像素索引, W_{ij} 是由引导图像和待滤波图像组成的滤波核函数。

假设滤波过程是局部范围内的线性变换。当前待滤波窗口中心像素为 k ,待滤波像素为 i ,窗口大小为 W_k ,局部线性窗口内滤波输出图像表示为

$$q_i=a_kI_i+b_k,\forall i\in\omega_k \quad (4)$$

式中, a_k 和 b_k 是以像素 k 为中心的窗口系数,对上式两边求梯度,可得

$$\nabla q=a\nabla I \quad (5)$$

公式(5)说明,输出图像 q 和输入图像 I 具有梯度相关性,这也是引导滤波保持边缘原因。为使输入图像和输出图像之间差异最小,即需求出 a_k 和 b_k 的一组最优解,等价值为下式的值最小,即:

$$E(a_k,b_k)=\sum_{i\in\omega_k}((a_kI_i+b_k-p_i)^2+\varepsilon a_k^2) \quad (6)$$

式中,调节系数 ε 用来预防系数 a 过大,也可以调节滤波效果。通过最小二乘法求出公式(6)的最优解为

$$a_k=\frac{\frac{1}{|\omega|}\sum_{i\in\omega_k}I_ip_i-\mu_k\bar{p}_k}{\sigma_k^2+\varepsilon} \quad (7)$$

$$b_k = \bar{p}_k - a_k \mu_k \quad (8)$$

在(7)式中, μ_k 代表引导图像 I 在局部窗口 w_k 内的像素平均值, σ_k^2 是引导图像 I 中在局部窗口 w_k 内的像素方差, $|w|$ 是局部窗口 w_k 中像素总个数。类似的, $\bar{p}_k$ 是待滤波图像 p 在与引导图像中位置对应的窗口内像素平均值。

3 中值引导滤波器的设计

由公式(4),(7),(8)可知,在计算系数 a_k 和 b_k 时,同一个像素会被多个窗口包含计算,则就会有多个系数。为解决这一问题,在具体计算某一点的系数时,用该点在这些不同窗口中的系数平均值作为该点系数,将原公式修订为

$$q_i = \frac{1}{|\omega|} \sum_{k|l \in \omega_k} (a_k I_i + b_k) \quad (9)$$

可简化为:

$$q_i = \bar{a}_i I_i + \bar{b}_i \quad (10)$$

系数 $\bar{a}_i$ 和系数 $\bar{b}_i$ 随窗口位置不断变换,即公式(5)中滤波输出图像和引导图像之间的梯度不再是单一成比例关系,而是变化的相关关系。类似的,定义中值引导滤波为

$$a_k = \frac{(I_k^m - p_k^m)^2}{\varepsilon + (I_k^m - p_k^m)^2} \quad (11)$$

$$b_k = p_k^m - a_k \cdot p_k^m \quad (12)$$

式中, I_k^m 为引导图像 I 在窗口 w_k 中的 Z 中值, p_k^m 为输入滤波图像 P 在窗口 w_k 中的中值, ε 为调整系数,此处取 $\varepsilon = 10^{-6}$ 。本文中窗口 w_k 的大小为 3×3 。

对比公式(7)和(8),新算法采用中值方法来构造系数 a_k 和 b_k ,在计算系数 a_k 和 b_k 时避免了文献[9]方法中需要对引导图像和滤波图像求方差和协方差,同时对滤波框内临近像素点采用同一 a_k 和 b_k ,减少了引导滤波器的计算量,提升了计算速度。

4 透射率的二次精确估计

透射率 $t(x)$ 与距离和雾的浓度有关,其大小表征了光线在大气中的穿透能力。透射率越大,表示较多光线能够穿过雾霾进入图像采集设备,即光线传输能力较强,光线受散射影响较小。透射率越低,则表示光线较难穿透雾霾进入图像采集设备,光线受散射影响较大,较少参与成像。

基于物理模型的图像去雾方程经过变形为:

$$\frac{I^c(x)}{A^c} = t(x) \frac{J^c(x)}{A^c} + (1 - t(x)) \quad (13)$$

式中, c 为 R, G, B 某一颜色通道, A^c 为大气光强,假设已经确定,为了便于计算,在估计透射率时,假设局部小范围的透射率是相同的,即为同一大小 $\tilde{t}(x)$, 对等式两边取最小值,可得

$$\min_c \left(\min_{y \in \Omega(x)} \left(\frac{I_c(y)}{A^c} \right) \right) = \tilde{t}(x) \min_c \left(\min_{y \in \Omega(x)} \left(\frac{J^c(y)}{A^c} \right) + (1 - \tilde{t}(x)) \right) \quad (14)$$

根据 He 等人统计不含雾霾图像的暗通道规则^[7],即:

$$J^{\text{dark}}(x) = \min_{y \in \Omega(x)} \left(\min_{c \in \{r, g, b\}} J^c(y) \right) \approx 0 \quad (15)$$

而大气光的值 A^c 相对大很多,即

$$\min_c \left(\min_{y \in \Omega(x)} \left(\frac{I_c(y)}{A^c} \right) \right) \rightarrow 0 \quad (16)$$

得到透射率为 $\tilde{t}(x)$

$$\tilde{t}(x) = 1 - \min_c \left(\min_{y \in \Omega(x)} \left(\frac{I_c(y)}{A^c} \right) \right) \quad (17)$$

可知, $\min_c \left(\min_{y \in \Omega(x)} \left(\frac{I_c(y)}{A^c} \right) \right)$ 可视为用大气光 A^c

对含雾图像归一化后的暗通道图像,透射率取值范围是 $[0, 1]$ 。实际经验可知,即使晴朗天气下,观察无穷远处的场景还是会有一些雾的感觉,这是由于相距较远,光线发生散射的可能性变大。因而,为了使透射率估计公式更加贴近实际,需要添加一个系数 ω ,保留一定雾感,(17)式被改写为

$$\tilde{t}(x) = 1 - \omega \min_c \left(\min_{y \in \Omega(x)} \left(\frac{I_c(y)}{A^c} \right) \right) \quad (18)$$

这里根据经验取 $\omega = 0.8$ 。

公式(18)完成了对透射率的粗估计。但此时估计值还不够精确,容易出现“halo”效应。利用中值引导滤波对透射率的粗估计进行精细化处理,得到透射率的精确估计,从而得到去雾图像:

$$J(x, y) = \frac{I(x, y) - A}{t_d(x)} + A \quad (19)$$

式中, $I(x, y)$ 为输入含雾图像中的某点像素, A 为大气光值, $J(x, y)$ 为去雾后该像素点的值, t_d 为中值引导滤波处理后的精准透射率。有些像素所对应透射率 $t(x)$ 很小,几乎趋近于 0,其衰减项 $J(x)t(x)$ 也趋于 0。在这种情况下,若依然根据(19)式直接

计算,在透射率过小时,图像中的噪声信息将会被过度增强,且图像局部区域对比度会下降,图像偏白,因而对透射率设下限 t_0 。最终复原的雾化图像 J_1 为

$$J_1(x,y)=\frac{I(x,y)-A}{\max(t_-d,t_0)}+A \tag{20}$$

根据经验取 $t_0=0.1$ 。

5 实验结果

实验采用 GPU 硬件平台——NVIDIA GeForce

GTX650M,由于目前并无标准雾天视频库,需采集相关含雾交通图像视频。将采集的每帧像素为 $1\,200\times1\,000$ 的一段含雾视频分别采用双边滤波去雾算法、梯度双边滤波去雾算法及引导滤波去雾算法及本文算法进行处理,第1 068,2 016,3 012,4 096关键帧实验结果如图2中所示。同时,表1中引入了模糊系数 K 、平均梯度、信息熵等客观参数,来对不同算法的去雾效果进行客观评价。

图2 去雾结果对比

结合图 1 和表 1~表 2 分析实验结果可以看出,经过双边滤波去雾算法得到的复原图像与原图像相比,虽然有一定的去雾效果,但模糊系数较小即图像清晰度较低,细节不够明显,去雾效果差且算法耗时较高。与双边滤波相比,梯度双边滤波去雾结果在模糊系数和平均梯度等方面均有一定提升,但算法耗时最高,难以应用于实际交通视频去雾处理中。

引导滤波效果与双边滤波和梯度双边滤波相近,处理时间有较大幅度的缩短,但仍然有提升空间。而本文算法得到复原图像与原图像相比模糊系数最大,清晰度最高,图像平均梯度、信息熵及细节强度较高,处理时间与前几种算法相比有较大幅度缩短,实时性最高。

表 1 去雾图像参数评价

图片	参数			
	去雾算法	模糊系数 K	平均梯度	信息熵
第 1 068 帧	原始图像	—	0.401 2	9.533 9
	双边滤波	5.719 5	1.440 5	12.110 4
	梯度双边滤波	7.582 3	1.697 8	12.025 2
	引导滤波	12.973 5	2.408 9	13.304 9
	中值引导滤波	14.902 1	2.660 0	13.493 3
第 2 016 帧	原始图像	—	0.432 0	9.946 6
	双边滤波	5.211 1	1.406 0	11.943 7
	梯度双边滤波	6.833 7	1.657 8	12.425 3
	引导滤波	11.125 0	2.307 7	13.656 9
	中值引导滤波	12.942 1	2.561 8	13.860 0
第 3 012 帧	原始图像	—	0.353 1	9.821 3
	双边滤波	6.506 6	1.334 3	11.770 1
	梯度双边滤波	8.611 2	1.592 3	12.270 2
	引导滤波	14.505 4	2.232 1	13.667 4
	中值引导滤波	16.820 4	2.479 3	13.844 7
第 4 096 帧	原始图像	—	0.380 3	9.559 1
	双边滤波	6.752 2	1.515 4	11.699 4
	梯度双边滤波	9.376 2	1.841 6	12.289 6
	引导滤波	16.269 2	2.718 2	14.262 9
	中值引导滤波	17.914 2	2.925 2	14.432 6

表 2 GPU 平台下去雾算法耗时比较

算法	双边滤波	梯度双边	引导滤波	中值引导
耗时/ms	431	678	77	39

6 结 论

现有传统图像去雾算法虽然能取得一定的去雾

效果,但是处理时间较长,在交通监控视频处理等应用场合难以满足要求。本文提出了一种新的中值引导滤波去雾算法,对雾霾天气下交通视频的去雾效果略优于同类文献的几种算法,同时较大提升了运算效率,实时性得到保证,可处理交通视频。

参考文献:

[1] Tan R T. Visibility in Bad Weather from a Single Image[C]//IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2008:1-8

[2] Kim J Y, Kim L S, Hwang S H. An Advanced Contrast Enhancement Using Partially Overlapped Sub-Block Histogram Equalization[J]. IEEE Trans on Circuits and Systems for Video Technology, 2001, 11(4): 475-484

[3] Oakley J P, Satherley B L. Improving Image Quality in Poor Visibility Conditions Using a Physical Model for Contrast Degrada-

tion[J]. IEEE Trans on Image Processing, 1998;7(2):167-179

[4] Tan K K, Oakley J. Enhancement of Color Images in Poor Visibility Conditions[C]//IEEE International Conference on Image Processing, 2000: 788-791

[5] Narasimhan S G, Nayar S K. Vision and the Atmosphere[J]. International Journal of Computer Vision, 2002, 48(3):233-254

[6] 孙玉宝, 肖亮, 韦志辉,等. 基于偏微分方程的户外图像去雾方法[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(16):3739-3744
Sun Yubao, Xiao Liang, Wei Zhihui, et al. Method of Defogging Image of Outdoor Scenes Based on PDE[J]. Journal of System Simulation, 2007, 19(16): 3739-3744 (in Chinese)

[7] He K, Sun J, Tang X. Single Image Haze Removal Using Dark Channel Prior[J]. IEEE Trans on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 2011, 33(12):2341

[8] He K, Sun J, Tang X. Guided Image Filtering[C]//European Conference on Computer Vision, Berlin, Heidelberg, 2010: 1-14

[9] 黄鹤,宋京,王会峰,等. 雾霾天气下基于二次滤波的交通图像去雾算法[J]. 科学技术与工程,2016,30(16): 274-277
Huang He, Song Jing, Wang Huifeng, et al. The Traffic Image Defogging Algorithm Based on Twice Filter in Haze Weather[J]. Science Technology and Engineering, 2016,30(16): 274-277 (in Chinese)

A Novel Dehazing Algorithm Based on Median Guide Filter for Traffic Video

Huang He^{1,2}, Song Jing¹, Guo Lu³, Wang Ping¹, Wang Huifeng^{1,2}

(1.School of Electronic and Control Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China;
2.Shaanxi Road Traffic Intelligent Detection and Equipment Engineering Technology Research Center, Xi'an 710064, China;
3.The 365th Institute of Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710065, China)

Abstract: Aiming at the problem that the edge preserving effect of the existing improved bilateral filtering algorithm in the process of dealing with the haze weather traffic images is not ideal, and the algorithm is time consuming and computationally inefficient, which is unacceptable in the traffic video defogging. Thus, this paper proposed a new algorithm based on median guide filter for this target. In the full paper, we explain in some detail about median guide filter; in this abstract, we just add some pertinent remarks to listing the title of each section of this paper. The six sections of this paper are: introduction(section 0), traffic image degradation model in fog and haze weather(section 1), guide filter(section 2), the design of median guide filter(section 3), Optimization of transmittance estimation (section 4), experimental result(section 5), conclusion(section 6). In section 2, we introduce the basic principle of guide filter . In section 3, we propose median guide filter and the formulas of algorithm are deduced and point out the deficiency of the traditional algorithm. In section 4, we introduce a simple method to optimize transmittance estimation. In section 5, In order to verify the effect of defog, we perform a simulation on MATLAB ,the analyze of simulation results, indicates that our median guide filter algorithm can not only guarantee the effectiveness of defog, but also ensure the efficiency of calculation.

Keywords: computer simulation; median guide filter; image processing; transmittance; defogging; video; design of experiments; computational efficiency; pixels