文章编号 2095-1531(2019)06-1311-10

多尺度窗口的自适应透射率修复交通图像去雾方法

黄 鹤[1,2],李昕芮[1*],宋 京[1],王会峰[1,2],茹 锋[1],盛广峰[1]
(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研究中心,陕西 西安 710064)

摘要:基于传统暗原色先验原理的图像去雾算法存在的“halo”效应,且图像中明亮区域存在颜色失真现象,针对此问题,本文提出了多尺度窗口的自适应透射率修复交通图像去雾方法。首先,利用新的 8 方向边缘检测算子求取图像中景深突变区域,根据暗通道先验理论和前一步求得的景深突变区域,在景深变化较大区域使用 5×5 的窗口,景深变化较小区域则使用 15×15 的窗口得到暗原色估计图。同时,针对暗通道先验原理对近景部分存在白色区域时透射率估计不准确的问题,引入了自适应透射率修复方法,通过引导滤波器得到边缘增强后的暗原色图像,并利用其与原暗原色图像的纹理差对近景区域的透射率进行修正,完成图像去雾。实验结果表明:双边滤波和梯度双边滤波两种算法均存在 halo 现象,并且在包含白色物体的明亮区域色彩失真严重,客观评价指标失去意义;相比于引导滤波,本文去雾算法的各项指标均有所提高,其中平均梯度平均提高了 8.305%,PSNR 平均提高了 12.455%,边缘强度因子平均提高了 7.77%。本文算法有效解决了复原图像中“halo”效应现象和明亮区域颜色失真现象,去雾效果最优。

关 键 词:暗通道理论;去雾;交通图像;边缘检测算法
中图分类号:TP391.41 **文献标识码**:A doi:10.3788/CO.20191206.1311

收稿日期:2018-12-17;**修订日期**:2019-02-07
基金项目:国家重点研发计划项目(No. 2018YFB1600600);“十三五”装备预研领域基金(No. 61403120105);陕西省自然科学基础研究计划面上项目(No. 2019JM-611),陕西省创新人才推进计划-青年科技新星项目(No. 2019KJXX-028);陕西省交通运输厅科技项目(No. 17-33T,No. 17-16K);长安大学中央高校基本科研业务费专项资金项目(No. 300102328204,No. 300102329401,No. 300102329502)
Supported by National Key Research and Development Program of China(No. 2018YFB1600600); “13th Five-Year” Equipment Pre-research Fund(No. 61403120105); Natural Science Basic Research Plan in Shaanxi Province(No. 2019JM-611); Shaanxi Province Innovative Talent Promotion Plan-Youth Science and Technology New Star Project(No. 2019KJXX-028); Science and Technology Projects of Shaanxi Transportation Department(No. 17-33T, No. 17-16K); the Fundamental Research Funds for the Central Universities in Chang′an University (No. 300102328204, No. 300102329401, No. 300102329502)

A traffic image dehaze method based on adaptive transmittance estimation with multi-scale window

HUANG He[1,2], LI Xin-rui[1*], SONG Jing[1], WANG Hui-feng[1,2], RU Feng[1], SHENG Guang-feng[1]

(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*
* *Corresponding author, E-mail*: 1076359350@*qq.com*

Abstract: Aiming at the halo effect and the color distortion of bright areas when using traditional dark priori image defogging algorithms, we propose a traffic image dehaze method based on adaptive transmittance estimation with multi-scale window in this paper. Firstly, a new 8-direction edge detection operator is used to detect abrupt changes in field depth in images. According to the dark channel prior theory and the abrupt change of field depth obtained in the previous step, a 5×5 window is used in the larger area of field depth transformation and a 15×15 window is used in the smaller area to obtain a dark primary color estimation image. At the same time, targetting the problem of inaccurate estimation of transmittance when there is a white area in the close-range region due to the dark channel priori principle, we introduce an adaptive transmittance restoration method. An edge-enhanced dark image is obtained by using a guide filter, and the texture difference between the edge-enhanced dark image and the original dark primary image is used to correct the transmittance in the close-range region, and then to complete image dehazing. The experimental results show that the halo phenomenon exists in both the bilateral filter and the gradient bilateral filter, and the color distortion is serious in the bright area containing white objects, causing the objective evaluation index to be meaningless. Compared with the guide filter, the indexes of the dehazing algorithm used in this paper show improvement, wherein the average gradient increased by 8.305%, the PSNR increased by 12.455% and the edge strength factor increased by 7.77%. The algorithm can effectively solve issues arising from the halo effect and color distortion in bright areas in restored images while providing a more effective dehazing effect.

Key words: dark channel; image dehazing; traffic image; edge detection algorithm

1 引 言

雾霾天气下,受大气中悬浮微粒对光线散射折射作用的影响,获取的图像信息有一定衰减,严重影响了交通监控设备的可靠性[1-2]。因此,对于图像去雾算法的研究是一项非常有意义且具有挑战性的工作。

目前,主流的图像去雾方法是基于物理模型的图像复原算法[3]。其中,Oakley 和 Tan[4] 提出的方法都是建立在已知图像场景深度的基础上,含雾图像的详细深度信息都要依靠高精度测距设备获得,因此应用环境受到限制。Nayar 和 Narasimhan 等人利用同一场景在不同天气下拍摄的图像来作为辅助信息获得复原图像[5],具有局限性。近年来,很多学者提出了依托先验知识或者单幅图像的去雾方法[6]。其中,He 提出了暗原色先验理论,并结合软抠图算法,成功复原出清晰图像[7],但仍有不足:(1)由于图像中湖面、白色物体等明亮区域不满足暗原色先验条件,得到的大气光可能会存在误差,透射率偏小,复原图像中相应区域存在明显的光晕效应,即"halo"效应,导致目标和场景色彩失真;(2)使用软抠图算法修复透射图,时间复杂度和空间复杂度大幅提高,实

时性较差。此后,诸多学者在此基础上提出了一些改进的去雾算法,如黄大荣等人[8]在求取暗原色图时将每个“块区域”的 RGB 3 个通道最小值替换为每个像素点 3 个通道的最小值,去除了最小值滤波,能有效消除光晕效应、降低时间复杂度,但复原图像清晰度较低。石文轩等人通过插值抠图法[9]对透射率进行优化,但计算稀疏矩阵导致运算量大大增加,比较耗时。此外,还有学者提出基于双阈值的明亮区域识别方法和透射率修正机制,然而明亮区域的判定条件需要人为设定参数,对于不同的图像鲁棒性较差。

针对上述问题,本文对暗原色先验去雾方法进行改进,提出了一种基于多尺度窗口的透射率自适应的图像去雾算法。该算法可以保证计算时间和复原图像的质量,较好地解决了暗原色先验原理在明亮区域失效的问题,适用于处理各类不同场景的雾化图像。

2　雾霾天气下图像降质模型

建立雾天图像降质模型,如图 1 所示[10],包括:(1)由大气微粒对散射和吸收作用导致的衰减的场景目标反射光;(2)由悬浮微粒散射作用而参与成像的环境光。分析该模型可知雾霾颗粒对光线的作用以及对成像的影响。含雾图像的模型如下所示:

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

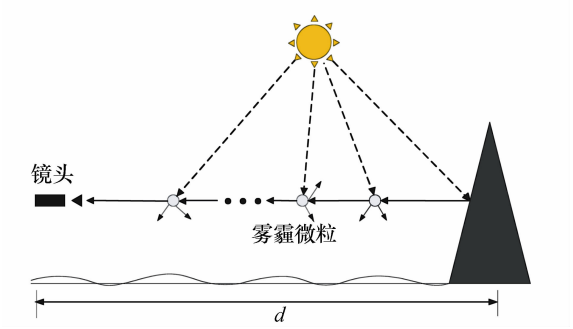


图 1　雾霾颗粒对成像影响示意图

Fig. 1　Schematic diagram of effects of haze particles on imaging

公式(1)包含入射光衰减模型和大气光成像模型,其中,可见光镜头采集得到的图像为 $L(x,y)$,即雾天降质图像,$L_0(x,y)e^{-kd(x,y)}$ 为入射光衰减模型,L_s 为环境光亮度,$e^{-kd(x,y)}$ 为透射分步率,$L_s(1-e^{-kd(x,y)})$ 为大气光成像模型。

大气微粒的散射致使一部分入射光不能到达镜头,造成了入射光衰减,$L_0(x,y)$ 代表该点的场景反射光强度,入射光衰减率与场景点到接受装置的距离有关,式中 $d(x,y)$ 表示场景深度,k 为大气散射系数,其与波长 λ 及大气中微粒大小 γ 关系如公式(2)所示:

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

分析模型可知图像降质原因如下:由于雾霾颗粒尺寸(1 ~ 10 μm)远大于纯空气中的微粒尺寸(10^{-4} μm 左右),而公式(2)中的大气散射系数又由微粒大小决定,又由于大气与不同颜色可见光的散射系数近似,导致可见光等量散射使雾霾呈灰白色,含雾图像也变得灰白不清。此外,由于雾霾微粒对光线散射影响较大,从入射光衰减模型 $L_0(x,y)e^{-kd(x,y)}$ 可知,固有亮度受景深影响成指数衰减,导致图像亮度降低,同时雾霾微粒的散射和折射还会造成成像离焦模糊,故图像质量较差。

3　含雾图像的复原

雾天图像成像物理模型如下所示:

$$I(x) = J(x)t(x) + A[x - t(x)], \tag{3}$$

式中,$I(x)$ 表示含雾图像,$J(x)$ 表示场景反射光强度,$t(x)$ 为透射率,$J(x)t(x)$ 表示入射光衰减,$A(1-t(x))$ 表示大气光成像。其中 $t(x)$ 与 A 均是未知项,故该方程求解是病态的,需给出先验条件才可求解。

雾天图像复原即由雾化的降质图像反演得到清晰图像,式(3)经过变形可得到:

$$\frac{I^c(x)}{A^c} = t(x)\frac{J^c(x)}{A^c} + (1 - t(x)), \tag{4}$$

其中,c 为{R,G,B}某一颜色通道,根据暗通道先验理论,估计透射率时,假设图像中局部区域的透射率是相同的,即在区域 Ω 内透射率 $\tilde{t}(x)$ 取值

相同,对等式两边取最小值,可得

$$\min_c\left[\min_{y\in\Omega(x)}\left(\frac{I_c(y)}{A^c}\right)\right]=\tilde{t}(x)\min_c\left\{\min_{y\in\Omega(x)}\left(\frac{J^c(x)}{A^c}\right]+[1-\tilde{t}(x)]\right\}. \tag{5}$$

根据不含雾图像的暗原色统计规律可知[7],即:

$$J^{\text{dark}}(x)=\min_{y\in\Omega(x)}\left[\min_{c\in\{r,g,b\}}J^c(y)\right]\approx 0, \tag{6}$$

而大气光的值 A^c 相对大很多,即

$$\min_c\left[\min_{y\in\Omega(x)}\left(\frac{I_c(y)}{A^c}\right)\right]\to 0, \tag{7}$$

得到透射率 $\tilde{t}(x)$ 为

$$\tilde{t}(x)=1-\min_c\left[\left(\min_{y\in\Omega(x)}\left(\frac{I_c(y)}{A^c}\right)\right)\right]. \tag{8}$$

$\min_c\left[\left(\min_{y\in\Omega(x)}\left(\frac{I_c(y)}{A^c}\right)\right)\right]$ 可视为大气光 A^c 对含雾图像归一化后的暗通道图像,透射率取值为[0,1]。由实际情况可知,即使在晴空下观察无穷远处的场景仍然会觉得有雾存在,这是由于距离远,光线发生散射、折射。添加控制去雾程度系数 w 可使透射率估计公式与实际相符,即:

$$\tilde{t}(x)=1-w\min_c\left[\left(\min_{y\in\Omega(x)}\left(\frac{I_c(y)}{A^c}\right)\right)\right], \tag{9}$$

根据经验取 $w=0.8$。

公式(9)仅完成了对透射率的粗估计,此时估计值存在块状效应,不够精确,需进行精细化处理,得到透射率的精确估计值:

$$J(x,y)=\frac{I(x,y)-A}{t\_d(x)}+A, \tag{10}$$

式中,$I(x,y)$ 为含雾图像像素点,A 为大气光值,$J(x,y)$ 为去雾后的像素点,t_d 为精准透射率。图像中某些像素对应的透射率 $t(x)$ 非常小,几乎为零,其衰减项 $J(x)t(x)$ 也趋于零。这种情况下,若仍根据式(10)直接计算,透射率过小时,噪声信息将会被过度增强,且图像局部区域对比度会下降,导致图像偏白,故设透射率下限为 t_0,得到最终复原图像为

$$J_1(x,y)=\frac{I(x,y)-A}{\max(t\_d,t_0)}+A, \tag{11}$$

根据经验取 $t_0=0.1$。

4 多尺度自适应暗原色估计

4.1 传统暗原色估计

利用公式(9)进行透射率粗估计计算,图像斑块比较明显,即出现 halo 效应,复原图像目标和场景出现色彩失真,如图 2 所示,图 2(b)天空与树木相交的边缘区域透射率(景深)变化大时产生光晕,导致失真。

(a) 原始含雾图像 (a) Original foggy image

(b) 去雾后图像 (b) Image after defogging

图 2 传统暗原色估计去雾前后图像

Fig. 2 Images before and after defogging by traditional dark priori image defogging algorithm

4.2 8 方向边缘检测算子

传统图像边缘检测算子采用的模板大都为两方向,其只能检测特定方向的边缘,当图像纹理较复杂时,边缘检测效果欠佳[11-13],因此本文设计了一种新的 8 方向边缘检测算子,以获取含雾图像的边缘。

建立极坐标系,定义极轴方向为 0 方向,逆时针旋转 45°为 1 方向,逆时针旋转 90°为 2 方向,逆时针旋转 135°为 3 方向,逆时针旋转 180°为 4 方向,逆时针旋转 225°为 5 方向,逆时针旋转 270°为 6 方向,逆时针旋转 315°为 7 方向。8 方向边缘算子图如图 3 所示。

针对图 2(a)进行边缘检测,比较 Roberts 算子、Sobel 算子、Prewitt 算子和本文边缘检测算子得到的含雾图像边缘,如图 4 所示。

实验结果表明,相对于传统算子,8 方向边缘检测算子能够提取更多的含雾图像边缘细节,获得比较细的图像边缘信息,区分度更好,边缘定位更准。

$$\begin{bmatrix}-1&-4&-1\\0&0&0\\1&4&1\end{bmatrix}\quad\begin{bmatrix}-4&-1&0\\-1&0&1\\0&1&4\end{bmatrix}\quad\begin{bmatrix}-1&0&1\\-4&0&4\\-1&0&1\end{bmatrix}$$

(a) 0 方向 (a) 0 direction　(b) 1 方向 (b) 1 direction　(c) 2 方向 (c) 2 direction

$$\begin{bmatrix}0&1&4\\-1&0&1\\-4&-1&0\end{bmatrix}\quad\begin{bmatrix}1&4&1\\0&0&0\\-1&-4&-1\end{bmatrix}\quad\begin{bmatrix}4&1&0\\1&0&-1\\0&-1&-4\end{bmatrix}$$

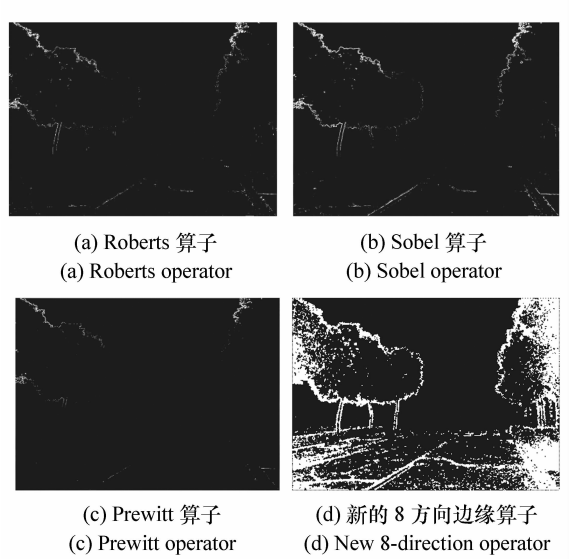
(d) 3 方向 (d) 3 direction　(e) 4 方向 (e) 4 direction　(f) 5 方向 (f) 5 direction

$$\begin{bmatrix}1&0&-1\\4&0&-4\\1&0&-1\end{bmatrix}\quad\begin{bmatrix}0&-1&-4\\1&0&-1\\4&1&0\end{bmatrix}$$

(g) 6 方向 (g) 6 direction　(h) 7 方向 (h) 7 direction

图 3　新的 8 方向边缘检测算子图

Fig. 3　Diagram of new 8-direction edge detection operator



(a) Roberts 算子 (a) Roberts operator　(b) Sobel 算子 (b) Sobel operator

(c) Prewitt 算子 (c) Prewitt operator　(d) 新的 8 方向边缘算子 (d) New 8-direction operator

图 4　4 种边缘算子的检测结果

Fig. 4　Detection results of 4 kinds of edge operators

4.3　基于多尺度窗口的自适应暗原色估计

若采用 15 ×15 固定模板求取暗通道时,当局部块区域内透射率值差异较大时,会形成明显斑块,导致复原图像中的目标和场景色彩失真。若采用 5 ×5 的固定模板求取暗通道时,因其模板小使得窗口时间复杂度更高,实时性较差。针对这一问题,本文提出了一种新的多尺度窗口,可以提高透射率估计的准确性,同时减少计算量。首先用 8 方向算子检测含雾图像的边缘细节,根据所在区域是否为景深突变区域来判断采用较大还是较小的窗口,然后对景深突变较大的区域采用较小的窗口计算其暗原色,对变换较小的区域采用较大的窗口计算其暗原色。本文根据大量的实验测试结果,取较小窗口为 5 ×5,较大窗口为 15 ×15。

本文提出的基于多尺度窗口的自适应暗原色估计算法能够克服暗原色图在透射率突变区域的 halo 现象,且实时性较好,综合效果优于单独使用 5 ×5 模板或 15 ×15 模板的暗原色估计算法。

(a) 边缘检测图像 (a) Edge detection image　(b) 去雾后图像 (b) Image after defogging

图 5　基于多尺度窗口的自适应暗原色估计算法的实验结果

Fig. 5　Experimental results of adaptive dark estimation algorithm with multi-scale window

从图 5(b)可以看出,基于多尺度窗口的自适应暗原色估计算法能够有效消除 halo 效应,去雾效果优于传统暗原色估计方法。从表 1 可知,该算法相对于插值抠图算法[9],效率提升了 35 倍。

表 1　两种算法的时间复杂度

Tab. 1　Consuming times of two kinds of algorithms

算法名称	时间(s)
插值抠图算法	10.732
多尺度算法	0.304

5　自适应透射率修复的图像去雾算法

5.1　明亮区域算法的不适用性分析

经过大量实验发现,在某些特殊情况下,基于暗通道先验去雾算法失效,主要表现为颜色过饱和或者某个颜色通道溢出[14-18]。通过统计观察可以发现失真区域常常包含一些明亮的近景区

域,这些区域的透射率估计有一定偏差。基于暗原色先验去雾算法在这些区域失效,无论如何调整参数(滤波窗口大小等),得到的去雾图像失真均较为严重。根据透射率的估计方法将方程(9)变形为:

$$\tilde{t}(x) = \frac{1 - \min_{c}\left[\min_{y\in\Omega(x)}\left(\frac{I^{c}(y)}{A^{c}}\right)\right]}{1 - \min_{c}\left[\min_{y\in\Omega(x)}\left(\frac{J^{c}(y)}{A^{c}}\right)\right]}. \quad (12)$$

由于这些区域的像素值较高,$\min_{c}\left[\min_{y\in\Omega(x)}\left(\frac{J^{c}(y)}{A^{c}}\right)\right]$不趋近于零,分母小于1,因此透射率的实际值要大于根据暗通道先验估计得到的数值。特别是当图像近景中存在较大的白色物体时,物体上的像素很有可能被选作整幅图像的光强,这时白色物体附近由于没有暗通道存在,滤波后 $I^{c}(y)$ 的值将与 A^{c} 非常接近,如果仍然采用式(9)计算,那么得到的透射率估计值将接近于零,显然结果偏离实际,从而导致去雾图像失真。

5.2 自适应透射率修复的图像去雾算法

图像去雾算法的关键是估计透射率。估计方法通常是将归一化后的暗通道图像作为景深信息,将其进一步处理后用作透射率。但是如果近景场景中包含白色物体等明亮区域时,使用上述方法对这些区域进行透射率估计,则会发生偏差,从而导致复原图像失真。

为此,本文提出了自适应透射率修复的图像去雾算法,即构造一个大气耗散函数,其能够自适应估计和修改透射率,从而有效解决了暗原色先验原理在图像明亮区域失效的问题,扩大了暗原色先验原理的适用范围,可以处理不同场景的雾化图像。

首先,定义大气耗散函数:

$$V = A[1 - t(x)], \quad (13)$$

对上式变形可得到透射率为:

$$t(x) = 1 - \frac{V}{A}. \quad (14)$$

由暗通道先验原理可知,暗原色图像中含有雾的浓度信息,即雾浓度较大的图像区域,所对应的暗原色图较亮;而雾的浓度与光线耗散程度相关,故可以认为暗原色图像中的明暗亮度与大气耗散程度相关。分别以含雾图像 I 的灰度图和暗原色图 J^{dark} 作为引导图像及待滤波图像,理论上就可以得到边缘增强后的暗原色图像 V':

$$V' = \mathrm{guide}(\mathrm{ragb2gray}(I), J^{\mathrm{dark}}). \quad (15)$$

假设原始图像近景区域较明亮,则其在暗原色图中得到的像素点也较明亮,相应地具有较大的散射函数值,因此会误以为该近景是有浓雾且景深较大的远景区域。因此要对式(15)进行修正,定义:

$$\Delta c = |V' - \mathrm{dark}|, \quad (16)$$

其中,Δc 代表原暗原色图 J^{dark} 与边缘增强后的暗原色图像 V' 相差的纹理信息。由于近景区域纹理信息明显,所以相应的 Δc 值较大。定义修正后的大气散射函数为:

$$V'' = V'(1 - \omega * \Delta c). \quad (17)$$

由公式(17)可以看出,修正后的大气散射函数对近景区域的散射函数值进行了一定程度的削弱,得到的散射函数值更为准确,更加符合实际情况。故可以通过公式(14)自适应估计和修改透射率。

6 本文算法流程

本文算法流程如图6所示。

多尺度窗口的自适应透射率修复交通图像去雾方法的具体步骤如下:首先,利用8方向边缘检测算子检测输入含雾图像边缘;根据检测的边缘信息,判断图像中的景深突变区域。对景深突变区域使用5×5的窗口进行暗原色估计,对非景深突变区域使用15×15的窗口进行暗原色估计;其次,使用引导滤波器,将含雾图像 I 的灰度图作为引导图像;将暗原色图 J^{dark} 作为待滤波图像,根据公式(15)得到边缘增强的暗原色图像 V';利用式(16)、式(17)对得到的 V' 进行修正,得到修正后的大气散射函数 V'';最后,将修正后的大气散射函数 V'' 及大气光值 A 带入公式(14)中,得到透射率 $t(x)$,并将其带入公式(11)得到最终去雾图像。

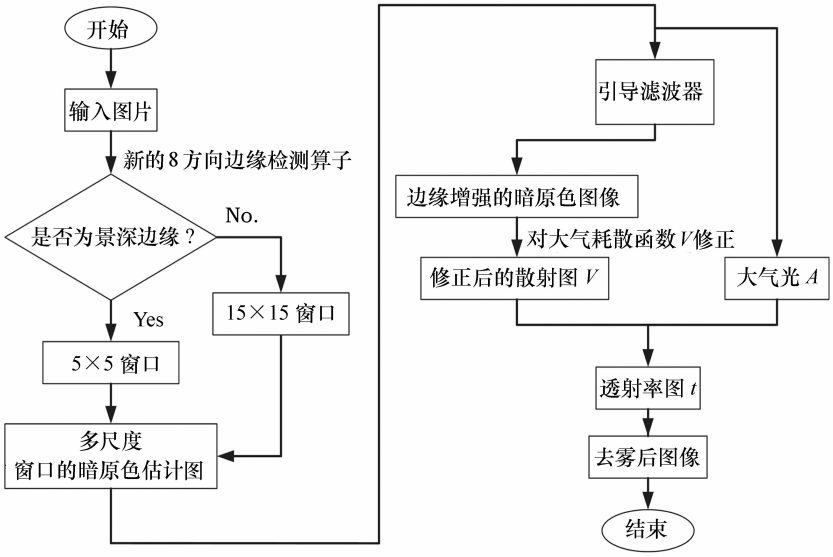


图 6　本文算法流程图

Fig. 6　Flowchart of proposed algorithm

7　实验结果与分析

实验硬件采用 GPU 硬件平台—NVIDIA GeForce GTX1080TI,对含雾图像依次采用双边滤波算法、梯度双边滤波算法及引导滤波去雾算法及本文算法进行去雾处理,实验结果如图 7(彩图见期刊电子版)和图 8(彩图见期刊电子版)所示。

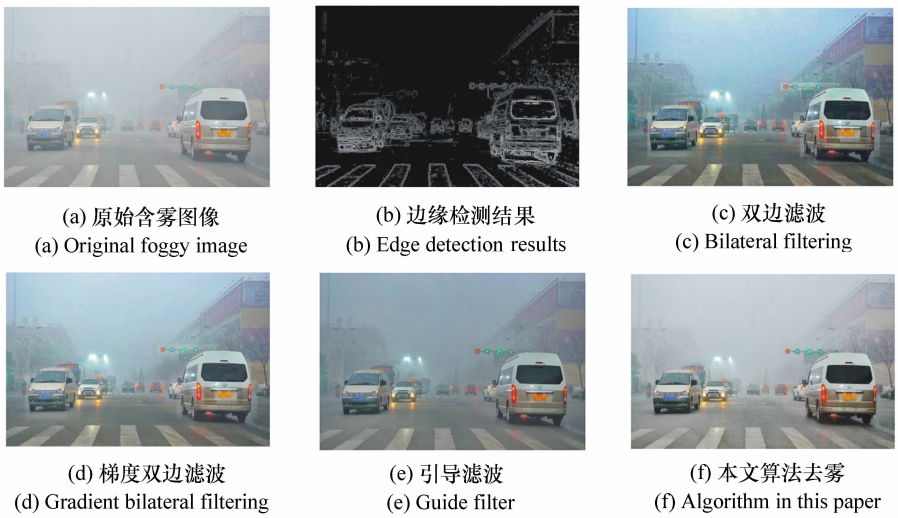


图 7　4 种方法对第一组图像处理结果

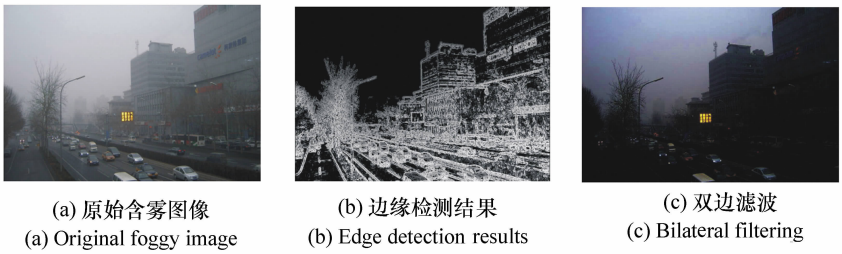
Fig. 7　Defogging results of the first set of image by 4 kinds of algorithms

引入了客观评价指标(平均梯度、信息熵、边缘强度因子、PSNR、模糊系数)对去雾效果进行客观评价(表 2 和表 3)。

从主观上来看,图 7(c)和 7(d)虽对含雾图像有一定的复原效果,但在明亮区域处发生了较为严重的色彩失真;相比之下,图 7(e)和7(f)在明亮区域则没有发生色彩失真,且图 7(f)色彩更为明亮,去雾效果更好。从图 8 实验结果中也可

以得到上述结论，相较于双边滤波去雾、梯度双边滤波去雾、引导滤波去雾，本文算法的去雾效果最好。

从表 2 和表 3 的客观评价指标来看，本文算法优于引导滤波算法，虽然在一些指标上，双边滤波算法和梯度双边滤波算法优于本文算法，这可能是由于图 7 和图 8 中包含白色物体的明亮区域色彩失真严重，导致双边滤波算法和梯度双边滤波算法的客观评价指标失效。综上所述，本文算法能够较好地解决 halo 效应，而且在景深边缘处提取了更多的边缘细节，去雾效果最优。



(a) 原始含雾图像 (a) Original foggy image

(b) 边缘检测结果 (b) Edge detection results

(c) 双边滤波 (c) Bilateral filtering

(d) 梯度双边滤波 (d) Gradient bilateral filtering

(e) 引导滤波 (e) Guide filter

(f) 本文算法去雾 (f) Proposed algorithm

图 8 4 种方法对第二组图像的处理结果

Fig. 8 Defogging effects of the second set of image by 4 kinds of algorithms

表 2 第一组实验结果的定量评价结果

Tab. 2 Evaluation indexes of the first set of experimental results

算法	图片	平均梯度	信息熵	边缘强度因子	PSNR	模糊系数
双边滤波	图 7(c)	5.474	13.780	54.224	26.006	1.594
梯度双边滤波	图 7(d)	4.584	13.014	45.395	26.511	1.359
引导滤波	图 7(e)	3.818	12.013	37.704	24.274	1.181
本文算法	图 7(f)	4.251	12.858	42.553	29.151	1.225

表 3 第二组实验结果的定量评价结果

Tab. 3 Evaluation indexes of the second set of experimental results

算法	图片	平均梯度	信息熵	边缘强度因子	PSNR	模糊系数
双边滤波	图 8(c)	2.592	10.272	24.779	24.126	1.155
梯度双边滤波	图 8(d)	3.913	12.355	38.262	24.415	1.587
引导滤波	图 8(e)	3.717	12.083	36.390	24.378	1.524
本文算法	图 8(f)	3.913	12.719	37.364	25.554	1.554

8 结 论

本文设计了基于多尺度窗口和透射率自适应修复的图像去雾算法，有效消除了 halo 效应，同时解决了暗原色原理在近景区域存在白色物体时失效的问题，扩大了暗原色先验原理的适用范围，使其能够处理不同场景的雾化图像。实验结果表明，本文去雾算法的各项指标均优于引导滤波去雾算法，其中平均梯度平均提高了 8.305%，PSNR

平均提高了 12.455%,边缘强度因子平均提高了 7.77%,且可以克服双边滤波和梯度双边滤波算法的 halo 效应以及明亮区域色彩失真严重的问题,应用价值明显。

参考文献:

[1] SINGH D,KUMAR V. Single image haze removal using integrated dark and bright channel prior[J]. *Modern Physics Letters B*,2018,32(4):1850051.

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

[3] ZHANG Z,FENG W,WANG T,*et al*.. An improved aerial remote sensing image defogging method based on dark channel prior information[C]. International Archives of the Photogrammetry,Remote Sensing and Spatial Information Sciences,ISPRS,2017.

[4] TAN K,OAKLEY J P. Enhancement of color images in poor visibility conditions[C]. Proceedings 2000 International Conference on Image Processing,IEEE,2000:788-791.

[5] NARASIMHAN S G,NAYAR S K. Contrast restoration of weather degraded images[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*,2003,25(6):720-724.

[6] LI Z G,ZHENG J H,YAO W,*et al*.. Single image haze removal via a simplified dark channel[C]. 2015 IEEE International Conference on Acoustics,Speech and Signal Processing,IEEE,2015.

[7] 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,2009:1956-1963.

[8] 黄大荣,方周,赵玲.一种改进的结合边缘检测的去雾新方法[J].上海交通大学学报,2015,49(6):861-867.
HUANG D R,FANG ZH,ZHAO L. An improved defogging algorithm combined with edge detection[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*,2015,49(6):861-867. (in Chinese)

[9] 石文轩,詹诗萦,李婕.一种边缘优化的暗通道去雾算法[J].计算机应用研究,2013,30(12):3854-3856, 3862.
SHI W X,ZHAN SH Y,LI J. Dark channel prior dehazing algorithm based on edge optimization[J]. *Application Research of Computers*,2013,30(12):3854-3856, 3862. (in Chinese)

[10] 杨红,崔艳.基于开运算暗通道和优化边界约束的图像去雾算法[J].光子学报,2018,47(6):238-244.
YANG H,CUI Y. Image defogging algorithm based on opening dark channel and improved boundary constraint[J]. *Acta Photonica Sinica*,2018,47(6):238-244. (in Chinese)

[11] VERMA O P,PARIHAR A S. An optimal fuzzy system for edge detection in color images using bacterial foraging algorithm[J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*,2017,25(1):114-127.

[12] SIDOR K, SZLACHTA A. The impact of the implementation of edge detection methods on the accuracy of automatic voltage reading[J]. *Measurement Science Review*,2017,17(2):93-99.

[13] LIU Y,CHENG M M,HU X W,*et al*.. Richer convolutional features for edge detection[C]. 2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition,IEEE,2017.

[14] 汪贵平,宋京,杜晶晶,等.基于改进梯度相似度核的交通图像去雾算法[J].中国公路学报,2018,31(6):264-271,280.
WANG G P,SONG J,DU J J,*et al*.. Haze defogging algorithm for traffic images based on improved gradient similarity kernel[J]. *China Journal of Highway and Transport*,2018,31(6):264-271,280. (in Chinese)

[15] 黄鹤,宋京,郭璐,等.基于新的中值引导滤波的交通视频去雾算法[J].西北工业大学学报,2018,36(3):414-419.
HUANG H,SONG J,GUO L,*et al*.. A novel dehazing algorithm based on median guide filter for traffic video[J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*,2018,36(3):414-419. (in Chinese)

[16] 邓莉.针对明亮区域的自适应全局暗原色先验去雾[J].光学 精密工程,2016,24(4):892-901.
DENG L. Adaptive image dehazing for bright areas based on global dark channel prior[J]. *Opt. Precision Eng.*,2016,24(4):892-901. (in Chinese)

[17] 徐伟,陈彦彤,朴永杰,等.基于吉林一号遥感图像的星载目标快速识别系统[J].光学 精密工程,2017,25(1):255-262.

XU W, CHEN Y T, PIAO Y J, *et al*.. Target fast matching recognition of on-board system based on Jilin-1 satellite image [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(1): 255-262. (in Chinese)

[18] 李佳童, 章毓晋. 图像去雾算法的改进和主客观性能评价[J]. 光学 精密工程, 2017, 25(3): 735-741.
LI J T, ZHANG Y J. Improvements of image haze removal algorithm and its subjective and objective performance evaluation[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(3): 735-741. (in Chinese)

作者简介:

黄 鹤(1979—),男,河南南阳人,副教授,2002 年、2006 年、2010 年于西北工业大学分别获得学士、硕士和博士学位,2010-2012 年在西北工业大学自动化学院从事博士后工作,专业为控制科学与工程,现为长安大学电子与控制与工程学院教师, E-mail: 8793141 @ qq.com

李昕芮(1993—),女,甘肃庆阳人,硕士研究生,2017 年于南京工程学院获得学士学位,主要从事图像处理、机器视觉方面的研究。E-mail: 1076359350@ qq.com