

# 基于边界限制加权最小二乘法滤波的 雾天图像增强算法

李红云<sup>1</sup>, 云利军<sup>2\*</sup>, 高银<sup>3</sup>

<sup>1</sup>泉州理工学院, 福建 晋江 362200;

<sup>2</sup>云南师范大学信息学院, 云南 昆明 650500;

<sup>3</sup>中国科学院泉州装备制造研究所, 福建 晋江 362200

**摘要** 针对经典的暗通道理论算法在处理雾天图像时天空区域出现光晕和亮度损失的问题, 提出了一种基于边界限制加权最小二乘法滤波的雾天图像增强算法。该方法根据雾天图像的直方图特性, 分割出天空区域, 并求解出了全局大气背景光; 根据辐射立方体法则推导出边界限制条件, 得到了初始的透射率, 运用加权最小二乘法滤波方法和容差机制, 对透射率进行了平滑处理; 利用暗通道理论的模型, 求取了增强后的图像。研究表明, 在去雾效果和图像的可视度方面, 所提算法优于现有的暗通道算法。

**关键词** 图像处理; 图像增强; 边界限制; 加权最小二乘法滤波; 天空区域分割; 暗通道理论

中图分类号 TP391

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0309002

## Fog Image Enhancement Algorithm Based on Boundary-Limited Weighted Least Squares Filtering

Li Hongyun<sup>1</sup>, Yun Lijun<sup>2\*</sup>, Gao Yin<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Quanzhou Institute of Technology, Jinjiang, Fujian 362200, China;

<sup>2</sup>College of Information, Yunnan Normal University, Kunming, Yunnan 650500, China;

<sup>3</sup>Quanzhou Institute of Equipment Manufacturing, Chinese Academy of Sciences, Jinjiang, Fujian 362200, China

**Abstract** Aiming at the problems of image hue and brightness distortion in sky regions when dealing with fog images by the classic dark channel theory algorithm, we propose a fog image enhancement algorithm based on the boundary constraint weighted least squares filtering. According to the histogram property of fog image, we reduce the boundary condition and obtain the initial transmittance. The transmission is smoothed by weighted least squares filtering method and tolerance mechanism. The enhanced image is obtained by using the model of dark channel theory. The research results show that the proposed algorithm is better than the existing dark channel algorithm in terms of dehazing effect and image visibility.

**Key words** image processing; image enhancement; boundary constraint; weighted least squares filtering; sky region segmentation; dark channel theory

**OCIS codes** 100.2000; 100.2980; 100.3008; 100.3020

## 1 引 言

空气中的水汽达到一定限度, 就会形成雾。随着科技的不断进步, 智能交通、室外监控及遥感等技术得到了较大的发展, 但工业的不断崛起, 造成了较严重的环境污染, 尤其是近些年雾霭天气的天数不

断增加, 给人们的出行、社会安全的监控和国家的发展带来了较大的隐患和威胁<sup>[1-2]</sup>。雾天视频图像的退化主要是因为图像中局部重要信息被遮挡, 蕴含的许多特征信息被覆盖或模糊化, 致使图像的对比度和颜色发生较大的改变, 从而影响了算法对物体的识别和判断。

收稿日期: 2018-09-27; 修回日期: 2018-11-26; 录用日期: 2018-12-12

基金项目: 云南省应用基础研究计划重点项目(2018FA033); 智能制造工程中心校级课题

\* E-mail: yunlj@163.com

目前,处理雾天图像的方法主要集中于两个基本理论模型:Retinex 理论<sup>[3-5]</sup>和暗通道理论<sup>[6-8]</sup>。Retinex 理论俗称视网膜双皮层理论,该理论基于色彩恒常性,即人眼对物体色彩的感知取决于物体表面反射光的特征,与入射光无关。到目前为止,由该理论发展出三个比较主流的算法:单尺度 Retinex (SSR)算法<sup>[3]</sup>、多尺度 Retinex(MSR)算法<sup>[4]</sup>和多尺度 Retinex 彩色恢复(MSRCR)算法<sup>[5]</sup>。这三种算法中,MSRCR 算法采用了颜色补偿,增强效果较好,但未保持色调恒定,依然会出现色彩失真或过曝光现象。虽然经过了很多人改进修正,但其实时性和复杂度依然是较难逾越的鸿沟。

大气散射模型由 Narasimha 等<sup>[6]</sup>结合场景深度及大气条件信息提出,但该方法缺少局部的修正,使得去雾的图像缺少真实感。暗通道模型由大气散射模型演化而来,由于该模型的求解存在不适定问题,很多学者的复原方法存在较大区别,效果也存在差异。Fatta<sup>[9]</sup>从景物的反射率入手,利用独立成分分析复原图像,但该方法是基于输入图像的统计性质,对于不同天气情况下的图像,其效果不佳。He 等<sup>[8]</sup>借助先验概率的理论,对该模型进行了简化,提出了一种新的暗通道先验去雾的方法,但是缺少对图像中不存在暗原色区域的部分的判断,使得复原的图像颜色失真,视觉受到影响。之后很多学者对此模型不断进行改进,取得了不错的效果。Yu 等<sup>[10]</sup>采用加权最小二乘法进行模型优化,却忽略了先验信息;Lu 等<sup>[11]</sup>简化了模型,运用联合三边滤波算法优化了透射率图像;Saggu 等<sup>[12]</sup>采用混合自适应直方图方法复原了图像;Gao 等<sup>[13]</sup>提出了全变差去雾模型,但忽略了全局大气背景光值的求解准确度。以上的各种理论方法均是对暗通道理论的修正,且对于特定的雾天环境取得了较好的效果,但是均存在某种程度的复杂度高、实时性低、天空区域的光晕效应和色彩失真等问题。

从计算机视觉角度出发,根据雾天图像的特征和辐射立方体法则,针对经典的暗通道理论算法处理中暗通道图像的“阶梯”效应和处理后的雾天图像中出现的光晕和过曝光问题,本文提出一种基于边界限制加权最小二乘法滤波的雾天图像增强算法。

## 2 暗通道先验理论

在计算机视觉和计算图形领域,雾天图像的形成被描述成数学模型<sup>[7-8]</sup>,即

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

式中: $I(x)$ 表示被观察或相机接收到的图像, $J(x)$ 表示去雾后的图像, $t(x)$ 表示介质的透射率, $A$ 表示天空区域的亮度值, $J(x)t(x)$ 为直接衰减项,描述了反射光在介质中因散射等作用而衰减的程度; $A[1 - t(x)]$ 为大气光成分,大气散射使得场景的颜色发生偏移。

暗通道理论认为,在无数的无雾图像的某些局部区域中,总存在趋近于 0 的像素点,即

$$J^{\text{dark}}(x) = \min_{c \in \{r, g, b\}} \{ \min_{y \in \Omega(x)} [I^c(y)] \}, \quad (2)$$

式中: $I^c$ 为图像的某一个通道; $\Omega(x)$ 为图像中以像素  $x$  为几何中心的某一区域; $J^{\text{dark}}(x)$ 为图像在  $\Omega(x)$  区域中的暗原色像素,如果是无雾的图像, $J^{\text{dark}}$ 会趋于 0。

对于有雾的图像,其初步估计的透射率为

$$t_1(x) = 1 - \omega \min_{c \in \{r, g, b\}} \{ \min_{y \in \Omega(x)} [I^c(y)] \}, \quad (3)$$

式中: $t_1(x)$ 为以  $x$  为中心邻域的透射率图像;实际应用中,为了满足景深的要求,会引入一个系数  $\omega$ ,其值为  $[0, 1]$ ,当  $\omega$  趋近于 1 时,说明不保留雾,一般情况, $\omega$  取 0.95,适当地保留雾的影响,使图像有深度感。为了提高透射率图像的估计精度,He 等<sup>[7]</sup>采用导向滤波方法,进行保边平滑处理。细化后的透射率图像为

$$t_2(x) = \text{gfilter}[I_g(x), t_1(x)], \quad (4)$$

式中: $I_g(x)$ 为输入彩色图像的  $g$  通道图像, $t_2(x)$ 为导向滤波  $\text{gfilter}(\cdot)$  处理后的结果。

在一幅图像中,最亮的像素点值更接近于大气光亮值, $A$  取暗通道图像中亮度最大的前 0.1% 的像素的均值。通过估计细化大气光  $A$  和透射率  $t_2(x)$ ,得到的无雾图像为

$$J(x) = \frac{I(x) - A}{\max[t_2(x), t_0]} + A, \quad (5)$$

式中: $t_0 = 0.1$ 。

## 3 基于加权最小二乘法滤波的雾天图像增强算法

传统的基于暗通道理论的方法在处理图像中有颜色陡变或亮度变化较大的区域时,一般采用与文献<sup>[8]</sup>类似的方法,处理的图像中天空区域边缘会出现明显的色彩失真和光晕现象。通过大量的实验分析发现,处理过程中暗通道图像的获取和优化方法虽然使得透射率图像得到了一定的平滑,但是暗通道图像的边缘却损失较大,这在一定程度上造成了光晕现象。为了能有效地解决该问题,在经典的暗通道理论的基础上,本研究提出一种基于边界限

制加权最小二乘法滤波的雾天图像增强算法。首先,通过辐射立方体法则,获得有效的边缘损失较少的暗通道图像;其次,通过修正的最小二乘法滤波方

法,对暗通道图像进行保边平滑处理;最后根据简化的暗通道理论模型,获取增强后的无雾图像。算法流程图如图 1 所示。

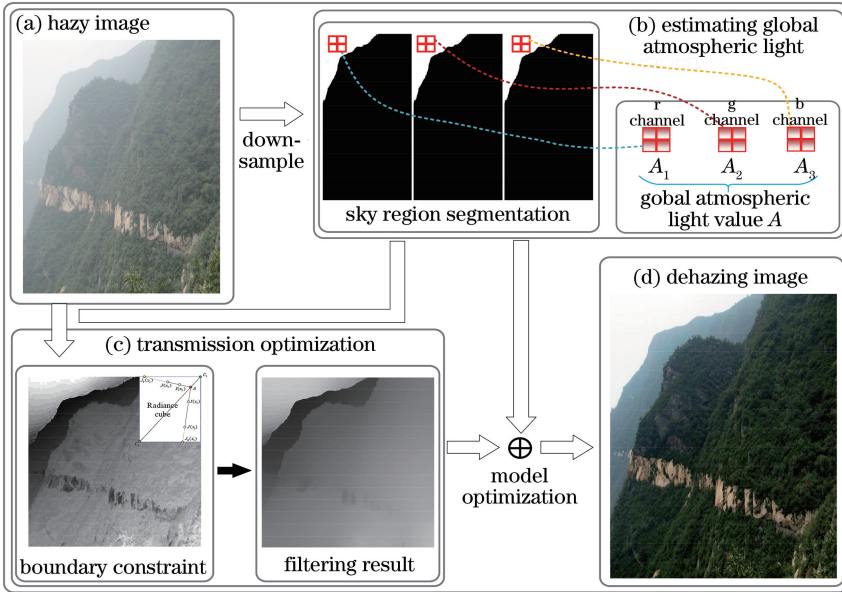


图 1 算法的流程图

Fig. 1 Flow chart of algorithm

### 3.1 全局大气背景光的求取

为了能获取全局大气背景光的有效值,减少去雾后图像的局部过曝光或光晕现象,本研究提出一种基于直方图分析的局部寻优阈值分割方法。在传统的暗通道理论算法中,全局大气背景光被设置为无穷远处的天空亮度值,造成该值无法被精确地求解。目前,很多学者将该值设定为暗通道图像像素从大到小排序的前 5% 的像素的平均值,但是这样的人为设定存在着很多不确定性。图像中高反光的物体区域被加入到全局大气背景光的计算中,这在很大程度上影响着最终的去雾结果,进而会造成局部过曝光或光晕现象的产生。因此,通过有效的分割方法,分离天空区域,求取全局大气背景光的有效值,就能有效地解决这些问题,达到最优的视觉效果。

由于这种预先假设的求取方法的不确定性,如果要获得比较好的去雾效果,就需要从雾天图像的特征分析入手,才能获得有效的全局大气背景光值。雾天图像中天空区域的特征主要包括梯度小,像素趋于图像中最大亮度附近且相对集中在某一范围等。根据雾天图像中天空区域的这些特性,结合图像直方图的特性,构建一种能有效获取全局大气背景光有效值的方法。定义雾天图像每个通道的天空区域范围的下限分割阈值  $a_c$ 。首先通过高斯滤波获取平滑后的单通道图像  $f_c(x)$ ;其次运用二分法

对该通道图像的直方图进行求解,获得局部的最小值。对应表达式为

$$\begin{cases} f_c(x) = h_c(x) * g(x)_{h,\sigma} \\ a_c = \operatorname{argmax}_{\tilde{x} \in [0, m_{h_c}]} \{ \tilde{x} \mid \operatorname{Lm}[f_c(\tilde{x})] \} \end{cases}, \quad (6)$$

式中:  $g(x)_{h,\sigma}$  为高斯滤波的核函数模板,  $h$  和  $\sigma$  分别为高斯卷积核的尺寸和标准差;  $*$  表示卷积操作;为了增加求取局部最小值的精度和速度,实验中设定从直方图的倒数第一个最高波峰开始寻找,即  $m_{h_c} = \max\{h_c(x)\}$ ,  $h_c(x)$  表示对应通道的图像;  $\operatorname{Lm}(\cdot)$  表示运用二分法求解局部最小值的函数;  $\tilde{x}$  为利用二分法求取的一系列局部最小值,  $\tilde{x} \in [0, m_{h_c}]$ ;  $a_c$  为雾天图像每个通道天空区域范围的下限阈值,全局大气背景光的有效值正是在该范围内。根据不同的高斯核和标准差给出分割的每个通道的结果。如图 1 所示,所提方法在分割获取图像天空区域方面具有较好的稳健性。

为了更加有效地获得全局大气背景光的有效值,将其定义为

$$A_c = f_{\Lambda}(a_c), \quad (7)$$

式中:  $f_{\Lambda}$  为全局大气背景光的求取函数,  $[a_c, \max(I_c)]$  在该区间中的平均值就是所要求取的有效值  $A_c$ , 图 1 中  $A_1, A_2, A_3$  分别代表图像三个通道求取的全局大气背景光的值。

### 3.2 边界限制加权最小二乘法滤波优化

在暗通道理论中,采用最小值滤波的方法获取暗通道图像,但通过该方法获取的暗通道图像,随着滤波窗口的增加,会出现越来越严重的“阶梯”效应。为了减少该效应,一般采用软抠图算法<sup>[8]</sup>或导向滤波方法<sup>[7]</sup>等对其进行平滑优化。当图像中有亮度变化较大的区域时,处理后在该区域边缘会出现明显的色彩失真和光晕现象。针对该问题,进行了大量的实验分析。结果发现,产生这些问题的主要原因是暗通道图像有“阶梯”效应,之后虽然采用平滑处理消除了“阶梯”效应,但平滑度有限,透射率图像的边缘损失较大。为了解决透射率优化过程中出现的边缘损失问题,及颜色失真和光晕现象,本研究提出一种边界限制加权最小二乘法滤波的优化方法。

边界限制方法是通过辐射立方体准则推导而来,目的是通过条件限制把原图像约束到某一范围,从而得到等效的暗通道图像<sup>[14]</sup>。该方法简化了对暗通道图像求解的复杂度,在一定程度上可以初步避免暗通道图像中的“阶梯”效应。根据(1)式可知:

$$\frac{1}{t(x)} = \frac{\text{sqrt}\left\{\sum_{x \in \Omega(x)} [J(x) - A]^2\right\}}{\text{sqrt}\left\{\sum_{x \in \Omega(x)} [I(x) - A]^2\right\}}. \quad (8)$$

考虑到输入图像的场景散射的限制,如图2所示,将场景的图像边界设置为

$$C_0 \leq J(x) \leq C_1, \quad (9)$$

式中: $C_0$ 和 $C_1$ 分别为场景图像的上下边界。

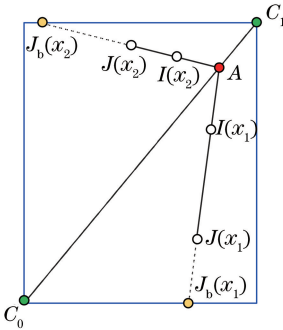


图2 散射立方

Fig. 2 Scattering cube

由图2可知,根据(8)式和(9)式,可以初步得到透射率图像的限制边界条件:

$$0 \leq t_b(x) \leq t(x) \leq 1, \quad (10)$$

式中: $t_b(x)$ 为透射率图像的下边界,也是对输入的雾天图像的一种边界限制的约束方法。根据(8)式,其具体的求解式为

$$t_b(x) = \min \left\{ \max_{c \in \{r, g, b\}} \left[ \frac{A_c - I_c(x)}{A_c - C_0^c(x)}, \frac{A_c - I_c(x)}{A_c - C_1^c(x)} \right] \right\}. \quad (11)$$

经过边界限制的处理,可得到初步去除“阶梯”效应的等效暗通道图像,但是这种等效的暗通道图像的“阶梯”效应仍然明显,且该图像的边缘也出现了模糊。如果将(11)式直接代入(17)式,求取复原后的图像,在其亮度变化较大的部分会出现光晕现象。目前还没有对于光晕现象处理得较好的方法。本研究通过加权最小二乘法滤波的方法,对透射率图像的边缘进行增强,对其余部分进行平滑处理,可以有效地避免光晕现象的出现。加权最小二乘法滤波方法通过滤波处理,使处理后的图像在保持边缘的基础上尽可能地与原图相似<sup>[15]</sup>。加权最小二乘法滤波的数学表达式为

$$\sum_p \left\{ (u_p - g_p)^2 + \lambda \left[ a_{x,p}(g) \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)_p^2 + a_{y,p}(g) \left( \frac{\partial u}{\partial y} \right)_p^2 \right] \right\}, \quad (12)$$

式中: $u$ 代表滤波处理后的图像; $g$ 代表输入图像, $g = t_b(x)$ ; $p$ 表示该位置的像素; $a_{x,p}$ 和 $a_{y,p}$ 为平滑的权重; $(u_p - g_p)^2$ 为数据项, $a_{x,p}(g) \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)_p^2 + a_{y,p}(g) \left( \frac{\partial u}{\partial y} \right)_p^2$ 为正则项, $\lambda$ 为平衡这两项的参数。

为了用矩阵计算,本研究把滤波前后的图像作矩阵等效,滤波前设定为 $q$ ,滤波后为 $v$ , (12)式可以改写为

$$(v - q)^T (v - q) + \lambda (v^T D_x^T A_x D_x v + v^T D_y^T A_y D_y v), \quad (13)$$

式中: $A_x$ 和 $A_y$ 为平滑项 $a_{x,p}$ 和 $a_{y,p}$ 的对角阵, $D_x$ 和 $D_y$ 为前后向差分矩阵。把输入图像 $I$ 的矩阵表示形式设定为 $R$ ,当(13)式获得最小值时, $v$ 满足:

$$(R + \lambda L_g) v = q, \quad (14)$$

式中: $L_g = D_x^T A_x D_x + D_y^T A_y D_y$ ;  $a_{x,p}(g) = \left[ \left| \frac{\partial I}{\partial x}(p) \right|^\alpha + \epsilon \right]^{-1}$ ,  $a_{y,p}(g) = \left[ \left| \frac{\partial I}{\partial y}(p) \right|^\alpha + \epsilon \right]^{-1}$ ,  $I$ 为输入图像 $g$ 的亮度通道图像的对数, $\alpha$ 是一个放大系数,取值范围为 $[1.2, 2]$ , $\epsilon$ 为增益项,用于防止该项出现0,一般设置为0.0001。

由(14)式求出滤波后的图像 $u$ 的矩阵形式 $v$ :

$$v = F_\lambda(q) = (R + \lambda L_g)^{-1} q, \quad (15)$$

式中: $F_\lambda(q) \approx (R + \lambda aL)^{-1} q$ ,  $L = D_x^T D_x + D_y^T D_y$ <sup>[15]</sup>。经过滤波处理后的透射率图像为

$$t_w = F_\lambda(t_b), \quad (16)$$

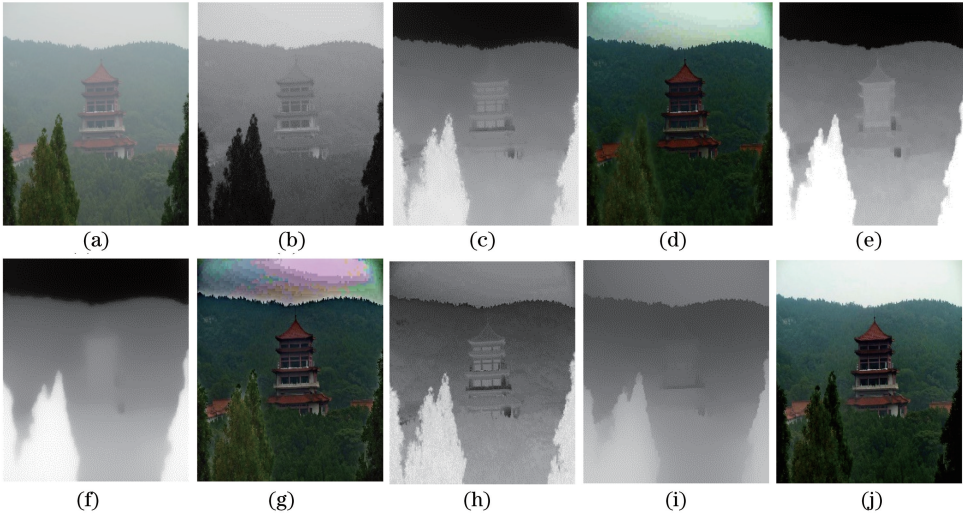


图3 透射率图像的对比。(a)原图;(b)文献[8]中的暗通道图像;(c)文献[8]中的透射率图像;(d)文献[8]中的去雾结果;(e)文献[14]中的边界限制图像;(f)文献[14]中的透射率优化图像;(g)文献[14]中的去雾后的图像;(h)所提方法的边界限制图像;(i)所提方法的透射率图像;(j)所提方法的去雾后的图像

Fig. 3 Comparison of transmission images. (a) Original image; (b) dark channel image in Ref. [8]; (c) transmission image in Ref. [8]; (d) dehazing image in Ref. [8]; (e) boundary constraint image in Ref. [14]; (f) transmission image in Ref. [14]; (g) dehazing image in Ref. [14]; (h) boundary constraint image by proposed algorithm; (i) optimized transmission image by proposed algorithm; (j) dehazing image by proposed algorithm

式中:  $t_w$  表示经过加权最小二乘法滤波后的透射率图像,  $F_\lambda(\cdot)$  表示加权最小二乘法滤波处理。从图3可以看出, 经过所提算法边界限制处理后, 初步获取的暗通道图像细节对比度比较大, 边缘也比较突出; 经过滤波优化后, 所提算法处理保留了透射率图像的边缘, 平滑了透射率图像的非边缘部分; 此外, 所提算法处理后的图像中的天空区域未出现光晕现象。

### 3.3 暗通道理论模型的优化

暗通道理论的数学模型可以简化为两项: 原图项和平滑项。其中平滑项的核心思想是通过平滑处理, 在不影响图像的边缘细节的情况下(即不影响高频信息), 对暗通道图像进行平滑, 获得低频信息, 从而达到增强复原的目的。通过实验发现, 暗通道模型处理后, 图像会出现一定程度的损失。为了能有效减少图像亮度的损失, 本研究在分母部分采用伽马校正来做调节。根据(5)式, 令  $I_1(x) = I(x) - A$ 。由(1)式和(3)式, 可得

$$J_1(x) = \frac{I_1(x)}{\max[t_w(x), \tilde{t}_0]^\gamma} + A, \quad (17)$$

式中:  $\gamma$  为伽马校正项, 取值范围(0, 1];  $\tilde{t}_0$  为防止滤波后透射率图像出现 0 值的容差机制项, 取值范围为(0, 0.1)。

## 4 实验结果及分析

运用 Matlab R2016a, 在 Windows 7 64 位操作系统平台上进行算法的验证和对比实验。所选的实验验证对象是不同像素和不同背景的 200 张雾天图像, 从中随机选取几组图像, 处理结果如图 4 和 5 所示。通过与经典的暗通道理论算法<sup>[8]</sup>、文献[14]的方法、文献[16]的方法、文献[17]的方法和文献[18]的方法作对比, 从主观评价和客观评价两个方面对算法的有效性、天空区域的失真以及细节特征进行分析对比, 验证算法的去雾效果。此外, 实验的参数设置如下:  $h=3, \sigma=0.5, \gamma=0.9, \tilde{t}_0=0.0001$ 。

### 4.1 算法的有效性分析

利用传统的暗通道理论算法处理图像时, 全局大气背景光的估计存在误差, 且优化的透射率图像边缘存在一定的损失, 造成复原后的图像亮度有所损失, 图像的天空区域会出现光晕现象。针对这两个方面的问题, 本研究运用主观评价的方法与当前主流的算法进行比较, 对算法的有效性进行分析。

选取的每种方法对雾天图像进行处理都有一定的效果。针对图 4 的 4 幅图, 利用文献[8]的方法处理后, 复原的效果整体比较好, 但在天空区域出现了轻微的色彩失真, 如图 4(b)第三行图所示, 此外经过该方法处理后 4 幅图的亮度也有所降低。利用文

献[14]的方法处理后,在有天空区域的图像中出现明显的光晕现象,且图像中物体的边缘出现了伪轮廓现象。利用文献[16]的方法处理后,复原的效果有较大的提高,但图像亮度降低得比较明显,如图4(d)第4行图所示,且图像的对比度也明显得到了增强;在图像的天空区域,出现了微弱的泛黄现象。利用文献[17]的方法处理后,复原后的结果有较好的可视度,色彩失真和亮度减少等现象都得到了消除,

但随着景深的增加,图像中的雾气明显增加,且图像中物体的清晰度也有所降低。利用文献[18]的方法处理后,图像表面还覆盖着一层淡淡的雾气,并且在天空区域出现了较严重的光晕现象。经过所提算法的处理,天空区域的光晕现象被有效地避免,图像的亮度得到了修正,图中的对比度也适度地得到了提高,图像中的物体细节得到了凸显,图像的整体视觉效果得到了明显提高。



图4 不同去雾方法的结果对比。(a)原图;(b)文献[8];(c)文献[14];(d)文献[16];(e)文献[17];(f)文献[18];(g)所提算法  
 Fig. 4 Qualitative comparison of results of different dehazing methods. (a) Original image; (b) Ref. [8];  
 (c) Ref. [14]; (d) Ref. [16]; (e) Ref. [17]; (f) Ref. [18]; (g) proposed algorithm

#### 4.2 天空区域的失真以及细节特征分析

户外的监控设备采集图像时不可避免地会遇到图像中存在天空区域的情况,由于天空区域的图像亮度对处理过程有较大的影响,如何有效地减少影响,成为当前研究雾天图像的关键。针对这些问题,本研究对图像中天空区域的失真和物体的细节特征进行比较,并通过提取图像中特定区域,针对性地分析算法的去雾效果。

在图5中,经过文献[14]中方法处理,图像的天空区域出现较严重的色彩失真现象,天空变成了深蓝色。在图5(c)中,物体的颜色改变也比较大,第

一行图像中的草棚顶,原图中是灰色的,而处理后变成浅蓝色。利用文献[8]的方法处理后,图像的天空区域有轻微的颜色失真现象,如图5(b)第二行所示。同样在图5第二行中,经过文献[16]的方法处理后,天空区域仍然出现了过增强现象,颜色也出现失真。经过文献[17]的方法处理后,天空区域的色彩保持得比较好,但图像整体仍然裹着一层雾气,清晰度比较低。经文献[18]的方法处理后,图像的色彩整体偏蓝,天空区域出现较严重的色彩畸变,主要原因是深度卷积神经网络的局限性,其只对数据样本内的图像处理得较好,换成样本外的图像就会出

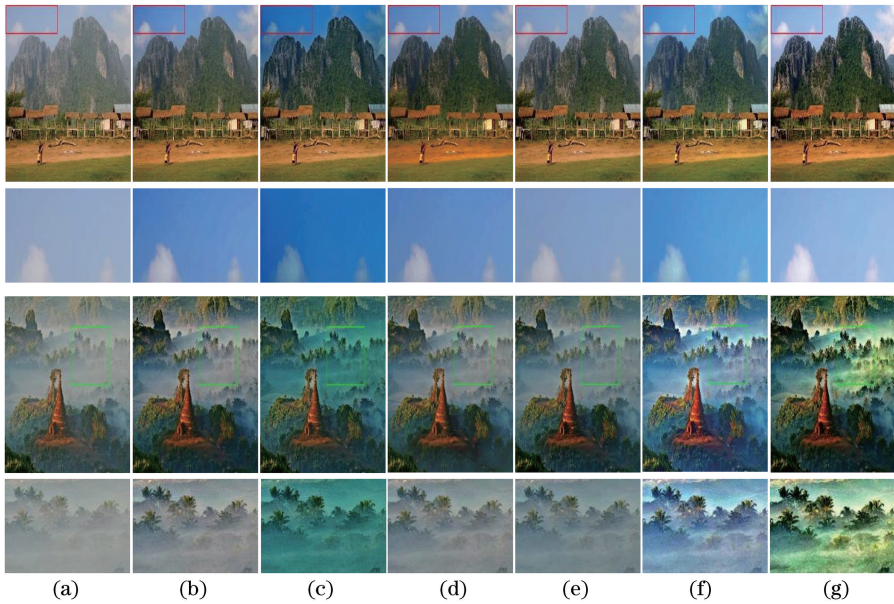


图 5 不同去雾方法中天空区域和细节特征对比。(a)原图;(b)文献[8];(c)文献[14];(d)文献[16];(e)文献[17];(f)文献[18];(g)所提算法

Fig. 5 Qualitative comparison of sky region and detail features of different dehazing methods. (a) Original image; (b) Ref. [8]; (c) Ref. [14]; (d) Ref. [16]; (e) Ref. [17]; (f) Ref. [18]; (g) proposed algorithm

现问题。而经过所提算法的处理,天空区域没有出现光晕现象,图像的可视度也比较高。

在图像的细节特征方面,以上 6 种方法处理后图像细节比较突出,均能较清晰地看到物体。但 5 种对比方法处理后,图像的对比度有所增加,清晰度却不够,随着景深的加大,远处似乎依然朦胧,图像的表面还包裹着一层淡淡的雾气,如图 5 第 4 行图片所示。经过所提算法的处理,图像的亮度得到修正,图像中物体比较清晰,且对比度也没有过度增强,图像整体可视度得到提高。

### 4.3 算法的客观评价

对于算法有效性进行客观评价,本研究将从可视边界率、边界平均梯度和可视边界的饱和黑白像素比三方面对每种方法的结果进行客观的对比和分析<sup>[19-20]</sup>。

对比度盲评价的函数表达式为

$$\begin{cases} e = \frac{n_r - n_0}{n_0} \\ \bar{r} = \exp\left[\frac{1}{n_r} \sum_{p_i \in p_r} \lg r_i\right], \\ \Psi = \frac{n_s}{h_x h_y} \end{cases} \quad (18)$$

式中, $e$  表示增强后新图像的可视边缘率, $n_0$  和  $n_r$  分别为输入和输出图像的可视边界数, $\bar{r}$  为可视边界的平均梯度率, $r_i$  为增强后图像中被采纳的可视

边界, $p_i$  和  $p_r$  分别代表区域  $r$  中像素和梯度图像的可视边界像素, $\Psi$  为增强后图像的黑白像素比, $n_s$  为增强后图像中饱和像素比, $h_x$  和  $h_y$  分别为增强后图像的长和宽。

在基于可见边缘的对比度增强评价方法中,可见边缘之比和可见边缘的规范化梯度均值越大,饱和黑色或白色像素点的百分比越小,表明去雾的效果越好。表 1 中加粗的部分代表最好的数据值。从表 1 中可以看出:经文献[14]的方法处理后,图像的  $e$  和  $\bar{r}$  较大,同时  $\Psi$  也较大,主要原因是图像中出现了明显的光晕现象,使得图像中的边缘较多,图像中饱和的像素比例也较大,使得图像的可视度比较差。经所提方法处理后,图像的  $e$  与  $\bar{r}$  的值较大,其和也较大,同时  $\Psi$  的值基本保持最小,表明所提算法处理后图像细节比较突出,整体感官比较清晰,更加自然,可视度比较高,去雾的效果也比较好。

## 5 结 论

针对经典的暗通道算法在处理图像时,会出现的亮度降低和天空的光晕现象的问题,本研究提出了一种基于加权最小二乘法滤波的雾天图像增强方法。算法主要从直方图的性质入手,有效地分割出天空区域;根据辐射立方体法则推导出边界限制条件,对物体图像进行规整,求解出初始暗通道图像,并通过加权最小二乘法滤波的方法和容差机制,对

表 1 图像质量评价

Table 1 Image quality evaluation

Fig. 4	Method	$e$	$\Psi$	$\bar{r}$	$e + \bar{r}$
Building	Ref.[8]	0.12	<b>0</b>	1.47	1.59
	Ref.[14]	<b>0.21</b>	0.15	<b>2.62</b>	<b>2.83</b>
	Ref.[16]	0.05	<b>0</b>	0.94	0.99
	Ref.[17]	0.04	<b>0</b>	1.11	1.15
	Ref.[18]	0.13	<b>0</b>	1.74	1.87
	Proposed	0.11	<b>0</b>	1.72	1.83
Mountain	Ref.[8]	0.02	<b>0</b>	0.92	0.94
	Ref.[14]	<b>0.05</b>	<b>0</b>	<b>1.66</b>	<b>1.71</b>
	Ref.[16]	0.01	<b>0</b>	0.89	0.9
	Ref.[17]	0.02	0.23	1.29	1.31
	Ref.[18]	0.02	0.09	1.23	1.25
	Proposed	0.03	<b>0</b>	1.5	1.53
Monitoring station	Ref.[8]	0.02	<b>0</b>	0.95	0.97
	Ref.[14]	<b>0.11</b>	0.31	<b>2.62</b>	<b>2.73</b>
	Ref.[16]	0.04	0	1.1	1.14
	Ref.[17]	0.03	<b>0</b>	1.33	1.36
	Ref.[18]	0.07	<b>0</b>	1.93	2.00
	Proposed	0.03	<b>0</b>	1.57	1.6
Market	Ref.[8]	0.01	<b>0.05</b>	1.2	1.21
	Ref.[14]	0.01	<b>0.05</b>	1.59	1.6
	Ref.[16]	0.01	0.95	1.07	1.08
	Ref.[17]	0.01	0.97	1.53	1.54
	Ref.[18]	0	0.13	1.64	1.64
	Proposed	<b>0.02</b>	0.16	<b>1.97</b>	<b>1.99</b>

透射率图像进行平滑处理;最后结合简化的透射率模型,获得最终的增强去雾的图像。该方法通过分割天空区域的方式求取了全局大气背景光,修正了图像的亮度。利用边界限制的加权最小二乘法滤波的方法避免了复原图像的伪轮廓的产生和图像的天空区域颜色失真的问题。主观评价和客观评价的结果表明,所提算法比主流的暗通道算法在细节增强、图像亮度和清晰度方面具有更好的视觉效果。

参 考 文 献

[1] Schechner Y Y, Narasimhan S G, Nayar S K. Instant dehazing of images using polarization[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: I-I.

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

[3] Jobson D J, Rahman Z, Woodell G A. Properties and performance of a center/surround Retinex[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1997, 6(3): 451-462.

[4] Rahman Z U, Jobson D J, Woodell G A. Retinex processing for automatic image enhancement [J]. Journal of Electronic Imaging, 2004, 13(1): 100-110.

[5] Elad M, Kimmel R, Shaked D, *et al.* Reduced complexity Retinex algorithm via the variational approach[J]. Journal of Visual Communication and Image Representation, 2003, 14(4): 369-388.

[6] Narasimhan S G. Interactive deweathering of an image using physical model[C] // IEEE Workshop on Color and Photometric Methods in Computer Vision, October 13-16, 2003, Beijing, China. New York: IEEE, 2003: 1-8.

[7] 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.

[8] 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.

[9] Fattal R. Single image dehazing [J]. ACM Transactions on Graphics, 2008, 27(3): 1-9.

[10] 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.

[11] Lu H M, Li Y J, Serikawa S. Underwater image enhancement using guided trigonometric bilateral filter and fast automatic color correction[C] // 2013 IEEE International Conference on Image Processing, September 15-18, 2013, Melbourne, VIC, Australia. New York: IEEE, 2013: 3412-3416.

[12] M. K. Saggul and S. Singh. Different techniques to dehaze an underwater image[J]. International Journal for Technological Research in Engineering, 2015, 2(6): 566-568.

[13] Gao Y, Yun L J, Shi J S, *et al.* Enhancement dark channel algorithm of fog image based on the TV model[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(8): 0809001.  
高银, 云利军, 石俊生, 等. 基于 TV 模型的暗原色理论雾天图像复原算法[J]. 中国激光, 2015, 42(8): 0809001.

[14] Meng G F, Wang Y, Duan J Y, *et al.* Efficient image dehazing with boundary constraint and contextual regularization [C] // 2013 IEEE International Conference on Computer Vision, December 1-8, 2013, Sydney, NSW, Australia. New York: IEEE, 2013: 617-624.



- [15] 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): 1-10.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] Zhang S D, He F Z, Yao J. Single image dehazing using deep convolution neural networks [M] // Zeng B, Huang Q, El Saddik A, et al. eds. *Advances in Multimedia Information Processing-PCM 2017*. Cham: Springer International Publishing, 2018: 128-137.
- [19] Hautière N, Tarel J P, Aubert D, et al. Blind contrast enhancement assessment by gradient ratioing at visible edges [J]. *Image Analysis & Stereology*, 2011, 27(2): 87-95.
- [20] Choi L K, You J, Bovik A C. Referenceless prediction of perceptual fog density and perceptual image defogging [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2015, 24(11): 3888-3901.