

doi:10.3788/gzxb20174609.0910001

基于暗通道先验的单幅图像快速去雾方法

汤群芳^{1,2}, 杨杰¹, 刘海波², 李祖林², 王福建²

(1 武汉理工大学 光纤传感与信号处理教育部重点实验室, 武汉 430070)

(2 湖南工学院 电气与信息工程学院, 湖南 衡阳 421002)

摘 要: 为了提高雾天图像的去雾效果, 针对暗通道先验法则中存在的不足, 提出一种单幅图像快速去雾方法. 该方法以暗通道先验法则为基础, 采用四叉树搜索算法对大气光值进行估计, 并通过白平衡对大气散射模型进行简化. 然后, 利用暗通道先验知识得到介质传输率粗略估计, 并通过引导滤波和双阈值判断方法对介质传输率中边缘和天空区域进行优化. 最后, 通过简化大气散射模型和色调调整得到去雾图像. 与几种典型的图像去雾方法相比, 该方法运算速度较快, 能有效提高去雾图像的清亮度, 并获得较好的图像颜色.

关键词: 图像去雾; 暗通道先验; 四叉树搜索算法; 引导滤波; 双阈值判断方法

中图分类号: TN941; TP391

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2017)09-0910001-9

Fast Single-image Dehazing Method Based on Dark Channel Prior

TANG Qun-fang^{1,2}, YANG Jie¹, LIU Hai-bo², LI Zu-lin², WANG Fu-jian²

(1 Key Laboratory of Fiber Optic Sensing Technology and Information Processing, Ministry of Education, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

(2 School of Electrical and Information Engineering, Hunan Institute of Technology, Hengyang, Hunan 421002, China)

Abstract: In order to improve the dehazing effect of hazed image, a fast single-image dehazing method based on dark channel prior was proposed in allusion to the defect of dark channel prior rule. Based on the dark channel prior rule, the quad-tree search algorithm was adopted to estimate the value of atmospheric optical, which is used to simplify the atmospheric scattering model by the white balance. Then, the coarse estimation of medium transmission was obtained through the dark channel prior knowledge, and the guided filter and double-threshold judgment method were used to optimize the fringe and sky regions. Finally, the simplified atmospheric scattering model and tone mapping were adopted to get the dehazed image. Compared to some state-of-the-art methods, the proposed method can achieve a faster processing speed, effectively improve the definition of the dehazed image, and obtain good image color.

Key words: Image dehazing; Dark channel prior; Quad-tree search algorithm; Guided filter; Double-threshold judgment method

OCIS Codes: 100.0100; 110.0110; 200.0200

0 引言

雾霾会引起大气中悬浮的大量微粒对光线的吸收、散射和折射, 导致捕获的图像对比度降低、饱和度下降以及色调偏移, 严重影响了机器视觉系统的正常工作.

目前, 图像去雾主要采用图像增强和图像复原的方法. 图像增强方法不考虑雾天图像的退化降质机理,

基金项目: 国家自然科学基金(No.51479159)、湖南省自然科学基金(No.2017JJ3053)、湖南省教育厅科学研究项目(Nos.17A051, 16C0435)、国家级大学生创新创业训练计划项目(No.201611528005)和衡阳市科技计划项目(Nos.2016KG65, 2016KF07)资助

第一作者: 汤群芳(1983-), 女, 副教授, 博士研究生, 主要研究方向为图像处理、多媒体通信和机器学习. Email: qunfangtang@126.com

导师(通讯作者): 杨杰(1960-), 女, 教授, 博导, 主要研究方向为图像处理、信息隐藏和多媒体通信. Email: seainlost81@126.com

收稿日期: 2017-04-14; **录用日期:** 2017-06-02

<http://www.photon.ac.cn>

通过增强图像局部对比度来实现图像去雾,该类方法以 Retinex 算法为代表,但不是真正意义上的去雾^[1].图像复原方法基于图像降质模型,利用图像退化的先验知识或假设,通过逆向还原实现图像去雾,该类方法以暗通道先验算法为代表^[2],具有较好的去雾效果.

近年来,利用先验知识或假设的单幅图像去雾方法得到了广泛的研究和应用^[3-5].Tan^[6]通过最大化局部对比度来实现图像去雾,其实质为对比度拉伸方法,该方法能够获得较高的图像对比度,但去雾图像的颜色显得过饱和,且容易产生光晕伪影.Tarel 等^[7]利用中值滤波对大气耗散函数进行估计,然后通过色调调整得到去雾图像,但在场景深度突变处会引起 Halo 效应.He 等^[2]首次提出了基于暗通道先验的去雾方法,该方法实现手段简单、去雾效果好,但易受到白色物体、天空区域等明亮区域的影响,导致复原图像颜色失真,且时间和空间复杂度较高.禹晶等^[8]从大气散射模型出发,通过白平衡和快速双边滤波得到去雾图像,该方法可以获得较快的运算速度,但对白色物体的恢复效果不太理想.张小刚等^[9]以大气散射模型和暗通道先验原理为基础,利用双区域滤波和图像融合实现单幅图像去雾,该方法具有较低的时间复杂度,但对于有大片天空和白色物体的图像,去雾图像色彩存在失真.陈书贞等^[10]针对雾天图像中包含大面积天空或白色物体的情况,采用改进暗通道和导向滤波的方法实现单幅图像去雾,该方法对大面积天空或白色物体区域获得较好的去雾效果,但时间复杂度较高,且去雾效果易受给定阈值的影响.

针对以上研究存在的不足,本文提出了一种基于暗通道先验的单幅图像快速去雾方法.首先,采用二叉树搜索算法对大气光值进行估计,并进行白平衡处理,得到简化大气散射模型.其次,利用暗通道先验知识,得到介质传输率的粗略估计,并通过引导滤波进行边缘优化,同时采用双阈值判断方法对天空区域进行识别和修正.最后,利用简化大气散射模型,通过逆变换和色调调整实现图像去雾.

1 算法原理

1.1 去雾原理

在计算机视觉和计算机图形学中,雾天图像的散射模型^[2]可表示为

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

式中, $I(x)$ 为雾天图像, $J(x)$ 为场景辐射照度或无雾图像, $t(x)$ 为介质传输率, A 为大气光值, $\rho(x)$ 为场景反照率.当大气同质时, $t(x)$ 可表示为

$$t(x) = e^{-\beta d(x)} \quad 0 \leq t(x) \leq 1 \quad (2)$$

式中, β 为大气散射系数, $d(x)$ 为场景深度.从本质上来讲,雾天图像去雾是一个典型的病态反问题,它通过对参数 A 和 $t(x)$ 的估计,从 $I(x)$ 中恢复 $J(x)$ 或 $\rho(x)$.

本文提出的基于暗通道先验的单幅图像快速去雾方法流程如图 1.

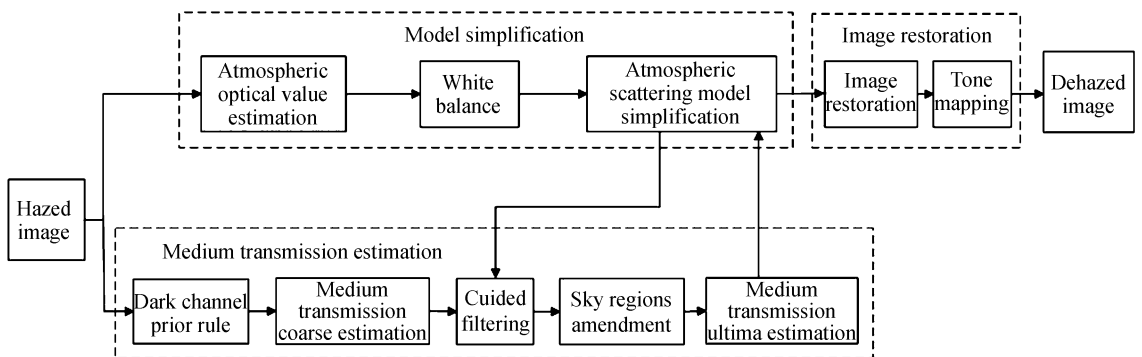


图 1 去雾方法流程

Fig.1 Flowchart of image dehazing method

为了对大气光值 A 和介质传输率 $t(x)$ 进行估计,首先对式(1)两边取最小值操作,可得

$$I^{\text{dark}}(x) = \min_{C \in \{R,G,B\}} I^C(x) = \min_{C \in \{R,G,B\}} A\rho^C(x)t(x) + A(1-t(x)) = \rho^{\text{dark}}(x)At(x) + A(1-t(x)) \quad (3)$$

式中, $\min_{C \in \{R,G,B\}}$ 表示对 (R,G,B) 通道对应的像素取最小值, $I^{\text{dark}}(x)$ 和 $\rho^{\text{dark}}(x)$ 定义为 $I(x)$ 和 $\rho(x)$ 的暗通道.

1.2 模型简化

1.2.1 大气光值估计

文献[6]直接将雾天图像中亮度最大的像素值作为大气光值.文献[2]按照亮度值的大小从暗原色图中选取前 0.1% 的像素,然后将这些像素在原图像中的最大亮度值作为大气光值.文献[11]采用灰度腐蚀和膨胀操作去除图像中面积较大的白色物体,然后通过灰度操作计算大气光值.这些方法易受高亮度噪声或白色物体的影响,通过增加结构元素的尺寸对高亮度噪声或白色物体进行滤除,则可能将天空区域滤掉,导致估计的大气光值存在严重偏差.通过对大量雾天图像的观察,文献[12]发现天空区域具有亮度较高、灰度平坦和位置偏上的特征.本文将满足以上特征的区域定义为天空区域,并提出一种基于二叉树搜索算法的大气光值估计方法,具体步骤为:

- 1)对雾天图像进行灰度化处理,得到灰度图像 G ;
- 2)对图像 G 进行二叉树分割,并顺时针依次标记为图像 1、2、3 和 4;
- 3)计算图像 1 和 2 的数值,公式为

$$\theta_i = \text{mean}(G_i) - \sigma_i, \quad i = 1, 2.$$

式中, $\text{mean}(G_i)$ 为图像 G_i 的灰度均值, σ_i 为图像 G_i 的灰度标准差;

4)比较 θ_1 和 θ_2 的数值,数值大的图像重复步骤 2)和 3)的过程,直到分割出的图像尺寸小于设定的阈值(30×30),停止搜索;

5)对所确定的区域假定为天空区域 S ,并计算灰度方差 σ^2 .若 $\sigma^2 \leq 0.01$,说明该区域为天空区域,并将区域 S 中像素点的最大灰度值作为大气光值 A ;若 $\sigma^2 > 0.01$,说明选定的区域非天空区域,则参考文献[2]的方法得到原始图像中对应的像素点,然后取这些像素点的灰度均值作为大气光值 A .

图 2(b)中深色区域为采用本文方法得到的天空区域,图 2(c)中深色区域为文献[2]方法估计的天空区域,显然本文方法得到的结果为天空区域,而文献[2]方法得到的结果为白色区域.

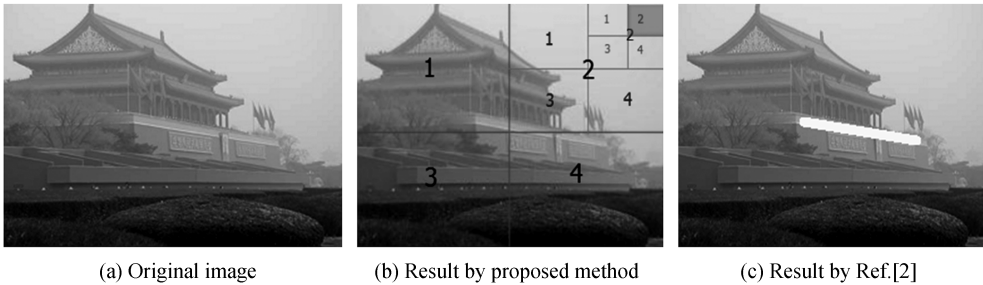


图 2 本文方法和文献[2]方法大气光区域对比结果

Fig.2 Comparative result of atmospheric optical region with proposed method and Ref.[2]'s method

1.2.2 白平衡处理

白平衡(White Point, WP)算法,也称为 Max-RGB 算法,它是利用 R、G、B 颜色分量的最大值来估计光照的颜色^[8].利用二叉树搜索算法得到的大气光值 A 对大气光照进行白平衡处理,可得

$$I(x)/A = \rho(x)t(x) + 1 - t(x) \quad (4)$$

雾天图像中像素值大于大气光值的区域,存在 $I(x)/A > 1$.为了对介质传输率进行估计,将图像 $I(x)/A$ 限制在 $[0, 1]$ 范围内,用 $I'(x)$ 表示,可得

$$I'(x) = \min(I(x)/A, 1) \quad (5)$$

进而,大气散射模型简化为

$$I'(x) = \rho(x)t(x) + 1 - t(x) \quad (6)$$

在 $I'(x)$ 中,大气光值 A 校正为白色 $(1, 1, 1)^T$.

1.3 介质传输率估计

1.3.1 介质传输率粗略估计

对式(3)两边取灰度开运算,可得

$$\hat{I}^{\text{dark}}(x) = \hat{\rho}^{\text{dark}}(x) A t'(x) + A(1 - t'(x)) \quad (7)$$

式中, $\hat{I}^{\text{dark}}(x)$ 、 $\hat{\rho}^{\text{dark}}(x)$ 和 $t'(x)$ 为灰度开运算处理的结果.根据暗通道先验法则,当灰度开运算中结构元素的尺寸大于 $I^{\text{dark}}(x)$ 中白色物体的尺寸时, $\hat{\rho}^{\text{dark}}(x)$ 的取值趋于 $0^{[2]}$.

因此,式(7)可改写为

$$\hat{I}^{\text{dark}}(x) \geq A(1-t'(x)) \quad (8)$$

对式(8)两边乘 $t'(x)$,可得

$$At'^2(x) + (\hat{I}^{\text{dark}}(x) - A)t'(x) \geq 0 \quad (9)$$

由式(2)和式(9),解不等式方程可得

$$t'(x) \geq [A - \hat{I}^{\text{dark}}(x) + \text{abs}(A - \hat{I}^{\text{dark}}(x))]/(2A) \quad (10)$$

式中, $\text{abs}(\cdot)$ 表示取绝对值.

因此,由式(10)定义介质传输率的粗略估计为 $t_1(x)$,其表达式为

$$t_1(x) = [A - \hat{I}^{\text{dark}}(x) + \text{abs}(A - \hat{I}^{\text{dark}}(x))]/(2A) \quad (11)$$

这里,灰度开运算中结构元素的尺寸 r 由 $I^{\text{dark}}(x)$ 尺寸的最小值 m 决定,其表达式为

$$r = \text{floor}(m/k) \quad (12)$$

式中, $\text{floor}(\cdot)$ 表示向负无穷方向取整, k 取值区间为 $[20, 40]$.

1.3.2 引导滤波

由于 $t_1(x)$ 为灰度开运算的结果, $t_1(x)$ 中物体的边缘显得模糊.从式(3)、(6)、(7)和(11)可以看出, $t_1(x)$ 和 $I'(x)$ 具有结构相似性,且 $I'(x)$ 中含有大量的边缘特征.因此,采用 He 等^[13]提出的引导滤波对 $t_1(x)$ 进行优化.

理想的引导图像应具有保持雾天图像边缘特征、景深相近处趋近平滑和与输入图像尽可能接近的特点.利用 $I'(x)$ 求取引导图像 $I_{\text{guide}}(x)$,具体步骤为:

1)对图像 $I'(x)$ 进行灰度化处理,得到灰度图像 $I'_{\text{gray}}(x)$,然后利用 $I'_{\text{part}}(x) = \text{Bilateral}(I'_{\text{gray}}(x))$ 得到局部均值图像 $I'_{\text{part}}(x)$,其中 $\text{Bilateral}(I'_{\text{gray}}(x))$ 表示对 $I'_{\text{gray}}(x)$ 进行双边滤波;

2)计算 $I'_{\text{gray}}(x)$ 和 $I'_{\text{part}}(x)$ 的局部差异图像,并进行双边滤波,然后与 $I'_{\text{part}}(x)$ 求差,即根据 $I_{\text{guide}}(x) = I'_{\text{part}}(x) - \text{Bilateral}(\text{abs}(I'_{\text{gray}}(x) - I'_{\text{part}}(x)))$ 得到二次差异图像 $I_{\text{guide}}(x)$,式中 $I_{\text{guide}}(x)$ 为引导图像.

本文采用文献[13]提出的引导滤波方法,利用 $I_{\text{guide}}(x)$ 对 $t_1(x)$ 进行引导滤波得到 $t_2(x)$.

1.3.3 天空区域修正

当雾天图像中存在大面积天空区域时, $\hat{\rho}^{\text{dark}}(x)$ 中天空区域的取值不趋于 0 ,导致天空区域的介质传输率被低估,进而去雾图像中天空区域出现颜色失真.若能从雾天图像中识别出天空区域,并对其介质传输率进行修正,则能有效消除颜色失真现象.由文献[14]可知,天空区域的亮度高于非天空区域的亮度,并且介质传输率与亮度值为线性关系.因此,采用双阈值判断方法对天空区域进行识别和修正,具体步骤为:

1)计算 $I'_{\text{gray}}(x)$ 的亮度直方图,并划分 64 等份,在亮度较高区域 $[\min(0.75, A), 1]$ 找出对应的直方图区间 $[V_{\text{lmin}}, V_{\text{lmax}}]$,在区间 $[V_{\text{lmin}}, V_{\text{lmax}}]$ 中找出频次最大的值 F_{lmax} ,并将其对应的亮度记为 L_a ,其中 $\min(0.75, A)$ 表示在 0.75 和 A 之间取较小值;

2)在区间 $[V_{\text{lmin}}, L_a]$ 中找出频次最小的值 F_{lmax} ,并将其对应的亮度记为 L_i ;

3)计算 $t_2(x)$ 的介质传输率直方图,并划分 64 等份,在介质传输率较低区域 $[0, 0.2]$ 找出对应的直方图区间 $[V_{\text{tmin}}, V_{\text{tmax}}]$,在区间 $[V_{\text{tmin}}, V_{\text{tmax}}]$ 中找出频次最大的值 F_{tmax} ,并将其对应的介质传输率记为 T_a ;

4)在区域 $[T_a, 0.3]$ 找出对应的直方图区间 $[T_a, V_{\text{tmax}0}]$,在区间 $[T_a, V_{\text{tmax}0}]$ 中找出频次最小的值 F_{tmin} ,并将其对应的介质传输率记为 T_i ;

5)满足条件 $t_2(x) \leq T_i \cap I'_{\text{gray}}(x) \geq L_i$ 的区域为天空区域.由于天空区域的介质传输率被低估,按式(13)对天空区域的介质传输率进行修正,即

$$t_3(x) = \max \left[C \cdot \frac{T_i \cdot I'_{\text{gray}}(x)}{L_i \cdot t_2(x)}, 1 \right] \cdot t_2(x) \quad (13)$$

式中, C 为修正因子,取值为 0.95 .

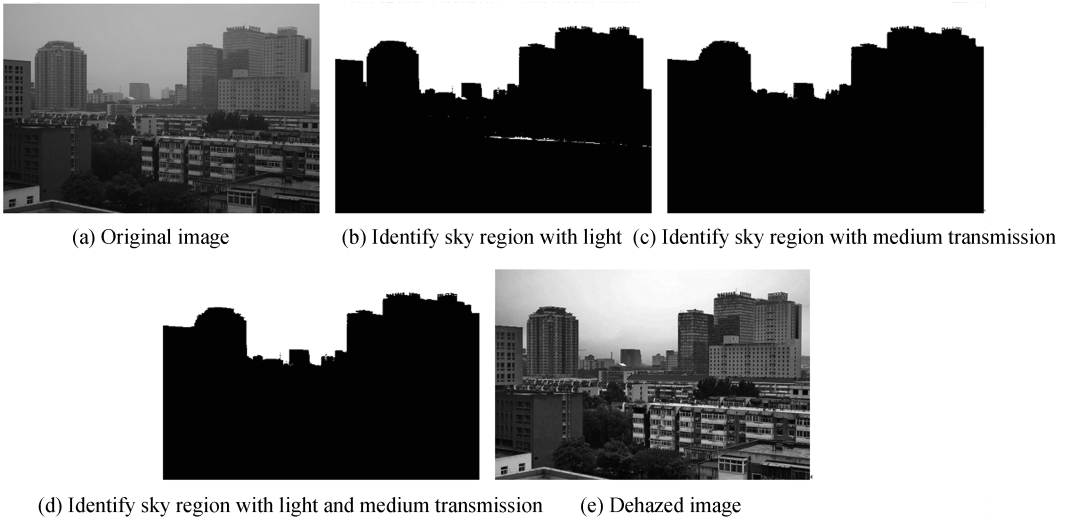


图3 天空区域识别过程和去雾结果

Fig.3 Recognition process of sky region and dehazed image

图3(d)为利用亮度和介质传输率直方图,通过双阈值判断方法得到的天空区域.显然,本文方法识别结果与实际天空区域基本吻合,且从图3(e)可以看出,去雾图像天空区域避免了颜色失真现象.

1.3.4 介质传输率最终估计

采用文献[15]中值域调整的方法对介质传输率的最小值进行修正,其表达式为

$$t_0 = \min(\max(n/N, 0.1), 0.2) \quad (14)$$

式中, N 为 $t_3(x)$ 中像素点总数, n 为 $t_3(x)$ 中天空区域像素点个数,固定值0.1和0.2用来限定 t_0 的上下限.因此,介质传输率的最终估计 $t(x)$ 可表示为

$$t(x) = \min(\max(t_3(x), t_0), 1) \quad (15)$$

1.4 图像复原

由式(6)和(15)可知,场景反照率 $\rho(x)$ 可表示为

$$\rho(x) = \frac{I'(x) - (1 - t(x))}{t(x)} = \frac{I'(x) + \min(\max(t_3(x), t_0), 1) - 1}{\min(\max(t_3(x), t_0), 1)} \quad (16)$$

由于大气光成分参与成像,导致复原图像 $\rho(x)$ 偏暗,因此需要对 $\rho(x)$ 进行色调调整,以提高去雾图像的清晰度和自然度.参考文献[15]方法,采用Drago等^[16]提出的自适应对数映射算子对 $\rho(x)$ 进行色调调整.

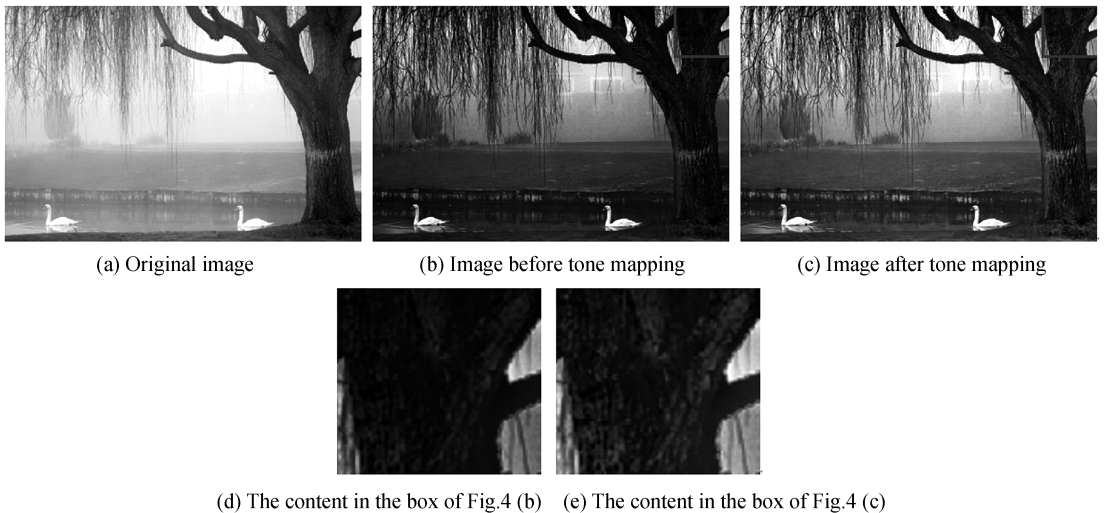


图4 去雾图像色调调整前后对比结果

Fig.4 Comparative results of dehazed image before and after tone mapping

从图 4(b)和图 4(c)可以看出,经过色调调整处理后,去雾图像的整体亮度和对比度得到了提高.与图 4(d)比较,图 4(e)中图像细节信息更为突出和丰富.

2 实验结果与分析

2.1 方法复杂度分析

对于一幅大小为 $s_x \times s_y$ 的图像,本文方法的时间复杂度主要来自引导滤波和双边滤波算法的计算.引导滤波和双边滤波算法的时间复杂度均为 $O(s_x s_y)$ ^[13,17],其他步骤为简单操作.因此,本文方法的时间复杂度为 $O(s_x s_y)$,它是图像像素数的线性函数,具有较高的运算效率.相比之下,文献[2]方法的时间复杂度为 $O(s_x^2 s_y^2 + s_x s_y s_w^2)$,文献[7]方法的时间复杂度为 $O(s_x s_y s_w^2 \ln s_w)$,其中 s_w 为最小值滤波的半径, s_v 为双边滤波的模板尺寸.

2.2 方法评价指标

从定性和定量两个方面对去雾方法的有效性进行评价,其中定性评价以主观的视觉评价为主,定量评价则采用常用的客观评价指标.对于去雾图像的客观评价,采用图像对比度和色调保真度评价指标.其中,图像对比度评价指标采用 Hautiere 等^[18]提出的新增可见边比 e 和图像复原前后可见边梯度比 \bar{r} ,其表达式为

$$e = \frac{n_r - n_0}{n_0} \quad \bar{r} = \frac{\bar{g}_r}{\bar{g}_0} \quad (17)$$

式中, n_0 和 n_r 表示雾天图像和去雾图像中可见边的数目, \bar{g}_r 表示去雾图像的平均梯度, \bar{g}_0 表示雾天图像的平均梯度.一般情况下, e 和 \bar{r} 取值较大,表明去雾图像边缘数量较多、强度较大^[19].色调保真度评价指标采用 Jobson 等^[20]提出的 r 列基于图像统计特征的度量参数 H ,它代表色调的变化,其定义为

$$H = \text{abs} \left(\frac{\text{mean}(H_{\text{out}}(x)) - \text{mean}(H_{\text{in}}(x))}{\text{mean}(H_{\text{in}}(x))} \right) \quad (18)$$

式中, $H_{\text{in}}(x)$ 和 $H_{\text{out}}(x)$ 表示去雾前后彩色图像在 HSV 空间中色调分量.一般情况下, H 取值较小,表明去雾图像的色调保真度较高^[15].

2.3 方法评价与分析

选择 5 幅典型图像进行去雾实验,并从定性和定量两个方面对方法的有效性进行评价与分析.图 5 给出了 5 幅图像去雾前后的实验结果,表 1 给出了 5 幅图像的定量评价指标值.

从图 5 可以看出,经过本文方法处理后,5 幅图像的清晰度明显提升,图像色彩鲜艳但不失真.从表 1 中 e 和 \bar{r} 数值来看,去雾图像新增可见边数量和平均梯度强度得到了不同程度提升,其中 \bar{r} 数值较大,说明本文方法能够有效提升去雾图像的清晰度.同时,表 1 中 H 数值较小,说明本文方法能够获得较好的图像颜色.另外,从图像去雾的运算时间来看,本文方法具有较快的运算速度(硬件: Intel(R) Core(TM) i3-4170CPU, 4GB 内存;软件: matlab2012a).

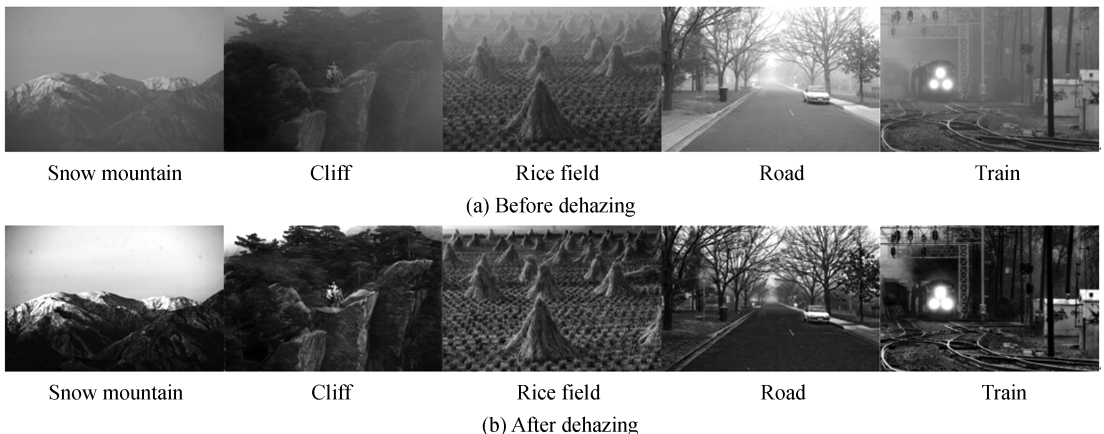


图 5 去雾前后图像对比

Fig.5 Comparison of the images before and after dehazing

表 1 去雾图像定量评价指标

Table 1 Value of quantitative evaluation indicators with de hazed images

Name	Original images Size/pixel	Evaluation indicator			
		Time/s	e	\bar{r}	H
Snow mountain	584×876×3	1.243 1	3.685	3.852	0.004 64
Cliff	400×600×3	0.683 0	1.892	3.712	0.036 74
Rice field	384×512×3	0.640 4	0.301	2.436	0.035 06
Road	400×600×3	0.637 8	0.721	2.268	0.007 27
Train	400×600×3	0.696 1	1.440	3.159	0.010 44

2.4 方法比较与分析

从定性和定量两个方面,通过几组典型图像,与几种类似和典型的去雾方法进行比较与分析。选择图 5 中的火车图像,将文献[2]、文献[21]中的算法结果和本文方法的结果进行定性比较,如图 6。

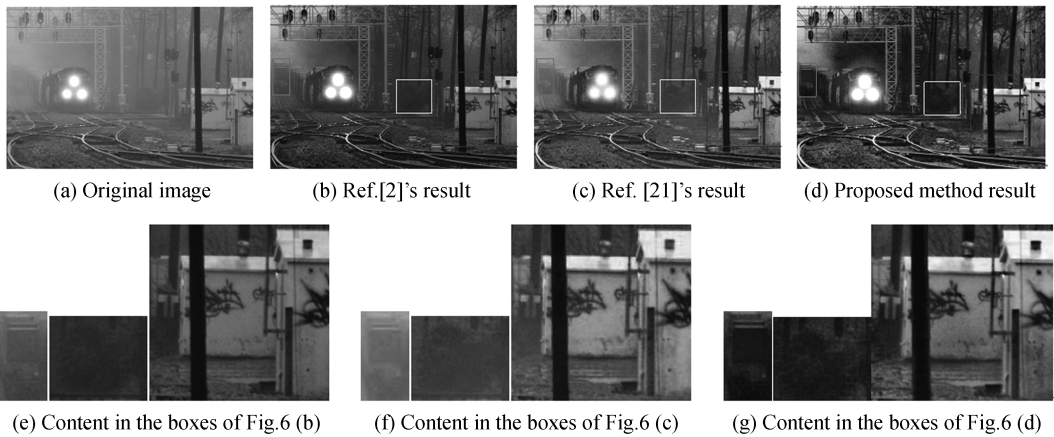


图 6 火车图像采用不同方法的去雾效果对比结果

Fig.6 Comparative results of image train by de hazing with different methods

从图 6 可以看出,三种方法能够不同程度地提高图像去雾的效果.从整体视觉效果来看,本文方法获得了相对较好的去雾效果;从去雾图像细节内容来看,本文方法可以获得较好的清晰度和图像颜色。

选择雾天房子图像,将文献[2]、文献[7]中的算法结果和本文方法的结果进行定性比较,如图 7。

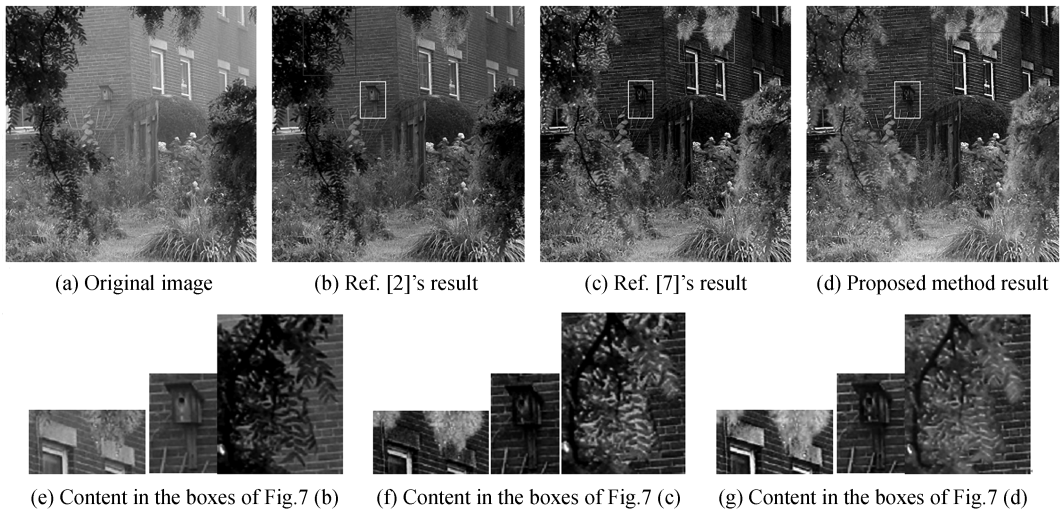


图 7 房子图像采用不同方法的去雾效果对比结果

Fig.7 Comparative results of image house by de hazing with different methods

从图 7 可以看出,文献[7]和本文方法能够获得较好的整体去雾效果,且在去雾图像细节方面,本文方法能够消除 Halo 效应影响,并获得较好的图像颜色。

选择雾天图像 y16 和 ny12,分别采用文献[2]、文献[7]、文献[21]、文献[15]和本文方法进行定性和定量比较.图 8 给出了 2 幅图像(第一行为图像 y16,第二行为图像 ny12)采用不同方法去雾前后的实验结果,

表 2 给出了 2 幅图像对应的定量评价指标值.



(a) Original images (b) Ref. [2]'s results (c) Ref. [7]'s results (d) Ref. [21]'s results (e) Ref. [15]'s results (f) Proposed method results

图 8 图像 y16 和 ny12 采用不同方法去雾前后结果

Fig.8 Results of images y16 and ny12 before and after dehazing with different methods

表 2 采用不同方法去雾后定量评价指标值

Table 2 Value of quantitative evaluation indicators bydehazing with different methods

Name	Ref.[2]			Ref.[7]			Ref.[21]			Ref.[15]			Proposed method		
	e	\bar{r}	H	e	\bar{r}	H	e	\bar{r}	H	e	\bar{r}	H	e	\bar{r}	H
y16	0.06	1.42	0.076 1	-0.008	2.01	0.027 2	0.18	1.46	0.097 0	0.106	1.969	0.058 2	0.092	1.826	0.019 0
ny12	0.06	1.42	0.024 7	0.07	1.88	0.090 3	0.02	1.49	0.028 0	0.061	1.531	0.002 1	0.057	1.561	0.006 1

从图 8 可以看出,进行比较的所有方法均不同程度地提高了去雾图像的清晰度.一般情况下,去雾方法增大 \bar{r} 值时, e 的值会变小,故 e 和 \bar{r} 取值之间需保持平衡^[18].从表 2 可以看出,本文方法能够获得较大 e 和 \bar{r} 值,同时得到较小的 H 值,说明本文方法可以获得较高的图像清晰度和色彩保真度.

3 结论

针对图像去雾这个病态反问题和暗通道先验法则中存在的不足,本文提出了一种基于暗通道先验的单幅图像快速去雾方法.该方法从大气散射模型出发,采用二叉树搜索算法对大气光值进行估计,并利用暗通道先验知识得到介质传输率粗略估计,同时通过引导滤波和双阈值判断方法对介质传输率中边缘和天空区域进行优化,最后利用简化大气散射模型和色调调整得到去雾图像.实验结果表明,本文方法能够获得较快的运算速度,能有效提高去雾图像的清晰度,同时获得较好的色调保真度.

参考文献

- [1] WU Di, ZHU Qing-song. 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] HE K M, SUN J, TANG X O. Single image haze removal using dark channel prior[C].Proceedings of the Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Miami, USA:IEEE, 2009:1956-1963.
- [3] JI Xiao-qiang, DAI Ming, YIN Chuan-li, et al. Haze removal for aerial degraded images[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, **19**(7):1659-1668.
嵇晓强,戴明,尹传历,等.航拍降质图像的去雾处理[J].光学精密工程,2011, **19**(7):1659-1668.
- [4] ZHANG Zheng-ming, LU Wei, LU Jing-xia. Dehazing method based on fast pseudosphere filtering for visual navigation of intelligent tractor in haze weather scene[J]. *Robot*, 2015, **37**(5):603-613.
张征明,卢伟,陆静霞.基于快速伪球滤波的智能拖拉机视觉导航中场景去雾方法[J].机器人,2015, **37**(5):603-613.
- [5] WANG Rui, LI Rui, LIAN Xiao-qin. Multiple scattering model based image dehazing with superpixel[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, **45**(4):0410001.
王睿,李蕊,廉小亲.基于大气多散射模型和超像素分割的图像去雾[J].光子学报,2016, **45**(4):0410001.
- [6] TAN R T. Visibility in bad weather from a single image[C].Proceedings of the Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Anchorage, USA:IEEE, 2008:1-8.
- [7] TAREL J P, HAUTIERE N. Fast visibility restoration from a single color or gray level image[C].Proceedings of the

- International Conference on Computer Vision. Kyoto, USA;IEEE, 2009: 2201-2208.
- [8] YU Jing, LI Da-peng, LIAO Qing-min. Physics-based fast single image fog removal[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2011, **37**(2):143-149.
禹晶,李大鹏,廖庆敏.基于物理模型的快速单幅图像去雾方法[J].自动化学报,2011,**37**(2):143-149.
- [9] ZHANG Xiao-gang, TANG Mei-ling, CHEN Hua, *et al.* A dehazing method in single image based on double-area filter and image fusion[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2014, **40**(8):1733-1739.
张小刚,唐美玲,陈华,等.一种结合双区域滤波和图像融合的单幅图像去雾算法[J].自动化学报,2014,**40**(8):1733-1739.
- [10] CHEN Shu-zhen, REN Zhan-guang, LIAN Qiu-sheng. Single image dehazing algorithm based on improved dark channel prior and guided filter[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2016, **42**(3):455-465.
陈书贞,任占广,练秋生.基于改进暗通道和导向滤波的单幅图像去雾算法[J].自动化学报,2016,**42**(3):455-465.
- [11] KUMARI A, SAHDEV S, SAHOO S K. Improved single image and video dehazing using morphological operation[C]. Proceedings of International Conference on VLSI Systems, Architecture, Technology and Applications, USA; IEEE, 2015:1-5.
- [12] YU J, LIAO Q M. Fast single image fog removal using edge-preserving smoothing[C]. Proceedings of International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, USA; IEEE, 2011:1245-1248.
- [13] 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.
- [14] ZHANG Deng-ying, JU Ming-ye, WANG Xue-mei. A fast image haze removal algorithm using dark channel prior[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2015, **43**(7):1437-1443.
张登银,鞠铭烨,王雪梅.一种基于暗通道先验的快速图像去雾算法[J].电子学报,2015,**43**(7):1437-1443.
- [15] LIU Hai-bo, YANG Jie, WU Zheng-ping, *et al.* A fast single image dehazing method based on dark channel prior and Retinex theory[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2015, **41**(7):1264-1273.
刘海波,杨杰,吴正平,等.基于暗通道先验和 Retinex 理论快速单幅图像去雾方法[J].自动化学报,2015,**41**(7):1264-1273.
- [16] DRAGO F, MYSZKOWSKI K, ANNEN T, *et al.* Adaptive logarithmic mapping for displaying high contrast scenes[J]. *Computer Graphics Forum*, 2003, **22**(3):419-426.
- [17] PARIS M, FREDO D. A fast approximation of the bilateral filter using a signal processing approach[C]. Proceedings of the 9th European Conference on Computer Vision. Graz, GER; Springer, 2006:568-580.
- [18] HAUTIERE N, TAREL J P, AUBERT D, *et al.* Blind contrast restoration assessment by gradient ratioing at visible edges[J]. *Image Analysis and Stereology*, 2008, **27**(2):87-95.
- [19] SUN Wei, LI Da-jian, LIU Hong-juan, *et al.* Fast single image fog removal based on atmospheric scattering model[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, **21**(4):1040-1046.
孙伟,李大健,刘宏娟,等.基于大气散射模型的单幅图像快速去雾[J].光学精密工程,2013,**21**(4):1040-1046.
- [20] JOBSON D J, RAHMAN Z, WOODDELL G A. Statistics of visual representation[C]. Proceedings of the Visual Information Processing XI. Orlando, USA; SPIE, 2002:25-35.
- [21] ANCUTI C O, ANCUTI C. Single image dehazing by multi-scale fusion[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2013, **22**(8):3271-3282.