

暗通道和全局估计结合的图像快速去雾方法

桑贤侦^{**}, 朱鸿泰^{*}, 程虎, 张晔

中国电子科技集团公司第五十八研究所, 江苏 无锡 214072

摘要 针对暗通道先验法中存在的透射率估值不准确、景深处易产生光晕效应、天空区域颜色失真以及算法实时性差等问题,提出了一种暗通道和全局估计结合的图像快速去雾方法。首先,求取图像中每个像素点 R、G、B 三个颜色通道强度值的最小值,采用大气散射模型结合全局估计的方法,并利用一种简单、快速的线性模型,求得无块状效应的透射率值;然后,再与暗通道先验法求得的粗略透射率进行线性融合;之后,根据有雾图像特点,对透射率值进行自适应调整,使得透射率估值更准确;最后,复原出去雾后的清晰图像。实验结果表明,所提方法得到的透射率值更准确,能有效地复原出图像的细节信息,避免光晕效应和颜色失真问题;同时,算法的处理速度更快,能更好地满足对实时性要求很高的视觉系统。

关键词 图像去雾; 暗通道; 全局估计; 光晕效应; 颜色失真

中图分类号 TP391

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1010006

Fast Image Defogging Method Based on Dark Channel and Global Estimation

Sang Xianzhen^{**}, Zhu Hongtai^{*}, Cheng Hu, Zhang Ye

The 58th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Wuxi 214072, Jiangsu, China

Abstract A fast image defogging method combining dark channel and global estimation is proposed to address the problems of inaccurate estimation of transmittance value, halo effect at the abrupt change in scene depth of field, color distortion in the sky region, and poor real-time performance of the algorithm in the dark channel prior method. Firstly, the minimum intensity values of the R, G, and B color channels of each pixel in the image are obtained. The atmospheric scattering model combined with the global estimation method is used to obtain the transmittance value without block effect using a simple and fast linear model. The transmittance obtained by the dark channel prior method is then linearly fused with it. The transmitted value is then adaptively adjusted according to the characteristics of the foggy image to improve the accuracy of the transmittance estimation. Finally, the defogged image is restored by combining the atmospheric scattering model. The experimental results show that the transmittance value obtained via the proposed method is more accurate, which can effectively restore the details of the image and avoid the halo effect and color distortion. Simultaneously, the algorithm's processing speed is faster, making it easier to meet the requirements of a high-resolution visual system.

Key words image defogging; dark channel; global estimation; halo effect; color distortion

1 引言

在雾、霾天气条件下,空气中存在着大量的微

小水滴、尘埃等颗粒,受这些微小颗粒的影响,光线在传播过程中容易发生反射、折射以及散射等物理反应,引起视觉上能见度降低、户外相机采集到的

收稿日期: 2021-03-29; 修回日期: 2021-04-28; 录用日期: 2021-05-18

通信作者: *h_t_zhu@163.com; **sangxianzhen@163.com

图像对比度较低、场景目标模糊等问题^[1]。这极大地影响户外视觉监控系统的正常运行,降低图像在目标检测、目标跟踪、摄影测量、户外监控、智能交通、军事侦察以及卫星遥感等方面的应用价值。因此,研究一种快速有效的图像去雾方法,就显得具有非常重要的现实意义和实用价值^[2-3]。

目前,去雾方法根据是否采用物理模型图像可分为两类^[4-5]。一类是基于非物理模型的图像增强方法,该方法根据图像处理过程所针对的空间不同,又分为空间域和频率域^[6]。其中,空间域法是直接对图像的像素值进行处理,常见的方法有:直方图均衡化、图像平滑以及图像锐化等^[7];频率域法是将图像的像素值变换到频率域空间,再进行相应的处理,常见的方法有:小波变换、曲波变换以及同态滤波等^[8]。此外,Land^[9]提出的 Retinex 算法通过调节图像动态范围,来实现对图像的自适应增强,常见的方法有:单尺度 Retinex 算法、多尺度 Retinex 算法以及色彩恢复多尺度 Retinex 算法等^[10-11]。这些方法操作简单,但去雾效果并不理想,甚至在浓雾情况下不能有效处理。

另一类是基于物理模型的图像复原方法,该方法以大气散射模型的数学公式为理论基础,主要通过模拟图像退化的逆过程,达到图像去雾的目的,是目前图像去雾中最常用的方法。其中,Tan 等^[12]利用最大化图像对比度的方法来增加图像的可见度,从而复原出清晰的无雾图像,该方法操作简单,去雾效果明显,但是在薄雾区域颜色过饱和,存在 halo 效应。Fattal 等^[13]根据图像中场景表面的阴影和透射率局部不相关的假设,先求得场景的反射率,再去估计图像的透射率,该方法对薄雾图像去雾效果较好,对浓雾、灰度图像去雾效果不好,甚至存在颜色失真。Tarel 等^[14]通过图像的最小通道来估计大气耗散函数,并利用中值滤波提高算法效率,该方法去雾效果不佳,易产生 halo 效应。He 等^[15]通过对大量无雾图像统计分析,提出了暗通道先验规律,并实现了图像快速去雾,该方法去雾效果明显,但在场景景深突变处,易产生 halo 效应,丢失部分亮度信息和边缘细节。后续采用软抠图的方法对透射率图进行优化,但软抠图算法的计算过程比较复杂,导致时间、空间复杂度很高。之后,又提出了引导滤波的方法对透射率图进行优化,该方法对大多数图像能够进行有效去雾,对含有大量天空区域的图像复原后有明显的失真现象^[16]。后续有采

用双边滤波、中值滤波等方法估计透射率^[17-18],这些方法可提高算法处理速度,但去雾效果会变差。之后,采用非局部全变分正则化、边界约束以及饱和度图估计等方法对透射率进一步优化,这些方法效果并不明显,算法复杂度更高,无法实现实时处理^[19-20]。

此外,Zhu 等^[21]提出了一种基于色彩衰减先验理论的图像去雾方法,该方法去雾程度较弱,线性模型系数依赖数据训练求取。Berman 等^[22]提出了一种基于“雾线”理论的图像去雾方法,该方法可以避免 halo 效应,但对图像浓雾区域、强光区域去雾效果会失效。Cai 等^[23]采用卷积神经网络对透射率估计的方法,实现图像去雾,该方法会造成图像局部区域偏暗。Chen 等^[24]采用 GAN (Generative Adversarial Network) 进行图像去雾,可以避免 halo 效应,由于缺乏训练样本,图像透射率估计不准确,使得去雾效果较弱,图像局部区域偏暗。

针对上述去雾算法存在的不足,本文提出了一种暗通道和全局估计结合的图像快速去雾方法。首先,利用全局估计的方法求得估值偏大、无块状效应的图像透射率;然后,根据暗通道先验法求得图像的粗略透射率,并将两者进行线性融合;之后,再结合原有雾图像的特点,对图像透射率进行自适应调整;最后,复原出去雾后的清晰图像。相比于暗通道结合引导滤波去雾方法,该方法去雾效果更加真实、自然,既能抑制景深处的 halo 效应,又避免了天空区域的颜色失真问题;同时,算法的处理速度更快,更适合实时性要求很高的视觉系统。

2 图像去雾算法

2.1 雾天图像退化模型

1975 年,McCartney 首次提出了大气散射模型^[25],目前常用的图像复原方法都建立在该模型的理论基础之上。该模型认为,成像设备接收到的光线强度主要由两部分构成:场景目标的反射光被空气中悬浮粒子散射后,到达成像设备的光线强度为第一部分分量,即入射光衰减分量;周围的环境光经过空气中悬浮粒子散射后,到达成像设备的光线强度为第二部分分量,即环境光分量。

大气散射模型如图 1 所示。其数学表达式为

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

式中: x 为图像中像素点的位置坐标; $I(x)$ 为原有雾图像; $J(x)$ 为去雾处理后的无雾图像; A 为图像的全局大气光值; $t(x)$ 为透射率,主要表征光线穿透

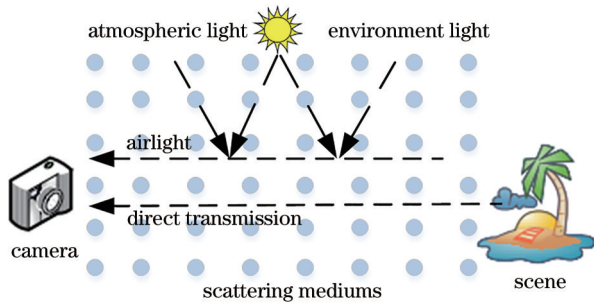


图 1 大气散射模型

Fig. 1 Atmospheric scattering model

大气介质的能力; $J(x)t(x)$ 为场景入射光衰减分量, 主要包含场景目标的真实信息; $A[1-t(x)]$ 为环境光分量, 主要包含大气光成分, 由于受该部分信息影响, 图像场景模糊、图像质量下降。

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

式(2)为均匀介质中透射率的表达式。式中: β 为大气散射系数, 由大气中介质粒子决定; $d(x)$ 为场景景深, 即场景目标到相机的距离。因此, 透射率随着场景深度的增加而减小。

根据大气散射模型的数学公式, 只要获得图像的透射率 $t(x)$ 和大气光值 A , 就可以求得去雾后的图像 $J(x)$ 的数学表达式

$$J(x) = \frac{I(x) - A}{t(x)} + A. \quad (3)$$

实际中, 为了使去雾后的图像显得更加真实、自然, 需要在图像浓雾区域保留少量的雾气, 通常给图像的透射率设定一个下限值 t_0 , 则去雾后的图像 $J(x)$ 可表示为

$$J(x) = \frac{I(x) - A}{\max[t(x), t_0]} + A. \quad (4)$$

在图像去雾过程中, 只有原始有雾图像 $I(x)$ 是已知的, 在求得图像的透射率 $t(x)$ 和大气光值 A 后, 才能获得无雾图像 $J(x)$ 。因此, 图像去雾的难点在于, 如何根据已知的有雾图像信息, 求得准确的图像透射率 $t(x)$ 和大气光值 A 。

2.2 暗通道先验去雾算法

暗通道先验规律是一种经验性规律, 何凯明等^[15]通过对大量户外清晰图像的分析, 发现在这些图像中, 除天空区域以外每个像素点的 R、G、B 三个颜色通道中至少有一个通道像素值最低, 并且在图像的局部区域中的最小值接近于 0, 称为暗原色, 其数学表达式为

$$J^{\text{dark}}(x) = \min_{y \in \Omega(x)} \left(\min_{c \in \{R, G, B\}} (J^c(y)) \right) \rightarrow 0, \quad (5)$$

式中: $J^{\text{dark}}(x)$ 为图像的暗原色图, 即暗通道图; c 为像素点 y 的三个颜色通道; $\Omega(x)$ 为以像素点 x 为中心的局部区域; y 为像素点的位置; $\min_{c \in \{R, G, B\}} (J^c(y))$ 为每个像素点三个颜色通道亮度的最小值, 即图像的最小值通道; $\min_{y \in \Omega(x)} \left(\min_{c \in \{R, G, B\}} (J^c(y)) \right)$ 为局部区域的最小值, 即图像的暗通道图。

由统计规律发现, 图像中自然景观的投影、景物的阴影、色彩鲜艳的物体以及颜色较暗物体的暗通道值都很低, 在受雾、霾干扰后, 图像中景物的暗通道图会变亮。因此, 暗通道图能够反映雾浓度大小, 可以用来估计图像的透射率。

首先, 假定大气光值 A 已知, 结合式(1)对图像局部区域求最小值, 可得

$$\min_{x \in \Omega(x)} \left(\min_{c \in \{R, G, B\}} I^c(x) \right) = \min_{x \in \Omega(x)} \left(\min_{c \in \{R, G, B\}} J^c(x) \right) \times t(x) + A[1-t(x)]. \quad (6)$$

由暗通道先验知识, 可得

$$\min_{x \in \Omega(x)} \left(\min_{c \in \{R, G, B\}} J^c(x) \right) \rightarrow 0. \quad (7)$$

那么, 图像的粗略透射率为

$$t(x) = 1 - \omega_0 \frac{\min_{x \in \Omega(x)} \left(\min_{c \in \{R, G, B\}} I^c(x) \right)}{A}. \quad (8)$$

为了防止透射率值 $t(x)$ 趋近于 0, 增加了参数 ω_0 , 通常选取 $\omega_0 = 0.95$, ω_0 的值越大, 图像透射率值越小, 图像去雾越彻底。

一般情况下, 选择原有雾图像中亮度最大的像素值作为大气光值 A , 实际上, 图像的一些白色物体的像素值往往会大于大气光值, 此时, 选取的大气光值就会偏大。由于暗通道图可以反映图像中雾的浓度大小, 因此, 可利用暗通道图求取大气光值 A 。具体步骤如下: 1) 先将暗通道图中像素值按大小排序, 选取其中前 0.1% 最亮的像素点的位置; 2) 根据这些像素点的位置, 选取原有雾图像中对应的像素点; 3) 再选取原有雾图像像素点中最亮的像素值作为大气光值 A 。最后, 根据大气散射模型, 结合公式(4), 就可以复原出清晰图像。

该方法去雾效果如图 2 所示。可以看出, 在树叶的边缘、建筑物与远方区域边缘处有明显的 halo 效应, 主要原因是采用了局部区域最小值的方法求得暗通道图, 使得图像的透射率在局部区域内相等, 从而形成了块状效应。由式(2)可知, 图像的透射率随着场景深度的增大而减小, 在场景景深突变处透射率值并不相等。

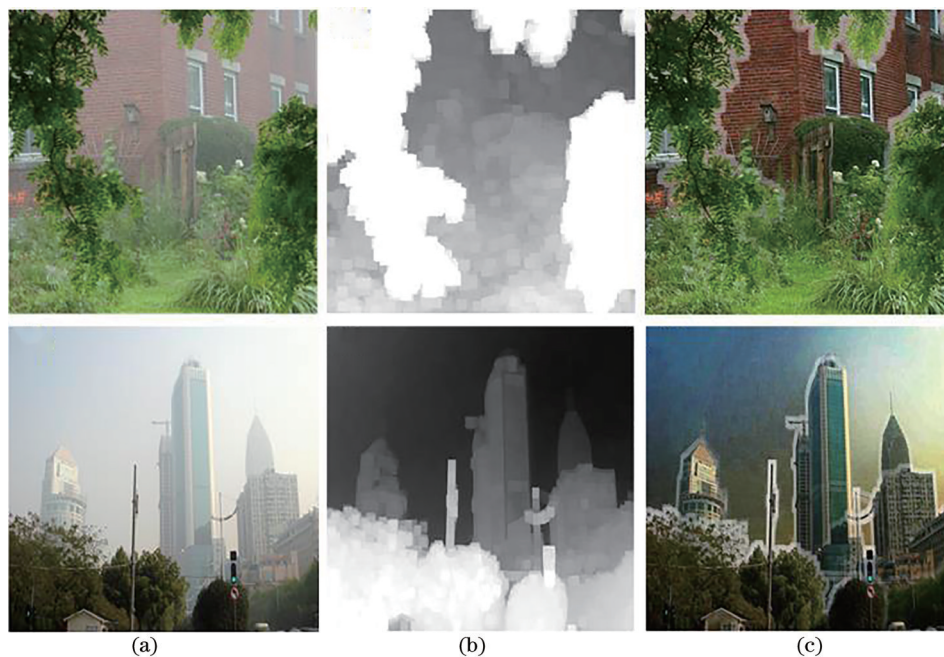


图 2 暗通道法图像去雾效果。(a)原有雾图像;(b)透射率图;(c)去雾后图像

Fig. 2 Image defogging effect of dark channel method. (a) Original foggy image; (b) transmittance map; (c) image after defogging

由式(6)、(7)、(8)可知,实际中求得的透射率值会比真实值偏小,又由于暗通道先验规律不适用于天空区域场景,求得的透射率值比真实值偏小较多,从而导致天空区域去雾处理后容易出现颜色失真;此外,在图像的浓雾区域,可以通过减弱图像去雾程度的方法避免去雾处理后的颜色失真问题。

2.3 所提去雾算法

采用暗通道结合引导滤波细化透射率的方法进行图像去雾,可以在一定程度上避免图像的 halo 效应,但天空区域还存在颜色失真问题。提出了一种暗通道结合全局估计的去雾方法,其算法过程如图 3 所示。

首先,为了避免暗通道法对大气光值的估值不准确,根据暗通道图中前 0.1% 最亮的像素点的位置,

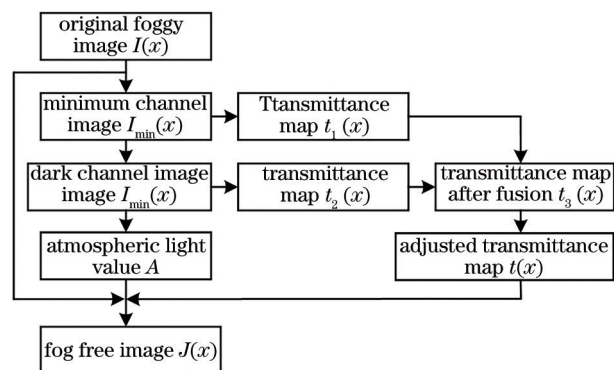


图 3 所提算法流程图

Fig. 3 Flow chart of the proposed algorithm

求得原有雾图像中这些像素点的均值,作为图像的全局大气光值 A 。采用暗通道先验法求得图像的粗略透射率图 $t_2(x)$;然后,对式(1)两边取图像的三个颜色通道值的最小值得

$$t(x) = \frac{A - \min_{c \in \{R, G, B\}} (I^c(x))}{A - \min_{c \in \{R, G, B\}} (J^c(x))}, \quad (9)$$

式中:令 $I_{\min}^c(x) = \min_{c \in \{R, G, B\}} (I^c(x))$, $J_{\min}^c(x) = \min_{c \in \{R, G, B\}} (J^c(x))$ 分别为原有雾图像和复原后无雾图像的最小值通道。由暗通道先验规律可知, $0 \leq J_{\min}^c(x) \leq I_{\min}^c(x) \leq 255$, 两者大小关系如图 4(a) 所示,其数学表达式为

$$I_{\min}^c(x) = J_{\min}^c(x) + \beta(x), \quad (10)$$

式中: $\beta(x)$ 为 $I_{\min}^c(x)$ 中的雾气分量, $J_{\min}^c(x)$ 为 $I_{\min}^c(x)$ 中的非雾气分量。

由暗通道先验规律,在图像的局部区域中有一个 $J_{\min}^c(x)$ 的值近似等于 0,那么,在整幅图像中 $\min(J_{\min}^c(x))$ 的值必然近似为 0。结合图 4(a) 可知,当 $J_{\min}^c(x)$ 的值近似为 0 时, $I_{\min}^c(x)$ 中只包含雾气分量或处于浓雾情况;当 $J_{\min}^c(x)$ 的值逐渐增大时, $I_{\min}^c(x)$ 的值逐渐增大或 $I_{\min}^c(x)$ 中的雾气分量逐渐变小;当 $J_{\min}^c(x)$ 的值近似等于 $I_{\min}^c(x)$ 时, $I_{\min}^c(x)$ 中不包含雾气分量或处于薄雾情况。

本文采用全局估计的方法求 $J_{\min}^c(x)$ 的值。假定图像中的雾气分量较小并且均匀分布, $I_{\min}^c(x)$ 中

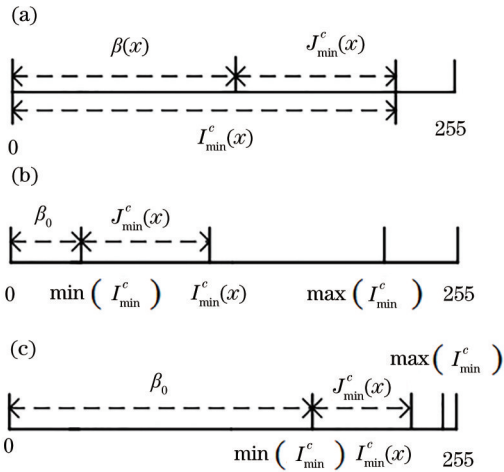


图 4 $I_{\min}^c(x)$ 和 $J_{\min}^c(x)$ 之间的大小关系。(a) 有雾图像；
 (b) 图像中雾气分量较小；(c) 图像中雾气分量较大
 Fig. 4 Relationship between $I_{\min}^c(x)$ and $J_{\min}^c(x)$. (a) Foggy image; (b) the fog component in the image is small; (c) the fog component in the image is large

的最大值为 $\max(I_{\min}^c)$ 、最小值为 $\min(I_{\min}^c)$ ， $I_{\min}^c(x)$ 中的 $\beta(x)$ 分量为 β_0 ，其大小关系如图 4(b) 所示。此时，在图像中，当 $J_{\min}^c(x)$ 的值近似为 0 时， $I_{\min}^c(x)$ 中只包含雾气分量，其值为 $\min(I_{\min}^c)$ ；当 $J_{\min}^c(x)$ 的值逐渐增大时， $I_{\min}^c(x)$ 的值也逐渐变大；当 $I_{\min}^c(x)$ 的值逐渐增大到 $\max(I_{\min}^c)$ 时，该位置的雾气分量占比较小，可以认为 $J_{\min}^c(x)$ 的值近似等于 $I_{\min}^c(x)$ 。分析可知，当 $I_{\min}^c(x)$ 从只包含雾气分量到雾气分量占最小的变化过程用数学表达式可表示为

$$\frac{J_{\min}^c(x)}{I_{\min}^c(x)} = \frac{I_{\min}^c(x) - \beta_0}{I_{\min}^c(x)}, \quad (11)$$

$$\frac{J_{\min}^c(x)}{\max(I_{\min}^c(x)) - \min(I_{\min}^c(x))} = \frac{I_{\min}^c(x) - \min(I_{\min}^c(x))}{\max(I_{\min}^c(x)) - \min(I_{\min}^c(x))}, \quad (12)$$

式(11)、(12)的值有相同的变化趋势，那么式(11)、(12)采用一种简单、快速的线性模型近似表示为

$$\frac{J_{\min}^c(x)}{I_{\min}^c(x)} = \frac{I_{\min}^c(x) - \min(I_{\min}^c(x))}{\max(I_{\min}^c(x)) - \min(I_{\min}^c(x))}, \quad (13)$$

结合式(9)，图像的透射率为

$$t_1(x) = \frac{A - I_{\min}^c(x)}{A - \frac{I_{\min}^c(x) - \min(I_{\min}^c(x))}{\max(I_{\min}^c(x)) - \min(I_{\min}^c(x))} I_{\min}^c(x)}. \quad (14)$$

现实中，图像中的雾气并非均匀分布， $\beta(x)$ 并非恒等于 β_0 。当 $I_{\min}^c(x)$ 接近于 $\min(I_{\min}^c)$ ，即在图像

浓雾区域时，求得 $J_{\min}^c(x)$ 的值会偏大；当 $I_{\min}^c(x)$ 接近于 $\max(I_{\min}^c)$ ，即在图像薄雾区域时，此时认为 $J_{\min}^c(x)$ 的值近似等于 $I_{\min}^c(x)$ ，使得 $J_{\min}^c(x)$ 的值也会偏大。当 $J_{\min}^c(x)$ 偏大时，求得的图像透射率值偏大。另外，当图像中的雾气分量较大并且均匀分布时，图像整体处于浓雾状态， $J_{\min}^c(x)$ 和 $I_{\min}^c(x)$ 的值大小关系如图 4(c) 所示，分析可知，采用式(14)求得的图像透射率值整体上都会偏大，这与上述分析中图像浓雾区域求得的透射率值偏大的结果一致。由于暗通道先验法求得透射率 $t_2(x)$ 具有偏小的特点，因此，本文采用将两者进行线性融合的方法，使求得的图像透射率值更接近于真实值，具体可表示为

$$t_3(x) = a \times t_1(x) + (1 - a) \times t_2(x), \quad (15)$$

式中， a 为比例系数，大小为 $[0, 1]$ ，实际应用中，可以通过调节 a 的值来实现最佳去雾效果。本文实验中，选择 a 的值为 0.5 时，求得的透射率 $t_3(x)$ 更接近于真实值。在原有雾图像中天空区域或浓雾区域中，根据其像素值的大小与大气光值相近的特点，通过设定阈值对透射率进行自适应调整，避免去雾处理后出现颜色失真问题^[26]，具体可表示为

$$t(x) = \min \left[\max \left(\frac{k}{|I(x) - A| + \varpi}, 1 \right) \times t_3(x), 1 \right], \quad (16)$$

式中： k 为阈值，大小为 $[0, 1]$ ，可以根据图像中雾的分布情况进行调整，本文取值为 0.12； ϖ 为正则化参数，其值为 0.001。

最后，结合式(4)求得去雾后的图像。

3 实验结果与分析

为了验证所提方法的可行性和实时性，在计算机上使用 Intel(R) Core(TM) i5-1035G1 处理器进行图像去雾处理。采用定性分析和定量分析两种方法，对图像去雾效果进行评价，定性分析主要是从人对图像的感受角度进行评价分析，主要包括图像中的边缘细节、颜色失真以及视觉效果等；定量分析主要是从人的视觉感受机制角度出发，对图像质量进行评价分析，本文主要从有效细节强度、色调还原程度、结构相似性、综合评测以及算法处理时间等方面进行定量分析。

有效细节强度表示图像的细节表现能力，其值越大说明图像场景景深突变处的边缘细节越好，halo 效应越不明显；色调还原程度表示图像的真实、自然程度，其值越大说明图像的失真程度越小；结

构相似性表示对图像场景结构的改变情况,其值越大说明与原图像结构相似度越高。为了从整体角度分析图像质量的好坏,通常用以上 3 个评价指标的乘积作为综合评测指标进行分析。

为了验证本文采用的暗通道结合全局估计 (Dark channel combined with global estimation, DC-GE) 方法能更好地改善场景边缘细节,减弱 halo 效应,选取了 3 张场景景深突变较大的图像进行去雾处理,并与暗通道结合引导滤波 (Dark channel combined with guided filtering, DC-GF) 法以及 Zhu^[21]、Berman^[22]、Cai^[23]、Chen^[24] 的方法进行比较,如图 5 所示。其中,方框内为去雾处理后存在的 halo 效应、去雾效果较弱、颜色失真、局部偏暗以及不能有效去雾的区域。可以看出,DC-GF 法去雾

后,在电线杆和树叶边缘存在 halo 效应。Zhu 的方法去雾后,如图 5(c) 所示,在 Img 1 图像中去雾效果较弱,在 Img 2 和 Img 3 图像的电线杆和树叶边缘存在 halo 效应。Berman 的方法去雾后,如图 5(d) 所示,在 Img 1 图像中存在颜色过饱和问题,在 Img 2 和 Img 3 图像的浓雾区域去雾效果较差。Cai 的方法去雾后,如图 5(e) 所示,图像的去雾效果较弱。Chen 的方法去雾后,如图 5(f) 所示,Img 1 图像的局部区域较暗,Img 2 图像去雾效果较弱,Img 3 图像去雾效果较好。本文所提方法,如图 5(g) 所示,在 Img 1 图像中削弱了树叶边缘的 halo 效应,去雾效果更加清晰、自然,在 Img 2 图像中电线杆周边的 halo 效应更小,在 Img 3 图像中树叶边缘的细节更明显,去雾效果更好。

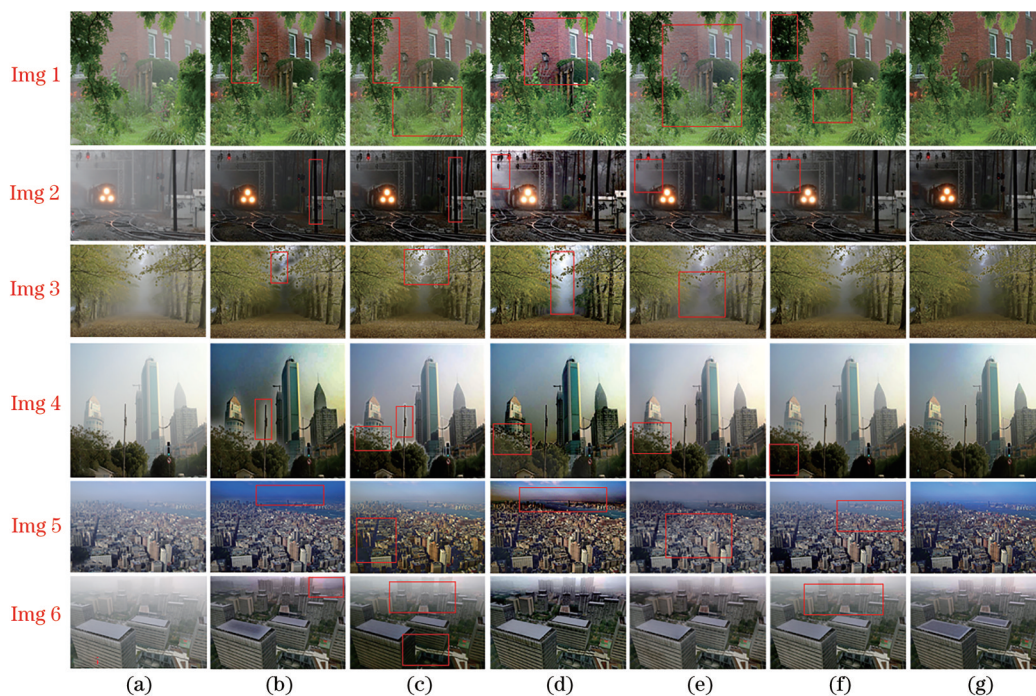


图 5 不同算法对包含景深突变和天空区域的图像去雾效果。(a) 原有雾图像;(b) DC-GF 方法;(c) Zhu 的方法;(d) Berman 的方法;(e) Cai 的方法;(f) Chen 的方法;(g) DC-GE 方法

Fig. 5 Dehazing results of hazy images with abrupt change of depth of field and sky region by different methods. (a) Original foggy image; (b) DC-GF method; (c) Zhu's method; (d) Berman's method; (e) Cai's method; (f) Chen's method; (g) DC-GE method

此外,为了验证所提方法可以避免天空区域颜色失真问题,针对包含天空区域的不同,选取了 3 张图像进行处理,如图 5 所示。可以看出,DC-GF 法去雾后,在图像的天空区域存在颜色失真问题,如图 5(b) 所示。Zhu 的方法去雾后,在图像的天空区域去雾效果较差,局部区域偏暗,存在 halo 效应。Berman 的方法去雾后,在薄雾区域去雾效果较好,在浓雾区域较差,对 Img 6 图像的去雾效果较好。

Cai 的方法去雾后,在图像的天空区域去雾程度较弱,在天空区域没有颜色失真问题,Img 6 图像的去雾效果较好。Chen 的方法去雾后,Img 4 图像的局部区域较暗,Img 5 和 Img 6 图像的去雾效果较差。本文所提方法,在图像的天空区域更接近于真实场景,去雾效果更加清晰的同时,又能有效避免颜色失真问题。

对图像进行定量分析,如表 1 所示。在有效细

表 1 图像的有效细节强度、色调还原程度、结构相似性以及综合评测结果

Table 1 Effective detail intensity, hue restoration degree, structural similarity and comprehensive evaluation of the obtained image

Image	Method	Effective detail intensity	Hue restoration degree	Structural similarity	Comprehensive evaluation
Img 1	DC-GF	0.394	0.513	0.834	0.169
	Zhu	0.369	0.74	0.937	0.256
	Berman	0.267	0.781	0.84	0.175
	Cai	0.406	0.653	0.916	0.243
	Chen	0.376	0.818	0.897	0.276
	DC-GE	0.408	0.561	0.868	0.199
Img 2	DC-GF	0.664	0.608	0.568	0.229
	Zhu	0.652	0.532	0.703	0.244
	Berman	0.501	0.529	0.517	0.137
	Cai	0.653	0.597	0.654	0.255
	Chen	0.608	0.623	0.693	0.262
	DC-GE	0.667	0.612	0.609	0.249
Img 3	DC-GF	0.370	0.625	0.797	0.192
	Zhu	0.365	0.681	0.863	0.214
	Berman	0.306	0.661	0.781	0.158
	Cai	0.386	0.637	0.914	0.225
	Chen	0.357	0.771	0.957	0.263
	DC-GE	0.389	0.656	0.810	0.207
Img 4	DC-GF	0.583	0.543	0.689	0.218
	Zhu	0.510	0.54	0.791	0.218
	Berman	0.519	0.678	0.723	0.254
	Cai	0.502	0.36	0.838	0.151
	Chen	0.523	0.602	0.851	0.268
	DC-GE	0.516	0.86	0.847	0.376
Img 5	DC-GF	0.302	0.524	0.817	0.129
	Zhu	0.28	0.687	0.866	0.167
	Berman	0.271	0.65	0.696	0.123
	Cai	0.32	0.759	0.898	0.218
	Chen	0.358	0.542	0.879	0.171
	DC-GE	0.283	0.773	0.832	0.182
Img 6	DC-GF	0.483	0.61	0.706	0.208
	Zhu	0.569	0.844	0.685	0.329
	Berman	0.458	0.549	0.57	0.143
	Cai	0.469	0.583	0.844	0.231
	Chen	0.506	0.681	0.753	0.259
	DC-GE	0.472	0.651	0.765	0.235

节强度结果中,所提方法的值都较大,说明去雾效果最好,由于减弱了天空区域的去雾程度,包含天空区域图像的值略偏小。在色调还原程度、结构相似性以及综合评测结果中,Zhu、Cai以及Chen的方法计算值都较大,主要是因为这些方法的去雾效果较差,去雾处理后图像与原图的色调还原程度、结构相似性更好,这与定性分析的结果一致,而本文

所提方法的值比DC-GF的方法都大,这说明所提方法既有效避免了halo效应,又解决了颜色失真问题。

从算法原理上进行复杂度分析,Zhu和Berman的方法都是在DC-GF方法的基础上改进的,其算法复杂度比DC-GF更高,而Cai和Chen的方法属于深度学习的方法,算法中包含较多的卷积运算,

其复杂度远高于 DC-GF 方法。文中在同一处理平台下,计算了 DC-GF 法和所提方法的处理时

间,如表 2 所示。可以看出,所提方法的处理时间更短。

表 2 算法的处理时间

Table 2 Processing time of the algorithm

Images	Img 1		Img 2		Img 3		Img 4		Img 5		Img 6	
Method	DC-GF	DC-GE	DC-GF	DC-GE	DC-GF	DC-GE	DC-GF	DC-GE	DC-GF	DC-GE	DC-GF	DC-GE
Time /s	0.405	0.094	0.452	0.109	1.479	0.234	0.577	0.078	1.513	0.265	0.624	0.109

综上所述,本文所提方法的去雾效果更好、算法的实时性更高。

4 结 论

针对暗通道先验去雾算法中存在的图像透射率估值偏小、易产生 halo 效应以及颜色失真问题,提出了一种暗通道和全局估计结合的图像快速去雾方法。首先,利用全局估计的方法求得估值偏大、无块状效应的图像透射率;然后,根据暗通道先验法求得图像的粗略透射率,并将两者进行线性融合;之后,再结合原有雾图像的特点,对图像透射率进行自适应调整,从而求得更准确的图像透射率值,使复原后图像的去雾效果更好。实验中,选择几组场景景深突变明显和包含天空区域的图像进行去雾处理,对图像的定性与定量分析结果表明:所提方法能更有效恢复图像中的细节信息,并能有效避免 halo 效应和颜色失真问题;同时,算法的处理速度更快,更适合应用在实时性要求很高的视觉系统中。

参 考 文 献

- [1] 代书博, 徐伟, 朴永杰, 等. 基于暗原色先验的遥感图像去雾方法[J]. 光学学报, 2017, 37(3): 0328002.
Dai S B, Xu W, Piao Y J, et al. Remote sensing image defogging based on dark channel prior[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(3): 0328002.
- [2] Yang Y, Sang X Z, Yang S M, et al. High-precision vision sensor method for dam surface displacement measurement[J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(24): 12475-12481.
- [3] 谭伟, 曹世翔, 齐文雯, 等. 一种高分辨率遥感图像去雾霾方法[J]. 光学学报, 2019, 39(3): 0301005.
Tan W, Cao S X, Qi W W, et al. A haze removal method for high-resolution remote sensing images[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(3): 0301005.
- [4] 杨燕, 杜康, 武旭栋. 基于改进线性变换的迭代优化去雾算法[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(6): 0610011.
Yang Y, Du K, Wu X D. Iterative optimization de-
- hazing algorithm based on improved linear transformation[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(6): 0610011.
- [5] Sang X Z, Yang Y, Hou X H. Fog removal method of slope monitoring image based on vision detection [C]//2018 37th Chinese Control Conference (CCC), July 25-27, 2018, Wuhan, China. New York: IEEE Press, 2018: 9422-9472.
- [6] Xu Y, Wen J, Fei L K, et al. Review of video and image defogging algorithms and related studies on image restoration and enhancement[J]. IEEE Access, 2016, 4: 165-188.
- [7] Wang W C, Yuan X H. Recent advances in image dehazing[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2017, 4(3): 410-436.
- [8] 陈永, 卢晨涛. 基于超像素分割和暗亮通道结合的单幅图像去雾[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(16): 161023.
Chen Y, Lu C T. Single image dehazing based on superpixel segmentation combined with dark-bright channels[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(16): 161023.
- [9] Land E H. Recent advances in Retinex theory[J]. Vision Research, 1986, 26(1): 7-21.
- [10] 杨爱萍, 白焯焯. 基于 Retinex 理论和暗通道先验的夜间图像去雾算法[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(4): 041002.
Yang A P, Bai H H. Nighttime image defogging based on the theory of Retinex and dark channel prior [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(4): 041002.
- [11] 彭静, 薛奉金, 苑玉彬. 基于多尺度 Retinex 和暗通道的自适应图像去雾算法[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(4): 0410004.
Peng J, Xue F J, Yuan Y B. Adaptive image defogging algorithm combining multi-scale Retinex and dark channel[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(4): 0410004.
- [12] Tan R T. Visibility in bad weather from a single image[C]//2008 IEEE Conference on Computer

- Vision and Pattern Recognition, June 23-28, 2008, Anchorage, AK, USA. New York: IEEE Press, 2008: 10139948.
- [13] Fattal R. Single image dehazing[J]. ACM Transactions on Graphics, 2008, 27(3): 721-729.
- [14] Tarel J P, Hautière 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 Press, 2009: 2201-2208.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 王振东, 靖旭, 孙国栋, 等. 基于区域对比度约束的暗通道图像去雾[J]. 中国激光, 2019, 46(8): 0810003.
Wang Z D, Jing X, Sun G D, et al. Image dehazing of dark channels based on area contrast constraint[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(8): 0810003.
- [18] 胡薇, 高银. 基于边界限制的自适应双边滤波单幅图像去雾算法[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(24): 241505.
Hu W, Gao Y. Single image dehazing method based on self-adaptive bilateral-filtering with boundary restriction[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(24): 241505.
- [19] Shao Y J, Li L, Ren W Q, et al. Domain adaptation for image dehazing[C]//2020 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), June 13-19, 2020, Seattle, WA, USA. New York: IEEE Press, 2020: 2805-2814.
- [20] Kim S E, Park T H, Eom I K. Fast single image dehazing using saturation based transmission map estimation[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2020, 29: 1985-1998.
- [21] 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.
- [22] Berman D, Treibitz T, Avidan S. Single image dehazing using haze-lines[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2020, 42(3): 720-734.
- [23] 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.
- [24] Chen D D, He M M, Fan Q N, et al. Gated context aggregation network for image dehazing and deraining [C]//2019 IEEE Winter Conference on Applications of Computer Vision, January 7-11, 2019, Waikoloa, HI, USA. New York: IEEE Press, 2019: 1375-1383.
- [25] Howard J N. Scattering phenomena: optics of the atmosphere. Scattering by molecules and particles. McCartney E J. Wiley, New York, 1976. xviii, 408 pp., illus. \$24.95[J]. Science, 1977, 196(4294): 1084-1085.
- [26] 蒋建国, 侯天峰, 齐美彬. 改进的基于暗原色先验的图像去雾算法[J]. 电路与系统学报, 2011, 16(2): 7-12.
Jiang J G, Hou T F, Qi M B. Improved algorithm on image haze removal using dark channel prior[J]. Journal of Circuits and Systems, 2011, 16(2): 7-12.