

基于亮通道和暗通道结合的图像去雾

卢辉斌¹, 赵燕芳², 赵永杰², 温淑焕^{2*}, 马金荣², Lam Hak Keung³, 王洪斌²

¹燕山大学信息科学与工程学院河北省信息传输与信号处理重点实验室, 河北 秦皇岛 066004;

²燕山大学河北省工业计算机控制工程重点实验室, 河北 秦皇岛 066004;

³Department of Informatics, King's College London, Strand, London, WC2R 2LS, United Kingdom

摘要 低照度环境下图片质量会下降。同时, 悬浮在空气中的烟雾、粉尘等物质形成的雾、霾, 会导致图像的细节模糊不清, 对户外拍照和计算机视觉应用造成了极大的影响。因此, 对退化图像进行去雾处理, 提高图像质量, 在图像处理 and 计算机视觉领域具有非常重要的应用价值。提出一种基于亮通道和暗通道结合的雾霾天气图像去雾算法。基于退化图像的物理模型, 提出一种空气光散射模型, 通过亮通道和暗通道的结合来估计大气光值和透射率。该算法可以解决有雾图像恢复时空区域的颜色失真问题, 恢复图像的细节和颜色, 提高图像的视觉效果。仿真结果表明, 本文算法优于多尺度 Retinex 图像去雾算法。

关键词 机器视觉; 图像去雾; 亮通道和暗通道; 多尺度 Retinex 算法; 透射率

中图分类号 TP391.41

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.1115004

Image Defogging Based on Combination of Image Bright and Dark Channels

Lu Huibin¹, Zhao Yanfang², Zhao Yongjie², Wen Shuhuan^{2*},
Ma Jinrong², Lam Hak Keung³, Wang Hongbin²

¹Key Lab of Information Transmission and Signal Processing of Hebei Province, School of Information Science and Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China;

²Key Lab of Industrial Computer Control Engineering of Hebei Province, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China;

³Department of Informatics, King's College London, Strand, London, WC2R 2LS, United Kingdom

Abstract The picture quality is declined in the low illumination environment. Meanwhile, the fog and haze formed by smoke, dust and other substances suspended in the air will cause blurred image details, which have a great impact on outdoor photography and computer vision. Therefore, it has important application value for image processing and computer vision by defogging degraded images to improve image quality. We propose an image defogging algorithm based on the combination of bright and dark channel in fog and haze weather. A model of the air light scattering is proposed based on the physical model of degraded image. Air light value and transmissivity are estimated by using the combination of light channel prior and dark channel prior. The algorithm can solve color distortion problem of sky area when fog-free image is restored, recover the image details and color, and improve the vision effect of the image. Evaluation parameters are used to compare the image quality. Simulation results show that the algorithm proposed in this paper is better than multi-scale Retinex image defogging algorithm.

Key words machine vision; image defogging; bright and dark channel; multi-scale Retinex algorithm; transmissivity

OCIS codes 150.1135; 150.6910; 150.4065

1 引 言

在现实生活中, 悬浮在空气中的烟雾、粉尘等物

质形成的雾、霾, 会导致图像质量下降, 这些图像被称为退化图像。退化图像的对比度下降, 有的内容甚至模糊不清, 这对户外拍照和计算机视觉应用造

收稿日期: 2018-05-02; 修回日期: 2018-06-05; 录用日期: 2018-06-19

基金项目: 国家自然科学基金(61773333, 61473248)

* E-mail: swen@ysu.edu.cn

成了不利影响。对退化图像进行去雾处理,提高图像质量,改善图像的视觉效果,在图像处理和计算机视觉应用领域具有非常重要的现实意义。

图像去雾技术^[1-2]主要应用的物理模型是大气散射模型,通过模拟退化图像形成过程的逆反方向,分析估计出模型中的参数,从而恢复清晰的图像。大气散射的物理模型^[3]是由 Cartney 于 1975 年提出的,该模型为图像去雾研究工作奠定了坚实的基础。1997 年,Cozman 等^[4]利用该理论模型计算出图像的场景深度信息。日益严重的雾霾天气导致图像的有用信息无法获取,给人们的生活带来诸多不便。国内外有诸多学者投入到图像去雾算法的研究中^[5-7]。Tan^[8]提出最大化局部对比度的去雾方法,即以无雾图像比有雾图像的对比度更明显为先验条件,假设局部环境光为常数,构造关于图像边缘信息变化的函数,最大化复原图像的局部对比度,改善图像的能见度,从而达到去雾的目的。该方法能够改善雾天图片的可视度,但无雾图像的部分颜色过于饱和导致失真。Fattal^[9]依据物体表面的反射率和传输值局部统计不相关的先验,利用独立成分分析方法估计场景反射率。该方法建立在大量图片的数理统计基础之上,要求图片具有鲜明的色彩,因此,可以满足薄雾天的去雾效果,但对浓雾天的去雾效果不尽理想。2011 年,He 等^[10]提出一种基于暗通道先验原理的去雾算法,为图像去雾技术提供了重大突破。该方法能够获得较好的去雾效果,但采用的 Soft Matting 算法对传输图进行优化,使得处理速度变慢、实时性变差。

之后,大量基于暗通道先验的图像去雾算法陆续被提出。He 等^[11]提出用引导滤波代替 Soft Matting 算法对传输图进行优化,但该算法在恢复天空区域的过程中容易出现颜色失真现象。Tarel 等^[12]对图像进行白平衡后,采用中值滤波的变形形式估计大气耗散函数,但该方法易产生光晕现象。此后,研究人员相继提出结合混合双边滤波^[13]、均值滤波^[14]的暗通道先验算法,以及多尺度 Retinex 算法^[15]等,以提高算法的有效性。但是,这些算法对于包含大面积天空或白色物体的雾霾图像的去雾效果较差。

针对上述情况,本文提出基于亮通道和暗通道先验结合的图像去雾算法。首先,对大气光散射模型进行改进;其次,运用亮通道先验和暗通道先验结合的方法估计大气光值和透射率;再次,根据加权引导滤波算法估计透射率,并恢复无雾图像;最后,通

过仿真验证本文算法的有效性和可行性。

2 退化图像的物理模型

退化图像的形成主要是由大气光散射造成的。大气光与空气中悬浮着的灰尘、烟雾等粒径较大的气溶胶粒子发生作用,引起光线的方向、颜色、亮度等特性发生改变,导致视觉系统捕获的场景图像颜色、对比度,以及分辨率等特征明显减弱。其中,大气光的散射由入射光衰减和环境光成像两部分组成^[16]。

在计算机视觉和计算机图形中,用于描述雾、霾环境下大气光散射模型(有雾图像形成模型)的方程^[17-19]如下:

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

式中 $I(x)$ 为雾霾图像, $J(x)$ 为无雾图像或者场景反射, $t(x)$ 为透射率或传输图, A 为全局大气光, x 为图像的像素坐标。图像去雾的原理就是,根据已知的有雾图像 $I(x)$ 估测出大气光值 A 和透射率 $t(x)$,然后将大气光值 A 和透射率 $t(x)$ 代入到大气散射模型中,求得唯一的未知解,恢复清晰的无雾图像 $J(x)$ 。

(1)式中的 $J(x)t(x)$ 表示直接衰减, $A[1 - t(x)]$ 表示大气光。直接衰减描述大气光经过媒介反射、衰减到达相机的部分,即导致图像颜色、亮度变化的过程;大气光表示光通过雾、霾、灰尘等散射或者扩散到空气中的部分。在均匀介质中,透射率 $t(x)$ 的表达式为

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

式中 β 为大气散射系数, $d(x)$ 为相机与成物像点之间的距离,称为场景深度。透射率随场景深度变化而变化。

在大气散射模型中进行图像去雾时,通常假设全局大气光 A 是固定的,即图像中每个像素点对应的大气光强度是一致的。然而,观察图像可以发现,大气光强度在不同区域的分布并不相同,如图 1 所示,图 1(b)~(d) 分别拥有不同的大气光强度。因此,全局大气光 A 可表示为 $A(x)$,改进的大气散射模型为

$$I(x) = J(x)t(x) + A(x)[1 - t(x)]. \quad (3)$$

3 基于亮通道和暗通道相结合的图像去雾算法

基于暗通道先验原理的图像去雾算法具有较好

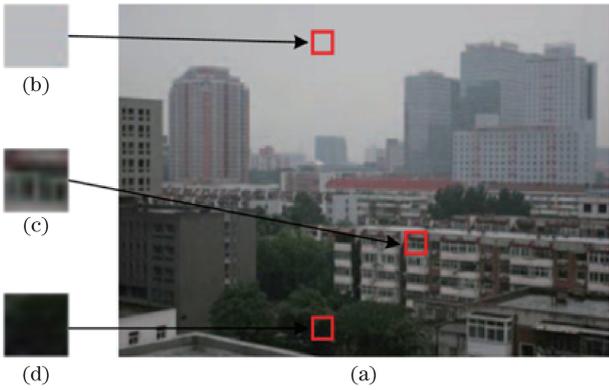


图 1 不同区域不同的大气光强度

Fig. 1 Different light intensity in different regions

的去雾效果,但是对于天空区域或者白色物体地方容易出现色彩偏差和过增强现象。针对这一问题,提出基于亮通道和暗通道结合的先验图像去雾算法,采用加权引导滤波估计透射率的算法平滑传输图,显示较多的细节,解决色彩偏差和过增强问题。本文提出的基于亮通道和暗通道结合的先验图像去雾算法的流程如图 2 所示,具体步骤如下:

- 1) 根据亮通道和暗通道先验原理,分别提取亮通道图像和暗通道图像;
- 2) 将亮通道图像像素强度接近无雾图像大气光,与暗通道图像求取符合条件像素点平均值的方法相结合,得到大气光;
- 3) 借助于大气光散射模型和大气光,估测透射率;
- 4) 采用加权引导滤波算法优化透射率,平滑并细化图像;
- 5) 通过优化估测透射率、大气光和大气光散射模型,对输入图像进行去雾处理,获取最终的无雾图像。

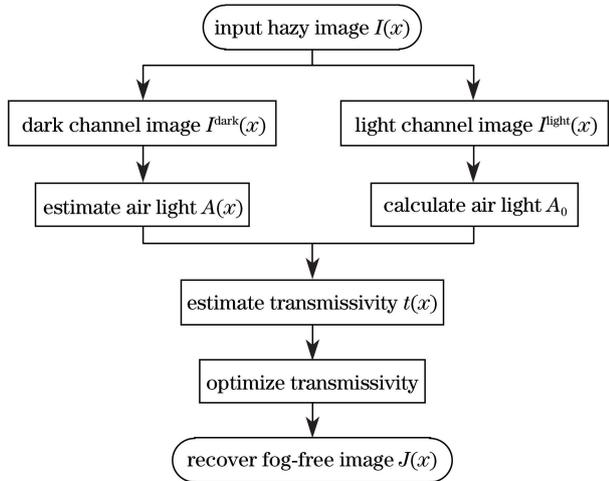


图 2 图像去雾算法流程图

Fig. 2 Flow chart of image defogging algorithm

3.1 亮通道和暗通道介绍

暗通道先验的基本思想是,基于对大量无雾图像的统计观察发现,在绝大多数非天空的局部区域里,某一些像素总会有至少一个颜色通道具有很低的强度。对于任意的自然无雾图像 J ,其暗通道表达式为

$$J^{\text{dark}}(x) = \min_{c \in \{R,G,B\}} [\min_{y \in \Omega(x)} J^c(y)], \quad (4)$$

式中 $J^c(y)$ 表示彩色图像 J 的某一 $R、G、B$ 颜色通道, $\Omega(x)$ 表示以像素点 x 为中心的邻域窗口。暗通道先验理论指出,非天空区域里无雾图像的暗通道强度很小,且趋于 0,即:

$$J^{\text{dark}}(x) \rightarrow 0. \quad (5)$$

与暗通道先验相似,亮通道先验^[16]的基本思想是,在大多模糊图像中,某一些像素总会有至少一个颜色通道具有较大的强度。对于任意图像 I ,其亮通道表达式为

$$I^{\text{light}}(x) = \max_{c \in \{R,G,B\}} [\max_{y \in \Omega(x)} I^c(y)], \quad (6)$$

式中 $I^c(y)$ 表示彩色图像 I 的某一 $R、G、B$ 颜色通道, $\Omega(x)$ 表示以像素点 x 为中心的邻域窗口。亮通道先验理论指出,像素点 x 处的亮通道强度趋近于无雾图像的大气光强度,即:

$$I^{\text{light}}(x) \rightarrow A^{\text{light}}(x). \quad (7)$$

图 3 给出了几幅有雾图像及其暗通道图像和亮通道图像,其中图 3(a)表示有雾图像,图 3(b)表示对应的暗通道图像,图 3(c)表示对应的亮通道图像。由图 3 可知,有雾图像在非天空区域里的暗通道强度很小,且趋于 0,而亮通道强度趋近于无雾图

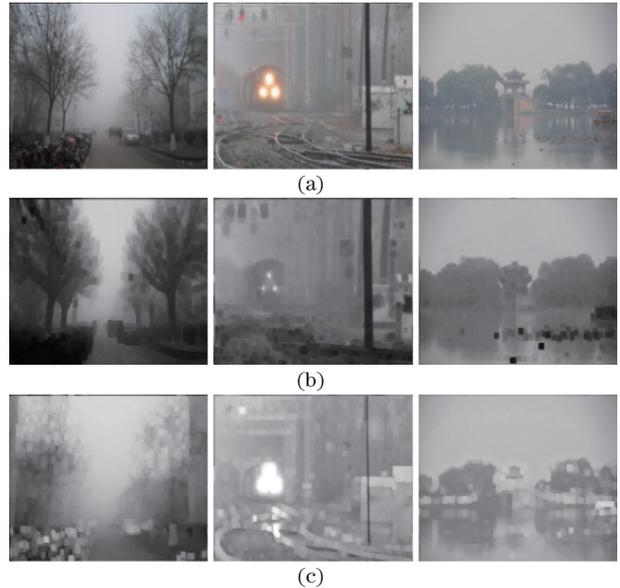


图 3 (a)有雾图像;(b)暗通道图像;(c)亮通道图像

Fig. 3 (a) Foggy images; (b) dark channel images; (c) bright channel images

像的大气光强度,印证了前文说法。

3.2 估计透射率

借助于大气散射模型和暗通道原理来估计透射率。假设大气光 A 是已知的,并且在一个局部区域 $\Omega(x)$ 里透射率是固定的,记作 $\tilde{t}(x)$ 。对大气散射模型,即(1)式进行最小化处理,得到下式:

$$\min_{y \in \Omega(x)} [I^c(y)] = \tilde{t}(x) \min_{y \in \Omega(x)} [J^c(y)] + [1 - \tilde{t}(x)]A^c. \quad (8)$$

由(8)式可得,最小化操作是对3个颜色通道(R, G, B)独立进行的,它等价于:

$$\min_{y \in \Omega(x)} \left[\frac{I^c(y)}{A^c} \right] = \tilde{t}(x) \min_{y \in \Omega(x)} \left[\frac{J^c(y)}{A^c} \right] + [1 - \tilde{t}(x)]. \quad (9)$$

对3个颜色通道作最小值操作:

$$\min_{c \in \{R, G, B\}} \left\{ \min_{y \in \Omega(x)} \left[\frac{I^c(y)}{A^c} \right] \right\} = \tilde{t}(x) \min_{c \in \{R, G, B\}} \left\{ \min_{y \in \Omega(x)} \left[\frac{J^c(y)}{A^c} \right] \right\} + [1 - \tilde{t}(x)]. \quad (10)$$

根据暗通道原理 $J^{\text{dark}}(x) \rightarrow 0$,可以得出透射率 $\tilde{t}(x)$ 的估计值为

$$\tilde{t}(x) = 1 - \min_{c \in \{R, G, B\}} \left\{ \min_{y \in \Omega(x)} \left[\frac{I^c(y)}{A^c} \right] \right\}. \quad (11)$$

在实际情况下,空气中总会存在各种各样的微粒,这些微粒使人在视觉上感觉远处的事物存在雾。雾的存在是人类感知深度的基本提示,这种现象被称为空中透视。如果将有雾部分全部去除,得到的去雾图像不真实、不自然。鉴于此,在透射率 $\tilde{t}(x)$ 计算过程中引入常数 ω ($0 \leq \omega \leq 1$),以保证图像可以保留少量的雾,则:

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

根据改进的大气散射模型和获取的亮暗通道图像,估计的透射率 $\tilde{t}(x)$ 为

$$\tilde{t}(x) = 1 - \omega \frac{I^{\text{dark}}(x)}{A(x)}, \quad (13)$$

式中 $I^{\text{dark}}(x)$ 为有雾图像的暗通道图像, $A(x)$ 为大气光估计值。

3.3 估计大气光

假设大气光已知,而实际上大气光是估计值。He算法取暗通道前0.1%像素,在原始无雾图像寻找像素对应位置的最大像素值作为大气光值。但是,若图像中天空区域过亮或有高亮物体,则大气光估计值可能接近255,会导致去雾后图像出现偏色或色斑。本文提出亮暗通道相结合的去雾算

法,从亮通道和暗通道两方面分别进行大气光值的估计,获取最终的大气光 $A(x)$ 。大气光 $A(x)$ 的表达式为

$$A(x) = \alpha A^{\text{light}}(x) + \beta A_0, \quad (14)$$

式中 $A^{\text{light}}(x)$ 为亮通道估计的大气光, A_0 为暗通道估计的大气光, α, β 是调整因子,由于亮通道像素值接近无雾图像大气光值,因此设置权重时,使亮通道获取的大气光值权重较大,而暗通道获取的大气光值权重较小,并满足条件 $\alpha + \beta < 1.0$ [实际中 $J(x) \leq A(x)$]。

本文通过实验调试,并结合峰值信噪比等参数信息,设 $\alpha = 0.7, \beta = 0.25$ 。

结合(6)式和(7)式,亮通道部分的大气光估计值为

$$A^{\text{light}}(x) = \max_{c \in \{R, G, B\}} \left[\max_{y \in \Omega(x)} I^c(y) \right]. \quad (15)$$

根据暗通道先验图像估计大气光的具体步骤如下:

1) 从暗通道先验图像中按照亮度的大小选取前0.1%的像素点;

2) 将这些像素点所在位置对应到原有雾图像 I 的相应位置上,寻找亮度点的最高值,作为 A 值。

通过这种方式选取的大气光,会造成处理后的图像出现偏差和大量色斑。当输入图像中含有与天空相似的白色区域(如白色帐篷、白色建筑等),选取的大气光可能出现较大偏差。因此,在得到相应位置的像素点时,本文取所有符合条件的点的平均值为 A_0 ,以提高选取的准确性。本文算法获取大气光值与经典算法获取大气光值的区别在于,经典算法取一个最高值作为全局大气光值,而本文算法求取每一点处大气光值,避免使用一个全局大气光造成局部区域透射率估计不准确的现象。

3.4 优化透射率

利用估测的透射率直接对输入图像进行去雾图像处理,所得无雾图像中会存在块效应,大幅降低去雾图像的质量,以及去雾图像的使用价值。He等^[10]利用 Soft Matting 算子进行优化处理,但运算速度较慢,应用不便。随后,又提出以引导滤波代替 Soft Matting 算子来优化透射率,该方法虽然能够保留图像细节、解决块效应,但是对于天空区域或者白色物体容易出现色彩偏差和过增强。因此,本文采用加权引导滤波^[8]算法对透射率图像进行滤波,平滑透射率图像边缘,使得图像景深突变边缘透射率求取更加准确,避免去雾后图像色彩偏差

和过增强。

加权引导滤波器是一种连接引导图像和输出图像的局部线性图像滤波器,具有平滑和边缘保持的特性,它能够像双边滤波器一样保持边缘平滑,而且在边缘附近能够保持更多的细节^[20]。加权引导滤波器使用像素点周围的平均值和方差作为局部窗口的估计值,能够根据窗口内容自适应地调整参数。假设引导图像为 I ,输入图像为 p ,引导图像 I 和输入图像 p 可以相同也可以不同,输出图像为 q ,其滤波线性转换模型为

$$q_i = a_k I_i + b_k, \forall i \in \omega_k, \quad (16)$$

式中 ω_k 是以像素点 k 为中心、 r 为半径的邻域窗口, a_k, b_k 是邻域窗口 ω_k 内的线性常数, i 是图像中的像素点。对(16)式两边求梯度,表达式为

$$\nabla q = a \nabla I. \quad (17)$$

由(17)式可知,当引导图像 I 有梯度时,输出图像 q 也有类似的梯度,因此,加权引导滤波具有边缘保持特性。根据邻域窗口 ω_k 的方差,边缘权重被定义为

$$W_I(k) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{\sigma_i^2(k) + \gamma}{\sigma_i^2(i) + \gamma}, \quad (18)$$

式中 $\sigma_i^2(\cdot)$ 表示引导图像 I 内像素点周围 $3 \text{ pixel} \times 3 \text{ pixel}$ 邻域窗口 ω_k 内的方差, γ 是一个较小的常数,被定义为 $(0.001 \times L)^2$, L 是输入图像的动态调整范围, N 是引导图像的总像素点数。加权引导滤波算法通过最小化输出图像 q 和输入图像 p 的差异来寻求滤波结果。最小化窗口 ω_k 内的损耗函数定义为

$$E(a_k, b_k) = \sum_{i \in \omega_k} \left[(a_k I_i + b_k - p_i)^2 + \frac{\epsilon}{W_I(k)} a_k^2 \right], \quad (19)$$

式中 ϵ 为规整化因子,可以避免系数 a_k 过大,也是调节滤波器滤波效果的重要参数。由(18)式和 $\frac{\epsilon}{W_I(k)}$ 可知,像素点 k 的邻域内方差越大,对应的边缘权重 $W_I(k)$ 越大,规整化因子越小。因此,可以更好地保持图像边缘。

对(19)式采用最小二乘法,可得

$$\begin{cases} a_k = \frac{\frac{1}{|\omega|} \sum_{i \in \omega_k} I_i p_i - \mu_k \bar{p}_k}{\sigma_k^2 + \frac{\epsilon}{W_I(k)}}, \\ b_k = \bar{p}_k - a_k \mu_k \end{cases}, \quad (20)$$

式中: μ_k 和 σ_k^2 为引导图像 I 在局部窗口 ω_k 内的灰

度像素平均值和方差; $|\omega|$ 为局部窗口 ω_k 内的像素总数; $\bar{p}_k = \frac{1}{|\omega|} \sum_{i \in \omega_k} p_i$ 为输入图像 p 在窗口 ω_k 内的平均值。最后输出为

$$q_i = \bar{a}_i I_i + \bar{b}_i, \quad (21)$$

式中 \bar{a}_i 和 \bar{b}_i 分别表示 a_i 和 b_i 在窗口 ω_k 内的平均值,其表达式为

$$\begin{cases} \bar{a}_i = \frac{1}{|\omega|} \sum_{k \in \omega_i} a_k \\ \bar{b}_i = \frac{1}{|\omega|} \sum_{k \in \omega_i} b_k \end{cases}. \quad (22)$$

加权引导滤波器与传统引导滤波器不同,其结合邻域窗口内的平均值和方差作为局部窗口的估计值,能够自适应地调整参数,从而有效地保留图像边缘细节。加权引导滤波同引导滤波器具有相同的复杂度,为图像的大小,即对像素点数为 N 的复杂度为 $O(N)$ 。

透射率图像(即输入图像)和恢复图像如图4所示。其中,图4(a)为初始估计出的透射率图像;图4(c)为由图4(a)得到的恢复图像,可以看出,图4(c)存在较明显的块效应;图4(b)为优化后的透射率图像,采用加权引导滤波器优化后的透射率图像更加细化;图4(d)为由图4(b)得到的恢复图像,块效应被消除,细节增加较多。

3.5 恢复图像

根据已获得的透射率和大气光,可以通过改进的大气散射模型恢复无雾图像。然而,当估测出透射率 $t(x)$ 趋近于0时,会直接导致 $J(x)$ 偏大,从而导致恢复的无雾图像颜色偏白。因此,需要设置一阈值 t_0 限制透射率 $t(x)$ 。为防止其过小,当 $t(x)$ 小于阈值 t_0 时,令 $t(x) = t_0$; 当 $t(x)$ 大于等于阈值 t_0 时, $t(x)$ 为其自身,本文设置的 t_0 值为0.1。恢复的无雾图像 $J(x)$ 可表示为

$$J(x) = \frac{I(x) - A(x)}{\max[t(x), t_0]} + A(x). \quad (23)$$

4 仿真结果

本文提出基于亮通道和暗通道混合的先验图像去雾算法。该方法能够解决白色天空区域复原图像的色彩偏差问题,并采用加权引导滤波算法细化透射率图像,不仅计算简单,而且能够平滑图像,显示较多的细节。为了验证本文算法的有效性,选取几组雾霾天气的场景图进行去雾处理,并对其进行分析。

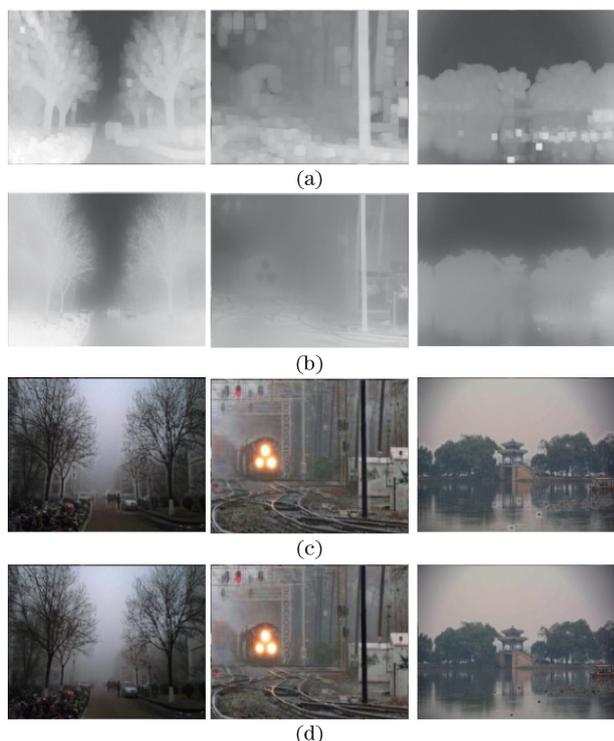


图 4 透射率图像以及得到的恢复图像。(a)初始估计出的透射率图像;(b)优化后的透射率图像;(c)由图(a)获取的恢复图像;(d)由图(b)获取的恢复图像
Fig. 4 Transmittance images and restored images. (a) Initial estimated transmittance images; (b) optimized transmittance images; (c) (d) recovered images from Fig. (a) and (b) respectively

图 5、图 6 分别为雾霾天气下的有雾场景图及采用各算法去雾处理之后的效果对比。本文主要是与多尺度 Retinex 图像去雾算法,以及 He 等^[10]提出的基于暗通道先验的图像去雾算法作对比,其中,图 5、图 6 的(a)表示有雾图像,图 5、图 6 的(b)表示采用多尺度 Retinex 算法得到的无雾图像,图 5、图 6 的(c)表示采用 He 等^[10]方法得到的无雾图像,图 5、图 6 的(d)表示采用本文方法得到的无雾图像。

图 5、图 6 代表存在较少天空区域的有雾图像。从图中可以看出,(a)图被雾霾笼罩,图像模糊;(b)图可以得到较清晰的图像细节,但图像整体看起来极其不自然,存在较大的颜色偏差;(c)图整体看起来较自然,但是相比(d)图细节模糊、不明显;(d)图整体上看起来更自然,细节增多且清晰,没有颜色偏差。

为进一步验证本文算法的优越性,采用平均值、方差、信息熵、均方差(MSE)、峰值信噪比(PSNR)等客观指标对各算法进行评价。平均值、方差分别表示图像亮度和对比度,其值越大,图像亮度和对比

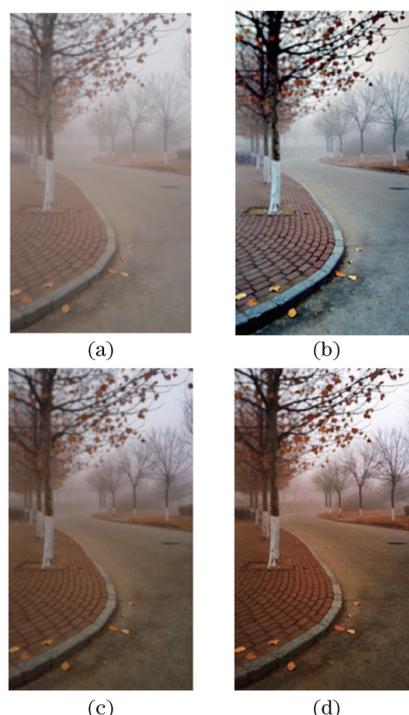


图 5 有雾图像及各算法的去雾结果。(a)有雾图像;(b)多尺度 Retinex 方法;(c)文献[10]的方法;(d)本文方法
Fig. 5 Foggy images and defogging results of different algorithm. (a) Foggy images; (b) multi-scale Retinex method; (c) method in Ref. [10]; (d) proposed method

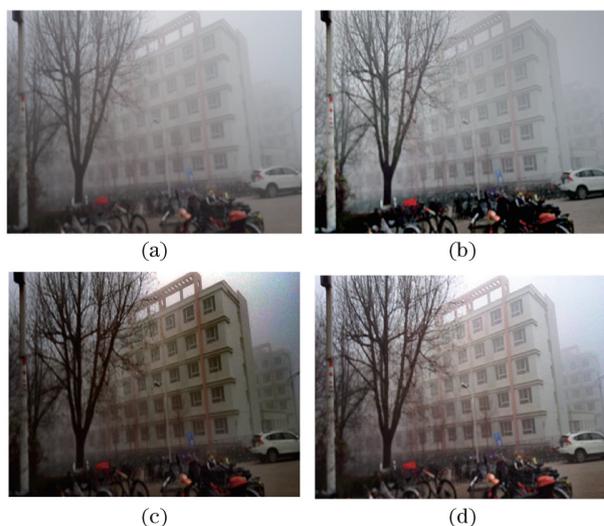


图 6 有雾图像及各算法的去雾结果。(a)有雾图像;(b)多尺度 Retinex 方法;(c)文献[10]的方法;(d)本文方法
Fig. 6 Foggy images and defogging results of different algorithm. (a) Foggy images; (b) multi-scale Retinex method; (c) method in Ref. [10]; (d) proposed method

度越高;信息熵表示图像细节方面的指标,信息熵越大,图像细节越多;MSE、PSNR表示图像之间的差异,均方差越小、峰值信噪比越大,表明图像的去雾效果越好。

表1和表2分别列出了图5、图6中各算法的客观评价指标。从表中可以看出,本文算法的指标均优于其他算法,能够得到与图5、图6相同的结论,验证了本文算法的优越性与有效性。

表1 图5中各算法的客观评价指标

Table 1 Objective evaluation standards of different algorithms in Fig. 5

| Index | Original image | Multi-scale Retinex | Algorithm in Ref. [10] | Proposed algorithm |
|----------|----------------|---------------------|------------------------|--------------------|
| Average | 103.53 | 129.01 | 112.35 | 138.80 |
| Variance | 39.93 | 55.23 | 49.35 | 58.55 |
| Entropy | 7.11 | 7.14 | 7.07 | 7.21 |
| MSE | - | 100 | 116 | 95 |
| PSNR | - | 65.83 | 63.28 | 61.55 |

表2 图6中各算法的客观评价指标

Table 2 Objective evaluation standards of different algorithms in Fig. 6

| Index | Original image | Multi-scale Retinex | Algorithm in Ref. [10] | Proposed algorithm |
|----------|----------------|---------------------|------------------------|--------------------|
| Average | 116.80 | 121.19 | 97.22 | 131.21 |
| Variance | 40.76 | 48.55 | 40.61 | 50.75 |
| Entropy | 7.18 | 7.15 | 7.05 | 7.25 |
| MSE | - | 97 | 102 | 91 |
| PSNR | - | 65.08 | 65.72 | 63.71 |

5 结 论

针对雾霾下的图像进行去雾处理,提出基于亮通道和暗通道结合的图像去雾算法。首先,基于退化图像的物理模型提出改进的大气光散射模型;然后,运用亮通道先验和暗通道先验,结合估计大气光和透射率,利用加权引导滤波优化透射率图像,并恢复图像,最后,通过仿真对各算法去雾效果进行对比,并采用平均值、方差、信息熵、均方差、峰值信噪比等客观指标对图像质量进行评价,验证了本文算法的有效性和可靠性。

参 考 文 献

- [1] Narasimhan S G, Nayar S K. Contrast restoration of weather degraded images[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2003, 25(6): 713-724.
- [2] Namer E, Schechner Y Y. Advanced visibility improvement based on polarization filtered images[J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5888: 36-45.
- [3] Sun W, Li D J, Liu H J, *et al.* Fast single image fog removal based on atmospheric scattering model[J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(4): 1040-1046.
- [4] 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.
- [5] Cozman F, Krotkov E. Depth from scattering[C]// IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 1997: 801-806.
- [6] Pei S C, Lee T Y. Effective image haze removal using dark channel prior and post-processing[C]// IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS), 2012: 2777-2780.
- [7] Kim J H, Jang W D, Sim J Y, *et al.* Optimized contrast enhancement for real-time image and video dehazing[J]. Journal of Visual Communication and Image Representation, 2013, 24(3): 410-425.
- [8] 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.
- [9] Tan R T. Visibility in bad weather from a single image[C]// IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2008: 1-8.
- [10] Fattal R. Single image dehazing[J]. ACM Transactions on Graphics, 2008, 27(3): 72.
- [11] He K, Sun J, Tang X. Single image haze removal using dark channel prior[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2011, 33(12): 2341-2353.
- [12] He K, Sun J, Tang X. Guided image filtering[C]//

- European Conference on Computer Vision, 2010: 1-14.
- [12] Tarel J P, Hautière N. Fast visibility restoration from a single color or gray level image [C] // IEEE International Conference on Computer Vision, 2009: 2201-2208.
- [13] Tripathi A K, Mukhopadhyay S. Single image fog removal using bilateral filter [C] // IEEE International Conference on Signal Processing, Computing and Control, 2012: 1-6.
- [14] Ding M, Wei L. Single-image haze removal using the mean vector L2-norm of RGB image sample window [J]. Optik, 2015, 126(23): 3522-3528.
- [15] Yu T H, Meng X, Zhu M, *et al.* An improved multi-scale Retinex fog and haze image enhancement method [C] // International Conference on Information System and Artificial Intelligence, 2016: 557-560.
- [16] Xu Y, Guo X, Wang H, *et al.* Single image haze removal using light and dark channel prior [C] // IEEE/CIC International Conference on Communications in China, 2016: 1-6.
- [17] Narasimhan S G, Nayar S K. Vision and the atmosphere [J]. International Journal of Computer Vision, 2002, 48(3): 233-254.
- [18] Kopf J, Neubert B, Chen B, *et al.* Deep photo: model-based photograph enhancement and viewing [J]. ACM Transactions on Graphics, 2008, 27(5): 116.
- [19] Cheng F C, Cheng C C, Lin P H, *et al.* A hierarchical airlight estimation method for image fog removal [J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2015, 43: 27-34.
- [20] Bo L, Luo X G, Wang H J. Adaptive weighted guided image filtering for image denoising based on artificial swarm optimization [J]. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, 2016, 31(4): 2137-2146.