

文章编号 1004-924X(2016)增-0622-10

光照分量去除的单幅图像快速去雾方法

李大健¹, 孙 伟^{2*}, 潘 蓉²

- (1. 西北工业大学 第 365 研究所, 西安 710065;
2. 西安电子科技大学空间科学与技术学院, 西安 710071)

摘要: 基于大气散射物理模型, 提出了一种全新的将雾霾去除和光照恢复统一的有雾图像复原方法。首先基于暗影通道原理求取大气幕函数, 获得去除大气幕后的残差图像; 然后基于光照-反射成像模型和亮通道概念, 通过联合双边滤波有效地获取残差图像光照分量信息; 最后, 去除残差图像的光照分量, 从而获得了与光照无关的场景物体反射分量, 同时去除了雾霾和光照对成像过程的影响。和传统的基于暗影通道的方法相比, 本方法无需求解全局环境光的值与透射率函数, 通过两个步骤即可复原场景的 RGB 反射系数。本方法再现的场景颜色饱和度适中, 获得了生动的颜色再现并避免光晕伪影。

关键词: 单幅图像去雾; 暗影通道先验; 亮度幕函数; 联合双边滤波器; 图像质量评价

中图分类号: TP394.1; TH691.9 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162413.0622

Fast single image dehazing method based on illumination veil elimination

LI Da-jian¹, SUN Wei^{2*}, PAN Rong²

- (1. The 365 Institute, Northwest Polytechnical University, Xi'an China;
2. School of Aerospace Science and Technology, Xidian University, Xi'an China)

* Corresponding author, E-mail: wsun@xidian.edu.cn

Abstract: An unified approach based on atmospheric scattering model is proposed to handle such degraded images with the strategy that gracefully bridges the gap between un-uniform illumination and hazy images. According to dark channel principle, the atmospheric veil function is caculated, and the residual image removing atmospheric veil is obtained. Then, based on illumination-reflection model and bright channel theory, with joint bilateral filter, illumination component of residual image is obtained and removed. So the reflection components which has nothing to do with illumination is obtained. Meanwhile, influence of hazy and illumination is removed. The proposed approach simultaneously dehazes images and enhances contrast, and the global atmospheric light is not necessary to be calculated to avoid the risk of errors. Experiment results on a variety of outdoor degraded images demonstrate that the proposed method achieves short computation time and good restoration for visibility and color fidelity.

Key words: defogging for single image; prior shadow channel; luminance curtain function; uniting bilateral filter; image quality evaluation

收稿日期: 2016-04-19; 修订日期: 2016-06-03.

基金项目: 国家自然科学基金青年项目《视觉原理指导下的动目标检测与跟踪新方法研究》(No. 61201290); 国家自然科学基金面上资助项目《基于视觉仿生的无人机环境感知关键技术研究》(No. 61671356); 中央高校基本科研业务费(No. JB161301)

1 引言

在雾霾天气条件下,由于大气中气溶胶等微粒的散射作用,导致采集到的图像对比度降低,颜色失真;同时,光源变化、物体阴影覆盖、曝光不足等因素会使场景光照不足,进一步导致采集到的图像整体或局部偏暗,能见度下降,细节模糊。总之,降质的雾霾图像将严重影响图像信息的辨识及后续的图像分析。近年来,雾霾图像的复原问题受到学术界的广泛关注,并取得了较大的研究进展。

雾霾图像复原方法很多,Tan^[1]对雾霾图像的局部对比度进行最大化,但其复原结果存在颜色失真与光晕伪影。Fattal^[2]采用 ICA 方法和 MRF 模型来复原图像,该方法无法处理灰度图像与雾霾严重的图像。Tarel^[3]方法将最小值滤波与中值滤波相结合,对颜色鲜艳的图像有较好的复原效果,但不恰当的参数易引起光晕伪影,同时伴有颜色的失真。多尺度 Retinex 颜色恢复^[4](Multi Scale Retinex with Color Rendition, MSRRCR)方法对彩色图像进行了雾霾去除和光照恢复,但由于对高频和低频分量分别处理,造成了边缘过分饱和的情况。Kimmel 等^[5-7]将已有的多种 Retinex 方法规范成统一的变分形式,虽然运算复杂度减小,但易使阴影边界模糊,产生光晕伪影。以上雾霾图像复原方法虽然对雾霾降质图像有一定的复原效果,但普遍存在颜色失真、光晕伪影、图像偏暗等缺点^[8-10]。He 等^[4]通过暗影通道估计场景雾霾的浓度和物体的深度信息,通过计算暗影通道的值来进行彩色图像去雾,取得了很好的复原效果。暗影通道先验认为,在彩色 RGB 图像中,在一些称为暗像素(Dark Pixels)的像素中,至少有一个色彩通道的颜色强度值很低,而且在有雾的情况下,这个值的大小和雾的浓度及像素点的距离有一定关系^[6]。近年来,He 的方法获得了广泛的好评并取得较多的后续研究。

针对暗影通道去雾,目前 Sun 等^[11-13]对 He^[14]的方法在原理上进行了深入剖析,并严格推导出散射模型中各参数的求解方法,解决了单幅图像去雾算法中的理论溯源问题。基于暗影通道理论的去雾方法中,全局环境光亮度 A 的取值对图像质量有重要的影响。 A 值偏大,会导致图

像偏暗,反之偏亮。因此 A 值的估计,对图像的复原很关键^[15],而目前尚无求解环境光 A 值的可靠方法。特别是场景存在大面积白色区域或天空的情况下,暗影通道方法的应用会受到限制。本文基于大气散射物理模型,利用暗影通道的物理原理,首先通过联合滤波获得精确的大气幕函数估计,并获得去除大气幕函数后的残差图像;为了避免计算环境光亮度 A ,本文通过计算残差图像亮通道,并利用快速联合双边带滤波快速算法,获得残差图像的光照分量;最后,基于光照反射模型,利用残差图像的场景辐射率即可计算目标的反射率。通过以上 3 个步骤,可在去雾的同时去除环境光照的影响,可以快速恢复图像色彩。

本文的贡献主要在于通过求取残差图像的光照分量,直接恢复出场景的 RGB 分量的反射率,去除雾霾的同时,也去除了光照的影响,并且避免了求解全局环境光亮度等参数的计算。本文内容安排如下:第 2 节研究了大气散射物理模型及暗影通道的去雾原理。第 3 节详细论述了基于光照恢复的去雾算法的原理及实现步骤,并对亮通道的概念进行了详细论述。第 4 节给出实验结果的分析。第 5 节为全文的结论。

2 相关工作

2.1 大气散射物理模型

Narasimhan 等^[9]给出的雾、霾天气条件下单色大气散射模型被广泛应用于去雾技术的研究,如图 1 所示,该模型描述如下:

$$L(x, y) = I(x, y)e^{-kd(x, y)} + A(1 - e^{-kd(x, y)}), \quad (1)$$

式(1)中 $L(x, y)$ 是摄像机采集的雾霾图像, $I(x, y)$ 为场景的反射光线强度, k 为大气散射系数, $d(x, y)$ 是场景深度, $e^{-kd(x)}$ 为透射函数, A 是全局环境光强度,在式(1)的模型中为全局常量。

2.2 暗影通道去雾方法分析

式(1)中的 $I(x, y)$ 即是要复原的图像,由式(1)知,图像复原可由式(2)完成:

$$I(x, y) = \frac{L(x, y) - A(1 - e^{-kd(x, y)})}{e^{-kd(x, y)}}, \quad (2)$$

式中,令 $V(x) = A(1 - e^{-kd(x)})$,称 $V(x)$ 为大气幕函数。计算出 $V(x)$ 和 A 即可求得 $I(x, y)$ 。而对于单幅有雾图像,方程(2)求解缺少约束条

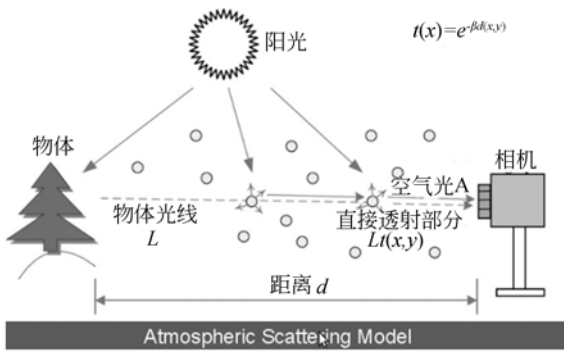


图 1 大气散射模型

Fig. 1 Atmospheric scattering model

件,故 $I(x, y)$ 无法由式(2)直接解析求出。

对于 RGB 彩色模型的数字图像而言,目标色彩是由物体对光的 RGB 三分量具有不同反射特性生成的。对于颜色鲜艳的彩色目标或较暗的灰度目标,至少对其中一种颜色分量的反射系数较小。暗影通道去雾方法利用 $L(x, y)$ 的最小颜色分量作为图像中的低反射率分量,认为其值为大气幕亮度 $V(x, y)$ 的初步估计,即:

$$V_{dc}(x, y) = \min_{c \in \{R, G, B\}} L_c(x, y) = A(1 - e^{-kd(x, y)}). \quad (3)$$

对于式(3)来说,并不一定是每个点均满足暗影通道的条件,因此需要对 $V_{dc}(x, y)$ 的结果进一步滤波,获得较精确的 $V(x, y)$ 估计。在获得大气幕函数 $V(x, y)$ 后,如何获取环境光亮度 A 值是求解式(2)的关键。

何恺明提出的 A 值估计方法,将各暗影像素点的亮度值按照递减的顺序排序,确定数值大小为前 0.1% 的点在暗原色图像中所处的位置,则这些位置所对应的原始有雾图像区域中的最大值即为大气光 A 的值。此方法仅适用于没有天空和面积白色目标的场景,所得 A 值存在误差,其会直接影响图像的去雾效果。为了更精确地估计 A ,Sun^[27-29]等首先去除白色目标的干扰,对式(3)获得的低反射分量进行灰度开操作,再取最大值。同时,针对大面积天空背景的特殊情况,对计算结果予以修正。但该方法仍存在局限性,本文将从一个新的角度论述雾霾图像复原的问题,既避免了环境光的估计,同时可以完成光照恢复。

3 基于光照恢复的图像去雾算法分析

3.1 亮通道定义

光照-反射模型认为,图像由光照分量和反射分量构成^[11],用式(4)表示为:

$$I(x, y) = I_0(x, y)R(x, y), \quad (4)$$

其中 $I(x, y)$ 为传感器采集到的图像, $I_0(x, y)$ 为光照分量,指场景的光照强度, $R(x, y)$ 为目标的反射系数,是物体的固有特性, (x, y) 为图像中任一像素点的位置。

根据式(4)易知,对于受光照影响的图像 $I(x, y)$,如果可以得到场景的光照分量 $I_0(x, y)$,通过式(4)可计算出目标的反射系数 $R(x, y)$,即获得场景的反射特性图像。而式(4)中只有 $I(x, y)$ 为已知,求解反射分量需利用某种方法估计光照分量,再进一步求解出反射分量,Retinex^[13-15]算法是其中的典型代表。

在自然光照的场景中,当场景中物体的反射率 $R(x, y) \rightarrow 1$ 时,根据光照反射成像模型知,得到的图像强度与场景光照强度接近,经过光电器件转换,变为 $[0, 255]$ 的响应强度。所以,对于彩色图像,其一个像素具有 RGB 3 个通道,在白色光源的假定下,若其中某一通道强度值较大,则认为这个通道的反射率亦较大,其强度值认为是该像素点的光照强度的表示。选取每个像素点的 RGB 通道的最大值,本文定义其为亮通道,即:

$$I_{MIC}(x, y) = \max_{c \in \{R, G, B\}} (I^c(x, y)), \quad (5)$$

其中, $I^c(x, y)$ 是输入图像 $I(x, y)$ 某个通道的强度值, $I_{MIC}(x, y)$ 即输入图像 $I(x, y)$ 的亮通道。

本文根据亮通道概念,完成彩色图像光照分量的计算。通过提取彩色图像的亮通道,利用快速联合双边滤波准确估计光照分量,再通过光照反射成像模型求解每个像素点的 RGB 反射分量。在本文去雾方法中,直接对去除大气幕函数的残差函数进行处理,无需计算大气光,即可完成场景的 RGB 反射系数的复原。

3.2 暗通道残差图像计算

由式(1)和式(4)可知,大气散射物理模型可表示为式(6):

$$L(x, y) = I_0(x, y)R(x, y)e^{-kd(x, y)} + A(1 - e^{-kd(x, y)}). \quad (6)$$

如式(6)所示,根据暗通道先验原理:

$$\min_{c \in \{R, G, B\}} \{R^c(x, y)\} \rightarrow 0, \text{ 可得到 } \min_{c \in \{R, G, B\}} \{L^c(x, y)\} \rightarrow V(x, y),$$

即雾霾图像 $L(x, y)$ 的暗通道图像 $V_{dc}(x, y)$ 近似于大气幕图像 $V(x, y)$ 。据此可将雾霾图像 $L(x, y)$ 的暗通道图像 $V_{dc}(x, y)$ 作为大气幕图像 $V(x, y)$ 的初步估计图像,如图 2(b)。通过灰度开运算后得到图 2(c),利用文献[17]的联合双边滤波算法,完成大气幕函数 $V(x, y)$ 的计算,如图 2(d)所示。

根据式(6),将雾霾图像 $L(x, y)$ 与大气幕图像 $V(x, y)$ 相减,即得到残差图像 $E(x, y)$,如图 2(e)所示:

$$E(x, y) = L(x, y) - V(x, y) = I(x, y) e^{-hd(x, y)}. \quad (7)$$

根据式(4),残差图像 $E(x, y)$ 可用光照-反射成像模型表示为,进一步对式(7)整理,可得:

$$E(x, y) = [I_0(x, y) e^{-hd(x, y)}] R(x, y). \quad (8)$$

3.3 反射分量求解

依据式(8),对残差图像 $E(x, y)$ 的 RGB 三通道进行运算,计算图像的亮通道,如图 2(f),将其作为光照分量 $S(x, y) = I_0(x, y) e^{-hd(x, y)}$ 的粗估计 $S_{rough}(x, y)$,表示为:

$$S_{rough}(x, y) = S_{MIC}(x, y). \quad (9)$$

由于目标的色彩并不完全是鲜艳的,也就是并不是亮通道每个像素点均能代表光照亮度,而光照在场景大部分区域的变化较为平缓^[16]。因此,利用式(9)的估计结果直接恢复图像会有很强的失真效果。

为了去除部分低反射率目标的影响,本文引入灰度闭运算对光照分量式(9)做进一步滤波。灰度闭运算可以削弱图像中独立的突变暗色小区域,而明亮部分不受影响,这样处理后的光照分量符合光照在大部分区域平缓变化的特点。定义处理后的结果为 S_{close} ,如图 2(g)所示,表示为:

$$S_{close} = (S_{rough} \oplus b) \ominus b, \quad (10)$$

其中, b 是灰度形态学结构元素,选取碟形结构能够得到相对平滑的结果。

一般情况下,场景中物体边缘处存在一定程度的光照突变,而经灰度闭运算处理后的光照分量丢失了局部细节并模糊了边缘。为了得到既具有平滑性质又能保持边缘细节的光照分量,本文用联合双边滤波器对闭运算滤波后的结果和亮通道图像进行细化处理。双边滤波器^[17-19]是一种边

缘保持滤波器,其结果不仅与周围像素的空间位置有关,而且还与它们的灰度差值有关,对于灰度图像 I ,双边滤波表示为:

$$BF(I_p) = \frac{1}{W_p} \sum_{q \in \Omega} f(\|p - q\|) g(|I_p - I_q|) I_q, \quad (11)$$

其中 BF 表示联合滤波函数, f 是中心在 p 点的高斯空域滤波器, g 是中心为 p 点的像素灰度值的高斯值域滤波器, Ω 是 f 的空域范围, W_p 是 $f \cdot g$ 权重和。由于值域滤波器的引入,若 p 点在边缘附近, g 权值正好反映了边缘信息,再与空域权值 f 相乘,这样既能保持边缘又能平滑边缘两侧的部分。联合双边滤波器是将双边滤波器的值域滤波器 g 应用于另一幅具有细节信息的图像上^[20]。因为光照分量的粗估计 S_{rough} 具有光照的细节信息,所以本文利用其求解值域高斯核 g 。不同于传统的双边滤波器,本算法对 S_{close} 和 S_{rough} 进行联合双边滤波,既能保持亮通道 S_{rough} 的边缘信息,也能使 S_{close} 更进一步平滑,即:

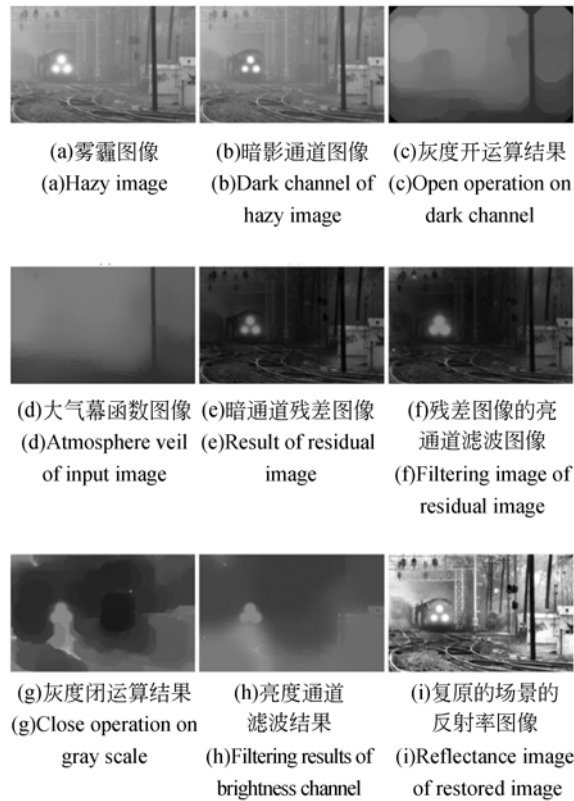


图 2 对 'train' 图像复原过程中的相关结果图像

Fig. 2 Restored image 'train' by proposed algorithm

$$S_{\text{refined}}(p) = \frac{1}{W_p} \sum_{q \in \Omega} f(\|p-q\|) g(|S_{\text{rough}}(p) - S_{\text{rough}}(q)|) S_{\text{close}}(q). \quad (12)$$

为了提高运算速度,本文通过快速联合双边滤波^[21]细化光照分量,细化后的光照分量如图 2(h)所示,估计出光照分量后,可求解场景的 RGB 分量的反射系数 $R(x, y)$,如式(13),最终增强结果如图 2(i)所示。

$$R(x, y) = \frac{E(x, y)}{S_{\text{refined}}(x, y)}. \quad (13)$$

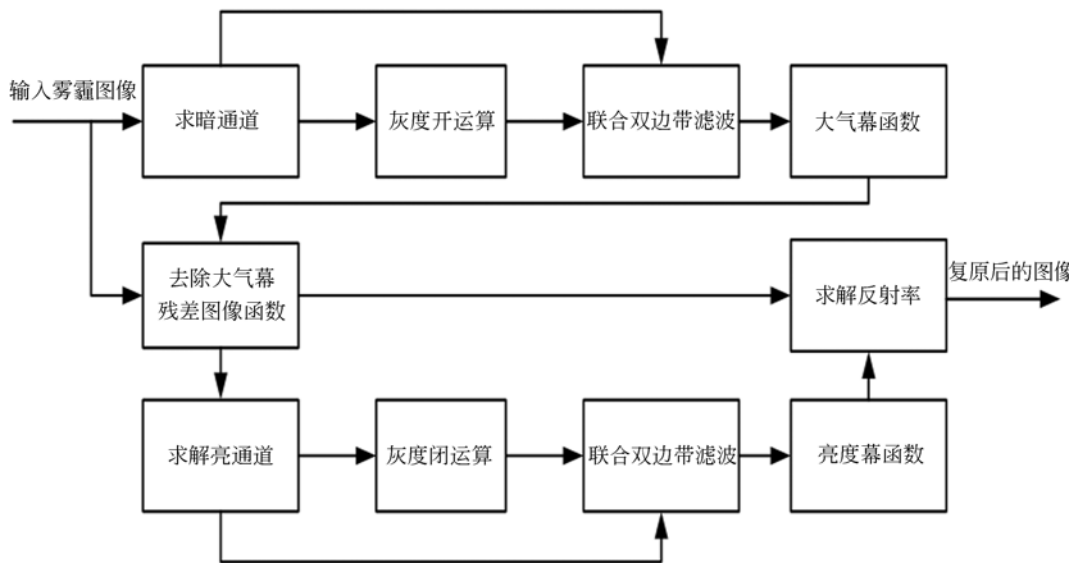


图 3 本文算法的流程框图

Fig. 3 Flowchart of proposed algorithm

4 实验分析

为了验证本文算法的性能,对一些典型的雾霾图像进行恢复,实验条件为: Intel(R) Pentium(R) D CPU 2.8 GHz 2.79 GHz, 1.5 GB 内存, matlab 7.12.0。通过本文方法和现有方法分别对一幅雾霾图像进行复原。

4.1 主观评价

通过本方法和现有的何恺明暗影通道^[4]方法对图 4(彩图见期刊电子版)所示 4 幅 'building' 'farm' 'scene' 'pumpki' 雾霾图像进行复原结果对比,本方法的复原结果分别如图 4(i)、(j)、(k)、(l)所示,何恺明方法复原结果分别如图 4(e)、(f)、(g)、(h)所示。

3.4 本文算法流程图

本文提出一种彩色雾霾图像去雾与光照补偿的复原方法,用雾霾图像的暗通道图像初步估计大气幕图像;通过灰度开运算和联合双边带滤波,得到大气幕图像;将雾霾图像与大气幕图像做差,对残差图像的亮通道图像进行灰度闭运算和联合双边滤波,得到光照分量图像;代入光照-反射成像模型中,求解即可得到场景的 RGB 通道的反射系数。

从图 4(e)和图 4(i)可以看出,何恺明暗影通道^[4]方法图像左下方的楼与绿树的颜色过暗,存在一定的过增强,其细节无法辨识,且天空亮度过高;而本文方法的整体颜色真实自然,且楼与绿树的细节清晰可见。

从图 4(f)和图 4(j)可以看出,何恺明暗影通道^[4]方法的结果颜色偏暗,场景近处的农田及远处的谷堆仍比较模糊;而本文方法的结果中近处的农田和远处谷堆的细节突出明显,图像视见度更高。

从图 4(g)和图 4(k)可以看出,何恺明暗影通道^[4]方法的结果对场景近处的视见度提高明显,但场景远处整体过暗;而本文方法的结果颜色饱和度和适中,场景整体相对更加真实。

从图 4(h)和图 4(l)可以看出,去除了图像中

的薄雾后,何恺明暗影通道^[4]方法的场景远处细节模糊不清;而本文方法的结果视能见度有大幅提升,同时近处的枯黄细节更加清晰可辨。

图 5-7(彩图见期刊电子版)给出了'y16', 'y01', 'ny17' 3 组不同场景下的雾霾图像复原对比结果。可以看出:Fattal 方法^[2]复原出的图像虽然颜色自然,但图中的森林细节较为模糊;Tan 方法^[1]复原出的图像中虽然诸如森林这样的细节较为清晰,但颜色过饱且存在光晕伪影;Koef 方法^[5]复原出的图像虽然整体颜色再现良好,但细节不清晰,颜色过饱和;Tarel 方法^[3]复原出的图像去雾效果不明显,存在明显光晕伪影;何恺明方法^[4]复原出的图像颜色整体偏暗,森林细节无法辨别;A. K. 方法^[8]复原出的图像虽然天空颜色自然,但存在轻微的光晕伪影,森林区域光照不足,颜色过暗且细节模糊;本文方法复原出的图像对比度明显提高,图中的山脉、森林等景物的细节清晰可辨,且有效避免了光晕伪影。

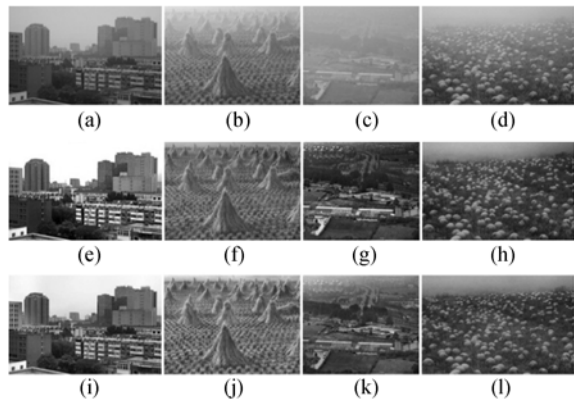


图 4 本文方法(i,j,k,l)和何恺明暗影通道^[4]方法(e,f,g,h)复原结果比较

Fig. 4 Dehazing results of He^[4] method and proposed method. Top row(a, b, c, d) are input hazy images, middle row(e, f, g, h) are dehazed results by He et al, bottom row(i, j, k, l) are results dehazed by proposed method. From left to right are 'building', 'corn', 'scene', and 'pumpkins'

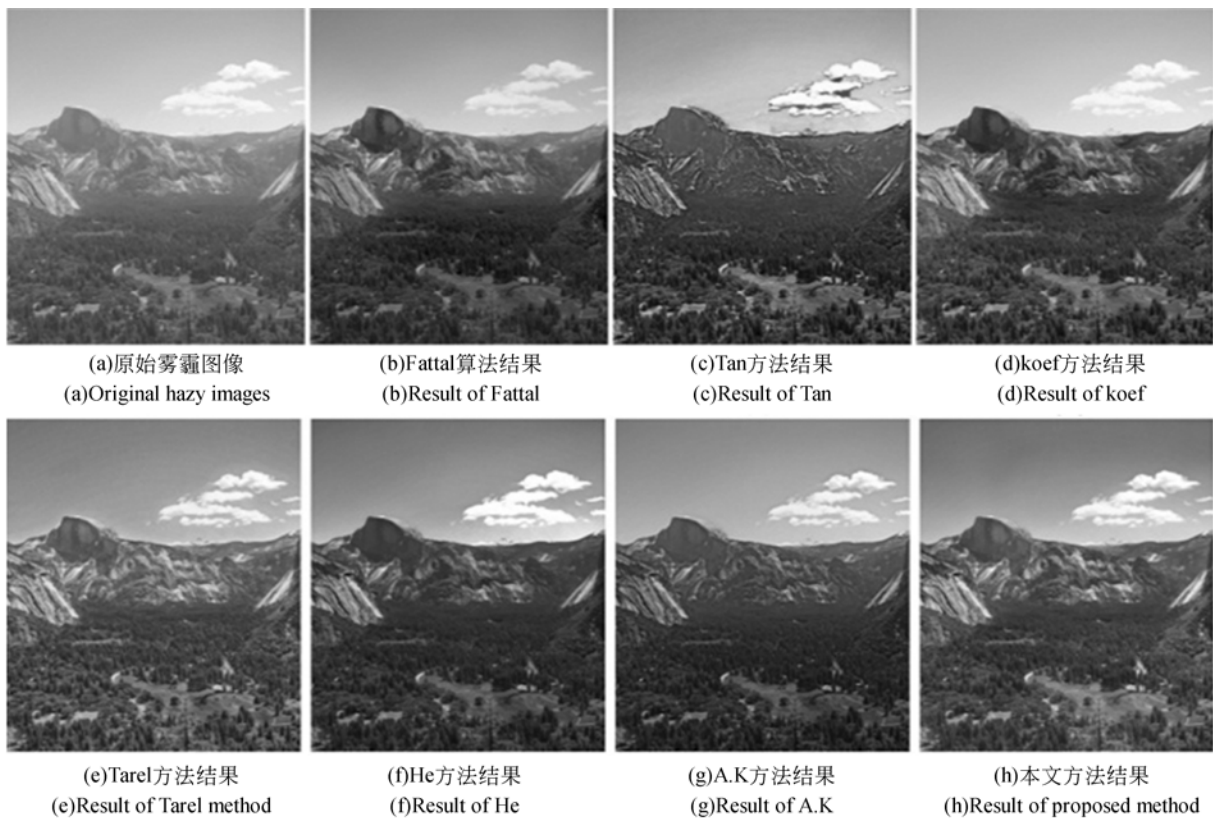


图 5 本文方法(h)和现有的 Fattal、Tan、Koef、Tarel、He、A. K(b,c,d,e,f,g)方法对雾霾图像'y16'(a)复原结果对比图

Fig. 5 Comparison of dehazing performances of different algorithms on hazy image 'y16'

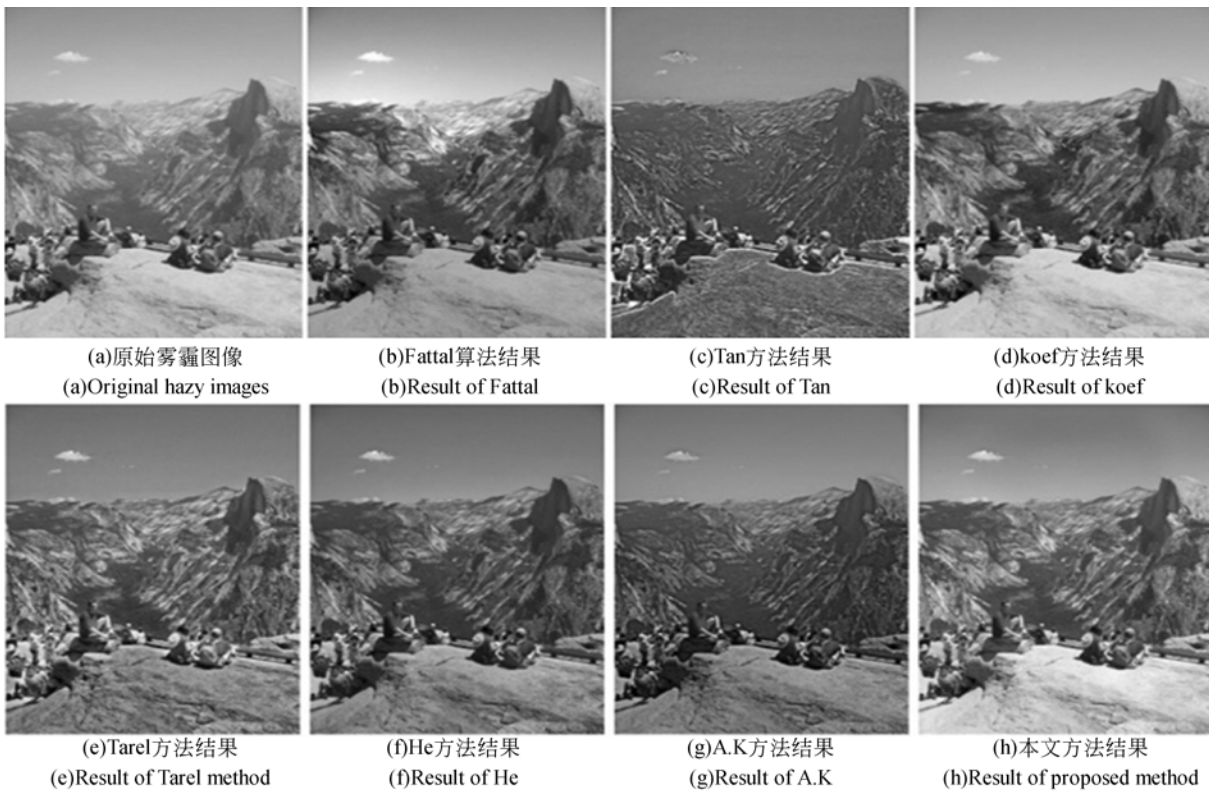


图 6 本文方法和现有的方法对雾霾图像‘y01’复原结果对比图

Fig. 6 Comparison of dehazing performances by different algorithms on image ‘y01’



图 7 本文方法和现有的方法对雾霾图像‘ny17’复原结果对比图

Fig. 7 Comparison of dehazing performances by different algorithms on image ‘ny17’

4.2 客观评价

将本文和现有的 Fattal^[2]、Tan^[1]、Koef^[5]、Tarel^[3]、He^[4]、A. K^[8]方法对 3 组图像的复原结果的可见边集合数目比 e 、平均梯度比 \bar{r} 、饱和像素比例 Σ 及对比度增益 C_{gain} 等客观评价指标进行比较^[20-23],结果如表 1 所示。其中,可见边集合数目比 e 和平均梯度比 \bar{r} 用来衡量处理前后细节的恢复程度;饱和像素比例 Σ 用来衡量处理前后颜色的再现效果;对比度增益 C_{gain} 用来

衡量处理前后对比度的提升程度^[24-26]。可以看出:本文复原结果的可见边集合数目比和平均梯度比均有提高,说明雾霾图像的细节复原及图像整体视见度得到了提高;本文复原结果饱和像素比例低于大多数现有方法,表明本文再现的场景颜色饱和度适中,更加真实自然;本文复原结果的对比度增益与现有方法基本接近,说明本方法与现有方法在对比度提高方面都有较理想的效果。

表 1 本文方法与现有方法复原结果的客观评价指标对比

Tab. 1 Comparison of objective evaluation index for dehazing performances by different algorithms

| 图像名称 方法名称 | y01 | | | | y16 | | | | ny17 | | | |
|--------------|--------|-----------|----------|-------------------|---------|-----------|----------|-------------------|---------|-----------|----------|-------------------|
| | e | \bar{r} | Σ | C_{gain} | e | \bar{r} | Σ | C_{gain} | e | \bar{r} | Σ | C_{gain} |
| Fattal | 0.0864 | 1.2152 | 0.0012 | 1.1540 | 0.0583 | 1.2033 | 0.0032 | 1.2458 | -0.1061 | 1.5346 | 0.0202 | 1.4139 |
| Tan | 0.1219 | 2.2283 | 0.0039 | 1.0209 | -0.0165 | 2.0602 | 0.0045 | 0.9023 | -0.0412 | 2.1900 | 0.0077 | 0.9101 |
| Kopf. | 0.0947 | 1.6362 | 0.0002 | 1.3088 | 0.0009 | 1.3456 | 0.0028 | 1.3732 | 0.0169 | 1.6136 | 0.0136 | 1.5238 |
| Tarel | 0.2092 | 1.9903 | 0.0000 | 0.8272 | 0.2406 | 1.9583 | 0.0000 | 0.9218 | 0.1104 | 1.7057 | 0.0000 | 0.8375 |
| He | 0.1426 | 1.3134 | 0.0101 | 0.8688 | 0.1314 | 1.3674 | 0.0019 | 0.9052 | 0.0232 | 1.6297 | 0.0023 | 1.3204 |
| A. K. | 0.2532 | 1.4244 | 0.0000 | 1.0551 | 0.1632 | 1.4937 | 0.0002 | 0.9849 | 0.2456 | 2.1832 | 0.0036 | 1.4360 |
| 本文方法 | 0.1605 | 1.5955 | 0.0017 | 0.7879 | 0.1062 | 1.4015 | 0.0004 | 1.2635 | 0.0372 | 1.3173 | 0.0004 | 1.1157 |

5 结 论

本文对雾霾图像的暗影通道原理进行深入剖析,提出了一种全新的雾霾图像复原方法。首先利用暗影通道原理,求取大气幕函数,并求解去除大气幕后的残差图像;然后基于光照-反射成像模型,通过联合双边滤波有效获取了残差图像的光照分量信息;最后,去除残差图像的光照分类,从而获得了场景物体的反射分量,去除雾霾和光照

对成像过程的影响。本文方法假定环境光为白光,对彩色图像的 RGB 分量恢复场景反射系数,恢复图像具有细节信息丰富、自然逼真等特点。该方法适用范围广,能大幅提高处理速度的同时获得良好的恢复图像质量,无需场景的其他附加信息。和当前主流方法相比较,本方法无需求解全局环境光与透射率,通过两个步骤即可复原场景的 RGB 反射系数,获得了生动的颜色再现并避免光晕伪影。客观质量评价表明。本方法很好的保留了图像的细节信息。

参考文献:

- [1] TAN K, OAKLEY P J. Physics-based approach to color image enhancement in poor visibility conditions [J]. *Optical Society of America*, 2001, 18(10): 2460-2467.
- [2] FATTAL R. Single image dehazing [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2008, 27(3): 1-9.
- [3] TAREL J P, HAYTUERE N. Fast visibility restoration from a single color or gray level image[C]. *Proceedings of the 12th IEEE International Conference on Computer Vision, Kyoto, Japan*: IEEE, 2009: 2201-2208.
- [4] HE K M, SUN J, TANG X O. Single image haze removal using dark channel prior[C]. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pat-*

- tern Recognition Miami. USA: IEEE, 2009: 1956-1963.
- [5] KOPF J, NEUBERT B, CHEN B, *et al.*. Deep photo: model-based photograph enhancement and viewing[J]. *ACM Trans. Graph.*, 2008, 27(5): 116-1-116-10.
- [6] ANCUTI C, HERMANS C, BEKAERT P. A fast semi-inverse approach to detect and remove the haze from a single image[C]. *Proc. ACCV*, 2011: 501-514.
- [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] TRIPATHI A K, MUKHOPADHYAY S. Single image fog removal using anisotropic diffusion [J]. *IET Image processing*, 2012, 6(7): 966-975.
- [9] 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.
- [10] TAN R C. Visibility in bad weather from a single image [C]. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'08)*, 2008, 1-8.
- [11] XIAO C, GAN J. Fast image dehazing using guided joint bilateral filter[J]. *The Visual Computer*, 2012, 28(6-8): 713-721.
- [12] RAHMAN, Z U, JOBSON D J. Retinex processing for automatic image enhancement[J]. *Journal of Electronic Imaging*, 2004, 13(1): 100-110.
- [13] SHUKRI D S M, ASMUNI H, OTHMAN R M, *et al.*. An improved multiscale retinex algorithm for motion-blurred iris images to minimize the intra-individual variations [J]. *Pattern Recognition Letters*, 2013, 34(9): 1071-1077.
- [14] CHAO W H, LAI A Y, SHIH Y Y I, *et al.*. Correction of inhomogeneous magnetic resonance images using multiscale retinex for segmentation accuracy improvement[J]. *Biomedical Signal Processing and Control*, 2012, 7(2): 129-140.
- [15] HASHEMI S, KIANI S, NOROOZI N, *et al.*. An image contrast enhancement method based on genetic algorithm[J]. *Pattern Recognition Letters*, 2010, 31(13): 1816-1824.
- [16] HUANG S C, YEH C H. Image contrast enhancement for preserving mean brightness without losing image features [J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2013, 26(5): 1487-1492.
- [17] PARIS S, DURAND F. A fast approximation of the bilateral filter using a signal processing approach [C]. *Computer Vision-ECCV 2006, Springer Berlin Heidelberg*, 2006: 568-580.
- [18] ZHANG B Y, ALLEBACH J P. Adaptive bilateral filter for sharpness enhancement and noise removal[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2008, 17(5): 664-678.
- [19] SUN CH H, DUAN H B. A restricted-direction target search approach based on coupled routing and optical sensor tasking optimization[J]. *OPTIK*, 2012, 123(24): 2226-2229.
- [20] HAUTIERE N. Blind contrast enhancement assessment by gradient ratioing at visible edges[J]. *Image Analysis & Stereology*, 2008, 27(2): 87-95.
- [21] HE K M, SUN J, TANG X O. Guided image filtering[C]. *Computer Vision-ECCV 2010. Springer Berlin Heidelberg*, 2010: 1-14.
- [22] SCHECHNER Y Y, NARASIMHAN S G, NAYAR S K. Polarization-based vision through haze [J]. *Applied Optics*, 2003, 42(3): 511-525.
- [23] NARASIMHAN S G, NAYAR S K. Vision and the atmosphere[J]. *International Journal of Computer Vision*, 2002, 48(3): 233-254.
- [24] GARG K, NAYAR S K. Vision and rain[J]. *Int. J. Comput. Vis.*, 2007, 75(1): 3-27.
- [25] YEH C H, KANG L W, LEE M S, *et al.*. Haze effect removal from image via haze density estimation in optical model[J]. *Optics Express*, 2013, 21(22): 27127-27141.
- [26] BAI Y, LI C, JIA W, *et al.*. Designing a wearable computer for lifestyle evaluation[C]. *38th Annual Northeast Bioengineering Conference*, 2012 March 16-18: 243-244.
- [27] WEI S, GUO B L. A fast single-image dehazing method for visible-light systems [J]. *Optical Engineering*, 2013, 52(9): 093103.
- [28] WEI S. A new single image fog removal algorithm based on physical model[J]. *International Journal for Light and Electron Optics*, 2013, 124(21): 4770-4775.
- [29] SUN W, HAN L, GUO B L. A fast color image

enhancement algorithm based on max intensity channel[J]. *Journal of Modern Optics*, 2014, 61

(6):466-477.

作者简介:



李大健(1966-),男,河南漯河人,高级工程师,研究方向为无人机控制与导航、信息处理。E-mail: lidajian@nwpu.edu.cn



潘蓉(1992-),女,山西运城人,硕士研究生,研究方向为数字图像处理。E-mail:1621980248@qq.com



孙伟(1980-),男,安徽人,博士,副教授,硕士生导师,主要研究方向为无人机智能环境感知、高性能视觉信息计算及嵌入式系统设计,第一作者发表SCI/EI论文20余篇,获国家发明专利授权6项,主编国家规划教材《数字图像处理系统工程导论》一部,主持国家自然科学基金青年项目一项。E-mail: wsun@xidian.edu.cn