

中图分类号: TP391.4 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2015)11-1453-09

论文引用格式: Liu X Y, Dai S K. Halo-free and color-distortion-free algorithm for image dehazing[J]. Journal of Image and Graphics 2015, 20(11): 1453-1461. [刘兴云, 戴声奎. 消除 halo 效应和色彩失真的去雾算法[J]. 中国图象图形学报 2015, 20(11): 1453-1461. ] [DOI: 10.11834/jig.20151104]

## 消除 halo 效应和色彩失真的去雾算法

刘兴云, 戴声奎

华侨大学信息科学与工程学院厦门市移动媒体重点实验室 厦门 361021

**摘要:** 目的 雾天条件下采集的图像存在低对比度和低场景可见度的问题,传统的去雾算法易产生 halo 效应和色彩失真问题。为此,结合大气散射光特性提出一种基于相对总变差的图像复原方法。方法 首先从大气散射光与纹理信息无关的角度出发,利用相对总变差分离图像主结构和图像纹理信息准确估计大气耗散函数,通过引入一个自适应保护因子来避免复原图像的色彩失真问题,最后由大气散射模型计算复原图像并进行图像的亮度调整,得到一幅清晰无雾的图像。结果 通过与经典的去雾算法比较,表明该方法可以有效避免 halo 效应和天空颜色失真等不足,并且在图像的深度突变处也能得到很好的去雾效果。结论 实验表明该算法的场景适应能力较强,时间复杂度与图像的大小成线性关系,相比于前人的算法在计算速度上有一定的提高。

**关键词:** 相对总变差; 大气耗散函数; 去雾; 大气散射模型

## Halo-free and color-distortion-free algorithm for image dehazing

Liu Xingyun, Dai Shengkui

Xiamen Key Lab. of MMC, College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China

**Abstract: Objective** A foggy image has low contrast and low visibility. Traditional dehazing algorithms suffer from the halo phenomenon and color distortion in image dehazing. In consideration of the characteristics of the atmospheric veil, an image restoration algorithm based on relative total variation is developed in this study. **Method** Given that atmospheric scattering light does not affect texture information, the atmospheric veil is estimated accurately according to the main structure and texture information separated by relative total variation. An adaptive protection factor is then utilized to avoid distorting the restored image. Finally, the ideal result is obtained with a physical model, and brightness is adjusted by a curve. **Result** Compared with state-of-the-art dehazing methods, the proposed method can avoid halo artifacts or color distortion and can achieve a good dehazing result at distant scenes and in areas where depth changes abruptly. **Conclusion** Experimental results show that the proposed method has robust scene adaptability and a fast computing rate because of the linear relation between time complexity and image size.

**Key words:** relative total variation; atmospheric veil; dehazing; atmospheric scattering model

收稿日期: 2015-05-20; 修回日期: 2015-07-28

基金项目: 福建省科技计划重点项目(2013H0030); 中央高校基本科研专项(JB-ZR1145)

第一作者简介: 刘兴云(1990—),男,华侨大学通信与信息系统专业硕士研究生,主要研究方向为图像处理、计算机视觉。

E-mail: liu1039323743@163.com

通信作者: 戴声奎,副教授, E-mail: d.s.k@hqu.edu.cn

**Supported by:** Fundamental Research Funds for the Central Universities(JB-ZR1145)

## 0 引言

雾天环境下,大气中存在的粒子会与光线发生散射、折射、吸收等反应,使成像设备捕捉到的户外图像模糊不清、对比度下降以及颜色退化,不利于观察者的信息提取,从而影响了各种户外监控系统的正常运行,带来了严重的安全隐患。因此,得到清晰的无雾图像具有重要的应用价值,目前已成为计算机视觉和数字图像处理的一个研究热点。

目前的去雾方法主要基于两大类:一类是雾天图像增强的处理方法,该方法不需考虑雾天图像降质的问题,能有效地提高雾天图像的对比度,突出图像的某些细节,但由于没有考虑雾天图像的退化模型,效果不佳。另一类是基于大气散射模型的图像复原方法,该方法充分利用图像的先验信息,通过反推成像过程得到清晰的无雾图像,但由于该模型依赖于场景的深度信息,而这一信息又往往是未知的,因此,去雾工作依然是一项非常具有挑战性的工作。

近年来,单幅图像的去雾方法取得了较大的进展,许多学者利用雾天图像本身的构造约束条件,试图从单幅图像中估计大气散射模型中的参数来达到去雾的目的。Tan 等人<sup>[1]</sup>通过最大化局部对比度来恢复图像,由于没有物理模型的支持,所呈现的图像过饱和,色彩不真实。Fattal<sup>[2]</sup>通过大气传播率和物体表面阴影局部不相关的假设,使用独立成分分析估计透射率,该方法依赖颜色统计信息,不能处理灰度图像,且在处理浓雾图像时,由于不满足假设条件,处理效果不佳。He 等人<sup>[3]</sup>提出了暗通道先验信息假设,统计结果表明大多数自然场景图像符合这一假设,通过抠图技术对透射率进行细化,可以得到很好的去雾效果,但由于引入了抠图技术,导致整个算法的时空复杂度非常高。引导滤波器<sup>[4]</sup>的提出,解决了抠图修复透射率的高时空复杂度问题,但滤波参数的设置不当易引起 halo 效应。针对不满足暗通道先验的明亮区域去雾后颜色失真问题,文献<sup>[5]</sup>采用固定阈值来修复透射率,在一定程度上保护有天空雾图的复原效果,但易造成无天空雾像的去雾不足。文献<sup>[6]</sup>采用分割天空区域来避免去雾后图像的色彩失真问题,但由于用最大联通区域作为识别的天空区域,易造成天空部位某些块的漏检,导致被漏检天空区域的颜色失真。Tarel 等人<sup>[7]</sup>从

大气散射模型出发,利用中值滤波来估计大气耗散函数,该方法虽然速度快,但中值滤波器不具有保边特性,易产生 halo 效应,去雾效果不佳。Kim 等人<sup>[8]</sup>提出优化对比度增强算法,该方法不是把重点放在透射率的细化上,而是提出一种基于粗透射率的去雾方法,认为对于一个小块透射率是一样的,并利用损失函数来估计局部最佳透射率,该方法可以说是暗通道先验的广义扩展,在一定程度上提高了处理速度,但同时也损失了图像的复原质量,去雾不足。Fattal<sup>[9]</sup>提出了基于 Color-Lines 的去雾方法,采用了马尔可夫随机场的方法,加强了相似像素之间的联系,可以很好地对图像进行复原,但在图像的深度频繁变换处易出现色彩失真,同时采用马尔可夫随机场的方法导致算法的时空复杂度相对较高。

针对目前算法存在的缺点,对大气散射模型中的关键参数进行研究,从 4 方面入手来恢复出高质量的无雾图像。1) 从大气散射光与纹理信息无关的角度出发,利用相对总变差分离图像主结构和图像纹理信息来准确估计大气耗散函数;2) 提出自适应天空保护因子来避免图像中含有天空等白色区域的颜色失真问题;3) 运用四叉树细分法准确估计大气光强度  $A$  值,避免了雾图中高亮物体对  $A$  值估计的影响;4) 亮度调整,即对复原后的图像偏暗的问题进行校正,以达到更好的去雾效果。实验结果表明本文算法可以有效地避免 halo 效应和颜色失真等问题,并且在图像的深度突变的地方也能得到很好的去雾效果,且算法的速度快,适应性强。

## 1 大气散射模型的特性

在雾霾环境下,图像的退化模型可表示为

$$I(x) = J(x)e^{-\beta d(x)} + A(1 - e^{-\beta d(x)}) \quad (1)$$

式中  $I(x)$  表示观察者采集到的有雾图像,  $J(x)$  表示清晰的无雾图像,  $A$  为全局大气光强度,  $e^{-\beta d(x)}$  表示介质传输透射率,  $\beta$  为大气散射系数,为场景深度。式(1)中第一项为直接衰减,表示物体表面反射光线在空气中传播衰减后的强度,并且随着场景深度  $d(x)$  发生指数性衰减。式(1)中第 2 项为大气耗散函数

$$V(x) = A(1 - e^{-\beta d(x)}) \quad (2)$$

它表示大气中环境光对成像所造成的影响,导致图

像色彩和亮度的偏移。

将  $V(x) = A(1 - e^{-\beta d(x)})$  代入式(1)中得到

$$I(x) = J(x) \left(1 - \frac{V(x)}{A}\right) + V(x) \quad (3)$$

从式(3)可以看出需要从图像  $I(x)$  中估计出大气耗散函数  $V(x)$  和全局大气光  $A$ , 以恢复出清晰的无雾图像  $J(x)$ 。

## 2 基于相对总变差去雾方法

从大气散射模型的物理特性出发,提出一种基于相对总变差的去雾方法,主要分为4个步骤:1) 利用相对总变差分离图像主结构和图像纹理信息来准确估计大气耗散函数;2) 提出自适应保护因子避免天空及白色物体的色彩失真;3) 利用四叉树细分法快速求取大气光值  $A$  并复原图像;4) 对复原后的图像进行亮度调整。

### 2.1 基于相对总变差的 $V(x)$ 估计

基于大气散射光的特性,Tarel等人<sup>[5]</sup>提出大气耗散函数在每个像素点的取值都为正且取值介于零和雾天图像各颜色通道的最小值之间,可用有雾图像中三通道的最小颜色分量对  $V(x)$  进行初始估计。首先提取雾天图像的最小通道图  $W(x) = \min_{c \in \{r, g, b\}} (I^c(x))$ ,  $W(x)$  包含了图像中丰富的边缘特性和纹理信息。Tan等人<sup>[1]</sup>指出大气耗散函数与图像的纹理信息无关,在大部分地方都是光滑的,仅与场景深度有关且在深度突变的边缘处会发生跳跃,因此保留景深的边缘信息并滤除图像的纹理信息对生成准确的大气耗散函数至关重要。为了得到满足上面要求的  $V(x)$ ,采用基于总变差改进的相对总变差方法来估计大气耗散函数。

总变差(TV)方法最早是由Rudin等人<sup>[10]</sup>提出,其解空间为有界变差函数空间,该空间的函数允许存在边缘等不连续的信息,所以在图像复原中有较好的边缘保持能力,并可以去除图像中的纹理细节信息。为了能够更好地去除纹理细节保留图像深度变化的边缘特性,采用文献[11]提出的一种基于总变差(TV)改进的相对总变差(RTV)去纹理方法对最小通道图像进行处理,从而得到去除纹理信息又保留深度信息的大气耗散函数。

RTV是一种基于总变差形式的新模型,可以处理非统一或者各向异性的纹理。改进的模型为

$$\arg \min_p \sum_p (S_p - I_p)^2 + \lambda \cdot \left( \frac{D_x(p)}{L_x(p) + \varepsilon} + \frac{D_y(p)}{L_y(p) + \varepsilon} \right) \quad (4)$$

式中  $(S_p - I_p)^2$  表示提取出来的结构图像和输入图像的相似性,通过引入一个新的正则化  $(D_x(p)/(L_x + \varepsilon) + D_y(p)/(L_y + \varepsilon))$  来更好区分纹理信息和结构信息,  $\lambda$  是一个权重,用来控制图像的光滑程度,  $\varepsilon$  是一个很小的正值防止分母为0。

如图1所示,基于窗口总变差(TV)的计算值反应了图像的视觉显著性,在一定程度上区分了纹理信息和结构信息,但区分度有限(如图1中的橙色柱条)。RTV通过引入基于窗口的固有变差(IV),利用窗口中像素点的梯度方向是否一致的特点,得到窗口中像素点的整体空间变化,从而更好的区分纹理边缘和结构边缘(如图1中的绿色柱条),可以看出所引入的固有变差(IV)可以很好地区分纹理边缘和结构边缘。为了更好地从图像中分离纹理信息和结构信息,将总变差(TV)和固有变差(IV)结合起来得到相对总变差(RTV),从图1中的两种边缘的RTV值计算(如图1中的蓝色柱条)可以看出,RTV方法可以显著提升纹理和结构信息的区分度,从而更好的去掉图像中的纹理信息。

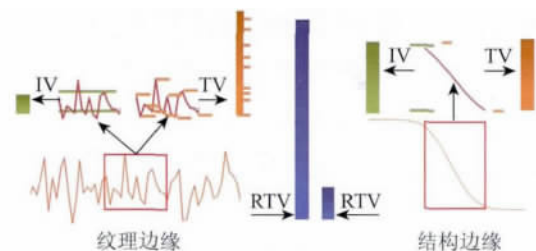


图1 两种边缘的RTV计算

Fig. 1 RTV calculation between two kinds of edge

近年来单幅图像去雾中经常会用到保边去噪的滤波器来估计大气耗散函数,为了验证RTV方法有较好的去纹理保边特性,将其与目前较好的保边滤波器进行比较。如图2所示,将RTV与加权最小二乘滤波(WLS)<sup>[12]</sup>、双边滤波(BLF)<sup>[13]</sup>、引导滤波(GF)<sup>[4]</sup>分别处理纹理图像,可以看出RTV可以很好去除纹理,而其他方法均未能很好地去掉图像纹理。WLS以及Xu等人<sup>[14]</sup>提出的梯度最小化方法与TV纹理结构的分解方式不同,他们依赖于图像的梯度幅值,并不能很好地将图像纹理分离出来。而BLF和GF方法都属于局部平滑,可以抑制图像



中的细节并保留图像的高频信息,但它们并不是为了去纹理而产生的,容易保留小边缘,将它们应用于纹理细节的去除效果并不好。通过图3几种算法的效果图可以看出RTV的处理结果与之前分析的大气耗散函数的特性是一致的,虽然WLS的处

理结果也符合深度特性,但是在局部的纹理细节上处理的并不好,如图2(b)所示,在去除纹理的同时,也模糊的图像的结构边缘。因此从总变差原理出发,利用RTV方法可以得到较为精确的大气耗散函数。

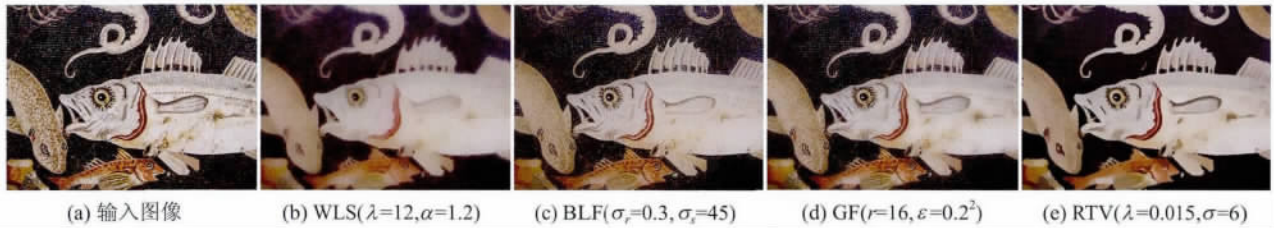


图2 对纹理图像的处理结果

Fig. 2 The processing results of texture images



图3 对最小通道图处理结果

Fig. 3 The processing results of the minimum channel images

以上分析可知,RTV方法可以很好地去掉图像纹理信息,所以对 $W(x)$ 进行RTV计算,既可以去除与复原图像无关的纹理细节,又能保留复原图像过程中所需要的深度信息。为了方便,用 $I_{RTV} = RTV(I, \lambda, \sigma, \varepsilon)$ 来表示图像的相对总变差计算,则大气耗散函数的计算可以表示为

$$V(x) = w \cdot RTV(W(x), \lambda, \sigma, \varepsilon) \quad (5)$$

式中 $w$ 为去雾调节参数,控制远景处的雾气残留,使去雾后图像自然。 $\lambda$ 是一个权重,用来控制图像的光滑程度。 $\sigma$ 是窗口尺度大小,用来控制权重函数的影响范围。 $\varepsilon$ 是一个防止分母为0的很小的正值。如图4所示,在场景深度 $d(x)$ 跳变的局部区域, $V(x)$ 也同时产生了跳变;而在同一场景深度或者变化较平缓的区域, $V(x)$ 基本保持不变。通过RTV计算出的大气耗散函数,保护了图像沿梯度方向的跳变,且在边缘和平缓区域之间的过渡十分自然,符合雾图中的雾气分布特性,所复原的图像不会出现halo效应或者雾气残留。

## 2.2 自适应保护因子

由于雾图中的天空,偏白色的物体不满足暗通



图4 大气耗散函数估计

Fig. 4 Estimation of atmospheric veil

道先验的假设,去雾结果易出现色彩失真问题,其主要原因在于天空区域的像素大体偏白色,3个通道的像素值差异不大,从图4的大气耗散函数可以看出,天空区域的 $V(x)$ 值很大,这时图像对天空区域的去雾力度很大,把原来三通道只有几个像素值的差异放大几倍甚至几十倍,因此导致天空区域的色彩失真,为了能够消除去雾后图像的色彩失真,改善图像视觉效果,文献[5]提出了改进的暗通道先验去雾,采用固定阈值来修复透射率,在一定程度上保护有天空雾图的复原效果,但易造成无天空雾图的去雾不足。文献[6]采用分割天空区域并提取最大联通区域作为识别的天空区域,在一点程度上改善了复原图像的色彩失真问题,但易造成天空部位某

些块的漏检,导致被漏检天空区域的色彩失真。为了解决目前复原图像存在的色彩失真问题,提出基于一维直方图分割的自适应保护因子对大气耗散函数进行修复以防止去雾后图像的色彩失真。

由图 5(b) 的雾图最小通道  $W(x)$  归一化直方图可以看出,图像的天空区域或白色物体通常是比较亮的,在直方图上呈现高尖峰特性。为了保护天空区域色彩的不失真,需要调整天空区域或者白色物体的大气耗散函数,即图像中靠近大气光值的尖峰直方图,通过引入一个自适应保护因子  $Thr$  来分割天空区域和白色物体区域,修复  $|G - A| < Thr$  ( $G$  是雾天图像的灰度图) 范围内的大气耗散函数,这些区域通常是比较亮的区域,其 3 个通道的像素值差异并不大,因此需要重新计算大气耗散函数以避免复原图像出现颜色失真。而其他区域的大气耗散函数值则保持不变,以获得较好的去雾效果。因此  $V(x)$  的计算公式可以重新定义为

$$V(x) = \max \left( \min \left( \frac{\text{abs}(G - A)}{Thr} \right), 1 \right) \cdot w \cdot RTV(W(x), \lambda, \sigma, \varepsilon, \rho) \quad (6)$$

式中如何准确的计算分割阈值是避免图像色彩失真的关键所在,对于无白色物体或者天空区域的图像,阈值  $Thr$  将设置为 0.1,以避免去雾不足。由上述分析可知,  $Thr$  的值取决于靠近大气光值的天空图像的尖峰直方图的宽度,因此如何准确地定位尖峰直方图的起始点  $ThrB$  将是计算阈值  $Thr$  的关键所在。下面将说明如何计算  $ThrB$ :

1) 为了判断直方图的分布情况,首先计算  $W(x)$  归一化直方图  $His(x)$ ,并计算图像累积分布函数  $L(x)$ ,提取直方图分布在  $[0.02, 0.98]$  的主直方图,利用分布函数计算  $L(x_1) = 0.02$  和  $L(x_2) = 0.98$  对应的灰阶值  $x_1$  和  $x_2$ ,最终计算出主直方图的中心点  $Med = (x_2 - x_1) / 2 + x_1$ ,如图 5(b) 中的绿色线条所示。

2) 利用最大类间方差法(Otsu)<sup>[15]</sup>对  $His(x)$  进行分割得到  $x_{otsu}$ ,如图 5(b) 中的红色线条所示。

3) 通过缩小直方图区间准确找到尖峰直方图起点对应的像素点,采用二分法快速查找位于  $[\max(Med, x_{otsu}), A]$  区间中直方图最小极小值点  $l_{min}$  (其中黑色线条代表  $A$  所在的位置),并计算  $l_{min}$

所对应的灰阶级,也就是要找的  $ThrB$ ,即位于图 5(b) 中的蓝色线条。

4) 为了自适应判断含天空雾图和非天空雾图,通过计算大量雾图直方图得到判断阈值  $ThrC = 1.5^{(-3)}$ 。

综上所述可以得到

$$Thr = \begin{cases} A - ThrB & His(ThrB) < 1.5^{(-3)} \\ 0.1 & His(ThrB) > 1.5^{(-3)} \end{cases} \quad (7)$$

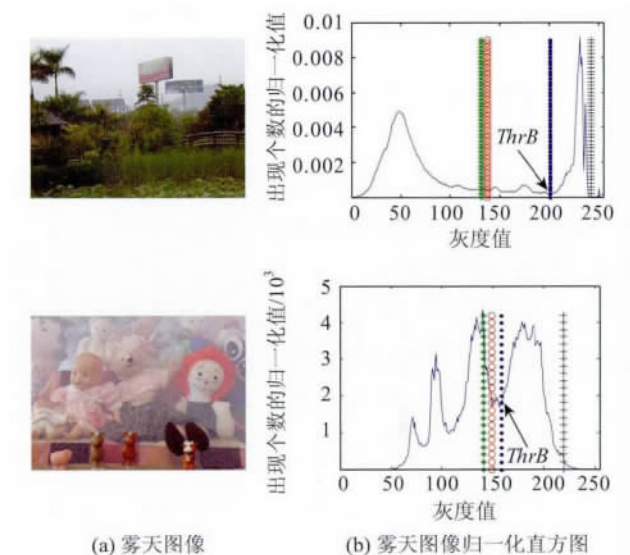


图5 雾图的归一化直方图

Fig. 5 The normalized histogram of foggy image

为了验证自适应保护因子的有效性,对大量的雾图进行了测试,下面给出一些测试结果。对图 4 的大气耗散函数进行修正得到图 6,可以看出有天空图像的大气耗散函数都得到的修正,而对于无天空的图像则基本保持不变,测试结果表明,本文提出的自适应保护因子可以很好地保护天空及浓雾等区域,避免了去雾后图像的色彩失真问题。



图6 大气耗散函数修正结果

Fig. 6 The correction result of atmospheric veil

## 2.3 大气光值估计及图像复原

大气光  $A$  值近似阴天天空中像素的最大值,或者雾图中雾最浓区域的最大值,如何找到图像中雾气最浓的区域或者天空区域是计算  $A$  值的关键。为了能够快速准确地估计出大气光值,采用文献[6]

中提到的四叉树细分法,并对其进行改进。除了计算图像块的均值,还计算图像块的方差值以避免大面积白色物体对大气光值估计的影响。

将  $W(x)$  划分成 4 个子块,分别计算 4 个子块的平均亮度和方差,然后用子块的平均亮度减去子块的方差,将子块中差值最大的块重复划分,当子块的大小小于自定义的大小时停止搜索并标记图像块的位置,为了适应不同大小的图像,选择图像块大小的 0.1% 作为停止搜索条件。然后根据所标记图像的位置计算原雾图中  $R$ 、 $G$ 、 $B$  通道中此块的均值  $\bar{R}$ 、 $\bar{G}$ 、 $\bar{B}$ ,最终得到的大气光  $A = [A_r, A_g, A_b] = [\bar{R}, \bar{G}, \bar{B}]$ 。

获得准确的大气耗散函数  $V(x)$  和大气光值  $A$  后,结合式(3)可以得到清晰的复原图。

#### 2.4 图像亮度调整

雾天得到的图像,由于在大气光的作用下,导致图像整体偏白,像素值要比真实的像素值要大,经过式(3)处理复原后,图像整体亮度偏暗,所以有必要对图像的亮度进行调整以提高图像的质量,使其更加符合人眼特性。

为了提高去雾后图像的亮度,采用曲线拟合的方法来快速调整图像亮度。复原图前 60% 的像素值比较低,用文献[16]中提到的拟合曲线  $L_d = L_w(255 + T)/(L_w + T)$  来调整图像亮度,余下 40% 为图像中亮度比较大的像素点,采用线性函数来拟合  $L_d$  曲线的后 40% 以加快亮度调整速度。 $T$  为调整参数,取值越小,图像的亮度提升越大,为了自适应调整处理后的图像亮度,在实验室中取  $T = 3 \cdot \text{mean}(W(x))$ 。如图 7 所示,对复原的图像按 a、b 曲线进行调整。

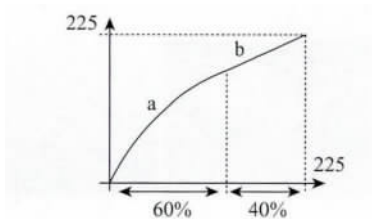


图 7 亮度调整

Fig. 7 Brightness adjustment

图 8 显示了亮度调整后的效果图对比,可以看出,图 8(b) 虽然降雾气去除,但是图像整体偏暗,视觉效果不佳,经过调整后的结果图 8(c) 相对于图 8(b) 来说更加明亮,细节饱和度强,整体效果更加接近晴天场景下拍摄的图像。



图 8 本文去雾效果

Fig. 8 Haze removal results

### 3 实验结果与比较

测试图像均来源于互联网,所使用的平台为 Intel (R) Core(TM) i5-4590 CPU@3.30 Hz with 4 GB RAM 的普通 PC 机。图 9 给出了本文算法在不同场合下获取的大气耗散函数、修复后的大气耗散函数以及复原图像。实验参数  $w = 0.98$ 、 $\lambda = 0.03$ 、 $\sigma = 3$ 、 $\varepsilon = 0.02$ 。可以看出,对不同类型的图片,本文算法均可以得到较为理想的效果图,其主要原因在于 RTV 方法可以很好保护大气耗散函数的深度信息,所提出的自适应保护因子可以准确地修正大气耗散函数,避免了复原图像的色彩失真问题,使复原后的图像更加符合人眼观察特性。从图 9 中可以看出本文算法去雾效果好,场景适应力强,显著改善了图像的视觉能见度。

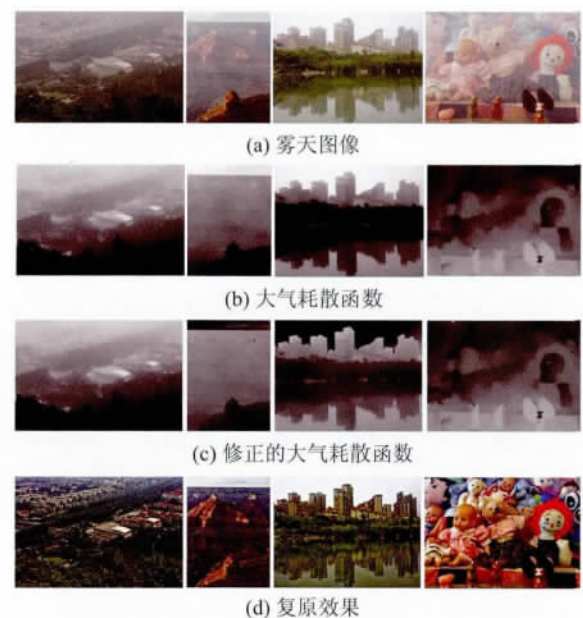


图 9 本文更多的去雾结果图

Fig. 9 More results using our method

#### 3.1 主观视觉效果比较

图 10 给出本文算法和 He 算法<sup>[4]</sup>以及文献[5]提出的改进的暗通道先验去雾算法进行对比,可以



发现文献[4]的运行速度得到了明显的提高,但却损失了图像的复原质量,复原图像出现了严重的 halo 效应,而且天空区域出现了严重的色彩失真,严重影响了复原效果,文献[5]针对文献[4]出现的色彩失真问题,提出了容差机制,采用固定阈值的方法来修复透射率,在一定程度上减少了图像色彩失真,但

由于采用了固定的阈值,对天空的图像色彩保护不足(如图10(c)第2组图像),并且对无天空的图像去雾不足(如图10(c)第4组图像)。通过对比可以发现,本文算法在一定程度上解决了雾天图像复原中出现的 halo 效应以及色彩失真问题,得到较好的视觉效果。图11给出了4组图像,通过与目前处



图10 实验结果对比

Fig. 10 Comparison of haze removal results

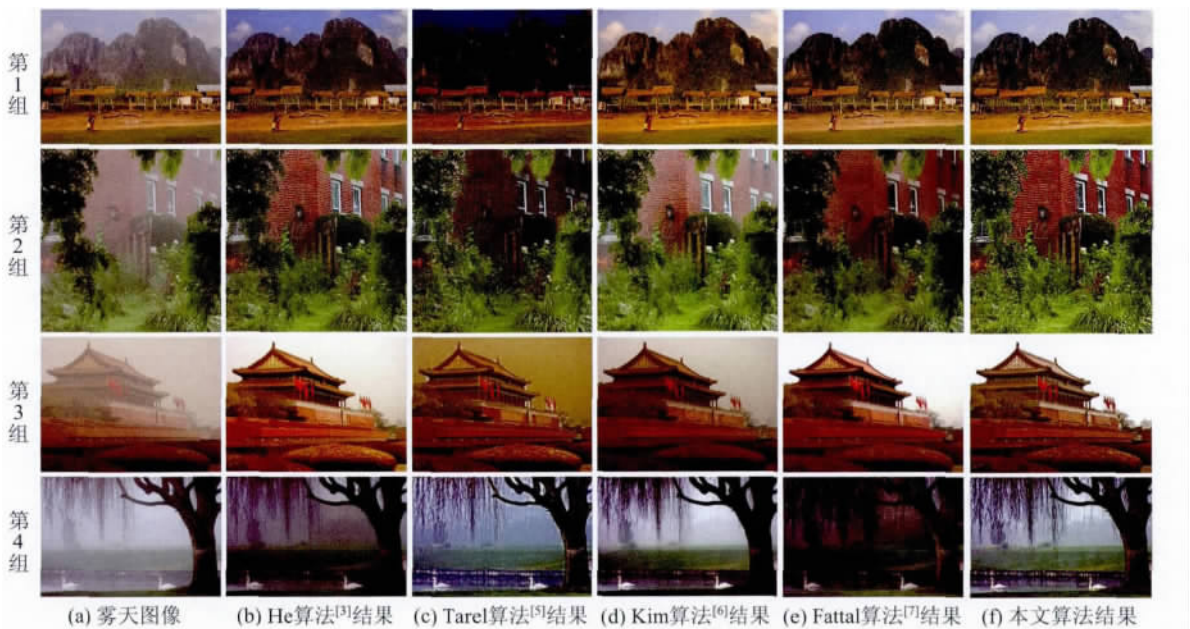


图11 实验结果对比

Fig. 11 Comparison of haze removal results

理效果较好的去雾算法进行比较,并采用作者提供的程序或处理结果来验证本文算法的视觉优势。He 等人采用暗通道先验对图像进行复原,总体来说复原效果较好。Tarel 方法由于采用了中值滤波求取大气耗散函数,对局部的大气耗散函数估计不准确,复原效果较差,有些图片色彩失真严重。Kim 利用损失函数来估计局部最佳透射率,在一定程度上提高了处理速度,但同时也损失了图像的复原质量,从复原图中可以看出去雾不足。Fattal 采用了马尔可夫随机场的方法,加强了相似像素之间的联系,复原与本文结果较为相似,但是在图像的深度频繁变换处易出现色彩失真,如 Fattal 的第 4 组图。从第 1 组和第 4 组可以看出,本文复原图的色彩感丰富,具有一定的视觉优势。

### 3.2 客观分析比较

目前比较常用的客观评价体系是 Hautiere 等人提出的可见边梯度法<sup>[17]</sup>。其中  $e$  为新可见边集合数目比,  $e = (n_r - n_o) / n_o$ ,  $n_o$  和  $n_r$  分别代表原图像和去雾图像中的可见边的数目。 $r$  为平均梯度比,  $r = \overline{g_r} / \overline{g_o}$ ,  $\overline{g_r}$  表示去雾图像的平均梯度,  $\overline{g_o}$  表示原有图像的平均梯度。 $e$  和  $r$  越大表示复原图像的质量越高。表 1 给出图 11 中图像的测试结果。

表 1 实验结果比较

Table 1 Comparison of haze removal results

图像	指标	He <sup>[3]</sup>	Tarel <sup>[5]</sup>	Kim <sup>[6]</sup>	Fattal <sup>[7]</sup>	本文
第 1 组	$e$	0.151 2	0.243 0	0.285 7	0.003 6	0.053 6
	$r$	1.180 4	1.424 8	2.543 5	1.551 7	1.796 8
第 2 组	$e$	0.118 2	0.189 3	0.057 0	0.056 2	0.041 1
	$r$	2.238 1	1.788 7	1.458 5	1.949 0	2.550 8
第 3 组	$e$	0.488 0	0.617 5	0.468 2	0.476 5	0.510 1
	$r$	2.634 8	2.436 5	1.828 8	2.025 4	2.924 9
第 4 组	$e$	0.368 4	0.734 3	0.385 9	0.704 7	0.360 5
	$r$	1.208 7	3.074 3	2.006 3	2.336 0	2.408 5

从表 1 可以看出,本文算法的  $r$  指标超过最新的 Fattal 所提出的算法,总体的  $r$  指标也比 He 的方法、Tarel 方法及 Kim 的算法要高。部分  $e$  指标较低的原因是对于某些雾图采用 RTV 方法尽管在复原后可见像素点相对于原图像明显增多了,但是复原后的像素点连成了一片区域,因而在计算这些可见

像素点构成的可见边数目时  $e$  值反而变小。从整体上看,本文算法相比其他算法具有一定的优势。

对处理效果较好的 He 方法、Fattal 方法和本文方法的时间复杂度进行分析。He 方法<sup>[3]</sup>中的软抠图是一个大规模稀疏线性方程组的求解问题,具有很高的计算复杂度,在本文所用的平台上处理  $600 \times 400$  的图像平均需要  $10 \sim 15$  s 的时间; Fattal 方法<sup>[9]</sup>效果与本文算法较为相似,但算法中用到了马尔可夫随机场,导致算法的时间复杂度较高,算法用 C 语言实现,在 2.6 GHz 的机子上处理  $600 \times 400$  的图像平均需要 5.4 s 的时间;本文算法的主要运行时间消耗在 RTV 计算上面,文献[11]采用数值分解法将非线性问题转化成一系列的线性问题使处理时间仅与图像的大小成线性关系,处理  $600 \times 400$  的图像平均需要 0.83 s,通过对比可以发现,本文算法在处理时间上有明显的提高,具有一定的速度优势。

## 4 结 论

本文提出了一种基于相对总变差的图像去雾算法。该方法充分利用大气散射模型的特性,无需场景的附加信息,自动复原无雾图像。利用相对总变差的去纹理性精确估计大气耗散函数,避免了其它方法中出现的 halo 效应;通过引入自适应保护因子来避免去雾后图像色彩失真问题;最后对复原后的图像进行亮度增强得到颜色更加自然,细节丰富的清晰图像。实验表明本文提出的方法相比于其他算法有更好的视觉效果,适用范围更广,在速度上也具有一定的优势。然而本文算法的局限在于自适应保护因子的引入有时会造成过度保护,如图 9 中的第 2 幅雾图,目前大多数复原算法得到的是湛蓝的天空,而本文得到的是含雾气的天空。接下来的工作是如何解决天空复原中颜色保留问题,使其更加符合人眼特性,并进一步提高算法的速度。

### 参考文献(References)

- [1] Tan R T. Visibility in bad weather from a single image[C]// Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Alaska, USA: IEEE Computer Society, 2008: 1956-1963.
- [2] Fattal R. Single image dehazing[J]. ACM Transactions on



- Graphics 2008 27(3):1-9.
- [3] He K M, Sun J, Tang X O. Single image haze removal using dark channel prior [C] // Proceeding of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Miami, USA: IEEE Computer Society, 2009:1956-1963.
- [4] He K H, Sun J, Tang X O. Guided image filtering[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2013, 35(6): 1397-1409.
- [5] 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. [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.]
- [6] Wang G, Ren G, Jiang L, et al. Single image dehazing algorithm based on sky region segmentation[J]. Information Technology Journal, 2013, 12(6): 1168-1175.
- [7] Tarel J P, Hautiere N. Fast visibility restoration from a single color or gray level image[C]//Proceedings of IEEE 12th International Conference on Computer Vision. Washington DC, USA: IEEE, 2009:2201-2208.
- [8] 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.
- [9] Fattal R. Dehazing using color-lines[J]. ACM Transactions on Graphics, 2014, 34: 1-14.
- [10] Rudin L I, Osher S, Fatemi E. Nonlinear total variation based noise removal algorithms [J]. Physica D Nonlinear Phenomena, 1992, 60(1-4): 259-268.
- [11] Xu L, Yan Q, Xia Y, et al. Structure extraction from texture via relative total variation [J]. ACM Transactions on Graphics, 2012, 31(6): 439-445.
- [12] Farbmán 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): 15-19.
- [13] Tomasi C, Manduchi R. Bilateral filtering for gray and color images[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Computer Vision. Bombay, India: IEEE Computer Society, 1998: 839-846.
- [14] Xu L, Lu C, Xu Y, et al. Image smoothing via L0 gradient minimization[J]. ACM Transactions on Graphics, 2011, 30(6): 61-64.
- [15] Otsu N. A threshold selection method from gray-level histograms [J]. IEEE Transactions on Systems Man & Cybernetics, 1979, 9(1): 62-66.
- [16] Wang W P, Dai S K. Fast haze removal method based on image fusion and segmentation [J]. Journal of Image and Graphics, 2014, 19(8): 1155-1161. [王伟鹏,戴声奎.结合图像融合与分割的快速去雾[J].中国图象图形学报,2014,19(8):1155-1161.] [DOI: 10.11834/jig.20140806]
- [17] Hautiere N, Tarel J P, Aubert D, et al. Blind contrast enhancement assessment by gradient ratioing at visible edges [J]. Image Analysis and Stereology Journal, 2008, 27(2): 87-95.