

中图分类号: TP319.4 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2017)07-0897-09

论文引用格式: Shen Y Y, Shao Y Q, Liu C X, Zhou H J, Zhao J W. Integrating sky detection with texture smoothing for image defogging[J]. Journal of Image and Graphics 2017 22(7): 0897-0905. [沈逸云, 邵雅琪, 刘春晓, 周华健, 赵锦威. 结合天空检测与纹理平滑的图像去雾[J]. 中国图象图形学报 2017 22(7): 0897-0905.] [DOI: 10.11834/jig.170030]

结合天空检测与纹理平滑的图像去雾

沈逸云, 邵雅琪, 刘春晓, 周华健, 赵锦威

浙江工商大学计算机与信息工程学院, 杭州 310018

摘要: 目的 针对已有图像去雾方法中存在的天空灰暗以及透射率分布与实际情况不一致导致的对比度增强不足等问题, 以暗通道先验图像去雾方法为基础, 提出结合天空检测与纹理滤波的图像去雾算法。方法 首先, 设计了一个基于天空检测的大气光自适应估计策略, 以天空区域亮度值较低的像素为依据估计大气光值, 能够避免天空色彩失真, 获得更明亮且干净的天空恢复结果; 其次, 对输入图像进行纹理平滑预处理以保持同一平面物体内的像素颜色一致性, 并提出一个基于块偏移与导向滤波的透射率精确化计算策略, 使透射率估值更符合深度信息的变化趋势, 以提升无雾图像的对比度与色彩饱和度; 最后, 对复原结果进行联合双边滤波后处理, 以降低噪声的影响。结果 本文算法得到的大气光估值更为合理, 对于不符合暗通道先验的天空区域, 能够取得更为自然的天空复原结果; 本文算法得到的透射率的变化趋势与实际场景深度之间具有更高的一致性, 对于符合暗通道先验的非天空区域, 能够取得高对比度与高色彩饱和度的恢复结果。结论 本文算法在大气光与透射率的估值的准确性以及无雾图像的对比度与清晰度增强方面都得到了有效提升, 具有较高的鲁棒性, 适用于视频监控、交通监管和目标识别等户外获取图像的诸多应用领域。

关键词: 图像去雾; 大气光; 透射率; 天空检测; 纹理平滑

Integrating sky detection with texture smoothing for image defogging

Shen Yiyun, Shao Yaqi, Liu Chunxiao, Zhou Huajian, Zhao Jinwei

School of Computer and Information Engineering, Zhejiang Gongshang University, Hangzhou 310018, China

Abstract: **Objective** Fog results in degradation of contrast and color saturation in the images shot outdoor. Therefore, the visibility of objects will decline, and details will be difficult to recognize. Thus, robust defogging techniques are valuable in the industrial fields driven by outdoor images or videos. Currently, the mainstream defogging methods are based on the foggy image degradation model, and two main problems that come from the estimation of atmospheric lights and transmissions remain. First, sky regions do not comply with the dark channel prior. The atmospheric light, which suffers from the interference of sunlight in the images with large sky area, is overestimated, resulting in gloomy sky regions in the fog-free image.

收稿日期: 2017-02-15; 修回日期: 2017-04-20; 预印本日期: 2017-04-27

基金项目: 浙江省自然科学基金项目(LY14F020004); 国家自然科学基金项目(61003188, 61379075, U1609215); 国家科技支撑计划基金项目(2014BAK14B01); 浙江省公益性技术应用研究计划基金项目(2015C33071); 浙江工商大学青年人才基金项目(QZ13-9); 浙江省智能交通工程技术研究中心开放课题(2015ERCITZJ-KF1)

第一作者简介: 沈逸云(1995—), 男, 现为浙江工商大学计算机科学与技术专业本科生, 主要研究方向为图像视频处理与增强复原技术。E-mail: onecloud.shen@gmail.com

通信作者: 刘春晓, 副教授, 硕士生导师, E-mail: cxliu@mail.zjgsu.edu.cn

Supported by: Natural Science Foundation of Zhejiang Province, China(LY14F020004); National Natural Science Foundation of China(61003188, 61379075, U1609215)

ges. Second, halo effects require being eliminated through a necessary transmission refinement process. However, the existing refinement methods will result in unreasonable transmissions with texture-like fluctuations inside the same planar objects, causing the inconsistency of variation trends between the transmission map and the depth information. Furthermore, these transmission fluctuations exert a negative influence on the contrast enhancement in the non-sky regions, which conform to the dark channel prior. To address the abovementioned problems, we combine sky detection with texture smoothing and propose a new image defogging algorithm. **Method** First, we design an adaptive atmospheric light estimation strategy based on sky detection, which can avoid gloomy restoration results of the sky regions, to address the overestimation of atmospheric lights in the images with sky regions. Initially, the foggy images are classified according to whether these images encompass sky regions. For the foggy images with sky, the pixels within the sky regions are sorted by their luminance values. The atmospheric light values are estimated according to the sky pixels with low luminance values. The problem of overestimated atmospheric light can be overcome through this strategy, resulting in bright and clean sky regions without color distortion phenomenon. For the foggy images without sky, a SVM-based atmospheric light validation strategy is adopted to avoid the interference of highlight objects and estimate reliable atmospheric light values. Second, we suggest a precise transmission calculation strategy based on patch shift and guided filter to solve the problem of insufficient contrast enhancement for the non-sky regions. At the first step, the input images are preprocessed by texture smoothing to simultaneously suppress the unnecessary texture details inside the same planar objects and maintain the necessary boundary information among the different objects. Therefore, the smoothed input images can maintain color consistency inside the same planar objects. Next, rough transmissions are estimated through the patch shift mechanism to restrain the halo effects, which are then refined with the smoothed input images by the guided filter. Thus, the refined transmissions are consistent with the trend of the depth variation, which is beneficial in promoting the contrast and color saturation of the fog-free images. Third, the fog removal results are post-processed with the original input images by the joint bilateral filter to prevent the negative impact from the noise inside the area with low luminance. **Result** For the foggy images with sky regions, relatively lower atmospheric lights can be obtained by our adaptive atmospheric light estimation strategy, and the problem of overestimating atmospheric lights is conquered. Therefore, the restoration results of the sky regions that do not comply with the dark channel prior are bright and clean, without color distortion phenomena. For the foggy images without sky regions, the selected locations of the atmospheric lights will avoid the highlight objects and lie in the regions with highest fog density by using the SVM-based atmospheric light validation strategy. Second, the texture details in the preprocessed images are suppressed fully through texture smoothing, and the pixel color information within the planar objects maintain homogeneous and continuous. The refined transmissions with our precise transmission calculation strategy hold high consistency with the depth variation under the guidance of the texture-smoothed images, and the restored non-sky regions that conform to the dark channel prior present high contrast and color saturation. Moreover, the noise in the fog-free images is reduced after the joint bilateral filtering process. **Conclusion** For the gloomy sky regions derived from the exceptions to the dark channel prior, reasonable atmospheric lights are concerned with our method, which is different with the previous strategies that split the sky regions and process them alone. Experimental results show that our estimated atmospheric lights have relatively lower values, and the sky restoration results are bright and clean. For the insufficient contrast-enhanced non-sky regions because of texture details in the original input images, the guidance of transmission refinement is preprocessed through texture smoothing, which is different from the direct transmission refinement strategies used in the previous methods. Moreover, our estimated transmissions are consistent with varying depth information, which contribute to the contrast and color saturation enhancement. Compared with the existing image defogging methods, our fog removal results have higher contrast and color saturation with natural sky regions, which are qualified in outdoor application fields, such as video surveillance, traffic regulation, and object detection. However, some excessive color saturation enhancement will lead to local color distortion phenomena, thus a reasonable and practical control strategy for the color saturation enhancement is expected as our next research goal.

Key words: image defogging; atmospheric light; transmission; sky detection; texture smoothing

0 引言

当环境中悬浮的气体小液滴与固体小颗粒大量聚集时形成雾或霾。悬浮物质对透过的光线具有散射作用,削弱了光线质量,导致雾天户外拍摄的图像降质。降质图像会对视频监控、交通监管以及图像识别等工作产生重大不利影响。近年来,有雾图像的复原工作已成为计算机视觉和计算机图形学等多学科交叉领域的热门研究方向。

有雾图像与无雾图像的主要差别在于后者具有较高的对比度,因此,许多基于图像增强的去雾方法^[1-2]被提出。但是此类方法并没有考虑场景深度对图像降质的影响,只是全局增强对比度,往往会导致无雾图像出现色调不协调的现象。目前主流的图像去雾方法都基于雾天图像退化模型^[3],依据场景深度反推降质前的无雾图像。然而,输入数据中深度信息的缺失使去雾工作依然具有很大挑战。因此,也有许多方法使用多幅输入图像进行去雾,比如基于同场景不同天气条件的去雾方法^[4]以及基于不同角度偏振图像的去雾方法^[5],还有部分方法要求直接输入深度信息^[6]。此类方法^[4-6]对输入数据的要求较为苛刻,实用性较差。各类假设及先验的提出使得对单幅图像进行有效去雾成为可能。Tan 等人^[7]最大化有雾图像的局部对比度,能够达到一定去雾效果,但是易造成局部对比度过度增强。Zhu 等人^[8]通过观察有雾图像中亮度与色彩饱和度的关系,提出基于色彩衰减先验的图像去雾方法,但是其通过设置全图统一的散射系数计算透射率,易造成局部区域去雾程度不足。

相对于已有的单幅图像去雾方法,目前效果较好的主要有 Fattal 等人提出的基于颜色线先验的图像去雾方法^[9]与 He 等人^[3]提出的基于暗通道先验的图像去雾方法。基于颜色线先验的图像去雾方法^[9]发现同一平面部分图像块内像素点的颜色值在 RGB 颜色空间成线性分布的规律,即颜色线先验。但是其对颜色线的筛选较为苛刻,易使部分图像在局部区域缺少透射率估计,导致最后拟合的透射率可靠性降低,恢复的无雾图像出现颜色失真现象。基于暗通道先验的图像去雾方法^[3]提出在无雾图像局部区域内存在某个颜色通道值接近零的规律,即暗通道先验。测试显示,暗通道先验适用于大

部分户外有雾图像且性能较为突出,然而仍存在两方面不足:第一,天空部分并不符合暗通道先验,复原得到的无雾图像易产生天空灰暗或偏色现象。对此,刘兴云等人^[10]引入自适应保护因子修正天空部分的透射率估值,以避免天空区域色彩失真,但是会导致天空部分去雾效果不足。邢晓敏等人^[11]取天空区域均值作为大气光值,以避免天空出现偏色现象,但恢复得到的无雾图像对比度不高,而且不适用于没有天空的有雾图像。第二,基于暗通道先验的图像去雾方法^[3]得到的透射率图像较为粗糙,容易在无雾图像中造成光晕效应,需要通过软抠图^[3]、导向滤波^[12]等方式对透射率图像进行精细化操作。然而,基于滤波的精细化操作易使同一平面的透射率估值出现不必要的纹理波动,不利于图像对比度的增强。对此,赵锦威等人^[13]提出基于块偏移的透射率计算策略估计透射率,能够有效减少光晕的产生,但是对于少量残留光晕粗糙地以替换的形式进行处理,易使交界处出现视觉瑕疵。Lai 等人^[14]通过求解带约束的大型矩阵方程估计透射率,以避免不合理的透射率波动,然而该方法效率较低且复原结果存在偏色现象。

针对基于暗通道先验的图像去雾方法^[3]中仍存在的不足,本文根据是否存在天空分别使用不同方式估算大气光,对于存在天空的图像能够得到比较明亮的天空复原结果;对输入图像进行纹理平滑预处理,使精细化校正后的透射率更符合深度信息变化规律,从而提升非天空区域的对比度与色彩饱和度。与主流单幅图像去雾方法相比,本文算法得到的去雾效果天空明亮干净,没有颜色失真现象,非天空区域对比度、色彩饱和度更高。

1 本文算法

雾天图像退化模型^[3]可以表示为

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

式中 $I(x)$ 表示有雾图像中像素点 x 的颜色值, J 为期望恢复的无雾图像, t 为透射率,用于衡量物体表面反射光在悬浮介质中的衰减比率, A 为环境大气光。透射率 t 可表示为^[3]

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

式中, $d(x)$ 表示像素点 x 的深度值, β 表为散射系数。

天空区域并不符合暗通道先验规律^[3],其透射率的估值较小,会导致恢复结果中天空区域的像素值变化幅度过大,出现偏色或灰暗的现象。如果对天空部分的透射率进行校正,提升其透射率估值^[10],虽然能够避免偏色现象,但是会导致天空去雾力度不足,恢复得到的天空偏灰色。由此可见,对于不符合暗通道先验的天空区域,无论使用何种方式校正透射率都无法得到一个明亮干净的天空恢复结果。本文使用大气光 A 对不符合暗通道先验规律的天空区域进行校正,并提出了一个大气光自适应估计策略,对于存在天空的图像,能够恢复得到明亮的具有显著去雾效果的天空结果。接着,本文对输入图像进行纹理平滑预处理,并提出使用基于块偏移与导向滤波的透射率精确化计算策略计算透射率值,以避免相同平面透射率出现纹理波动,对于符合暗通道先验规律的区域,能够提升恢复结果的对比度。最后,本文对恢复得到的无雾图像使用联合双边滤波进行后处理,消除噪声的影响。图1展示了本文算法的流程图。

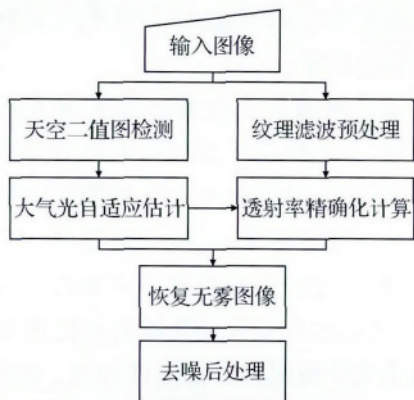


图1 本文算法流程图

Fig. 1 Flowchart of our algorithm

1.1 大气光自适应估计

物体表面反射光,太阳光等光源在大气悬浮颗粒中经过漫反射形成环境大气光 A ^[3]。观察式(1)可知,当 $t(x)$ 趋近于零时 $J(x)$ 将趋近 A ,因此,可以近似认为图像中雾最浓区域的光线强度就是 A 。

对于存在天空的图像,大气光一般会选取在天空像素值最高的区域,使得大气光估值高于大部分天空像素值。根据式(1),恢复结果中天空部分的像素值相较于有雾图像会降低,出现天空灰暗的现象。反之,如果使大气光估值低于大部分天空像素值,则天空恢复结果会比有雾图像更加明亮。因此,本文

设计了一个大气光自适应估计策略,为存在天空的图像估算一个较低的大气光值,以得到明亮干净的天空恢复结果。首先,使用基于一维直方图分割的天空识别方法^[10]检测天空区域。如果图像中存在天空,则对天空像素按照亮度值进行排序,剔除亮度值最低的0.5%的像素,以避免天空检测结果中存在的噪声对大气光估值产生的影响。接着取天空区域亮度值最低0.1%的像素点的三通道颜色均值作为大气光值。通过这种方式取得的大气光值较低,能够确保得到明亮的天空复原结果。同时,由于天空区域的深度值理论上是无限大,因此该大气光取值也是合理的。如果图像中不存在天空区域,则使用基于支持向量机的误判大气光校验方法^[13]估计大气光值,该方法能有效避免图像中车灯等高亮物体的干扰,筛选后的大气光选取位置也能恰当体现图像中雾最浓区域的意义。

图2展示了有天空的图像去雾实例,图2(c)中红色区域为暗通道先验图像去雾方法^[3]选取的大气光位置,蓝色区域为本文选取的大气光位置,可以看到本文大气光选取在天空亮度值较低的区域,估计得到的大气光选取在天空亮度值较低,图2(h)中展示了本文算法中大气光自适应估计模块替换为暗通道先验图像去雾方法^[3]中大气光估计模块后得到的无雾图像,可以看出,图2(h)的天空较为昏暗,相较于输入图像出现了严重的偏色现象,造成了视觉上的不适,而本文算法恢复的无雾图像的天空结果更为明亮、干净并且没有偏色现象的产生。图3展示了一个没有天空的图像去雾实例,由于其并不存在天空区域,因此本文直接使用基于支持向量机的误判大气光校验方法^[13]估计大气光。图3(b)中红色方框代表被剔除的大气光位置,绿色方框代表最终选取的大气光位置。

1.2 透射率精确化计算

基于暗通道先验的图像去雾算法^[3]通过在局部图像块内取颜色通道最小值来计算中心像素点的透射率值。然而,当图像块处于物体边缘时容易产生不可靠的透射率估计,导致出现光晕效应,其本质是局部透射率估值过高导致的去雾力度不足。对此,一般的解决策略是以输入图像为模版,使用软抠图^[3]或导向滤波^[12]对粗糙的透射率图像进行精细化校正,使透射率图像的边缘信息尽量与输入图像吻合,从视觉上达到消除光晕效应的目的。但是此

类精细化策略主要存在两方面缺陷: 1) 在滤波过程中, 相邻像素的透射率值之间会相互影响, 如果图像中存在大范围的光晕效应, 那么与光晕相邻区域内的透射估值会在精细化操作过程中被拉升, 这将严重削弱这部分光晕相邻区域的去雾力度。2) 等深度平面的透射率值应具有一致性, 但是, 直接以输入图像作为模版的精细化操作会使相同平面的透射率出现不必要的纹理波动, 使得透射率估值与实际深度的变化趋势相违背, 其会对无雾图像对比度的增强造成不利影响。对此, 本文提出基于纹理平滑的精细化透射率估计策略, 能够在避免产生上述两方面缺陷的同时得到更为可靠的透射率估计。首先, 本文采用零范数滤波^[15]对输入图像 I 进行纹理平滑预处理, 即

$$\min_I \left\{ \sum_p (I'_p - I_p) + \lambda C(I') \right\} \quad (3)$$

$$C(I') = \#\{p \mid |\partial_x I'_p| + |\partial_y I'_p| \neq 0\}$$

式中 I'_p 代表滤波后像素点 p 的值, I 是输入图像, $C(I')$ 代表 I' 中梯度不为零的像素点个数, λ 是滤波系数。零范数滤波不仅能够较好地抑制输入图像中的纹理信息, 使相同平面的连续物体尽可能保持一致的颜色值, 还能够增强图像的边缘梯度, 避免不同的物体被平滑至同一平面。本文通过大量实验发现, 有雾图像最佳的滤波参数 $\lambda \in (0.01, 0.05)$ 。由于最佳参数的取值空间较窄, 所以取一个折中的 λ 并不会对结果造成较大影响, 为了用户使用方便同时节省计算时间, 设置 λ 的默认值为 0.03。

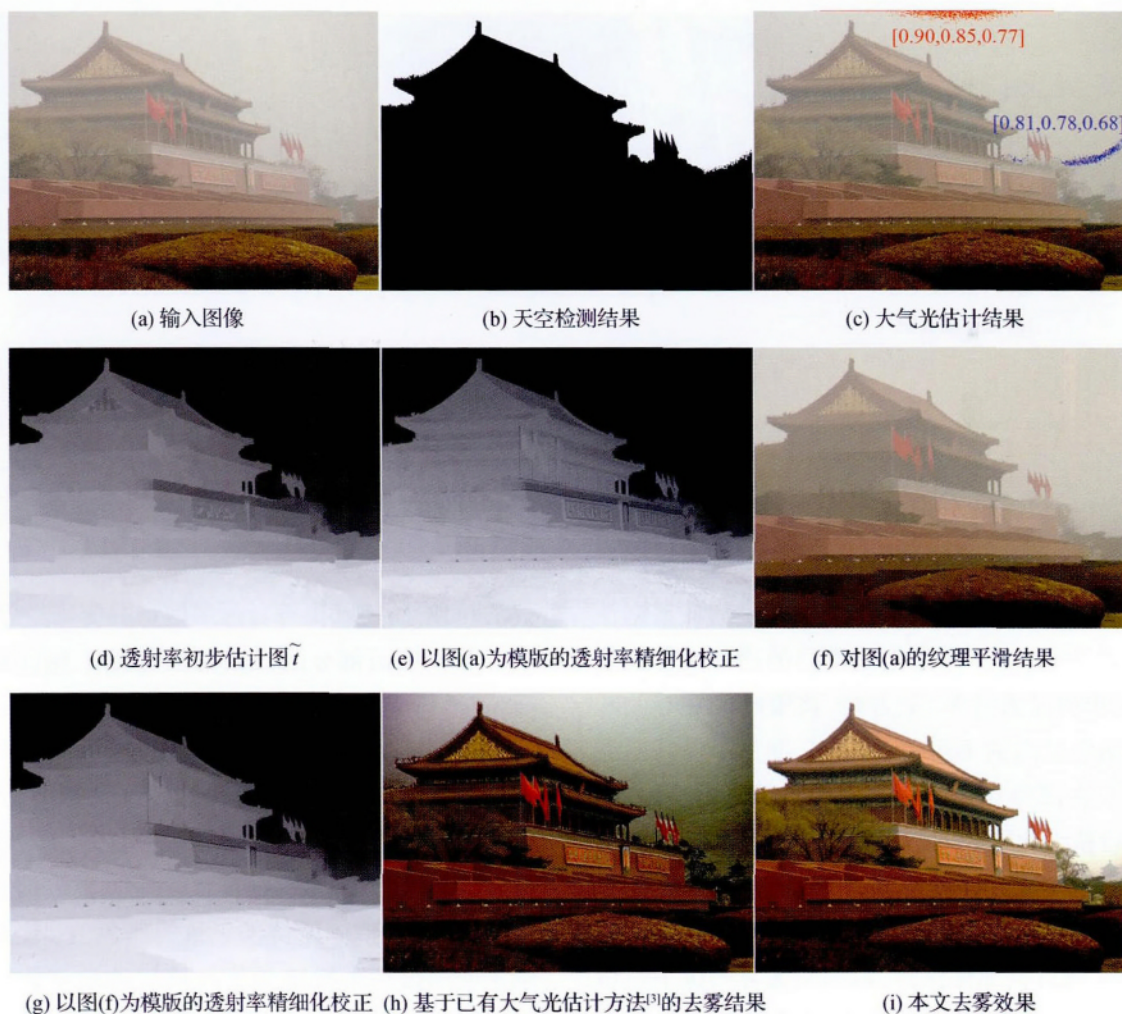


图2 有天空的天安门图像去雾实例

Fig. 2 Tiananmen image defogging example with sky (a) the input image; (b) the sky detection result; (c) the atmospheric light estimation result; (d) preliminary estimated transmission map \tilde{t} ; (e) fine transmission correction with figure (a); (f) texture smoothing result of figure (a); (g) fine transmission correction with figure (f); (h) the haze removal result based on the existing atmospheric light estimation method^[3]; (i) our dehazing result)



图3 没有天空的大楼图像去雾实例

Fig. 3 Mansion image defogging example without sky((a) the input image; (b) the location of the estimated atmospheric light; (c) preliminary estimated transmission map \tilde{t} ; (d) refined transmission map with figure(a); (e) texture smoothing result of figure(a); (f) refined transmission map with figure(e); (g) local magnification; (h) our defogging result; (i) dark channel prior based image defogging result^[3])

接着,本文以 I' 以及大气光自适应估计策略估算的 A 作为输入,采用基于块偏移的透射率计算策略^[14]初步估计透射率,记为 \tilde{t} 。该策略能够有效减少 \tilde{t} 中估值过高的不可靠透射率,使用 \tilde{t} 恢复的无雾图像只在部分复杂结构下出现少量光晕。因此,对 \tilde{t} 进行精细化操作时,会产生光晕的不可靠透射率对相邻透射率估值的影响将得到有效控制。

最后,本文以 I' 作为滤波模版,采用导向滤波^[12]对 \tilde{t} 进行精细化操作,以消除无雾图像中残留的光晕效应。将精细化操作后的透射率记为 t 。经过零范数滤波^[15]预处理, I' 中的纹理细节得到有效抑制。相同平面物体具有一致的颜色信息,因此,使用 I' 作为滤波模版的精细化操作不仅能够使 t 的边缘信息趋近输入图像,还能够保持同一平面透射率估

值的一致性,使其更符合深度信息的变化趋势。

图3 墙面部分的红砖与墙缝处于相同深度平面,其透射率估值应近似相等,但是在图3(g)中图(d)放大图中,以输入图像作为模板的精细化操作得到的透射率在墙面部分出现明显纹理波动,不符合深度信息的变化规律。图3(e)展示了对输入图像进行纹理平滑的效果,可以发现大楼墙面处的纹理得到抑制,整体保持了一致的颜色值,图3(f)展示了使用纹理平滑结果作为模板的精细化操作结果,从局部放大图中可以看到相同平面的透射率估值保持了高度的一致性,对比图3(h)与图3(i)可以看出,本文算法恢复的无雾图像比暗通道先验图像去雾方法^[3]得到的无雾图像具有更高的对比度与色彩饱和度。

1.3 联合双边滤波后处理

将大气光自适应估计得到的 A 与透射率精确化计算得到的 t 代入式(1)进行单幅图像去雾, 得到的无雾图像为 \tilde{J} 。 \tilde{J} 颜色饱满, 对比度与可见度高, 但是部分无雾图像在亮度值较低的区域易出现大量噪点。对此, 本文采用联合双边滤波对无雾图像 \tilde{J} 进行后处理

$$J_p = \frac{1}{K_p} \sum_{p, q \in \Omega} \tilde{J}_q f(p - q) g(I_p - I_q) \quad (4)$$

式中 J_p 表示后处理图像中像素点 p 的颜色值, I 是输入图像, $f(x) = \exp(-\frac{\|x\|^2}{\sigma^2})$ 是距离空间的高斯权重函数, $g(x) = \exp(-\frac{\|x\|^2}{\sigma^2})$ 是颜色空间的高斯权重函数, K_p 是以 p 为中心的局部区域 Ω 内所有像素的权重之和。联合双边滤波同时参考了像素点的空间信息与 I 的颜色信息, 能够在去除噪点的同时保持图像边缘。

图4(b)与图4(c)分别展示了后处理前的无雾图像 \tilde{J} 与经过后处理后的无雾图像 J , 从图4(d)局部放大图中可以看到, 无雾图像远景处的噪点被有效去除, 同时图像的边缘信息与对比度得到较好地保持。



图4 基于联合双边滤波的后处理效果

Fig.4 Joint bilateral filtering based post-processing result

((a) input foggy image; (b) fog-free image

without post-processing; (c) fog-free image

after being post-processed; (d) local magnification)

2 实验结果与讨论

图5比较了基于暗通道先验的方法^[3]、基于颜色线先验的方法^[9]以及本文算法的去雾效果。

从图5实例1可以看出, 暗通道先验图像去雾方法^[3]与颜色线先验图像去雾方法^[9]得到的无雾图像去雾力度不足, 整体色调暗淡, 对比度与饱和度不高。本文算法恢复得到的无雾图像整体明亮, 墙面与树叶都具有较高的对比度色彩饱和度。

图5实例2显示, 暗通道先验图像去雾方法^[3]得到的去雾结果较为灰暗, 红框区域内树干上方与下方的去雾程度不一致。颜色线先验图像去雾方法^[9]得到的无雾图像在左侧枝条部分出现严重偏色现象, 且图像较暗。本文算法去雾效果整体明亮, 色彩较为饱满, 红框区域内的景物较为清晰。

从图5实例3可以发现, 暗通道先验图像去雾方法^[3]整体去雾效果不佳, 街道及大片房屋去雾力度不足, 仍残留有薄雾。颜色线先验图像去雾方法^[9]得到的无雾图像整体色彩波动不大, 失去了真实感, 前景的树叶部分存在明显光晕。本文算法得到的无雾图像具有较高的对比度与色彩饱和度且天空没有偏色现象。

图6展示了本文算法与3个基于暗通道先验的图像去雾改进算法的效果比较图。图6实例1显示, 刘兴云等人^[10]的方法在图像上半部分出现了偏色现象。邢晓敏等人^[11]的方法并不适用于没有天空的图像, 会导致图像出现严重的过曝现象。赵锦威等人^[13]的方法得到的无雾图像对比度较低。本文算法得到的无雾图像都具有较高的对比度与色彩饱和度。

图6实例2显示, 刘兴云等人^[10]的方法恢复得到的天空不够明亮, 前景房屋处对比度过高, 且局部区域偏黑。邢晓敏等人^[11]的方法得到的无雾图像在非天空部分的对比度与色彩饱和度较低, 整体色调平淡。赵锦威等人^[13]的方法在天空处存在严重的偏色现象。本文算法恢复的无雾图像天空明亮干净, 前景的房屋与绿树对比度与色彩饱和度高。

从图6实例3可以看出, 刘兴云^[10]、邢晓敏^[11]与赵锦威等人^[13]的方法得到的无雾图像在天空左侧都出现了严重的偏色现象。本文算法得到的无雾图像天空明亮, 不存在偏色现象, 并且对比度较高。

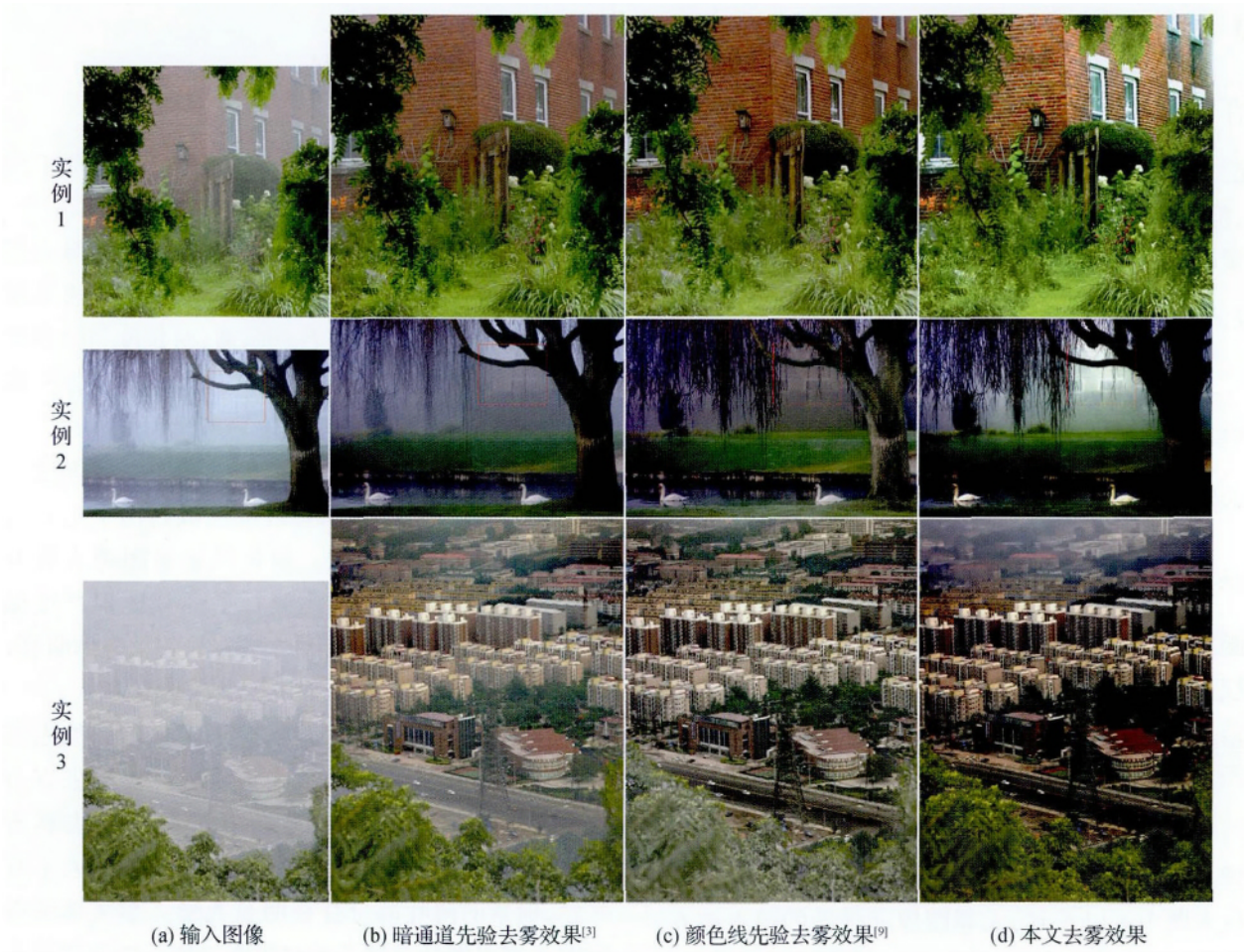


图 5 图像去雾方法比较图

Fig. 5 Comparison of different image defogging methods((a) input images; (b) original dark channel prior based results^[3]; (c) color lines prior based results^[9]; (d) our results)



图 6 本文算法与已有暗通道先验改进方法的比较

Fig. 6 Comparison of our algorithm with other improved dark channel prior based methods((a) the input images; (b) Liu et al' s results^[10]; (c) Xing et al' s results^[11]; (d) Zhao et al' s results^[13]; (e) our results)

3 结 论

本文针对已有单幅图像去雾方法中存在的天空复原结果灰暗的问题,提出使用基于天空检测的大气光自适应估计策略估计合理的大气光值,能够得到较为明亮的天空复原结果并且避免了偏色现象。针对部分透率不符合实际深度信息变化趋势导致的对比度增强不足,提出基于纹理平滑的透射率精确化计算策略,能够使相同深度像素的透射率估值保持更高的一致性,从而获得对比度与色彩饱和度均得到极大提升的非天空区域复原结果。

然而,颜色饱和度的过度提升也会带来一定程度的颜色失真问题,如图5(d)实例1中的窗户玻璃,合理控制饱和度提升的程度以避免颜色失真现象的发生是我们正在努力争取达成的下一个研发目标。

参考文献 (References)

- [1] Rahman Z, Jobson D J, Woodell G A. Multi-scale retinex for color image enhancement [C]//Proceedings of the 1996 International Conference on Image Processing. Lausanne: IEEE, 1996, 3: 1003-1006. [DOI: 10.1109/ICIP.1996.560995]
- [2] Reza A M. Realization of the contrast limited adaptive histogram equalization (CLAHE) for real-time image enhancement [J]. Journal of VLSI Signal Processing Systems for Signal, Image and Video Technology, 2004, 38(1): 35-44. [DOI: 10.1023/B:VLSI.0000028532.53893.82]
- [3] 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. [DOI: 10.1109/TPAMI.2010.168]
- [4] 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. [DOI: 10.1109/TPAMI.2003.1201821]
- [5] Shwartz S, Namer E, Schechner Y Y. Blind haze separation [C]//Proceedings of the 2006 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. New York: IEEE, 2006, 1984-1991. [DOI: 10.1109/CVPR.2006.71]
- [6] 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. [DOI: 10.1145/1409060.1409069]
- [7] Tan R T. Visibility in bad weather from a single image [C]//Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Anchorage, AK: IEEE, 2008: 1-8. [DOI: 10.1109/CVPR.2008.4587643]
- [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. [DOI: 10.1109/TIP.2015.2446191]
- [9] Fattal R. Dehazing using color-lines [J]. ACM Transactions on Graphics, 2014, 34(1): #13. [DOI: 10.1145/2651362]
- [10] 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]
- [11] Xing X M, Liu W. Haze removal for single traffic image [J]. Journal of Image and Graphics, 2016, 21(11): 1440-1447. [邢晓敏,刘威.雾天交通场景中单幅图像去雾[J].中国图象图形学报,2016,21(11): 1440-1447.] [DOI: 10.11834/jig.20161103]
- [12] 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. [DOI: 10.1109/TPAMI.2012.213]
- [13] Zhao J W, Shen Y Y, Liu C X, et al. Dark channel prior-based image dehazing with atmospheric light validation and halo elimination [J]. Journal of Image and Graphics, 2016, 21(9): 1221-1228. [赵锦威,沈逸云,刘春晓,等.暗通道先验图像去雾的大气光校验和光晕消除[J].中国图象图形学报,2016,21(9): 1221-1228.] [DOI: 10.11834/jig.20160911]
- [14] Lai Y H, Chen Y L, Chiou C J, et al. Single-image dehazing via optimal transmission map under scene priors [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2015, 25(1): 1-14. [DOI: 10.1109/TCSVT.2014.2329381]
- [15] Xu L, Lu C W, Xu Y, et al. Image smoothing via L_0 gradient minimization [J]. ACM Transactions on Graphics, 2011, 30(6): #174. [DOI: 10.1145/2070781.2024208]