

## 基于亮度对比度增强与饱和度补偿的快速图像去雾算法

曹绪民<sup>1)</sup>, 刘春晓<sup>1,2)\*</sup>, 张金栋<sup>1)</sup>, 林宇航<sup>1)</sup>, 赵锦威<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> (浙江工商大学计算机与信息工程学院 杭州 310018)

<sup>2)</sup> (浙江捷尚视觉科技股份有限公司 杭州 311121)  
(cxliu@mail.zjgsu.edu.cn)

**摘要:** 针对传统去雾方法存在的恢复质量差和耗时较长等问题, 提出一种基于亮度对比度增强与饱和度补偿的快速图像去雾算法. 首先提出一种基于颜色畸变因子的偏色检测方法, 并通过基于完美反射的白平衡方法对存在偏色的图像进行色彩校正; 然后在 Lab 色彩空间的亮度通道内, 结合基于天空检测的大气光值估计方法和基于暗通道先验的透射率估计方法, 提出基于大气散射模型的亮度通道对比度增强方法; 最后为了改善图像画面的苍白感, 在 HSV 色彩空间的饱和度通道内提出基于大气散射模型的饱和度补偿方法, 对初步去雾结果进行饱和度补偿, 获得色彩鲜艳的无雾图像. 与有代表性的去雾方法进行实验的结果表明, 该算法可以有效地提高去雾速度, 并在避免颜色畸变的同时获得高对比度和高饱和度的清晰复原结果.

**关键词:** 偏色检测; 天空检测; 亮度对比度增强; 饱和度补偿

**中图分类号:** TP391.41 **DOI:** 10.3724/SP.J.1089.2018.17000

## Fast Image Defogging Algorithm Based on Luminance Contrast Enhancement and Saturation Compensation

Cao Xumin<sup>1)</sup>, Liu Chunxiao<sup>1,2)\*</sup>, Zhang Jindong<sup>1)</sup>, Lin Yuhang<sup>1)</sup>, and Zhao Jinwei<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> (School of Computer and Information Engineering, Zhejiang Gongshang University, Hangzhou 310018)

<sup>2)</sup> (Zhejiang iCare Vision Technology Co., Ltd., Hangzhou 311121)

**Abstract:** Aiming at the disadvantages of low image quality and long response time in the existed image defogging methods, we propose a fast image defogging algorithm based on luminance contrast enhancement and saturation compensation. Firstly, a color cast detection method based on color distortion factor is put forward, and correction of the images with color cast is realized through a white balance method on the basis of perfect reflection. Then, in the luminance channel of Lab color space, a luminance contrast enhancement method based on atmospheric scattering model is raised by the combination of the sky detection based atmospheric light estimation as well as the dark channel prior based transmission estimation. Finally, to improve the image quality and get color-bright and haze-free effects, we design a new saturation compensation method based on the atmospheric scattering model in the saturation channel of HSV color space, to compensate the saturation of the preliminary defogging results. Compared with the state-of-the-art defogging methods, our algorithm can effectively improve the defogging speed. Moreover, high-contrast, and clear

收稿日期: 2017-11-20; 修回日期: 2018-07-19. 基金项目: 国家自然科学基金(61379075, 61472363, U1609215); 浙江省自然科学基金(LY14F020004); 国家科技支撑计划项目(2014BAK14B01); 浙江省公益性技术应用研究计划项目(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). 曹绪民(1997—), 男, 在校学生; 刘春晓(1979—), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, CCF 会员, 论文通讯作者, 主要研究方向为图像视频处理与理解、智能视觉监控、计算机视觉、模式识别与智能系统; 张金栋(1997—), 男, 在校学生; 林宇航(1997—), 男, 在校学生; 赵锦威(1995—), 男, 学士, 工程师, 主要研究方向为图像视频处理、增强与识别技术.

restoration results can be obtained without color distortion.

**Key words:** color cast detection; sky detection; luminance contrast enhancement; saturation compensation

在雾天环境下, 因为大气中有许多灰尘颗粒和水滴, 所以光线在传播的过程中会发生散射、折射、吸收等反应. 图像去雾方法中通常假定雾为白色透明的物质, 但是由于相机、空气介质等因素的影响, 会导致摄取的有雾图像出现偏色的现象. 雾天的空气中含有大量液滴会吸收光线, 使光线散射, 降低了摄取图像的可见度和对比度. 雾不但会降低图像的对比度, 且由于雾对物体光线的遮挡, 还会使图像的色彩寡淡、饱和度降低, 呈现苍白感, 使图像内的物体缺乏生机. 这些问题已成为视频监控等领域的研究热点, 亟待解决. 因此, 图像去雾技术具有重要的应用价值, 已经成为图像视频处理、计算机视觉和计算机图形学等领域的热点问题.

已有的去雾方法主要分为两大类: 一类是基于图像增强的方法<sup>[1-2]</sup>, 这类方法不需考虑雾天图像降质的问题, 对部分有雾图像能够取得较好的去雾效果. 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<sup>[3]</sup>, 该方法很好地描述了雾天图像退化的过程并构建出大气散射模型, 通过大气散射模型复原出清晰的无雾图像. 但图像场景的深度信息和大气光值难以准确估计, 导致得到的恢复图像仍然存在问题. 因此, 图像去雾仍然是一项有意义和挑战性的工作.

本文将图像去雾过程分解为偏色校正、对比度增强和饱和度补偿 3 个步骤. 为了避免严重的颜色畸变现象, 对输入图像进行基于偏色检测的白平衡预处理; 因为亮度通道包含了大部分的图像结构和纹理信息, 所以仅在亮度通道进行对比度增强处理, 在减少算法耗时的同时获得对比度增强结果; 受有雾图像低饱和度的影响, 对比度增强后的图像饱和度也较低, 基于大气散射模型对对比度增强结果进行饱和度补偿, 获得高饱和度、高对比度的无雾图像.

## 1 相关工作

目前, 已有的图像去雾方法主要分为基于图像增强的方法和基于图像复原的方法.

基于图像增强的去雾方法不考虑每个像素的

深度信息, 通过对整幅图像信息统计进行图像增强. 经典的方法包括基于直方图均衡化的去雾方法<sup>[1]</sup>、基于 Retinex 理论的去雾方法<sup>[2]</sup>等. 直方图均衡化是将有雾图像的直方图变换为均匀分布的形式, 通过增大图像的动态范围达到增强图像对比度的效果. Retinex 理论将图像表示为照射分量和反射分量的乘积, 通过把照射分量去除得到反映物体本身属性的反射分量, 达到去雾的效果. 基于图像增强的去雾方法通过增强图像整体对比度实现去雾效果, 由于没有考虑到图像退化的特征, 容易出现去雾不彻底、去雾后出现光晕等问题.

已有的大部分去雾方法属于基于大气散射模型的图像复原方法. Tan<sup>[4]</sup>根据有雾图像对比度普遍较低的先验条件提出局部对比度最大化的去雾方法, 得到的去雾结果存在过饱和的问题, 并且有比较严重的光晕效应. Zhu 等<sup>[5]</sup>根据有雾图像中亮度与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. Fattal<sup>[6]</sup>使用独立成分分析的方法估计透射率, 该方法对浓雾图像处理效果不佳, 并且无法处理灰度图像. Kratz 等<sup>[7]</sup>基于场景深度和反照度在概率统计上是独立的先验条件, 通过求解最大后验验证概率估计景深和反照度, 但该方法大多以经验值来设定参数, 实用性不强. Tarel 等<sup>[8]</sup>利用滤波预估大气散射函数, 通过色度调和获得最终去雾图像, 该方法恢复结果颜色鲜艳, 但由于使用了色度调和, 导致部分图像出现色彩失真.

对于单幅图像去雾, He 等<sup>[3]</sup>提出基于暗通道先验的单幅图像去雾方法, 该方法简单有效, 对大多数有雾图像都能够有较好的去雾效果; 之后, 他们引入导向滤波<sup>[9]</sup>对透射率进行细化, 但滤波参数设置不当容易引起光晕效应, 并且因为高亮、白色物体或是天空区域不满足暗通道先验的条件, 所以这些位置的透射率往往估计不准确, 致使结果出现光晕或色彩失真等问题. 文献<sup>[10-13]</sup>方法改进了 He 等方法存在的不足. Ancuti 等<sup>[14]</sup>提出一种基于图像融合的去雾方法, 通过多尺度处理消除光晕效应, 由于该方法针对逐个像素进行处理, 因此处理效率较高; 但此方法只通过 2 幅衍生图像

进行融合, 不能完全体现出场景的细节. 多尺度处理也使算法复杂度增加, 效率降低. Fattal<sup>[15]</sup>提出基于颜色线先验的去雾方法, 发现局部图像块内像素点的颜色值在颜色空间呈线性分布的规律, 并利用这一规律与初始值的线性偏移量来预估有雾图像的透射图, 可以很好地对图像进行复原; 但是在图像的深度频繁变换处易出现色彩失真, 并且计算复杂度会相对较高, 耗时较长. Lai 等<sup>[16]</sup>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. Berman 等<sup>[17]</sup>提出雾线先验的去雾方法, 利用有雾图像中同一类像素由于雾浓度不同导致在空间呈线性关系的特点, 预估有雾图像的透射率, 对场景深度明显的图像有较好的去雾效果; 但是由于没有考虑图像局部特征, 导致无雾区域处理后有“加雾”现象, 并且没有提出鲁棒的大气光预估方法. Chen 等<sup>[18]</sup>为了消除光晕和伪影, 提出有雾图像和无雾图像梯度残余最小化的方法, 得到了无光晕伪影的去雾效果; 但是由于迭代次数较多, 导致运行速度较慢, 耗时较长, 并且由于原始图像对比度较低, 导致该方法去雾后图像局部对比度较低. 刘兴云等<sup>[19]</sup>针对去雾过程中容易出现的光晕效应提出消除光晕效应和色彩失真的去雾方法, 并结合大气光特性提出一种基于相对总变差的方法, 对大气光值进行了更加准确的估计; 但是去雾结果中容易出现图像整体偏暗的情况, 仍然存在不同程度的偏色现象. 邢晓敏等<sup>[20]</sup>提出一种雾天交通场景中单幅图像去雾方法, 主要针对雾天环境下交通场景存在大量天空区域的特点, 将有雾图像分为天空区域和非天空区域, 分别采取不同的策略进行去雾; 但对于无天空图像, 去雾结果往往会出现过曝问题. 基于大气散射模型的图像复原方法符合有雾图像的特征, 相对于基于图像增强的去雾方法有更好的效果; 但是难以准确估计透射率和大气光, 容易导致在天空区域出现伪影, 且去雾结果偏暗.

目前, 单幅图像去雾方法存在耗时长、恢复结果中的对比度和饱和度较低等问题, 尤其没有单独对偏色问题进行处理. 为了解决上述问题, 本文提出一种基于亮度对比度增强与饱和度补偿的快速图像去雾算法.

## 2 本文算法

本文算法首先对有雾图像进行偏色检测, 并

对偏色图像进行白平衡预处理, 解决了部分图像去雾后产生颜色畸变的问题. 然后, 将图像转换到 Lab 色彩空间内, 在  $L$  单通道内进行大气光自适应估计, 合适的大气光值可以在天空区域获得较好的恢复效果. 因为  $L$  通道包含了图像内绝大部分的结构和纹理信息, 所以在单通道内进行透射率计算并恢复对比度就可以达到较好的去雾效果. 最后基于大气散射模型推导出饱和度补偿公式, 根据有雾图像的饱和度和透射率可以计算出期望的无雾图像的饱和度. 通过该方法进行饱和度补偿, 可以有效地增加图像的鲜艳程度, 使图像颜色饱满, 画面内的物体栩栩如生. 图 1 所示为本文算法的流程图.

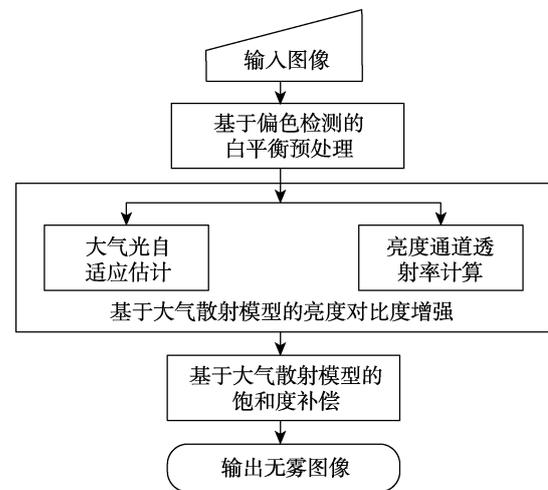


图 1 本文算法流程图

### 2.1 基于偏色检测的白平衡预处理

对于存在偏色的图像, 饱和度补偿会放大偏色效应, 导致恢复结果严重偏色. 为了解决该问题, 本文提出基于颜色畸变因子的偏色检测方法, 对存在偏色的图像, 通过基于完美反射的白平衡方法<sup>[21]</sup>对其进行白平衡预处理.

在图像 Lab 颜色空间内, 通过计算色度空间的均值和中心偏离程度获得颜色畸变因子

$$K = \frac{M}{V} \quad (1)$$

通过  $K$  衡量图像的偏色程度, 对于  $K > 1$  的图像, 认为该图像偏色. 式(1)中,  $M$  为图像的平均色度,  $M = \sqrt{M_a^2 + M_b^2}$ ,  $M_a$  和  $M_b$  分别为  $a$  和  $b$  通道的均值, 即

$$M_a = \frac{\sum_{i=1}^h \sum_{j=1}^w a(i, j)}{h \times w}, M_b = \frac{\sum_{i=1}^h \sum_{j=1}^w b(i, j)}{h \times w}.$$

其中,  $h$  和  $w$  分别表示图像的高和宽;  $V$  为色度空间的中心偏离程度,  $V = \sqrt{V_a^2 + V_b^2}$ ;  $V_a$  和  $V_b$  分别表示  $a$  和  $b$  通道的中心偏离程度, 即

$$V_a = \frac{\sum_{i=1}^h \sum_{j=1}^w |M_a - a(i, j)|}{h \times w}, V_b = \frac{\sum_{i=1}^h \sum_{j=1}^w |M_b - b(i, j)|}{h \times w}.$$

彩色图像的偏色程度不仅与图像色度的均值相关, 也与图像色度的分布特性相关.  $V$  表示了图像色度在 Lab 空间的分布情况,  $V$  越大表示图像色度分布越分散. 在  $a, b$  色度平面内, 根据  $M$  和  $V$  可以计算  $K$ . 一般情况下,  $K > 1$ , 则认为图像存在偏色; 否则, 认为无偏色.

对于  $K > 1$  的偏色图像, 通过基于完美反射的白平衡方法<sup>[21]</sup>进行颜色校正. 从图 2a 和图 2b 的比较可以看出, 白平衡处理不仅能校正图像的偏色问题, 还能地有效提高图像的亮度.



图 2 白平衡对比实例

## 2.2 基于大气散射模型的对比度增强

本文首先借助天空检测方法获得相对准确的大气光估值; 然后将图像转换到 Lab 色彩空间内, 在  $L$  通道内进行透射率计算; 最后基于大气散射模型增强亮度通道对比度. 在  $L$  通道使用的大气散射模型为  $L(x) = L'(x)t(x) + A(1-t(x))$ . 其中,  $L$  表示有雾图像  $I$  的  $L$  通道图,  $t(x)$  为透射率,  $A$  为大气光值. 通过自适应估计的大气光值和亮度通道计算的透射率, 可以计算出对比度增强后的亮度通道值  $L'(x)$ . 将复原结果转换到 RGB 色彩空间, 获得初始去雾结果  $I'(x)$ .

### 2.2.1 大气光自适应估计

He 等<sup>[3]</sup>通过暗通道先验的方法估计大气光值, 没有考虑白色物体和天空区域对大气光选取的影响. 该方法对于存在天空区域的图像, 大气光通常会选取在亮度值相对较高的区域, 高于天空区域

大部分像素的亮度值. 根据大气散射模型, 恢复结果会导致天空区域变得灰暗; 相反, 若取得的大气光值低于天空区域大部分亮度值, 天空区域会变的明亮, 获得较好的去雾效果.

使用基于一维直方图分割的天空识别方法<sup>[22]</sup>可以获得检测较好的天空二值图. 为了加快天空区域检测速度, 将原始图像下采样的结果作为输入图像. 若图像中存在天空区域, 如图 3c 所示, 则在预处理后的图像的  $L$  通道内对天空区域的亮度值进行排序. 为了避免天空区域中存在的噪声对大气光选取产生影响, 剔除掉亮度值最小的前 0.5% 的像素, 然后取  $L$  通道天空区域内最小的亮度值作为图像的大气光值  $A$ . 通过这种方式得到的大气光值小于大部分天空区域的亮度值, 恢复结果的天空区域会显得干净明亮. 对于不存在天空区域的图像, 将预处理结果的暗通道值排序, 求得暗通道值前 0.1% 对应像素亮度值的平均值, 将该平均值作为图像大气光值.

### 2.2.2 亮度通道透射率计算

有雾图像通常信息受损、细节模糊, 饱和度和对比度较低. 基于暗通道先验的图像去雾方法是通过在局部图像块内取  $R, G, B$  三通道最小值来计算透射率值. 通过三通道计算透射率并恢复图像, 会使恢复过程的计算复杂度较高, 不利于快速得到恢复图像. 为此, 本文提出了在  $L$  通道估计透射率值的策略, 并且在亮度通道内通过估计的透射率增强对比度.

将预处理后的图像转换到 Lab 空间后, 为了进一步减少透射率计算耗时, 对  $L$  通道进行高斯下采样处理. 透射率值在图像相同区域内部应尽可能保持一致, 上下采样处理后得到的透射率图比直接得到的透射率图在局部更加平滑, 并且将下采样得到分辨率较小的图像作为输入图, 可以大大减少透射率的计算耗时.

初始透射率可以通过亮度通道块内最小值计算

$$t(x) = 1 - \min_{y \in \Omega(x)} \left( \frac{L_{\text{down}}(y)}{A} \right).$$

其中,  $L_{\text{down}}(y)$  表示有雾图像的亮度通道下采样值;  $A$  表示自适应大气光;  $\Omega(x)$  表示窗口大小,  $\Omega(x) = (2 \times r + 1)^2$ , 半径  $r$  根据图像  $L_{\text{down}}$  的尺寸大小自适应计算, 可通过 round 函数对半径进行四舍五入计算, 即  $r = \text{round}(0.02 \times \min(h, w))$ .

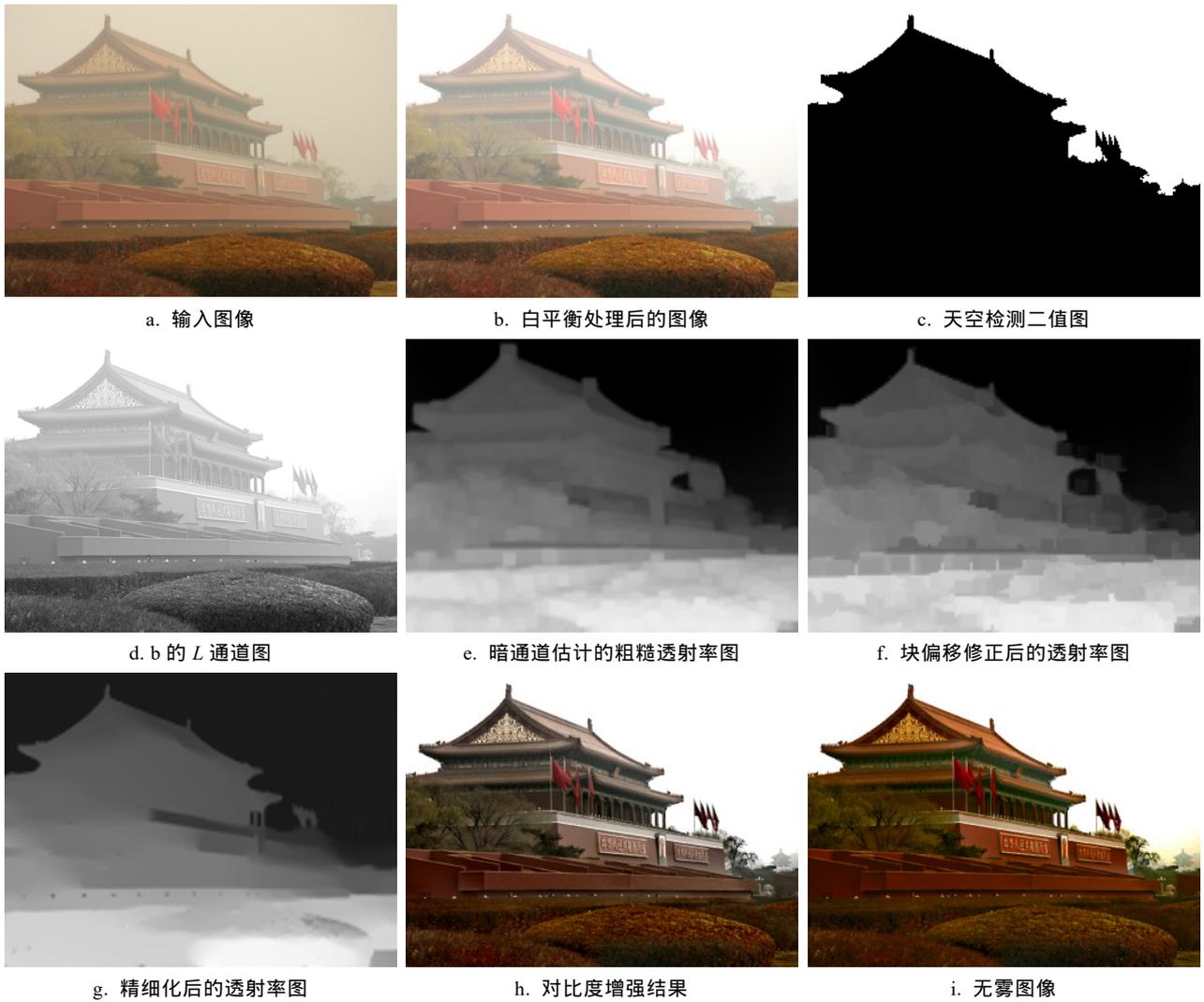


图 3 天安门图像去雾实例

通过基于块偏移的方法<sup>[22]</sup>优化  $L$  通道获得的透射率  $t$ , 在纹理滤波后的  $L$  通道内, 计算每个像素的局部块中最大值和最小值的差值, 并以此为依据得到该局部块内中心像素的新透射率值, 该方法能够有效地去除粗糙透射率的块效应和部分光晕. 每个像素在局部块内亮度的差值

$$\Delta(\Omega_x) = L_{\max}(\Omega_x) - L_{\min}(\Omega_x).$$

其中,  $L_{\max}(\Omega_x)$  和  $L_{\min}(\Omega_x)$  表示以像素  $x$  为中心的局部块  $\Omega_x$  内所有像素  $L$  通道的最大值和最小值.  $p$  表示在图像  $\Delta$  中以像素为中心的局部块  $\Omega_x$  内的最小值位置, 将  $x$  位置的透射率替换为  $p$  位置的透射率  $t(x) = t(p)$ . 至此, 获得了消除块效应的透射率. 从图 3e 和图 3f 可以看出, 经过块偏移操作, 透射率边缘的梯度有了更好的保持, 减少了由于暗通道先验方法带来的块效应.

为了在较好地平滑亮度通道的纹理信息的同

时保持边缘梯度, 本文采用  $L_0$  滤波方法<sup>[23]</sup>对  $L$  通道的下采样图像  $L_{\text{down}}$  进行平滑处理. 通过实验发现,  $L_0$  滤波中颜色保持项和颜色平滑项的系数分别设置为 1 和 0.01 时的图像滤波结果最接近预期效果. 然后以  $L_0$  滤波后的图像为模版, 采用导向滤波<sup>[9]</sup>对基于块偏移计算得到的透射率进行精细化操作, 消除无雾图像中残留的光晕效应. 最后通过双三次上采样操作得到最终的透射率  $t$ .

通过  $L_0$  滤波操作,  $L$  通道中的纹理细节得到有效平滑, 使得相同区域内的亮度值大体相同. 通过上述方法获得的透射率不仅能够保持边缘信息, 还能够使深度相同区域的透射率值也尽可能相同, 进而使得估计的透射率值更符合预期, 如图 4c 所示. 上下采样处理不仅能够减少计算量, 还能够去除局部块内的雾残留. 经过上下采样的操作后, 得到的透射率图更加精细且减少了光晕. 从饱和度

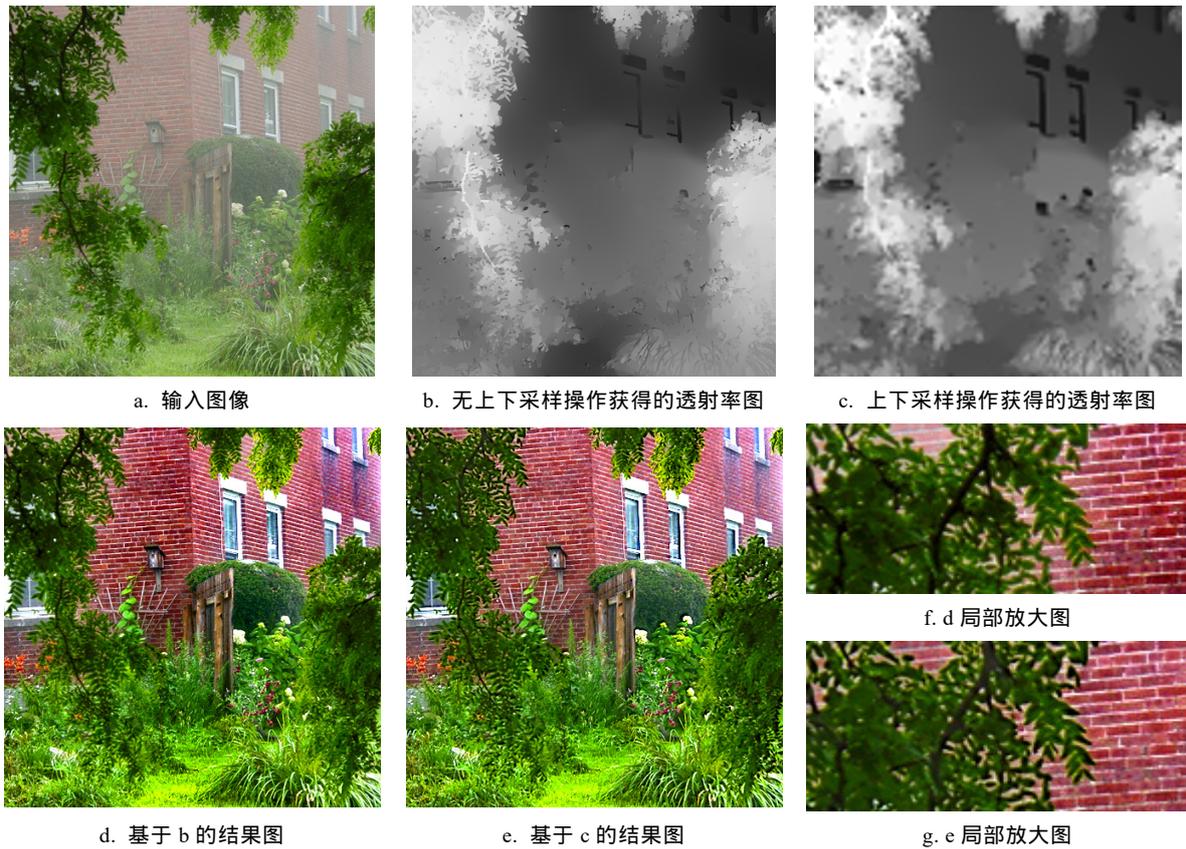


图 4 墙面有雾图像去雾实例

补偿后的结果可以看出, 经过上下采样操作得到的去雾图像光晕更少, 在树叶缝隙处雾残留现象有了明显的改善.

### 2.3 基于大气散射模型的饱和度补偿

亮度通道对比度增强对图像饱和度影响较小, 有雾图像画面苍白感依然存在, 恢复结果的色彩仍然不够鲜艳. 从图 5c 可以看出, 虽然具有较高的对比度, 但是恢复结果色彩暗淡, 视觉效果不佳. 该算法将对对比度增强后的图像转换到 HSV 空间, 在 S 通道内进行饱和度补偿.

本文提出基于大气散射模型的饱和度补偿公式, 通过该公式可以有效地补偿图像饱和度, 获得色彩鲜艳的高饱和度图像. 通常, 图像像素的饱和度

$$S(x) = 1 - \frac{\min(I^c(x))}{\max(I^c(x)) - c}$$

其中,  $I(x)$  表示白平衡预处理后的低饱和度图像;  $S(x)$  表示像素  $x$  的饱和度. 为了得到增强后的饱和度  $S'(x)$ , 根据大气散射模型, 增强前后图像的饱和度应存在如下关系

$$S'(x) = 1 - \frac{\min(I^c(x)) - A(1-t(x))}{\max(I^c(x)) - A(1-t(x)) - c} \quad (2)$$

将式(2)变形得到

$$S'(x) = 1 - \frac{\frac{\min(I^c(x))}{c} - \frac{A(1-t(x))}{\max(I^c(x))}}{1 - \frac{A(1-t(x))}{\max(I^c(x)) - c}} \quad (3)$$

饱和度补偿因子  $\mu(x)$  可以表示为

$$\mu(x) = 1 - \frac{A(1-t(x))}{\max(I^c(x)) - c} \quad (4)$$



图 5 有雾图像去雾实例

将式(4)代入式(2)可以得到饱和度补偿公式

$$S'(x) = \begin{cases} S(x)/\mu(x), & S(x)/\mu(x) \leq 1 \\ 1, & S(x)/\mu(x) > 1 \end{cases} \quad (5)$$

$\mu(x)$  越小, 图像饱和度补偿程度越大. 由于在天空和白色物体区域求得的透射率偏小, 导致饱和度补偿程度较大, 超出饱和度通道范围, 对于增强后  $S'(x) > 1$  的饱和度值作阈值截断. 因为式(5)经过大气散射模型推导, 所以对于大部分透射率估计较为准确的像素, 饱和度补偿的结果也相对准确. 通过自适应估计获得的大气光值小于大部分天空区域的亮度值, 天空区域的恢复结果接近白色, 所以阈值截断操作对这些区域的饱和度几乎无影响. 通过基于大气散射模型的式(5), 最终获得了高饱和度、高对比度的恢复图像, 如图 5d 所示. 相对于对比度增强后的结果, 饱和度补偿使图像的色彩更加鲜艳, 更符合无雾场景摄取的图像.

### 3 实验结果与分析

为验证本文算法的有效性, 与文献[3,15,17-20]的去雾方法进行了比较.

图 6 中, 从实例 1 可以看出, 文献[3]方法得到的图像饱和度有所增强, 但是去雾力度不足, 所以恢复结果对比度较低; 文献[15]方法得到的图像对比度比文献[3]方法略有增强, 但是饱和度较低; 而本文算法恢复得到的图像对比度和饱和度都较高. 从实例 2 可以看出, 经过文献[3,15]方法处理后, 图像去雾不彻底, 存在雾残留; 经过文献[15]方法处理后, 草堆颜色偏白, 对比度和饱和度都较低; 本文算法恢复的无雾图像在保证对比度和饱和度都较高的情况下, 能使得天空区域无偏色现象. 从实例 3 可以明显看出, 相对于文献[3,15]方法的去雾结果, 本文算法的去雾程度更彻底, 且饱和度和对比度更高.

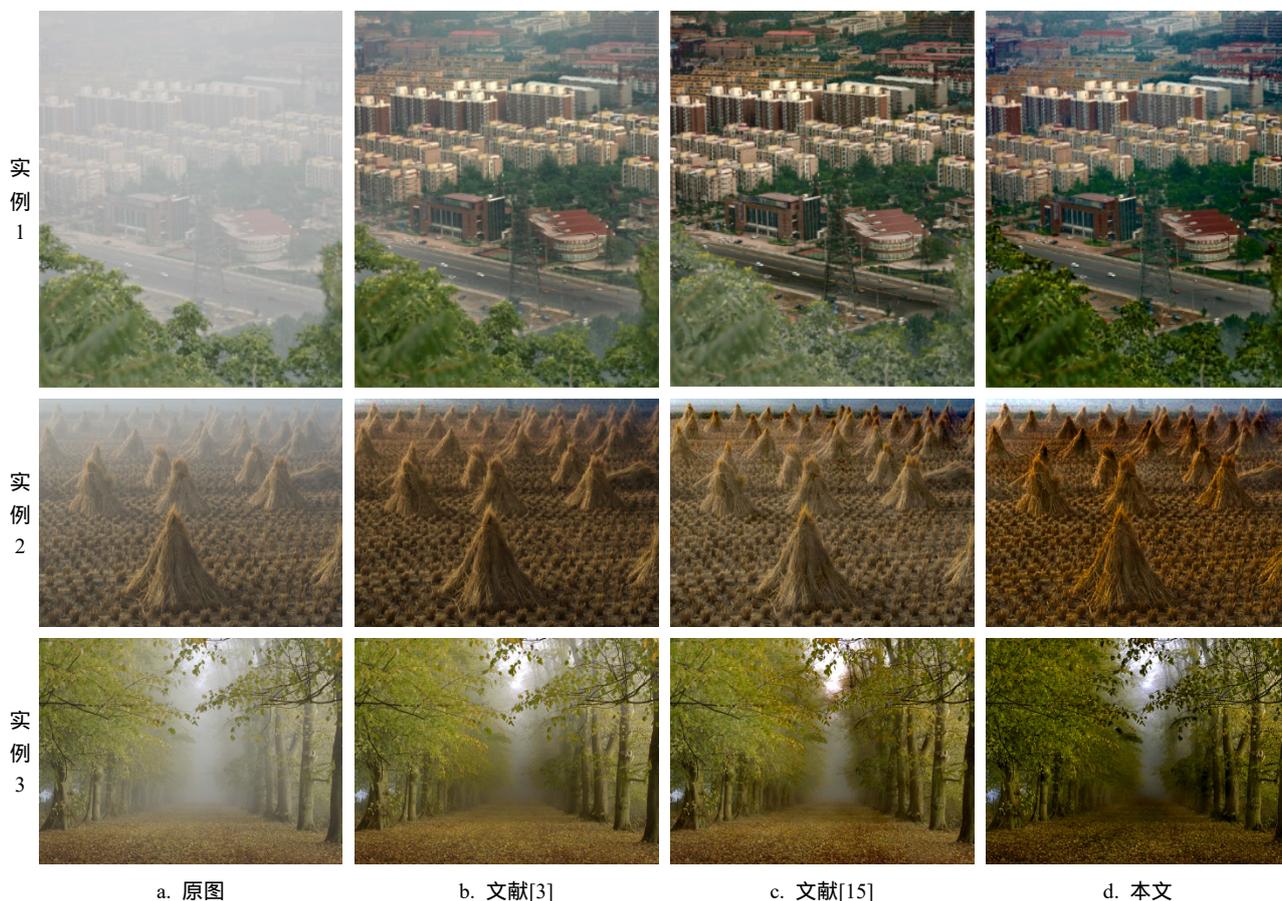


图 6 不同去雾方法效果比较 1

图 7 中, 从实例 1 可以看出, 文献[18]方法去雾后存在偏色且饱和度较低; 文献[17]方法去雾后景深较小处依然有雾残留; 本文算法因为通过白

平衡校正偏色, 所以得到的无雾图像不仅有较好的饱和度和对比度, 而且无偏色. 从实例 2 和实例 3 可以看出, 文献[18]方法的去雾结果对比度都

较低, 文献[17]方法对有明显景深变化的图像有较好的去雾结果, 如实例 2 所示, 但是在景深较小的区域有较明显的雾残留; 与其他 2 种方法相比, 本文算法得到的无雾图像饱和度对比度和对比度都较高.

图 8 中, 从实例 1 可以看出, 文献[19]方法对图像远处的去雾效果不佳, 树丛部分和小路部分

对比度比较低; 文献[20]方法恢复得到的图像对比度更加低, 并且出现了严重的过曝现象; 本文算法得到的无雾图像成功地恢复了更多图像场景中更多远处的细节, 在对比度和饱和度方面与前 2 种方法相比都有较大优势. 从实例 2 可以看出, 通过文献[19]方法去雾后, 在天空和景物的交界处有明显

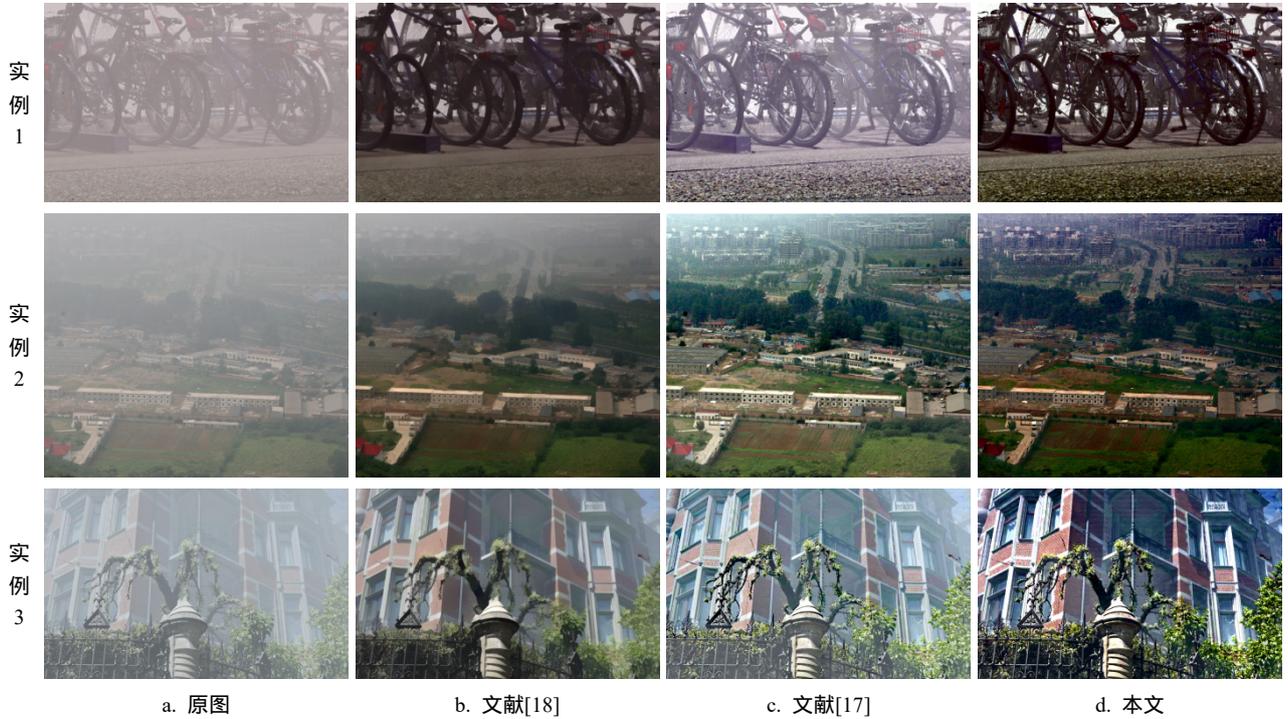


图 7 不同去雾方法效果比较 2

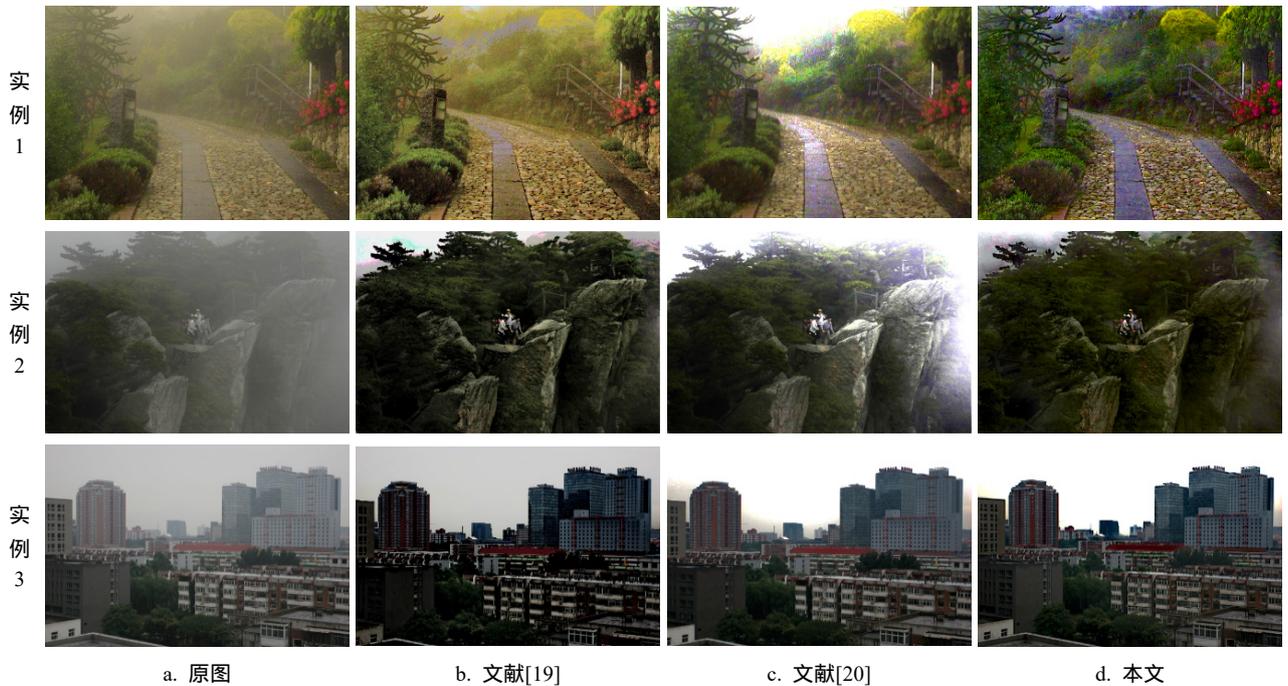


图 8 不同去雾方法效果比较 3

的偏色现象; 文献[20]方法去雾后, 天空部分出现了严重的过曝现象, 导致细节损失; 而本文算法在保留图像细节的同时, 有效地增强了对比度和饱和度. 从实例 3 可以看出, 文献[19]方法得到无雾图像整体偏暗, 天空较为灰暗; 文献[20]方法得到的无雾图像天空比较明亮, 但是在天空与房屋交界处存在大量光晕; 本文算法得到的图像天空区域干净明亮、图像饱和度高、对比度高.

从图 6~图 8 可以看出, 本文算法的去雾结果总体饱和度和对比度都较高; 大气光的准确估计使得天空区域也干净明亮; 通过  $L$  通道去雾不但可以提高去雾结果的对比度, 还可以有效地减少算法处理时间; 使用了滤波和上下采样操作使图像局部对比度更高; 通过大气散射模型推导出的饱和度补偿公式对绝大部分图像都有较好的补偿效果. 综上所述, 本文算法对浓雾和薄雾图像都有较好的去雾效果.

本文展示的有雾图像中, 存在偏色的图 2a、图 3a、图 4a、图 5a、图 7 的实例 1 和图 8 实例 1 的颜色畸变因子  $K$  分别为 2.041, 2.491, 1.509, 1.332, 3.621 和 3.79, 被本文算法判断为偏色图像; 其余有雾图像的颜色畸变因子  $K$  均小于 1, 认为这些图像无偏色. 大量实验结果表明, 本文基于颜色畸变因子的偏色检测方法的准确率达到 95%.

本文采用 Intel Core i5-5200U CPU 的计算机, Matlab 2015a 软件对上述方法进行图像处理时间的统计与分析, 表 1 所示为各种方法运行时间的比较结果. 可以看出, 文献[15]方法由于计算过程中包含大量大型矩阵计算, 时间复杂度较高, 导致运行速度极慢; 文献[3]方法对  $400 \times 400$  的图像处理速度较快, 该方法的时间复杂度与图像大小呈线性关系; 文献[18]方法和本文算法也存在这个现象, 通过时间对比可以看出, 本文算法的耗时远低于文献[15]方法和文献[18]方法; 对于图像分辨率大

于  $1200 \times 1200$  的图像, 本文算法处理时间大约是文献[3]方法的 20%, 是文献[17]方法的 25%, 是文献[19-20]方法的 10%.

## 4 结 语

针对已有的单幅图像去雾方法存在的问题, 本文采用基于偏色检测的白平衡校正方法解决了图像的偏色问题. 该方法结合天空检测方法和暗通道先验方法恢复图像对比度, 在获得清晰复原结果的同时得到了干净明亮的天空区域; 同时提出基于大气散射模型的饱和度补偿公式, 有效地补偿了复原结果的饱和度, 使无雾图像色彩鲜艳, 画面栩栩如生; 在  $L$  单通道内进行透射率计算, 并采用下采样和上采样的策略, 能够有效地缩短去雾处理时间, 大大减少算法运行时间.

## 参考文献(References):

- [1] 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
- [2] Rahman Z, Jobson D J, Woodell G A. Multi-scale retinex for color image enhancement[C] // *Proceedings of the 3rd IEEE International Conference on Image Processing*. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 1996: 1003-1006
- [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
- [4] Tan R T. Visibility in bad weather from a single image[C] // *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2008: 1956-1963
- [5] 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
- [6] Fattal R. Single image dehazing[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2008, 27(3): Article No.72
- [7] Kratz L, Nishino K. Factorizing scene albedo and depth from a single foggy image[C] // *Proceedings of the 12th IEEE International Conference on Computer Vision*. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2009: 1701-1708
- [8] Tarel J P, Hautière N, Cord A, *et al.* Improved visibility of road scene images under heterogeneous fog[C] // *Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Vehicles Symposium*. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2010: 478-485
- [9] 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
- [10] Yu J, Liao Q M. Fast single image fog removal using

表 1 各种方法运行时间比较 s

方法	图像尺寸				
	400×400	600×600	800×800	1000×1000	1200×1200
文献[3]	2.395	5.839	11.434	20.062	34.754
文献[17]	14.635	15.058	16.759	20.346	25.292
文献[18]	77.994	189.615	333.102	542.553	955.217
文献[15]	1162.236	>1162.236	>1162.236	>1162.236	>1162.236
文献[19]	3.421	10.692	23.906	44.516	74.248
文献[20]	3.413	11.090	26.513	52.558	95.140
本文	1.104	1.971	3.227	5.071	6.982

- edge-preserving smoothing[C] //Proceedings of the IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2011: 1245-1248
- [11] Carr P, Hartley R. Improved single image dehazing using geometry[C] //Proceedings of the IEEE International Conference on Digital Image Computing: Techniques and Applications. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2009: 103-110
- [12] Schaul L, Fredembach C, Süssstrunk S. Color image dehazing using the near-infrared[C] //Proceedings of the 16th IEEE International Conference on Image Processing. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2009: 1629-1632
- [13] Dong X M, Hu X Y, Peng S L, *et al.* Single color image dehazing using sparse priors[C] //Proceedings of the IEEE International Conference on Image Processing. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2010: 3593-3596
- [14] Ancuti C O, Ancuti C, Hermans C, *et al.* A fast semi-inverse approach to detect and remove the haze from a single image[C] //Proceedings of the 10th Asian Conference on Computer Vision. Heidelberg: Springer, 2010, Part II : 501-514
- [15] Fattal R. Dehazing using color-lines[J]. ACM Transactions on Graphics, 2014, 34(1): Article No.13
- [16] 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
- [17] Berman D, Treibitz T, Avidan S. Non-local image dehazing[C] //Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2016: 1674-1682
- [18] Chen C, Do M N, Wang J. Robust image and video dehazing with visual artifact suppression via gradient residual minimization[C] //Proceedings of the 14th European Conference on Computer Vision. Heidelberg: Springer, 2016, Part II: 576-591
- [19] Liu Xingyun, Dai Shengkui. Halo-free and color-distortion-free algorithm for image dehazing[J]. Journal of Image and Graphics, 2015, 20(11): 1453-1461(in Chinese)  
(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)
- [20] Xing Xiaomin, Liu Wei. Haze removal for single traffic image[J]. Journal of Image and Graphics, 2016, 21(11): 1440-1447 (in Chinese)  
(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)
- [21] Gasparini F, Schettini R. Color balancing of digital photos using simple image statistics[J]. Pattern Recognition, 2004, 37(6): 1201-1217
- [22] Liu C X, Shen Y Y, Shao Y Q, *et al.* Sky detection- and texture smoothing-based high-visibility haze removal from images and videos[J]. Computer Animation and Virtual Worlds, 2017, 28(3/4): e1776
- [23] Xu L, Lu C W, Xu Y, *et al.* Image smoothing via  $L_0$  gradient minimization[J]. ACM Transactions on Graphics, 2011, 30(6): Article No.174