

基于边缘保持的自适应高斯衰减去雾算法

杨燕*, 张国强, 李一菲, 岳辉

兰州交通大学电子与信息工程学院, 甘肃 兰州 730070

摘要 针对通过局部相似假设估计透射率, 景深突变边缘出现 Halo 效应问题, 提出一种基于边缘保持的自适应高斯衰减图像去雾算法。该方法从大气散射模型出发, 引入大气幕亮度, 将场景透射率的估计等效为大气幕亮度的估计。通过边缘检测算子提取边缘信息, 分离边缘区域与非边缘区域, 利用邻域内像素点的空间邻近度构建自适应高斯函数对非边缘区域进行平滑衰减, 从而获得最优效果。通过大量实验对所提方法进行验证, 结果表明复原的图像整体平滑, 细节明显, 有效地消除景深突变处的 Halo 效应, 并且在客观评价中也体现出了优势。

关键词 图像处理; 高斯衰减; 边缘检测; 大气幕亮度; 边缘保持

中图分类号 TP391

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.081004

Adaptive Gaussian Attenuation Defogging Algorithm Based on Edge Preservation

Yang Yan*, Zhang Guoqiang, Li Yifei, Yue Hui

School of Electronic and Information Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou, Gansu 730070, China

Abstract An adaptive Gaussian attenuation image defogging algorithm based on edge preservation is proposed to solve the problem when transmissivity is estimated under the local similarity assumption, the abrupt change edge of depth field often leads to the Halo effect. This method starts from the atmospheric scattering model and introduces the luminance of the sky, the estimation of scene transmissivity can be equivalent to the estimation of the luminance of the sky. The edge information is extracted by the edge detection operator to separate the edge region and the non-edge region. The adaptive Gaussian function is constructed by using the spatial proximity of the pixel points in the neighborhood to smooth and attenuation on the non-edge region, thereby obtaining the optimal effect. Through a large number of experiments to verify the proposed method, the results show that the restored image is smooth and the details are obvious. It can effectively eliminate the Halo effects at the abrupt changes of the depth field, and it also shows its advantages in the objective evaluation.

Key words image processing; Gaussian attenuation; edge detection; luminance of the sky; edge preservation

OCIS codes 100.2000; 280.1310; 100.2980

1 引言

雾霾天气是一种常见的自然天气, 天空中存在着大量固体颗粒, 水滴等悬浮物, 对光线有折射、散射的作用, 导致成像系统采集的户外图像严重降质, 图像可见度和对比度严重下降, 色彩和分辨率难以保真。因此, 如何复原雾霾天气下捕获的图像, 具有重要的研究意义和使用价值。

目前, 针对单幅图像去雾算法的研究已经取得

了一定的成果。针对不同的方法而言, 主要分为三类: 图像增强、图像复原以及图像融合。图像增强^[1]的方法不考虑图像退化因素, 通过提高对比度突显图像中 useful 细节来增强人眼视觉效果。这类方法由于缺少一定的模型支持, 因此不能达到真正意义上的去雾, 常见的主要是基于 Retinex 理论的去雾方法; 图像复原方法^[2-7]是目前经常采用的方法, 这种方法从图像降质的本质出发, 建立雾天图像退化模型, 利用先验知识以及假设逼近模型参数真实值, 从

收稿日期: 2018-01-18; 修回日期: 2018-02-09; 录用日期: 2018-03-07

基金项目: 国家自然科学基金(61561030)、甘肃省财政厅基本科研业务费(214138)、兰州交通大学教改项目(160012)

* E-mail: yangyantd@mail.lzjtu.cn

而达到去雾的目的,主要是暗通道先验的去雾算法;图像融合方法^[8]是一种基于融合策略的去雾方法,这种方法通过对退化图像进行分层研究,从而选取不同的权重图进行加权融合,可以取得相对优越的效果,但是由于权重值选取不足存在一定的局限性,典型的是多尺度融合图像去雾算法。

近年来,基于单幅雾天图像复原方法的研究取得了巨大的成果。He等^[3]通过对大量无雾图像进行统计提出一种暗通道先验去雾方法,这种方法利用先验知识解决了大气散射模型的病态问题,对于满足暗通道先验的图像可以取得很好的去雾效果,但是在不满足暗通道先验的区域可能失效,且Soft Matting算法时间复杂度较高。因此,后人在暗通道先验的基础上,提出了很多改进算法并且取得了一定成果。Meng等^[4]考虑到大气散射模型病态问题,因此增加约束条件,提出一种基于边界约束的图像去雾方法,该方法通过牺牲部分细节来复原较好的无雾图像。Sun等^[5]提出一种局部大气光估计方法,这种方法可以改善暗通道先验中全局大气光值选取不足的问题。Zhu等^[6]通过观察HSV颜色通道发现,亮度和饱和度的差值与雾浓度呈正相关的关系,因此提出颜色衰减去雾算法,该算法通过近似估计景深达到去雾的目的,但是依然存在去雾不彻底的现象。Cai等^[7]提出端对端系统训练透射率以达到最优去雾效果,但是该方法是在前人先验约束假设的基础上提出来的,因此存在一定的不足。

通过对大量单幅图像去雾方法的研究,本文提出一种基于边缘保持的自适应高斯衰减去雾算法,该方法从大气散射模型出发,引入大气幕亮度,将场景透射率的估计等效为大气幕亮度的估计。通过边缘检测算子提取边缘信息,分离边缘区域与非边缘区域,利用邻域内像素点的空间邻近度构建高斯函数对非边缘区域进行平滑衰减,从而获得最优效果。其次,对于大气光的选取,本文采用局部大气光

的策略。最后,结合大气散射模型复原无雾图像。

2 大气散射模型及其简化

Narasimhan大气散射模型被广泛地应用于去雾算法的研究领域,该模型的表达式为

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

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

式中: $I(x)$ 为捕获的有雾图像; $J(x)$ 为恢复的无雾图像; A 为全局大气光值; $t(x)$ 为透射率; $d(x)$ 是成像设备与景深之间的距离,即场景深度; $J(x)t(x)$ 为直接衰减项; $A[1 - t(x)]$ 为大气幕亮度,反映了全局大气光的散射对场景颜色的影响。

根据大气散射模型,图像复原的目的就是通过观察到的有雾图像 $I(x)$ 估计出全局大气光 A ,场景深度 $d(x)$ 或透射率 $t(x)$,进而恢复出无雾图像 $J(x)$ 。由于方程中有三个未知参数,可知此模型的求解是病态的,因此需要简化模型以削弱求解条件。为了简化大气散射模型,引入大气幕亮度,即:

$$V(x) = A[1 - t(x)], \quad (3)$$

它表示环境光对场景成像的附加部分。将大气幕亮度引入到大气散射模型中,可得到其改进的大气散射模型为

$$I(x) = J(x) \left[1 - \frac{V(x)}{A} \right] + V(x). \quad (4)$$

综上所述,雾化图像 $I(x)$ 的复原可分解成如下步骤:1)由 $I(x)$ 估计大气幕亮度 $V(x)$;2)估计大气光强度 A ;3)根据简化后的大气散射模型,获得无雾图像 $J(x)$ 。

3 算 法

针对通过局部相似假设估计透射率,景深突变边缘出现Halo效应的问题,提出一种基于边缘保持的自适应高斯衰减图像复原算法,该算法流程图如图1所示。首先初步估计粗大气幕亮度,然

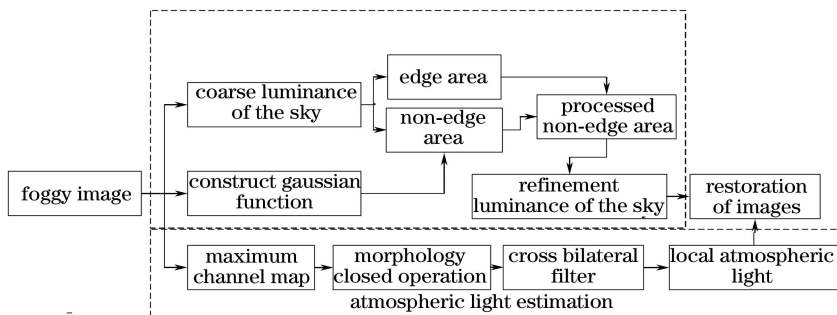


图1 所提算法流程图

Fig. 1 Flow chart of proposed algorithm

后利用边缘检测算子进行滤波处理,获取准确的边缘信息,然后分离边缘区域与非边缘区域,对非边缘区域利用邻域内像素点的空间邻近度构建高斯函数

对非边缘区域进行平滑衰减,进而得到细化大气幕亮度。其次,对于大气光的选取,本文采用局部大气光的策略。图2所示为本文算法具体的实现效果。

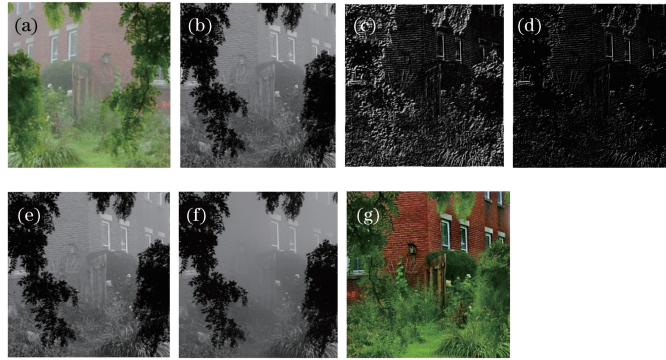


图2 效果过程图。(a)有雾图像;(b)粗大气幕亮度;(c)边缘信息;(d)图(b)边缘区域;(e)图(b)非边缘区域;(f)细化大气幕亮度;(g)恢复的图像

Fig. 2 Effect process diagram. (a) Foggy image; (b) coarse luminance of the sky; (c) edge information;

(d) edge area of Fig. (b); (e) non-edge area of Fig. (b); (f) refinement luminance of the sky; (g) restoration image

3.1 大气幕亮度的估计

3.1.1 大气幕亮度的粗估计

根据文献[3]暗通道先验理论,假设场景反射光的R,G,B颜色通道至少有一个颜色通道的灰度值趋近0,即 $\min_{c \in \{R,G,B\}} J(x) \rightarrow 0$ 。因此,对(4)式进行最小值操作可消去等式右边第一项,即可以得到大气幕亮度的粗略估计为

$$V_R(x) = \min_{c \in \{R,G,B\}} I^c(x), \quad (5)$$

式中 $V_R(x)$ 表示大气幕亮度的粗估计值, $I^c(x)$ 表示原有雾图像的某一通道颜色分量。若采用(5)式直接复原图像将引入误差,主要原因是:1)大气幕亮度仅是关于场景深度 $d(x)$ 的函数并在局部区域趋于平稳;2)边缘信息的不准确会导致景深突变的边缘产生错误的 Halo 效应。由于 $V_R(x)$ 中包含了有雾图像丰富的纹理特性和边缘信息。因此,必须滤除纹理信息,同时使大气幕亮度局部区域平滑并保留景深突变的边缘细节。为了避免全面平滑导致边缘模糊,而在景深突变处带来错误的 Halo 效应。本文采用基于边缘检测获取边缘信息,分离边缘区域与非边缘区域,结合高斯滤波的策略细化大气幕亮度。

3.1.2 大气幕亮度的细化

文献[9]中提出中值滤波算法,该方法只有在平坦区域能够很好地估计大气幕亮度,没有考虑边界的影响产生的边缘模糊,导致在景深突变区域通常会出现光晕现象。文献[10]利用双边滤波进行大气幕亮度估计的策略,由于双边滤波是空域和值域滤

波器的组合,虽然能够有效地减少边缘模糊现象,但其运算比较复杂。文献[11]提出引导滤波算法,该算法在非边缘区域输出结果近似等于均值滤波操作后的结果,而均值滤波没有考虑相邻像素之间的关系,导致恢复的图像平滑效果不明显。在边缘区域输出结果近似等于原图像边缘处的像素值,也就是说在边缘区域没有进行滤波操作,这会导致边缘区域存在噪声影响。

本文对大气幕亮度的估计采用边缘检测获取完整的边缘信息,然后分离边缘区域与非边缘区域,对非边缘区域通过邻域内像素点的空间邻近度构建高斯函数进行平滑衰减。构造的高斯函数考虑空间位置坐标的权重关系,能有效地减少光晕的产生,使恢复的图像更加平滑自然,具体过程如下所述。

首先,分别利用水平和垂直边缘检测算子对粗大气幕亮度进行滤波处理,获取边缘信息。利用滤波检测边缘信息,可以消除噪声对边缘的影响获得准确的边缘信息,然后通过两个方向边缘信息的近似组合得到大气幕亮度的整体边缘信息,具体可以表示为

$$I_e(x) = |G_v + G_h|, \quad (6)$$

式中 $I_e(x)$ 表示大气幕亮度对应的边缘信息, G_v 和 G_h 分别表示垂直和水平边缘信息,对应使用的边缘检测算子分别为 $[-1 \ 0 \ 1; -2 \ 0 \ 2; -1 \ 0 \ 1]$ 和 $[-1 \ -2 \ -1; 0 \ 0 \ 0; 1 \ 2 \ 1]$ 。

获得的边缘信息如图2(c)所示,其中边缘部分为白色,其值为1,非边缘部分为黑色,其值为0。那么,从粗大气幕亮度中提取的边缘区域可表示为

$$V_e(x) = V_R(x) \cdot I_e(x). \quad (7)$$

通过上述步骤得到的边缘区域如图 2(d) 所示, 则大气幕亮度中需要高斯衰减平滑的非边缘(平坦)区域可表示为

$$V_f(x) = [1 - V_e(x)] \cdot V_R(x). \quad (8)$$

分离出粗大气幕亮度的边缘区域与非边缘区域, 通过滤波检测得到的边缘区域不再进行任何操作, 从而达到良好的保边效果。而非边缘区域利用邻域内像素点的空间邻近度构建高斯衰减函数进行平滑处理。结合边缘区域与非边缘区域得到边缘保持的细化大气幕亮度为

$$V_G(x) = V_e(x) + V_f(x) * G(x), \quad (9)$$

$$G(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_n} \exp\left(-\frac{\|x-y\|^2}{2\sigma_n^2}\right), \quad (10)$$

式中 * 代表卷积操作, $G(x)$ 为构造的高斯函数, 其中 $\|x-y\|$ 表示两像素点的欧氏距离。 σ_n 为高斯函数的尺度参数即方差, 其中, σ_n 越小, 高斯曲线下降的速率越快, 平滑效果越差, 反之亦然。因此, 对于 σ_n 值的选取比较敏感。本文把雾对图像的影响假设成噪声的影响, 以最小均方误差为依据获取 σ_n 的最优值。因此, 要自适应地获得敏感参数 σ_n 的取值。根据文献[12]的方法进行快速估计:

$$\sigma_n = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{1}{6(W-2)(H-2)} \sum_I |I(x,y) * N|, \quad (11)$$

式中 W 和 H 分别表示原始图像的宽和高, * 表示卷积操作, $N = [1 \ -2 \ 1; -2 \ 4 \ -1; 1 \ -2 \ 1]$ 为离散拉普拉斯变换的掩模。

从图 2(f) 可以看出, 通过分离边缘区域与非边缘区域, 利用邻域内像素点的空间邻近度构建高斯函数平滑非边缘区域, 不仅可以使深度交替区域趋于平滑过渡, 更能反映深度信息。其还可以消除纹理效应, 同时融合完整的边缘细节, 能够很好地抑制景深突变处引入的 Halo 效应。

3.2 局部大气光估计

大气散射模型中一个未知的参数大气光 A , 其准确性直接决定恢复图像的质量, 如果选取的全局大气光值大于其真实值, 会导致复原图像偏暗, 反之亦然。文献[3]选取暗通道前 0.1% 最亮像素对应的原始有雾图像中最亮像素值作为全局大气光值, 这种方法易受图像中白色物体的影响, 从而产生较大的误差。文献[13]提出一种自动获取大气光值的方法, 这种方法通过判断大气光矢量方向来确定大气光值。文献[13]尽管可以获得良好的大气光值, 但

是在其大气光矢量方向判断失误时则失效。考虑到全局大气光值在出现误差时影响整体效果的前提下, 本文采用局部大气光值估计方法。利用局部大气光可以消除全局大气光估计不准确对整体的影响, 从而避免由于估计不准确而增加的后处理操作。

根据 Land 成像模型 $J(x) = A\rho(x)$, 可以将反射强度最高像素的场景反照率 $\rho(x)$ 近似为 $\rho(x) \rightarrow 1$ 。假设对有雾图像进行分块且每块都存在最高像素点, 那么在块 P_i 中的大气光值可以表示为

$$A_{P_i} = \max_{x \in P_i, c \in \{R, G, B\}} [I^c(x)]. \quad (12)$$

如果将有雾图像分解为无穷小块, 每一个小块就可以看成一幅图像, 因此根据(12)式可以将全局大气光转换为局部大气光, 从而将(12)式转化为:

$$A_{mc}(x) = \max_{c \in \{R, G, B\}} [I^c(x)]. \quad (13)$$

为了保证局部大气光的准确性, 对 $A_{mc}(x)$ 进行形态学闭操作得到 $A'_{mc}(x)$, 利用形态学闭操作可以消除局部内部分过大像素的干扰。本文采用 square 的结构元素, 结构半径 $r = \min(h, w)/100$ (w 和 h 分别表示图像的宽和高)。为了满足局部大气光局部平滑特性, 利用交叉双边滤波的策略得到平滑且边缘保持良好的局部大气光 $A_L(x)$:

$$A_L(x) = \sum_{j \in \Omega} \frac{C}{h_s^2 h_r} k_1 \left(\left\| \frac{E - E_j}{h_r} \right\| \right) k_2 \left(\left\| \frac{c - c_j}{h_s} \right\| \right) * D_j, \quad (14)$$

式中 $E = A_{mc}(x)$, $D = A'_{mc}(x)$, Ω 是用于计算 $A(x)$ 的窗口, C 表示空域部分, c_j 表示窗口 Ω 中围绕中线像素的索引, E_j 是 c_j 对应的值域部分, k_1 和 k_2 是值域和空域对应的修正权值, h_s 和 h_r 分别表示空域和值域的滤波核, C 是归一化常数, 实验效果图如图 3 所示。

4 图像复原

从前面的分析中已经获取了大气幕亮度和全局大气光 $A(x)$, 根据(4)式就可以得到恢复的无雾图像 $J(x)$ 为

$$J(x) = \frac{I(x) - A(x)}{\min\left\{\max\left\{1 - \frac{V(x)}{A(x)}, 0.05\right\}, 0.95\right\}} + A(x), \quad (15)$$

式中在景深无穷远处 $V(x)$ 的值可能为 A , 则分母 $1 - V(x)/A(x)$ 的取值有可能为 0; 在近景处 $V(x)$ 的值有可能为 0, 分母 $1 - V(x)/A(x)$ 则趋于 1。在出现上述两种情况时直接恢复无雾图像 $J(x)$, 将

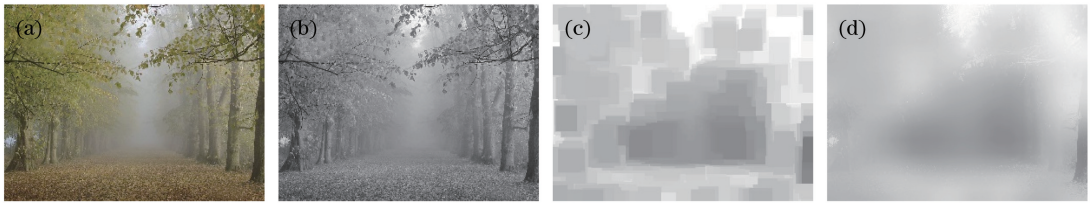


图3 局部大气光过程效果图。(a)原始雾图;(b)最大通道图;(c)形态学闭操作;(d)交叉双边滤波结果

Fig. 3 Local atmospheric light process renderings. (a) Original foggy image; (b) maximum channel map; (c) morphological closed operation; (d) cross-bilateral filter result

会造成部分像素出现严重失真,因此本文将分母强制约束在 $[0.05, 0.95]$ 之间。

5 实验结果

实验所用的软件环境是 Matlab R2014R, 硬件环境为 Intel (R) Core (TM) i5-6300HQ CPU @ 2.30 GHz, 8.0 GB RAM。为了验证所提算法的实用性和有效性,选取经典的图像去雾算法,分别从视

觉效果和客观评价两个方面进行对比说明。

5.1 视觉效果

视觉分析是从人的主观意识出发,往往具有一定的片面性,但是可以快速地看出恢复效果。本文选取目前经典的去雾方法进行对比,主要有 He 等^[3]的暗通道先验算法、Meng 等^[4]的边界约束算法、Sun 等^[5]的局部大气光遮罩估计算法、Cai 等^[7]的基于端对端系统的去雾方法。实验效果对比如图 4 所示。

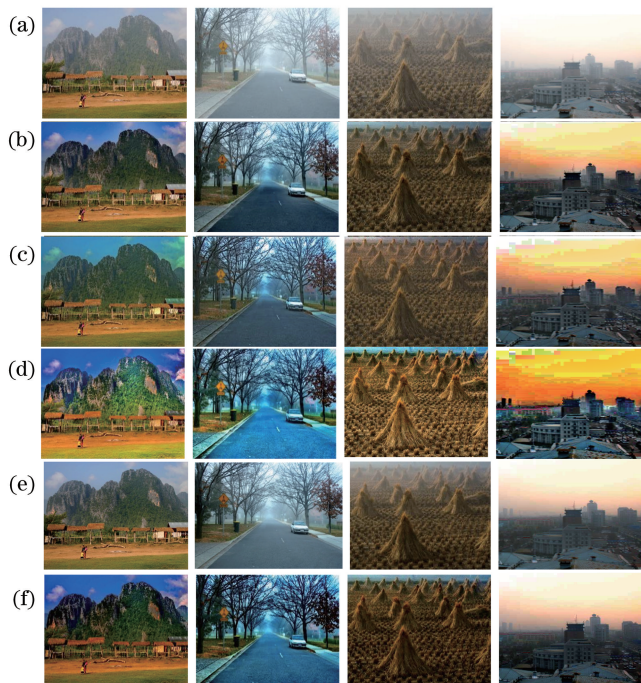


图4 实验效果对比。(a)原始雾图;(b)文献[3]方法;(c)文献[4]方法;

(d)文献[5]方法;(e)文献[7]方法;(f)本文方法

Fig. 4 Comparison of experimental effect. (a) Original foggy image; (b) method of Ref. [3];

(c) method of Ref. [4]; (d) method of Ref. [5];

(e) method of Ref. [7]; (f) proposed method

对于不存在大面积天空区域的图像,图 4(b)效果为暗通道先验去雾效果,恢复的效果细节明显增多,基本上去除了雾气干扰,但是在深度交替的边缘区域遗留有残晕,远景细节不是很突出,并且图像明显偏暗,这主要是大气光估计不准确造成的。图 4

(c)效果为边界约束去雾效果,该方法增加约束条件来解决大气散射模型病态问题,尽管恢复的效果细节增多,但是牺牲了图像色彩保真度,恢复的图像出现了明显的偏色现象并且有伪影出现,因此该方法具有一定的局限性。图 4(d)为局部大气光遮罩估

计的去雾效果,该方法恢复的图像亮度较好,基本去除了图像中的雾气,但是在部分图像中出现了颜色失真现象,恢复的图像过度饱和,这主要是由于形态学操作的使用所导致的。图 4(e)为文献[7]提出的基于端对端系统的去雾方法,该方法提出端对端系统训练透射率以达到最优的效果,但是该方法依然存在去雾不彻底的现象及浓雾效果不佳等问题。图 4(f)为本文算法实现的去雾效果,从图中可以看出,恢复图像细节明显增多,亮度适宜。相比暗通道先验,所提方法复原图像细节多,尤其在远景区域,并且明亮度相对较好;相比边界约束方法,本文方法具有良好的色彩保真度;相比局部大气光估计方法,所提方法在实现效果饱和度上具有一定的优势。但是亮度上有所不足,相比文献[7]的机器学习方法,本文方法去雾效果更彻底。综上所述,本文方法在视觉效果上取得了一定的成果,基本上去除雾气的干扰,并存在一定的优势。

对于存在大面积天空区域的图像,从图 4(b)~(d)的恢复效果可以看出,其同样都存在大片天空区域透射率估计过小的问题,进而导致复原的图像在天空区域出现严重的伪彩色现象;图 4(e)通过系统训练的方法使得天空区域的透射率估计相对较大,恢复出来的效果优于暗通道先验算法和边界约束方法,但是存在细节丢失,边缘模糊的问题;图 4(f)相比端对端

系统的去雾算法,本文算法不仅对于大面积天空区域的透射率估计相对较大,而且复原图像近景细节较多,存在一定的优势。

5.2 客观评价

主观上的评价往往具有一定的局限性,因此必须采用客观评价进行说明。对于图像质量的评估,无参考的图像质量评估方法经常使用^[14-16],常见的有峰值信噪比(PSNR)、结构相似性(SSIM)、信息熵、平均梯度、以及全局对比度。本文采用 Hautiere 等^[15]提出的图像评价方法,其中可见边(e)、归一化平均梯度(\bar{r})越大越好,恢复图像的饱和像素点个数(σ)越小越好。对应的数学表达式为

$$e = \frac{n_r - n_0}{n_0}, \quad (16)$$

$$\bar{r} = \exp\left(\frac{1}{n_r} \sum_{P_i \in \Omega_r} \log r_i\right), \quad (17)$$

$$\sigma = \frac{n_s}{W \times H}, \quad (18)$$

式中 n_0 表示原始有雾图像的可见边数, n_r 表示恢复图像的可见边数, r_i 是 P_i 恢复图像与原始有雾图像的梯度比, Ω_r 是恢复图像可见边的集合, n_s 表示饱和像素点数, W 和 H 分别表示图像的宽和高。实验对比数据如图 5 所示,所用的实验图像为图 4(a)。

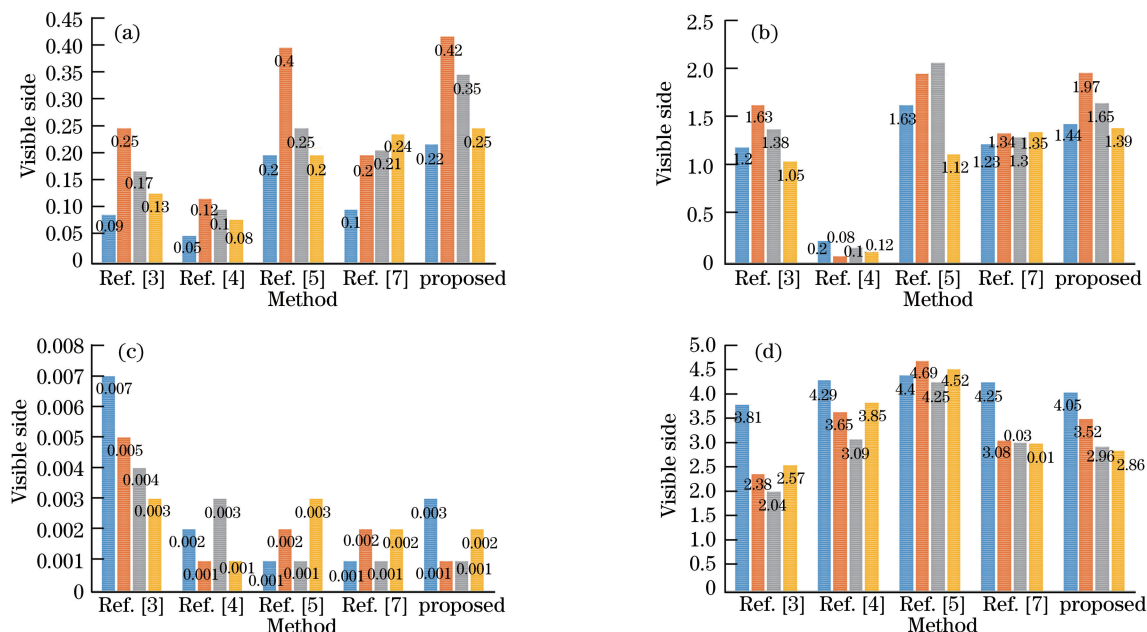


图 5 客观评价。(a)可见边;(b)归一化平均梯度;(c)饱和点像素数;(d)运行时间

Fig. 5 Objective evaluation. (a) Visible side; (b) normalized average gradient;

(c) number of pixels in the saturation point; (d) running time

6 结 论

针对通过局部相似假设估计透射率,景深突变边缘出现 Halo 效应的问题,提出一种基于边缘保持的自适应高斯衰减图像去雾算法,该方法从大气散射模型出发,引入大气幕亮度,将场景透射率的估计等效为大气幕亮度的估计。通过边缘检测算子提取边缘信息,分离边缘区域与非边缘区域,利用邻域内像素点的空间邻近度构建自适应高斯函数对非边缘区域进行平滑衰减,从而获得最优效果。实验结果显示,所提方法复原的无雾图像在主观上消除了景深突变处引入 Halo 效应的问题,细节增多,饱和度和亮度适宜,客观数据也证明了本文方法的有效性。

参 考 文 献

- [1] He L, Zhao J, Zheng N, *et al.* Haze removal using the difference-structure-preservation prior[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2017, 26(3): 1063-1075.
- [2] Yang Y, Chen G K. Single image visibility restoration algorithm using optical compensation and pixel-by-pixel transmission estimation[J]. Journal on Communications, 2017, 38(5): 48-56.
杨燕, 陈高科. 基于光补偿和逐像素透射率的图像复原算法[J]. 通信学报, 2017, 38(5): 48-56.
- [3] He K, Sun J, Tang X. Single image haze removal using dark channel prior[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 2011, 33(12): 2341-2353.
- [4] Meng G, Wang Y, Duan J, *et al.* Efficient image dehazing with boundary constraint and contextual regularization [C]. 2013 IEEE International Conference on Computer Vision, 2013: 617-624.
- [5] Sun W, Wang H, Sun C, *et al.* Fast single image haze removal via local atmospheric light veil estimation[J]. Computers & Electrical Engineering, 2015, 46(C): 371-383.
- [6] Zhu Q, Mai J, Shao L. A fast single image haze removal algorithm using color attenuation prior[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2015, 24(11): 3522-3533.
- [7] Cai B, Xu X, Jia K, *et al.* Dehaze Net: an end-to-end system for single image haze removal[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2016, 25(11): 5187-5198.
- [8] Ancuti C O, Ancuti C. Single image dehazing by multi-scale fusion[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2013, 22(8): 3271-3282.
- [9] Tarel J P, Hautiere N. Fast visibility restoration from a single color or gray level image [C]. 2009 IEEE 12th International Conference on Computer Vision, 2009: 2201-2208.
- [10] Jin W, Mi Z, Wu X, *et al.* Single image de-haze based on a new dark channel estimation method[C]. 2012 IEEE International Conference on Computer Science and Automation Engineering, 2012: 791-795.
- [11] He K, Sun J, Tang X. Guided image filtering [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 2013, 35(6): 1397-1409.
- [12] Tai S C, Yang S M. A fast method for image noise estimation using Laplacian operator and adaptive edge detection[C]. 2008 IEEE International Symposium on Communications, Control and Signal Processing, 2008: 1077-1081. [13] Sulami M, Glatzer I, Fattal R, *et al.* Automatic recovery of the atmospheric light in hazy images [C]. 2014 IEEE International Conference on Computational Photography, 2014: 1-11.
- [14] Wang Z, Bovik A C, Sheikh H R. Structural similarity based image quality assessment[J]. Digital Video Image Quality & Perceptual Coding, 2005.
- [15] Hautière N, Tarel J P, Aubert D, *et al.* Blind contrast enhancement assessment by gradient ratioing at visible edges [J]. Image Analysis & Stereology Journal, 2008, 27(2): 87-95.
- [16] Xu Y, Wen J, Fei L, *et al.* Review of video and image defogging algorithms and related studies on image restoration and enhancement [J]. IEEE Access, 2016, 4: 165-188.