

文章编号:1002-2082(2019)03-0447-07

# 一种自适应线性透射率估计去雾算法

杨 燕,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:**为了有效复原雾霾天气下退化的图像,文章提出了一种自适应线性透射率估计去雾算法。建立有雾图像与无雾图像最小值通道之间的线性变换模型;利用有雾图像的混合通道得到自适应参数,结合自适应参数和线性变换模型估计出透射率,通过有雾图像的最小值通道构造高斯函数来补偿估计明亮区域透射率,提升该区域透射率的准确度,再使用交叉双边滤波器消除纹理效应得到优化透射率;最后,结合大气散射模型复原出无雾图像。实验结果表明,该方法有效降低了时间复杂度,且复原的图像细节明显,亮度适宜。

**关键词:**去雾;自适应线性变换;高斯函数;大气散射模型

中图分类号:TP391.41

文献标志码:A

DOI:10.5768/JAO201940.0302007

## Adaptive linear transmission estimation dehazing algorithm

YANG Yan, LI Yifei, YUE Hui

(College of Electronic and Information Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

**Abstract:** In order to effectively restore the degraded images in hazy weather, an adaptive linear transmission estimation dehazing algorithm was proposed. Firstly, we created a linear transformation model between the hazy image and the dehazing image minimum channel. Secondly, the adaptive parameters were obtained by using the mixed channel of the hazy image, and the transmission was estimated by combining the adaptive parameter and the linear transformation model. Then, a Gaussian function was constructed by the minimum channel of the hazy image to compensate the estimated transmission of the bright region, and the accuracy of the transmission of this region was improved, and the cross-bilateral filter was used to eliminate the texture effect to obtain the optimized transmission. Finally, a dehazing image was restored in combination with the atmospheric scattering model. The experimental results show that the method can effectively reduce the time complexity, and the restored image has obvious details and appropriate brightness.

**Key words:** dehazing; adaptive linear transformation; Gaussian function; atmospheric scattering model

## 引言

雾、霾是由大气中悬浮的气溶胶和固体颗粒等介质对光线吸收和散射作用而形成的一种自然

现象<sup>[1]</sup>。该现象会导致计算机视觉系统捕捉到的户外图像严重降质,出现诸如细节丢失、色彩失真以及对比度下降等,这使得对图像的分析形成了

收稿日期:2018-11-16; 修回日期:2018-12-17

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基金资助项目(214138);兰州交通大学教改项目(160012)

作者简介:杨燕(1972—),女,博士,教授,研究生导师,主要从事数字图像处理、智能信息处理、语音信号处理技术研究。

E-mail: yangyantd@mail.lzjtu.cn

一定的障碍<sup>[2]</sup>。因此,研究有效快速的图像去雾算法具有一定的实际应用价值和现实意义。

近年来,图像去雾技术取得了重大突破<sup>[3]</sup>。目前,针对不同的单幅图像去雾方法大体可以分为 4 类:图像复原、图像增强、图像融合以及机器学习方法<sup>[5]</sup>。目前较为主流的是基于图像复原的方法;Zhu 等人<sup>[6]</sup>通过观察 HSV 颜色通道时,发现 S 分量和 V 分量的差值能近似估计图像的深度信息,在此基础上提出了颜色衰减先验去雾算法,该方法取得了一定的去雾效果,但因约束条件过多,导致算法时间复杂度较高。Wang 等人<sup>[7]</sup>利用同一场景下的多幅图像统计出场景深度信息进而复原出无雾图像,虽然该方法取得了一定的去雾效果,但由于需要同一场景的多幅图像,因此在实际应用中有一定的局限性。He 等人<sup>[8]</sup>提出了暗通道先验理论,利用先验知识解决了大气散射模型的病态问题,虽然该方法取得了显著去雾效果,但是对于包含大片天空区域的图像算法失效,同时复原图像在景深突变区域出现残雾,且由于使用 Soft Matting 方法,导致算法的时间复杂度增加。

针对上述问题,为了快速有效地复原出雾霾天气下的退化图像,本文提出了一种自适应线性透射率估计去雾方法,该方法利用线性变换约束有雾图像最小值通道近似估计无雾图像最小值通道操作;其次,利用有雾图像的混合通道得到自适应参数,结合自适应参数和线性变换模型估计出透射率,通过高斯函数衰减有雾图像最小值通道对大面积天空等明亮区域透射率进行补偿,可以解决透射率估计不足的问题,然后利用交叉双边滤波器消除透射率纹理效应,得到局部平滑,边缘保持良好的优化透射率;本文采用四叉树大气光策略估计大气光值,避免了由于全局大气光值估计不准确引起的误差;最后,结合大气散射模型复原出无雾图像。

## 1 背景

### 1.1 大气散射模型

在计算机视觉系统中,通常使用大气散射物理模型<sup>[9]</sup>描述在雾霾环境下的图像成像机制,具体表示如下:

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

式中: $I$  表示有雾图像; $J$  表示清晰的无雾图像; $t$

表示透射率; $A$  表示大气光值。 $J(x)t(x)$  称为直接衰减项,表示场景反射光经过介质传输衰减后到达成像系统的部分; $A(1-t(x))$  称为大气光项,描述环境光由于大气介质散射作用对观测点所接收到的光强影响。根据(1)式,可得透射率表达式:

$$t(x) = \frac{A - I(x)}{A - J(x)} \quad (2)$$

### 1.2 线性传输

已知在有雾图像中,大气光对图像成像的影响随着观测点到场景距离的增加而增大,且图像中雾浓度越高导致图像像素值越大。场景反射率  $\beta$  和透射率之间存在如下关系式<sup>[10]</sup>:

$$t(x) = e^{-\beta d(x)} \quad (3)$$

式中: $d$  表示场景深度。在彩色图像中,由于在色彩鲜艳的图像范围内,至少有一个颜色通道的反射系数非常小,基于此结论,对(2)式进行最小值操作:

$$t(x) = \frac{\min_{c \in \{r,g,b\}} A^c - \min_{c \in \{r,g,b\}} I^c(x)}{\min_{c \in \{r,g,b\}} A^c - \min_{c \in \{r,g,b\}} J^c(x)} \quad (4)$$

式中: $c$  表示有雾图像的 RGB 颜色通道。由于有雾条件下,雾浓度随着观测点到场景距离增加而增大,且雾浓度越大图像像素的亮度值越高。基于此结论,文献[11]提出一种假设关系,即有雾图像和无雾图像的最小值通道之间存在一种线性关系,将该线性关系用数学表达式表示为:

$$\min_{c \in \{r,g,b\}} I^c(x) = a \times \min_{c \in \{r,g,b\}} J^c(x) + b \quad (5)$$

式中: $a$  反映图像对比度, $0 < a < 1$ ; $b$  反映图像亮度, $b > 1$ 。由于(5)式中含有 2 个未知数,是不可解方程,故提出用二次函数的分段区域求解:

$$\min_{c \in \{r,g,b\}} J^c(x) = \delta \times \frac{\min_{c \in \{r,g,b\}} I^c(x) - Min}{Max - Min} \times \min_{c \in \{r,g,b\}} I^c(x) \quad (6)$$

式中: $Max$  和  $Min$  分别表示  $\min_{c \in \{r,g,b\}} I^c(x)$  的最大值和最小值; $\delta$  是引入的控制因子,用来调节图像的去雾效果, $0 < \delta < 1$ 。

## 2 本文算法

为了有效快速地复原出雾霾天气下的退化图像,本文提出一种自适应线性传输去雾方法。该方法解决了线性传输模型中控制因子为定值这一问题,并且提出了用高斯函数补偿有雾图像中明亮区

域的透射率,进一步提升了透射率估计的准确性。

## 2.1 自适应线性传输

在线性传输模型中,控制因子 $\delta$ 的值能直接影响

复原效果,为了进一步说明 $\delta$ 值对图像复原效果的影响,图1展示了选取不同 $\delta$ 值本文算法所得不同实验结果。

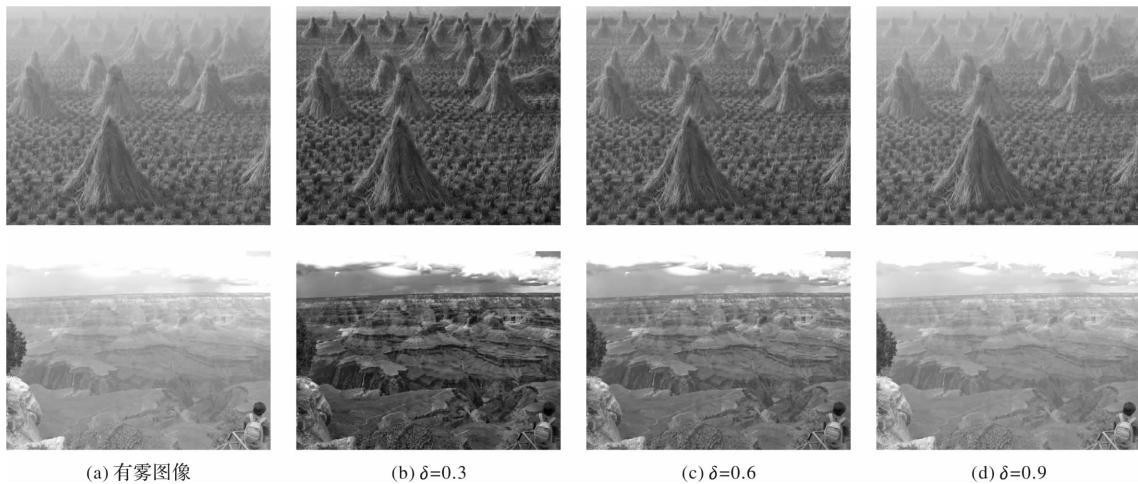


图1 选取不同 $\delta$ 值时去雾效果

Fig. 1 Dehazing effects with different  $\delta$  values

由图1可以看出,当有雾图像为景深变化平缓场景下的图像时, $\delta$ 值较小时能获得去雾效果较好的复原图像。当有雾图像为包含天空区域且景深变化剧烈场景下的图像时, $\delta$ 值在0.6能获得去雾效果较好的复原图像。基于此实验结果,通过对大量有雾图像的统计观察发现, $\delta$ 值与图像景深存在相关关系。于是,提出一种包含景深信息的自适应 $\delta$ 值获取方式:由于有雾图像的最大值通道大致包含了有雾图像的深度信息,而为了进一步消除局部区域内白色物体对 $\delta$ 值的影响,并且同时保证局部区域内具有相同的 $\delta$ 值,本文选用最小滤波器作用于有雾图像的最大值通道,其数学表达式为:

$$t(x) = \frac{\min_{c \in \{r,g,b\}} A^c - \min_{c \in \{r,g,b\}} I^c(x)}{\min_{c \in \{r,g,b\}} I^c(x) - \min_{c \in \{r,g,b\}} A^c} \times \frac{\min_{c \in \{r,g,b\}} A^c - \delta(x) \times \frac{\min_{c \in \{r,g,b\}} I^c(x) - \min_{c \in \{r,g,b\}} A^c}{\max_{c \in \{r,g,b\}} I^c(x) - \min_{c \in \{r,g,b\}} A^c}}{\max_{c \in \{r,g,b\}} I^c(x) - \min_{c \in \{r,g,b\}} A^c} \quad (9)$$

对于存在大片明亮区域的无雾图像,(9)式得到的透射率会随着 $\min_{c \in \{r,g,b\}} I^c(x)$ 值的增大而逐渐减小,因此在明亮区域透射率估计不足,并且由于(9)式所得透射率在边缘处不够平滑,而平滑边缘处的像素可以使用加权平均法,即距离中心像素越远的像素加权值越小,距离中心像素点越近的像素加权值越大,将其近似看作呈正态分布。故选用高斯函数进行补偿优化,通过参数期望和标

准差可以调整其峰值和宽度。因此,本文通过构造高斯函数控制线性变换,对明亮区域透射率进行自适应补偿,表示式为:

$$gaussian = \exp \left( -\frac{(1 - \min_{c \in \{r,g,b\}} I^c(x))^2}{\sigma^2} \right) \quad (10)$$

式中: $\min_{c \in \{r,g,b\}} I^c(x)$ 表示高斯函数的中心像素; $\sigma$ 表示高斯函数的标准差,可以直接控制高斯函数的平滑结果,经过大量实验取 $\sigma=0.15$ 。(10)式对有

雾图像进行逐像素平滑处理,能很好保留图像的

边缘信息,将(10)式代入(9)式:

$$t(x) = \frac{\min_{c \in \{r,g,b\}} A^c - \min_{c \in \{r,g,b\}} I^c(x)}{\min_{c \in \{r,g,b\}} I^c(x) - \text{Min}} \quad (11)$$

$$\min_{c \in \{r,g,b\}} A^c - \delta(x) \times \frac{\min_{c \in \{r,g,b\}} I^c(x)}{\text{Max} - \text{Min}} \times \text{gaussian}$$

有雾图像的非明亮区域存在  $\min_{c \in \{r,g,b\}} I^c(x) < \min_{c \in \{r,g,b\}} A^c$ , 根据(8)式可得  $0 \leq t(x) \leq 1$ , 但对于有雾图像的非明亮区域存在  $\min_{c \in \{r,g,b\}} I^c(x) \geq \min_{c \in \{r,g,b\}} A^c$  时,  $t(x) \leq 0$ , 不满足  $0 \leq t(x) \leq 1$ 。故提出一种透射率的约束方式,对透射率进行标准化:

$$t'(x) = \begin{cases} |t(x)|, & \min_{c \in \{r,g,b\}} I^c(x) \geq \min_{c \in \{r,g,b\}} A^c \\ \frac{1}{\max(t(\text{Max}), 1)} \times |t(x)|, & \min_{c \in \{r,g,b\}} I^c(x) < \min_{c \in \{r,g,b\}} A^c \end{cases} \quad (12)$$

联合双边滤波具有保持图像边缘、平滑细节和降低图像噪声等优点,本文采用联合双边滤波对透射率进行进一步优化,得到如图 2 所示的较为平滑的透射率图。

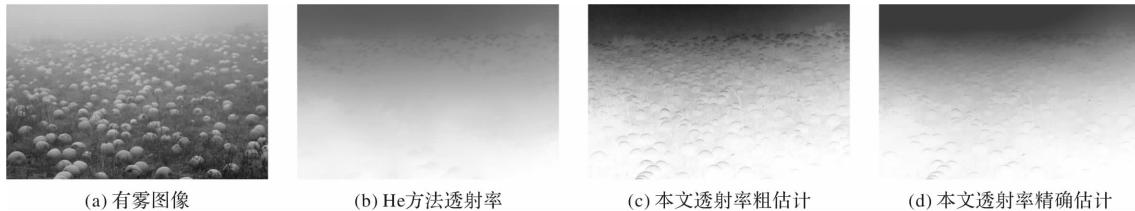


图 2 透射率对比

Fig. 2 Transmission comparison

从图 2 中可知,相较于 He 等人<sup>[12]</sup>方法的透射率,本文所得透射率细节更丰富,在边缘处更平滑,并且对于天空区域透射率的估计更准确。

### 2.3 大气光估计

从(1)式中可知,若选取的大气光值大于其真实值,将导致复原图像偏暗和图像细节丢失,需要再对其进行图像增强处理;若选取的大气光值小于其真实值,复原图像偏亮且颜色失真导致大量细节丢失。由于(12)式选取大气光值作为阈值对透射率进行分类估计,故大气光值的准确估计尤为重要,将  $\min_{c \in \{r,g,b\}} A^c$  视为  $A$ 。本文选取四叉树算法<sup>[11]</sup>估计大气光值,具体操作为:对有雾图像的 RGB 三个颜色通道分别进行四叉树分割。而选取有雾图像的 RGB 三个通道是为了避免有雾图像在局部区域的某颜色通道内存在极大值的情况下对大气光进行错误估计。将有雾图像图像的 RGB 颜色通道分离开,并将每个颜色通道图等分成 4 块,分别计算各块图像的均值,取均值最大的块再继续四等分,重复迭代至图像块大小小于设定阈值,取最后所得像素块中的像素均值作为大气

光值。

### 2.4 图像复原

获得透射率精确估计以及利用四叉树算法求得大气光值后,根据下式来获得图像的复原:

$$J(x) = \frac{I(x) - A}{\max(t(x), t_0)} + A \quad (13)$$

式中,由于当透射率趋近于零时,会使(1)式中的衰减项  $J(x)t(x)$  也趋于零,导致  $J(x)$  可能出现噪声干扰,因此对透射率  $t(x)$  设定下限值  $t_0$ ,  $t_0 = 0.1$ 。

## 3 实验结果及评价

本文算法选用文献[6-8]中的经典图像进行了仿真实验,实验平台为 Matlab(R2014a),运行环境为 Windows7,计算机配置为 Intel(R) Core(TM) i5-3210M CPU @ 2.50 GHz。为了进一步验证本文算法的有效性和实时性,本文从主观评价和客观评价两个方面进行实验对比,对比方法选用目前比较主流的去雾方法:He 等人<sup>[12]</sup>的暗通道先验算法、Zhu 等人<sup>[6]</sup>的颜色衰减算法、Meng 等人<sup>[13]</sup>的边界约束算法以及 Sun 等人<sup>[14]</sup>的局部大气光遮罩估计算法。

经典图像选取不同场景下的有雾图像:图从左至右分别是包含明亮区域的有雾场景图像、景深变化剧烈的有雾场景图像、景深变化平缓的有雾场景图像以及包含天空区域的有雾场景图像。

### 3.1 主观评价

视觉分析是从人眼的主观意识出发,可以直观看出图像复原效果的好坏。图3为原始的有雾

图像,场景中的对比度较低,色彩淡化,细节模糊。图3(b)至图3(f)是不同方法的实验结果:图3(b)是He等人的暗通道先验去雾方法的复原结果,从实验结果来看,图像整体细节增多,色彩自然,基本消除了雾霾对图像的影响,但是景深交替处留有残雾,并且对于包含明亮区域场景的图像恢复出的色调偏暗,这是因为错误定位大气光而造成的。

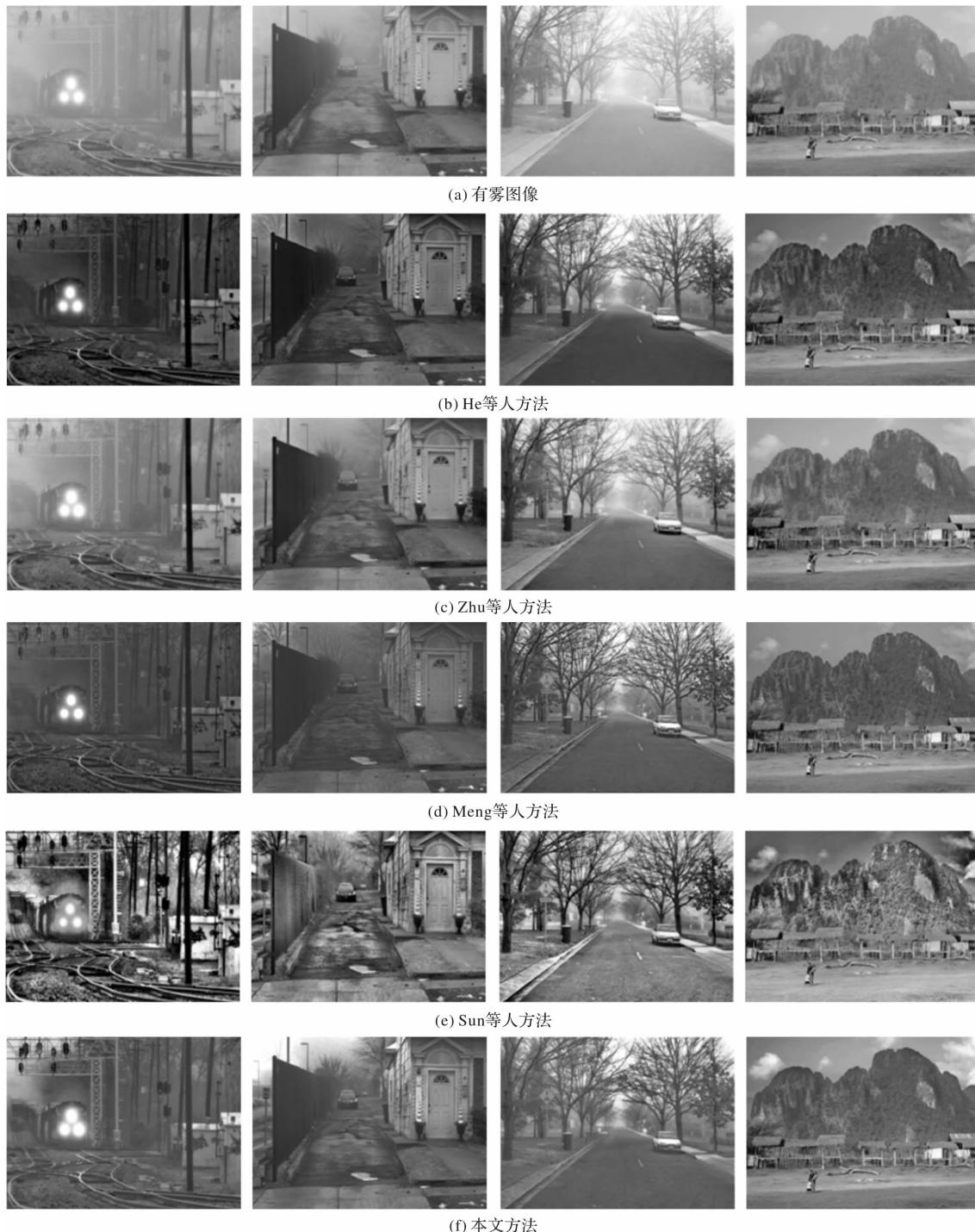
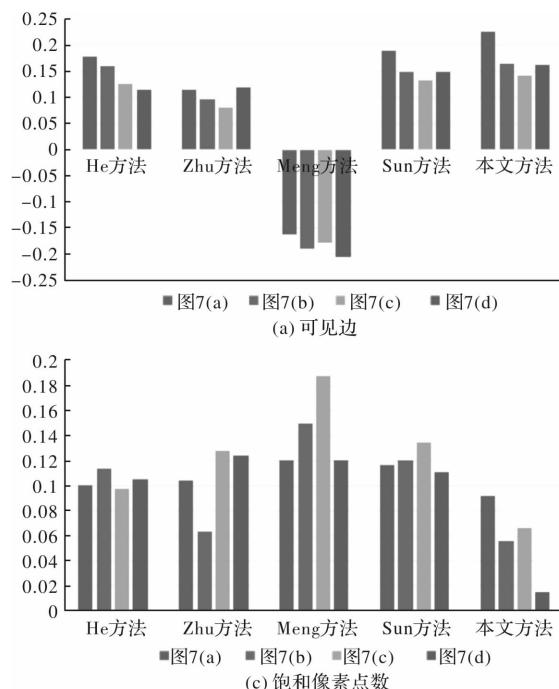


图3 实验结果对比

Fig. 3 Comparison of experimental results

对于景深变化平缓的有雾图像角度而言,He 等人方法在景深雾较浓处,算法基本失效,如图 3(b)第 2 幅图像所示,在图像树枝处,图像细节丢失,边缘模糊。对于包含天空区域的有雾图像,该方法对透射率的估计不足,导致复原图像出现偏色现象,并且在天空区域出现噪声。图 3(c)是 Zhu 等人提出的颜色衰减去雾方法的复原结果,该方法在颜色不失真的条件下取得了一定的去雾效果,但复原的图像整体雾感较浓,亮度较低,细节较少。图 3(d)是 Meng 等人的基于边界约束的去雾方法的复原结果,该方法通过增加大气散射模型中参数的约束条件来解决其病态问题,复原图像细节增多,但颜色过饱和,图像亮度偏亮,且出现严重的色彩失真现象,因此该方法在应用上有一定的局限性。图 3(e)是 Sun 等人的局部大气光遮罩估计的去雾方法的复原结果,该方法复原的图像亮度较高,图像细节丰富,但是部分图像中出现了严重的色彩失真,这是由于该方法在对图像处理的过程中使用形态学操作导致的。图 3(f)是本文所提方法的复原结果,从图中可以看出,本文方法恢复的图像细节丰富,色调自然,亮度适宜,在近景处,细节增多;在远景处,有较好亮度,特别是在天空区域有丰富的云彩纹理细节等。相比暗通道先验,本文方法色调更自然细节更丰富,在天空区域复原效果更好;相比颜色衰减方法,本文方法去雾



(a) 可见边

效果更明显;相比边界约束方法,本文方法有良好色彩保真度性能,并且复原图像的细节更多;相比局部大气光遮罩估计方法,本文在饱和度和实现效果上都具有一定优势。

### 3.2 客观评价

由于主观评价具有一定的局限性,为了进一步论证本文所提方法的有效性,本文采用客观评价对算法进行说明。采用图像去雾领域经常采用的无参考的图像质量评估方法<sup>[15]</sup>,通过可见边集合数  $e$ ,平均梯度  $r$ ,饱和像素点个数  $\sigma$  以及时间复杂度(单位:秒)作为评价指标。其中,  $e$  和  $r$  的值越大表明算法去雾效果越好,而复原图像的饱和点个数  $\sigma$  和时间复杂度越小越好。其对应的数学表达式如下:

$$e = \frac{n_r - nr_0}{n_0} \quad (14)$$

$$r = \exp\left[\frac{1}{n} \sum_{P_i \in \varrho_r} \lg r_i\right] \quad (15)$$

$$\sigma = \frac{n_s}{W \times H} \quad (16)$$

式中: $n_0$  表示原有雾图像的可见边数; $n_r$  表示复原图像的可见边数; $r_i$  表示  $P_i$  处复原图像与原有雾图像的梯度比; $\varrho_r$  表示复原图像的可见边集合; $n_s$  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 4 所示。

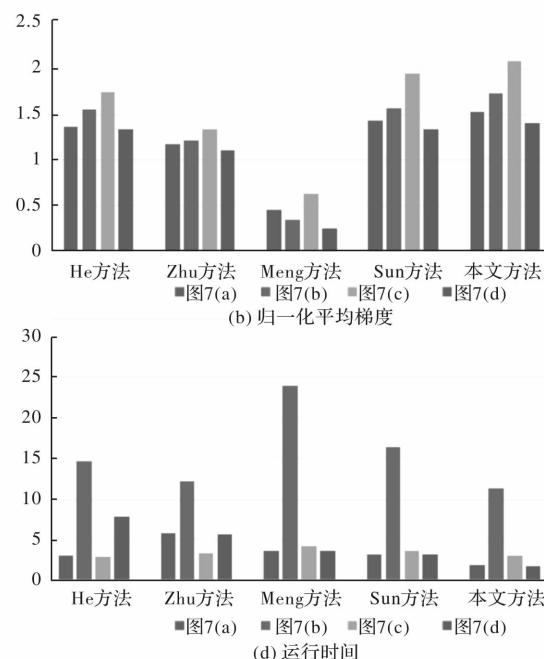


图 4 客观评价(实验图像为图 3(a)图像,从左到右依次为图 1~图 4)

Fig. 4 Objective evaluation (experimental image is Fig. 3, from left to right, Fig. 1 ~ Fig. 4)

在图 4 所示的客观评价数据中, Meng 方法复原图像的可见边参数出现负数,与主观评价中的严重偏色现象相对应。从图 4(a)至图 4(c)可知,本文方法的复原结果优于 He 等人方法和 Zhu 等人方法,且在饱和像素点方面,本文方法比其他 4 种方法取得的实验效果更好。图 4(d)表示各方法的运行时间,从图中可以看出,本文方法取得较低时间复杂度。综上,可以说明本文方法的去雾效果相对较好,具有一定优劣性。

## 4 结论

本文通过有雾图像的混合通道得到包含深度信息的自适应参数,并结合高斯函数,提出了一种自适应线性传输的透射率估计方法。通过有雾图像的最小值通道结合线性变换理论近似估计无雾图像最小值通道的操作,可以消除局部最小值滤波引起的 Halo 效应,并通过有雾图像的混合通道得到包含深度信息的自适应参数,同时使用高斯函数衰减有雾图像最小值通道以对明亮区域透射率进行补偿,从而得到粗略透射率,最后采用交叉双边滤波器以得到透射率的精确估计。实验结果表明,本文方法复原的图像色彩自然,细节明显,并且在客观评价中也体现出了优势。但是本文算法依然存在不足,对于浓雾图像有一定的局限性,如何处理浓雾图像是接下来的研究方向。

## 参考文献:

- [1] XU Y, WEN J, FEI L K, et al. Review of video and image defogging algorithms and related studies on image restoration and enhancement[J]. IEEE Access, 2016, 4: 165-188.
- [2] GUO Han, XU Xiaoting, LI Bo. Study on image dehazing methods based on dark channel prior[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(4): 113-122.  
郭翰,徐晓婷,李博. 基于暗原色先验的图像去雾方法研究[J]. 光学学报,2018,38(4): 113-122.
- [3] HUANG Lihong. Fog-degraded image enhancement based on single-scale Retinex[J]. Journal of Applied Optics, 2010, 31(5): 728-733.  
黄黎红. 一种基于单尺度 Retinex 的雾天降质图像增强新算法[J]. 应用光学,2010,31(5): 728-733.
- [4] ZHANG Xiaogang, TANG Meiling, CHEN Hua, et al. A dehazing method in single image based on double-area filter and image fusion[J]. Acta Automatica Sinica, 2014, 40(8):1733-1739.
- [5] CAI Bolun , XU Xiangmin , JIA Kui , et al. DehazeNet: an end-to-end system for single image haze removal[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2016, 25(11):5187-5198.
- [6] 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.
- [7] WANG Yuankai, FAN Chingtang. Single image defogging by multiscale depth fusion[J]. IEEE Transactions on Image Processing , 2014, 23(11):4826.
- [8] 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.
- [9] NARASIMHAN Srinivasa, NAYAR Shree. Vision and the atmosphere [J]. International Journal of Computer Vision, 2002, 48(3):233-254.
- [10] LAND Eh, MCCANN Jj. Lightness and retinex theory[J]. Journal of the Optical Society of America, 1971, 61(1):1.
- [11] WANG Wencheng, YUNG Xiaohui, WU Xiaojing, et al. Fast image dehazing method based on linear transformation[J]. IEEE Transactions on Multimedia, 2017, 19(6):1142-1155.
- [12] HE Kaiming, SUN Jian, TANG Xiaou. Guided image filtering[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2013, 35 ( 6 ): 1397-1409.
- [13] MENG Gaofeng, WANG Ying, DUAN Jiangyong. Efficient image dehazing with boundary constraint and contextual regularization[C]. //The IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV), Sydney, NSW:IEEE, 2013;617-624.
- [14] SUN Wei, WANG Hao, SUN Changhao, et al. Fast single image haze removal via local atmospheric light veil estimation. [J]. Computers & Electrical Engineering, 2015, 46:371-383.
- [15] HAUTIER Nicolas. Blind contrast enhancement assessment by gradient ratioing at visible edges[J]. Image Analysis & Stereology Journal, 2008, 27(2): 87-95.