

引用格式: ZHANG Chen, YANG Yan. Single Image Dehazing Algorithm Based on Fusion and Gaussian Weighted Dark Channel[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, 48(1): 0110002.

张晨, 杨燕. 基于融合与高斯加权暗通道的单幅图像去雾算法[J]. 光子学报, 2019, 48(1): 0110002.

基于融合与高斯加权暗通道的单幅图像去雾算法

张晨, 杨燕

(兰州交通大学 电子与信息工程学院, 兰州 730070)

摘 要: 针对图像去雾算法在景深突变处出现光晕现象和远景区域去雾不足的问题, 提出了一种基于融合与高斯加权暗通道的单幅图像去雾算法. 利用图像形态学梯度的特点, 将形态学梯度图像与暗通道图像线性融合获取融合暗通道, 构造自适应的高斯权重参数对融合的暗通道图像逐像素处理获取粗透射率, 在使用 L1 正则化优化透射率, 通过大气散射模型与修复的大气光值恢复无雾图像. 仿真实验表明, 本文算法可以较好地恢复出图像的细节并抑制光晕现象, 与几种典型的图像去雾算法客观对比, 证实了本文算法的可行性.

关键词: 图像融合; 高斯权重; 图像去雾; 暗通道先验; 图像复原

中图分类号: TP391.4

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20194801.0110002

Single Image Dehazing Algorithm Based on Fusion and Gaussian Weighted Dark Channel

ZHANG Chen, YANG Yan

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

Abstract: Aiming at the problem that the image dehazing algorithm has halo phenomenon in depth discontinuity and legacy residual fog in the distant area, this paper proposes a single image dehazing algorithm based on fusion and Gaussian weighted dark channel. Firstly, using the characteristics of image morphology gradient, the morphological gradient image and the dark channel image are linearly fused to obtain the fusion dark channel. Secondly, the adaptive Gaussian weight parameter is constructed to pixel-by-pixel process the fused dark channel image to obtain the coarse transmission, and the L1 regularization is used to optimize the transmission. Finally, the haze-free image is restored by the atmospheric scattering model and the restored atmospheric light value. Experimental results show that the proposed algorithm can recover the details of the image and suppress the halo phenomenon. The objective comparison with several typical algorithms proves the feasibility of the proposed algorithm.

Key words: Image fusion; Gaussian weight; Image dehazing; Dark channel prior; Image restoration

OCIS Codes: 100.0100; 100.2000; 100.3020

0 引言

雾、霾天气条件下, 户外图像采集系统获取的图像质量受到了不同程度的影响, 我国最近几年的雾霾发生频率增加, 尤其在秋冬季节, 图像采集系统得到的图像对比度降低、色彩饱和度下降、图像的细节大量丢

基金项目: 国家自然科学基金(No.61561030), 甘肃省财政厅基本科研业务费基金(No.214138), 兰州交通大学教改项目(No.160012)

第一作者: 张晨(1995—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为数字图像处理. Email: chen-zhang19@163.com

导师(通讯作者): 杨燕(1972—), 女, 教授, 博士, 主要研究方向为数字图像处理、智能信息处理. Email: yangyand@mail.lzjtu.cn

收稿日期: 2018-07-24; 录用日期: 2018-09-12

<http://www.photon.ac.cn>

失^[1-2].在交通监测、目标识别与跟踪、卫星遥感监测等领域会受到较大的影响.对雾天采集的降质图像进行去雾处理具有十分重要的现实意义^[3].

目前,雾天图像清晰化处理主要分为两大类:一是基于图像增强的方法,该类方法主要是通过提高图像的对比度,突出图像的细节特征,该类方法并不是把图像中的雾气影响去除,不考虑图像退化的原因,使得恢复出的图像无法正确地表示出场景信息,造成图像失真.另一种是基于物理模型的图像复原方法,大气散射模型作为目前去雾领域广泛使用的物理模型,该模型直观地表示了雾天图像的退化原因,反演出未降质前的图像,图像的信息得到了很好的保存.

雾与场景深度有着密切的联系,图像采集系统无法准确地获取图像的场景深度,基于物理模型去雾是一个病态问题,近几年,单幅图像去雾也取得了很大的进展,许多方法建立在先验与假设上.TAN^[4]等以提高图像的对比度为切入点,通过采取最大化局部对比度的方法,提高了图像的清晰度,但是没有基于物理模型恢复出原本的场景反射,复原的图像颜色过饱和,景深突变处也出现了光晕现象.FATTAL^[5]通过假设光传播透射率与物体的表面阴影局部不相关,通过独立成分分析实现图像去雾,但是该算法比较耗费时间且不能用于灰度图像去雾,对于浓雾图像,没有足够的颜色信息用于成分分析,恢复的图像效果不理想.HE^[6]等对大量户外无雾图像分析发现,图像的非天空区域中像素点的某一个颜色通道有较低像素值,根据该发现提出了暗通道先验,估计出雾的浓度,通过大气散射模型恢复出无雾图像,取得了比较显著的去雾效果,但是在景深突变处出现明显的光晕现象并伴随严重的块状效应,此后提出了引导滤波^[7]优化透射率,但景深突变处遗留明显的残雾.TAREL^[8]等利用中值滤波优化透射率图像获取无雾图像,但是中值滤波不能够保持图像的边缘信息,导致恢复的图像在边缘处出现光晕.MENG^[9]等提出了边界约束图像复原方法,通过其物理模型的约束条件来获取图像透射率,但牺牲了图像的部分细节特征来获取恢复图像,SUN^[10]等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现象.最近,基于深度学习的去雾方法被提出,利用深度神经网络更好地提取与雾相关的特征并进行透射率估计,CAI^[11]等提出端到端深度学习去雾算法,并提出双边线性修正提高恢复图像的质量,REN^[12]等提出了多尺度卷积神经网络图像去雾算法,利用多级神经网络训练图像特征信息,但在训练神经网络多采用合成数据集,因此不适用于不同类型的图像.

以上方法在去雾领域提出了新的思路,目前基于暗通道先验理论也提出了一些优化算法^[13],本文提出了一种改进算法,该方法充分考虑到图像暗通道对去雾效果的影响,使用形态学滤波方法与初始的暗通道图像融合,在构造高斯函数对融合后的暗通道在不同景深位置赋予不同的权值,对透射率图像优化求解.该方法能够很好地恢复出图像细节,有效地抑制光晕现象和块状效应的产生,具有很好的执行效率和去雾效果.

1 暗通道先验去雾理论

在计算机视觉和计算机图形学中,对雾天降质图像进行描述普遍采用的物理模型为 1976 年 McCartney 提出的大气散射模型^[14]

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

式中, $I(x)$ 是采集的有雾图像强度, $J(x)$ 是无雾时的图像强度, $t(x)$ 为介质传输率, A 为大气光值, $t(x)$ 的值与场景深度有着密切的关系, $t(x)$ 的值越小则表示雾的浓度越大,表示为

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

式中, $d(x)$ 表示为场景中的景物到达相机的距离, β 表示为介质散射系数,式(1)中 $J(x)t(x)$ 为直接衰减项,描述场景辐射照度在介质中传播受到的衰减, $[1 - t(x)] \cdot A$ 该项被称为大气光幕,主要是大气的散射光,造成图像的亮度提高,使得场景的颜色发生偏移.

图像去雾的主要目标是估计图像的介质传输率 $t(x)$ 和大气光值 A ,但是图像的景深信息无法准确地获取,且雾的分布不均匀,直接通过式(2)获取介质传输率具有很大的难度.

暗通道先验的提出给图像去雾领域提供了一种新的思路,该方法取得了较好的图像去雾效果,HE等通过对大量的无雾图像观测发现,图像的3个颜色通道中,至少有一个颜色通道在非天空的区域里具有较低的像素值甚至接近于0,对于图像的暗通道描述表示为

$$J^{\text{dark}}(x) = \min_{y \in \Omega(x)} \left[\min_{c \in \{r, g, b\}} J^c(y) \right] \quad (3)$$

0110002-2

$$J^{\text{dark}}(x) \rightarrow 0 \quad (4)$$

式中, $J^c(y)$ 是图像的三个颜色通道, $\Omega(x)$ 是以 $J(x)$ 为中心半径的方形滤波窗口, 通常取值为 15×15 , 该式被称为暗通道先验公式。

介质传输率 $t(x)$ 为局部常量, 对式(1)等式两边同时进行最小值运算, 假设大气光值 A 为常数, 即

$$\frac{I^{\text{dark}}}{A} = \frac{J^{\text{dark}}}{A} + 1 - t(x) \quad (5)$$

根据暗通道先验, 可以获取透射率的表达式

$$t(x) = 1 - \omega \frac{I^{\text{dark}}}{A} \quad (6)$$

式中, 为了保留一定的雾感, 使得恢复图像接近于真实的场景反射, 引入系数 ω , 文献[6]中, 取 $\omega = 0.95$ 。

由于暗通道使用了局部最小值操作, 恢复的图像出现块状效应且在景深突变出现了光晕现象, HE 使用了 LEVIN^[15] 等人提出的 Soft Matting 方法优化透射率图像获得了较好的边缘保持效果, 由于软抠图技术时间复杂度较高, 一种更高效的引导滤波技术被提出取代了软抠图技术, 通过式(7)恢复了无雾图像。

$$J(x) = \frac{I(x) - A}{\max[t(x), t_0]} + A \quad (7)$$

式中, 下限 t_0 取值为 0.1, 是为防止分母趋于 0。

2 本文算法

获取图像暗通道使用了局部最小值滤波, 使暗通道图像的像素值在局部区域内是一个常数, 如果一个像素点 x 处于边缘区域(明亮侧)且像素值较高, 该点暗通道值显然会被边缘区域像素值最小的点所取代^[16], 导致该像素点的暗通道值小于实际值, 暗通道图像没有保持图像的边缘特性, 使得恢复图像出现光晕现象, 本文提出了一种基于融合与高斯加权暗通道的去雾算法, 方法流程图如图 1。

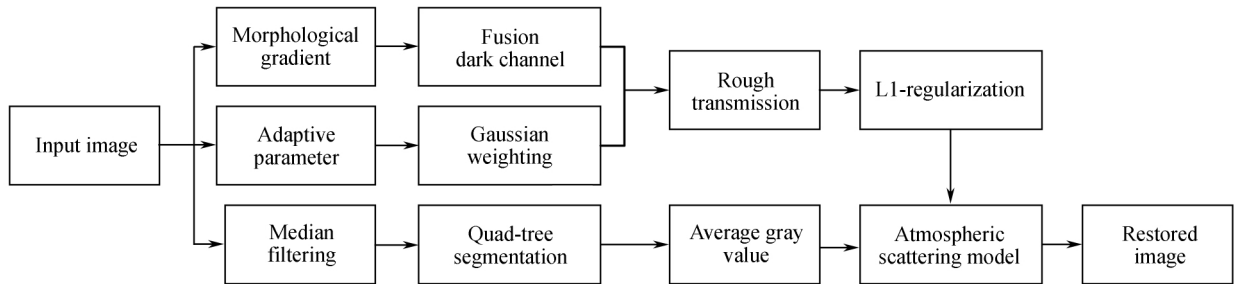


图 1 本文算法流程图

Fig.1 Flowchart of the algorithm

2.1 暗通道估计

由于最小值滤波操作导致暗通道图像边缘处明亮侧的像素值被低估, 本文使用图像融合的方法来增强边缘处的暗通道像素值, 利用形态学梯度的特点补偿暗通道, 形态学梯度通过对图像进行膨胀与腐蚀的操作, 进而求取膨胀图像与腐蚀图像的差值获取图像的形态学边缘, 本文首先求取图像的最小通道图像 I_1^{dark} , 根据式(8)求得图像的形态学边缘。

$$I^{\text{edge}}(x) = \text{dilate}[I_1^{\text{dark}}(y)] - \text{erode}[I_1^{\text{dark}}(y)] \quad (8)$$

式中, I^{edge} 是图像的形态学边缘, $\kappa_1(x)$ 是以 x 为中心的滤波区块(取 3×3 的方形矩阵), $\kappa_2(x)$ 是以 x 为中心的滤波区块(取 15×15 的方形矩阵)。

根据获取的形态学边缘与原始的暗通道图像进行图像融合, 以此来补偿图像边缘处的暗通道像素值, 图像融合分为像素级融合、特征级融合和决策级融合, 本文使用的是像素级融合技术对暗通道图像进行像素补偿, 减小算法复杂度和降低处理时间, 见式(9)。

$$I_f^{\text{dark}} = \omega_1 I^{\text{edge}} + \omega_2 I^{\text{dark}} \quad (9)$$

式中, I_f^{dark} 为融合后的暗通道, ω_1 和 ω_2 为加权系数, 而且满足 $\omega_1 + \omega_2 = 1$ 的条件, 权值的选取比较关键, ω_1

的选取过大会导致暗通道图像过度边缘补偿, ω_1 的选取过小则无法有效地补偿暗通道的边缘区域, 消除恢复图像的光晕现象, 经过反复的实验, 采用的权值分别为 $\omega_1 = 0.5$ 和 $\omega_2 = 0.5$, 从图 2(c) 可以看出形态学边缘提高了暗通道边缘处的像素值, 并且保留了图像的细节特征, 图 2(b) 的边缘区域暗通道值被严重低估, 导致图 2(d) 边缘区域出现明显的光晕现象.

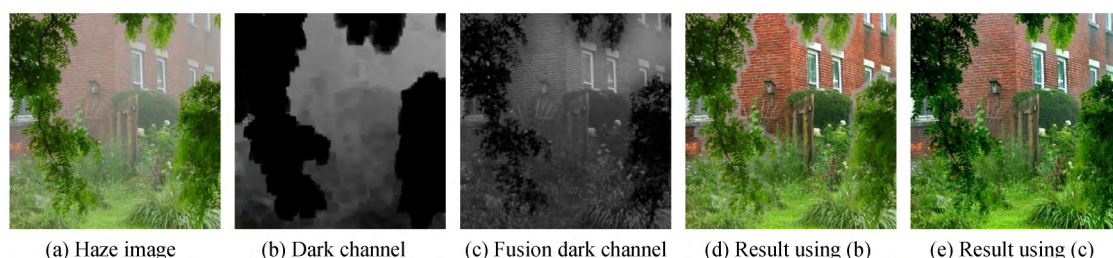


图 2 暗通道比较

Fig.2 Dark channel comparison

由于获取的暗通道图像由最小值图像与形态学边缘融合而来, 低估了暗通道图像的远景区域的像素值, 最终造成恢复的图像在远景区域去雾不彻底, 本文通过构造高斯加权函数, 提高远景区域的去雾效果. 高斯加权暗通道表示为

$$I_g^{\text{dark}} = \frac{1}{\beta} [\lambda I_t^{\text{dark}} + \omega_i(i) I_1^{\text{dark}}] \quad (10)$$

$$\beta = \lambda + \omega_x(i) \quad (11)$$

式中, I_g^{dark} 是加权暗通道, $\omega_i(i)$ 为高斯权重, β 是总的权值, 高斯权重为

$$\omega_i(i) = e^{-\{[1-I_t^{\text{dark}}(x)]^2/\sigma^2\}} \quad (12)$$

式中, σ 是标准差, σ 值的选取影响复原图像的质量, 其取值范围为 $[0, 1]$.

为了直观地看出 σ 值大小对有雾图像近景和远景处理结果的差异, 选用浓雾图像进行实验, 实验结果如图 3. 从图 3(b) 至图 3(d) 可以看出: 当 σ 值较小时, 复原图像近景细节比较丰富, 整体色调趋于自然; 图像的远景区域雾感较明显, 大量细节丢失, 恢复效果不理想, 随着 σ 值的增大, 图像的远景区域细节越丰富, 可以明显地看到远处的车和建筑物, 而图像的近景区域则出现颜色过饱和现象.

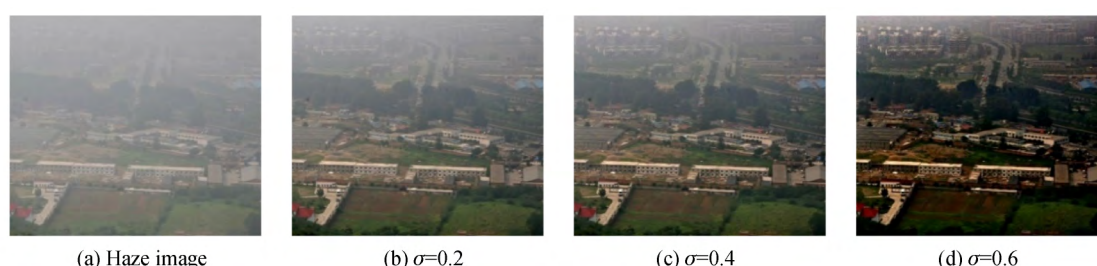


图 3 仿真实验比较

Fig.3 Compared through simulation

通过对大量有雾图像统计实验发现, 对于远景区域, σ 值越大, 高斯曲线下降越缓慢, 平滑效果越明显, 对 I_g^{dark} 值的贡献越大. 而对于近景区域, σ 值越小, 高斯曲线下降越迅速, 平滑效果越差, 对 I_g^{dark} 值的贡献越小. 根据高斯函数的特点, 本文选取一种根据景深变化的自适应 σ , 根据对图像灰度分布的观察发现, 有雾图像的像素点分布相对于无雾图像处于较高的灰度级, 图像的最大通道图像远景区域灰度值较高, 近景区域灰度值相对较低, 可以反映出图像的深度信息, 根据此特点, 将图像的最大通道作为自适应 $\sigma(x)$ 值, 为了保证局部区域内具有相同的 σ 值并消除白色物体的影响, 使用局部最小值滤波操作, 得到混合通道 I^{mix} 为

$$I^{\text{mix}} = \min_{y \in \Omega_2(x)} [\max_{c \in (r, g, b)} I^c(y)] \quad (13)$$

式中, $\Omega_2 = 15$, 最小值滤波操作使混合通道出现比较严重的块状效应, 通过将 I^{mix} 和含有图像特征的 $\max_{c \in (r, g, b)} I^c(y)$ 进行联合双边滤波得到自适应调整参数 $\sigma(x)$, 表达式为

$$\sigma(x) = \frac{1}{W_x^{jb}} \sum_{y \in S} G_{\sigma_y} [\|I^{\text{mix}}(x) - \max_{c \in (r, g, b)} I^c(y)\|] \times G_{\sigma_s}(\|x - y\|) [1 - \max_{c \in (r, g, b)} I^c(y)] \quad (14)$$

$$W_x^{jb} = \sum_{y \in S} G_{\sigma_y} [\|I^{\text{mix}}(x) - \max_{c \in (r, g, b)} I^c(y)\|] \times G_{\sigma_s}(\|x - y\|) \quad (15)$$

式中, G_{σ_y} 和 G_{σ_s} 为高斯函数; σ_y 为值域高斯函数尺度; σ_s 为空域高斯模板尺寸; W_x^{jb} 是归一化系数。

假设大气光值 A 已知, 可以得到粗略透射率估计, 其表达式为

$$t(x) = 1 - \omega \frac{I_g^{\text{dark}}}{A} \quad (16)$$

2.2 透射率优化

透射率与景深大小的关系通过式(2)表示, 在一个较小的局部区域里, 处于相同景深区域的像素应该具有相近的透射率, MENG^[9]等利用相邻像素的颜色差构造加权函数 $W(x, y)$ 使处于相同景深的两相邻像素间透射率之差趋于 0, 既满足

$$W(x, y)[t(y) - t(x)] = 0 \quad (17)$$

式中, x 和 y 是两个相邻像素, 通过构造的加权函数调节透射率之差, 当深度变化比较大时选取较小的 $W(x, y)$, 反之亦然。获取图像的深度信息比较困难, 这里假设若相邻像素的色差越小则两像素点具有相同的景深信息, 反之亦然。权值的表达式为

$$W(x, y) = e^{-\|I(x) - I(y)\|^2 / 2\delta^2} \quad (18)$$

式中, $\|I(x) - I(y)\|$ 表示两相邻像素间的像素差, 边缘检测算子可以反映出图像的梯度变化, 这里使用 4 个模板方向的 Krish 边缘检测算子对式(18)做卷积运算, 最终得到的加权函数为

$$W_j(i) = \exp(-\sum_{c \in (r, g, b)} \|(D_j \otimes I^c)_i\|^2 / 2\delta^2) \quad (19)$$

L_1 正则化的总权值为

$$\sum_{j \in \omega} \|W_j \cdot (D_j \otimes t)\|_1 \quad (20)$$

式中, D_j 是一组 Krish 算子, i 表示第 j 个滤波器构造的第 i 个加权函数索引, 其中 $i = 1, 2, \dots, 4$, 参数 δ 是标准差。

通过上面的分析, 引入了 $\sum_{j \in \omega} \|W_j \cdot (D_j \otimes t)\|_1$ 范数约束透射率, 并加入该约束平衡优化初级透射率与优化透射率之间的关系, 通过最小化下面的代价损失函数

$$\theta \|t - t_y\|_2^2 + \sum_{j \in \omega} \|W_j \cdot (D_j \otimes t)\|_1 \quad (21)$$

第一项为数据项, 优化的透射率图像应该接近于初级透射率, 第二项修正邻域透射率间的关系, θ 是正则化系数, 平衡两项之间的关系。直接最小化式(21)有很大的困难, MENG 等采用变量分裂的方法, 引入辅助变量 μ_j , 构造新的代价函数

$$\theta \|t - t_y\|_2^2 + \mu (\sum_{j \in \omega} \|\mu_j - (D_j \otimes t)\|_2^2) + \sum_{j \in \omega} \|W_j \cdot \mu_j\|_1 \quad (22)$$

最后通过求取式(22)的偏导函数并令偏导函数为零, 最终求解出优化透射率 t_y , 参数 μ 以 $2\sqrt{2}$ 为缩放因子在 $\mu_0 = 1$ 到 $\mu_{\max} = 2^3$ 的范围进行迭代。其迭代效果如图 4。

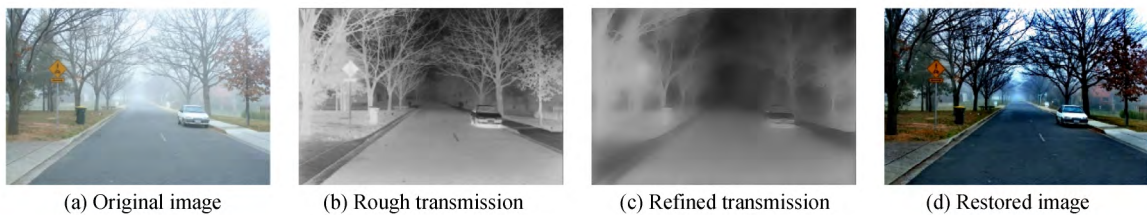


图 4 透射率迭代效果

Fig.4 Transmission iteration effect

2.3 大气光值选取

大气光值的准确选取也决定着恢复图像的视觉效果, 通常定义无穷远处的像素点作为大气光强度, 但该

值的选取容易受到高亮噪声和明亮区域的影响,直接将图像中最大的像素值作为大气光值并不准确.文献[17]直接采用图像中亮度值最高的值作为大气光值,容易受到白色物体的影响,导致大气光值选取过大.文献[6]选取有雾图像暗通道亮度值前 0.1% 的像素点,然后再取这些像素点所对应的有雾图像中的最大值选取为大气光值,由于白色物体和明亮区域的暗通道值相对较高,造成大气光值的选取出现误差.文献[18]采用四叉树分割的方法对图像区域进行划分并对划分的区域进行评分,同时对纹理信息和亮度进行选择,把与纯白色差值最小的像素值作为大气光值.但当图像受到高亮噪声污染时,会影响大气光值选取的准确性,本文基于四叉树方法提出了一种改进方法,具体算法为:

- 1) 对灰度图像 I_{gray} 使用中值滤波,获得滤波后的图像 I_{median} ;
- 2) 将图像 I_{median} 平均分为四个矩形区域;
- 3) 求取每个区域的平均像素值减去该区域的标准差,得到该区域的得分;
- 4) 将得分最高的区域平均划分为四个矩形区域;
- 5) 重复步骤 2) 与步骤 3),直到区域的大小小于最先设定的阈值;
- 6) 求取该区域的平均值.

从图 5 中可以看出 HE 算法会将大气光值选择为强光区域,高估了大气光值导致恢复图像比较暗淡,而改进的四叉树算法可以更准确地获取大气光值,恢复图像较明亮,对噪声有很强的鲁棒性,避免了将高亮噪声和白色区域作为大气光值,提高了大气光估值的精确性.

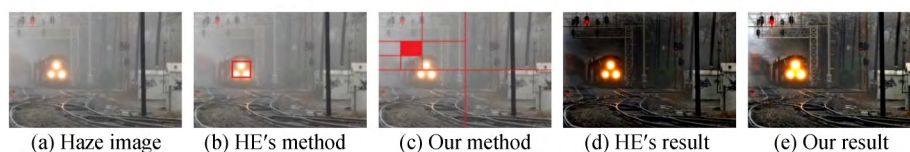


图 5 大气光值选取

Fig.5 Atmospheric light value selection

3 实验结果与分析

为了验证图像复原效果,本文算法在 PC 上采用 MATLAB 语言进行计算.程序运行环境为 Win10,计算机的配置为 Intel (R) Core (TM) i5-6300U CPU@2.40GHz, 4GB 内存.最小值滤波窗口 $\Omega=15$, λ 设置为 0.1, θ 设置为 1.本文从主观评价和客观评价两个方面对图像去雾效果进行对比.

3.1 主观评价

主观分析可以最直观地反映出恢复效果,本文选取目前经典的图像去雾算法进行对比,图 6 为不同算法的去雾结果.图 6(a)为有雾图像.图 6(b)为 HE^[7] 等的暗通道先验算法,基本消除了雾气影响,但是在景深突变处去雾不彻底,如第 2 幅图像,在景深变化的区域存在明显的残雾,其次,对含有大量天空区域或者白色物体的图像,如第 1、3 幅图像,天空区域出现偏色现象且白色物体明显颜色偏暗.图 6(c)为 MENG^[9] 的算法,去雾后的图像细节部分增多,但出现了明显的偏色现象并且有伪影出现,如第 1、4 幅图像,天空区域的云朵色彩失真严重.图 6(d)为 ZHU^[19] 等提出的颜色衰减先验去雾算法,从恢复结果来看,该方法对于薄雾有较好效果,但是仍存在雾感,并且恢复的图像偏暗,对于浓雾图像难以有效恢复出细节.图 6(e)为 CAI^[11] 等人提出的端对端系统的去雾算法,该方法具有优越的性能,并且能够复原大量的细节信息,但仍存在一定的不足,比如去雾不彻底以及浓雾去雾效果不佳等现象.图 6(f)为本文算法的复原效果,对明亮区域的恢复效果相对较好,整体色彩比较自然,与 HE 等的算法相比较,在景深突变处消除了残雾,且抑制了天空区域偏色现象,但恢复图像近景出现过饱和现象,如第 4、5 幅图像,这主要是由于高斯加权融合的使用,高估了近景区域的暗通道图像,从而该区域颜色出现了过饱和现象.

从图 7 可以看出,对于广告牌图像,本文算法可以有效地恢复出广告牌中的文字,提高图像的清晰度和对比度.对于楼房图像,CAI^[11] 和 REN^[12] 的算法没能有效地去除远景的雾,从图中方框里放大图像来看,本文算法较好地恢复出大楼的细节,提高图像的能见度.

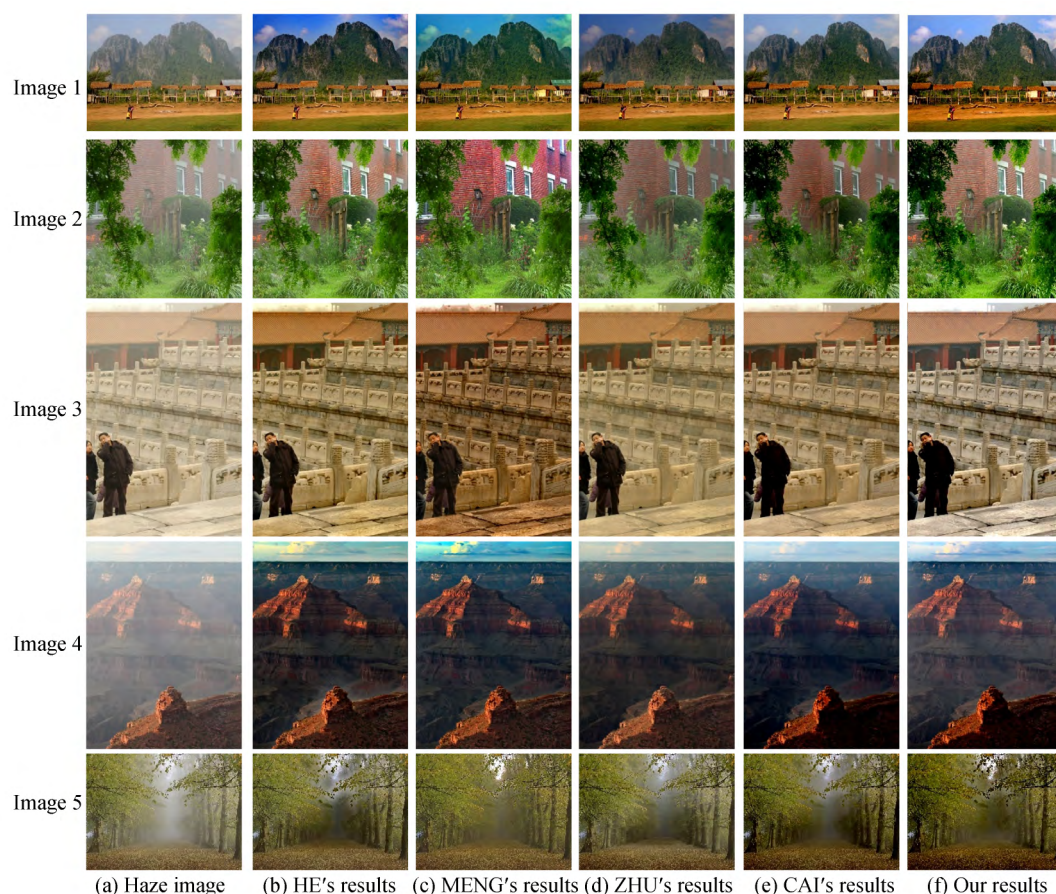


图 6 实验效果对比

Fig.6 Comparison of experimental results



图 7 局部效果比较

Fig.7 Local effect comparison

3.2 客观评价

为了进一步验证本文算法的有效性,采用图像增强效果评价的无参考图像质量评估方法^[20],将可见边集合数 e , 平均梯度 \bar{r} , 饱和像素点 s 以及处理时间作为评价指标.其中, e 和 \bar{r} 的值越大表明算法恢复效果较好,恢复图像的饱和像素点 s 和处理时间越小越好.实验对比数据如图 8 所示.

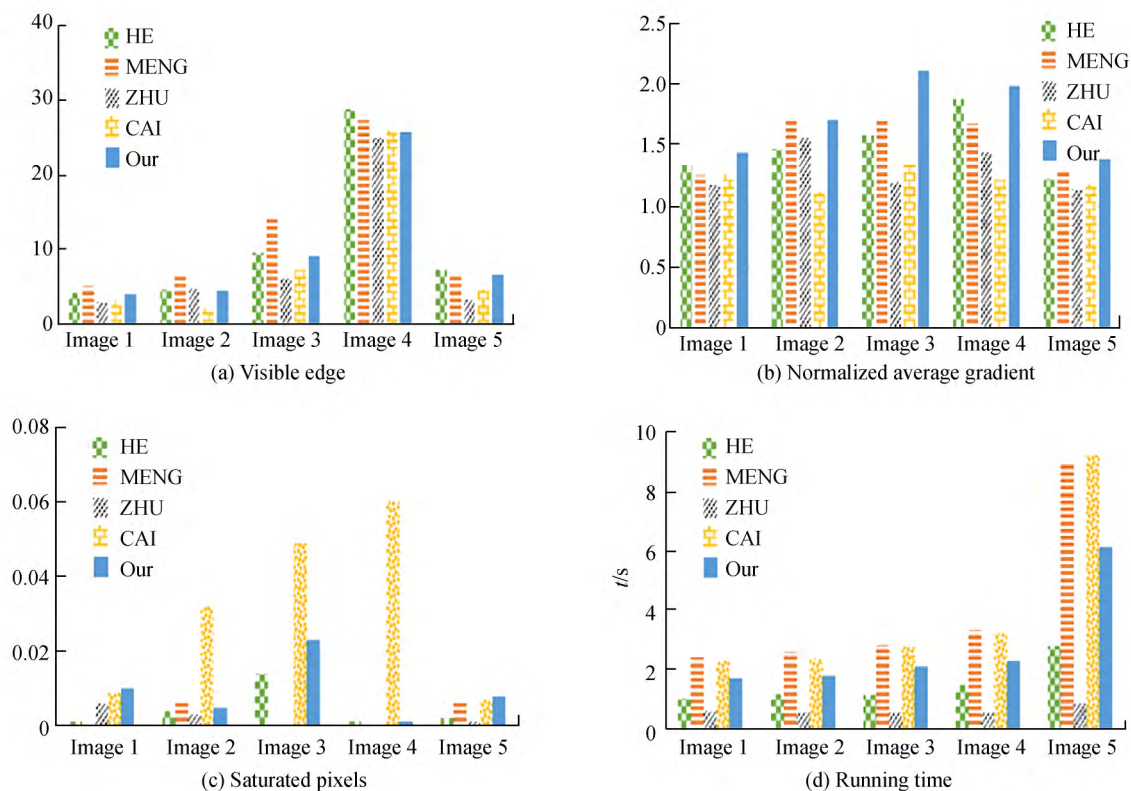


图8 客观评价

Fig.8 Objective evaluation

选取图6中的5幅有雾图像,分别采用HE^[7],MENG^[9],CAI^[11],ZHU^[19]与本文算法进行比较.从图8(a)可以看出,本文方法取得了不错的表现,但相比MENG^[9]的方法略显不足;图8(b)表示归一化平均梯度,本文方法相比其他四种方法效果更好;图8(d)为算法运行时间对比,ZHU^[19]的算法时间复杂度比较低,本文算法由于使用了L1正则化优化透射率使得算法处理时间提高.综上,说明本文方法的去雾效果相对较好,具有一定的优越性.

4 结论

本文算法针对暗通道先验算法在景深突变处透射率估计不准确和远景区域去雾不彻底的问题,结合形态学梯度与图像融合的方法对介质传输率进行估计,并构造自适应高斯权重对景深较大区域进行修正,最后采用L1正则化思想优化介质传输率.实验结果表明,本文算法复原的图像具有较高色彩保真度,图像细节丰富,同时对于天空区域也有良好的去雾效果,并且在客观评价中也体现出一定优势.尽管算法取得了不错的去雾效果,但部分恢复图像在近景区域出现颜色过饱和现象,主要是因为低估了近景区域的介质透射率,提高透射率估计的准确性将是之后进一步研究和改进的重点.

参考文献

- [1] 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*, 2017, **4**: 165-185.
- [2] WANG W, YUAN X. Recent advances in image dehazing[J]. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2017, **4**(3): 410-436.
- [3] YANG Yan, CHEN Gao-ke. Single image visibility restoration using optical compensation and pixel-by-pixel transmission estimation[J]. *Journal on Communications*, 2017, **38**(5): 48-56.
- [4] 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.
- [5] TAN R T. Visibility in bad weather from a single image[C]. *Proceeding of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Anchorage, AK: IEEE Press, 2008: 1-8.
- [6] FATTAL R. Single image dehazing[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2008, **27**(3):1-9.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] TAREL J P, HAUTIERE N. Fast visibility restoration from a single color or gray level image[C]. International Conference on Computer Vision, IEEE, 2010: 2201-2208.
- [9] MENG G F, WANG Y, DUAN J, *et al.* Efficient image dehazing with boundary constraint and contextual regularization [C]. IEEE International Conference on Computer Vision, IEEE, 2014: 617-624.
- [10] SUN W, LI D J, LIU H J, *et al.* Fast single image fog removal based on atmospheric scattering model[J]. *Optics & Precision Engineering*, 2013, **21**(4): 1040-1046.
- [11] CAI B, XU X, JIA K, *et al.* An end-to-end system for single image haze removal[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2016, **25**(11): 5187-5198.
- [12] REN W Q, LIU S, ZHANG H, *et al.* Single image dehazing via multi-scale convolutional neural networks[M]. Computer Vision-ECCV 2016, Springer International Publishing, 2016: 154-169.
- [13] TANG Qun-fang, YANG Jie, LIU Hai-bo, *et al.* Fast single-image dehazing method based on dark channel prior[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, **46**(9): 0910001.
汤群芳,杨杰,刘海波,等.基于暗通道先验的单幅图像快速去雾方法[J].光子学报,2017,**46**(9):0910001.
- [14] MCCARTNEY E J. Optics of the atmosphere; scattering by molecules and particles[M]. New York, John Wiley and Sons, Inc, 1976: 421-421.
- [15] LEVIN A, LISCHINSKI D, WEISS Y. A closed form solution to natural image matting[C]. Computer Vision and Pattern Recognition, 2006 IEEE Computer Society Conference on IEEE, 2006: 61-68.
- [16] YU T, RIAZ I, PIAO J, *et al.* Real-time single image dehazing using block-to-pixel interpolation and adaptive dark channel prior[J]. *Iet Image Processing*, 2015, **9**(9): 725-734.
- [17] NAMER E, SCHECHNER Y Y. Advanced visibility improvement based on polarization filtered images [J]. *Proceedings of the 2005 Polarization Science and Remote Sensing*, 2005: 36-45.
- [18] 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 & Image Representation*, 2013, **24**(3): 410-425.
- [19] 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.
- [20] HAUTIERE N. Blind contrast enhancement assessment by gradient ratioing at visible edges[J]. *Image Analysis & Stereology Journal*, 2008, **27**(2): 87-95.

Foundation item: The National Natural Science Foundation of China (No.61561030), Research Fund of Department of Finance of Gansu Province (No.214138), Research Fund of Teaching Reform Project of Lanzhou Jiaotong University (No.160012).