

一种结合双区域滤波和图像融合的单幅图像去雾算法

张小刚¹ 唐美玲¹ 陈华^{1,2} 汤红忠^{1,3}

摘要 基于大气散射物理模型和暗原色先验原理, 提出一种结合双区域滤波和图像融合的单幅图像去雾算法. 首先在计算暗通道函数时, 定义了一类暗区域对图像边缘的低强度像素点进行描述, 该区域像素点的暗原色中值取其三原色通道的最小值, 以代替原来的中值滤波运算值. 此滤波方法不仅能有效去除 Halo 效应, 而且避免了黑斑效应; 然后基于大气散射物理模型定义一种伪去雾图, 将其与原去雾图进行像素级融合对原图进行色度校正, 实现了柔性去雾, 改善了现有方法易出现过去雾的缺陷. 实验结果表明, 该算法去雾后图像具有较好清晰度及色彩恢复度, 去雾鲁棒性强. 在大雾和图像色彩失真严重的情况下, 仍可有效恢复图像.

关键词 暗原色先验, 双区域滤波, 图像融合, 去雾

引用格式 张小刚, 唐美玲, 陈华, 汤红忠. 一种结合双区域滤波和图像融合的单幅图像去雾算法. 自动化学报, 2014, 40(8): 1733–1739

DOI 10.3724/SP.J.1004.2014.01733

A Dehazing Method in Single Image Based on Double-area Filter and Image Fusion

ZHANG Xiao-Gang¹ TANG Mei-Ling¹ CHEN Hua^{1,2} TANG Hong-Zhong^{1,3}

Abstract A dehazing method based on double-regional filter and image fusion is proposed based on the atmospheric scattering model and dark channel prior principle. Firstly, a dark region is defined to describe the low intensity pixel of the image's edge area when the median filter is adopted to calculate the dark channel transmission. The minimum value of the color (RGB) channels are assigned to the dark channel in dark region pixels instead of its median. This method not only removes the halo effect but also avoids black spot. On the other hand, a pseudo-dehazed image based on the atmospheric scattering model is proposed to solve the over-defogging problem. The defect of over-defogging can be cut down by the pixels fusion between the original dehazed image and the pseudo-dehazed image. Experiments show that the dehazing images with the proposed method in this paper have better sharpness, color restore degrees and robustness, even on the dense fog and color distortion.

Key words Dark channel prior, double-regional filter, image fusion, dehazing

Citation Zhang Xiao-Gang, Tang Mei-Ling, Chen Hua, Tang Hong-Zhong. A dehazing method in single image based on double-area filter and image fusion, 2014, 40(8): 1733–1739

大气中由于微尘颗粒以及水蒸汽的存在, 在温度下降时, 水蒸汽凝结成小水珠或冰晶与空气中的微尘颗粒相结合形成雾霾. 近年来, 我国多个地区发生了持续性大规模灰霾污染事件, 使捕获到的图像质量大幅度下降, 很难适用于交通监测、物体跟踪、户外识别等智能视觉系统中. 如何进行有效去雾, 已

经成为当今研究的热点.

目前, 通用的图像去雾算法是先对大气透射率进行估算, 再根据大气散射模型恢复场景色彩. 通用的图像去雾算法根据所需的参照条件主要分为两类: 一类是利用不同偏振程度的多幅图像^[1-4] 或不同天气条件下, 对同一场景采集的多幅图像^[5-7] 作为参照数据来去雾. 这种方法虽然能有效去雾, 但同一场景多幅图像采集较困难, 导致该方法适用性不强. 因此另一类基于单幅图像的去雾方法逐渐受到国内外研究人员的关注^[8-11]. Tan^[8] 利用对比度的区域最大法获得无雾图像, 但是易造成图像颜色过度饱和而失真. Fattal^[9] 假设光透射率与物体表面的透射传播局部不相关, 根据这一假设估算透射率. 该方法需要足够的物理色彩信息, 然而在有雾条件下所采集到的图像已经丢失了大量颜色信息, 因此该算法得到的透射率偏差较大. He 等^[10-11] 提出了一种暗

收稿日期 2013-04-17 录用日期 2013-12-09
Manuscript received April 17, 2013; accepted December 9, 2013
国家自然科学基金 (61174050, 61203016) 资助
Supported by National Natural Science Foundation of China (61174050, 61203016)

本文责任编辑 田捷

Recommended by Associate Editor TIAN Jie

1. 湖南大学电气与信息工程学院 长沙 410082 2. 湖南大学信息与工程学院 长沙 410082 3. 湘潭大学信息工程学院 湘潭 411105
1. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082 2. School of Information Science and Engineering, Hunan University, Changsha 410082 3. College of Information Engineering, Xiangtan University, Xiangtan 411105

原色先验算法. 该算法通过对大量户外无雾图像的统计发现, 在大多数图像中, 除天空部分外, 总存在某些像素点在某个通道上有很低的强度值. 根据这一特点估算透射率, 并采用抠图算法对透射率进行细化, 可以得到恢复的无雾图像. 但该算法时间复杂度大, 不能达到实时处理的要求. 因此, 后续又出现了采用双边滤波^[12-13]和中值滤波^[14]代替最小值滤波^[10]来估算透射率, 以提升算法性能.

本文提出一种结合双区域滤波和图像融合的单幅图像去雾算法. 首先, 在利用暗通道估算透射率时, 定义一种暗区域, 对其采用双区域滤波法以代替最小值滤波^[10], 有效去除了 Halo 效应及黑斑效应; 随后, 针对去雾后图像暗沉的现象, 定义一种伪去雾图, 将其与原去雾图进行像素级融合, 实现色度校正和柔性去雾, 改善了现有方法易出现过去雾的缺陷. 实验结果表明, 去雾后的图像具有较好清晰度及色彩恢复度, 去雾鲁棒性强, 可有效恢复图像.

1 暗原色先验去雾物理模型

在雾霾环境下, 大气散射物理模型的成像方程^[15-16]描述如下:

$$Org(x, y) = J(x, y) \cdot t(x, y) + A \cdot (1 - t(x, y)) \quad (1)$$

即

$$Org(x, y) = A + (J(x, y) - A) \cdot t(x, y) \quad (2)$$

式中, $Org(x, y)$ 为像素点 (x, y) 观测到的图像强度, $J(x, y)$ 为无雾时景物光线的强度, A 为全球大气光成分, $t(x, y)$ 为介质透射率. 其中, $Org(x, y)$ 与 $J(x, y)$ 都为彩色图像, 拥有红、黄、蓝三原色通道. 根据对大量户外无雾图像的统计, 发现这三个原色通道中, 至少有一个通道在某些非天空的局部区域里强度值很低^[10], 其值趋于 0, 即

$$J_{dark}(x, y) = \min_{(x, y) \in \omega(x, y)} \left(\min_{c \in \{R, G, B\}} J^c(x, y) \right) \rightarrow 0 \quad (3)$$

式中, $J^c(x, y)$ 为 $J(x, y)$ 的红、黄、蓝三原色通道, $\omega(x, y)$ 是以像素点 (x, y) 为中心的方形区域 (通常取 7×7 或 15×15 的方形矩阵). 上式被称为暗原色先验公式.

对式 (2) 进行最小运算, 并将式 (3) 代入式 (2), 得

$$\min_{(x, y) \in \omega(x, y)} \left(\min_{c \in \{R, G, B\}} Org^c(x, y) \right) = (1 - t(x, y)) \cdot A \quad (4)$$

即

$$t(x, y) = 1 - \frac{\min_{(x, y) \in \omega(x, y)} \left(\min_{c \in \{R, G, B\}} Org^c(x, y) \right)}{A} \quad (5)$$

为使去雾后图像显得更加真实, 在式 (5) 中引入常量系数 θ ($0 < \theta \leq 1$), 根据文献 [10, 14], 本文取 $\theta = 0.95$,

$$t'(x, y) = 1 - \theta \cdot \frac{\min_{(x, y) \in \omega(x, y)} \left(\min_{c \in \{R, G, B\}} Org^c(x, y) \right)}{A} \quad (6)$$

将式 (6) 代入式 (1) 得:

$$J(x, y) = \frac{Org(x, y) - (1 - t'(x, y)) \cdot A}{t'(x, y)} \quad (7)$$

为了保证分母不为 0, 将上式化为:

$$J(x, y) = \frac{Org(x, y) - (1 - t'(x, y)) \cdot A}{\max(t'(x, y), \varepsilon)} \quad (8)$$

其中, ε 为很小的常数, 通常取 0.1.

利用上式对图 1 (a) 进行去雾处理, 去雾后图像如图 1 (d) 所示. 可以看出, 图中出现明显的 Halo 效应, 严重影响了去雾后图像的视觉效果. 文献 [10] 提出了采用抠图对 $t'(x, y)$ 进行细化, 去除 Halo 效应. 但抠图算法复杂度高且耗时长, 不能满足实时处理的要求.

2 结合双区域滤波和图像融合的图像去雾

为提高去雾算法的实时性, 近年来涌现了多种改进的透射率估算方法. 文献 [12-13] 利用双边滤波重新定义透射率, 大大减少了运算时间. Gibson 等^[14] 提出用中值滤波代替最小值滤波, 该方法不需要抠图或双边滤波等对透射率进行细化, 在一定程度上再次降低了时间复杂度并有效去除了 Halo 效应, 但该方法去雾后图像质量较差, 易出现黑斑效应. 本文在上述研究基础上, 首先提出一种双区域滤波法, 保持了运算速度快的优点, 同时有效去除了黑斑效应, 提高了图像质量; 然后针对大雾图像去雾后易出现的图像暗沉现象, 本文定义一类伪去雾图与上述去雾结果图进行像素级融合, 实现柔性去雾.

2.1 暗区域分析

Gibson 等^[14] 利用中值滤波对暗原色先验函数进行修订如下:

$$J_{dark_m}(x, y) = \underset{(x, y) \in \omega(x, y)}{\text{med}} \left(\underset{c \in \{R, G, B\}}{\min} J^c(x, y) \right) \quad (9)$$

其中, $J_{dark_m}(x, y)$ 称为暗原色中值.

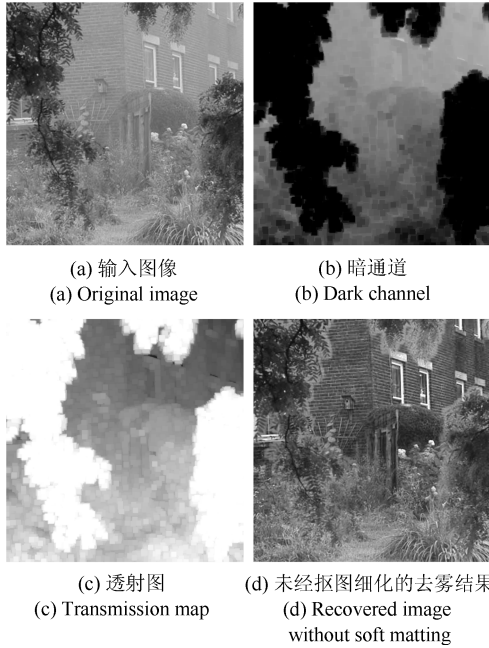


图 1 暗通道先验图像去雾

Fig. 1 Recovered images using dark channel

值得注意的是, 如果像素点 (x, y) 三原色通道中最小强度值低 (如图 1 (a) 中的树叶部分, 其暗原色先验值为 $0^{[10]}$) 且处于强度变化的边缘 (如图 1 (a) 中的树叶边界), 即其 $\omega(x, y)$ 邻域内一半以上像素点的强度值较大, 此时对 $\omega(x, y)$ 进行中值运算, 会增大 $J_{dark_m}(x, y)$ 与像素点 (x, y) 之间的强度差值, 进而造成相应像素点的透射值偏小. 因为 $Org(x, y) \leq A$ (A 值的求取详见第 2.3 节), 即 $Org(x, y) - A \leq 0$. 由式 (7) 可知, $J(x, y)$ 与透射率 $t'(x, y)$ 成正比, 因此透射值减小会导致 $J(x, y)$ 偏小, 这是在景物边缘出现黑斑效应的主要原因. 为了从图像中识别出这类像素点以进行更有效的处理, 本文定义一种暗区域: 若像素点 (x, y) 满足 $J_{dark_m}(x, y) > K \cdot \min_{c \in \{R, G, B\}} J^c(x, y)$ (其中 K 为常数. 本文取 $K = 1$), 定义该像素点处于暗区域.

图 2 (b) 和图 3 (b) 为利用中值滤波^[14] 的去雾图, 从方框标记出的区域中可以看出, 当像素点处于暗区域时, 容易出现过去雾, 即产生黑斑效应. 为了避免黑斑效应影响图像质量, 基于上述暗区域的分析, 本文采用双区域滤波对中值滤波算法进行改进.

2.2 双区域滤波

黑斑的产生影响整个图像的去雾效果, 本文根

据暗区域的特点, 在选取暗原色中值前, 先判断当前像素点所在的区域, 然后根据像素点所在区域对暗原色中值函数进行重新定义. 具体描述如下式:

$$J'_{dark_m}(x, y) = \begin{cases} \underset{(x, y) \in \omega(x, y)}{\text{med}} \left(\underset{c \in \{R, G, B\}}{\min} J^c(x, y) \right), & \text{若 } J_{dark_m}(x, y) \leq \\ & K \cdot \min_{c \in \{R, G, B\}} J^c(x, y) \\ \underset{c \in \{R, G, B\}}{\min} J^c(x, y), & \text{若 } J_{dark_m}(x, y) > \\ & K \cdot \min_{c \in \{R, G, B\}} J^c(x, y) \end{cases} \quad (10)$$

上式表示当像素点处于暗区域时, 暗原色中值直接取该像素点三原色通道的最小值; 否则, 取其 $\omega(x, y)$ 邻域内三原色通道最小值的中值.

基于第 1 节讨论的大气散射物理模型和暗原色先验去雾模型^[10], 由式 (6) 和式 (8) 可知, 基于上述双区域滤波的透射率计算函数 $t'_m(x, y)$ 和去雾图 $J_{m1}(x, y)$ 描述如下:

$$t'_m(x, y) = 1 - \theta \cdot \frac{Org'_{dark_m}(x, y)}{A} \quad (11)$$

$$J_{m1}(x, y) = \frac{Org(x, y) - (1 - t'_m(x, y)) \cdot A}{\max(t'_m(x, y), \epsilon)} \quad (12)$$

式中, $Org'_{dark_m}(x, y)$ 为输入图像的暗原色双区域值:

$$Org'_{dark_m}(x, y) = \begin{cases} Org_{dark_m}(x, y), & \text{若 } Org_{dark_m}(x, y) \leq \\ & K \cdot \min_{c \in \{R, G, B\}} Org^c(x, y) \\ \min_{c \in \{R, G, B\}} Org^c(x, y), & \text{若 } Org_{dark_m}(x, y) > \\ & K \cdot \min_{c \in \{R, G, B\}} Org^c(x, y) \end{cases} \quad (13)$$

且 $Org_{dark_m}(x, y) = \underset{(x, y) \in \omega(x, y)}{\text{med}} \left(\underset{c \in \{R, G, B\}}{\min} Org^c(x, y) \right)$ 为输入图像的暗原色中值.

图 2 和图 3 为中值滤波改进前后去雾效果对比, 从图中可以看出, 改进后的透射图 (图 2 (c)) 比中值滤波^[14] 的透射图 (图 2 (a)) 轮廓更清晰, 细节保持度更好. 从图 2 (d) 和图 3 (c) 可以看出, 本文算法可以有效地抑制黑斑效应, 使图像拥有更好的视觉效果.

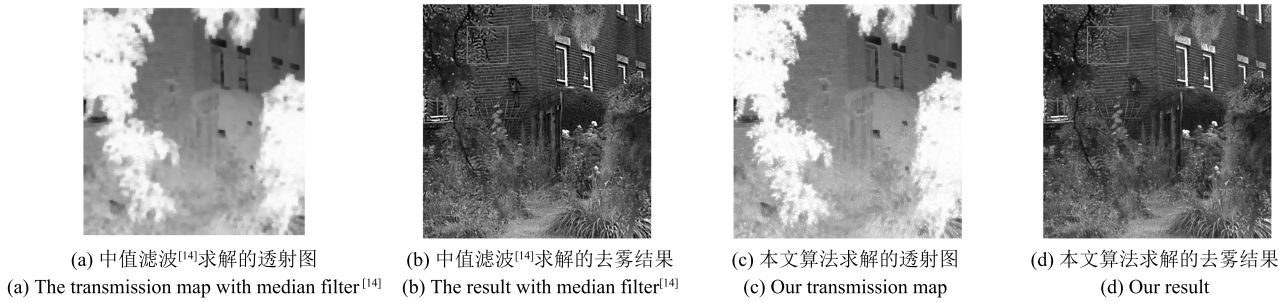


图 2 中值滤波改进前后去雾效果对比结果 1

Fig. 2 The first comparative results of improved algorithm and unimproved median filters

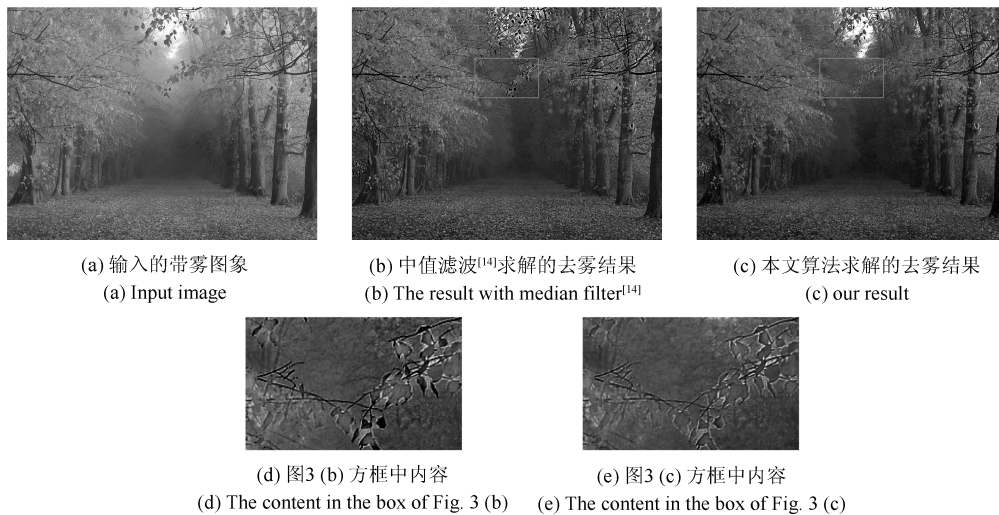


图 3 中值滤波改进前后去雾效果对比结果 2

Fig. 3 The second comparative result of improved algorithm and unimproved median filters

2.3 大气光成分估计

文献 [11] 采用输入图像暗通道值 $Org_{dark}(x, y) = \min_{(x,y) \in \omega(x,y)} (\min_{c \in \{R,G,B\}} Org^c(x, y))$ 中的 0.1% 最亮像素的强度值, 文献 [13] 则先选定天空区域, 然后取 $Org_{dark}(x, y)$ 中的最大值的 95%, 文献 [11] 和文献 [13] 都需要根据经验从 $Org_{dark}(x, y)$ 中选取一定的比例, 这样很容易造成应用的局限性. 为了更简单地估算大气光成分值, 本文取 $Org'_{dark_m}(x, y)$ 中的最大值作为大气光成分的估计值. 可表示为:

$$A = \max(Org'_{dark_m}(x, y)) \quad (14)$$

2.4 基于图像融合的柔性去雾

从图 2 和图 3 可以看出, 利用暗原色中值去雾不需要抠图等复杂算法进行细化, 也能有效改善

Halo 效应. 但对一些雾霾较大和色彩失真较严重的图像 (如图 4(a)), 现有算法去雾后易出现色彩暗沉现象 (如图 4(b)). 为了丰富图像色彩, 调节去雾强度, 本文新定义一种伪去雾图, 并与第 2.2 节讨论的去雾图 $J_{m1}(x, y)$ 进行像素级融合, 达到柔性去雾效果.

首先, 重新引进大气散射模型公式. 即

$$Org(x, y) = J(x, y) \cdot t_1(x, y) + A \cdot (1 - t_2(x, y)) \quad (15)$$

其中, $J(x, y) \cdot t_1(x, y)$ 为场景透射项, $A \cdot (1 - t_2(x, y))$ 表示周围物体表面散射项. 故 t_1 和 t_2 不一定完全相等^[11] (式 (1) 中 $t_1 = t_2$ 是该模型的特殊形式). 令 $t_1 = t'_m, 1 - t_2 = C$ (C 为常数, 通常取 t'_m 的均值).

经过一系列变换后, 式 (12) 变为:

$$J_{m2}(x, y) = \frac{Org(x, y) - C \cdot A}{\max(t'_m(x, y), \varepsilon)} \quad (16)$$

因上式中的常数 C 并不是场景中物体表面的实际散射值, 不具有实际的物理意义, 我们将 $J_{m2}(x, y)$ 称为伪去雾图。

图 4(c) 为利用式 (16) 得到的伪去雾图。对比图 4(c) 和图 4(b) 可以看出, 图 4(c) 比较明亮, 保存的细节比图 4(b) 多, 但图 4(c) 的色彩除了几个颜色比较明显的区域外, 基本偏向于灰度图, 因此还需要利用图像融合的技术, 将图 4(b) 与图 4(c) 按照一定比例进行融合, 调节去雾强度, 对原图进行色度校正。

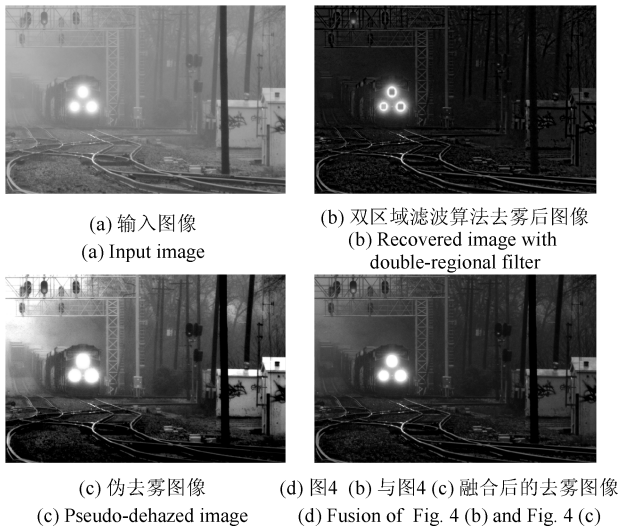


图 4 对大雾图像去雾

Fig. 4 Dahazed on heavy-fog image

图像融合分为数据级融合、特征级融合和决策级融合。数据级融合也称为像素级融合, 是指直接对传感器采集的数据进行处理而获得融合图像的过程。为减小算法复杂度和降低运行时间, 本文采用像素级融合中的加权平均算法进行柔性去雾, 公式如下:

$$J_m(x, y) = w_1 J_{m1}(x, y) + w_2 J_{m2}(x, y) \quad (17)$$

式中, J_m 为融合后的图像, J_{m1} 为基于双区域滤波后的去雾图, J_{m2} 为本节定义的伪去雾图, w_1 和 w_2 为加权系数, 满足 $w_1 + w_2 = 1$ 约束条件。为提升计算效率, 将式 (12) 和式 (15) 代入上式, 整理后得到本文提出的结合双区域滤波和图像融合的单幅图像去雾公式如下:

$$J_m(x, y) = \frac{Org(x, y)}{\max(t'_m(x, y), \varepsilon)} - \frac{(w_1 \cdot (1 - t'_m(x, y)) + w_2 \cdot C) \cdot A}{\max(t'_m(x, y), \varepsilon)} \quad (18)$$

上式中权值 w_1 和 w_2 的选取是加权平均算法中的关键, Burt 等^[17] 提出了平均和选择相结合的方法, 即用一个匹配矩阵来表示两幅图像的相似度。当两幅图像很相似时, 合成图像采用两幅图像的平均值, 也就是权值分别为 0.5 和 0.5; 当两幅图像差异很大时, 选择最显著的那一幅图像, 此时的权值为 0 和 1。本文因需要融合的图像大小一致, 但色彩差异较大, 且考虑融合后图像的视觉感受, 经过反复实验, 采用的权值分别为 $w_1 = 0.85$ 和 $w_2 = 0.15$ 。按本节方法融合去雾后的图像如图 4(d) 所示, 与双区域滤波去雾图 (图 4(b)) 相比, 图像色彩变得柔和明亮。

3 实验结果对比及质量评估

利用中值滤波^[14]、双边滤波^[13]、引导滤波^[18]和本文算法对多幅图像进行去雾的结果如图 5 所示。从图 5 可以看出, 双边滤波在某些对比度很低的图像中, 易出现过去雾现象 (如图 5(3))。而中值滤波^[14] 去雾后图像色彩整体比较暗沉, 图像质量相对较差。本文算法去雾后图像在视觉上较好地恢复了场景色度, 在有效去除雾霾的同时保持图像色彩明亮。为了更好地评判去雾后图像的质量, 本文采用对比度和色调还原程度^[19] 作为评价指标, 对 4 种方法进行定量评价, 各评价指标的计算结果如下:

1) 对比度。对比度作为视觉效果评论的一个重要指标, 它的高低直接关系到图像的清晰度、细节表现及灰度层次的表现。对比度值越大, 说明图像越清晰。

2) 用直方图相似度来度量去雾图像的色调还原程度^[19]。直方图相似度可以用两幅图像相关系数来测量, 公式如下:

$$d_{sim}(I, I') = \frac{\sum_k (I_k - \bar{I}) \sum_k (I'_k - \bar{I}')}{\sqrt{\sum_k (I_k - \bar{I})^2 \sum_k (I'_k - \bar{I}')^2}} \quad (19)$$

其中, k 为直方图的灰度级, \bar{I} 、 \bar{I}' 分别为 I 、 I' 的均值。 d_{sim} 越大, 说明相似度越高, 色调还原程度越好。

图 5 中 4 种去雾算法的评价指标值如表 1 所示。 T_{con} 代表去雾后图像的对比度, d_{sim} 代表不同算法去雾后与原图的直方图相似度。从表 1 可以看出, 本文算法基本优于其他 3 种方法, 表明本文方法去雾后的图像具有较高清晰度和较好色彩还原程度。

4 结论

本文提出了一种结合双区域滤波和图像融合的单幅图像去雾算法。首先, 定义了一类暗区域对图像边缘的低强度像素点进行描述, 在选取暗原色中值



图 5 去雾效果对比

Fig. 5 More comparisons with others' work

表 1 图 5 中 4 种去雾算法的评价指标对比

Table 1 The evaluation index comparison for different algorithms in Fig. 5

	图 5 (1)		图 5 (2)		图 5 (3)		图 5 (4)	
	T_{con}	d_{sim}	T_{con}	d_{sim}	T_{con}	d_{sim}	T_{con}	d_{sim}
中值滤波 ^[14]	36.5	0.41	27.8	0.39	24.5	0.32	35.3	0.34
双边滤波 ^[13]	37.9	0.45	20.5	0.45	7.50	0.39	37.2	0.46
引导滤波 ^[18]	35.7	0.62	23.5	0.58	58.9	0.43	38.1	0.60
本文算法	40.0	0.68	35.6	0.60	77.3	0.49	43.0	0.64

前先判断景物是否处于暗区域,再根据不同区域采取不同的滤波方法,实现双区域滤波,从而提升了透射率的估算精度,有效避免了由暗通道最小值滤波而产生的 Halo 效应和由暗通道中值滤波产生的黑斑效应;然后,定义一种伪去雾图,将其与双区域滤波去雾图进行像素级融合,实现色度校正,解决了去雾后图像暗沉的问题.本文不需要抠图和双边滤波等方法对透射率进行细化,算法的时间复杂度低.实验结果表明,本文算法即使在大雾和图像色彩失真严重的情况下,仍然具有良好的去雾效果.如何使该算法适用于有大片天空和白色物体的图像去雾中,

是我们下一步工作的重点.

References

- 1 Shwartz S, Namer E, Schechner Y Y. Blind haze separation. In: Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Washington D. C., USA: IEEE, 2006. 1984–1991
- 2 Namer E, Schechner Y Y. Advanced visibility improvement based on polarization filtered images. In: Proceedings of IEEE Conference on Polarization Science and Remote Sensing. Washington D. C., USA: IEEE, 2005. 36–45
- 3 Schechner Y Y, Narasimhan S G, Nayar S K. Instant dehazing of images using polarization. In: Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Washington D. C., USA: IEEE, 2001. 325–332

- 4 Schechner Y Y, Narasimhan S G, Nayar S K. Polarization-based vision through haze. *Applied Optics*, 2003, **42**(3): 511–525
- 5 Oakley J P, Satherley B L. Improving image quality in poor visibility conditions using a physical model for contrast degradation. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1998, **7**(2): 167–179
- 6 Narasimhan S G, Nayar S K. Vision and the atmosphere. *International Journal of Computer Vision*, 2002, **48**(3): 233–254
- 7 Narasimhan S G, Nayar S K. Chromatic framework for vision in bad weather. In: *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. New York, USA: IEEE, 2000. 598–605
- 8 Tan R T. Visibility in bad weather from a single image. In: *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Anchorage, USA: IEEE, 2008. 23–28
- 9 Fattal R. Single image dehazing. *ACM Transactions on Graphics*, 2008, **27**(3): 1–9
- 10 He Kai-Ming, Sun Jian, Tang Xiao-Ou. Single image haze removal using dark channel prior. In: *Proceeding of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Washington D. C., USA: IEEE, 2009. 1956–1963
- 11 He Kai-Ming, Sun Jian, Tang Xiao-Ou. Single image haze removal using dark channel prior. *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2011, **33**(12): 2341–2353
- 12 Xu H R, Guo J M, Liu Q, Ye L L. Fast image dehazing using improved dark channel prior. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Information Science and Technology*. Hubei, China: IEEE, 2012. 663–667
- 13 Yu Jing, Li Da-Peng, Liao Qing-Min. Physics-based fast single image fog removal. *Acta Automatica Sinica*, 2011, **37**(2): 143–149
(禹晶, 李大鹏, 廖庆敏. 基于物理模型的快速单幅图像去雾方法. *自动化学报*, 2011, **37**(2): 143–149)
- 14 Gibson K B, Vo D T, Nguyen T Q. An investigation of dehazing effects on image and video coding. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2012, **21**(2): 662–673
- 15 Narasimhan S G, Nayar S K. Removing weather effects from monochrome images. In: *Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Washington D. C., USA: IEEE, 2001. 186–193
- 16 Narasimhan S G, Nayar S K. Contrast restoration of weather degraded images. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2003, **25**(6): 713–724
- 17 Burt P J, Kolczynski R J. Enhanced image capture through fusion. In: *Proceedings of the IEEE Computer on Computer Vision*, Berlin, Germany: IEEE, 1993. 173–182
- 18 He Kai-Ming, Sun Jian, Tang Xiao-Ou. Guided image filtering. *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2013, **35**(6): 1397–1409
- 19 Li Da-Peng, Yu Jing, Xiao Chuang-Bai. No-reference quality assessment method for defogged images. *Journal of Image and Graphics*, 2011, **16**(9): 1753–1757
(李大鹏, 禹晶, 肖创柏. 图像去雾的无参考客观质量评测方法. *中国图象图形学报*, 2011, **16**(9): 1753–1757)



张小刚 湖南大学电气与信息工程学院教授. 主要研究方向为工业窑炉过程控制与模式识别.

E-mail: zhangxiaogang@126.com

(ZHANG Xiao-Gang Professor at the College of Electrical and Information Engineering, Hunan University.

His research interest covers process control and pattern recognition for industrial kiln.)



唐美玲 湖南大学硕士研究生. 主要研究方向为图像处理与模式识别.

E-mail: tangmeiling@hnu.edu.cn

(TANG Mei-Ling Master student at the College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Her research interest covers image processing and pattern recognition.)



陈华 湖南大学信息科学与工程学院讲师. 主要研究方向为图像处理与模式识别. 本文通信作者.

E-mail: anneychen@126.com

(CHEN Hua Lecturer at the School of Information Science and Engineering, Hunan University. Her research interest covers image processing and pattern recognition. Corresponding author of this paper.)



汤红忠 湘潭大学信息工程学院副教授. 主要研究方向为压缩感知, 稀疏表示及其在图像处理与模式识别中的应用.

E-mail: diandiant@126.com

(TANG Hong-Zhong Associate professor at the College of Information Engineering, Xiangtan University. Her research interest covers compressed sensing, sparse representation and the application into image processing and pattern recognition.)