

单幅图像快速去雾算法

张 弟, 吴 萍

ZHANG Di, WU Ping

华东师范大学 计算机科学与软件工程学院, 上海 200062

School of Computer Science and Software Engineering, East China Normal University, Shanghai 200062, China

ZHANG Di, WU Ping. Fast single image defogging. Computer Engineering and Applications

Abstract: At present, the defogging algorithm is mainly thought the dark channel prior and the image color channel processing methods, but these methods to the defogging efficiency is not high, resulting in poor practicability, in view of this drawback, a fast defogging algorithm based on single image is proposed. Atmospheric light estimation using the improved dark-channel approach, at first make color channel minimum filtering, and then take the maximum minimum filtering as atmospheric light estimates; transmittance estimation using physical model mean filter, first converted according to the mathematical model and a mean filter, then use the offset to correct the estimated value with transmittance. The algorithm is simple, quick and effective, and has practicality. Qualitative and quantitative analysis of the experimental results show that compared with other algorithms, it has better defogging effect and faster processing speed.

Key words: defogging; mean filter; quick

摘 要: 目前去雾算法主要有通过暗原色和对图像颜色通道处理等方法, 但是这些方法去雾效率不高, 从而导致实用性不强, 针对此弊端提出了一种基于单幅图像的快速去雾算法。大气光估计运用改进的暗通道方法, 先对颜色通道进行最小滤波, 然后取最小滤波的最大值作为大气光的估计值; 透射率估计运用物理模型均值滤波, 先根据数学模型转换, 然后进行一次均值滤波, 再用偏移值来修正的带透射率的估计值。算法简单快速有效, 具有实用性。对实验结果进行定性定量分析, 证明与其他算法相比, 具有更好的去雾效果和更快的处理速度。

关键词: 去雾; 均值滤波; 快速

文献标识码: A 中图分类号: TP91.41 doi: 10.3778/j.issn.1002-8331.1802-0133

1 引言

在视频监控, 遥感, 目标跟踪和自动驾驶等领域, 都涉及到图像处理步骤。这些户外图像处理系统的性能在极端天气下会有很大的影响。在雾、霾天气下, 物体表面的反射光会受到大气中微小粒子的吸收和散射, 从而导致获得的图像细节模糊、色

彩偏移、可视性弱, 对后续的图像处理结果会有很大的影响。因此, 对图像去雾算法的研究就变得尤为重要了。而很多实际应用系统对实时性要求很高, 所以快速去雾算法的研究极其重要。

目前图像去雾的研究算法有很多, 但是主要分为两类: 一类是基于图像增强的方法, 此方法主要

作者简介: 张弟(1993 -), 男, 硕士研究生, 研究领域为现代软件技术, E-mail: 51164500173@stu.ecnu.edu.cn; 吴萍, 通讯作者, 女, 副教授, 研究领域为现代软件技术、智能优化算法, E-mail: pwu@cc.ecnu.edu.cn。

是去除图像的噪声，提高图像的对比度，从而恢复出清晰无雾的图像，但是此类方法没有考虑到形成有雾图像的过程，从而使得图像的细节部分会有所丢失。基于图像增强的方法具有代表性的有直方图均衡化^[1-2]、Retinex 算法^[3-4]和同态滤波^[5-6]。另一类是基于图像复原的算法，该方法基于雾天成像模型和假设条件，根据模型推导出模型中所需的未知数，最后根据成像模型的逆过程得到去雾图像。基于图像复原具有代表性的去雾算法有 He^[7]利用暗原色先验来求得透射率，然后利用软抠图技术进行修正，最终恢复出无雾图像；Fattal^[8]基于大气散射模型，假设景物表面阴影与介质透射率具有局部统计不相关性，再根据马尔科夫随机场来推论原图像颜色；Tan^[9]假设局部区域的环境光为常数，增强图像的对比度，用图分割理论估计最优光照；Tarel^[10]假设大气耗散函数在函数的可行域中逼近最大值处局部区域的变化不是很明显，再利用中值滤波的变形形式估计大气耗散函数，最后得到去雾图像；Wang^[11]利用贝叶斯先验和马尔科夫得到去雾图像；Han^[12]基于彩色图像流型理论用拉普拉斯-贝尔特拉米算子得到去雾图像；Tarel^[13]对图像中颜色点聚类并提出 haze-line 的概念，Berman^[14]在此基础上提出一幅彩色图像可以用几百个 RGB 值代替从而得到去雾图像；刘万军^[15]运用四叉树估计大气光、采用饱和度运算估计透射率来得到去雾图像。

目前比较多的快速去雾算法都是根据 He 和 Tarel 算法的改进或者根据特定应用场景的调整。刘建磊^[16]基于暗原色先验理论，根据复原图像的边缘特征利用分步梯度下降法去雾。Meng^[17]在 He 根据暗原色估计大气光的基础上进行修正，并且提出了内在边界约束和正则化来估计透射率。Guo^[18]利用遗传算法对 He 和 Tarel 算法的参数进行动态筛选增强其算法的健壮性。

基于图像增强这类方法而言，由于图像细节部分会有所丢失，因此去雾算法都尽量避免这种方法。

基于图像复原的算法，He^[7]和 Fattal^[8]提出的方法具有开创性意义，但暗通道和马尔科夫随机场的运算复杂度过高，导致去雾效率降低；Tarel^[13]提出的 haze-line 概念又给去雾提供了一种新思路，但同样的在寻找 haze-line 和用几百种颜色代替的过程中需要大量的时间使算法效率降低；其他根据这些经典方法改进的方法中也或多或少存在同样的问题。因此本文在 Meng 对 He 大气光修正的启发下提出一种基于均值滤波的改进算法——利用一次均值滤波来求透射率。该算法相对于 Meng 算法在速度上有明显提高，同时，在去雾效果上也与 Meng 的效果相当，甚至在有些情况下优于 Meng 的去雾效果。

2 基于均值滤波的改进算法

2.1 雾天图像退化模型

在计算机视觉和计算机图形学领域中，描述雾霾等天气对图像造成的影响一般用下述物理模型描述，该模型由大气衰减模型和环境光模型两部分组成，模型的表达式为：

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

其中， x 为图像像素的空间坐标， I 为观察到的有雾图像， J 是像素点 x 在无雾的自然光下的清晰图像，空气光 A 表示图像区域中当 $t = 0$ 时的全局大气光。

式(1)中 $t(x)$ 为像素点 x 处的透射率，它导致图像色彩和亮度的偏移，它是由距离决定的：

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

其中， β 为大气衰减系数， $d(x)$ 为像素点 x 到镜头的距离。

对于式(1)而言，已知的只有有雾图像 $I(x)$ ，而需要求得 $J(x)$ 、 $t(x)$ 和 A 三个未知数，因此这是一个欠定问题。所以必须根据有雾图像 $I(x)$ 中估计出大气光 A 和透射率 $t(x)$ ，从而恢复出清晰的无雾图像。

2.2 估计全局大气光

估计全局大气光，He^[7]提出一种基于图像暗通道的方法。该方法选择有雾图像暗通道图中最明亮的 0.1% 的像素点，再将这些点对应到原图像像素点

位置，选择最亮的一个像素点作为全局大气光 A 的估计值。本文对此估计大气光的方法稍加调整使其效果与之相当但效率更高。首先，对于输入图像 $I(x)$ 每个颜色通道进行最小值滤波，并记：

$$M(x) = \min_{c=\{r,g,b\}} (I^c(x))_{s_a} \quad (3)$$

其中， s_a 表示最小值滤波的窗口大小。

然后取最小值滤波得到的结果中每个颜色通道的最大值作为全局大气光的估计值：

$$A = \max_{c=\{r,g,b\}} (M(x)) \quad (4)$$

这种估计全局大气光的方法效率明显高于 He 的方法，并且实验表明其效果也与之相当。

2.3 估计透射率

由公式(1)可以得出：

$$A(1 - t(x)) \leq I(x) \quad (5)$$

对式(5)两边求每个颜色通道的最小值，则不等式右边得到的即是式(3)的 $M(x)$ ，并记：

$$A = [A_m, A_m, A_m]^T \quad (6)$$

则式(5)可以改写为：

$$A_m(1 - t(x)) \leq M(x) \quad (7)$$

即：

$$t(x) \geq 1 - \frac{M(x)}{A_m} \quad (8)$$

由式(2)可知，随着像素点 x 距离镜头的距离的增加 $t(x)$ 会逐渐减小，像素点 x 处反射光的衰减程度也会随之增大。当 $t(x)$ 为 0 时，表示景物的反射光衰减为 0，此时 $I(x) = A$ ，当 $t(x) = 1$ 时，表示景物反射光完全没有衰减，此时 $I(x) = J(x)$ 。由此可知，透射率 $t(x)$ 与景深距离具有相似的趋势，透射率在景深缓变时平滑，在景深不连续时跳跃。

由此基础来估计透射率，首先对式(8)右侧进行均值滤波：

$$\text{average}_{s_a} \left(1 - \frac{M(x)}{A_m} \right) = 1 - \frac{\text{average}_{s_a}(M(x))}{A_m} \quad (9)$$

其中， s_a 为均值滤波的窗口大小。均值滤波结果可以反映透射率 $t(x)$ 的大致趋势，不过与实际的透射率相差一定的绝对值，所以对该结果弥补一个偏移值，并记：

$$M_{ave}(x) = \text{average}_{s_a}(M(x)) \quad (10)$$

于是得到透射率的粗略估计值：

$$\tilde{t}(x) = 1 - \frac{M_{ave}(x)}{A_m} + \varphi \frac{M_{ave}(x)}{A_m} \quad (11)$$

上式中等于右边部分最后一项为弥补的偏移值，且 $0 \leq \varphi \leq 1$ 。

记 $\delta = 1 - \varphi$ ，则

$$\tilde{t}(x) = 1 - \delta \frac{M_{ave}(x)}{A_m} \quad (12)$$

对于上式中 δ ，当 δ 的取值较小时，透射率 $t(x)$ 取值较大，最终得到去雾图像中残留的雾会较多，图象整体较亮；当 δ 的取值较大时，透射率 $t(x)$ 取值较小，最后得到的去雾图像整体较暗。为了防止最后的去雾图像过亮或过暗，设置一个参数：

$$\tilde{\delta} = \rho m_{av} \quad (13)$$

其中， ρ 为可以调节的参数，且 $0 \leq \rho \leq 1/m_{av}$ ， m_{av} 为 $M(x)$ 中所有元素的均值。（注意： m_{av} 的值需要约束在 $[0,1]$ 之间，若输入图像范围在 $[0,1]$ 之间，则直接取 $M(x)$ 所有元素的均值；若输入图像范围在 $[0,255]$ 之间，则在取 $M(x)$ 所有元素的均值后再相应的缩小 255 倍。）因为 m_{av} 是一个和原图像整体灰度分布有关的值，所以 $\tilde{\delta}$ 有自动调节去雾图像整体亮度的作用。原图像越亮， m_{av} 值越高，透射率会相应减小，从而使得去雾图像不会过于明亮，反之亦然。

为了保证 φ 为正值并且不会过小，需要对 δ 设置一个上限，本文设定上限为 0.9，那么：

$$\delta = \min(\rho m_{av}, 0.9) \quad (14)$$

再联合式(8)、式(12)和式(14)，可以得出最终的透射率估计值：

$$t(x) = \max \left(1 - \min(\rho m_{av}, 0.9) \frac{M_{ave}(x)}{A_m}, 1 - \frac{M(x)}{A_m} \right) \quad (15)$$

这种方法估计透射率，仅用了一次均值滤波器，在滤波前根据数学公式转换，滤波后利用数学方法对透射率增加偏移量来调整透射率的估计值。根据大气耗散函数进行数学分析可保证透射率估计值的合理性，而且计算机对这些数学变换处理非常快，从而使算法效率显著提高，并且从结果来看也兼顾了去雾图像的效果。

2.4 算法流程

估计出全局大气光 A 和透射率 $t(x)$ ，根据式(1)

求得去雾图像：

$$J(x) = \frac{I(x)}{t(x)} + A \left(1 - \frac{1}{t(x)}\right) \quad (16)$$

本文的算法步骤：

step1.输入有雾图像 $J(x)$

step2.最小滤波求得 $M(x)$

$$M(x) = \min_{c=\{r,g,b\}} (I^c(x))_{s_a}$$

step3.根据 $M(x)$ 求得全局大气光的估计值

$$A = \min_{c=\{r,g,b\}} (M(x))$$

step4.对 $M(x)$ 进行均值滤波，得到 $M_{ave}(x)$

$$M_{ave}(x) = average_{s_a}(M(x))$$

step5.求得 $M(x)$ 所有元素的均值 m_{av}

step6.利用所求的 $M(x)$ 、 $M_{ave}(x)$ 和 m_{av} 得出透射率的估计值

$$t(x) = \max \left(1 - \min(\rho m_{av}, 0.9) \frac{M_{ave}(x)}{A_m}, 1 - \frac{M(x)}{A_m} \right)$$

step7.输出去雾图像 $J(x)$

$$J(x) = \frac{I(x)}{t(x)} + A \left(1 - \frac{1}{t(x)}\right)$$

3 实验比较与分析

本文的实验结果主要分为复杂度比较、定性比较和定量比较三个方面。复杂度比较主要比较三种算法的大气光估计值以及透射率估计值的时间复杂度；定性比较主要用实际有雾的实景图与 He^[7]和 Meng^[17]的方法比较；定量比较主要用公共数据库 frida2 图像去雾数据集中的图像，将三种方法就峰值信噪比和算法的运行时间两个指标进行对比统计。本文算法以及与其他对比算法的实验均是用 MATLABR2016a 得到，运行环境为：2.70GHz 的 Intel(R)Core(TM)i7-7500U CPU，16G 运行内存，64 位 win10 系统。

3.1 复杂度比较

本文去雾算法主要是估计大气光和估计透射

率两个参数，从而得到去雾图像，因此分析复杂度也从这两个方面分析。

对于大气光的估计 He 的方法是先用最值滤波得到暗通道图，再在暗通道图中按照亮度的大小取前 0.1% 的像素，然后在原始有无图像中寻找对应的具有最高亮度点的值作为大气光估计值。由此可知 He 的方法估计大气光的时间复杂度为 $O(rnm)$ ，其中， r 表示最小滤波半径， n 表示图像像素点数， m 表示前 0.1% 像素点数（下同）。而本文由 Meng 方法的启发，对输入的有雾图像的每个颜色通道进行最小滤波，然后取最小值滤波得到的结果中每个颜色通道的最大值作为全局大气光的估计值。故时间复杂度为 $O(rn)$ 。

对于透射率，He 根据暗通道的先验理论和之前大气光得到估计值，取 1 减去最小滤波每个颜色通道有雾图像与大气光之比的最小值作为透射率的估计值，结合 He 的文章可得其估计透射率的时间复杂度为 $O(r^2n^2)$ 。Meng 在 He 的暗通道的基础上增加了边界约束条件，但整体计算的数量级并没有改变，其时间复杂度仍是 $O(r^2n^2)$ 。而本文方法仅运用了一次均值滤波器，再加上一个调节去雾图像亮度的参数 δ ，其时间复杂度为 $O(n^2)$ 。

表 1 三种方法时间复杂度比较

	He 方法	Meng 方法	本文方法
大气光估计	$O(rnm)$	$O(rm)$	$O(rn)$
透射率估计	$O(r^2n^2)$	$O(r^2n^2)$	$O(n^2)$

由表 1 可以看出，相对于 He 和 Meng 的方法，本文提出的方法在时间复杂度上由于前两种方法，佐证了本文方法的高效性。

3.2 定性比较

本文中所用的实景图均是来自 Meng^[17]实验主页，图 1 为实景图有雾图像以及各方法去雾后的效果图比较。

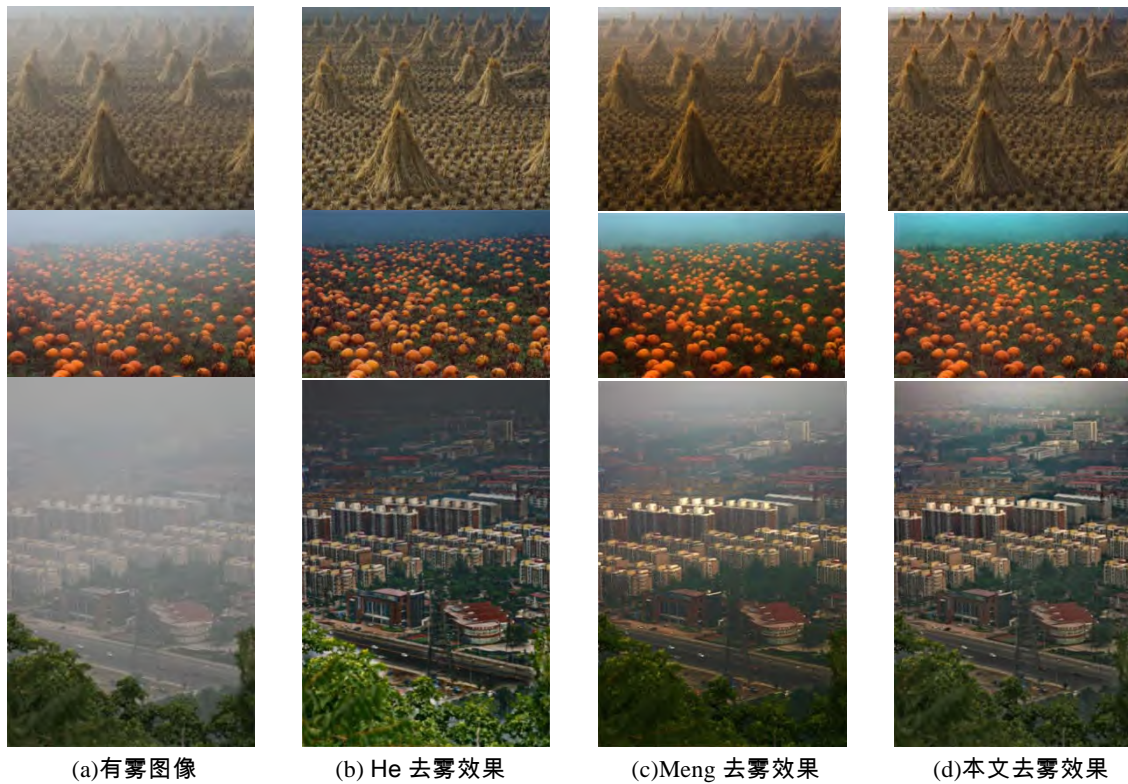


图 1 实景图去雾效果比较

图 1 中从左至右依次是有雾图像,He 方法去雾效果图、Meng 方法去雾效果图以及本文方法的去雾效果图。从细节上看,He 的方法景物边缘效果有些失真,第三幅图像此弊端显现得尤为明显,并且去雾后图像的色彩饱和度不如后两种方法的高。Meng 的边界约束方法对上述弊端有很好的处理,

但是景深处的去雾效果欠佳。本文方法的去雾效果虽没有完全消除前两种方法的不足之处,从图像中可以看出还是有明显改善的。

本文所用的 frida2 为公开的人工合成雾的公共数据库中的数据,图 2 为数据库中其中三张图像的去雾效果图。

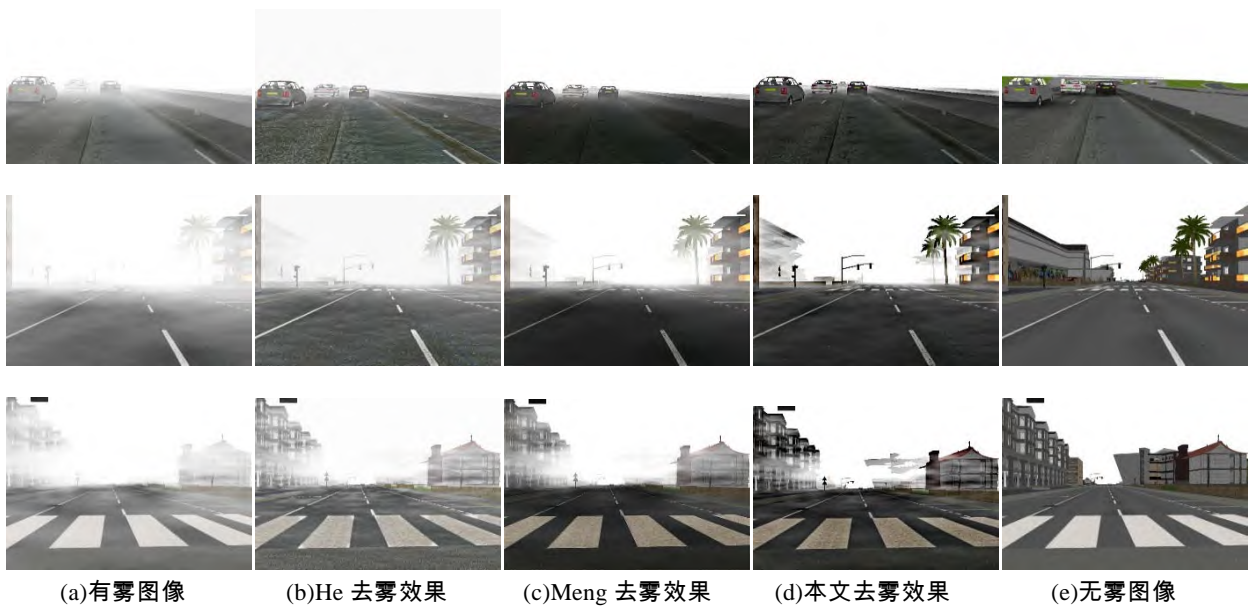


图 2 frida2 数据库中图像去雾效果图

图 2 中从左至右依次是有雾图像、He 方法去雾效果图、Meng 方法去雾效果图、本文方法去雾效果图和原无雾图像。从图 2 中可以看出，在细节方面，数据库中图像与实景图的效果大致相同。

从整体上看，无论是实景图还是公共数据集中的图像，本文方法的去雾效果与其他两种算法去雾效果相当，甚至更优。以下从定量分析方面进一步比较各个方法的去雾效果。

3.3 定量比较

本文的定量实验分析主要从峰值信噪比和算法运行所需时间两个标准比较，数据来自公共数据库 frida2 数据集中 66 张图像。由于 He 方法对输入图像的 RGB 值进行标准化至 $[0,1]$ 之间，与其他两种方法比较无法控制变量，故本文对峰值信噪比标准只与 Meng 的方法进行定量比较。

表 2 图 2 中图像两种方法峰值信噪比比较(单位/dB)

图像	Meng 方法	本文方法
图 2 第一行	13.17	13.54
图 2 第二行	9.84	11.59
图 2 第三行	9.65	11.67

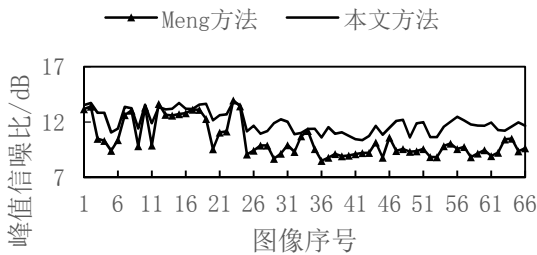


图 3 峰值信噪比对比图

表 2 为图 2 中图像(frida2 数据集中三张实例图像)Meng 方法与本文方法的峰值信噪比数据比较。图 3 为对 frida2 数据集中所有图像用 Meng 的方法和本文方法去雾图像与原有雾图像的峰值信噪比统计对比图，可以清楚的看出，几乎对于所有的图像，均是本文方法去雾后峰值信噪比相对较大，说明用本文方法去雾后的图像相对失真更少。

表 3 图 2 中图像三种方法运行时间比较(单位/s)

图像	He 方法	Meng 方法	本文方法
图 2 第一行	4.96	3.64	1.17
图 2 第二行	5.93	3.29	1.20
图 2 第三行	5.95	3.74	1.21

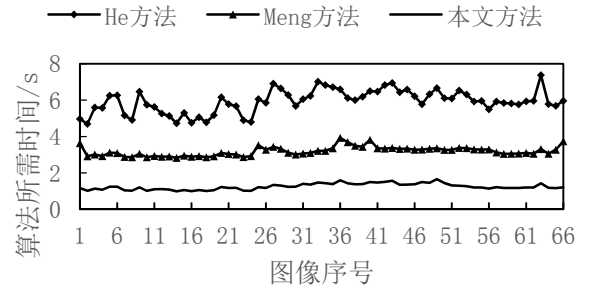


图 4 运行时间对比图

表 3 为图 2 中图像(frida2 数据集中三张实例图像)Meng 方法与本文方法的算法运行时间数据比较。图 4 为对 frida2 数据集中所有图像用三种方法运行所需时间的统计对比图。从图中可以看出，本文算法速度相较于其他两种方法有显著提高。

从上文的定性定量分析可知，本文提出的方法具有一定的可取之处。不过，大量的实际景物图的实验表明，本文方法在一般的有雾图像的去雾效果和去雾效率上都有比较好的结果，但是由于运用的是均值滤波估计透射率去雾，因此对于边缘强度过大的有雾图像，其去雾效果一般，甚至在有些场景下不如 He 等一些经典去雾算法的效果。这也是下一步需要解决的工作。

4 结束语

本文受 Meng 对 He 大气光修正去雾算法的启发，提出一种单幅图像快速去雾算法。该算法对大气光的估计是在暗通道方法上的简化和改进，透射率的估计是根据物理模型均值滤波，步骤简单，运行速度快。进行定性定量实验比较，结果表明本文算法在去雾效果上与 Meng 的效果相当，甚至在有些情况下优于 Meng 的去雾效果；在去雾效率上相

对于 Meng 的效率有明显的提高。

参考文献:

- [1] Gonzalez R C.数字图像处理[M].阮秋琦,阮宇智,译.2版.北京:电子工业出版社,2007:72-75.
- [2] Xu Zhiyuan,LiuXiaoming,ChenXiaonan.Fog removal from video sequences using contrast limited adaptive histogram equalization[C]//International Conference on Computational Intelligence and Software Engineering. IEEE,2009:1-4.
- [3] ChoiD H,I H Jang.Color image enhancement using single-scale retinex based on an improved image formation model[C]//16th European Signal Processing Conference, 2008:1-5.
- [4] 肖燕峰. 基于 Retinex 理论的图像增强恢复算法研究[D]. 上海:上海交通大学,2007.
- [5] 林英. 基于小波变换的同态滤波法去雾图像处理[J]. 龙岩学院学报,2008,26(6):32-36.
- [6] 肖俊, 宋寿鹏. 空域同态滤波算法研究[J]. 中国图象图形学报,2008,13(12):2302-2306.
- [7] He Kaiming,SunJian,TangXiaoou.Single image haze removal using dark channel prior[C]//IEEE Conf on Computer Vision and Pattern Recognition,2009:1956-1963.
- [8] FattalR.Single image dehazing[J].Special Interest Group forComputer Graphics,2008,27(3):1-9.
- [9] TanR T.Visibility in bad weather from a single image[C]//IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition,2008:1-8.
- [10] TarelJ P, HautiereN. Fast visibility restoration from a single color or gray level image[C]//IEEE Conf. Computer Vision,2009:2201-2208.
- [11] WangYuankai,FanChingtang.Single image defogging by multiscale depth fusion[J].IEEE transactions on image processing,2014,23(11):4826-4837.
- [12] Han Yubing. Image dehaze using alternating Laplacian and Beltrami regularizations[J]. Journal of Electronic Imaging, 2015, 24(2):023004.
- [13] FattalR.Dehazing using color-lines[J]. ACMTransactions on Graphics,2014,34(1):1-14.
- [14] Berman D, Treibitz T, Avidan S. Non-local image dehazing[C]//Computer Vision and Pattern Recognition. IEEE, 2016:1674-1682.
- [15] 刘万军, 赵庆国. 基于颜色饱和度的快速图像去雾研究[J]. 计算机工程与应用, 2017, 53(8):209-215.
- [16] 刘建磊. 全局平滑和边缘保持的单幅图像去雾[J]. 计算机工程与应用, 2017, 53(23):165-170.
- [17] MengGaofeng,WangYing,DuanJiangyong,etal.Efficient image dehazing with boundary constraint and contextual regularization[C]//IEEE International Conference on Computer Vision.IEEE,2014:617-624.
- [18] Guo Fan, Peng Hui, Tang Jin. Genetic algorithm-based parameter selection approach to single image defogging[J]. Information Processing Letters, 2016, 116(10): 595-60.