

基于判别式滤波和双边滤波的快速图像去雾研究

刘万军, 赵庆国

(辽宁工程技术大学 软件学院, 辽宁 葫芦岛 125105)

摘要: 为了提高图像去雾算法的运行效率,并解决明亮区域去雾后颜色失真的问题,提出一种基于两次滤波的快速图像去雾算法(TBFIDA)。利用改进的四叉树方法得到鲁棒性强、稳定性好的环境光亮度,在最小通道图中,采用判别式滤波获取粗略的大气散射图,消除光晕现象,使用双边滤波器对粗略的大气散射图作进一步保边平滑优化操作,得到更加精确的大气散射图,并通过容差机制进行透射率修正,解决天空明亮区域去雾后的颜色失真问题。应用大气散射模型形成无雾图像。实验结果表明,TBFIDA 能较好地恢复场景的颜色,对景深突变区域也能够保持边缘细节,获得较真实的清晰无雾图像,具有较高的准确性、鲁棒性和实时性。

关键词: 去雾;暗通道;四叉树判别式滤波;双边滤波器;容差机制

中文引用格式:刘万军,赵庆国.基于判别式滤波和双边滤波的快速图像去雾研究[J].计算机工程,2016,42(7):209-215.

英文引用格式:Liu Wanjun,Zhao Qingguo.Study on Fast Image Dehazing Based on Discriminant Filtering and Bilateral Filtering[J].Computer Engineering,2016,42(7):209-215.

Study on Fast Image Dehazing Based on Discriminant Filtering and Bilateral Filtering

LIU Wanjun,ZHAO Qingguo

(School of Software,Liaoning Technical University,Huludao,Liaoning 125105,China)

[Abstract] In order to improve the running efficiency of image dehazing algorithm and solve the color distortion problem in the bright area after dehazing, this paper puts forward a Fast Image Dehazing Algorithm based on Twice Filtering (TBFIDA). It gets the ambient light brightness with strong robustness and high stability by the improved quadtree method, and obtains a coarse scattering map using the discriminant filtering in minimum channel, eliminating the phenomenon of halo. And it makes full use of bilateral filter for further optimization on edge preserving to get more precise scattering map, followed by using the tolerance mechanism to correct the transmissivity and resolve color distortion in the bright area after dehazing. Finally it gains the fog-degraded image based on the atmospheric scattering model. Experimental results show that TBFIDA algorithm can well restore color, better preserve the edge details of the area with suddenly changed depth of field, and get a real clear no-fog image. It has higher accuracy, robustness, and real-time performance.

[Key words] dehazing; dark channel; quadtree discriminant filtering; bilateral filter; tolerance mechanism

DOI:10.3969/j.issn.1000-3428.2016.07.035

1 概述

由于环境的恶化,雾霾天气频繁出现,给室外的计算机视觉系统带来极大的挑战。雾霾图像的复原在视频监控、智能交通、地形测量、图像遥感等领域有着广泛的应用^[1]。

近年来,随着基于单幅图像去雾方法研究的不断深入,出现了基于图像增强^[2-5]和基于大气散射

物理模型^[6-9]的去雾方法。基于物理模型的方法根据假设的物理场景数据,从单幅图像估测场景深度及相关参数,进而得到去雾的效果。文献[10]通过大量测试发现,无雾图像的对比度比有雾图像的对比度要高,从而采用最大化复原图像的对比度来获取清晰的图像,但常常会使复原图像产生颜色过饱和而失真的现象。文献[11]利用目标物体表面阴影和大气透射率局部不相关的假设获取场景透射率,

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61172144);辽宁省科技攻关计划基金资助项目(2012216026)。

作者简介:刘万军(1959-),男,教授,博士生导师,CCF高级会员,主研方向为数字图像处理、运动目标检测与跟踪;赵庆国,硕士研究生。

收稿日期:2015-06-29 **修回日期:**2015-08-13 **E-mail:**719022416@qq.com

通过大气散射模型得到无雾图像。该方法在薄雾情况下能获得较好的去雾效果,但在浓雾下拍摄的图像假设条件不成立,得到的大气透射率是不准确的。文献[12]采用基于暗通道先验理论的去雾算法,大气透射率可以直接从单幅有雾图像估计获得,从而复原出无雾图像。该算法多适用于自然图像,可以获得较好的复原效果;但由于结合软抠图技术处理边缘细节,使得该方法运行效率极低,而且运行时占用很大的内存空间。为了追求较高的图像去雾效率,已提出很多去雾过程加速算法。文献[13]提出引导滤波器替换文献[12]中的软抠图优化部分,该算法尽管提高了运行效率,但复原图像中仍然存在一定程度的雾气,去雾效果较差。在文献[1]中,采用中值滤波器复原有雾图像,该方法虽然很大程度缩减了处理时间,但是由于中值滤波器缺少对边缘的处理,导致大气散射光不完全吻合场景的深度信息,在许多场景深度发生突变的细小边缘区域,该方法最终获取的图像去雾效果并不理想。

针对上述不足,本文提出一种基于两次滤波的快速图像去雾算法。该算法通过抑制光晕现象,提高图像透射率的估算精度,调整景深突变区域透射率的估算值,最终获得一幅视觉上较自然的清晰无雾图像。

2 大气散射模型

目前应用最为广泛的雾天降至图像的退化模型是由大气散射模型演变而来,可表示为:

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

其中, $I(x)$ 为成像系统捕捉到的图像; $J(x)$ 为场景辐射亮度,即复原图像; A 表示环境大气光; $t(x)$ 为介质传输率,也称透射率。当大气同质时,透射率 $t(x)$ 计算式为:

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

其中, β 是散射系数; $d(x)$ 是景深。去雾就是从捕获图像 $I(x)$ 中得到 $A, t(x)$,进而得到 $J(x)$ 。式(1)中 $J(x)t(x)$ 表示入射光衰减项,表明场景辐射亮度在不同雾霾介质情况下会发生不同程度的衰减,且伴随场景深度 d 发生指数性衰减。式(1)中 $A(1 - t(x))$ 是耗散函数,它降低了场景的可见度并造成场景颜色的偏移失真。文献[1]对大气散射光提出2个制约前提:(1)每个像素值不为负;(2)每个像素值要不大于雾霾图像各颜色成分中的最小值。由式(1)、式(2)观察得出大气耗散函数的计算公式:

$$V(x) = A(1 - e^{-\beta d(x)}) \quad (3)$$

从计算式可得出它的值取决于场景深度和大气自身的特性。文献[10]提出在空间上场景深度具有平滑性,在大多数区域都是光滑的,除了在某些边缘

区域会发生较大的跳跃。由此,推测大气散射光具有这种特性。通过大量实验,大气散射图在图像边缘会存在大的跳跃已得到了证实,这对于图像复原非常重要。若强行在全局空间上平滑细化大气散射图,复原图像会出现严重的光晕现象。综上所述,大气散射光具有如下特性:

- (1) 每个像素点值不为负,不大于雾天图像各颜色通道的最小值;
- (2) 每个像素点与图像本身的纹理信息无关,仅与场景深度信息及大气自身的特性有关;
- (3) 除了在某些景深突变的边缘区域会产生跳跃,在大多数区域都是光滑的。

3 算法设计与实现

3.1 算法步骤

算法步骤如下:

- (1) 利用二叉树方法求解输入图像的大气环境光值 A 。
- (2) 求解输入图像的最小通道图 W ,利用判别式滤波估计大气散射图,再通过双边滤波得到更精确的大气散射图 V 。
- (3) 计算大气透射率,修正后得到较准确的大气透射率 t 。
- (4) 根据式(1)得到去雾图像 J 。

本文算法流程如图1所示。

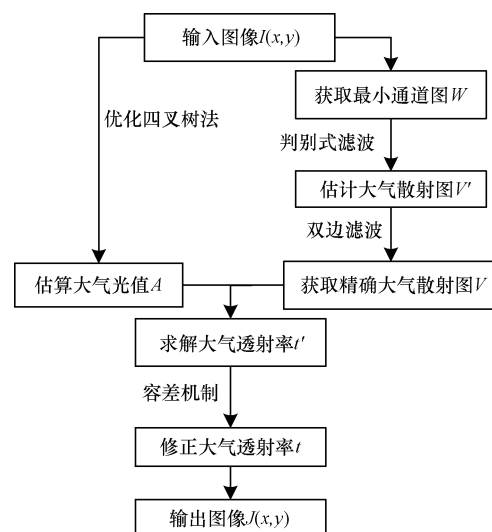


图1 去雾算法流程

3.2 环境光亮度的精确估计

环境光,通常被定义为无穷远处的大气光强度,独立于图像局部而存在的全局变量。大气环境光的数值易受到高亮噪声和白色物体的影响,若对原有雾图像直接选取亮度最大值作为环境光值是极不准确的,大气光的选择应该在天空区域或雾最浓的区

域,而不是亮度最大的区域。当近景出现明亮区域,且比天空亮度大时,把全局亮度最大值作为大气环境光值就会产生一定的误差。文献[12]的方法是先生成有雾图像的暗通道,选取暗通道中像素值排在前 0.1% 的点之后,再进一步选取对应雾图像中亮度值最大的点作为环境光的数值。若图像不存在白色物体或白色物体较小时,该方法可得到较准确的大气光值;若图像存在大块白色物体,其像素值比天空区域的像素值要大时,由于该方法无法排除比模板大的白色物体,这样就会造成一定的误差。为了得到更准确的环境光值,文献[14]利用四叉树的方法计算每一个局部区域的得分,同时对亮度和纹理信息进行选择。然后,通过确定与纯白色差值最小的亮度值作为环境光值。但该方法在某些情况会受到噪声的影响。通常情况,图像中的天空区域雾或最浓区域具有以下 3 个基本特性:(1)位置偏上;(2)亮度值较大;(3)相对平滑,细节较少。针对这 3 个基本特性,对四叉树方法进行改进,而不是直接用最亮的像素值。首先对雾天图像的每一个颜色通道按位置平均划分为 4 个部分,然后定义每部分的得分为区域像素的平均值减去标准差值,选取位置偏上且得分最高的区域作为要迭代处理的部分,继续划分为 4 个更小的块,再次计算得分,选取位置偏上且得分最高的区域作为迭代处理的部分,不断迭代直至标准偏差在允许的误差内,通常大气光值选择区域中最亮点对应的像素值。各算法得到环境光所在的区域如图 2 所示。图 2(a)是有雾图像,图 2(b)是文献[12]得到的环境光所在区域,图 2(c)是本文算法得到的环境光区域。文献[13]算法无法排除明亮非天空区域,进而获得的大气环境光值是错误的。而改进的四叉树方法在提高运行效率的同时,能较准确地获取大气环境光值,对噪声有很强的鲁棒性,很大程度上避免了将白色物体作为环境光,而且得到的环境光是稳定的。



图 2 各算法的环境光所在区域比较

3.3 两次滤波去雾算法

根据大气散射光的特性,获取输入图像的最小通道图:

$$W(x) = \min_{c \in \{r, g, b\}} (I^c(x)) \quad (4)$$

最小通道图包含了原有雾图像中较多的边缘信息以及纹理细节。除了在某些景深突变的边缘区域

会产生跳跃,雾霾图像的大气散射图在大多数区域都是光滑的,因此要得到较精确的大气散射图,关键是处理好原图像的边界信息。同时,图像的纹理信息对大气散射光没有影响,因此需要把图像相关的纹理细节滤除掉。文献[12]采用 15×15 大小的最小值滤波来获取大气散射图,并采用 soft matting 算法对透射率进行优化,因最小值滤波会导致景深突变区域的透射率估算值偏大,而且 soft matting 算法复杂度较大,运行效率低。文献[15]利用中值滤波获取大气散射图,消除光晕,再采用均值滤波提高计算精度。该算法虽一定程度上提高图像清晰度和运算效率,但是针对含有明亮区域的图像进行复原时,中值滤波会丢失大量的大气散射图景深突变边缘区域细节信息,而且均值滤波优化透射率时会带来较大的误差,降低计算精度。文献[16]通过中值滤波对暗通道图像进行修正,得到大气散射图,再采用高斯低通滤波器替代软抠图算法对透射率进行优化操作。该算法在一定程度上使得整体图像更加平滑,运行速度有所提高,但中值滤波会造成大气散射光的部分边缘区域与实际场景不吻合,且高斯低通滤波器对透射率进行优化操作时会使得图像的很多细节丢失。为了获取更精确的大气散射图估算值,本文采用判别式滤波获取大气散射图,然后利用双边滤波对其进行保边平滑优化操作,从而得到更精确的大气散射图,提高去雾过程的效率和图像清晰度。

判别式滤波是一种改进的均值滤波器。当该点灰度值与该点领域灰度均值的差值较小时,判别式滤波将该点像素值置为该点的灰度值;而当该点灰度值与该点领域灰度均值的差值较大时,判别式滤波将该点像素值置为该点领域的灰度值均值。因此,判别式滤波能很好地避免图像像素值过高或过低,且能够抑制噪声的影响。其数学表达式为:

$$g(x, y) = 1/m \sum I(x, y) \quad (5)$$

$$h(x, y) = \begin{cases} g(x, y) & |I(x, y) - g(x, y)| < T \\ I(x, y) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

在式(5)中, $g(x, y)$ 是均值滤波后的图像; $I(x, y)$ 是最小通道图, m 是以 (x, y) 为中心的模块尺寸。在式(6)中, $h(x, y)$ 是判别式滤波后的结果图像; T 是设置的阈值,用于避免某像素值发生过小或过大。判别式滤波能有效提升被低估的暗原色值,且能抑制噪声的影响,避免了光晕效应的发生。但判别式滤波对某些场景深度发生突变的边界信息处理效果不是很好,本文采用双边滤波对判别式滤波求解的暗原色值进行两次滤波,对边缘信息进行平滑保持操作,提高其估算精度。

双边滤波是一种边缘保持滤波器,它的权值由

两部分的乘积组成,即空间高斯函数和值域高斯函数的乘积。与模板中心像素点相邻且灰度差值较小的像素点,双边滤波对其赋较大的权值;而对于与模板中心像素点相邻且灰度差值较大的像素点,双边滤波对其赋较小的权值。因此,双边滤波能平滑图像的同时保持图像的边缘细节,无论在平坦区域或是景深突变区域都有较好的边缘保持和去噪效果,其数学表达式可表示为:

$$I_{Bil}(x) = \frac{\sum_{y \in S} \sum_{r \in R} (f(x,y)g(I(x),r)\delta(r-I(y))I(y))}{\sum_{y \in S} \sum_{r \in R} (f(x,y)g(I(x),r)\delta(r-I(y)))} \quad (7)$$

其中, f 是空间高斯函数,表示空间邻近度; g 是值域高斯函数,表示灰度相似度; δ 代表方差; x 是图像的像素点位置; S 是以 x 为中心的空域模块大小; y 是 S 空间模板内除 x 点的其他像素位置; R 是值域模块大小; r 是以 $I(x)$ 为中心的 R 模块内的强度值。则式(5)可以简化为:

$$I_{Bil} = BF(I, \sigma_s, \sigma_r) \quad (8)$$

其中, I 是输入图像; σ_s 代表空间域上核函数的参数; σ_r 代表值域上核函数的参数,其直接影响滤波后图像的平滑程度和边缘保持效果。当参数取值较大时,纹理细节丢失较多,图像平滑效果较明显。因此,为了避免边缘丢失过多的信息以及产生光晕效应,对判别式滤波后获得的图像进行双边滤波,得到大气散射图 V 。双边滤波虽然能在边缘保持的同时对图像的细微变化进行有效的平滑,但当像素点邻域内的相似像素不是很多时,其得到的高斯加权平均是不确定的。另外,根据式(7)直接计算双边滤波的运行时间很长,其他加速算法虽在运行效率上得以提高,但计算精度有不同程度的降低,而且其他加速算法无法在场景深度突变的边缘区域达到保持边缘平滑的目的。因此,最近人们更倾向于应用双边滤波的近似算法^[17-18],这类算法在处理速度上有较大的提高,在精度方面仅有很微小的下降。为了缩短运行时间而又不影响去雾效果,本文利用文献[18]提出的算法进行加速。该算法在空间域上把双边滤波器分解成一组滤波器,在任意的值域和空间域,核函数的时间复杂度都是 $O(1)$,同时该算法可进行并行操作,可利用GPU进一步加速。

本文利用判别式滤波器对最小通道图 W 进行滤波,用双边滤波对结果图进行平滑保边操作,从而得到大气散射图 $V(x)$ 。图像大气散射图获取的效果如图3所示。对图3(a)的原图,图3(b)为大气散射图的粗略估计,图3(c)为平滑保边操作后的大气散射图,可以看出两次滤波后大气散射图中的很多细节得到很好的保持,如树叶的细节信息。



图3 图像大气耗散情况比较

3.4 大气透射率函数的修正

获得大气耗散函数 V 和环境光值 A 后,利用 $V(x) = A(1 - t(x))$,得到大气透射率函数:

$$t(x) = 1 - \omega \frac{V(x)}{A} \quad (9)$$

其中,参数 $\omega \in (0, 1]$,其目的是为了保留小部分雾气,通过大量实验,当它的取值为0.95时去雾后的图像更加清晰自然。在一般情况下,由于目标物体离成像系统距离的越大,受到雾的影响越大,因此图像的亮度随着目标物体离成像系统的距离变大而变大。然而对于含有白色物体等大面积明亮区域的图像,其3个通道的像素值与天空区域的像素值近似,它们的像素值即使在无雾的情况下也接近255。因此,这些区域受雾的影响相对较小,若直接利用式(9)计算大气透射率, $t(x)$ 趋近于0,造成过度去雾,使复原图像颜色过饱和而失真。另外,噪声在去雾过程可能被放大,特别是对于浓雾区域。图4是修正前后图像复原的结果。



图4 复原图像比较

图4(a)为原图。图4(b)显示的是修复前复原图像效果图,图中天空区域的颜色明显失真,噪声非常明显。图4(c)是修正后复原图像效果图,去雾后大部分图像的颜色保持了原有的颜色,特别是天空区域和明亮非天空区域均能得到很好的纠正。因

此,需要对这些区域的透射率函数进行调整,弱化这些区域的去雾。

本文引入容差参数 Q ,把 $|I-A|$ 不大于 Q 的区域作为明亮非天空区域,大气透射率需要重新计算;把 $|I-A|$ 大于 Q 的区域作为满足暗原色先验理论的区域,不改变原来的透射率。对大气透射率进行修正:

$$t(x) = \min(k \cdot t(x), 1) \quad (10)$$

$$k = \begin{cases} \frac{Q}{|I(x) - A|} & |I(x) - A| \leq Q \\ 1 & |I(x) - A| > Q \end{cases} \quad (11)$$

通过大量实验发现, Q 的取值与大气环境光的大小有关。当 $Q = 0.4 \times A$ 时实验效果最佳。图 5 显示了透射率修正前后的效果对比图。图 5(a) 为原图。图 5(b) 显示修正前的透射率图,图 5(c) 显示修正后的透射率图。容易看出,经过透射率修正的算法对明亮区域的处理效果更加真实自然。

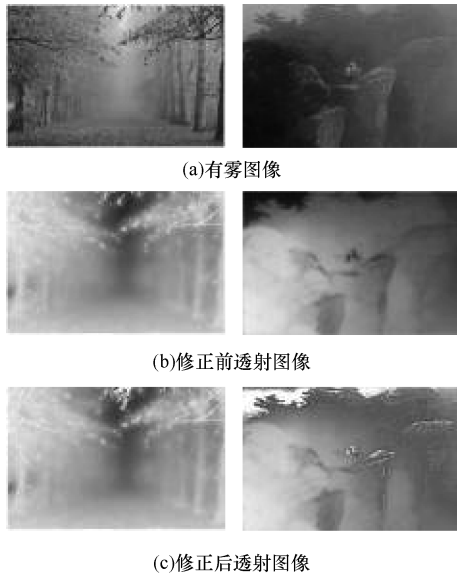


图 5 图像透射情况比较

为了抑制去雾过程中较多的噪声产生,通常对 $t(x)$ 设置一个下限 t_0 ,一般取 0.1,这意味着在图像浓雾区域仍存留一定程度的雾气。最后基于大气散射模型式(1),重新定义复原图像的公式为:

$$J(x) = \frac{I(x) - A}{\max(\min(k \cdot t(x), 1), t_0)} + A \quad (12)$$

4 实验与结果分析

本文算法在 PC 机上利用 Matlab2012b 进行仿真实验。其运行环境是 Windows 7,配置为 Intel(R) Core(TM) i3 CPU M380 @ 2.53 GHz,2 GB RAM。

对最小通道图进行两次滤波获取较精确的大气散射图是本文算法中最重要的步骤。双边滤波器的参数选择和判别式滤波的阈值选择直接影响到图像滤波的边缘保持程度和平滑效果,双边滤波器针对不同的输入图像会选择不同的参数大小。通过大量实验,对于大部分有雾图像,采用 $T = 48, \sigma_{sw} = 0.03 \times \min(\text{height}, \text{width}), \sigma_{rw} = 28$ 时,可以获得较好的效果。

为了证明本文算法去雾效果较为真实自然,将本文算法与目前较为经典的单幅图像去雾算法的实验结果进行比对,结果如图 6 所示。其中,第 1 列图像为原始图像,第 2 列 ~ 第 6 列分别为文献[10]算法 ~ 文献[13]算法和本文算法的去雾效果图。对近景图像(Fig1)、远景图像(Fig2 和 Fig3)和含有白色物体图像(Fig4 和 Fig5)进行去雾,通过实验观察可以发现,对于大部分图像,文献[12]算法通过抠图技术优化后近景处理效果较好,但在天空区域和白色区域的颜色处理过于饱和甚至失真,如 Fig2, Fig4 和 Fig5。文献[13]提出引导滤波器来细化大气透射率。该算法处理后图像的整体色彩保持较好,边缘细节保留很好,但去雾效果不佳,5 幅图像均有不同程度的雾气存在。文献[10]运行速率同样也很快,但在场景深度发生突变的边缘区域去雾效果较差, Fig1 中树叶部分和 Fig5 中的树木与白云区域都没有很好地处理,丢失了很多细节信息。文献[11]是基于物理模型的算法,在很多情况下可以产生很好的去雾效果,然而,该算法在雾浓区域或白色区域去雾效果并不理想, Fig2 和 Fig4 中天空区域出现了光晕现象, Fig5 中天空区域白云的信息丢失非常严重。与上述算法相比,本文算法无论在景深突变区域还是远景区域都能得到较好的去雾效果。

若应用到实际的生产生活中,必须考虑算法处理耗时,处理时间的长短反映了算法的复杂程度能否达到实时性需求。文献[12]采用空间复杂度和时间复杂度都较高的抠图技术进行透射率优化。本文采用优化的二叉树算法获取稳定、准确的环境光,利用文献[18]中的实时性双边滤波器优化大气透射率,有效地提高了运行速度,具有较好的实时性。各算法的运行时间如表 1 所示。从 3 幅图像的处理时间上来看,文献[10]、文献[11]和文献[12]处理时间较长,文献[13]和本文算法耗时较少,但文献[13]处理后的图像在效果上不及本文算法。由表 1 可见本文算法运行时间较其他文献算法快,可满足实时性需求。

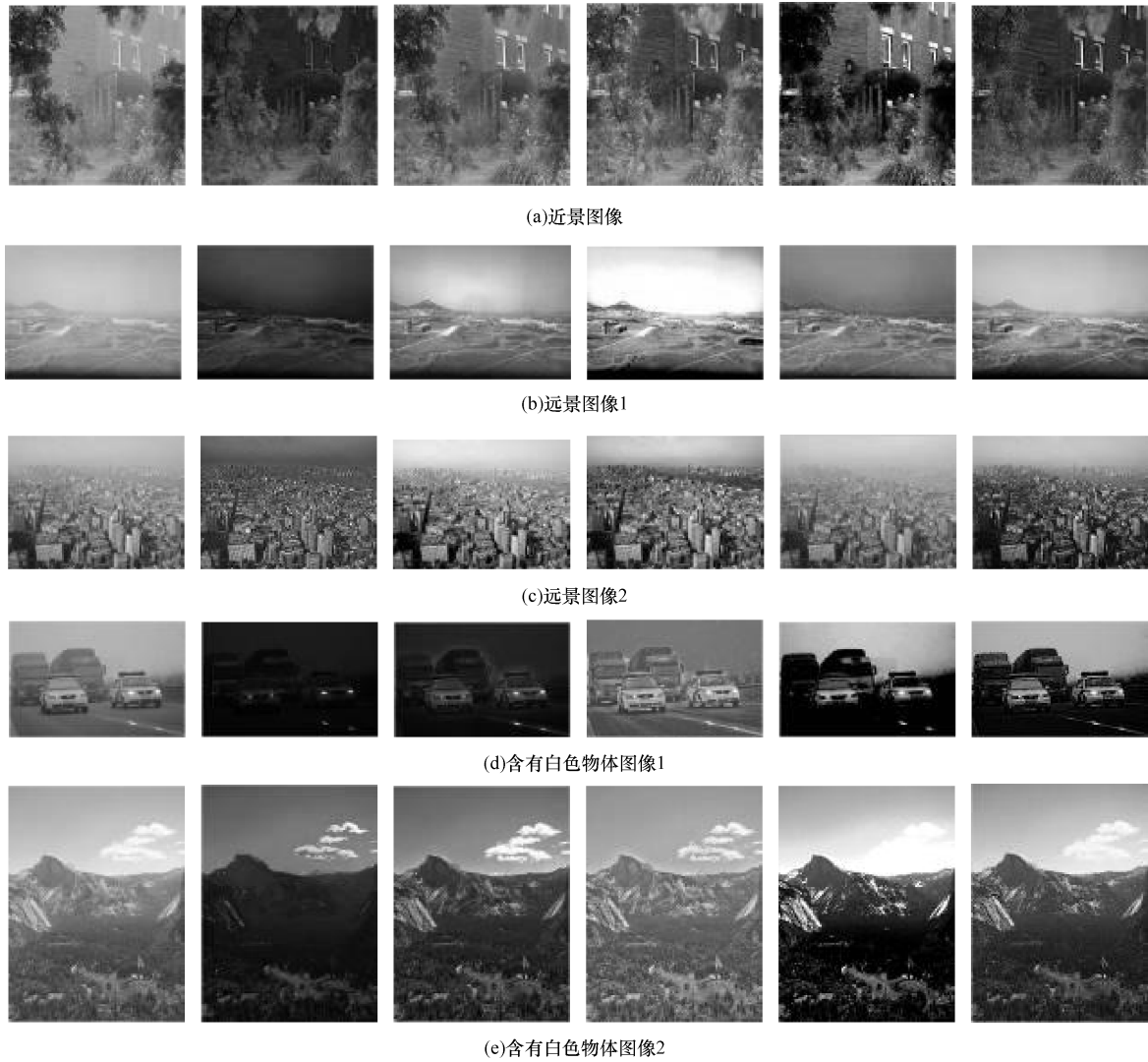


图 6 各方法复原结果对比

表 1 各类算法运行时间对比

图像尺寸/像素	s				
	文献[10]算法	文献[11]算法	文献[12]算法	文献[13]算法	本文算法
Fig1 (463 × 475)	276.412	28.360	14.245	4.752	2.236
Fig2 (576 × 337)	246.672	23.358	12.812	2.753	1.572
Fig3 (536 × 876)	423.654	31.483	34.753	11.954	2.863
Fig4 (576 × 337)	246.327	24.453	11.527	3.053	1.586
Fig5 (536 × 876)	401.954	33.563	25.473	9.431	2.772

为更确切地表述问题,本文利用客观评价标准。

把评估彩色图像视觉质量的重要指标熵、均值和方差作为客观评价指标。对于图 6 的输入图像,部分算法处理后的去雾图像的客观质量评估情况如表 2 所示。从表 2 数据可以看出:各个算法得到的图像均值都比较适中,熵和方差也有一定程度的提高,说明原降质图像经各算法处理后,边缘细节和清晰度都增加了,取得了很好的复原结果。本文算法的熵和方差的值都要大于其他算法的结果,这说明本文算法的去雾效果更好。

表 2 各类算法的图像客观质量评价

图像	原图		文献[10]算法			文献[11]算法			文献[12]算法			本文算法			
	均值	方差	熵	均值	方差	熵	均值	方差	熵	均值	方差	熵	均值	方差	熵
Fig1	118.18	40.54	5.20	119.53	46.76	6.07	125.24	51.54	5.58	127.54	43.63	5.66	134.32	49.34	5.71
Fig2	164.71	40.57	6.14	127.75	46.43	6.25	126.64	51.57	6.39	130.24	41.53	6.21	140.73	54.75	6.77
Fig3	140.48	62.69	5.18	123.75	64.43	5.21	128.32	64.67	5.43	126.87	65.76	5.33	135.35	89.73	5.33
Fig4	127.25	41.48	4.57	122.53	50.44	4.97	131.65	56.34	5.01	129.54	46.65	4.87	135.65	65.64	5.09
Fig5	136.99	53.53	7.51	133.57	63.73	7.58	131.54	67.87	7.63	132.78	59.87	7.67	136.42	77.86	7.86

通过大量雾霾图像仿真实验发现,本文算法对于绝大多数雾霾图像都能达到较好的去雾效果,但由于利用相对简单的大气散射模型,对于较复杂的情况,例如运动场景下的雾霾图像,虽然能够去除图像中雾气,但复原图像仍然比较模糊。该算法无法既去雾又去模糊,得到清晰无雾图像,如图 7 所示。

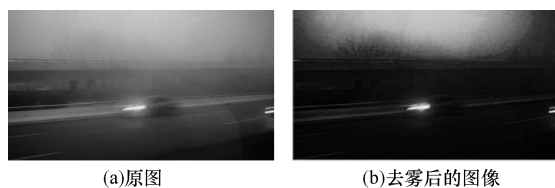


图 7 本文算法去雾效果

5 结束语

本文提出基于两次滤波的快速图像去雾算法,利用二叉树方法获取环境光值,采用判别式滤波获取大气散射图,通过双边滤波对其进行第二次保边平滑滤波,得到精确的大气散射图,并校正透射率得到更准确的透射率图,基于大气散射模型对雾天图像进行复原,可得到去雾效果较为真实自然的无雾图像。对于一幅大小为 $M \times N$ 的图像,本文算法中二叉树方法的时间复杂度是 $O(\frac{1}{4} \times M \times N)$,判别式滤波器的时间复杂度是 $O(1 + \ln(M \times N))/2$,双边滤波器的时间复杂度是 $O(\min(M, N))$,其他步骤均为简单操作。因此,本文算法的时间复杂度是 $O(M \times N)$,关于像素点个数的线性函数运行效率较高,且鲁棒性强,稳定性好。通过对比实验,本文算法不仅能较好地恢复近景图像和远景图像,而且对含有白色物体等明亮区域的图像也能得到较清晰自然的无雾图像,从而具有有效性与普适性。

下一步将探索复杂运动场景下图像的雾霾去除和运动模糊问题。此外,视频特定场景的快速去雾也是一个实用的研究课题,其处理速度和复原效果是视频去雾研究的主要内容。

参考文献

[1] Tarel J P, Hautiere N. Fast Visibility Restoration from a Single Color or Gray Level Image[C]//Proceedings of the 12th International Conference on Computer Vision. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2009: 2201-2208.

[2] 曲 艺. 基于移动模块的图像去雾方法研究[J]. 计算机工程与应用, 2013, 49(24): 186-190.

[3] 苏春莉, 赵向梅. 图像去雾增强算法研究[J]. 价值工程, 2012, 31(32): 219-221.

[4] 张赛楠, 吴亚东, 张红英, 等. 改进的单尺度 Retinex 雾天图像增强算法[J]. 激光与红外, 2013, 43(6): 698-702.

[5] 王小明, 黄 昶, 李全杉, 等. 改进的多尺度 Retinex 图像增强算法[J]. 计算机应用, 2010, 30(8): 2091-2093.

[6] 孙 伟, 李大健, 刘宏娟, 等. 基于大气散射模型的单幅图像快速去雾[J]. 光学精密工程, 2013, 21(4): 1040-1046.

[7] 陈 功, 王 唐, 周荷琴. 基于物理模型的雾天图像复原新方法[J]. 中国图象图形学报, 2008, 13(5): 888-893.

[8] 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[J]. 自动化学报, 2011, 37(2): 143-149.

[9] 甘佳佳, 肖春霞. 结合精确大气散射图计算的图像快速去雾方法[J]. 中国图象图形学报, 2013, 18(5): 853-890.

[10] Tan R T. Visibility in Bad Weather from a Single Image[C]//Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2008: 1956-1963.

[11] Fattal R. Single Image Dehazing[J]. ACM Transactions on Graphics, 2008, 27(3): 1-9.

[12] He Kaiming, Sun Jian, Tang Xiaoou. Single Image Haze Removal Using Dark Channel Prior[C]//Proceedings of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Washington D. C., USA: IEEE Computer Society, 2009: 1956-1963.

[13] He Kaiming, Sun Jian, Tang Xiaoou. Guided Image Filtering[C]//Proceedings of European Conference on Computer Vision. Berlin, Germany: Springer, 2010: 1-14.

[14] Kim Jin-hwan, Jang Won-dong, Sim Jae-young, et al. Optimized Contrast Enhancement for Real-time Image and Video Dehazing [J]. Journal of Visual Communication and Image Representation, 2013, 24(3): 410-425.

[15] 刘红平, 陈明义. 基于两次滤波的单幅图像快速去雾算法研究[J]. 计算机工程与应用, 2015, 18(5): 156-159.

[16] 肖钟捷, 李宝方. 一种改进的单幅图像快速去雾方法与实验[J]. 地球信息科学学报, 2015, 17(4): 494-499.

[17] 孙 抗, 汪 渤, 周志强, 等. 基于双边滤波的实时图像去雾技术研究[J]. 北京理工大学学报, 2011, 31(7): 810-814.

[18] Yang Qingxiong, Tan Kar-han, Ahuja N. Real-time $O(1)$ Bilateral Filtering[C]//Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2009: 557-565.