

doi: 10.3788/gzxb20164504.0410002

基于大气多散射模型和超像素分割的图像去雾

王睿¹, 李蕊¹, 廉小亲²

(1 北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100191)

(2 北京工商大学 计算机与信息工程学院 北京 100048)

摘要:通过分析大气粒子对光线的多次散射作用,利用大气点扩散函数作为卷积核,基于暗原色图像复原理论,建立了基于多次散射的雾天成像模型,并以函数形状相似性为依据,利用广义高斯分布定量估计出大气点扩散函数核函数在图像域下的相关参数.针对传统暗原色理论以固定大小图像区域估计透射率的不足,提出了基于超像素分割获得景深一致的图像分块方案,通过区域合并,获得更为精准的天空检测效果;基于暗原色先验理论分别估计天空和非天空区域的透射率,并对天空区域的透射率进行修正,不但减少了天空色彩失真,同时也消除了复原结果的光晕现象.本文从主观和客观两个方面将所提出的去雾方法和其他算法进行了对比,结果表明,本文提出的去雾算法能够在较短的运行时间内获得对比度较高、细节信息丰富的去雾结果,具有较好的鲁棒性.

关键词:图像处理;图像增强;暗原色先验;多次散射;超像素;去雾;光晕现象;透射率

中图分类号:TP391.41;TN911.7

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2016)04-0410002-7

Multiple Scattering Model Based Image Dehazing with Superpixel

WANG Rui¹, LI Rui¹, LIAN Xiao-qin²

(1 School of Instrumentation Science & Opto-electronics Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

(2 School of Computer and Information Engineering, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China)

Abstract: The formation pattern of hazy image based on multiple scattering, which is described by atmosphere point spread function (APSF), is modeled. The generalized Gaussian distribution was adopted to approximately formula the expression for APSF through the similarity in the shape and proper convolution operation. Aiming at enhancing the quality with reasonable time consuming, an improved dehazing method was proposed based on dark channel prior (DCP). The approach applies the superpixel algorithm to obtain image patches with similar depth for halo prevention, and based on this, the sky region was also detected more accurately by region merging. Therefore the transmission on the sky and non-sky region was separately estimated, the color distortion reduction in the sky region was achieved. Experimental results show that the proposed method can robustly recover a high-quality haze-free image with abundant details from both subjective and objective image-quality assessment.

Key words: Image processing; Image enhancement; Dark channel prior; Multiple scattering; Superpixel; Atmosphere point spread function; Dehazing; Halo effect; Transmission

OCIS Codes: 100.2980; 100.1830; 290.3700; 290.1310; 290.1310

0 引言

雾霾天气下大量气溶胶粒子对光线的散射作用导致户外图像质量严重退化,图像模糊不清,对比度下降,细节信息不明显,颜色失真等^[1].为保证户外视觉

系统性能的稳定性和需对采集到的户外图像进行有效的去雾处理.

图像去雾技术分为基于非模型的方法和基于模型的方法两大类^[2-3].非模型方法主要借助图像处理等手段,如直方图均衡化、频域滤波等,来提高有雾图像的

基金项目:国家自然科学基金(No. 60974108)资助

第一作者:王睿(1965—),女,副教授,博士,主要研究方向为计算机视觉与模式识别、光电传感与图像处理. Email: wangr@buaa.edu.cn

通讯作者:李蕊(1991—),女,硕士研究生,主要研究方向为图像处理. Email: lirui_bei@buaa.edu.cn

收稿日期:2015-09-17;录用日期:2015-12-07

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

对比度,改善图像细节信息.模型方法从大气散射理论出发,建立雾天成像数学模型,利用有雾图像复原无雾天气下的真实场景.相比之下,基于模型的去雾方法考虑了降质图像的退化机理,能够获得理想的去雾效果.但由于真实天气复杂变化,难以建立一种合理的、适用性强的物理模型,因此该类方法大都基于 Narasimhan 等人所提出的单散射模型,通过引入不同先验约束达到去雾目的^[1-3]. Tan^[4]采用雾图局部对比度最优化思想, Fattal^[5]提出了表面投影和透过率局部独立的假设, He^[6]通过大量实验总结出暗原色先验统计规律.基于暗原色先验的单幅图像去雾因其模型简单,鲁棒性较好而获得了广泛的关注,但该方法运算耗时,去雾后天空色彩失真并在景深突变处存在光晕现象.为克服这些不足, Tarel、He 提出了基于中值滤波^[7]和引导滤波^[8]的加速方法, 嵇晓强全局暗原色理论^[9]以及刘楠^[10]的加权暗原色去雾方法等.李权合等^[11]将单色大气散射模型类比 Retinex 模型,重新解释了大气传递图;高原原等^[12]利用摄影中常用的负矫正方法实现了图像的快速去雾处理.同时,为衡量现有去雾算法的有效性, Tarel^[13]、郭璠^[1]、禹晶等^[14]分别从不同角度提出了图像去雾算法的客观质量评价体系.基于单散射模型的图像去雾技术目前虽已得到广泛的应用,但如何较好地平衡其鲁棒性、实时性及复原质量仍是研究的热点之一.

单散射模型在解释雾天成像机理时仅考虑了粒子对光线的单次散射作用,即假设经某粒子散射后的光束不再被其他粒子散射.实际上,光线在传播过程中会反复地被大气粒子散射,形成多散射作用,导致光线以不同角度到达摄像机,在图像上会表现为以原始像点为中心向外扩散的图像模糊.

本文在大气单散射模型的基础上,考虑大气粒子的多散射影响,建立了基于多散射的雾天成像模型.采用超像素分割法代替暗原色理论中固定大小的分块操作,使得天空和非天空分离更精确.利用暗原色先验理论和引导滤波的方法估计透射率,并对天空区域的透射率进行修正,减少天空失真和光晕现象,得到高质量的去雾效果.

1 大气成像模型

根据 Mie 大气散射理论,基于单次散射的雾天成像模型可表示为^[5-6]

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

式中, $I(x)$ 表示采集到的雾天图像, $J(x)$ 为待恢复的无雾场景, $x = (x, y)^T$ 表示图像坐标, $t(x)$ 为大气介质透射率, A 为大气光值, 可视为与 x 无关的全局常量.假设大气介质是均匀的,透射率 t 与全散射系数 β 以及场景深度 d 的关系可表示为

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

考虑粒子的多散射作用,将大气对光线的衰减(吸收和单散射)和多散射作用看作两个相互独立的作用,并假定多散射发生在吸收和单散射之后,则景物的衰减光以及大气光的散射光在摄像机视场内被大气粒子反复地散射后以不同的角度到达摄像机的成像平面.在像平面上形成一个模糊的弥散斑^[15],如图 1.多散射作用产生的影响可由大气点扩散函数(Atmospheric Point Spread Function, APSF)描述.在式(1)基础上增加多散射的影响,雾天成像模型可表示为

$$I(x) = [J(x)t(x) + A(1-t(x))] * h_{\text{APSF}} \quad (3)$$

式中, h_{APSF} 为图像卷积模板,可由 APSF 在图像域下的核函数 h_r 得到,“*”表示卷积运算.

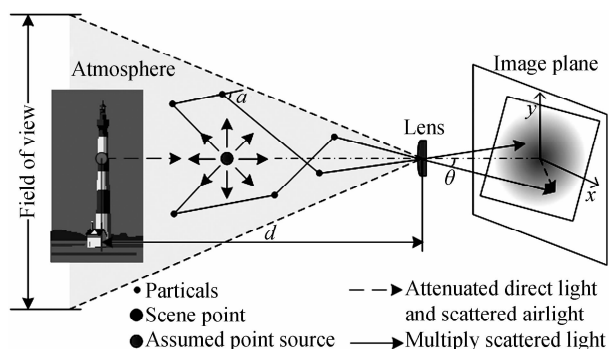


图 1 大气多散射成像模型

Fig. 1 Image formation based on multiple scattering model

2 雾天图像复原算法

由式(3)可知,图像去雾的首要步骤是估计 APSF 卷积模板 h_{APSF} 、透射率 t 和大气光值 A .其中 h_{APSF} 可通

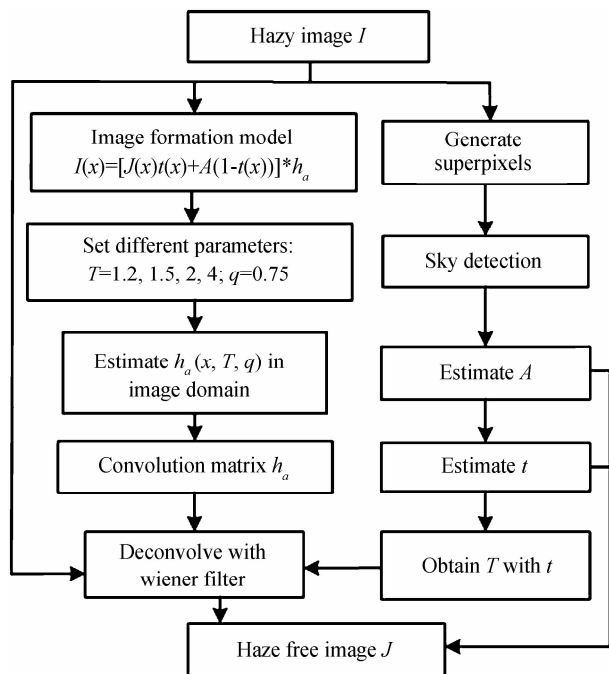


图 2 本文提出的去雾算法整体流程

Fig. 2 Overall procedure of the proposed dehazing scheme

过估计 APSF 在图像域下的分布获得,而针对目前去雾方法中由于对 t 和 A 的不准确估计所引起的光晕现象等缺点,本文基于暗原色先验理论提出了一种如图 2 所示的改进去雾方案.首先利用超像素分割的方法得到景深一致的图像分块并利用引导滤波的方法估计透射率,然后利用区域合并等方法检测出天空区域并对其透射率进行修正,减少色彩失真.

2.1 估计 h_{APSF}

Narasimhan 和 Nayar 等人通过求解辐射传输方程的方法得到了 APSF 的估计值^[15-16],即

$$\begin{cases} I(T, \mu) = \sum_{m=0}^{\infty} (g_m(T) + g_{m+1}(T)) L_m(\mu) \\ g_m(T) = I_0 e^{-\beta_m T - \alpha_m \log T} \\ \alpha_m = m + 1 \\ \beta_m = \frac{2m + 1}{m} (1 - q^{m-1}) \end{cases} \quad (4)$$

式中, $I(T, \mu)$ 为摄像机接收到的辐射度,即直接获取到的图像, I_0 为光源处的辐射度, T 为光学厚度, q 为大气粒子的前向散射系数,薄雾和浓雾下的取值分别为 0.75 和 0.9. L_m 为 m 阶 Legendre 多项式, g_m 为相应的系数,假设 I_0 为单位辐射度,则 APSF 可由式(4)计算得到.

显然, APSF 与 $\theta = \arccos \mu$ 的函数形式受光学厚度 T 以及粒子前向散射系数 q 的影响,如图 3. 由于点光源球面波的对称性, APSF 的 3D 形式可由图中曲线绕直线 $\theta = 0$ 旋转得到. 此外,光学厚度 T 与场景深度 d 、散射系数 β 以及透射率 t 的关系式为

$$T = \int_0^d -\beta dx = -\ln t \quad (5)$$

要得到图像域下的 h_{APSF} , 需根据成像条件建立 2D 图像域像素坐标和 3D 散射径向角的几何投影关系,利用式(4)可得到 APSF 在图像域下的核函数 $h_r(x)$, 但需要确定成像条件和参数^[16]. 由文献[17], APSF 曲线的形状非常接近广义高斯分布 (Generalized Gaussian Distribution, GGD), 即

$$\text{GGD}(x; \zeta, \sigma, p) = \frac{e^{-|x-\zeta|/A(p, \sigma)|^p}}{2\Gamma(1+p^{-1})A(p, \sigma)}, x \in \mathcal{R} \quad (6)$$

式中, $A(p, \sigma) = \sigma(\Gamma(p^{-1})/\Gamma(3/p))^{1/2}$, $\Gamma(\cdot)$ 为伽马函数 ($\Gamma(z) = \int_0^{\infty} e^{-t} t^{z-1} dt, z > 0$), p 和 σ 分别是形状参数和尺度因子. 尽管文献[17] 通过曲线峰值形状近似一致给出了 GGD 和 ASPF 两对参数 (p, σ) 和 (T, q) 之间的映射关系, 但却忽略了参数映射后 h_{APSF} 的取值情况. 因此本文从形状上和卷积模板的数值意义上重新定义二者的映射关系, 并利用 GGD 近似估计核函数 $h_r(x)$ 的解析形式.

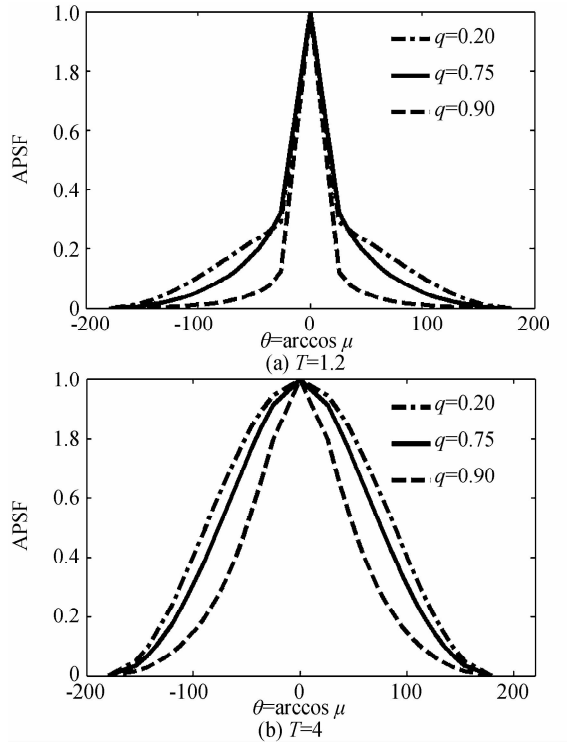


图 3 不同参数下归一化 APSF 截面曲线
Fig. 3 Normalized cross-sections of APSF under different weather conditions and atmosphere types

通常, 光线经多散射后大部分光束以 $\theta = 0^\circ$ 入射到摄像机上, 少部分以其它角度入射而影响相邻像点的辐射度, 反映到卷积模板上, 模板中心的权值应占有主要比例, 其它点的权重所占比例较少但不能忽略. 此外, 由于 APSF 受 T 值的影响, 不同像素点的 $h_r(x)$ 不同, 而光学厚度 $T \leq 1$ 时式(4)不收敛, 且通过实验发现, 当 $T \geq 4$ 时 APSF 的变化非常小. 为减少计算量, 本文主要针对薄雾下 (即 $q = 0.75$), $T = 1.2, 1.5, 2, 4$ 时 $h_r(x)$ 的估计, 其他 T 值下的 $h_r(x)$ 均采用近似处理.

图 3 为不同参数下归一化 APSF 截面曲线图. 图 4 为 σ 分别为 0.5 和 0.7 时不同 p 值下的 GGD 曲线图. 从形状上, 对比分析 APSF 和 GGD 曲线的特性 (图 3 和图 4) 可得, GGD 形状参数 p 对曲线的影响与 T 对 APSF 的影响一致, 而尺度参数 σ 对曲线的影响与 q 对 APSF 的影响恰好相反. 同时, 当 $p > 2$ (或 $p < 1.5$) 时, GGD 曲线峰值变化过于平坦 (或过于尖锐), 在“腰”处迅速下降, 与标准的 APSF 曲线相差较大, 从形状上考虑, $T = 4$ 对应的 p 值一般取 2 左右.

从数值上, 卷积模板 h_{APSF} 的取值由 APSF 核函数 $h_r(x)$ 确定, 对应 $h_r(x)$ 上自变量 x 为整数的函数值. 由图 4(b), $\sigma = 0.7, p = 2$ 时 GGD 在 $x = \pm 1$ 处的函数值接近 0.4, 扩展至 2D 平面, 这种情况下得到的 h_{APSF} 在模板中心处的权值较低, 而当 $\sigma = 0.7, p = 0.6$ 时得到的 h_{APSF} 在模板中心处的权值过高. 考虑到 σ 越小曲线在 $x = \pm 1$ 处下降越快, 因此 $q = 0.75$ 时 σ 值应在区间

[0.5, 0.7]上,且 $T=1.2$ 时的 p 值应大于 0.6.

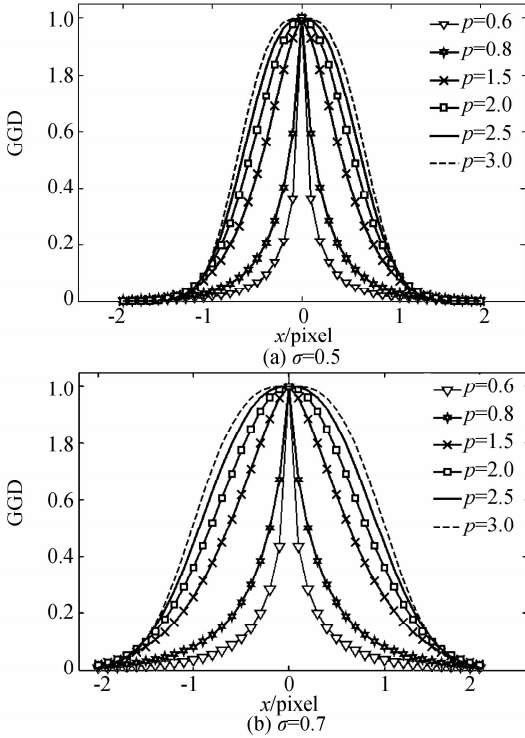


图 4 σ 分别为 0.5 和 0.7 时不同 p 值下 GGD 曲线
Fig. 4 Normalized cross-sections of APSF under different weather conditions and atmosphere types

考虑浓雾 $q=0.9$ 情况,两对参数之间的映射关系最终确定为

$$p = T^{0.5}, \sigma = 0.5/q^{0.5} \quad (7)$$

由式(7)并考虑 APSF 的对称性,最终确定的 APSF 核函数形式为

$$h_r(x, y; \zeta, \sigma, p) = \frac{e^{-\left(\frac{x+y}{\sigma}\right)^2}}{2\Gamma\left(1 + \frac{1}{\sqrt{T}}\right)A\left(\sqrt{T}, \frac{0.5}{\sqrt{\sigma}}\right)}, x \in \mathcal{R} \quad (8)$$

图 5 展示了由文献[17]和式(8)得到的 $q=0.75$, $T=4$ 时的 5×5 卷积模板以及对有雾图像去卷积后的效果图.与文献[17]的方法相比,利用式(8)得到的去卷积图像细节信息更为丰富,景物边缘更加清晰可见.

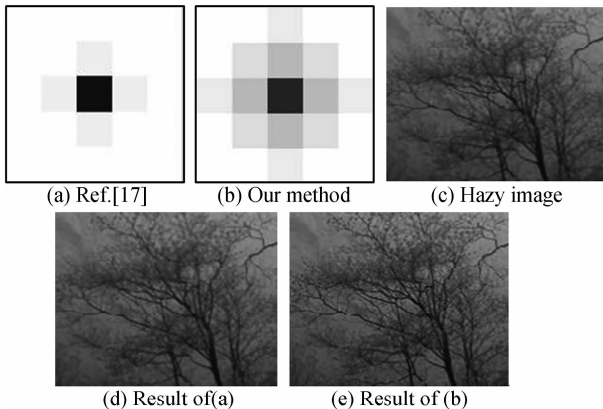


图 5 文献[17]和本文提出的估计方法所得到的 h_{APSF} 卷积模板及去卷积后的效果
Fig. 5 Comparison with Metari's method

2.2 估计透射率和大气光值

He 提出的暗原色先验理论(Dark Channel Prior, DCP)^[6]是目前公认的较好的去雾方法之一,能够较准确地估计大气光值和透射率分布.假定大气光值 A 已知,由暗原色先验规律可得透射率的估计值为

$$\bar{t}(x) = 1 - \omega \times \min_{c \in \{r, g, b\}} \left(\min_{y \in \Omega_c} \left(\frac{I^c(y)}{A^c} \right) \right) \quad (9)$$

式中, I^c, A^c 分别为有雾图像 I 和大气光 A 的一个颜色通道,即 $c \in \{r, g, b\}$. Ω_c 表示以像素点 x 为中心的邻域窗口, $\omega=0.95$ 是为保留远景处的薄雾使去雾后图像自然而引入的.由式(9)估计的透射率通常表现出严重的块效应,He 等提出利用软抠图的思想对 $\bar{t}(x)$ 进行细化.然而,由于软抠图带来的运算量巨大,严重制约了算法的应用^[18].另外,暗原色先验这一规律在天空等明亮物体处是失效的,对于含有大片天空的有雾图像,去雾后会产生严重的色彩失真.

因此,本文利用 SLIC 超像素分割^[19]对图像进行分块,然后合并天空区域的超像素,将天空和非天空分离,分别估计透射率,同时采用引导滤波进行细化,得到复原图像.

为保证相邻超像素合并的准确性,提出基于显著边缘点率的超像素合并方法,具体过程为:

利用 Canny 算子获得二值化边缘图像,统计相邻超像素边界线上边缘点数与该边界线上像素总数的比值,若该值大于某一阈值,则二者之间存在显著边缘,二者距离为 ∞ ; 否则不存在显著边缘,以颜色距离和纹理距离的加权和计算二者的距离,即

$$D_{ij} = \begin{cases} \infty & (\text{edges}) \\ \|f_{ci} - f_{cj}\|_2 + \rho |f_{ti} - f_{tj}| & (\text{no edges}) \end{cases} \quad (10)$$

式中, $f_{ci} = (l_i, a_i, b_i)^T$ 和 f_{ti} 分别为超像素 i 的颜色特征矢量和纹理特征, ρ 为权值.颜色特征是通过在 Lab 颜色空间中分别计算每个超像素 l, a, b 三通道的颜色均值得到的,纹理特征是利用 Laws 纹理掩膜^[20],对图像的亮度通道计算不同方向上的纹理变化,并计算超像素内所有点的纹理特征之和得到的. D_{ij} 值越小,表示两超像素越相似.

超像素合并完成后,根据天空区域的颜色接近白色,纹理比较单一的特性,采用如下条件来判断某一聚类区域 Γ_k 是否是天空区域,即

$$\min_{c \in \{r, g, b\}} \left(\text{mean}(y^c) \right) \geq 160 \& \& f_{tk} \leq 2 \cdot \min \{ f_{tk} \} \quad (11)$$

分两种情况对透射率 t 和 A 进行估计:对于不含天空的图像,采用 He 的方法估计 A ,利用引导滤波对式(9)得到的透射率进行修正,对于含有天空的图像,利用上述方法检测并分离天空区域后,以天空均值估计大气光值,并修正天空区域的透射率.

图 6 给出了利用上述方法得到的超像素分割、天空检测以及去雾结果.可以看到,所得到的超像素较好

地反映了景物的边界信息,由此检测到的天空区域更准确,能够保持较多的边缘细节.

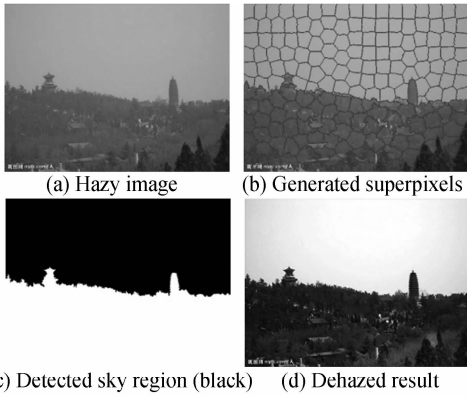


图6 超像素分割及天空检测结果

Fig. 6 Results of superpixel generation and sky detection

3 实验结果及分析

采用维纳滤波对原始图像进行去卷积运算. 实验中,考虑到时间效率的问题,对小尺寸图像,如 400×600 ,设置的超像素个数为 $N=200$,对于较大尺寸图像,如 728×1024 ,取 $N=400$. 式(10)中的纹理权重取 $\rho=50$. 算法的运行平台为 E8400 3.0 GHz CPU 和 3.0 GB RAM PC 机的 MATLAB 2012a.

3.1 复原效果的主观评价

实验采用不同的测试图片,在不同的场景下对比了本文所提出的算法与现有的几种算法:经典暗原色先验方法(DCP)、基于引导滤波的暗原色方法(GDCP)、Fattal的方法、Tarel的方法及Tan的方法,结果如图7~9.

容易看到,由于暗原色先验理论在天空区域失效,DCP和GDCP复原的天空失真严重,如图7(b)~(c). 并且GDCP复原的结果在天空边界处出现光晕现象,如图7(c)所示. Tan的方法旨在提高图像对比度,而没有考虑物理模型,因此结果图像中出现颜色过饱和的现象^[21],如图8(b)中天空处的白云以及近景的山坡等出现了过矫正等现象. Fattal方法基于大气传播率和物体表面阴影局部不相关的假设来估计场景的反射率,需要足够的颜色信息以及较高的信噪比,因此在雾

气较浓以及颜色信息变化不大的区域,其复原结果存在过矫正或欠矫正的问题,如图9(b)和(f). Tarel方法通过中值滤波来快速估计大气耗散函数,但无法与场景的深度分布进行较好的匹配,去雾结果中也出现了欠矫正现象,如图9(c)和(g). 此外由于中值滤波无法起到边角保护的作用,因此在景深突变的细小边缘处易产生去雾不彻底的现象,如9(g)中远处植物的枝叶中间残存的雾片. 相比而言,本文利用超像素分割来获取景深一致的图像分块,避免了景深突变处的光晕现象,通过分离天空并修正天空透射率的操作减少了天空的色彩失真问题,获得了较好的对比度、色彩质量等. 此外由于采用多散射模型,景物的细节信息也到较好的恢复,如图7(d)和图9(h),这在一定程度上反映了多散射模型的优越性.

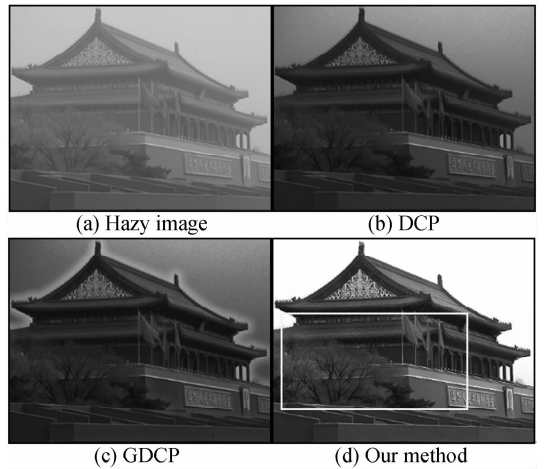


图7 利用改进的透射率估计方法和GDCP、DCP比较
Fig. 7 Comparison with DCP and GDCP

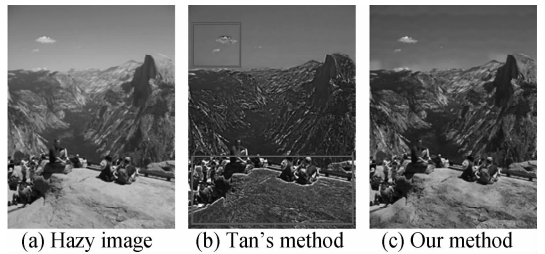
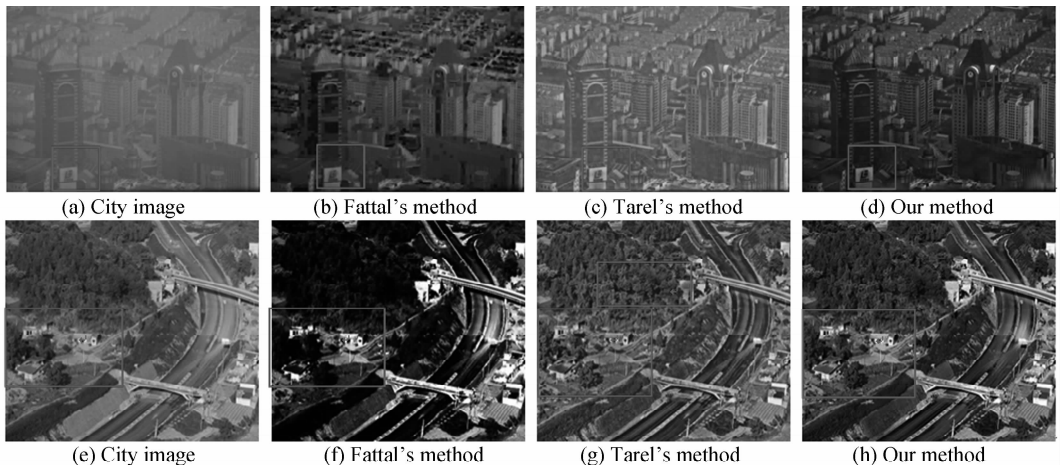


图8 与Tan方法比较
Fig. 8 Comparison with Tan's method



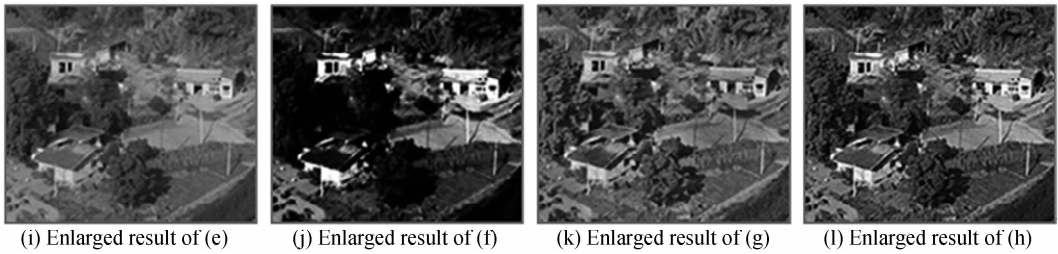


图9 本文的方法与 Fattal, Tarel 进行比较

Fig. 9 Comparison with Fattal's method and Tarel's method

3.2 无参考图像质量的客观评价

从客观角度对本文提出的去雾方法进行无参考质量评价,采用基于可视边的对比度估计方法,有如下两个评价指标^[13]

$$e = \frac{n_r - n_o}{n_o} \quad (11)$$

$$r = \exp\left[\frac{1}{n_r, p_i \in I} \sum \log r_i\right] \quad (12)$$

评价指标 e 表征了复原算法从原始图像中恢复的可视边缘个数的百分比, r 则可以用来衡量复原算法的对比度复原水平. 通常情况下, e 越大, 表示复原算法恢复的可视边越多, 复原效果越好; r 越大, 表示复原图像的对比度越高, 复原效果越好.

对图 9 中的图像分别计算 e 和 r 值, 如表 1 所示. 可以看出, Fattal 方法在 road image 上出现了较严重的过矫正现象, 不少区域呈现一片深色, 细节信息难以辨认, 因此与原始有雾图像相比, 该方法得到的可视边数有所降低. 尽管 Tarel 的方法得到的 e 值和 r 值较高, 但从图 9(c)、(g) 可以推断, 该方法增加的可视边缘很可能是由于景深不连续处的光晕现象产生的. 本文所提出的算法得到最高的 e 值和 r 值, 且复原得到的细节信息较为丰富, 视觉效果较好.

表 1 图 7 和图 9 中不同方法所得无雾图像的 e 和 r

Table 1 Quantitative comparison with state-of-art algorithms

method	city image		road image	
	e	r	e	r
Fattal	2.929 1	3.708 5	-0.016 1	1.981 2
Tarel	3.483 37	3.269 9	0.065 9	2.368 2
Our	5.344 4	3.977 9	0.090 1	2.364

在算法运行效率上, 利用 Tarel 及 He 所提供的 MATLAB 源程序, 分别对图 7 和图 9 (大小为 400×600 左右) 中的雾图进行去雾处理, 算法所运行时间如表 2. 可以看到, 本文所提出算法的效率明显高于 Tarel 方法以及 DCP, 略低于 GDCP, 这是由于, 本文提出的算法从本质上来讲是 GDCP 的一种改进方案, 在其基础上增加了超像素分割及天空检测等过程, 因此其运行时间大于 GDCP. 为准确地检测并分离天空区域, 本文采用了迭代的区域合并操作, 这给算法带来了较高的复杂度. 而对于不含天空的图像, 由于不需要进行区域合并, 因而可以大大节省运算时间.

表 2 几种算法处理图 7 和图 9 所用时间 (s)

Table 2 Comparison on runtime with other methods (s)

Image	Tarel	DCP	GDCP	our
Fig. 7	14.2	57.9	3.3	6.8
Fig. 9(a)	13.7	56.3	2.7	2.9
Fig. 9(e)	6.5	64.1	2.9	3.6

4 结论

本文利用广义高斯分布近似估计大气点扩散函数, 以此作为卷积核来描述大气粒子的多次散射作用, 建立了基于多散射的雾天成像模型. 在模型求解中, 采用超像素分割获得景深一致的图像分块, 并通过修正不同区域的透射率, 解决暗原色先验估计透射率过程中产生的光晕现象和天空失真, 获得了细节丰富、色彩自然的去雾效果. 与大多数去雾方法相比, 所提出的算法在运行效率和复原质量上都得到了一定的提升. 以硬件移植为导向, 通过优化提高算法的计算效率, 实现视频实时去雾, 是我们今后的改进方向.

参考文献

- [1] GUO Fan. Research on image defogging effect assessment and application[D]. Changsha: Central South University, 2012: 10-15.
郭璠. 图像去雾方法和评价及其应用研究[D]. 长沙: 中南大学, 2012: 10-15.
- [2] PANG Chun-ying, JI Xiao-qiang, SUN Li-na, et al. An improved method of image fast defogging[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(7): 872-877.
庞春颖, 嵇晓强, 孙丽娜, 等. 一种改进的图像快速去雾新方法[J]. *光子学报*, 2013, **42**(7): 872-877.
- [3] BI Du-yan, GE Yuan. A research on defogging methods with single image [J]. *Journal of Air Force Engineering University*, 2013, **14**(6): 46-53.
毕笃彦, 葛渊, 李权合, 等. 单幅图像去雾方法研究[J]. *空军工程大学学报*, 2013, **14**(6): 46-53.
- [4] TAN R. Visibility in bad weather from a single image[C]. Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Alaska, USA, 2008, 1-8.
- [5] FATTAL R. Single image dehazing[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2008, **27**(3): 1-9.
- [6] HE Kai-ming, SUN Jian, TANG Xiao-ou. Single image haze removal using dark channel prior[C]. Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Miami, USA, 2009: 1956-1963.
- [7] TAREL J P, HAUTIERE N. Fast visibility restoration from a single color or gray level image[C]. Proceedings of IEEE Conference on International Conference on Computer Vision,

- Kyoto, Japan, 2009, 10: 20-28.
- [8] HE Kai-ming, SUN Jian, TANG Xiao-ou. Guided image filtering[C]. Proceedings of the 11th European Conference on Computer Vision, Heraklion, Greece, 2010: 1-14.
- [9] JI xiao-qiang. Research on fast image defogging and visibility restoration[D]. Chang Chun; Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, 2012: 16-18.
嵇晓强. 图像快速去雾与清晰度恢复技术研究[D]. 长春:中国科学院研究生院(长春光学精密机械与物理研究所), 2012: 16-18.
- [10] LIU Nan, CHENG Yong-mei, ZHAO Yong-qiang. An image dehazing method based on weighted dark channel prior[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(3): 320-325.
刘楠, 程咏梅, 赵永强. 基于加权暗通道的图像去雾方法[J]. 光子学报, 2012, **41**(3): 320-325.
- [11] LI Quan-he, BI Du-yan, XU Yue-lei, *et al.* Haze degraded image scene rendition[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2014, **40**(04): 744-750.
李权合, 毕笃彦, 许悦雷, 等. 雾霾天气下可见光图像场景再现[J]. 自动化学报, 2014, **40**(04): 744-750.
- [12] GAO Yuan-yuan, HU Hai-miao, WANG Shu-hang, *et al.* A fast image dehazing algorithm based on negative correction [J]. *Signal Processing*, 2014, **103**(2014): 380-398.
- [13] HAUTIERE N, TAREL J, AUBERT D, *et al.* Blind contrast restoration assessment by gradient rationing at visible edges[J]. *Image Analysis and Stereology*, 2008, **27**(2): 87-95.
- [14] LI Da-peng, YU Jing, XIAO Chuang-bo. No-reference quality assessment method for defogged images[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2011, **16**(09): 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[J]. 中国图象图形学报, 2011, **16**(09): 1753-1757.
- [15] TAO Shu-yin. Research on image degradation and recovery based on physical properties of atmosphere[D]. Zhejiang: Zhejiang University, 2014: 20-35.
陶叔银. 基于大气物理特征的光学图像退化及补偿技术研究[D]. 浙江: 浙江大学, 2014: 20-35.
- [16] MAHALATI R N, KAHN J M. Effect of fog on free-space optical links employing imaging receivers [J]. *Optics Express*, 2012, **20**(2): 1649-1661.
- [17] METARI S, DESCHENES F. A new convolution kernel for atmospheric point spread function applied to computer vision [C]. Proceedings of IEEE International Conference On Computer Vision, Rio De Janeiro, Brazil, 2007, 1-8.
- [18] CHEN Lu, HE Hong-jie, CHEN Fan. A fast image defogging algorithm based on edge-maximum filter[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(11): 1-6.
陈露, 和红杰, 陈帆. 基于边界邻域最大值滤波的快速图像去雾算法[J]. 光子学报, 2014, **43**(11): 1-6.
- [19] ACHANTA R, SHAJI A, SMITH K, ET AL. SLIC superpixels compared to state-of-the-art superpixel methods [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2012, **34**(11): 2274-2282.
- [20] SAXENA A, CHUNG S H, NG A Y. 3-d depth reconstruction from a single still image[J]. *International Journal of Computer Vision*, 2008, **76**(1): 53-69.
- [21] SUN W, GUO B L, LI D J, ET AL. A fast single-image dehazing method for visible-light systems [J]. *Optical Engineering*, 2013, **52**(9): 1-10.