

文章编号 1004-924X(2017)03-0729-06

夜间有雾图像的光照模型构建及去雾

余顺园^{1,2,3}, 朱虹^{1,3*}

(1. 西安理工大学 自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048;

2. 安康学院 电子与信息工程学院, 陕西 安康 710025;

3. 陕西省复杂系统控制与智能信息处理重点实验室, 陕西 西安 710048)

摘要:夜间有雾图像会出现严重退化,而且人工光源的存在也使得环境光呈现不均匀性。针对上述问题,本文提出了一种适用于夜间有雾图像的光照模型,并在此基础上实现了夜间图像去雾。模型中主要包含了环境光和透射率两个参数,这两个参数都会随着图像局部内容的变化而产生空间变化。首先基于信息损耗约束理论对上述参数进行初始估计,随后利用快速导向滤波对其进行细化,以抑制块效应和光晕效应,最后将细化后的参数代入光照模型中,通过求解模型即可获得最终待还原目标图像。实验结果表明,本文提出的算法能够有效实现夜间有雾图像的去雾处理,在抑制亮区发散的同时能重现暗区的细节,恢复的场景具有较好的亮度和对比度,恢复的图像颜色自然,总体性能优于同类型的其它算法。

关键词:夜间图像;图像去雾;光照模型;信息损耗约束;快速导向滤波

中图分类号:TP391 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20172503.0729

Lighting model construction and haze removal for nighttime image

YU Shun-yuan^{1,2,3}, ZHU Hong^{1,3*}

(1. Faculty of Automation and Information Engineering,
Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. Faculty of Electronics and Information Engineering,
Ankang University, Ankang 710025, China;

3. Shaanxi Key Laboratory of Complex System Control
and Intelligent Information Processing, Xi'an 710048, China)

* Corresponding author, E-mail: zhuhong@xaut.edu.cn

Abstract: Nighttime haze images degrade seriously and artificial light sources cause uneven atmospheric light. Aimed at those problems, this paper introduced a kind of lighting model applicable to nighttime haze image and realizes nighttime image dehazing. The model mainly consisted of two parameters of atmospheric light and transmission, of which space changed with change of local image content. Firstly, the above parameters were initially estimated based on information loss constraint theory and then refinement was carried out by applying fast guide filter to restrain the block effect and halo effect; finally, ultimate refined parameters were applied to lighting model and target image could

收稿日期:2016-12-21;修订日期:2017-01-15.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61673318);高层次人才科研启动项目(No. 2016AYQDZR06)

be obtained by solving the model. Experimental result shows that the proposed algorithm can realize dehazing treatment for nighttime haze image and show again detail of dark space by suppressing emission of light area simultaneously; recovered scene has favorable brightness, contrast ratio and recovered image has natural color. The overall performance of the algorithm is superior to that of other algorithms.

Key words: nighttime image; image dehazing; lighting model; information loss constraint; fast guide filter

1 引言

夜间有雾图像和白天有雾图像的退化原理类似,即受空气中悬浮大气粒子的影响,由于光线的散射使得捕获图像的质量发生退化。但是除此之外,由于夜间自然光线很弱甚至没有,夜间有雾图像会呈现大量暗区,暗区内容模糊不清,细节丢失;另外,在存在人工光源的情况下,又会因为环境光线分布不均匀,导致图像出现部分高光区域,使图像整体亮度不均。这些因素都将导致图像中感兴趣区域信息难以识别,从而严重影响了视频监控、目标识别等计算机视觉系统的应用性能。

近年来学者们致力于研究白天场景下单幅有雾退化图像^[1-6]的还原,并取得了很大的进展。所提出的算法均是基于标准的大气散射模型^[7],通过参数估计来还原退化图像的。关于模型参数的估计,目前公认的有效方法是基于暗原色先验的透射率估计,大量学者就此进行了延拓性的研究^[8-12]。然而上述方法无法直接应用于夜间图像去雾,因为在夜间场景下,暗原色先验已经失效,其次由于人工光源的存在,成像过程中的环境光不再均匀分布,也无法简单地认为大气光是画面中最亮的区域。

考虑到夜间有雾图像和白天有雾图像的不同,Pei 等人利用颜色传递思想先对夜间有雾图像进行预处理^[13],使之看上去和白天的图像类似,然后利用暗原色先验方法再辅以亮度校正后处理实现夜间有雾图像的增强。该方法虽能改善夜间有雾图像的对比度,但是恢复的颜色缺乏自然性和生动性。分析其原因如下:颜色传递并非基于物理模型,而该方法恢复的颜色则过分依赖颜色传递的目标图像。Zhang 等人提出了一个夜

间有雾图像的成像模型^[14],同时估计出了空间变化的大气光。该方法能够获得颜色相对自然的校正结果,但是需要后期的 Gamma 校正和直方图均衡化来提升对比度。Li 等人考虑到夜间有雾图像中的人工光源和其颜色变化^[15],建立了一个新的模型。该模型是在标准散射模型^[7]的基础上通过点扩散函数融入了人工光源散射项。该方法能获得相对自然的颜色,但是对暗区亮度恢复有所欠缺。

针对夜间有雾图像中人工光源及环境光不均匀的问题,本文同样在标准的散射模型^[7]的基础上提出了适用于夜间有雾场景的图像退化模型。该模型由于考虑了环境光线对图像的影响,因此模型中的环境光参数是随实际场景变化而进行空间变化的;同时针对夜间图像暗区细节难以辨析的问题,提出了基于信息损耗约束的参数估计方法,能够较好地实现暗区的亮度校正;另外为了抑制光晕和块效应,提升算法的运算效率,本文引入了快速导向滤波^[16]对初始估计的参数进行细化。

2 夜间有雾图像光照模型

由 McCartney 模型^[17]可知,镜头采集到的辐照度由正透射和大气光两部分组成,由于存在大气粒子,使物体表面的反射光线发生散射,由此导致的能量衰减后剩余的部分为正透射;大气光是环境光经过大气粒子的散射后到达传感器的能量总和,环境照度有几个来源,包括直射的阳光、漫反射的天空亮度、地面的反射光及夜间光源发出的光。

基于 McCartney 散射理论推导出来的图像退化模型被广泛应用于雾天图像还原算法中^[1-2,5,18],该模型成立的前提是空气中必须有散

射粒子存在,且环境光必须是常量。然而对于夜间有雾图像,首先由于大气散射粒子的存在,因此在低照度图像成像过程中光线的散射是必然存在的;但是有所不同的是,在夜间有雾图像中,环境光主要来源于人工光源,其不再是均匀的常量,因此本文提出了式(1)所示的低照度图像成像模型:

$$S(x, y) = R(x, y) \cdot t(x, y) + L(x, y) \cdot (1 - t(x, y)), \quad (1)$$

其中: $S(x, y)$ 表示观测到的低照度图像, $R(x, y)$ 表示原有的清晰图像; $t(x, y)$ 为透射率,其取值为 $[0, 1]$,其取值和景深相关,即 $t(x, y) = e^{-\beta d(x, y)}$,其中 $d(x, y)$ 表示场景深度, β 表示散射系数; $L(x, y)$ 表示环境光,此处的环境光不再是常量,而是随实际场景中人工光源的不同而变化的。

合理估计出 $t(x, y)$ 和 $L(x, y)$,即可计算出增强后的目标图像 $R(x, y)$ 。如式(2)所示:

$$R(x, y) = (S(x, y) - L(x, y)) / (\max(t_{\min}, t(x, y)) + L(x, y)), \quad (2)$$

式中:为避免分母过小而导致溢出需合理设定 t_{\min} 的值, t_{\min} 过小会使 $R(x, y)$ 中包含大量的噪声。参考文献[2]中对 t_{\min} 的取值进行了讨论,根据文献[2]中大量的实际实验结果,本文实验中, t_{\min} 取0.1。

3 夜间有雾图像的恢复

根据夜间有雾图像的成像物理模型对其进行恢复,需要合理估计环境光照和透射率。

3.1 环境光的初步估计

在利用Retinex理论提取照度分量时,Jobson等人比较了不同的中心环绕函数对增强结果的影响^[19],最终建议选择高斯函数作为中心环绕函数来提取照度分量。从物理意义的角度来讲,在图像成像过程中,光线的变化通常是缓慢,因此可以通过计算图像中的像素点与周围区域的加权平均来初步估计低照度图像的环境光。本文同样通过高斯模糊核卷积初步估计环境照度,如式(3)所示:

$$L_{\text{initial}}(x, y) = S(x, y) * F(x, y), \quad (3)$$

其中: $L_{\text{initial}}(x, y)$ 为初步估计的环境照度,式中

“ $*$ ”为卷积, $F(x, y)$ 为高斯形状的中心环绕函数。

3.2 环境光的补偿及透射率估计

在夜视环境中,环境光线往往都比较弱,因此要实现夜间有雾图像的亮度校正,必须要对初始估计的环境光进行更新补偿。本文在模型(1)的基础上,基于信息损耗约束的思想,实现环境光的更新补偿和透射率估计。

当计算得到的像素值超出 $[0, 255]$ 时,受图像显示范围的限制,超出的部分必须被截断,由此导致的场景信息丢失即称为信息损耗。Kim等人^[20]和Yu等人^[21]分别基于信息损耗约束的思想对雾天退化图像和沙尘退化图像进行了还原,并证明了恢复图像对比度的提升与信息损耗的程度成正比,同时与透射率成反比,基于此理论,本文通过逐步迭代的方法,在估计透射率的同时对环境光进行了更新补偿。

假设局部观测窗 $\omega(x, y)$ 内的光照和景深是光滑的,先估计当前观测窗内的环境光和透射率,然后观测窗无重叠平移,估计得到全图的环境光和透射率。首先需要确定的是最大迭代次数和环境光补偿更新的步长,通过迭代计算出更新后的环境光和透射率,并将这两个参数代入公式(2)中,计算得到当前观测窗内的初步还原结果 $\hat{R}_{\omega}(x, y)$;然后统计 $\hat{R}_{\omega}(x, y)$ 的信息损耗量,若信息损耗量高于某一阈值时,以一定的步长调整环境光和透射率,重新计算 $\hat{R}_{\omega}(x, y)$,直到 $\hat{R}_{\omega}(x, y)$ 的信息损耗量小于既定阈值 N_{th} 时停止迭代。

3.3 环境光和透射率细化

上述环境光和透射率是基于场景光线变化和景深变化均是局部平滑的假设而得到的,但是在诸如景深跳变等场景不满足此假设的地方,恢复结果往往存在严重的光晕和块效应,因此需要对其进行细化。对于此类的保边去噪细化通常是通过滤波来实现的,常见的有双边滤波^[22]和导向滤波^[23]。由于双边滤波块效应的去除效果有局限性,相比之下导向滤波的平滑效果更好。为了提高运算的效率,本文选取快速导向滤波^[16]作为细化工具,对环境光和透射率进行细化,得到细化之后的透射率 $t(x, y)$ 和环境光 $L(x, y)$ 。

通过以上推理,可以将细化后的透射率 $t(x, y)$ 和环境光 $L(x, y)$ 代入公式(2)中计算,即可直接得到增强后的目标图像,而无需任何诸如文献[14]所讨论的通过后期曝光调整来进一步校正亮度。

4 实验结果分析

对本文所提出的算法进行了大量的测试,并将测试结果与近年来较为经典的相关算法进行比较,主要包括针对夜间图像去雾的 Zhang 等人的算法^[24], Pei 等人的算法^[13], Li 等人的算法^[15]; 针对单幅图像去雾的 Meng 等人的算法^[25]和 He 等人的算法^[2]; 常见的图像增强算法有 Retinex 算法和直方图均衡化(Histogram Equalization, HE),如图 1 和图 2 所示,并对实验结果进行了比较和分析。

图 1(彩图见期刊电子版)和图 2(彩图见期刊电子版)的原图是夜间拍摄的不同场景的两幅图,画面局局部区域偏暗,均有人工光源存在。

从图 1 可以看出,直方图均衡化和 Retinex 的方法均能对夜间有雾图像起到一定的增强作用,但是远处区域雾气去除效果不明显,直方图均衡化增强存在明显的过增强,导致远处过亮区域和近处暗区的细节完全丢失。Pei 等人的算法虽然对亮暗区域的细节均有所恢复,但是恢复的颜色明显缺乏生动性; Zhang 等人的算法结果和本文方法恢复结果比较相似,但是在较亮的人工光源处,光源明显扩散,与实际情况不符。

从图 2 可以看出, Meng 等人的算法和 He 等人的算法对夜间图像的去雾效果不是很明显,这是因为这两种算法都是针对白天有雾图像设计的,夜间图像不满足其先验和约束条件。Li 等人的算法有一些去雾的效果,亮区处理的很好,没有光源扩散现象,但是对图像整体的亮度恢复有所欠缺。Zhang 等人的算法能获得较好的细节和亮度,但是路面区域色偏比较严重,且存在严重的亮区扩散效应,铁栏杆的边缘有明显的光晕。相比较而言,本文算法能够获得较好的亮暗细节,颜色鲜艳且符合人眼的主观视觉特性,在灯光等亮区光源扩散现象相对较轻。

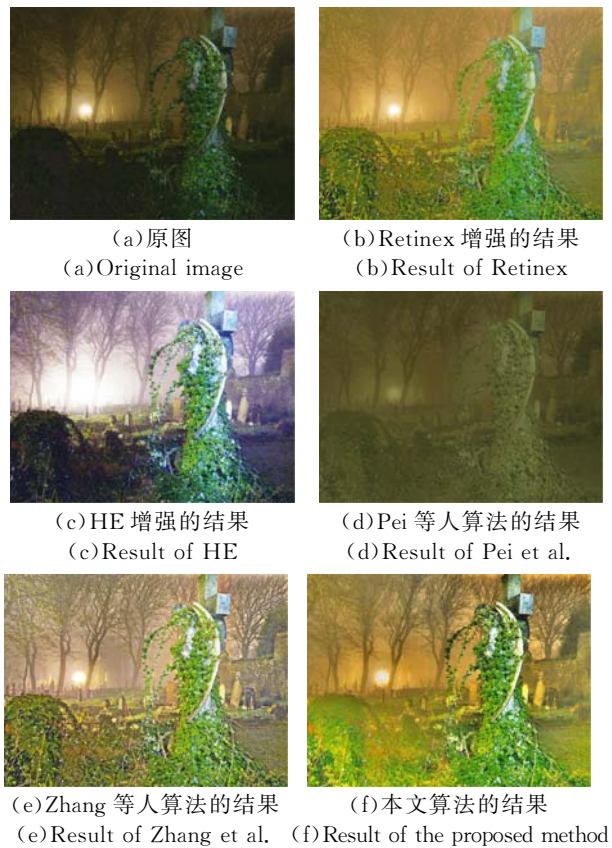


图 1 实验结果比较

Fig. 1 Comparison of experimental results for different methods

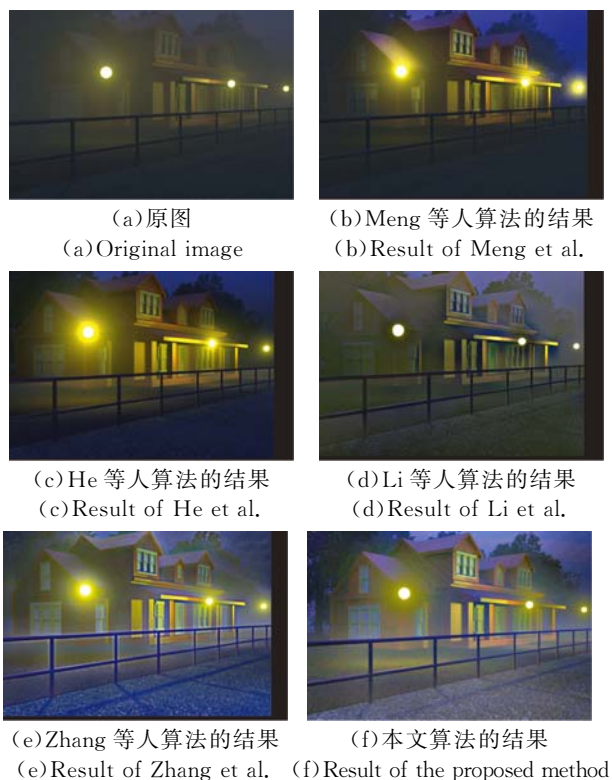


图 2 实验结果比较

Fig. 2 Comparison of experimental results for different methods

5 结 论

本文针对夜间有雾图像环境光照不均匀和局部区域偏暗的特点,构建了适应于夜间有雾图像的退化模型。该模型中的透射率和环境光两个参数是随实际场景的亮度变化而产生空间变化的,通过高斯环绕函数估计出初始的环境光,然后利用信息损耗约束对参数实现粗略估计,随后利用

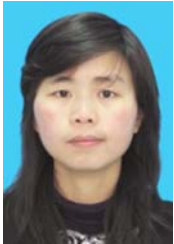
快速导向滤波对参数进行细化,最后求解光照模型,实现夜间有雾图像的去雾。实验结果表明,本文所提出的方法能够较好地实现夜间有雾图像的还原,能够明显提升其对比度,在重现暗区细节的同时能抑制光源发散,能够获得比较好的全局亮度和相对自然鲜艳的颜色;引入快速导向滤波细化的方法和局部观测窗无重叠平移的思想,有效抑制了光晕效应,算法的运算效率和效果明显优于近年来同类型的其它算法。

参考文献:

- [1] FATTAL R. Dehazing using color-lines [J]. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 2014, 34(1): 11-24.
- [2] HE K, SUN J, TANG X. Single image haze removal using dark channel prior [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2011, 33(12): 2341-2353.
- [3] 龚昌来, 罗聪, 申志强. 基于暗原色与逆暗原色融合的含明亮区域图像去雾 [J]. *液晶与显示*, 2016, 31(8): 831-839.
- GONG CH L, LUO C, SHEN ZH Q. Haze removal algorithm for image on dark channel and inverse with bright region based dark channel fusion [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2016, 31(8): 831-839. (in Chinese)
- [4] 肖创柏, 赵宏宇, 禹晶, 等. 基于WLS的雾天交通图像恢复方法 [J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(3): 1080-1084.
- XIAO CH B, ZHAO H Y, YU J, *et al.*. Traffic image defogging method based on WLS [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(3): 1080-1084. (in Chinese)
- [5] ANCUTI C O, ANCUTI C. Single image dehazing by multi-scale fusion [J]. *IEEE Transaction on Image Process*, 2013, 22(8): 3271-3282.
- [6] TAN R T. Visibility in bad weather from a single image [C]. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2008: 1-8.
- [7] KOSCHMIEDER H. *Theorie Der Horizontalen Sichtweite: Kontrast Und Sichtweite* [M]. Keim & Nemnich, 1925.
- [8] WANG J B, NING H, ZHANG L L, *et al.*. Single image dehazing with a physical model and dark channel prior [J]. *Neurocomputing*, 2015, 149: 718-728.
- [9] TENG Y, RIAZ I, JINGCHUN P, *et al.*. Real-time single image dehazing using block-to-pixel interpolation and adaptive dark channel prior [J]. *IET Image Process*, 2015, 9(9): 725-734.
- [10] KIL T H, LEE S H, CHO N I. Single image dehazing based on reliability map of dark channel prior [C]. *ICIP*, 2013, 882-885.
- [11] 宋颖超, 罗海波, 惠斌, 等. 尺度自适应暗通道先验去雾方法 [J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(9): 1-9.
- SONG Y CH, LUO H B, HUI B, *et al.*. Haze removal using scale adaptive dark channel prior [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(9): 1-9. (in Chinese)
- [12] 王凯, 王延杰, 樊博. 基于暗通道先验的图像去雾算法改进 [J]. *液晶与显示*, 2016, 31(8): 840-845.
- WANG K, WANG Y J, FAN B. Improved method for single image dehazing using dark channel prior [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2016, 31(8): 840-845. (in Chinese)
- [13] PEI S-C, LEE T Y. Nighttime haze removal using color transfer pre-processing and dark channel prior [C]. *2012 19th IEEE International Conference on Proceedings of the Image Processing (ICIP)*, 2012: 957-960.
- [14] ZHANG J, CAO Y, WANG Z. Nighttime haze removal based on a new imaging model [C]. *2014 IEEE International Conference on Proceedings of the Image Processing (ICIP)*, 2014: 4557-4561.
- [15] LI Y, TAN R T, BROWN M S. Nighttime haze removal with glow and multiple light colors [C]. *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision*, 2015: 226-234.
- [16] HE K, SUN J. Fast guided filter [J]. *arXiv preprint arXiv:150500996*, 2015:1-2.
- [17] MCCARTNEY E J. Optics of the atmosphere:

- scattering by molecules and particles [J]. *New York, John Wiley and Sons, Inc*, 1976:23-32.
- [18] 邓莉. 针对明亮区域的自适应全局暗原色先验去雾 [J]. *光学精密工程*, 2016, 24(4): 892-901.
- DENG L. Adaptive image dehazing for bright areas based on global dark channel prior[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(4): 892-901. (in Chinese)
- [19] JOBSON D J, RAHMAN Z U, WOODSELL G. A multiscale retinex for bridging the gap between color images and the human observation of scenes [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1997, 6(7): 965-976.
- [20] 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 and Image Representation*, 2013, 24(3): 410-525.
- [21] YU S, ZHU H, WANG J, *et al.*. Single sand-dust image restoration using information loss constraint [J]. *Journal of Modern Optics*, 2016, 1-10.
- [22] GHOSH S, CHAUDHURY K N. On fast bilateral filtering using fourier kernels [J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2016, 23(5): 570-573.
- [23] HE K, SUN J, TANG X. Guided image filtering [C]. *Computer Vision-ECCV 2010. Springer*, 2010: 1-14.
- [24] ZHANG J, CAO Y, WANG Z. Nighttime haze removal with illumination correction [J]. *ARX-IV*, 2016, 1-14.
- [25] MENG G F, WANG Y, DUAN JY, *et al.*. Efficient image dehazing with boundary constraint and contextual regularization [C]. *2013 IEEE International Conference on Proceedings of the Computer Vision (ICCV)*, 2013: 617-624.

作者简介:



余顺园(1982—),女,湖北仙桃人,博士研究生,讲师,2008年于西安交通大学获得硕士学位,2013年至今于西安理工大学攻读博士学位,主要从事模式识别,图像复原和增强,大气粒子散射机理等方面的研究。E-mail: ysywzhm@163.com



朱虹(1963—),女,浙江嘉兴人,教授,博士生导师,1991年于陕西机械学院获得硕士学位,1999年于日本福井大学获得博士学位,主要从事视频分析、深度学习、图像增强与复原等方面的研究。E-mail: zhuhong@xaut.edu.cn