

文章编号: 2096-1618(2020)01-0031-05

基于暗通道先验理论及其改进算法的夜间图像增强处理

包兆华^{1,2}, 高瑜翔^{1,2}, 夏朝禹^{1,2}, 郭春妮^{1,2}

(1. 成都信息工程大学通信工程学院, 四川 成都 610225; 2. 气象信息与信号处理四川省高校重点实验室, 四川 成都 610225)

摘要:针对现有夜间图像增强处理算法对夜间图像处理时图像存在暗区域过度增强、噪声同样被放大及图像失真等导致图像质量变差的情况,结合夜间图像的特点,提出将暗通道先验理论应用于夜间图像增强处理,并对暗通道先验算法中大气光值和初始透射率计算方法进行改进,同时引入导向滤波完善图像细节部分的增强。实验结果表明,基于暗通道先验理论的改进算法对夜间图像处理不仅有很好的视觉效果,在图像结构相似度(SSIM)和图像峰值信噪比(PSNR)也有明显提高,而均方误差(MSE)基本相当。

关键词:图像增强;暗通道先验;大气光值;初始透射率;导向滤波

中图分类号:TP391.4

文献标志码:A

doi:10.16836/j.cnki.jcuit.2020.01.006

0 引言

高质量的图像是图像处理算法获得高性能的前提。在实际运用中,会得到较多的夜间图像或者低照度的图像,因为光照不足或光线亮暗不均使拍摄的图像细节信息不显著或质量差,对后续进行图像算法处理有较大的影响。

国内外学者已经对夜间图像增强算法做了大量研究,处理夜间图像的传统方法是直方图均衡,该算法增强夜间图像的同时噪声也会同时增大,影响最终的增强效果。李宏宇等^[1]提出基于传统颜色恢复函数改进的Retinex算法,但是存在亮区域过度增强的情况。Lin等^[2]提出一种基于改进色彩恢复的多尺度视网膜(MSRCR)的夜间视频增强算法,由于Retinex系列算法在处理彩色图像时分别对R、G、B 3个通道进行处理,这样处理会破坏RGB 3个通道之间的联系,最直观的结果是处理后的图片存在失真现象。Dong等^[3]通过对夜间图像和雾天图像统计分析发现夜间反转图像与雾天图像有着近乎相同的像素分布,提出将去雾算法运用于夜间图像增强,有效提高对比度和增强可视化细节,但是没有考虑不同光照下的情况,不能自适应的处理图像。朱俊^[4]提出基于Retinex的改进夜视高光抑制视频增强算法,该算法在图像可视化细节上有较大缺失。He等^[6]的暗通道先验算法在图像去雾性能上有优异的表现,但是没有将其运用于夜间图像处理。

为了解决以上不足,受到Dong等^[3]通过对夜间

图像和雾天图像统计分析的启发,提出一种将去雾的暗通道先验算法运用于夜间图像增强处理的算法。基本过程包括:根据夜间图像的特点,首先将夜间图像从RGB颜色空间转换到HSV颜色空间,以解决在RGB颜色空间处理图像会破坏RGB 3个通道之间的联系的问题;其次对HSV 3个通道分别进行BM3D去噪,解决处理图像的同时会将噪声增强的问题;然后将V通道取反后使用导向滤波结合改进的暗通道先验算法对V通道进行处理,去掉取反V通道中存在的暗区域,运用导向滤波后的细节图像对V通道图像细节进行增强,将V通道再次进行取反,得到增强处理的夜间图像;最后将该图像从HSV颜色空间转换到RGB颜色空间,即可得到处理后的夜间图像。

1 暗通道先验基本模型

在处理雾天图像时,运用最广泛的是Koschmieder^[5]提出的大气粒子散射成像模型,模型主要由场景反射光线的衰减模型和周围光照的散射引起的环境光模型两部分,模型可表示为

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

其中, $J(x)$ 表示无雾图像; A 是大气光值; x 表示像素在照片中的位置; $t(x)$ 是透射率,反映物体反射光线避免散射的能力, $I(x)$ 表示原图像。

暗通道先验理论认为:在绝大多数的非天空的局部区域中,总会有至少一个颜色通道的像素具有很低的值。通过对式(1)进行变换得

$$\frac{I^c(x)}{A^c} = t(x) \frac{J^c(x)}{A^c} + (1-t(x)) \quad (2)$$

式中假设 $t(x)$ 在图像的局部区域是固定的,且大气光值 A 是常量, c 表示 3 个不同的图像通道,给式(2)两边取两次最小运算,可得

$$\min_{V \in \varphi(x)} \left(\min \frac{I^c(x)}{A^c} \right) = t(x) \min_{y \in \varphi(x)} \left(\min \frac{J^c(y)}{A^c} \right) + (1-t(x)) \quad (3)$$

其中, $\varphi(x)$ 表示在图像中的局部区域, $J(x)$ 代表无雾图像, c 表示 3 个不同的图像颜色通道。暗通道先验理论认为暗通道为由 3 个颜色通道中像素值最小的点组成,可得

$$J^{\text{dark}}(x) = \min \left(\min \frac{I^c(x)}{A^c} \right) \quad (4)$$

暗通道先验理论指出 $J^{\text{dark}}(x)$ 趋近于 0。由暗通道先验理论可以计算出透射率 $t(x)$,从而得到无雾的图像:

$$J(x) = \frac{I(x) - A}{t(x)} + A \quad (5)$$

2 暗通道先验改进算法

对于雾天图像其细节更少、更加平滑,也比较符合暗通道理论假设,而在处理夜间图像时,因为夜间图像总存在极其暗的区域,通过现有算法计算得到的大气光值偏大,很难符合暗通道理论假设。传统暗通道先验理论算法主要用于去雾算法处理,因此将暗通道先验理论算法运用于夜间图像处理需要对大气光值估计、初始透射率估算两部分进行必要改进。

2.1 大气光值估计改进

大气光值 A 就是待处理图像像素的透明度中最高值。Tan 等^[9]找到整幅图像中最亮的点作为大气光值,He 等^[6]通过计算暗通道中前 0.1% 像素点的像素值,找出其最高值,用作大气光值,此方法在处理图像时在大多时候都会得到很大的大气光值,而造成恢复的图像效果较差。为解决这个问题,将图片分成几个区域,分别计算各个区域暗通道中前 0.1% 像素点的像素值,找到其中的最高值作为该区域大气光值,然后取几个区域的大气光值的平均值作为整个图像的大气光值。由于整幅图像的某个区域中可能存在大气光值很大的情况,因此需要设置一个大气光值阈值,使得到的值不超过该阈值,文中设置为 240。

2.2 初始透射率估算改进

投射率的表达式为

$$t(x) = e^{-\beta d(x)} \quad (6)$$

其中 β 是散射系数, $d(x)$ 表示拍摄设备到拍摄物体的距离。暗通道假设的是在小块的区域内投射率是固定值,但是从式(6)可知,图片中有距离变化时投射率随着距离改变,导致增强过后的图片中有距离变化的区域产生过度增强的情况。为解决该问题,除了图片中有很大的距离改变的区域,其他区域不该保留过多的细节信息。因此使用导向滤波去掉图片中细节的东西并保持边缘使其符合暗通道假设。

$$I_{\text{dark}}^{\text{smooth}} = \text{guid}(I_{\text{inv}}^{\text{dark}}(x)) \quad (7)$$

其中 $I_{\text{dark}}^{\text{smooth}}$ 是 $I_{\text{inv}}^{\text{dark}}(x)$ 经过导向滤波平滑过的图像。将 $I_{\text{dark}}^{\text{smooth}}$ 用于计算透射率,得到初始透射率为

$$t(x) = 1 - w \min_{v \in \varphi(x)} \left(\min \frac{I_{\text{dark}}^{\text{smooth}}}{A} \right) \quad (8)$$

其中 $\varphi(x)$ 选用的是 3×3 的窗口。加入 w 是因为考虑到大气透视现象的存在,如果完全移除暗区域,图像看起来会不自然并且可能丢失深度信息,所以对远处的对象保留少量的暗像素,于是在式(8)中引入了参数 w ,取值为 0.95。

3 整体算法流程及推导

整体算法流程如图 1 所示,首先对图像进行 RGB 颜色空间到 HSV 颜色空间的转换,再对 3 个通道进行 BM3D 滤波处理,并对 V 通道取反,得到 V 通道的反转图像。

$$I_{\text{inv}}^v(x) = 255 - \text{BM3D}(I^v(x)) \quad (9)$$

其中, BM3D 为一种滤波方法, V 为颜色通道, $I_{\text{inv}}^v(x)$ 为 V 通道取反后的图像。

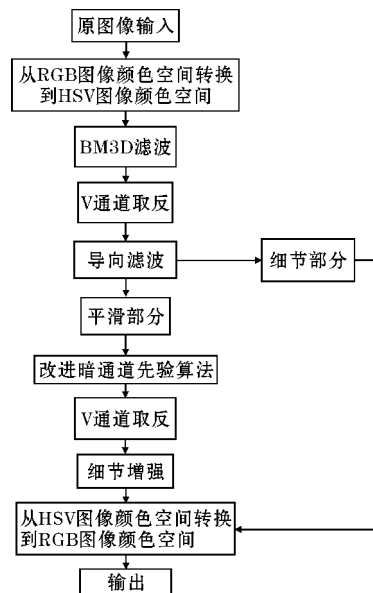


图1 算法流程图

对式(9)反转图 $I_{inv}^V(x)$ 求局部最小值,得到反转图像对应的暗通道图像,如式(10)所示:

$$I_{inv}^{dark}(x) = \min_{y \in \varphi(x)} (I_{inv}^V(y)) \quad (10)$$

通过 $I_{inv}^{dark}(x)$ 估算出大气光值 A 。

使用引导滤波去掉图片中细节的东西并保持边缘使其符合暗通道假设;引导滤波的另一个作用是可以再次更加有效的滤除噪声,并可以得到图像的细节信息以用于后面的增强处理。 $I_{inv}^{dark}(x)$ 经过导向滤波得到平滑过后的图像,具体形式为

$$I_{dark}^{smooth} = \text{guid}(I_{inv}^{dark}(x)) \quad (11)$$

$$I_{dark}^{details} = I_{inv}^{dark}(x) - \text{guid}(I_{inv}^{dark}(x)) \quad (12)$$

其中 I_{dark}^{smooth} 是 $I_{inv}^{dark}(x)$ 经过导向滤波平滑过的图像, $I_{dark}^{details}$ 是导向滤波滤除的细节。将 I_{dark}^{smooth} 用于估算透射率,得到初始透射率为

$$t(x) = 1 - w \min_{y \in \varphi(x)} \left(\min \frac{I_{dark}^{smooth}}{A} \right) \quad (13)$$

文中 $\varphi(x)$ 选用的是 3×3 的窗口。加入 w 是因为考虑到大气透视现象的存在,如果完全移除暗区域,图像视觉会表现得不自然并且可能丢失深度信息,所以需要对外部的对象保留少量的暗像素,于是在式(13)中引入了恒参 w ,取值为0.95。

将夜间 V 通道图像反转,结合上文得到的大气光值和透射函数,可得到反转的增强结果:

$$J_{inv}^V = \frac{I_{inv}^V(x) - A}{\max(t(x)t^*)} + A \quad (14)$$

其中, t^* 的设定是为了避免分母出现零,文中设为0.01或0.02。 J_{inv}^V 为 V 通道去除黑暗后的图像。

在处理过程中会损失一些细节信息,因此将 J_{inv}^V 加上 $I_{dark}^{details}$ 将补全损失的细节信息,达到增强可视化细节的目的:

$$J = w \times I_{dark}^{details} + J_{inv}^V \quad (15)$$

其中 w 为细节的权重,文中 $w = 2.5$,将式(15)中的 J 进行反转,得到处理过的夜间图像的 V 通道,最后将图像从 HSV 颜色空间转换到 RGB 颜色空间。

4 实验结果与数据分析

为了验证文中算法优于其他现有算法,在夜间场景下和低照度场景下分别对算法进行验证。首先,采用基于 HSV 空间的直方图均衡技术对图像进行处理;接着采用基于颜色复原的多尺度 Retinex (MSRCR) 算

法对图像进行处理;同时,采用 He 的暗通道先验算法对图像进行处理;最后,使用导向滤波进行细节增强对图像进行处理。5 种算法处理的结果如图 2 ~ 3,可以看出,使用直方图均衡算法处理后的图像对比度较低,受到噪声的影响较大,在增强图像的同时放大了噪声,在光亮区域部分变白,视觉效果非常差;使用 MSRCR 算法处理后的图像对比度较直方图均衡算法有很大的提升,但是处理后的图像整体色彩仍然不符合人眼的视觉感知,图像光照度太低时受到的噪声的影响较大,在高光照时有过度增强的情况;He 的算法效果与 MSRCR 算法相似,处理后的图像整体色彩仍然不符合人眼的视觉感知,其中的主要原因是因为在 RGB 3 个颜色通道分别处理图像破坏了颜色间的相互联系,在图像光照度太低,会受到噪声的影响较 MSRCR 算法小;文中算法处理后的图像整体色彩比较自然,阴影部分和光照部分像素差距适中,符合人眼的视觉感知,有很好的抗噪性能。图 4 是从场景 2 中提取出的部分细节,可以看出文中算法抗噪性能好,细节清晰。综上所述,文中算法在处理夜间图像(图 2)及处理低照度图像(图 3)上都优于现有算法。

图像处理的指标主要有图像结构相似度(SSIM)、峰值信噪比(PSNR)、均方误差(MSE)3 个指标,表 1 ~ 3 给出了已有算法与文中算法对应的 3 个指标的对比值,其中图像结构相似度(SSIM)和图像峰值信噪比(PSNR)值越大表示增强后的图像越清晰,均方误差(MSE)越小图像质量越高。

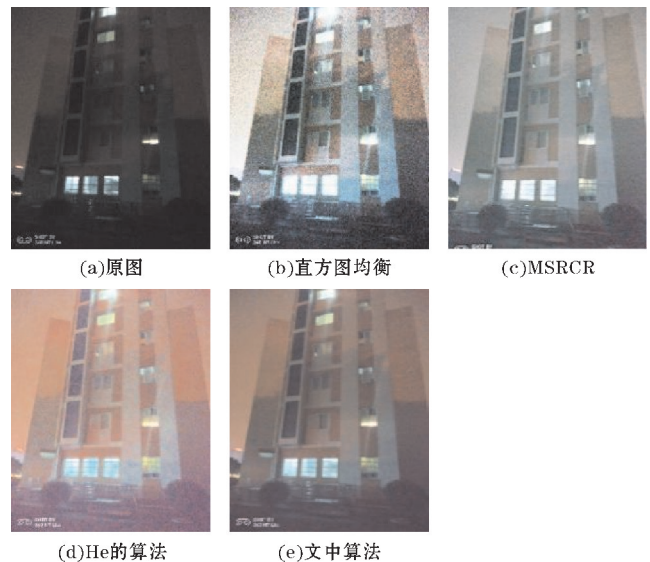


图 2 场景 1(夜间)图像处理结果对比图



图3 场景2(低照度)图像处理结果对比图

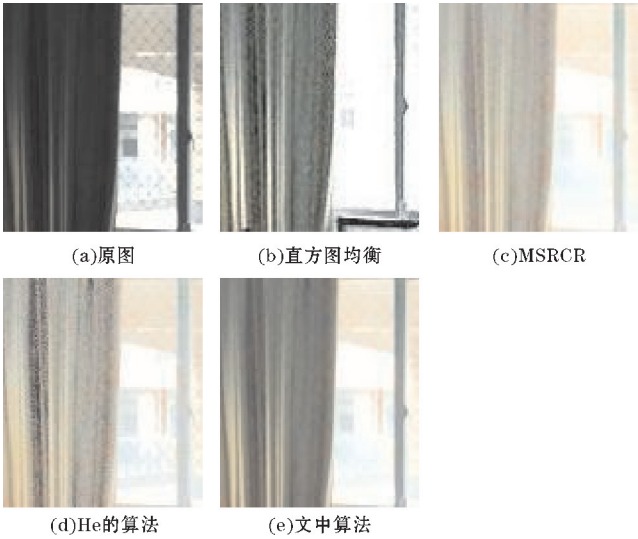


图4 场景2部分细节对比图

表1 数据结构相似度(SSIM)对比

	直方图均衡	MSRCR	He 的算法	文中算法
场景 1	0.2683	0.1647	0.2388	0.4209
场景 2	0.2314	0.1178	0.2189	0.4069

由表1可得,文中图像结构相似度(SSIM)指标明显高于其他现有算法,文中图像结构相似度指标比最高的直方图均衡在场景一高0.1526,比场景二高0.1755,整体表明文中算法处理后的图像失真最小。

表2 峰值信噪比(PSNR)

	直方图均衡	MSRCR	He 的算法	文中算法
场景 1	8.5567	8.1946	6.4000	11.5835
场景 2	8.83391	7.8650	6.6714	12.0295

由表2可得,文中图像峰值信噪比指标明显比现有其他算法大,使用导向滤波的指标优于未使用的导

向滤波算法,表明使用导向滤波可以改善图像的质量;整体表明文中算法图像对噪声的处理优于现有算法,处理后的图像质量更优。

表3 均方误差(MSE)

	直方图均衡	MSRCR	He 的算法	文中算法
场景 1	0.2854	7.2727	0.0754	0.0591
场景 2	0.24	7.2631	0.0760	0.0759

由表3可得,文中图像均方误差指标比现有其他算法小,表明文中算法处理后的图像失真小,MSRCR算法的失真最严重,就是因为分别在3个颜色空间对图像处理破坏了颜色空间的联系。表1、表2、表3从客观角度证明文中算法可以有效增强夜间图像。

5 结束语

针对现有夜间图像增强算法在处理夜间图像时存在图像各种失真问题,通过暗通道先验理论及其大气光值和初始透射率计算方法的改进,仿真实验的效果与指标值在主观及客观方面都表明,文中算法在处理夜间图像及低照度图像时的整体指标优于现有算法,处理后的图像对比度高、色彩自然,更符合人眼视觉。

参考文献:

[1] 李宏宇,朱一峰,黄怡. 基于 Retinex 改进的夜间图像增强算法[J]. 长春理工大学学报(自然科学版),2018,41(6):104-108.

[2] Lin H N, Shi Z W. Multi-scaleretinex improvement for nighttime image enhancement[J]. Optik International Journal for Light and Electron Optics, 2014, 125(24): 7143-7148.

[3] Dong X, Wang G, Pang Y, et al. Fast efficient algorithm for enhancement of low lighting video [C]. Proceedings of the 12th IEEE International Conference on Multimedia and Exposition. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2011.

[4] 朱俊. 基于 Retinex 的改进夜视高光抑制视频增强算法[J]. 计算机与数字工程,2018,46(6): 1208-1211.

[5] Koschmieder H. Theorie der Horizontalen Sichtweite[J]. Beitr Phys Freien Atm, 1925,12: 171-181.

[6] He K M, Sun J, Tang X O. Single image haze removal using dark channel prior[C]. Proceedings of

- IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. LosAlamitos: IEEE Computer Society Press, 2009: 1956–1963.
- [7] He K M, Sun J, Tang X O. Guided image filtering [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2013, 35(6): 1397–1409.
- [8] 高银, 云利军, 石俊生, 等. 基于各向异性高斯滤波的暗原色理论雾天彩色图像增强算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2015, 27(9): 1701–1706.
- [9] Tan R T. Visibility in bad weather from a single image[C]. Proceedings of the 26th IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2008.
- [10] 张红颖, 袁晓鹏. 基于 YUV 色彩空间的 Retinex 夜间图像增强算法[J]. 科学技术与工程, 2014, 14(30): 71–75.

Night Image Enhancement Algorithm based on Improved Dark Channel Prior Method

BAO Zhaohua^{1,2}, GAO Yuxiang^{1,2}, XIA Chaoyu^{1,2}, GUO Chunni^{1,2}

(1. College of Communication Engineering, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China; 2. Meteorological Information and Signal Processing Key Laboratory of Sichuan Higher Education Institutes, Chengdu 610225, China)

Abstract: When the image is processed by the existing night image enhancement processing algorithm, the image quality is deteriorated due to excessive enhancement of dark area, amplification of noise and image distortion, in this paper, combining the characteristics of the image at night, put forward the views that applying the prior theory of the dark channel to image enhancement processing at night, and the dark channel prior algorithm in atmospheric optical value calculation method and the initial transmission rate were improved also, guided filtering is introduced to improve the enhancement of image details. Experimental results show that the improved algorithm based on the dark channel prior theory not only has a good visual effect on night image processing, but also significantly improves the image structure similarity (SSIM) and image peak signal to noise ratio (PSNR), and the mean square error (MSE) is basically the same.

Keywords: image enhancement; dark channel prior; atmospheric light value; initial transmittance; orientation filter