

基于全尺度 Retinex 算法的夜间图像去雾

徐兴贵^{1,2,3}, 杨 平¹, 刘永利³

(1 中国科学院 光电技术研究所 自适应光学重点实验室, 四川 成都 610209; 2 电子科技大学 光电信息学院, 四川 成都 610054; 3 武警警官学院, 四川 成都 610213)

摘 要: 提出了一种基于全尺度 Retinex 算法的夜间图像去雾处理模型。首先由暗原色先验理论估计图像的全局透射率, 接着将透射率估计值映射为全尺度的环绕函数进而求取照度分量, 最后基于 Retinex 原理进行去雾处理。实验结果表明, 该方法能够有效地处理各种夜间非均匀照明条件下的有雾图, 同时还能获得图像的全尺度透射率图信息。

关键词: 夜间图像; 去雾; 图像增强; 图像复原; 照明度

中图分类号: TP751.1; TH391.4

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2017)07-0132-05

Night Image Dehazing Based on Full-scale Retinex Algorithm

XU Xing-gui^{1,2,3}, YANG Ping¹, LIU Yong-li³

(1 Key Laboratory on Adaptive Optics, Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China; 2 School of Optoelectronic Information, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China; 3 Armed Police College of CAPF, Chengdu 610213, China)

Abstract: In this paper a novel nighttime image dehazing model based on the full-scale Retinex algorithm is proposed. We firstly estimate the global transmissivity of the image based on the dark prior theory. Then the estimated transmissivity values are mapped to the full-scale surround functions to get the illumination component. Finally, Retinex principle is used to dehaze. This method can be used to deal with various nighttime under foggy and inhomogeneous illumination conditions effectively, and to get full-scale transmissivity of the image.

Key words: nighttime image; haze removal; image enhancement; image restoration; illumination

1 引言

在夜间雾、霾等天气条件下, 光源照明度分布不均, 大气中混浊的媒质对光的吸收和散射影响严重, 直接造成所获得图像对比度降低, 清晰度不够, 可辨识度和色彩保真度差等。因此, 夜间图像去雾处理具有重要的意义。

目前, 单幅雾天图像的去雾处理取得了很大的突破^[1]。这些方法可分为两大类: 一类是基于图像增强的方法, 文献[2]提出了多尺度 Retinex 算法, 另一类是基于物理模型的方法^[3-4], 以上的图像去雾方法对白天光照情况下的处理都取得了不同程度的效果, 然而, 对夜间图像去雾的效果则不明显。

针对夜间雾天降质图像去雾处理, 文献[5-7]提出一种夜间去雾模型, 这些方法取得了较好的效果, 但也存在一些问题。

综合分析, 大多白天和夜间条件下的去雾处理方法都是构建模型、参数估计、图像复原、后处理等。鉴于此, 本文提出了一种夜间去雾模型, 先估计出逐点透射率值, 接着构建全尺度环绕函数并估计照度分量和反射分量, 最后进行去雾处理。

2 夜间去雾模型

2.1 白天去雾模型

Koschmieder 提出了经典的大气散射模型^[1], 大多其他去雾模型均由此演变。HE 等^[4]提出了基

于大气散射模型的暗原色先验理论,其模型如下:

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

$$J^{\text{dark}}(x) = \min_{c \in \{r, g, b\}} (\min_{y \in \Omega(x)} (J^c(y))) \approx 0 \quad (2)$$

式中, I 为观测点接收到的光强(即原有雾图); J 为场景点处的辐照度(即去雾后的复原图); A 为大气光, $t(x) = e^{-\beta d(x)}$ 为光路传输率; β 是大气散射系数; $d(x)$ 是景深。从模型中可看出,通过求取 I 与 A 值即可得到复原图像 J 。HE 等通过大量的无雾或晴天图像分析得出暗原色先验规律即式(2)。其中, $\Omega(x)$ 为以 x 为中心的局部区域; J^c 为原图 J 的三个颜色通道。 J^{dark} 的物理意义在于通过局部最小值滤波可得到天空区域外大气光值 A 和传输率 t 的估计。

另一经典模型为 Retinex 理论^[8] 的增强模型:

$$I(x, y) = L(x, y)R(x, y) \quad (3)$$

$$L(x, y) = I(x, y) \otimes F(x, y) \quad (4)$$

式中, $L(x, y)$ 为照射分量, $R(x, y)$ 为反射分量。式(4)中, $L(x, y)$ 由高斯函数 $F(x, y)$ 与原图像 $I(x, y)$ 卷积运算得到。Retinex 的基本思想是照度分量变化缓慢表现为低频,反射分量表现为高频,通过高斯低通滤波即可分离出照度分量进而实现去雾。

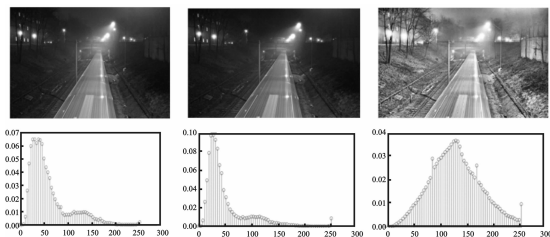
2.2 提出的夜间去雾模型

直接将白天去雾算法应用于夜间去雾处理的效果并不明显,如图 1(b)中去雾前后的图像和直方图所示,文献[4]得到的去雾图视觉效果很差,灰度直方图的值大多分布于 0~150 之间,处理后的图像对比度较低,图像细节模糊严重。

与 ZHANG 等^[7]提出的算法模型不同,我们提出的模型源于 Retinex 增强思想,其数学模型:

$$I_i^\lambda = L_i^\lambda R_i^\lambda = [J_i \otimes F_i(x, y)] \times R_i^\lambda \quad (5)$$

式中, λ 为 RGB 的通道数; L_i 为像素点处的照度分量; R_i 为反射分量即所要求取的无雾图; $F_i(x, y)$ 为所构建的全尺度环绕函数; J_i 为原图 I_i 经简单白平衡处理后的值; $\otimes$ 表示卷积运算。



(a)原图 (b)HE的算法结果 (c)所提算法结果

图1 去雾处理结果及直方图

所提模型得到的去雾处理结果如图 1(c)所示,从视觉效果看,图像细节信息和清晰度都取得很好

效果;从灰度直方图看,灰度值由去雾处理前集中于 0~150 变为处理后集中分布于 50~200,可见去雾处理后的图像对比度和色彩饱和度得到增强。

3 夜间图像去雾算法

根据节提出的夜间去雾模型,本节具体给出了透射率、环绕函数、照度分量和反射分量参数的推导步骤和计算方法,最后的算法流程图能够实现所提的夜间去雾模型。

3.1 透射率估计

根据文献[9]和式(1)、(2),由暗颜色先验理论得出大气透射率分布:

$$t_i = 1 - wJ^{\text{dark}}(i) \quad (6)$$

式中,调节因子 w 取值 0~1 之间,HE 的暗原色先验去雾理论中,引入 w 的目的是为了增强处理结果的自然视觉效果,而有针对性地保留一部分遥远景物的雾,文献[4]在处理白天雾图场景中 w 取值为 0.95,但夜间与白天有雾场景不一样,夜间有雾的景深较短,更小的 w 取值使得大气透射传输分量 t_i 更大,景深的感知能力更强,根据大量实验,本文算法中 w 取 0.65。

3.2 全尺度的环绕函数设计

MSR 算法一般取大、中、小三个尺度进行加权,三个尺度一定程度上兼顾了图像动态压缩范围和颜色保真之间的平衡性,文献[2]中定义三个经验尺度分别为 5,20,240。受此启发,我们根据有雾图不同区域的暗原色值来映射环绕函数的尺度,尺度参数 σ_i 的大小由暗原色传输分量值 t_i 的非线性拟合得到。式(5)中的环绕函数 $F_i(x, y)$ 根据文献[8]定义为

$$F(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_i^2} e^{-\left(\frac{x^2+y^2}{2\sigma_i^2}\right)} \quad (7)$$

式中, σ_i 为尺度参数,与 Retinex 理论中的尺度参数不同,所提算法中的尺度参数是暗通道下的透射率值经指数函数映射得到的全尺度参数,映射公式^[10]如下:

$$\sigma_i = ce^{\beta t_i} \quad (8)$$

式中, c 为常数; β 为调节系数,主要用来调节尺度参数的映射值,去雾过程中雾气越浓则 β 值越小。根据暗原色理论,光路传输率中设定 w 的目的是降低传输率的值,如式(6)所示,进而保留远距离物体带有自然视觉效果的雾,可见 β 与 w 没有必然联系;式(8)中的调节参数 β 决定了尺度参数 σ_i 与传输分量值 t_i 之间的拟合程度,夜间雾天传输分量 t_i 的分布

值主要集中于 40 ~ 225 之间,大量实验中取调节系数 β 为 1/60 时去雾效果最佳. 图 2 下为调节系数取值为 1/60,常数取值为 1 得到的结果.

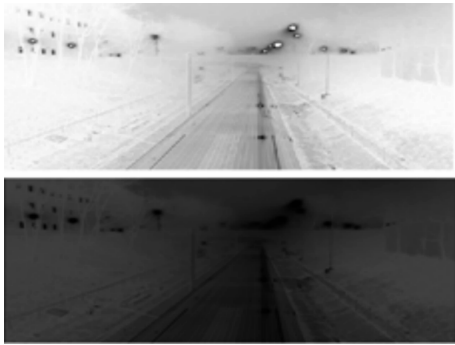


图 2 透射率图及全尺度映射图

图 2 的原图同图 1(a),图 2(上)为根据式(6)得到的透射率图,图 2(下)为映射后得到的全尺度函数图估计. 两者对比可见,根据透射率映射后的全尺度值扩展了图像细节信息,夜间光源周围的传输率控制效果更好.

3.3 去雾处理

去雾处理基于 Retinex 图像增强思想,即先计算照度分量 L_i ,然后估计各通道的反射分量 $\tilde{R}_i^{\lambda}$.

照度分量公式:

$$L_i = J_i \otimes F_i(x, y) \tag{9}$$

反射分量公式:

$$\tilde{R}_i^{\lambda} = \log(J_i^{\lambda}) - \log(\tilde{L}_i^{\lambda}) \tag{10}$$

式(9)、(10)中参数的物理意义与式(3)、(4)类似,分别是 Retinex 理论中的照度分量与反射分量,夜间去雾模型(式 5)的目的是从原图 I 中求得物体表面的反射性质 $\tilde{R}_i^{\lambda}$ (式 10),从而还原出物体的本来面貌. 然而,直接获取物体反射部分是不太可能的,因此先估算入射分量(式 9),再通过运算获得物体的反射性质即为去雾图,运算通常采用对数形式^[1].

不同之处在于照度分量 L_i 和反射 $\tilde{R}_i^{\lambda}$ 是全尺度下的逐像素点估计.

3.4 算法流程

综上,可得出本算法结构框图,如图 3 所示.

由图 3 的算法结构框图和上节的公式推导,算法步骤简单归纳如下.

步骤 1:根据暗原色理论由式(6)求取全局透射率值 t_i ;步骤 2:根据映射函数式(8)构建全尺度的环绕函数 $F_i(x, y)$;步骤 3:根据式(9)和(10)估计照度分量 L_i 和反射分量 $\tilde{R}_i^{\lambda}$;步骤 4:根据夜间去雾

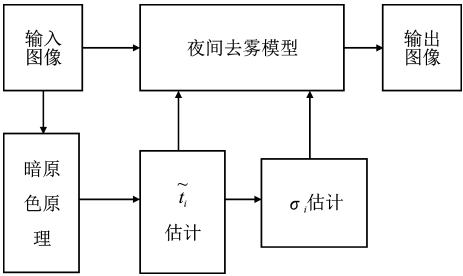


图 3 所提算法结构框图

模型即式(5) 进行去雾处理.

4 实验结果与分析

本文实验平台为 64 位 win7 操作系统, Intel Celeron(R) CPU1. 83 GHz、4 GB 内存, MATLAB2014b,原夜间雾图来自文献[7],图像大小从左至右分别为 $333 \times 500, 500 \times 333, 648 \times 432$,各参数的值均依照 2.3 节中的值设定. 图 4 分别给出了文献[2、4、7]和所提算法的三个夜间雾图的去雾结果.

实验结果表明,文献[2]结果出现过增强现象,夜间图像的雾气没有得到很好的去除. 文献[4]的算法在主观视觉度、清晰度方面最差,这也说明了 HE 的去雾模型不能充分估计夜间图像的大气光值,进而不能有效地进行夜间图像去雾. 文献[7]和本文所提算法去雾结果明显好于文献[2、4],但文献[7]中出现了一定程度的假色彩,文献[4]的去雾图中出现一层淡淡的蓝光.

根据文献[1]的方法,用图像信息熵、平均梯度、边缘密度、对比度等四个客观评价指标对各种去雾算法对比分析. 表 1、表 2、表 3 分别为评价结果,其中对比度为各去雾结果与原图的对比.

表 1 图 4 左的去雾结果评价

去雾算法	信息熵	平均梯度	对比度	边缘密度
原图	12.774 1	0.011 6	1	0.106 3
文献[2]的算法	14.102 4	0.027 1	1.847 4	0.244 5
文献[4]的算法	13.789 2	0.014 9	1.075 2	0.130 2
文献[7]的算法	16.710 8	0.052 2	0.672 0	0.472 2
本文算法	16.848 4	0.054 5	0.473 6	0.476 1

表 2 图 4 中的去雾结果评价

去雾算法	信息熵	平均梯度	对比度	边缘密度
原图	13.366 5	0.018 4	1	0.132 7
文献[2]的算法	14.102 4	0.059 9	2.713 1	0.432 2
文献[4]的算法	13.789 2	0.021 0	0.985 6	0.152 9
文献[7]的算法	16.710 8	0.068 6	1.159 2	0.502 3
本文算法	16.848 4	0.070 9	1.320 8	0.518 5



图 4 去雾处理结果

表 3 图 4 右的去雾结果评价

去雾算法	信息熵	平均梯度	对比度	边缘密度
原图	15.748 8	0.016 1	1	0.172 2
文献[2]的算法	15.217 8	0.016 9	7.054 3	0.175 2
文献[4]的算法	15.751 2	0.018 6	0.795 9	0.195 2
文献[7]的算法	17.605 9	0.042 5	0.914 2	0.439 4
本文算法	17.654 3	0.046 2	0.972 8	0.479 4

从客观评价结果看,本文算法的去雾结果在图像信息熵、平均梯度、对比度、边缘密度方面都明显优于文献[2]和文献[4]的算法,值得注意的是文献

[2]得到的对比度值都比其他算法高,但其出现我们所不希望的过增强结果.另外,所提算法总体指标优于文献[7]的算法,本文算法的参数设置较简单,没有采用文献[7]中复杂的光线补偿和颜色校正技术对原图预处理.

5 结束语

本文针对夜间有雾图存在对比度低、图像清晰度差、光照强度不均匀等问题,提出了一种夜间去雾

模型。实验结果表明,利用所提算法去雾处理后的夜间图像视觉清晰度高,信息熵、平均梯度、边缘密度等评价指标优于 HE^[4] 及多尺度的 Retinex^[2] 算法,参数设置较 ZHANG^[7] 的算法简单。本文算法能够对夜间光照不均、光照不足、图像特征模糊等场景下的有雾图进行有效处理。下一步需改进方面:尝试去雾结果的后处理,提高去雾结果的色彩视觉效果。

参考文献:

- [1] 吴迪,朱青松. 图像去雾的最新研究进展[J]. 自动化学报, 2015, 41(2):221-239.
- [2] RAHMAN Z U, JOBSON D J, WOODALL G A. Retinex processing for automatic image enhancement [J]. Electronic Imaging, 2004, 13(1):100-110.
- [3] TAREL J P, Hautière N. Fast visibility restoration from a single color or gray level image[J]. Proceedings, 2009, 30(2):2201-2208.
- [4] 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.
- [5] PEI CHANG S, Lee T Y. Nighttime haze removal using color transfer pre-processing and Dark Channel Prior[C]// IEEE International Conference on Image Processing. IEEE, 2012, 8556:957-960.
- [6] LI Y, TAN R T, BROWN M S. Nighttime Haze Removal with Glow and Multiple Light Colors [C]// IEEE International Conference on Computer Vision. IEEE, 2015:226-234.
- [7] Zhang J, Cao Y, Wang Z. Nighttime haze removal based on a new imaging model[C]// Image Processing, 2014. IEEE, 2014:4557-4561.
- [8] RAHMAN Z, JOBSON D J, Woodell G. A. Multi scale retinex for color image enhancement [C]// Proceedings of the International Conference on Image Processing. Switzerland: IEEE Press, 1996:1003-1006.
- [9] TAN R T. Visibility in bad weather from a single image [C]// IEEE Conference on Computer Vision & Pattern Recognition. IEEE, 2008:1-8.
- [10] 汪荣贵,张璇. 一种新型自适应 Retinex 图像增强方法研究[J]. 电子学报, 2010, 38(12):2933-2936.

作者简介:

徐兴贵 男, (1985-), 博士研究生, 助教. 研究方向为光电信号处理、图像增强与识别.

E-mail: xu_xingguai@126.com.

杨平 男, (1981-), 博士, 研究员. 研究方向为高速实时信号处理.

刘永利 男, (1987-), 硕士, 助教. 研究方向为模式识别与图像处理.

(上接第 131 页)

图像数据采用小波降噪方法进行提纯预处理, 然后采用小波尺度分解方法进行图像数据抗干扰信息的特征提取和分层映射, 提高图像数据信息的融合深度. 最后进行仿真测试, 结果表明, 采用该方法进行多尺度纹理图像数据抗干扰信息映射, 能提高图像数据的提取精度, 鲁棒性较强.

参考文献:

- [1] 于涛, 胡炳樑, 高晓惠, 等. 高光谱干涉图像动态追踪补偿方法研究[J]. 光子学报, 2016, 45(7):0710003.
- [2] 许宁, 肖新耀, 尤红建, 等. HCT 变换与联合稀疏模型相结合的遥感影像融合[J]. 测绘学报, 2016, 45(4):434-441.
- [3] 徐光宪, 徐山强, 郭晓娟, 等. DCT 变换与 DNA 运算相结合的图像压缩加密算法[J]. 激光技术, 2015, 39(6):806-810.
- [4] 张鹏, 张志辉. 基于分段直方图变换的图像非线性增强[J]. 光子学报, 2014, 43(增刊 1):0110002.
- [5] 肖淑苹. 基于改进的进化概率神经网络的纹理图像识别[J]. 电子设计工程, 2016, 24(16):184-186.
- [6] 涂超平, 肖进胜, 杜康华, 等. 基于各向异性热扩散方程的多聚焦图像融合算法[J]. 电子学报, 2015, 43(6):1192-1199.
- [7] 丁勇, 李楠. 基于高维度特征分析的非局部图像质量评价方法[J]. 电子与信息学报, 2016, 38(9):2365-2370.
- [8] BDI H, WILLIAMS L J. Principal component analysis [J]. Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics, 2010, 2(4):433-459.
- [9] 杨建峰, 赵涓涓, 强彦, 等. 结合区域生长的多尺度分水岭算法的肺分割[J]. 计算机工程与设计, 2014, 35(1):213-217.
- [10] 代双凤, 吕科, 翟锐, 等. 基于 3D 区域增长法和改进的凸包算法相结合的全肺分割方法[J]. 电子与信息学报, 2016, 38(9):2358-2364.

作者简介:

周雪燕 女, (1978-), 硕士研究生, 讲师. 研究方向为图形图像处理、大数据. E-mail: hht2006@126.com.

孔梦荣 女, (1973-), 硕士研究生, 讲师. 研究方向为大数据、图形图像处理.

杨关 男, (1974-), 博士研究生, 副教授. 研究方向为图像处理、机器学习和模式识别.