

# 基于多光源模型的夜晚雾天图像去雾算法

郭 璠, 邹北骥, 唐 璠

(中南大学信息科学与工程学院, 湖南长沙 410083)

**摘 要:** 依据夜间多光源导致强光处能见度低的现象, 在传统大气散射模型中定义发光因子项, 构建了一个专门针对夜晚雾天图像的去雾模型, 在此基础上提出了一种夜晚雾天图像去雾算法. 该算法将原输入图像分解为新雾天图像层和发光图像层, 然后对此分解得到的新雾天图像层进行色偏纠正和引导滤波操作以得到最终的去雾结果. 与暗原色原理方法、快速中值滤波方法、图像颜色迁移方法、夜晚成像模型方法等已有方法的对比实验证实了本文算法的有效性. 该算法可应用于汽车防碰撞系统、道路监控系统, 以及其他识别系统.

**关键词:** 夜晚; 图像; 去雾; 多光源; 发光图像

**中图分类号:** TP399      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0372-2112 (2017)09-2127-08

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>      **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2017.09.011

## Nighttime Image Defogging Based on Multiple Light Source Model

GUO Fan, ZOU Bei-ji, TANG Jin

(School of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha, Hunan 410083)

**Abstract:** Multiple light sources cause the low visibility in the brightest region in nighttime images, a glow term was defined in the traditional atmospheric scattering model. A defogging model was constructed for nighttime foggy images. Based on the model, a nighttime image defogging algorithm was proposed. The algorithm decomposed the original image into a nighttime foggy image layer and a glow image layer, and then the color-shift correction operation and the guided filter were applied for the foggy image layer. Thus, the defogging results can be obtained. Comparisons with dark channel prior method, fast median filter method, image color transfer method, and nighttime imaging model method verified the effectiveness of the proposed algorithm. This algorithm can be applied in such devices as vehicle collision avoidance systems, traffic surveillance systems, and other recognition systems.

**Key words:** nighttime; image; defogging; multiple light source; glow image

## 1 引言

夜晚雾天情况下拍摄的图像往往缺乏视觉生动感, 且场景对象的能见度较低. 此外, 由于受到夜晚多光源的影响, 有可能导致图像中强光附近的场景区域能见度受到衰减. 因此, 如何自动、实时地有效消除雾气及强光源对夜晚图像中场景目标的影响具有重要的理论研究意义和实际应用价值. 针对图像去雾问题, 目前去雾算法<sup>[1-7]</sup>的处理对象主要为日间的雾天图像. 这些工作或是从物理成因, 或是从经验统计的角度, 利用相关先验知识以达到有效去雾的目的. 但大量实验结果表明: 尽管这些去雾方法对于处理日间雾天图像较为

有效, 但却并不适用于对夜晚雾天场景的清晰化处理. 究其原因, 主要是因为传统的大气散射模型并不适用于夜晚雾天场景的情况. 夜晚场景通常具有多种主动光源, 如街灯、车灯、房屋建筑用灯等. 正是由于这些光源的存在, 导致图像中的亮度比实际自然大气光更亮. 因此, 需要专门针对夜晚雾天图像研究新的去雾模型及算法. 目前具有代表性的夜晚雾天图像去雾方法主要有: 图像颜色迁移方法<sup>[8]</sup>、基于图像亮度补偿的方法<sup>[9]</sup>、基于亮度变换模型的方法<sup>[10]</sup>、自动图像衰退检测与退化复原算法<sup>[11]</sup>等. 但上述已有算法均未构建专门描述夜晚雾天成因的去雾新模型, 而本文的主要贡献就在于针对夜晚雾天图像提出了新的物理模型. 该

收稿日期: 2016-01-18; 修回日期: 2016-03-29; 责任编辑: 覃怀银

基金项目: 国家自然科学基金(No. 61502537, No. 61573380); 湖南省科技计划重点研发项目(No. 2015WK3006); 中南大学博士后基金资助项目(No. 126648)

模型通过在传统大气散射模型中引入发光因子,从而更为准确地刻画由夜间图像主动光源所产生的发光效应.依据此新模型,所提算法首先将原输入图像分解为新雾天图像层和发光图像层.在此基础上,再对上述求得的新雾天图像进行色偏纠正操作及引导滤波增强处理<sup>[12]</sup>以得到最终的去雾结果.实验结果表明:由所提算法获得的去雾图像所受发光光源的影响较小,具有较好的清晰化效果,且不会出现图像色偏严重的问题.

## 2 夜晚图像去雾算法

### 2.1 夜晚雾天图像去雾新模型的构建

本文所构建的夜晚雾天图像去雾新模型主要是在传统大气散射模型的基础上,加入对图像中多光源所引起的发光现象的考虑,即引入光源发光因子项,则新构建的夜晚雾天模型主要由三大部分组成:入射光衰减项、大气光成像项、发光因子项.利用该模型,本文算法首先将原输入图像分解为两个图像层,即削弱了夜晚光源影响后的新雾天图像层和反映原夜晚图像光源作用的发光图像层.但由于该新雾天图像层仍然存在雾气的影响,为此所提算法又采用色偏纠正和引导滤波<sup>[5]</sup>操作以进一步改善图像的视觉效果,同时消除该图像中的雾气.由上述分析可知,所构建的夜晚图像去雾新模型主要建立在传统大气散射模型的基础上,此传统模型假设由摄像机所拍摄的大气介质中的光强是传播图和大气光的线性函数<sup>[6,13]</sup>.

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

其中,  $I$  为观测点接收到的光强(即输入的原有雾图像),  $J$  为场景点处的辐照度(即去雾后的复原图像),  $t$  为光路传播图,是一个矩阵,反映光线穿透雾的能力,其值越大,表示从场景表面反射的光线穿透雾到达观测者的数量越多.式(1)中  $J$  与  $t$  相乘组成入射光衰减项,该项描述了光从场景点到观测点之间的削弱衰减过程.  $A(1 - t)$  为大气光成像项,该项主要描述周围环境中的各种光由于大气粒子的散射作用对观测点所接收到的光强的影响.  $A$  为大气光,其代表周围环境中各种光的总强度.对于日间雾天图像而言,大气光主要由天空光以及云层和雾气粒子散射所产生的间接太阳光生

成.给定雾天输入图像  $I$ , 图像去雾的主要目的就是复原出场景的辐照度  $J$ . 但是对于大多数夜晚雾天场景而言,图像中的各种主动光源造成发光现象的出现. Narasimhan 和 Nayar<sup>[14]</sup> 两位学者对此发光现象进行了分析,明确指出此发光现象主要是由经过多次散射最终从不同方向到达观测者的光强所引起的.为此,两位学者将此发光现象建模表示为一个大气点扩散函数.受此启发,本文所构建的去雾新模型即是在传统大气散射模型的基础上加入一个发光因子项来对夜晚雾天场景进行建模,由此其数学表达式如下:

$$I(x, y) = J(x, y)t(x, y) + A(1 - t(x, y)) + L_s(x, y) * \text{APSF} \quad (2)$$

在式(2)中,  $L_s$  为主动光源,其通过与大气点扩散函数 APSF 做卷积以生成图像中的发光因子项<sup>[14]</sup>.除了此额外添加的发光项,传统大气散射模型中的入射光衰减项和大气光成像项均在此新构建模型中保持不变.图1即给出了针对日间雾天图像的传统大气散射模型和针对夜间雾天图像的夜晚雾天成像新模型.对于夜晚雾天场景而言,其光源除了自然大气光,还有从多种主动发光光源中获取的光强,由此导致图像的整体亮度较高.对于如图1(a)所示的传统大气散射模型而言,该模型涉及的主要参数为大气光和光路传播图.其中大气光被假定为具有全局一致性,光路传播图则描述了光从物体或场景点传至相机所拍图像平面的过程.而对于如图1(b)所示的夜晚雾天成像新模型,大气光由于光源的存在不再具备全局一致性,同时该模型除包含入射光衰减项、大气光成像项外,还应添加发光因子项.该发光因子项主要表示光由发光光源经过多次散射,最终从各个不同方向到达相机所拍图像平面的过程.

基于上述构建的去雾新模型,本文提出了一种专门针对夜晚雾天图像的去雾算法,图2即给出了所提夜晚雾天去雾算法流程.从该图可以看出,所提算法主要有三大步骤:一是采用图像层分解操作以从输入图像中分离出初始的新夜晚雾天图像和发光因子项图像;二是对此新雾天图像进行色偏纠正操作以得到相关最终夜晚雾天图像.这主要是因为上述得到的初始雾天

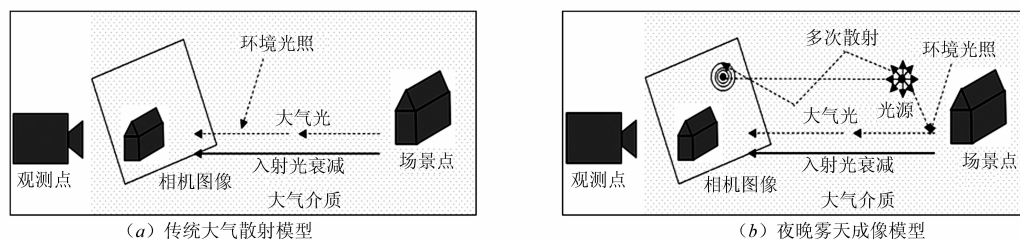


图1 传统大气散射模型与夜晚雾天成像新模型对比

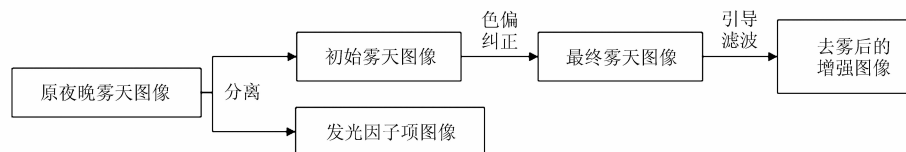


图2 夜晚雾天去雾算法流程示意图

图像往往颜色失真严重,需要通过色偏纠正操作来获得最终颜色较为自然的图像去雾结果;三是对此最终雾天图像采用引导滤波进行图像增强处理,以获得去雾后的增强图像.由此可见,算法的关键在于通过图像层分解得到消除了光源发光项影响的夜晚雾天图像和反映原图像光源影响的发光图像,在此基础上即可采用色偏纠正和引导滤波进行处理以得到最终的去雾图像.

## 2.2 初始雾天图像和发光因子项图像的估计

### 2.2.1 图像层分解的出发点

夜间图像由于受多光源的影响,导致强光处图像模糊严重.夜晚图像中的街灯、车灯、建筑用灯等主动光源都会极大地增强图像中原有大气光的亮度,而由夜晚雾天成像模型中的发光因子项所刻画的主动光源往往在夜晚雾天场景中占主导地位,从而导致主动光源附近的场景对象能见度较低,甚至让人无法看清.其中,此发光因子项主要是由直接到达相机的强光和经由传播介质中的雾气微粒多次散射后到达相机的光强组成,将其定义命名为“发光因子项”以便与场景中的其它对象相区分.对于实际拍摄图像而言,发光因子项对图像光源临近区域及图像亮度的影响尤为显著.同时,由于粒子散射的原因,主动光源的发光亮度会随着离此光源距离的增加而逐渐减退,其对应的发光因子项图像整体较为平滑.因此,为了减轻主动光源强光处的图像模糊问题,提高该区域的能见度,需要从原夜晚雾天图像中分离出较为平滑的发光因子项图像,以获得消除了发光因子项的新雾天图像,进而达到削弱主动光源对所拍图像清晰度的影响的目的.

图3即为通过从原图像中分离发光因子项图像以消除多光源影响的结果示例.从该图中可以看出,发光因子项图像实质上是对原夜晚雾天图像中主动光源的位置、亮度及其影响区域的抽象表征,且此图像整体较为平滑.将此平滑的发光因子项图像从原输入图像中分离即可得到光源影响削弱后的新雾天图像,如图3所示.在此基础上,对该新雾天图像进行后续的色偏纠正及引导滤波增强处理即可得到最终的去雾结果.由此可见,解决夜间多光源所造成的强光处图像模糊问题的关键在于发光因子项图像的求取.

针对发光因子项求取问题,已有研究者提出了各自的发光项计算方法.例如 Narasimhan 和 Nayar<sup>[14]</sup> 通过将光源与由勒让德多项式所表示的大气点扩散函数和

由比尔-朗伯定律所表示的衰退系数做卷积来对发光项进行建模.该模型被用于估计从光源到相机的距离以及 Henyey-Greenstein 散射相位函数的前向散射参数,此参数代表了不同悬浮微粒的散射程度.在估计得到这些参数以后,即可对发光项应用去卷积操作,从而获得对光源作用的效果估计.由于从光源到相机的距离是已知的,由此即可恢复光源附近的场景深度.尽管利用 Narasimhan 和 Nayar 方法能够估计发光项的 APSF 参数,但仅仅进行该操作并非就能增强能见度或从输入图像中分离出发光项.此外,该方法一般假定各光源的位置和区域是已知的,而在实际应用中若要自动获取上述信息往往较为困难.正是由于已有发光项计算方法存在以上诸多问题,本文算法提出利用图像层分解操作,以从原夜晚雾天图像中分离得到发光因子项图像和初始新雾天图像.为了实现此分解过程,式(2)可变换为如下形式:

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



图3 利用发光因子项图像分离消除多光源影响的结果示例

其中,  $\mathbf{R}(x, y) = \mathbf{J}(x, y)\mathbf{t}(x, y) + \mathbf{A}(1 - \mathbf{t}(x, y))$  且  $\mathbf{G}(x, y) = \mathbf{L}_s(x, y) * \text{APSF}$ . 前者  $\mathbf{R}$  表示新夜晚雾天图像层, 或初始新雾天图像. 后者  $\mathbf{G}$  表示发光图像层, 也即发光因子项图像. 依据上述表达式, 求取发光因子项的问题可转化为一个图像层分解问题, 即从原输入图像  $\mathbf{I}$  中估计出相关的两图像层  $\mathbf{J}$  和  $\mathbf{G}$ .

### 2.2.2 基于图像层分解的初始雾天图像及发光图像的求取

如前所述, 由于光源四周存在多散射现象, 其发光亮度会随着离光源距离的增加而逐渐降低, 即发光因子项图像一般具有平滑的特性. 为此, 本文算法在利用图像层分解操作求取发光因子项图像时, 采用的是由 Li 和 Brown 等人提出的图像分层方法<sup>[15]</sup>. 该方法可以有效地从具有不同平滑程度的多层场景中将各层分离出来, 而这些多层场景一般其中某一层比其余图像层更为平滑. 本算法所采用的图像分层方式即将输入图像分解为两层, 其中较为平滑的图像层为发光图像层, 其梯度直方图具有“短尾”分布的特性, “短尾”分布主要是指该分布如同被突然截断一般陡然下降趋近于 0. 尽管发光光源的颜色、形状、发光方向不同, 其对应图像层的梯度直方图均可采用“短尾”分布<sup>[15]</sup>来较好描述. 同时, 由文献<sup>[15]</sup>可知, 若对图像层分解操作建立目标函数, 此目标函数应保证发光层图像较为平滑, 而另一图像层新夜晚雾天图像层则应存在较大的梯度变化. 由此, 可定义夜晚雾天图像  $\mathbf{R}$  的代价函数如下:

$$E(\mathbf{R}) = \sum_x (\rho(\mathbf{R}(x) * f_{1,2}) + \lambda((\mathbf{I}(x) - \mathbf{R}(x)) * f_3)^2) \quad \text{s. t. } 0 \leq \mathbf{R}(i, j) \leq \mathbf{I}(i, j) \quad (4)$$

其中,  $(i, j) = x$  表示图像  $\mathbf{R}$  和  $\mathbf{I}$  中的各个像素值.  $f_{1,2}$  为两个方向的一次偏导滤波,  $f_3$  为二次拉普拉斯滤波, 操作子  $*$  表示卷积. 式(4)右边第二项采用  $L_2$  范数正则化以求取发光图像层  $\mathbf{G}$  的梯度, 即  $\mathbf{G}(x) = \mathbf{I}(x) - \mathbf{R}(x)$ . 而对于等式右边第一项, 算法采用了具有较好鲁

棒性的函数  $\rho(s) = \min(s^2, \tau)$ , 目的是保留原输入图像  $\mathbf{I}$  在图像层分解操作所得到的夜晚雾天图像层  $\mathbf{R}$  中的大规模梯度. 对于函数  $\rho(s)$ , 其参数  $\tau$  为一较小的数值用以增加算法的稳定性, 在实验中本文算法的  $\tau$  值被设置为  $10^{-16}$ . 此外, 上式中的参数  $\lambda$  主要用于控制发光层的平滑度, 实验中  $\lambda$  的值被默认设置为 500. 式(4)中的目标函数可采用已有图像分层方法<sup>[15]</sup>所采用的一次因式分解<sup>[16,17]</sup>来有效求解.

### 2.3 最终雾天图像的估计

大量夜晚雾天图像的测试表明: 若仅仅采用上述操作, 所得到的新雾天图像会出现较为严重的色偏问题, 因此该新雾天图像可视为由算法中间过程得到的初始雾天图像  $\mathbf{R}$ . 对此初始雾天图像还需采用如下方式进行图像色偏的纠正处理, 该过程可表示为:

$$\text{Avg} = \frac{\sum R_{\text{sum}}^l}{3} \quad (5)$$

$$\text{Avg}^l = \text{Avg} / R_{\text{sum}}^l \quad (6)$$

$$R_{\text{final}}^l = (R^l \times \text{Avg}^l) \times 255 \quad (7)$$

式(5)~(7)中  $l$  表示图像的 RGB 三颜色通道,  $R_{\text{sum}}^l$  表示初始雾天图像  $\mathbf{R}$  的各颜色通道的像素值之和, 在 RGB 三颜色通道上分别为一数值. 式(5)将初始雾天图像  $\mathbf{R}$  三颜色通道的像素值之和相加再除以 3 得到图像  $\mathbf{R}$  的一个平均像素值 Avg. 图 4 即给出了色偏纠正前后所生成的新雾天图像视觉效果对比. 从此图中可以看出处理后的图像在三颜色通道上更为均衡, 结果也更为自然. 同时对大量夜晚雾天图像进行色偏纠正处理后发现: 若未经过色偏纠正操作, 所得的图像色彩失真较为严重, 最后生成的去雾图像在色彩自然度上效果较差. 上述色偏纠正操作就是为了使图像各颜色通道的亮度值取值范围更为合理, 从而确保经由该操作得到的最终夜晚雾天图像  $\mathbf{R}_{\text{final}}$  在颜色上更为均衡, 同时在视觉效果上显得更为自然, 如图 4 所示.

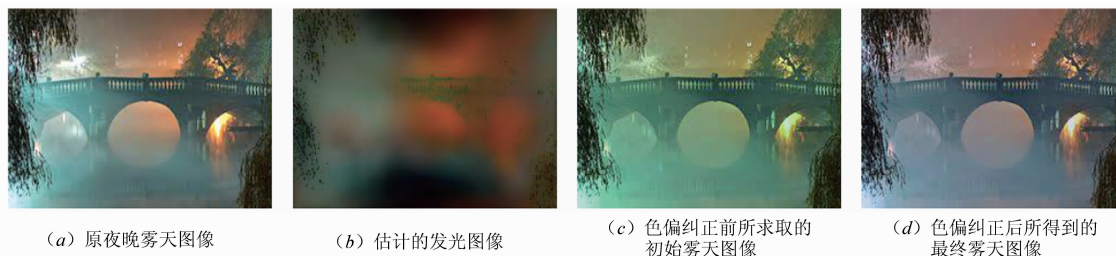


图4 色偏纠正前后所生成的新雾天图像视觉效果对比

### 2.4 夜晚去雾图像的求取

在获得纠正了色偏后的最终雾天图像  $\mathbf{R}_{\text{final}}$  后, 即可采用何恺明所提出的引导滤波<sup>[12]</sup>对此夜晚雾天图像进行去雾增强处理, 具体操作过程如下:

首先, 对于上述求取的最终雾天图像  $\mathbf{R}_{\text{final}}$ , 假定增

强后的去雾图像  $\hat{\mathbf{I}}_f$  是此图像的线性变换,  $\omega_x$  为中心元素为  $x$  的窗口.

$$\hat{\mathbf{I}}_f(y) = \mathbf{a}_x^T \mathbf{R}_{\text{final}}(y) + \mathbf{b}_x \quad (8)$$

其中,  $y$  表示窗口  $\omega_x$  中的像素.  $\mathbf{a}_x$  和  $\mathbf{b}_x$  为在窗口  $\omega_x$  中为常数的两个线性系数. 为了使输出  $\hat{\mathbf{I}}_f(x)$  与输入  $\mathbf{R}_{\text{final}}$

之间的差异尽可能小,可最小化如下以像素  $x$  为中心的局部窗口  $\omega_x$  内的代价函数:

$$E(\mathbf{a}_x, \mathbf{b}_x) = \sum_{y \in \omega_x} ((\mathbf{a}_x^T \mathbf{R}_{\text{final}}(y) + \mathbf{b}_x - \mathbf{R}_{\text{final}}(y))^2 + \varepsilon \mathbf{a}_x^2) \quad (9)$$

式(9)中的平滑参数  $\varepsilon$  为取值较小的调节参数  $\varepsilon = 0.01$ ,其主要作用在于防止  $\mathbf{a}_x$  的值过大,由此式(9)的解如下所示:

$$\mathbf{a}_x = (\mathbf{C}_x + \varepsilon \mathbf{U})^{-1} \left( \frac{1}{|\omega_x|} \sum_{y \in \omega_x} \mathbf{R}_{\text{final}}(y) \mathbf{R}_{\text{final}}(y) - \mathbf{u}_x \bar{\mathbf{R}}_{\text{final}} \right) \quad (10)$$

$$\mathbf{b}_x = \bar{\mathbf{R}}_{\text{final}} - \mathbf{a}_x^T \mathbf{u}_x \quad (11)$$

其中,  $\mathbf{C}_x$  为  $\mathbf{R}_{\text{final}}$  在窗口  $\omega_x$  中的一个  $3 \times 3$  的协方差矩

阵,  $\bar{\mathbf{R}}_{\text{final}}$  表示窗口  $\omega_x$  中输入图像  $\mathbf{R}_{\text{final}}$  的均值图像,  $\mathbf{u}_x$  为图像  $\mathbf{R}_{\text{final}}$  在窗口  $\omega_x$  中的均值向量. 通过将式(10)和式(11)代入式(8),即可获得具有较好清晰化效果的去雾图像  $\hat{\mathbf{I}}_x$ .

图5即为所提算法关键步骤的处理结果. 其中,图5(a)为原输入图像,图5(b)和图5(c)分别为从原夜晚雾天图像中分离得到的发光因子项图像和初始雾天图像,图5(d)为对此初始雾天图像进行色偏纠正操作后所得到的最终雾天图像. 图5(e)为对最终雾天图像采用引导滤波进行增强处理后得到的算法去雾结果. 从图中可以看出,相比于原夜晚雾天图像,去雾结果的能见度和清晰度都获得了明显的改善.

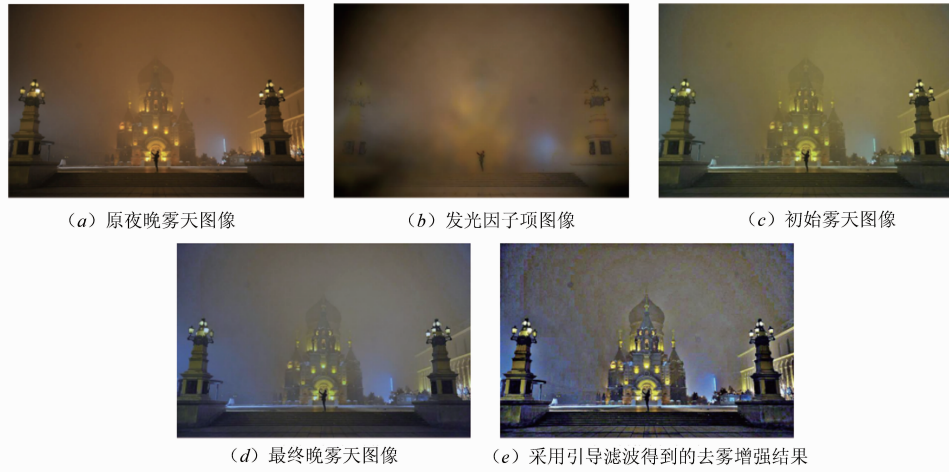


图5 所提算法的关键步骤

### 3 实验结果与性能分析

#### 3.1 对比分析

为了验证算法的有效性和实用性,采用 MATLAB 在 Pentium(R) D,3.00 GHz,2 GB 内存的 PC 机上对大量夜晚雾天图像进行了对比性实验. 实验选取了具有代表性的日间或夜晚雾天图像去雾算法进行实验效果的对比. 这些算法包括:He 等人提出的基于暗原色原理的去雾方法<sup>[6]</sup>,Tarel 等人提出的基于快速中值滤波的去雾方法<sup>[7]</sup>,Pei 等人提出的图像颜色迁移方法<sup>[8]</sup>,以及 Zhang 等人提出的基于夜晚雾天场景成像模型的去雾方法<sup>[9]</sup>与所提方法进行对比. 选取上述这些方法的原因是 He 方法和 Tarel 方法则是目前去雾效果较好或

运算速度较快的日间去雾算法,而 Pei 方法和 Zhang 方法则是专门针对夜晚雾天图像的典型去雾算法. 表 1 即通过图 6 和图 7 两组图像对上述各算法的去雾效果进行了对比分析.

由表 1 可知,相比于日间雾天图像去雾方法和专门针对夜间雾天图像的去雾方法,所提方法的清晰化效果较为明显,能够得到对比度、色彩和细节信息均适度增强的处理结果. 究其原因,主要是因为日间雾天图像去雾方法没有考虑光源发光效应的影响,其所采用的传统大气散射模型仅仅包含入射光衰减项和大气光成像项两部分. 此外,大气散射模型的前提是假设光线从场景点到接收点的传播过程中只发生单散射现象,所以对于发生多散射的夜晚雾天图像,此物理模型将

表 1 各算法的去雾效果对比

衡量因素	He 方法	Tarel 方法	Pei 方法	Zhang 方法	本文方法
对比度增强效果	无明显改变	无明显改变	细节增强效果显著	细节增强效果显著	细节增强效果显著
颜色自然程度	颜色改善不明显	颜色不自然	颜色不自然	颜色较为自然	颜色较为自然
噪声抑制效果	无明显改变	存在伪影现象	噪声放大明显	光源区存在光晕	无明显光晕伪影

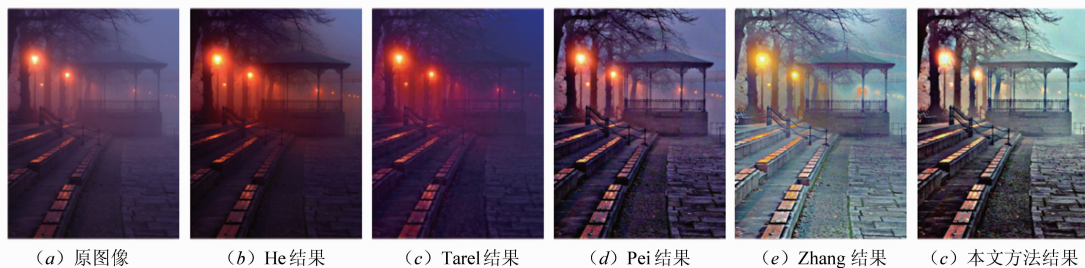


图6 与各去雾方法的结果对比1

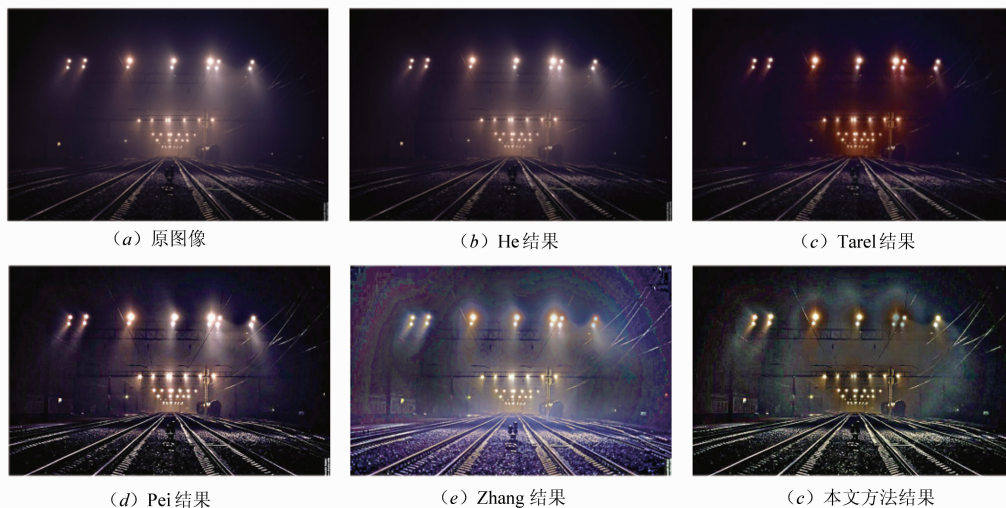


图7 与各去雾方法的结果对比2

会失效.而专门针对夜间雾天图像的去雾方法则未能很好地抑制图像噪声和保留图像色彩的逼真度,或是在光源区域引入光晕问题.相比之下,所提方法通过将新雾天图像和发光图像从原图像中分离以尽可能消除原图像中的光源影响.在此基础上,利用引导滤波的增强作用以最终获得图像细节突出、颜色丰富自然的去雾结果.

### 3.2 定量评估

目前,国内外研究者在图像去雾算法方面开展了大量的研究工作,但对于去雾效果的客观评价则关注较少.针对图像去雾效果评价这一具体应用,应用最广的是由法国学者 Hautiere 所提出的基于可见边的对比度增强评估方法<sup>[18]</sup>.但是该方法仅从图像对比度的角度来评估去雾效果,而未从图像色彩的角度来考虑去雾效果的优劣.由于图像的颜色也是去雾效果评价最为显著的特性,因此需要从图像的对比度和颜色两方面来对图像进行综合评价.为此,本文针对图6和图7两组图像,除了从图像的对比度增强效果方面进行评估外,还采用了图像色彩自然度指标 CNI(Color Naturalness Index)<sup>[19]</sup>来对去雾图像的颜色质量进行评价.其中,在基于可见边的对比度增强评估方法中, $e$ 和 $\bar{\gamma}$ 值越大, $\sigma$ 越小,表明去雾效果越好,因此本文将图像对

比度评价指标 ICI(Image Contrast Index)定义如下:

$$ICI = e + \bar{\gamma} - \sigma \quad (12)$$

上述图像对比度评价指标 ICI 的值越大,说明算法的去雾效果也越好.而对于图像色彩自然度评价指标 CNI,其值越接近于1,表明图像越自然<sup>[19]</sup>.表2即为采用上述评价指标对图6和图7的定量评估结果.从表2中可以看出,相比于其它对比方法,本文方法的 ICI 和 CNI 指标值均最大.如对图6而言,采用本文方法后,ICI 和 CNI 指标值分别从 He 方法的“1.3398”、“0.3579”,Tarel 方法的“2.5414”、“0.3561”,Pei 方法的“3.7057”、“0.3722”,Zhang 方法的“5.7671”、“0.5820”,提高到“6.7190”、“0.6502”,ICI 和 CNI 指标值提高显著,对其它图像也具有相似的效果,说明本文方法相对于其它方法具有最佳的去雾效果.这一结论与图6和图7的视觉效果是一致的,从而验证了所提算法对夜晚雾天图像的有效性.

此外,算法的运算时间也是定量衡量算法性能的一个重要指标.在 MATLAB 环境下,对于一幅大小为  $600 \times 400$  的图像,Tarel 方法处理速度最快,需要 3s.Zhang 方法由于算法参数的估计过程运算代价较低,因此只需 10s.Pei 方法由于在传播图求取过程中采用引导滤波简化运算,因此该方法相对于 He 方法速度较快,需要 12s.

而 He 方法所需的处理时间则相对较长,需要 20s. 相比之下,本文方法具有相对较快的运算速度,处理同样大小的图像仅需 9s 左右. 具体而言,对于本文图 6 和图 7 所给出

的两组实验图像,本文也对各去雾方法所消耗的运算时间进行了统计,统计结果如表 2 所示.

表 2 采用各评价指标对各去雾算法的统计结果对比

指标	$e$	$\bar{\gamma}$	$\sigma$ (%)	ICI	CNI	T (s)	$e$	$\bar{\gamma}$	$\sigma$ (%)	ICI	CNI	T (s)
	图 6(360 × 540)						图 7(640 × 424)					
He	0.4090	1.1371	0.2063	1.3398	0.3579	19	0.0161	0.9539	7.4643	-6.4943	0.3657	25
Tarel	0.6917	1.8497	0	2.5414	0.3561	2	0.4913	1.3654	3.5606	-1.7039	0.3756	3
Pei	0.4765	3.8177	0.5885	3.7057	0.3722	12	1.0635	2.6109	9.6050	-5.9306	0.3828	15
Zhang	0.5153	5.4730	0.2212	5.7671	0.5820	10	0.7937	5.6391	6.0024	0.4304	0.4073	12
本文	0.4781	6.7959	0.5550	6.7190	0.6502	8	1.0452	3.9753	4.5254	0.4951	0.5005	8

## 4 结论

图像去雾是计算机视觉领域的重要问题,尽管目前国内外学者对日间雾天图像的去雾处理进行了广泛的研究,但是专门针对夜晚雾天图像的物理模型和去雾算法还不多见. 因此,本文主要针对夜间雾天图像清晰化问题展开研究,其主要贡献与创新点为构建了一个专门针对夜晚雾天图像的去雾模型,在此基础上提出了一种夜晚雾天图像去雾算法,实验结果表明本文算法在去雾结果的对比度、色彩自然度和算法运算时间等方面均优于或部分优于其它对比算法. 因此,可广泛应用于汽车防碰撞系统、道路监控探头等诸多领域. 但本文算法仍有待进一步完善,如算法中的参数主要依靠人为事先设置,无法依据图像的不同而自动估计获取. 尽管如此,所提方法仍不失为解决夜晚雾天图像去雾问题的一种新的思路和处理途径. 同时,相信本文所提出的解决夜晚图像去雾问题的图像分层思想将会有助于解决计算机视觉领域的其它问题.

### 参考文献

- [1] Shwartz S, Namer E, Schechner Y. Blind haze separation [A]. Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition [C]. New York, United States: IEEE Computer Society, 2006. 1984 - 1991.
- [2] Schechner Y Y, Narasimhan S G, Nayar S K. Instant dehazing of images using polarization [A]. Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition [C]. Los Alamitos, USA: IEEE Computer Society, 2001. 1325 - 1332.
- [3] Hu W, Yuan G D, Dong Z, Shu X M. Improved single image dehazing using dark channel prior [J]. Journal of Computer Research and Development, 2010, 47(12): 2132 - 2140.
- [4] Fattal R. Single image dehazing [J]. ACM Transactions on Graphics, 2008, 27(3): 72 - 79.
- [5] Tan R T. Visibility in bad weather from a single image [A]. Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition [C]. Anchorage, AK: IEEE Computer Society, 2008. 1 - 8.
- [6] He K M, Sun J, Tang X O. Single image haze removal using dark channel prior [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2011, 33(12): 2341 - 2353.
- [7] Tarel J P, Hautiere N. Fast visibility restoration from a single color or gray level image [A]. Proceedings of IEEE 12th International Conference on Computer Vision [C]. Kyoto, Japan: IEEE Computer Society, 2009. 2201 - 2208.
- [8] Pei S C, Lee T Y. Nighttime haze removal using color transfer pre-processing and dark channel prior [A]. Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing [C]. Orlando, USA: IEEE Computer Society, 2012. 957 - 960.
- [9] Zhang J, Cao Y, Wang Z. Nighttime haze removal based on a new imaging model [A]. Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing [C]. Paris, France: IEEE Computer Society, 2014. 4557 - 4561.
- [10] Lee J W, Lee B H, Won Y, Kim C H, Hong S H. Real-time night visibility enhancement algorithm using the similarity of inverted night image and fog image [J]. Lecture Notes in Electrical Engineering, 2015, 339: 1045 - 1052.
- [11] Naik D K, Rout D K. Outdoor image enhancement: increasing visibility under extreme haze and light condition [A]. Proceedings of 4th IEEE International Advance Computing Conference [C]. Gurgaon, India: IEEE Computer Society, 2014. 1081 - 1086.
- [12] 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.
- [13] Koschmieder H. Theorie der horizontalen Sichtweite; Kontrast und Sichtweite [M]. Germany: Keim & Nemnich

Press, 1925. 25 – 33.

- [14] Narasimhan S G, Nayar S K. Shedding light on the weather [A]. Proceedings of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition [C]. Madison, USA: IEEE Computer Society, 2003. 665 – 672.
- [15] Li Y, Brown M S. Single image layer separation using relative smoothness [A]. Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition [C]. Columbus, USA: IEEE Computer Society, 2014. 1 – 8.
- [16] Geman D, Yang C. Nonlinear image recovery with half quadratic regularization [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1995, 4(7): 932 – 946.
- [17] Wang Y, Yang J, Yin W, Zhang Y. A new alternating minimization algorithm for total variation image reconstruction [J]. SIAM Journal on Imaging Sciences, 2008, 1(3): 248 – 272.
- [18] Hautiere N, Tarel J P, Aubert D, Dumont E. Blind contrast enhancement assessment by gradient ratioing at visible edges [J]. Image Analysis and Stereology Journal, 2008, 27(2): 87 – 95.
- [19] Huang K Q, Wang Q, Wu Z Y. Natural color image enhancement and evaluation algorithm based on human visual system [J]. Computer Vision and Image Understanding, 2006, 103(1): 52 – 63.

#### 作者简介



郭 璠 女, 1982 年生于湖南长沙. 现为中南大学信息科学与工程学院讲师. 主要研究方向为图像处理和模式识别.

E-mail: guofancsu@163.com



邹北骥 男, 1961 年生于江西南昌. 现为中南大学信息科学与工程学院教授、博士生导师. 主要研究方向为计算机图形学、图像处理、计算机视觉等.

E-mail: bjzou@csu.edu.cn



唐 璉 男, 1966 年生于湖南武冈. 现为中南大学信息科学与工程学院教授、博士生导师. 主要研究方向为图像处理、计算机视觉、模式识别等.

E-mail: tjjin@csu.edu.cn