

基于颜色衰减的自适应去雾算法

范迪, 提璇, 孟琪, 王光彩

(山东科技大学 电子通信与物理学院, 山东 青岛 266590)

摘要: 雾霾使室外拍摄的图像、视频画质退化严重, 给室外安防和交通监控等系统的正常运行带来困难; 去雾算法旨在恢复图像质量, 增强图像对比度和清晰度; 作者提出了一种结合大气散射模型与颜色衰减先验的去雾复原模型, 并以新增可见边比为评价标准, 给出了模型参数的自适应求取方法, 并采用引导滤波对透射率进行优化, 从而较好地恢复出无雾图像; 对有雾图像分别采用本文方法和 3 种现有去雾算法进行对比实验, 从实验结果看, 基于颜色衰减的自适应去雾算法可使图像清晰度、对比度得到较大的提高, 与其他算法相比, 在实时性和清晰度方面有一定优势。

关键词: 图像去雾; 大气散射模型; 颜色衰减先验; 自适应

An Adaptive Defogging Algorithm Based on Color Attenuation

Fan Di, Ti Xuan, Meng Qi, Wang Guangcai

(College of Electronics, Communication and Physics, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

Abstract: The haze makes the outdoor images and videos quality degraded seriously, which brings big difficulties to the normal operation of security and traffic monitoring system. Defogging algorithm is designed to restore the image quality, enhance the image contrast and clarity. The authors proposed a model of defogging restoration model based on the atmospheric scattering model and the color attenuation prior. Furthermore, by introducing additional visible edge ratio as the evaluation criterion, an adaptive method for obtaining the model parameters is proposed, then a set of adaptive algorithm for defogging is formed, and then the transmission map is optimized by the guided filter to recover the final haze-free images. Experiments have been taken by applying the presented method and three existing defogging algorithms to two foggy images. the experimental results show that the adaptive defogging algorithm in this paper can make the image sharpness and contrast improved greatly, and has advantage in real-time and clarity comparing with the other three algorithms.

Keywords: images defogging; atmospheric scattering model; color attenuation prior; adaptive

0 引言

近年来, 雾霾天气频发, 持续时间也越来越长。雾、霾、雨等特殊天气使得图像对比度下降、清晰度降低, 严重影响拍摄图像的质量, 成为视频监控、交通监控、目标跟踪和识别等领域的重要障碍。因而对有雾图像去雾旨在恢复图像质量, 增强图像对比度和清晰度, 是室外视频监控中的主要研究内容。

目前, 图像去雾算法主要分为基于图像增强的去雾方法和基于图像复原的去雾方法^[1]。前者不考虑造成雾霾图像退化的原因和机制, 而是通过增强技术突出图像的细节信息、增强图像的对比度以便改善图像的视觉效果, 进而获得提质图像。后者先分析图像传感器在雾霾天气下的成像机理, 并构建雾霾图像退化的数学模型, 然后倒推出图

像恢复模型, 计算获得与真实图像尽可能逼近的估计值, 从而获得清晰的去雾图像。

直方图均衡算法是一种典型的基于图像增强的去雾方法, 该算法可使图像具有高对比度和多变的灰度色阶。但由于没考虑图像局部对比度, 因而图像细节依旧模糊。为克服此问题有学者提出了局部直方图均衡化去雾算法^[2-4], 该方法将直方图均衡化操作分散到图像的局部区域, 通过局部运算的叠加自适应来增强图像局部细节, 这种方法对于严重退化的图像会放大图像噪声。另外, 图像增强的去雾算法还有 Retinex 算法, 它是一种描述图像不变性的模型, 它具备动态范围压缩、颜色恢复、光照再现等能力, 包括单尺度 Retinex (Single-Scale Retinex, SSR) 算法^[5]和多尺度 Retinex (Multi-Scale Retinex, MSR) 算法^[6]。该方法在一定程度上能够获得较好的去雾效果, 但也并不是适用全部情况, 尤其是浓雾情况。

近几年, 基于图像复原的去雾方法有较大发展。He 等人^[7]发现暗通道先验 (Dark Channel Prior, DCP), 即在大多数非天空区域, 至少一个颜色通道一些像素的强度非常低接近于零。利用此先验知识, 并通过大气散射模型恢复

收稿日期: 2018-01-29; 修回日期: 2018-03-22。

基金项目: 2012 年山东省优秀中青年科学家科研奖励基金项目 (BS2012DX034); 2012 年第 52 批中国博士后科学基金面上二等资助项目 (2012M521361); 山东省高等学校科技计划项目 (J13LN17)。

作者简介: 范迪 (1976-), 女, 河南南阳, 副教授, 博士研究生, 主要从事图像处理、机器视觉、智能技术方向的研究。

无雾图像。在大多数情况下,暗通道先验方法简单有效。然而,它不能很好地处理天空图像,并且是计算复杂度高。为了克服暗通道先验方法的缺点,He等人^[8]、Xiao等人^[9]、Dakkar等人^[10]后又不断提出了一些改进措施。Zhu等人^[11]提出颜色衰减先验,在此条件下对有雾图像的场景深度进行建模,并用监督学习方法学习模型的参数,恢复深度信息,然后通过大气散射模型估计透射率并恢复场景辐射,从而有效地消除单个图像的雾度。但此方法样本收集过程非常困难,缺乏理论依据。Berman等人^[12]首先采用非局部先验,估算初始的透射图,然后采用正则化的方法来优化透射图,并且将原始图像和去雾后图像的梯度差的范数作为正则化项,抑制噪声干扰。基于图像复原的去雾方法都需求取物理模型中的参数,模型参数的估计普遍复杂耗时。

本文提出了一种结合大气散射与颜色衰减的去雾模型,并针对模型参数的求取,提出了一种新增可见边比最优的自适应方法,进而形成了一种新的自适应去雾算法。本文对两幅有雾图像分别采用本文方法、暗通道先验、多尺度Retinex算法、自适应直方图均衡化进行去雾处理,并从主观和客观方面进行对比实验,结果表明,本文的方法能够较好的实现图像去雾,在新增可见边比评价标准下较好,耗时也比较少。

1 基于大气散射与颜色衰减的去雾模型

1.1 大气散射模型

大气散射模型由McCartney于1976年提出^[13],之后Narasimhan和Nayar^[14]进一步推导出数学模型,描述全局大气光经物体反射、散射,到达视觉传感器的过程。其模型如图1所示。

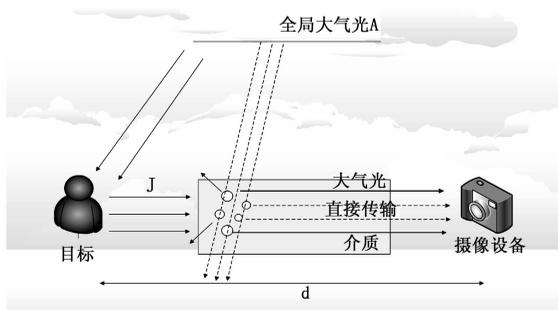


图1 McCartney大气散射模型

模型的数学表达式为:

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

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

其中: x 是图像中像素的位置, $I(x)$ 是有雾图像; $J(x)$ 是无雾图像,表示全局大气光照射到物体上未经大气散射衰减的反射光; A 是全局大气光,表示无穷远处的环境光照; $t(x)$ 是介质透射率,表示全局大气光在传输过程中,受

大气散射的影响,随距离变化而变化的衰减过程; β 是大气的散射系数; d 是场景的深度,即观测点到场景的距离。

式(1)的第一项 $J(x)t(x)$ 表示直接衰减项,也称为直接传播,描述的是场景辐射度在介质中的退化;第二项 $A[1 - t(x)]$ 叫做大气光,它是由前面的散射光引起,并可引起场景颜色的变化。去雾的目标就是从 $I(x)$ 中恢复 $J(x)$,若 β, d, A 已知,将其代入下式便可恢复出去雾图像:

$$J(x) = \frac{I(x) - A}{e^{-\beta d(x)}} + A \quad (3)$$

1.2 颜色衰减先验

2015年,zhu^[11]发现有雾图像中像素的亮度和饱和度随着雾的浓度的变化而急剧变化,雾的浓度随着场景深度的增加而增加,因而场景的深度与雾的浓度呈正相关,提出颜色衰减先验:

$$d(x) \propto c(x) \propto [v(x) - s(x)] \quad (4)$$

其中, $d(x)$ 是场景深度, $c(x)$ 是雾的浓度, $v(x)$ 是场景的亮度, $s(x)$ 是场景饱和度。“ \propto ”表示成正比。

1.3 本文的去雾模型

根据颜色衰减先验,本文根据图像的亮度分布 $v(x)$ 和饱和度分布 $s(x)$,定义一种场景深度估计的线性模型:

$$d(x) = \alpha[v(x) - s(x)] \quad (5)$$

其中, α 为常数。代入式(2)有,

$$t(x) = e^{-\beta\alpha[v(x) - s(x)]} \quad (6)$$

令 $\gamma = \beta\alpha$,有:

$$t(x) = e^{-\gamma[v(x) - s(x)]} \quad (7)$$

由式(1)大气散射模型和式(7)颜色衰减,可得:

$$J(x) = \frac{I(x) - A}{e^{\gamma[s(x) - v(x)]}} + A \quad (8)$$

由式(8)的模型可见,去雾图像 $J(x)$ 是只与 A 和 γ 相关的函数,如果通过某种方式求出 A 和 γ ,则可得去雾图像。

2 自适应求参及去雾算法

在式(8)改进的大气散射模型中,全局大气光 A 值和参数 γ 的估计极为重要。 A 值的大小决定着图像的曝光度。 A 值太大,会造成去雾图像昏暗; A 值太小,使得图像过度曝光,图像色彩失真。 γ 值的大小决定图像的透射效果。 γ 值太大,导致图像亮度变小; γ 太小,导致图像细节不清晰。本文基于去雾评价函数新增可见边比,提出了一种自适应求取最优模型参数 A 和 γ 的方法,并进一步形成自适应去雾算法。总自适应去雾算法框架如图2所示。

本文算法步骤如下。

Step1: 根据原始有雾图像的灰度直方图估计大气光 A 的范围。

Step2: 在 A 值范围内,寻找去雾评价函数新增可见边比最大下的 γ 值,从而估计 γ 的范围。

Step3: 在 A 和 γ 范围内进行细搜索,寻找使新增可见

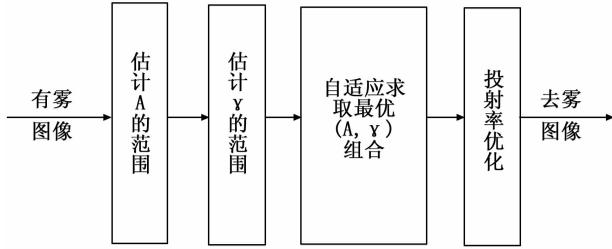


图 2 自适应去雾算法

边比最优的 (A, γ) 组合。

Step4: 通过式 (7) 获取透射率 $t(x)$ ，并利用引导滤波对透射率进行修正。

Step5: 利用修正后的 (A, t) 组合，按照大气散射模型恢复图像。

2.1 全局大气光 A 的范围估计

A 为全局大气光，表示无穷远处大气光照，一般亮度较高，根据这一特性，利用灰度直方图估计全局大气光 A 值范围。

图 3 (a) 为原始图像，图 3 (b) 为其灰度直方图，从中可以看出图像的动态范围较小，在图像的 $0 \sim 100$ 低灰度区域和 $200 \sim 250$ 高灰度区域像素分布很少，在 $100 \sim 200$ 灰度区域像素密集，直方图双峰一谷现象明显。由于全局大气光 A 表示无穷远处环境光照，因此可选取右侧峰值 $165 \sim 198$ 作为全局大气光 A 范围。

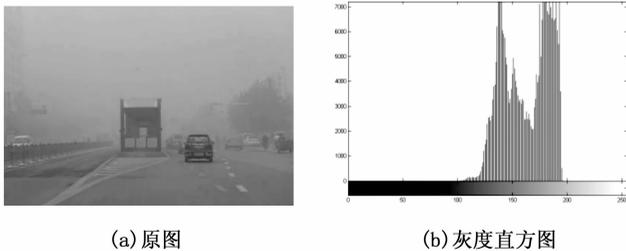


图 3 原图和其直方图

2.2 γ 值的范围估计

本文以 Hautière 等^[15]提出的去雾评价函数新增可见边比作为评价标准，在 A 的范围内，A 以 10 为步长取值来寻找最大 e 值时对应的 γ ，从而确定 γ 的粗范围。 e 为恢复后图像的新增可见边比，其计算式如下：

$$e = \frac{n_r - n_0}{n_0} \quad (9)$$

其中： n_0 代表原图像 $I(x)$ 中的可见边数， n_r 代表去雾图像 $J(x)$ 中的可见边数。 e 值越大，表明图像恢复后可见边缘越多，去雾效果越好。表 1 表示 A 值分别取 165、175、185、195， γ 在 $0 \sim 10$ 范围取值时， e 为最大值时记为 e_{\max} ， e 为最大值时的 γ ，记为 γ_g 。考虑到一定的余量，由表 1 可知，图 3 (a) 所对应的 γ 值范围取 $2 \sim 3.5$ 。

表 1 γ 值范围选取

A	165	175	185	195
e_{\max}	6.5395	5.7987	6.5186	4.7385
γ_g	3	2.5	2.5	3

2.3 最优 (A, γ) 的自适应

以新增可见边比去雾评价标准，在估计的 A 和 γ 的范围内进行细搜索寻优，自适应的找到使得评价标准最大的 (A, γ) 组合。该方法不用设定参数或人工参与，是一种自适应的最优 (A, γ) 的估计方法，其具体步骤如下：

- 1) 由输入有雾图像粗估计 A 值范围 (a, b) 和 γ 范围 (m, n) 。
- 2) 对 A, γ 范围按一定步长进行等间隔离散。
- 3) 遍历 (A, γ) 组合的取值，分别代入式 (8) 模型求取 $J(x)$ ，进而求取新增可见边比 e 。
- 4) 从求出的所有 e 中，找到最大 e 值及其所对应的 (A, γ) 。

图 4 为 (A, γ, e) 的三维图，由图可看出， (A, γ) 在 $(178, 2.6)$ 处 e 值最大。

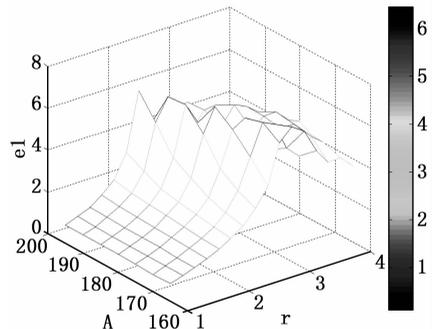


图 4 自适应求参结果

2.4 透射率优化

引导图像滤波^[16]是一种去噪保边滤波器，它可以实现对图像滤波的同时增强图像细节且计算速度快。以上文 (A, γ) 组合得到的初始透射率图 $t(x)$ 作为输入图像，以原含雾图像 $I(x)$ 作为引导图像，通过引导滤波得到修正透射率图像记为 $t'(x)$ ，其过程如图 5 所示。

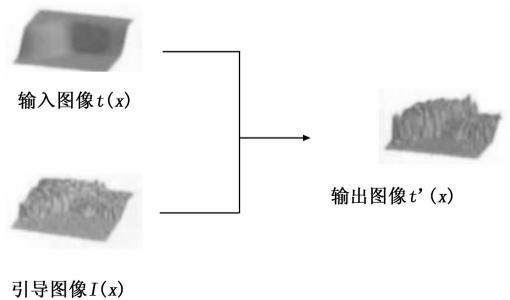


图 5 引导滤波原理图

根据局部线性模型假设，输出图像 $t'(x)$ 是 $I(x)$ 在中

心像素为 k 的窗口 ω_k 内的一个线性变换,可表示为:

$$t'(x) = a_k I(x) + b_k, \forall x \in \omega_k \quad (10)$$

其中, a_k, b_k 为线性表示的系数。由式(10)可看出,在窗口内,输出图像可以获得与引导图相似的纹理和细节。

由引导滤波原理确定出最优的系数 (a_k, b_k) 为:

$$a_k = \frac{\text{cov}_k(I(x), t(x))}{\text{var}_k(I(x)) + \epsilon}$$

$$b_k = \bar{t}_k(x) - a_k \bar{I}_k(x) \quad (11)$$

其中, $\text{cov}_k(I(x), t(x))$ 为引导图像 $I(x)$ 和输入图像 $t(x)$ 的协方差, $\text{var}_k(I(x))$ 为 $I(x)$ 的方差, $\bar{t}_k(x)$ 为 $t(x)$ 的均值, \bar{I}_k 为 $I(x)$ 的均值,以上参数均在以 k 为中心的窗口中求取。当求得 a_k, b_k 后,输出图像 $t'(x)$ 为:

$$t'(x) = \bar{a}_x I(x) + \bar{b}_x \quad (12)$$

$$\text{其中, } \bar{a}_x = \frac{1}{|\omega|} \sum_{k \in \omega_x} a_k, \bar{b}_x = \frac{1}{|\omega|} \sum_{k \in \omega_x} b_k.$$

通过最优 A 值和修正后的 $t'(x)$ 根据大气散射模型恢复出无雾图像的各通道,最终的去雾图像如图6所示。



图6 最终去雾图像

3 实验结果与对比

本文选取了两幅有雾图像进行去雾实验,分别用本文算法、暗通道先验、多尺度 Retinex、自适应直方图均衡化4种去雾算法对图像进行处理,并对所得结果从对比度和耗时两方面进行了性能评价。

3.1 实验结果分析

图7(a1)和(b1)为两个有雾图像,(a2)~(a5)、(b2)~(b5)分别是采用不同方法得到去雾结果。从结果可看到,所有去雾算法都在一定程度上提高了图像的清晰度,有明显的去雾效果,但也存在一些不足。

从图例一可看出,暗通道先验方法去雾图像在天空处色彩有偏差,出现一块蓝一块绿现象且颜色整体偏暗;多尺度 Retinex 方法去雾图像对比度得到很大的提高但因此也导致有些图像细节不清晰,BRT 车站内部和道路中栏删部分整体显示为黑色,内部结构和细节没有显现出来,地面上污渍也显示为纯黑色,失去道路污渍真实色彩;自适应直方图均衡化算法去雾图像 BRT 车站前方白色挡栏中孔隙以及道路旁交通牌不清晰;本文算法得到的图像细节清晰,

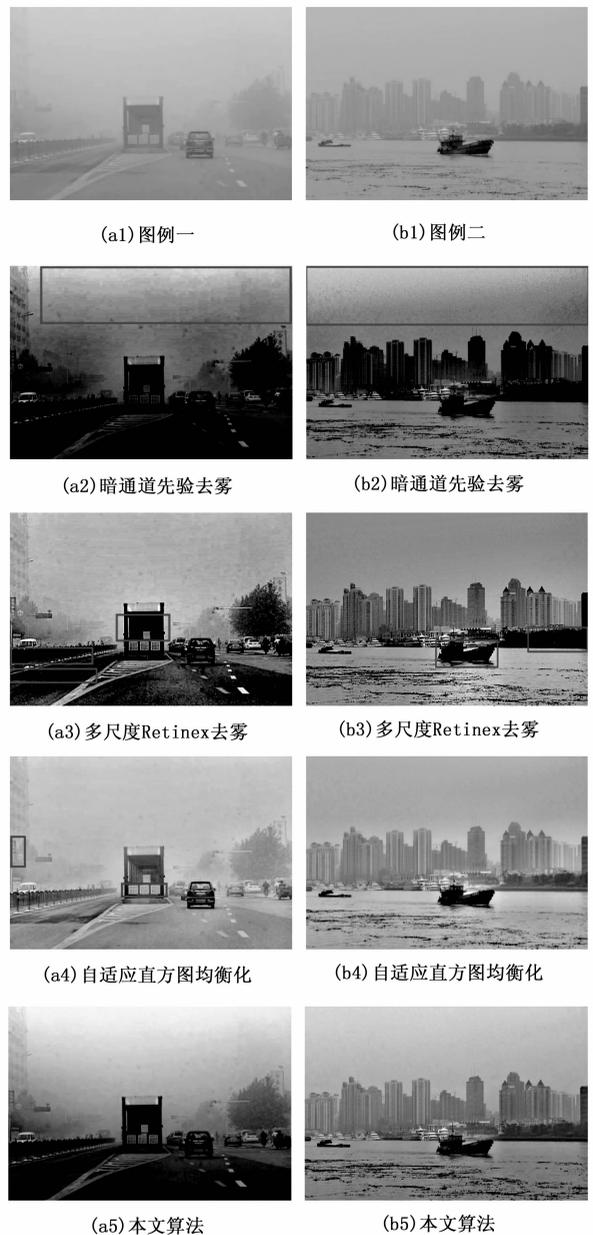


图7 4种算法的去雾效果

可清楚看到 BRT 车站内部结构,以及物体细节,恢复图像色彩真实。

从图例二可看出,暗通道先验方法去雾图像天空区域明显出现3个颜色段,左边发白,中间色彩偏绿,右侧偏紫,且天空区域比较粗糙,图像中树木轮廓看不清,颜色整体偏暗;多尺度 Retinex 方法去雾图像船只以及图像右侧树木颜色整体发黑,看不清细节;本文算法和自适应直方图算法去雾图像天空区域颜色均匀,船内结构清晰,效果相对较好。

3.2 实验结果的客观评价

考虑到实际应用中不但要求有雾图像处理后画质清晰,还要求算法的实时性好,本文选择从这两方面对4种算法

进行评价和对比。对比度采用恢复后图像的新增可见边比 e 作为评价标准。实时性采用处理时长 T 为评价标准。 e 越大, 图像对比度越高, 去雾效果越理想; 算法的运行时间 T 越小, 表示去雾的实时性越高, 去雾效率也越高。

对图 7 中去雾实验分别计算各算法的 e 和 T , 具体情况如图 8、图 9 所示。从图 8 可看出, 图例一中本文算法 e 值最大, 图例二中本文算法 e 值比较大, 表明本文去雾算法在对比度上有很大提高, 相比于其他算法有较强优势。从图 10 可看出, 本文算法在时间上均取得最小值。综合以上结果可看出, 本文算法在对比度和实时性上均有很好的表现。

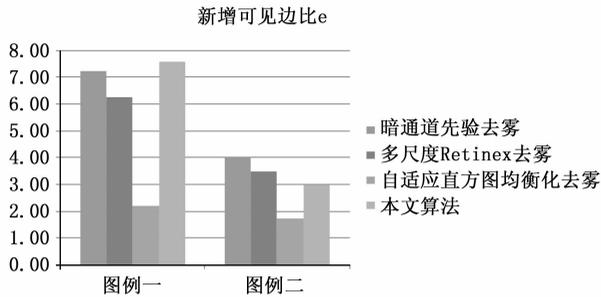


图 8 新增可见边比情况

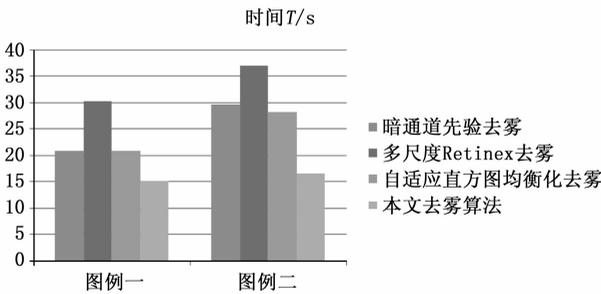


图 9 耗时情况

4 结论

雾霾天气使得室外拍摄的图像、视频对比度下降、清晰度降低、颜色暗淡, 是户外安防监控、交通监控、目标跟踪应用中迫切需要解决的问题。本文提出了一种结合大气散射模型与颜色衰减先验的去雾复原模型, 并以新增可见边比为评价标准, 给出了模型参数的自适应求取方法, 并采用引导滤波对透射率进行优化, 从而较好地恢复出无雾图像。该算法立足已有模型理论基础和特点, 以评价指标为指导获取最优模型参数和最优恢复结果, 它不需要人工设定和参与, 是一套自动完成的自适应算法。从实验结果上看, 本文方法可使图像清晰度、对比度得到较大的提高, 与其他算法相比, 在实时性和清晰度方面有较强的优势。

参考文献:

- [1] 郭 璠, 蔡自兴, 谢 斌, 等. 图像去雾技术研究综述与展望 [J]. 计算机应用, 2010, 30 (9): 2417-2421.
- [2] 张 丽. 对比度受限自适应直方图均衡方法 [J]. 电脑知识与技术, 2010, 6 (3X): 2238-2238.
- [3] 杨 骥, 杨亚东, 梅 雪, 等. 基于改进的限制对比度自适应直方图的视频快速去雾算法 [J]. 计算机工程与设计, 2015, 36 (1): 221-226.
- [4] 曲 艺. 基于移动模板的图像去雾方法研究 [J]. 计算机工程与应用, 2013, 49 (24): 186-190.
- [5] 黄黎红. 一种基于单尺度 Retinex 的雾天降质图像增强新算法 [J]. 应用光学, 2010, 31 (5): 728-733.
- [6] 肖胜笔, 李 燕. 具有颜色保真性的快速多尺度 Retinex 去雾算法 [J]. 计算机工程与应用, 2015, 51 (6): 176-180.
- [7] He K, Sun J, Tang X. Single image haze removal using dark channel prior [A]. Computer Vision and Pattern Recognition, 2009. CVPR 2009. IEEE Conference on [C]. IEEE, 2009: 1956-1963.
- [8] He K, Sun J, Tang X. Single Image Haze Removal Using Dark Channel Prior [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 2011, 33 (12): 2341-2353.
- [9] Wang W X, Xiao X, Chen L Q. Image dark channel prior haze removal based on minimum filtering and guided filtering [J]. Guangxue Jingmi Gongcheng/optics & Precision Engineering, 2015, 23 (7): 2100-2108.
- [10] Makkard, Malhotra M. Single Image Haze Removal Using Dark Channel Prior [J]. International Journal of Advanced Trends in Computer Science & Engineering, 2016, 5 (1): 15467-15473.
- [11] Zhu Q, Mai J, Shao L. A Fast Single Image Haze Removal Algorithm Using Color Attenuation Prior [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2015, 24 (11): 3522-3533.
- [12] Berman D, Treibitz T, Avidan S. Non-local Image Dehazing [A]. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition [C]. IEEE Computer Society, 2016: 1674-1682.
- [13] Mccartney E J. Scattering Phenomena. (Book Reviews; Optics of the Atmosphere. Scattering by Molecules and Particles) [J]. Science, 1977, 196: 1084-1085.
- [14] Narasimhan S G, Nayar S K. Vision and the Atmosphere [J]. International Journal of Computer Vision, 2002, 48 (3): 233-254.
- [15] Hautiere N, Tarel J P, Aubert D, et al. Blind Contrast Enhancement Assessment by Gradient Rationing at Visible Edges [J]. Image Analysis & Stereology, 2008, 27 (2): 87-95.
- [16] He K, Sun J, Tang X. Guided Image Filtering [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 2013, 35 (6): 1397-1409.