

基于暗通道先验和 Retinex 理论快速单幅图像去雾方法

刘海波^{1,2} 杨杰¹ 吴正平¹ 张庆年³ 邓勇¹

摘要 针对雾霾天气下捕获的图像存在低对比度、低饱和度和色调偏移等现象,提出了一种基于暗通道先验和 Retinex 理论快速单幅图像去雾方法.该方法从大气散射模型出发,利用暗通道先验法则,通过灰度开运算对大气光值进行区间估计,同时获得介质传输率的初始估计,并通过白平衡简化大气散射模型;其次,基于 Retinex 理论,利用高斯滤波获得介质传输率的粗略估计,并通过线性映射实现灰度值搬移;然后,将介质传输率的初始估计和粗略估计进行像素级融合,利用快速联合双边滤波进行边缘优化,同时通过参数自适应调整的方法对雾图中大片天空区域的介质传输率进行修正;最后,通过简化大气散射模型和色调调整得到复原图像.与几种典型的图像去雾算法相比,本文算法具有很快的运算速度,能有效提高复原图像的清晰度和对比度,同时获得较好的图像颜色.

关键词 图像去雾, 大气散射模型, 暗通道先验, Retinex 理论, 图像融合

引用格式 刘海波, 杨杰, 吴正平, 张庆年, 邓勇. 基于暗通道先验和 Retinex 理论快速单幅图像去雾方法. 自动化学报, 2015, 41(7): 1264–1273

DOI 10.16383/j.aas.2015.c140748

A Fast Single Image Dehazing Method Based on Dark Channel Prior and Retinex Theory

LIU Hai-Bo^{1,2} YANG Jie¹ WU Zheng-Ping¹ ZHANG Qing-Nian³ DENG Yong¹

Abstract Imaging in the atmosphere presents the phenomenons of low contrast, low saturation and hue offset due to atmospheric particles such as haze and fog. In this paper, a fast method is proposed to remove haze from a single image based on dark channel prior and Retinex theory. Based on the atmospheric scattering model, dark channel prior and gray-scale opening operation are used to estimate the value of global atmospheric light by an interval. Meanwhile, the initial estimation of medium transmission is obtained. And the white balance is performed to simplify the atmospheric scattering model. Then, a simple Gaussian filter is adopted to get the coarse estimation of medium transmission based on Retinex theory, whose gray value is altered by linear mapping. After the pixels fusion between the initial estimation and coarse estimation of medium transmission, a fast joint bilateral filtering is used to refine edge, and a dynamic parameter strategy is adopted to improve the medium transmission of large sky region in fog image. Finally, the simplified atmospheric scattering model and tone mapping are used to get the restored image. Compared to some state-of-the-art methods, the proposed method can achieve a faster processing speed, effectively improve the visibility and contrast of the restored image, and obtain good color effect.

Key words Image dehazing, atmospheric scattering model, dark channel prior, Retinex theory, image fusion

Citation Liu Hai-Bo, Yang Jie, Wu Zheng-Ping, Zhang Qing-Nian, Deng Yong. A fast single image dehazing method based on dark channel prior and Retinex theory. *Acta Automatica Sinica*, 2015, 41(7): 1264–1273

收稿日期 2014-10-28 录用日期 2015-03-20

Manuscript received October 28, 2014; accepted March 20, 2015
国家自然科学基金 (51479159), 交通运输部软科学项目 (2013-322-811-470) 资助

Supported by National Natural Science Foundation of China (51479159) and Soft Science Project of China's Ministry of Transport (2013-322-811-470)

本文责任编辑 贾云得

Recommended by Associate Editor JIA Yun-De

1. 武汉理工大学光纤传感与信号处理教育部重点实验室 武汉 430070
2. 湖南工学院电气与信息工程学院 衡阳 421002 3. 武汉理工大学交通学院 武汉 430070

1. Key Laboratory of Fiber Optic Sensing Technology and Information Processing, Ministry of Education, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070 2. School of Electrical and Information Engineering, Hunan Institute of Technology, Hengyang 421002 3. School of Transportation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070

雾霾是一种常见的自然现象,它是由悬浮在大气中的大量微小水滴、气溶胶等颗粒对光线的散射和吸收作用产生的.它会导致图像中目标的对比度降低、饱和度下降和色调偏移,直接影响户外视觉系统效用的发挥^[1-2].因此,雾天降质图像的清晰化处理具有十分重要的意义^[3].

目前,针对图像去雾,人们提出了各种方法,具体来说可以分为两类:图像增强方法和图像复原方法.图像增强处理不考虑退化原因,通过突出图像中某些信息,同时削弱或去除某些不需要的信息,实现图像去雾.该类方法以 Retinex 算法为代表,但不能实现真正意义上的去雾^[4].图像复原通过分析雾图降

质机理, 建立图像散射模型, 充分利用图像退化的先验知识或假设, 实现场景复原. 相比而言, 利用图像复原的方法具有内在的优越性, 已成为图像去雾领域的研究热点.

近年来, 基于先验知识或假设的单幅图像去雾技术取得了重大突破^[5-6]. Tan^[7] 假设局部区域的环境光为常数, 通过最大化局部对比度来达到去雾的效果. 由于该方法旨在增强图像的对比度, 没有从物理模型上求解真实场景反照率, 恢复后的颜色显得过饱和, 且在景深不连续的地方产生 Halo 效应. Fattal^[8] 假设物体表面色度与介质传播具有局部统计不相关性, 利用独立成分分析来估计场景反照率. 该方法的性能与输入图像的统计特性有关, 对于浓雾下的图像和灰度图像, 由于颜色信息不足将导致统计估计不可靠. He 等^[9] 提出了暗通道先验法则, 并借助图像抠图算法, 对大多数户外图像都能获得很好的去雾效果, 具备物理有效性. 但在某些暗通道不接近 0 的区域会出现偏差, 导致复原图像失真, 且软抠图算法具有很高的时间和空间复杂度. Tarel 等^[10] 假设大气耗散函数在可行域中逼近最大值, 且局部变化平缓, 利用中值滤波来估计大气耗散函数. 由于没有严格估计大气光参数, 导致复原效果整体偏暗, 且引入色调调整后, 容易引起颜色的失真和 Halo 效应.

总结以上方法, 本文对 He 等^[9] 提出的暗通道先验法则和 Retinex 理论在原理上进行深入剖析, 推导出散射模型中各参数的求解方法, 提出一种基于暗通道先验和 Retinex 理论快速单幅图像去雾方法. 该方法从大气散射模型出发, 利用暗通道先验知识, 通过灰度开运算估计大气光的取值, 同时得到介质传输率的初始估计, 并对大气光照进行白平衡处理, 从而简化大气散射模型; 其次, 利用 Retinex 理论, 通过高斯卷积实现介质传输率的粗略估计, 并对其灰度值进行线性搬移; 然后, 融合介质传输率的

初始估计和粗略估计, 利用快速联合双边滤波进行边缘优化, 同时对雾图中大片天空区域的介质传输率进行动态修正; 最后, 利用简化大气散射模型, 通过色调调整获得较好的去雾效果. 实验表明, 本文方法具有很好的执行效率和效果.

1 背景

在计算机视觉和计算机图形学中, 描述有雾图像的散射模型^[7-8] 可表示为

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

式中, x 为空间坐标, $I(x)$ 为有雾图像, $J(x)$ 为场景辐射照度或清晰无雾的图像, A 为整体大气光值, $\rho(x)$ 为场景反照率, $t(x)$ 为介质传输率. 当大气同质时, 介质传输率 $t(x)$ 可表示为

$$t(x) = e^{-\beta d(x)}, \quad 0 \leq t(x) \leq 1 \quad (2)$$

式中, β 为大气散射系数, $d(x)$ 为场景深度. 式 (1) 中 $J(x)t(x)$ 称为直接衰减项^[7-9], 用来描述场景辐射照度在介质中的衰减, 它随场景深度呈指数性衰减; $A(1 - t(x))$ 称为大气光幕^[10], 用来描述场景成像中加入的大气散射光, 它造成了场景的模糊和颜色的失真.

去雾的目的是通过估计参数 A 和 $t(x)$ 从 $I(x)$ 中恢复 $J(x)$, 关键是估计介质传输率 $t(x)$. 因此, 从本质上来讲, 雾天降质图像的复原是一个典型的病态反问题.

2 本文算法

本文提出的基于暗通道先验和 Retinex 理论快速单幅图像去雾算法流程如图 1 所示. 首先, 利用值域范围实现大气光值估计, 并通过白平衡处理实现

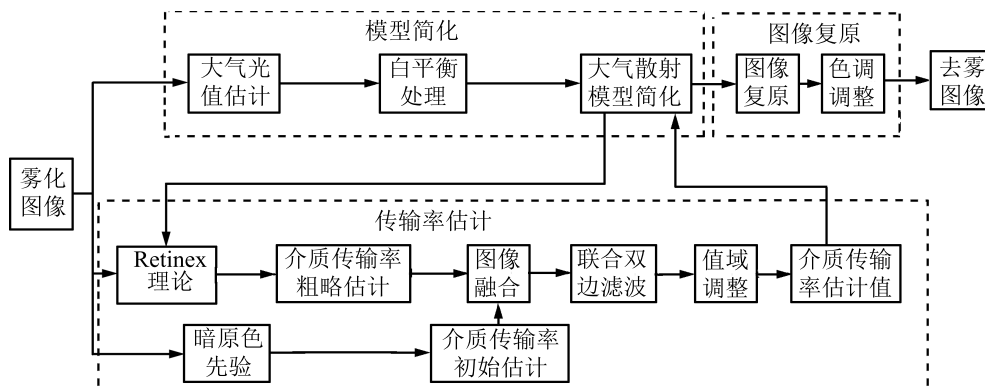


图 1 去雾算法流程

Fig. 1 Algorithm flowchart of image dehazing

大气散射模型简化;其次,基于暗通道先验得到介质传输率的初始估计,并从简化大气散射模型出发,利用 Retinex 理论实现介质传输率的粗略估计,通过图像融合、联合双边滤波和值域调整得到介质传输率的最终估计;最后,利用简化大气散射模型,通过色调调整实现图像复原,获得去雾图像。

为了获得大气光值 A 和介质传输率 $t(x)$ 的估计,首先对式 (1) 两边取最小值操作,可得:

$$I^{\text{dark}} = \min_{C \in \{R, G, B\}} I^C(x) = \min_{C \in \{R, G, B\}} A \rho^C(x) t(x) + A(1 - t(x)) = \rho^{\text{dark}}(x) A t(x) + A(1 - t(x)) \quad (3)$$

式中, $I^C(x)$ 和 $\rho^C(x)$ 为 $I(x)$ 和 $\rho(x)$ 的一个彩色通道, $\min_{C \in \{R, G, B\}}$ 表示对 (R, G, B) 通道对应的像素取最小值, I^{dark} 和 ρ^{dark} 定义为 $I(x)$ 和 $\rho(x)$ 的暗通道。

2.1 大气散射模型的简化

2.1.1 大气光值的估计

文献 [11] 直接采用最亮像素值估计大气光值,方法简单但易受高亮度噪声或白色物体的影响。文献 [9] 从暗原色中选取 0.1% 亮度最大的像素,然后取这些像素对应于原图像中的最大值作为大气光值。但是,若图像中天空区域小于暗原色求取中滤波窗口的尺寸,则错误地滤除了天空区域。因此,本文采用减小大气光取值范围的方法,通过区间估计,提高大气光值估计的精确度和鲁棒性。

首先,考虑到 I^{dark} 中白色物体对大气光值估计的影响,对式 (3) 两边进行灰度开运算处理,可得:

$$\hat{I}^{\text{dark}} = \hat{\rho}^{\text{dark}} A t'(x) + A(1 - t'(x)) \quad (4)$$

式中, $\hat{I}^{\text{dark}}$, $\hat{\rho}^{\text{dark}}$ 和 $t'(x)$ 为对 I^{dark} , ρ^{dark} 和 $t(x)$ 进行灰度开运算处理的结果。根据暗通道先验法则,当灰度开运算中结构元素的尺寸大于 I^{dark} 中白色物体的尺寸时, $\hat{\rho}^{\text{dark}}$ 的取值趋于 0^[9]。因此,式 (4) 可改写为

$$\hat{I}^{\text{dark}} = A(1 - t'(x)) \quad (5)$$

由式 (5) 可推导出 $t'(x)$ 的表达式为

$$t'(x) = 1 - \frac{\hat{I}^{\text{dark}}}{A} \quad (6)$$

式中, $t'(x)$ 定义为介质传输率 $t(x)$ 的初始估计。

由于 $t'(x)$ 中像素的取值不大于 $t(x)$ 中像素的取值,故 $\hat{I}^{\text{dark}}/A$ 的取值范围为 $[0, 1]$ 。因此, A 的取值应大于 $\hat{I}^{\text{dark}}$ 中像素的最大值,则 A 可表示为

$$A \geq \max(\hat{I}^{\text{dark}}) \quad (7)$$

其次,一般情况下, A 的取值不大于原图像中像素的最大值。因此, A 的取值范围可表示为

$$\max \left(\max_{C \in \{R, G, B\}} I^C(x) \right) \geq A \geq \max(\hat{I}^{\text{dark}}) \quad (8)$$

由式 (8) 可推导出 A 的区间估计为

$$A = (1 - \alpha) \max(\hat{I}^{\text{dark}}) + \alpha \max \left(\max_{C \in \{R, G, B\}} I^C(x) \right), \quad 0 \leq \alpha \leq 1 \quad (9)$$

式中, α 称为调节参数,其表达式为

$$\alpha = \text{mean}(\hat{I}^{\text{dark}}) \quad (10)$$

式中, $\text{mean}(\cdot)$ 表示对所有元素取均值。由于 α 是一个和 $\hat{I}^{\text{dark}}$ 的灰度分布有关的参数,故对大气光 A 具有自动调节功能。

另外,当雾图中天空区域尺寸偏大或偏小时,式 (8) 仍然成立,故仍然可以采用式 (9) 对大气光值进行估计。

2.1.2 白平衡

WP (White point) 算法,也称为 Max-RGB 算法,利用 R, G, B 颜色分量的最大值来估计光照的颜色^[12]。本文利用式 (9) 估计的大气光值对大气光照进行白平衡处理,即将大气光照的颜色校正到灰度轴方向上。修改 WP 算法的白平衡处理正好是对图像除以大气光值 A ^[13]。因此,式 (1) 可改写为

$$\frac{I(x)}{A} = \rho(x) t(x) + 1 - t(x) \quad (11)$$

对于雾图中像素值大于大气光值的区域,则有 $I(x)/A > 1$ 。为了下一节估计介质传输率的目的,本文将白平衡校正的图像 $I(x)/A$ 限制在 $[0, 1]$ 范围内,用 $I'(x)$ 进行表示

$$I'(x) = \min \left(\frac{I(x)}{A}, 1 \right) \quad (12)$$

进而,大气散射模型可简化为

$$I'(x) = \rho(x) t(x) + 1 - t(x) \quad (13)$$

在 $I'(x)$ 中,大气光值 A 校正为白色 $(1, 1, 1)^T$ 。

2.2 介质传输率的估计

2.2.1 粗略估计

为了获得介质传输率的粗略估计, 对式 (13) 两边取最小值操作, 可得:

$$I''(x) = \min_{C \in \{R, G, B\}} I^C(x) = \min_{C \in \{R, G, B\}} \rho^C(x)t(x) + 1 - t(x) = \rho^{\text{dark}}(x)t(x) + 1 - t(x) \quad (14)$$

式中, $I''(x)$ 定义为 $I'(x)$ 中 (R, G, B) 通道对应的像素取最小值输出。

由式 (14), 可得:

$$1 - I''(x) = (1 - \rho^{\text{dark}}(x))t(x) \quad (15)$$

根据 Land 提出的理论, 式 (15) 中图像 $1 - I''(x)$ 可分解为两幅不同的图像: 入射光图像 $t(x)$ 和反射物体图像 $1 - \rho^{\text{dark}}(x)$. 其中 $t(x)$ 描述了图像的低频信息, $1 - \rho^{\text{dark}}(x)$ 包含了图像的高频信息. Retinex 理论的目的就是忽略入射光图像 $t(x)$ 的性质, 获得物体的反射性质 $1 - \rho^{\text{dark}}(x)$, 从而达到颜色恒常, 实现图像增强的效果^[14]. 因此, $t(x)$ 的估计值 $t''(x)$ 可表示为

$$t''(x) = (1 - I''(x)) \otimes F(x) \quad (16)$$

式中, $\otimes$ 表示卷积操作, $F(x)$ 为中心环绕函数. 一般情况下, $F(x)$ 采用高斯函数, 其标准差为 0.5. 卷积窗口尺寸 h 由图像 $I''(x)$ 中尺寸的最小值 m 决定, 其表达式为

$$h = \text{floor}\left(\frac{m}{50}\right) \quad (17)$$

式中, $\text{floor}(\cdot)$ 表示向负无穷方向取整. 由于 $t''(x)$ 中像素的取值范围为 $[0, 1]$, 则式 (16) 可改写为

$$t''(x) = \min((1 - I''(x)) \otimes F(x), 1) \quad (18)$$

式中, $t''(x)$ 定义为介质传输率的粗略估计.

2.2.2 图像融合

经过高斯卷积处理后, 介质传输率的粗略估计 $t''(x)$ 整体偏暗, 而 $t'(x)$ 满足暗通道先验法则, 且定义为介质传输率 $t(x)$ 的初始估计. 因此, 本文以 $t'(x)$ 中灰度值分布为参考, 对 $t''(x)$ 中灰度值进行线性搬移, 其表达式为

$$t''(x) = \text{imadjust}(t''(x), [\min(t''(x)), \max(t''(x))], [t_d \cdot \min(t'(x)), \min(t_u \cdot \max(t'(x)), 1)]) \quad (19)$$

式中, $\text{imadjust}(\cdot)$ 表示对 $t''(x)$ 中灰度值进行线性映射, t_d 和 t_u 用来调节映射区间范围. 根据实验统计结果, 本文中 t_d 和 t_u 设置为 0.95 和 1.05.

由式 (6) 和式 (19) 可知, $t'(x)$ 满足暗通道先验条件, 而 $t''(x)$ 是在 Retinex 理论的基础上通过高斯卷积和灰度搬移获得, 两者分别从图像复原和图像增强的角度对介质传输率进行了估计, 具有互补性. 因此可以利用图像融合的技术, 对 $t'(x)$ 和 $t''(x)$ 按照一定比例进行融合.

图像融合分为数据级融合、特征级融合和决策级融合^[15]. 本文采用数据级融合 (也称为像素级融合) 中的加权平均算法对介质传输率进行柔性处理, 其表达式为

$$t'''(x) = \omega_1 \cdot t'(x) + \omega_2 \cdot t''(x) \quad (20)$$

式中, ω_1 和 ω_2 为加权系数, 且满足 $\omega_1 + \omega_2 = 1$ 的约束条件. Burt 等^[16] 提出了平均和选择相结合的方法, 即用一个匹配矩阵来表示两幅图像的相似度. 当两幅图像很相似时, 权值分别取 0.5 和 0.5; 若两者差异很大, 则选择最显著的那一幅图像, 此时权值为 0 和 1. 由于 $t'(x)$ 和 $t''(x)$ 都是对介质传输率的估计, 两者具有较高的相似性. 本文采用图像亮度特征, 利用相关系数对 $t'(x)$ 和 $t''(x)$ 的相似性进行度量, 经过反复实验, 权值 ω_1 和 ω_2 分别设置为 0.55 和 0.45.

2.2.3 联合双边滤波

由于 $t'(x)$ 为灰度开运算的结果, $t''(x)$ 为高斯卷积的输出, 两者经过图像融合处理后, $t'''(x)$ 中物体的边缘显得模糊. 从式 (3)、式 (6) 和式 (20) 可以看出, $t'''(x)$, $1 - \hat{I}^{\text{dark}}/A$ 和 $1 - I^{\text{dark}}/A$ 结构相似, 且 $1 - I^{\text{dark}}/A$ 具有大量的边缘特征和纹理细节. 因此, 本文采用 Paris 等^[17] 提出的快速联合双边滤波, 利用 $1 - I^{\text{dark}}/A$ 对 $t'''(x)$ 进行滤波处理. 对于图像 $t'''(x)$ 和 $1 - I^{\text{dark}}/A$, 联合双边滤波可表示为

$$t^{jb}(x) = \frac{1}{W_x^{jb}} \sum_{y \in S} G_{\sigma_\gamma} \left(\|t'''(x) - \left(1 - \frac{I^{\text{dark}}(y)}{A}\right)\| \right) \times G_{\sigma_s}(\|x - y\|) \left(1 - \frac{I^{\text{dark}}(y)}{A}\right) \quad (21)$$

式中, G_{σ_s} 和 G_{σ_γ} 为高斯函数, σ_s 为空域高斯模板的尺寸, σ_γ 为值域高斯函数的尺度. W_x^{jb} 为归一化系数, 其表达式为

$$W_x^{jb} = \sum_{y \in S} G_{\sigma_\gamma} \left(\|t'''(x) - \left(1 - \frac{I^{\text{dark}}(y)}{A}\right)\| \right) \times$$

$$G_{\sigma_s}(\|x - y\|) \quad (22)$$

经过联合双边滤波处理后, 输出介质传输率 $t^{jb}(x)$ 的边缘特性得到了显著提高.

2.2.4 值域调整

当雾图中存在大面积天空区域时, $\hat{\rho}^{\text{dark}}$ 中天空区域的取值不趋于 0, 故 $t'(x)$ 中天空区域的介质传输率的取值大于 $1 - \hat{I}^{\text{dark}}/A$. 因此, $t^{jb}(x)$ 中天空区域的介质传输率被低估, 导致复原图像在这些区域容易出现颜色失真. 文献 [1] 通过引入一个参数来判断大气光值 A 与暗通道 I^{dark} 差值绝对值大小, 从而判断雾图中是否含有明亮区域, 并人为改变传输率函数. 该方法可以获得较好的视觉效果, 但需针对不同图像进行参数调节.

本文采用文献 [18] 中自适应参数调整的方法对天空区域的介质传输率进行修正, 其表达式为

$$t_0 = \min \left(\max \left(\frac{n}{N}, 0.15 \right), 0.3 \right) \quad (23)$$

式中, N 为 $t^{jb}(x)$ 中像素总数, n 为 $t^{jb}(x)$ 中像素值小于 0.15 的像素点的个数, 固定值 0.15 和 0.3 用来限定 t_0 的上下限. t_0 为天空区域介质传输率的修正值, 即天空区域介质传输率的取值小于 t_0 时统一修正为 t_0 . 由式 (2) 可知, 天空区域的介质传输率具有最小值, 且已修正为不小于 t_0 , 因此介质传输率的下限值修改为 t_0 , 故介质传输率的最终估计 $t(x)$ 可表示为

$$t(x) = \min \left(\max \left(t^{jb}(x), t_0 \right), 1 \right) \quad (24)$$

2.3 图像复原

由式 (13) 和式 (24) 可知, 大气光幕 $V(x)$ 可表示为

$$V(x) = 1 - t(x) = 1 - \min \left(\max \left(t^{jb}(x), t_0 \right), 1 \right) \quad (25)$$

为了提高复原图像的清晰度和对比度, 本文引入参数 β 对大气光幕进行调整, 则式 (25) 可改写为

$$V(x) = 1 - \beta \cdot \min \left(\max \left(t^{jb}(x), t_0 \right), 1 \right) \quad (26)$$

式中, β 设置为 0.95. 由式 (13) 可知, 场景反照率 $\rho(x)$ 可表示为

$$\rho(x) = \frac{I'(x) - V(x)}{t(x)} \quad (27)$$

最后, 将场景反照率限制在 $[0, 1]$ 范围内, 可得复原图像 $O(x)$, 其表达式为

$$O(x) = \min \left(\max \left(\rho(x), 0 \right), 1 \right) \quad (28)$$

2.4 色调调整

在雾天条件下, 由于大气光的作用, 复原图像 $O(x)$ 通常会偏暗. 因此有必要对去雾后复原图像进行色调调整^[19-20], 以提高复原图像的细节和对比度. 本文采用 Drago 等^[21] 提出的自适应对数映射算子对复原图像进行色调调整.

对于复原图像 $O(x)$ 中的一个彩色通道 $O^C(x)$, 其色调调整函数可表示为

$$Op(x) = \frac{O_{\text{dmax}} \times 0.01}{\lg(O_{\text{max}}^C(x) + 1)} \times \frac{\ln(O^C(x) + 1)}{\ln \left(2 + \left(\left(\frac{O^C(x)}{O_{\text{max}}^C(x)} \right)^{\frac{\ln(b)}{\ln(0.5)}} \right) \times 8 \right)} \quad (29)$$

式中, $Op(x)$ 为彩色通道 $O^C(x)$ 色调调整后输出, O_{dmax} 为显示设备可以显示的最大亮度值, 其值通常取 100^[21]. b 为偏置参数, 它决定了高像素值被压缩的程度和较暗区域的细节可见度, 其推荐值为 0.85^[21]. $O_{\text{max}}^C(x)$ 为 $O^C(x)$ 中像素的最大值. 图 2 给出了复原图像天鹅采用色调调整前后的实验结果.

从图 2(b) 可以看出, 采用本文算法去雾后, 复原图像整体颜色偏暗, 且复原图像中细节不明显. 经过色调调整后, 图 2(c) 的整体亮度和对比度得到了提高. 对比图 2(d) 和图 2(e) 中的内容可以发现, 图像的细节信息也得到了有效提高.

3 实验结果与分析

3.1 算法复杂度分析

对于一幅大小为 $s_x \times s_y$ 的图像, 本文算法的复杂度主要来自式 (21) 中快速联合双边滤波算法的计算. 在文献 [17] 中, 快速联合双边滤波算法的时间复杂度为 $O(s_x s_y)$, 而本文算法中其他步骤均为简单操作. 因此, 本文算法的时间复杂度为 $O(s_x s_y)$, 它是图像像素数的线性函数, 具有很高的执行效率. 相比之下, Tarel 等^[10] 算法的时间复杂度为 $O(s_x s_y s_v^2 \ln s_v)$, 其中, s_v 为中值滤波的模板尺寸, 其取值一般较大, He 等^[9] 算法具有较高的时间和空间复杂度, 其时间复杂度为 $O(s_x^2 s_y^2 + s_x s_y s_w^2)$, 其中 s_w 为块窗口大小.

3.2 算法评价指标

为了衡量去雾算法的有效性, 本文从定性和定量两个角度对去雾图像进行评价, 其中定性以主观的视觉评价为主, 定量采用客观评价指标. 去雾图像的客观评价方法主要分为两类^[22]: 一类是仅从图像对比度角度衡量的方法; 另一类是从图像对比度和颜色两方面综合考虑的方法. 本文采用图像对比度和颜色对去雾图像进行客观评价. 其中, 对比度评价

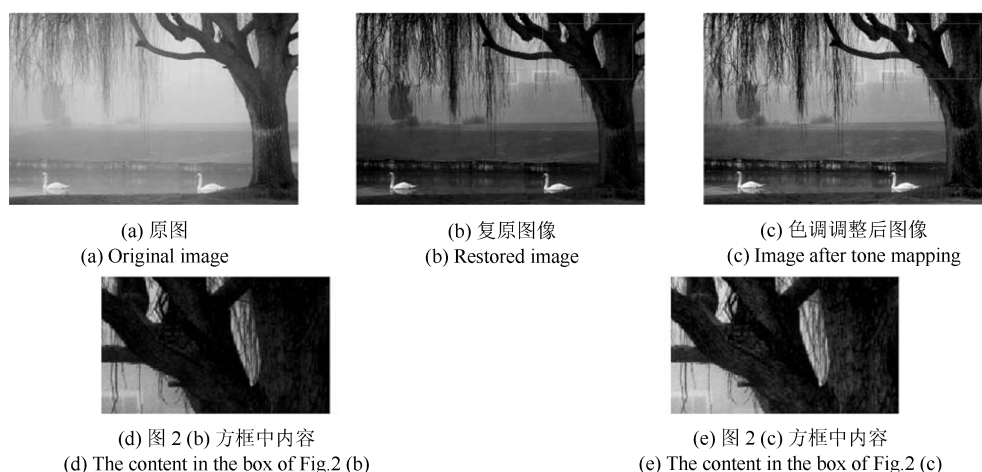


图 2 复原图像采用色调调整后对比结果

Fig. 2 The comparative results of restored image before and after tone mapping

指标采用 Hautière 等^[23] 提出的新增可见边比 e 和图像复原前后可见边梯度比 $\bar{r}$, 其表达式为

$$e = \frac{n_r - n_0}{n_0}, \quad \bar{r} = \frac{\bar{g}_r}{\bar{g}_0} \quad (30)$$

式中, n_0 和 n_r 分别表示雾化图像和去雾图像中可见边的数目, $\bar{g}_r$ 表示去雾图像的平均梯度, $\bar{g}_0$ 表示雾化图像的平均梯度. 一般情况下, e 和 $\bar{r}$ 较大, 表明去雾后的图像边缘强度较大、数量较多^[5]. 关于去雾图像颜色的客观评价, 本文采用色调保真度作为评价指标进行度量. 这里, 色调保真度采用 Jobson 等^[24] 提出的列基于图像统计特征的度量参数 H , 它代表色调的变化, 其定义为

$$H = \text{abs} \left(\frac{\text{mean}(H_{\text{out}}(x)) - \text{mean}(H_{\text{in}}(x))}{\text{mean}(H_{\text{in}}(x))} \right) \quad (31)$$

式中, $\text{abs}(\cdot)$ 表示对所有元素取绝对值, $H_{\text{in}}(x)$ 和 $H_{\text{out}}(x)$ 分别表示去雾前后彩色图像在 HSV 空间中的色调分量. 一般情况下, H 的取值越小, 复原图像的色调保真度就越高^[25].

3.3 算法评价与分析

为了验证本文算法的有效性, 选择 5 幅典型图像进行复原实验, 并从定性和定量两个角度进行评价与分析. 图 3 给出了 5 幅图像去雾前后的实验结果, 表 1 给出了 5 幅图像的定量评价指标值.

从图 3 可以看出, 经过本文算法处理后, 5 幅图像的清晰度和对比度都得到了很大程度的提高, 并且复原图像色彩鲜艳, 具有较好的图像颜色. 从表 1 中图像处理的运算时间 (硬件为 Intel 酷睿 i5 CPU, 8 GB 内存, 软件为 Matlab R2012a) 来看, 本文算法具有很快的运算速度, 并且 e 和 $\bar{r}$ 的取值得到了

不同程度的提高, 其中 $\bar{r}$ 的取值得到了明显提高, 说明本文算法能有效提高复原图像的清晰度和对比度. 从表 1 中 H 的取值来看, 本文算法得到了较小的 H 值, 获得了较好的图像颜色.

表 1 5 幅图像定量评价指标值

Table 1 Value of quantitative evaluation indicators with five images

名称	原图		本文算法去雾结果		
	尺寸 (像素)	时间 (s)	e	$\bar{r}$	H
高楼	600 × 400	0.523	0.083	1.834	0.0524
河道	375 × 450	0.396	1.221	3.079	0.0107
火车	400 × 600	0.527	1.349	2.907	0.0743
高山	600 × 450	0.574	2.107	2.734	0.1976
楼房	600 × 400	0.489	0.970	4.348	0.0061

3.4 算法比较与分析

本节从定性和定量两个角度分别与几种经典算法进行比较和分析.

首先, 本文选择图 3 中楼房和火车图像, 分别采用 He 等^[9]、Ancuti 等^[26] 算法与本文算法进行定性比较, 实验结果如图 4 和图 5 所示. 图 4 和图 5 中 He 等^[9] 和 Ancuti 等^[26] 算法结果分别来自文献 [9] 和文献 [26].

从图 4 和图 5 可以看出, He 等^[9]、Ancuti 等^[26] 和本文算法都获得了较好的去雾效果. 从去雾图像方框中内容来看, 相比 He 等^[9] 和 Ancuti 等^[26] 算法结果, 本文算法结果可以获得更好的清晰度和对比度和图像颜色.

其次, 本文选择 2 幅有雾图像田野和房子 (从上到下), 分别采用 Fattal^[8]、Tarel 等^[10] 和本文算法

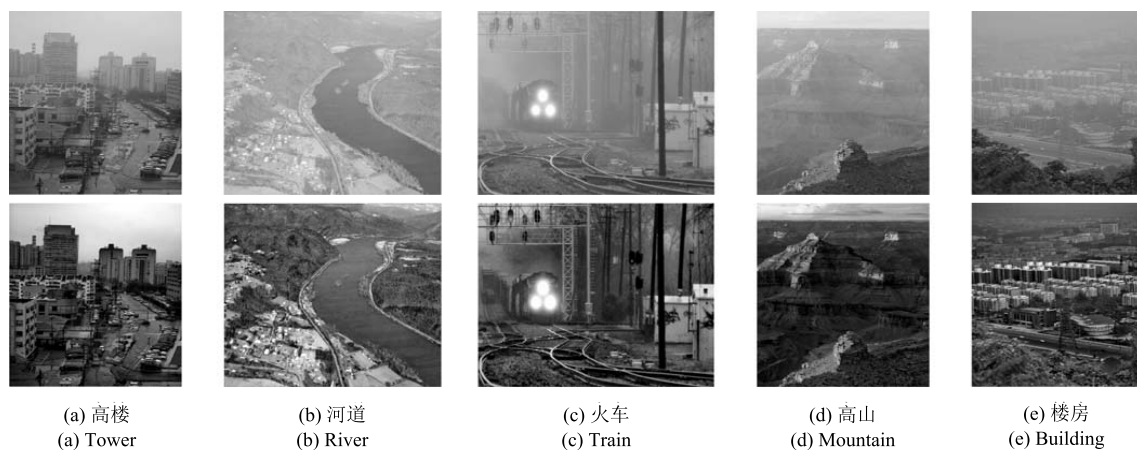


图 3 原始雾图 (上) 和本文算法复原图像 (下)

Fig. 3 Hazing images (up) and our algorithm's restored images (down)

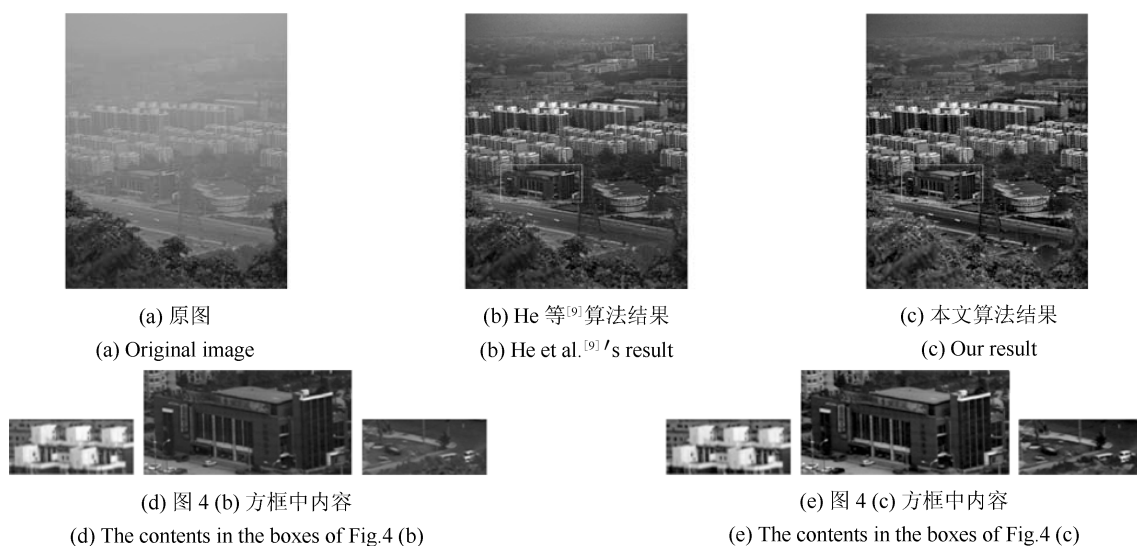


图 4 楼房图像采用不同算法去雾效果对比结果

Fig. 4 The comparative results of image building by dehazing with different algorithms

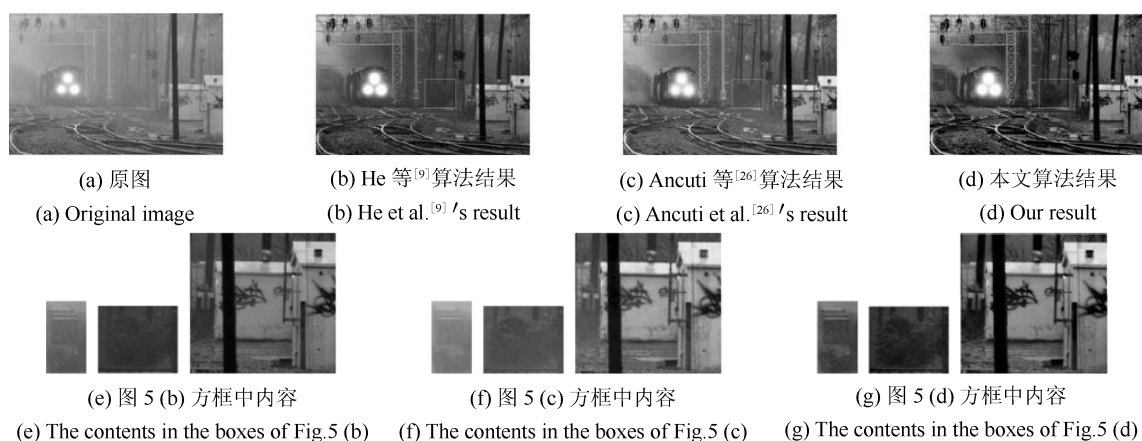


图 5 火车图像采用不同算法去雾效果对比结果

Fig. 5 The comparative results of image train by dehazing with different algorithms

进行定性比较, 实验结果如图 6 所示. 图 6 中 Fattal^[8] 和 Tarel 等^[10] 算法结果来自文献 [10].

从图 6 可以看出, 对于田野图像, 相比 Fattal^[8] 算法结果, Tarel 等^[10] 和本文算法能较好地去除图像远处场景的雾, 并且本文算法结果能够获得更好的清晰度和对比度. 从房子图像来看, Fattal^[8] 算法结果在树叶浓密的区域存在明显的颜色失真, Tarel 等^[10] 算法结果中窗户和壁灯的颜色显得过饱和, 且在景深突变的树叶间隙区域产生明显的 Halo 效应. 相比而言, 本文算法能有效消除 Halo 效应, 并获得较好的图像颜色.

最后, 选择 4 幅具有代表性的有雾图像 (图 7 从上到下依次为 y01、y16、ny12 和 ny17), 分别采用 Fattal^[8]、He 等^[9]、Kopf 等^[27]、Tarel 等^[10]、Ancuti 等^[26] 与本文算法进行定性和定量比较. 图 7 给出了 4 幅图像采用不同算法去雾前后的实验结果, 表 2 给出了 4 幅图像对应的定量评价指标值. 图 7 和表 2 中 Fattal^[8]、He 等^[9]、Kopf 等^[27] 和 Tarel 等^[10]

算法实验结果均来自文献 [10], Ancuti 等^[26] 算法实验结果来自文献 [26].

从图 7 可以看出, 进行比较的所有算法都不同程度地提高了复原图像的清晰度、对比度和图像颜色. 从表 2 中 e 和 $\bar{r}$ 的取值来看, Tarel 等^[10] 算法获得了较高的 $\bar{r}$ 值, 但 e 的取值较低. 一般情况下, 去雾算法增大 $\bar{r}$ 值时, e 的取值会变小, 故 e 和 $\bar{r}$ 的取值需保持平衡^[23]. 从表 2 还可以看出, 本文算法在获得较高 $\bar{r}$ 值的同时也获得了较大的 e 值. 另外, 从表 2 中 H 的取值来看, 本文算法能够得到较小的 H 值, 说明本文算法可以获得较高的色彩保真度, 得到较好的图像颜色.

4 结论

针对单幅图像去雾中存在的病态反问题, 提出了一种有效的基于暗通道先验和 Retinex 理论的去雾方法. 该方法结合了图像增强和图像复原的思想, 通过灰度开运算对大气光值进行区间估计, 采

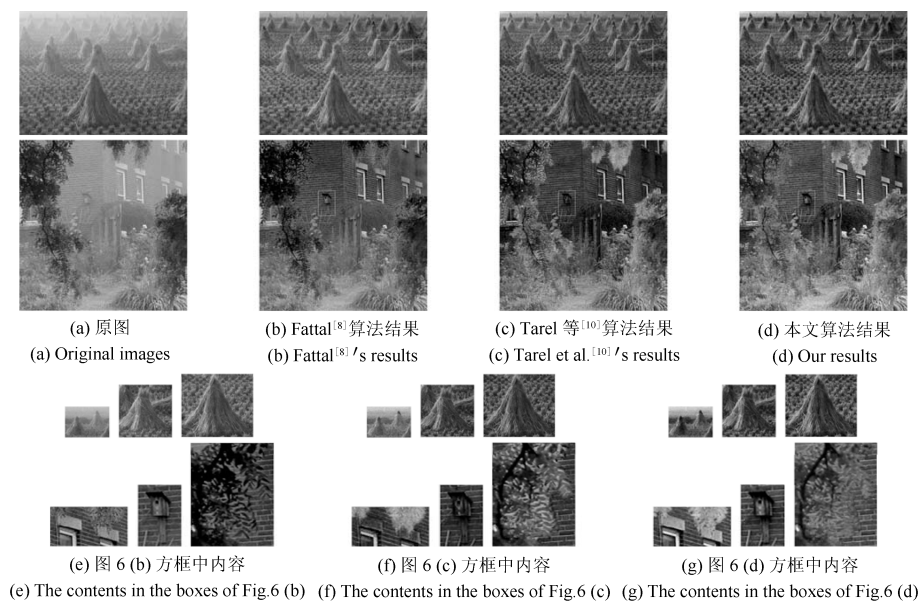


图 6 田野和房子图像采用不同算法去雾效果对比结果

Fig. 6 The comparative results of image field and house by dehazing with different algorithms

表 2 4 幅图像采用不同算法去雾后定量评价指标值

Table 2 Value of quantitative evaluation indicators by dehazing with different algorithms about 4 images

名称	Fattal 算法结果			He 等算法结果			Kopf 等算法结果			Tarel 等算法结果			Ancuti 等算法结果			本文算法结果		
	e	$\bar{r}$	H	e	$\bar{r}$	H	e	$\bar{r}$	H	e	$\bar{r}$	H	e	$\bar{r}$	H	e	$\bar{r}$	H
y01	0.04	1.23	0.1204	0.08	1.33	0.0700	0.09	1.62	0.0491	0.024	2.09	0.0263	0.07	1.19	0.0390	0.095	1.754	0.0362
y16	0.03	1.27	0.0474	0.06	1.42	0.0761	-0.01	1.34	0.0196	-0.008	2.01	0.0272	0.18	1.46	0.0970	0.106	1.969	0.0582
ny12	-0.06	1.32	0.0459	0.06	1.42	0.0247	0.05	1.42	0.0046	0.07	1.88	0.0903	0.02	1.49	0.0280	0.061	1.531	0.0021
ny17	-0.12	1.56	0.0643	0.01	1.65	0.1699	0.01	1.62	0.0071	-0.01	1.87	0.0647	0.12	1.54	0.3130	-0.015	1.907	0.0237

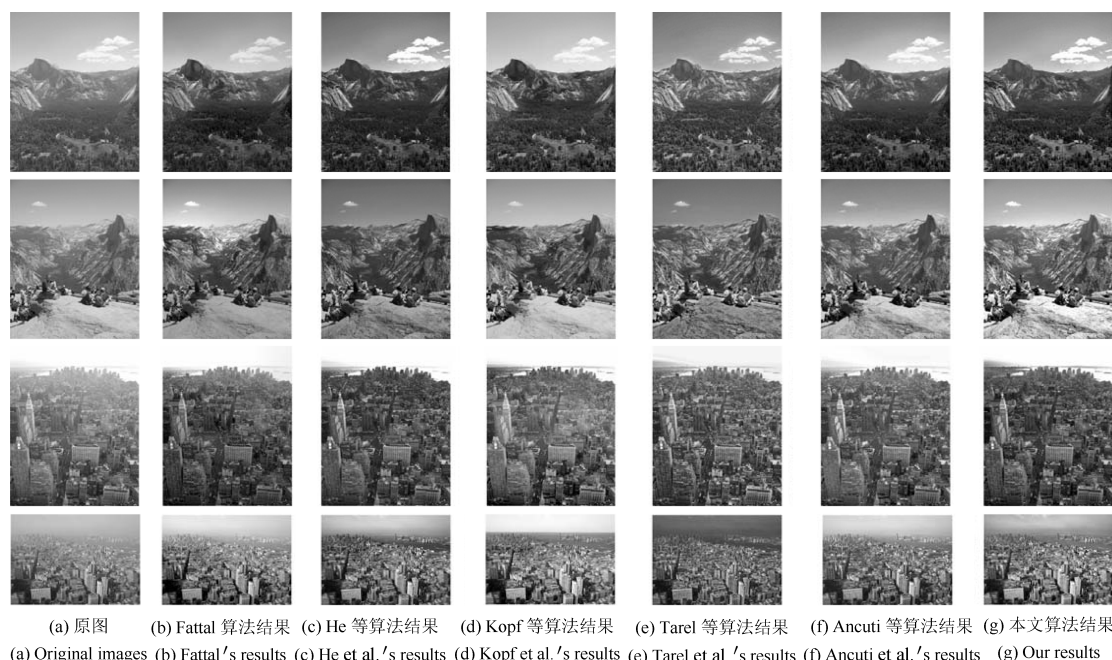


图 7 y01、y16、ny12 和 ny17 图像采用不同算法去雾前后结果

Fig. 7 Results of images y01, y16, ny12 and ny17 by dehazing with different algorithms before and after restoration

用高斯卷积和图像融合对介质传输率进行估计, 并利用快速联合双边滤波进行边缘优化, 同时对天空区域的介质传输率进行动态修正, 最后利用色调调整对复原图像进行整体优化. 实验结果表明, 本文算法具有很快的处理速度, 能有效提高复原图像的清晰度和对比度, 获得较好的图像颜色.

References

- 1 Sun Xiao-Ming, Sun Jun-Xi, Zhao Li-Rong, Cao Yong-Gang. Improved algorithm for single image haze removing using dark channel prior. *Journal of Image and Graphics*, 2014, **19**(3): 381–385
(孙小明, 孙俊喜, 赵立荣, 曹永刚. 暗原色先验单幅图像去雾改进算法. 中国图象图形学报, 2014, **19**(3): 381–385)
- 2 Wu Di, Zhu Qing-Song. The latest research progress of image dehazing. *Acta Automatica Sinica*, 2015, **41**(2): 221–239
(吴迪, 朱青松. 图像去雾的最新研究进展. 自动化学报, 2015, **41**(2): 221–239)
- 3 Ji Xiao-Qiang, Dai Ming, Yin Chuan-Li, Feng Yu-Ping, Bai Xu-Guang. Haze removal for aerial degraded images. *Optics and Precision Engineering*, 2011, **19**(7): 1659–1668
(嵇晓强, 戴明, 尹传历, 冯宇平, 柏旭光. 航拍降质图像的去雾处理. 光学精密工程, 2011, **19**(7): 1659–1668)
- 4 Nan Dong, Bi Du-Yan, Xu Yue-Lei, Wang Shi-Qiang, Lou Xiao-Long. Image dehazing method based on dark channel prior. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2013, **44**(10): 4101–4108
(南栋, 毕笃彦, 许悦雷, 王世强, 娄小龙. 基于暗原色先验的图像去雾算法. 中南大学学报(自然科学版), 2013, **44**(10): 4101–4108)
- 5 Sun Wei, Li Da-Jian, Liu Hong-Juan, Jia Wei. Fast single image fog removal based on atmospheric scattering model. *Optics and Precision Engineering*, 2013, **21**(4): 1040–1046
(孙伟, 李大健, 刘宏娟, 贾伟. 基于大气散射模型的单幅图像快速去雾. 光学精密工程, 2013, **21**(4): 1040–1046)
- 6 Li Quan-He, Bi Du-Yan, Xu Yue-Lei, Zha Yu-Fei. Haze degraded image scene rendition. *Acta Automatica Sinica*, 2014, **40**(4): 744–750
(李权合, 毕笃彦, 许悦雷, 查宇飞. 雾霾天气下可见光图像场景再现. 自动化学报, 2014, **40**(4): 744–750)
- 7 Tan R T. Visibility in bad weather from a single image. In: *Proceedings of the 2008 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Anchorage, USA: IEEE, 2008. 1–8
- 8 Fattal R. Single image dehazing. *ACM Transactions on Graphics*, 2008, **27**(3): Article No. 72
- 9 He K M, Sun J, Tang X O. Single image haze removal using dark channel prior. In: *Proceedings of the 2009 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Miami, USA: IEEE, 2009. 1956–1963
- 10 Tarel J P, Hautiere N. Fast visibility restoration from a single color or gray level image. In: *Proceedings of the 12th IEEE International Conference on Computer Vision*. Kyoto, USA: IEEE, 2009. 2201–2208
- 11 Namer E, Schechner Y Y. Advanced visibility improvement based on polarization filtered images. In: *Proceedings of the 2005 Polarization Science and Remote Sensing*. San Diego, USA: SPIE, 2005. 36–45
- 12 Cardei V C, Funt B, Barnard K. White point estimation for uncalibrated images. In: *Proceedings of the 7th IS and T/SID Color Imaging Conference: Color Science, Systems and Applications*. Scottsdale, 1999. 97–100
- 13 Yu Jing, Li Da-Peng, Liao Qing-Min. Physics-based fast single image fog removal. *Acta Automatica Sinica*, 2011, **37**(2): 1040–1046

- 143–149
(禹品, 李大鹏, 廖庆敏. 基于物理模型的快速单幅图像去雾方法. 自动化学报, 2011, **37**(2): 143–149)
- 14 Liu Hai-Bo, Tang Qun-Fang, Yang Jie. Application of improved histogram equalization and Retinex algorithm in gray image enhancement. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2014, **31**(5): 525–532
(刘海波, 汤群芳, 杨杰. 改进直方图均衡和 Retinex 算法在灰度图像增强中的应用. 量子电子学报, 2014, **31**(5): 525–532)
 - 15 Zhang Xiao-Gang, Tang Mei-Ling, Chen Hua, Tang Hong-Zhong. A dehazing method in single image based on double-area filter and image fusion. *Acta Automatica Sinica*, 2014, **40**(8): 1733–1739
(张小刚, 唐美玲, 陈华, 汤红忠. 一种结合双区域滤波和图像融合的单幅图像去雾算法. 自动化学报, 2014, **40**(8): 1733–1739)
 - 16 Burt P J, Kolczynski R J. Enhanced image capture through fusion. In: *Proceedings of the 4th International Conference on Computer Vision*. Berlin, USA: IEEE, 1993. 173–182
 - 17 Paris M, Fredo D. A fast approximation of the bilateral filter using a signal processing approach. In: *Proceedings of the 9th European Conference on Computer Vision*. Graz, Austria: Springer, 2006. 568–580
 - 18 Wu Xiao-Tian, Lu Jian-Feng, He Bo-Gen, Wu Chuan, Zhu Ming. Fast restoration of haze-degraded image. *Chinese Optics*, 2013, **6**(6): 892–899
(吴笑天, 鲁剑锋, 贺柏根, 吴川, 朱明. 雾天降质图像的快速复原. 中国光学, 2013, **6**(6): 892–899)
 - 19 Gan Jia-Jia, Xiao Chun-Xia. Fast image dehazing based on accurate scattering map. *Journal of Image and Graphics*, 2013, **18**(5): 583–590
(甘佳佳, 肖春霞. 结合精确大气散射图计算的图像快速去雾. 中国图象图形学报, 2013, **18**(5): 583–590)
 - 20 Zhang Hong-Ying, Zhang Sai-Nan, Wu Ya-Dong, Wu Bin. Fast haze removal algorithm for single image based on human visual characteristics. *Journal of Computer Applications*, 2014, **34**(6): 1753–1757, 1761
(张红英, 张赛楠, 吴亚东, 吴斌. 基于人眼视觉特性的快速单幅图像去雾算法. 计算机应用, 2014, **34**(6): 1753–1757, 1761)
 - 21 Drago F, Myszkowski K, Annen T, Chiba N. Adaptive logarithmic mapping for displaying high contrast scenes. *Computer Graphics Forum*, 2003, **22**(3): 419–426
 - 22 Guo Fan, Cai Zi-Xing. Objective assessment method for the clearness effect of image defogging algorithm. *Acta Automatica Sinica*, 2012, **38**(9): 1410–1419
(郭璠, 蔡自兴. 图像去雾算法清晰化效果客观评价方法. 自动化学报, 2012, **38**(9): 1410–1419)
 - 23 Hautière N, Tarel J P, Aubert D, Dumont É. Blind contrast enhancement assessment by gradient ratioing at visible edges. *Image Analysis and Stereology*, 2008, **27**(2): 87–95
 - 24 Jobson D J, Rahman Z, Woodell G A. Statistics of visual representation. In: *Proceedings of the 2002 Visual Information Processing XI*. Orlando, USA: SPIE, 2002. 25–35
 - 25 Li Ju-Xia, Yu Xue-Li. Enhance algorithm for fog images based on improved multi-scale Retinex. *Computer Science*, 2013, **40**(3): 299–301
(李菊霞, 余雪丽. 雾天条件下的多尺度 Retinex 图像增强算法. 计算机科学, 2013, **40**(3): 299–301)
 - 26 Ancuti C O, Ancuti C. Single image dehazing by multi-scale fusion. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2013, **22**(8): 3271–3282
 - 27 Kopf J, Neubert B, Chen B, Cohen M F, Cohen-Or D, Deussen O, Uyttendaele M, Lischinski D. Deep photo: model-based photograph enhancement and viewing. *ACM Transactions on Graphics*, 2008, **27**(5): Article No. 116



刘海波 武汉理工大学信息工程学院博士研究生. 主要研究方向为图像处理, 模式识别和盲信号处理. 本文通信作者.

E-mail: seainlost81@126.com

(**LIU Hai-Bo** Ph.D. candidate at the School of Information Engineering, Wuhan University of Technology. His research interest covers image processing, pattern recognition, and blind signal processing. Corresponding author of this paper.)



杨杰 武汉理工大学信息工程学院教授. 主要研究方向为图像处理, 信息隐藏, 密码学和多媒体通信.

E-mail: jieyang509@163.com

(**YANG Jie** Professor at the School of Information Engineering, Wuhan University of Technology. Her research interest covers image processing, information hiding, cryptography, and multimedia communication.)



吴正平 武汉理工大学信息工程学院博士研究生. 主要研究方向为图像和视频处理, 多传感器数据融合和视觉跟踪.

E-mail: lxywzp@163.com

(**WU Zheng-Ping** Ph.D. candidate at the School of Information Engineering, Wuhan University of Technology. His research interest covers image and video processing, multi-sensor data fusion, and visual tracking.)



张庆年 武汉理工大学交通学院教授. 主要研究方向为交通运输规划, 运输系统优化和决策, 交通安全管理.

E-mail: zqnwhut@163.com

(**ZHANG Qing-Nian** Professor at the School of Transportation, Wuhan University of Technology. His research interest covers traffic and transportation planning, optimization and decision making of transportation system, and transportation safety management.)



邓勇 武汉理工大学信息工程学院博士研究生. 主要研究方向为图像处理, 多媒体通信和机器识别.

E-mail: xd_dy@163.com

(**DENG Yong** Ph.D. candidate at the School of Information Engineering, Wuhan University of Technology. His research interest covers image processing, multimedia communication, and machine recognition.)