

基于透射率权值因子的雾天图像融合增强算法

江巨浪^{*①} 孙伟^① 王振东^② 朱柱^① 郑江云^①

^①(安庆师范大学物理与电气工程学院 安庆 246133)

^②(中国科学院安徽光学精密机械研究所 合肥 230031)

摘要: 雾天图像增强具有重要现实意义。由于现有的图像去雾算法在提升图像全局对比度的能力上存在不足,为此将暗通道先验去雾算法与直方图均衡化算法的各自优势进行整合,该文提出一种雾天图像增强新算法。首先,分别采用基于导向滤波的暗通道先验去雾算法和基于HSV色彩空间的直方图均衡化算法处理雾天图像;然后,基于修正的透射率图构造权值因子,将上述两种处理结果加权融合,得到输出图像。仿真实验结果表明,该算法比现有去雾算法具有更高的标准差、平均梯度与信息熵,具有更好的全局与局部对比度增强效果。算法运行时间主要依赖于图像去雾环节,处理一般尺寸图像能够满足实时要求。

关键词: 图像融合; 雾天图像; 透射率; 暗通道先验; 直方图均衡

中图分类号: TP941; TP391

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2018)10-2388-07

DOI: 10.11999/JEIT171032

Integrated Enhancement Algorithm for Hazy Image Using Transmittance as Weighting Factor

JIANG Julang^① SUN Wei^① WANG Zhendong^②

ZHU Zhu^① ZHENG Jiangyun^①

^①(School of Physics and Electrical Engineering, Anqing Normal University, Anqing 246133, China)

^②(Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: Hazy image enhancement has important practical significance. Since the existing haze removal algorithms have disadvantages in improving the global contrast of images, a novel hazy image enhancement algorithm is presented by integrating advantages of haze removal and histogram equalization. Firstly, the hazy image is processed respectively using guided filtering-based dark channel prior algorithm and HSV space-based histogram equalization algorithm. Then, the output image is obtained by fusing the above two results using weighting factor which is constructed by the revised transmittance map. Simulation results show that the algorithm has higher standard deviation, average gradient and information entropy than the present haze removal algorithm, and shows better result of global and local contrast. The running time of the algorithm mainly depends on the process of haze removal, which can meet the real-time requirements for normal size image.

Key words: Image fusion; Hazy image; Transmittance; Dark channel prior; Histogram equalization

1 引言

雾是一种悬浮在大气中的气溶胶分子,其对可

见光的散射作用导致可见光波段图像的降质。雾天图像普遍存在细节退化、对比度降低、色彩失真等缺陷,对雾天图像的增强具有广泛的现实需求。目前主要采用两种雾天图像增强方法,分别是基于图像对比度增强的方法和基于物理模型的方法^[1]。直方图均衡化是一种常用的对比度增强方法。雾天图像对比度低,其直方图具有较窄的灰度级分布,直方图均衡化可以自动扩展图像灰度级动态范围,提升图像全局和局部对比度,达到突显目标区域、弱化雾对图像影响的目的^[2,3]。图像增强方法尽管有明显的对比度增强作用,但由于未考虑雾化效果产

收稿日期: 2017-11-02; 改回日期: 2018-07-02; 网络出版: 2018-07-30

*通信作者: 江巨浪 jiangjulang@126.com

基金项目: 国家自然科学基金(61701006), 安徽省自然科学基金(1708085QF147), 安徽省高校自然科学研究重点项目(KJ2015A234)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61701006), The Anhui Natural Science Foundation (1708085QF147), The Natural Science Key Foundation of Anhui Education Committee (KJ2015A234)

生机理，通常不能较好地恢复被雾掩盖的图像细节，且难以纠正雾天产生的色彩失真，去雾效果不理想。

基于物理模型方法的典型代表是He等人^[4]提出的暗通道先验图像去雾算法。文献^[4]总结了图像暗通道先验规律，给出了雾天图像退化模型，通过逆向计算实现图像去雾，处理大多数雾天图像能够取得令人满意的去雾效果。近年来，文献^[4]算法得到了广泛的研究和应用，之后的大量图像去雾算法研究都是以其为基础进行改进。为了解决可能出现的天空区域色彩失真与边缘光晕等问题，提出了多种改进算法。汤群芳等人^[5]采用四叉树搜索算法对大气光值进行估计，采用双阈值判断方法对天空区域进行识别和修正，最后通过色调调整解决天空色彩失真。肖进胜等人^[6]将引导滤波用于天空区域细化分割，利用中值滤波获取更为清晰的透射率，能够有效抑制景物边缘光晕。陈丹丹等人^[7]构造一个修正函数用于纠正暗先验失效的明亮区域的大气耗散函数，改善天空彩色失真。王伟鹏等人^[8]将数学形态学与图像加权融合方法用于大气耗散函数估计，以改善光晕效应和天空颜色失真；邢晓敏等人^[9]采用最大类间方差法分割图像天空区域，并将天空区域平均亮度作为大气光值，明显改善了图像去雾后的光晕和色彩失真。赵锦威等人^[10]采用支持向量机(SVM)对大气光进行有效性校验，然后采用基于块偏移的精细透射率计算方法抑制光晕像素数量。还有一些图像去雾的研究是针对特殊环境下的雾天图像。代书博等人^[11]针对遥感图像特点以及实时去雾要求，直接通过像素三颜色通道最小值获取图像暗原色图，在保证去雾效果前提下将处理时间减少为原算法的2%。Huang等人^[12]通过深度估计、颜色分析与视觉恢复3个处理环节，使算法适用于恶劣天气下的图像去雾；杨爱萍等人^[13]建立了含有人工光源的夜间雾天成像模型，提出的算法能自适应处理光源区域和非光源区域，较好地解决了色偏与光晕问题。Fattal^[14]基于场景表面阴影与透射率局部统计不相关假设估算透射率图与恢复无雾图像，该方法处理非浓雾图像获得理想效果。文献^[15-17]分别采取导向滤波、双边滤波、边缘替代法代替文献^[4]的软抠图处理，显著提高了算法效率。

在视觉监控、目标识别等应用领域，雾天图像增强需要兼顾两方面需求：一是图像去雾，二是图像的全局对比度增强。考察现有的暗通道先验去雾算法，或者直方图均衡化对比度算法，很难通过其中的一种方法同时满足以上两方面需求。本文以基于导向滤波的暗通道先验去雾算法为基础，以透射

率图构造权值因子，对暗通道先验去雾图像与直方图均衡化图像进行加权融合，实现雾天图像增强。实验结果表明，该算法能够合理兼顾图像去雾与对比度增强的两方面需要，雾天图像增强效果令人满意。

2 相关算法分析

2.1 基于导向滤波的暗通道先验图像去雾

在近年来提出的众多去雾算法中，文献^[15]提出的基于导向滤波的暗通道先验去雾算法最为有效。该方法将雾天图像退化模型描述为

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

其中， I 为有雾图像， J 为待恢复的无雾图像， A 为大气光强度， t 为场景反射光的透射率， x 为像素坐标。暗通道先验规律认为无雾清晰图像中的每个局部区域都存在阴影，至少有一个像素点在某一颜色分量上的强度值近似为零。图像 I 的暗通道计算如式(2)：

$$I^{\text{dark}}(x) = \min_{y \in \Omega(x)} \left(\min_c (I^c(y)) \right) \quad (2)$$

其中， $\Omega(x)$ 表示以像素 x 为中心的局部邻域， I^c 为R, G, B任一颜色分量。大气光强 A 可取为暗通道中最亮的0.1%像素的均值。近似透射率 t_1 计算如式(3)：

$$t_1(x) = 1 - \omega \min_{y \in \Omega(x)} \left(\min_c \left(\frac{I^c(y)}{A^c} \right) \right) \quad (3)$$

参数 ω 用于在景深较远处保留少量雾，以有利于改善去雾效果， ω 经验值取为0.95。以 t_1 为输入，以 I 为引导，通过导向滤波可获得更加精细的透射率 t_2 。以图像 I 为引导，在 I 和 t_2 之间建立一个基于2维窗口的局部线性模型：

$$t_2(x) = a_k I(x) + b_k, \quad x \in w_k \quad (4)$$

其中， w_k 为像素 x 的邻域， (a_k, b_k) 在此邻域中为常数。以最小化 t 和 t_0 之间的差异为代价函数，用于确定 a_k 与 b_k 的值：

$$E(a_k, b_k) = \sum_{i \in w_k} \left((a_k I_i + b_k - t_1)^2 + \varepsilon a_k^2 \right) \quad (5)$$

其中， ε 为调整参数，防止 a_k 过大。通过导向滤波方法得到的透射率 t_2 包含更为丰富的细节信息。最后由式(6)计算无雾图像：

$$J(x) = \frac{I(x) - A}{\max(t_2(x, y), 0.1)} + A \quad (6)$$

图1(a)是雾天彩色图像，图1(b)是基于导向滤波方法生成的透射率图。观察图1(b)中透射率值较小的A区域，所包含的像素景深相对较大；B区域

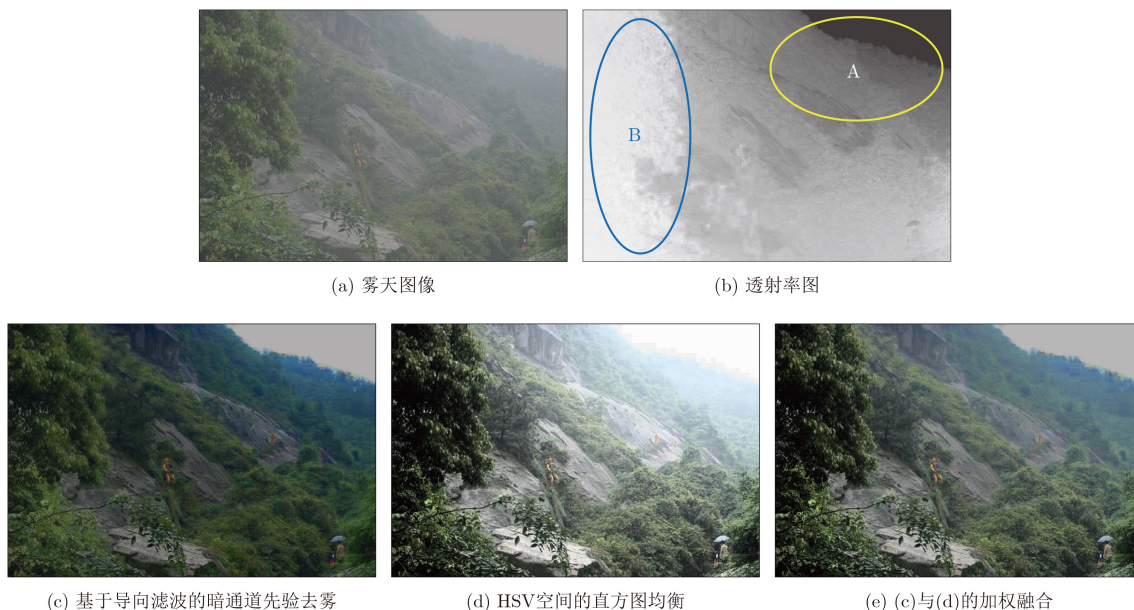


图1 雾天图像增强结果比较

的景深则较小,透射率值相对较大。图1(c)为基于导向滤波的暗通道先验去雾处理结果,去雾效果显著。尤其是A区域中像素景深较大,图1(a)中的该区域细节严重退化,去雾处理后的图1(c)复原了被雾掩盖的树木纹理与颜色,山体与天空的分界线也变得清晰可见。

然而,去雾算法直接用于图像对比度增强也存在以下不足^[4]:尽管去雾算法对局部细节与颜色的退化有理想的恢复效果,但由于场景反射光强通常小于大气光强,去雾处理后的图像通常比去雾前要黯淡一些,图像对比度改善效果仍不理想。在图1(c)中,输出图像的全局对比度和局部对比度与其他图像增强方法相比存在一定差距,输出图像亮度也整体偏暗。此外,对于包含灰色明亮区域(如天空、白色大理石等)的图像,去雾处理还可能产生明显的图像失真。

2.2 基于HSV色彩空间的直方图均衡化

直方图均衡化是一种得到广泛应用的图像对比度增强方法。该方法利用图像直方图信息计算灰度级的累积概率密度函数,将其用作灰度转换函数对图像进行灰度变换。如果采用直方图均衡化方法直接处理彩色图像的 R, G, B 分量,将会导致色调失真。本文采用基于HSV色彩空间的图像直方图均衡化方法,在增强彩色图像对比度的同时,保持图像色调不变。具体步骤如下:

步骤1 将输入图像 I 从RGB色彩空间转换到HSV色彩空间;

步骤2 对HSV空间中的亮度分量 V 进行直方图均衡化处理,得到增强的亮度分量 V^* ;色调分量 H 与饱和度分量 S 均保持不变;

步骤3 根据HSV空间的 H, S, V^* ,转换回到RGB色彩空间,得到输出图像。

直方图均衡化对于雾天图像有一定的增强作用。这是由于雾天图像灰度级通常集中分布在直方图中的较窄区域,直方图均衡化能够自动扩展灰度级动态范围,达到增强图像对比度目的。图1(d)是基于HSV色彩空间对图1(a)进行直方图均衡的结果,可看到图像整体对比度比图1(c)有较大提升,同时B区域中的近景树木的局部细节有更好的对比度增强效果。

直方图均衡化用于处理雾天图像同样存在不足之处。首先是去雾效果不够好,例如在图1(d)中的A区域像素的色调与饱和度没有随直方图均衡化得到有效恢复;其次,直方图均衡化容易导致过增强现象,体现在A区域亮度过大,细节丢失,山体与天空的分界线变得模糊。

3 基于透射率权值因子的加权融合增强算法

雾天图像增强通常不仅需要去雾处理,还需要提高全局对比度。本文将去雾处理与直方图均衡处理的图像进行融合,通过透射率构造的权值因子突出两种处理方法的各自优势,削弱各自缺陷,提升雾天图像增强质量。根据去雾算法中透射率的物理意义,对于透射率值较低的像素,图像处理以去雾为主,图像去雾在图像融合中所占权重相对较大;对于透射率高的像素,以对比度增强为主,直方图均衡处理所占权重相对较大。

由式(4)计算得到的透射率 t_2 的值近似位于 $0 \sim 1$ 之间。为使权值随像素透射率的不同能够充分变化,按式(7)对 t_2 进行归一化处理。

$$t^*(x) = \frac{t_2(x) - \min(t_2)}{\max(t_2) - \min(t_2)} \quad (7)$$

$t^*(x)$ 为像素 x 的归一化透射率。为保留两种处理方法对图像融合结果的最小影响，对 t^* 进行限幅处理。

$$T(x) = \begin{cases} t_{\min}, & t^* < t_{\min} \\ t_{\max}, & t^* > t_{\max} \\ t^*, & \text{其他} \end{cases} \quad (8)$$

实验确定的经验值是取 $t_{\min}=0.1, t_{\max}=0.9$ 。雾天图像增强算法步骤如下：

步骤 1 采用导向滤波的暗通道先验去雾算法处理雾天图像 I ，得到去雾图像 J_1 ；

步骤 2 对去雾处理的透射率 t_2 ，采用式(7)与式(8)进行归一化与限幅处理，得到修正后的透射率 T ；

步骤 3 采用基于HSV色彩空间的直方图均衡算法处理图像 I ，得到对比度增强图像 J_2 ；

步骤 4 按照式(9)将去雾图像 J_1 与增强图像 J_2 进行融合，得到输出图像 J 。

$$J(x) = (1 - T(x)) \cdot J_1(x) + T(x) \cdot J_2(x) \quad (9)$$

式(9)中的权值因子由透射率 T 直接构造。对于透射率 T 较大的像素，去雾图像 J_1 的权重相对较小，而增强图像 J_2 的权重较大；反之，对于透射率 T 较小的像素 J_1 权重较大而 J_2 权重较小。因此，该算法能够将去雾处理与对比度增强处理的结果自动

进行融合，并且依据不同像素的透射率值自动分配合理的权值因子。

图1(e)是按照该算法将图1(c)与图1(d)进行加权融合的结果。对于场景中的B区域，景深较小而透射率值较大，根据式(9)，图1(d)在图像融合中有较大权重。图1(e)更多体现了图1(d)中的近景树木的局部对比度优势。对于场景中的A区域，景深较大而透射率 T 较小，图1(e)更多凸显了图1(c)的去雾优势，体现在远处山体的树木细节与颜色得到较好恢复，回避了图1(d)在A区域的过增强缺陷。综上所述，图1(e)通过图像融合方法，利用了去雾算法对低透射率区域的去雾能力与HE算法对高透射率区域的对比度增强效果，回避了去雾算法的对比度增强不足与直方图均衡化算法的过增强缺陷。

4 实验结果与分析

从互联网下载了4幅雾天图像，检测本文算法对雾天图像的增强效果。在个人计算机上使用Matlab (R2010a)进行仿真实验，操作系统为Windows7，计算机配置为3.0 GHz Intel Pentium Dual处理器、2 G内存。

4.1 主观评价

图2(a)为待增强的雾天图像。采用基于导向滤波的暗通道先验去雾算法(文献[15]算法)生成透射率图，然后进行归一化与限幅处理，结果见图2(b)；



图2 雾天图像增强结果

为方便考察图像不同区域的增强效果,在透射率图中对观察区域进行编号。雾天图像透射率图通常遵循以下规律:远景物体的透射率值相对较小,在透射率图中对应于较暗区域,用编号A标注;而近景物体透射率值相对较大,对应于透射率图中的较亮区域,用编号B标注。图2(c)是采用文献文献[15]算法进行去雾处理的结果,图2(d)是基于HSV色彩空间的直方图均衡化结果。图2(e)是采用本文算法的图像融合结果。

对于透射率值较小的A区域,文献[15]算法比HSV色彩空间的直方图均衡化有明显优势。图2中各图像的A区域景物细节在处理之前都因雾气影响而严重退化,经过文献[15]算法处理之后,观察图2(c)中图像1的候车亭轮廓与颜色、图像2的远方山体颜色与轮廓、图像3中道路尽头的树干与树枝、图像4的楼面纹理细节,均取得良好的去雾效果。观察图2(d)中HSV色彩空间的直方图均衡化结果,可看出各图像中的A区域亮度都有所提升,但同时出现了不同程度过增强现象,被雾退化的轮廓细节没有得到有效恢复。本文算法通过对图2(c)与图2(d)的加权融合,得到的结果见图2(e)。由于A区域透射率值较小,文献[15]算法的去雾结果在图像融合中有较大权重,本文算法在A区域不仅有良好的去雾效果,同时避免了过增强影响。

对于透射率值较大的B区域,因受雾化影响相对较少,文献[15]算法对该区域对比度增强作用不

够明显,同时亮度有所降低。与此相反,HSV色彩空间的直方图均衡化对B区域有显著的对比度增强作用,增强效果体现在图像1中的人物与车体、图像2中的墙体与近处树林、图像3中的近处路面细节、图像4中的车辆道路与近处树木。由于B区域透射率值较大,HSV色彩空间的直方图均衡化结果在图像融合中所占权重较大,本文算法因此能够在B区域获得良好的对比度增强效果。

综上所述,本文算法通过基于透射率权值因子的图像融合方法,综合利用了暗通道先验的图像去雾算法与直方图均衡化算法的各自优势,合理回避了这两种方法的不足,增强雾天图像获得令人满意的效果。另外,观察图像处理前后的亮度变化可以发现,图像去雾算法通常导致亮度比处理前显得黯淡,而直方图均衡化算法容易导致局部区域出现过增强,通过图像融合处理可以使图像保持一个合理的亮度。

4.2 客观评价

为从客观上评价算法性能,采用标准差、平均梯度、信息熵、图像平均亮度作为雾天图像增强效果的定量评价指标。对图2中的图像增强算法性能进行了数据统计,如表1所示。统计数据表明,本文算法增强图像的标准差、平均梯度、信息熵分别比文献[15]算法平均提升了163.8%,69.4%和7.1%,和单纯的去雾算法相比具有更高的全局对比度。与直方图均衡化算法相比,本文算法的标准差与梯度指

表1 不同增强算法的客观评价

图像	增强算法	标准差	平均梯度	信息熵	亮度
图像1	输入图像	19.568	1.505	6.015	88.556
	文献[15]算法	23.001	3.039	6.343	42.771
	HSV空间HE	75.139	5.937	7.515	127.243
	本文算法	111.206	9.375	7.314	82.391
图像2	输入图像	53.585	7.464	7.627	108.122
	文献[15]算法	44.020	7.164	7.085	71.431
	HSV空间HE	73.494	12.531	7.759	127.331
	本文算法	110.384	12.990	7.538	95.696
图像3	输入图像	58.324	6.359	7.749	103.088
	文献[15]算法	44.392	6.788	7.149	65.680
	HSV空间HE	74.148	8.584	7.877	127.448
	本文算法	111.854	11.428	7.620	93.043
图像4	输入图像	75.896	9.661	7.449	119.459
	文献[15]算法	63.888	10.246	7.488	59.750
	HSV空间HE	76.886	9.767	7.460	127.167
	本文算法	129.088	12.360	7.582	80.07
平均	输入图像	51.843	6.247	7.21	104.806
	文献[15]算法	43.825	6.809	7.0162	59.908
	HSV空间HE	74.916	9.204	7.652	127.297
	本文算法	115.633	11.538	7.513	87.8

标平均提高了54.3%和25.3%, 体现出更好的局部细节表现能力。从图像平均亮度的统计结果看, 单纯的去雾算法使图像亮度平均降低了42.8%, 而本文方法使图像亮度比去雾算法平均提升了46.5%, 得到合理恢复。

在算法效率方面, 由于透射率计算已包含去雾算法之中, 本文算法只是在文献[15]算法基础上增加了图像色彩模型转换与直方图均衡化的处理时间。由于后者算法复杂度远低于去雾算法, 本文运行时间在去雾算法基础上略有增加。以处理图2中的图像4为例, 其分辨率为500×600, 文献[15]算法耗时1.536 s, 本文算法耗时1.703 s。统计图2的4幅图像平均处理时间, 本文算法比文献[15]算法增加了约10%~12%, 基本满足实时要求。

5 结束语

针对图像去雾与增强全局对比度的需要, 本文提出了一种雾天图像增强新算法。该算法采用图像融合方法, 合理运用暗通道先验的图像去雾算法与直方图均衡化算法的各自优势, 回避二者的不足。利用透射率构造权值因子, 使图像去雾在低透射率区域发挥更大作用, 直方图均衡化则对高透射率区域产生更多影响。主观评价与客观统计数据表明, 该算法用于增强雾天图像, 能够有效恢复被雾掩盖的场景细节, 显著提升图像全局对比度, 获得自然的图像增强效果。

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): 221–227. doi: 10.16383/j.aas.2015.c131137.
WU Di and ZHU Qingsong. The latest research progress of image dehazing[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2015, 41(2): 221–227. doi: 10.16383/j.aas.2015.c131137.
- [2] 艾明晶, 戴隆忠, 曹庆华. 雾天环境下自适应图像增强去雾方法研究[J]. 计算机仿真, 2009, 26(7): 244–247. doi: 10.3969/j.issn.1006-9348.2009.07.062.
AI Mingjing, DAI Longzhong, and CAO Qinghua. A self-adaptation image enhancement method for fog elimination in foggy environment[J]. *Computer Simulation*, 2009, 26(7): 244–247. doi: 10.3969/j.issn.1006-9348.2009.07.062.
- [3] TAN R T. Visibility in bad weather from a single image[C]. Proceedings of the Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Anchorage, USA, 2008: 1–8. doi: 10.1109/CVPR.2008.4587643.
- [4] HE Kaiming, SUN Jian, and TANG Xiaoou. Single image haze removal using dark channel prior[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2011, 33(12): 2341–2353. doi: 10.1109/TPAMI.2010.168.
- [5] 汤群芳, 杨杰, 刘海波, 等. 基于暗通道先验的单幅图像快速去雾方法[J]. 光子学报, 2017, 46(9): 0910001. doi: 10.3788/gzxb20174609.0910001.
TANG Qunfang, YANG Jie, LIU Haibo, et al. Fast single-image dehazing method based on dark channel prior[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, 46(9): 0910001. doi: 10.3788/gzxb20174609.0910001.
- [6] 肖进胜, 高威, 邹白昱, 等. 基于天空约束暗通道先验的图像去雾[J]. 电子学报, 2017, 45(2): 346–352. doi: 10.3969/j.issn.0372-2112.2017.02.012.
XIAO Jinsheng, GAO Wei, ZOU Baiyu, et al. Image dehazing based on sky-constrained dark channel prior[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2017, 45(2): 346–352. doi: 10.3969/j.issn.0372-2112.2017.02.012.
- [7] 陈丹丹, 陈莉, 张永新, 等. 修正大气耗散函数的单幅图像去雾[J]. 中国图象图形学报, 2017, 22(6): 787–796. doi: 10.11834/jig.160616.
CHEN Dandan, CHEN Li, ZHANG Yongxin, et al. Single-image dehazing algorithm to correct atmosphere veil[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2017, 22(6): 787–796. doi: 10.11834/jig.160616.
- [8] 王伟鹏, 戴声奎. 结合图像融合与分割的快速去雾[J]. 中国图象图形学, 2014, 19(8): 1155–1161. doi: 10.11834/jig.20140806.
WANG Weipeng and DAI Shengkui. Fast haze removal method based on image fusion and segmentation[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2014, 19(8): 1155–1161. doi: 10.11834/jig.20140806.
- [9] 邢晓敏, 刘威. 雾天交通场景中单幅图像去雾[J]. 中国图象图形学报, 2016, 21(11): 1440–1447. doi: 10.11834/jig.20161103.
XING Xiaomin and LIU Wei. Removal for single traffic image[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2016, 21(11): 1440–1447. doi: 10.11834/jig.20161103.
- [10] 赵锦威, 沈逸云, 刘春晓, 等. 暗通道先验图像去雾的大气光校验和光晕消除[J]. 中国图象图形学报, 2016, 21(9): 1221–1228. doi: 10.11834/jig.20160911.
ZHAO Jinwei, SHEN Yiyun, LIU Chunxiao, et al. Dark channel prior-based image dehazing with atmospheric light validation and halo elimination[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2016, 21(9): 1221–1228. doi: 10.11834/jig.20160911.
- [11] 代书博, 徐伟, 朴永杰, 等. 基于暗原色先验的遥感图像去雾方法[J]. 光学学报, 2017, 37(3): 348–354. doi: 10.3788/aos01737.038002.
DAI Shubo, XU Wei, PIAO Yongjie, et al. Remote sensing image defogging based on dark channel prior[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(3): 348–354. doi: 10.3788/aos01737.038002.
- [12] HUANG S C, CHEN B H, and WANG W J. Visibility restoration of single hazy images captured in real-world

- weather conditions[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2014, 24(10): 1814–1824. doi: [10.1109/TCSVT.2014.2317854](https://doi.org/10.1109/TCSVT.2014.2317854).
- [13] 杨爱萍, 王南, 庞彦伟, 等. 人工光源条件下夜间雾天图像建模及去雾[J]. *电子与信息学报*, 2018, 40(6): 1330–1337. doi: [10.11999/JEIT170704](https://doi.org/10.11999/JEIT170704).
- YANG Aiping, WANG Nan, PANG Yanwei, *et al.* Nighttime haze removal based on new imaging model with artificial light sources[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2018, 40(6): 1330–1337. doi: [10.11999/JEIT170704](https://doi.org/10.11999/JEIT170704).
- [14] FATTAL R. Signal image dehazing[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2008, 27(3): 721–728. doi: [10.1145/1360612.1360671](https://doi.org/10.1145/1360612.1360671).
- [15] HE Kaiming, SUN Jian, and TANG Xiaoou. Guided image filtering[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2013, 35(6): 1397–1409. doi: [10.1109/TPAMI.2012.213](https://doi.org/10.1109/TPAMI.2012.213).
- [16] 庞春莹, 嵇晓强, 孙丽娜, 等. 一种改进的图像快速去雾新方法[J]. *光子学报*, 2013, 42(7): 872–877. doi: [10.3788/gzxb20134207.0872](https://doi.org/10.3788/gzxb20134207.0872).
- PANG Chunying, JI Xiaoqiang, SUN Lina, *et al.* An improved method of image fast defogging[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, 42(7): 872–877. doi: [10.3788/gzxb20134207.0872](https://doi.org/10.3788/gzxb20134207.0872).
- [17] 张登银, 鞠铭焯, 王雪梅. 一种基于暗通道先验的快速图像去雾算法[J]. *电子学报*, 2015, 43(7): 1437–1443. doi: [10.3969/j.issn.0372-2112.2015.07.029](https://doi.org/10.3969/j.issn.0372-2112.2015.07.029).
- ZHANG Dengyin, JU Mingye, and WANG Xuemei. A fast image haze removal algorithm using dark channel prior[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2015, 43(7): 1437–1443. doi: [10.3969/j.issn.0372-2112.2015.07.029](https://doi.org/10.3969/j.issn.0372-2112.2015.07.029).
- 江巨浪: 男, 1967年生, 教授, 研究方向为数字图像分析与处理.
孙 伟: 男, 1994年生, 硕士生, 研究方向为数字图像处理.
王振东: 男, 1992年生, 博士生, 研究方向为数字图像处理.
朱 柱: 男, 1983年生, 副教授, 研究方向为图像分析与处理.
郑江云: 女, 1973年生, 副教授, 研究方向为图像分析与处理.