Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology

文章编号: 2095-4980(2019)06-1078-08

基于环境光差异的图像去雾算法

杜振龙,施 颖,李晓丽,祁高国

(南京工业大学 计算机科学与技术学院, 江苏 南京 211800)

摘 要:针对环境光差异引起图像去雾亮度值存在偏差、图像质量下降的问题,提出一种基 于环境光差异的图像去雾算法。把图像分为环境光差异较大的天空区域和非天空区域,根据环境 光差异设置不同的阈值对两类区域再进行分割;采用对比度先验去雾算法对天空区域块去雾,通 过暗通道先验去雾算法对非天空区域块处理;最后用动态阈值白平衡算法调整恢复后的图像亮度 和色彩。实验结果表明,本算法比其他算法能更有效解决环境光差异引起的图像去雾色彩失真、 质量下降问题,鲁棒性较高,恢复后的图像色彩真实度和清晰度较高,更符合人眼视觉观察特性。 关键词:图像去雾;环境光差异;暗通道;先验;白平衡

中图分类号:TN911.23 文献标志码:A doi: 10.11805/TKYDA201906.1078

An image dehazing algorithm based on atmospheric difference

DU Zhenlong, SHI Ying, LI Xiaoli, QI Gaoguo

(School of Computer Science and Technology, Nanjing TECH University, Nanjing Jiangsu 211800, China)

Abstract: The atmosphere lighting difference in outdoor image would cause the dehazed outdoor image quality to occur the color deviation, image quality degradation and other issues. An image dehazing algorithm based on atmosphere lighting difference is proposed. The image is segmented into sky area and non-sky area. The sky area and non-sky area are further segmented according to atmosphere lighting difference. The contrast prior dehazing method is applied to the sky areas, while the dehazing approach based on dark channel is applied to dehaze the non-sky areas. The white balance adjustment algorithm is employed for slightly changing the brightness and color. Experiments demonstrate that the presented method is better than the conventional methods in color fidelity preservation, uniform illumination generation and image quality maintenance. The algorithm is robust, which makes the frog-free images bear more realistic and sharp detail, and accord to the human visual characteristics.

Keywords: image dehazing; atmosphere lighting difference; dark channel; prior; white balance

雾天空气中悬浮着大量的灰尘颗粒,对光有吸收和散射作用,造成在雾天拍摄图像的对比度和饱和度下降、 色彩细节丢失等问题,导致图像中物体模糊,影响了图像信息的识别。尤其是在交通、环保和地理信息处理等领 域,有雾图像影响了正常工作进行。因此去雾算法已成为目前比较热门的研究问题。

目前常用的图像去雾算法主要分为 3 类: a) 多张图像的去雾算法。由于单张图像去雾是一个病态问题,输入多个图像获取较充分的信息,使病态问题演化为定解问题。Schechner 等^[1]用不同方向的偏振光拍摄同一场景的多张图像,分析有雾图像的形成过程,实现了多幅图像的去雾。Narasimhan 等^[2-3]采用不同天气下的多张图像,利用光照模型恢复降质图像。通过获取多张图像的去雾算法需要额外的硬件及较高的成本代价。b) 基于机器学习的图像去雾算法。从数据集训练光照模型、透射率等参数,再利用训练得到的模型去雾。TANG等^[4]训练自然图像获得光照模型先验值,分解有雾图像的场景光照和材质,定义有雾图像的相关属性构造去雾模型。ZHU等^[5]从数据集中训练雾浓度与饱和度之间的相关性模型,再通过线性回归训练线性模型恢复清晰图像。但由于室外图像变化多样,单个训练模型很难适用于任意的室外有雾图像,因此算法无法正确恢复与训练数据集相似度弱的图像。c) 单张图像的去雾算法。这类算法常常统计室外图像的一些光照分布先验,在图像去雾模型中引用这些先

收稿日期: 2018-06-12; 修回日期: 2018-07-07

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61672279); 江苏省"六大人才高峰"资助项目(2012-WLW-023); 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室开放基金资助项目(2016491411)

验知识来降低图像去雾的病态问题的求解。TAN 等^[6]研究发现,干净无雾图像比有雾的图像拥有更高的对比度, 通过局部对比度最大化来恢复清晰图像。Nishino 等^[7]通过自然图像颜色的色度梯度的重尾分布这一先验条件, 推断透射率,并恢复无雾图像。HE 等^[8]统计得出户外自然图像在某个颜色通道存在一个最小的亮度值,提出暗 通道先验模型,通过暗通道假设直接恢复出无雾图像。但该方法有时会产生不完整的透射图,因此,人们利用中 值滤波算法^[9]和 Retinex 算法^[10]优化透射率,但所恢复的清晰图像仍会产生过饱和、色彩分布不平衡等现象。

上述图像去雾算法,把大气环境光设定为常值,将亮度较大的大气光强度作为整个场景的环境光值,但该值 在整个场景中常常会变化,通常在有雾图像场景中,不同区域的环境光值差异比较大,因此用同一个大气环境光 进行去雾,会造成复原图像的亮度值出现偏差,从而影响图像的去雾效果。文献[1-11]所提算法可适用于图像去 雾算法的预处理阶段。本文主要以第3类算法提出的去雾算法模型为基础,把环境光的差异处理引入到图像去雾 算法,提出一种基于环境光差异的图像去雾算法。实验表明,本文算法可有效减少环境光差异对图像去雾复原质 量的影响,改善复原图像的亮度值偏差现象,提升图像的去雾效果。

1 基于环境光差异的图像去雾算法

1.1 雾天图像退化模型

文献[3]提出的大气散射物理模型定义了雾天图像的退化过程。主要分为 2 部分:场景反射光衰减模型和大 气光散射成像模型,其数学模型可描述为:

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

式中: *J*(*x*)为待恢复的清晰无雾图像; *I*(*x*)为观察到的有雾图像; *t*(*x*)为透射率; *A* 为全局大气光强。从式(1)可知, 要获取清晰无雾图像 *J*(*x*), 需要估计出 *t*(*x*)和 *A*。

1.2 暗通道先验去雾模型

文献[8]提出大多数非天空的局部区域里,对于拥有 R,G,B 三个通道的彩色图像,某些像素点总会在至少一个颜色通道中拥有趋于0的最小值,定义该值为暗通道值。对于任意输入的图像 *I*,其暗通道可表示为:

$$J^{\text{dark}}(x) = \min_{y \in \Omega(x)} \left(\min_{c \in \{r,g,b\}} J_c(y) \right)$$
(2)

式中: $x \to y$ 为像素点的位置; $\Omega(x)$ 为以 x 为中心的图像块; J_c 代表图像 J 的第 c 个颜色通道。对大量的室外无 雾图像进行统计得出: $J^{dark}(x) \to 0$ 。

假设在窗口 *Ω*(*x*)内 *t*(*x*)为恒常数,对于给定的大气光值 *A*_c(取暗通道图像中亮度值前 0.1%的像素,在这些位置中,从原始的有雾图像中寻找对应的具有最高亮度的点的值作为 *A*_c),式(1)可以定义为:

$$\frac{I_c(x)}{A_c} = t(x)\frac{J_c(x)}{A_c} + 1 - t(x)$$
(3)

式中I_c代表图像I的第c个颜色通道

对式(3)同时计算等式两边的暗通道:

$$\min_{y \in \Omega(x)} \left(\min_{c \in \{r,g,b\}} \frac{I_c(x)}{A_c} \right) = \tilde{t}(x) \min_{y \in \Omega(x)} \left(\min_{c \in \{r,g,b\}} \frac{J_c(x)}{A_c} \right) + 1 - \tilde{t}(x)$$
(4)

根据暗通道先验 $\min_{y \in \Omega(x)} \left(\min_{c \in \{r,g,b\}} \frac{J_c(x)}{A_c} \right) \rightarrow 0$,则式(4)中透射率可以定义为:

$$\tilde{t}(x) = 1 - \omega \min_{y \in \Omega(x)} \left(\min_{c \in \{r, g, b\}} \frac{I_c(x)}{A_c} \right)$$
(5)

实际情况下,天空中总是存在一定程度的尘粒,因此引入系数 $\omega(0 < \omega \le 1$,通常取 $0.90 \sim 0.97$)。由式(5)得出的透射率 $\tilde{i}(x)$ 较为粗糙,需要应用软抠图算法^[12]来完善透射率分布函数,得到最终透射率t(x)。

由于大面积天空等明亮区域不满足这一先验条件,使用该算法会导致该区域出现较严重的失真。

1.3 对比度增强图像去雾模型

根据统计得出,清晰图像比有雾图像具有更高的对比度^[13],因此可以增强对比度来恢复清晰无雾图像,为 在提高图像的色彩对比度同时尽可能地保留图像细节信息,建立目标优化函数:

$$E = E_{\text{contrast}} + \lambda_{\text{L}} E_{\text{loss}} \tag{6}$$

式中: AL为平衡因子,用于调节对比度信息和损失信息之间的比重; Econtrast 为对比度损失函数,定义为:

$$E_{\text{contrast}} = -\sum_{c \in \{r,g,b\}} \sum_{y \in \Omega(x)} \frac{(J_c(y) - \bar{J}_c)^2}{N_{\Omega(x)}} = -\sum_{c \in \{r,g,b\}} \sum_{y \in \Omega(x)} \frac{(I_c(y) - \bar{I}_c)^2}{t^2 N_{\Omega(x)}}$$
(7)

信息损失函数 E_{loss} 定义为:

$$E_{\text{loss}} = \sum_{c \in \{r,g,b\}} \sum_{y \in \Omega(x)} \left\{ \left(\min\{0, J_c(y)\} \right)^2 + \left(\max\{0, J_c(y) - 255\} \right)^2 \right\} = \sum_{c \in \{r,g,b\}} \left\{ \sum_{i=0}^{\alpha_c} \left(\frac{i - A_c}{t} + A_c \right)^2 h_c(i) + \sum_{i=\beta_c}^{255} \left(\frac{i - A_c}{t} + A_c - 255 \right)^2 h_c(i) \right\}$$
(8)

式中: $N_{\Omega(x)}$ 为该图像块内像素点的个数; $\overline{J}_c \cap \overline{I}_c$ 为图像块 $\Omega(x)$ 内 $J_c \cap I_c$ 的平均值; h_c 为颜色通道 c 中输入像素 点 i 的直方图的统计值; $\alpha_c \cap \beta_c$ 为避免像素值超出有效区间而设定的 2 个阈值; min{0, $J_c(y)$ } 和 max{0, $J_c(y) - 255$ } 分别表示下溢和上溢的截断函数。

最优透射率不应该产生任何信息的丢失,应该满足以下条件:

$$t \ge \max\left\{\min_{c \in \{r,g,b\}} \min_{y \in \Omega(x)} \left(\frac{I_c(y) - A_c}{-A_c}\right), \max_{c \in \{r,g,b\}} \max_{y \in \Omega(x)} \left(\frac{I_c(y) - A_c}{255 - A_c}\right)\right\}$$
(9)

因为 E_{contrast} 是一个递增函数,因此最优透射率 t^* 定义为满足式(9)的最小值,定义为:

$$t^* = \max\left\{\min_{c \in \{r,g,b\}} \min_{y \in \mathcal{Q}(x)} \left(\frac{I_c(y) - A_c}{-A_c}\right), \max_{c \in \{r,g,b\}} \max_{y \in \mathcal{Q}(x)} \left(\frac{I_c(y) - A_c}{255 - A_c}\right)\right\}$$
(10)

由于该模型假定在图像块内透射率是恒定的,但是场景深度在块内会发生变化,因此去雾效果有时出现块状效应,为了减弱块状效应,增强图像细节信息,采用导向滤波器^[11]来优化透射率 *t*^{*},得到最优透射率 *t*(*x*)。但在景深变化较明显的区域仍然会出现块状效应,因此适合处理景深变换不明显的天空区域。

1.4 基于环境光差异的去雾模型

本文所提方法步骤如下:

1) 将有雾图像分割为天空区域和非天空区域;

2) 由于被分割区域的环境光不同,在步骤 1) 基础上再次对图像进行基于环境光差异的分割;

3) 采用不同去雾算法对分割后的天空区域图像块和非天空区域图像块恢复无雾图像;

4) 调整平衡不同区域的光照。

1.4.1 天空区域分割

由于天空区域和非天空区域环境光差异较大,为减弱环境光差异对图像 去雾效果的影响,本文算法把有雾图像分割为天空区域和非天空区域。如文 献[8]所述,在一定程度上图像的暗通道图能够反映图像的环境光值的分布, 如图 1(b)所示,图像的天空区域的暗通道值和非天空区域的暗通道值相差较 大,表示天空区域和非天空区域环境光差异较大,需要对天空区域和非天空 区域进行分割。

如图 2 所示,分割方法如下:

1) 将原图转换为灰度图;

2) 求灰度图像的梯度信息(图像中的天空区域为弱纹理区域,相邻像素之间的变化不大,用梯度来表示更容易被识别,梯度越小,说明区域越平滑, 认定为天空区域);

3) 对灰度图像的梯度进行去噪;

4) 设定梯度阈值 w, 小于该值判断为初始天空区域;

5) 对分割后的每个联通区域统计其原始图像的对应位置像素值的平均 亮度,如果大于亮度阈值 w₁,则保留为天空区域;否则设定为非天空区域, 从而进一步细化天空区域。





(b) dark channel Fig.1 Dark channel of the image 图 1 图像的暗通道图



(d) denoised











(f) refinement

1.4.2 基于环境光差异的区域分割

对有雾图像进行天空区域和非天空区域分割之后,分别获取天空区域 和非天空区域图像的暗通道图像(文献[8]中实验表明图像暗通道值反映了 图像环境光大小,因此本文将图像的暗通道值作为区分图像环境光差异的 参考值)。从图 1(b)可以得出,有雾图像在一定的区域里环境光分布较为平 滑,而且大小差异不会过大,因此不会分割为较为零散的多个区域。然后 再分别获取天空区域和非天空区域图像暗通道图中像素值分布的直方图, 对直方图设置不同阈值(由于不同图像暗通道值不同,因此应根据图像暗通 道直方图来设置阈值)分别对天空区域和非天空区域中环境光差异不同的 区域进行分割。图 3(b)为再次根据环境光差异分割后的结果,环境光差异 不同的区域用不同的颜色标识。

1.4.3 图像去雾

对于环境光差异的不同区域,采用不同的去雾算法分别对天空区域和 非天空区域分割的不同区域块进行处理。

天空区域和非天空区域图像块内环境光 A_Q计算: 从分割后的每个图像 块的暗通道中按照亮度大小取前 0.1%的像素,在这些位置的原始有雾图像 区域块中寻找对应的具有最高亮度的值,作为 A_Q的值。

由于天空区域较为平滑,景深变化较小,天空区域不满足暗通道先验 条件。因此采用对比度增强图像去雾模型对天空区域块内的 *t*(*Q*)进行计算,经过导向滤波处理得到最优透射率 *t*(*Q*)。

非天空区域多为自然图像,满足暗通道先验的条件,因此采用暗通道先验去雾模型对非天空区域块内的 t(Q)进行计算,经过导向滤波处理得到最优透射率 t(Q)。

计算出每个图像块内的环境光 A_{Ω} 、透射率 $t(\Omega)$ 和给定的 $I(\Omega)$,根据式(1),恢复出 $J(\Omega)$:

$$J(\Omega) = \frac{I(\Omega) - A_{\Omega}}{\max(t(\Omega), t_0)} + A_{\Omega}$$
(11)

式中 max($t(\Omega), t_0$) 是为了避免 $t(\Omega)$ 趋近于 0 设定的截断处理, t_0 为设置的下限。 1.4.4 光照平衡调整

在去雾过程中,不同区域去雾后的亮度、色彩存在偏差,需要调整不同区域的亮度、色彩。采用一种动态阈 值白平衡算法^[14]对图像进行光照平衡调整,分为 2 个步骤:白点检测和白点调整。先检测白色点,把去雾后的 图像块从 RGB 颜色空间转换到 *YC*_rC_b 颜色空间,对每个图像块分别计算 C_r和 C_b 色度通道的平均值 M_r和 M_b,根 据 M_r和 M_b分别计算 C_r和 C_b通道的方差 D_r和 D_b:





(b) segmentationFig.3 Ambiguity difference segmentation图 3 环境光差异分割效果图

$$D_{\rm b} = \sum_{i,j}^{\infty} (|C_{\rm b}(i,j) - M_{\rm b}|) / N$$
(13)

式中 N 为该区域像素点的数量。获得这些统计属性后,判定每个图像块的近白区域。设定一个"参考白色点" 亮度矩阵 **R**_L,大小为 I,定义判别表达式为:

$$\left|C_{\rm r}(i,j) - (1.5 \times M_{\rm r} + D_{\rm r} \times \operatorname{sign}(M_{\rm r}))\right| < 1.5 \times D_{\rm r}$$
(14)

$$\left|C_{\rm b}(i,j) - (1.5 \times M_{\rm b} + D_{\rm b} \times \text{sign}(M_{\rm b}))\right| < 1.5 \times D_{\rm b}$$
(15)

若满足该判别式,则作为"参考白色点",并将该点(*i*,*j*)的亮度值(Y分量)赋值给亮度矩阵 $R_L(i, j)$;若不符合该判别式,则该点的亮度矩阵 $R_L(i, j)$ 的值为 0。获取"参考白色点"的亮度矩阵 R_L 后,选取"参考白色点"中最大的 10%亮度(Y分量)值中的最小值 $R_{L_{min}}$,若 $R_L(i, j) < R_{L_{min}}$,则 $R_L(i, j)=0$;否则, $R_L(i, j)=1$ 。

得到最终的"参考白色点"的亮度矩阵 R_L 后,进行白平衡调整。将每个像素点 R,G 和 B 通道的值分别与 R_L 相乘得到 R',G'和 B',计算 R',G'和 B'的平均值 R_{aver},G_{aver} 和 B_{aver} 。每个通道的增益可以定义为: $R_{gain}=Y_{max}/R_{aver},G_{gain}=Y_{max}/G_{aver}$ 和 $B_{gain}=Y_{max}/B_{aver}$ 。其中, Y_{max} 为图像 Y分量像素的最大亮度值。则最终每个通道的 颜色值调整为: $R'=R \times R_{gain},G'=G \times G_{gain}$ 和 $B'=B \times B_{gain}$ 。根据调整后的每个颜色通道值重新调整图像。

2 实验结果与分析

实验硬件平台为 Intel i5 2.8 GHz+4 GB 内存,开发平台为 Matlab R2014a。实验图像数据选取了不同场景下 拍摄的不同浓度雾的多幅图像进行去雾,并选取了文献[6]中 Tan 算法、文献[8]中 He 算法、文献[9]中 Retinex 去 雾算法和文献[10]中的中值滤波去雾算法进行结果比较(这些算法中环境光的取值都按照 1.2 的方法来计算),并 在主观和客观方面进行评价。

2.1 去雾主观评价

算法的参数设置如表 1 所示(其中的阈值均是经过大量实验选取的较为 理想阈值)。为表现本文算法的普适性,选取了含有天空区域的图像、自然 图像、建筑物图像、局部有雾图像进行处理,处理结果如图 4 所示。图 4 中,在处理天空区域时,不会出现图像失真现象,而且对于自然场景的图像 处理后保持了图像的色彩真实度和对比度,不会出现过度饱和的现象,对于

衣 1						
Table1 Parameter setting						
parameter	values					
coefficients ω	0.95					

coefficients ω	0.95
equilibrium factor λ_L	5
threshold α_c	110
threshold β_c	240
gradient threshold w	0.02
brightness threshold w1	0.81
lower limit t_0	0.1

局部有雾图像也较好地保持了无雾区域的颜色对比度,不会产生失真现象,使处理后的图像看起来更加柔和真实。



第17卷



(a) original image

(b) transmittance image Fig.4 Results generated from the proposed algorithm 图 4 本文算法的去雾效果图

图 5~图 10 为其他去雾算法与本文算法处理结果的比较。图 5 为选取的实验对比用原图像,主要是有雾的自 然图像和建筑物图像,包含天空区域和不包含天空区域两类。图 6 为 Tan 的对比度先验去雾算法处理结果,去雾 情况较为理想,但靠近天空区域处还是出现了局部模糊现象(如图 6(a)所示),而且去雾结果图会出现块状效应和 颜色偏差现象(图 6(b)部分区域颜色过于明亮,图 6(c)天空区域产生块状效应,图 6(d)左侧建筑物出现颜色偏差 现象)。图 7 为 He 暗通道先验去雾算法的处理结果,整体去雾效果理想,但对于有天空区域的图像,天空区域产 生了严重的图像失真和颜色偏差现象(图 7(c)中整个天空区域严重失真)。图 8 为 Retinex 算法的去雾结果,整体 颜色过于明亮(图 8(b)和 8(c)所示),而且部分区域去雾效果不理想,仍存在模糊现象(图 8(a)靠近天空区域和图 8(d) 上面部分区域),去雾不彻底。图9为中值滤波区域算法的处理结果,去雾结果过于饱和(图9(c)的天空区域和图 9(d)所示)。图 10 为本文算法的实验结果,在颜色对比度和去雾效果上都较为理想。

















Fig.6 Dehazing results by Tan algorithm 图 6 Tan 算法去雾效果

图 5 对比效果原图像



Fig.7 Dehazing results by He algorithm 图 7 He 算法去雾效果

太赫兹科学与电子信息学报



Fig.10 Dehazing results by the proposed method 图 10 本文算法去雾结果

2.2 去雾客观评价

为更好地评价去雾后图像的质量,采用峰值信噪比(Peak Signal-to-Noise Ratio, PSNR)、平均梯度和信息熵 进行表征。峰值信噪比反映了图像失真程度,峰值信噪比越大,图像失真越小。平均梯度反映图像对微小细节反 差的表达能力,平均梯度越大,说明图像越清晰,反差越好。信息熵度量图像信息丰富程度,反映了图像携带信 息量的多少,信息熵越大,图像的信息量就越丰富,图像的质量越好。表 2 为图 5~图 10 中各个算法的去雾效果 的客观评价结果。

表 2 去雾效果客观评价 Table2 Objective evaluation of dehazing effect												
											dehazing	PSNR
algorithm	Fig.5(a)	Fig.5(b)	Fig.5(c)	Fig.5(d)	Fig.5(a)	Fig.5(b)	Fig.5(c)	Fig.5(d)	Fig.5(a)	Fig.5(b)	Fig.5(c)	Fig.5(d)
Tan	13.703 3	17.713 6	15.195 4	19.108 3	21.500 9	10.810 9	13.282 1	7.105 2	7.470 3	7.369 8	7.320 5	7.006 1
He	13.449 7	14.471 7	10.228 8	11.191 9	21.744 5	9.421 6	14.262 0	5.618 0	6.979 0	7.125 3	7.368 1	7.201 2
Retinex	11.560 9	20.008 9	14.658 2	20.178 9	23.278 2	9.768 3	13.121 6	7.263 8	7.087 6	6.736 6	7.512 2	6.822 4
median filtering	13.2607	17.240 6	8.860 1	10.061 5	19.5368	9.536 8	4.830 0	10.776 9	7.5180	7.463 1	7.183 7	6.874 2
proposed	10 860 9	12 240 1	7 953 4	8 891 2	25 044 6	10 054 5	14 603 9	10 497 7	7 560 6	7 561 5	7 596 7	7 297 1

从表 2 可以看出,本文算法在处理结果的 PSNR、平均梯度和信息熵总体相对稳定并有所提升,体现出本文 算法去雾效果较为彻底,图像失真较少,去雾图像质量较好。

3 结论

针对常见的图像去雾算法把整张图像的环境光值设定为常数,造成去雾图像出现色彩偏差、图像部分区域失 真等现象,导致图像质量下降。本文算法充分考虑环境光差异对图像去雾效果的影响,根据环境光差异对图像进 行分割。首先根据梯度阈值和亮度阈值将图像分割为天空区域和非天空区域,根据暗通道值分别分割天空区域和 非天空区域的图像。结合暗通道先验去雾算法和对比度先验去雾算法,对天空区域利用对比度先验去雾算法减少 块状效应,对非天空区域利用暗通道先验区域算法,避免暗通道先验算法对天空区域处理效果差的现象。最后对 图像采用动态阈值白平衡算法调整整张图像的亮度和颜色平衡。实验证明,虽然本文算法处理时间较长,但处理 结果在颜色对比度和图像清晰度方面都较好,去雾后图像色彩失真现象降低,图像质量较高,细节保持方面显著 提升,算法鲁棒性好。

参考文献:

- SCHECHNER Y,NARASIMHAN S G,NAYAR S K. Instant dehazing of images using polarization[C]// 2001 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Kauai,HI,USA:IEEE, 2001:325-332.
- [2] NARASIMHAN S G, NAYAR S K. Vision and the atmosphere[J]. Journal of Computer Vision, 2002, 48(3):233-254.
- [3] NARASIMHAN S G, NAYAR S K. Contrast restoration of weather degraded images[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2003,25(6):713-724.
- [4] TANG K,YANG J,WANG J. Investigating haze-relevant features in a learning framework for image dehazing[C]// 2014 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Columbus,OH,USA:IEEE, 2014:2995-3002.
- [5] 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. DOI:10.1109 / TIP.2015.2446191.
- [6] TAN R T. Visibility in bad weather from a single image[C]// IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Anchorage, AK, USA: IEEE, 2008:1-8. DOI:10.1109/CVPR.2008.4587643.
- [7] NISHINO K, KRATZ L, LOMBARDI S. Bayesian defogging[J]. International Journal of Computer Vision, 2012,98(3):263-278.
- [8] 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, 2009,33(2):2341-2353. DOI:10.1109/TPAMI.2010.168.
- [9] 刘海波,杨杰,吴正平,等. 基于暗通道先验和Retinex理论的快速单幅图像去雾方法[J]. 自动化学报, 2015,41(7):1264-1273. (LIU Haibo,YANG Jie,WU Zhengping, et al. A fast single image dehazing method based on dark channel prior and retinex theory[J]. Acta Automatica Sinica, 2015,41(7):1264-1273. DOI:10.16383/j.aas.2015.c140748.
- [10] 肖进胜,高威,邹白昱,等. 基于天空约束暗通道先验图像去雾[J]. 电子学报, 2017,45(2):346-352. (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.
- [11] 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. DOI:10.1109/TPAMI.2012.213.
- [12] LEVIN A,LISCHINSKI D,WEISS Y. A closed form solution to natural image matting[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2006,30(2):228-242. DOI:10.1109/TPAMI.2007.1177.
- [13] KIM J H,JANG W D,SIM J Y,et al. Optimized contrast enhancement for real time image and video dehazing[J]. Journal of Visual Communication and Image Rrpresentation, 2013,24(3):410-425. DOI:10.1016/j.jvcir.2013.02.004.
- [14] WENG C C,CHEN H,FUH C S. A novel automatic white balance method for digital still cameras[C]// IEEE International Symposium on Circuits and Systems. Kobe,Japan:IEEE, 2005:3801-3804. DOI:10.1109/ISCAS.2005.1465458.

作者简介:



杜振龙(1971-),男,陕西省韩城市人,博 士,教授,主要研究方向为可信媒体认证、计 算机图像学、机器学习等.email:duzhl-cad@163. com. 施 颖(1994-), 女, 江苏省南通市人, 在读 硕士研究生, 主要研究方向为可视计算.

李晓丽(1971-), 女, 甘肃省白银市人, 博士, 副教授, 主要研究方向为机器学习、水文信息处 理和多媒体信息处理.

祁高国(1993-),男,江苏省宿迁市人,在读硕士研究生,主要研究方向为可视计算.