

文章编号:1007-2780(2016)11-1098-07

一种改进的容差机制图像去雾算法

龚昌来*, 罗 聪

(嘉应学院 电子信息工程学院, 广东 梅州 514015)

摘要:针对经典容差机制图像去雾算法存在的对部分明亮区域透射率提升力度不够,难以彻底消除色彩失真问题,本文提出一种改进算法。将原算法中对明亮区域透射率根据容差进行双曲线提升修正变为线性提升修正,使透射率平稳提升,并适当增大了透射率提升力度,有效消除色彩失真。以方差和色调还原度作为图像去雾的客观质量评测指标,与暗原色先验算法和经典容差机制算法进行对比实验。实验结果表明,本文算法在改善明亮区域色彩失真及提高图像去雾效果方面优于对比算法。

关键词:图像去雾;暗原色先验;透射率;容差机制;明亮区域

中图分类号:TP391 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/YJYXS20163111.1098

Improved haze removal algorithm based on tolerance mechanism

GONG Chang-lai*, LUO Cong

(School of Electronic & Information Engineering, Jiaying University, Meizhou 514015, China)

Abstract: In view of the problem that exists in the classic tolerance mechanism image haze removal algorithm, the efforts to enhance the transmission of the bright region is not enough, it is difficult to completely eliminate the color distortion, an improved algorithm is proposed herein. For the bright region transmission, according to the tolerance, hyperbolic type enhancement is adopted in the original algorithm, while linear enhancement correction is used in this paper, which makes the transmission enhance steadily. The effort to enhance the transmission is appropriately increased, thus the color distortion is effectively eliminated. Variance and color reduction degree are used as objective quality evaluation index for image haze removal. Compared with the dark channel prior algorithm and the classic tolerance mechanism algorithm, the proposed algorithm is superior to the contrast algorithms in improving the color distortion of the bright region and improving the image haze removal.

Key words: image haze removal; dark channel prior; transmission; tolerance mechanism; bright region

收稿日期:2016-06-08;修订日期:2016-07-18.

基金项目:广东省自然科学基金资助项目(No.S2012010010368)

Supported by Natural Science Foundation Guangdong Province of China(No. S2012010010368)

* 通信联系人, E-mail: dzxgcl@sohu.com

1 引言

在雾霾环境中,天空存在大量的悬浮颗粒,对大气中传播光具有吸收和散射作用,使进入到成像设备的入射光相比真实值发生了衰减,同时进入到成像设备的大气光也叠加到入射光图像中,造成采集到的图像产生失真,出现模糊不清、对比度下降等退化现象。导致诸如高速公路视频监控等机器视觉系统无法正常工作,因此图像去雾的研究具有重要的实用价值。

图像去雾的方法很多,近年来,基于大气散射模型和统计先验求解的单幅图像去雾的研究取得了很大进展,成为国内外研究热点^[1]。2009年,He^[2]通过对大量户外自然图像的观察统计,提出了暗原色先验(dark channel prior, DCP)的单幅图像去雾方法,该方法直观简单,在处理单幅户外场景图像去雾方面取得了较好的效果,得到了业内学者的广泛认同。但是该方法存在局限性,对于明亮区域,暗原色先验模型不成立,暗原色估计偏大,导致透射率估计偏小,图像去雾后明亮区域出现过度饱和,通道间颜色值的差异扩大,产生马赛克状色斑,出现色彩失真,使图像的视觉效果变差。近年来,许多学者对其进行改进,取得很多成果。蒋建国^[3]等通过引入一种容差机制,对明亮区域进行识别,将明亮区域的透射率进行提升修正,纠正 DCP 算法对明亮区域透射率估计不足的缺陷。该方法计算简单,对于改善明亮区域色彩失真有较好的效果,是目前比较流行的一种经典算法。但是,该方法由于采用容差双曲线式提升透射率,对部分明亮区域透射率提升力度不够,透射率仍然偏小,恢复图像的明亮区域仍存在不同程度的色斑,不能完全消除明亮区域色彩失真。孙小明^[4]等采用图像分块方法完成透射率的空间自适应估计,通过判断大气光强度和暗通道差值绝对值大小来判断雾化图像中是否含有明亮区域,最后采用容差机制获得透射率。张登银^[5]等提出一种基于亮度上限阈值和透射率下限阈值的双阈值明亮区域识别和容差机制透射率修正方法,对明亮区域识别更准确。以上改进方法虽然有一定效果,但由于受经典容差机制固有缺陷的影响,也难以完全消除明亮区域色彩失真。

本文在文献[3]经典容差机制方法基础上进行改进,提出一种明亮区域透射率线性容差修正

方法,适当增强明亮区域透射率提升力度,从而彻底消除明亮区域的色彩失真,取得了较好效果。

2 暗原色先验去雾算法

在计算机视觉与图像处理中,广泛采用的雾化图像大气散射模型为^[6]:

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

式中: $I(x)$ 为观测到的雾化图像, $J(x)$ 表示清晰无雾图像, A 是大气光强度。 $t(x)$ 为场景的透射率,可表示为 $t(x) = e^{-\beta d(x)}$, β 为大气散射系, $d(x)$ 为场景的景深。式(1)右边的第一项 $J(x)t(x)$ 为景物光线的直接衰减项,第二项 $A(1 - t(x))$ 为大气光成分。去雾的目标就是从 $I(x)$ 图像中恢复 $J(x)$ 图像。

对于户外图像 J , 其暗原色定义为:

$$J^{\text{dark}}(x) = \min_{y \in \Omega(x)} \left(\min_{c \in \{R, G, B\}} J^c(y) \right) \quad (2)$$

式中: J^c 代表 J 的某一个颜色通道, $\Omega(x)$ 是以 x 为中心的局部区域。He 通过统计得出暗原色先验规律^[2]: 如果 J 是户外的无雾图像,除了天空区域,暗原色 J^{dark} 的强度总是很低并且趋近于 0。

在区域 $\Omega(x)$ 对式(1)中的各项取最小运算,并据暗原色先验: $J^{\text{dark}}(x) \rightarrow 0$, 可得到透射率的估计值 $\tilde{t}(x)$ 为:

$$I^{\text{dark}}(x) = \min_{y \in \Omega(x)} \left(\min_{c \in \{R, G, B\}} I^c(y) \right) \quad (3)$$

$$\tilde{t}(x) = 1 - \omega \frac{I^{\text{dark}}(x)}{A} \quad (4)$$

式中: ω 为修正参数,一般取 0.95,使去雾后的复原图像显得更为自然。 $\tilde{t}(x)$ 是在区域 $\Omega(x)$ 中透射率不变的条件下推导而来的,存在明显的分块现象,会造成复原图像在场景深度不一致的边缘区域出现光晕,因此,需对式(4)的粗略透射率 $\tilde{t}(x)$ 进行细化,得到细节明显的透射图。关于透射率细化方法,有许多学者提出,如引导滤波、最小滤波、各向异性高斯滤波、形态学滤波等^[7-10]。本文采用引导滤波法,引导滤波是一种边缘保持滤波,在运算中通过引入盒式滤波(boxfilter)技术形成一种快速滤波器,可实现对雾化图像透射率快速细化。设细化后的透射率为 $t(x)$, 根据式(1)可得到去雾后的图像 $J(x)$ 为:

$$J(x) = \frac{I(x) - A}{\max(t(x), t_0)} + A \quad (5)$$

式中 t_0 为透射率最小临界值,一般取 0.1。大气光 A 的估计方法为:先取暗原色中 0.1% 亮度最大的像素,然后取这些像素对应在原图中的最大值作为 A 的值。

对于大多数户外无明亮区域的雾化图像,上述 DCP 算法能取得非常好的去雾效果。但对于含有明亮区域的雾化图像,DCP 算法效果则失效。对于明亮区域, $I^{\text{dark}}(x)$ 较大,若取 $\omega = 1$,则当 $I^{\text{dark}}(x) > A$ 时,由式(4)可知透射率 $\tilde{t}(x) < 0$,根据大气散射理论,透射率取值范围

应为 $0 \sim 1$,因此,暗原色先验模型失效。图 1 所示为本文一个实验例子,由图 1(d) 可以看出,在非天空区,DCP 方法去雾效果比较好,但在天空明亮区域,暗原色 $I^{\text{dark}}(x)$ 估计偏大,图 1(b) 所示暗原色图的上部天空区亮度较大,导致透射率 $\tilde{t}(x)$ 估计偏小,图 1(c) 所示透射率图的上部天空区呈黑色(图 1(c) 中红线标注区域),去雾后出现色彩失真,如图 1(d) 上部区域所示。由此可见,DCP 算法对图像明亮区域的透射率需要进行修正。

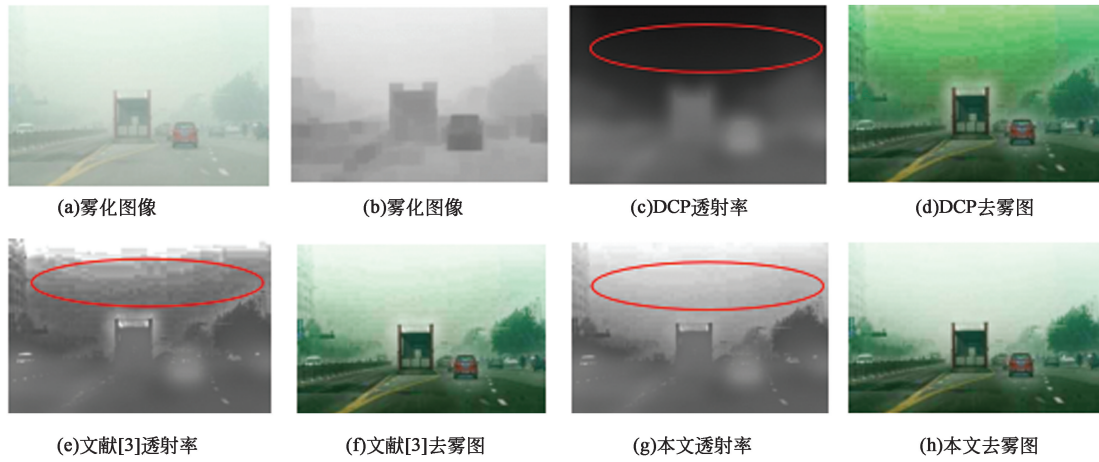


图 1 三种方法的透射率及去雾效果实例

Fig.1 Transmittance and haze removal instances of three methods

3 透射率容差机制修正

由式(5)可知,DCP 方法虽然对透射率进行下限 $t_0 = 0.1$ 的限幅修正,但对明亮区域透射率的修正还远远不够,若增大 t_0 ,则有利于消除明亮区域的色彩失真,但降低非明亮区域的去雾能力。文献[3]提出一种容差机制对明亮区域透射率进行修正,引进一个参数 k ,定义为容差,对于 $|I(x) - A| < k$ 的区域,认为是明亮区域,需对透射率进行修正; $|I(x) - A| > k$ 的区域,认为是满足暗原色先验的区域,保持原来的透射率不变。透射率修正公式为:

$$t'(x) = \min \left(\max \left(\frac{k}{|I(x) - A|}, 1 \right), \max(t(x), t_0) \right) \quad (6)$$

由式(6)可知,文献[3]方法是将明亮区域的

透射率乘以一个大于 1 的系数 $k/|I(x) - A|$ 进行提升,以缩小通道间颜色值的差异,避免明亮区域图像过度饱和,从而克服色彩失真现象。该方法既保持对非明亮区域的去雾能力,又提升明亮区域的透射率以改善色彩失真,效果显著,如图 1(f) 所示,与图 1(d) 相比,有效改善了天空区的色彩失真。但仍不十分理想,天空区中邻近非天空区部分图像仍存在一定程度的色斑。从图 1(e) 所示透射率图可看出,邻近非天空区部分的天空区(图 1(e) 中红线标注区域)透射率仍偏小而呈块状浅黑色,说明透射率提升不足,修正欠佳。

4 改进算法

由上面的分析和实例可知,提高明亮区域透射率可改善图像明亮区域的色彩失真,但不能提升过大,否则,会造成对明亮区域的去雾能力下

降,使图像的视觉效果变差。

一种简单的改进方法是采用 $k/|I(x)-A|$ 幂函数,透射率修正公式为:

$$t''(x) = \min\left(\max\left(\left(\frac{k}{|I(x)-A|}\right)^\gamma, 1\right) \times \max(t(x), t_0), 1\right), \quad (7)$$

式中: γ 值取 $1 \sim 2$ 。由于 $|I(x)-A| < k$, $\gamma > 1$ 时, $(k/|I(x)-A|)^\gamma > k/|I(x)-A|$, 故式(7)比式(6)的透射率提升能力增强。但是这种幂函数提升方式,其效果依赖于指数 γ 的选择, γ 若选取不当,易造成提升不够或过度提升。对不同的图像要求选择不同的 γ 值,经反复实验确定,给算法的推广应用带来困难。

本文在总结大量实验结果的基础上,提出一种透射率线性容差修正算法。透射率修正公式为:

$$t'''(x) = \max\left(1 - \frac{|I(x)-A|}{k}(1-t(x)), \max(t(x), t_0)\right), \quad (8)$$

式中: k 为容差系数, $t(x)$ 为修正前的透射率, $t'''(x)$ 为修正后的透射率。由式(8)可知,对于 $|I(x)-A| < k$ 的明亮区域,若 $t(x)$ 固定不变,则透射率 $t'''(x)$ 随 $|I(x)-A|$ 的减小而线性增大,当 $|I(x)-A|=0$ 时, $t'''(x)$ 达到最大值 1,因此本文透射率的修正是一种线性容差修正。

为了比较本文方法与文献[3]方法在明亮区域透射率的提升力度及性能,根据式(6)和式(8)绘出两种方法的修正透射率与 $|I(x)-A|$ 之间关系曲线,如图 2 所示。为了绘图及分析的简便,设 $t(x)$ 为固定值 t_c , $t'(|I(x)-A|)$ 为文献[3]方法的提升曲线, $t'''(|I(x)-A|)$ 为本文方法的提升直线。图 2 中 k_p 、 k_q 、 t_q 值可根据 $t'(|I(x)-A|) = 1$ 及 $t'(|I(x)-A|) = t'''(|I(x)-A|)$, 由式(6)和式(8)计算得出。

$$k_p = k \times t_c, \quad (9)$$

$$k_q = \frac{k - \sqrt{k^2 - 4(1-t_c)k^2 t_c}}{2(1-t_c)}, \quad (10)$$

$$t_q = \frac{kt_c}{k_q}. \quad (11)$$

以 $k=50$, $t_c=0.1$ 为例,计算可得: $k_p=5$, $k_q=5.5556$, $t_q=0.9$ 。由图 2 可知,对于明亮区域中 $t(x)=t_c$ 的像素点,文献[3]方法的透射率 t' 在 $|I(x)-A|$ 值为 $k \sim k_p$ 范围内按双曲线提

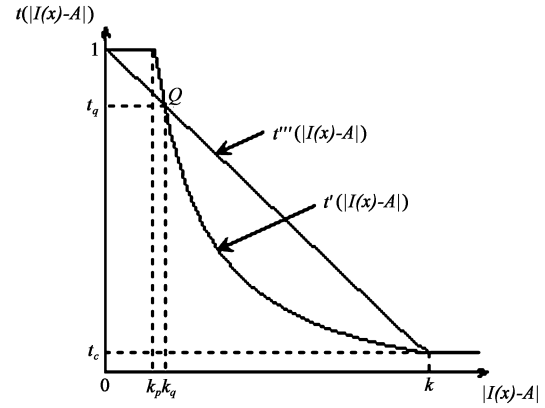


图 2 透射率提升曲线

Fig.2 Transmittance lift curve

升, $|I(x)-A| < k_p$ 时限幅为 1;本文方法的透射率 t''' 在 $|I(x)-A|$ 值为 $k \sim 0$ 范围内按线性提升。曲线 t' 和直线 t''' 交点为 Q, $|I(x)-A|$ 值为 $k_q \sim k$ 范围内, $t' < t'''$, 即本文方法的透射率提升力度大于文献[3]方法; $|I(x)-A|$ 值为 $0 \sim k_q$ 时,虽然 $t' > t'''$,但此时本文方法的透射率已提升较大(大于 t_q),色彩失真现象已被抑制。

文献[3]的双曲线提升方式存在的缺陷是透射率提升过程不平稳,造成提升力度不够或透射率变化剧烈。由图 2 可知,当 $|I(x)-A|$ 值在 k 值附近(对应于明亮区域中邻近非明亮区域部分), t' 变化缓慢,提升力度较弱,导致消除色彩失真效果差;当 $|I(x)-A|$ 值较小, t' 变化剧烈,提升力度过大,易出现色斑现象。本文的线性提升方式,将透射率平稳提升,并增大了透射率提升力度,克服了双曲线提升方式存在的缺陷。

图 1(g)所示为本文方法的透射率图,与图 1(e)相比,天空部分透射率图(图 1(g)中红线标注区域)亮度增大而且比较均匀,说明本文算法对天空区透射率的提升力度增大且比较平稳,无剧变或突变,透射率得到较好提升。图 1(h)所示为本文方法去雾图,与图 1(f)相比较,天空部分的色斑及颜色失真现象基本消除。本文方法不仅有效消除天空区色彩失真,而且对天空区保持较好的去雾能力,将图 1(h)与图 1(a)比较可知,图 1(h)天空区更亮,说明去雾能力较强。此外,由式(6)和式(8)可知,两种方法计算量相当,本文方法未增加计算量。

5 实验结果与分析

本文针对 DCP 算法和文献[3]经典容差机制算法进行对比实验。实验硬件环境为: AMD Athlon(tm) 64x2 Dual core Processor 5200 + 2.7 GHz, 1.75 GB 内存; 软件环境为: Windows XP Sp2 + Matlab R2009b。实验所用图像来源于网络。为了公平比较, 本文算法、DCP 算法、文献[3]算法的透射率细化统一采用相同参数的引导滤波器, 本文算法、文献[3]算法的容差系数 k 统一取 50。

为了客观评价去雾后恢复图像的质量, 采用方差和色调还原度作为评价指标。图像方差的大小反映了图像的可分辨度, 其值越大图像清晰度越高, 表明算法的去雾能力越强; 色调还原度用于度量图像的色彩失真程度, 色调还原度采用去雾前后图像直方图的相似程度来衡量, 计算公式为^[11]:

$$d_{\text{correl}}(h', h) = \frac{\sum_k (h'(k) - \bar{h}')(h(k) - \bar{h})}{\sqrt{\sum_k (h'(k) - \bar{h}')^2 \sum_k (h(k) - \bar{h})^2}}, \quad (12)$$

式中: h 、 h' 分别为去雾前后图像直方图, $\bar{h}$ 、 $\bar{h}'$ 分别为 h 、 h' 的均值。本文分别计算去雾前后图像 R、G、B 分量的直方图相似度, 然后取平均值作为色调还原度 d_{correl} , 即

$$d_{\text{correl}} = (d_{\text{correl}}(R) + d_{\text{correl}}(G) + d_{\text{correl}}(B)) / 3, \quad (13)$$

d_{correl} 越大, 代表直方图相似程度越高, 色调还原得越好, 色彩失真越小。

本文选择 5 幅不同尺寸和不同景物的含天空区雾化图像进行实验及对比分析, 如图 3~图 7 所示。表 1 所示为实验结果的客观评价指标数据。

表 1 三种方法去雾效果客观评价
Tab.1 Haze removal effect objectively evaluate of three methods

雾化图像	去雾算法	方差	色调还原度
图 3(a)	DCP 方法	0.053 5	-0.245 2
	文献[3]方法	0.081 2	0.151 1
	本文方法	0.083 0	0.171 9
图 4(a)	DCP 方法	0.041 5	-0.251 0
	文献[3]方法	0.082 2	0.342 3
	本文方法	0.088 5	0.396 9
图 5(a)	DCP 方法	0.049 3	-0.217 8
	文献[3]方法	0.096 9	0.362 4
	本文方法	0.104 0	0.400 9
图 6(a)	DCP 方法	0.042 9	-0.289 5
	文献[3]方法	0.084 4	0.199 6
	本文方法	0.094 8	0.287 5
图 7(a)	DCP 方法	0.047 1	-0.113 0
	文献[3]方法	0.086 3	0.107 5
	本文方法	0.091 7	0.265 4

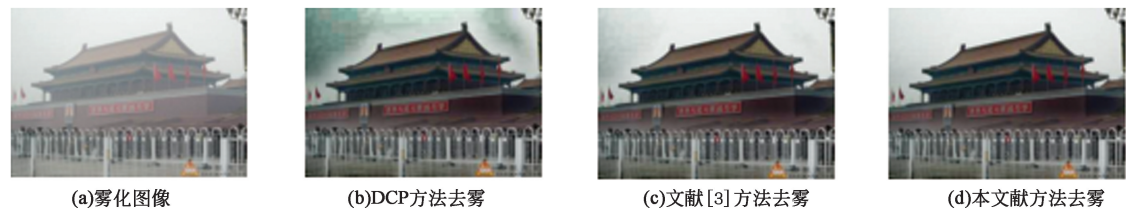


图 3 去雾效果对比(一)
Fig.3 Comparison of Haze removal effect (1)

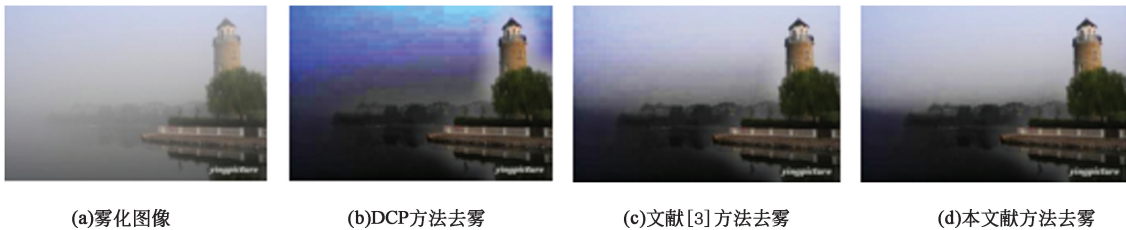


图 4 去雾效果对比(二)
Fig.4 Comparison of Haze removal effect (2)



图 5 去雾效果对比(三)

Fig.5 Comparison of Haze removal effect (3)



图 6 去雾效果对比(四)

Fig.6 Comparison of Haze removal effect (4)



图 7 去雾效果对比(五)

Fig.7 Comparison of Haze removal effect (5)

主观视觉方面,由图 3 (b)~图 7 (b) 可见,DCP 算法去雾后图像天空区产生严重色彩失真;由图 3 (c)~图 7 (c) 可见,文献 [3] 算法去雾后图像天空区色彩失真现象得到较大的改善,但未被彻底消除,仍存在一定程度的色彩失真;由图 3 (d)~图 7 (d) 可见,本文算法去雾后图像天空区色彩失真现象被彻底消除,视觉效果最好。

在客观评价方面,由表 1 可知,DCP 算法去雾后图像的方差最小,文献 [3] 算法的方差值比 DCP 算法有较大增加,说明文献 [3] 算法的去雾效果优于 DCP 算法,而本文算法的方差值高于文献 [3] 算法,因此本文算法的去雾效果最优。由表 1 还可知,DCP 算法去雾后图像的色调还原度值为负数,即去雾后图像的直方图

与去雾前图像直方图呈现负相关性,说明去雾后图像发生了严重的色彩失真现象;本文算法的色调还原度值比文献 [3] 算法增大,说明本文算法改善色彩失真的效果优于文献 [3] 算法。客观评价指标数据与主观评价的结果保持一致。

6 总 结

DCP 算法对于图像明亮区域失效,暗原色估计过大,透射率估计过小,出现色彩失真现象。文献 [3] 提出的透射率容差机制提升修正方法,有效的改善了明亮区域色彩失真,但对部分明亮区域透射率提升力度不够,不能彻底消除色彩失真现象。本文对其进行改进,提出一种明亮区域透射率线性容差提升修正方

法, 将透射率平稳提升, 并适当增大了透射率提升力度, 从而有效消除色彩失真。实验结果验证了本文算法的有效性。本文算法适应性

强, 对各类含明亮区域雾化图像都适用, 并继承原算法运算简单, 易于实现等特点, 无需设置新的参数, 使用方便。

参 考 文 献:

- [1] 南栋, 毕笃彦, 马时平, 等. 基于景深约束的单幅雾天图像去雾算法 [J]. 电子学报, 2015, 43 (3): 500-504.
NAN D, BI D Y, MA S P, *et al.* Single image dehazing method based on scene depth constraint [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2015, 43 (3): 500-504. (in Chinese)
- [2] HE K M, SUN J, TANG X O. Single image haze removal using dark channel prior [C]. *Proceedings of 27th IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, Columbus, Ohio: IEEE, 2009: 1956-1963.
- [3] 蒋建国, 侯天峰, 齐美彬. 改进的基于暗原色先验的图像去雾算法 [J]. 电路与系统学报, 2011, 16 (2): 7-12.
JIANG J G, HOU T F, QI M B. Improved algorithm on image haze removal using dark channel prior [J]. *Journal of Circuits and Systems*, 2011, 16 (2): 7-12. (in Chinese)
- [4] 孙小明, 孙俊喜, 赵立荣, 等. 暗原色先验单幅图像去雾改进算法 [J]. 中国图象图形学报, 2014, 19 (3): 381-385.
SUN X M, SUN J X, ZHAO L R, *et al.* Improved algorithm for single image haze removing using dark channel prior [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2014, 19 (3): 381-385. (in Chinese)
- [5] 张登银, 鞠铭烨, 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.
ZHANG D Y, JU M Y, WANG X M. A fast image daze removal algorithm using dark channel prior [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2015, 43 (3): 1437-1443. (in Chinese)
- [6] 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.
- [7] 高银, 云利军, 石俊生, 等. 基于各向异性高斯滤波的暗原色理论雾天彩色图像增强算法 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2015, 27 (9): 1701-1706.
GAO Y, YUN L J, SHI J S, *et al.* Enhancement dark channel algorithm of color fog image based on the anisotropic gaussian filtering [J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2015, 27 (9): 1701-1706. (in Chinese)
- [8] 王卫星, 肖翔, 陈良琴. 结合最小滤波和引导滤波的暗原色去雾 [J]. 光学精密工程, 2015, 23 (7): 2100-2108.
WANG W X, XIAO X, CHEN L Q. Image dark channel prior haze removal based on minimum filtering and guided filtering [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23 (7): 2100-2108. (in Chinese)
- [9] 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.
- [10] 吴笑天, 鲁剑锋, 贺柏根, 等. 雾天降质图像的快速复原 [J]. 中国光学, 2013, 6 (6): 892-899.
WU X T, LU J F, HE B G, *et al.* Fast restoration of haze-degraded image [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6 (6): 892-899. (in Chinese)
- [11] 李大鹏, 禹晶, 肖创柏. 图像去雾的无参考客观质量评测方法 [J]. 中国图象图形学报, 2011, 16 (9): 1753-1757.
LI D P, YU J, XIAO C B. No-reference quality assessment method for defogged images [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2011, 16 (9): 1753-1757. (in Chinese)

作者简介: 龚昌来 (1962—), 男, 湖南浏阳人, 教授, 主要从事图像与信号处理方面的研究。E-mail: dzxgcl@sohu.com