

基于暗通道边缘细化的图像快速去雾算法研究

冯辉^{1,2}, 王露露¹, 周晓晓¹

(1 河海大学 计算机与信息学院, 南京 210098;

2 江苏财经职业技术学院 机械电子与信息工程学院, 淮安 223003)

摘要 指出了在雾霾天气下, 镜头获得的户外图像必然会出现降质和退化等问题. 暗通道先验算法能够很好地解决有雾图像复原的问题, 但是其时效性较低. 针对这些问题, 提出了一种对暗通道图进行边缘细化修正的改进图像快速去雾算法. 该算法对暗通道边缘进行细化, 并对透射率进行适度修正, 以加快透射率的细化过程并提高图像复原的性能. 实验结果表明: 所提算法在图像复原质量和速度上都有了较大的提升, 具有一定的实用价值.

关键词 图像; 暗通道先验; 去雾; 边缘细化; 透射率修正

中图分类号 TP391 文献标识码 A 文章编号 1672-4321(2017)03-0101-05

Research on Fast Image Defogging Algorithm Based on Edge Thinning of Dark Channel

Feng Hui, Wang Lulu, Zhou Xiaoxiao

(1 College of Computer and Information, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2 Department of Mechanical Electronic and Information Engineering, Jiangsu Vocational College of Finance and Economics, Huaian 223003, China)

Abstract In fog and haze, the outdoor images will be degraded. The dark channel prior algorithm can solve the problem through fog image recovery, but its effectiveness is low. To address this problem, an improved fast dehazing method for images edge thinning correction of dark channel is proposed. The edge of dark channel is thinning step by step, and the transmissivity is corrected appropriately to speed up the thinning process and improve the performance of image restoration. The experimental results show that the algorithm proposed in this paper has greatly improved the quality and speed of image restoration, and has some practical value.

Keywords image; dark channel prior; defogging; edge thinning; transmissivity correction

图像是人类认识世界最重要的信息载体之一, 人们通过眼睛观察和认识客观世界, 就是通过图像来获取客观信息. 正常的天气状态下, 人们观察到的图像能够清晰地反应真实的世界, 传达准确的信息. 人工智能的发展离不开对图像信息的识别和解读, 清晰图像可以为图像识别提供足够多的信息. 但是有时人们经常会灰蒙蒙的有雾图像, 这给图像信息提取和识别带来了很大的麻烦. 因此, 图像去雾的研究变得越来越重要, 也已经成为人工智能发展研究的热点内容.

目前, 图像去雾的方法有两种类型, 一种是基于图像增强的方法, 比如直方图均衡化、Retinex 算法等; 另外一种是基于雾天大气物理模型的图像复原的

方法^[1]. 基于图像增强的去雾方法的思路是从有雾图像自身出发, 通过对图像的细节增强来达到去雾的效果. 这样的方法没有考虑到有雾图像质量退化的因素, 单纯地针对图像本身的增强, 虽然方法具有普遍意义, 但是细节信息会丢失很多, 并不能带来理想的处理效果. 基于物理模型的图像复原方法在近些年取得了很大的进展. Tan 将雾霾图像和无雾图像进行分析, 发现无雾图像的局部对比度相对较高, 根据该特点, 结合马尔可夫随机场(MRF), 最大程度地增加复原图像的局部对比度^[2]. 该算法虽然能够得到显著的效果, 但是复原的图像对比度过高, 易产生颜色失真. Nishino 将雾霾图像中的统计信息进行处理, 通过贝

收稿日期 2017-06-22

作者简介 冯辉(1983-)男, 博士生, 研究方向: 图像处理、人工智能, E-mail: fenghuiyyd@163.com

基金项目 国家自然科学基金资助项目(61501173); 淮安市重点研发计划(HAG2015009)

叶斯后验概率模型,提取图像中的潜在特征^[3].该算法对于浓雾区域效果较好,但不适用于薄雾天气,会导致颜色过度修正. Fattal 通过独立分量分析方法获取场景的辐照度^[4],该方法对于色彩信息要求较高,对于整体偏暗或浓雾图像的复原效果较差,无法进行灰度图像去雾. He 等人提出的暗通道理论,在对雾霾图像进行处理时能够得到较好的复原图像^[5],但是抠图算法优化透射率时耗时过长,计算量很大,天空等色彩灰白的明亮区域产生颜色失真.暗通道理论在该环境下不成立.为了克服暗通道理论的弱点,学者们又采用了很多的改进方法. Tarel 提出了一种使用中值滤波代替软抠图的快速图像去雾算法^[6],但中值滤波没有边缘保持的功能,若参数设置有偏差,容易导致“halo”效应.本文针对 He 等人提出的暗通道理论,针对暗通道软抠图时效性较低的缺点,提出了对暗通道图边缘进行逐步插值细化的方法,再对透射率计算进行修正来提高算法的时效性能,通过实验对比,结果显示本文所提出的方法能够有效提高暗通道去雾算法的性能,有一定的实用价值.

1 大气散射模型

雾是由有大量细微粒子悬浮在大气中而形成的特别自然现象.由于在雾天大气中存在大量的细微粒子,光线在传播过程中就会被散射,反映到人类视觉上也造成了图像信息的丢失.早在1908年,G. Mie 就提出了有关在介质之中的颜料粒子对光散射的理论即米氏(Mie)散射理论.该理论充分解释了恶劣天气条件下的大气散射作用,因此 McCartney 在米氏散射理论的基础上,于1975年提出了目前计算机和图像领域最常用的物理模型,即大气散射模型^[7].雾天图像的退化模型如下:

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

其中 x 代表图像任意像素点的坐标; $I(x)$ 表示最终形成的雾天图像; $t(x)$ 表示光线的透射率,反映雾天条件下光线的传播能力, $t(x)$ 值越大,说明光线的透射能力越强,得到的图像越清晰; A 表示无穷远处的光强,与 x 无关,一般视为全局变量; $J(x)$ 表示清晰图像,反映场景的真实信息,即反射光强度.

在雾天退化模型中,只有雾天图像 $I(x)$ 已知,若要恢复无雾图像,可根据(1)式,通过求解透射率 $t(x)$ 和大气光 A 获得清晰的无雾图像 $J(x)$.透射率 $t(x)$ 是景深的函数,公式如下:

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

由(2)式可知,若景深 d 不断增加,场景的辐照度会以指数的形式不断衰减.因此,由雾天图像退化模型可知,图像的退化程度与场景深度有关,然而对于景深的估计至今仍未得到有效解决.

2 暗通道先验去雾

2.1 暗通道先验

暗通道先验,暗原色先验理论(dark-channel prior)是 Kaiming He 等人提出的^[5]. He 等人将收集到的户外无雾图像进行裁剪,去除天空等区域后进行统计分析,发现大部分区域的局部块中的颜色通道,至少具有一个很低的像素值,且趋近于零,并将其称为暗通道.通过获取 R, G, B 三通道中的最小值,形成与原图大小一样的灰度图,再通过固定的窗口大小对灰度图进行最小值滤波,也即灰度腐蚀操作,最终得到暗通道图,公式如下:

$$J^{\text{dark}}(x) = \min_{c \in \{r, g, b\}} (\min_{y \in \Omega(x)} (J^c(y))), \quad (3)$$

其中 J^{dark} 为图像 J 的暗原色, J^c 表示 J 的 R, G, B 通道, Ω_x 是以 x 为中心的方形窗口, J^{dark} 趋近于 0.

2.2 暗通道先验去雾方法

由雾天图像退化模型可知,根据式(1),从原图 $I(x)$ 中获取透射率 $t(x)$ 、大气光 A ,才能够复原去雾图 $J(x)$.对原图 $I(x)$ 采用固定窗口求取暗通道图,公式如下:

$$I^{\text{dark}}(x) = \min_{c \in \{r, g, b\}} (\min_{y \in \Omega(x)} (I^c(y))). \quad (4)$$

然后根据大气光估计来计算粗透射率,再用软抠图算法来获得细化透射率,最后根据物理模型、原图 I 、参数 A 和 $t(x)$ 得到去雾图像 J .整个算法过程如图 1 所示.

(1) 大气光估计. He 等人提出改进的大气光估计方法,通过获取的暗通道值来得到对应的雾气信息,值越大,对应的雾浓度越大^[7].通过获取暗通道值最大的前 0.1% 的像素点,在原图的对应位置找到 RGB 通道的最大值,将其设置为大气光值.此方法使大气光的获取更具有鲁棒性,准确性较高.

(2) 求解粗透射率.透射率与散射系数 β 、场景到图像传感器的距离有关,假设大气均匀分布,在某一时刻的散射系数 β 被当作定值,假设图像局部块 $\Omega(x)$ 中的透射率为常数,根据退化模型对式(1)进行最小值滤波,可得表达式如下:

$$\min_{y \in \Omega(x)} \sum_{c \in \{r, g, b\}} \frac{I^c(y)}{A^c} = \tilde{t} \min_{y \in \Omega(x)} \sum_{c \in \{r, g, b\}} \left(\frac{J^c(y)}{A^c} \right) + 1 - \tilde{t}(x). \quad (5)$$

式中 $\tilde{t}(x)$ 表示粗透射率值, $\Omega(x)$ 是以 x 像素为

中心的方形区域 $A^c > 0$. 其次, 获取 (5) 式中 R, G, B 三通道中的最小值, 公式如下:

$$\min_c \left(\min_{\gamma \in \Omega(x)} \left(\frac{I^c(\gamma)}{A^c} \right) \right) = \tilde{t}(x) \min_c \left(\min_{\gamma \in \Omega(x)} \left(\frac{J^c(\gamma)}{A^c} \right) \right) + (1 - \tilde{t}(x)). \quad (6)$$

由于 J^{dark} 趋近于 0 且 $A^c > 0$, 可得下式:

$$J^{\text{dark}}(x) = \min_c \left(\min_{\gamma \in \Omega(x)} \left(\frac{J^c(\gamma)}{A^c} \right) \right) = 0. \quad (7)$$

将式 (7) 代入式 (6) 得到粗透射率 $\tilde{t}(x)$ 表达式如下:

$$\tilde{t}(x) = 1 - \min_c \left(\min_{\gamma \in \Omega(x)} \left(\frac{I^c(\gamma)}{A^c} \right) \right). \quad (8)$$

虽然暗通道先验排除了天空区域, 在此区域无效, 但由于天空区域与大气光都来自于无穷远处, 因此可用大气光值 A 近似等于天空区域的光强, 可得

(9) 式:

$$\min_c \left(\min_{\gamma \in \Omega(x)} \left(\frac{I^c(\gamma)}{A^c} \right) \right) \rightarrow 1. \quad (9)$$

结合式 (8), 可得天空区域的粗透射率 $\tilde{t}(x)$ 接近于 0 ($\tilde{t} \rightarrow 0$), 因此式 (8) 能够很好地处理全图, 无需将天空区域单独处理.

为了使图像自然、贴合实际, 也有利于对景深的提取, 通过加入参数 ω ($0 < \omega \leq 1$) 防止雾气的过度去除, 使空间中保持少量的雾气:

$$\tilde{t}(x) = 1 - \omega \min_c \left(\min_{\gamma \in \Omega(x)} \left(\frac{I^c(\gamma)}{A^c} \right) \right) = 1 - \frac{I^{\text{dark}}}{A}. \quad (10)$$

通过设置 ω 的值, 使不同图像保持少量的雾气, 一般情况取 $\omega = 0.95$, 从而得到真实自然的去雾图像.

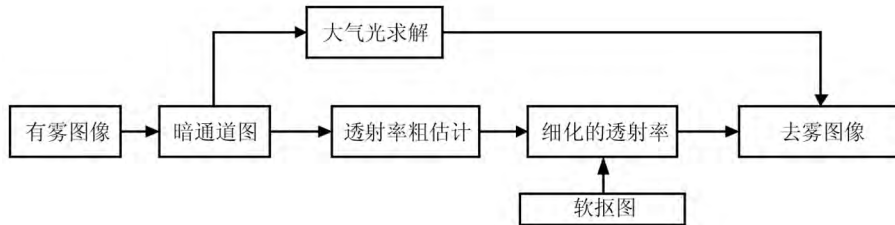


图 1 He 的算法去雾流程图

Fig. 1 The defogging flow chart of He's algorithm

(3) 图像复原. 根据估计的透射率图以及大气光值, 可以通过式 (1) 获得清晰的复原图像. 伴随着 $t(x) \rightarrow 0$ 的情况, $J(x) t(x)$ 也趋近于 0, 此时获得的去雾图像可能含有噪声. 通过设置阈值 t_0 限制透射率的最低值, 保证去雾图像的质量, 保留浓雾区域少量的雾气, 具体公式如下.

$$J(x) = \frac{I(x) - A}{\max(t(x), t_0)}. \quad (11)$$

3 边缘细化暗通道去雾算法

针对 He 的雾天图像复原的不足, 提出采用基于边缘细化的去雾算法. (1) 对边缘区域采用由块到像素的插值细化暗通道图, 修正景深跳变区域的暗通道值, 减少该区域晕光的产生, 降低算法的运行时间. (2) 对于暗通道理论失效的天空等区域, 通过引入修正因子改进透射率公式, 减少该区域的颜色失真. (3) 通过雾霾图像的降质模型复原清晰的图像.

3.1 边缘细化暗通道

基于暗通道理论的去雾算法中, 认为透射率在局部区域是一个定值, 因此需要首先求出每个窗口的暗

通道值, 类似于形态学的腐蚀, 进而得到局部区域的透射率^[5]. 在保证图像质量的前提下, 避免复原图像出现“halo”效应. 本文针对软抠图细化透射率耗时过长且复杂度高的不足, 提出对有雾图像边缘区域的暗通道进行由块到像素的插值来细化暗通道, 修正景深跳变区域的暗通道值, 再通过透射率公式直接得到细化的透射率, 降低算法的运算时间, 既保证了非景深跳变区域的透射率准确性, 也去除了边缘区域的块效应, 保护了边缘区域的细节. 具体步骤如下.

(1) 对于输入图像 I , 由式 (4) 获得暗通道图 I^{dark} . 为了保留了良好的细节和边缘信息, 可以计算得到有雾图像 R, G, B 通道的最小值图, 见公式 (12):

$$I^{\min}(x) = \min_{c \in \{r, g, b\}} (I^c(x)), \quad (12)$$

最小值图 $I^{\min}(x)$ 不能用于估计透射率, 因为暗通道先验成立的条件是基于局部区域而不是单个像素点.

(2) 通过 Sobel 算子对最小值图 $I^{\min}(x)$ 完成边缘检测^[8], 得到包含景深突变信息的二值图像 B , 对 B 以半径 r 进行邻域扩展, 执行形态学膨胀操作后得到扩展后的二值图像 B_w , 得到图像 I 的边缘信息.

(3) 将边缘二值图像 B 所在区域的暗通道值重

新计算,消除或减少暗通道值和最小值差值较大的像素的权重,降低边缘区域的块效应.边缘区域单个像素的暗通道细化可由其邻域暗通道值的加权插值得到,公式如下:

$$\hat{I}^{\text{dark}}(x) = \frac{1}{TW} \left(\sum_{i \in S(x)} w_x(i) I^{\text{dark}}(i) \right), \quad (13)$$

$$TW = \sum_{i \in S(x)} w_x(i), \quad (14)$$

其中 x 为边缘区域的像素, $S(x)$ 表示中心位于 x 的 25×25 方形窗口, i 表示窗口 $S(x)$ 中像素点的索引,为保证运行的效率与加权插值的准确性,选取 25 个像素点作为 i 的集合,其中包括 $x, S(x)$ 中 13×12 以及 25×25 窗口上均匀分布的像素点.

TW 为规范化的权重之和,权重的定义如下:

$$w_x(i) = e^{-D_x(i)^2/\sigma^2}, \quad (15)$$

$$D_x(i) = I^{\text{min}}(x) - I^{\text{dark}}(i), \quad (16)$$

权重公式引入高斯函数,表示对边缘区域中的任意像素 x ,当最小值 $I^{\text{min}}(x)$ 和邻域中 $I^{\text{dark}}(x)$ 的差值很小时,像素 x 和 i 趋于相同,权重 $w_x(i)$ 很高;若差值较大,则得到的权重值很小.当 $\sigma \in [0.1, 0.3]$ 时,复原图像既保留了边缘细节以及纹理信息,也平滑了噪声.

(4) 当边缘区域较锋利,或者明亮像素邻域内没有暗像素的极端情况,通过加权插值得到的 $\hat{I}^{\text{dark}}(x)$ 较低,此区域复原的图像仍会有少许晕光.因此,我们引入阈值 $T \in [0.1, 0.3]$ 来判断细化后的边缘区域暗通道 $\hat{I}^{\text{dark}}(x)$ 值和最小值 $I^{\text{min}}(x)$ 的差异.若差值超过阈值 T ,就用最小值 $I^{\text{min}}(x)$ 替换暗通道值,最终细化后的暗通道图为 $\tilde{I}^{\text{dark}}(x)$.

3.2 透射率修正

场景中若出现天空等明亮区域时,此区域的暗通道值偏大,和大气光的值相近^[7].因此 \hat{I}^{dark}/A 趋近于 1,透射率很小,在此区域的去雾效果会出现颜色失真.更本质的是,透射率 $t(x)$ 可以表示为:

$$t(x) = \left| \frac{1 - \hat{I}^{\text{dark}}(x)/A}{1 - \tilde{I}^{\text{dark}}(x)/A} \right|. \quad (17)$$

由于无雾环境下,天空等明亮区域的暗通道远大于 0,因此在这些区域的暗通道失效.为了减少该区域的颜色失真,引入调整因子修正透射率求解公式,从而改善失真情况.引入高斯核函数形式的调整因子:

$$f(x) = ke^{-(\hat{I}^{\text{dark}}(x) - A)^2/\sigma^2}, \quad (18)$$

式中 $k \in [0.4, 0.8]$ 可根据图像整体色彩不同进行选择, $\tilde{I}^{\text{dark}}(x)$ 为上一节中细化得到的暗通道图, A 表示求得的大气光值.由于明亮区域的暗通道值接近大气光 A ,当 $(\hat{I}^{\text{dark}}(x) - A)$ 趋近于 0 时, $f(x)$ 趋近于最大

值. σ 是标准方差,是核函数的宽度参数.根据实验统计 $(\hat{I}^{\text{dark}}(x) - A)$ 大小范围,可设置 $\alpha = [0.05, 0.15]$ 来控制调整因子修正透射率的暗通道区间.得到最终的透射率如下:

$$\hat{t}(x) = \tilde{t}(x) + f(x), \quad (19)$$

式中右边 $\tilde{t}(x)$ 由式(10)确定,即 $\tilde{t}(x) = 1 - \omega \frac{\hat{I}^{\text{dark}}}{A}$.

此时式(19)满足当暗通道值较小时, $f(x)$ 趋近于 0,对透射率 \tilde{t} 无修正作用;当暗通道值趋近于大气光值, $f(x)$ 自适应修正透射率,减少天空等明亮区域的失真.

3.3 图像复原

通过细化的透射率图,可以根据式(11)恢复无雾图像.为了防止透射率大于 1 的无效情况,为透射率设置一个上界^[9],防止恢复图像产生失真.最终恢复的无雾图像的表达式如下:

$$J(x) = \frac{I(x) - A}{\min(\max(t(x) - t_0), 1)} + A. \quad (20)$$

通过对本文算法大量的实验,证明该算法的去雾图像视觉效果良好,亮度适中,具有较高的清晰度,图像的细节信息保持较好.如图 2 所示,原始有雾图像颜色偏灰白色,对比度低,场景信息比较模糊,颜色失真比较严重;经过改进的方法去雾后,图像结构信息比较清晰,对比度得到明显提高,细节信息变得丰富,色彩信息比较真实.

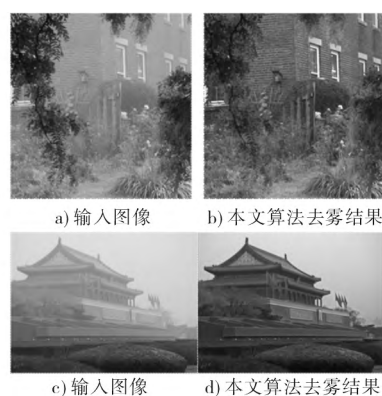


图2 算法的去雾结果图

Fig.2 The defogging result of the algorithm

4 算法实验与结果分析

为了验证本文算法的性能,将其与 He 的暗通道以及指导滤波算法的复原图像进行比较,如图 3 所示.在使用本文算法时,第一步边缘细化暗通道中,式(15)引入高斯函数的取 0.2;第二步透射率修正中,

采用高斯核函数的调整因子,式(18)中 k 取均 0.5, 取 0.1 进行实验.

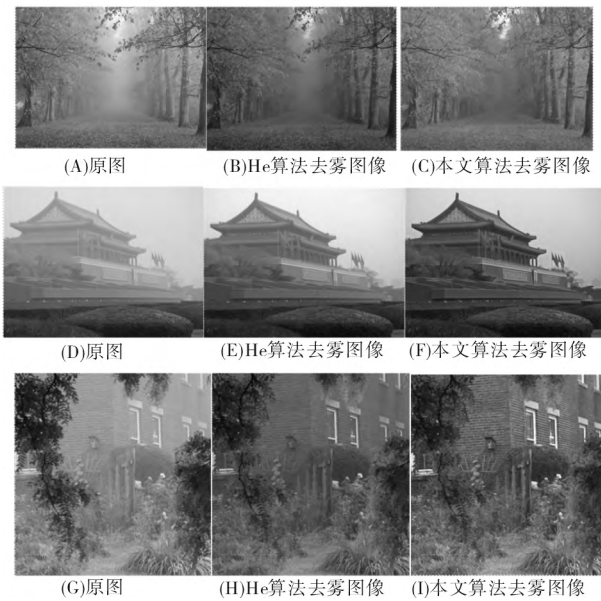


图 3 不同算法去雾结果图对比

Fig. 3 Comparison of defogging results in this paper

观察图 3 的结果,每种算法均可以改善图像质量,达到去雾的效果.第一组为雾较浓的风景图,图中包括天空树林的分界区.图(B) He 的算法得到的图像较为清晰,可是色彩偏暗,存留了较多的雾气.图(C)为本文算法得到的去雾图像,图像细节部分较为清晰,对比度较好,很好地消除了树林与天空的 halo 效应,且图像颜色没有失真.

第二组为雾很轻的户外场景图,图中包括天空与建筑的分界区.图(E) He 的算法获得很好的清晰度,可是天空区域产生明显的颜色失真.图(F)为本文算法得到的去雾图像,图像细节部分清晰,对比度较好,且图像颜色没有失真,与实际场景很接近.

第三组为雾适中的普通近景图,且色彩较为丰富,并且图中包括树叶与房屋的分界区.图(H) He 的算法可以去除大部分的雾霭,可是图像仍然较为模糊,细节不明显,颜色偏暗.图(I)为本文算法得到的去雾图像,细节部分清晰,对比度较好,很好地消除了边缘区域的 halo 效应,无颜色失真.

图 3 对各个算法的去雾实验图进行了对比,表 1 中对比了上述的各个算法处理的均值、平均梯度、信息熵、峰值信噪比以及运算时间等 5 个性能指标^[10].

表 1 不同算法的性能比较

Tab. 1 Performance comparison of different algorithms

图	去雾方法	μ	\bar{r}	H	PSNR/dB	t
第一组	原图	118.43	24.62	15.22		
	He 算法	78.67	25.59	16.11	25.13	21.76
	本文算法	97.93	26.78	17.15	26.47	2.20
第二组	原图	139.53	7.82	13.88		
	He 算法	123.45	8.97	14.45	25.76	14.73
	本文算法	105.71	13.04	14.70	26.30	1.57
第三组	原图	107.77	26.09	15.45		
	He 算法	73.05	28.24	15.84	25.18	12.15
	本文算法	78.62	31.13	16.58	25.86	1.42

根据表 1 中的数据可以得出,两种算法得到的去雾图像均值都降低,表明图像的雾气减弱,色彩更为丰富,图像亮度更符合人眼的视觉感受;两种算法去雾后的图像平均梯度都增加,有雾图像引起的灰白现象得到处理,图像更为清晰,其中本文算法的平均梯度值最大,边缘区域细节最为清晰;峰值信噪比的增加,表示本文算法能够更好地抑制噪声;本文算法处理后的图像相对较高的信息熵,说明能够保持原图的本质特征,去雾效果更为真实;相比 He 算法,本文算法具有更短的运行时间,因此实时性更强^[11].

5 结语

本文提出了边缘细化透射率修正的图像去雾算法,通过对边缘区域采用块到像素插值的方法优化暗通道,得到细化的透射率图,提高了算法的实时性;对于天空等区域,通过引入修正因子改进粗透射率,减少该区域的色彩失真.实验证明,该算法在多个性能上都相对 He 算法有了很大改进,在保证边缘信息的前提下明显提高了时效性.

(下转第 124 页)

- with multiscale feature learning, purity trees, and optimal covers [J/OL]. (2012-07-13). <https://arxiv.org/abs/1202.2160>
- [19] Farabet C, Couprie C, Najman L, et al. Learning hierarchical features for scene labeling [J]. IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence, 2013, 35(8): 1915-1929.
- [20] Dai J, He K, Sun J. Convolutional feature masking for joint object and stuff segmentation [C]//IEEE. Proceedings of the Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE, 2015: 3992-4000.
- [21] Long J, Shelhamer E, Darrell T. Fully convolutional networks for semantic segmentation [C]//IEEE. Proceedings of the Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE, 2015: 3431-3440.
- [22] 蒋应锋, 张桦, 薛彦兵, 等. 一种新的多尺度深度学习图像语义理解方法研究[J]. 光电子·激光, 2016, (02): 224-230.
- [23] 刘丹, 刘学军, 王美珍. 一种多尺度 CNN 的图像语义分割算法[J]. 遥感信息, 2017, (01): 57-64.
- [24] Mostajabi M, Yadollahpour P, Shakhnarovich G. Feed-forward semantic segmentation with zoom-out features [C]//IEEE. Proceedings of the Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE, 2015: 3376-3385.
- [25] Lin G, Shen C, van den Hengel A, et al. Efficient piecewise training of deep structured models for semantic segmentation [C]//IEEE. Proceedings of the Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE, 2016: 3194-3203.

(上接第 105 页)

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): 221-239.
- [2] Tan R T. Visibility in bad weather from a single image [C]//IEEE. 2008 Computer Vision and Pattern Recognition. Alaska: IEEE, 2008: 1-8.
- [3] Nishino K, Kratz L, Lombardi S. Bayesian Defogging [J]. International Journal of Computer Vision, 2012, 98(3): 263-278.
- [4] Fattal R. Single image dehazing [J]. ACM Transactions on Graphics, 2008, 27(3): 1-9.
- [5] He K, Sun J, Tang X. Single image haze removal using dark channel prior [C]//IEEE. Computer Vision and Pattern Recognition. Miami: IEEE, 2011: 1956-1963.
- [6] Tarel J P, Hautiere N, Caraffa L, et al. Vision Enhancement in Homogeneous and Heterogeneous Fog [J]. Intelligent Transportation Systems Magazine IEEE, 2012, 4(2): 6-20.
- [7] McCartney E J, Jr F F H. Optics of the Atmosphere: Scattering by Molecules and Particles [J]. Journal of Modern Optics, 1977, 14(7): 521-521.
- [8] 李锋, 阚建霞. 基于 Sobel 算子的图像快速二维最大熵阈值分割算法[J]. 计算机科学, 2015, 42(6A): 209-210 + 220.
- [9] Chu H L, Li Y X, Zhou Z M, et al. Optimized fast dehazing method based on dark channel prior [J]. Acta Electronica Sinica, 2013, 41(4): 791-797.
- [10] 刘书琴, 毋立芳, 宫玉, 等. 图像质量评价综述 [J]. 中国科技论文, 2011, 06(7): 501-506.
- [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(9): 1753-1757.