

文章编号 1004-924X(2017)03-0735-07

图像去雾算法的改进和主客观性能评价

李佳童, 章毓晋*

(清华大学 电子工程系, 北京 100084)

摘要: 本文主要研究了图像去雾技术以提高由于雾霾影响而导致的失真图像的主客观质量。对基于暗通道先验和大气散射模型的去雾算法进行了改进, 设计了新的天空区域计算和透射率阈值确定方法, 通过增强结果图的对比度和调整亮度, 进一步降低了算法的失真。还通过对图像加雾, 分别从主观质量评价和以结构相似度作为客观标准的客观评价两方面, 用数理统计方法比较了各个相关算法的性能。实验表明, 所提算法有效地降低了图像的失真(评价分最高), 使去雾图像有较高的主观质量(总体评价分并列最高)。

关键词: 图像去雾; 图像失真; 结构相似度; 主观质量评价

中图分类号: TP391.4 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20172503.0735

Improvements of image haze removal algorithm and its subjective and objective performance evaluation

LI Jia-tong, ZHANG Yu-jin*

(Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

* Corresponding author, E-mail: zhang-yj@tsinghua.edu.cn

Abstract: In this paper, a study was conducted in the image haze removal to improve the subjective quality of images distorted due to haze. First, the haze removal algorithm based on dark channel prior and atmospheric scattering model was improved, and a new method for calculation of the sky area and determination of the transmittance threshold was designed; then the distortion of such algorithm was further lowered by enhancing the image contrast and adjusting the brightness; finally, mathematical statistic method was used to compare the performance of each relevant algorithm by adding haze to the image, with subjective quality assessment and structural similarity as the objective criterion. The experiment in the existing haze images and the actually shot images indicates that the proposed algorithm can effectively reduce the distortion of images (with the highest assessment scores), thus keeping the haze removed images with relatively high subjective quality (tying first in the overall assessment).

Key words: image haze removal; image distortion; structural similarity index measurement; subjective quality assessment

收稿日期: 2016-12-21; 修订日期: 2017-01-15.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 61171118, No. 61673234)

1 引言

雾霾是一种自然现象,它会使大气的能见度下降,导致户外拍摄的图像质量变差,颜色失真,清晰度降低,目标难以辨别。图像去雾技术就是要提升图像对比度,改善图像的视觉效果,去除或降低雾霾对图像质量的退化影响,以便有效获取图像中的信息^[1]。

根据图像去雾方法的作用机理,可将其分为两大类:图像增强方法和图像恢复方法。图像增强处理不考虑退化原因,仅从提升对比度角度入手,突出有用细节,削弱或去除某些不需要的干扰,以提高图像质量。但这从本质上讲并没能实现真正意义上的去雾。图像恢复处理通过分析雾霾图像的退化机理,利用图像退化的先验知识或假设,建立图像降质的物理模型或估计雾的属性,从而有针对性地实现去雾并恢复场景。这类方法去雾效果比较自然,失真较小,已成为图像去雾领域的主流方法。

根据采用的输入图像数量,又可将常用的图像恢复去雾方法分为两大类:多幅图像去雾方法和单幅图像去雾方法。多幅图像去雾方法常利用同一场景下不同时间和不同天气情况下的多幅图像或不同偏振程度的多幅图像进行处理^[2-5]。这样做的原因主要是考虑到景深可提供去雾的重要线索,但从单幅图像获得深度信息比较难,所以需要利用多幅图像(对应雾的不同偏振度或不同属性或不同天气条件)来构建场景的三维结构模型,从而估计场景的深度信息和大气散射系数,以实现去雾。在这类方法中,由于采集图像时间跨度较大,前景变化(行人,车辆等)和抖动导致的景物偏移会使同一场景多幅图像的采集比较困难,所以其在实际应用中受到了一定的限制,不适用于实时应用场合,也不适用于动态场景。单幅图像去雾方法则多利用单幅图像中包含的先验信息,也有些方法通过建立若干合理的假设,以实现图像去雾。

一种典型的基于图像恢复的单幅图像去雾方法利用了暗通道先验和大气散射模型^[1],该方法取得了较好的效果。但在后续的研究中,也陆续发现了一些不足,如所采用的软抠图计算复杂度很大,确定选取暗原色的阈值时容易引起颜色失

真,对环境光强的估计不够自适应等。针对这些问题,文献[3~10]提出了一些改进方法。文献[3]提出使用边缘和暗通道估计天空区域;文献[4]提出利用变分偏微分方程以保持处理结果色彩自然;文献[5~6]分别提出了不同的大气散射图计算方法;文献[2]和文献[7~8]提出了不同的亮度调整曲线,以解决去雾后图像较暗的问题。文献[9]提出应该在透射率空间进行去雾。文献[10]提出采用尺度自适应策略更合理地计算暗通道先验。

通过分析文献[1]算法存在的问题以及一些文献所提出的相应解决方案,本文采取在透射率空间计算大气散射图,并使用引导滤波平滑细节来防止逆梯度效应^[11]。还通过对天空区域计算方法的改进以及透射率阈值的确定,借助对结果图的对比度增强和亮度调整方法,进一步降低了图像失真。还用结构相似度(Structural Similarity Index, SSIM)^[12]作为客观评价标准,并使用蓝色通道^[13]对去雾结果再进行加雾以帮助建立 SSIM 与失真的关系。最后,进行了主观质量评价实验,以对比分析本文算法和相关算法的去雾效果。

2 改进算法

本节安排如下:先概述原始算法所使用的基本模型,然后给出改进算法流程,接下来依次介绍各个改进步骤。

2.1 图像退化基本模型

雾天彩色图像退化的基本模型^[1]如下($\mathbf{x} = [x \ y]^T$):

$$\mathbf{I}(\mathbf{x}) = \mathbf{J}(\mathbf{x})t(\mathbf{x}) + \mathbf{A}[1 - t(\mathbf{x})], \quad (1)$$

其中: $\mathbf{I}(\mathbf{x})$ 是有雾原图; $\mathbf{J}(\mathbf{x})$ 是无雾图; \mathbf{A} 是常数环境光强;记 $\mathbf{V}(\mathbf{x}) = \mathbf{A}[1 - t(\mathbf{x})]$ 为大气散射图^[5]; $t(\mathbf{x})$ 是透射率,其随场景深度指数衰减,可表示为:

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

其中: β 是常数大气散射系数; $d(\mathbf{x})$ 是场景深度。

图像去雾过程是在只知道 $\mathbf{I}(\mathbf{x})$ 的条件下,先估计出 $t(\mathbf{x})$ 和 \mathbf{A} ,然后得到 $\mathbf{J}(\mathbf{x})$ 。 $\mathbf{J}(\mathbf{x})$ 的恢复公式为:

$$\mathbf{J}(\mathbf{x}) = \frac{\mathbf{I}(\mathbf{x}) - \mathbf{A}}{\max(t, t_0)} + \mathbf{A}, \quad (3)$$

式(3)中加入阈值 t_0 是为防止分母为零。

公式(1)是一个欠定方程,只有1个已知数 $\mathbf{I}(\mathbf{x})$,需要利用先验假设解出最终的 $\mathbf{J}(\mathbf{x})$ 。

2.2 改进算法流程

改进算法的基本思路是在透射率(T)空间计

算大气散射图,然后进行去雾。主要步骤为:

- (1)将图像从 RGB 空间转换到透射率 T 空间;
- (2)利用引导滤波得到大气散射图 $\mathbf{V}(\mathbf{x})$;
- (3)确定天空区域;
- (4)进行对比度调整和亮度调整。整个流程如图1所示。

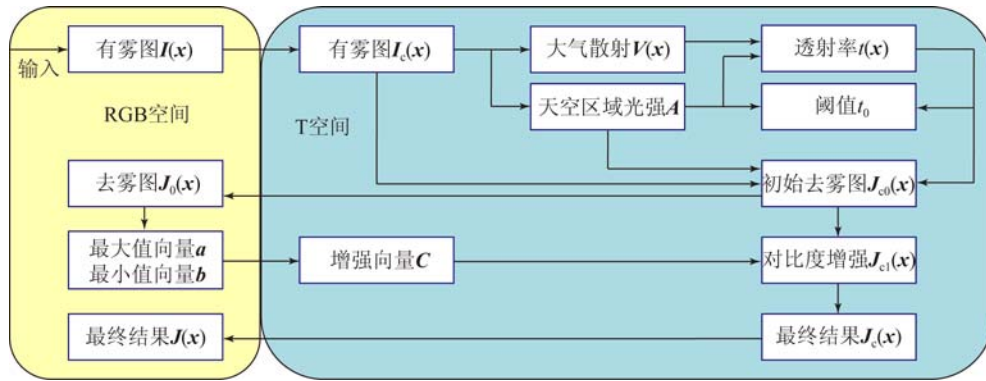


图1 改进算法流程

Fig.1 Flowchart of improved algorithm

这里按文献[9]的方法将图像 $\mathbf{I}(\mathbf{x})$ 转换到透射率空间,得到 $\mathbf{I}_c(\mathbf{x})$ 。为使 RGB 空间中的 $[255;255;255]$ 转换到 T 空间后仍为 $[255;255;255]$,将文献[9]求出的转换矩阵放大 255 倍:

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} 0.0255 & -0.1275 & 1.0965 \\ -0.3315 & 1.5045 & -0.1785 \\ 0.5610 & 0.3825 & 0.0510 \end{bmatrix}.$$

2.3 透射率空间的大气散射图

根据暗通道先验和雾天图像退化模型,计算 T 空间中的颜色通道最小值:

$$\mathbf{W}(\mathbf{x}) = \min_{d \in (T_1, T_2, T_3)} [\mathbf{I}_c^d(\mathbf{x})]. \quad (4)$$

可使用引导滤波去除 $\mathbf{W}(\mathbf{x})$ 的细节,以得到 $\mathbf{V}_1(\mathbf{x})$ 。这样就既能保留边缘且没有逆梯度效应。另外,通过一次滤波将降低出现边缘光晕效应的风险。

大气散射图 $\mathbf{V}(\mathbf{x})$ 的计算公式为(系数 $p = 0.75$):

$$\mathbf{V}(\mathbf{x}) = \max[\min(p \times \mathbf{V}_1(\mathbf{x}), \mathbf{W}(\mathbf{x})), 0]. \quad (5)$$

由 $\mathbf{V}(\mathbf{x}) = \mathbf{A}[1 - t(\mathbf{x})]$ 得到的透射率 $t(\mathbf{x})$ 为:

$$t(\mathbf{x}) = 1 - 0.95 \times \mathbf{V} / \mathbf{A}. \quad (6)$$

式中:引入系数 0.95 是为了保留一部分雾,使图像更加自然。将 \mathbf{V} 和 \mathbf{A} 的平均值带入式(6),使分子分母均只有一个颜色通道。根据式(5)和式(6)知,当 p 较大时, $\mathbf{V}(\mathbf{x})$ 较大, $t(\mathbf{x})$ 较小。在式

(3)中,由于一般 $\mathbf{I} \leq \mathbf{A}$,所以第一项为负。 t 较小时恢复出的 \mathbf{J} 较小,更容易出现过于鲜艳的颜色,导致颜色失真。图2(彩图见期刊电子版)所示为 p 取不同值时得到的去雾结果。其中,图2(b)的颜色过于饱和,楼房的色调偏黄,而图2(c)的颜色更加自然。



(a)有雾原图 (b) $p=0.9$ (c) $p=0.75$
(a)Original haze image (b) $p=0.9$ (c) $p=0.75$

图2 p 取不同值时的去雾结果

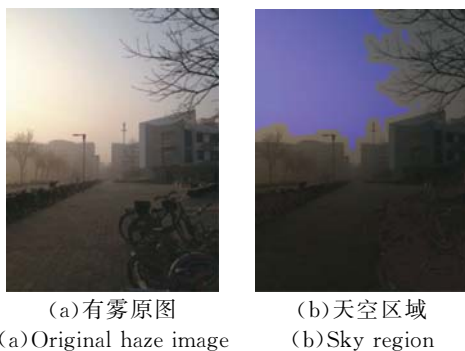
Fig.2 Haze removal results with different p values

2.4 天空区域检测

文献[3]提出只有暗通道值 \geq 阈值 T_v 且邻域内边缘数 $\leq T_p$ 的区域才是天空区域。本文引入文献[14]提出的动态 t_0 ,通过适当放松 T_v 来扩大天空区域,从而得到更准确的天空区域和 t_0 。这里将 T_v 放松为 $0.88 \times \max[\mathbf{I}^{\text{dark}}(\mathbf{x})]$ 。天空部分较多的

图像,可以放松为 $0.6 \times \max[\mathbf{I}^{\text{dark}}(\mathbf{x})]$ 。 T_p 则保持不变。所求出的天空区域如图 3(彩图见期刊电子版)所示。图 3 中 $T_v = 0.6 \times \max[\mathbf{I}^{\text{dark}}(\mathbf{x})]$,由图 3 可知,此时绝大部分的天空都能被覆盖。

由天空区域中最亮的像素值计算出大气光的 \mathbf{A} 值。采用文献[14]提出的天空区域透射率的 0.99 分位求出透射率阈值 t_0 。图 3 的 $t_0 = 0.6643 > 0.1$ 。如前所述,若 t_0 偏小,则部分 t 也会偏小,从而出现失真。



(a)有雾原图 (b)天空区域
(a)Original haze image (b)Sky region

图 3 天空区域检测

Fig. 3 Detection of sky region

2.5 对比度增强和亮度调整

采用文献[9]方法进行 T 空间的对比度增强,从而可以使由雾霾或沙尘导致的颜色偏红的天空变得晴朗,提高图像的主观质量。

然而,对比度增强会使原本偏暗的地方变得更暗,所以需要提高暗处的亮度来恢复这些细节。本文选择文献[5]提出的亮度调整曲线,来提高 T 空间图像每个通道的亮度。记亮度调整曲线为 $y = f(x)$,在 x 较小时 $f(x) - x$ 较大。令 $f(255) = 255$,可得(其中 b 是可调参数,本文取 $b = 5$):

$$y = \frac{255}{\lg 256} \times \frac{\ln(x+1)}{\ln\left[2 + 8 \left(\frac{x}{255}\right)^{\frac{\ln b}{\ln 0.5}}\right]}. \quad (7)$$

将亮度调整后的结果转换回 RGB 空间就得到最终的去雾结果。

3 图像质量评价

为了评价图像质量,将结构相似度 SSIM^[12] 作为客观评价标准。对于彩色图像,采用文献[15]的方法,将图像转换到 Lab 空间,分别计算

每个通道的相似度。鉴于 L 通道的 SSIM 比 a 和 b 通道的 SSIM 更有代表性。在算法比较中,由于数据量不够等原因会导致期望相同的两组数据得到的值不同,此时,并不能通过直接比较均值来判断算法的优劣。故本文采用数理统计学中的成对 t 检验方法对不同算法进行评价^[16],其中对判断检验假设是否成立的参数 p -value 选 0.05 作为阈值。

实验表明失真越小的算法,SSIM 越高。为获得更多证据,利用图像加雾实验进一步判断图像的主观质量。具体是使用蓝色通道^[13]加雾算法对去雾结果进行加雾。加雾后的结果和原图之间的 SSIM 越大,则表明去雾算法效果越好。归一化的蓝色通道 $B(\mathbf{x})$ 与图像深度之间存在对数关系,可表示为^[13]:

$$d(\mathbf{x}) = -\log(1 - B(\mathbf{x})). \quad (8)$$

用引导滤波去掉 $B(\mathbf{x})$ 的细节,即可得到 $B_1(\mathbf{x})$ 。根据式(2)和式(8)知,透射率与蓝色通道为线性关系。透射率可写为:

$$t(\mathbf{x}) = 1 - 0.95 \times B_1(\mathbf{x}). \quad (9)$$

选图中最亮的像素值作为 \mathbf{A} ,利用式(1)就可恢复有雾的 $\mathbf{I}(\mathbf{x})$ 。加雾结果示意图见图 4(彩图见期刊电子版)。



(a)去雾结果 (b)加雾结果
(a)Haze removal result (b)Haze addition result

图 4 图像去雾加雾结果

Fig. 4 Haze removal and addition results

实验结果表明,去雾结果与原图之间的 SSIM 越大,则加雾结果与原图之间的 SSIM 也越大。这说明 SSIM 越大则失真越小,主观质量更高。将加雾前后的 SSIM 数据点标在图 5(彩图见期刊电子版)里,其中横轴指去雾图与原图之间

的 SSIM,纵轴指加雾图与原图之间的 SSIM。图 5 最右侧的红色点代表原图经过加雾后得到的 SSIM,其横轴坐标为 1。

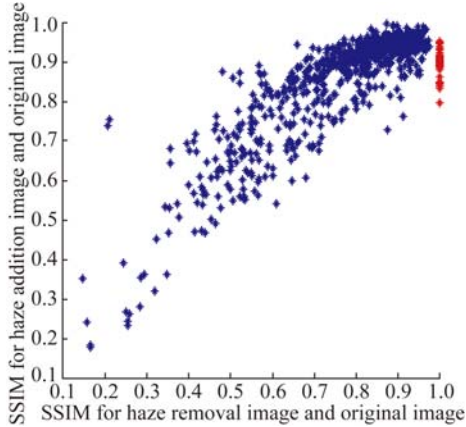


图 5 加雾前后的 SSIM 数据点

Fig. 5 Data points of SSIM before and after haze addition

由图 5 可知,蓝色点去雾图的 SSIM 与加雾图的 SSIM 的相关系数最高达 0.870 8。由图 5 还可以发现,当去雾图的 SSIM 较大时,加雾图的 SSIM 增长变慢。如果去雾图的 SSIM 继续增加,加雾图的 SSIM 的增长将进一步变慢,甚至下降,直至红色点。虽然 SSIM 过高时的图像主观质量可能下降,但在蓝色点区间,即去雾算法结果中,SSIM 越大,失真越小,图像的主观质量更高。主观质量评价也说明了这点。

实际中选择了 SSIM 较高,主观质量较好的 4 种算法:文献[3]、文献[5]、文献[9]的算法,文献[3]和文献[9]组合的算法与本文提出的改进算法进行主观质量评价。取 50 幅有雾原图作为参照,一共得到 250 幅结果图,打乱算法结果的显示顺序。对于每幅图,均分别使用失真和去雾两个评判指标进行打分,将打分标准分为低中高 3 档。失真越低越好,去雾指标越高越好。一共请 10 个人对这些图像进行评价。他们的打分结果较集中,(10,0,0),(9,1,0),(8,1,1),(8,2,0)(不考虑顺序)的分布比较多,峰值较明显。上述结果说明 10 个人已经能帮助找出了打分的统计分布;而且由于结果图的质量较好,大家对图像质量好坏比较容易达成共识。

由于打分时 3 档之间的差距并不很明显,所以将低中高失真项的权重分别设为 3,2,1;低中

高去雾项的权重分别设为 1,2,3。两项的得分都是越高越好。失真总分和去雾总分的权重均为 1。由于归一化系数不影响 t-test 和 p-value 值,所以对计算出的分数不需要做归一化处理。

4 实验结果和分析

本文使用文献[1]网站和 PPT 中展示的图像作为测试图像的一部分进行实验,这些图像的大小约为 400 pixel×600 pixel。另外,还在 PM2.5 约为 300 时拍摄了一些有雾霾的图像来扩展数据集,这些图像的大小为 2 448 pixel×3 264 pixel。从这些雾霾图像中再选出一些作为测试图像,共选择 50 张测试图像。测试图像种类比较分散,其中有自然风光也有城市景象,有存在高光区域的图像也有逆光条件下拍摄的图像。

求大气散射图时,引导滤波的引导图和输入图均为归一化到[0,1]的 $W(x)$,滤波后再将结果放回[0,255]区间。对于加雾图像也同样处理。对于 400 pixel×600 pixel 图像的引导滤波,参数选为 window=12, $\epsilon=0.04$;对 2 448 pixel×3 264 pixel 大小的图像,参数设置为 window=70, $\epsilon=0.04$ 。求天空区域时,对 2 448 pixel×3 264 pixel 大小的图像, $T_v=0.6 \times \max(I^{\text{dark}}(x))$;对 400 pixel×600 pixel 大小的图像 $T_v=0.88 \times \max(I^{\text{dark}}(x))$ 。对 400 pixel×600 pixel 大小的图像,暗通道邻域大小为 30,边缘邻域为 15;对 2 448 pixel×3 264 pixel 大小的图像,暗通道邻域为 120,边缘邻域为 60。图像加雾时,对 400 pixel×600 pixel 大小的图像,window=5, $\epsilon=0.04$;对 2 448 pixel×3 264 pixel 大小的图像,window=30, $\epsilon=0.04$ 。

在主观质量评价中,所提改进算法的失真得分最高,和第二名之间的 p-value 为 0.000 3。总分与文献[5]和文献[9]的算法并列第一。这 3 个算法的最小 p-value 为 0.26 > 0.05,统计上也大于其余 2 种算法。

参与比较的 5 种算法的失真评分如图 6(彩图见期刊电子版)所示。5 种算法 L 通道的 SSIM 如图 7(彩图见期刊电子版)所示。由图 6 和图 7

可见, SSIM 对最高分和最低分的识别较好。SSIM 最高的粉色点在失真得分图中排在前面, 最低的蓝色点在失真得分图中也排在后面。这两种算法平均有 40% 的图的 SSIM 和失真得分排序相同。

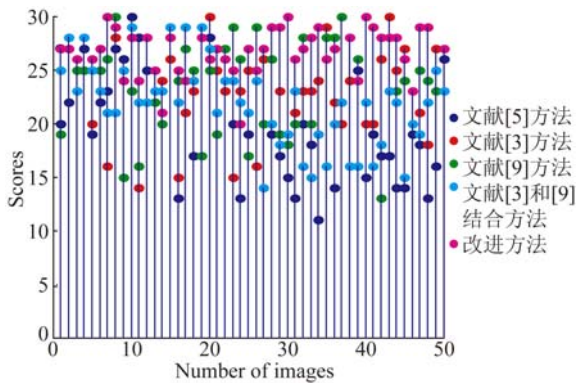


图 6 5 种算法的失真得分

Fig. 6 Distortion scores of five different algorithms

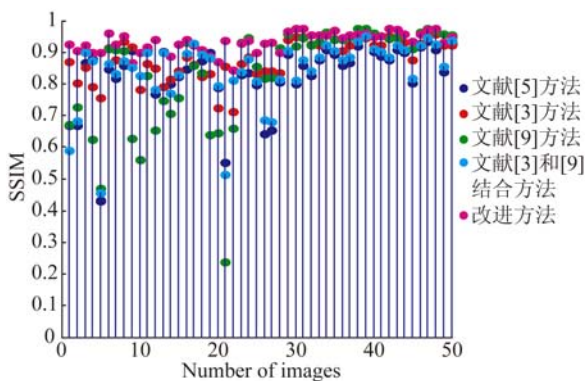


图 7 5 种算法在 L 通道中的 SSIM 值

Fig. 7 SSIM values in L channel for five different algorithms

另外, 还使用 PSNR, 熵, 平均梯度, 标准差,

以及去雾前后增加的边缘数等对算法性能进行了评价。其中, PSNR 对最大值和最小值的区分效果和 SSIM 接近, 也约为 40%。不过很多算法去雾后的标准差和熵都比原图小, 这表明这些指标不太适合作为客观评价标准。

5 结 论

本文依据在透射率空间中利用大气散射图去雾的思路, 采用多个措施对基本的基于暗通道先验和大气散射模型的去雾算法进行了改善。其中使用引导滤波以防止逆梯度效应, 改进天空区域的计算并动态估计透射率阈值, 还通过增强结果图的对比度和亮度调整, 进一步降低了去雾图像的失真。由于本文对 $V(x)$ 的计算仅通过单通道滤波即可完成, 不需要计算颜色通道协方差, 和文献[1]相比降低了时间复杂度。主观质量和 SSIM 的评价结果均表明本文算法比参与比较的其他算法的失真更少。此外, 本文还通过对去雾图像加雾实验进行了主观质量评价, 还用 SSIM 作为标准用统计中的 t-test 和 p-value 比较了各算法的性能, 并试着去建立主观质量与客观质量的联系。

在实际应用中, 还有一些问题需要解决, 如对各算法的主观质量打分不是独立的, 而且不同的图像由于高光等原因去雾难度可能不同, 相同的 SSIM 也可能对应不同的主观质量评分 (SSIM 与主观得分之间的相关系数很低, 仅为 0.18)。下一步工作可考虑建立 SSIM 与图像主观质量得分的直接函数关系, 提出更加适用于图像去雾, 并可以与图像主观质量建立更明显联系的客观评价标准。

参考文献:

- [1] HE K M, SUN J, TANG X O. Single image haze removal using dark channel prior [C]. *Proc. CVPR*, 2009, 1956-1963.
- [2] 郭琦, 唐璠, 蔡自兴. 基于融合策略的单幅图像去雾算法[J]. *通信学报*, 2014, 35(7): 199-207, 214. GUO F, TANG J, CAI Z X. Single image defogging based on fusion strategy [J]. *Journal on Communications*, 2014, 35(7): 199-207, 214. (in Chinese)
- [3] 褚宏莉, 李元祥, 周则明, 等. 基于黑色通道的图
- [4] 周理, 毕笃彦, 何林远. 融合变分偏微分方程的单幅彩色图像去雾[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(5): 1466-1473. ZHOU L, BI D Y, HE L Y. Single color image dehazing using variational partial differential equation

像快速去雾优化算法[J]. *电子学报*, 2013, 41(4): 791-797.

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. (in Chinese)

- [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(5): 1466-1473. (in Chinese)
- [5] 甘佳佳,肖春霞. 结合精确大气散射图计算的图像快速去雾[J]. *中国图象图形学报*, 2013, 18(5): 583-590.
- GAN J J, XIAO CH X. Fast image dehazing based on accurate scattering map [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2013, 18(5): 583-590. (in Chinese)
- [6] 王一帆,尹传历,黄义明,等. 基于双边滤波的图像去雾[J]. *中国图象图形学报*, 2014, 19(3): 386-392.
- WANG Y F, YIN CH L, HUANG Y M, *et al.*. Image haze removal using a bilateral filter [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2014, 19(3): 386-392. (in Chinese)
- [7] 王伟鹏,戴声奎. 结合图像融合与分割的快速去雾[J]. *中国图象图形学报*, 2014, 19(8): 1155-1161.
- WANG W P, DAI SH K. Fast haze removal method based on image fusion and segmentation [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2014, 19(8): 1155-1161. (in Chinese)
- [8] 张冰冰,戴声奎,孙万源. 基于暗原色先验模型的快速去雾算法[J]. *中国图象图形学报*, 2013, 18(2): 184-188.
- ZHANG B B, DAI SH K, SUN W Y. Fast image haze-removal algorithm based on the prior dark-channel [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2013, 18(2): 184-188. (in Chinese)
- [9] 史德飞,李勃,丁文,等. 基于地物波谱特性的透射率-暗原色先验去雾增强算法[J]. *自动化学报*, 2013, 39(12): 2064-2070.
- SHI D F, LI B, DING W, *et al.*. Haze removal and enhancement using transmittance-dark channel prior based on object spectral characteristic [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2013, 39(12): 2064-2070. (in Chinese)
- [10] 宋颖超,罗海波,惠斌,等. 尺度自适应暗通道先验去雾方法[J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(9): 286-297.
- SONG Y CH, LUO H B, HUI B, *et al.*. Haze removal using scale adaptive dark channel prior [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(9): 286-297. (in Chinese)
- [11] HE K M, SUN J, TANG X O. Guided image filtering [C]. *Proc. ECCV*, 2010, 1-14.
- [12] WANG Z, BOVIK A C, SHEIKH H R, *et al.*. Image quality assessment: from error visibility to structural similarity [J]. *IEEE Trans. on Image Processing*, 2004, 13(4): 600-612.
- [13] WANG P, BICAZAN D, GHOSH A. Rerendering landscape photographs [C]. *Proc. CVMP*, 2014, 13.
- [14] 方雯,刘秉瀚. 多尺度暗通道先验去雾算法[J]. *中国体视学与图像分析*, 2013, 18(3): 230-237.
- FANG W, LIU B H. Image dehazing using multi-scale dark channel prior [J]. *Chinese Journal of Stereology and Image Analysis*, 2013, 18(3): 230-237. (in Chinese)
- [15] 赵秀芝,谢德红,潘康俊. 彩色视觉相似性图像评价方法[J]. *计算机应用*, 2013, 33(6): 1715-1718.
- ZHAO X ZH, XIE D H, PAN K J. Color image quality assessment algorithm based on color structural similarity [J]. *Journal of Computer Applications*, 2013, 33(6): 1715-1718. (in Chinese)
- [16] 数学百科全书编译委员会. 数学百科全书[M]. 北京:科学出版社,2000,5:45-46.
- The Committee of Encyclopedia of Mathematics. *Encyclopedia of Mathematics* [M]. Beijing: Science Press,2000,5:45-46. (in Chinese)

作者简介:



李佳童(1994—),女,四川成都人,2016年于清华大学电子工程系获得工学学士学位,现为美国 University of Michigan-Ann Arbor 研究生,主要从事信号,图像处理与机器学习方面的研究。E-mail: jenniferjtli@hotmail.com



章毓晋(1954—),男,江苏江阴人,1989年于比利时列日大学获得应用科学博士学位,现为清华大学电子工程系教研系列长聘教授,主要从事图像工程(图象处理、图象分析、图象理解及其技术应用)的研究。E-mail: zhang-yj@tsinghua.edu.cn