

提高特殊场景下图像质量的图像复原算法^①

张旭东, 张 明

(上海海事大学 信息工程学院, 上海 201306)

摘 要: 本文首先分析基于暗原色先验去雾算法的基本步骤, 然后提出一种提高特殊场景下图像质量的图像复原算法. 该算法先对特殊场景下的图像进行反转操作, 然后利用反转操作后的图像与雾天图像具有相似特征的结论, 将改进的暗原色先验理论算法用于反转后的图像, 从而使特殊图像的质量得到提高. 本文通过改进暗原色先验去雾算法参数的获取, 同时将图像中天空区域和非天空区域分开处理, 得到了很好的视觉效果, 也降低了算法的复杂度.

关键词: 特殊场景; 图像复原; 图像反转; 去雾算法

Image Restoration Algorithm for Improving Image Quality Under Special Scene

ZHANG Xu-Dong, ZHANG Ming

(Information Engineering College, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China)

Abstract: First of all, this paper analyzes the basic steps of dark channel prior algorithm, and then proposes a method to improve image quality under special scene image restoration algorithm. The algorithm works on special scene image through reversion operation firstly, and then lets improved dark channel prior algorithm use for inverting image to make the quality of the special image be improved on using the conclusion that an reversed special scene image has the similar features with a haze image. In this paper, we will optimize the parameters of improved dark channel prior algorithm and deal with the sky in the image area and the non-sky area in separate, which is very good visual effect and also reduces the complexity of the algorithm.

Key words: special scene; image restoration; image inversion; defogging algorithm

随着科学技术的不断发展, 智能手机、平板电脑、数码相机等电子产品已经成为我们生活中的必需品. 虽然它们的性能越来越强大, 但在现实生活中, 经常会因为天气等特殊场景而影响了我们拍摄图像的质量, 如背光、夜晚以及雾天. 在这些特殊场景下所拍摄的图像的质量严重下降, 图像也模糊不清, 对比度偏低, 并且有明显的颜色失真, 这样的图像应用价值低, 图像质量人们也难以接受. 基于此, 为了提高这种特殊情况下的图像质量, 本文主要针对背光条件下的图像进行分析其产生的原因并根据这些原因进行研究, 提出了一种图像复原算法. 所谓背光图像, 顾名思义, 就是由于拍摄目标周围的光照强度不强, 或者光源处

于拍摄物体的后方. 这种情况下拍摄出来的图像的很多细节都会被隐藏, 图像的整体视觉效果也偏暗也就没什么使用价值. 因此研究如何提高这种特殊场景下的图像质量就有着很重要的意义.

为了提高这种特殊图像的质量, 大多学者们采用最多的方法就是增加图像对比度的方法. 目前, 主要流行的增加对比度的方法有增强局部对比度、增强全局对比度和直方图均衡化(HE)等. 这些方法的主要思想就是通过将原图像直方图调整为全部灰度范围内的均匀分布来增强图像的对比度, 从而使图像整体偏亮, 达到提高图像质量的目的, 这些方法对直方图比较窄的图像有比较好的作用, 但同时也会增加图像的噪声.

^① 基金项目: 河南省重点科技攻关项目(142102210225)

收稿时间: 2015-10-17; 收到修改稿时间: 2015-12-31 [doi:10.15888/j.cnki.csa.005238]

在文献[1]中,采用了保持亮度的双直方图均衡来提高图像的对比度,效果虽然明显,但用该方法处理的结果图像有一定的失真.文献[2]则通过记录图像像素间前后之间相关信息的方法提高对比度,虽然也获得了不错的视觉效果,但该方法的时间复杂度比较高,有一点点的缺陷.伽马校正^[3]是通过采用减少明亮区域的对比度的方法,来达到增加暗区域的对比度,显而言之,该方法的不足是舍去了图像明亮区域的细节,从而弱化了图像的视觉效果.在文献[4]中,采用了指数校正方法提高图像的局部对比度,该方法在增强图像局部对比度的同时,也同时减弱了整幅图像的全局对比度,图像的部分细节也被丢失.文献[5]中提到的 Retinex 方法,则是采用先估计出照射光影响,然后再消除照射光的影响的方法,实验表明,该方法会在图像光照突变、明暗对比强烈的边缘出现明显的光晕现象.多尺度的 Retinex^[6]则是通过采用多种不同的单尺度 Retinex 方法来提高图像的质量,该方法采用多尺度卷积,提高了运算的复杂度但参数设定相当的复杂.

本文提出了一种有效的提高特殊场景下图像质量的复原方法.该算法首先对背光图像执行反转算法操作,然后判断图像中是否存在天空区域,若存在,则将天空区域和非天空区域分开处理,再利用改进的暗原色先验去雾算法对反转后的背光图像进行处理,最后再对处理后的图像再执行反转操作从而得出复原图像.最后实验结果表明,该方法能够有效提高特殊场景下的图像质量,取得了不错的视觉效果.

1 基于暗原色先验去雾过程

1.1 大气散射物理模型

在 1975 年,McCartney 根据 Mie 散射理论提出了大气散射模型^[7],目前是图像处理领域最为常用的模型,该模型由衰减模型和大气光模型两部分组成.其中,衰减模型表示目标物体光线在传输媒介中衰减后所剩余的部分,而大气光模型则是描述周围环境中的各种光线,经大气粒子的散射之后,附加在目标景物上,这会导致景物颜色的偏移.下述方程所描述的雾天图像形成模型被广泛使用

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

在上式中, $I(x)$ 就是我们现在已经有的图像(待去雾的图像), $J(x)$ 是我们要恢复的无雾的图像, A 是全球大气光,通常被认定为大气、地平线处或者天空的颜

色, $t(x)$ 为雾气的通透程度,也称为透射率,其函数可以表示为

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

该式表明景物光线是随着景物深度 d 按指数衰减的.在公式(1)中,已知量是 $I(x)$, 要求未知目标值是 $J(x)$, 显然,这是个有无数解的方程,因此,就需要做一些先验来估计出 A 和 $t(x)$ 的值,从而从公式(1)中恢复出未知量 $J(x)$.

1.2 暗原色先验理论

根据文献[8]可以得知:在无雾图像中,去除其天空区域部分后,在图像的局部块内存在光照强度很低,并且在至少一个通道中趋于零的像素,这些像素被称为暗原色.对于任意的输入图像 $I(x)$, 给暗原色一个数学定义,其可以用下式表达:

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

式中, J^c 表示彩色图像的每个通道, $\Omega(x)$ 表示以像素 x 为中心的一个局部块.式(3)的代码意义是:首先求出每个像素 RGB 分量中的最小值,存入一幅和原始图像大小相同的灰度图中,然后再对这幅灰度图进行最小值滤波,滤波的半径由窗口大小决定,一般有 $WindowSize=2*Radius+1$.

经过大量实验统计表明,无雾图像中 J^{dark} 强度值很低且趋于零,该规律被称为暗原色先验理论.

1.3 暗原色先验去雾算法

从上文知,要求得 $J(x)$ 的值,要做一些假设.首先假设在每一个窗口内透射率 $t(x)$ 为常数,定义为 \tilde{t} , 并且假设 A 的值已经给定,对公式(1)两边同时除以 A 进行归一化处理,然后对式(1)两边求两次最小值运算,求其暗原色,于是有

$$\begin{aligned} \min_{y \in \Omega(x)} (\min_{c \in \{r,g,b\}} \frac{I^c(y)}{A^c}) &= \tilde{t}(x) \cdot \\ \min_{y \in \Omega(x)} (\min_{c \in \{r,g,b\}} \frac{J^c(y)}{A^c}) + 1 - \tilde{t}(x) & \end{aligned} \quad (4)$$

公式(4)中, $J(x)$ 是待求的无雾的图像,根据前述的暗原色先验理论有

$$J^{dark}(x) = \min_{y \in \Omega(x)} (\min_{c \in \{r,g,b\}} J^c(y)) = 0 \quad (5)$$

将公式(5)代入公式(4)可得

$$\tilde{t}(x) = 1 - \min_{y \in \Omega(x)} (\min_{c \in \{r,g,b\}} \frac{I^c(y)}{A^c}) \quad (6)$$

但在实际场景中,无论天气如何,空气中总会存在着一些颗粒,也总会让人感觉到有一点雾的存在,

因此, 这里我们通过在公式(6)中引入一个在[0,1]之间的因子 ω 来表示保留一定程度的雾, 本文中实验结果依赖于 $\omega=0.8$ ^[9], 则公式(6)修正为

$$\tilde{t}(x) = 1 - \omega \min_{y \in \Omega(x)} \left(\min_{c \in \{r, g, b\}} \frac{I^c(y)}{A^c} \right) \quad (7)$$

由上文分析知, 公式(7)中 \tilde{t} 的比较粗糙, 所以图像用它处理后块效应会很明显, 为了优化该参数, 何凯明^[9]等人对透射率使用Soft Matting方法进行优化, 其 $t(x)$ 通过公式(7)求解得到

$$(L + \lambda U)t = \lambda \tilde{t} \quad (8)$$

公式(8)中, L是抠图拉普拉斯矩阵, λ 是修正参数, U是单位矩阵. 综上所述, 再估计出A的值, 便可由公式(1)求出J(x), 但用Soft Matting方法的时间复杂度很高, 处理会花费较长的时间, 所以在下文, 会对该参数进行优化处理. 同时, 从上文的公式(1)可以看出, 在求解J(x)时, 在 $t(x)$ 取很小值的情况下, 就会使得计算结果J(x)偏大, 会有一些的误差, 从而导致图像的整体亮度偏亮, 所以, 从这方面考虑, 我们这里为 $t(x)$ 设置一个阈值 t_0 , 当 $t(x)$ 值小于 t_0 时, 令 $t=t_0$, 结合文献[9], t_0 取0.1获得了比较好的效果, 故本文中, t_0 取值为0.1, 因此, 最终的恢复公式如下:

$$J(x) = \frac{I(x) - A}{\max(t(x), t_0)} + A \quad (9)$$

2 提高特殊场景下图像质量的复原算法

由大量实验发现, 背光图像经过反转操作后的图像与雾天图像在像素值分布上非常相似. 文献[9]提出雾天图像的雾区域在每个颜色通道的像素值都比较高. 为了验证上述结论, 随机选择 50 幅雾天图像和 50 幅背光图像, 分别计算雾天图像和反转后的背光图像每个像素三个颜色通道的最小值. 结果如下图 1 和图 2 所示.

上述的反转操作如下

$$R^c(x) = 255 - I^c(x) \quad (10)$$

仔细观察图 1 和图 2, 我们可以发现这两个直方图在颜色值的分布上有相似之处. 如雾天图像有雾区域的像素在每个颜色通道都有比较高的像素值, 反转后的宽动态范围图像也表现出相同的特性, 这也为用暗原色去雾算法处理反转后的宽动态范围图像奠定了基础.

为了进一步说明上面反转后的背光图像和雾天图像有相似之处. 我们下面再利用文献[10]中雾检测算

法来检测反转背光图像, 进一步说明它们的相似之处. 检测的实验结果如下图 3 所示, 反转背光图像检测出的有雾区域我们用黑色标记, 从检测结果来看, 背光图像中的暗目标区域经过反转后被检测为有雾区域.

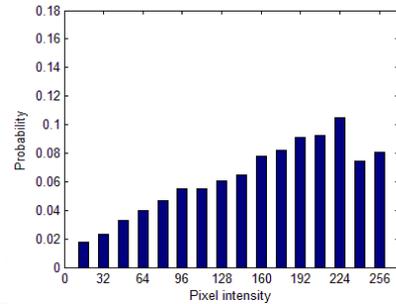


图 1 50 幅雾天图像颜色最小值分布图

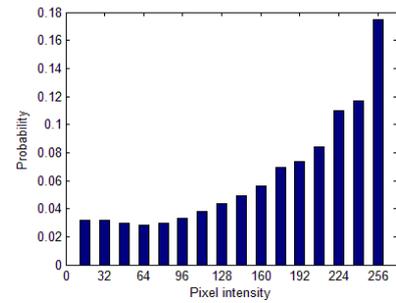


图 2 50 幅反转图像颜色最小值分布图



图 3 雾检测结果图

下面分析一下雾天图像和反转背光图像有上面相似特性的原因. 在有雾天气条件下, 物体进入相机输入光中夹杂了大气光, 这样就会使相机所成图像的亮度比实际物体的亮度更亮, 也就遮盖了图像中细节和场景暗光部分, 所以导致对比度也降低, 背景的颜色值也都接近雾粒的亮度. 同样, 在背光条件下, 光源不能直接照射到目标对象, 所以会导致光照强度低, 另一种情况是目标物体的背景光照强度相对目标物体较强, 这样背光物体经过感光器件后所成的图像就偏暗. 把这种偏暗的图像反转以后, 图像中的暗目标区域就会呈现出高亮度, 就像大气光把雾天目标的亮度增强一样, 从而使雾天图像和反转后的背光图像颜色通道的最小值直方图有相似之处.

综上所述, 我们就可以利用雾天图像处理方法来处理背光图像经过反转之后得到的图像, 从而来提高图像的质量. 基于以上结论, 我们就借鉴雾天图像的处理算法来处理背光图像.

2.1 改进的暗原色理论去雾算法

文献[8]中提到, 有雾图像里大气光的颜色与天空的颜色很接近, 透射率相当于 0, 所以可以把非天空区域和天空区域放在一起处理, 而没有必要把它们分开单独处理. 而文献[11]提出了不同的观点, 认为有雾图像中的天空区域不满足暗原色先验理论, 所以不能把它暗原色的透射率认为是 0, 而它的实际透射率要偏大. 从公式(9)中可以看出, 有雾图像的天空区域像素通道之间色彩值有很小的差异, 在这基础上, 再除以一个较小的数值 t , 结果会变大, 因此图像的色彩也会失真. 故认为应该把有雾图像中的非天空区域和天空区域分开处理是有必要的. 综上所述, 在本文中, 我们将把天空区域和非天空区域分开处理, 使用天空区域分割算法, 对天空区域用公式(11)处理, 对非天空区域用公式(9)处理, 然后再使用优化后的透射率进行精细化处理, 最后使用反转算法反转处理过后的图像. 算法流程如下图 4 所示

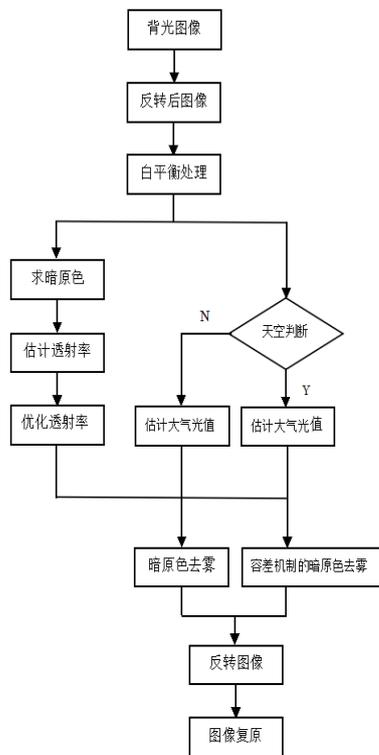


图 4 算法流程图

2.2 天空区域存在性判断及分割方法

在文献[12]中指出, 天空区域具有以下 3 个特征: (1)亮度较高; (2)灰度平坦; (3)位置偏上.

本文采用的分割天空区域的方法将基于以上 3 个特征. 第一步, 需要对图像中是否存在天空区域进行判断. 首先, 获取有雾图像的前 N_{top} 行, 然后求该区域中亮度的最大亮度值和平均值, 分别记为 V_{max} 和 V_{avg} , 如果 $V_{avg} > \mu_1 V_{max}$ 不等式成立, 则表明天空区域存在. 本文中 μ_1 为 0.9 时, 检测结果较好.

对于天空区域和非天空区域的边界检测, 我们采用边缘检测算法来检测, 因为在雾天图像中天空区域的灰度比较平滑. 文献[12]指出检测天空区域和非天空区域的边界需要对图像边缘采取分块统计的方法, 但是当雾的程度比较大时, 天空区域的边缘会模糊不清, 边缘的分块信息也就不能有效地标记出天空区域. 综合上述因素, 我们采用如下方法: 首先获得有雾图像的灰度分量, 然后再对它采用直方图均衡化处理来增强边缘信息, 最后再进行 Canny 算子的边缘检测. 在检测的过程中, 需要同时检查灰度图像中对应边缘处的亮度值 V_e , 如果 $V_e > \mu_2 V_{max}$ 不等式成立, 则继续往下检查, 直到获得有效边缘或者是检查到 βH 行, 然后, 记下此时的边界位置记为 $Y_s(x)$.

一般情况下, β 取 0.5, μ_2 取 0.95. 而对于 $Y_s(x) = \beta H$ 的情况, 有可能是因为边缘信息比较弱而使得定位错误. 这时, 需要使用该点左右邻域有效值的均值来作为有效边缘表示为 $(Y_s(x-m) + Y_s(x+n))/2$. 该方法检测效果如下图 5 所示, 用黑色标记图像中天空区域.

对于雾天图像中非天空区域的部分用基于暗原色先验方法处理能得到比较好的效果, 而若用它去处理天空区域, 则会引起图像一定程度的失真. 文献[11]中提出了一种方法可以有效地处理天空区域, 它采用了一种容差机制, 能够有效地改善在获取天空区域时透射率偏小的问题. 该方法引入了一个容差参数 K , 如果 $|I-A|$ 大于参数 K , 表明非天空区域, 则用暗原色先验算法处理, 反之, 则认为是天空区域, 就需要重新计算透射率. 从实验结果来看, 该方法取得了很好的效果, 但在天空区域和非天空区域的交界处会发生一点失真现象, 为了解决这个问题, 我们先对图像进行白平衡处理来让图像的整体亮度趋于一致, 然后在边界处用下面的公式(11)~(13)对两种方法得到的复原结果

进行融合. 综上所述, 本文中, 我们将采用有容差机制的暗原色方法处理天空区域, 用暗原色去雾算法处理非天空区域, 这样就较好地保留了两种算法各自的优势, 实验也得到了不错的效果, 交叉区域也没有明显锯齿效应.



图5 天空分割区域图

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

$$J_s(x) = \frac{I(x) - A}{\min\left(\frac{K \cdot \max(t(x), t_0)}{|I(x) - A|}, 1\right)} + A \quad (12)$$

$$J(x) = (1 - \alpha) \cdot J_s'(x) + \alpha \cdot J_d'(x) \quad (13)$$

其中, J_d 为非天空区域及交叉区域使用暗原色先验去雾方程, J_s 为天空区域及交叉区域使用有容差机制的暗原色先验去雾方程, K 为容差参数, 结合文献[11], K 取50获得了比较好的效果, $\alpha = i^2 / H^2$, H 为天空区域和非天空区域重叠区域的高度, i 为像素 y 坐标相对于重叠区域起点的纵坐标值, J_s' 和 J_d' 分别是使用白平衡方法调整亮度后的天空区域和非天空区域的图像.

2.3 优化透射率和简化大气光估计

由上文知, 在用暗原色去雾算法时, 假设局部区域内的透射率值是定值. 但是, 在实际生活中, 这个假设是不成立的, 局部区域的透射率不是恒定的, 以上假设会导致处理后的图像有块效应. 文献[9]中采用 Soft Matting 方法来修正透射率, 虽然获得的效果不错,

但该方法的时间复杂度很高, 耗时长, 不利于实际的应用. 为了提高透射率修复的效率, 本文没有对图像进行分块处理, 而且只求了处理图像三个通道中的最小分量, 并没有对最小分量再求局部区域的最小值, 如公式(14).

先前在对于大气光 A 的选择时, 一般选择

$$t(x) = 1 - \omega \min_{c \in \{r, g, b\}} \left(\frac{I^c(y)}{A^c} \right) \quad (14)$$

图像中最大亮度的像素作为 A 的值, 这样的做法虽然简单但是不合理的, 因为在实际拍摄的图像中, 图像中最亮的点可能是白色的物体, 比如白色的房屋, 天空中的白云等, 在这种情况下, A 的取值是不正确的. 文献[9]中用如下的方法来获取大气光的值, 先从暗通道图中取前 0.1% 的像素, 然后在这些位置中, 在原始有雾图像中寻找对应的具有最高亮度的点的值作为 A 值. 这种方法合理, 但比较费时. 因此, 本文对其进行优化, 根据公式(1)得

$$A \geq \max \left(\min_{c \in \{r, g, b\}} I^c(x) \right)$$

一般情况下, 又认为

$$A \leq \max \left(\max_{c \in \{r, g, b\}} I^c(x) \right)$$

综合考虑算法的有效性和快速性, 文中取

$$A = \frac{1}{2} \left\{ \max \left(\min_{c \in \{r, g, b\}} I^c(x) \right) + \max \left(\max_{c \in \{r, g, b\}} I^c(x) \right) \right\}$$

该方法保证了大气光估计的合理性, 并且考虑了算法的快速性. 图 6 为用本文方法处理得到的结果, 效果明显增强.



原图 反转后图像 复原图像

图6 背光图像处理示例

2.4 实验结果

本文算法是在 Win7 操作系统下搭建 VS2012 开发环境, PC 配置为处理器为 2.40GHz 的 Inter(R) Core i7-4700MQ. 该系统处理 720×960 的图像耗时为 0.010~0.015s. 下面给出一些对比实验结果. 图 7 为 RBBC^[13]方法、HE 方法及本文方法实验结果的对比图;

图 8 为 CVEIF^[14]方法、HE 方法及本文方法实验结果的对比图; 图 9 为 MSR^[6]方法、HE 方法及本文方法实验结果的对比图。



图7 RBBC、He与本文方法处理对比图



图8 LCC、He与本文方法处理对比图

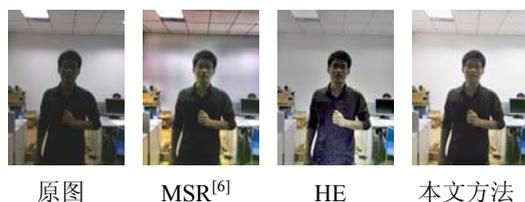


图9 MSR、HE与本文方法的处理结果比较

从实验结果可得如下结论, RBBC 提高了暗区域的亮度, 但图像的整体视觉效果还是很差; CVEIF 的效果很好, 但文献[14]中指出, 该算法的复杂度很高; MSR 方法增加了图像的对比度, 但效果不是很好; HE 方法提高了图像的亮度, 但降低了图像颜色的饱和度; 本文方法处理获得了比较好的效果, 算法复杂度也不高(见表 1)。综上所述, 在与上述的对比方法中, 本文方法比其他方法能获得更好的视觉效果, 实验结果较好, 时间复杂度与其他方法相比, 也有一点的提高。

表 1 时间复杂度比较(单位/s)

图像大小	500*375	800*600	960*720
RBBC法	0.007	0.013	0.016

CVEIF法	0.010	0.019	0.025
直方图均衡	0.003	0.009	0.011
本文方法	0.004	0.011	0.013

上面只给出了主观性的视觉效果的评价, 或许并没有说服力, 下面我们对处理结果图像质量采用客观方法评价。目前常用的方法有均方误差和峰值信噪比等, 但使用这些方法时都需要提供参考图片, 本文场景不符合它们的使用场景, 所以本文采用文献[15]中提出的 NIQE 方法, 该方法基于自然图像场景统计的高斯广义回归模型, 不需要参考图像来考察图像的质量, NIQE 值可以反映图像的客观质量, 数据指标越高, 表明图像质量越差。表 2 给出了各个方法的 NIQE 评价指数。可以看出本文方法也获得了不错的效果。

表 2 客观质量评价

图7	原图	HE	RBBC	本文方法
	6.6953	4.5503	4.5341	3.8200
图8	原图	HE	CVEIF	本文方法
	4.1021	3.6031	3.5012	3.0106
图9	原图	HE	MSR	本文方法
	7.4020	4.1252	4.2016	3.5130

3 结束语

在本文中, 通过对背光反转图像的统计分析研究, 我们提出了一种提高特殊场景下图像质量的处理方法。本文将目前主流的基于暗原色先验理论的去雾方法进行简化并改进, 在利用去雾算法的过程中, 将天空和非天空区域分开, 优化透射率和简化大气光估计, 使算法执行的更高效, 并将其用于背光图像处理中。通过实验结果的分析, 本文方法处理效果良好, 视觉效果得到了显著的提高。虽然在处理天空和非天空区域花费了一点时间, 但是在可接受范围内。但本文算法并不适用于图像背景过暗的目标, 如夜晚图像, 对于这样的图像处理效果不好, 对于文中算法对天空区域的判断, 当在雾浓度特别大的情况下, 算法可能失效, 需进一步的研究和改进。

参考文献

- Kim YT. Contrast enhancement using brightness preserving bi-histogram equalization. IEEE Trans. on Consumer Electronic, 1997, 1(43): 1-8.
- Celik T, Tjahjadi T. Contextual and variational contrast enhancement. IEEE Trans. on Image Processing, 2011,

- 20(12): 3431-3441.
- 3 朱志刚,林学闯,石定机等译.数字图像处理,北京:电子工业出版社,2005.
- 4 Schettini R, Gasparini F, Corchs S, et al. Contrast image correction method. *Journal of Electronic Imaging*, 2010, 19(2): 334-343.
- 5 Jobson DJ, Rahman Z, Woodell GA. Properties and performance of a center/surround retinex. *IEEE Trans. on Image Processing*, 1997, 1(6): 451-462.
- 6 Jobson DJ, Rahman Z, Woodell GA. A multiscale retinex for bridging the gap between color images and the human observation of scenes. *IEEE Trans. on Image Processing*. 1997, 7(6): 965-976.
- 7 McCartney EJ. *Optics of the atmosphere: Scattering by molecules and particles*, New York: JohnWiley and Sons.
- 8 He KM, Sun J, Tang XO. Single image haze removal using dark channel prior. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2011, 33(12): 2341-2353.
- 9 He KM, Sun J, Tang XO. Single image haze removal using dark channel prior. *Proc. of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 2009. 1957-1963.

www.c-s-a.org.cn

www.c-s-a.org.cn