

反馈调节机制的暗通道去雾算法

方 雯, 刘秉瀚*

(福州大学 数学与计算机科学学院, 福州 350108)

(*通信作者电子邮箱 lbh@fzu.edu.cn)

摘 要:针对暗通道图像去雾算法在处理不满足暗通道先验条件的明亮区域时,估计的透射率偏小,导致去雾后的图像与原图像相比,色彩和纹理平滑度出现较大偏差的问题,提出反馈调节的暗通道去雾算法。该算法首先通过暗通道算法对原始有雾图像进行去雾,反馈出去雾后的图像与原始图像纹理平滑度的差异,使用模糊C-均值聚类算法分割出明亮的区域;然后用高斯函数调整明亮区域偏小的透射率,使其更加接近实际的透射率;最后利用调整后的透射率求得清晰的无雾图像。实验结果表明,该算法可以有效地处理不满足暗通道先验条件的区域,使得包含明亮区域的雾化图像,去雾后的色彩更加符合真实场景,视觉效果也更好。该算法可以提高户外监视系统的鲁棒性。

关键词: 图像去雾;暗通道先验;模糊C-均值聚类;纹理平滑度;反馈调节

中图分类号: TP391.14 **文献标志码:** A

Dehazing algorithm based on dark channel with feedback regulation mechanism

FANG Wen, LIU Bingham*

(College of Mathematics and Computer Science, Fuzhou University, Fuzhou Fujian 350108, China)

Abstract: When the dark channel image dehazing algorithms deal with the bright region without satisfying the dark channel fog priori condition, the estimated transmission is relatively small, and it leads to large deviation from the original image in terms of color, smoothness and texture. Therefore, a feedback regulation mechanism of the dark channel dehazing was proposed. First, removed haze using dark channel prior algorithm and gave the feedback difference of the texture smoothness of haze-free image and the original image, segmented the bright region by using Fuzzy C-Means (FCM) algorithm, and then used the Gaussian function to adjust the transmission of the bright region, made it closer to the actual transmission. Finally, the article got haze-free image by using the adjusted transmission. The experimental results show that the proposed algorithm can effectively deal with the bright region which does not meet the assumptions of dark channel. It also makes the dehazed image's color more accord with the real scene, and its visual effect is also better. This method can improve the robustness of outdoor surveillance system.

Key words: dehazing; dark channel priori; Fuzzy C-Means (FCM) clustering; texture smoothness; feedback regulation

0 引言

大气环境中存在着大量的粒子,在有雾的天气下,光线在大气中传播时会受到这些粒子散射作用的影响^[1],使成像设备捕获的户外自然场景的图像的对比度和颜色等特征衰减。这种降质严重的图像,使得户外监视系统效用的发挥受到极大的限制和影响。因此对雾天降质图像进行清晰化处理成为一种非常实用且需要急迫研究的课题,并逐渐成为计算机视觉和图像处理领域研究的热点问题之一。

目前雾天图像清晰化的方法主要分为两类:物理模型的方法和非物理模型的方法^[2]。非物理模型的方法不考虑造成图像降质的物理原因,目的是增强图像的对比度和校正图像的颜色。物理模型的方法是研究雾天图像降质的物理过程,并建立退化模型,再通过求解降质过程的逆过程,得到未经干扰退化的无雾图像或无雾图像的最优估计值,从而改善雾天图像质量。

雾对图像的影响程度与场景到成像设备的距离(即场景深度)和大气条件有密切的关系。如果知道精确的场景深度

与大气条件,可以较容易地恢复出理想的无雾图像。而现实条件下,获取的降质图像并没有任何场景深度与大气条件的信息附加其上。由于已知信息量不充分,给图像的恢复带来了很大的不确定性,雾天图像的清晰化是个不适定的反问题(ill-posed inverse problem)。因此,很多基于物理模型的去雾方法都使用了多幅图像^[3-5]或者附加信息^[6-7]。近几年提出的基于单幅图像的去雾方法^[8-12],通过对图像数据做各种假设或者基于一些统计规律,来估计无雾的图像。He等^[10]提出的暗通道先验的去雾方法,是目前最实用和效果最好的单幅雾天图像清晰化方法。He等^[10]对大量户外无雾自然图像的统计观察得出,除天空区域外,绝大多数无雾的图像块中都存在一些在某个颜色通道亮度值很小的像素。基于该实验结论,He等^[10]提出了暗通道先验模型,通过暗通道假设直接恢复出无雾图像。

由于暗通道先验是一种统计规律,该方法对那些符合暗通道假设的图像效果非常显著,而对那些不满足暗通道的明亮区域,恢复效果不太理想,影响了图像的视觉效果。因此,本文提出了基于反馈调节的暗通道先验去雾算法,调整不满

收稿日期:2013-01-21;修回日期:2013-03-03。

基金项目:福建省科技计划重点项目(2011Y0040);福建省自然科学基金资助项目(2012J01263)。

作者简介:方雯(1987-),女,湖北荆门人,硕士研究生,主要研究方向:图像处理; 刘秉瀚(1963-),女,福建福州人,教授,主要研究方向:模式识别。

足暗通道先验条件的明亮区域偏小的透射率,使其更加接近实际的透射率,以提高去雾后的图像的视觉效果。

1 基于暗通道先验的单幅图像去雾算法

在计算机视觉和计算机图形中,雾天降质图像的光学模型被广泛描述为:

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

其中: x 是图像中的某个像素点; $I(x)$ 表示观察到的有雾图像; $J(x)$ 表示场景光线的强度,即清晰的无雾图像; A 为全局大气光; $t(x)$ 称为透射率,描述了场景的光线通过大气透射到成像设备没有被散射的部分。去雾的目的就是从 $I(x)$ 中求解出 $J(x)$ 。

暗通道先验基于对户外无雾图像的观察:在大部分非天空的局部区域中,存在一些至少有一个颜色通道具有很低强度值的像素。换句话说,该区域的光强度的最小值非常小,描述如式(2):

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

其中: J^c 代表 J 的三个颜色通道中的一个, $\Omega(x)$ 是以 x 为中心像素的一块方形区域。He等^[10]经过观察统计得出,天空区域除外, J^{dark} 的强度非常低,并且趋近于0。

假设全局大气光 A 是已知的,并假设透射率在一个局部区域内是恒定不变的。对方程(1)两边进行最小值运算,并且两边同时除以 A ,得:

$$\min_{y \in \Omega(x)} (I^c(y)/A^c) = \tilde{t}(x) \min_{y \in \Omega(x)} (J^c(y)/A^c) + (1 - \tilde{t}(x)) \quad (3)$$

将最小操作运算作用于三个颜色通道,可以得到:

$$\min_c \left(\min_{y \in \Omega(x)} (I^c(y)/A^c) \right) = \tilde{t}(x) \min_c \left(\min_{y \in \Omega(x)} (J^c(y)/A^c) \right) + (1 - \tilde{t}(x)) \quad (4)$$

根据暗通道先验的统计规律,知 J^{dark} 应该是趋近于0的,即:

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

由于 A^c 总是正的,导致:

$$\min_{c \in \{r, g, b\}} \left(\min_{y \in \Omega(x)} (J^c(y)/A^c) \right) = 0 \quad (6)$$

将式(5)代入式(3),可以得到粗糙的透射率:

$$\tilde{t}(x) = 1 - \min_c \left(\min_{y \in \Omega(x)} (J^c(y)/A^c) \right) \quad (7)$$

由于一个局部区域内的透射率并不总是恒定的,因此需要对式(7)求得的粗糙的透射率采用软抠图算法^[13]来进行细化。细化后的透射率为 $t(x)$,则去雾后的图像为:

$$J(x) = \frac{I(x) - A}{\max(t(x), t_0)} + A \quad (8)$$

当 $t(x)$ 与0接近的时候,直接复原得到的无雾图像会包含噪声。因此,为透射率 $t(x)$ 设定了一个下限 t_0 。这意味着一定数量的雾会保留在那些雾稠密的区域。对大气光 A 的估计,先选取暗通道中亮度最大像素的0.1%,在以上像素当中,有雾图像 I 中强度最大的值被选定为大气光的值。

对于大多数雾化图像,暗通道先验算法会取得很好的效果,如图1所示。这是因为图像中的绝大多数像素点都满足暗通道先验条件。蒋建国等^[14]通过大量实验得知,对另外一些雾化图像使用暗通道先验的去雾算法,恢复的结果出现色彩失真的现象,并且某些区域的色彩与源图像严重背离。蒋

建国等^[14]分析得出这些区域内不存在像素值趋近于0的暗通道点,在这些区域内暗通道的假设不成立,这些区域通过暗通道估计的透射率比实际的透射率要小,因此复原的无雾图像出现了色彩失真。蒋建国等^[14]认为若想消除色彩失真,就必须调整明亮区域偏小的透射率,使估计的透射率更加符合实际的透射率。蒋建国等^[14]引入了一种容差机制,即引入一个参数 K ,对不满足暗通道先验的明亮区域($|I - A|$ 大于 K 的区域),纠正这类区域估计错误的透射率,从而克服原算法在处理明亮区域时产生的色彩失真。

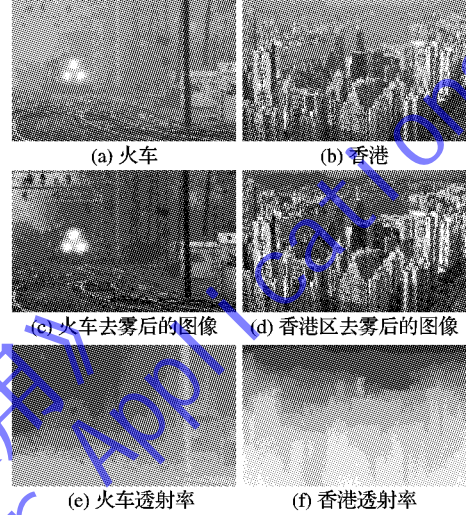


图1 暗通道先验去雾

蒋建国等^[14]重新定义式(8):

$$J(x) = \frac{I(x) - A}{\min \left(\max \left(\frac{K}{|I(x) - A|}, 1 \right), \max(t(x), t_0), 1 \right)} + A \quad (9)$$

式(9)使得了明亮区域的透射率更加接近实际的透射率。容差机制实际上是对原算法的扩展和补充,使含有大面积明亮区域的雾化图像的去雾效果更好,但并没有跳出暗原色先验的框架,而是在其基础上调整了明亮区域的透射率。其缺点是没有给出参数 K 如何确定。

2 基于反馈调节的去雾算法

本文通过对暗通道去雾后的图像进行观察,发现色彩严重背离原图像的区域其纹理平滑度与原图像有很大的差别。如图2所示。基于此,本文提出了基于反馈调节的暗通道先验的去雾算法。首先对原图像进行暗通道去雾处理,然后反馈原图像与去雾后图像纹理平滑度的差异信息,利用模糊C-均值(Fuzzy C-Means, FCM)聚类算法分割出明亮的区域,并通过高斯函数调整明亮区域偏小的透射率,得到改进的透射率分布图。最后用此透射率分布图求得去雾后的图像。

2.1 原图像与暗通道去雾后图像纹理的差异

图像的很多纹理信息都包含在图像的亮度分量中,因此通过亮度分量的平滑度来衡量图像纹理的差异。亮度转换按表达式 $0.299R + 0.587G + 0.144B$ 计算。图像的纹理平滑度由式(10)计算:

$$S = 1/(1 + \sigma^2) \quad (10)$$

$$\sigma^2 = \sqrt{\sum_{i=0}^{L-1} (z_i - m)^2 p(z_i)} \quad (11)$$

$$m = \sum_{i=0}^{L-1} z_i p(z_i) \quad (12)$$

其中: L 为亮度图像的灰度级总数, $p(z_i)$ 是归一化直方图分布中亮度级为 z_i 的概率。图像纹理的平滑度用 S 来衡量。

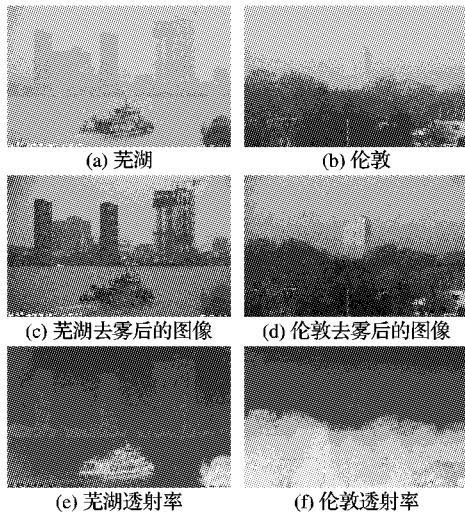


图2 含明亮区域的暗通道先验去雾

图3(a)、(b)显示了图2的原有雾图像与暗通道先验去雾后图像的纹理差异。从图中可以看出,纹理差异较大的区域,即是去雾后的图像视觉效果不理想区域。

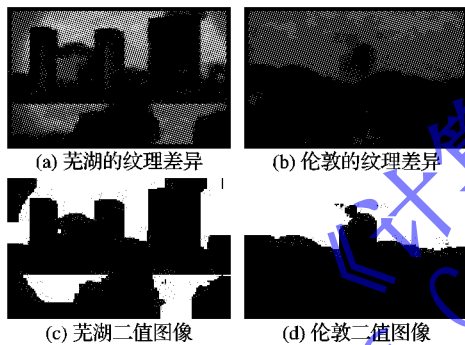


图3 纹理差异图像

2.2 基于纹理平滑度的区域分割

图像分割可以看成聚类问题。图像从三维空间转换到二维平面的过程中,本身会丢失许多的信息数据,如场景的深度信息会丢失,因此图像具有模糊性,并且模糊逻辑的推理方式更接近人类的真实思维和决策。FCM 算法是一种无监督的模糊聚类方法,在算法的实现过程中不需要人工干预。因此,采用 FCM 算法,将纹理差异图像分割成两类。采用最大隶属度方法去模糊,即将模糊量转化为一个确定的值。分割后的二值图像如图3(c)、(d)所示。

2.3 明亮区透射率修正

统计原有雾图像明亮区域的亮度与透射率,可得明亮区域的亮度的下限值 I' 与透射率的上限值 T 。

原有雾图像亮度大于 I' 的区域(认为是明亮区域),根据高斯函数重新计算其透射率,亮度小于 I' 的区域(认为是满足暗通道的区域),保持其原来的透射率不变。调整后的透射率 t' 为:

$$t' = \begin{cases} \max(t) \times e^{\frac{-(lum-\mu)^2}{2\sigma^2}}, & lum > I' \\ t, & lum < I' \end{cases} \quad (13)$$

其中: lum 为原始有雾图像的亮度分量, t 为暗通道先验算法估计的透射率, μ 为全局大气光 A 。根据点 I' 的透射率为 T ,

可以求出 σ 的值。从式(7)可以知道,像素点的亮度值越小,其透射率越大。明亮区域的亮度的下限为 I' ,而明亮区域透射率的上限 T 为与亮度 I' 大致相对应的透射率值,因此当原有雾图像的亮度值大于 I' 时,其透射率在 T 的基础上进行调整。调整后的透射率如图5所示。

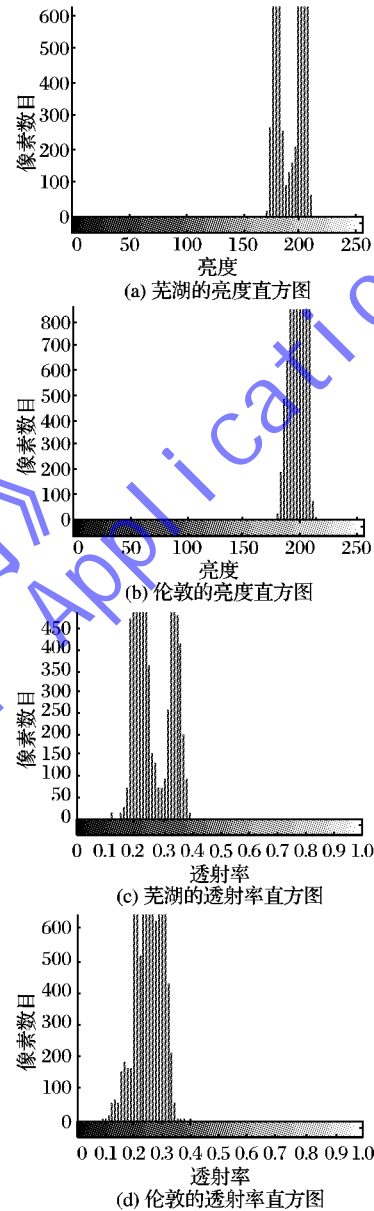


图4 明亮区域直方图

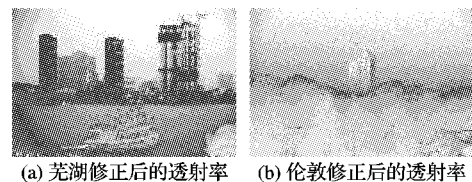


图5 修正后的透射率

2.4 基于反馈机制的图像算法

反馈调节后的透射率为 t' ,则去雾后的图像 $J'(x)$ 为:

$$J'(x) = \frac{I(x) - A}{t'(x)} + A \quad (14)$$

本文算法的具体步骤如下。

输入:原始有雾图像 $I(x)$ 。

输出:去雾后的图像 $J'(x)$ 。

第1步 输入原始有雾的图像 $I(x)$,根据暗通道先验算

法得去雾后的图像 $J(x)$ 和全局大气光 A 。

第2步 根据式(10)~(12)求出 $I(x)$ 与 $J(x)$ 纹理平滑度的差异图像,并用FCM算法将纹理平滑度差异图像聚成两类,即分割出了原有雾图像 $I(x)$ 的明亮区域。

第3步 统计 $I(x)$ 明亮区域亮度的下限值 I' 与透射率的上限值 T ,并利用 A 、 T 和 I' 定义调整透射率的高斯函数。

第4步 原有雾图像 $I(x)$,其亮度大于 I' 的区域(认为是明亮区域),根据高斯函数重新计算其透射率,其亮度小于 I' 的区域(认为是满足暗通道的区域),保持其原来的透射率不变,即根据式(13)计算调整后的透射率 $t'(x)$ 。

第5步 利用 A 、 $t'(x)$ 和 $I(x)$ 根据式(14)计算去雾后的图像 $J'(x)$ 。

3 实验结果与分析

为了验证本文算法的有效性,进行了一系列的对比实验。本文所有的实验数据均来自百度、谷歌等网站,大小统一剪裁在 200×300 左右。使用文献[13]的软抠图算法,编程语言为Matlab。实验选取包含天空、水域等明亮区域的有雾图像,并与暗通道先验去雾算法的实验结果进行对比。实验中用于调整透射率的高斯函数(式(13))的相关参数见表1。

表1 实验的相关参数

实验数据	μ	σ	I	$\max(t)$
芜湖	211	28.8147	170	1
伦敦	211	27.6066	170	0.8290
山	255	24.0960	220	1
千岛湖	255	88.9384	150	1

从图6中可以看出,He等^[10]的算法在处理明亮区域时,会出现色彩失真、纹理平滑度变得粗糙等现象,天空区域噪声明显,视觉效果很差。而本文算法则很好地克服了这个现象,使去雾后的图像的色彩更加接近真实的场景,视觉效果也更好。

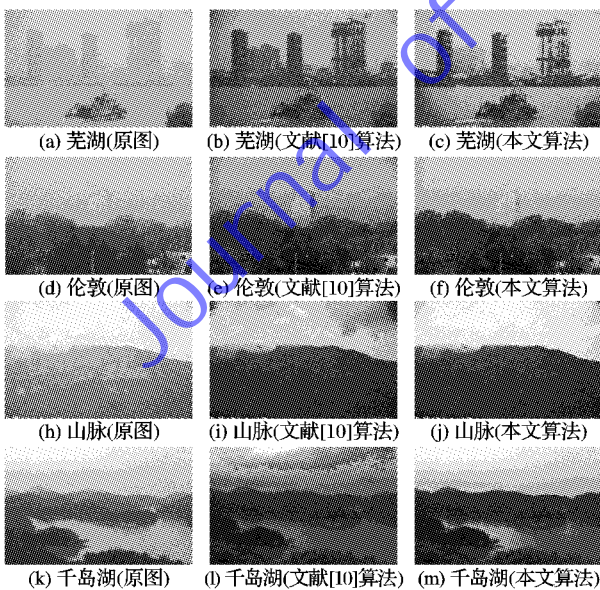


图6 去雾效果对比

4 结语

单幅图像的去雾算法一直是图像去雾技术研究的热点和难点。针对传统基于暗通道先验的图像去雾算法对明亮区域

失效的情况,提出反馈调节的机制。将原图像与暗通道去雾后的图像进行对比,分割出纹理平滑度变化大的区域,并调节这些区域偏小的透射率,使其更加接近实际的透射率,避免暗通道算法在处理这些区域时产生失真。对比实验表明,本文提出的反馈调节机制可以更加有效地处理含有大片明亮区域的雾化图像。

尽管本文算法在单幅图像去雾上取得了良好的效果,但是本文算法也有一定的局限性,比如纹理平滑度差异图像分割的好坏将影响透射率的修复结果,基于反馈调节的算法时间复杂度较高;并且基于暗通道的方法对浓雾图像,其去雾效果依然较差。提高去雾算法的实时性和尝试新的模型用于雾天图像的恢复,将是下一步要展开的工作。

参考文献:

- [1] MEARTNEY E J. Optics of the atmosphere: scattering by molecules and particles [M]. New York: John Wiley and Sons, 1976: 23-32.
- [2] 禹晶,徐东彬,廖庆敏. 图像去雾技术研究进展[J]. 中国图象图形学报, 2011, 16(9): 1561-1576.
- [3] NARASIMHAN S G, NAYAR S K. Vision and the atmosphere [J]. International Journal on Computer Vision, 2002, 48(3): 233-254.
- [4] SEHEEHNER Y Y, NARASIMH S G, NAYAR S K. Polarization-based vision through haze [J]. Applied Optics, 2003, 42(3): 511-525.
- [5] SEHEELMER Y Y, NARASIMHAN S G, NAYAR S K. Instant dehazing of images using polarization [C]// Proceeding of 2011 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2011: 325-332.
- [6] OAKLDEY J P, SATHERLEY B L. Improving image quality in poor visibility condition using a physical model for contrast degradation [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1998, 7(2): 167-179.
- [7] NARASIMHAN S G, NAYAR S K. Interactive (De) weathering of an image using physical models [C]// Proceedings of the 2003 IC-CV Vision Workshop on Color and Photometric Methods in Computer Vision. Piscataway: IEEE Press, 2003: 1387-1394.
- [8] TAN R T. Visibility in bad weather from a single image [C]// Proceedings of the 2008 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2008: 2347-2354.
- [9] FATTAL R. Single image dehazing [J]. ACM Transactions on Graphics, 2008, 27(3): 721-729.
- [10] HE K M, SUN J, TANG X O. Single image haze removal using dark channel prior [C]// Proceedings of 2009 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2009: 1956-1963.
- [11] KRATZ L, NISHINO K. Factorizing scene albedo and depth from a single foggy image [C]// Proceedings of 2009 IEEE International Conference on Computer Vision. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2009: 1701-1708.
- [12] TAREL J, HAUTIERE N. Fast visibility restoration from a single color or gray level image [C]// Proceedings of 2009 IEEE International Conference on Computer Vision. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2009: 1701-1708.
- [13] LEVIN A, LISCHINSKI A, WEISS Y. A closed form solution to natural image matting [C]// Proceedings of 2006 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2006: 61-68.
- [14] 蒋建国,侯天峰,齐美斌. 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.