

暗通道先验在雾化图像复原中的应用^①

肖钟捷, 郭 磊

(福建武夷学院 数学与计算机学院, 武夷山 354300)

摘 要: 目前, 基于暗通道先验的去雾算法是目前最有效的单幅图像去雾方法之一. 文中研究比较了各种基于暗通道先验的雾化图像去雾技术; 由于采用软抠图算法的暗通道先验去雾算法时间复杂度太大, 文中提出利用自适应中值滤波实现对透射率的平滑与细化, 以提升去雾算法的速度; 提出了一种具有鲁棒性的大气光值求取方法. 实验结果表明, 文中所提方法能实现雾化图像的有效去雾, 能保证去雾图像的清晰度, 大幅提高暗通道先验去雾算法的速度, 具有一定实用价值.

关键词: 图像; 暗通道先验; 去雾; 透射率; 自适应中值滤波

Application of Dark Channel Prior in Fog Image Restoration

XIAO Zhong-Jie, GUO Lei

(Department of Mathematics and Computer Science, Wuyi University, Wuyishan 354300, China)

Abstract: Currently, defogging algorithm based on dark channel prior is one of the most effective single image defogging method. This paper studies various image defogging technologies based on dark-channel-prior. The time complexity of soft matting algorithm is too large. This paper presents an adaptive median filter to achieve a smooth and refined transmittance to improve the algorithm speed and a robust method for determining the value of Light Atmosphere. Experimental results show that the proposed method can achieve effective defogging, ensure defogging image clarity, and increase speed of dark-channel-prior defogging algorithm, which has some practical value.

Key words: image; dark channel prior; defog; transmittance; adaptive median filter

雾霁天气往往会造成图像模糊、对比度降低、细节或部分信息缺失等, 影响目标识别与跟踪、智能导航、公路监控、卫星遥感等视觉系统的性能. 因此, 以获取清晰图像为目的研究成为图像处理领域的一个热点. 有关雾化图像复原的研究方法一般可以分两类: 一类是基于图像增强的方法, 如直方图均衡化^[1-2]、基于大气调制传递函数、以及 Retinex 算法^[3]等, 但由于图像增强只是改善雾化图像的视觉效果, 没有考虑雾化图像的退化原因, 虽然应用上具有普遍性, 但容易造成图像信息丢失; 另一类是基于物理模型的图像复原, 这方面研究取得的重点进展有: 2008 年 Tan^[4]提出通过最大化图像的局部对比度来复原雾化图像, 但该

法不仅时间复杂度大, 而且容易出现图像过饱和及颜色失真; Fattal^[5]利用光传播和场景目标表面遮光部分局部不相干的假设, 推算景物的反射率及其在空气中传播的透射率, 但在雾浓度较大的区域, 雾化图像复原的结果失真较大; 2009 年, He(何凯明)等^[6]提出“基于暗通道先验的单幅图像去雾”, 是目前最有效的雾化图像复原方法之一, 该方法的主要缺点是应用的时间复杂度太大.

为改进暗通道先验去雾算法, He^[7]等又提出利用引导滤波来代替 soft matting(软抠图)算法, 以提高暗通道先验去雾算法求取透射率时的速度; 还有学者们提出利用暗原色先验改进大气光的估计算法^[8], 采

① 基金项目:福建省教育厅项目(JA14312);基于人机交互的认知结构可视化平台研究(JA14309?);福建省自然科学基金(2015J01668)

收稿时间:2015-08-17;收到修改稿时间:2015-10-19

用容差机制改变透射率^[9-10], 以使暗原色先验适应明亮区域的去雾处理. 孙抗^[11]提出利用双边滤波替代软抠图算法; 杜宏博^[12]利用插值算法和最大最小估计法改进暗通道先验模型, 进而准确计算出不同场景深度的透射率; 文献[13]提出利用高斯滤波代替软抠图算法及边缘修复来改进暗通道先验去雾算法的速度; 这些算法在保证暗通道先验去雾效果的同时, 都在速度上提升了暗通道先验去雾的速度. 本文利用自适应中值滤波对透射率图进行优化以提高暗通道先验去雾算法的速度, 并给出具有鲁棒性的大气光求取方法, 通过对以上各种暗通道先验去雾算法的实验, 结果表明本文所提方法能够有效地从雾化图像复原出真实场景, 提高了去雾算法的速度, 具有一定实用参考价值.

1 大气散射模型

雾天图像质量的退化过程, 可以用光在大气中的传播过程(大气散射模型)来描述: 观测点(Observer)成像来自于场景点(Scene)传播到观测点的光强以及大气光(Atmosphere)经过大气散射(Scattering)到达观测点的光强. 在雾天成像时, 大气中存在大量的悬浮颗粒, 每个悬浮颗粒都是一个散射体(Scattering medium), 所以进入成像设备的光强来自于悬浮颗粒的散射光强及景物的直接衰减光强.

计算机视觉及图像处理领域常用的大气散射模型是由 McCartney 根据 Mie 散射理论提出, 其表达式如下式(1)所示.

$$I(x, y) = J(x, y)e^{-\beta d(x, y)} + A(1 - e^{-\beta d(x, y)}) \quad (1)$$

在式(1)中, (x,y)是像素坐标, I 是雾化图像, J 是真实场景, β 表示大气散射系数; d 为场景深度; A 是全局大气光. 而 $J(x, y)e^{-\beta d(x, y)}$ 则表示场景直接衰减成像, $A(1 - e^{-\beta d(x, y)})$ 则表示由于悬浮颗粒的散射作用形成的杂散光成像.

若用 $t(x, y)$ 代表指数衰减项 $e^{-\beta d(x, y)}$, 则式(1)可简化为:

$$I(x, y) = J(x, y)t(x, y) + A(1 - t(x, y)) \quad (2)$$

由式(2)移项可得求解无雾图像 J(x,y)的公式:

$$J(x, y) = \frac{I(x, y) - A(1 - t(x, y))}{t(x, y)} \quad (3)$$

$$= \frac{I(x, y) - A}{t(x, y)} + A$$

由式(3)可知: 若要得到无雾图像 J, 必须先求出透射率 t、大气光值 A 及有雾图像 I(已知). 当 t 为 0 时, 式(3)无意义(无法求得去雾图像 J), 所以我们设定一个初值 $t_0=0.08$, 式(3)转化为式(4):

$$J(x, y) = \frac{I(x, y) - A}{\max(t(x, y), t_0)} + A \quad (4)$$

2 暗通道先验去雾方法

He^[6]在统计了 5000 幅正常彩色无雾图像后发现: 若取每个像素点的 RGB 三通道中的最小值作为该像素点的灰度值, 则所得灰度图像的所有像素点中约 86% 的像素灰度值取值在 0 至 16 之间, He 把所有像素的最小通道值称为暗通道(dark channel).

进一步地, 若取像素某一邻域窗口 Ω (如取窗口大小为 5*5 或 7*7)中所有暗通道值的最小值作为该像素的暗通道值, 则该值将更加接近于 0, 由所有像素的暗通道值构成的灰度图像, He 称之为暗原色图像 J_{dark} . 经 He 统计, 暗原色图像中像素值接近于零的比例达到 90% 以上, J_{dark} 的定义如下式(5):

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

式(5)中, $J_{\text{dark}}(x, y)$ 代表暗原色图像的像素值, C 代表 {RGB} 三通道中的某一颜色通道, $\Omega(x, y)$ 表示以某一像素 (x,y) 为中心的邻域, $J_c(x, y)$ 像素的某颜色通道值.

同理, 按指定窗口 Ω , 对式(2)中的 I 和 J 执行暗通道运算, 等式两边同除以全局大气光 $A(A \neq 0)$, 可得下式(6):

$$\min_{c \in \{r, g, b\}} \left(\min_{(x, y) \in \Omega(x, y)} \left(\frac{I_c(x, y)}{A_c} \right) \right) = \quad (6)$$

$$t(x, y) \min_{c \in \{r, g, b\}} \left(\min_{(x, y) \in \Omega(x, y)} \left(\frac{J_c(x, y)}{A_c} \right) \right) + (1 - t(x, y))$$

结合式(5)、式(4)可知:

$$t(x, y) \min_{c \in \{r, g, b\}} \left(\min_{(x, y) \in \Omega(x, y)} \left(\frac{J_c(x, y)}{A_c} \right) \right) \rightarrow 0, \text{ 则式(6)}$$

可简化为式(7):

$$t(x, y) = 1 - \min_{c \in \{r, g, b\}} \left(\min_{(x, y) \in \Omega(x, y)} \left(\frac{I_c(x, y)}{A_c} \right) \right) \quad (7)$$

在式(7)中 $\min_{c \in \{r, g, b\}} \left(\min_{(x, y) \in \Omega(x, y)} (I_c(x, y)) \right)$ 为雾化图像的暗原色图像. 为保留原图像的真实效果, 式(7)中

可加入一个常数 $\omega(0 < \omega \leq 1)$, 即得式(8):

$$t(x, y) = 1 - \omega \min_{c \in \{r, g, b\}} \left(\min_{(x, y) \in \Omega(x, y)} \left(\frac{I_c(x, y)}{A_c} \right) \right) \quad (8)$$

所以把式(8)求得的 t 代入式(4)即可求得去雾图像 J .

3 改进的暗通道先验快速去雾算法

在式(8)中, $t(x, y)$ 是在窗口 $\Omega(x, y)$ 范围内求取三通道内最小值, 所以求得的透射率图 t 会存在小块光晕, 即“halo”效应. 为提高透射率精度, 必须对透射率 t 进行平滑与细化. 文献[6]中 He 利用 soft matting 算法来实现对透射率图 t 的细化和平滑, 效果非常好, 但 soft matting 算法的时间复杂度太大, 占用整个去雾算法时间的 80%以上. 文献[7]中 He 又提出用引导滤波来代替 soft matting 算法, 大大提高了去雾算法速度. 文献[11-13]等亦对此提出不同的滤波方法, 以提高暗通道先验去雾算法的速度. 本文采用自适应中值滤波器实现对 t 的滤波, 以改进暗通道先验去雾算法的速度.

3.1 应用自适应中值滤波器对透射率 t 的平滑与细化

自适应中值滤波不仅可以处理噪声, 它的另一个优点是平滑脉冲噪声时试图保留细节, 这是传统中值滤波器做不到的. 它的这个特点正适合于对透射率 t 进行平滑与细化.

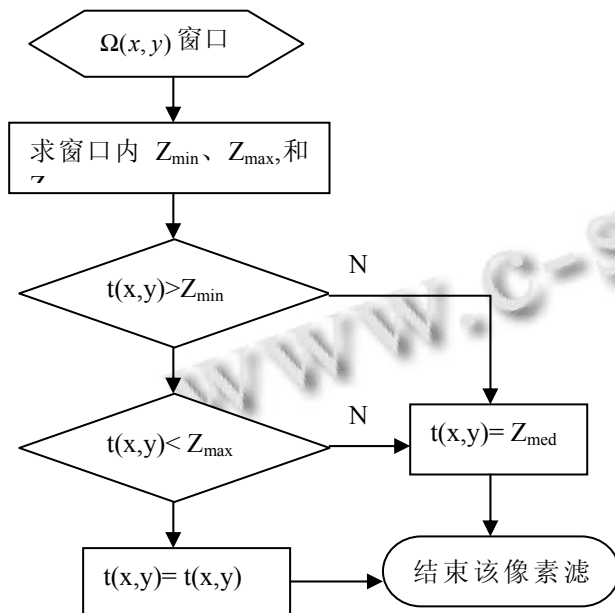


图 1 自适应中值滤波器对 t 的滤波流程图

自适应中值滤波器和中值滤波一样也工作于矩形窗口区域 $\Omega(x, y)$ 内, 但不是简单地用窗口像素中值

代替当前像素(窗口中心位置像素)的值, 而是根据窗口内数据条件满足的情况选择是用窗口内中值像素代替当前像素值(当前像素值为本窗口最大或最小时)还是保留当前像素值(即保留图像细节信息). 因此自适应中值滤波能达到平滑与细化的功能; 但考虑到本文算法的适用性, 与一般自适应中值滤波算法相比, 本文自适应中值滤波算法不根据窗口内数据的条件满足情况而改变窗口尺寸, 这样既能保持自适应中值滤波的优点, 又降低了自适应中值滤波算法的复杂性, 提升了滤波算法的速度.

本文自适应中值滤波器对透射率 t 的滤波过程如流程图 1 所示. (其中 Z_{min} 、 Z_{max} 和 Z_{med} 分别表示窗口 $\Omega(x, y)$ 中的最小值、最大值和中值, $t(x, y)$ 是当前像素值.)

3.2 求取大气光值 A

在图像去雾中, 大气光值一般取为全局常量^[6]. 文献[4]取雾化图像中最亮的像素值作为大气光值 A ; 文献[6]中, He 指出 A 不一定是整幅图像里最亮的点, 根据 He^[6]的想法, 本文使用了一个具有一定鲁棒性的自适应算法求取大气光值 A , 具体实现步骤如下:

- ① 根据暗通道先验理论, 选取暗原色图像中灰度值最大的 0.1% 像素;
- ② 将这些像素与输入图像中相同位置像素对应;
- ③ 求输入图像中这些对应位置所有像素的最大值;
- ④ 取该最大值像素的 $\Omega(x, y)$ 窗口的平均值 \bar{A} ;
- ⑤ 取 $\Omega(x, y)$ 中满足 $\max(|A_r - \bar{A}|, |A_g - \bar{A}|, |A_b - \bar{A}|) < \partial$ 的最大像素值作为 A (∂ 初值可设为 0.01; 如果找不到满足条件的像素, 则 ∂ 可递推取为 0.05、0.1; 如仍无满足条件像素, 则取 \bar{A} 作为最大像素值).

3.3 本文去雾算法

根据文中 3.1 节及 3.2 节所述, 综合可得本文去雾算法步骤(结合图 2):

- (1) 输入雾化图像如图 2 (a), 根据暗通道先验理论, 获取暗原色图像. 如图 2 (b)所示;
- (2) 如本文 3.2 节所述, 求取大气光值 A ;
- (3) 由式(8)求取透射率 t ;
- (4) 如本文 3.1 节所述, 利用自适应滤波器对 t 进行滤波. 结果如图 2 (c)所示;
- (5) 由所得 t 和 A , 根据式(4)求得去雾图像 J . 如果如图 2 (h)所示.

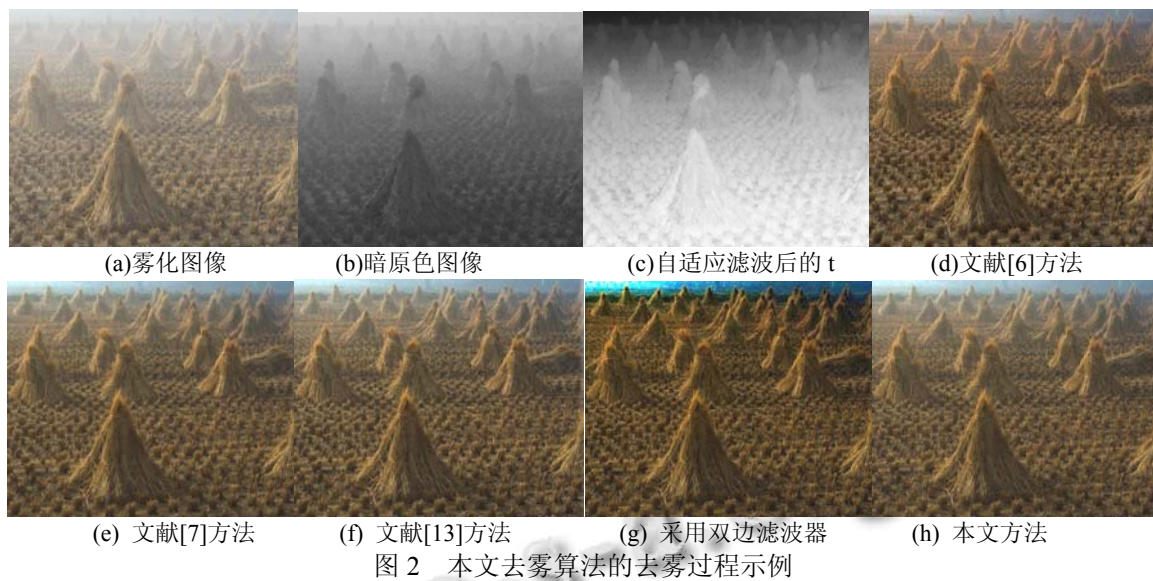


图 2 本文去雾算法的去雾过程示例



图 3 各种基于暗通道先验去雾算法的去雾效果示例

图 2(a)为输入的源雾化图像(Cones.jpg), (b)为根据暗通道先验理论所得的暗原色图像, (c)是采用本文方法所求得透射率图 t , (h)为本文去雾算法的结果; (d)(e)(f)(g)为基于暗通道先验理论, 采用不同滤波器对 t 进行滤波的各种去雾算法的结果; 由图 2 中示例效果可知: 主观视觉上看(d)和(g)算法除雾较尽, 但(g)算法在图像远处有失真现象, 而(e)(f)(h)还保留有一些微雾, 相对来说图像更具真实感. 下节将进一步从客观方面(图像像素级的差别)对各种去雾效果进行比较分

析.

4 实验及结果的比较分析

本文算法的实验环境为: 处理器 Intel(R) Core(TM) i5-4570cpu@3.20GHz; 内存 RAM4.0G; 32 位 Windows 7 操作系统; 模拟软件 MatLab2010a; 实验采用的 4 幅雾化图像 (Cones.jpg, canon7.jpg, toys.jpg, yellowmountain.jpg)皆取自 He^[6]发表论文时提供的图像.

该4幅雾化图像采用各种暗通道先验去雾算法去雾后的效果如图2、图3所示;在图3中,从主观视觉上几乎看不出这几种基于暗通道先验的图像去雾算法去雾效果之间的差别(考虑到排版方便,图2、图3中的图像都缩小至原图像的26%)。

表1给出了这几种不同去雾算法在速度上的比较:从表中可以看出本文算法相较于经典的暗通道先验去雾算法^[6]在速度上有8至10倍的提升(本文针对各种去雾算法的程序代码在速度上还有优化的空间),本文算

表1 不同的暗通道先验去雾算法在时间复杂度上的比较(单位:秒)

源雾化图像	文献[6]	文献[7]	文献[13]	双边滤波器	本文算法
Cones.jpg (465*384)	17.28	2.519	2.0349	4.7	2.027
canon7.jpg(600*525)	38.21	4.27	3.5129	7.9385	3.7944
toys.jpg (500*360)	15.236	2.3915	1.9070	5.068	2.182
yellowmountain.jpg(600*400)	22.638	3.1451	2.2435	6.021	2.2359

表2 利用GMG评价去雾效果的实验结果

图像	雾化图像	文献[6]	文献[7]	文献[13]	双边滤波器	本文算法
Cones.jpg	8.6097	12.2714	11.4435	12.1898	14.3917	11.7049
canon7.jpg	4.5233	8.5233	8.2791	8.9322	7.9385	8.6351
toys.jpg	6.0920	12.6570	12.4444	15.6058	16.2749	15.1991
yellowmountain.jpg	5.3964	8.9344	6.5782	6.9506	7.016	6.9099

灰度平均梯度值(Gray Mean Grads, GMG)是分别将图像水平方向和垂直方向上相邻像素灰度值做差后求平方和,再求平方根.GMG能有效地反应图像的对比度与纹理变化特征,其值越大表示图像的清晰度越高.GMG的计算公式如下

$$GMG = \frac{1}{(M-1)(N-1)} \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} \sqrt{\frac{[I(i, j+1) - I(i, j)]^2 + [I(i+1, j) - I(i, j)]^2}{2}} \quad (9)$$

其中, I 为待评价的图像, M, N 为图像的尺寸。

表2给出了应用GMG对以上4幅雾化图像采用不同暗通道先验去雾算法的效果评价,评价图像是大小是原图像的26%,灰度平均梯度值计算结果如表2所示。

由表2可以看出,本文算法与其它几种去雾算法去雾后图像的GMG值相对于原雾化图像都有了较大幅度的提升,即图像清晰度得到了很大提高。

由表1、表2可知,采用双边滤波器算法速度相对较慢,且去雾效果的数据相对不够稳定;而经典的文献[6]方法的速度太慢;本文算法则与文献[7]和文献[13]一样,在速度及去雾效果上都具有一定的实用价

值也比采用双边滤波技术快1倍,但相较于文献[7]和文献[13],本文自适应中值滤波算法更简单且容易理解,但在运行速度测试上,从表1可以看出分别采用这三种滤波算法的暗通道先验去雾算法的时间复杂度没有明显的优劣。显然文献[7]、文献[13]和本文算法在速度上都具有实用价值,但本文算法更简单。(实际上的算法应用时,采用c或c++编写的程序,在速度上相对于Matlab编写的实验程序还有较大提升空间)。

值,但本文算法过程更加简洁明了,实验代码优化后速度还有提升空间。

5 结语

通过实验验证,本文所提方法可以快速实现基于暗通道先验的图像去雾算法,复原出雾化图像的真实场景,且算法具有一定鲁棒性,有效提高了去雾后图像的清晰度,具有一定实用参考价值。但算法在图像不同区域边缘的处理性能还有待进一步研究,真正实用的算法程序也可以考虑进一步优化。

参考文献

- 1 Stark JA. Adaptive image contrast enhancement using generalizations of histogram equalization. IEEE Trans. on Image Processing, 2000, 9(5): 889-896.
- 2 Xu Z, Liu X, Ji N. Fog removal from color images using contrast limited adaptive histogram equalization. The 2nd International Congress on Image and Signal Processing. Tianjin, China. IEEE. 2009. 1-5.
- 3 Parthasarathy S, Sankaran P. A RETINEX based haze removal method. The 7th IEEE International Conference on Industrial

- and Information Systems (ICIIS).Chennai, India. IEEE. 2012. 1-6.
- 4 Tan R. Visibility in bad weather from a single image. Proc. of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition(CVPR'08). Washington USA. IEEE Computer Society. 2008. 1-8.
- 5 Fattal R. Single image dehazing. ACM Trans. on Graphics, 2008, 27(3): 1-9.
- 6 He K, Sun J, Tang XO. Single image haze removal using dark channel prior. Proc. of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'09). Washington, USA. IEEE Computer Society. 2009. 1956-1963.
- 7 He K, Sun J, Tang X. Guided image filtering. Proc. of ECCV. 2010. 1-14.
- 8 Xiong Y, Yan H. Improved haze removal algorithm using dark channel prior. Journal of Computational Information Systems, 2013, 14: 5743-5750.
- 9 Yu L, Piao Y, Yan X. Video defogging based on adaptive tolerance. Telkomnika, 2012, 10(7): 1644-1654.
- 10 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.电路与系统学报,2011,16(2):7-12.
- 11 孙抗,汪渤.基于双边滤波的实时图像去雾技术研究.北京理工大学学报,2011,31(7):810-813.
- 12 杜宏博,王丽会.基于改进暗原色先验模型的快速图像去雾方法.计算机工程与应用,2015,51(14):61-68.
- 13 肖钟捷,李宝方.一种改进的单幅图像快速去雾方法与实验.地球信息科学学报,2015,17(4):494-499.