

基于TV模型的暗原色理论雾天图像复原算法

高 银¹ 云利军² 石俊生¹ 魏 利¹

¹云南师范大学颜色与图像视觉实验室, 云南 昆明 650500

²云南师范大学信息学院, 云南 昆明 650500

摘要 针对经典的暗原色理论算法在处理雾天图像时, 图像的边缘光晕现象, 图像的色度、色调、亮度失真等问题, 提出基于全变差(TV)模型的暗原色理论雾天图像增强算法。基于暗原色理论数学模型, 粗略的获取透射率图像, 并在此基础上, 通过引入TV模型, 对透射率图像进行保边平滑优化, 为避免图像中高亮度区域出现光晕失真现象, 结合容差机制, 判断图像中的天空区域, 对透射率图像进行修正, 根据暗原色理论的数学模型反向求解, 获得复原后的图像。通过主观观察和客观评价, 在整体和细节方面该算法比经典的暗原色算法有更好的处理效果。

关键词 图像处理; 全变差模型; 透射率修正; 容差机制; 暗原色理论

中图分类号 TP391 文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0809001

Enhancement Dark Channel Algorithm of Fog Image Based on the TV Model

Gao Yin¹ Yun Lijun² Shi Junsheng¹ Wei Li¹

¹Color & Image Vision Laboratory, Yunnan Normal University, Kunming, Yunnan 650500, China

²College of Information, Yunnan Normal University, Kunming, Yunnan 650500, China

Abstract To deal with the halo phenomenon at the image edges, image hue, tone and brightness distortion problems in the classic dark channel theory algorithm, enhancement dark channel algorithm of fog image based on the total variation (TV) model is proposed. The rough transmission image based on the dark channel theory mathematical model is smoothed by the TV model. The image is segmented by the tolerance mechanism and distinguishes sky areas, so as to solve the halo phenomenon in the image highlight area. According to the dark channel theory mathematical model, it gets a defogging enhancement image from the inverse solution. Through the subjective observation and objective evaluation, the algorithm is better than the classic dark channel algorithm in the overall and details.

Key words image processing; total variation model; transmittance correction; tolerance mechanism; dark channel theory

OCIS codes 100.2000; 100.2980; 100.3008; 100.3020

1 引 言

近几年, 随着工业的不断崛起, 大量废气的排放、环境的污染造成了雾霭的气象天数不断的增加, 给智能交通系统、视觉监控系统带了的很大的干扰, 即图像的对比度和颜色会发生改变和退化, 其蕴含的许多特征因被覆盖而变得模糊。因此, 雾天图像的增强格外受到重视。最新的雾天图像处理是暗原色理论^[1], 该理论形成初期运用稀疏矩阵, 耗时较长, 占用大量计算内存, 之后采用导向滤波的方法^[2], 另外很多学者也提出了较好的改进方法, 如利用方向延伸专家场^[3]和景深^[4], 但是其实时性仍然受限, 当处理对比度较大的图像时, 依然会出现光晕和色彩失真现象。

收稿日期: 2015-01-09; 收到修改稿日期: 2015-03-08

基金项目: 国家自然科学基金(60963020)、云南省学术带头人后备人才培养项目(2010CI038)、云南师范大学研究生科研创新基金

作者简介: 高 银(1985—), 男, 硕士研究生, 主要从事视频图像复原方面的研究。E-mail: yngaoyin@163.com

导师简介: 云利军(1973—), 男, 博士, 教授, 主要从事视频图像处理方面的研究。E-mail: yunlj@163.com

鉴于以上的不足,本文从计算机视觉角度出发,提出了基于全变差(TV)模型的暗原色理论雾天图像增强算法。

2 暗通道先验理论

在计算机视觉和计算图形领域,雾天图像的形成被描述成以下数学模型^[5]:

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

式中 $I(x)$ 表示被观察或相机接收到的图像, $J(x)$ 是在无雾情况下的图像, $t(x)$ 表示介质的透射率, A 是天空的亮度值。 $J(x)t(x)$ 为直接衰减项,它描述了反射光在介质中因散射等作用而衰减; $A[1 - t(x)]$ 为大气光成分,由于大气散射,使场景的颜色发生偏移。

暗原色理论认为在多数无雾图像局部区域中,总存在趋近于0的像素点,即

$$J^d(x) = \min_{c \in \{r, g, b\}} \{ \min_{y \in \Omega(x)} [I^c(y)] \}, \quad (2)$$

式中 I^c 为图像的某一个通道, $\Omega(x)$ 为图像中以像素 x 为几何中心的某一区域, $J^d(x)$ 为图像在 $\Omega(x)$ 区域中的暗原色,如果是无雾的图像, J^d 会趋于0。

对于有雾的图像,其初步估计的透射率为

$$t_1(x) = 1 - \min_{c \in \{r, g, b\}} \{ \min_{y \in \Omega(x)} [I^c(y)] \}, \quad (3)$$

式中 $t_1(x)$ 为以 x 为中心邻域的透射率,为了提高精度,采用导向滤波方法,通过对初步获取的透射率图像运用导向滤波,进行保持边缘且能平滑的处理。

细化后的透射率图像为

$$t_1(x) = 1 - \omega \min_{c \in \{r, g, b\}} \{ \min_{y \in \Omega(x)} [I^c(y)] \}, \quad (4)$$

式中 ω 为调节参数,其值为[0 1], ω 越趋近于1,说明处理后基本没有保留雾,这样会造成图像深度的不协调。一般情况下, $\omega = 0.95$,适当的保留雾的影响,使图像具有深度感。

在一幅图像中,最亮的像素点值更加接近于大气光亮, A 选取暗原色中亮度最大的0.1%像素均值。将(4)式代入(1)式,得到无雾的图像为

$$J(x) = \frac{I(x) - A}{\max[t_1(x), t_0]} + A, \quad (5)$$

式中 $t_0 = 0.1$ 。

3 基于TV模型的暗原色理论雾天图像增强算法

经典的暗原色理论在处理梯度变化缓慢的图像时具有较好的效果,但是当图像中存在颜色陡变区域时,会出现明显的色彩失真和光晕现象。通过大量的实验发现造成这种现象的主要原因是:在经典暗原色理论中,采用导向滤波的处理,暗原色图像虽然得到了一定的平滑,但是平滑度仍然不足,且导向滤波的引入减慢了算法的实时性^[6]。此外对大气光的估计也造成图像亮度的损失。在经典的暗原色理论的基础上,通过引入TV数学模型^[7],修正初步估计的透射率图像;结合容差机制,判断图像中的天空区域,修正光晕现象;最后,在暗原色数学模型基础上获得更加精确地无雾的图像。鉴于以上情况,提出了基于TV模型的暗原色理论雾天图像增强算法。

具体步骤如下:

1) TV模型

1992年,Rudin等首先提出以 $\int_{\Omega} |Du|$ 作为图像平滑性的度量,在处理图像时,开创了一种全新的图像去噪方法,即全变分图像去噪方法,而且实验表明全变分模型表现出色。设 Ω 为 R^n 中的有界开子集,其表达式为

$$f_{TV}(u) = \int_{\Omega} |Du| = \sup_{\Omega} \left\{ \int_{\Omega} Du |dx| \right\}. \quad (6)$$

有界变差函数空间可定义为

$$f_{\text{BV}}(\Omega) = \{u | u \in L^1(\Omega) \text{ 且 } f_{\text{TV}}(u) < \infty\}. \quad (7)$$

设 u 为观测到的图像, u_0 为输入图像 I^c , n 为噪声, 于是 $u = u_0 + n$, 则

$$\int_{\Omega} (u - u_0) dx dy = 0, \quad \frac{1}{|\Omega|} \int_{\Omega} |(u - u_0)|^2 dx dy = \sigma^2. \quad (8)$$

定义图像的能量函数为

$$E_{\lambda}(u) = \int_{\Omega} |\nabla u| dx dy + \frac{\lambda}{2} \int_{\Omega} (u - u_0)^2 dx dy, \quad (9)$$

式中 λ 为拉格朗日乘数。由变分法原理可知, 能量泛函取极小值的必要条件是满足 Euler-Lagrange 方程, 即 $-\nabla \left(\frac{\nabla u}{|\nabla u|} \right) + \lambda(u - u_0) = 0$, 由梯度下降法得到全变分去噪模型:

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} = \nabla \left(\frac{\nabla u}{|\nabla u|} \right) - \lambda(u - u_0) \\ u(x, y, t) = u_0(x, y) \end{cases}. \quad (10)$$

由于存在 $\nabla u = 0$ 的点, 引入一个很小的正数 β 对其进行校正, 则全变分的表达式为

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \nabla \left(\frac{\nabla u}{|\nabla u|_{\beta}} \right) - \lambda(u - u_0). \quad (11)$$

经典的暗原色理论算法对初步估计的透射率图像做细化处理时, 最开始运用的是稀疏矩阵, 经过改进后采用导向滤波, 此外还有双边滤波等方法。但是这些方法在处理透射率图像时, 存在透射率估计不准确、处理时间过长和算法复杂度过高等问题。借鉴 TV 模型代替导向滤波, 对透射率图像进行细化处理。通过实验发现, TV 模型处理修正后的透射率图像, 其平滑程度明显优于导向滤波, 其效果图如图 1 所示。

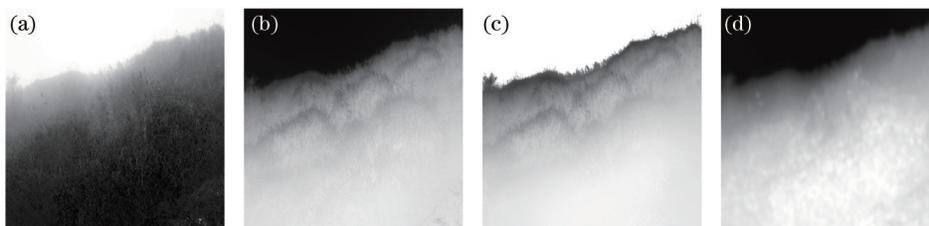


图 1 透射率图像的对比图。(a) 暗通道图像; (b) 文献[5]结果; (c) 文献[8]结果; (d) 本文滤波结果

Fig.1 Comparison of the transmission image.(a) Dark channel image; (b) result of Ref.[5]; (c) result of Ref.[8]; (d) results of proposed filter

彩色图像图 2(a) 经过处理, 获取的暗通道图像为图 1(a); 文献[5]采用导向滤波处理, 如图 1(b) 所示; 文献[8]通过容差来判断获取透射率, 如图 1(c) 所示; 本文的滤波方法处理, 如图 1(d) 所示。与暗通道图像相比, 导向滤波处理后, 图像的边缘虽得到了保持, 但是图像某些部分的清晰度和亮度却得到提高, 当运用到暗原色模型中, 就会造成某些部分亮度信息的损失, 且在天空区域, 由于透射率图像被清晰化, 光晕现象和色彩的失真就会产生, 如图 2(b) 所示。文献[8]很好地估计了透射率, 但是在图像的某些区域, 仍会有少量的色彩失真, 如图 2(c) 所示。从图 1(d) 可以看出, 利用本文算法图像整体被平滑处理, 在图像的边缘区域没有出现锐化现象; 与导向滤波处理的图像亮度相比, 其亮度高于导向滤波处理的结果, 这在一定程度上弥补了透射率图像亮度的损失。此外, 在一些亮度较大的区域, 其对比度也没有导向滤波增强的程度高, 这在一定程度上修正了光晕现象, 如图 2(d) 所示。

2) 容差机制

由于保边平滑的处理, 图像的透射率在一定程度上偏小, 图像的色彩在某些部分会出现失真现象, 为了弥补以上的缺陷, 对透射率图像进行修正^[8]。其公式为

$$J(x) = \frac{I(x) - A}{\min \left\{ \max \left[\frac{S}{|A - J^d(x)|}, 1 \right] \times \max [t_2(x), t_0], 1 \right\}} + A, \quad (12)$$

式中 S 为修正过程中引入的容差系数,通过大量的实验发现,经过保边平滑的处理后,其取值小于 35 时较好,输入的图像进行了归一化处理此处取值为 0.13; $t_2(x)$ 为经过 TV 模型滤波处理后的透射率图像。

最后,把经过以上步骤修正的透射率图像带入(5)式,获得无雾的图像。

4 实验结果及分析

实验平台硬件为双核 3.2 GHz CPU、1024 MB,软件为 Matlab R2010a, Windows XP 操作系统。所选的是不同像素和不同背景的 300 张雾天图像,由于篇幅限制,仅随机采用其中 3 幅图像,处理的结果如图 2~4 所示。在实验中,选作实验的图像像素尺寸分别为 800 pixel×600 pixel、900 pixel×600 pixel、922 pixel×709 pixel。

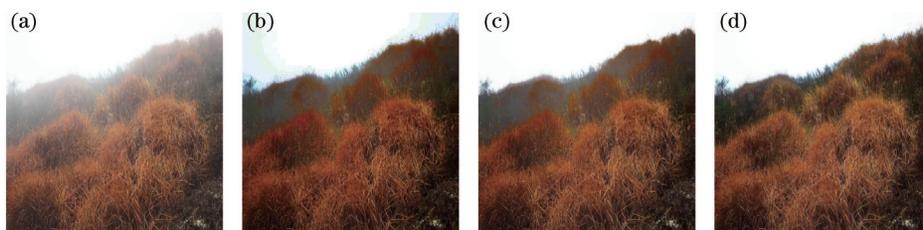


图 2 高山景物的处理对比图。(a) 原图; (b) 文献[5]结果; (c) 文献[8]结果; (d) 本文算法结果

Fig.2 Comparison of the alpine scenery.(a) Original image; (b) result of Ref.[5]; (c) result of Ref.[8]; (d) result of proposed method



图 3 建筑景物的处理对比图。(a) 原图; (b) 文献[5]结果; (c) 文献[8]结果; (d) 本文算法结果

Fig.3 Comparison of the architectural image. (a) Original image; (b) result of Ref.[5]; (c) result of Ref.[8]; (d) result of proposed method



图 4 交通监控的处理对比图。(a) 原图; (b) 文献[5]结果; (c) 文献[8]结果; (d) 本文算法结果

Fig.4 Comparison of the monitoring image. (a) Original image; (b) result of Ref.[5]; (c) result of Ref.[8]; (d) result of proposed method

考虑到监控设备应用的多样化,从高山景物、建筑景物和交通监控图像入手,随机选取三组图像作对比。

从图 2~4 可以看出,文献[5]图像的亮度明显低于原图,文献[8]图像的亮度略高于原图,而本文算法在一定程度上对亮度做了修正,视觉效果有了较好的提高。

在图像的整体清晰度方面,文献[5]引入导向滤波,虽然对透射率图像有保边平滑的作用,但是发现其平滑处理效果也有所欠缺。如图 2(b),图 3(b),图 4(b)所示处理后,图像整体表面的雾气仍没有得到较好的去除且产生了光晕现象。如图 2 中的高山风景图像所示,由于平滑程度的限制和容差机制的缺失,文献[5]的处理出现了光晕现象。文献[8]改进算法确实有较大的提高,但是在某些区域出现了过度增强的现象,且对比度也有所降低。经过本文的处理,很好的修正了透射率图像,解决了光晕的产生。

对于图像处理的客观评价,将从图像清晰度和蕴含的信息量方面做客观的对比和评价。

图像的对比度反映的是图像的清晰程度,对比度越大,图像的清晰度越高,反之越低^[9]。选用单位能量梯度函数,其公式为

$$f(I) = \sqrt{\left\{ \sum_x \sum_y \{ [I(x+1,y) - I(x,y)]^2 + [I(x,y+1) - I(x,y)]^2 \} \right\}} / K_{xy}, \quad (13)$$

式中 I 为输入的像素值, K_{xy} 为所选的像素个数, $f(I)$ 为单位梯度能量值^[10]。由表 1 数据可知, 与原图像比, 文献[5]和文献[8]处理结果基本上都有所提高; 但本文算法提高的范围基本上均高于其余两种方法, 即图像的清晰度得到了明显的提高。

表 1 图像的对比度
Table 1 Contrast of image

Contrast of image	Original image	Results of Ref.[5]	Results of Ref.[8]	Proposed results
Fig.2	13.7074	13.2703	13.3625	16.6748
Fig.3	2.2878	6.1130	6.4080	6.2368
Fig.4	2.2854	5.9802	6.3663	6.6362

对于一幅图像, 最重要的评价标准就是图像的信息熵, 图像的信息熵反映的是图像中每个灰像素所传达的平均信息量, 可以度量目标在图像中的重要性^[11]。信息熵越高, 图像蕴含的信息量越大。从表 2 可以看出与原图相比, 文献[5]和文献[8]处理结果所蕴含的信息量基本上都得到了提高, 但是提高的程度基本上都低于本文的算法。此外对于图 2, 从表 1 可以看出, 其对比度是最高的, 经过处理, 图像对比度依然很高, 则其各个灰度出现的概率就趋于不均匀, 信息量也会减少, 故文献[5]和文献[8]处理结果和本文算法的结果都出现降低。

表 2 图像的信息熵
Table 2 Information entropy of image

Information entropy of image	Original image	Results of Ref.[5]	Results of Ref.[8]	Proposed results
Fig.2	6.9136	6.6587	6.4681	6.5775
Fig.3	6.1161	6.6024	7.3260	7.1732
Fig.4	4.8535	5.3797	6.0031	6.5385

5 结 论

结合经典的暗原色理论数学模型, 通过 TV 模型对处理后的透射率进行修正, 并引入容差机制, 对天空区域进行区分, 避免了天空区域的光晕现象和色彩失真。在处理时间方面, 由于采用的是 TV 模块处理, 比导向滤波更加节约时间, 且能有效的减少算法的复杂度。通过主观评价和客观评价的结果表明: 本文算法比现有的暗原色算法在细节增强、图像亮度和清晰度方面具有更好的效果。

参 考 文 献

- 1 Narasimhan S G, Nayar S K. Interactive (de) weathering of an image using physical models[C]. IEEE Workshop on Color and Photometric Methods in Computer Vision. France, 2003, 6(6.4): 1.
- 2 He K, Sun J, Tang X. Guided image filtering[C]. Proc. European Conf. Computer Vision, 2010: 1-14.
- 3 Xue Mogen, Zhou Pucheng, Zhang Hongkun. Single foggy image restoration using orientation extended fields of experts[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2014, 26(5): 782-787.
薛模根, 周浦城, 张洪坤. 利用方向延伸专家场的单幅雾天图像复原[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2014, 26(5): 782-787.
- 4 Guo Jia, Wang Xiaotong, Hu Chengpeng, *et al.*. Single image dehazing based on scene depth and physical model[J]. Journal of Image and Graphics, 2012, 17(1): 027-032.
郭 珈, 王孝通, 胡程鹏, 等. 基于单幅图像景深和大气散射模型的去雾方法[J]. 中国图象图形学报, 2012, 17(1): 027-032.
- 5 He K, Sun J, Tang X. Single image haze removal using dark channel prior[J]. Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on, 2011, 33(12): 2341-2353.
- 6 Xu H, Guo J, Liu Q, *et al.*. Fast image dehazing using improved dark channel prior[C]. Information Science and Technology (ICIST), 2012 International Conference on. IEEE, 2012: 663-667.
- 7 Rudin L I, Osher S, Fatemi E. Nonlinear total variation based noise removal algorithms[J]. Physica D: Nonlinear Phenomena, 1992, 60(1): 259-268.
- 8 Jiang Jianguo, Hou Tianfeng, Qi Meibin. Improved algorithm on image haze removal using dark channel prior[J]. Journal of Circuits and Systems, 2011, 16(2): 7-12.

- 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.
- 9 Wang Hongnan, Zhong Wen, Wang Jing, *et al.*. Research of measurement for digital image definition[J]. Journal of Image and Graphics, 2004, 9(7): 828-831.
- 王鸿南, 钟 文, 汪静, 等. 图像清晰度评价方法研究[J]. 中国图象图形学报, 2004, 9(7): 828-831.
- 10 Li Qi, Feng Huajun, Xu Zihai, *et al.*. Digital image sharpness evaluation function[J]. Acta Photonica Sinica, 2002, 31(6): 736-738.
- 李 奇, 冯华君, 徐之海, 等. 数字图像清晰度评价函数[J]. 光子学报, 2002, 31(6): 736-738.
- 11 Sun Junding, Ding Zhenguo, Zhou lihua. Image retrieval based on image entropy and spatial distribution entropy[J]. Journal of Infrared Millimeter Waves, 2005, 24(2): 135-139.
- 孙君顶, 丁振国, 周利华. 基于图像信息熵与空间分布熵的彩色图像检索方法[J]. 红外与毫米波学报, 2005, 24(2): 135-139.

栏目编辑: 苏 岑