

doi: 10.3788/gzxb20124103.0320

基于加权暗通道的图像去雾方法

刘楠,程咏梅,赵永强

(西北工业大学 自动化学院,西安 710072)

摘 要:传统基于暗通道图像去雾中仅考虑初始透射图对于透射图优化的影响,而未充分考虑深度信息对于透射图优化贡献不同的特点,造成去雾结果在深度不连续处出现“晕”且离视点较远区域的去雾效果有明显下降.针对上述问题,本文提出一种基于边缘特征的加权暗通道先验去雾算法.该方法根据边缘特征的位置估计深度信息的连续性,将边缘点及非边缘点赋予不同权值,对加权透射图优化求解.仿真实验表明,新的去雾算法在恢复图像细节的基础上能够有效抑制“晕”的产生,证实了本文方法的可行性和有效性.

关键词:图像去雾;暗通道先验;边缘检测;深度估计

中图分类号:O647.3

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2012)03-0320-6

0 引言

由于大气气溶胶(悬浮颗粒、雾、霾等)的影响,导致自然场景中获取的图像质量下降.相机接收到来自于场景的辐射会在传输过程中发生衰减,使得图像的对比度下降并造成色彩失真^[1].恢复有雾图像的对比度及真实颜色,在摄影及计算机视觉中有着重要的应用.首先,图像去雾可以增加场景的能见度以及修正颜色偏差;其次,大多数的图像处理算法通常都基于输入图像的像素值是场景的辐射值,当颜色发生偏差或者对比度下降时,会对处理算法产生不利影响;再次,图像去雾算法所获得的深度信息,将给许多计算机视觉算法提供额外的数据支持.

由于雾是跟场景深度相关的一个量,因此基于物理模型的单幅图像去雾实际上是一个欠约束问题.尽管如此,近年来单幅图像的去雾方法有了很大进展^[1-5],许多方法都建立在先验假设基础之上. Tan^[3]通过最大化局部的对比度来恢复图像的色彩对比,此方法在某些场景上取得了较好的效果,但是没有物理模型支持,复原图像呈现过饱和,色彩不真实. Fattal^[2]提出了简单的符合物理规律的模型,该方法基于颜色信息的统计,由于浓雾缺少颜色信息且含有大量噪音,因此对浓雾图像处理效果较差. He 等人^[1]提出了暗通道先验信息假设,统计结果表明大多数自然场景图像符合这一假设,结合对有雾图像的物理模型,该方法在单幅图像去雾中得到了

广泛的应用.但暗通道方法中优化透射图的计算复杂,耗时较长,无法满足实时性要求,因此许多研究者对其进行了改进,黄黎红^[6]通过色彩空间转换及四叉树分割的方法,提高了暗通道去雾的计算时间;王燕等人^[7]使用局部黑体减法(Local Dark-Object Subtraction, LDOS)对初始透射图进行优化;胡伟等^[8]提出透射梯度优先规律,对下采样后的透射图进行优化处理;XIE 等人^[9]先对原始有雾图像进行亮色分离,然后用多尺度 Retinex 方法得到优化后的透射图;YANG 等人^[10]将暗通道先验与共生直方图均衡化(Co-occurrence Histogram Equalization, COHE)方法相结合求取透射图.所有这些方法在提高初始透射图优化速度方面比较有效,但只考虑初始透射图对于透射图优化的影响,而未充分考虑深度信息对于透射图优化贡献不同的特点,粗略地认为初始透射图对全图贡献基本相同.造成去雾结果在深度不连续处出现“晕”,极大地影响了视觉效果,并且离视点较远区域的去雾效果有明显下降.

针对上述问题,本文提出了一种基于边缘特征加权暗通道先验去雾方法,该方法充分考虑深度信息对于透射图优化贡献不同的特点,根据边缘特征的位置估计深度信息的连续性,将边缘点及非边缘点赋予不同权值,对加权透射图优化求解,该方法在恢复图像细节的基础上能够有效抑制“晕”的产生.

1 暗通道先验理论

在计算机视觉和计算图形学中,对有雾图像的

基金项目:国家自然科学基金(No. 61071172, No. 60602056, No. 60634030)、航空科学基金(No. 20105153022)和西北工业大学基础研究基金(No. JC200941)资助

第一作者:刘楠(1986—),男,硕士研究生,主要研究方向为尘雾图像恢复、景象匹配导航. Email: lovinamn@gmail.com

责任作者(通讯作者):赵永强(1976—),男,副教授,博士,主要研究方向为图像融合、偏振图像分析. Email: zhaoyq@nwpu.edu.cn

收稿日期:2011-07-13; **修回日期:**2011-10-24

描述模型如下

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

式中, I 为相机得到的像素值, J 是期望得到的场景的真实辐射值, A 是天空光亮度, t 是介质的透射率, 由于透射率随像素的位置而变化, 因此后文称为透射图 (Transmission Map). 若彩色图像 I 含有 N 个像素, 则包含 RGB 三通道的 $3N$ 个约束条件以及 $4N+3$ 个未知量, 因此图像去雾本质上是一个欠约束问题.

式(1)右边由两部分构成, 第一项 $J(x)t(x)$ 称为直接衰减, 它描述了场景的真实辐射值及其在介质中的衰减. 第二项 $A(1-t(x))$ 称为天空光, 它来源于大气散射, 并使得场景的颜色发生偏移.

假设大气状态均匀且同性时, 透射率 t 可写为

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

式中, β 为大气的散射系数, d 为场景与相机之间的距离. 式(2)表明场景的辐射值随距离成指数衰减. 一旦能够恢复场景的透射率, 那么同时也能获得未知尺度的深度图像, 即像素间的深度关系可以得到, 但其具体深度范围未知.

暗通道先验假设基于对无雾自然场景的一个观察统计信息: 图像除天空外的大部分区域, 在 RGB 三个通道中至少存在某一通道的亮度值非常低以至接近于 0 值.

对于任意图像 J , 其暗通道先验通过式(3)描述

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

式中, J^c 是 J 的颜色通道, $\Omega(x)$ 是以 x 为中心的分块. 实验观察表明, 当图像 J 是不含雾的自然场景图像, 除去天空区域以外, J^{dark} 非常低且接近于 0 值.

对于有雾的原始图像, 可以从暗通道先验处理后的结果中得到初始透射图 \tilde{t} 和天空光亮度值 A . 透射图中亮度越高的地方表示场景辐射通过性越好, 即距离视点越近. 由于暗通道处理时使用了分块计算, 即认为分块中的大气透射率为定值, 这使得初

始透射图 \tilde{t} 也存在严重的分块现象, 不能很好地保留原始图像的边缘特征. 为了得到更精确的透射图 t , He 使用了 Levin 等人^[1]提出的 Soft Matting 方法, 将透射图的优化过程转化为最小化如下代价函数的过程

$$E(t) = t^T L t + \lambda (t - \tilde{t})^T (t - \tilde{t}) \quad (4)$$

式中, 第一项为平滑项, 第二项为数据项, 通过 λ 来改变权重, L 为 Matting Laplacian 矩阵^[8].

对于式(4)二次型的优化求解, 可以转换为对稀疏线性方程的求解, 并得到优化后的透射图 t , 并结合计算出的天空光亮度 A 、已知的像素值 I 便可以求出场景的真实辐射值 J .

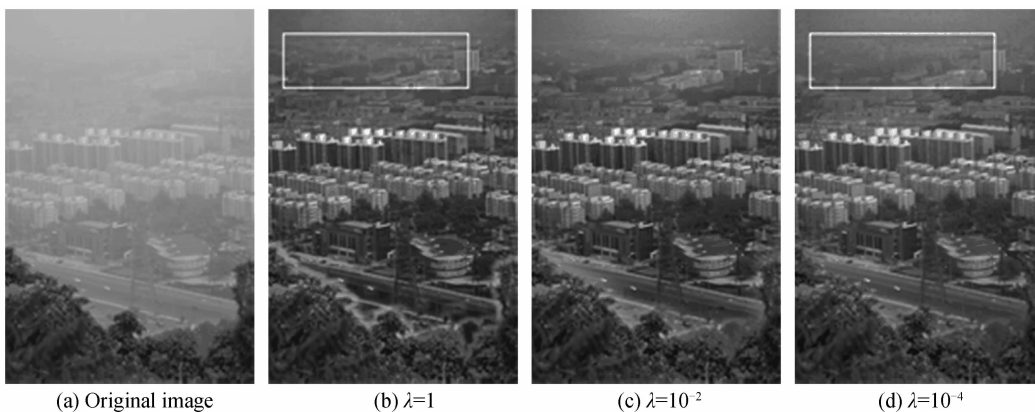
2 基于加权暗通道的图像去雾方法

2.1 透射图优化对去雾效果的分析

在文献^[1]中, He 分析了不同局部区域大小对去雾效果及“晕”所产生的影响, 实验表明当选择较小的局部区域时, “晕”现象减弱, 但去雾结果过饱和和现象明显; 当选择较大的局部区域时, “晕”现象增强, 但去雾效果更好. 为了解决这一矛盾, He 选择了 15×15 的局部区域. 但 He 并没有考虑透射图优化中不同暗通道权重对去雾效果的影响.

仿真实验中为了达到 Soft Matting 的效果, He 使用的 λ 权重较小 ($\lambda = 10^{-4}$), 即平滑项在透射图计算中占有较大的比重, 弱化了暗通道先验信息的作用, 即会弱化灰白区域 (浓雾部分) 的去雾效果, 造成图像在近天空端的质量下降. 图 1 为不同 λ 权值下的去雾结果.

从图 1(b) 中能够明显观察到, 在场景深度突变的区域 (从树叶过渡到地面之间) 会产生“晕”, “晕”随着 λ 的增大而越来越明显. 随着 λ 的减小, 图像细节丢失严重, 且噪点明显增多, 图像的对比度也有所下降, 细节图像中的建筑物在 $\lambda = 1$ 时能够准确辨认, 当 $\lambda = 10^{-4}$ 是已经变为模糊一片几乎无法看清.



(a) Original image

(b) $\lambda=1$

(c) $\lambda=10^{-2}$

(d) $\lambda=10^{-4}$



图 1 不同 λ 权值下的去雾结果
Fig. 1 Haze removal results using different λ

为了更直观地看出不同 λ 权值带来的差异, 图像信噪比随 λ 的变化曲线如图 2 所示. 图 2 表明图像的信噪比随 λ 的增大而增大, 即图像保留了更多的细节部分, 且图像噪点明显降低, 直观效果更好.

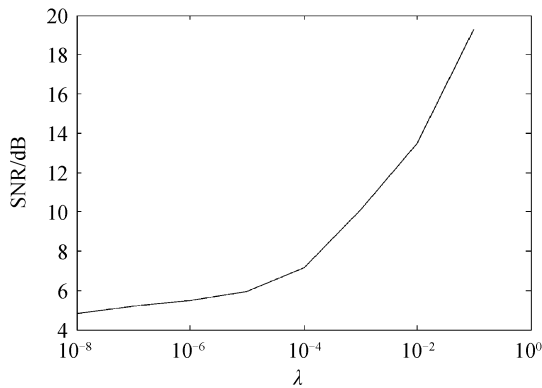


图 2 不同 λ 权值下去雾图像的信噪比
Fig. 2 SNR of haze removal images using different λ

图 3 为不同 λ 权值下的透射图优化结果. 从图 3 可以看出, λ 越小, 则优化后的透射图分块效应越弱, 细节越丰富. 在优化过程中, 暗通道先验信息的权重越小, 优化后的透射图就越接近原始图像, 然而透射图 t 作为深度的估计值, 反映的是场景距离视点的远近, 而不是场景的边缘细节信息, 从这个意义上讲, $\lambda=1$ 时的优化结果比 $\lambda=10^{-4}$ 时的更为准确.

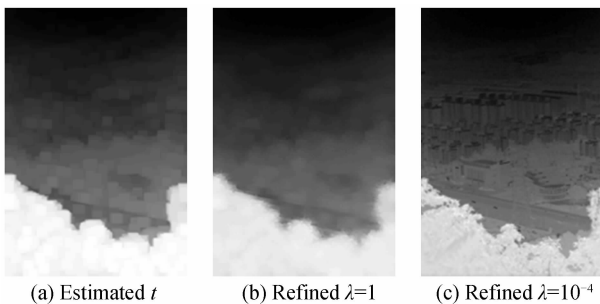


图 3 不同 λ 权值下的透射图优化结果
Fig. 3 Results of refined transmission map using different λ

但当 $\lambda=1$ 时, 优化后的透射图在深度突变边缘区域有明显的扩散效应, 由于暗通道求解过程使用了分块处理, 即假设分块中的大气透射率为定值, 但当分块包含图像深度突变区域时, 这一假设便不完全成立, 这是造成“晕”现象出现的主要原因.

透射图的优化中, 对图像中所有的像素使用固定的 λ , 即假设由暗通道先验所求出的 \tilde{t} 在全图范

围内对式(4)的优化求解贡献相同, 这一假设无法达到最优的图像去雾效果.

2.2 加权暗通道的权值构造

为了解决图像信噪比与“晕”之间的矛盾, 在对透射图进行优化求解时, 对包含深度突变的区域求解时应当赋予较小的权重. 修改后的代价函数为

$$E(t) = t^T L t + \lambda (t - \tilde{t})^T D (t - \tilde{t}) \quad (5)$$

等式右边第一项为平滑项, 第二项数据项中增加了一个对角矩阵 D , 体现了 \tilde{t} 到 t 的约束, 其主对角线上的数值(1 或 α)表示该像素赋予的不同权重, α 为深度突变区域的衰减系数. 对于透射图 t 的优化求解可以转化为如式(6)所示的稀疏线性方程组的求解.

$$(L + \lambda D)t = \lambda D \tilde{t} \quad (6)$$

由于图像的深度突变区域多数位于图像边缘特征附近, 因此采用边缘检测的结果估计图像的深度突变区域. 为了保证边缘检测的准确性, 消除检测中所产生的大量不太重要的弱边缘点、琐碎边缘点, 边缘检测不在原图上直接进行, 而对经过较小 λ 处理后的透射图进行边缘检测, 使得对深度突变区域的估计效果更为准确.

图 4 为两种边缘检测方法的比较结果. 直接在原图基础上进行边缘检测的结果如图 4(a)所示, 可以看出检测结果的中部及上部检测出了大量的建筑物边缘, 这些边缘并非深度突变区域, 且对于近处树叶的检测产生了大量的琐碎边缘点. 在透视图优化

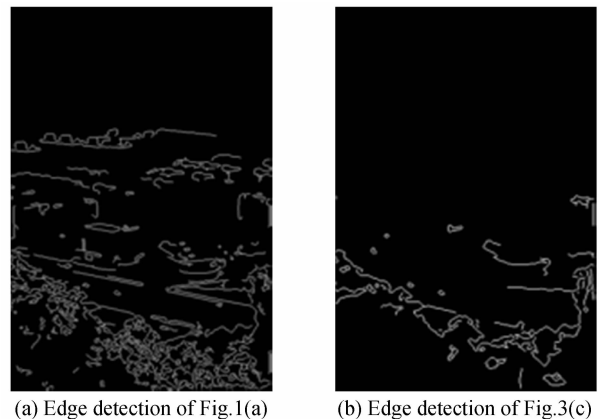


图 4 边缘检测结果
Fig. 4 Comparison with different edge detection method

结果的基础上再进行边缘检测,如图 4(b)所示,尽管依然检测到了部分建筑边缘,但相比直接检测有了明显改善,由于丢掉了大量琐碎边缘点,因此对于树叶至地面的深度突变区域的描述更为精确。

由图 3 可以看出,对经过优化后的透射图进行边缘检测会得到更为准确的结果.由于在暗通道先验处理过程中使用了分块方式(\tilde{t} 中某个像素亮度值会受到以该像素为中心,分块大小为边长的正方形区域 I 中其他像素值的影响),因此图像边缘特征周围一定区域内的像素都需要赋以较小的权值.对边缘特征进行分块大小的膨胀处理,得到最终的对角矩阵 D ,处理如图 5 所示.经过膨胀处理后,对非边缘部分即黑色区域赋值为 1,对膨胀的边缘部分即白色区域赋值为 α .



图 5 边缘膨胀结果

Fig. 5 Results of edge feature after dilate process

2.3 基于加权暗通道的图像去雾算法

根据暗通道去雾方法的基本原理以及对透射图进行优化时各参量对去雾结果的影响可知,对于符合物理模型的有雾图像,较大的初始透射图权重去雾效果较好,但会在深度突变区域产生“晕”.为去雾图像保留较多的细节信息并且尽可能地消除“晕”效果的影响,本文提出一种基于加权暗通道的图像去雾方法.其具体算法为:

- 1) 对图像 I 求取暗通道 J^{dark} , 计算天空光亮度 A , 得到初始透射图 \tilde{t} ;
- 2) 在较小权值 ($\lambda = 10^{-4}$) 的条件下, 使用式 (4) 对初始透射图进行优化, 得到优化透射图 t' ;
- 3) 对优化透射图 t' 进行边缘特征提取, 对提取出的边缘进行膨胀处理, 得到加权矩阵 D ;
- 4) 使用式 (6) 对初始透射图重新优化计算, 得到最终的透射图 t ;
- 5) 利用 t 、 A 和 I , 通过式 (1) 计算得到去雾图像 J .

3 图像去雾仿真实验

为了验证本文方法的可行性和有效性,本节将从图像去雾视觉效果、细节信息、色彩还原、计算速度等方面与 He 的方法进行比较.其中前两组数据来源于文献[1],第三组数据为实际拍摄获得.实验平台采用处理器为 Pentium 1.60 GHz、内存为 2 GB,运行 Windows XP 的 PC 机,编程语言为 Matlab 7.4.根据实际去雾经验,局部区域大小设置为 15×15 pixel,将 λ 设置为 1,衰减系数 α 设置为 10^{-4} .对式 (6) 的求解采用预处理共轭梯度算法 (Preconditioned Conjugate Gradients, PCG).

图 6 为第一幅图像测试结果.由图 6(e)和(f)可以看出本文算法相对 He 的方法在建筑物表面颜色

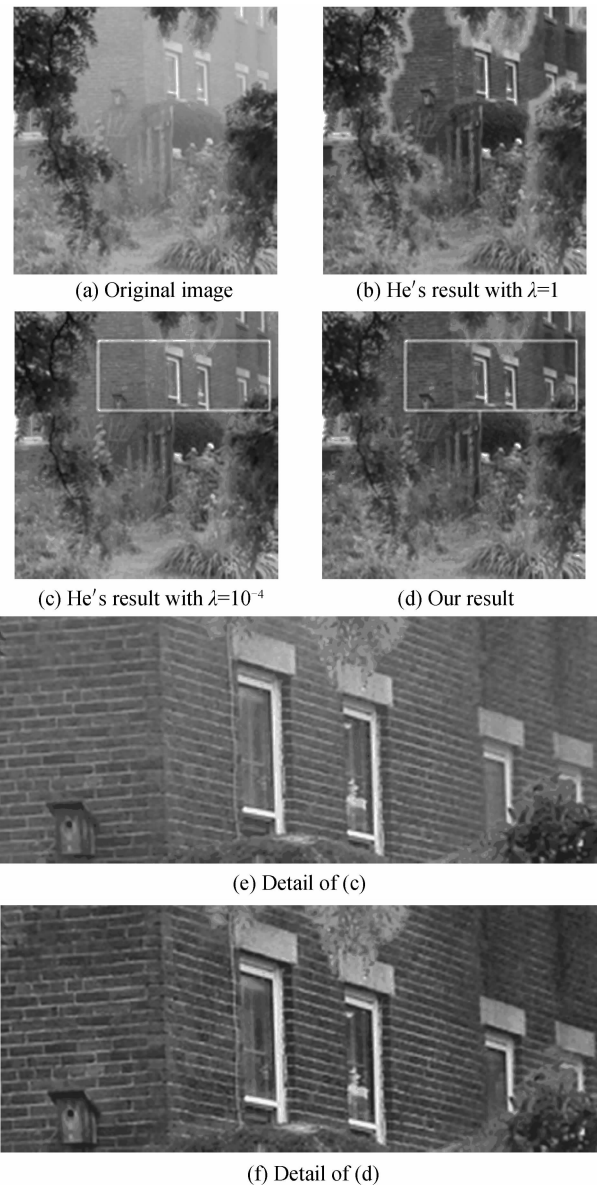


图 6 第一组测试结果

Fig. 6 Haze removal results of the first experiment

的色彩还原准确,且恢复出的窗台、墙角等边缘锐利,即对图像细节有更多的保留,同时减少了去雾结果中的噪点.由图 6(b)和(d)的比较可以看出,本文算法在绿色树叶与红色墙壁区域保持了良好的过渡效果,有效抑制了“晕”的产生.

图 7 为第二幅图像测试结果.虽然局部放大部分处于原图最上端,即最接近天空的区域,但本文方法比 He 的方法有了明显提高,在离视点较远的区域依然能够清晰分辨建筑物,且图 7(f)中的白框保留了建筑物屋顶的蓝色信息,在图 7(e)中已经完全丢失.

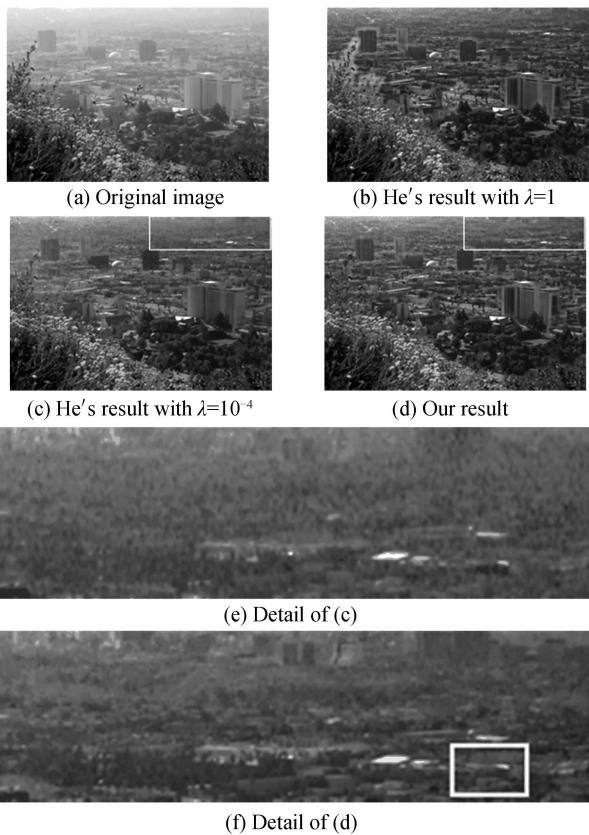


图 7 第二组测试结果

Fig. 7 Haze removal results of the second experiment

图 8 为第三幅图像测试结果,与前两幅图像相

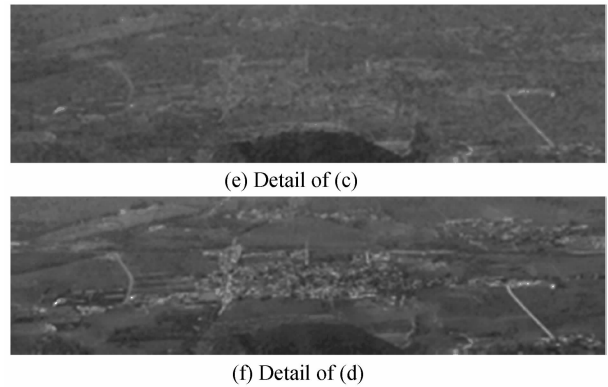
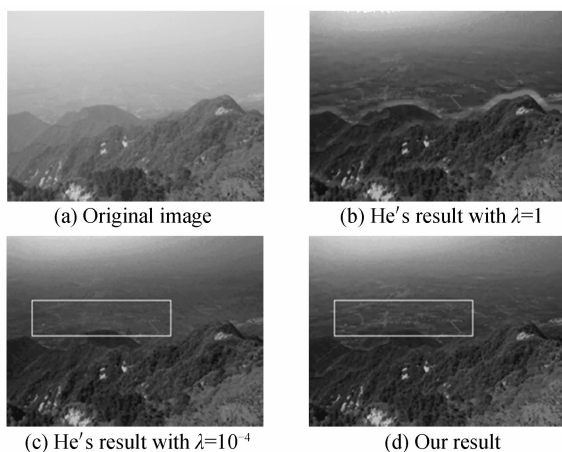


图 8 第三组测试结果

Fig. 8 Haze removal results of the third experiment

比,第三幅图像雾的浓度较厚.从图 8(e)和(f)可以看出,本文的去雾结果中,田间的小路,村落的分布等细节更清晰,图像噪点明显降低,从图(b)和图(d)的对比中可以看出山顶到平原的过渡区域没有出现“晕”.该测试较好地证明在符合去雾模型的情况下,较大的暗通道先验权重对于浓雾图像的恢复效果也较好.

表 1 给出了图 6、7、8 中本文方法与 He 方法的具体计算时间比较结果.可以看出本文方法与 He 方法耗时相当,仅有大约 0.5% 的增加.由于边缘检测速度很快,且求解稀疏线性方程组时以第一次优化透射图作为初值,采用预处理共轭梯度算法,其收敛速度非常快,因此相比 He 方法,本文算法并没有增加更多的计算量.

表 1 计算时间比较

Table 1 Computing performance comparison

Figure	Resolution	He's/s	Ours/s
Fig. 6	441 * 450	89.86	90.27
Fig. 7	480 * 320	69.14	69.47
Fig. 8	420 * 315	59.09	59.24

4 结论

单幅图像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图像去雾中仅考虑初始透射图对于透射图优化的影响,而未充分考虑深度信息对于透射图优化贡献不同的特点,造成去雾结果在深度不连续处出现“晕”且离视点较远区域的去雾效果有明显下降.针对上述问题,本文提出一种基于边缘特征的加权暗通道先验去雾算法.该方法根据边缘特征的位置估计深度信息的连续性,将边缘点及非边缘点赋予不同权值,对加权透射图优化求解.仿真实验表明,新的去雾算法在恢复图像细节的基础上够有效抑制“晕”的产生,证实了本文方法的可行性和有效性.

尽管本文方法在单幅图像去雾上取得了良好的效果,但基于暗通道的去雾方法对与浓雾图像以及包含大块灰白色物体的图像,其去雾效果依然较差.提出更为鲁棒的单幅图像去雾方法和提高暗通道图像去雾的实时性等是我们下一步将要开展的工作.

参考文献

- [1] HE K, SUN J, TANG X. Single image haze removal using dark channel prior[C]. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Miami, USA; IEEE Press, 2009: 1956-1963.
- [2] FATTAL R. Single image dehazing[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2008, **27**(3): 1-9.
- [3] TAN R T. Visibility in bad weather from a single image[C]. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Anchorage, USA; IEEE Press, 2008: 1-8.
- [4] TAREL J P, HAUTIERE N. Fast visibility restoration from a single color or gray level image [C]. IEEE International Conference on Computer Vision, Kyoto, Japan; IEEE Press, 2009: 1-8.
- [5] SHWARTZ S, NAMER E, SCHECHNER Y Y. Blind haze separation[C]. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, New York, USA; IEEE Press, 2006: 1984-1991.
- [6] HUANG Li-hong. A novel algorithm for single image dehazing [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(9): 1419-1422.
- 黄黎红. 单幅图像的去雾新算法[J]. *光子学报*, 2011, **40**(9): 1419-1422.
- [7] WANG Yan, WU Bo, GU Jin-hong. A method for single image defogging[J]. *Electronics Optics & Control*, 2011, **18**(4): 65-67.
- 王燕, 伍博, 谷金宏. 一种单幅图像去雾方法[J]. *电光与控制*, 2011, **18**(4): 65-67.
- [8] HU Wei, YUAN Guo-dong, DONG Zhao, *et al.* Improved single image dehazing using dark channel prior[J]. *Journal of Computer Research and Development*, 2010, **47**(12): 2132-2140.
- 胡伟, 袁国栋, 董朝, 等. 基于暗通道优先的单幅图像去雾新方法[J]. *计算机研究与发展*, 2010, **47**(12): 2132-2140.
- [9] XIE Bin, GUO Fan, CAI Zi-xing. Improved single image dehazing using dark channel prior and multi-scale retinex[C]. 2010 International Conference on Intelligent System Design and Engineering Application, Changsha, China; IEEE Press, 2010(1): 848-851.
- [10] YANG H, WANG J. Color image contrast enhancement by co-occurrence histogram equalization and dark channel prior [C]. 2010 3rd International Congress on Image and Signal Processing, Yantai, China; IEEE Press, 2010: 659-663.
- [11] LEVIN A, LISCHINSKI D, WEISS Y. A closed-form solution to natural image matting[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2008, **30**(2): 228-242.

An Image Dehazing Method Based on Weighted Dark Channel Prior

LIU Nan, CHENG Yong-mei, ZHAO Yong-qiang

(College of Automation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: The classical method based on dark channel prior only considers the estimated transmission map and does not take into account the depth information to optimize the soft matting function, which makes the result contain few halo artifacts in depth discontinuity and haze-removal effect in the region far from the viewpoint is degraded. For this issue, a simple but efficient image dehazing method is proposed with weighted dark channel prior based on edge feature. Using this method, depth continuity can be estimated by position of edge points, and refined transmission map is obtained by different weight of edge points and non-edge points. Experimental results show that detail information is well preserved and no halo artifacts in haze-free image, and demonstrates the feasibility and effectiveness of the proposed algorithm.

Key words: Haze removal; Dark channel prior; Edge detection; Depth estimation