

一种边缘优化的暗通道去雾算法

石文轩, 詹诗萦, 李 婕

(武汉大学 电子信息学院, 武汉 430072)

摘 要: 针对暗通道先验去雾算法大部分的时间都消耗在对透射率的优化上的问题, 对暗通道去雾算法进行了改进, 提出了边缘优化的暗通道去雾算法。使用边缘算子从粗略估计的透射率中提取边缘, 对边缘及周围扩展区域内的像素采用差值抠图法优化图像中场景深度变化明显的区域的透射率。实验结果证明, 边缘优化的暗通道去雾算法在得到与原始算法基本一致的去雾结果的同时, 平均计算时间仅为原算法时间的 60% 左右, 有效减少了计算量, 提高了去雾算法的运算速度。

关键词: 去雾; 图像复原; 暗通道先验; 边缘优化

中图分类号: TP751

文献标志码: A

文章编号: 1001-3695(2013)12-3854-03

doi: 10.3969/j.issn.1001-3695.2013.12.088

Dark channel prior dehazing algorithm based on edge optimization

SHI Wen-xuan, ZHAN Shi-ying, LI Jie

(School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: Most of the computation time was consumed in the step of optimization the transmittance in the dark channel prior dehazing. Aiming at this problem, this paper modified the dark channel prior dehazing algorithm, and proposed a new dark channel prior algorithm based on edge optimization. The new algorithm firstly extracted the edges from crude estimated transmittance image. Then, for the pixels on and near the edges, the difference matting optimization algorithm was performed on the regions that the depth changed significantly. The experimental results demonstrate that the performance of the proposed algorithm is substantially the same as the original one. The average computation time of the new algorithm is around 60% of the original one. Therefore, it can reduce the computation load effectively and improve the speed of the dehazing algorithm.

Key words: dehazing; image recovery; dark channel prior; edge optimization

0 引言

光线在含有很多杂质的空气中传输, 必然会受到大气环境光的影响而造成图像质量的退化, 雾霾就是降低图像质量的原因之一。在道路上, 雾致使能见度降低, 当能见度降低到一定的范围时, 人眼对车距很容易产生错觉, 以致发生交通事故^[1,2]。因此, 图像去雾在机器视觉以及计算机摄影业都有着广泛的需求; 同时去雾也是一项有一定难度的研究课题, 因为在大气中, 雾中场景所依赖的深度信息是未知的。因此研究图像去雾对提高计算机视觉系统的实用性和可靠性具有非常重要的意义。现有的图像去雾算法主要分为两大类: a) 基于图像增强的去雾算法; b) 基于物理模型的雾图复原算法^[3]。

全局直方图均衡化是图像增强去雾算法的一种^[4], 但该算法可能会使某些图像色彩与原始场景发生较大的偏移。基于色彩空间单一图像像素级去雾算法^[5]将雾天图像作为一般的降质图像处理, 该算法能提高雾图的对比度和视觉效果, 突出图像细节, 但会造成图像信息丢失。

另外, 如果只有一幅图像可分析的情况下, 去雾问题又受到了制约。因此, 使用多张图像或者其他辅助信息的去雾方法被提出。在文献[6,7]中, 利用多幅图像, 从不同程度的偏振光的角度来去掉雾对图像信息的干扰。

基于物理模型的雾图复原算法则需要研究大雾造成图像降质的物理过程, 然后建立雾图退化模型, 反演退化过程, 补偿退化过程中造成的图像失真, 以便获取无雾图像的最优估计值^[8]。复原算法相较于增强算法针对性更强, 去雾的效果更好, 一般不会有信息丢失。Tan^[9]假设在局部区域, 环境光可以看做常量, 利用 MRF 模型(Markov random field, 马尔可夫随机场) 框架, 构造关于边缘强度的代价函数; 同时, 使用 Graph Cut 理论来估计最优化的光照强度。该算法由于没有从大气耗散函数的物理模型上恢复真实场景的反射率, 因此恢复后的图像颜色过饱和, 同时会在一些景深突变的边界区域产生 Halo 效应^[10]。Fattal^[11]假设在局部区域光的反照率为常量, 以及光的传播与目标物体的表面色度具有局部不相关性。在此前提下估计出场景的反射率, 最终推导出传播图像。但是由于该算法基于数理统计, 是非线性反问题的求解, 其处理性能在很大程度上取决于输入的图像信息。在浓雾天气或者颜色暗淡的情况下, 颜色信息不足, 就会导致复原图像失真较大^[3,10]。

基于暗通道先验的单幅图像去雾算法^[12]利用暗通道假设直接估算雾的浓度以及图像透射率; 然后利用软抠图法优化估计的透射率使其细节更清晰; 最后根据大气物理模型复原得到无雾的图像。暗通道先验算法能去除彩色图像中大部分的雾, 获得较好的视觉效果。但是该算法也存在一些缺陷, 即运算量

收稿日期: 2013-03-28; 修回日期: 2013-04-26

作者简介: 石文轩(1983-), 男, 湖北武汉人, 助理研究员, 博士(后), 主要研究方向为图像处理、嵌入式系统(shiwx@163.com); 詹诗萦(1987-), 女, 湖北武汉人, 硕士, 主要研究方向为图像处理; 李婕(1984-), 女, 湖北宜昌人, 博士, 主要研究方向为图像处理、计算机视觉。

大,运算速度慢。

通过实验发现,暗通道先验去雾算法大部分的时间是消耗在对估计透射率的优化上,减少透射率优化的计算量就可提高算法的运算速度。本文针对暗通道先验算法的不足,提出了边缘优化的暗通道去雾算法。该算法只优化图像中场景深度变化明显区域的透射率。

1 边缘优化的暗通道去雾算法

暗通道先验的单幅图像去雾算法在去雾效果上取得了很大的进展,但由于该算法大量的计算使得整个处理过程比较耗时,对处理设备的内存要求极高。在具体实现时,发现需要内存最多、耗费时间最长的是优化粗略估计的透射率 $\tilde{t}(x)$ [12]。因为在优化的计算过程中,需要构建拉普拉斯融合矩阵 L ,其大小为原始含雾图像高度乘以图像宽度,如分辨率为 $M \times N$ 的含雾图像,需要生成大小为 $MN \times MN$ 的拉普拉斯融合矩阵,而且需要计算原始含雾图像中的每一个像素点。

计算速度慢、耗时长限制了暗通道先验图像去雾算法的应用和推广,大大降低了该算法的实用性。所以在优化该算法时,希望在不影响最终去雾效果的前提下,降低运算量,提高运算速度,减少运算时间。

1.1 初始透射率的边缘优化思想

估算出透射率 $t(x)$ 和环境光 A 后,根据去雾方程式 (1) 可以获得处理后的无雾图像 [12]:

$$J(x) = \frac{I(x) - A}{\max(t(x), t_0)} + A \quad (1)$$

由式 (1) 可以看出,粗略估计的透射率 $\tilde{t}(x)$ 也是可以参与运算求得去雾后的图像。不过,经过优化后的透射率 $t(x)$ 可以得到更为清晰、效果更好的去雾图像。

图 1 给出了使用粗略估计的透射率和优化后的透射率分别计算 $J(x)$ 后得到的无雾图像。

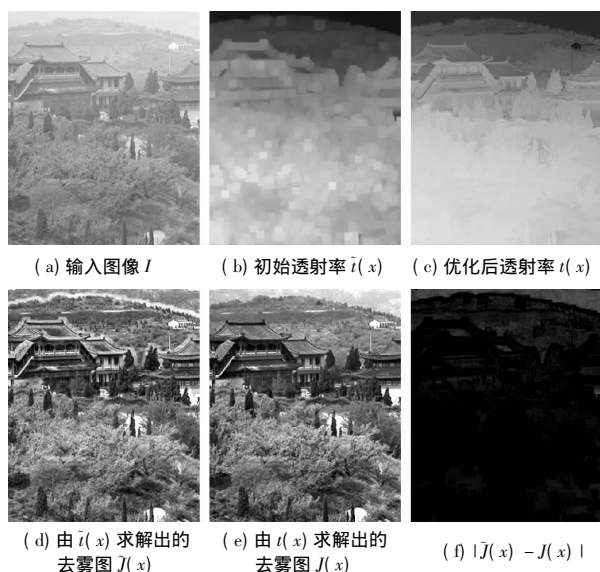


图 1 $\tilde{t}(x)$ 和 $t(x)$ 比较图

从图 1 中可以看出,由 $\tilde{t}(x)$ 和 $t(x)$ 分别恢复的无雾图像 $\tilde{J}(x)$ 和 $J(x)$ 在绝大部分区域都差别不大。但仔细观察会发现,虽然在大部分区域两幅恢复后的无雾图像差别很小,但是仍然有部分区域有较为明显的差别。例如后景山峰与天空交界处,通过比较观察透射率图和恢复后的无雾图像可以发现,

差异明显的区域往往与图像场景深度突然变化的区域相吻合,同时也与透射率图中亮度变化明显的边缘区域相吻合。而图 1 中大部分去雾效果差别不大的区域则与图像场景深度变化平滑的区域吻合,同时也是透射率图中亮度变化平滑的区域。

由此,可以推导出一个优化假设,即透射率图的边缘优化假设:在粗略估计的透射率 $\tilde{t}(x)$ 中,边缘区域优化需求最大,优先级最高,而平缓的区域优化的需求较小,优先级较低,可以暂时不执行优化。同时,透射率图中边缘明显的区域与场景深度图中边缘明显的区域也是相符的。

根据上面的分析,基于边缘优化后的透射率 $t_i(x)$,有大部分的像素点直接使用粗略估计的透射率 $\tilde{t}(x)$ 中的数据,只有较少部分,也就是透射率中边缘变化明显的部分,需要利用插值抠图法优化透射率。

由于只对部分边缘的区域进行透射率优化,那么在计算拉普拉斯融合矩阵 L 的值时,只有需要优化的区域计算 $L(x, y)$ 的值,其他区域在 L 中取值为 0。这一改进大大降低了运算量,增加了运算速度。如图 1 为 255×310 大小的图片,但是边缘需要优化的部分像素数为 44 633,占总像素数的 56.46%,而在计算 L 这个稀疏矩阵则是成平方地减少运算量。由此在计算 L 时,会加入二值约束参数 C 来修改 L 的计算,二值约束图 C 是用来指出需要优化的那部分,即边缘明显的那部分。

在计算二值约束参数 C 时,先利用 Sobel 边缘算子处理粗略估计的透射率 $\tilde{t}(x)$,用来得到 $\tilde{t}(x)$ 中的边缘信息,这些边缘信息表示图像中边缘变化明显的区域的位置。求解边缘时可直接调用函数,其 MATLAB 代码是: `tc_edge = edge(tc, 'sobel')`。因为粗略估计的透射率 $\tilde{t}(x)$ 是通过暗通道先验算法处理原始含雾图像 $I(x)$ 得到的,根据暗通道先验处理规则中的滑动窗口处理方式, $\tilde{t}(x)$ 中某个像素点的强度值会受到以其为中心、 $n \times n$ 的滑动窗口内的其他像素点强度值的影响。所以,利用 Sobel 边缘算子求出的 $\tilde{t}(x)$ 的交界线,其周围扩展区域内的像素也需要差值抠图法的优化计算。因此,在优化算法中,需将边界线,以 n 作为宽度进行膨胀处理,得到更恰当的参数 C 。膨胀时可以直接调用 MATLAB 中的 `imdilate` 函数。

C 为一幅二值图像,其中黑色区域的像素点可以称为未被约束像素点,这一部分像素要进行优化处理,其他白色区域像素称为被约束像素,可以直接使用粗略估计透射率 $\tilde{t}(x)$ 的数据参与计算。根据暗通道先验的单幅图像去雾方法,透射率优化的价值函数可以修改为

$$E(t_i) = t_i^T L t_i + \lambda (t_i - \tilde{t})^T D (t_i - \tilde{t}) \quad (2)$$

式 (2) 在结构上与文献 [13] 中,Levin 处理软抠图的优化方程类似,前一部分是平滑项,后一部分是数据项。最关键的是约束参数 D ,它体现 $\tilde{t}(x)$ 到 $t_i(x)$ 的约束。 D 的数值是根据 $\tilde{t}(x)$ 的梯度值确定的。 D 的大小与 L 相同,为对角矩阵,其对角线位置上的取值表示该位置在优化后透射率图上对应的像素点是否可以直接使用 $\tilde{t}(x)$ 的数据:若为 1,则代表透射梯度变化平缓的区域,可以直接使用 $\tilde{t}(x)$ 的数据;若为 0,则代表透射梯度变化明显的区域,需要进行透射率优化。由此可以通过二值图像 C 来约束 D 的取值。

仍旧采用最小二乘法求解,使修改后的价值函数式 (2) 最小的 $t_i(x)$ 为

$$t_i(x) = (L + \lambda U D)^{-1} \tilde{t}(x) C \quad (3)$$

1.2 边缘优先算法步骤

基于透射率边缘优化算法的具体过程如下:

- 使用暗通道先验的单幅图像去雾算法处理原始含雾图像 $I(x)$, 得到粗略估计的透射率 $\hat{t}(x)$ 和大气环境光 A ;
- 使用 Sobel 边缘算子处理粗略估计的透射率 $\hat{t}(x)$ 提取边缘, 得到粗略透射率图中梯度变化明显的区域, 然后根据求解暗通道时滑动窗口的大小, 对提取的边缘进行膨胀处理, 扩展该区域宽度, 以获取二值约束图 C ;
- 根据原始含雾图像 $I(x)$ 和求得的二值约束图 C , 计算改进后的拉普拉斯融合矩阵 L 和约束参数 D ;
- 将求得的 L 、 D 、 C 和 $\hat{t}(x)$ 代入式 (3) 求得部分区域进行优化后的 $t_i(x)$;
- 利用 $t_i(x)$ 、 A 和 $I(x)$ 根据式 (1) 计算去雾后的图像 $J(x)$;
- 根据情况调整图像亮度和对比度。

图 2 为边缘优化改进算法过程示意图。

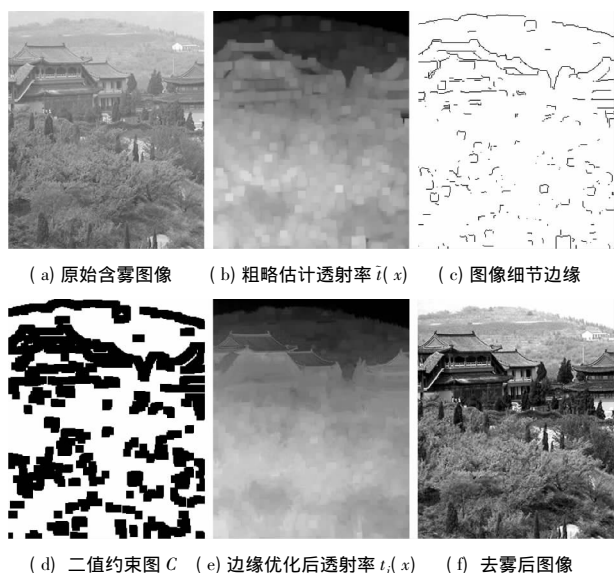


图 2 透射率边缘优化改进算法过程示意图

2 实验结果及分析

本文的实验结果是在 CPU 为双核 2.66 GHz、操作系统为 Windows XP、内存为 4 GB 的计算机上获得的。通过表 1 中的实验数据可以很清楚地看出, 改进后的算法能够有效地提高运算速度, 减少运算时间。

通过实验结果图的比较可以发现, 改进的算法还可以改善原始算法造成色彩失真的区域。例如, 在图 3~5 中, 用原始算法去雾得到的远处天空部分的色彩过于偏蓝。这是因为暗通道先验原始算法在处理灰白明亮区域时会得到错误的透射率估计, 因为这些区域不符合暗通道假设, 从而造成色彩失真。同时, 优化透射率时使用的拉普拉斯融合矩阵中的平滑项会强化这种影响。而采用改进算法时, 这部分区域都不用作优化处理, 更好地保持了初始的结果, 因此有明显改善。对于一幅分辨率为 300×450 像素的含雾测试图像, 原算法的整个计算过程用时 19.971 s, 其中优化粗略估计的透射率耗时 14.612 s, 占整个运算过程的 73%。而采用本文的改进算法, 整个计算过程用时减少到了 13.304 s。实验中, 采用三种不同分辨率的图像进行算法比较, 运算时间的比较如表 1 所示。



图 3 运算速度改进实验结果比较 1



图 4 运算速度改进实验结果比较 2



图 5 运算速度改进实验结果比较 3

表 1 运算时间比较

图像	图像大小	原始算法/s	边缘优化/s
图 3	300×450	19.971	13.304
图 4	450×600	37.169	23.739
图 5	450×600	42.628	26.147

3 结束语

本文提出了一种边缘优化的暗通道去雾算法, 在保持了与原始算法基本一致的去雾效果的同时, 有效减少了计算量, 提高了基于暗通道去雾算法的运算速度。本算法使用边缘算子从粗略估计的透射率中提取边缘, 只优化图像中场景深度变化明显区域的透射率, 从而有效地节省了计算时间。实验结果表明, 该算法的平均计算时间仅为原算法时间的 60% 左右, 同时, 改进的算法还可以改善原始算法造成色彩失真的区域。

参考文献:

- [1] PERRY A H, SYMONS L J, SYMONS L. Highway meteorology [M]. London: E&FN Spon, 1991: 91-130.
- [2] SNOWDEN R J, STIMPSON N, RUDDLE R A. Speed perception fogs up as visibility drops [J]. Nature, 1998, 392(6675): 450.
- [3] 郭瑞, 蔡自兴, 谢斌, 等. 图像去雾技术研究综述与展望 [J]. 计算机应用, 2010, 30(9): 2417-2421.
- [4] 刘治群, 杨万挺, 朱强. 几种图像增强算法的研究比较 [J]. 合肥师范学院学报, 2010, 28(6): 60-63.
- [5] 甘建红, 何童丽. 基于色彩空间单一图像像素级去雾算法 [J]. 计算机应用研究, 2012, 29(9): 3591-3593.

(下转第 3862 页)

- York: ACM Press 2006: 835-844.
- [3] LAW-TO J, CHEN Li, JOLY A *et al.* Video copy detection: a comparative study[C]//Proc of the 6th International Conference on Image and Video Retrieval. 2007: 371-378.
- [4] XIE Qing, HUANG Zi, SHEN Heng-tao, *et al.* Efficient and continuous near-duplicate video detection[C]//Proc of the 12th International Asia-Pacific Web Conference. 2010.
- [5] YEH Mei-chen, CHENG Kwang-ting. Video copy detection by fast sequence matching[C]//Proc of ACM International Conference on Image and Video Retrieval. New York: ACM Press, 2009.
- [6] HUA Xian-sheng, CHEN Xian, ZHANG Hong-jiang. Robust video signature based on ordinal measure[C]//Proc of International Conference on Image Processing. 2004: 685-688.
- [7] SHEN Heng-tao, SHAO Jie, HUANG Zi, *et al.* Effective and efficient query processing for video subsequence identification[J]. *IEEE Trans on Knowledge and Data Engineering* 2009, 21(3): 321-334.
- [8] TAN H K, NGO C W, CHUA T S. Efficient mining of multiple partial near-duplicate alignments by temporal network[J]. *IEEE Trans on Circuits and Systems for Video Technology*, 2010, 20(11): 1486-1498.
- [9] TAN H K, NGO C W, HONG R, *et al.* Scalable detection of partial near-duplicate videos by visual-temporal consistency[C]//Proc of the 17th ACM International Conference on Multimedia. New York: ACM Press 2009: 145-154.
- [10] HAMPAPUR A, BOLLE R M. Comparison of distance measures for video copy detection[C]//Proc of IEEE International Conference on Multimedia and Expo. 2001: 737-740.
- [11] HAMPAPUR A, HYUN K H, BOLLE R. Comparison of sequence matching techniques for video copy detection[C]//Storage and Retrieval for Media Databases. 2002: 194-201.
- [12] WU Xiao, NGO C W, HAUPTMANN A, *et al.* Real-time near-duplicate elimination for Web video search with content and context[J]. *IEEE Trans on Multimedia* 2009, 11(2): 196-207.
- [13] CHEN Li, STENTIFORD F W M. Video sequence matching based on temporal ordinal measurement[J]. *Pattern Recognition Letters*, 2008, 29(13): 1824-1831.
- [14] KIM C, VASUDEV B. Spatiotemporal sequence matching for efficient video copy detection[J]. *IEEE Trans on Circuits and Systems for Video Technology*, 2005, 15(1): 127-132.
- [15] EHRIG H, TAENTZER G. Computing by graph transformation: a survey and annotated bibliography[R]. [S. l.]: Leiterder Fach Bibliothek Informatik, 1996.
- [16] ZHANG Hong-jiang, KANKANHALLI A, SMOLIAR S W. Automatic partitioning of full-motion video[J]. *Multimedia Systems*, 1993, 1(1): 10-28.
- [17] SHAHRARAY B, GIBBON D C. Automatic generation of pictorial transcripts of video programs[C]//Multimedia Computing and Networking. 1995: 512-518.
- [18] ZHANG H J, WU J H, SMOLIAR S W. System for automatic video segmentation and key frame extraction for video sequences having both sharp and gradual transitions: US, 5635982 A[P]. 1997-06-03.
- [19] DIRFAUX F. Key frame selection to represent a video[C]//Proc of International Conference on Image Processing. 2000: 275-278.
- [20] SZE K W, LAM K M, QIU Guo-ping. A new key frame representation for video segment retrieval[J]. *IEEE Trans on Circuits Systems for Video Technology*, 2005, 15(9): 1148-1155.
- [21] TRUONG B T, VENKATESH S. Video abstraction: a systematic review and classification[J]. *ACM Trans on Multimedia Computing, Communications, and Applications*, 2007, 3(1): 1-37.
- [22] KUCUKTUNC O, GUDUKBAY U, UIUSOYA O. Fuzzy color histogram-based video segmentation[J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 2010, 114(1): 125-134.
- [23] DOUZE M, GAIDON A, JEGOU H, *et al.* INRIA-LEAR's video copy detection system[EB/OL]. (2008). <http://www-nlpir.nist.gov/projects/tvpubs/tv8.papers/inria-lear.pdf>.
- [24] ZHANG Xu-dong, LIU Tie-yan, LO K T, *et al.* Dynamic selection and effective compression of key frames for video[J]. *Pattern Recognition Letters*, 2003, 24(9): 1523-1532.
- [25] GUIL N, GONZÁLEZ-LINARES J M, CÓZAR J R, *et al.* A clustering technique for video copy detection[C]//Proc of the 3rd Iberian Conference on Pattern Recognition and Image Analysis. Berlin: Springer-Verlag 2007: 452-458.
- [26] FURHT B, SMOLIAR S W, ZHANG Hong-jiang. Video and image processing in multimedia systems[M]. Boston: Kluwer Academic Publisher, 1995.
- [27] LIU Hong, LU Hong, WEN Zhao-hui, *et al.* Gradient ordinal signature and fixed-point embedding for efficient near-duplicate video detection[J]. *IEEE Trans on Circuits and Systems for Video Technology*, 2012, 22(4): 555-566.
- [28] 刘红. 近重复视频检测算法研究[D]. 上海: 复旦大学, 2012.
- [29] Final list of transformations[EB/OL]. (2008). <http://www-nlpir.nist.gov/projects/tv2008/active/copy.detection/final.cbcd.video.transformations.pdf>.
- [30] LIU Hong, LU Hong, XUE Xiang-yang. A segmentation and graph-based video sequence matching method for video copy detection[J]. *IEEE Trans on Knowledge and Data Engineering*, 2013, 25(8): 1706-1718.
- [31] XUE Xiang-yang, ZHANG Wei, GUO Yue-fei, *et al.* Fudan university at TRECVID[EB/OL]. (2008). <http://www-nlpir.nist.gov/projects/tvpubs/tv8.papers/fudan.pdf>.
- (上接第 3856 页)
- [6] SCHECHNER Y Y, NARASIMHAN S G, NAYAR S K. Instant dehazing of images using polarization[C]//Proc of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Kauai, HI: IEEE Computer Society 2001: 1-325.
- [7] SHWARTZ S, NAMER E, SCHECHNER Y Y. Blind haze separation[C]//Proc of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. New York: IEEE Computer Society, 2006: 1984-1991.
- [8] SONKA M, HLANACE V, BOYLE R. 图像处理、分析与机器视觉[M]. 艾海舟, 武勃, 等译. 2版. 北京: 人民邮电出版社 2003.
- [9] TAN R. Visibility in bad weather from a single image[C]//Proc of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Washington DC: IEEE Computer Society 2008: 2347-2354.
- [10] 禹晶, 李大鹏, 廖庆敏. 基于物理模型的快速单幅图像去雾方法[J]. *自动化学报* 2011, 37(2): 143-149.
- [11] FATTAL R. Single image dehazing[J]. *ACM Trans on Graphics*, 2008, 27(3): 1-9.
- [12] HE K, SUN J, TANG Xiao-ou. Single image haze removal using dark channel prior[C]//Proc of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Washington DC: IEEE Computer Society 2009: 1956-1963.
- [13] LEVIN A, LISCHINSKI D, WEISS Y. A closed form solution to natural image matting[C]//Proc of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. New York: IEEE Computer Society, 2006: 67-68.