

doi:10.3788/gzxb20134207.0872

一种改进的图像快速去雾新方法

庞春颖¹, 嵇晓强¹, 孙丽娜², 郎小龙²

(1 长春理工大学 生命科学技术学院, 长春 130022)

(2 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

摘 要:为提高雾霭天降质图像的清晰度和色彩保真度,基于暗原色先验提出了一种改进的图像快速去雾方法.针对原方法运算时间过长的问题,在保证去雾效果的前提下,利用快速双边滤波方法代替软件抠图修复透过率图,大幅度地降低了计算量和复杂度,处理时间仅为原方法的 5%,满足了一般工程上的实时性要求.针对去雾处理后的图像亮度降低、颜色较实际场景偏暗的问题,提出了一种简单有效的图像对比度和亮度增强的方法,自适应地增强了图像的亮度,并对局部由于雾浓度过高而造成不清晰的区域,进行了对比度修正.结果表明,该方法能够快速有效地复原出雾天场景的对比度和真实色彩,在一定程度上保证了户外成像系统在恶劣天气下工作的稳定性和可靠性.

关键词:雾霭;图像去雾;暗原色先验;快速双边滤波

中图分类号:TP391.4

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2013)07-0872-6

An Improved Method of Image Fast Defogging

PANG Chun-ying¹, JI Xiao-qiang¹, SUN Li-na², LANG Xiao-long²

(1 Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

(2 Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: In order to improve degraded image clarity and color fidelity in foggy weather, an improved defogging method based on dark-channel prior is proposed. According to the more computation time, and on the premise of defogging effect, fast bilateral filtering is used instead of soft matting to refine transmission map that reduces the complexity of the algorithm greatly. The processing time is 5% of original method, which can meet the real-time requirements of the general engineering. Since the brightness of image after haze removal is lower than the actual scene and the color is dim, a simple and effective method of image contrast and brightness enhancement is proposed. It adaptively enhances the image brightness, and modifies the local contrast which is due to the thick fog and haze. The experimental results indicates that this method can restore the fog scene and color rapidly and effectively, and guaranteed the stability and reliability of outdoor imaging system in bad weather in a certain extent.

Key words: Fog; Image defogging; Dark-channel prior; Fast bilateral filter

0 引言

对于户外视觉系统而言,雾霭天气是影响成像质量的重要因素,往往会造成图像对比度降低、动态范围缩小、模糊不清、细节信息不明显或部分缺失,

以及严重的颜色偏移与失真^[1],从而直接限制和影响了室外目标识别与跟踪、智能导航、公路监控、卫星遥感、航空侦察等系统效用的发挥^[2].因此,对雾天图像进行有效的去雾处理是户外成像系统克服恶劣天气影像,稳定、可靠工作的保证.图像去雾方法

基金项目:吉林省科技厅项目(No.20121006)资助

第一作者:庞春颖(1971-),女,副教授,博士,主要研究方向为光电医学仪器. Email:pangcy@cust.edu.cn

通讯作者:嵇晓强(1982-),女,讲师,博士,主要研究方向为医学图像处理. Email:zuoanmulan@163.com

收稿日期:2012-12-24;录用日期:2013-01-28

一般分为两大类:一类是图像增强处理,比较典型和常用的图像增强方法包括直方图均衡化算法、曲波变换、同态滤波算法、基于大气调制传递函数、小波方法、以及 Retinex 算法等. 每种方法针对不同的场合和对象都取得了不错的去雾效果,但是每种方法都有其不足和局限,所以不断有新方法和新手段引入,并不断有新成果面世,使得该领域保持了旺盛的生命力. 但从图像增强角度去雾处理,实际上只是在一定程度上改善了图像的视觉效果,并不是实质上的去雾^[2]. 另一类方法是图像复原,其基于图像退化原因和大气散射规律建立退化模型,充分利用退化的先验知识,具有一定的优越性. 目前,国内外的一些研究人员基于大气散射理论对雾霭等恶劣天气条件下的图像退化机理以及雾天图像建模进行了深入的分析,提出了一些基于退化模型的雾天降质图像清晰化处理方法,并且取得了较大的进展. 在计算机视觉领域,通过处理多幅在恶劣天气条件下拍摄的图像,就可以在场深和大气条件等精确信息未知的情况下,自动地恢复出雾天场景的颜色和对比度;而依据深度信息的去雾算法,已经发展到实现单幅图像去雾的程度^[3-5]. 但是由于雾所依赖的深度信息未知,所以单幅图像去雾处理需要依靠一定的先验、假设或约束条件. 本文基于一个全新的比较有代表性的先验知识——暗原色先验,在深入分析和研究该去雾方法的基础上做了有针对性的优化和改进,采用更为快速的双边滤波方法代替原算法中的软件抠图来细化透过率图,将整个算法的运算时间降低到 5%,从而满足了一般工程上对实时性的需求;另外,利用对去雾后图像进行了对比度和亮度增强处理,实现了雾天图像的快速还原处理.

1 雾天图像退化机理及其建模分析

根据大气散射理论描述,雾天条件下光从物体表面反射到达观测点传播过程中会发生散射,引起入射光的衰减^[6],导致获得的图像对比度下降,动态范围缩小,模糊不清等特性. 光削弱情况通过衰减模型描述为

$$E_d(d, \lambda) = E_0(\lambda) e^{-\beta(\lambda)d} \quad (1)$$

式中, β 为大气散射系数; d 为场景深度; $E_0(\lambda)$ 是物体表面反射的光线强度; $e^{-\beta(\lambda)d}$ 表示沿光线的传播率,反映了光线穿透雾的能力; $E_d(d, \lambda)$ 表示光线经衰减后到达成像设备的强度.

另一方面,由于光路上大气粒子的散射作用,周围光路上的杂散光会融入到成像光路中,与目标物

体的反射光一起参与成像^[6],引起图像景物颜色的偏移. 到达观测者处的大气光辐射度可表示为

$$E_a(d, \lambda) = E_\infty(\lambda)(1 - e^{-\beta(\lambda)d}) \quad (2)$$

式中 $E_\infty(\lambda)$ 表示在沿着观测者视线方向无穷远处光照强度. 根据 McCartney 模型^[7]的描述,雾天户外视觉传感器上接收到的总辐射度是衰减模型和大气光成像模型同时作用的结果,即

$$E(d, \lambda) = E_0(\lambda) e^{-\beta(\lambda)d} + E_\infty(\lambda)(1 - e^{-\beta(\lambda)d}) \quad (3)$$

根据光在雾天传输的物理特性,对上式进行简化代替,令: $I(x) = E(d, \lambda)$, $J(x) = E_0(\lambda)$, $t(x) = e^{-\beta(\lambda)d}$, $A = E_\infty(\lambda)$, 可得到雾天图像的光学模型为

$$I(x) = J(x)t(x) + A(1 - t(x)) \quad (4)$$

式中 x 表示图像上点的位置坐标; $I(x)$ 表示观察到的带雾图像. 式(4)从本质上解释了雾天图像退化降质的原因^[8-10]. 依据该模型,去雾的目标就是获得参量 J , 而在式(4)中只有参量 I 是已知的,显然利用单幅图像求解时需要辅助信息或假设条件.

2 暗原色先验理论

暗原色先验理论(dark channel prior)是一种对无雾图像的统计规律^[10]. 文献[10]指出:在绝大多数户外无雾图像的任意局部小块中,总存在至少一个像素,它的某一个或几个颜色通道的强度值很低,且接近于零,称之为暗原色^[11]. 针对一幅户外无雾图像求取暗原色点 J_{dark} 的表达式为

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

式中, J_c 为 J 的一个颜色通道, Ω_x 是以 x 为中心的局部区域. 而在雾霭等天气下获得的图像,由于大气光参与成像,会使得暗原色点强度值发生改变,而其值直接影响着透射率 t , 因此可以通过暗原色值的变化来估计透射率 t ^[12].

暗原色先验理论认为物体的局部阴影、自然景观的投影、黑色物体或表面以及具有鲜艳颜色的物体及其表面中都存在着暗原色点^[10].

3 改进的暗原色先验快速去雾方法

3.1 暗原色去雾原理

暗原色先验在去雾问题上是一个客观存在的本质规律. 利用暗原色先验理论能够简单有效地复原得到高质量的清晰图像. 该方法实现原理和过程如下:首先,利用暗原色先验估测出透过率图,对式 4 两边取最小运算,可求得带雾图像 R、G、B 三通道的暗原色值为^[11]

$$\min\left(\min_{y \in \Omega(x)}\left(\frac{I_c(y)}{A_c}\right)\right) = t(x) \min_c\left(\min_{y \in \Omega(x)}\left(\frac{J_c(y)}{A_c}\right)\right) + (1-t(x)) \quad (6)$$

根据暗原色先验可知,无雾图像的暗原色值 $\min_c(\min_{y \in \Omega(x)}(J_c(y)))$ 接近零,且 $A \neq 0$,则由式(6)可变换求得透过率 $t(x)$ 的表达式为

$$t(x) = 1 - \min_c\left(\min_{y \in \Omega(x)}\left(\frac{I_c(y)}{A_c}\right)\right) \quad (7)$$

式中 $\min_c(\min_{y \in \Omega(x)}(I_c(y)))$ 为带雾图像的暗原色,从而可以得到透过率 t . 为了使得复原出的图像更接近实际图像,式(7)中加入一个调节因子 ω ($0 < \omega \leq 1$),所以

$$t(x) = 1 - \omega \min_c\left(\min_{y \in \Omega(x)}\left(\frac{I_c(y)}{A_c}\right)\right) \quad (8)$$

初估计出的透过率图中存在“halo”现象,为了提高其估计的准确度和去雾效果,需要细化和平滑透过率图.

接下来再通过暗原色值来估测大气散射模型中另一参量:大气光成分 A ,方法是首先选取暗原色中亮度最高的 0.1% 像素,并把其在 I 中对应的最大亮度值作为大气光 A 的估计值. 得到透过率 t 以及大气光 A 后,即可求得场景的辐射度 J . 于是

$$J(x) = \frac{I(x) - (1 - \max(t(x), t_0))A}{\max(t(x), t_0)} \quad (9)$$

式中 t_0 是为了避免去雾结果中包含噪音^[10-11]而设定的透过率的下限值. 经过上述处理后就可以达到去雾的目的.

3.2 双边滤波快速修复透过率图

虽然暗原色先验图像去雾是一种被广泛关注且非常实用、有效的方法,但是该方法仍然存在一定的缺陷,最大的瓶颈是算法的复杂度. 在利用暗原色估计透过率的过程中,采用模板计算会造成图像边缘模糊不清,即视觉上的“halo”现象,直接影响了去雾效果^[11,13]. 文献[10]使用一种软件抠图方法来细化和平滑透过率图,抠图是一种把图像的前景部分从背景中分离出来的技术,假设前景颜色和背景颜色局部连续,得到一个有关该点透明程度的二次能量函数,再通过求解一个稀疏线性方程组得到全局最优的掩像值. 抠图实际上是采用一个高准确度的插值算法,利用像素间的关联性和已知的精确值,通过计算、求解、插值、扩散得到其他未知的值. 由于使用预处理共轭梯度算法求解大型拉普拉斯矩阵方程,给整个处理过程带来了巨大的运算量. 针对这

个问题,国内外许多研究者尝试进行改进^[1,14]. 本文提出一种简单而有效的修复方法——快速双边滤波方法. 在处理效果上该方法既能平滑透过率图,又能很好地保留场景深度发生突变时的边缘信息,使估计出的透过率图平滑、细腻、精确. 而在算法的复杂度方面快速双边滤波方法较软件抠图修补方法,有很大幅度的降低.

双边滤波原理上采用加权平均的方法获取图像的像素值,其在二维邻域内的权重由空域和值域平滑函数的因子乘积构成^[15]. 利用双边滤波估计的透过率为

$$t'(x) = \frac{1}{\omega(x)} \sum_{y \in \Omega(x)} G_{h_s}(\|x-y\|) \cdot G_{h_r}(|I_x - I_y|) t(x) \quad (10)$$

式中 $t(x)$ 是透过率粗估计图; $\Omega(x)$ 表示中心点 (x, y) 的 $(2N+1) \times (2N+1)$ 大小的邻域窗口; I 是图像的强度值; G_{h_s} 和 G_{h_r} 为高斯函数,即

$$G_s(x) = e^{-\frac{\|x-y\|^2}{2h_s^2}}, y \in \Omega(x) \quad (11)$$

$$G_r(x) = e^{-\frac{|I_x - I_y|^2}{2h_r^2}}, y \in \Omega(x) \quad (12)$$

$\omega(x)$ 为归一化系数,其表达式为

$$\omega(x) = \sum_{y \in \Omega(x)} G_{h_s}(\|x-y\|) G_{h_r}(|I_x - I_y|) \quad (13)$$

双边滤波器受参量 h_s 、 h_r 和 N 的控制. h_s 和 h_r 分别为空域和值域高斯模板的尺寸,其大小受输入图像的强度值 I 的影响. N 为滤波领域半径,其值越大,表示平滑作用越强,同时运算量越大. 分析去雾算法可知,本文主要耗时操作集中在双边滤波,为了提高算法的运算速度,采用文献[17]中的快速双边滤波器算法. 该算法加速的关键是将双边滤波分解成一组空间域上的滤波器,同时可以并行处理,所以大大提高了运算速度^[17].

图1给出了采用快速双边滤波以及其他细化方法对透过率粗估计图进行平滑处理的结果. 图中可以看出,粗估计图有明显的“halo”效应,文献[14]采用图像引导滤波器进行平滑,求得的透过率图层次感较好,细节信息丰富. 但当图像存有较大噪音时,会使噪音增加;文献[10]的软件抠图效果同样具有明显的平滑效果;本文方法处理后细节信息有所加强,虽然较前两种方法效果略低,但基本能抓住尖锐边缘的不连续性,并且勾勒出物体的轮廓,“halo”现象也得到较好的去除,较之粗估计的结果变得细腻、平滑.

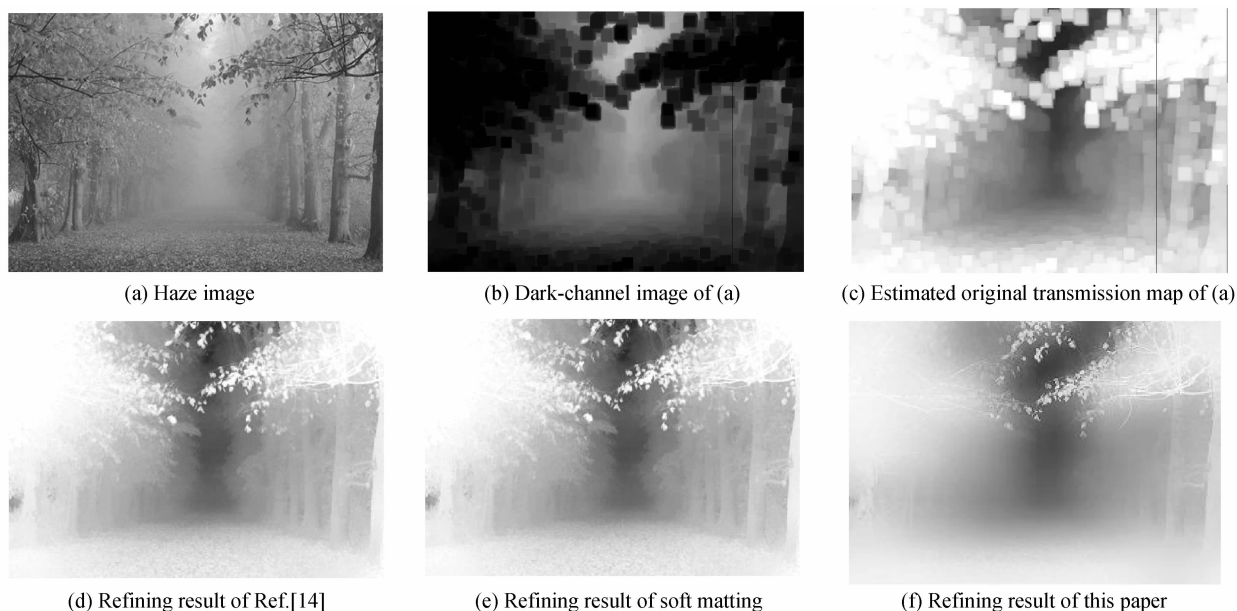


图 1 透射率细化图

Fig. 1 Result of refining transmission map

表 1 给出了上述三种细化处理的时间对比(实验平台:处理器为 2.0 GHz Intel Pentium Dual Processor 的 PC 机, MatlabR2008A). 表中可以明显反映出, 文献[10]软件抠图方法运算时间最长; 文献[14]算法较之有大幅度改善, 但是本文算法在处理时间上优势最为明显.

表 1 不同细化算法运行时间的对比

Table 1 Comparison of algorithm time of refiningt

Fig. 1(800×720)	Ref. [10]	Ref. [14]	This paper
Processing time/s	12.625	1.459	0.613

3.3 去雾后图像亮度调节

由于雾天时大气光成分参与成像, 造成图像整体呈现灰白色, 天空的亮度与晴天时相差较大, 而且物体光线的亮度通常不及大气光线, 所以把大气光成分看做常量处理会导致去雾处理后的图像亮度降低^[11-12], 颜色较实际场景图像偏暗, 因此需要调整图像亮度. 这就需要加大亮暗区域的对比度, 突出图像的细节信息. 图像对比度和亮度增强的方法有很多, 例如 gamma 校正、Retinex 算法等^[16]. 本文采用一种自适应对比度拉伸的方法, 所采用的函数是非线

性的, 全局操作, 并且参量自适应性较好, 其表达式为

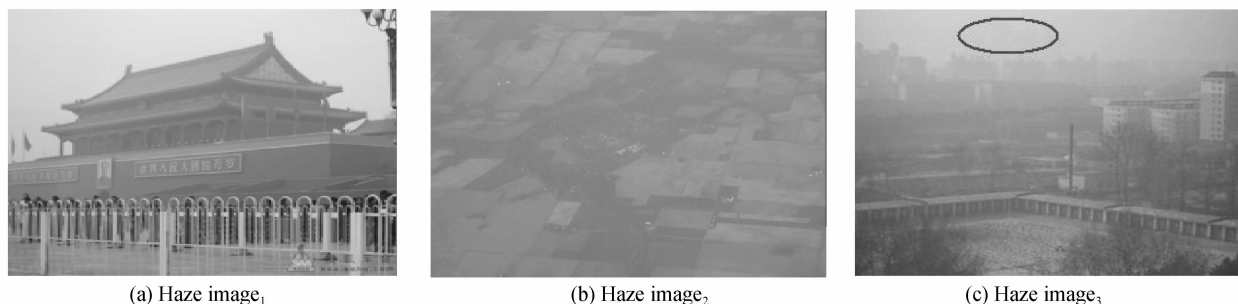
$$F(x) = x^2 / \mu, 0 \leq x < 255 \quad (14)$$

式中, μ 为图像灰度的平均值. 经过调节后图像细节会更清晰, 颜色更逼真, 更接近实际场景图像.

4 实验结果与分析

4.1 实验结果

针对雾天拍摄的户外场景图像进行实验测试(实验平台同上), 结果如图 2. 原图像图 2(a)~图 2(c)由于雾的干扰, 场景比较模糊, 细节被淹没, 颜色偏灰白色. 处理后图像图 2(d)~图 2(f)整体上比较清晰, 对比度明显提高, 色彩生动逼真, 获得了较好的视觉效果. 通过对大量雾天图像进行实验表明, 该方法适用各种不同场景的图像去雾处理, 基本不受雾的分布情况、雾的浓度以及景深变化情况的影响, 能有效去除图像中雾的影响, 保持图像的色彩真实性, 提高图像的清晰度. 对于浓雾下的场景复原, 细节信息恢复也很明显, 例如图 2 中椭圆区域标注的远处楼房及浓烟位置清晰可见.



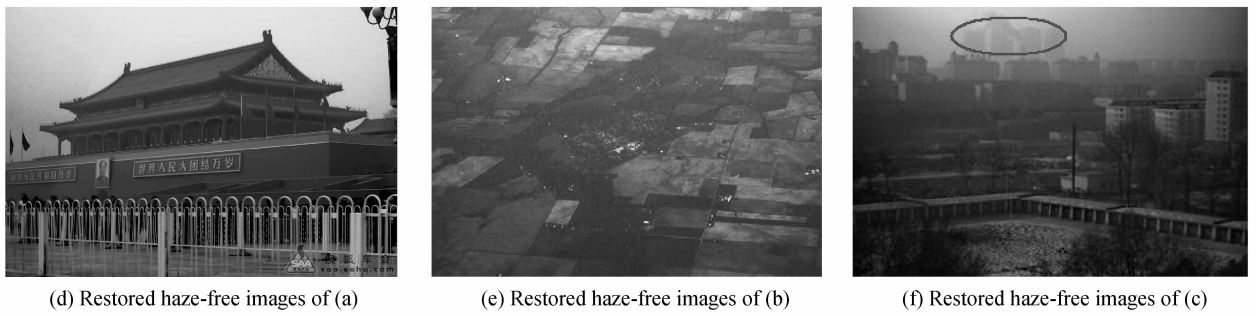


图 2 去雾结果图
Fig. 2 Haze removal results

为了验证本文算法的性能,与文献[10]算法进行比较,图 3 给出了对比结果. 图 3(a)和图 3(d)为带雾图像,图 3(b)和图 3(e)为本文结果,图 3(c)和图 3(f)为文献[10]结果. 可以看出,两种方法对雾天降质图像处理都取得了不错的效果,图像整体比

较清晰,色彩较真实,更接近实际场景. 图 3 中截取局部浓雾区域进行放大,从细节图图 3(g)、(h)和(i)上反映出,两种方法对于浓雾区域的处理效果较好,局部对比度明显提高,去雾较彻底.

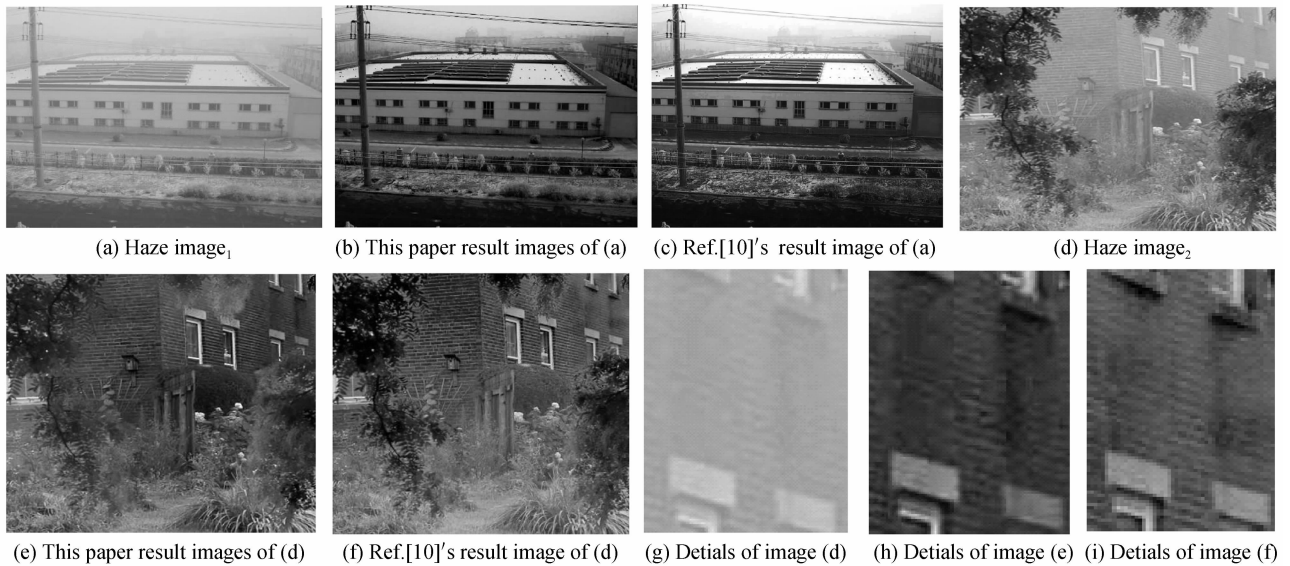


图 3 本文方法和文献[10]方法的比较
Fig. 3 Comparison between this paper's result and Ref. [10]'s result

4.2 算法性能分析

结合图像质量主客观评价指标,从算法的高效性、稳定性、效果的明显性以及使用的广泛性等方面,对本文算法以及文献[10]算法进行分析和评价.

表 2 给出了种方法针对图 2 和图 3 处理时间的对比. 可以看出,采用本文方法所处理时间大约是文献[10]方法的 5%,有较大程度的降低. 究其原因是由于利用快速双边滤波方法代替软件抠图来优化透过率图,很大程度上提高了运算速率.

针对大量实验结果图像,从对比度、信息熵以及平均梯度三个角度进行了图像质量的定量分析. 以图 2 为例,表 3 给出了评价指标的具体数值. 从结果中可以看出,本文去雾方法在对比度、信息熵和平均梯度三个指标上较之原带雾图像都有很大幅度的提高,说明结果图像的对比度较高,图像信息量较丰

富,细节较明显,一定程度上反映出暗原色图像去雾方法的优越性.

表 2 不同算法运行时间的比较
Table 2 Comparison of algorithm time

	Fig. 2 (a)	Fig. 2 (b)	Fig. 2 (c)	Fig. 3 (a)	Fig. 3 (d)
Processing time of my method/s	0.698	0.634	0.766	0.770	0.686
Processing time of paper 10' method/s	13.368	12.452	14.112	14.261	13.348

表 3 不同结果图像的对比度、熵值和平均梯度的比较
Table 3 Comparison of δ^2 , H and GMG

Fig. 2	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)
δ^2	40.636 6	43.567 8	43.761 3	65.433 2	88.046 2	95.114 8
H	12.144 3	15.767 6	16.943 0	13.881 0	13.634 1	14.990 3
GMG	7.625 3	10.556 2	9.336 2	11.440 2	15.931 0	15.884 1

5 结论

本文在深入研究基于暗原色先验去雾方法的基础上,发现了算法的时间和空间复杂度很高,制约了其实际应用这一弊端。为此,提出了一种改进的图像快速去雾方法。重点介绍了暗原色先验原理及其改进方法,并进行了实验验证,给出了实验结果和图像主客观评价指标。实验结果表明该方法有效解决了原方法的耗时长的问题,对于雾天降质图像的去雾处理取得了显著的效果。不足之处在于本文所采用的快速双边滤波方法对于光照突变的处理仍有待改进和完善。

参考文献

- [1] JI Xiao-qiang. Research on fast image defogging and visibility restoration[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, 2012: 10-15.
嵇晓强. 图像快速去雾与清晰度恢复技术研究[D]. 长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2012: 10-15.
- [2] CHEN Gong. Research on method of robust intelligent visual surveillance[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2008: 35-53.
陈功. 鲁棒的智能视频监控方法研究[D]. 合肥:中国科学技术大学, 2008: 35-53.
- [3] TAN R. Visibility in bad weather from a single image[C]. Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Alaska, USA, 2008, 1: 1-8.
- [4] FATAL R. Single image dehazing[J]. *ACM Transactions on Graphics, SIGGRAPH*, 2008, **27**(3): 1-9.
- [5] TAREL Jean-philippe. Fast visibility restoration from a single color or gray level image[C]. Proceedings of IEEE Conference on International Conference on Computer Vision, Kyoto, Japan, 2009, **10**: 20-28.
- [6] WANG Yong. Reserch on single image degraded by haze[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2010: 66-69.
王勇. 单幅雾天降质图像复原方法研究[D]. 合肥:合肥工业大学, 2010: 66-69.
- [7] McCARTNEY E J. Optics of the atmosphere; scattering by molecules and particles[J]. *John Wiley and Sons*, 1976, **12**(5): 123-129.
- [8] YANG Jing-yu, ZHANG Yong-sheng, ZOU Xiao-liang, *et al.* Using dark channel prior to quickly remove haze from a single image[J]. *Geomatic and Information Science of Wuhan University*, 2010, **16**(11): 1292-1295.
杨靖宇, 张永生, 邹晓亮, 等. 利用暗原色先验知识实现航空影像快速去雾[J]. *武汉大学学报*, 2010, **16**(11): 1292-1295.
- [9] ZHAO Ying. Research on single image-based dehazing algorithm[D]. Tianjin: Tianjin University, 2009: 87-89.
赵莹. 基于单幅图像的去雾方法研究[D]. 天津:天津大学, 2009: 87-89.
- [10] HE Kai-ming, SUN Jian. Single image haze removal using dark channel prior[C]. Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Miami, 2009: 1956-1963.
- [11] JI Xiao-qiang, DAI Ming, YIN Chuan-li, *et al.* Research on haze removal for aerial degraded image [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, **19**(7): 1660-1668.
嵇晓强, 戴明, 尹传历, 等. 航拍降质图像去雾处理技术[J]. *光学精密工程*, 2011, **19**(7): 1660-1668.
- [12] JI Xiao-qiang, DAI Ming, SUN Li-na, *et al.* Research on the image haze removal based on the dark-channel prior [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2011, **22**(6): 926-930.
嵇晓强, 戴明, 孙丽娜, 等. 暗原色先验图像去雾算法研究[J]. *光电子激光*, 2011, **22**(6): 926-930.
- [13] WANG Shi-zhen, WAN Hui-qiong. Haze removal methods of remote sensing image using dark channel prior[J]. *Journal of Geomatic Science and Technology*, 2011, **28**(3): 183-189.
王时震, 万惠琼. 应用暗原色先验规律的遥感影像去雾技术[J]. *测绘科学技术学报*, 2011, **28**(3): 183-189.
- [14] HE Kai-ming, SUN Jian, TANG Xiao-ou. Guided image filtering[C]. Proceedings of the 11th European Conference on Computer Vision. Heraklion, Crete, Greece: 2010: 1- 14.
- [15] ZHANG Zhi-qiang, WANG Wan-yu. A modified bilateral filtering algorithm [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2009, **14**(3): 444-447.
张志强, 王万玉. 一种改进的双边滤波方法[J]. *中国图像图形学报*, 2009, **14**(3): 444-447.
- [16] HAN Xi-zhen, ZHAO Jian. Enhancement of image texture and contrast combined with partial differential equation [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, **20**(6): 1382-1388.
韩希珍, 赵建. 结合偏微分方程增强图像纹理及对比度[J]. *光学精密工程*, 2012, **20**(6): 1382-1388.
- [17] YANG Qing-xiong, TAN Kar-Han, AHUJA N. Real-Time O (1) Bilateral Filtering [C]. Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Miami, 2009: 557-564.