

提高雾天激光主动成像图像质量的研究

王 森, 潘玉寨, 刘 一, 杨宝森, 曲士良

(哈尔滨工业大学(威海)光电科学系, 山东 威海 264209)

摘 要: 在雾天, 激光主动成像系统所得图像的质量明显下降。针对所得红外图像噪声大、对比度低的特点, 提出一种结合暗通道先验(Dark Channel Prior, DCP)与双边滤波(Bilateral Filter, BF)的图像处理算法。采用暗通道先验对图像进行去雾, 对去雾后的图像采用双边滤波方法做进一步去噪处理, 从而达到提高对比度降低噪声的目的。对不同算法处理后图像的主客观评价表明, 提出的算法处理后的图像有更好的视觉效果, 标准差有一倍多的提高, 信息熵和信息容量有 20% 左右的提高。

关键词: 红外图像处理; 暗通道先验; 双边滤波; 激光主动成像; 雾天

中图分类号: TN219 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)09-2392-05

Image quality improvement of laser active imaging in fog

Wang Sen, Pan Yuzhai, Liu Yi, Yang Baosen, Qu Shiliang

(Department of Opt-electronics, Harbin Institute of Technology at Weihai, Weihai 264209, China)

Abstract: The image quality of laser active imaging system degraded dramatically in fog. The obtained infrared image had the features of low contrast and serious noise. Thus an image process method combining dark channel prior and bilateral filter was proposed. The dark channel prior was adopted to remove fog from the image. Then the image was denoised using the bilateral filter. So the contrast of the image was improved and the noise was reduced. Both subjective and objective evaluation of the processed image by different methods show that the proposed method could obtain better visual effect. The standard deviation is more than doubled. The information entropy and information capacity have about a twenty percent improvement. Thus, it's an effective way to improve the quality of infrared image in fog.

Key words: infrared image processing; dark channel prior; bilateral filter; laser active imaging; foggy weather

收稿日期: 2013-01-07; 修订日期: 2013-02-17

基金项目: 哈尔滨工业大学科研创新基金(HIT.NSRIF.2009146); 山东省自然科学基金(ZR2010FQ017); 威海市科技计划项目(2011DXGJ09)

作者简介: 王森(1988-), 男, 硕士生, 主要研究领域为红外图像处理、激光主动成像技术。Email:wangsen9090@126.com

导师简介: 潘玉寨(1976-), 男, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为激光及其应用技术。Email:panyzh2002@163.com

0 引言

雾天时,由于大气分子和气溶胶的吸收和散射,导致场景能见度大大降低,对交通、户外监控及海防等有严重影响。因此,研究透雾技术具有重要的现实意义^[1]。

利用红外波段的高透过率特性,采取红外激光主动照明的方法进行雾天成像,可以取得较可见光更好的效果^[1-3],但所得图像仍存在对比度低、噪声大的问题。改善图像质量方法主要包括两方面:改善激光器、CCD等硬件的性能和采用距离选通、图像处理等技术手段。改善硬件性能会增加成本甚至增加噪声,距离选通技术增加成本的同时会大大增加系统复杂性,难度大,实用性差。图像处理技术作为一种实用性强、成本低、效果明显的手段具有明显的优势。常用的红外图像处理技术包括直方图均衡化(Histogram Equalization, HE)、小波变换(Wavelet Transform, WT)等^[4]。

在红外主动成像系统中,在系统几何配置和器件参数确定后,要想得到更高质量的红外图像,就只受图像处理技术的制约了。文中将红外主动成像技术与图像处理技术结合,采用何恺明等提出的暗通道先验去雾算法^[5]处理雾天红外图像,并采用双边滤波^[6]对去雾后图像进行去噪,明显提高了雾天红外图像的质量,较常用方法有更好的处理效果。

1 红外激光主动成像系统

文中采用的红外主动成像系统如图1所示。红外激光经可变焦扩束系统后照射到目标物体,通过计算机调整云台的角度和镜头的光圈、焦距和放大倍数,即可对目标成像。其中,解/转码器用于云台、镜头与计算机之间的通信。激光器中心波长为808 nm,功率为4 W,调整扩束系统可对激光

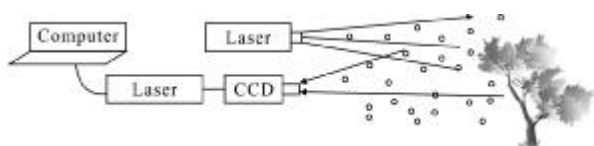


图1 红外激光主动成像系统
Fig.1 Infrared laser active imaging system

光斑大小进行控制。摄像头为CCD型探测器,型号为IK-UT373P,最低照度为0.000 06 lx,光谱响应范围为350~1 100 nm,镜头采用可变焦红外镜头。

2 暗通道先验去雾算法

2.1 雾天图像模型

McCarney的大气散射模型广泛应用于计算机视觉和图像处理领域中,根据光在雾天传输的物理特性,可描述为:

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

式中: $I(x)$ 为CCD所成图像; $t(x)$ 为光线透过率; A 为由雾散射的光; $J(x)$ 为场景反射光。笔者的目标就是通过 I 计算得到 J,A,t 的信息,对于一幅含有 N 个像素的彩色图像,有 $3N$ 个约束条件和 $4N+3$ 个未知量,这是一个病态问题。引入恰当先验(假设)就可以解决上述问题,暗通道先验很好地解决了这一问题。与其他方法相比,暗通道先验简单有效而且仅需一幅图片。

2.2 暗通道先验

对大量无雾图像的统计观察发现:在图像的任意窗口区域中,往往存在某一颜色通道值非常低甚至为零的像素。也就是说,该区域的最小强度非常接近零,此即暗通道先验。出现这种现象的主要原因是图像中阴影、彩色和黑暗物体的存在,可用下面公式描述暗通道图像:

$$J^{\text{dark}}(x)=\min_{y \in \Omega(x)} (\min_{c \in \{r,g,b\}} J^c(y)) \quad (2)$$

$$J^{\text{dark}} \rightarrow 0 \quad (3)$$

式中: J^{dark} 为暗通道图像; J 为任意图像; J^c 为 J 的一个颜色通道; $\Omega(x)$ 代表中心为 x 的窗口区域。暗通道先验是基于彩色图像提出来的,而红外图像为黑白图像。一般红外图像较暗、阴影较多,因此暗通道先验仍可成立^[5],将公式(2)中 $\min_{c \in \{r,g,b\}}$ 的算子去掉即可应用于红外图像。

2.3 图像去雾算法

2.3.1 雾散射光 A 的估算

暗通道图像反应了图像 I 中雾的分布,因此可用来估算由雾散射的光。首先找出取暗通道图像中前0.1%的最亮像素,然后将这些像素对应原图像 I 中的像素的最大值作为大气光 A 的近似。

2.3.2 透过率 $t(x)$ 的估算

假设窗口区域 $\Omega(x)$ 中透过率为常数, 记作粗略透过率 $\tilde{t}(x)$ 。对公式(1)左右同除 A 归一化并进行暗通道运算得:

$$\min_{y \in \Omega(x)} \left(\frac{I(x)}{A} \right) = \tilde{t}(x) \min_{y \in \Omega(x)} \left(\frac{I(y)}{A} \right) + 1 - \tilde{t}(x) \quad (4)$$

由暗通道先验可知, 其暗通道图像接近零。即:

$$J^{\text{dark}}(x) = \min_{y \in \Omega(x)} (J(y)) = 0 \quad (5)$$

因此可得,

$$\tilde{t}(x) = 1 - \min_{y \in \Omega(x)} \left(\frac{I(y)}{A} \right) \quad (6)$$

引入参数 $\omega(0 < \omega < 1)$ 来控制去雾程度:

$$\tilde{t}(x) = 1 - \omega \min_{y \in \Omega(x)} \left(\frac{I(y)}{A^c} \right) \quad (7)$$

对于粗略透过率图像 $\tilde{t}(x)$ 利用引导滤波^[7]进行优化可得透过率 $t(x)$ 。

2.3.3 去雾后图像

当 $t(x)$ 很小时, $J(x)t(x)$ 也非常小, 根据公式(1)直接计算 $J(x)$ 容易产生噪声。引入参数 t_0 对透过率 $t(x)$ 进行一定限制, 得到 $J(x)$ 的表达式为:

$$J(x) = \frac{I(x) - A}{\max(t(x), t_0)} \quad (8)$$

2.3.4 对 J 进行修正

不符合暗通道先验的区域往往会存在失真, 引入参数容差 K 对 J 进行修正^[8]。修正后的 $J(x)$ 的表达式为:

$$J(x) = \frac{I(x) - A}{\min\left(\max\left(\frac{K}{I(x) - A}\right) \cdot \max(t(x), t_0), 1\right)} + A \quad (9)$$

上式对 $|I - A|$ 小于 K 的区域(不满足暗通道先验)重新计算透过率, 对 $|I - A|$ 大于 K 的区域(满足暗通道先验)保持原透过率不变。

3 双边滤波

双边滤波的滤波器核心表达式如下:

$$h(x) = k^{-1}(x) \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(\xi) c(\xi, x) s(f(\xi), f(x)) d\xi \quad (10)$$

式中: $k(x)$ 为归一化常数, $k(x) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} c(\xi, x) s(f(\xi), f(x)) d\xi$ 。由上式可知, 像素 x 处的值 $h(x)$ 是其周围像素 ξ 处值 $f(\xi)$ 的加权平均, 权重由 $c(\xi, x)s(f(\xi), f(x))$ 决定。函数 $c(\xi, x)$ 的值由像素空间几何距离决定, 而函数 $s(f(\xi), f(x))$ 的值由 x 和 ξ 处像素值差决定, 因此双边滤波可以起到保边去噪的效果。函数 $c(\xi, x)$ 和 $s(f(\xi), f(x))$ 选为高斯形式, 具体表达式为:

函数 $c(\xi, x)$ 的值由像素空间几何距离决定, 而函数 $s(f(\xi), f(x))$ 的值由 x 和 ξ 处像素值差决定, 因此双边滤波可以起到保边去噪的效果。函数 $c(\xi, x)$ 和 $s(f(\xi), f(x))$ 选为高斯形式, 具体表达式为:

$$c(\xi, x) = e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{d(\xi, x)}{\sigma_d} \right)^2} \quad s(\xi, x) = e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\delta(f(\xi), f(x))}{\sigma_f} \right)^2} \quad (11)$$

式中: $d(\xi, x) = \|\xi - x\|$, $\delta(f(\xi), f(x)) = |f(\xi) - f(x)|$ 。

4 实验结果及分析

利用红外主动成像系统在雾天分别对远处树木(场景 1)和建筑(场景 2)成像, 结果如图 2(a)、图 3(a)所示。可以看出得到的红外图像存在对比度低、噪声大的问题。在 MATLAB 平台下编程, 分别采用 HE、WT 和 DCP 的方法处理雾天红外图像, 所得结果如图 2(b)~(d)、图 3(b)~(d)所示。

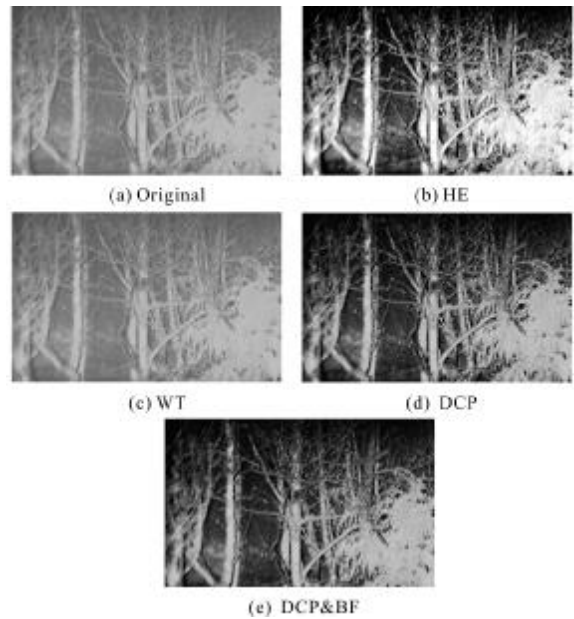


图 2 场景 1 处理结果对比

Fig.2 Results comparison of scene one

从视觉效果来看, HE 法有效地提高了图像对比度, 但图像中出现了过饱和现象, 造成图像信息的丢失; WT 法处理后图像变化不大, 去雾消噪效果不明显; DCP 法有效去除由雾带来的“面纱”效应, 图像清晰度、对比度都有明显提高。但是由于暗通道先验算法中的窗口运算导致了图像中存在锯齿现象, 图像不够平滑, 利用双边滤波的保边去噪特点可以很好地解决这个问题, 如图 4 所示。对于图 2(d)、图 3(d)

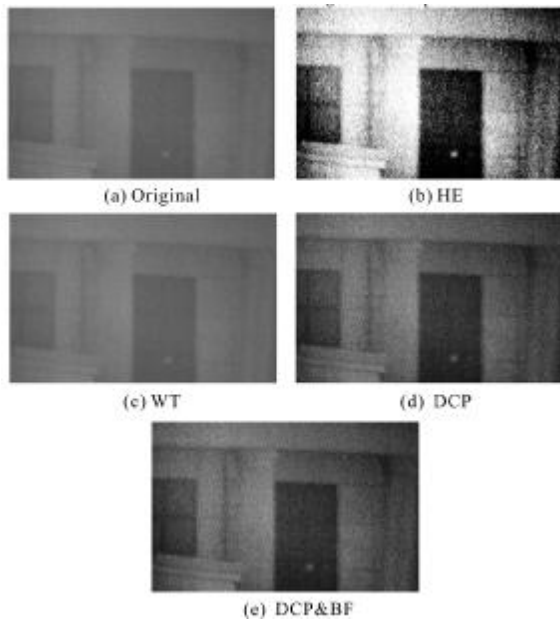


图 3 场景 2 处理结果对比

Fig.3 Results comparison of scene two

进行滤波得到结果如图 2(e)、图 3(e)所示。对比 DCP 处理图像可以看出,场景一具有比场景二更好的处理效果。场景一树林中的阴影较多,暗通道比较理想,而场景二建筑中的阴影较少,暗通道不理想。因此,树林等自然场景图像具有理想暗通道,DCP 法的处理效果更好。

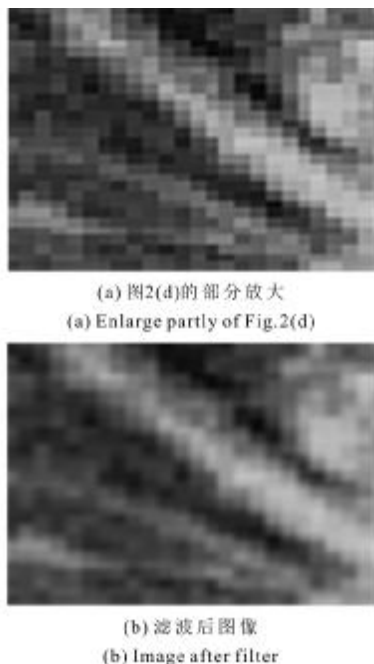


图 4 双边滤波结果对比

Fig.4 Results comparison of bilateral filter

信息熵作为一种常用的评价参数,反映了图像中的平均信息量。标准差统计图像灰度相对于平均灰度的离散情况,能够反应图像对比度的大小。信息容量是对图像的二维直方图统计,反映了图像中有意义的灰度层次的丰富程度,其中的对数变换反应了人类视觉系统的低通-对数响应特性,保证了与主观评价的一致性。对不同方法处理后的红外图像用信息熵、标准差和信息容量^[9]来进行客观评价,所得结果如表 1 和表 2 所示。可以看出:HE 法处理后,图像对比度有较大提高,但信息熵和信息容量下降较多,这是处理后图像中的过饱和现象导致的;WT 处理后三个参数都基本没变化;DCP 和 DCP&BF 处理后,标准差有一倍多提高,信息熵和信息容量有 20% 左右的提高,图像灰度层次更加丰富,对比度增加,所含信息量增大。由以上讨论可知,DCP&BF 法处理后图像质量明显提高,与主观评价结果基本一致。

表 1 场景 1 客观评价结果

Tab.1 Subjective evaluation of scene one

	Original	HE	WT	DCP	DCP&BF
Information entropy	6.484 8	5.945 9	6.475 3	7.568 2	7.884 1
Standard deviation	25.293	75.100	24.971	57.979	52.527
Information capacity	8.221 6	5.864 1	8.670 5	9.441 5	9.474 8

表 2 场景 2 客观评价结果

Tab.2 Subjective evaluation of scene two

	Original	HE	WT	DCP	DCP&BF
Information entropy	5.061 7	4.967 5	5.029 0	6.465 4	6.404 5
Standard deviation	8.349 5	74.703	8.208 2	22.08	20.669
Information capacity	7.051 0	4.947 1	7.328 4	8.460 3	8.721 4

通过对图像的主客观评价分析可以看出:暗通道先验结合双边滤波处理后的图像对比度提高,噪声减少,有更好的视觉效果,图像质量明显提高。

5 结 论

文中将最新的雾天图像处理技术与红外主动成像技术结合起来,采用暗通道先验去雾与双边滤波结合的方法对雾天红外图像进行处理,取得了较其

他常用方法更好的结果,为雾天红外图像处理提供了一种新的有效方法。但暗通道先验和双边滤波都是计算量较大、耗时较长的算法,不利于实时图像处理。在下一步工作中,要对暗通道先验算法中较费时的透过率计算部分和双边滤波进行修改或寻找替代算法,同时尝试利用其他计算机语言和 DSP 实现实时雾天红外图像处理系统。

参考文献:

- [1] Wang Dejun, Wang Jianli, Yin Yumei, et al. Near infrared real-time penetrating fog imaging method based on FPGA [J]. Chinese Journal of Optics and Applied Optics, 2009, 2(5): 445-451. (in Chinese)
王德俊,王建立,阴玉梅,等.基于FPGA的近红外实时透雾成像方法[J].中国光学与应用光学,2009,2(5): 445-451.
- [2] Li li, Gao Zhiyun, Wang Xia, et al. effects of forward-scattering of fog on range-gated system [J]. Infrared and Laser Engineering, 2004, 33(6): 562-566.(in Chinese).
李丽,高稚允,王霞,等.雾的前向散射对距离选通成像系统的影响[J].红外与激光工程,2004,33(6): 562-566.
- [3] Zhu Haibo, Zhang Shengchong, Yang Haibo, et al. System design of active imaging [J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(S): 93-94. (in Chinese)
朱海波,张晟翀,杨海波,等.激光主动成像系统设计[J].红外与激光工程,2008,37(S): 93-94.
- [4] Yu Tianhe, Hao Fuchun, Kang Weimin, et al. Summarization on infrared image enhancement technology [J]. Infrared and Laser Engineering, 2007, 36(S): 335-338. (in Chinese)
于天河,郝富春,康为民,等.红外图像增强技术综述[J].红外与激光工程,2007,36(S): 335-338.
- [5] He Kaiming, Sun Jian, Tang Xiaou. Single image haze removal using dark channel prior [J]. Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2011, 33(12): 2341-2353.
- [6] Tomasi C, Manduchi R. Bilateral filtering for gray and color images [C]// Proceedings of IEEE Conference on Computer vision, 1998.
- [7] He Kaiming, Sun Jian, Tang Xiaou. Guided image filtering [C]// ECCV, 2010: 1-14.
- [8] Jiang Jianguo, Hou Tianfeng, Qi Meibin, et al. Improved algorithm on image haze removal using dark channel prior [J]. Journal of Circuits and Systems, 2011, 16(2): 7-12.(in Chinese)
蒋建国,侯天峰,齐美彬,等.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] Xu Chunmei, Li Gang, Hu Wengang, et al. Image quality evaluation of infrared image [J]. Infrared Technology, 2004, 26(6): 72-75. (in Chinese)
徐春梅,李刚,胡文刚,等.红外图像评价质量研究[J].红外技术,2004,26(6): 72-75.