

空间激光成像跟踪系统中的图像噪声抑制技术

董吉辉^{1,2} 胡企铨² 孙东松¹

(¹ 中国科学院安徽光学精密机械研究所中国科学院大气成分与光学重点实验室, 安徽 合肥 230031)

² 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800

摘要 激光成像跟踪系统是实现空间远距离暗目标跟踪的一种极具潜力的手段,而目标在激光照射下的图像将受到激光散斑的调制作用,影响目标的识别及目标的定向精度。对激光照射下的目标图像的统计特性进行了理论分析,提出了一种对原始图像依次实施灰度线性变换、中值滤波和 Lee 滤波的组合数值滤波器对图像噪声进行抑制。处理的结果表明,采用上述组合方法,图像的噪声指数可从 0.67 降至 0.22,同时边缘保持度可达 0.96,为后续图像处理提供了必要的条件。

关键词 图像处理;噪声抑制;组合数值滤波器;激光散斑

中图分类号 TN958.98

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201138.0109002

Techniques of Depressing Image Noise in Laser Imaging Tracking System

Dong Jihui^{1,2} Hu Qiquan² Sun Dongsong¹

¹ Key Laboratory of Atmospheric and Optical Radiation, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China

² Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

Abstract Laser imaging tracking system is a potential way of tracking dark target in distance especially in space, but target image under the illumination of laser is modulated by the laser speckle and it will affect the identification and orient precision of target. Analysis of the statistical characteristic of laser imaging is given, then a combined numerical filter that utilize gray level linear transformation, median filtering and Lee filtering acting on the original image in turn is provided to reduce the image noise. The results indicate that the noise coefficient reduces from 0.67 to 0.22, and edge-preserving degree is up to 0.96, respectively, and it makes a necessary basis for the followed image processing.

Key words image processing; noise depression; combined numerical filter; laser speckle

OCIS codes 100.2000; 100.2960; 100.2550; 100.2980

1 引 言

激光由于具有亮度高和方向性强等特点,被人们应用于运动目标的跟踪并进行了广泛的研究,如空间碎片的搜索与跟踪、机器人对运动目标的跟踪等^[1~4]。激光跟踪系统具有探测距离远、对环境不太敏感、且能够获得目标的距离信息等特点。另一方面,成像跟踪相比点跟踪系统而言,具有目标识别能力且跟踪精度更高。因此,激光成像跟踪系统是实现远距离暗目标,尤其是空间目标的精确、智能跟

踪的一种极具潜力的技术手段。然而,激光照射下的目标图像会受到激光散斑的调制,这必然影响对目标的识别及跟踪精度。为了抑制散斑的影响,国内外学者提出了各种各样的图像滤波算法,如各种自适应滤波算法、同态滤波算法、形态滤波算法、小波滤波算法等^[5~10],国内以哈尔滨工业大学的李自勤等^[11]和蒋立辉等^[12]为代表,进行了广泛而深入的研究。但这些算法基本上都是就相干探测系统,如合成孔径雷达、超声成像、相干成像激光雷达等的散

收稿日期:2010-06-04; 收到修改稿日期:2010-06-13

作者简介:董吉辉(1974—),男,博士,助理研究员,主要从事光电探测、激光遥感及图像处理等方面的研究。

E-mail: dongjh@aiofm.ac.cn

斑抑制而设计的,处理效果显示它们都尚有改进的空间。

本文将讨论基于非相干探测技术的激光成像跟踪系统中的图像噪声的抑制技术,在分析图像噪声统计特性的基础上给出一种组合滤波算法,并从噪声抑制能力和边界保持能力两方面对该算法的效能进行了评估。

2 激光成像中的噪声特性分析

根据激光探测系统的接收信号统计特性可知,远场目标的粗糙表面经跟踪系统所发射的一束激光照射后,将生成一个由大量的、微小的、等振幅的、具有随机相位的高斯光束的相干散射光场,经过空间传输后到达跟踪系统的接收孔径的散射光场,将呈现出高斯光束的轮廓和构成目标粗糙表面的大量散射点源阵列的卷积和的散斑图案^[13]。从而,经过 CCD 图像传感器光电转化后所成的目标电子图像也将受到激光散射斑纹的污染。也就是说,目标的电子图像中除了含有 CCD 内部固有的泊松噪声外,还含有由信号光所产生的服从负二项式分布的散斑噪声。当噪声电子数足够多时,它们都可以用高斯分布来近似。总的噪声方差可表示为

$$\sigma_{\text{sn}}^2 = \sigma_s^2 + \sigma_n^2 = [I_s + (I_s^2/M)] + (\sigma_b^2 + \sigma_d^2 + \sigma_r^2), \quad (1)$$

由(1)式可知,目标图像中的噪声可分为两类,一类是与照射目标的信号光强度无关的噪声,也就是 CCD 图像传感器及后续电路的内部噪声,这一类噪声是加性噪声;另一类就是与照射目标的信号光相关的噪声,包括光子发射自身固有的散粒噪声和由于目标粗糙表面对入射相干光的散射所形成的散斑噪声,这一类噪声属于乘性噪声。

令 $\phi(\rho)$ 为目标表面对入射光的相位调节因子,用来描述入射光场在目标表面上的相位延迟,它是

由于目标的高度起伏而引起的相位变化。假设激光垂直照射在目标表面上,则目标表面散射光波相位的改变量为

$$\phi(\rho) = 2kh(\rho), \quad (2)$$

式中 $h(\rho)$ 表示目标表面高度相对于平面平均高度的起伏量, $k = 2\pi/\lambda$ 为入射光波(λ 为波长)的波数。

假设目标的表面高度是一个以平均高度为基准的、服从零均值高斯分布的随机变量,由相位调节因子与目标表面高度之间的线性关系可知,相位调节因子也是一个服从零均值高斯分布的随机变量,其均方根 σ_ϕ 与目标表面高度的均方根 σ_h 之间的关系为

$$\sigma_\phi^2 = 4k^2\sigma_h^2. \quad (3)$$

经推导可得^[14],落在激光成像跟踪系统接收孔径内的激光散斑的面积 S_c 为

$$S_c = \pi\omega_0^2 \left(1 + \frac{\beta^2}{2\sigma_\phi^2}\right), \quad (4)$$

假设激光散斑具有圆对称性,则激光散斑的半径 ρ_c 为

$$\rho_c = \omega_0 \sqrt{1 + \frac{\beta^2}{2\sigma_\phi^2}} = \omega_0 \left(1 + \frac{1}{4} \frac{\beta^2}{\sigma_\phi^2} - \frac{1}{16} \frac{\beta^4}{\sigma_\phi^4} + \dots\right) \approx \omega_0, \quad (5)$$

在(4)、(5)两式中, ω_0 为激光束腰, $\beta = k\omega_0 d/(2L)$, L 为激光发射装置到目标的距离, d 表示目标表面高度起伏的相关长度。

上述关系表明,对于远场($L \geq k\omega_0^2/2$)情况,利用高斯光束照射粗糙表面时,在接收面上,激光散斑半径只与激光束腰有关。

通过以上分析可知,激光照射所生成的目标图像中的散斑噪声的大小与入射光强成比例,但只要目标满足远场条件,散斑的大小却可以近似认为是一个不变的量,这对后续的图像处理十分重要,保证了图像处理中所采用的模板尺寸在目标与跟踪系统间的距离变化的时候具有一定的适应性。

图 1(a)给出了激光成像跟踪系统对空间远距

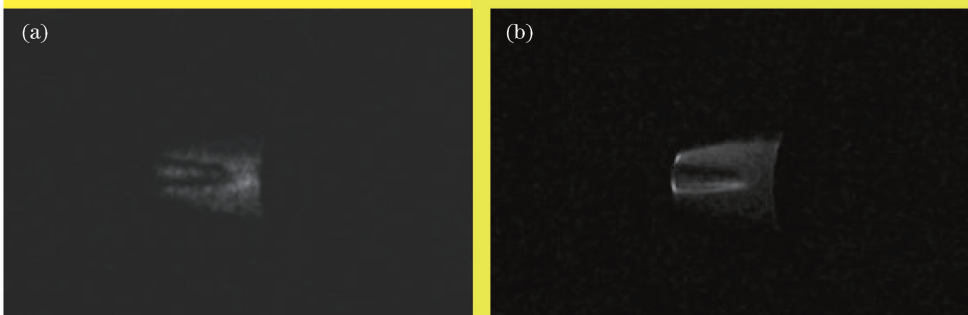


图 1 目标在激光(a)和日光灯(b)照明下的图像对比

Fig. 1 Images of target under the illumination of laser (a) and fluorescence lamp (b)

离目标所成的微弱图像一幅模拟图(用一个U盘帽模拟目标),为了显示激光图像的特点,将日光灯照明下的目标图像放在图1(b),以作比较。

从图1可以很明显地看出,激光照明时在目标的图像上形成了一种明暗相间的散斑,这是日光灯等非相干光照明时的目标图像上所没有的。

3 激光成像中的噪声抑制方法

由第2节的分析可知,激光图像中既存在加性噪声,又存在乘性噪声,这就决定了任何一种单一的滤波算法都不能取得很好的效果,需要对这两类特性不同的噪声分别处理,故而可采取分步的方法依次对这两种噪声进行抑制。

首先,利用灰度值线性变换技术^[15],改善图像对比度。对图1(a)进行增强,得到如图2所示的结果。由图2可见,经过灰度值的线性变换后,目标图像得到了很好的增强,同时可以看出图中背景区还残存大量散布的噪声点,从而有利于后续的噪声处理。

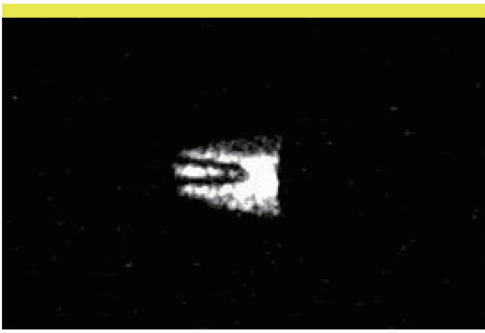


图2 经灰度值线性变换后的目标图像
Fig.2 Image of target after linear grey scale transformation

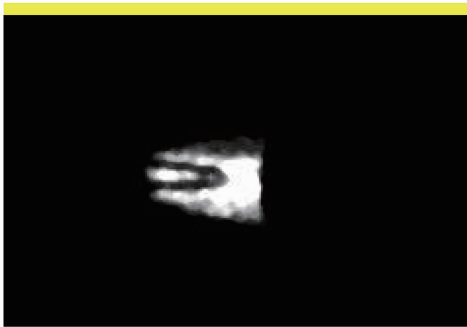


图3 经中值滤波后的目标图像
Fig.3 Image of target after median filtering

然后,利用中值滤波技术^[15],并根据目标图像的大小选取一个 3×3 的滤波窗口对图2中散布的颗粒状噪声进行滤除,得到如图3所示的结果。由

图3可见,中值滤波可以将原目标图像中散布的点噪声几乎滤除殆尽,同时还很好地保持了图像的细节。

最后,利用Lee滤波器滤除目标图像中的散斑图案。Lee滤波器^[16,17]是依据散斑图像的统计特性而设计的一种滤波器,其基本思想为:对于一个服从高斯分布的随机变量而言,95.5%的随机采样都将分布在以均值为中心的二倍均方差范围内。在一个 $(2n+1) \times (2m+1)$ 窗口内,对中心像素 (i,j) 进行处理。假设 $z_{i,j}$ 为真实值 $x_{i,j}$ 的一个先验均值,且灰度值在 $z_{i,j}$ 的二倍标准方差内的窗口中的像素服从相同的分布。由于散斑噪声是乘性的,强度范围为 $(z_{i,j} - 2\sigma_v z_{i,j}, z_{i,j} + 2\sigma_v z_{i,j})$,将在这个强度范围内的像素的均值代替中心像素作为 $z_{i,j}$ 的平滑值。令

$$\delta_{k,l} = \begin{cases} 1 & (1 - 2\sigma_v)z_{i,j} \leq z_{k,l} \leq (1 + 2\sigma_v)z_{i,j} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}, \quad (6)$$

则 $x_{i,j}$ 的估计值可表示为

$$\hat{x}_{i,j} = \frac{\sum_{k=i-n}^{i+n} \sum_{l=j-m}^{j+m} \delta_{k,l} z_{k,l}}{\sum_{k=i-n}^{i+n} \sum_{l=j-m}^{j+m} z_{k,l}}. \quad (7)$$

经过Lee滤波算法处理后的目标图像如图4所示。

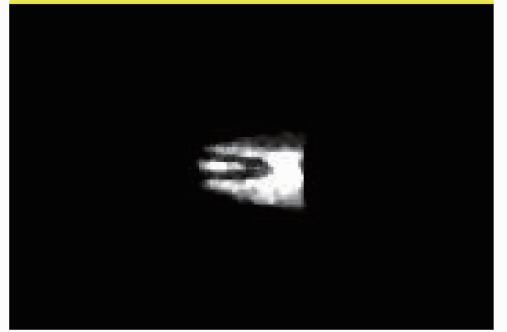


图4 经Lee滤波后的目标图像
Fig.4 Image of target after Lee filtering

4 图像滤波算法的效能评估

噪声的抑制能力是算法适用性的主要指标,可利用噪声指数 N_1 来衡量一幅图像的噪声大小,其定义为

$$N_1 = \frac{1}{MN} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \frac{\sigma_{m,n}}{\mu_{m,n}}, \quad (8)$$

式中 M, N 表示图像维数; $\sigma_{m,n}$ 表示图像中像素 (m,n) 的强度标准差; $\mu_{m,n}$ 表示图像中像素 (m,n) 的强度均值。

经过计算可知目标图像的噪声指数已降为0.22,而原图1(a)中未经处理的的目标像面上的噪声指数为0.67,图3中仅经过中值滤波处理后的目标图像中的噪声指数为0.34,可见 Lee 滤波器对散斑噪声确实有着较好的抑制作用。

另外,在成像跟踪系统中,图像的边界保持能力也是衡量一种滤波方法优劣的一个重要参数,它可以用边界相似度来表征。可利用二值形态学来提取目标的边界,首先需要将目标的灰度图像转化成二值图像,然后利用

$$\beta(A) = A - (A \ominus B) \quad (9)$$

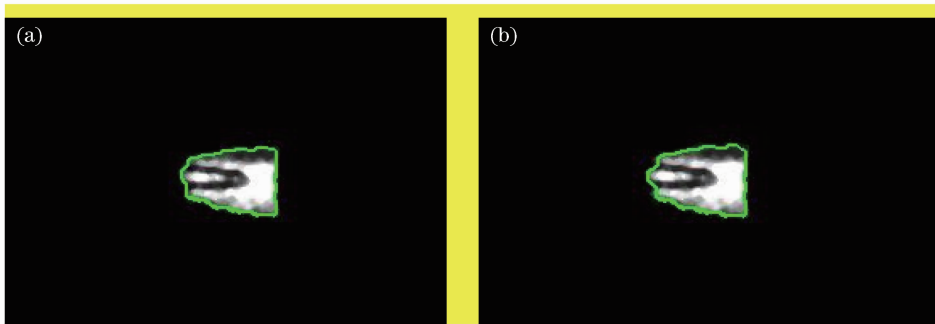


图5 激光(a)和日光灯(b)照明下经二值形态学方法提取的目标边界

Fig. 5 Boundaries abstracted by two-value morphologic of target under the illumination of laser (a) and fluorescence lamp (b)

目标的边界可以利用链码来描述,为了使链码同时具有唯一性、平移不变性、旋转不变性,可以利用形状数(归一化差分链码)进行描述,可用它作为目标图像的一个描绘子。

经过计算可得图5中的两条边界的形状数分别为

$$\begin{aligned} M'_1 = & 000000000000000170007100017000007100000010100000001 \\ & 71700000001700171700000017100717001701701010000000701 \\ & 71000100007001010007171000000701000000710000017000771 \\ & 00001700101, \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} M''_2 = & 00000001000000017000710001070000710000001010000000 \\ & 1717170000017000017000000171007170017017010100000007 \\ & 0171001007000101000717100000070100000071000001700070 \\ & 100001700101, \end{aligned} \quad (12)$$

由(11),(12)式的计算结果分析可知,经处理后的目标图像的边界保持度可达0.96,可见边界的保持度是很好的。

5 结 论

针对激光成像跟踪系统中的目标图像存在激光散斑的现象,在对激光照射下漫反射目标成像统计特性分析的基础上,提出了一种“灰度值线性变换+中值滤波+Lee滤波”的组合算法对目标图像进行噪声抑制,并利用噪声指数和边界保持度对滤波算

来提取目标的边界。在提取时,为了防止目标像面上散斑暗区的影响,有必要首先进行区域填充,以消除目标像面上的暗洞。二值形态学的填充操作可描述为

$$X_k = (X_{k-1} \oplus B) \cap A^c, \quad k = 1, 2, 3, \dots, \quad (10)$$

为了得到较为平滑的边界,可以利用二值形态开、闭运算对目标图像进行平滑处理。利用以上所述方法计算所得结果如图5所示(为做比较,同时给出了日光灯照明时所得的目标参考图)。

参 考 文 献

- 1 R. E. Johnson, P. F. Weiss. Laser tracking system with automatic reacquisition capability [J]. *Appl. Opt.*, 1968, 7(6): 1095~1102
- 2 B. Greene. Laser tracking of space debris [C]. Proceeding of 13th International Workshop on Laser Ranging, 2002. 7~11
- 3 Y. Bai, H. Zhuang, Z. Roth. Experiment study of PUMA robot

- calibration using a laser tracking system [C]. Proceedings of IEEE International Workshop on Soft Computing in Industrial Applications, 2003. 139~144
- 4 Yu Shuang, Zhao Yanzheng. Study on rotational stabilization in a laser tracking system [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University (Science)*, 2009, **14**(3):316~320
- 5 S. Ghofrani, A. Ayatollahi. Speckle suppression by adaptive nonlinear filtering [C]. Proceedings of ICSP'02, 2002, **19**(4):777~779
- 6 G. R. K. S. Subrahmanyam, A. N. Rajagopalan, R. Aravind *et al.*. Edge-preserving unscented kalman filter for speckle reduction [C]. 19th International Conference on Pattern Recognition, Tampa, 2008, 978-1-4244-2175-06/08
- 7 Hou Jianhua, Liu Xiangming, Xiong Chengyi. Speckle reduction algorithm for synthetic aperture radar images based on Bayesian maximum a posteriori estimation in wavelet domain [J]. *Opt. Eng.*, 2008, **47**(5):057004
- 8 P. Dewaele, P. Wambacq, A. Osterlinek *et al.*. Comparison of some speckle reduction techniques for SAR images [C]. Geoscience and Remote Sensing Symposium. IGRASS'90, 1990. 2417~2422
- 9 I. L. Aroquiaraj, K. Thangavel, R. Manavalan. Comparative analysis of speckle filtering techniques [J]. *International Journal of Recent Trends in Engineering*, 2009, **2**(2):120~123
- 10 Li Kai, Zhang Qingchuan. Speckle fringe pattern smoothing method based on Gabor filtering [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(10):2751~2755
- 李凯,张青川. 基于Gabor滤波的散斑条纹图平滑方法[J]. *光学学报*, 2009, **29**(10):2751~2755
- 11 Li Ziqin, Wang Qian. Edge similar degree and its application in the comparison of suppressing speckle noise algorithm [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(5):655~658
- 李自勤,王潜. 边缘相似度及其在散斑噪声抑制算法比较中的应用[J]. *中国激光*, 2006, **33**(5):655~658
- 12 Jiang Lihui, Zhao Chunhui, Wang Qi. Algorithm about suppressing speckle noise in coherent laser radar imagery [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(5):541~546
- 蒋立辉,赵春晖,王骥. 相干激光雷达图像散斑噪声抑制算法[J]. *光学学报*, 2003, **23**(5):541~546
- 13 J. W. Goodman. Some fundamental properties of speckle [J]. *Opt. Soc. Am.*, 1976, **66**(11):1145~1150
- 14 Guo Guanjun, Shao Yun. Statistical properties of the back-scattered signals from ground in laser radar applications [J]. *Acta Physica Sinica*, 2002, **51**(2):228~234
- 郭冠军,邵芸. 地面对激光雷达信号散射的统计研究[J]. *物理学报*, 2002, **51**(2):228~234
- 15 R. C. Gonzalez, R. E. Woods. Digital Image Processing (2nd Edition) [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2006. 78~125
- 16 J. S. Lee. Speckle suppression and analysis for synthetic aperture radar images [J]. *Opt. Eng.*, 1986, **25**(5):636~643
- 17 J. S. Lee, J. H. Wen, T. L. Ainsworth. Improved sigma filter for speckle filtering of SAR imagery [J]. *IEEE Transactions on Geo-Science and Remote Sensing*, 2008, **47**(1):202~213