

双边滤波与引导滤波增强激光三维图像的 图像预处理方法

李媛淼*, 孙华燕, 郭惠超

航天工程大学电子与光学工程系, 北京 101416

摘要 基于距离选通的激光成像受激光脉冲能量、距离门控时间的影响, 激光图像对比度偏低, 在此基础上进行三维成像的重建效果在整体上存在边缘信息、结构信息严重缺失的问题。因此, 提出了一种改善思路, 即将引导滤波结合双边滤波的方法应用于二维切片的预处理中, 在误差范围内改变二维切片的像素信息分布, 以获得高质量的三维重建结果。首先, 利用引导滤波增强边缘信息, 恢复目标内部的结构信息; 然后, 结合双边滤波弥补在上一步骤中出现的无效点增多的缺陷, 稳定图像的均匀度。研究表明: 采用引导滤波结合双边滤波的二维图像预处理得到的三维重建结果, 在保证距离精度的同时, 在边缘信息、结构信息的增强, 以及图像的均匀度提升等方面具有优势。

关键词 图像处理; 距离选通; 三维成像; 双边滤波; 引导滤波; 距离能量函数

中图分类号 TN911.74; TP391.72

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.151007

Image Preprocessing Method Based on Bilateral Filtering Combined with Guided Filtering to Enhance Laser Three-Dimensional Images

Li Yuanmiao*, Sun Huayan, Guo Huichao

Department of Electronic and Optical Engineering, Space Engineering University, Beijing 101416, China

Abstract Time-slicing images captured by laser-based active range-gated imaging technique are easily affected by the energy of the laser pulse and gate time. Consequently, the contrasts of time-slicing images are poor. Furthermore, the edge information and structural information are seriously lacked in the reconstruction of three-dimensional imaging. Therefore, an image preprocessing method for time-slicing images based on guided filtering combined with bilateral filtering is proposed to overcome this limitation. The proposed method changes the distribution of pixel information of time-slicing images within the error range to obtain high-quality three-dimensional reconstruction results. First, the guided filtering is employed to enhance edge information and recover structural information within the image. Then, the bilateral filtering is employed to compensate for defects introduced in the previous step (i. e., increasing invalid points). As a result, the uniformity of the image is stabilized. Experimental results demonstrate that three-dimensional reconstruction after applying the proposed preprocessing method achieves better performance in enhancing edge information, structural information, and image uniformity without sacrificing distance accuracy.

Key words image processing; range gating; three-dimensional imaging; bilateral filtering; guided filtering; range-intensity profiles

OCIS codes 100.6890; 110.6955; 330.6110

1 引言

基于距离选通原理的激光成像具有良好的抑制后向散射的能力, 与激光测距原理结合后发展出的

基于距离选通的激光三维成像具有距离精度高、作用距离远、抗干扰能力强等特性, 因而具有广泛的应用前景, 目前已应用于低对比度目标的探测^[1]、实际海域的水下成像^[2]等领域, 并实现了针对运动目标

收稿日期: 2019-01-24; 修回日期: 2019-02-19; 录用日期: 2019-03-07

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFxxx22700)

* E-mail: liyuanmiao65@foxmail.com

的距离选通二维切片的配准技术^[3]。

最初的三维重建方法通过将距离选通门采集到的二维切片序列进行切片式叠加,获得距离精度近似于距离门门宽的三维重建结果^[4-5]。这种方法的成像精度依赖于高精度的窄激光脉宽,且数据量较大。为解决以上问题,2007年,Laurenzis等^[6]提出利用距离信息与成像面接收的光强关系解算出距离信息。基于这一原理,2011年,张秀达等^[7]提出基于三幅时间切片的指数编码体制,并将这一理论应用于实验中,在指数编码体制的基础上实现了多切片多码道的实验验证^[8-9]及零误差编码序列的实验验证^[10]。因此,高效利用二维切片的像素信息重建三维图像成为关注的焦点。

受激光脉冲能量、距离门门控时间的影响,距离选通图像存在对比度低、照度不均匀、图像模糊等缺点^[11],导致三维重建的有效信息有限。本文基于发展较为成熟的基于距离能量的激光三维成像技术,通过滤波对二维切片进行预处理,进而在保证一定距离精度的同时增强三维重建效果,使三维重建效果在整体目标识别等深度应用研究中更具有竞争力。

2 基于距离能量的激光三维成像方法

2.1 成像原理

基于距离能量函数(RIP)^[12]的激光三维成像方法通过结合高精度的矩形激光脉冲与发展较为成熟的距离选通技术,利用距离信息(与飞行时间正相关)与成像面接收的光强(与二维切片的灰度值正相关)的关系,即距离能量函数,解算出距离信息。当矩形激光脉冲的脉宽 τ_p 与距离选通门门宽 τ_g 相等时,距离能量函数呈三角形,如图1所示,两帧二维切片的步长可表示为

$$\Delta z_p = \frac{c \cdot \tau_p}{2}, \quad (1)$$

式中: c 为光速。选取距离选通门的延迟时间满足

$$\tau_{\text{Delay},2} - \tau_{\text{Delay},1} = \tau_p, \quad (2)$$

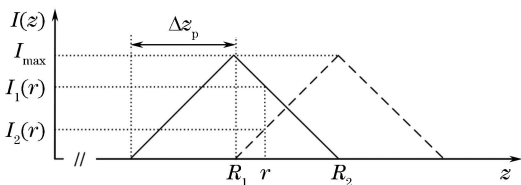


图1 用于三维重建的三角形距离能量空间相关函数

Fig. 1 Spatial correlation function of triangular range-intensity for three-dimensional reconstruction

式中: $\tau_{\text{Delay},1}$ 、 $\tau_{\text{Delay},2}$ 分别为两帧对应的时延。进行三维信息重建,两帧二维切片对应的距离能量函数依次为 $I(r,1)$ 、 $I(r,2)$,对应的观测距离^[13]依次为 R_1 、 R_2 ,在有效距离 $[R_1, R_2]$ 之间,距离信息可表示为

$$r = R_1 + \frac{\Delta z_p}{2} \cdot \frac{I_1(r)}{I_1(r) + I_2(r)} = R_2 - \frac{\Delta z_p}{2} \cdot \frac{I_2(r)}{I_1(r) + I_2(r)}. \quad (3)$$

2.2 三维成像效果不理想的原因分析

基于距离能量函数的三维重建方法采用距离选通激光主动成像技术,其成像效果不理想的原因是:照明激光能量受限、作用距离长、激光传输过程中受大气吸收和散射、目标表面对激光的反射不均匀以及激光照明区域无法完全覆盖目标区域导致的照明不均匀等。成像系统与楼房的距离是500 m,选取成像实验中的一组二维切片^[14],距离选通门的门宽与激光脉冲脉宽均为100 ns,选取延时步进为100 ns[满足(1)式的条件]的两张二维切片(像素大小为512 pixel×512 pixel),如图2(a)、(b)所示,有效距离深度为15 m,进行基于距离能量的激光三维重建。将10帧原始成像图像配准后求均值合成一张用于三维成像的二维切片,得到的两张二维切片图像及其对应的灰度分布的局部曲线图(灰度值为0时像素点颜色为黑,255时为白)如图2(c)所示。

通过观察二维切片与灰度分布曲线可知,采集到的激光图像成像质量不高,整体灰度值偏低,相同目标距离的激光照明存在差异,这些因素都对三维重建的效果产生影响。使用原始数据生成的三维距离图像中距离深度不足8 m,激光照射不均匀的目标区域未能在三维图像中显示出,重建的三维可视化效果较差,轮廓不够清晰,内部结构的重建也不够完整。由于二维切片图像的像素信息中包含重要的距离信息,因此在后续的增强处理中,需确保二维切片的像素信息稳定。

3 保边去噪滤波方法

3.1 双边滤波保边去噪

双边滤波(BF)是一种非线性滤波方法,采用两个高斯滤波核 σ_d 、 σ_r ,在降噪的同时又可保护图像边缘信息^[15]。空间域滤波核 σ_d 考虑滤波中心点受相邻像素点的影响,灰度域滤波核 σ_r 考虑灰度值间的相似性对滤波结果的作用。令待处理图像范围为 ω ,滤波窗口为 ω_b ,待处理像素点坐标为 P_0 、对应灰

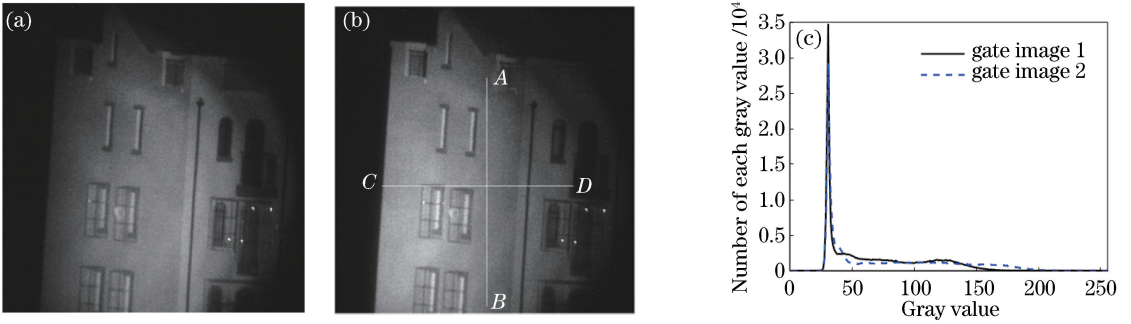


图2 待处理二维切片与灰度分布曲线。(a)(b)二维切片;(c)灰度分布曲线

Fig. 2 Original two-dimensional gate images and gray distribution curves. (a)(b) Two-dimensional gate images; (c) gray distribution curves

度值为 I_{P_0} , 邻域像素点坐标为 P 、对应灰度值为 I_P , 经双边滤波后的图像表达式为^[16]

$$O = \sum_{\omega_b \in \omega} \frac{1}{W_{\omega_b}} \left[\sum_{P \in \omega_b} G_{\sigma_d}(\|P - P_0\|) \cdot G_{\sigma_r}(I_P - I_{P_0}) I_{P_0} \right], \quad (4)$$

式中: W_{ω_b} 为滤波窗口函数; G_{σ_d} 为双边滤波器的空间临近度函数; G_{σ_r} 为灰度相似度函数。三者分别表示为

$$G_{\sigma_d} = \exp\{-\| (i, j) - [(i_0, j_0)] \|^2 / 2\} \cdot \sigma_d^2, \quad (5)$$

$$G_{\sigma_r} = \exp\{-[(I_{ij} - I_{i_0 j_0})^2 / 2] \cdot \sigma_r^2\}, \quad (6)$$

$$W_{\omega_b} = \sum_{(i, j) \in \omega_b} G_{\sigma_d}[\| (i, j) - (i_0, j_0) \|] \cdot G_{\sigma_r}(I_{ij} - I_{i_0 j_0}). \quad (7)$$

采用(3)式处理的两张二维切片的灰度值分布曲线如图3所示。

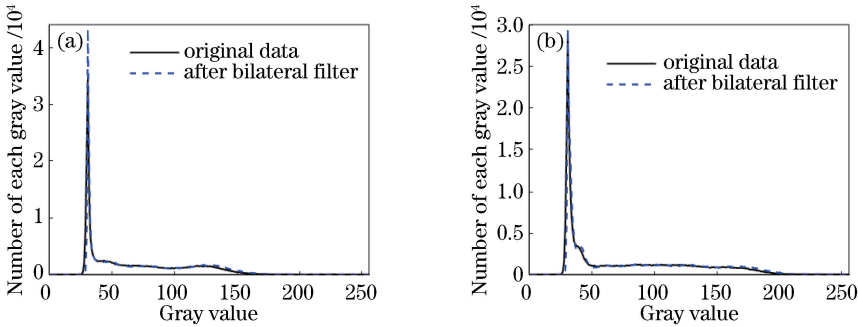


图3 双边滤波前后两张二维切片的灰度值分布曲线对比

Fig. 3 Comparison of gray value distribution curves of two two-dimensional gate images before and after bilateral filtering

对比双边滤波后的三维重建结果和未经处理的原始二维切片的三维重建结果可知, 双边滤波具有一定的保存边缘信息的能力, 对于梯度值较大的边缘具有较好的保边去噪能力, 但对于保存梯度值较小的边缘效果较差。针对这一成像特性, 需要在双边滤波前, 通过选择合适的预处理方法, 减小噪声对图像边缘信息的侵蚀, 从而最大化双边滤波的作用。

3.2 引导滤波增强边缘信息

引导滤波(GF)是一种通过使用参考图像的特征信息保留待处理图片中的某些特征的滤波方法。使用局部线性模型建立引导图像 G 与待处理图像 P 之间的关系, 是引导滤波的重要前提。令待处理图像范围为 ω , 滤波窗口为 ω_g , 则经引导滤波后的

图像 O' 为

$$O' = \sum_{\omega_g \in \omega} W_{\omega_g} \cdot P_{\omega_g}. \quad (8)$$

由于基于距离能量分布函数的激光三维重建是根据二维切片的灰度信息进行三维信息解算的, 经预处理后的图像灰度信息与原图的灰度信息的差异应控制在一定范围内, 因此需要使滤波窗口 ω_k 内 $|P - O|$ 的值最小, 通过求取代价函数的最小值得到适当的系数 a_k 与 b_k 。代价函数为

$$E(a_k, b_k) = \sum_{(i, j) \in \omega_g} [(a_k G_{ij} + b_k - P_{ij})^2 + \epsilon a_k^2]. \quad (9)$$

令引导图像 G 在滤波窗口 ω_g 的均值为 μ_{Gk} 、方差为 σ_{Gk}^2 。采用最小二乘法得到系数 a_k 与 b_k 为

$$a_k = \frac{\sum_{(i,j) \in \omega_g} (G_{ij} \cdot P_{ij} - \mu_{Gk} \cdot P_{ij}) / |\omega_g|}{\sigma_{Gk}^2 + \epsilon}, \quad (10)$$

$$b_k = \frac{\sum_{(i,j) \in \omega_g} P_{ij}}{|\omega_k|} - a_k \cdot \mu_{Gk}. \quad (11)$$

当滤波窗口针对完整的图像区域 ω 进行处理时,输出图像为

$$O_{ij} = \bar{a}G_{ij} + \bar{b}, \quad (i,j) \in \omega, \quad (12)$$

式中: \bar{a} 、 \bar{b} 分别为 a_k 、 b_k 在完整图像区域 ω 内的均值。当无参考图像时,引导滤波支持输入图像作为

参考图像进行滤波。滤波窗口的表达式为

$$W_{\omega_g} = \sum_{(i,j) \in \omega_g} \left[1 + \frac{(P_{ij} - \mu_{Gk})^2}{\sigma_{Gk}^2 + \epsilon} \right] \cdot \frac{1}{|\omega_g|^2}. \quad (13)$$

为达到增强边缘信息的目的,将引导滤波后的图像 O 代入下式,得到最终的输出图像 Q :

$$Q = (P - O) \cdot x + O, \quad (14)$$

式中: x 为细节层的层数,取值为自然数。当 $x=4$ 时,二维切片序列的引导滤波结果如图 4(a)、(b) 所示,细节层信息如图 4(c)、(d) 所示。

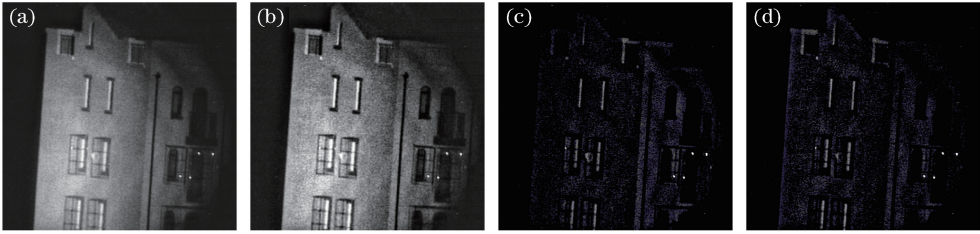


图 4 包含 4 层细节层的引导滤波结果。(a)(b) 引导滤波后的结果;(c)(d) 4 层细节层图像

Fig. 4 Results of guided filtering of image including four-layer detail information. (a)(b) Results after guided filtering; (c)(d) images of four detail layers

对比引导滤波前后的二维切片可以得出:1) 引导滤波后的图像中,含有目标的区域灰度有所增强;2) 受激光光源照射不均影响的区域得到了修复,具体表现为同一距离区域内相同材料结构部分的灰度值趋近,且圆形激光光斑的轮廓不再明显。

第一帧二维切片原图以及经分别含有 2、4 层细节信息的引导滤波后的二维切片的灰度值分布曲线如图 5(a) 所示,随着细节层层数的增加,对灰度值较小的背景噪声部分的增强作用增加,对灰度值分布的影响增大。选取灰度值为 44 的点作为图像二值化的临界点,位置如图 5(a) 中“×”所示。经计算,对于含有 2、4 层细节信息的引导滤波后的二维切片,其灰度值高于 44 的有效像素点数相比于原图像的有效像素点数(148595)分别减少了 2.57%、8.22%。基

于结构相似度并采用结构相似性(SSIM)进行衡量,SSIM 值越接近 1 表示滤波后图像与原图越相近。对于含有 2、4 层细节信息的引导滤波后的二维切片与原始图像的 SSIM 值如图 5(b)、(c) 所示。

因而,引导滤波可在误差范围内实现有效滤除背景噪声、减弱激光光源照射不均匀对成像质量的影响、增强目标区域的边缘信息的作用。这一预处理对于后期三维重建效果的影响十分重要。

根据无参考图像的图像空间质量评估(BRISQUE)模型^[17],对包含 0~5 层细节层的三维重建图像的失真情况进行量化评估,评分结果如表 1 所示。评分越趋近于 0 的图像,其成像质量越好,因此选取包含 4 层细节信息的引导滤波作为本文后续滤波处理的预处理方法。

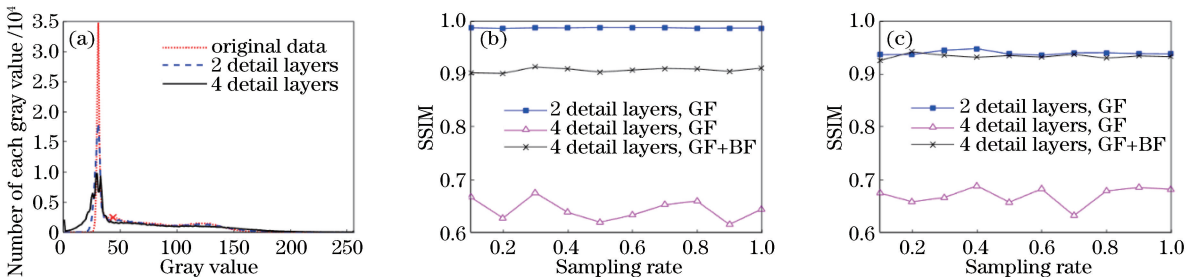


图 5 预处理对原图的影响。(a) 引导滤波前后灰度分布对比;(b)(c) 切片序列的 SSIM 值对比

Fig. 5 Effect of pre-processing on original image. (a) Comparison of gray value distribution curves before and after guided filtering; (b)(c) comparison of SSIM values of time-slicing images

表 1 基于 BRISQUE 模型的图像质量评价结果

Table 1 Image quality evaluation based on BRISQUE model

Detail layer	0	2	3	4	5
Quality score (0-100, 0 represents the best quality, and 100 represents the worst)	69.8214	49.9775	41.6417	40.5178	42.7348

3.3 引导滤波结合双边滤波的保边去噪

对(13)式处理后的图像 Q 进行双边滤波,由于引导滤波已经完成了对边缘信息的增强,因此为达到保边去噪的最优效果,双边滤波窗口 ω_b 与引导滤波窗口 ω_g 应满足

$$\omega_b > \omega_g, \quad (15)$$

最终的二维输出图像为

$$I = \sum_{\omega_b \in \omega} \frac{1}{W_{\omega_b}} \left[\sum_{Q \in \omega_b} G_{\sigma_d}(\|Q - Q_0\|) \cdot G_{\sigma_r}(I_Q - I_{Q_0}) I_{Q_0} \right]. \quad (16)$$

对引导滤波结合双边滤波处理后后的二维切片进行三维重建。

4 结果与讨论

图 6 为各种滤波的三维重建结果。从成像的主观效果来看,滤波后的三维重建效果优于原始图像的重建效果,起到了保护边缘信息的作用。引导滤波在保护边缘信息的同时,又能起到对于目标内部

的结构信息(如大楼主体部分的窗户区域,右上角天台的栅栏区域)的恢复作用,但随着细节层层数的增加,三维重建图像中出现的无效点的个数增多,进而导致结构信息的失真。引导滤波结合双边滤波的方法不仅提升了有效信息的像素灰度值,而且在保持三维重建过程中二值化阈值相同的情况下,弥补了无效点增多的缺陷,使三维重建既能够保留边缘信息、内部结构信息,又可以稳定图像的均匀度。

分别提取如图 2(b)所示的目标 AB、CD 两个位置在原始图像及引导滤波结合双边滤波方法的三维重建的像素信息。AB、CD 所在列、行的全部像素信息散点图分别如图 7 所示。位置 AB、CD 均为大楼侧面的一段平滑楼体,反射率均匀,AB 相对于距离门的距离可近似为线性关系,CD 相对于距离门的位置为近似的两段线性关系,滤波前后的距离信息分布与理想情况的预期^[12]相符,即在线性区域内起伏较为平滑,且滤波后的距离信息分布没有引起较大误差。

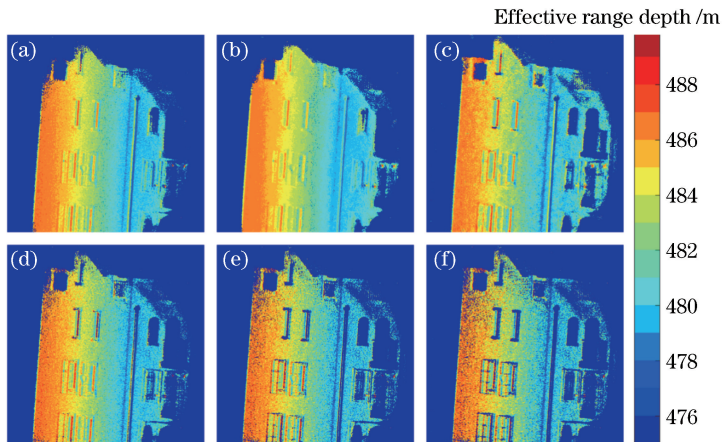


图 6 三维重建图像。(a)原图重建;(b)双边滤波后重建;(c)4层细节层的引导滤波结合双边滤波的重建;(d)2层细节层的引导滤波重建;(e)3层细节层的引导滤波重建;(f)4层细节层的引导滤波重建

Fig. 6 Three-dimensional reconstruction images. (a) Reconstruction of original image; (b) reconstruction of images after bilateral filtering; (c) reconstruction of images after guided filtering with four detail layers combined with bilateral filtering; (d) reconstruction of images after guided filtering with two detail layers; (e) reconstruction of images after guided filtering with three detail layers; (f) reconstruction of images after guided filtering with four detail layers

图 8 提取了图 6(a)与图 6(f)中大小分别为 $70 \text{ pixel} \times 70 \text{ pixel}$ 、 $120 \text{ pixel} \times 120 \text{ pixel}$ 的两个边缘区域,并分别对比了原图重建结果[图 8(a)、(c)]与引导滤波结合双边滤波方法的重建结果[图 8

(b)、(d)]。由图 8(a)、(c)可知:受背景噪声、激光照明不均匀影响较大的目标区域,其边缘区域的灰度值偏低,导致二值化过程中含有目标信息的像素点被剔除,因而三维重建结果边缘信息缺失较严重,

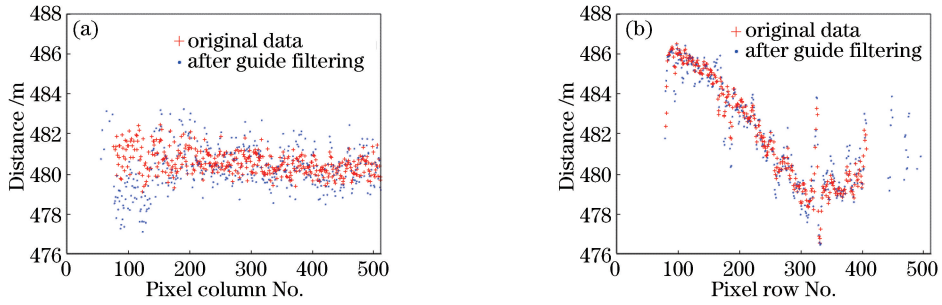


图 7 三维重建像素信息的采样。(a) 260 列;(b) 300 行

Fig. 7 Sampling of pixel information in three-dimensional reconstruction. (a) 260 columns; (b) 300 rows

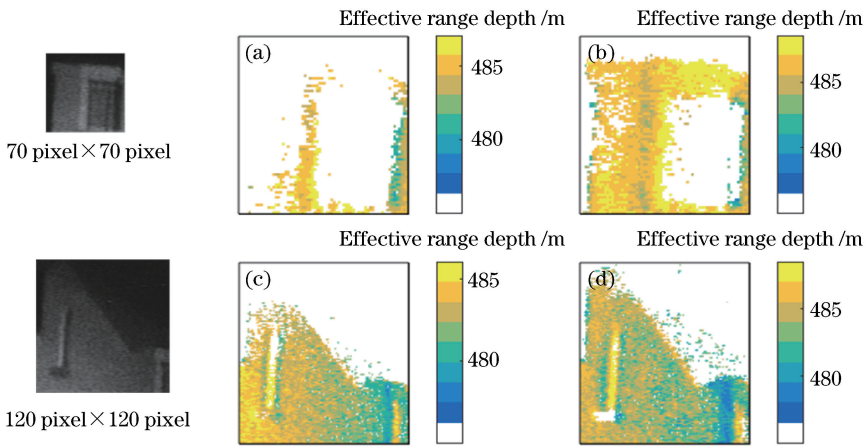


图 8 图 6(a)、(c)的局部结构提取。(a)(b) 70 pixel×70 pixel 边缘区域;(c)(d) 120 pixel×120 pixel 内部结构区域

Fig. 8 Local structure extraction from Figs. 6(a) and 6(c). (a)(b) Edge area in 70 pixel×70 pixel; (c)(d) internal structure area in 120 pixel×120 pixel

内部结构的形状发生变化。由图 8(b)、(d)可知:引导滤波结合双边滤波的方法在保证距离精度的同时可以有效弥补上述缺陷,边缘信息与内部结构信息与实际目标基本一致。

5 结 论

针对采用原始二维切片数据生成三维图像时出现的边缘信息、内部结构信息缺失问题,提出了一种改善思路。将引导滤波结合双边滤波的方法应用于二维切片的预处理中,在误差范围内改变二维切片的像素信息分布,以获得高质量的三维重建结果。预处理采用引导滤波降噪并增强边缘、内部结构信息,再利用双边滤波保边去噪的特性减少因引导滤波引起的无效点,提升图像的均匀度。结果表明:采用引导滤波结合双边滤波的二维图像预处理方法相比于单一的去噪和增强方法,其三维重建结果在边缘、结构信息的增强、图像的均匀度提升等方面具有优势。该方法适用于激光主动成像的图像预处理中,能够在有效增强图像效果的同时确保其像素分布信息稳定,为激光主动图像的后续应用提供与原

始数据误差较小的滤波后的图像。

参 考 文 献

[1] Wang X W, Cao Y N, Liu C, *et al.* Low contrast target detection based on 2D/3D range-gated imaging [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(9): 2854-2859.
王新伟, 曹忆南, 刘超, 等. 2D/3D 距离选通成像的低对比度目标探测[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(9): 2854-2859.

[2] Laurenzis M, Christnacher F, Scholz T, *et al.* Underwater laser imaging experiments in the Baltic Sea[J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 9250: 92500D.

[3] Fan Y C, Zhao H L, Sun H Y, *et al.* Application of cross-correlation algorithm in moving target range-gated three-dimensional laser active imaging [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(6): 0617003.
范有臣, 赵洪利, 孙华燕, 等. 互相关算法在运动目标距离选通激光三维成像中的应用[J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(6): 0617003.

- [4] Busck J, Heiselberg H. Gated viewing and high-accuracy three-dimensional laser radar [J]. Applied Optics, 2004, 43(24): 4705-4710.
- [5] Steinvall O. Laser radar work at FOI [J]. Proceedings of SPIE, 2009, 7382: 738202.
- [6] Laurenzis M, Christnacher F, Monnin D. Long-range three-dimensional active imaging with superresolution depth mapping [J]. Optics Letters, 2007, 32(21): 3146-3148.
- [7] Zhang X D, Yan H M. Three-dimensional active imaging with maximum depth range [J]. Applied Optics, 2011, 50(12): 1682-1686.
- [8] Laurenzis M, Bacher E. Image coding for three-dimensional range-gated imaging [J]. Applied Optics, 2011, 50(21): 3824-3828.
- [9] Wang X W, Cao Y N, Cui W, *et al.* Three-dimensional range-gated flash LIDAR for land surface remote sensing [J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9260: 92604L.
- [10] Laurenzis M, Bacher E. Three-dimensional laser-gated viewing with error-free coding [J]. Optical Engineering, 2018, 57(5): 053103.
- [11] Xu B, Huang Y B, Fan C Y, *et al.* Analysis of equivalent optical properties of heterogeneous aerosols in stratosphere [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(6): 1587-1592.
徐博, 黄印博, 范承玉, 等. 平流层非均匀气溶胶粒子等效光学特性的数值分析 [J]. 红外与激光工程, 2012, 41(6): 1587-1592.
- [12] Wang X W, Li Y F, Zhou Y. Triangular-range-intensity profile spatial-correlation method for 3D super-resolution range-gated imaging [J]. Applied Optics, 2013, 52(30): 7399-7406.
- [13] Laurenzis M, Christnacher F, Monnin D, *et al.* 3D range-gated imaging in scattering environments [J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7684: 768406.
- [14] Guo H C, Sun H Y, Wang S, *et al.* Study on super-resolution three-dimensional range-gated imaging technology [J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10615: 106153M.
- [15] Tomasi C, Manduchi R. Bilateral filtering for gray and color images [C] // Sixth International Conference on Computer Vision (IEEE Cat. No. 98CH36271), January 7-7, 1998, Bombay, India. New York: IEEE, 1998: 601059.
- [16] Liang G S, Wang R W, Wen X B. Image denoising based on bilateral filtering and non-local means [J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2015, 26(11): 2231-2235.
梁广顺, 汪日伟, 温显斌. 基于双边滤波与非局部均值的图像去噪研究 [J]. 光电子 • 激光, 2015, 26(11): 2231-2235.
- [17] Mittal A, Moorthy A K, Bovik A C. No-reference image quality assessment in the spatial domain [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2012, 21(12): 4695-4708.