

# 基于像素点分类的激光主动成像混合滤波

王灿进<sup>1,2,3</sup> 孙涛<sup>1,2</sup> 陈娟<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033  
<sup>2</sup> 激光与物质相互作用国家重点实验室, 吉林 长春 130033  
<sup>3</sup> 中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 为了在滤波的同时较好地保留边缘细节,提出一种基于像素点分类的激光主动成像混合滤波方法,将像素点根据其轮廓曲率进行分类,使用 Lee 滤波去除散斑噪声,使用模糊加权均值滤波器滤除其余混合噪声。定义一种轮廓点筛选方法,从含噪图像中提取候选轮廓点。将轮廓细化,剔除噪声引起的伪轮廓和强度较小的轮廓后,计算轮廓曲率,并根据轮廓曲率将图像上的像素点分为强信息点、弱信息点和无信息点。对于属于不同类的像素点,使用不同滤波参数的 Lee 和模糊加权均值滤波器进行滤波,使算法具备像素级的自适应性。实验结果表明,所提算法比 Lee、Kuan 和小波软阈值滤波有更好的去噪能力和轮廓细节保留能力。

**关键词** 图像处理; 混合滤波; 激光主动成像; 像素点分类; 轮廓曲率; 模糊加权均值滤波

**中图分类号** TN957.52; TP391.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0309001

## Hybrid Filter Based on Pixel Classification for Laser Active Imaging

Wang Canjin<sup>1,2,3</sup> Sun Tao<sup>1,2</sup> Chen Juan<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China  
<sup>2</sup> State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Changchun, Jilin 130033, China  
<sup>3</sup> University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** In order to keep the detail information of edges while suppressing noise in laser active imaging, hybrid filter based on pixel classification is proposed. Based on contour curvature, the pixels are divided into different classes. Lee filter is used to suppress speckle noise and fuzzy weighted averaging filter is used to suppress other mixed noise. A contour point screening method is proposed to select candidate contour points from noisy image. Then the contours are thinned into single pixel. After eliminating the bogus contours brought by the noise and those that are comparatively week, the contour curvatures are calculated. According to the contour curvature, the pixels of the image are divided into different classes. For the pixels belonging to different classes, fuzzy weighted averaging filter and Lee filter with different filter parameters are used, which makes the proposed method own pixel-level adaptability. Experimental results indicate that the proposed method outperform the classical Lee, Kuan and wavelet soft-thresholding filter in denoising and keeping detail edge information.

**Key words** image processing; hybrid filter; laser active imaging; pixel classification; contour curvature; fuzzy weighted averaging filter

**OCIS codes** 100.2000; 100.2980; 100.3008; 100.4997; 110.6150

收稿日期: 2013-07-26; 收到修改稿日期: 2013-09-09

基金项目: 吉林省重大科技攻关专项(20120615)

作者简介: 王灿进(1987—),男,博士研究生,主要从事激光主动成像模式识别方面的研究。

E-mail: wcj@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 陈娟(1961—),女,研究员,博士生导师,主要从事光电跟踪与伺服控制技术等方面的研究。

E-mail: chenjuan@mail.ccut.edu.cn(通信联系人)

# 1 引 言

激光主动成像作为一种新兴的成像技术,具有抗干扰能力强、成像对比度高、不受环境限制等优点,在夜晚、雾霾等能见度较低的天气条件下,对于目标的定位、识别、跟踪和导航具有重要作用<sup>[1]</sup>。但是激光主动成像采集的图像会受到散斑噪声、光子散粒噪声和背景辐射噪声等多种噪声的影响,图像变得模糊不清,严重影响后续的目标识别和跟踪。因此研究激光主动成像去噪方法具有重要意义。

目前关于激光主动成像去噪的研究已经取得了一定的进展。早期的 Lee 等<sup>[2-4]</sup>在滑动窗口内计算当前像素的替代值,计算方法简单;Parthiban 等<sup>[5]</sup>使用 Contourlet 变换进行多尺度的散斑降噪处理,该方法拥有比小波分解更好的去噪效果;Kang 等<sup>[6]</sup>提出一种广义多尺度轮廓探针(CB)形态学滤波方法,使用全方向的多结构元素和 CB 开闭运算形态学滤波器去除散斑;Roomi 等<sup>[7]</sup>首先使用混合中值滤波滤除噪声,并引入粒子群优化(PSO)技术调整局部像素来恢复降噪后的图像;此外 Jarabó-Amores 等<sup>[8]</sup>提出基于均值原移算法的去噪方法,Hyenkyun 等<sup>[9]</sup>提出基于交互技术的降噪方法。国内对激光主动成像的研究起步较晚。蒋立辉等<sup>[10]</sup>提出一种非线性加权均值多方向形态滤波算法,在抑制散斑噪声的同时能较好地保留边缘信息。李晓峰等<sup>[11]</sup>提出一种基于同态滤波和小波域 Stein 无偏风险估计(SURE)的激光主动成像降噪方法,该方法胜在计算量小。许毅玢等<sup>[12]</sup>将小波变换和中值滤波相结合,取得了较理想的滤波效果。

以上算法大部分单纯针对散斑噪声,并未考虑激光主动成像中混合噪声的影响。此外上述方法对整个图像均使用同一的滤波结构,这会导致抑制噪声和保留细节信息之间的矛盾。因此本文提出一种将 Lee 滤波和模糊加权均值滤波相结合的自适应滤波方法。Lee 滤波器能去除散斑噪声,模糊加权均值滤波器能去除其余的噪声,将二者结合适用于激光主动成像中的混合噪声去除。同时定义一种轮廓点提取和轮廓曲率计算方法,根据轮廓曲率将像素点分为强信息点、弱信息点和无信息点,不同的点类采用不同参数的滤波器,使算法具有像素级的自适应性。实验证明该方法能够有效去除激光主动成像中的各种噪声,并很好地保留了细节信息。

## 2 激光主动成像中的噪声

分析激光主动成像条件下的噪声性质,是选用

合适的滤波器将其滤除的前提。根据来源不同,激光主动成像中的噪声主要分为散斑噪声、CCD 噪声和背景辐射噪声<sup>[11]</sup>。图 1 是实际拍摄的激光主动成像图,目标距离为 500 m,激光功率为 3 W,散射角为 5 mrad,下面结合它分析噪声的性质。



图 1 实拍激光主动照明图

Fig. 1 Actual image in laser active imaging

### 2.1 散斑噪声

散斑噪声是一种乘性噪声,表现为图像中亮或暗的斑块,如图 1 中背景区域的亮暗斑。它是由于激光的相干性和目标表面凹凸不平引起的。在图像的均匀区域或者弱纹理区域,完全发育的散斑噪声数学模型为

$$I = I_0 \cdot I_{sn}, \quad (1)$$

$$p(I_{sn}) = \frac{L^L I_{sn}^{L-1}}{\Gamma(L)} \exp(-LI_{sn}), \quad (2)$$

式中  $I_0$  表示实际信号强度,对应不包含噪声的图像, $I_{sn}$  表示散斑噪声强度, $I$  表示成像装置接收到的信号强度,对应含噪声图像, $\Gamma(\cdot)$  表示伽玛函数。(2) 式表示散斑噪声  $I_{sn}$  服从均值为 1,方差为  $1/L$  的伽马分布,其中  $L$  是常数。

假设目标表面高度以平均高度为基准并服从高斯分布,激光成像系统接收孔径内的散斑形状具有圆对称性,则散斑半径  $\rho_c$  为<sup>[13]</sup>

$$\rho_c = \omega_0 \sqrt{1 + \frac{\beta^2}{2\sigma_\phi^2}} = \omega_0 \left( 1 + \frac{1}{4} \frac{\beta^2}{\sigma_\phi^2} - \frac{1}{16} \frac{\beta^4}{\sigma_\phi^4} + \dots \right) \approx \omega_0, \quad (3)$$

式中  $\omega_0$  表示激光束腰, $\beta = k\omega_0 d / (2D)$ , $d$  为目标表面高度起伏的相关长度, $D$  为成像系统到目标的距离, $\sigma_\phi$  称为相位调节因子均方根,与目标表面特性有关。由(3)式可知对于远场,散斑半径只与激光束腰有关,可认为是一个不变的量。

### 2.2 CCD 噪声

CCD 噪声包括暗电流、光子散粒噪声和读出噪声。暗电流引起的噪声可以分为两部分:一是载流子的热噪声,服从泊松分布;二是 CCD 像素晶体中

缺陷大量集中引起的脉冲尖峰,称为暗电流的不一致性。光子散粒噪声是器件的固有噪声,光信号注入 CCD 光敏区产生电荷的随机性导致了光子散粒噪声。读出噪声是由 CCD 的输出和后续处理电路产生的,包括复位噪声(KTC 噪声)和  $1/f$  噪声。

### 2.3 背景辐射噪声

背景辐射噪声主要包括背景的自然辐射、反射和大气传输噪声等。大气传输噪声由后向散射、湍流和折射等引起,一般表现为高斯分布。

CCD 噪声和背景辐射噪声为与信号无关的加性噪声,这些噪声相比于散斑噪声强度较小,逐个分析噪声的分布及性质是困难的。对于此类小的混合噪声,可近似为高斯噪声。高斯噪声掺杂在散斑噪声中,共同导致目标边缘的模糊,如图 1 中枪尖的位置。

由以上分析可知,激光主动成像中包含多种噪声,其中散斑噪声是最主要的成分。对于散斑噪声,可以采用 Lee 滤波将其滤除。文献[2]指出, Lee 滤波器采用局部均值与方差估计先验均值与方差,能够较好地保留边缘信息,对于乘性噪声也可以进行线性化。而对于多种加性噪声构成的高斯噪声,这里采用模糊加权均值滤波器滤除。

若对整个图像采用结构相同的滤波器,当 Lee 滤波器或者模糊加权均值滤波器步长选择较大时,在包含较多的细节信息的部位(多数为轮廓曲率较大的位置),有可能将图像的有用信息也一同滤除,而当 Lee 滤波器或者模糊加权均值滤波器的步长选择较小,在包含细节信息较少的部位(轮廓曲率较小和无轮廓的位置),则无法很好地滤除噪声。为了在较好滤除轮廓噪声的同时保留轮廓的细节信息,提出一种基于像素点分类的激光主动成像轮廓去噪方法,根据轮廓曲率的分布将图像上的点分为强信息点(曲率较大的部位)、弱信息点(曲率较小的部位)和无信息点(无轮廓的部位),不同的点类采用不同参数的滤波器。

## 3 基于轮廓曲率的去噪方法

### 3.1 基于轮廓曲率的像素点分类

#### 1) 轮廓曲率

采用十一一点法计算轮廓曲率,该方法计算区域较大,对噪声具有较好的稳健性。设  $P_i$  表示图像上的像素点,  $R_{i1} = P_i - P_{i-5}$ ,  $R_{i2} = P_{i+5} - P_i$ , 则曲率  $\rho$  表达为

$$\rho = \text{sign}[(x_i - x_{i-5})(y_{i+5} - y_i) - (y_i - y_{i-5})(x_{i+5} - x_i)] \frac{R_{i1} R_{i2}}{\|R_{i1}\| \|R_{i2}\|}, \quad (4)$$

式中  $\| \cdot \|$  表示二阶矩运算。

#### 2) 强信息点、弱信息点与无信息点

使用轮廓的曲率来划分轮廓上点的重要性,将图像上轮廓曲率较大的点及其邻域称为强信息点(PSS),轮廓曲率较小的点及其邻域称为弱信息点(PWS),既不属于 PSS 又不属于 PWS 的点称为无信息点(PNS)。

因为原始图像包含散斑噪声、CCD 噪声和背景辐射噪声,目标和背景均淹没在噪声中,用普通的边缘提取算子无法直接提取轮廓。为此定义一种轮廓点筛选方法:

① 对图像进行一次  $3 \times 3$  中值滤波。

② 计算当前像素点  $0^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $45^\circ$  和  $135^\circ$  的 5 邻域加权梯度值,分别表达为

$$d_1 = f(i, j-1) - f(i, j+1) + \frac{1}{2}[f(i, j-2) - f(i, j+2)], \quad (5)$$

$$d_2 = f(i-1, j) - f(i+1, j) + \frac{1}{2}[f(i-2, j) - f(i+2, j)], \quad (6)$$

$$d_3 = [f(i-1, j-1) - f(i+1, j+1)] + \frac{1}{2}[f(i-2, j-2) - f(i+2, j+2)], \quad (7)$$

$$d_4 = [f(i-1, j+1) - f(i+1, j-1)] + \frac{1}{2}[f(i-2, j+2) - f(i+2, j-2)]. \quad (8)$$

一个方向计算两次梯度进行加权,可以减小噪声影响。

#### ③ 定义梯度差异值

$$m_d = \max[ (|d_2| - |d_1|), (|d_4| - |d_3|) ], \quad (9)$$

式中  $|\cdot|$  表示取绝对值。定义阈值  $T_m$ , 若  $m_d > T_m$ , 转到步骤④, 否则取下下一个像素点并转到步骤②。

④ 取  $\max(d_i)$  的垂直方向, 即轮廓方向, 并计算该方向上与当前像素相邻的左右两个像素的  $m_d$  值, 若也满足  $m_d > T_m$ , 则将当前像素归为候选边缘点。

⑤ 使用步骤①~④遍历整个图像区域后, 对候选边缘点计算其梯度幅值和方向, 利用与 canny 算子相似的局部非极大值抑制法将边缘细化。

此时检测出的轮廓, 包括图像真实的轮廓和由噪声产生的伪轮廓。这里只希望保留真实轮廓中含

信息量较丰富的部分。为此设计一种轮廓滤波方法: 定义轮廓链长度阈值  $T_L$  和轮廓强度阈值  $T_s$ 。若单个轮廓链的长度小于  $T_L$ , 认为是噪声引起的轮廓, 将其丢弃, 并将该轮廓上的像素点归为 PNS; 计算某一段轮廓的强度, 轮廓强度定义为该轮廓上的点的  $m_d$  值的平均值, 若轮廓强度小于  $T_s$ , 认为是不重要的轮廓信息, 也将其丢弃。

经过筛选的轮廓, 认为均包含较多的有用信息。根据(4)式计算轮廓曲率。提取出的目标轮廓和轮廓曲率随轮廓点的分布如图 2 所示。

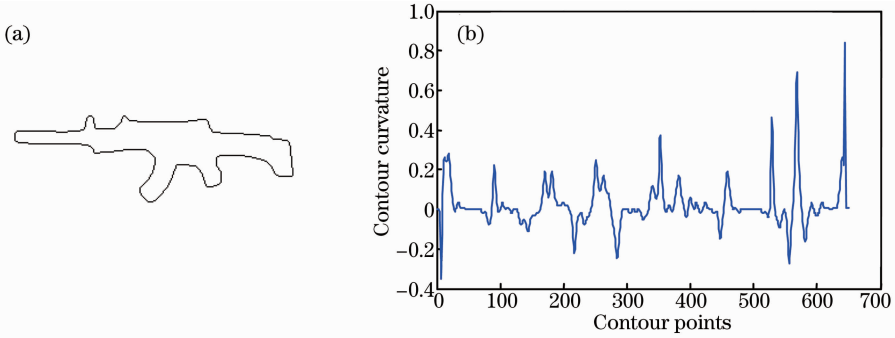


图 2 (a) 提取出的目标轮廓及(b) 轮廓曲率分布图

Fig. 2 (a) Extracted target contour and (b) curvature map of the target

在图 2(b)中, 由于噪声的影响和背景干扰, 单个轮廓点的曲率有一定几率发生突变, 从而导致强信息点和弱信息点错乱分布, 无法进行区域分类。对于噪声引起的强信息点, 希望将之滤除。为此使用长度为 9 的均值滤波器进行曲率平滑, 即

$$\rho(p_i) = \frac{1}{9} \sum_{j=i-4}^{i+4} \rho(p_j). \quad (10)$$

平滑结果如图 3 所示。

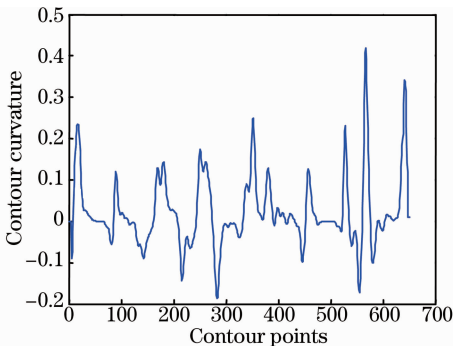


图 3 均值滤波后轮廓曲率分布图

Fig. 3 Contour curvature map after mean filtering

接着定义轮廓曲率阈值  $T_k$  和信息函数  $K(p)$ 。 $K(p) = 1$  表示该点为强信息点, 即  $p \in R_{PPS}$ ;  $K(p) = 0$  该点为弱信息点, 即  $p \in R_{PWS}$ ;  $K(p) = -1$ , 表示该点为无信息点, 即  $p \in R_{PNS}$ 。 $K(p)$  的取值为

$$K(p) = \begin{cases} 1, & |\rho(p)| \geq T_k \\ 0, & |\rho(p)| < T_k \\ -1, & |\rho(p)| \text{ does not exist} \end{cases} \quad (11)$$

### 3.2 模糊加权均值滤波器

Choi 等<sup>[14]</sup>提出的模糊加权均值滤波器, 能够较好地保持边缘, 平滑高斯噪声。定义如下:

$$Y_{fmean}(X_i) = \frac{\sum_{j=1}^{N_G} \frac{\mu_{ij}}{\beta_j} I(X_j)}{\sum_{j=1}^N \frac{\mu_{ij}}{\beta_j}}, \quad (12)$$

式中  $N_G$  为滤波窗的尺寸,  $X_i$  为当前像素,  $X_j$  为当前像素的邻域像素,  $\mu_{ij}$  称为隶属度函数, 代表邻域像素和中心像素的相似性, 定义为

$$\mu_{ij} = \omega_{ij} \exp\left(\frac{-d_{ij}^2}{\beta_i}\right), \quad (13)$$

$$d_{ij} = I(X_i) - I(X_j), \quad (14)$$

$$\beta_i = \frac{1}{N_G - 1} \sum_{j=1}^{N_G} d_{ij}^2, \quad (15)$$

式中  $\beta_i$  称为尺度估计函数。如果某一像素具有较大的  $\beta_i$  值, 表示当前像素与邻域其余像素相差较大, 由(12)式可知滤波器对这样的像素赋予较小的权重, 反之亦然。而对于  $\mu_{ij}$ ,  $d_{ij}$  越大, 即中心像素与周围像素差距越大, 由(13)式可知  $\mu_{ij}$  越小, 这样的权重也

较小,反之亦然。因此,在均匀区域,模糊均值滤波器对邻域像素取较大的权重,平滑效果明显;在边缘区域,模糊均值滤波器对邻域像素取较小的权重,能保留细节信息。因此模糊均值滤波器在滤除高斯噪

声的同时,能够保护图像边缘细节信息。

### 3.3 基于轮廓曲率的去噪方法

根据计算出的轮廓曲率,对于图像上的每个点  $p$ ,其 Lee 滤波窗口大小  $N_L$  为

$$N_L(p) = \begin{cases} 0, & p \in R_{PPS} \text{ and } \rho(p) > T_{\max} \\ 3T_{L1}/\rho(p), & p \in R_{PPS} \text{ and } \rho(p) \leq T_{\max} \\ 5T_{L2}/\rho(p), & p \in R_{PWS} \\ N_{LPNS}, & p \in R_{PNS} \end{cases}, \quad (16)$$

式中  $T_{L1}, T_{L2}$  为预设的步长调长系数,  $T_{\max}$  表示一个较大的轮廓曲率阈值。 $p \in R_{PPS}$  并且  $\rho(p) > T_{\max}$  时,  $N_L(p) = 0$ ,表示在轮廓曲率很大的位置,不进行滤波而直接保留该点的灰度值。 $N_{LPNS}$  需要根据散斑噪声的情况进行调整,散斑噪声越强,  $N_{LPNS}$  越大。

因为高斯噪声会污染所有像素,所以对整个图像均使用模糊加权均值滤波器。均值滤波窗口大小  $N_G$  为

$$N_G(p) = \begin{cases} 3T_{G1}/\rho(p), & p \in R_{PPS} \\ 5T_{G1}/\rho(p), & p \in R_{PWS}, \\ N_{GPNS}, & p \in R_{PNS} \end{cases} \quad (17)$$

式中  $T_{G1}$  为预设的步长调节系数。同样,  $N_{GPNS}$  需要根据高斯噪声的情况进行调整,高斯噪声越强,  $N_{GPNS}$  越大。

## 4 实 验

搭建一套激光主动成像识别系统:光束发射系统采用功率为 3 W 的 LU0793T030 近红外光纤耦合半导体激光器,波长为 793 nm,发散角为 5 mrad;

接收系统选用 Falcon HG 1M120CMOS 相机,像素尺寸为  $7.4 \mu\text{m} \times 7.4 \mu\text{m}$ ,帧频取为 30 frame/s,图像分辨率为  $1024 \text{ pixel} \times 1024 \text{ pixel}$ ;目标为 43 式冲锋枪模型,目标距离 500 m。发射光束照亮目标后,成像系统将采集得到的图像通过 cameralink 接口传送到工控机进行滤波处理。实验截取被照亮的区域,得到的图像大小为  $193 \text{ pixel} \times 163 \text{ pixel}$ 。软件编程环境为:i7-2600 3.40 GHz CPU、2G 内存、Matlab7.10+VS2008 软件平台。

为了模拟高噪声的环境,人为地加入均值为 0、方差为 0.05 的高斯噪声和均值为 0、方差为 0.5 的散斑噪声。分别使用文献[2]提出的 Lee、文献[3]提出的 Kuan、文献[15]提出的小波软阈值和所提算法进行图像滤波。Lee 和 Kuan 滤波窗口分别选为  $3 \times 3, 5 \times 5, 7 \times 7$ ,小波软阈值选用“coif2”小波分别进行 2、3、4 级分解,对所有高频系数进行阈值处理。滤波结果如图 4 所示。

从图 4(b)~(d)可以看出, Lee 滤波窗口越大,背景越均匀,散斑抑制效果越好,而目标的边缘也变得越模糊。从图 4(e)~(g)可以看出, Kuan 滤波和

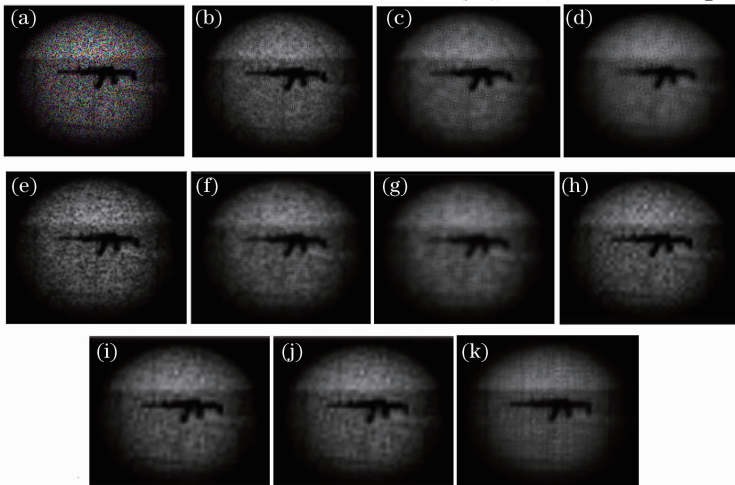


图 4 (a) 含噪图像和 (b)~(k) 不同算法滤波后图像

Fig. 4 (a) Noisy image and (b)~(k) denoised images by different methods

Lee 滤波结果呈现相同的规律,滤波效果比同窗口大小的 Lee 更好,但同时边缘也模糊得更严重。从图 4(h)~(j)可以看出,随着小波分解级数的增加,滤波效果几乎不变,模糊程度也并没有明显加强。小波 4 级分解滤波效果不如 Kuan $7 \times 7$ 。只有所提的滤波方法,在基本滤除噪声的同时较好地保留了图像的细节信息,如图 4(k)所示。尤其对枪尖和准星这样轮廓曲率较大的部位,对比所提算法和 Lee $7 \times 7$ 、Kuan $7 \times 7$  这三种滤波效果最好的算法,发现所提算法能够很好地保留这些部位的信息,而其余两种算法滤波后,这些部位已经变得十分模糊。

这里引入两种评价指标来衡量滤波效果:噪声指数  $N_{\text{index}}$ <sup>[13]</sup> 和边缘保持指数 EPI<sup>[16]</sup> (记作  $E_{\text{PI}}$ )。噪声指数衡量一幅图像上的噪声大小,定义为

$$N_{\text{index}} = \frac{1}{M \cdot N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \frac{\sigma_{ij}}{\nu_{ij}}, \quad (18)$$

式中  $M$ 、 $N$  表示图像的大小,  $\sigma_{ij}$  表示像素点的局部灰度方差,  $\nu_{ij}$  表示像素点的局部灰度均值。  $N_{\text{index}}$  越大,表示噪声越强。

EPI 反映了算法在水平和垂直方向上保留边缘的能力,分别定义为

$$E_{\text{PI-H}} = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^{N-1} |f'(i, j+1) - f'(i, j)|}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^{N-1} |f(i, j+1) - f(i, j)|}, \quad (19)$$

$$E_{\text{PI-V}} = \frac{\sum_{i=1}^{M-1} \sum_{j=1}^N |f'(i+1, j) - f'(i, j)|}{\sum_{i=1}^{M-1} \sum_{j=1}^N |f(i+1, j) - f(i, j)|}, \quad (20)$$

式中  $E_{\text{PI-H}}$  为水平方向上的边缘保持能力,  $E_{\text{PI-V}}$  为垂直方向上的边缘保持能力,  $f(i, j)$  为图像在该位置的像素值。  $E_{\text{PI-H}}$  和  $E_{\text{PI-V}}$  越大,表示算法边缘保持能力越强。

各算法的  $N_{\text{index}}$  指数和 EPI 指数如表 1 所示。表 1 中,观察 Lee 滤波器、Kuan 滤波器各自的表现,与图 4(b)~(d)、(e)~(g)中的规律一致,即:  $N_{\text{index}}$  (即噪声强度)随着滤波窗口增大而减小,同时  $E_{\text{PI-H}}$ 、 $E_{\text{PI-L}}$  (即图像边缘)也随着滤波窗口增大而减小。横向比较,相同滤波窗口时 Kuan 滤波效果好于 Lee。小波软阈值的滤波能力和边缘保留能力随着分解级数的增加变化不大,小波 4 级分解的  $N_{\text{index}}$  略大于小波 3 级分解,这可能是由于  $N_{\text{index}}$  的

定义引起的。  $N_{\text{index}}$  只是用局部灰度方差近似噪声强度,用局部灰度均值近似图像信号强度,并不能完全准确表示噪声与信号之比。从主观图像上看或者理论推导,小波 4 级分解的滤波效果应好于小波 3 级分解。所提滤波算法  $N_{\text{index}}$  最大,表示滤波能力最强。同时  $E_{\text{PI-H}}$  和  $E_{\text{PI-L}}$  也要远远高于其余算法,表示边缘保持能力也相当理想。

表 1 不同滤波算法的性能评价指数

Table 1 Performance of different denoising methods

Filter	$N_{\text{index}}$	$E_{\text{PI-H}}$	$E_{\text{PI-L}}$
Noisy image	0.4718	1	1
Lee filter	$3 \times 3$	0.2983	0.3328
	$5 \times 5$	0.2727	0.2546
	$7 \times 7$	0.2409	0.2392
Kuan filter	$3 \times 3$	0.2630	0.2426
	$5 \times 5$	0.2438	0.1953
	$7 \times 7$	0.2043	0.0905
Wavelet	2-layer	0.2273	0.2485
	3-layer	0.2225	0.2339
Soft-thresholding	4-layer	0.2253	0.2332
	Proposed method	0.1649	0.4259

通过固定高斯噪声方差为 0.05,改变散斑噪声方差为 0.1~1.0,模拟激光束腰的变化,观察算法对不同混合噪声的去噪情况。因为曲线较密集,对于  $N_{\text{index}}$  曲线,画出的是滤波效果较好的 Lee $7 \times 7$ 、Kuan $7 \times 7$ 、小波 4 级分解和所提方法的对比,结果如图 5 所示。对于  $E_{\text{PI-H}}$  和  $E_{\text{PI-L}}$  画出的是边缘保持能力较强的 Lee $3 \times 3$ 、Kuan $3 \times 3$ 、小波 2 级分解和所提方法的对比,结果分别如图 6、图 7 所示。

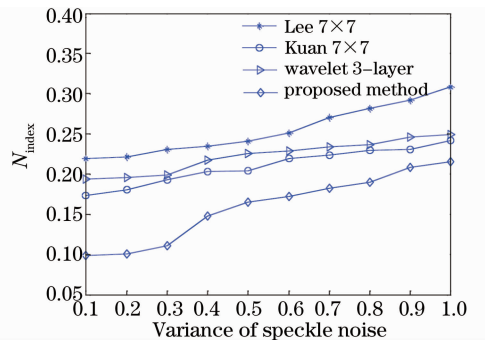
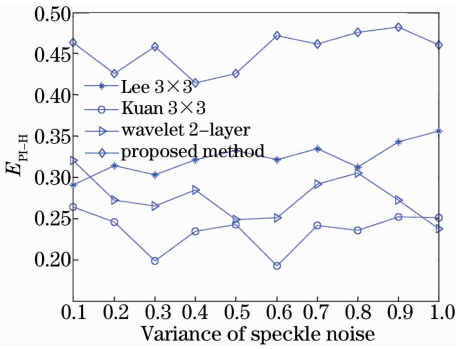
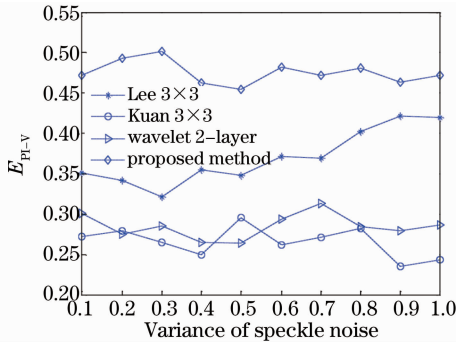


图 5 不同噪声下算法的  $N_{\text{index}}$  曲线

Fig. 5  $N_{\text{index}}$  curves in different speckle noises

从图 5 看出,4 种滤波算法中, Lee $7 \times 7$  滤波后的  $N_{\text{index}}$  最大,所提算法滤波后的  $N_{\text{index}}$  最小,这表示 Lee $7 \times 7$  去噪能力最差,所提方法的去噪能力最强。从图 6、7 可以看出,算法的边缘保持能力和噪声的大小并无直接关系,这是因为噪声增加会导致含噪图像的边缘发生不可预知的变化。从整体上看,对

图6 不同噪声下算法的  $E_{PI-H}$  曲线Fig. 6  $E_{PI-H}$  curves under different speckle noises图7 不同噪声下算法的  $E_{PI-V}$  曲线Fig. 7  $E_{PI-V}$  curves under different speckle noises

于横轴边缘和纵轴边缘,边缘保持能力从强到弱依次为:所提算法 Lee $3 \times 3$ 、wavelet 2-layer、Kuan  $3 \times 3$ ,并且所提算法的  $E_{PI-H}$  和  $E_{PI-V}$  要远高于其余三种算法。由此可见,所提的混合去噪算法在噪声强度不同的情况下,相比以上其余算法,具有最好的去噪和边缘细节保持能力。

## 5 结 论

在分析激光主动成像噪声性质的前提下,提出一种基于像素点分类的激光主动成像混合滤波方法。定义了一种轮廓点筛选方法和根据轮廓曲率对像素点进行分类的方法,用于区分不同像素载有的信息量,对不同的像素点有针对性地采用不同结构的滤波器,使算法具有像素级的自适应性。同时引入 Lee 滤波和模糊加权均值滤波器进行混合噪声的滤除。从实验结果看,所提算法相对于已有的滤波方法,具有更好的滤波能力和边缘细节保留能力。

## 参 考 文 献

1 Li Ziqin, Li Qi, Wang Qi. Noise characteristic in laser active imaging system by statistic analysis[J]. Chinese J Lasers, 2004, 31(9): 1081-1085.

李自勤,李琦,王骐.由统计特性分析激光主动成像系统图像的噪声性质[J].中国激光,2004,31(9):1081-1085.

2 J S Lee. Digital image enhancement and noise filtering by use of local statistics[J]. IEEE Trans Pattern Analysis and Machine Intell, 1980, PAMI-20(2): 165-168.

3 V S Frost, J A Stiles, K S Shanmugan, et al.. A mode for radar images and its application to adaptive digital filtering of multiplicative noise [J]. IEEE Trans Pattern Analysis and Machine Intell, 1982, PAMI-4(2): 157-165.

4 D Kuan, A Sawchuk, T Strand, et al.. Adaptive restoration of images with speckle[J]. IEEE Trans Acoust, Speech, Signal Process, 1987, 35(3): 373-383.

5 L Parthiban, R Subramanian. Speckle noise removal using contourlets [C]. Shandong: International Conference on Information and Automation, 2006. 250-253.

6 Jie Kang, Gang Yang. The algorithm of SAR speckle noise suppressing by using generalized multi-scale CB morphology[C]. Beijing: 2010 IEEE 10th International Conference on Signal Processing (ICSP), 2010. 1106-1109.

7 S M M Roomi, R B J Rajee. Speckle noise removal in ultrasound images using particle swarm optimization technique[C]. Chennai: 2011 International Conference on Recent Trends in Information Technology (ICRTIT), 2011. 926-931.

8 P Jarabó Amores, M Rosó Zurera, D Mató Moya, et al.. Mean-shift filtering to reduce speckle noise in SAR images [C]. Singapore: Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2009. 1188-1193.

9 W Hyenkyun, S Yun. Alternating minimization algorithm for speckle reduction with a shifting technique[J]. Image Processing, 2012, 21(4): 701-1714.

10 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,王骐.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.

11 Li Xiaofeng, Xu Jun, Luo Jijun, et al.. Noise analyzing and denoising of intensity image for laser active imaging system[J]. Infrared and Laser Engineering, 40(2): 332-337.

李晓峰,徐军,罗积军,等.激光主动成像图像噪声分析与抑制[J].红外与激光工程,40(2):332-337.

12 Xu Yibin, Xu Jun, Zhao Falin, et al.. Laser active image-denoising method based on wavelet transform[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2009, 21(21): 1786-1790.

许毅芬,徐军,赵法林,等.基于小波变换的激光主动成像图像去噪方法[J].强激光与粒子束,2009,21(21):1786-1790.

13 Dong Jihui, Hu Qiquan, Sun Dongsong, et al.. Techniques of depressing image noise in laser imaging tracking system[J]. Chinese J Lasers, 38(1): 0109002.

董吉辉,胡企铨,孙东松.空间激光成像跟踪系统中的图像噪声抑制技术[J].中国激光,2011,38(1):0109002.

14 Y Choi, R Krishnapuram. A robust approach to image enhancement based in fuzzy logic[J]. IEEE Trans on Image Processing, 1997, 6(6): 808-825.

15 D L Donoho. Denoising by soft-thresholding[J]. IEEE Trans on Inform Theory, 1995, 41(3): 613-627.

16 W G Zhang, Q Zhang, C S Yang. Improved bilateral filtering for SAR image despeckling [J]. Electron Lett, 2011, 47 (17): 286-288.

栏目编辑:何卓铭