

文章编号:1007-2780(2016)02-0193-08

同态非局部滤波在激光主动成像散斑抑制中的应用研究

王灿进^{1*}, 石宁宁², 孙 涛¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 激光与物质相互作用国家重点实验室, 吉林 长春 130033; 2. 北京航天自动控制研究所, 北京 100049)

摘要:传统的激光主动成像散斑抑制方法中,局部单像素滤波和变换域滤波难以取得良好的抑制效果,同时容易导致边缘展宽,对图像信息造成破坏。鉴于非局部滤波对加性噪声的优异去噪性能,本文研究了三种具有代表性的非局部滤波方法,并使用半导体泵浦固体脉冲激光器搭建主动成像系统,进行散斑噪声抑制性能的比较。实验表明,采用同态 FM-PatchGP 不仅能够有效抑制散斑噪声,而且能很好地保持边缘信息,同时满足实时性处理的要求,在激光主动照明系统中具有良好的应用前景。

关 键 词:激光主动成像;散斑噪声;非局部滤波;同态变换

中图分类号:TN957.52;TP391.4 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/YJYXS20163102.0193

Application of homomorphic non-local filters in speckle noise suppression for laser active imaging

WANG Can-jin^{1*}, SHI Ning-ning², SUN Tao¹

(1. *State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, Changchun 130033, China;*
2. *Beijing Aerospace Automatic Control Institute, Beijing 100049, China*)

Abstract: It's difficult for traditional speckle suppression methods such as local single pixel filters and transform-domain filters to obtain good suppression effects in laser active imaging. Meanwhile, these methods would broaden edges, so as to damage the information of the image. In view of the excellent suppression performance of non-local filters for additive noise, three representative nonlocal filtering methods are introduced into laser active imaging. An active imaging system was built up to compare the performance of these three methods in speckle noise suppression using a diode-pumped solid-state pulsed laser. Experimental results indicated that homomorphic FM-PatchGP can not only suppress speckle noise effectively, but also preserve edge information while satisfies the real-time requirement, which leads to a good application prospect in laser active lighting systems.

收稿日期:2015-03-24; **修订日期:**2015-05-18.

基金项目:吉林省科技发展计划(No. 20126015)

Supported by Scientific and Technological Developing Program of Jilin Province(No. 20126015)

* 通信联系人, E-mail: wcjps@126.com

Key words: laser active imaging; speckle noise; non-local filters; homomorphic transform

1 引言

激光主动成像是一种新的主动探测手段,通过发射激光束照射目标,探测器接收回波信号生成图像,能有效克服光照条件差、成像距离远等严苛条件带来的影响,越来越多地应用于国防安全和战场侦察中^[1]。但由于激光的相干性,激光主动成像系统所成的图像会形成明暗相间的散斑图样^[2],严重影响成像质量,妨碍后续的识别和跟踪。因此研究有效的散斑抑制方法对推广激光主动成像系统具有重要作用。

噪声抑制是一个经典的病态问题。常用的滤波方法中,早期的中值滤波、均值滤波、双边滤波等单像素平滑方法利用像素点邻域的局部区域进行运算,滤波效果一般,并且性能受滤波窗口大小影响;基于小波、曲波和轮廓波的方法将图像信号分解到多个子带上,每个子带上使用阈值化或者统计方法处理,具有代表性的是 Cunha 等^[3]提出的非下采样轮廓波(NSCT),不仅拥有多方向性,同时具有平移不变性,有效避免了频谱混叠。但这类方法利用像素之间的空间关系,不可避免地引入振铃效应或者假信号;基于稀疏表示与过完备字典的滤波方法包括 Guerrero 等^[4]提出的基于高斯尺度混合(GSM)过完备金字塔去噪、Aharon 等^[5]提出的 K-SVD、Foi 等^[6]提出的形状自适应余弦变换(SA-DCT),这些变换利用较少的系数实现图像的过完备表示,取得比经典小波变换更好的去噪性能,但仍然不可避免引入假信号。近年来,非局部滤波^[7-10]方法得到迅速发展,这类方法的思想是自然图像中存在众多相似图像块,通过对相似像素进行加权平均就能得到真实图像的估计。这类方法在有效滤除噪声的同时具有良好的边缘细节保留能力。

目前国内外对激光主动成像散斑噪声的滤除研究处于起步阶段,主要包括中值滤波、Lee 滤波^[11]、Frost 滤波^[12]等单像素平滑方法,以及小波软阈值^[13]等变换域方法。如前文所述,这些方法会模糊图像细节,引入假信号,影响后续的识别和跟踪。考虑到非局部滤波方法的良好去噪能力,本文研究其中具有代表性的 NLM、BM3D 以

及 FM-PatchGP 方法,将其应用在激光主动成像散斑抑制中,比较其滤波效果,为实际应用提供依据。

2 散斑噪声分析

由于目标表面相对于激光波长而言是凹凸不平的,激光的不同子波在像面上产生干涉,就会形成散斑图样。散斑噪声是一种乘性噪声,表现为图像中亮或暗的斑块。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如下:

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

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

式中: I_0 表示不包含噪声的信号, I_{sn} 表示散斑噪声, I 表示光学系统捕获的信号。公式(2)表示散斑噪声服从均值为 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 ρ_c 为

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

式中: ω_0 表示激光束腰, $\beta = k\omega_0 d/2L$, d 为目标表面高度起伏的相关长度, L 为成像系统到目标的距离, σ_φ 称为相位调节因子均方根,与目标表面特性有关。由公式(3)可知对于远场,散斑半径只与激光束腰有关,可认为是一个不变量。

3 非局部均值滤波方法

3.1 NLM 滤波

自然图像上具有多个相似的图像块,根据这一性质,Buades 等提出一种有效去除图像加性噪声的方法 NLM(Non-local Mean Filtering, 非局部均值滤波)。设 $x(i)$ 表示含噪图像第 i 个像素值, $y(i)$ 表示滤波后的像素值,则 NLM 方法可以表示为^[7]:

$$y(i) = \sum_j w(i, j) y(j), \quad (4)$$

式中: $w(i, j)$ 为归一化权值, 表示像素 i 的邻域 $N(i)$ 与 j 的邻域 $N(j)$ 的相似性, 计算公式为

$$w(i, j) = \frac{1}{Z(i)} e^{-\frac{\|N(i) - N(j)\|_a^2}{h^2}}, \quad (5)$$

$$Z(i) = \sum_j e^{-\frac{\|N(i) - N(j)\|_a^2}{h^2}}, \quad (6)$$

式中: $\|\cdot\|_a^2$ 表示以 a 为权值的加权欧氏距离, h 为与噪声方差有关的常数。

NLM 根据像素邻域几何形状的相似性, 对整个图像区域上的像素进行加权, 越是相似的像素, 权值越大。相对于传统的双边滤波、各向异性扩散滤波以及小波滤波等方法, NLM 利用了图像的全局信息, 具有更好的细节保留能力。

3.2 BM3D 滤波

BM3D 结合了局部和非局部、空间域和变换域的思想, 将图像块分组聚合并进行稀疏表示, 在变换域进行噪声抑制, 既能较好地保留图像细节, 又能较少地引入假信号, 因此普遍被认为是目前效果较好的滤波方法^[14]。BM3D 滤波方法主要分为两个阶段: 基本估计和最终估计。

3.2.1 基本估计

(1) 分组

将输入图像逐像素或按一定步长取图像块 Z_{x_R} , x_R 表示该块左上角的坐标。分别将每个块 Z_{x_R} 作为参考块, 计算它与其他各块之间的距离 L (本文采用 l^2 距离进行度量), 若 $L < T_{\text{har}}$ (T_{har} 为事先定义的阈值), 表示这两个块之间足够相似, 将其归为一组。这样, 相似的块就被放在一组, 而不同的块则被区分开, 构成三维矩阵。

(2) 联合滤波

对于每个相似块构成的组, 使用以下步骤进行联合滤波:

(I) 用一个线性变换 (例如三维小波变换) 对该组进行稀疏表示

(II) 收缩变换系数 (软硬阈值收缩), 以去除噪声

(III) 反线性变换, 得到组中每个块的估计值

(3) 聚合

对不同组里对相同块的估计或者块与块之间重叠部分的像素, 需要进行加权平均。加权系数 w_i 为

$$w_i = \begin{cases} \frac{1}{\sigma^2 N_{\text{har}}^{x_R}} & N_{\text{har}}^{x_R} \geq 1 \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases}, \quad (7)$$

式中: $N_{\text{har}}^{x_R}$ 为硬阈值变换后的非零个数, σ 是噪声标准差估计。

3.2.2 最终估计

最终估计可视为基本估计的迭代, 也分为分组、联合滤波和聚合 3 个步骤。区别在于: 在分组阶段, 使用基本估计得到的粗滤波图像进行分组, 构成三维矩阵 D_1 , 并记下分组各块的标号。在原始图像上取出对应标号的图像块, 构成另外一个三维矩阵 D_2 ; 在联合滤波阶段, 以 D_1 的三维变换能量谱作为真实能量谱的估计, 对 D_2 进行经验维纳滤波, 最后进行三维逆变换得到去噪的图像块。

BM3D 滤波方法是一个迭代过程, 只需要将上一次的滤波结果作为本次分组的输入即可。理论上迭代次数越多, 滤波效果越好, 但每一次迭代本身计算量很大, 需要根据实际需要选择。Dabov 为了进一步提升 BM3D 的去噪性能, 提出形状自适应块匹配三维滤波 (Shape adaptive block-matching 3D, SA-BM3D) 和基于主成分分析的形状自适应块匹配三维滤波 (BM3D-SAPCA), 这两种改进方法在低噪声的情况下性能得到提升, 但在强噪声情况下失效, 原因是形状自适应算法在强噪声情况下无法使用。

3.3 FM-PatchGP

尽管 NLM 和 BM3D 能取得较好的滤波效果, 但计算块之间的相似度非常耗时, 这在激光主动成像系统这种实时性要求较高的场合是无法忍受的。为此 Chen 等提出 FM-PatchGP 多尺度滤波方法^[9], 通过计算图像块之间的测地距离来衡量块之间的相似性。

定义图像块 s 、 t 之间的 PatchGP (测地距离) 为:

$$d^{\text{patchGP}}(s, t) = \min_r \sum_{i=1}^{N_r-1} \|N_i(\Gamma(p_{i+1})) - N_i(\Gamma(p_i))\|, \quad (8)$$

式中: $N_i(p_i)$ 表示中心为 p_i 的图像块, $\|\cdot\|$ 表示块距离, Γ 表示从 s 到 t 之间的一条路径, N_r 表示路径上的拐点。

文献[9]使用大量实例证明: 在有一定噪声或者图像块足够大的情况下, s 、 t 之间的 PatchGP 和它们之间的 MHP (Minimal Hop Paths) 近似。因此在自然图像中, PatchGP 可以用 MHP

替代:

$$d^{\text{patchGP}}(x_0, x_r) \approx \max\{d^{\text{patchGP}}(x_0, x_{r-1}), \\ \|N(x_r) - N(x_{r-1})\|\} \alpha, \quad (9)$$

式中: α 为一固定常数, 实验取 1.2。

使用 MHP 代替 PatchGP, 不仅可以缩短计算时间, 同时可以降低存储消耗, 原因如图 1 所示。

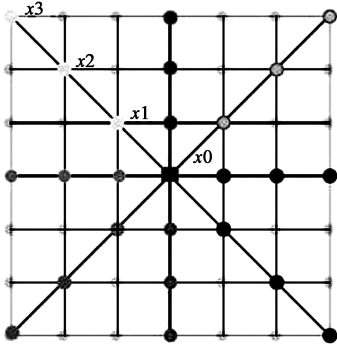


图 1 8 个方向上的 MHPs

Fig. 1 MHPs under 8 search directions

要计算图像块 x_0 的 8 个方向上的 MHPs, 即

$$d^{\text{patchGP}}(x_0, x_r) \approx \sum_{t=1}^r \|N(x_t) - N(x_{t-1})\| = \\ d^{\text{patchGP}}(x_0, x_{r-1}) + \|N(x_r) - N(x_{r-1})\|, \\ r = 1, 2, \dots \quad (10)$$

由式(10)可知, 每个方向上的 MHP 可以进行累加, 存储时只需要保留单步的 MHP 即可。不同方向上的 MHP 可以并行计算, 采用多线程的方式可以大大加快计算效率。

定义像素之间的加权因子为:

$$\omega_p(i, j) = G_\sigma(d^{\text{patchGP}}(i, j)), \quad (11)$$

式中: G_σ 为高斯核函数, i, j 为两个不同位置的像素。则 FM-PatchGP 滤波器可以表示为:

$$\hat{I}(i) = \frac{1}{z(i)} \sum_{\theta \in \Theta} \sum_{r=1}^R \omega_p(i, i_{\theta, r}) I(i_{\theta, r}), \quad (12)$$

$$z(i) = \sum_{\theta \in \Theta} \sum_{r=1}^R \omega_p(i, i_{\theta, r}), \quad (13)$$

式中: θ, r 表示以当前像素点为坐标原点的其余像素坐标, $z(i)$ 为归一化加权因子, $I(i_{\theta, r})$ 为坐标 (θ, r) 处的像素灰度。

本文采用的 FM-PatchGP 多尺度滤波方法具体步骤如下:

(1) 对图像降采样建立 Laplacian 金字塔, 对金字塔的每层做 Haar 小波变换

(2) 从最顶层开始使用 FM-PatchGP 对图像进行局部非局部均值滤波, 通过计算同时将滤波结果作为下一层计算 PatchGP 的参考图像

(3) 重复步骤(2)直至到达最底层, 得到最终的滤波图像

4 使用非局部滤波的激光主动成像散斑抑制流程

散斑噪声是乘性噪声, 故首先对图像进行同态变换转化为加性噪声, 再进行滤波。滤波流程如图 2 所示。

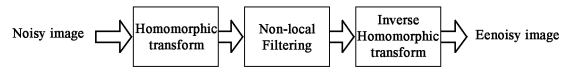


图 2 使用非局部滤波的散斑去除流程图

Fig. 2 Flow chart of speckle noise suppression using non-local filter

5 实 验

为研究以上非局部均值滤波方法对激光主动成像中散斑噪声的抑制能力, 搭建一套激光主动成像系统: 光束发射系统采用半导体泵浦固体脉冲激光器, 脉冲宽度为 8 ns, 波长为 793 nm, 发散角为 5 mrad; 接收系统 Lambert ICCD, 镜头直径 $D=110$ mm, 焦距 $f=300$ mm, 帧频为 25 fps, 图像分辨率为 1024×1024 ; 自制 FPGA 设计同步控制器, 实现了激光器和相机之间的选通控制。同步控制器首先向激光器发送触发信号, 经过一个短的延时 Δt_1 , 激光器发射出脉冲激光, 又经过 $\Delta t_2 = \frac{2s}{c}$ 光脉冲返回接收装置, s 为目标与激光器之间的距离, c 为光速。因此控制器在向激光器发出触发信号之后 $\Delta t_1 + \Delta t_2$ 时刻将选通门打开, 就能保证抑制后向散射, 采集到较为清晰的图像。软件编程环境为: i7-2600 3.40 GHz CPU、2G 内存、matlab7.10+VS2008 软件平台。

实验系统框图如图 3 所示。

选取目标为 3.4 km 外的楼房, 截取被照亮的目标区域, 得到的含噪图像大小为 150×150 ,

如图 4(a)所示。可见目标区域分布着大量的散斑噪声,严重影响目标辨识。分别采用文献[10]

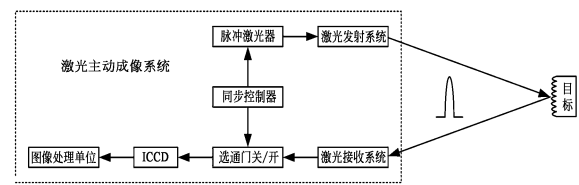


图 3 实验系统框图
Fig. 3 Experimental system diagram

提出的 Lee、文献[12]提出的小波软阈值以及 NLM、BM3D 和 FM-PatchGP 方法进行处理。为了在保留边缘细节和噪声滤除之间的达到较好的平衡, Lee 采用 5×5 大小的滤波窗口, 小波软阈值采用三级小波分解, BM3D 的块大小均选为 8×8 , NLM 和 FM_PatchGP 的搜索区域为 15, BM3D 的最大相似图像块为 16, 步长选为 3。滤波结果如图 4(b~f)所示。

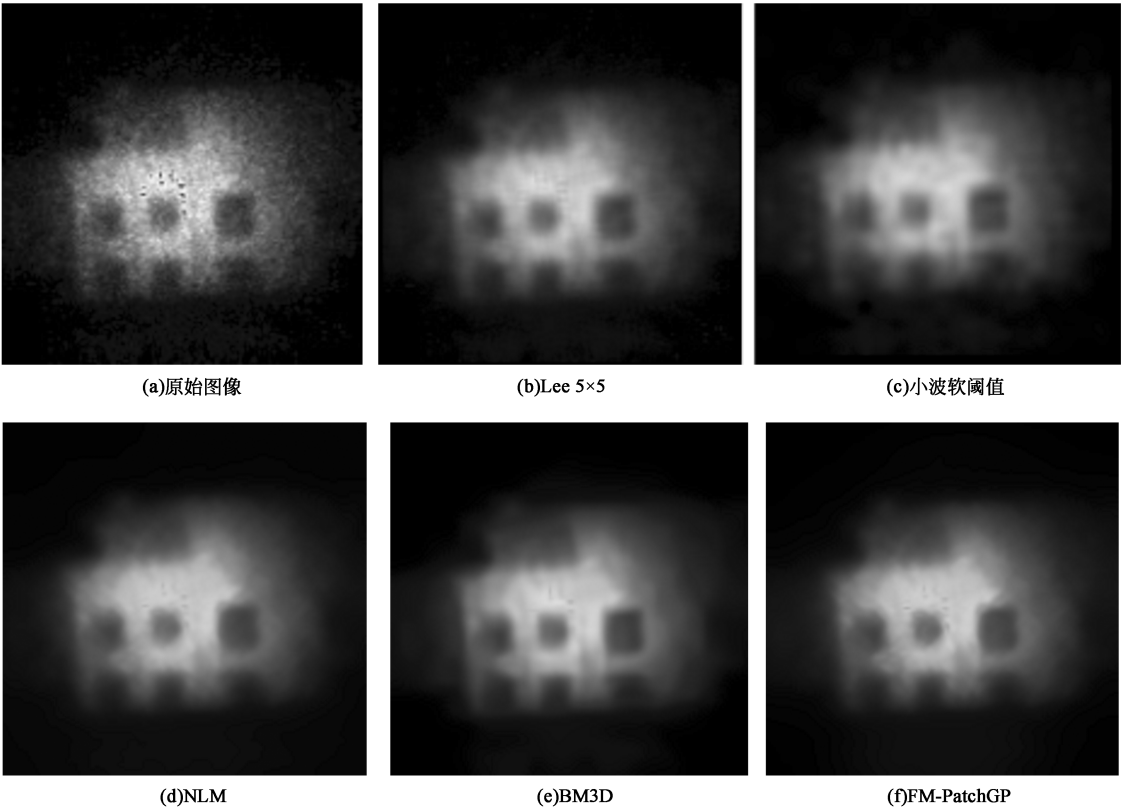


图 4 不同方法的散斑抑制结果
Fig. 4 Noise suppression results of different methods

从图(4)中可以直观看, Lee 5×5 和小波软阈值处理结果图中, 白色楼房区域残余较多的散斑颗粒, 而 NLM、BM3D 和 FM-PatchGP 处理结果残余散斑较少。这说明整体上非局部均值滤波算法的散斑抑制效果好于 Lee 和小波软阈值。可以通过增加 Lee 的滤波窗口大小和小波分解级数获得更好的噪声抑制效果, 但这一方面会加大运算量, 另一方面会导致边缘信息丢失更加严重。观察右下角的门框区域, 可见小波软阈值会产生比较严重的边缘展宽, 而 Lee 5×5 和 3 种非

局部均值方法的边缘保持效果都比较好。这是因为小波阈值法对整个图像在小波域进行阈值收缩, 小于阈值的边缘信息也被抹除, 导致边缘模糊; Lee 滤波器在局部方差较大的区域(高对比区域和边缘附近), 不作平均而保留原像素值, 故能够很好地保护图像边缘细节; 非局部方法利用了全局像素的相似性进行加权, 也能够较好地保护边缘。仔细观察图 4(e), 在白色墙面区域(目标灰度较均匀区域)出现明显的块效应, 这是由于

BM3D 将图像分块处理。相比之下,NLM 以及 FM-PatchGP 的处理单元是单个像素,因此不存在这种现象。块效应可以通过减小图像块的尺寸进行抑制,但这会降低算法的执行效率。

为定性地比较算法的性能,引入散斑指数 $SI^{[15]}$ 来度量算法的噪声抑制能力:

$$SI = \frac{1}{mn} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \frac{\sigma(i,j)}{\mu(i,j)}, \quad (14)$$

式中: $\sigma(i,j)$ 表示像素点 (i,j) 处的方差, $\mu(i,j)$ 表示像素点 (i,j) 处的均值, m 、 n 代表图像尺寸。

引入边缘保持系数 ENL_H 和 ENL_V 来度量算法的边缘保持能力^[16]:

$$EPI_H = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^{N-1} |f'(i,j+1) - f'(i,j)|}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^{N-1} |f(i,j+1) - f(i,j)|}, \quad (15)$$

$$EPI_V = \frac{\sum_{i=1}^{M-1} \sum_{j=1}^N |f'(i+1,j) - f'(i,j)|}{\sum_{i=1}^{M-1} \sum_{j=1}^N |f(i+1,j) - f(i,j)|}, \quad (16)$$

式中: EPI_H 为水平方向上的边缘保持能力, EPI_V 为竖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。

同时,统计算法的执行时间,实验结果如表 1 所示。

表 1 散斑抑制算法的滤波性能对比

Tab. 1 Performance comparison of speckle noise suppression methods

	SI	ENL _H	ENL _V	Time
Lee 5×5	0.312 8	0.361 8	0.355 6	0.878 7
小波软阈值	0.302 6	0.247 1	0.228 7	1.147 0
NLM	0.244 0	0.332 6	0.321 8	3.362 4
BM3D	0.231 6	0.358 9	0.350 2	0.427 8
FM-PatchGP	0.231 0	0.338 7	0.317 6	0.028 3

从表 1 可以看出,NLM、BM3D 和 FM-PatchGP 这 3 种非局部滤波的 SI 系数比 Lee 5×5 和小波软阈值低得多,这表示非局部滤波的散斑抑制能力比 Lee 5×5 和小波软阈值要好。

BM3D 与 FM-PatchGP 的 SI 指数相差不多,略低于 NLM,表明 BM3D 与 FM-PatchGP 的噪声抑制能力更好。边缘保持能力上, Lee 5×5 边缘保持效果最好,小波软阈值最差,3 种非局部滤波方法中,BM3D 边缘保持能力最强。

通过改变 ICCD 的积分时间,获取散斑强度不同的激光主动成像图像,使用上述方法进行对比实验,结果如图 5 所示。

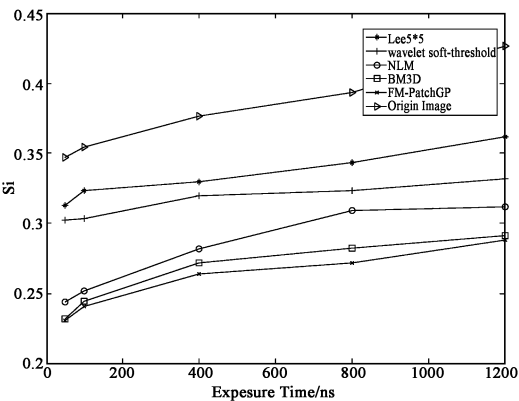


图 5 不同滤波算法的 SI 曲线

Fig. 5 SI curves of different denoising methods

由图 5 可知,积分时间增加时,散斑噪声也随之增强。这是因为随着入射光的增加,光线投射在 ICCD 成像靶面上的能量增大,图像的灰度级增加,干涉强度也越来越大。在各个曝光时间上,仍然是非局部均值方法散斑抑制能力优于 Lee 和小波软阈值。而 3 种非局部均值方法中,FM-PatchGP 的散斑抑制能力最好,NLM 的散斑抑制能力最差。

激光主动成像系统对算法具有严格的实时性要求。本文实验系统帧频为 25 fps,要求滤波算法处理时间在 40 ms 以内,由表 1 可知仅有 FM-PatchGP 达到要求。

综合考虑散斑抑制能力、边缘保持能力和实时性 3 个指标,经典的 Lee 滤波和小波软阈值滤波散斑抑制均较差,并且小波软阈值的边缘保持能力也不能达到要求,二者并不适用于激光主动成像系统。非局部滤波方法中,虽然 NLM 和 BM3D 均具有较好的边缘保持能力和散斑抑制能力,但处理时间过长。只有 FM-PatchGP 在 3 个指标上均达到要求,适用于激光主动成像系统。

6 结 论

针对局部单像素滤波和变换域滤波方法散斑抑制能力较差和容易导致边缘展宽的问题,提出使用非局部均值滤波进行激光主动成像散斑抑制。

使用半导体泵浦固体脉冲激光器和 ICCD 搭建激光主动成像系统,对 3 种具有代表性的非局部滤波方法 NLM、BM3D 和 FM-PatchGP 进行实验并与经典方法进行对比,结果表明:FM-PatchGP 方法在散斑抑制能力、边缘细节保持能力和实时性方面均满足要求,适用于激光主动成像系统。

参 考 文 献:

- [1] 王灿进,孙涛,石宁宁,等. 基于双隐含层 BP 算法的激光主动成像识别系统[J]. 光学精密工程, 2014, 22(6): 1639-1647.
WANG C J, SUN T, SHI N N, *et al.* Laser active imaging and recognition system based on double hidden layer BP algorithm [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(6): 1639-1647. (in Chinese)
- [2] 付瀚毅,刘伟奇,魏忠伦,等. 转动随机微透镜阵列对激光显示中散斑的抑制[J]. 液晶与显示, 2015, 30(2): 359-364.
FU H Y, LIU W Q, WEI Z L, *et al.* Speckle reduction using rotating random micro-lens array in laser display [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Display*, 2015, 30(2): 359-364. (in Chinese)
- [3] DA CUNHA A L, ZHOU J P, DO M N. The nonsubsamped contourlet transform: Theory, design, and applications[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2006, 15(10): 3089-3101.
- [4] GUERRERO-COLON J A, PORTILLA J. Two-level adaptive denoising using Gaussian scale mixtures in overcomplete oriented pyramids[C]. *Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing*, Genova: IEEE, 2005, 1: 105-108.
- [5] AHARON M, ELAD M, BRUCKSTEIN A M. K-SVD: An algorithm for designing of overcomplete dictionaries for sparse representation [J]. *IEEE Transactions on signal Processing*, 2006, 54(11): 4311-4322.
- [6] FOI A, KATKOVNIK V, EGIAZARIAN K. Pointwise shape-adaptive DCT for high-quality denoising and de-blocking of grayscale and color images[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2007, 16(5): 1395-1411.
- [7] BUADES A, COLL B. A non-local algorithm for image denoising[C]. *IEEE International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, San Diego, CA, USA: IEEE, 2005, 2: 60-65.
- [8] DABOV K, FOI A, KATKOVNIK V, *et al.* Image denoising by sparse 3-D transform-domain collaborative filtering[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2007, 16(8): 2080-2095.
- [9] CHEN X G, ANG S B, YANG J, *et al.* Fast patch-based denoising using approximated patch geodesic paths[C]. *IEEE International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, Portland, OR: IEEE, 2013: 1211-1218.
- [10] 刘巧红,李斌,林敏. 结合复方向滤波器组高斯尺度混合模型及非局部均值滤波的图像去噪[J]. 光学精密工程, 2014, 22(10): 2806-2814.
LIU Q H, LI B, LIN M. Image denoising with dual-directional filter bank GSM model and non-local mean filter [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(10): 2806-2814. (in Chinese)
- [11] LEE J S. Digital image enhancement and noise filtering by use of local statistics[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1980, 2(2): 165-168.
- [12] FROST V S, STILES J A, SHANMUGAN K S, *et al.* A mode for radar images and its application to adaptive digital filtering of multiplicative noise[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1982, 4(2): 157-166.
- [13] 叶树亮,张玉德,张炜. 齿轮视觉检测中的尺度与方向相关性联合降噪[J]. 光学精密工程, 2014, 22(6): 1622-1630.
YE S L, ZHANG Y D, ZHANG W. Scale and directional correlation combined denoising in gear visual inspection [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(6): 1622-1630. (in Chinese)
- [14] 金炜,王文龙,符冉迪,等. 联合块匹配与稀疏表示的卫星云图修复[J]. 光学精密工程, 2014, 22(7): 1886-1895.
JIN W, WANG W L, FU R D, *et al.* Satellite cloud image inpainting based on patch matching and sparse representation [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(7): 1886-1895. (in Chinese)

[15] 王灿进,孙涛,王锐,等. 基于信号子空间谱域约束的激光主动成像散斑噪声去除[J]. 中国激光,2013,40(11): 217-222.
WANG C J, SUN T, WANG R, *et al.* Speckle noise suppression for laser active imaging based on spectrum-domain constrain in signal subspace[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(11): 217-222. (in Chinese)

[16] 钱方,孙涛,郭劲,等. 无参考的特征点复杂度激光干扰图像评估[J]. 光学精密工程,2015,23(4):1179-1186.
QIAN F, SUN T, GUO J, *et al.* No-reference laser-dazzling image quality assessment based on feature-point complexity [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(4): 1179-1186. (in Chinese)

作者简介:王灿进(1987—),男,福建龙岩人,博士,主要从事激光主动成像中的图像处理研究。E-mail: wcjpsh@126.com