

## 强噪声条件下激光光斑图像预处理方法研究

戴得德<sup>1</sup>, 孙华燕<sup>2</sup>, 宋丰华<sup>2</sup>, 吴伟伟<sup>1</sup>

(1. 解放军装备指挥技术学院 研究生院, 北京 101416; 2. 解放军装备指挥技术学院 光电装备系, 北京 101416)

(daidede\_163@126.com)

**摘要:**为了研究强噪声光斑图像的抑噪方法,采用基于小波阈值法和形态学滤波的级联算法及小波域中值滤波法进行预处理,以信噪比、均方根误差和光强分布作为评估标准,并将处理效果与其他方法对比。结果表明:小波域中值滤波处理效果优于空域中值滤波;级联法的抑噪和光斑特征恢复效果更优于传统方法,其中对-2.0843 dB 的原低信噪比图像处理后的信噪比、均方根误差分别约为小波变换和空域中值滤波法的 1.34、0.81 倍和 3.14、0.50 倍;且原图像信噪比越低,其处理效果相对于传统方法的优越性越明显。

**关键词:**图像预处理;强噪声;小波域中值滤波;形态学滤波

**中图分类号:** TP391.41 **文献标志码:** A

## Pretreatment for laser spot image in strong noise

DAI De-de<sup>1</sup>, SUN Hua-yan<sup>2</sup>, SONG Feng-hua<sup>2</sup>, WU Wei-wei<sup>1</sup>

(1. Graduate School, Academy of Equipment Command and Technology, Beijing 101416, China;

2. Department of Photoelectric Equipment, Academy of Equipment Command and Technology, Beijing 101416, China)

**Abstract:** To investigate the de-noise ways of the strongly polluted laser spot image, a wavelet domain median filter and a combined filter based on wavelet-threshold and mathematics morphology were applied to inhibit the strong noise of laser spot images; the image Signal to Noise Ratio (SNR) and the Root-Mean-Square Error (RMSE) and the image gray surface chart were selected to estimate the de-noising effect of the images. Compared with other image filters, experimental results show that the de-noising effect of the Wavelet domain median filter is better than spatial domain median filter; when image noise reduction is carried out with the continuum method, the improved SNR is about 1.34 times of the wavelet transform algorithm and 3.14 times of the median filter; the RMSE is about 0.81 times of the wavelet transform algorithm and 0.50 times of the median filter; moreover, when the SNR of the former laser spot image is lower, the advantage of inhibiting noise of this method is more obvious.

**Key words:** image pretreatment; strong noise; wavelet domain median filter; morphology filter

## 0 引言

在激光主动成像、激光大气传输等激光应用场合,激光束经远距离传输后的光斑图像将受到严重的噪声污染。一方面,由于环境背景光影响,激光光斑图像中夹杂着众多不同频率的噪声,使得图像轮廓模糊,像质差,图像的信噪比降低;另一方面,图像采集时总会受到 CCD 的热噪声、读出噪声、A/D 转换噪声、量化噪声的干扰。这些噪声极大地影响了上述应用场合的光斑分析,尤其是在暗背景条件下,CCD 的光子噪声成为制约图像信噪比的主要因素,低信噪比条件下的激光光斑图像预处理技术是目前激光图像处理的一个研究热点。

对于上述强噪声、低信噪比激光光斑图像预处理,用线性滤波器(如均值滤波<sup>[1]</sup>)不能有效地抑制各种非加性高斯噪声,且不利于信号边缘等细节特征的保持。近年来,对噪声信号的恢复主要采用非线性手段。由于噪声具有随机性、突变性和量值大的特点,单独采用中值滤波效果也不佳<sup>[2-3]</sup>。当前,运用基于数学知识和数字信号处理理论的小波变换抑噪效果公认是较为理想的<sup>[4-5]</sup>;基于灰度形态学的图像滤波方法也是一类滤波效果较好非线性方法<sup>[6]</sup>。本文利用基于小波阈值法和形态学滤波的级联算法(后文简称级联算法)对

低信噪比光斑图像分别进行抑噪平滑处理,相比传统的单独使用中值滤波和小波变换的方法,图像处理效果将有很大改善。

## 1 强噪声光斑图像预处理方法分析

### 1.1 小波域中值滤波法对含噪图像的滤波分析

噪声常常表现为图像上孤立像素的灰度突变,具有高频特性和空间不相关性。图像经小波分解后可得到低频部分和高频部分,低频部分体现了图像的轮廓,高频部分表现为图像的细节和混入的噪声。因此,对图像进行抑噪,只需要对其高频分量进行处理即可<sup>[7]</sup>。本文使用的处理方法为基于小波域的中值滤波法,其主要步骤如下:

1) 采用 sym4 小波对含噪图像  $f(x, y)$  进行小波分解,为减小图像边缘信息量的损失,分解层数为 4。

2) 对分解后的各高频分量进行中值滤波,滤波窗口大小分别取为 5、7、11、15。

3) 根据小波分解的低频分量和中值滤波后的各高频分量进行图像重构,得到消噪后最终的图像  $g(x, y)$ 。

### 1.2 级联算法对噪声光斑图像预处理分析

光斑图像中经常会同时含有高斯白噪声和椒盐噪声(即

收稿日期:2008-07-28;修回日期:2008-09-29。

**作者简介:**戴得德(1985-),男,安徽宣城人,硕士研究生,主要研究方向:图像处理、信号与信息处理;孙华燕(1963-),女,山东荣成人,教授,博士生导师,主要研究方向:图像处理、光电信息处理与对抗;宋丰华(1948-),男,安徽庐江人,高级工程师,主要研究方向:图像处理、光电信息处理与对抗;吴伟伟(1983-),男,安徽安庆人,硕士研究生,主要研究方向:图像处理、信号与信息处理。

双极脉冲噪声)组成的混合噪声。利用基于幅度的小波阈值抑噪法滤除高斯白噪声,该方法的基本思想是:将含噪图像进行小波变换,虽然噪声和图像信号在小波域的分布是重叠在一起的,但是它们的幅度不同,对幅度进行滤波,去除噪声的影响。一般情况在小波域中,信号的幅度大于噪声的幅度,如果过滤掉那些小幅度的信号,就可以达到去除噪声的目的。

但是,对于双极脉冲噪声,由于其能量也是集中在小区域范围内,它在小波域的幅度并不比信号的幅度小很多,对小波阈值法抑噪后的图像再进行形态学滤波抑噪。形态学滤波中的开、闭运算所处理的信息分别与图像的凹、凸相关,因此可用它们去除噪声、恢复图像。开运算可以抑制信号中的峰值(正脉冲)噪声,而闭运算则可抑制信号中的峰谷(负脉冲)噪声,而保持图像整体灰度值和大的暗区域基本不受影响<sup>[8]</sup>。为了去除信号中的正负脉冲噪声,通常可将开、闭运算结合起来构成形态滤波器。

所以小波阈值法和形态学滤波的级联算法对光斑图像的抑噪是分两步进行:首先用小波阈值法对光斑图像进行抑噪预处理并重建,得到剔除了大量高斯噪声后的图像;然后再对预处理后的图像采用灰度形态滤波器进一步滤除脉冲噪声后得到最终的图像。设 $f(x,y)$ 是受噪声污染的图像,算法示意图如图1所示。

含噪光斑图像 → 小波阈值法 → 形态学滤波器 → 处理结果

图1 基于小波阈值法和形态学滤波的级联算法示意图

具体步骤如下:

1) 对像素为 $(M \times N)$ 含噪图像 $f(x,y)$ 进行小波分解,分解层数 $k \in [0, \lg \max(M,N) - 1]$ ,得到各层低频系数 $w_{m,l}$ 和高频系数 $w_{m,h}$ 。对小波变换后的分解层的低频系数 $w_{m,l}$ 和高频系数 $w_{m,h}$ 进行软阈值处理;选取的阈值为:

$$\lambda = \sigma \sqrt{2 \times \ln n} \quad (1)$$

其中: $n$ 是图像的采样总数, $\sigma$ 是噪声的标准差。

2) 对软阈值处理后的图像进行小波逆变换,得到重构图像 $h(x,y)$ 。

3) 用开、闭运算结合起来构成形态滤波器对图像 $h(x,y)$ 做进一步的滤波,得到最终的图像 $g(x,y)$ 。

形态滤波器算法示意图如图2所示。

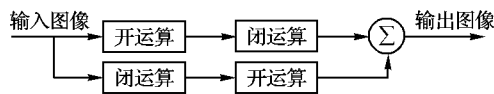


图2 形态学滤波器算法示意图

## 2 光斑图像消噪效果的比较与分析

选取 Sony Ex480CP 型近红外 CCD 拍摄强噪声图像 $(652 \times 512)$ 与模拟激光光斑叠加后的图像来验证本文方法的消噪效果,并与小波变换、中值滤波消噪效果等进行对比。

### 2.1 图像消噪效果评估方法

对光斑图像去噪效果的评估除了比较光斑的视觉效果和光强分布外,主要采用信噪比(SNR)和均方根误差(RMSE)作为评价标准。

设 $I_n(i,j)$ 和 $I(i,j)$ 分别表示 CCD 获取的噪声图像和模拟的无噪光斑图像, $I_p(i,j)$ 表示对 $I_n(i,j)$ 和 $I(i,j)$ 叠加的含噪光斑图像进行消噪后图像。SNR 和 RMSE 可表示为:

$$SNR = \lg \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N I_p^2(i,j)}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [I_p(i,j) - I(i,j)]^2} \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [I_p(i,j) - I(i,j)]^2}{M \times N}} \quad (3)$$

信噪比越大,噪声平滑效果就越好。均方根误差用来评价相同条件下消噪后的光斑图像与模拟无噪光斑图像之间的差异程度。均方根误差越小,说明消噪后的光斑图像与原模拟光斑图像越接近,表明该方法所提取图像边缘细节的损失越少,其主要特征参数(如光斑的形状、光斑的峰值等)越接近原始模拟光斑。

### 2.2 图像消噪效果比较与分析

含噪光斑图像和4种方法消噪后的光斑与光强分布图如图3所示,不同的低信噪比光斑图像经4种方法消噪后的定量评估结果见图4所示。

图3(a)所示为原模拟的光斑图像及光强分布,主要用于与 CCD 拍摄的强噪声图像进行叠加,并为处理后的光斑图提供对比参考。

图3(b)所示为叠加后的光斑图像。从它的光强分布图中可看出,此时图像的噪声能量很强,归一化后的信噪比约为 $-1.866$  dB。

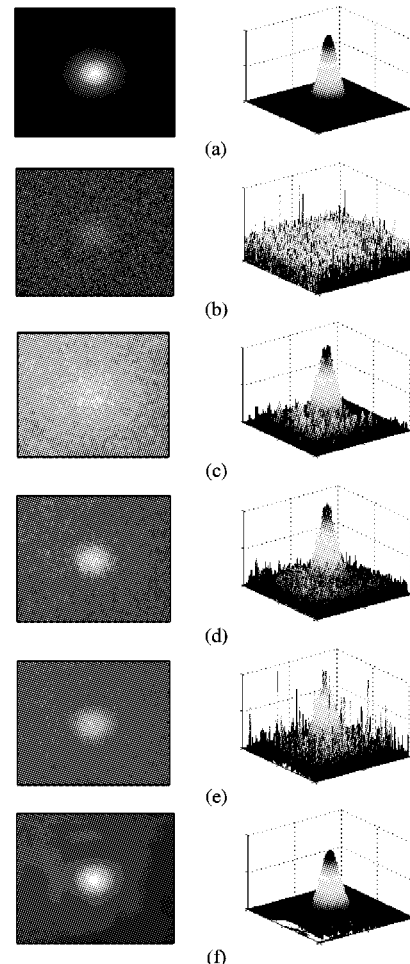


图3 光斑图像消噪后的效果比较

图3(c)、(d)所示的是分别经 $15 \times 15$ 位的空域中值滤波器和小波域中值滤波消噪后得到的光斑图像。空域中值滤波器对椒盐噪声的抑制作用显而易见,但同时看到图像中仍有大量高斯噪声,说明其对高斯噪声的抑制作用很弱,这一点从其光强分布中也可看出;另一方面,从图3(d)光强分布中可看出,小波域中值滤波所提取光斑边缘的连续性和光滑性优于普通中值滤波,并且从图4(a)、(b)中SNR、RMSE曲线可看出,小波域中值滤波处理后图像的信噪比大于普通中值滤

波处理后图像,其均方根误差小于空域中值滤波。

图 3(e)所示的是经单独使用小波阈值法抑噪后得到的光斑图像,该方法抑制了光斑中大量的噪声,光斑的基本形状和部分参数(如波峰)已经基本提取出来,但从光强分布中可看出图像仍有大量脉冲噪声。

图 3(f)所示的是级联算法消噪后的光斑图像,选用迈耶小波(Meyer)进行软阈值去噪处理,分解层数 $k$ 为 8,采用半径为 5 的圆形结构元素构建形态滤波器。从光强分布中可看出,噪声基本滤除,仅有中心光斑信号存在。

进一步,从图 4(a)、(b)中抑噪评估参数 SNR、RMSE 曲线中可看出:从信噪比改善情况来看,级联算法最好,小波变换次之,小波域中值滤波优于空域中值滤波,空域中值滤波相对最弱;随着原光斑图像信噪比的恶化,4 种方法的抑噪能力都有所减弱。

从均方根误差 RMSE 大小来看,级联算法较小,而其他三种方法相对较大,说明级联法尽量保留了图像的高频细节特征,所提取边缘细节、边缘连续性和光滑性较为理想,抑噪后的光斑主要特征参数接近原模拟光斑,而经其他三种方法处理后光斑图像变得模糊,会丢失较多的图像信息。

此外,从图 4(c)中抑噪后信噪比的比值曲线可得出:采用级联法等四种方法对  $-2.0843$  dB 的低信噪比图像进行预处理,级联法处理后的图像信噪比大约分别为其他三种方法的 3.14、1.48 和 1.34 倍;从图 4(b)也可简单计算出均方根误差分别约为其他三种方法的 0.50、0.67 和 0.82 倍;并且原图像信噪比越小,级联法的信噪比改善比值越大。说明级联法的噪声平滑效果优于单独使用小波变换或中值滤波。

### 3 实验光斑图像的抑噪处理

为了验证本文消噪方法的有效性,我们获取了由 Sony Ex480CP 型近红外 CCD 采集的强噪声激光光斑图像( $460 \times 350$ ),并对它们分别用两种方法进行处理,处理后的效果如图 5 所示。

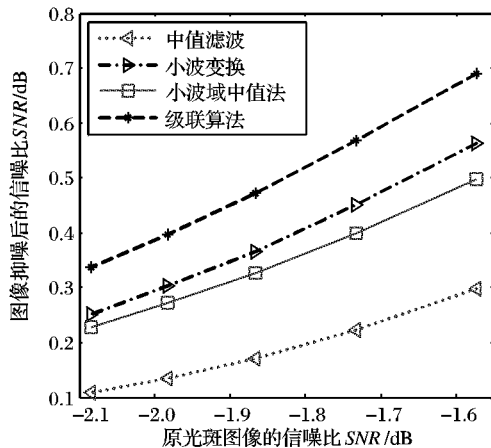
从实验结果可以得出:本文方法能较好地将近噪声中提取出来,所提取光斑边缘的细节、连续性和光滑性都较理想,光斑恢复的质量良好,抑噪后的光斑基本能够达到多个场合下对光斑进行分析的预处理要求。

### 4 结语

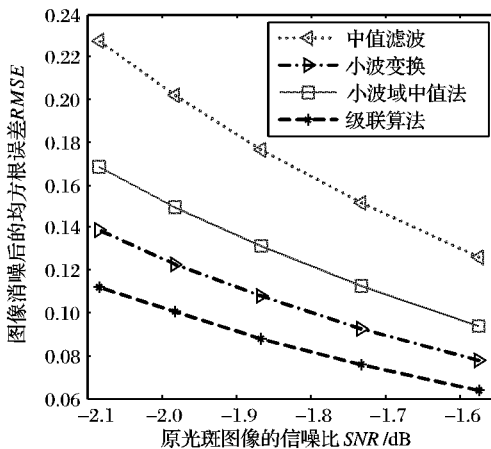
本文采取基于小波阈值法和形态学滤波的级联算法对强噪声条件下的光斑图像进行处理,其效果明显优于传统的非线性滤波方法,处理后的图像基本恢复了原图像的信息。随着原光斑图像信噪比的恶化,其抑噪效果和光斑特征的恢复效果更加优于传统方法,因此更适用于处理强噪声激光光斑图像,这对于激光主动成像条件下的弱背景、强噪声图像处理研究是十分有意义的。在激光主动成像的微弱信号处理方面,先前采用基于高阶累积量的信号处理算法,有效地从低信噪比回波信号中提取波形信息,本文使用的算法进一步实现了低信噪比条件下光斑图像的复原。在级联算法中,还应考虑结构元素的选择对光斑图像抑噪效果的影响,这将在以后的工作中继续研究。

#### 参考文献:

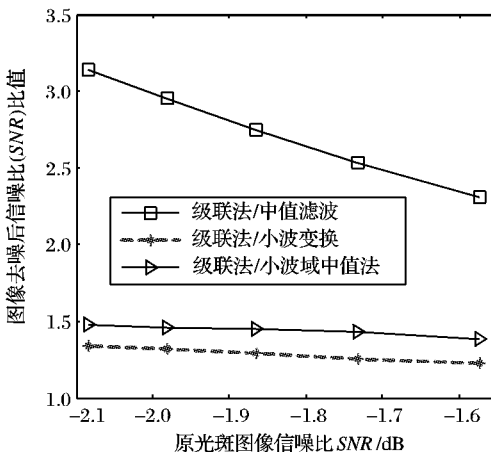
- [1] PITAS I, VENETSANOPOULOS A N. Linear mean filters in image processing [J]. IEEE Transaction on Acoustics Speech, Signal Processing, 1986, 4(3): 573-584.
- [2] 张兆礼,赵春晖,梅晓丹.现代图像处理技术及 Matlab 实现[M].北京:人民邮电出版社,2001.



(a) 抑噪后的信噪比曲线



(b) 抑噪后的均方根误差曲线



(c) 图像经不同方法消噪后信噪比的比值曲线

图 4 光斑图像经 4 种方法消噪后的定量评估结果

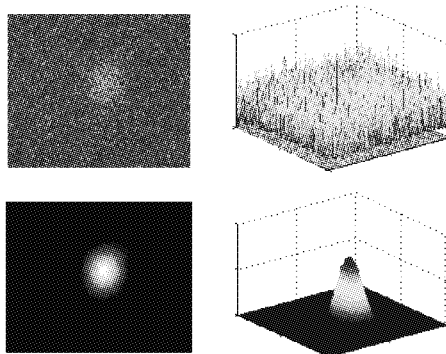


图 5 原实验光斑与级联法消噪处理后的图像及光强分布

形状;

2) 移动点,改变样条曲线的位置和方向,生成变形后的控制曲线集  $D$ ;

3) 通过计算将  $S$  和  $D$  上的控制点一一对应,生成控制点集;

4) 采用基于控制点集的方法计算图像变形;

5) 使用逆向映射方法生成变形图像。

图 3 所示为利用控制曲线集对图像进行变形操作计算生成的变形后的图像效果,将图像中的迪拜阿拉伯之星酒店向反方向倾斜,同时在高度上进行了缩小。相对于控制点,控制曲线能使图像的变形更加平滑、真实。

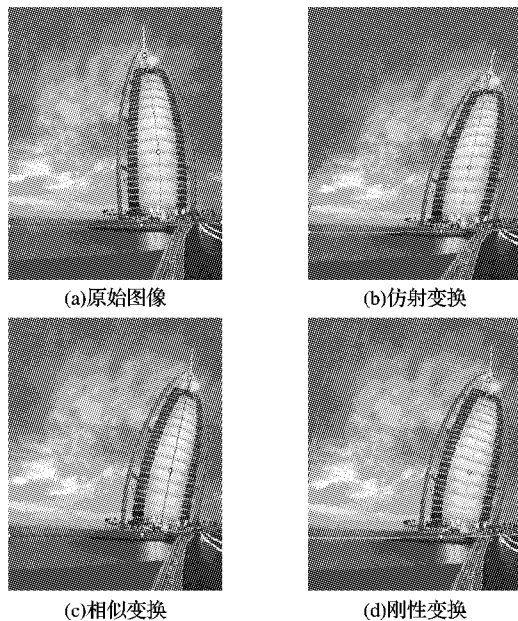


图 3 基于控制曲线集的 MLS 图像变形

图 4 所示为对悉尼歌剧院的贝壳穹顶进行旋转变形的效果,图 4(a)为原始图像,图 4(b)示出了利用基于控制点集的刚性变换变形后的图像效果,可以看到由于贝壳穹顶发生旋转,图像中云彩的形状发生了扭曲,这并不是我们所期望的变形效果。图 4(c)示出了在图中利用控制点生成两条控制曲线,图 4(d)示出了利用基于控制曲线集的刚性变换变形后的图像效果,利用样条曲线将变形区域分割出来,从变形效果可以看出贝壳穹顶发生了旋转,邻近区域变形平滑,具有真实感。

### 3 结语

仿射变换用于图像变形会产生非均匀缩放和错切,相似变换的同比例缩放某些局部位置则会产生不理想的效果,刚性变换有很强的真实感,使用户有操纵真实物体的感觉。

利用控制曲线集可以表示图像中的形状拓扑关系或轮廓信息,本文提出了基于控制曲线集的移动最小二乘图像变形

方法,进行了图像变形研究。生成新图像时,可以采用正向映射或逆向映射来实现,正向映射容易出现空洞和重叠现象。本文采用了逆向映射的方法,实现了基于控制曲线集的 MLS 图像变形,获得了较好的图像效果。

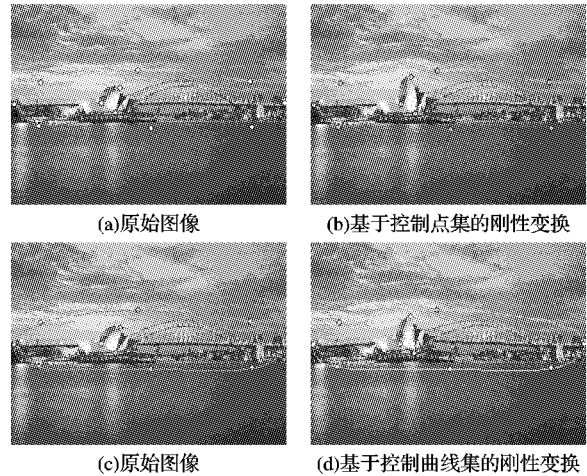


图 4 两种变形方法图像变形效果比较

### 参考文献:

- [1] SMYTHE D B. A two-pass mesh warping algorithm for object transformation and image interpolation, TR 1030 [R]. ILM Computer Graphics Department. San Rafael, Calif, 1990.
- [2] WARREN J, JU T, EICHELE G, et al. A geometric database for gene expression data [C]// Proceedings of the 2003 Eurographics/ACM SIGGRAPH symposium on Geometry processing. New York: ACM International Conference Proceeding Series, 2003, 43: 166 - 176
- [3] SEDERBERG T W, PARRY S R. Free-form deformation of solid geometric models [C]// Proceedings of ACM SIGGRAPH 1986. New York: ACM Press, 1986: 151 - 160
- [4] LEE S Y, CHWA K Y, SHIN S Y. Image metamorphosis using snakes and free-form deformations [C]// SIGGRAPH '95: Proceedings of the 22nd annual conference on Computer graphics and interactive techniques. New York: ACM Press, 1995: 439 - 448.
- [5] BEIER T, NEELY S. Feature-based image metamorphosis [C]// SIGGRAPH '92: Proceedings of the 19th annual conference on Computer graphics and interactive techniques. New York: ACM Press, 1995: 35 - 42.
- [6] IGARASHI T, MOSCOVICH T, HUGHES J F. As-rigid-as-possible shape manipulation [J]. ACM Transactions on Graphics, 2005, 24 (3): 1134 - 1141.
- [7] SCHAEFER S, MCPHAIL T, WARREN J. Image deformation using moving least squares [J]. ACM Transactions on Graphics, 2006, 25(3): 533 - 540.
- [8] LEVIN D. The approximation power of moving least squares [J]. Mathematics of Computation, 1998, 67(224): 1517 - 1531.
- [9] 孙家广. 计算机图形学 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.

(上接第 62 页)

- [3] 桂顶风, 陶剑峰. 数字图像中值滤波改进算法研究 [J]. 武汉理工大学学报, 2004, 28(1): 103 - 105.
- [4] 谢杰成, 张大力, 徐文立. 小波图像去噪综述 [J]. 中国图象图形学报, 2002, 7(3): 209 - 217.
- [5] 李弼程, 罗建书. 小波分析及其应用 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2003.

- [6] 崔屹. 图像处理与分析——数学形态学方法及应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [7] 倪虹霞, 胡巧多. 小波域中值滤波的图像去噪方法 [J]. 大连铁道学院学报, 2006, 12(4): 35 - 37.
- [8] GONZALEZ R C, WOODS R E. 数字图像处理 [M]. 阮秋琦, 阮宇智, 译. 电子工业出版社, 2007.