

基于小波变换的 STM 图像处理的研究*

周红秀^① 李鸿琦^② 张振宇^②

(^①天津大学燃烧学国家重点实验室,天津 300072 ;

^②天津大学力学系,天津 300072)

摘要 :根据扫描隧道显微镜 (STM) 的特点,将小波变换应用于扫描隧道显微镜的降噪、增强及融合方法进行了阐述。对于不同仪器和不同扫描样品的图像,选用不同的小波基函数和分解层数进行分解和重构,结果表明,利用小波变换对扫描隧道显微镜图像进行处理是有效的、可行的,图像质量得到明显提高。

关键词 扫描隧道显微镜 (STM) 小波变换 图像降噪 图像增强 图像融合

Study on the Image Processing of STM Based on Wavelet Transform

ZHOU Hongxiu^①, LI Hongqi^②, ZHANG Zhenyu^②

(^①State Key Laboratory of Engine Combustion, Tianjin University, Tianjin 300072, CHN ;

^②School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, CHN)

Abstract :Wavelet transform used in STM image was described according to the properties of STM. The image processing includes noise reduction, enhancement and fusion via the wavelet transform. Different wavelet basis functions and decomposition levels are proposed in the decomposition and reconstruction with diverse images of varieties of samples and instruments. This processing method is effective and feasible and its applications are demonstrated by some examples.

Keywords Scanning Tunneling Microscopy (STM) ; Wavelet Transform ; Image Denoise ; Image Enhancement ; Image Fusion

纳米科技包括三个研究领域:纳米材料、纳米器件、纳米尺度的检测与表征^[1]。纳米尺度检测与表征的重要工具——扫描隧道显微镜 STM 的出现,使纳米科技有了迅速的发展,它的发明者也因此获得了 1986 年诺贝尔物理学奖^[2]。但是扫描隧道显微镜是基于量子力学中的隧道贯穿效应,所检测的隧道电流为纳安级,因此检测的时候对环境的要求非常严格。轻微振动和电磁干扰都会对扫描图像有很大影响,出现各种各样的噪声和干扰。目前,在扫描隧道显微镜系统中配备的图像处理软件主要包括图像的灰度直方图处理、伪彩色处理、粗糙度的平滑处理及三维形貌显示

等功能,其他如图像特征的降噪、增强、边缘检测、压缩、融合等功能在配套软件中较少涉及。本文结合小波变换技术,针对 STM 的特点,对所得图像降噪、增强及融合的方法进行阐述,为 STM 图像的处理提供一种新途径。

1 小波变换的基本原理^[3]

对一维小波变换,其小波变换可记为

$$WT_f(a, b) = \int f(t) \overline{\psi_{a,b}(t)} dt \quad (1)$$

式中 $\psi_{a,b}(t)$ 为基本小波 $\psi(t)$ 的位移与尺度伸缩 $\psi_{a,b}$

2 曹葆青,曾晓雁.中美激光加工领域专利技术发展动态评述.激光技术,2004,28(4):346~351

3 王家金.激光加工技术.北京:中国计量出版社,1992.

4 易树平,苏力.日本激光加工技术在汽车工业中的应用.机械制造,1998(11):8~10

(编辑 徐洁兰) (收稿日期 2005-06-15)

文章编号 5917

如果您想发表对本文的看法,请将文章编号填入读者意见调查表中的相应位置。

* 国家自然科学基金资助项目(10372069) 天津大共建纳米研究中心资助项目

$(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$; a 为尺度因子, $a \in R^+$; b 为位移因子。

在数字图像处理中,常采用二进小波变换,即 $a = 2^j$ 。

1.1 二维正交小波变换

二维正交小波变换可由一维正交小波变换直接推得。若 φ 和 ψ 分别为一维小波变换的尺度函数和小波函数,那么二维尺度函数和二维小波函数分别为

$$\varphi(x_1, x_2) = \varphi(x_2)\varphi(x_1) \quad (2)$$

$$\psi^1(x_1, x_2) = \psi(x_2)\varphi(x_1) \quad (3)$$

$$\psi^2(x_1, x_2) = \varphi(x_2)\psi(x_1) \quad (4)$$

$$\psi^3(x_1, x_2) = \psi(x_2)\psi(x_1) \quad (5)$$

则二维图像 $f_{j-1}(x_1, x_2)$ 小波变换后得到 4 幅子图,分别为

$$A_2^j f_{j-1}(x_1, x_2) = \varphi(x_2)^* | \varphi(x_1) \cdot f_{j-1}(x_1, x_2) | \quad (6)$$

$$D_2^1 f_{j-1}(x_1, x_2) = \psi(x_2)^* | \varphi(x_1) \cdot f_{j-1}(x_1, x_2) | \quad (7)$$

$$D_2^2 f_{j-1}(x_1, x_2) = \varphi(x_2)^* | \psi(x_1) \cdot f_{j-1}(x_1, x_2) | \quad (8)$$

$$D_2^3 f_{j-1}(x_1, x_2) = \psi(x_2)^* | \psi(x_1) \cdot f_{j-1}(x_1, x_2) | \quad (9)$$

式中, $*$ 为竖直方向上的卷积, \cdot 为水平方向上的卷积。分辨率为 2^{j-1} 的二维图像 $f_{j-1}(x_1, x_2)$ 经小波分解后,得到 4 幅分辨率为 2^j 的子图。其中 $A_2^j f_{j-1}$ 为近似图,对应着 $j-1$ 图像中的低频分量, $D_2^1 f_{j-1}$ 、 $D_2^2 f_{j-1}$ 、 $D_2^3 f_{j-1}$ 为细节子图。

1.2 图像的多分辨分解与重构算法

STM 扫描获得的图像是离散的数据,所以要采用离散的小波变换。

若用 H_r 、 H_c 和 G_r 、 G_c 分别表示镜像共轭滤波器, H 、 G 作用于阵列 $\{C_j(x_1, x_2)\}((x_1, x_2) \in Z^2)$ 的行和列,则二维 Mallat 分解算法如下:

$$\left. \begin{aligned} C_{j+1} &= H_r H_c C_j \\ D_{j+1}^1 &= H_r G_c C_j \\ D_{j+1}^2 &= G_r H_c C_j \\ D_{j+1}^3 &= G_r G_c C_j \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

相应地有二维 Mallat 重构算法:

$$\begin{aligned} C_j &= H_r^* H_c^* C_{j+1} + H_r^* G_c^* D_{j+1}^1 + \\ &G_r^* H_c^* D_{j+1}^2 + G_r^* G_c^* D_{j+1}^3 \end{aligned} \quad (11)$$

式中 H^* 、 G^* 分别为 H 、 G 的共轭。

2 小波变换在 STM 图像处理中的应用

石墨原子图像是 STM 在室温大气状态下容易获得的扫描图像,所以选取石墨原子图像作为降噪图像具有代表性,也为 STM 科技工作者所熟悉。所选取的图像扫描范围为 $3.5 \mu\text{m} \times 3.5 \mu\text{m}$,分辨率为 180×180 。所使用的 STM 为 CSPM-930b(图 1)。

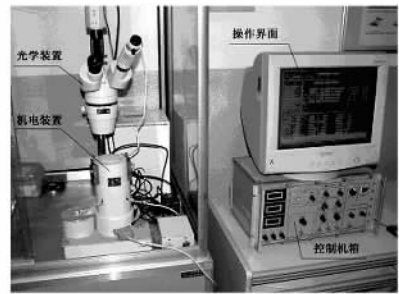


图1 CSPM-930b扫描探针显微镜

2.1 扫描图像降噪

图像降噪是图像预处理中一项应用比较广泛的技术,其作用是提高图像的信噪比,突出图像的期望特征。图像降噪方法有时域和频域两种,但是归根到底是利用噪声和信号在频域上分布不同进行的:信号主要分布在低频区域,而噪声主要分布在高频区域。但对 STM 图像而言,其细节也大都分布在高频区域。所以,扫描图像降噪中一个两难的问题是如何在降低图像噪声和保留细节上保持平衡。传统的低通滤波方法将图像的高频成分滤除,虽然能够达到降低噪声的效果,但破坏了图像的细节^[4]。而利用小波变换的多分辨特性就可以做到两者兼顾^[5]。其主要步骤如下:

(1) 采用 coif 、 bior 、 dmey 基本小波对含噪图像进行二层小波分解,然后将其信号投影到该正交小波基上获得相应的小波分解系数。

(2) 对每个尺度上的高频系数根据 Stein 的无偏似然估计原理选择不同的软阈值进行量化处理,调节相应的小波分解系数:

$$\overline{\alpha(j, k)} = \begin{cases} \text{sgn}(\alpha(j, k)) (|\alpha(j, k)| - \delta) \lambda > \delta \\ 0 \lambda & |\alpha(j, k)| \leq \delta \end{cases}$$

三种小波均选择固定软阈值格式,选择噪声类型为未知白噪声和水平细节系数。

(3) 根据小波分解的第 2 层的低频系数和经丈量化处理的第 1、2 层的高频系数,运用小波变换进行重构,恢复原信号。

处理图像结果表明,这三种小波处理图像的效果均不错。限于篇幅,将 dmey 小波 2 阶分解合成图像列于下面,见图 2。所选用的阈值第一级和第二级分别为 33.48 和 30.79。图 2a 为扫描后的原始图,从高序石墨的表面图像可以看出,在信号的采集和转换过程中,已产生了降质,噪声干扰严重,主要特征是在图像的行方向间隔引入了高频噪声。图 2b 为经小波变换降噪后的图像,可以看出,图像的细节保持得较好,而行方向的高频噪声基本上被全部去除,而且各个原子的形貌清晰可见。所以,小波降噪方法在扫描图像降噪方面有很好的效果。

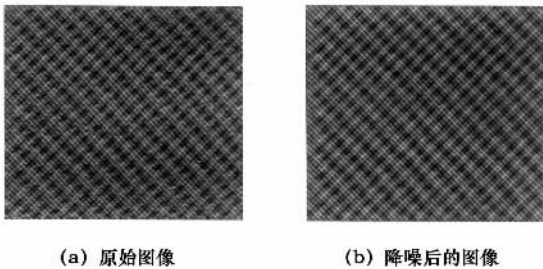


图 2 扫描图像在小波变换降噪前后的图像

2.2 扫描图像增强

图像增强所选样品为生命科学中普遍关注的纳米粒子 DNA,扫描仪器为 AJ-I 扫描隧道显微镜(图 3)。扫描范围为 $1.5 \mu\text{m} \times 1.5 \mu\text{m}$,分辨率为 476×482 。



图 3 AJ-I 扫描隧道显微镜

图像增强是指在图像处理过程中有选择地提升感兴趣的分量而舍弃不感兴趣的内容,对图像信息作初步提炼。图像增强的目的是突出图像中物体的轮廓特征,以便于机器识别。根据小波变换的原理,图像在进行小波变换后,将图像分解成大小、位置和方向都不相同的分量。对于扫描图像,采用 db7 小波基函数,进行 3 层多尺度二维小波分解图像。分解后的图像,其主要信息(即轮廓)由低频部分来表征,而其细节部分则由高频部分来表征;对分解后的低频系数选择加权因子 1.2 进行增强,而对高频系数选择加权因子 0.8 进

行弱化,即达到了增强图像的目的。由增强后的图像可以看出,轮廓得到增强,质量得到提高(图 4)。

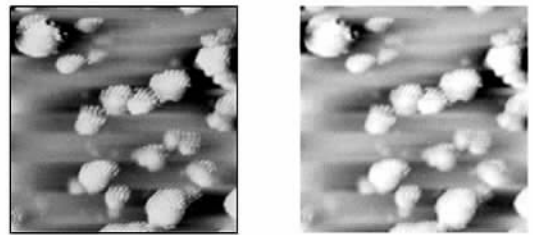


图 4 扫描图像在小波变换增强前后的图像

2.3 扫描图像融合

图像融合所选样品为纳米材料的研究热点纳米碳管,表面的颗粒状突起为纳米碳管的截面图。由图像可知,纳米碳管的直径为 50 nm 左右。所用仪器为 AJ-ISTM,扫描范围为 $1 \mu\text{m} \times 1 \mu\text{m}$,分辨率为 478×476 。

图像融合是对多幅图像数据用某种方法进行处理,生成一幅能够更有效地表示该目标检测信息的图像。对源图像按相应像素逐个取均值的方法,将使在一幅源图像中出现的特征的对比度减弱,甚至出现影像。为解决这一问题,近年来提出了基于金字塔的图像融合方法,它提供了对应于多尺度的灵活、方便的多分辨率信息,通过适当的算法进行融合,并进行图像重建,生成融合图像。金字塔图像融合方法克服了上述缺点,但仍有不完善之处,如金字塔的大小是源图像的 $4/3$,增大了数据量,在金字塔重建时,有时可能出现不稳定性,特别是当多幅源图像中存在明显差异时,融合图像将出现斑块^[7]。

本文利用小波变换对扫描图像进行融合的方法如下:

(1)对原始图像使用 rbio1.3 小波基函数进行二维多尺度二层小波分解,再对第二层低频系数使用 rbio1.3 小波进行小波重构,存储重构系数。

(2)对重构系数进行增强处理,利用 coif2 小波进行 3 级小波分解,所设置阈值为 160,低频系数增强加权因子为 2.0,高频弱化加权因子为 0.8,存储增强系数。阈值设置要以不产生冗余信息为宜。如在本例中,阈值超过 220 时在图像的正方形中心偏右的位置将产生黑斑,阈值小于 100,图像将产生纵向条纹。

(3)对重构系数和增强系数进行融合处理,使用 sym5 小波分别对两个系数进行二层多尺度小波分解,

对消噪系数矩阵使用加权因子 1.2 ,对增强系数矩阵使用加权因子 0.8。因为两个矩阵来自同一幅图像,维数相同,进行加法运算。为了降低图像亮度,对相加得到的矩阵增加弱化因子 0.7,再用 sym5 小波进行重构,得到融合后的图像(图 5)。由融合结果可知,不仅纳米碳管直径的微观形貌的宏观轮廓特性得到加强,而且还保留了微观结构的细观形貌。

对于小波基函数的选取,不同的图像所用的小波函数也不相同,要根据所要提取的不同信息选择不同的小波。对于本例(图 5a),上部有一条黑白相间的横条纹,显然是由于振动或者其他噪声干扰所致。所以选取的理想小波能最大限度地弱化这个横挑条纹并且保留原图像其他细节的小波为宜。另外,小波变换的层数越多,则融合的频率范围越丰富,但是,并不是说层数越多越好,因为分解的层数越多,顶层融合损失的信息量越大,而且均是小波逆变换不能恢复的损失,会

使得图像出现模糊羽化。因此基于小波分解的层数不宜过高。

3 结语

本文介绍了利用小波变换对扫描隧道显微镜的降噪、增强及融合等处理方法。提出了通过对小波高频系数进行弱化,对低频系数进行增强来实现降噪与保持图像细节的平衡,通过加大扫描图像消噪矩阵系数和弱化增强矩阵系数来实现对图像的融合。所有实验结果表明,利用小波变换方法对扫描隧道显微镜图像进行处理是有效的、可行的,图像质量得到明显提高。

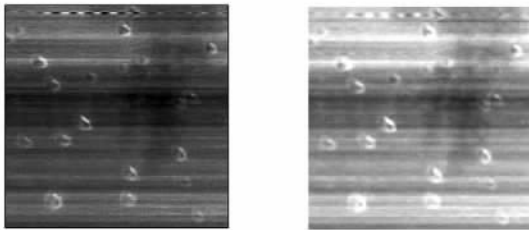
参 考 文 献

- 1 白春礼,贾词. 纳米技术与精密工程, 2003, 1(1)
- 2 Binnig G, Rohrer H. Appl. Phys. Lett., 1981, 40: 178 ~ 181
- 3 杨福生. 小波变换的工程分析与应用. 北京: 科学出版社, 2000.
- 4 Donoho D L. De-noising by soft-thresholding. IEEE Trans. IT, 1995, 41(3): 613 - 627.
- 5 Mallat S G. Multifrequency channel decompositions of images and wavelet models. IEEE Trans. ASSP, 1989, 37(12): 2091 - 2110.
- 6 王森,李振华,齐滕弥八. 双壁纳米碳管的制备及其结构研究. 物理学报, 52(11)
- 7 Nunez J, Otazu X, Fors O. Multiresolution-based image fusion with additive wavelet decomposition. IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing, 1999, 37(3): 1204 - 1211

(编辑 孙德茂) (收稿日期 2004-11-29)

文章编号 5918

如果您想发表对本文的看法,请将文章编号填入读者意见调查表中的相应位置。



(a) 原始图像

(b) 融合后的图像

图5 扫描图像在小波变换融合前后的图像

(上接第 49 页)

我国机床样本中,还未见过有类似的例子。事实上,我国不少高校、研究所均拥有从国外引进、性能很好的有限元分析软件,而利用率一般均很低。我国机床企业在开发新产品中却很少去利用。这类资源价格不菲,单个企业拥有是很不划算的,也没有必要。又如数控机床的软件补偿,国外已较普遍采用,这项技术难度不是很大,我国有些高校已掌握这项技术,效果很好,但企业则采用的不多,等等。对这些资源应该组织起来成为面向全社会服务的公共技术创新资源。

在 2004 年日本国际机床展览会上,展出和发行了“有关机床和制造技术的研究成果摘要汇编”一书,书中刊出的绝大部分成果出自日本高校。每一成果限刊出日、英文各一项,总共 121 页(16 开本)。这也是一种将科技资源推向社会的一种方法,值得我们仿效。

我们也应从体制和机制上想办法,让这些技术创新资源能够源源不断地支撑企业的自主创新。

总之,我们要改变营销理念,以向用户提供“全面解决方案”的方式,用市场和用户需求来“拉动”企业自主创新,要建立新的制造技术行业科研创新体系,对引进技术和国外产品用科学试验的方法进行消化吸收和创新,并充分利用高校、研究所已有的科技创新资源来“推动”企业自主创新。只要我们坚持不懈地从机制、体制上的“拉”“推”来提升我机床企业的自主创新,尽快缩小我国机床技术水平与国外的差距,使我国从机床大国变为机床强国,从而得到振兴是大有希望的。

此外,凡机床行业内的国有企业必须首先使机制、体制改革到位,使企业迸发活力,为自主创新创造更为有利的条件。

以上不一定正确,请大家指教。

(编辑 宋业钧) (收稿日期 2005-07-26)

文章编号 5915

如果您想发表对本文的看法,请将文章编号填入读者意见调查表中的相应位置。