

文章编号 1004 924X(2004)03 0282-05

# 小波变换及其在 MEMS 谐振器运动轨迹的特征提取中的应用

金翠云<sup>1</sup>, 栗大超<sup>1</sup>, 靳世久<sup>1</sup>, 冯亚林<sup>2</sup>, 李一博<sup>1</sup>, 郝一龙<sup>2</sup>

(1. 天津大学 精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072;

2. 北京大学 微电子学研究院, 北京 100871)

**摘要:** 为测量微机械系统(MEMS)谐振器的动态特性参数,根据 MEMS 谐振器运动图像的特点,将小波变换应用于 MEMS 谐振器运动轨迹的特征提取中。基于模糊图像合成技术,利用小波变换对 MEMS 谐振器的模糊运动图像进行了增强及降噪处理,并结合传统的图像处理方法,提取 MEMS 谐振器的运动轨迹,最终获得了 MEMS 谐振器的特性参数,从而可为 MEMS 器件的设计提供重要参考。实验结果表明,利用小波变换的方法获得了更好的测量精度,测量重复性误差为 100 nm。

**关键词:** MEMS 谐振器;特征提取;小波变换;模糊图像;图像增强;图像降噪

**中图分类号:** TH703 **文献标识码:** A

## Wavelet transform and its application in extraction of micro-resonator motion track features

JIN Cuiyun<sup>1</sup>, LI Darchao<sup>1</sup>, JIN Shirjiu<sup>1</sup>, FENG Yalin<sup>2</sup>, LI Yibo<sup>1</sup>, HA0 Yilong<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Institute of Microelectronics, Peking University, Beijing 100871, China)

**Abstract:** According to the characteristics of micro resonator motion images, wavelet transform is used to extract the micro-resonator motion track features. Based on the blur image synthetic technique, wavelet transform was applied to enhance and abate noise of blur micro-resonator motion images, while the traditional image processing method is used to extract the motion track features, and finally the natural parameter of micro resonator was acquired as important reference for MEMS design. In comparison with traditional image processing method, wavelet transform method has better measurement resolution, and its measurement repetition error is 100 nm.

**Key words:** MEMS resonator; wavelet transform; blur image; image enhancement; noise reduction

## 1 引言

微机械系统(MEMS)是在微电子技术基础上发展起来的多学科交叉的新兴学科<sup>[1]</sup>。由于它与传统机械系统相比具有可大批量生产、成本低、

功耗小、集成化等一系列显著的优点,近 10 年来得到了迅速的发展。随着 MEMS 从研究阶段逐渐步入产业化阶段,其对测试系统的需求,特别是对动态特性的测试技术的需求越来越迫切<sup>[2]</sup>。这是因为 MEMS 的动态特性决定了 MEMS 器件的基本性能, MEMS 微结构三维微运动情况,材料属性及

机械力学参数, MEMS 可靠性与器件失效模式, 失效机理等关键问题均应通过 MEMS 动态测试技术加以解决<sup>[3]</sup>; 同时, 通过动态测试技术, 还可以研究一系列相关的基础理论问题。因此, MEMS 动态测试技术近年来得到了国内外许多 MEMS 研究机构的高度重视<sup>[4]</sup>。

在对 MEMS 动态特性测试技术的研究中, 基于模糊图像合成技术, 利用小波变换方法, 针对 MEMS 谐振器运动图像的特点, 对 MEMS 谐振器的运动图像进行了增强、降噪等处理, 并结合传统的图像处理方法, 提取 MEMS 器件的运动轨迹, 最终获得 MEMS 谐振器的特性参数, 为 MEMS 器件的设计、加工提供了很好的参考。

## 2 模糊图像合成技术的测量原理

对于平面微运动的 MEMS 器件, 采用模糊图像合成技术可获得其运动特性参数。模糊图像合成技术的基本原理是在连续光的照明下, 采集 MEMS 器件的运动图像, 对所采集的图像利用图像处理技术得到器件运动的特性参数。以测量 MEMS 谐振器的特性参数为例, 模糊图像合成技术的原理描述为: 在连续光照明的条件下, 采集一定驱动频率下谐振器的运动图像。由于谐振器的驱动频率一般来说都较高 (> 1kHz), CCD 摄像机所成的像呈现模糊, 如图 1 所示(作为对比图 2 示出静止时谐振器的“清晰”图像), 即所称的“模糊图像”。

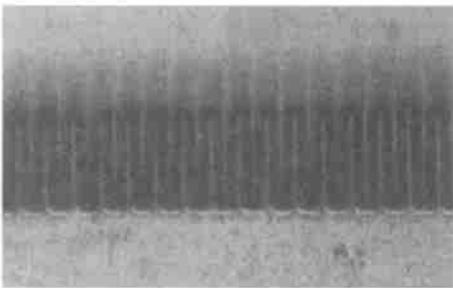


图 1 谐振器运动时的模糊图像  
Fig. 1 Blur image of the moving micro resonator

从图 1 可以看到, 图像所以会产生模糊带是因为谐振器在这个区域来回运动。借助这一点, 可以认为这个模糊带正反映了谐振器在这一驱动频率下的运动幅度。

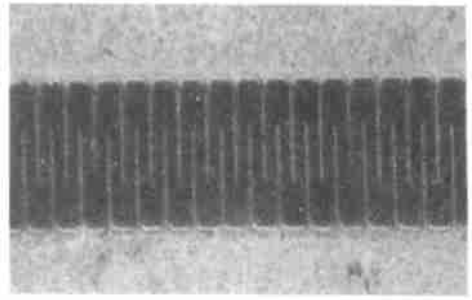


图 2 谐振器的静止图像  
Fig. 2 Still image of the micro resonator

利用图像处理技术测得这个模糊带的长度, 即可得到谐振器在这一驱动频率下的运动幅度。同理, 结合扫频技术可得到一系列驱动频率下谐振器的运动图像, 用相同的方法获得它们的运动幅度。从而, 利用上述一系列驱动频率下测得的运动幅度便可以采用曲线拟合的方法得到谐振器的幅频特性曲线, 最终得到谐振器的谐振频率及这一频率所对应的运动幅度等特性参数。

## 3 小波变换的基本原理

小波分析是傅里叶分析的一个发展。与傅里叶变换相比, 小波变换具有良好的时频特性, 能较好地解决时域和频域分辨率的矛盾。特别是在 1989 年 Mallat 提出了小波变换的多分辨率分析后, 实现了信号的快速分解与重构, 使小波分析真正走向工程应用, 成为信号处理的有效工具<sup>[5]</sup>。

对一维信号  $f(t)$ , 其小波变换可记为:

$$W(a, b) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \phi_{ab}^*(t) dt,$$

其中  $\phi_{ab}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \phi\left(\frac{t-b}{a}\right)$  是基本小波  $\phi(t)$  的位移与尺度伸缩;  $a \in R^+$  为尺度因子;  $b$  为位移因子。实际上, 小波函数可看成为一个带通滤波器的冲击响应, 经小波变换后, 信号将被分解到一系列频带上, 从而可以在这一系列不同频带中进行信号的处理与分析。在数字图像处理中, 通常采用二维小波变换, 即  $a = 2^j$ 。

二维小波变换则可由一维小波变换直接推得。设二维空间  $V_f^{(2)}(x_1, x_2)$  是可分离信号, 即可分解成 2 个一维空间  $V_f^{(1)}(x_1)$  和  $V_f^{(1)}(x_2)$  的张量乘积:

$$V_f^{(2)}(x_1, x_2) = V_f^{(1)}(x_1) \times V_f^{(1)}(x_2).$$

$V_J^{(2)}(x_1, x_2)$  即构成了  $L^2(R^2)$  一个多分辨率分析(MRA)。若  $\varphi$  和  $\phi$  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:

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

$$\phi^{(1)}(x_1, x_2) = \varphi(x_1) \phi(x_2)$$

$$\phi^{(2)}(x_1, x_2) = \phi(x_1) \varphi(x_2)$$

$$\phi^{(3)}(x_1, x_2) = \phi(x_1) \phi(x_2)$$

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

$$A_1^J f_{J-1}(x_1, x_2) = \varphi(x_2) * |\varphi(x_1) \cdot f_{J-1}(x_1, x_2)|$$

$$D_2^J f_{J-1}(x_1, x_2) = \phi(x_2) * |\varphi(x_1) \cdot f_{J-1}(x_1, x_2)|$$

$$D_2^{2J} f_{J-1}(x_1, x_2) = \varphi(x_2) * |\phi(x_1) \cdot f_{J-1}(x_1, x_2)|$$

$$D_2^{3J} f_{J-1}(x_1, x_2) = \phi(x_2) * |\phi(x_1) \cdot f_{J-1}(x_1, x_2)|$$

式中,  $*$  表示竖直方向上的卷积;  $\cdot$  表示水平方向上的卷积。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<sup>[6]</sup>。其中  $A_1^J f_{J-1}(x_1, x_2)$  反映的是  $x_1, x_2$  两个方向上的低频成分,  $D_2^J f_{J-1}(x_1, x_2)$  反映的是水平方向上的低频成分和垂直方向的高频成分,  $D_2^{2J} f_{J-1}(x_1, x_2)$  反映的是水平方向的高频成分和垂直方向上的低频成分, 而  $D_2^{3J} f_{J-1}(x_1, x_2)$  则反映  $x_1, x_2$  两个方向的高频成分。

## 4 小波变换在 MEMS 谐振器运动轨迹的特征提取中的应用

### 4.1 MEMS 谐振器模糊运动图像的增强

根据模糊图像合成技术, 为了得到 MEMS 谐振器在某一驱动频率下的运动幅度, 利用图像处理技术对这一驱动频率下所获得的模糊运动图像进行增强等图像处理。但是, 在增强处理中不是对 MEMS 谐振器运动图像的所有细节都给予增强, 而是只增强其水平细节, 这样才能得到其运动幅度。根据小波变换原理, 图像在进行小波变换后将分解成大小、位置和方向都不相同的分量。如果在进行逆变换之前根据图像的特点改变某些分量的小波系数大小, 就可以很方便地对图像中感兴趣的部分进行增强。根据这一原理, 首先将小波分解中的水平分量给予增强, 但对其他分量则保持不变, 在进行逆变换时, 重构图像中的水平

细节分量即会得到增强。利用 db1 小波首先对其进行了小波变换, 并加大高频水平方向小波系数, 再利用 db1 小波对其进行重构。由于 MEMS 谐振器的原始运动图像对比度比较低, 为了保证更好的处理效果, 在进行小波变换之前对其做了对比度增强处理。最后的重构图像如图 3 所示(原图为图 1)。

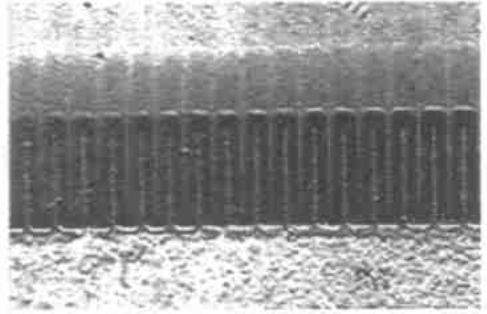


图 3 小波增强后的图像

Fig. 3 Enhancement of microresonator image by wavelet transform

从图中可以看到, 经小波增强处理后, MEMS 谐振器的水平细节分量得到了明显的增强。

### 4.2 MEMS 谐振器模糊运动图像的降噪

传统的建立在傅里叶变换基础上的滤波方法在提高信噪比和提高空间分辨率二项指标上存在矛盾。低通滤波固然能通过平滑抑制噪声, 但同时也会把图像中的边沿变模糊。高通滤波可以使边沿更加陡峭, 但背景噪声同时也被加强。与之相比, 基于小波变换的多分辨率滤波技术有明显的优点。通过小波变换对图像进行去噪是小波变换较为成功的一类应用, 其主要步骤为: (1) 选择一个小波和小波分解的层次  $N$ , 对含噪图像进行小波分解; (2) 对于从 1 到  $N$  的每一层, 选择一个适当的阈值, 并对这一层的高频系数进行阈值量化处理; (3) 根据修改后的小波系数矩阵, 利用同一小波函数对其进行重构。

根据小波去噪原理, 将增强后的 MEMS 谐振器运动图像进行降噪处理, 以消除图像处理过程中引入的噪声。图 4 为图 3 经小波变换降噪后的图像。降噪过程采用的是 sym5 小波, 小波分解层数为 2 层。从图 4 可以看出, 小波降噪方法在 MEMS 谐振器模糊运动图像降噪方面有着很好的效果, 且降噪后的图像细节保持良好。

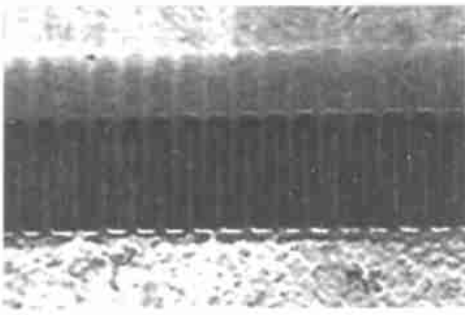


图 4 小波降噪后的图像

Fig. 4 Noise reduction of micro resonator image by wavelet transform

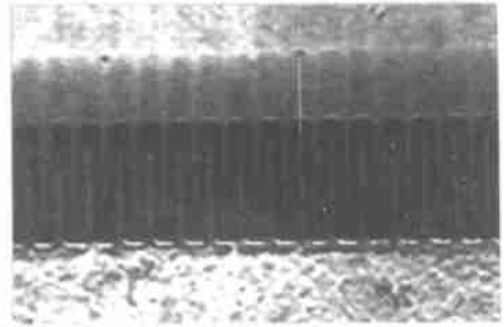


图 5 边缘点检测结果

Fig. 5 Result of edge detection

### 5 MEMS 谐振器特性参数测量实验结果分析及讨论

经小波变换增强和降噪处理后的 MEMS 谐振器的模糊图像, 其运动轨迹得到了很大程度的改善。对于处理后的图像利用边缘点检测技术即可将 MEMS 谐振器的运动幅度测出。图 5 为边缘点检测结果。

结合扫频技术, 得到一系列驱动频率下 MEMS 谐振器的运动图像, 利用小波变换来对它们进行处理后再利用边缘点检测技术测得不同驱动频率下 MEMS 谐振器的运动幅度(其中包含谐振频率), 最后通过曲线拟合得到了 MEMS 谐振器的谐振频率及在此频率下的运动幅度等重要特性参数。

利用上述方法, 对某一 MEMS 谐振器的动态特性参数进行了测量。所设置的基本参数如下: 扫频区间为 20~ 24 kHz; 扫描间隔为 100 Hz; 驱动电压为 160 V; 偏置电压为 20 V。在此条件下, 驱动 MEMS 谐振器运动并对其运动参数进行测量。得到其幅频特性曲线如图 6 所示。

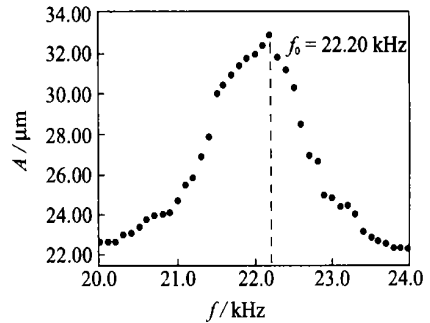


图 6 幅频特性曲线

Fig. 6 Amplitude frequency response curve

表 1 用普通图像处理方法所获得的测量结果及误差分析

Tab. 1 Measurement and analysis results with normal image processing method

驱动频率 $f$ (kHz)	20.0	21.4	22.2	23.4	24.0	谐振频率 $f_0$ (kHz)
测试 1 运动幅度 ( $\mu\text{m}$ )	22.62	27.92	32.94	23.17	22.32	22.20
测试 2 运动幅度 ( $\mu\text{m}$ )	22.50	27.59	32.61	23.25	22.10	22.10
测试 3 运动幅度 ( $\mu\text{m}$ )	22.42	27.78	32.76	23.38	22.27	22.20
测试 4 运动幅度 ( $\mu\text{m}$ )	22.70	27.83	32.56	23.08	22.12	22.20
测试 5 运动幅度 ( $\mu\text{m}$ )	22.56	27.64	32.66	23.08	22.16	22.20
标准偏差 $\sigma$	0.11	0.14	0.15	0.13	0.10	

从所测得的幅频特性曲线中即可得到待测 MEMS 谐振器的谐振频率及在此频率下的运动幅度, 从而为 MEMS 器件的设计提供一个反馈值, 且对此器件性能可以给出一个评价。

为了更好地对所提出的测量方法的测试精度

进行评价, 在相同的运动参数设置下表 1 给出了利用普通的图像处理方法得到的 5 次测量的部分结果; 表 2 给出了利用小波变换方法得到的 5 次测量的部分结果, 并且对相同驱动频率下各个运动幅度测量值的标准偏差进行了计算。从表 2 可

以看出,小波变换处理方法的测量重复性误差可达到 100 nm,具有较好的重复性及较高的测量精度,而从表 1 与表 2 的比较来看,小波变换方法的

测量重复性及测量精度也比普通图像处理方法要高。

表 2 用小波变换处理方法所获得的测量结果及误差分析

Tab. 2 Measurement and analysis results with wavelet transform method

	驱动频率 $f$ (kHz)	20.0	21.4	22.2	23.4	25.0	谐振频率 $f_0$ (kHz)
测试 1	运动幅度 ( $\mu\text{m}$ )	22.68	27.66	32.88	23.14	22.18	22.20
测试 2	运动幅度 ( $\mu\text{m}$ )	22.72	27.66	32.73	23.18	22.14	22.20
测试 3	运动幅度 ( $\mu\text{m}$ )	22.80	27.80	32.74	23.18	22.09	22.20
测试 4	运动幅度 ( $\mu\text{m}$ )	22.65	27.85	32.90	23.13	22.13	22.10
测试 5	运动幅度 ( $\mu\text{m}$ )	22.81	27.66	32.94	23.28	22.20	22.20
	标准偏差 $\sigma$	0.07	0.09	0.10	0.06	0.04	

## 6 结 论

基于模糊图像处理技术,利用小波变换的方法对 MEMS 谐振器的动态特性进行了测量。对 MEMS 谐振器的运动轨迹进行提取,最终得到

MEMS 谐振器的特性参数,为 MEMS 器件的设计及加工提供很好的反馈。实验表明,利用小波变换对 MEMS 谐振器的运动轨迹进行特征提取是行之有效的办法,其测量重复性达 100 nm。与普通图像处理办法相比,小波变换具有更好的测量重复性及更高的测量精度。

## 参考文献:

- [1] 李路明,王立鼎. MEMS 研究的新进展-微型系统及其发展应用的研究[J]. 光学 精密工程, 1997, 5(1): 68-73.  
LI L M, WANG L D. Microsystem and its development and applications[J]. *Optics and Precision Engineering*, 1997, 5(1): 68-73. (in Chinese)
- [2] REMBE C, KANT R, MULLER R S. Optical measurement methods to study dynamic behavior in MEMS[C]. *Microsystems Engineering: Metrology and Inspection. Bellingham(USA): Proc SPIE*, 2001. 127-137.
- [3] BURNS D J, HELBIG H F. A system for automatic electrical and optical characterization of microelectromechanical devices[J]. *J Microelectromech Syst*, 1999, 8(4): 473-482.
- [4] 李智,王向军. 微机电系统测试技术及方法[J]. 光学 精密工程, 2003, 11(1): 37-44.  
LI ZH, WANG X J. MEMS measurement technologies and methods[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2003, 11(1): 37-44. (in Chinese)
- [5] 杨福生. 小波变换的工程分析与应用[M]. 北京: 科学出版社, 1999. 1-12.  
YANG F SH. *Project analysis and application of wavelet transform* [M]. Beijing: Science Press, 1999. 1-12. (in Chinese)
- [6] 董汉丽. 基于小波变换的图像增强方法研究[J]. 郑州纺织工学院学报, 1999, 10(3): 40-43.  
DONG H L. The study of the method of reinforcing picture based on the wavelet transforms[J]. *Journal of Zhengzhou Textile Institute*, 1999, 10(3): 40-43. (in Chinese)

作者简介:金翠云(1978-),女,浙江人,天津大学精密仪器与光电子工程学院博士研究生,主要研究方向为微电子机械系统(MEMS)及其检测技术与智能控制;

靳世久(1947-),男,天津人,天津大学精密仪器与光电子工程学院博士生导师,教授,主要研究方向为检测技术与仪器、管道泄漏检测、微机电系统及其检测技术。