

基于模糊图像相关的 MEMS 动态测量技术

罗元¹, 杨博¹, 张毅²

1. 重庆邮电大学光电工程学院, 重庆 400065
2. 重庆邮电大学自动化学院, 重庆 400065

摘要 在基于视觉的微机电系统(MEMS)谐振器动态参数测量中,由于模糊图像合成技术对摄像机采集速率要求不高,且能够得到较高的测量精度,因此在实际测量系统中具有广阔的应用前景。在研究模糊图像相关性的基础上,提出了一种基于模糊图像相关性的 MEMS 平面运动参数测量方法。该方法通过求取模糊图像一阶微分的自相关函数负峰的间距实现振幅的测量,算法在空域内进行,不受变换域分辨率限制,可以通过插值提高振幅测量精度。实验分析表明,图像中不同区域的相似纹理是产生干扰峰的主要原因,通过在振动方向对图像进行对比度增强,可以减小振动方向的纹理重复度。实验结果表明:该方法是可行的,能精确测量 MEMS 谐振器的动态参数,并且测量方法简单,只需采集一幅 MEMS 谐振器在振动稳定状态下的模糊图像即可进行测量,数据处理量小,有利于实现在线测量。

关键词 图像相关;微机电系统;动态测试;模糊图像

中图分类号 TH133.2, TN256

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.27.006

Dynamic Measurement of Parameters of MEMS Based on Correlation of Blurred Image

LUO Yuan¹, YANG Bo¹, ZHANG Yi²

1. College of Photoelectric Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China
2. College of Automation, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China

Abstract In the measurement of MEMS resonator's dynamic parameters, because the fuzzy synthesis technology does not require a high camera image sampling rate to obtain a high measuring accuracy, so in the actual measurement system it finds a wide application. Based on the study of the blurred image correlation, this paper proposes a technique of dynamic measurement of MEMS parameters for the exact motion tracing. Through computing the distance between two correlated peaks of the first order differential blurred image of the autocorrelation function, the dynamic amplitude of micro-resonators can be obtained. This algorithm is carried out in the spatial domain, the results will not be affected by the resolution of the transform domain, and the measurement accuracy can be improved by interpolation. And through the experimental analysis, the cause of forming the interference peak is clearly identified, and a solution is found and tested. Experimental results show that in this way, the dynamic parameters of MEMS resonators can be effectively measured, and the method is simple, requiring only to collect a fuzzy image of MEMS resonator in the stable state, a small amount of data, and can be used in the online measurement.

Keywords blurred image correlation; MEMS; dynamic test; blur image

0 引言

微机电系统(MEMS)的运动特性测试技术是其研发过程

和产业化过程中的关键技术之一,对一些包含可动部件的 MEMS 器件,如 MEMS 谐振器,其动态性能决定了其基本性

收稿日期:2012-7-10;修回日期:2012-08-07

基金项目:国家自然科学基金项目(51075420)

作者简介:罗元(中国科协所属全国学会个人会员登记号:E660100045M),教授,研究方向为信号与信息处理、数字图像处理,电子信箱:luoyuan@cqupt.edu.cn

能。动态性能测试包括对器件的振动方向、振动振幅等的测量,目前国内外对 MEMS 动态性能的测试方法做了很多研究,但是大多数都是基于频闪成像技术。2007 年,金翠云等^[1]提出了基于相位相关与块匹配相结合的运动检测技术,得到了其动态特性参量;2009 年,陈治等^[2]提出了一种基于相位相关技术与 Radon 变换技术相结合的旋转角度测量方法。基于频闪成像技术的测量方法对硬件设备的要求都较高,尤其是对 CCD 摄像机的采集速率要求很高,此类高速摄像系统价格昂贵,不能满足经济实用性要求。目前基于连续光照明的测量方法的研究很少,基于连续光照明的测量方法,即模糊图像测量方法对系统硬件条件要求不高,且能够得到较高的测量精度,具有广阔的应用前景。2004 年以来,汪宝国等^[3-5]提出了一种高频振动的视觉测量方法,研究了运动模糊图像在空间域和频域上的数学模型,通过检测频谱上直线条纹的位置,实现高频振动振幅的测量。但是该方法由于受到傅里叶变换频谱分辨率的限制,要想获得高分辨率的频谱分辨率,就需要在不改变采样频率的条件下增加像素点数,即增加摄像机的分辨率,这也对摄像机的硬件提出了更高要求。

针对目前研究现状,本文从模糊图像退化模型出发,在研究模糊图像相关性的基础上,提出了一种基于模糊图像相关性的 MEMS 平面运动参数测量方法。该方法通过求模糊图像一阶微分的自相关函数实现振幅的测量,振动模糊图像处理在空域内进行,不受变换域分辨率的限制,可以通过插值提高振幅测量的精度。

1 振动幅度测量原理

1.1 简谐振动图像退化模型

在基于视觉的 MEMS 谐振器动态参数测量中,由于摄像机采集速率慢,所以获得的是模糊图像。图像模糊是由于器件与摄像机之间发生了相对运动,因此在不考虑噪声的情况下,模糊图像与静止图像存在如下关系^[6]:

$$g(x, y) = f(x, y) * h(x, y) \quad (1)$$

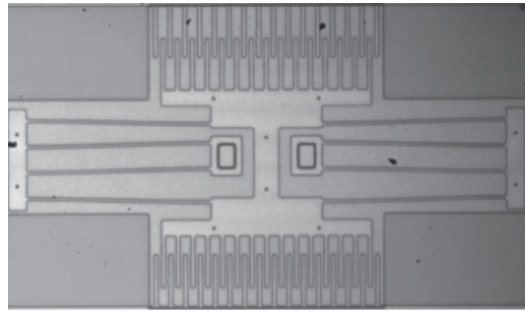
式中,*为卷积, $g(x, y)$ 为模糊图像, $f(x, y)$ 为静止图像, $h(x, y)$ 为系统函数。

图 1(a)为谐振器静止图像,假设 MEMS 器件在余弦信号 $x(t) = A \cos(2\pi ft)$ 驱动下垂直于水平方向做简谐振动,且摄像机的曝光时间远大于器件振动频率。图 1(b)为在余弦信号驱动下的谐振器振动模糊图像。

为简化分析,先对一维情况进行讨论。取静止图像的第 j 列像素 $f(x)_j$,则式(1)可表示为

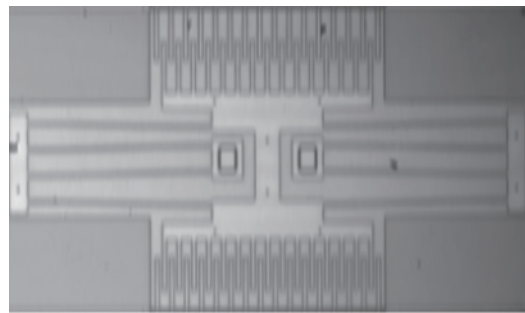
$$g(x)_j = f(x)_j * h(x)_j \quad (2)$$

其中, $g(x)_j$ 为振动图像的第 j 列像素, $f(x)_j$ 为静止图像的第 j 列像素, $h(x)_j$ 为系统函数。由 CCD 器件的线性积分特性和系统函数的定义可知, $h(x)_j$ 即为像素点 $f(x)_j$ 扫过 $[x-A, x+A]$ 范围在 CCD 平面上所成的像,与 $f(x)_j$ 在 $[x-A, x+A]$ 范围内各个 CCD 像素点停留的时间成正比。



(a) 谐振器静止图像

(a) Still images of MEMS



(b) 谐振器振动模糊图像

(b) Vibration image of MEMS

图 1 MEMS 图像

Fig. 1 Image of MEMS

对 $x(t) = A \cos(2\pi ft)$ 微分,有 $dx = -2\pi f A \sin(2\pi ft) dt$,所以有

$$\begin{aligned} dt &= \frac{1}{-2\pi f A \sin(2\pi ft)} dx = \frac{1}{-2\pi f A \sin(\arccos(x/A))} dx \\ &= \frac{1}{-2\pi f \sqrt{A^2 - x^2}} dx \end{aligned} \quad (3)$$

通常 CCD 像素尺寸是均匀的,即 dx 大小不变,且 $h(x)_j \propto dt$,所以可以令 $h(x)_j = \frac{k}{-2\pi f \sqrt{A^2 - x^2}}$;又因为 $\int_{-A}^A h(x) dx = 1$,且有 $k = -2f$,所以有

$$h(x)_j = \frac{1}{\pi \sqrt{A^2 - x^2}} \quad (4)$$

由于 $-A \leq x \leq A$,所以式(4)可以表示为

$$h(x)_j = \frac{1}{\pi \sqrt{A^2 - x^2}} \text{rect}\left(\frac{x}{A}\right) \quad (5)$$

此式即为 MEMS 器件在余弦信号驱动下的系统函数,式中 $\text{rect}(\cdot)$ 为矩形函数。将式(5)代入式(2)有

$$g(x)_j = f(x)_j * h(x)_j = \int_{-\infty}^{+\infty} f(\tau)_j \frac{1}{\pi \sqrt{A^2 - x^2}} \text{rect}\left(\frac{x}{A}\right) d\tau \quad (6)$$

1.2 模糊图像相关性分析

对模糊图像进行一阶微分,得到微分图像 $g'(x)_j$,

$$g'(x)_j = \int_{-\infty}^{+\infty} f(\tau)_j \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\pi \sqrt{A^2 - (x-\tau)^2}} \text{rect}\left(\frac{x-\tau}{A}\right) \right) d\tau$$

$$= \int_{-\infty}^{+\infty} f(\tau)_j \text{rect}\left(\frac{x-\tau}{A}\right) \frac{x-\tau}{\pi} [A^2-(x-\tau)^2]^{-3/2} d\tau + \frac{2}{\sqrt{3} \pi A} \left(f\left(x+\frac{A}{2}\right)_j - f\left(x-\frac{A}{2}\right)_j \right) \quad (7)$$

令 $T(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(\tau)_j \text{rect}\left(\frac{x-\tau}{A}\right) \frac{x-\tau}{\pi} [A^2-(x-\tau)^2]^{-3/2} d\tau$, 代入式(7), 则有

$$g'(x)_j = T(x) + \frac{2}{\sqrt{3} \pi A} \left(f\left(x+\frac{A}{2}\right)_j - f\left(x-\frac{A}{2}\right)_j \right) \quad (8)$$

求微分图像 $g'(x)_j$ 的自相关函数 $s(x)_j$, 有

$$\begin{aligned} s(x)_j &= g'(x)_j \otimes g'(x)_j \\ &= T(x) \otimes T(x) + \frac{2}{\sqrt{3} \pi A} T(x) \otimes f\left(x+\frac{A}{2}\right)_j - \frac{2}{\sqrt{3} \pi A} T(x) \otimes f\left(x-\frac{A}{2}\right)_j + \frac{2}{\sqrt{3} \pi A} f\left(x+\frac{A}{2}\right)_j \otimes T(x) + \frac{2}{\sqrt{3} \pi A} f\left(x+\frac{A}{2}\right)_j \otimes T(x) + \frac{4}{3\pi^2 A^2} f\left(x+\frac{A}{2}\right)_j \otimes f\left(x+\frac{A}{2}\right)_j - \frac{4}{3\pi^2 A^2} f\left(x+\frac{A}{2}\right)_j \otimes f\left(x-\frac{A}{2}\right)_j - \frac{4}{3\pi^2 A^2} f\left(x-\frac{A}{2}\right)_j \otimes f\left(x+\frac{A}{2}\right)_j + \frac{4}{3\pi^2 A^2} f\left(x-\frac{A}{2}\right)_j \otimes f\left(x-\frac{A}{2}\right)_j - \frac{2}{\sqrt{3} \pi A} f\left(x-\frac{A}{2}\right)_j \otimes T(x) - \frac{4}{\sqrt{3} \pi^2 A^2} f\left(x-\frac{A}{2}\right)_j \otimes f\left(x+\frac{A}{2}\right)_j + \frac{4}{\sqrt{3} \pi^2 A^2} f\left(x-\frac{A}{2}\right)_j \otimes f\left(x-\frac{A}{2}\right)_j \quad (9) \end{aligned}$$

其中, 式(9)第6项为

$$E_6 = -\frac{4}{3\pi^2 A^2} f\left(x+\frac{A}{2}\right)_j \otimes f\left(x-\frac{A}{2}\right)_j = -\frac{4}{3\pi^2 A^2} f(x)_j \otimes f(x)_j * \delta(x-A)$$

同理, 式(9)可化为

$$\begin{aligned} s(x)_j &= T(x) \otimes T(x) + \frac{2}{\sqrt{3} \pi A} T(x) \otimes f(x)_j * \delta\left(x+\frac{A}{2}\right) - \frac{2}{\sqrt{3} \pi A} T(x) \otimes f(x)_j * \delta\left(x-\frac{A}{2}\right) + \frac{2}{\sqrt{3} \pi A} f(x)_j \otimes T(x) * \delta\left(x+\frac{A}{2}\right) + \frac{4}{3\pi^2 A^2} f(x)_j \otimes f(x)_j * \delta(x) - \frac{4}{3\pi^2 A^2} f(x)_j \otimes f(x)_j * \delta(x-A) - \frac{2}{\sqrt{3} \pi A} f(x)_j \otimes T(x) * \delta\left(x-\frac{A}{2}\right) - \frac{4}{3\pi^2 A^2} f(x)_j \otimes f(x)_j * \delta(x+A) + \frac{4}{3\pi^2 A^2} f(x)_j \otimes f(x)_j * \delta(x) \quad (10) \end{aligned}$$

由式(10)可知, E_6, E_8 为 $f(x)_j$ 的自相关峰, 且为负峰, 虽然 E_3, E_7 也为负峰, 但由于 E_3, E_7 为 $T(x)$ 与 $f(x)_j$ 的互相关峰, 相关度有限且中心位置不同, 所以不会对自相关峰形成干扰^[10]。式(10)表明, $s(x)_j$ 有 2 个负的自相关峰, 尖峰的位置在 $x=A$ 和 $x=-A$ 处。因此可以通过检测 $s(x)_j$ 负峰之间的距离测量器件的振幅。假设 $s(x)_j$ 2 个负峰的位置分别为 x_1, x_2 , 则谐振器振幅 $A = |x_1 - x_2|/2$ 。

2 振动幅度测量流程

为简化分析, 假设 MEMS 器件垂直于水平方向做简谐振

动。振动幅度测量流程如下:

- (1) 求模糊图像 $g(x, y)$ 沿振动方向的一阶微分 $g'(x, y)$;
- (2) 计算 $g'(x, y)$ 各列的自相关函数 $s(x)_j, j=1, 2, \dots, N, N$ 表示 $g(x, y)$ 的列数;
- (3) 为减小误差和抑制噪声, 将 $s(x)_j$ 在行方向上相加得到一维数列 $s(x)$;
- (4) 检测 $s(x)$ 的负峰值间距 L , 则谐振器振幅 $A=L/2$ 。

3 实验结果及分析

对图 1 所示的振动模糊图像采用上述算法流程计算自相关函数 $s(x)$, 得到图 2 所示的振幅鉴别曲线。

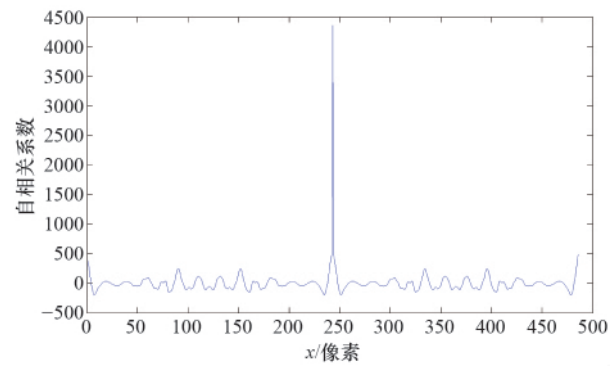


图 2 振幅鉴别曲线

Fig. 2 Amplitude differential curve

由图 2 可以看出, 振幅鉴别曲线 $s(x)$ 中出现 1 个正尖峰, 对应式(10)中的 E_9 , 在正峰附近有 2 个对称的负峰, 对应式(10)中的 E_6 和 E_8 。实验验证了上述分析的正确性。注意到, 整个鉴别曲线中出现了与 E_6, E_8 大小相同的负峰, 且特征峰绝对值相对较小, 对鉴别结果有较大影响, 直接导致无法寻找到正确的特征峰。初步猜想, 出现此现象是因幅度鉴别曲线是由列方向的像素求取自相关函数得到, 自相关函数的特性决定了图像中出现相似纹理会对自相关函数产生影响, 尤其是列方向条形相似纹理对自相关函数的影响更为明显。

纹理重复度指垂直方向上相似纹理重复出现时所间隔的像素个数。为了验证上述猜想, 采用随机方法生成 300×300 像素的图片, 其中在列方向上每隔 D 个像素重复出现相似纹理, 即纹理重复度为 D 。图 3(a)~(d) 为列方向上不同纹理重复度的静止图像, 作为对比, 图 3(f) 为行方向不同纹理重复度的静态图像。图 4 给出了对应图像的振幅鉴别曲线, 振动方向都为竖直方向, 振动幅度都为 8 个像素。

从图 4 可以看出, 列方向上不同的纹理重复度对应的鉴别曲线出现了一系列的负峰值, 幅度基本相同, 导致无法准确寻找特征峰, 并且峰值之间的间隔随着纹理重复度的增大而增大。对于行方向上不同纹理重复度的鉴别曲线, 除了需要的特征峰外, 没有出现明显的负峰, 不会对鉴别造成干扰。

上述实验结果验证了之前的猜想, 即图像中振动方向上相似纹理的出现是造成鉴别曲线出现多个特征峰的主要要

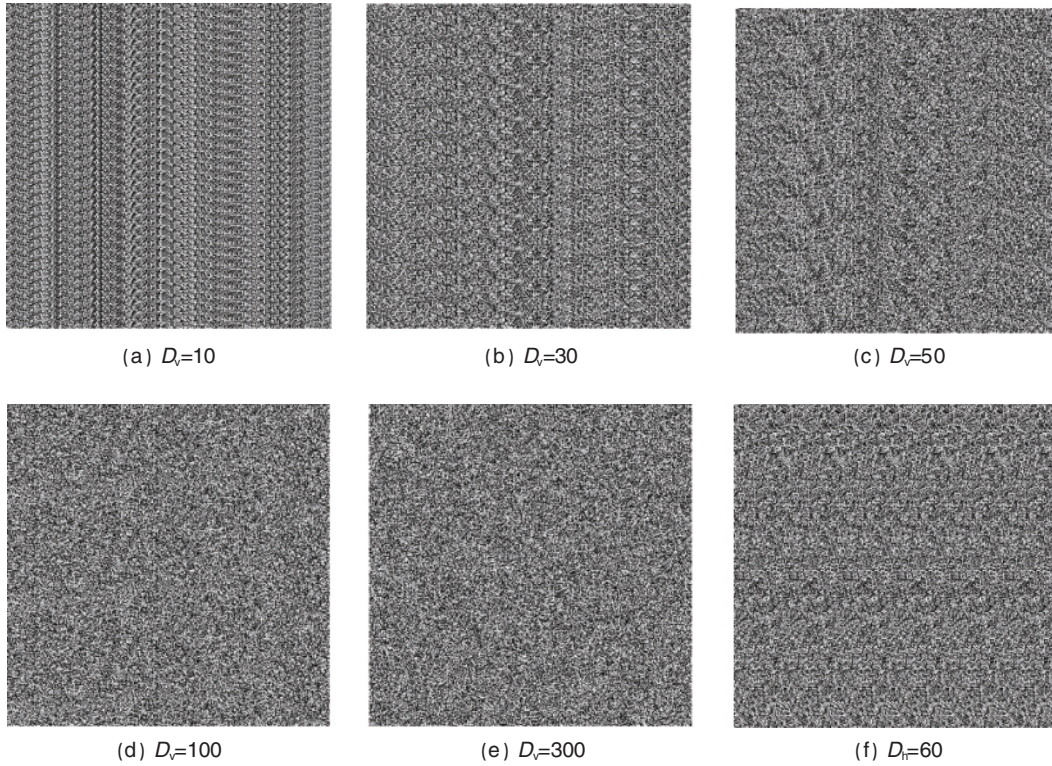


图3 不同纹理重复度的静止图像

Fig. 3 Still images of different texture repeat degrees

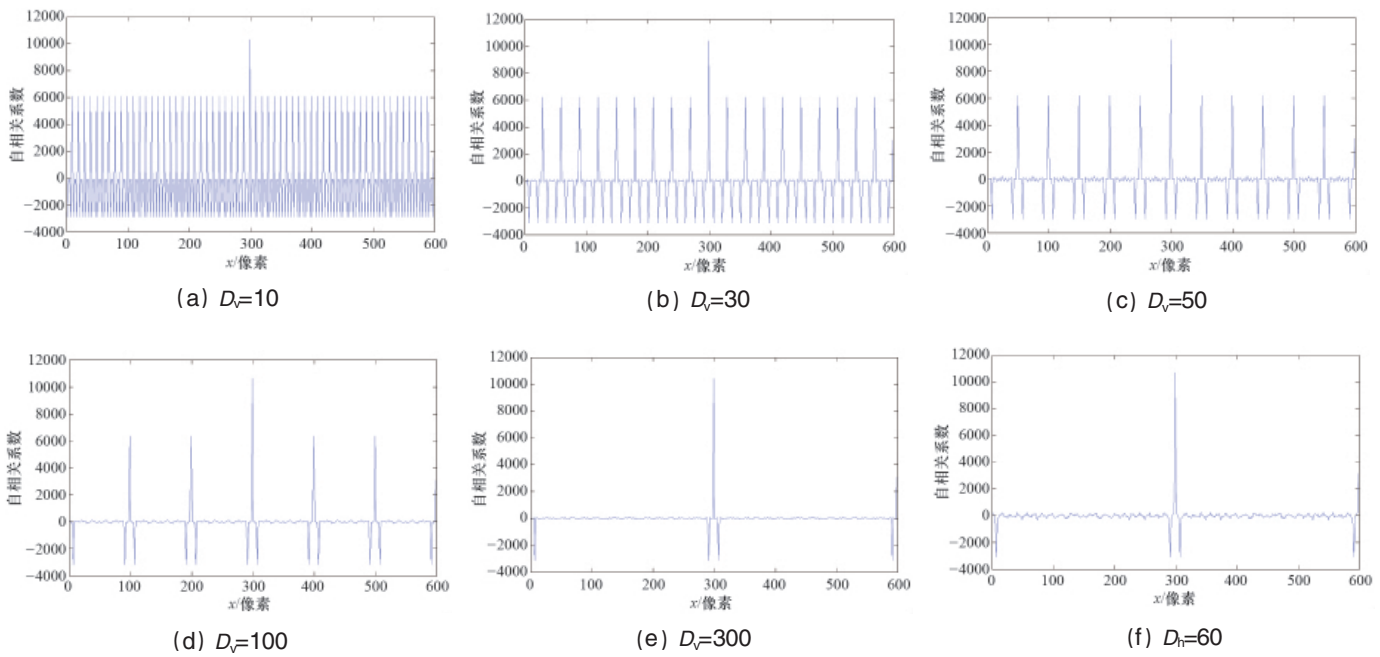


图4 不同纹理重复度的静止图像对应的鉴别曲线

Fig. 4 Amplitude differential curve corresponding to different texture repeat degrees

因,即干扰峰,干扰峰的出现会使鉴别曲线失去鉴别能力,因为无法判断哪一个是需要的特征峰,因此必须尽量降低这种干扰。基于这一结论,对上述算法做进一步改进,在振动方向对图像对比度进行增强,以减小振动方向的纹理重复度。图5

为在振动方向上对图像进行对比度增强后的鉴别曲线,与图2相比,特征峰的幅度明显增大,干扰峰明显减小,从而能够找出特征峰,达到幅度鉴别的目的,而且特征峰之间的距离并没有改变,即振幅鉴别结果没有改变。由图5所示的鉴别曲线

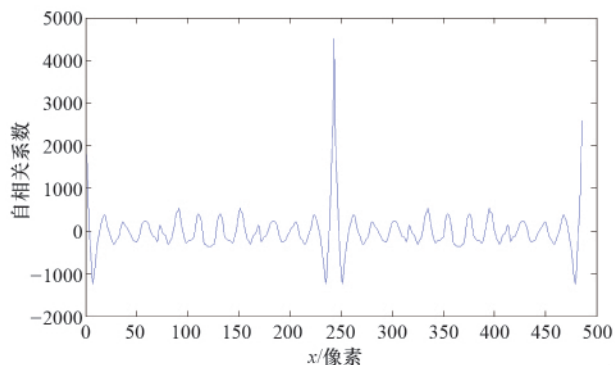


图5 改进后的振幅鉴别曲线

Fig. 5 Improved amplitude differential curve

计算相关峰之间的距离,得到振动幅度 $A=8$,与仿真结果一致,实验表明该方法是有有效、准确的。

4 结论

本文在研究模糊图像相关性的基础上,提出了一种基于模糊图像相关性的 MEMS 平面运动参数测量方法。该方法通过求取模糊图像一阶微分的自相关函数负峰的间距实现振幅的测量,算法在空域内进行,不受变换域分辨率限制,可以通过插值提高振幅测量精度。通过实验分析明确了图像中不同区域的相似纹理是产生干扰峰的主要原因,并提出通过在振动方向对图像进行对比度增强,以减小振动方向的纹理重复度的解决方案。实验结果表明,该方法是可行的,能精确测量 MEMS 谐振器的动态参数,并且测量方法简单,只需采集一幅 MEMS 谐振器在振动稳定状态下的模糊图像即可进行

测量,数据处理量小,有利于实现在线测量。

参考文献 (References)

- [1] 金翠云, 王建林, 靳世久, 等. 基于相位相关与块匹配的纳米精度微器件平面动态测量[J]. 光学技术, 2007, 33(2): 269-272.
Jin Cuiyun, Wang Jianlin, Jin Shijiu, et al. *Optical Technique*, 2007, 33(2): 269-272.
- [2] 陈治, 朱洪程, 胡晓东, 等. 基于相位相关技术的 MEMS 旋转角度高分辨率测量[J]. 光学精密工程, 2009, 17(8): 1884-1889.
Chen Zhi, Zhu Hongcheng, Hu Xiaodong, et al. *Optics and Precision Engineering*, 2009, 17(8): 1884-1889.
- [3] 汪宝国, 王石刚, 于新瑞, 等. 高频振动振幅的视觉测量 [J]. 机械工程学报, 2004, 40(4): 85-88.
Wang Baoguo, Wang Shigang, Yu Xinrui, et al. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2004, 40(4): 85-88.
- [4] 王超峰, 刘利, 汪宝国, 等. 高频振动方向和振幅测量的模糊图像处理方法[J]. 振动与冲击, 2005, 24(5): 59-62.
Wang Chaofeng, Liu Li, Wang Baoguo, et al. *Journal of Vibration and Shock*, 2005, 24(5): 59-62.
- [5] 王晓燕, 闫吉庆, 唐义, 等. 高频振动模糊图像仿真与分析 [J]. 光学技术, 2011, 37(3): 346-350.
Wang Xiaoyan, Yan Jiqing, Tang Yi, et al. *Optical Technique*, 2011, 37(3): 346-350.
- [6] 陈前荣, 陆启生, 成礼智, 等. 运动模糊图像点扩散函数尺度鉴别[J]. 计算机工程与应用, 2004, 23(15): 15-19.
Chen Qianrong, Lu Qisheng, Cheng Lizhi, et al. *Computer Engineering and Applications*, 2004, 23(15): 15-19.
- [7] 陈前荣. 目标图像的光学相关识别与运动模糊图像恢复 [D]. 长沙: 国防科技大学, 2004.
Chen Qianrong. Target image correlation recognition and motion blur optical image restoration [D]. Changsha: National Defense Science and Technology University, 2004.

(责任编辑 马宇红, 朱宇)

·学术动态·



“第十八届全国青年通信学术年会”征文

第十八届全国青年通信学术年会将于 2013 年 4 月 27—29 日,由中国通信学会主办于北京市举行。

征稿范围:通信与通信工程;网络理论与技术;信号与信息处理;计算机科学与技术;信息与网络安全;智能电网。

摘要截稿日期:2012 年 9 月 25 日。

联系电话:010-62262770。

电子信箱:cncomsoc@gmail.com。

通信地址:北京邮电大学 287 信箱(100876)。

会议网站: <http://www.comsoc.cn/>。