

文章编号 1004-924X(2009)08-1884-06

基于相位相关技术的 MEMS 旋转角度高分辨力测量

陈 治,朱洪程,胡晓东,胡小唐

(天津大学 精密测试技术及仪器国家重点实验室,天津 300072)

摘要:为实现 MEMS 微结构周期运动过程中各个时刻的旋转角度及其动态特性参数的高分辨力测量,针对频闪成像技术获得的微结构运动图像序列,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。该方法通过 Radon 变换将图像的空间坐标转换为极坐标的参数空间,使得空间坐标的旋转投影为参数坐标的平移运动,然后通过相位相关技术的亚像素运动估计算法,得到物体旋转角度的高分辨力测量结果。实验结果显示,用该方法测量旋转角度分辨力优于 0.01° ,表明该方法可以有效地减少由旋转产生的形变对测量结果的影响,提高测量结果的稳定性并减少测量误差。

关键词:MEMS 谐振器;旋转角度;Radon 变换;相位相关

中图分类号:TN752.8;TB922 **文献标识码:**A

High resolution measurement of MEMS rotation angle by phase correlation method

CHEN Zhi,ZHU Hong-cheng, HU Xiao-dong, HU Xiao-tang

(*State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and
Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China*)

Abstract: To realize the high resolution measurement of rotation motion to get the characteristic and dynamic parameters of MEMS resonators in every moment, this paper presents a method to measure the rotation angle based on the combination of Radon transform and phase correlation for the motion image sequences of microstructures collected by a stroboscopic imaging technology. By the Radon transform, the motion in Descartes coordinates is transferred to parameters of polar coordinates, so that the rotation motion is projected to displacements of parameters. Then, the displacements are measured by a phase correlation method to realize a subpixel motion measurement. Experimental results show that the resolution power of rotation angle is superior to 0.01° . MEMS motion process is analyzed by the method, and the offered solutions indicate that the influence of the distortion caused by rotation is decreased, while the repetition of measurement is increased.

Key words: MEMS resonator; rotation angle; Radon transform; phase correlation

收稿日期:2008-10-06;修订日期:2008-10-23.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2006AA04Z327);国家自然科学基金资助项目(No. 50505031);新世纪优秀人才支持计划资助项目

1 引 言

微电子机械系统(Micro-electro-mechanical System, MEMS)最大的特征是在不同外力或内力作用下都可以工作在谐振状态,从而完成系统相应的功能。除了对 MEMS 系统微结构几何尺寸的精密测量之外^[1],运动特性的测量也是 MEMS 系统性能和可靠性的重要参考。

由于 MEMS 运动一般都具有很高的频率,因此通过频闪成像技术获取 MEMS 器件在各个“瞬时”运动状态下的图像,然后从图像序列中提取出被测运动参数是目前研究的热点^[2]。目前 MEMS 运动测试主要集中于测试器件平面运动的刚性平移,变形以及离面的位移估计。采用相关技术^[3]、块匹配^[4]和光流技术^[5]已经能够实现 MEMS 平面位移纳米级测量分辨力。但对旋转运动的测量却关注很少,目前很多的角度测量都是运用图像的配准和拼接,测量方法很复杂^[6-9]。

相位相关技术具有对图像的灰度依赖较小,有较强的抗干扰能力和很高的匹配精度等特点^[10-12],在平面位移和图像配准中有很好的效果,但是直接应用在旋转角度测量上,需要在测量角度变化范围内遍历搜索,运算量非常大,而且在旋转运动中图像特征结构的成像会发生形变,从而影响测量分辨力的提高。因此,本文提出相位相关与 Radon 变换^[13]相结合的技术来进行快速、高分辨力测量。通过 Radon 变换后,将图像从空间坐标转换到 $\rho\theta$ 参数空间,同时将图像的平移运动和旋转运动分别投影的不同的参数坐标,将旋转角度变化转化为 θ 参数的平移运动,再利用相位相关算法实现亚像素的平移运动估计,从而得出实际旋转角度变化。

2 相位相关与 Radon 变换结合技术的测量原理

2.1 相位相关技术

相位相关的运动估计算法是一种非线性的、基于傅里叶功率谱分析的频域相关技术。在相位

相关的实施过程中,主要是依赖于功率谱分析进行相位相关方法计算。设 $r(x, y)$ 为参考图像, $s(x, y)$ 为待测图像,当两图像间仅存在平面内的位移变化 (x_0, y_0) ,即 $s(x, y) = r(x - x_0, y - y_0)$ 。

设 $R(u, v)$ 和 $S(u, v)$ 分别为 $r(x, y)$ 和 $s(x, y)$ 的傅里叶变换,则两幅图像的互功率谱的相位为:

$$\tilde{C}_{r,s}(R, S) = \frac{S(u, v)}{R(u, v)} = \frac{R(u, v)^* \times S(u, v)}{|R(u, v)^* \times S(u, v)|} = \exp(j(\varphi_s - \varphi_r)) = \exp(-j2\pi(ux_0 + vy_0)), \quad (1)$$

式中 φ_s, φ_r 分别为两图的相位角, $R(u, v)^*$ 为 $R(u, v)$ 的共轭复数。

相位相关函数定义为两图像互功率谱相位的逆傅里叶变换,表达式如下:

$$d = \text{IFFT}(\exp(-j2\pi(ux_0 + vy_0))), \quad (2)$$

式中 IFFT 表示傅里叶反变换。由公式(2)可见, d 为 $\Delta(\text{delta})$ 函数阵列,理想情况下,形成一个由 delta 构成的相关表面。在相关表面上搜索其峰值即可找到相应的时域位移。

相位相关方法在平移运动估计中应用较多,在旋转角度的测量方面虽有应用,但方法复杂,精度不高。在旋转运动中,由于显微镜照明方式和物镜数值孔径的作用,理想原点的成像也会因衍射呈椭圆形,并且椭圆形的长轴和短轴方向保持不变^[6]。即采集到的图像并不是预期的刚性运动,如图 1 所示。

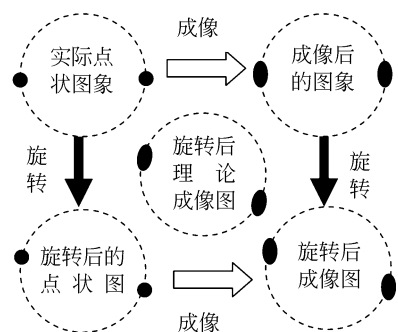
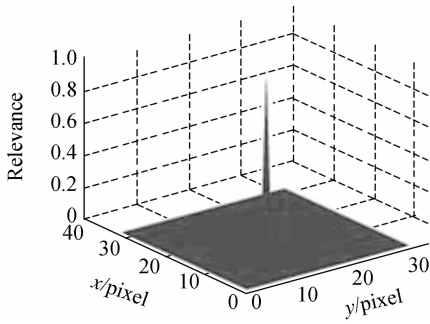


图 1 旋转对物体成像的影响

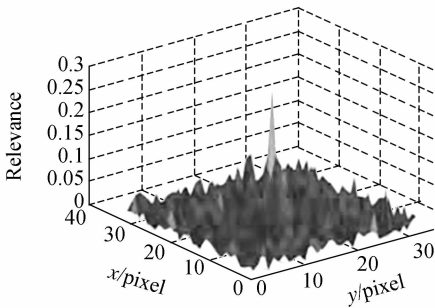
Fig. 1 Effect of rotation on rigid-body

由于这种变形的影响会导致 delta 函数的能量向四周扩散,形成由一个个尖峰组成的相关表

面,从而降低测量分辨力,如图 2 所示。



(a)理想情况
(a) Ideal image



(b)实际情况
(b) Real image

图 2 相关表面示意图

Fig. 2 Image of correlation surface

通过以上分析,本文提出一种结合 Radon 变化的相位相关技术。通过 Radon 变换将图象平移与旋转运动影射到参数空间,使得旋转运动在参数空间呈现为平移运动,再应用相位相关技术测量参数空间的平移运动,进而实现旋转角度测量。

2.2 Radon 变换技术

Radon 变换是在给定的方向上计算投影(Projection)。2 维函数 $f(x, y)$ 沿着 ϕ 方向的投影,定义为 $f(x, y)$ 平行于 y' 轴的线积分,即:

$$f_r(x', \phi) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x' \cos \phi - y' \sin \phi, x' \sin \phi + y' \cos \phi) dy', \quad (3)$$

$f_r(x', \phi)$ 简记为 $r_\phi(x')$, 是在 x' 上的投影。

Radon 变换具有平移和旋转不变性。其旋转不变性是令 $h(x, y) = f(x \cos \theta_0 - y \sin \theta_0, x \sin \theta_0 + y \sin \theta_0)$ 为 $f(x, y)$ 顺时针旋转 θ_0 角之后获得的函数,则 $h(x, y)$ 的 Radon 变换为:

$$H(\theta, \rho) = \iint_D f(x \cos \theta_0 - y \sin \theta_0, x \sin \theta_0 + y \cos \theta_0) \delta(\rho - x \cos \theta - y \sin \theta) dx dy, \quad (4)$$

令

$$\begin{bmatrix} \mu \\ \nu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_0 & -\sin \theta_0 \\ \sin \theta_0 & \cos \theta_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}, \quad (5)$$

可得:

$$\begin{aligned} H(\theta, \rho) &= \iint_D f(\mu, \nu) \delta(\rho - (\cos \theta_0 \mu + \sin \theta_0 \nu) \cos \theta - \\ &\quad (-\sin \theta_0 \mu + \cos \theta_0 \nu) \sin \theta) d\mu d\nu = \\ &= \iint_D f(\mu, \nu) \delta(\rho - \cos(\theta + \theta_0) \mu - \\ &\quad \sin(\theta + \theta_0) \nu) d\mu d\nu = \\ &= F(\theta + \theta_0, \rho), \end{aligned} \quad (6)$$

由此可见,原图顺时针旋转 θ_0 角,则其 Radon 变换沿 θ 轴平移 θ_0 。

虽然由于衍射和数值孔径作用会导致图像旋转发生形变,但是并不影响图像中直线特征的旋转角度。这是因为构成直线的各个点的质心的相对位置不因形变而发生变化,所以由点的质心所构成的直线的旋转角度不受影响。因此,通过 Radon 变换可以将 MEMS 器件中具有直线特征的图像结构映射到参数空间,通过检测这些直线特征在参数空间的平移来实现角度的测量,从而避免在图像空间由于形变而产生的影响。

3 实验结果分析及讨论

选用美国 Failure Analysis Associates 公司设计的 MEMS 平面微结构谐振器,如图 3 所示。

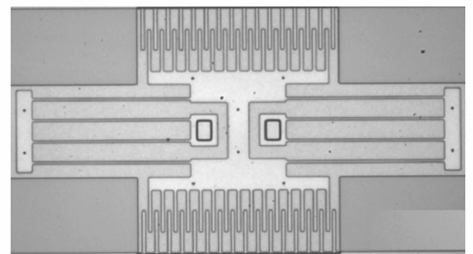


图 3 MEMS 微谐振器图像

Fig. 3 Image of micro-resonator

将该平面谐振器放置在高精度旋转台上,以 0.01° 为步距,从 $0 \sim 0.1^\circ$ 产生 10 幅图像,应用本

文的方法对该图像序列进行测量。

在谐振器上选择一具备直线特征的感兴趣区域(ROI 区域),如图 4 所示。

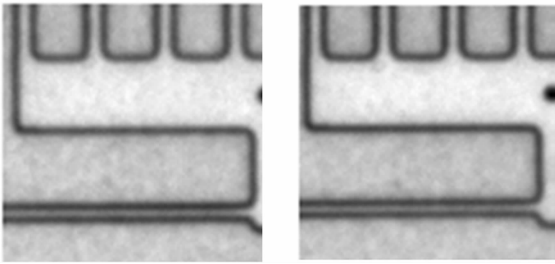


图 4 微谐振器不同旋转角度的 ROI 区域

Fig. 4 ROIs of micro-resonator with different angles

对该 RIO 区域进行 Radon 变换,如图 5 所示。

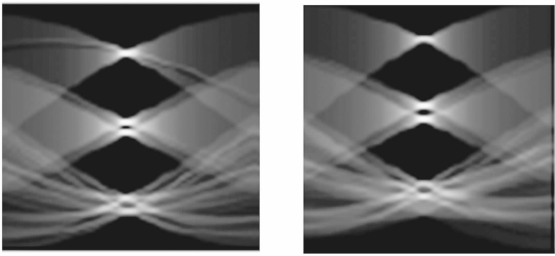


图 5 Radon 变换后的 ROI 区域

Fig. 5 ROIs after Radon transform

对图 5 进行相位相关运算,其相关表面如图 6 所示。

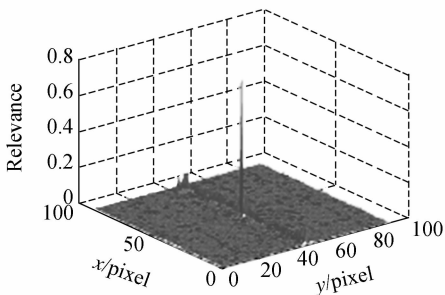


图 6 相关表面图

Fig. 6 Image of correlation surface after Radon transform

从图 6 可以看出经过 Radon 变换后的相关表面相关峰非常尖锐,受图像原本噪声和灰度影响较小,有利于提高测量分辨力。

对 10 幅图像旋转角度测量的结果如表 1 所示。

表 1 步距为 0.01° 时测量的结果

Tab. 1 Measurement results of 10 images

旋转角度 ($^\circ$)	测量角度 ($^\circ$)	误差 ($^\circ$)	运行时间 (ms)
0.01	0.009 0	0.001	188
0.02	0.017 9	0.002	172
0.03	0.028 4	0.002	140
0.04	0.038 8	0.001	187
0.05	0.049 9	0.000	172
0.06	0.060 6	0.001	219
0.07	0.071 7	0.002	171
0.08	0.082 8	0.003	180
0.09	0.093 3	0.003	177

从测量结果可以看出旋转角度测量分辨力优于 0.01° , 测量最大偏差为 0.003° 。MIT 的 Freeman 教授在其年度报告^[6]中,对 -1° 到 $+1^\circ$ 的旋转运动范围内采集 10 幅图像,采用图像拼接的方法进行测量,其测量结果的最大偏差为 0.01° 。从实验结果可以看出,本文的方法在测量分辨力上优于文献^[6]中的方法。在算法复杂度上,由于避免了图像拼接技术,而是通过对感兴趣区域进行整体运算,在算法复杂性上被大大降低,在普通 PC 机上进行算法处理的平均测量时间 < 200 ms,说明本文提出的方法也非常适合在线检测。

对上述 MEMS 平面微谐振器施加正弦波激励信号。在激励信号幅度为 10 V;激励信号偏置电压为 40 V;驱动频率为 23 kHz 的条件下,应用自行研制的频闪成像系统^[14],在脉宽占空比为 50%;采样相位为 12;频闪次数为 1 500 次, $20\times$ 物镜的条件下,采集 MEMS 谐振器在 12 个不同运动相位处的瞬时静态图像进行分析。

MEMS 谐振器设计为中间微结构在上下端静电梳齿的作用下进行上下往复的直线运动。但是实际上,在直线往复运动中同时必然存在轻微的旋转运动。通过本文方法对 MEMS 谐振器实际运动的旋转角度进行测量的结果如图 7 所示。

从测量结果可以看出,该直线位移式谐振器在第 4 和第 5 运动相位下有相对较大的偏转角度,使静电梳齿之间的间隙变小,并且在外界气流波动和振动的影响下可能会导致静电梳齿的两极

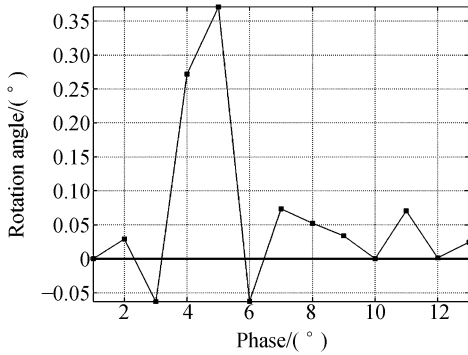


图 7 MEMS 谐振器运动角度测量

Fig. 7 Angle measurement of MEMS motion

接触而发生短路,急剧增大的电流将会导致 MEMS 谐振器的烧毁。在以往实验过程中被损坏的该类型谐振器两端静电梳齿都有烧毁变黑的

参考文献:

- [1] 王向军,王峰. 显微精密成像与微型机械尺寸检测技术[J]. 光学 精密工程, 2001, 9(6): 511-513.
WANG X J, WANG F. Study of micro mechanical size inspection technology by microscope precision digital image [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2001, 9 (6): 511-513. (in Chinese)
- [2] REMBE C, KANT R, MULLER R S. Optical measurement methods to study dynamic behavior in MEMS[J]. *SPIE*, 2001, 4400: 127-137.
- [3] CHEN Z, HU X D, JIN C Y, *et al.*. Nanoscale measurement technique of in-plane motion for MEMS based on phase correlation method [J]. *SPIE*, 2006, 6357: 63573p1-7.
- [4] 金翠云, 粟大超, 靳世久, 等. 基于块匹配技术的 MEMS 器件平面微运动特性的测量[J]. 吉林大学学报, 2004, 34(3): 445-448.
JIN C Y, LI D CH, JIN SH J, *et al.*. Measurement technique of In-plane motion for MEMS based on block matching[J]. *Journal of Jilin University of Technology*, 2004, 34(3): 445-448. (in Chinese)
- [5] 张少婧, 胡晓东, 胡小唐. 基于光流技术的 MEMS 平面微运动特性测量[J]. 纳米技术与精密工程, 2006, 4(3): 240-244.
ZHANG SH J, HU X D, HU X T, Measuring in-plane motion of micro-MEMS based on optical flow [J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2006, 4(3): 240-244. (in Chinese)
- [6] The annual progress report of the research laborato-

现象,可以推断在第 4 和第 5 相位运动偏转角度过大可能是形成这种现象的原因。

4 结 论

本文提出了一种基于相位相关与 Radon 变换相结合的旋转角度测量方法,可以提高相位相关方法的测量分辨力。对通过频闪成像技术得到不同运动相位的 MEMS 微谐振器的清晰图像进行分析,可以提取 MEMS 器件的平面旋转运动特性参数,从而为 MEMS 器件的设计提供重要参考。实验表明,该方法可以实现 0.01° 的旋转角度测量分辨力,测量最大偏差为 0.003° ,并且算法实现简单,运算速度快,可以满足目前 MEMS 器件对微小旋转角度在线测量的要求。

- ry of electronics at the Massachusetts Institute of Technology (MIT), 1999; NO. 142 [R/OL]. <http://www.rle.mit.edu/media/pr142/20.pdf>.
- [7] HIROVUKI O, HISASHI S. Detection of rotation and parallel translation using Hough and Fourier transforms[J]. *IEEE Inter. Conf. Image processing*, 1996: 827-830.
- [8] LOH K H, ER M H, HUI S K. High accuracy registration of translated and rotated images using hierarchical method[J]. *IEEE Inter Conf. Acoustics, Speech and Signal Processing*, 2000: 2211-2214.
- [9] ERTURK S. Translation, rotation and scale stabilization of image sequences [J]. *Electronics Letters*, 2003, 39(17): 1245-1246.
- [10] 马晶, 徐科华, 谭立英. 基于相位相关的深空光通信扩展信标跟踪技术研究[J]. 光学 精密工程, 2006, 14(3): 180-184.
MA J, XU K H, TAN L Y. Extend-beacon tracking for deep space optical communication based on phase-correlation[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(3): 180-184. (in Chinese)
- [11] 高莹莹, 杨建峰, 马晓龙, 等. 基于 Fourier-Mellin 算法的干涉图像配准[J]. 光学 精密工程, 2007, 15(9): 1415-1420.
GAO Y Y, YANG J F, MA X L, *et al.* Interference image registration based on Fourier-Mellin algorithm[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(9): 1415-1420. (in Chinese)
- [12] HILL L, VLACHOS T. Motion measurement u-

sing shape adaptive phase correlation[J]. *Electronics Letters*, 2001,37(25):1512-1513.

- [13] KELLY B T, MADISETTI V K. The fast discrete radon transform-I: Theory [J]. *IEEE transaction on Image Processing*, 1993,2(3):382-400.
- [14] 胡晓东, 粟大超, 郭彤, 等. 微结构特性的光学测试

平台[J]. *光学学报*, 2005,25(6):803-808.

HU X D, LI D C, GUO T, *et al.*. Optical measurement platform for micro-structures characterization[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005,25(6):803-808. (in Chinese)

作者简介:



陈 治(1977—),男,湖南湘潭人,博士,2007年于天津大学获得博士学位,现为天津大学精仪学院讲师,主要从事微纳测试技术的研究。E-mail: ch-z@163.com



胡晓东(1974—),男,江西新余人,博士,博士生导师,2000年于天津大学获得博士学位,现为天津大学教授,主要从事微纳测试技术的研究。E-mail: xdhu@tju.edu.cn



朱洪程(1987—),男,河南信阳人,2008年于天津大学获得学士学位,现为天津大学硕士研究生,主要从事计算机图像处理算法的研究。E-mail: zhu-hongchengabc@yahoo.com.cn



胡小唐(1952—),男,山西大同人,博士,博士生导师,1983年于天津大学获得博士学位,现为天津大学教授,主要从事微纳测试与加工技术的研究。E-mail: xthu@tju.edu.cn

● 下期预告

卫星光通信光学天线轴间距的精确调试

俞建杰,谭立英,刘剑峰,韩琦琦,杨玉强

(哈尔滨工业大学 可调谐激光技术国家级重点实验室,黑龙江 哈尔滨 150080)

卫星光通信系统的光学天线由物镜和目镜构成,两者在光轴方向的间距对系统的发射和接收性能有重要影响。物镜和目镜的轴间距通常由干涉仪予以确定,当干涉仪与光学天线的工作波长不同时,由波长不同引起的镜头组焦距的变化将导致物镜和目镜的轴间距存在偏差。为能利用单波长干涉仪精确调试物镜和目镜的轴间距,根据光学天线在干涉测量装置中的程函方程,研究了因波长差异引起的物镜和目镜的轴间距变化量与干涉条纹变化量的相应关系,并据此提出一种能精确调试光学天线物镜轴间距的方法。提出几种检验该方法有效性的验证方案,包括实验验证和计算机仿真验证两大类。基于计算机仿真的验证结果表明,卡塞格伦反射式光学天线和的透射式光学天线轴间距模拟调试误差分别 $<15\%$ 和 $<3\%$,仿真误差满足使用要求。