

文章编号 1004-924X(2012)01-0165-06

基于高速摄影动态测试微陀螺振动

姚峰林^{1,2*}, 高世桥¹

- (1. 北京理工大学 机电学院, 北京 100081;
2. 太原科技大学 机电学院, 山西 太原 030024)

摘要:针对微机电系统(MEMS)特征尺寸小,常用的动态测试方法和系统还有一定的缺点等问题,本文在介绍 MEMS 常见的三种动态测试方法的基础上,给出了一种基于高速摄影的微陀螺振动动态测试系统。介绍了系统的硬件架构和软件功能。在动态测试的关键算法上,应用 Otsu 算法对图像进行分割,使用感兴趣区域(ROI)和不变矩方法得到振动曲线,通过幅频分析得到微机械陀螺的振动特性。实验结果表明:使用这种方法测量振幅的精度达到了 $0.1 \mu\text{m}$;频域测量的重复性和一致性也较好。这种动态测试方法稳定可靠、精度高、抗干扰能力强,可以极大地减少计算量,提高系统运行速度。

关键词:微机电系统;微机械陀螺;振动测试;动态测试;高速摄影

中图分类号: TB872; TB936 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20122001.0165

Dynamic test of vibration for micro machined gyroscope based on high speed photography

YAO Feng-lin^{1,2*}, GAO Shi-qiao¹

- (1. School of Mechatronical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;
2. School of Mechatronical Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China)

* Corresponding author, E-mail: jasonyfl@163.com

Abstract: As the common dynamic test method for Micro-electro-mechanical System (MEMS) is limited by its tiny feature sizes, this paper proposes a dynamic test system for micro machined gyroscope based on high speed photography after introducing three kinds of dynamic test methods. The hardware of the system and the function of the software are introduced. Then, it explains the key algorithm of the dynamic test system. It uses the Otsu algorithm to segment the image, and takes the region of Interest (ROI) and moment invariants to obtain the vibration curve. After spectrum analysis, the vibration characteristic of the micro machined gyroscope can be gotten. Experimental results indicate that the precision of the amplitude is $0.1 \mu\text{m}$ and the repeatability and consistency of the frequency domain is satisfactory. The dynamic test method shows higher precision, rapid speed, as well as strong anti-jamming and stabilization. It reduces the amount of calculation and improves the operation speed for the system.

Key words: Micro-electro-mechanical System (MEMS); micro machined gyroscope; vibration test; dynamic test; photography

收稿日期: 2011-05-31; 修订日期: 2011-07-06.

基金项目: “十一五”国防科研计划资助项目

1 引 言

微机电系统(MEMS)是由特征尺寸在亚微米至毫米范围内的电子和机械元件组成的微器件或微系统。随着 MEMS 从研究阶段逐渐步入产业化阶段,对测试系统的需求也越来越迫切,特别是 MEMS 动态测试技术得到了国内外许多 MEMS 研究机构的高度重视^[1]。

MEMS 动态测试包括振幅测量、频率测量、相位测量和模态分析等三个基本环节。通过某种激励力作用在被测 MEMS 器件上,使其产生振动响应,通过测量激励和响应,进而确定 MEMS 器件的固有频率等模态参数,从而建立或验证 MEMS 器件的理论模型,并通过结合有限元方法和 CAD 技术,最终指导 MEMS 器件的结构优化设计。

当前 MEMS 动态测试中最常用的 3 种非接触无损测量技术有激光多普勒测振,频闪视觉测量和频闪干涉视觉测量 3 种。其中,激光多普勒测振(Scanning Laser Doppler Vibrometer, SLDV)技术最为成熟,已有商品化产品出售,但它一次只能测量单个点运动的弱点限制了它在很多场合的应用;麻省理工学院集成频闪微视觉(stroboscopic micro vision)测量^[2]和频闪干涉测量的频闪干涉(stroboscopic interferometer vision)视觉测量系统代表了目前最先进的 MEMS 动态测试技术^[3]。但这两种方法设备昂贵,测量复杂。本文介绍一种基于高速摄影的微陀螺振动动态测试技术,有关微陀螺结构和驱动原理见文献^[4]。

2 基于高速摄影的动态测试系统

本系统的架构如图 1~图 3 所示,测试系统主要由驱动部分,摄影部分,图像处理部分组成^[5]。其中,驱动包括稳压电源,可编程函数信号发生器,示波器和专用驱动电路组成;摄影部分主要由 ZEISS Image2 显微镜,PHOTRON SA4 高速摄影机组成和千兆以太网组成;图像处理部分由计算机和图像处理软件组成。检测对象是某单轴微机械陀螺。

检测系统软件是基于 MATLAB GUI 编制

而成的。由于高速摄影的采集速度较高,高达 40 000 frame/s,图像处理不可能实时处理如此庞大的数据。所以图像处理的属于后处理。软件的功能如图 2 所示。

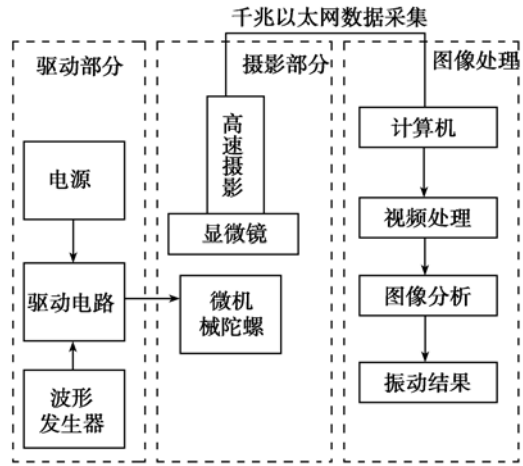


图 1 系统的架构

Fig. 1 Block diagram of image measuring system

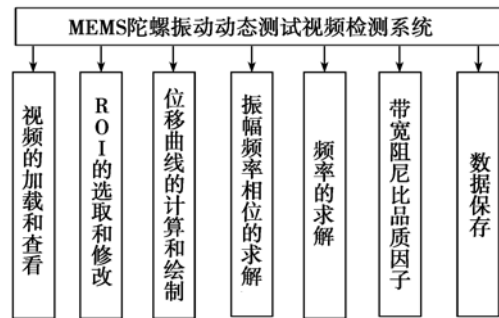


图 2 软件的功能框图

Fig. 2 Block diagram of software function

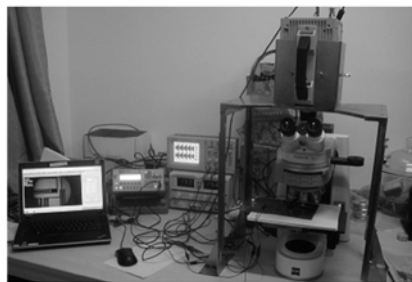


图 3 系统的架构照片

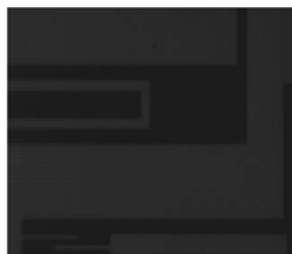
Fig. 3 Photo of measuring system

3 检测系统关键算法

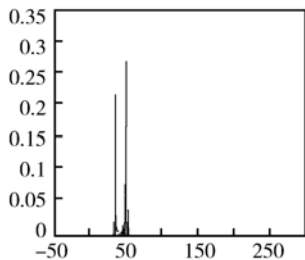
本系统的图像处理首先是把高速摄像机摄取

的视频文件导入计算机。然后对每一幅图像进行滤波和格式变换然后使用图像分割。这里使用了 Otsu 提出的一种基于阈值的图像分割算法。Otsu 法也称为最大类间方差法或最小类内方差法。它的基本思想是利用图像的灰度直方图,以目标和背景类间方差最大或类内方差最小为阈值选取准则,从而动态地确定图像的最佳分割阈值。在大多数情况下能取得良好的分割效果,特别是对于图像的分布出现双峰的图像效果最好,如图 4b)所示。Otsu 法的理论推导以及各个变量所代表的物理意义详见文献[6]。

$T^* = \text{Arg max}[\omega_0(\mu_0 - \mu)^2 + \omega_1(\mu_1 - \mu)^2]$,
 其中, $0 \leq T \leq L$ 是分割阈值, L 是图像分割最大阈值。



(a) 视频图像
 (a) Original image



(b) 图像直方图
 (b) Histogram of image



(c) 阈值分割后的二值图像
 (c) Binary image after thresholding

图 4 视频照片及处理

Fig. 4 Processing of video image

再者,由于微陀螺驱动后,由于结构上有固定部分,也有可运动部分。通常可动部分的运动可以用帧间差阈值法(简称 TIFD),利用视频序列相邻帧的强相关性进行变化检测,进而通过对变化图像的滤波确定运动目标^[7]。为了简化计算和节约计算机的内存,在微陀螺视频处理时采用了 ROI 技术(Region of Interest),也就是在某个感兴趣区域进行计算,如图 5 箭头所指方框中所示为微陀螺的驱动梁,这里的振幅大,结构体积也大,便于检测。

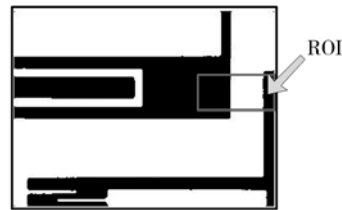
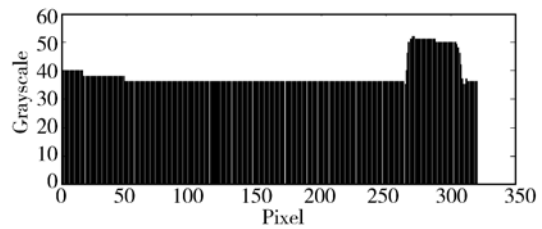
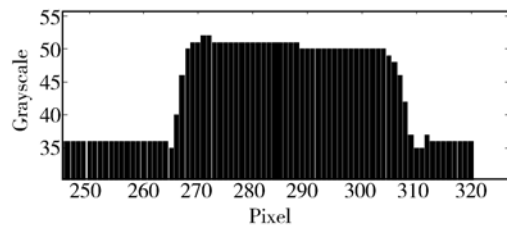


图 5 ROI 区域
 Fig. 5 ROI region

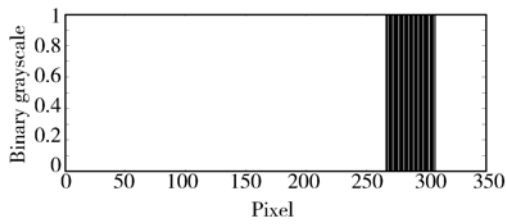
采用阈值分割的方法,然后对图像进行二值变换,这种方法虽然可以得到图像的轮廓图像,但是这种分割的图像边缘可能并不是很准确。尽管这里的 ROI 区域是一对称区域,但由于光照的分布不够均匀,在相对称的两个边缘,图像的边缘并不是很明显,采用 Otsu 方法是一种全局阈值,对于局部的不分割就不一定是图像的真实边缘如图 6 所示^[8]。所以分割后的图像的边缘不能作为测



(a) 前景与背景图像灰度图
 (a) Grayscale of image



(b) 局部灰度分布图
 (b) Distribution of local image



(c) 二值分割后边缘分布图

(c) Edge distribution after binary segmentation

图 6 灰度图及处理

Fig. 6 Grayscale of image and processing

量的基准。高速运动图像是时间间隔很短序列图像,其间目标运动的变化很小,光照的不均匀性变化也很小^[9]。还要考虑实际加工的特性,利用求导的方法确定边缘点精确位置可能就会产生误差^[10]。然而,这种 ROI 图像的几何特征在视频检测中却很有代表性,而采用矩的方法来求解图像矩中心来确定图像的位移是较可靠的算法。

几何矩是由 Hu 提出的,图像 $f(x, y)$ 的 $(p+q)$ 阶几何矩定义为^[11]:

$$M_{pq} = \iint x^p y^q f(x, y) dx dy.$$

$$(p, q = 0, 1, \dots, \infty)$$

矩特征主要表征了图像区域的几何特征,又称为几何矩,由于其具有旋转、平移、尺度等特性的不变特征,所以又称其为不变矩。在图像处理中,几何不变矩可以作为一个重要的特征来表示物体,可以据此特征来对图像进行分类等操作。

矩在统计学中被用来反映随机变量的分布情况,推广到力学中,它被用作刻画空间物体的质量分布。同样的道理,如果我们将图像的灰度值看作是一个二维或三维的密度分布函数,那么矩方法即可用于图像分析领域并用作图像特征的提取。

最常用的,物体的零阶矩表示了图像的“质量”:

$$M_{00} = \iint f(x, y) dx dy.$$

一阶矩(M_{10}, M_{01})用于确定图像质心(X_c, Y_c):

$$M_{10} = \iint x \cdot f(x, y) dx dy$$

$$M_{01} = \iint y \cdot f(x, y) dx dy$$

$$X_c = \frac{M_{10}}{M_{00}}$$

$$Y_c = \frac{M_{01}}{M_{00}}$$

由于视频图像序列中的边缘图像的相似性,边缘的分布具同一分布,而本文测定的是微陀螺的振动,用质心的振动来检测要比用边缘检测的方法的更可靠。

4 频域算法

通过以上算法可以得到微陀螺振动曲线如图 7 所示。

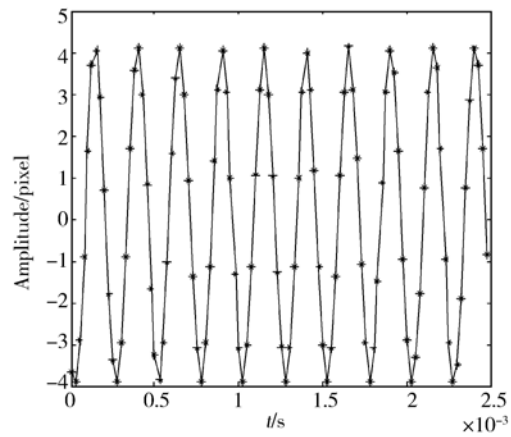
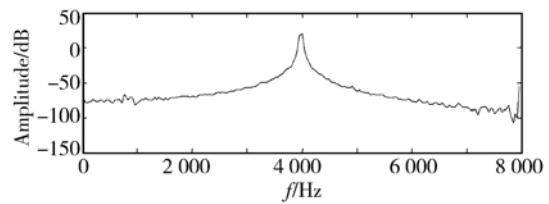


图 7 振动时间位移(像素)图

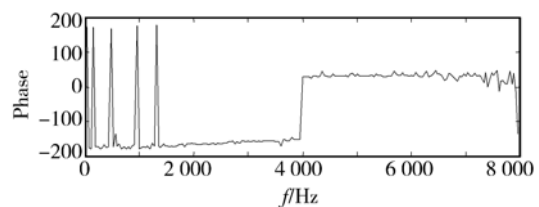
Fig. 7 Vibration curve (pixels)

通过时间位移曲线和快速傅立叶变换(FFT)和带通滤波器^[12]对位移数据进行处理的结果,计算出来的微陀螺的幅频特性图如图 8 所示。



(a) 幅频图

(a) Amplitude frequency diagram



(b) 相频图

(b) Phase-frequency diagram

图 8 振动幅频图

Fig. 8 Amplitude frequency diagram

另外,采用数值拟合的方法可以把幅频曲线中一些无法通过测量值计算出来的点通过插值的方法得到,这样,通过公式计算,我们就可以得到微陀螺驱动模态的固有频率,振幅,品质因子带宽,相位角等特性参数^[13]。

5 实验结果

本文采用 MATLAB GUI 编制的检测系统软件界面如图 9 所示。



图 9 检测系统软件界面

Fig. 9 Interface of test software

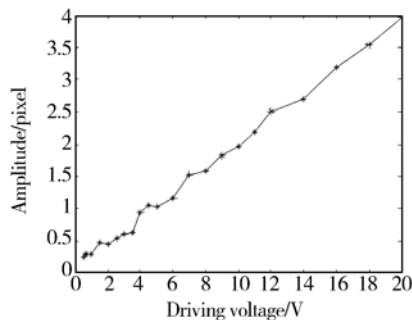


图 10 不同驱动电压下振幅变化规律

Fig. 10 Curve under different drive voltages

在本实验中采用一常压下封装的微陀螺,驱动频率在 3 980 Hz 下,驱动电压在 0.5~20 V 内进行 13 组测量,可以得到在不同电压下驱动模态振幅的变化如图 10 所示,振幅测量的精度达到了 0.1 μm 以上。

振动的带宽,阻尼比,品质因子和谐振频率也做了分析计算得到数据,如表 1 所示,实验的重复性和一致性较好。

表 1 不同驱动电压振动特性的测量统计

Tab. 1 Statistical of vibration characteristics

	带宽	阻尼比	品质因子	谐振频率/Hz
平均值	43.598	0.010 95	45.68	3 980.11
标准差	0.811 5	0.000 203	0.86	0.098 01

6 结 论

实验验证了使用高速摄影的微陀螺振动的动态测试的方法的可行性,利用高速摄影采集高速运动 MEMS 器件的清晰图像,对采集到的一系列不同相位不同驱动频率下 MEMS 器件的图像,借助 ROI 技术和矩法对它们进行分析,可以测量 MEMS 器件平面微振动的振幅、频率和品质因子等特性。使用这种方法可以极大地减少计算量,提高系统的运行速度,经过实验可以准确地提取微陀螺振动的特征。本系统还需要在兼顾运行速度的前提下完善运动图像自动识别技术和对图像振动的亚像素分析,对整个 MEMS 动态测试系统做全面的误差分析,以进一步提高整个系统的测量精度。

参考文献:

- [1] 张涛,冷长林,钟莹,等.基于激光差动多普勒效应的微机电系统动态测试技术[J].光学学报,2007,27(1):63-67.
ZHANG T, LENG CH L, ZHONG Y, et al.. MEMS dynamic testing technique based on differential laser Doppler effect[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(1): 63-67. (in Chinese).
- [2] REMBE C, MULLER R S. Measurement system for full three-dimensional motion characterization of

MEMS[J]. *Journal of Microelectro Mechanical Systems*, 2002, 11(5): 479-488.

- [3] HEMMERT W, MERMELSTEIN M S, FREEMAN D M. Nanometer resolution of three-dimensional motions using video interference microscopy[J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 1999 (9): 17-21.

- [4] 高世桥, 刘海鹏. 微机电系统力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008: 222-279.

GAO SH Q, LIU H P. *MEMS Force*[M]. Beijing:

- Defence Publishing House, 2008: 222-279. (in Chinese)
- [5] 蒋明, 杨福俊. 基于高速摄像的双线性振动陀螺力学特性分析[J]. 光学精密工程, 2006, 14(1): 121-126.
- JIANG M, YANG F J. Analysis of mechanical characteristics in the double linear vibratory gyroscope using high speed photography[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(1): 121-126. (in Chinese)
- [6] OTSU N. A threshold selection method from gray-level histograms[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 1979, 9(1): 62-66.
- [7] 魏娟丽, 翟社平, 王万诚. 视频序列中人体运动目标的检测与跟踪研究[J]. 计算机应用与软件, 2006, 23(4): 139-141.
- WEI J L, ZHAI SH P, WANG W CH. Arch for detecting and tracking of human motion target in videobased sequences[J]. *Computer Applications and Software*, 2006, 23(4): 139-141. (in Chinese)
- [8] 范九伦, 赵凤. 灰度图像的二维 Otsu 曲线阈值分割法[J]. 电子学报, 2007, 35(4): 751-755.
- FAN J L, ZHAO F. Two-dimensional Otsu's curve thresholding segmentation method for gray-level images[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2007, 35(4): 751-755. (in Chinese)
- [9] 章毓晋. 图像分割[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 134-135.
- ZHANG Y J. *Image Segmentation*[M]. Beijing: Science Publishing House, 2001: 134-135. (in Chinese)
- [10] 张之敬, 杜芳. 微小尺寸零件复杂边缘识别算法[J]. 光学精密工程, 2009, 17(2): 356-361.
- ZHANG ZH J, DU F. Complex edge recognition algorithm of micro-accessory[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(2): 356-361. (in Chinese)
- [11] MING-KUEI H. Visual pattern recognition by moment invariants[J]. *Transaction on Information Theory*, 1962, 49(1): 179-187.
- [12] 贾建科, 韩团军. 基于 Matlab GUI 的模拟带通滤波器的设计[J]. 现代电子技术, 2010, 33(10): 58-62
- JIA J K, HAN T J. Design of analog band-pass filter based on matlab GUI[J]. *Modern Electronics Technique*, 2010, 33(10): 58-62. (in Chinese)
- [13] 金翠云, 乘大超. 基于机器微视觉的 MEMS 平面微运动测试技术[J]. 仪器仪表学报, 2005, 26(8): 772-774.
- JIN C Y, LI D CH. Measurement technique of in-plane motion for MEMS based on machine microvision[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2005, 26(8): 772-774. (in Chinese)

作者简介:



姚峰林(1978—),男,山西太原人,博士研究生,2005年于太原理工大学获得硕士学位,主要从事微机电技术方面的研究。E-mail: jasonyfl@163.com



高世桥(1961—)男,辽宁铁岭人,博士,教授,博士生导师,1987于上海工业大学获得博士学位,1990年获洪堡基金在德国鲁尔大学做博士后研究,主要从事微机电技术,高速条件下的控制技术方面的研究。E-mail: gaoshq@bit.edu.cn