

直方图在显微热成像微扫描位置标定中的应用

关丛荣¹, 金伟其², 王吉晖²

(1. 北方工业大学 机电工程学院, 北京 100041;

2. 北京理工大学 光电学院 光电成像技术与系统教育部重点实验室, 北京 100081)

摘要: 为提高显微热成像系统微扫描装置位置标定精度, 提出了一种基于直方图统计拉伸显微热图像细节增强的傅里叶变换微位移检测方法。该方法针对显微热图像直方图特点, 通过直方图统计拉伸改善图像对比度增强细节, 以此提高基于傅里叶变换平移特性的微位移检测准确度, 从而提高微扫描位置的标定精度。基于此方法进行了图像增强前后的位置标定和图像重构对比实验, 实验结果表明: 经直方图统计拉伸细节增强后的位置标定更精确, 重构的图像质量更高, 细节更丰富。

关键词: 直方图; 显微热成像; 光学微扫描; 位置标定

中图分类号: TN211 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)02-0519-05

Application of histogram on micro-scanning position calibration of microscopic thermal imaging

Guan Congrong¹, Jin Weiqi², Wang Jihui²

(1. College of Mechanical Electrical and Engineering, North China University of Technology, Beijing 100041, China;

2. Key Laboratory of Photoelectric Imaging Technology and System, Ministry of Education of China, School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: To improve optical micro scanning device position calibration precision of the micro thermal imaging system, a Fourier transform micro displacement detection method based on histogram statistical tension was proposed. It can improve image contrast and enhance image details according to histogram features of micro thermal imaging. And with the images enhanced by histogram statistical tension can increase displacement detection accuracy by Fourier transform. So it also can improve the scanning calibration position precision. The construct experiment of before and after images enhance were done. The experiment results show that with the method of histogram statistical tension the position calibration is more precise, the reconstructed image has higher quality and more abundant details.

Key words: histogram; micro thermal imaging; optical micro scanning; position calibration

收稿日期: 2012-06-24; 修订日期: 2012-07-29

基金项目: 北京市自然科学基金(4062029); 科技部中小型科技型企业创新基金(06KW1051)

作者简介: 关丛荣(1971-), 女, 副教授, 博士, 主要从事热成像系统与图像处理方面的研究。Email: xg_ft@sina.com

导师简介: 金伟其(1961-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事夜视与红外技术、光电图像处理方面的研究。

Email: jinwq@bit.edu.cn

0 引言

显微热成像技术可利用对红外辐射敏感的探测器获取不同物体之间或物体表面不同位置之间细微的辐射能量分布,被广泛地应用于大规模集成电路芯片设计与检测、MEMS/MOEMS 器件的热分析、生物医学方向诊断等领域^[1-2]。微扫描技术可在不增加探测器数目和减小探测器像元尺寸的情况下,提高显微热成像系统的分辨力、改善图像质量^[3-4]。在多种微扫描技术和模式中,基于光学旋转平板 2×2 微扫描显微热成像系统存在扫描位置标定问题,且其标定精度决定着系统图像重构质量。为解决该问题需要准确检测各扫描位置之间亚像素微位移位置,参考文献[5]中,基于傅里叶变换的平移特性实现了微位移检测,但是显微热图像属于欠采样图像,对比度不高,细节表现差,使得微位移检测精度低,系统图像重构质量不高。

为提高微扫描装置各扫描位置之间的微位移检测精度,文中提出了一种基于直方图统计拉伸增强图像细节的傅里叶变换微位移检测方法。首先给出了显微热成像系统的组成和位置标定方法,然后介绍了傅里叶变换微位移检测方法,并根据显微热图像的直方图特点给出了显微热图像增强方法,且进行了图像增强前后的微扫描位置标定实验,最后对该方法进行了总结。

1 系统组成及位置标定方法

光学平板旋转微扫描显微热成像系统由红外热像仪、微扫描装置、红外显微物镜、机械结构组件及计算机组成,如图 1 所示。



图 1 显微热成像系统

Fig.1 Microscopic thermal imaging system

微扫描装置由计算机控制,使与热像仪焦平面

成一倾角的光学平板绕系统光轴旋转,间隔 90°,得到 A、B、C、D 4 个扫描位置,如图 2 所示,理论上构成一个正立正方形,坐标轴的方向与探测器成像光敏模块的边相互平行^[6]。但实际上微扫描装置的初始安装位置不能保证四个标准位置点中的一个,假设初始位置点在图 2 中的 P 点,那么它与最近的标准位置点 A 也有偏差,因此需要对初始零点进行标定。旋转微扫描装置 90°得到 Q 点,计算点 P(x_P,y_P)和点 Q(x_Q,y_Q)的相对位移,得出标定角度大小及旋转方向,其大小为:

$$\begin{aligned} \angle AOP &= 45^\circ - \angle POX = 45^\circ - \angle MPO \\ &= \angle MPQ = \arctan \frac{|y_Q - y_P|}{|x_Q - x_P|} \end{aligned} \quad (1)$$

比较点 P 和点 Q 的坐标差大小判断旋转方向。

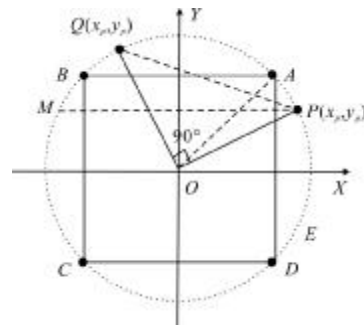


图 2 微扫描位置标定图

Fig.2 Micro-scanning position calibration

零点标定后相继旋转 90°得到其他位置的扫描图像,但是由于外界环境条件的不确定性,以及旋转台精密控制器或高精度自动旋转平台等的机械原因,其他微扫描位置也会与理想位置产生偏差,可以用同样的方法计算图像之间的微位移来得到其他位置点的标定角度及旋转方向。由此可以看出,微扫描位置的标定精度取决于各扫描位置图像之间的微位移。

2 微位移检测方法

为求微扫描装置的标定角度,要计算显微热图像之间的微位移。显微热图像属于欠采样图像,传统的运动估计方法,如块匹配法,无法满足精度的要求,傅里叶变换微位移检测具有抗噪声能力强、计算量小、计算速度快的优势^[7]。它的基本思想是图像的位移关系经傅里叶变换转为频域的相位变化关系,

只要能测定傅里叶变换函数的相位变化,就能测定微扫描图像的微位移。

若设参考图像为 $f_1(x,y)$,经平移后图像为 $f_2(x,y)$, Δx 和 Δy 为水平和垂直方向位移,则有:

$$f_1(x,y)=f_2(x-\Delta x,y-\Delta y) \quad (2)$$

则它们相应的傅里叶变换为:

$$F_1(u,v)=F_2(u,v)\exp[-j2\pi(u\Delta x+v\Delta y)] \quad (3)$$

公式(3)说明两幅图像具有相同的傅里叶变换和不同的相位,它们之间的位移量可以通过两幅图像的互能量谱求出:

$$\exp[-j2\pi(u\Delta x+v\Delta y)]=\frac{F_1(u,v)F_2^*(u,v)}{|F_1(u,v)F_2^*(u,v)|} \quad (4)$$

式中: $F_2^*(u,v)$ 为 $F_2(u,v)$ 的共轭。

对公式(4)取傅里叶逆变换就会得到一个脉冲函数,该函数在平移位置上不为零,在其他位置上均为零。由于图像低频部分含有的能量较大,混叠现象较小,文中选取频谱低频一定范围内的像素,根据相位差,利用最小二乘法求出平移量,精度可达亚像素级。

为抑制成像模型对图像边缘造成的影响,采取对图像加窗函数的方法,窗函数选取 Tukey 窗,其表达式为:

$$W(n)=\begin{cases} 1.0 & 0\leq|n|\leq\frac{N}{2} \\ 0.5\left[1+\cos\left[\pi\frac{n-\alpha\frac{N}{2}}{2(1-\alpha)\frac{N}{2}}\right]\right] & \alpha\frac{N}{2}\leq|n|\leq\frac{N}{2} \end{cases} \quad (5)$$

式中: α 为系数,取 0.25; N 为图像的行或列的像素总数; n 代表第 n 个像素取值为 $0,\dots,N$ 。

3 显微热图像细节增强

在基于傅里叶变换检测显微热图像微位移时,由于图像质量不高影响了检测精度,为此对显微热图像进行图像增强。红外图像增强方法有直接高频增强、非锐化掩膜、基于直方图、基于小波变换、基于模糊逻辑等^[8-9]。上述方法多用于红外图像的望远模式,文中图像是显微热图像,属于显微放大模式,其细节纹理和背景通常表现出明显的高频和低频特征,直方图表现出明显的单峰性质,如图 3 所示。图

中,左边是原始显微热图像,右边是相应图像的直方图。从图中可以看出,显微热图像的直方图灰度包络峰主要集中在有限灰度范围的一段,而出现在其他灰度级位置的像素很少甚至为零。

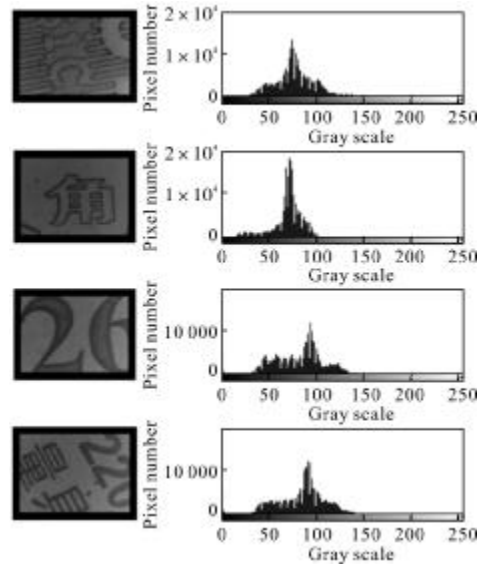


图3 显微热图像及其直方图

Fig.3 Microscopic thermal imaging and histogram

为提高图像对比度差,充分利用空闲灰度级,提高灰度级的间距,利用直方图统计拉伸方法增强图像细节,具体方法如下。

(1) 对一幅 8 bit、大小为 $M\times N$ 的图像 $f(x,y)$ 进行直方图统计,计算图像各灰度级的 PDF 数值 p_k :

$$p_k=\frac{n_k}{n} \quad (6)$$

式中: n_k 和 n 分别为灰度级 k 的像素数和图像总像素数 $M\times N$, k 的范围为 $[0,255]$ 。

(2) 确定最大 PDF 数值 p_{max} 及其所处的灰度级 k_{max} 。

(3) 以 k_{max} 为中心分别向两侧进行 PDF 累加求和 p_{sum} ,并设定一阈值 p_t ,当 $p_{sum}>p_t$ 时停止累加:

$$p_{sum}=\sum_{k_1}^{k_2} p_k, k_1=k_{max}-m, k_2=k_{max}+m \quad (7)$$

式中: $m=0,1,2,\dots,2^8-1$,具体取值取决于阈值 p_t 。

公式(7)累加求和采取交替累加的处理策略,即以 k_{max} 为中心左右轮流累加,使得累加结果更具合理性。

(4) 将(3)中满足阈值条件的有限灰度范围按照图 4 所示进行直方图线性拉伸,以实现图像增强的目的。

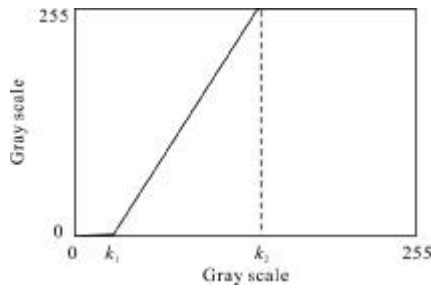


图 4 直方图对比拉伸增强变换函数

Fig.4 Histogram contrast enhance transformation function

图 3 中图像增强后的结果如图 5 所示，图中第一排是四幅显微热图像，第二排是经直方图统计拉伸后的对应图像。从图中可以看出，图像增强后的对比度明显提高，细节更突出。



图 5 图像直方图统计拉伸增强

Fig.5 Image enhanced by histogram contrast enhance transformation

4 微扫描位置标定实验

按照第一部分给出的微扫描位置标定方法进行图像增强前后的对比实验，微扫描位置标定结果如图 6 所示。

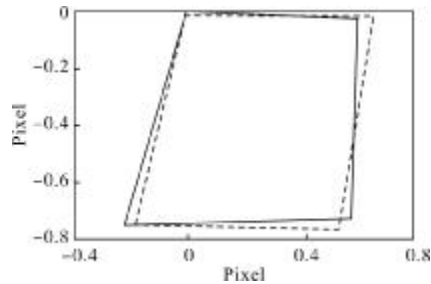
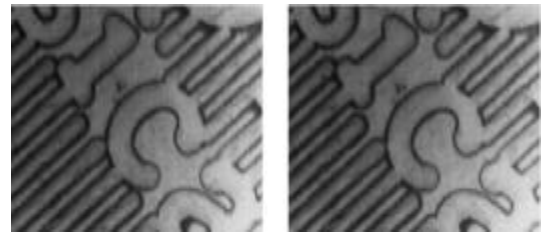


图 6 微扫描位置标定对比图

Fig.6 Contrast graph of micro-scanning position calibration

图 6 中的虚线四边形为未经图像增强得到的 4 个微扫描位置连成的，实线四边形为经直方图统计拉伸后标定的各微扫描位置图。可以看出，图像经直方图统计拉伸增强后，进行标定的位置图要更接近于正立正方形，由于硬件设备加工安装产生的误差，以及图像处理过程中信息的损失，使得位置标定图还不是理想正立正方形。

图 7 是利用图 6 四边形角点位置的四幅过采样图像重构出的超分辨率图像，其中，图 7(a)是未经图像增强位置标定的四幅过采样图像直接重构出的超分辨率图像，图 7(b)是经图像增强后的结果。图像信息熵 SNT 是衡量图像信息丰富程度的重要指标，SNT 值越大，图像的信息量越大，SNT 的确定毋需原图像。实验结果表明，经过图像增强后，进行位置标定得到的过采样图像重构出的图像 SNT 值要大，细节更丰富。



(a) SNT=5.486 (b) SNT=5.595

图 7 显微热图像过采样重构图

Fig.7 Results of thermal microscope imaging reconstruction

同样进行了重复实验，实验数据如表 1 所示。可以看出，经直方图统计拉伸图像增强后的位置标定更接近正立正方形，重构图像的信息熵 SNT 值更大。

表 1 图像增强对比实验数据

Tab.1 Image enhancement contrast experiment data

No.	Before enhancement		After enhancement	
	Micro-scanning position	SNT	Micro-scanning position	SNT
1	(0.00,0.00)	5.486	(0.00,0.00)	5.495
	(0.65,-0.01)		(0.60,-0.02)	
	(0.53,-0.76)		(0.58,-0.73)	
	(-0.18,-0.74)		(-0.22,-0.75)	
2	(0.00,0.00)	5.521	(0.00,0.00)	5.532
	(0.62,-0.02)		(0.64,0.04)	
	(0.75,-0.67)		(0.70,-0.67)	
	(-0.13,-0.63)		(-0.07,-0.73)	
3	(0.00,0.00)	5.316	(0.00,0.00)	5.352
	(0.77,-0.02)		(0.72,-0.01)	
	(0.72,-0.77)		(0.77,-0.68)	
	(0.04,-0.70)		(0.02,-0.71)	
4	(0.00,0.00)	5.279	(0.00,0.00)	5.294
	(0.79,0.01)		(0.77,-0.04)	
	(0.62,-0.64)		(0.73,-0.63)	
	(0.03,-0.63)		(-0.02,-0.66)	

5 结论

显微热图像属于欠采样放大图像,图像的直方图具有单峰、灰度级范围窄的缺点,文中利用直方图统计拉伸实现图像细节增强,将其运用到显微热成像系统位置标定的微位移测量中,实验表明经图像增强后的微扫描位置标定更准确,重构出的图像视觉效果更好,SNT值更大,细节更丰富。

参考文献:

- [1] Wiltsc J M, Miller J L. Imagery improvements in staring infrared imagers by employing subpixel microscan [J]. *Optical Engineering*, 2005, 44(5): 056401-1-056401-9.
- [2] Sz -Yuan Lee, Hsi -Wen Tung, Wen -Chih Chen, et al. Thermal actuated solid tunable lens [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2006, 18(21): 2191-2193.
- [3] Zhang Yi, Bai Lianfa, Chen Qian, et al. Performance analysis and computation for spatial resolving capability of IRFPA micro -scan [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(2): 221-225. (in Chinese)
张毅, 柏连发, 陈钱, 等. 红外焦平面微扫描空间分辨性能分析与估算 [J]. *红外与激光工程*, 2009, 38 (2): 221-225.
- [4] Joachimsthaler I, Zimmermann G, Heiderhoff R. SEM/STEM -hybrid -system: A new tool for advanced thermal analysis of electronic devices [C]//*Proceeding of 9th IPFA*, 2002: 196-200.
- [5] Gao Meijing, Jin Weiqi, Wang Xia, et al. Design and implementation of optical micro-scanning thermal microscope imaging system with high resolution [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2009, 30(5): 1037-1041. (in Chinese)
高美静, 金伟其, 王霞, 等. 高分辨力光学微扫描显微热成像系统设计与实现[J]. *仪器仪表学报*, 2009, 30(5): 1037-1041.
- [6] Gao Meijing, Jin Weiqi, Wang Xia, et al. Zero calibration for the designed micro scanning thermal microscope imaging system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(8): 2175-2179. (in Chinese)
高美静, 金伟其, 王霞, 等. 光学微扫描热成像扫描零点定标方法研究[J]. *光学学报*, 2009, 29(8): 2175-2179.
- [7] An Jianni, Liu Guixi. Image mosaic algorithm based on feature points matching and automatic transform parameters identifying[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(3): 564-569. (in Chinese)
安建妮, 刘贵喜. 利用特征点配准和变换参数自动辨识的图像拼接算法[J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(3): 564-569.
- [8] Liu Kun, Guo Lei, Chen Jingsong. Sequence infrared image fusion algorithm using region segmentation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(3): 553-558. (in Chinese)
刘坤, 郭雷, 陈敬松. 基于区域分割的序列红外图像融合算法[J]. *红外与激光工程*, 2009, 38(3): 553-558.
- [9] Zhang Changjiang, Wang Xiaodong, Zhang Haoran. Global and local contrast enhancement algorithm for image using wavelet neural network and stationary wavelet transform [J]. *Chinese Optics Letters*, 2005, 3(11): 636-639.