

文章编号: 0253-2239(2009)08-2175-05

光学微扫描显微热成像扫描零点定标方法研究

高美静^{1,2} 金伟其¹ 王霞¹ 于杰¹

(¹北京理工大学光电工程系, 北京 100081; ²燕山大学光电子系, 河北 秦皇岛 066004)

摘要 为改善已研制光学微扫描显微热成像系统的空间分辨力, 微扫描零点需要确定。基于几何原理, 研究提出了一种利用数字图像处理技术进行零点定标的方法。给出了微扫描零点的定义、详细分析了零点定标原理及方法, 完成了实际显微热成像系统的微扫描零点定标。针对红外热图像, 模拟零点定标前后的实际系统, 采用不同重构方法进行了仿真研究, 给出了评价参数; 利用零点定标后的光学微扫描显微热成像系统采集低分辨力显微热图像序列进行过采样重构研究, 仿真和实验结果表明了该方法的有效性, 从而得到了高分辨力光学微扫描显微热成像系统, 可应用于需要显微热分析的场所。

关键词 成像系统; 显微热成像; 光学微扫描; 数字图像处理; 零点定标

中图分类号 TN211 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20092908.2175

Zero Calibration for the Designed Microscanning Thermal Microscopic Imaging System

Gao Meijing^{1,2} Jin Weiqi¹ Wang Xia¹ Yu Jie¹

(¹Department of Optical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)
(²Department of Photoelectron, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China)

Abstract In order to improve the spatial resolution of the optical microscanning thermal microscopic system, the zero of microscanning should be determined to complete the oversample reconstruction. Based on the geometric principle and digital imaging processing, a new zero calibration was presented. The definition, the working principle and the method were analyzed, and the microscanning zero calibration of the real system was done. Different reconstruction methods were applied to reconstruct the thermal image and the real thermal microscopic image, moreover the evaluation parameters were given. Results of simulation and real thermal image processing show the availability of the zero calibration, thus the high resolution optical microscanning thermal microscopic system has been achieved. The system can be applied into many systems which need microscopic thermal analysis with high spatial resolution.

Key words imaging systems; thermal microscopic system; optical microscanning; digital image processing; zero calibration

1 引言

为满足大规模集成电路、生物医学和科学研究等领域对细微热分析的需求, 20 世纪 90 年代开始国外推出显微热成像系统^[1~3], 但由于采用制冷型红外探测器作为成像组件, 不仅系统体积重量较大, 而且价格昂贵, 限制了系统的普及和使用^[4,5]。由于非制冷焦平面探测器具有较高性价比、无需制冷、

功耗低、体积小、重量轻等特性^[6,7], 同时也可以降低系统成本, 我们已研制了一种基于非制冷焦平面探测器的显微热成像系统^[8~10]。探测器阵列规模较小(320×240 或 384×288)以及探测器单元尺寸较大(45 μm×45 μm 或 38 μm×38 μm), 使得系统的空间分辨力较低。而基于光学微扫描的高分辨力光电成像技术, 可以由较低规模的探测器阵列, 获得

收稿日期: 2008-06-17; 收到修改稿日期: 2008-10-11

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

作者简介: 高美静(1977—), 女, 讲师, 博士, 主要从事热成像系统与图像处理等方面的研究。

E-mail: matlabgirl@sina.com.cn

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

E-mail: jinwq@bit.edu.cn

更高分辨力的成像,特别在高分辨力可见光遥感成像、红外热成像等领域具有广泛的应用前景^[11~13]。本文研究了一种基于光学平板旋转微扫描器的高分辨力显微热成像系统。在平板旋转微扫描显微热成像系统中,不论是系统安装还是检测之后,由于各次安装热成像组件的方位角不完全一致,需要对 2×2 微扫描的零点(角度)位置进行新的标定,使其通过光路中倾斜平板的旋转,获得 2×2 微扫描的图像,进而经过过采样重构,获得高分辨力显微热图像。目前国外的光学微扫描技术已经作为组件成功的应用于很多系统,但国内对光学微扫描技术的研究还处于理论和实验阶段,光学平板微扫描零点定标问题也未见文献报道。为解决已研制系统实用化的关键问题,本文将基于几何原理,利用数字图像处理方法研究确定微扫描零点的方法。

2 光学平板旋转微扫描器及其零点

图1为基于长波非制冷焦平面探测器的光学微扫描显微热像仪。光学平板旋转式微扫描器是一种较简单的光学微扫描方式^[14],其通过具有一定倾斜角度的透明平板在光学物镜与探测器之间的同轴旋转,在四个相隔 90° 的位置处获得相互之间错位 $1/2$ 探测器间距的低分辨力成像,进而经过过采样和亚像元重构,获得高分辨力的亚像元成像。该扫描器结构简单,成本低,适合在许多光学微扫描成像系统中使用。



图1 光学微扫描显微热成像系统

Fig. 1 Optical microscanning microscopic thermal imaging system

光学平板旋转微扫描器由红外光学平板、精密光学平板支座、高精度电控旋转平台及其控制器等组成。光学平板支座保证光学平板与成像系统光轴保持一定倾角 θ ,当平板绕光轴进行方位角旋转时,会聚光束的聚焦点将在成像面上形成以原像点为中心, Δ 为半径的圆周,如图2所示。如果以探测器阵列的直角坐标系为基准,旋转光学平板使其分别在 $45^\circ, 135^\circ, 225^\circ$ 和 315° 等4个位置进行图像采样,且根据光学平板的折射率 n ,设计平板厚度 d 和倾斜

角度 θ ,使 $\sqrt{2}\Delta = L/2$ (其中 L 为探测器单元的中心距),则由此获得标准 2×2 微扫描模式下的4幅低分辨力欠采样图像,如图3所示。定义系统微扫描零点为标准 2×2 微扫描模式下采集第一幅欠采样图像的位置,如图3采集点1。

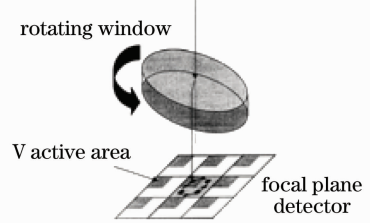


图2 单块光学平板旋转 2×2 微扫描示意图

Fig. 2 Schematic diagram of 2×2 microscanning for single optical plate microscanner

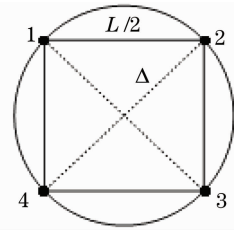


图3 标准 2×2 微扫描模式成像位置

Fig. 3 Imaging position of standard 2×2 microscanning

由于系统的热成像组件属于可拆卸模式,每次安装后探测器方向与电控旋转平台的零点定位均存在一定的偏差。如果仍按以前确定的旋转位置进行 2×2 微扫描,则由于微扫描零点位置的偏差,造成所有微扫描位置偏差,如图4所示,难以得到标准 2×2 的微扫描模式下相互之间水平和垂直错位 $1/2$ 探测器间距的4幅低分辨力图像,直接影响后续高分辨力图像的重构,无法提高系统空间分辨力,有时分辨力甚至会降低。因此,快速准确地获得系统的微扫描零点成为系统实用化的关键。

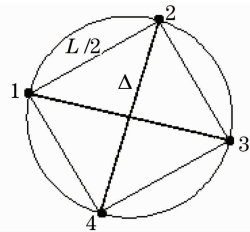


图4 微扫描零点偏差下的成像位置

Fig. 4 Imaging position of zero deviation of microscanning

3 微扫描零点的确定方法

为了获得系统微扫描零点,在系统安装完毕后,以某选定(按探测器方向大致确定的方向或上一次

标定的零点)的旋转台角度为测试零点,进行间隔为 90° 的旋转扫描,获得 4 幅低分辨率力欠采样图像。如图 5 所示,以光学平板旋转中心为原点 O ,建立直角坐标系 X_1OY_1 ,在扫描圆周上,正方形 1234 为标准 2×2 微扫描模式下 4 幅欠采样图像的采集位置,其中点 1 为系统微扫描零点,即校正标定需要确定的零点;正方形 $1'2'3'4'$ 为以旋转台测试零点为起点获得的 4 幅欠采样图像的采集位置,其中点 $1'$ 为旋转台测试零点。

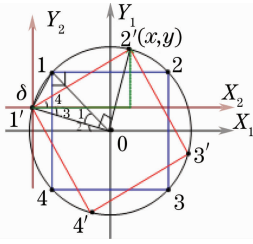


图 5 $x > 0, y > 0$ 微扫描零点确定示意图
Fig. 5 $x > 0, y > 0$ schematic diagram of microscanning zero

以 $1'$ 位置为原点 O' ,建立相对 X_1OY_1 平移的直角坐标系 $X_2O'Y_2$,利用改进的频域图像配准算法^[15]计算出位置 $2'$ 图像相对于位置 $1'$ 图像的亚像素级微位移量 (x, y) ,进一步根据 (x, y) 在 $X_2O'Y_2$ 坐标系的象限确定微扫描零点 1。

这里,以 (x, y) 处于第 1 象限 $(x > 0, y > 0)$ 为例,说明由旋转台测试零点 $1'$ 到微扫描零点 1 的转

角的求解方法。由图 5 不难得到

$$\angle 1 = \angle 4 = \arctan(y/x),$$

即由旋转台测试零点 $1'$ 将光学平板顺时针旋转 $\angle 1 = \arctan(y/x)$ 后即得到微扫描零点 1。

同理,不难得到

- 1) (x, y) 处于第 2 象限 $(x < 0, y > 0)$,顺时针旋转 $\angle 1 = 180^\circ - \arctan(y/|x|)$;
- 2) (x, y) 处于第 3 象限 $(x < 0, y < 0)$,逆时针旋转 $\angle 1 = 180^\circ - \arctan(y/x)$;
- 3) (x, y) 处于第 4 象限 $(x > 0, y < 0)$,逆时针旋转 $\angle 1 = \arctan(|y|/x)$ 。

4 微扫描零点定标及过采样重构仿真与实验研究

4.1 实际系统的微扫描零点定标

利用微扫描零点定标方法对实际显微热成像系统进行零点定标。图 6 给出微扫描零点定标前后按 2×2 微扫描模式采集的 4 幅低分辨率图像微位移位置,图中坐标单位均为 1 个单位像元。可以看出,经过微扫描零点定标后,低分辨率图像采集位置较定标前明显接近正立的正四边形,这表明本文提出的微扫描系统零点定标方法的有效性。当然,由于实际加工、装调及系统工作中机械震动和环境等不可避免的误差因素,使得目前采集 4 幅图像的微位移位置还不是严格的正立正方形。

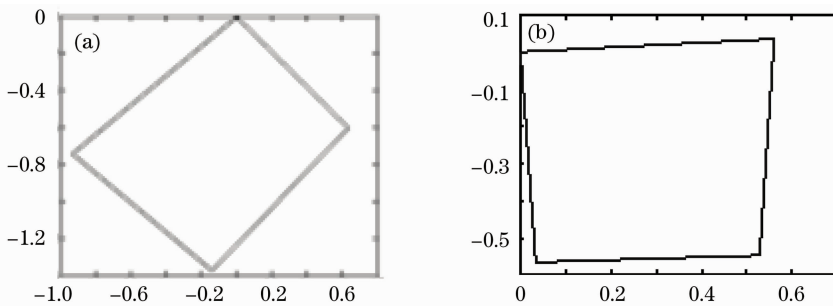


图 6 微扫描零点定标前后的 4 幅低分辨率图像微位移位置(a)定标前;(b)定标后
Fig. 6 Micro displacement position of 4 images before zero calibration and after zero calibration
(a) before zero calibration;(b) after zero calibration

4.2 红外热图像过采样图像的重构

这里利用图 6(b)微扫描位置模拟和实际采集的 4 幅低分辨率图像,进行过采样重构的仿真和实验,以进一步验证实际显微热成像系统光学微扫描零点定标的有效性。

4.2.1 仿真重构实验

利用图 6(b)微位移位置由高分辨力图像

[图 7(a), $640 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$]模拟得到 4 幅低分辨率图像图 7(b), $320 \text{ pixel} \times 256 \text{ pixel}$ 。图 8 给出了采用图 7(b)的第 1 帧低分辨率图像的双线性插值放大法和过采样重构法(零点定标后)进行图像重构的结果。其中过采样重构法是由图 7(b)的 4 帧低分辨率图像按标准 2×2 过采样直接嵌入的方法。

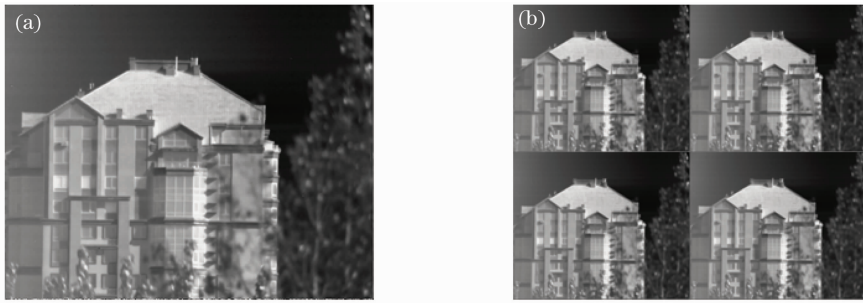


图 7 高分辨力热图像及其微扫描欠采样图像。(a)原始高分辨力图像;(b)4 帧低分辨率图像

Fig. 7 High resolution thermal image and it's microscanning downsampled image. (a) original high-resolution images; (b) 4 low resolution images

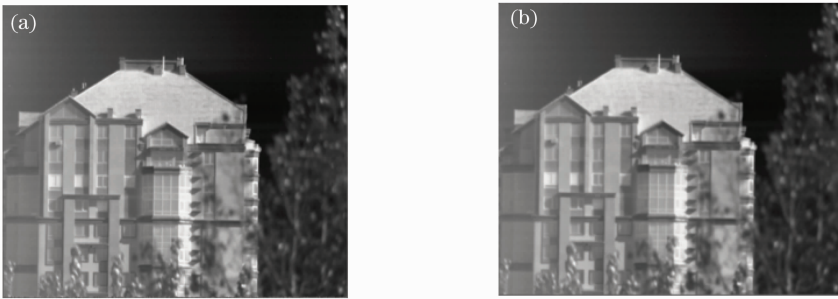


图 8 热图像过采样重构仿真研究。(a)过采样重构;(b)双线性放大

Fig. 8 Oversample reconstruction simulation of thermal image. (a) reconstructed oversampled image; (b) bilinear interpolated image

峰值信噪比 R_{PSN} 、通用图像质量因子 Q 和图像信息熵 T_{SN} 等参数评价重构图像的效果^[16]如表 1 所示。图像信息熵 T_{SN} 是衡量图像信息丰富程度的重要指标,图像信息熵越大,图像的信息量越大。其中过采样重构(定标前)是以旋转台测试零点为起点进行间隔为 90° 的旋转扫描获得 4 幅低分辨率欠采样图像,然后按标准 2×2 过采样进行直接插值重建。从视觉效果和评价参数知过采样方法重构(定标后)的细节还原能力(房顶及楼房窗户、空调等细部)优于双线性放大法,其图像信息更丰富,可分辨的细节最多,图像更清晰;而系统零点定标前的评价参数不仅比定标后的差,而且小于双线性放大法,以上两者说明了实际系统零点定标的正确性和必要性。

表 1 红外热图像重构的评价参数

Table 1 The evaluation parameters of infrared thermal image

Image processing methods	R_{PSN}	Q	T_{SN}
Bilinear interpolation	79.2119	0.9911	7.6377
Oversample (before calibration)	75.5177	0.9790	7.6256
Oversample (after calibration)	80.4697	0.9934	7.6450

4. 2. 2 实际采集显微热图像的重构

实际光学微扫描显微热成像系统完成微扫描零点定标后,按标准 2×2 微扫描模式采集 4 幅低分辨率图像如图 9(a)所示,采用过采样重构方法和双线性插值放大法得到的重构图像分别如图 9(b)和图 9(c)所示。可以看出,过采样图像比双线性插值图像更清晰、噪声更小,而且较原始低分辨率图像的空间分辨力明显提高;过采样图像包含更多的信息

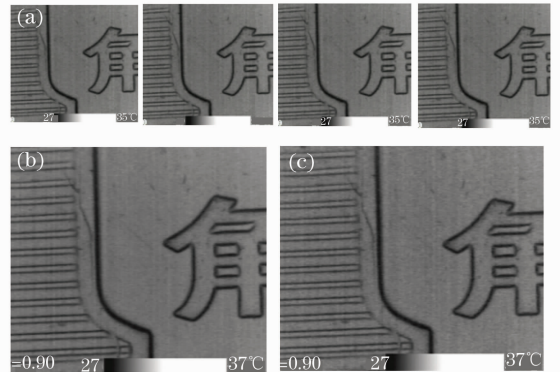


图 9 人民币一角硬币显微热图像(a)采集的低分辨率图像序列;(b)过采样重构;(c)双线性放大

Fig. 9 Thermal microscope images of the coin of one jiao (a) the collected real low resolution images; (b) oversampled image; (c) bilinear interpolated image

量(T_{SN} 较大),图像细节更丰富,说明实际光学微扫描显微热成像系统的空间分辨力得到提高,证明了实际系统零点定标方法的有效性。

5 结 论

提出了一种利用数字图像处理技术确定微扫描零点的方法,同时给出了微扫描零点定标的原理及步骤,完成了实际系统的微扫描零点定标及过采样重构工作,系统空间分辨力明显提高。微扫描零点定标具有定位精度高、速度快等优点,易于系统的硬件和实时化处理,从而解决了已研制光学微扫描显微热成像系统的实用化的关键问题,可满足需要高分辨力精细热分析领域的需求。

参 考 文 献

- H. Wang, R. B. Dinwiddie, H. Maleki. IR imaging of integrated circuit power transistors during operation[C]. *SPIE*, 2002, **4710**: 80~86
- He Xiaoqi, Fei Qingyu. Tool for semiconductor device and inactivation analysis-introduction of micro infrared imaging infraScope and ray radiation microscope EMM1630[J]. *Electronic Product Reliability and Environmental Test*, 1996, (2): 58~59
何小琦, 费庆宇. 半导体器件与 IC 失效分析的有力工具-介绍显微红外热像仪 InfraScope 和光辐射显微镜 EMM1630[J]. *电子产品可靠性与环境试验*, 1996, (2): 58~59
- Alastair Trigg. Applications of infrared microscopy to IC and MEMS packaging [J]. *IEEE Trans. Electron. Packaging Manufacturing*, 2003, **26**(3): 232~238
- Bai Tingzhu, Jin Weiqi. *Principle and Technology of Opto-electronic Imaging* [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2006, 33~35
白廷柱, 金伟其. *光电成像原理与技术*[M]. 北京:北京理工大学出版社, 2006, 33~35
- O. Legras, A. Crastes, J. L. Tissot. Low cost uncooled IRFPA and molded IR lenses for enhanced driver vision[C]. *SPIE*, 2005, **5663**: 230~237
- Xing Suxia, Zhang Junjun, Chang Benkang *et al.*. The development and status of the uncooled infrared imaging [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2004, **33**(5): 441~443
邢素霞, 张俊举, 常本康等. 非制冷红外热成像技术的发展与现状[J]. *红外与激光工程*, 2004, **33**(5): 441~443
- Cheng Changhong, Yi Xinjian, Cheng Zuhai. Fabrication of 8-element linear vOx uncooled microbolometer IR detector array [J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **28**(12): 1082~1084
陈长虹, 易新建, 程祖海. 基于 VOx 薄膜 8 元线列非致冷微测辐射热红外探测器的制备 [J]. *中国激光*, 2001, **28**(12): 1082~1084
- Gao Meijing, Jin Weiqi, Wang Xia *et al.*. Study on the noise equivalent temperature difference and noise equivalent radiation difference mathematical models for micro thermal imaging systems[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2007, **27**(1): 50~54
高美静, 金伟其, 王霞等. 显微热成像系统的 NETD, NEED 模型及其分析[J]. *北京理工大学学报*, 2007, **27**(1): 50~54
- Gao Meijing, Jin Weiqi, Wang Xia. Thermal microscope imaging system for semiconductor device and IC invalidation analysis[C]. *SPIE*, 2008, **6621**: 1~8
- Gao Meijing, Jin Weiqi. Digital thermal microscope for biomedical application [C]. 2007 *IEEE/ICME International Conference on Complex Medical Engineering*, 2007, 1875~1878
- Jean Fortin, Paul Chevere. Realization of fast microscanning device for infrared focal plane[J]. *SPIE*, 1996, **2743**: 185~196
- Zhang Haitao, Zhao Dazun. Mathematics theory and realization of aliasing reduction in opto-electric imaging system using microscanning[J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(9): 1263~1258
张海涛, 赵达尊. 微扫描减少光电成像系统频谱混淆的数学原理及实现[J]. *光学学报*, 1999, **19**(9): 1263~1258
- Zhang Haitao, Zhao Dazun. Quantitative analysis of aliasing effects in opto-electric imaging systems[J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(12): 1649~1654
张海涛, 赵达尊. 光电成像系统混淆效应的定量分析[J]. *光学学报*, 1999, **19**(12): 1649~1654
- Wu Xinshe, Cai Yi. The optical microscan technology in the infrared staring imaging system [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2007, **26**(1): 177~181
吴新社, 蔡毅. 红外凝视成像系统中的光学微扫描技术 [J]. *红外与毫米波学报*, 2007, **26**(1): 177~181
- Patrick Vandewalle, Sabine S üsstrunk, Martin Vetterli. A frequency domain approach to registration of aliased images with application to super-resolution [J]. *EurasiP Journal on Applied Signal Processing*, 2006: 1~14
- Gao Meijing. *Investigation of High Resolution Optical Microscanning Thermal Microscope Imaging System* [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2008, 65~67
高美静. *高分辨力光学微扫描显微热成像系统的研究*[D]. 北京:北京理工大学, 2008, 65~67