

# 显微热成像系统自适应位置标定方法

高美静<sup>1</sup> 顾海华<sup>1\*</sup> 关丛荣<sup>2</sup> 吴伟龙<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 燕山大学信息科学与工程学院河北省特种光纤与光纤传感重点实验室, 河北 秦皇岛 066004

<sup>2</sup> 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** 利用光学微扫描技术,可在不改变探测器结构的情况下,提高显微热成像系统空间分辨率。但为了获得高质量过采样重构图像,微扫描位置需要标定。基于零点定标,提出一种各点自适应定标的微扫描位置标定方法。模拟实际系统在定标前后的欠采样图像,采用不同重构方法进行仿真对比验证;完成了实际采集的欠采样显微热图像序列的重构对比实验。实验结果表明该方法明显改善了显微热成像系统的过采样重构图像质量,提高了系统空间分辨率。此方法还可以应用在其他光电成像系统中。

**关键词** 成像系统;显微热成像;光学微扫描;数字图像处理;自适应位置标定

中图分类号 TN211 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201333.0111002

## Adaptive Position Calibration for Thermal Microscopic Imaging System

Gao Meijing<sup>1</sup> Gu Haihua<sup>1</sup> Guan Congrong<sup>2</sup> Wu Weilong<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Key Laboratory for Special Fiber and Fiber Sensor of Hebei Province, College of Information Science and Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China

<sup>2</sup> Key Laboratory of Photoelectronic Imaging Technology and System of Ministry of Education, School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

**Abstract** With optical micro scanning technology, the spatial resolution of micro thermal imaging systems can be improved without changing the detector structure. But in order to obtain high-quality oversampled reconstructed image, the micro scanning position must be calibrated. A each point adaptive calibration micro scanning method based on the zero calibration theory is proposed. The reconstruction contrast experiments of undersampled microscopic thermal images are done before and after calibration with the thermal image and the real thermal microscopic image. The experimental results show that the method significantly improves the oversampled reconstructed image quality, and enhances the system spatial resolution. This method can also be used in other electro-optical imaging systems.

**Key words** imaging systems; thermal microscopic system; optical micro scanning; digital image processing; adaptive position calibration

**OCIS codes** 040.6808; 110.6820; 230.4685; 100.2000

## 1 引 言

热成像技术利用物体辐射能量差异获得场景信息,是当前国内外迅速发展光电图像信息获取技术,已经广泛应用在军事和民用领域<sup>[1~3]</sup>。显微热成像能够获得物体细部的微弱温度分布,在大规模

集成电路芯片设计与检测、食品安全检测、微电子机械系统/微光电子机械系统器件的热分析和生物医学诊断等领域具有广阔的应用前景<sup>[4~6]</sup>。受焦平面阵列、单位像素尺寸和采样频率等限制,显微热成像属于欠采样成像,极易造成图像的混淆失真<sup>[7~9]</sup>。

收稿日期: 2012-07-16; 收到修改稿日期: 2012-08-18

基金项目: 河北省自然科学基金(F2010001268)资助课题。

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

E-mail: gaomeijing@126.com

\* 通信联系人。E-mail: haihuanilong126@126.com

要提高成像质量,采用光学平板旋转微扫描技术是一种较简单的方式<sup>[10]</sup>。该技术是利用微扫描装置将红外光学系统所成的图像在  $x, y$  方向进行  $1/N$  ( $N$  为整数) 像素距的位移,得到  $N \times N$  帧欠采样图像,并运用数字图像处理器将多帧经过亚像素位移的图像重建成一帧图像,该图像的像素数是原来的  $N^2$  倍<sup>[11,12]</sup>,从而在较小的探测器规模下获得更多的场景信息,提高系统空间分辨率<sup>[13,14]</sup>。

由于该光学微扫描显微热成像系统为可拆卸装置,每次装调后探测器与微扫描器的位置关系都会有所改变。为此文献<sup>[15]</sup>提出了一种零点定标方法,对初始位置进行标定,然后依次旋转  $90^\circ$  找到其他三个微扫描位置点。但由于系统的改进和硬件条件的限制,仅使用零点定标方法标定的初始点与标准点间会产生误差,误差的累积将造成四个微扫描位置所成的四边形偏离标准微扫描所成的正立正方形,造成实验效果不理想。因此,系统各扫描位置的准确定位,是目前需要解决的问题。本文提出一种巧妙的几何方法并利用改进的频域配准方法<sup>[16]</sup>,在文献<sup>[15]</sup>提出的零点定标方法基础上对光学平板旋转微扫描系统的各个扫描位置进行自适应准确定位。

## 2 光学微扫描显微热成像系统与微扫描位置

光学微扫描显微热成像系统由红外热像仪、光学平板旋转微扫描装置、红外显微物镜、机械结构组件及计算机组成<sup>[13]</sup>。图 1 为光学平板旋转微扫描装置,其中平板旋转折射镜和与光轴垂直的面成一定角度,由机械装置控制平板折射镜绕光轴旋转,在每相隔  $90^\circ$  的位置处各采集一幅图像,使得到的四幅图像相互之间错位半个探测器间距,再对四幅图像进行过采样重构获得超分辨率亚像素成像<sup>[15]</sup>。

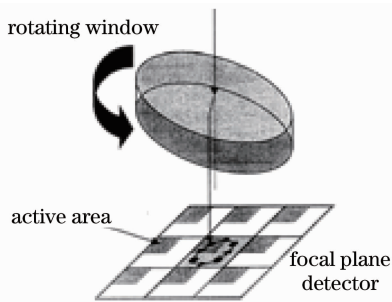


图 1 旋转折射镜微扫描示意图

Fig. 1 Schematic diagram of micro scanning

图 2 中,实线圆是平板折射镜运动过程中物体在焦平面探测器上所成图像的轨迹,圆心是系统光轴也是微扫描装置的旋转中心,圆半径  $\Delta$  是平板折射镜与光轴倾斜产生的移动距离,每两个相邻扫描位置点间距为探测器像素间距  $L$  的一半,其等量关系是  $\Delta = \sqrt{2}L/4$ ,圆周上位于四个象限  $45^\circ, 135^\circ, 225^\circ, 315^\circ$  处的四点是微扫描标准位置点,构成一个标准  $2 \times 2$  正立正方形(如图 2 中虚线所示),在四个标准位置采集四幅低分辨率欠采样图像可重构出高质量的超分辨率图像,从而提高系统空间分辨率。

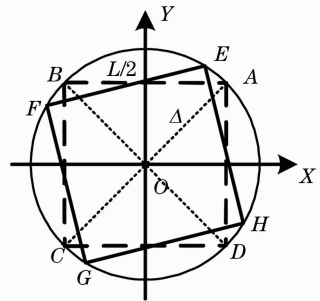


图 2  $2 \times 2$  微扫描位置图

Fig. 2  $2 \times 2$  micro scanning position

不论是系统安装还是检测之后,由于各次安装属于可拆卸模式的成像组件的方位角不完全一致,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<sup>[15]</sup>。如果仍按安装位置确定后续的旋转位置进行  $2 \times 2$  微扫描,则四个微扫描位置构不成正立正方形(如图 2 中实线的正方形所示)。这样获得的四幅欠采样图像重构出的图像质量会降低,甚至还不如单幅图像经过双线性插值放大得到的图像质量。而且由于扫描装置在旋转过程中产生的振动及环境等因素影响,即使初始位置刚好与标准位置重合,其他位置的点也会和标准位置点产生误差。因此,对微扫描零点位置的标定以及其后的各个扫描位置的标定都是必不可少的。

## 3 微扫描装置扫描位置的标定

微扫描零点位置标定是指将装置的初始微扫描位置点与图 2 中  $2 \times 2$  正立正方形中标准点(A, B, C, D 四点)中的任一点重合。标定的方法如文献<sup>[15]</sup>所述。待零点位置标定完成后,再进行其他位置点的标定。

### 3.1 对角线位置点标定

以文献<sup>[15]</sup>标定的零点为起点,旋转光学平板  $180^\circ$  找到其对角点。如图 3(a)所示,以零点位置在

C点为例,逆时针旋转平板折射镜  $180^\circ$ ,理论上应该到达A点,但由于偏差,实际上落在了 $P(x_P, y_P)$ 点上,则标定角 $\alpha$ 的大小等于 $\angle AOP$ 的大小,过点C、P分别做水平线和垂直线相交于Q点, $\angle AOP$ 和 $\angle ACP$ 是弧 $\widehat{AP}$ 对应的圆心角和圆周角,所以对角线位置标定角 $\alpha$ 为

$$\alpha = 2 \left[ 45^\circ - \left| \arctan \left( \frac{y_C - y_P}{x_C - x_P} \right) \right| \right] = 2 \left[ 45^\circ - \left| \arctan \left( \frac{\Delta y}{\Delta x} \right) \right| \right], \quad (1)$$

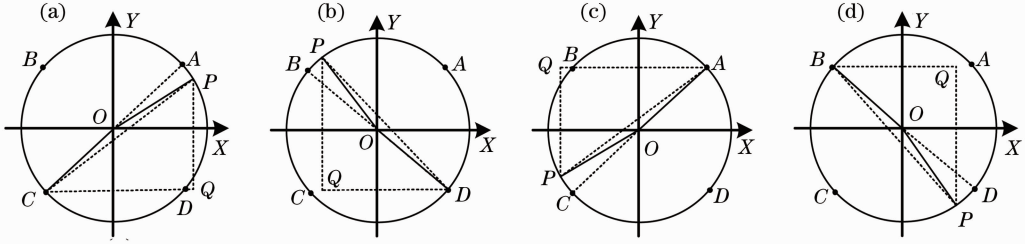


图3 对角线位置标定示意图。(a)待标定点在第1象限;(b)待标定点在第2象限;(c)待标定点在第3象限;(d)待标定点在第4象限

Fig. 3 Diagonal position calibration diagram. (a) Calibration point in the first quadrant; (b) calibration point in the second quadrant; (c) calibration point in the third quadrant; (d) calibration point in the fourth quadrant

### 3.2 其他两个位置点标定

当对角点标定完成后继续逆时针旋转  $90^\circ$ ,以待标定点在第1象限为例,旋转  $90^\circ$ 以后,理论上应该到达A点,但由于偏差,实际上落在了 $R(x_R, y_R)$ 点上,如图4(a)所示,则标定角 $\beta$ 的大小等于 $\angle AOR$ 的大小,过点D、R分别作垂直线和水平线交于S点, $\angle AOR$ 和 $\angle ADR$ 是弧 $\widehat{AR}$ 对应的圆心角和圆周角,所以标定角 $\beta$ 为

$$\beta = 2 \arctan \left( \frac{x_D - x_R}{y_D - y_R} \right) = 2 \arctan \left[ \left| \frac{\min(\Delta x, \Delta y)}{\max(\Delta x, \Delta y)} \right| \times \frac{\Delta x \times \Delta y}{|\Delta x \times \Delta y|} \right], \quad (2)$$

式中 $\Delta x$ 和 $\Delta y$ 分别为旋转前和旋转后两点横纵坐标之差,当待标定点在其他象限时,标定角 $\beta$ 的计算

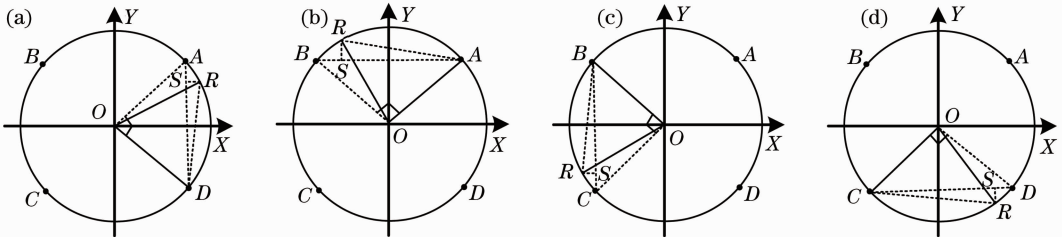


图4 其他位置标定示意图。(a)待标定点在第1象限;(b)待标定点在第2象限;(c)待标定点在第3象限;(d)待标定点在第4象限

Fig. 4 Other position calibration diagram. (a) Calibration point in the second quadrant; (b) calibration point in the third quadrant; (c) calibration point in the first quadrant; (d) calibration point in the fourth quadrant

式中 $\Delta x$ 和 $\Delta y$ 分别为旋转前和旋转后两点横纵坐标之差,当待标定点在其他象限时,标定角 $\alpha$ 的计算方法与其在第1象限的情况相同。对于确定微扫描器的旋转方向,由图3可知,微扫描装置的旋转方向与已确定的零点所在象限有关:当待标定点在第1、3象限时, $\alpha < 0$ 时平板折射镜顺时针旋转 $|\alpha|$ , $\alpha > 0$ 时平板折射镜逆时针旋转 $|\alpha|$ ;当待标定点在2、4象限时 $\alpha > 0$ 时平板折射镜顺时针旋转 $|\alpha|$ , $\alpha < 0$ 时平板折射镜逆时针旋转 $|\alpha|$ 。

方法与其在第1象限的情况相同。对于确定微扫描器的旋转方向,由图4可知,微扫描装置的旋转方向与待标定点所在象限有关:当待标定点在第1、3象限时, $\beta > 0$ 时平板折射镜逆时针旋转 $|\beta|$ , $\beta < 0$ 时平板折射镜顺时针旋转 $|\beta|$ ;当待标定点在2、4象限时 $\beta > 0$ 时平板折射镜顺时针旋转 $|\beta|$ , $\beta < 0$ 时平板折射镜逆时针旋转 $|\beta|$ 。

按上述方法标定出第三个点后,则以此点为起点旋转  $180^\circ$ ,按照对角线位置点标定方法将第四个点也标定出来。

### 3.3 自适应位置标定过程

标定时,由于外界环境因素及系统本身精度的影响,标定后的位置与理想位置还有偏差。为此在

每次标定时都首先设定一个阈值,在每一个标定位置多次重复标定,阈值的设定是通过多次实验选取了一个足够小且不用重复次数太多的数值(本实验中阈值为  $500 \text{ r} \times 0.0025^\circ$ ,即为  $1.25^\circ$ )。自适应标定过程为:采集旋转前图像  $I_1$  和旋转后图像  $I_2$ ,然后根据图像配准算法确定两点之间微位移,再根据标定公式计算标定角度和旋转方向,并将标定角度大小与设定的阈值作比较,若标定角大于阈值,则按标定角度及方向旋转平板重新得到图像  $I_2$ ,再一次重新计算旋转角度及方向,反之则自适应位置标定完成。这种自适应标定方法可以达到更高的标定精度,其流程图如图 5 所示。

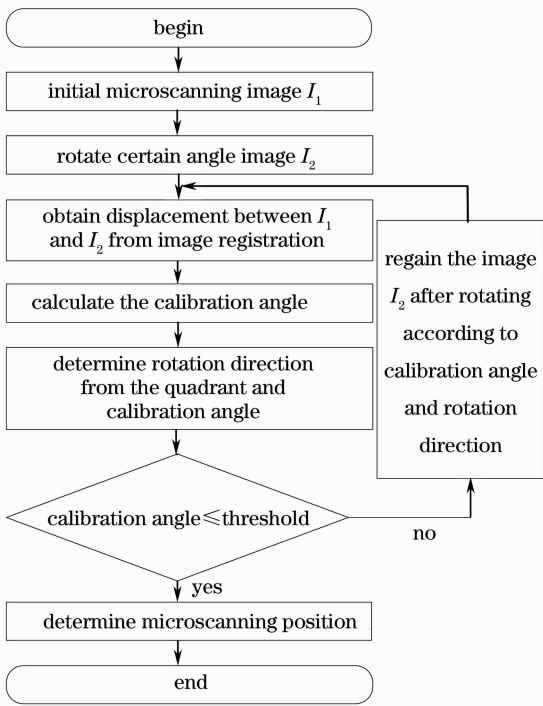


图 5 自适应位置标定流程图

Fig. 5 Flow chart of adaptive-position calibration

#### 4 位置标定及图像重构实验

对实际光学平板微扫描显微热成像系统进行位置标定实验。图 6 是扫描位置标定前后的四幅图像的微位移位置图,其中细实线代表未经位置标定的微扫描位置图,粗实线代表只有零点被自适应标定其余点不标定的微扫描位置图,虚线代表各位置点都被自适应标定的微扫描位置图。从图 6 中可以看出各点都进行自适应标定后的位置图最接近标准的正立正方形,从而说明了所提出的标定方法的有效性。

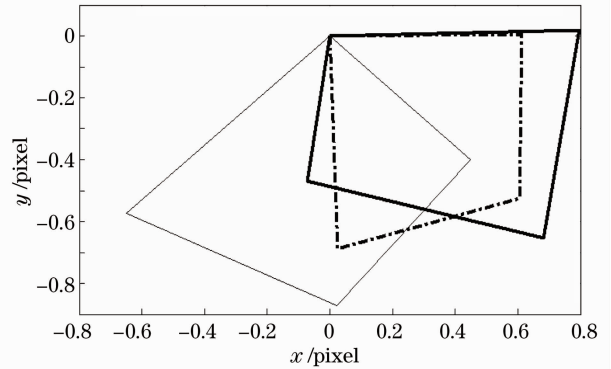


图 6 系统微扫描位置标定实验

Fig. 6 Calibration experiment of system micro scanning position

##### 4.1 红外图像仿真重构实验

将高分辨率的红外大楼图像 ( $640 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$ ) 图 7(a) 按照图 6 中三种位移分别模拟生成四幅低分辨率 ( $320 \text{ pixel} \times 256 \text{ pixel}$ ) 图像,如图 7(b) 所示即为按照各点都进行自适应位置标定结果生成的四幅低分辨率图像。图 8 分别给出了按零点自适应标定[图 8(a)]和各点自适应标定方法进行图像过采样重构的结果。图 8(b) 即为将图 7(b) 的四幅低分辨率图像按标准  $2 \times 2$  过采样直接嵌入重构出一幅高分辨率图像。

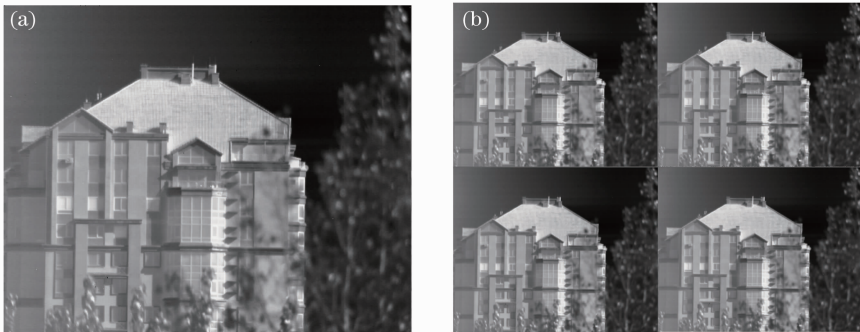


图 7 (a) 高分辨力图像及 (b) 模拟位移低分辨力图像

Fig. 7 (a) High-resolution image and (b) low-resolution images of simulation displacement

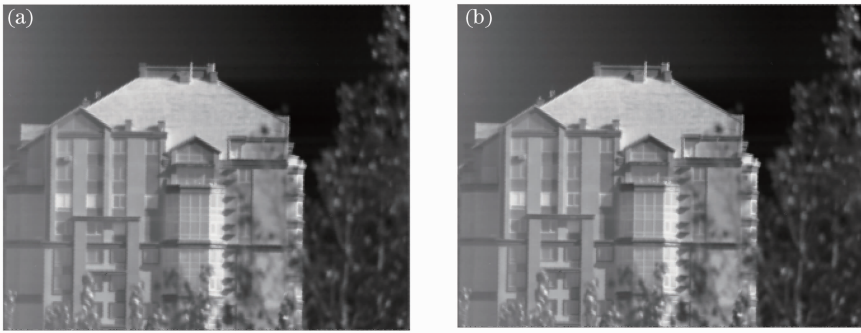


图 8 热图像过采样重构仿真研究。(a)零点自适应标定；(b)各点自适应标定

Fig. 8 Simulation of oversampled reconstruction thermal images. (a) Zero adaptive calibration; (b) each point adaptive calibration

通过峰值信噪比(PSNR)、通用图像质量因子Q和图像信息熵(SNT)来评价重构图像的效果<sup>[16]</sup>(见表1)。其中过采样重构(未定标)图像是以旋转台测试零点为起点,以 $90^\circ$ 间隔旋转扫描得到的四幅低分辨率欠采样图像直接插值重构所得<sup>[15]</sup>。从目视效果和评价参数知:系统未标定时PSNR和Q不仅比标定后的差,而且小于双线性插值法,但所含信息量大于双线性插值法;标定后过采样重构图像(零点自适应标定和各点自适应标定)的细节还原能力(楼房窗户等细部)优于双线性插值法和未标定的重构图像,尤其是各点自适应标定的过采样重构图像在信息量、清晰度和细节分辨能力上更优。

#### 4.2 实际采集显微热图像的重构

如图9所示是实际光学微扫描显微热成像系统

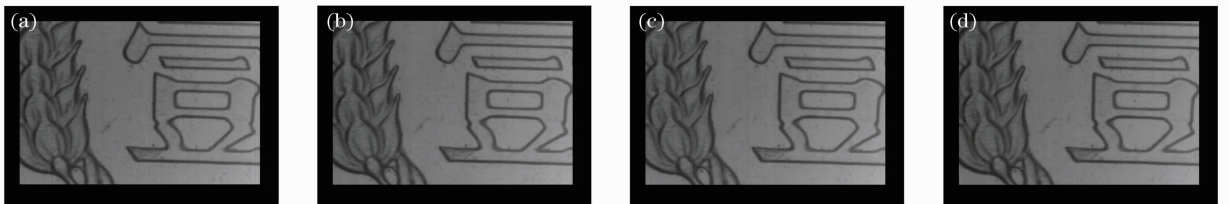


图 9 低分辨率显微热图像序列

Fig. 9 Low resolution microscopic thermal images

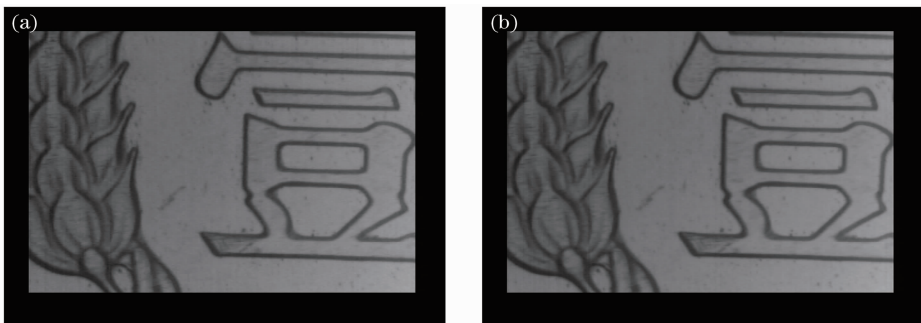


图 10 实际显微热图像过采样重构结果。(a)零点自适应标定；(b)各点自适应标定

Fig. 10 Reconstruction results of actual microscopic thermal image oversample. (a) Zero adaptive calibration; (b) each point adaptive calibration

表 1 红外热图像重构的评价参数

Table 1 Evaluation parameters of infrared thermal image reconstruction

Image processing methods	PSNR	Q	SNT
Oversample (no calibration)	74.2062	0.9748	7.6585
Bilinear interpolation	74.7718	0.9777	7.6498
Oversample (zero adaptive calibration)	74.9933	0.9790	7.6593
Oversample (each point adaptive calibration)	75.4376	0.9810	7.6597

经各点自适应位置标定后所采集的一角硬币的四幅低分辨率图像(768 pixel $\times$ 576 pixel)。将四幅图像进行过采样重构可以得到图10(b)所示的高分辨率图像(1536 pixel $\times$ 1152 pixel),其SNT为5.6974。图10(a)是采用零点自适应标定得到的过采样重构图像,其SNT为5.6685。

通过对比可以看出:各点自适应标定后的过采样重构图像比零点自适应标定得到的重构图像清晰度更高,信息量更大,细节更丰富,且与原始低分辨率图像相比空间分辨率有明显提高。说明各点自适应位置标定的方法提高了实际系统的空间分辨率,证明了其有效性。

## 5 结 论

光学平板旋转微扫描器用于热成像系统,可以在较低探测器规模条件下获得高分辨率的成像系统,它具有结构简单、控制方便以及易与不同成像系统结合的优势,具有广泛的应用前景。微扫描位置的标定是该模式微扫描器正常工作的必要环节。本文研究的光学微扫描各点自适应标定方法,经实验证明可有效地提高重构图像质量,进而提高显微热成像系统的空间分辨率。提出的定标方法由于算法简单,复杂度低,速度快,所以易于系统进一步的硬件实现和实时化处理。

## 参 考 文 献

- Zhou Hao, Liu Ying, Sun Qiang. Mid-infrared zoom optical system with ratio of 25[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(4): 0422001  
周昊,刘英,孙强等. 25倍中红外连续变焦光学系统设计[J]. *光学学报*, 2012, **32**(4): 0422001
- Cheng Teng, Zhang Qingchuan, Gao Jie *et al.*. Analysis of optical readout sensitivity for uncooled infrared imaging based on optical readout[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(2): 0204002  
程腾,张青川,高杰等. 光学读出非制冷红外成像技术的光学灵敏度分析[J]. *光学学报*, 2012, **32**(2): 0204002
- Liang Zhongzhu. Design and experimental study on micro infrared radiometer chip[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(11): 1112009  
梁中翥. 微型红外辐射探测芯片的设计及实验研究[J]. *光学学报*, 2011, **31**(11): 1112009
- M. Romeo, B. Mohlenhoff, M. Diem. Infrared micro-spectroscopy of human cells: causes for the spectral variance of oral mucosa ( buccal) cells [J]. *Vibrational Spectrosc.*, 2006, **42**(1): 9~14
- S. Y. Lee, H. W. Tung, W. C. Chen *et al.*. Thermal actuated solid tunable lens [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2006, **18**(21): 2191~2193
- Yang Xiukun, Zhong Mingliang, Jing Xiaojun *et al.*. FTIR microscopic image analysis based on principal component analysis-2nd derivative spectral imaging[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012,

**32**(7): 0711001

- 杨秀坤,钟明亮,景晓军等. 基于主成分分析-二阶导数光谱成像的红外显微图像分析[J]. *光学学报*, 2012, **32**(7): 0711001
- 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): 1263~1268  
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): 1263~1268
  - 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
  - Bai Junqi, Chen Qian, Qu Huiming. Research on optical microscanning reconstruction for infrared starting imaging[J]. *J. Infrared and Millimeter Waves*, 2008, **27**(4): 257~260  
白俊奇,陈钱,屈惠明. 红外凝视成像光学微扫描重建技术研究[J]. *红外与毫米波学报*, 2008, **27**(4): 257~260
  - Wu Xinshe, Cai Yi. The optical microscan technology in the infrared staring imaging system[J]. *J. Infrared and Millimeter Waves*, 2007, **26**(1): 10~14  
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): 10~14
  - Zhang Yi, Bai Lianfa, Chen Qian *et al.*. Performance analysis and computation for spatial resolving capability of IRFPA microscan [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, **38**(2): 221~225  
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
  - Qu Huiming, Chen Qian. Comparison of microscanning schemes in infrared focal plane array imaging [J]. *Laser & Infrared*, 2006, **36**(3): 161~164  
屈惠明,陈钱. 红外焦平面阵列微扫描成像方案比较 [J]. *激光与红外*, 2006, **36**(3): 161~164
  - Gao Meijing, Jin Weiqi, Wang Xia *et al.*. Design and implementation of optical micro-scanning thermal microscope imaging system with high resolution[J]. *Chinese J. Scientific Instrument*, 2009, **30**(5): 1037~1041  
高美静,金伟其,王霞等. 高分辨率光学微扫描显微热成像系统设计及实现[J]. *仪器仪表学报*, 2009, **30**(5): 1037~1041
  - A. aL TES, I. Joachimsthaler, G. Zimmermann *et al.*. SEM/SThM-hybrid-system; a new tool for advanced thermal analysis of electronic devices [C]. Singapore; Proceedings of the 9th IPFA, 2002. 196~200
  - Gao Meijing, Jin Weiqi, Wang Xia *et al.*. Zero calibration for the designed microscanning thermal microscope imaging system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(8): 2175~2179  
高美静,金伟其,王霞等. 光学微扫描显微热成像扫描零点定标方法研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(8): 2175~2179
  - Gao Meijing. Investigation of High Resolution Optical Microscanning Thermal Microscope Imaging System[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2008. 14~67  
高美静. 高分辨率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. 14~67

栏目编辑:李文洁