

## 小波变换在显微热图像位移估计中的应用

关丛荣<sup>1</sup>, 金伟其<sup>2</sup>, 王吉晖<sup>2</sup>

(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:** 针对显微热图像, 提出一种基于傅里叶变换的多分辨率位移估计方法。该方法首先对显微热图像进行小波变换, 再将原始图像及小波变换后的各个近似分量生成一个基于灰度的金字塔序列图像, 然后基于傅里叶变换位移估计算法分别对金字塔各层序列图像进行位移估计, 最后将得到的各层序列图像位移量按照分层权重进行加权平均得到最后的图像序列位移量, 实验结果表明: 该方法有效地提高了显微热图像位移估计精度, 降低了位移估计的平均误差和方差。

**关键词:** 显微热图像; 位移估计; 小波变换; 傅里叶变换; 亚像素

**中图分类号:** TN211   **文献标志码:** A   **文章编号:** 1007-2276(2014)08-2780-06

## Application of wavelet transform on micro thermal imaging displacement estimation

Guan Congrong<sup>1</sup>, Jin Weiqi<sup>2</sup>, Wang Jihui<sup>2</sup>

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

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

**Abstract:** According to micro thermal imaging, multiresolution displacement estimation based on Fourier transform was put forward. First micro thermal imaging was changed by wavelet transform, and a gray pyramid was built by the wavelet transform of image sequence. And the displacement components of each layer was estimated with Fourier transform. Then the final image sequence displacement was obtained by arithmetic layered weighted mean of all layers. The experimental results show that this method can effectively improve the micro thermal imaging displacement estimation accuracy, and reduce the average error and standard deviation mean.

**Key words:** micro thermal imaging; displacement estimation; wavelet transform; Fourier transform; subpixel

收稿日期: 2013-12-10; 修订日期: 2014-01-08

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, 博士后, 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, 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

物体的显微热图像能够体现其细部微弱温度分布,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<sup>[1-2]</sup>。光学微扫描方式可提高显微热图像分辨力,而微扫描图像序列的位移估计是显微热图像超分辨力重建的关键。经典的图像位移估计算法主要有匹配模块内插值法、相关系数法、光流法、梯度展开法、投影法、尺度不变特征变换算法等<sup>[3-4]</sup>。而显微热图像属于欠采样热图像,需采用抗噪能力强、计算速度快的图像估计算法。

傅里叶变换位移估计法是一种频域内图像位移估计算法,对图像噪声和亮度变换有一定的鲁棒性。相对于运算量大的相关系数等方法可以用 FFT 快速实现,提高图像位移估计速度。但是傅里叶变换是信号整个时域内的积分,没有局部化分析信号的功能,而小波变换被称为数学显微镜,它可以在低频部分具有较高的频率分辨率和较低的时间分辨率,在高频部分具有较高的时间分辨率和较低的频率分辨率。而且离散小波变换不具有平移不变性,当图像发生轻微平移时,由于在变换过程中进行降采样使得图像分解后的系数将发生很大的变换,有利于傅里叶变换位移估计。

为此,文中基于傅里叶变换和小波变换提出用于估计显微热图像位移的多分辨率亚像素位移估计算法。分别研究了傅里叶位移估计算法和小波分层策略,研究二者结合的算法原理及实现方法,给出相应的仿真和实际实验。

## 1 傅里叶变换位移估计

在参考文献[6]中,基于光学平板旋转微扫描显微热成像系统,利用图像傅里叶变换的平移特性估计图像序列位移,其基本思想是被测图像序列的频谱包含确定偏移量充分信息,傅里叶变换后频域的相位变化相应于空域的平移变化,则图像序列的位移关系转为其频域的相位变化关系。只要能精确测定傅里叶变换函数的相位变化,就能估计图像序列的位移量。

设参考图像为  $f_1(x, y)$ , 经平移后的图像为  $f_2(x,$

$y)$ ,  $\Delta x$  和  $\Delta y$  是水平和垂直方向位移,则有:

$$f_1(x, y) = f_2(x - \Delta x, y - \Delta y) \quad (1)$$

则其相应的傅里叶变换为:

$$F_1(u, v) = F_2(u, v) \exp[-j2\pi(u\Delta x + v\Delta y)] \quad (2)$$

公式(2)说明两幅图像之间的平移位移  $\Delta x$  和  $\Delta y$  可以用相位差的斜率  $\angle(F_1(u, v)/F_2(u, v))$  求得。为提高对噪声的鲁棒性,用最小二乘法将相位差拟合为一个平面,则最小二乘解对应的平移参数  $\Delta x$  和  $\Delta y$  即为所求。

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:

$$W(n) = \begin{cases} 1.0 & 0 \leq |n| \leq \frac{N}{2} \\ 0.5 \left[ 1 + \cos \left[ \pi \frac{n - \alpha \frac{N}{2}}{2(1 - \alpha) \frac{N}{2}} \right] \right] & \alpha \frac{N}{2} \leq |n| \leq \frac{N}{2} \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $\alpha$  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  $0, \dots, N$ 。

当图像序列出现混频时,由于频率组成的不同使得上述方法得不到精确的位移估计量,此时公式(2)等式两端不再相等,代替它的是:

$$F_1(u, v) = \sum_{k=-K}^K \sum_{l=-L}^L \exp[-j2\pi((u - ku_s)\Delta x + (v - lv_t)\Delta y)] \cdot F_2(u - ku_s, v - lv_t) \quad (4)$$

式中:  $u_s$  为频率  $u$  处的采样频率和  $2K+1$  个混频叠加的频率之和,  $v_t$  为频率  $v$  处的采样频率和  $2L+1$  个混频叠加的频率之和,混频的出现打破了  $|F_1(u, v)|$  和  $|F_2(u, v)|$  间线性关系。但是,在限定混频或者仅考虑轻微混频甚至无混频的情况下,利用公式(2)还是能够得到图像之间正确位移估计量的。

显微热图像属于欠采样图像,图像混频情况严重,仅仅用低通滤波难以消除混频的影响,如果低频频率滤除的过多会使信号损失严重,得不到准确的位移估计量,如果滤除的过少,又因为混叠现象同样得不到正确的结果。因此,文中选用小波变换多分辨率分层策略,利用小波变换局部化分析信号的功能,降低傅里叶变换位移估计中图像混频的影响,提高显微热图像位移估计精度。

## 2 小波变换多分辨率分层策略

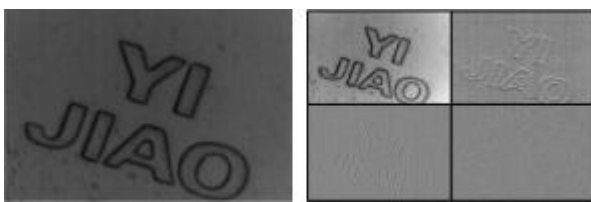
小波变换是用一族函数去逼近一信号,此函数

族称为小波函数系,它是通过一基本小波函数在不同尺度下经平移和伸缩构成的<sup>[7]</sup>。函数  $f(t) \in L^2(\mathbf{R})$  的连续小波变换(CWT)定义为:

$$\text{CWT}_{a,b} = \int_{\mathbf{R}} f(t) \overline{\psi_{a,b}(t)} dt = |a|^{-\frac{1}{2}} \int_{\mathbf{R}} f(t) \overline{\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)} dt \quad (5)$$

式中:  $\Psi(t)$  为基本小波(Prototype);  $\psi_{a,b}(t)$  为分析小波,  $a$  和  $b$  分别为小波基的尺度和平移参数,将它们离散化就成为离散小波变换。

将一维离散小波推广到二维就可以实现图像的二维离散小波变换。按照 Mallat 小波快速分解算法,图像信号的小波分解是对图像  $f(x, y)$  依次按行、列与一维小波低通和高通分解滤波器作卷积来实现的,在卷积之后进行相应的降采样。随着小波理论及各种数值算法的发展,人们在一些基本小波的基础上,构造了满足不同需要的小波,最为典型的如 Mexico、Meyer、Harr、dbN、Symlet、Coiflet、BiorNr.Nd 小波等。对于具体问题如何选择小波没有一个统一的准则,一般由实验及经验值决定<sup>[8]</sup>,因为文中小波分层后要利用傅里叶变换进行位移估计,因此选用具有线性相位和正交性的双正交小波 Bior6.8。图 1 是利用 Bior6.8 将一幅显微热图像进行了小波一级分解。图 1(a) 是人民币 1 角硬币局部显微热图像。图 1(b) 是其一级小波分解各分量图,左上角为近似分量 cA,其余三幅是细节图像,分别为水平细节分量 cH、垂直细节分量 cV 以及对角细节分量 cD。



(a) 原图 (b) 一级小波分解  
(a) Original (b) Primary wavelet decomposition

图 1 显微热图像的一级小波分解

Fig.1 Micro thermal imaging primary wavelet decomposition

依此类推,可以将每次分解后的近似分量再次进行下一层分解,每进行一层小波分解,其分量图像大小为上一层的四分之一,由原始图像和各层分解近似分量图像生成一个基于灰度的多分辨率金字塔。小波分解中每层的近似分量一方面原图像的平滑逼近,能够降低噪声和混频影响有利于傅里叶

位移估计;另一方面图像在分解的过程中实现了降采样,使得具有微小位移的图像序列分解后的系数会发生很大变化,从而有利于傅里叶变换后相位变化的估计。而且,小波变换具有时间-频率局部化的特点,也就是小波分解每层中的近似分量是原图像不同频率成分的能量集中,这样,按分层的权重平均原始图像和每层近似分量的位移估计量得到图像序列的最后位移估计量。而小波分解每层中的细节分量更多的是含有图像噪声的高频成分,不利于位移估计,在位移估计过程中没有进行考虑。

### 3 微位移估计算法

依据上述傅里叶和小波变换微位移估计原理,文中提出的微位移估计算法框图如图 2 所示。

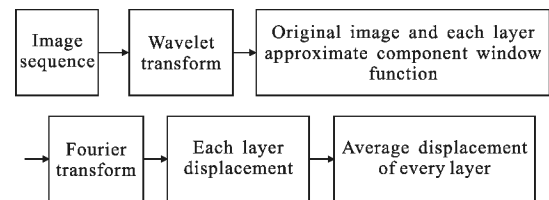


图 2 微位移估计算法框图

Fig.2 Micro displacement estimation algorithm diagram

将显微热图像序列,基于 Bior6.8 小波基进行  $L$  层小波分解,与原始图像构成  $L+1$  层灰度金字塔,将原始图像和每层分解中的近似分量加 Tukey 函数窗后再进行傅里叶变换,根据公式(2)计算从灰度金字塔底层到顶层位移量  $d_0, d_1, \dots, d_n$ ,由于每层小波分解后图像是上一层的四分之一,则最终位移量  $d$  为:

$$d = \frac{1}{L+1} \sum_{i=0}^N 2^i d_i \quad i=0, 1, 2, \dots, L \quad (6)$$

式中:  $L$  为小波分解的层数,它由原始图像大小确定,对于一幅大小为  $M \times N$  图像,最大层数  $L$  要小于  $\min\{\log_2 M, \log_2 N\}$ 。

### 4 实验

基于小波变换前后的傅里叶微位移估计算法设计了位移估计仿真实验。实验所用图像如图 3 所示,图 3(a) 是原始无噪声高分辨率图像,实验中在  $[0, 1]$  区间以 0.1 个像素为步长在水平和垂直方向 1/2 降采样得到低分辨率图像序列,将图像序列中的参考图像和待匹配图像分别引入加性均值为 0、 $\sigma_1=0.04$ 、

$\sigma_2=0.05$  的高斯噪声,归一化至[0,1]灰度区间的图像,标准方差为 0.05 的噪声量可认为足够大,足以模拟实际成像过程中噪声的影响,图 3(b)是被噪声污染的图像。实验结果如图 4 所示,图中坐标单位为一个像素,由图中看出经小波变换后的傅里叶位移估计值要比变换前的更接近于真值。



(a) 原图 (b) 噪声图像  
(a) Original image (b) Noise image

图 3 仿真实验图像

Fig.3 Simulation images

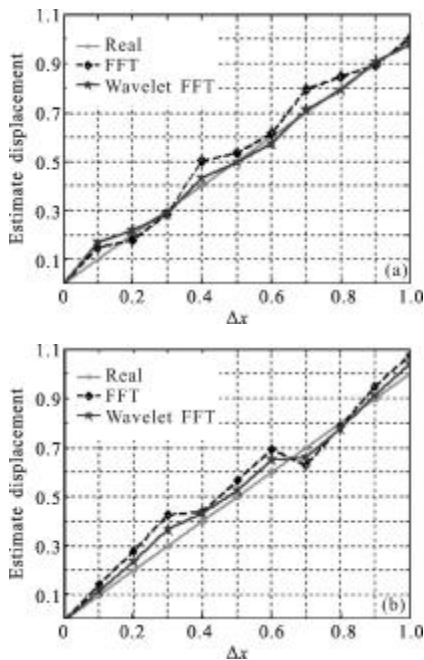


图 4 位移估计仿真实验结果

Fig.4 Simulation results of displacement estimate

实际位移估计实验是基于参考文献[6]中光学平板微扫描显微热成像系统进行的,该系统由红外热像仪、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,如图 5 所示<sup>[9]</sup>。载物台上的被测物经红外显微物镜、微扫描装置到达热像仪的焦平面阵列,所拍摄热显微图像经图像采集卡送与

计算机进行处理。

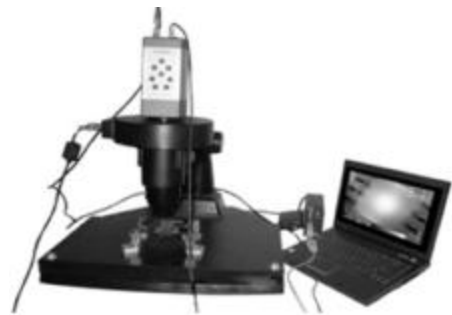


图 5 显微热成像系统

Fig.5 Microscopic thermal imaging system

其中微扫描装置由光学平板和机械装置组成如图 6 所示。光学平板相对于与光轴垂直的平面偏离一个角度,利用由计算机控制的机械装置使光学平板绕系统光轴旋转,从而获得不同位置的微扫描显微热图像。

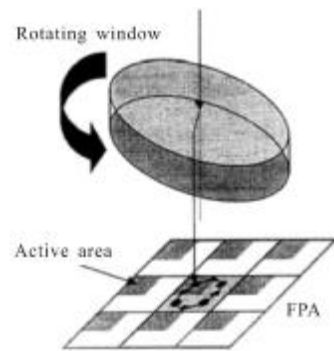


图 6 光学平板微扫描示意图

Fig.6 Sketch map of optical plate rotating micro scanning

实验中光学平板绕光轴旋转一周,每隔 30°拍摄一幅显微热图像,则理想的各微扫描位置如图 7 所

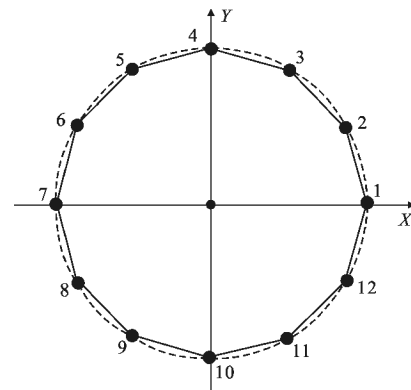


图 7 理想微扫描位置图

Fig.7 Ideal micro scanning locations



示,各个微扫描点图像之间只有平移运动且平移距离在一个像素内。图 7 中,虚线的圆是光学平板的运动轨迹,圆心是系统光轴也是微扫描装置的旋转中心,圆半径是光学平板与光轴倾斜产生的移动距离,以圆心为原点建立直角坐标系,1 到 12 是微扫描理想位置,如果选取每隔  $90^\circ$  的四幅图像就构成了  $2 \times 2$  微扫描方式,利用这四幅欠采样低分辨率图像可以重构出高质量超分辨率图像,从而提高系统的空间分辨率。

以图 1(a)所示的被测物为对象,按图 7 所示的微扫描位置获得显微热图像,光学平板旋转一周得到 12 幅不同位置的图像,实验中共旋转 10 圈获得 10 组,每组 12 幅图像,将这些图像分别进行了小波变换前后微位移估计,实验结果如图 8 所示,图中坐标单位为一个像素。

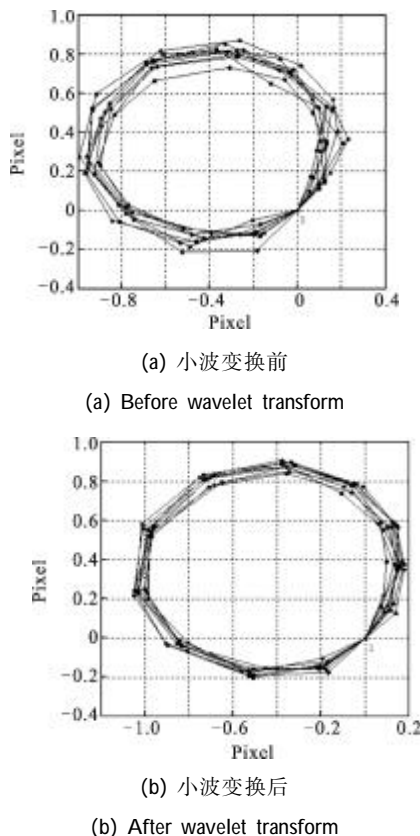


图 8 位移估计实验结果

Fig.8 Displacement estimates experimental results

从图 8 的实验结果可以看出,经小波变换后微位移估计要比未经小波变换直接用傅里叶变换估计的微位移重复性好。这里要说明的是实际微扫描装置安装到系统中后的起始点不会与图 7 中的起始点 1

重合,而是圆周上的某一位置。由图 8(b)中可以看出,相同位置点的重复估计过程中还是存在误差的,这一部分来源于算法计算过程中产生的误差,还有就是光学平板旋转过程中机械振动以及环境因素的影响。

以初始点 1 为参照,分别求出其他各点与点 1 之间的距离,然后求出各距离的平均误差和标准差,如表 1 所示。

表 1 实验对比数据

Tab.1 Experimental comparison data

	Average error		Standard deviation	
	Before	After	Before	After
1	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0
2	-0.000 8	0.000 1	0.002 4	0.000 3
3	-0.008 0	-0.005 9	0.025 3	0.018 7
4	-0.002 5	-0.000 9	0.008 0	0.002 8
5	-0.003 0	-0.003 0	0.009 4	0.009 6
6	-0.005 2	-0.000 9	0.016 4	0.002 8
7	-0.003 2	-0.000 9	0.010 2	0.002 8
8	-0.003 1	-0.000 3	0.009 8	0.000 9
9	0.000 9	0.000 2	0.002 7	0.000 5
10	-0.001 1	-0.000 7	0.003 6	0.002 3
11	0.001 3	0.000 2	0.004 0	0.000 5
12	0.001 5	-0.000 5	0.004 8	0.001 6

从表中可以看出,平均误差绝对值的最大值由小波变换前 0.008 0 降为变换后的 0.005 9,标准差由变换前的 0.025 3 降为 0.018 7,经小波变换后的微位移估计精度更高。

## 5 结 论

结合小波变换良好的时频局部化特性和傅里叶变换良好的频域分析特性,文中基于傅里叶变换微位移估计算法,利用小波变换多层分解显微热图像序列,最后在按层的权重平均各层位移量以达到降低噪声和混频影响的同时还能兼顾图像各频率成分。实验表明:该方法有很好的鲁棒性,能够提高显微热图像微位移估计精度。

## 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] Lee Szyuan, Tung Hsiwen, Chen Wenchih, 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] 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及实现[J]. *仪器仪表学报*, 2009, 30(5): 1037-1041.
- [5] Joachimsthaler I, Zimmermann G, Heiderhoff R. Sen/stem-hybrid-system: A new tool for advanced thermal analysis of electronic devices [C]//*Proceeding of 9th IPFA*, 2002: 196-200.
- [6] Gao Meijing. Investigation of high resolution optical microscanning thermal microscope imaging system [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2008: 65-68. (in Chinese)  
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: 65-68.
- [7] Jiang Zhiguo, Han Dongbing, Xue Bindang, et al. Series microscopy images fusion based on area wavelet transform [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2006, 32(4): 399-403. (in Chinese)  
姜志国, 韩冬兵, 薛斌党, 等. 基于区域小波变换的序列显微图像融合 [J]. *北京航空航天大学学报*, 2006, 32(4): 399-403.
- [8] Yang Biwu, Guo Xiaosong, Zhao Jingmin, et al. An algorithm on gemetric global registration of parallax images based on wavelet transform[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, 36(3): 574-476. (in Chinese)  
杨必武, 郭晓松, 赵敬民, 等. 基于小波变换的视差图像全局几何配准新算法[J]. *光子学报*, 2007, 36(3): 574-476.
- [9] 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.