

基于变焦技术的三维微纳表面形貌测量算法研究

尹秋霞¹, 史艳琼², 卢荣胜¹

¹合肥工业大学; ²淮南联合大学

摘要: 利用变焦原理,通过控制步进电机的运动,不断改变成像 CCD 与被测物体的 z 向间距,拍摄获取一维、二维图像序列。通过比较分析各种聚焦评价和搜索算法,采用抗噪性和处理速度较好的 Tenengrad 聚焦评价函数和高斯曲线拟合搜索方法,通过空间域的像素融合得到被测物体的全景深图像。实验结果表明,采用上述算法能够较好地重现被测物体的三维结构,纵向分辨率能够满足测量精度要求。

关键词: 数字图像相关;聚焦评价函数;极值搜索算法;图像融合

中图分类号: TG806;TH124

文献标志码: A

Algorithm Study on 3D Micro-nano Surface Topography Measurement Based on Variation Focus Technology

Yin Qiuxia, Shi Yanqiong, Lu Rongsheng

Abstract: In this paper, by using the variation focus principle and controlling the movement of stepper motor to change the distance between imaging CCD and the object continuously, a sequence of two-dimensional images are obtained. By comparing various focusing evaluation functions and searching algorithm, adopting tenengrad focusing evaluation function and Gauss curve fitting search method is decided, which act better in noise immunity and processing speed. Through the fusion of pixels in the spatial domain, the panoramic image of the object is obtained. The experimental result shows that the proposed algorithm can reproduce the 3D structure of the object, and the vertical resolution can meet the measurement accuracy requirements.

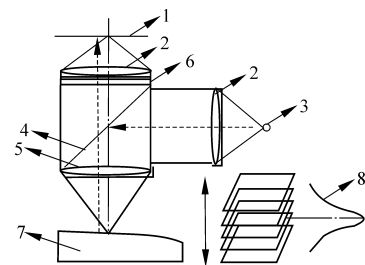
Keywords: DIC; focusing evaluation functions; extremum searching algorithm; image fusion

1 引言

目前三维微纳表面形貌测量方法有接触式和非接触式。接触式测量方法(如微型三坐标测量机和表面轮廓仪)存在机械划损和测量力变形,且不适用于结构复杂的微观物体表面测量;非接触式测量方法主要有干涉显微测量方法、扫描探针显微镜法和光学探针法。干涉显微一次可以测量一个面的表面形貌,横向分辨率在微米量级,纵向分辨率可达到纳米量级,但测量范围小;扫描探针显微镜利用被测物体和探针之间存在的微观作用工作,横向和纵向分辨率可以达到原子量级,但测量范围小;光学探针法大多对光源质量要求较高,适用范围小。

与上述方法相比,变焦测量技术是一种能够对复杂微观物体真正实现三维形貌测量的新技术,具有很高的纵向分辨率,测量精度高,测量范围广,能真实还原被测物体表面色彩。变焦测量起源于 shape from focus^[1],在 1924 年由 Von Helmholtz 提出,当时受限于计算机技术和图像处理技术的发展,近些年才在三维形貌测量领域受到关注。变焦原理

见图 1^[2]。



1. CCD 2. 成像透镜 3. 光源 4. 半透半反镜 5. 小景深物镜
6. 波片 7. 被测物体 8. 图像序列的评价函数曲线

图 1 变焦原理

该方法采用小景深的光学成像系统,每次只有被测物体的一部分准确对焦,并成像清晰。CCD 在 z 向以一定的速度移动,并以一定的采集速率对被测物体扫描成像,获取一维、二维图像序列。通过图像处理算法确定在扫描过程中物体聚焦程度的变化情况,并进一步确定物体表面各点的正焦位置和扫描高度的对应关系,即可产生一幅物体的深度图或高度图,进而实现微观物体三维形貌重构。

2 数字图像相关算法

在 z 向扫描成像过程中,如果 CCD 和成像镜头

安装不完全垂直就会引起成像 CCD 飘摆,造成成像范围内物体上同一点在 CCD 成像序列中不处于同一像素位置,即像素点的偏移。为了减小这种偏移所造成的测量误差,创造性提出在进行聚焦评价和搜索之前先对获得的图像序列进行数字图像相关处理。相关匹配问题是数字图像相关算法的关键,既可以在空域进行,也可以在频域进行,一般来说空域相关运算可以获得比频域相关运算更精确的结果。

在进行相关运算之前,预先定义一个评价前后两幅图像子区相似程度的相关函数,要求具有较强的可靠性和抗干扰性,运算量少。函数主要有积相关函数和减相关函数。通过比较各相关函数的运算时间和相似性测度值,采用归一化互相关函数^[3],即

$$S_{CC} = \frac{\sum_{i=-N}^N \sum_{j=-M}^M f(x_i, y_j) g(x'_i, y'_j)}{\bar{f} \bar{g}} \quad (1)$$

其中

$$\bar{f} = \sqrt{\sum_{i=-M}^M \sum_{j=-N}^N [f(x_i, y_j)]^2}, \bar{g} = \sqrt{\sum_{i=-M}^M \sum_{j=-N}^N [g(x'_i, y'_j)]^2}$$

通过寻找与图像子区相关函数取极大值的目标图像子区,来获取图像像素的偏移量。具体算法见图 2,程序流程见图 3。

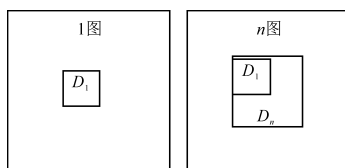


图 2 算法原理

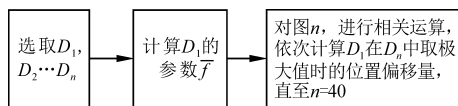


图 3 程序流程

为避免对图像序列处理过程中的累积误差产生影响,使后续的每一幅图像直接和第一幅图像进行相关运算,得出第 n 幅 ($n = 2, 3, \dots, 40$) 相对于第一幅图像的偏移量,并用数组存放以便后续处理。由于每幅图像各像素点的偏移量相同,故选取第一幅图像中 D_1 小区域为待匹配模板,取第 n 幅图像中包含 D_1 的 D_n 为待搜索区域。通过在 D_n 区域上逐像素移动 D_1 ,找到与 D_1 相关函数取极大值的小区域,从而得出 D_1 在 D_n 上的偏移量。算法处理结果显示:在横向方向上,第 1 - 14 幅不存在偏移,第 15 - 40 幅存在一个像素的偏移;在纵向方向上,第 1 - 30 幅不存在偏移,第 31 - 39 幅存在一个像素的偏移,第

40 幅存在 2 两个像素的偏移。

3 聚焦评价函数和聚焦搜索算法

物体对焦时成像清晰,具有尖锐的边缘,细节特征多且图像对比度高;而物体离焦时图像模糊,对比度低,边缘不明显,细节特征少。根据上述特点,可以构造不同的清晰度评价函数来判断成像时物体上各点是否处于正焦位置。该评价函数的好坏直接影响对焦的速度和准确度。常用的清晰度评价函数有空域评价函数、频域评价函数、信息熵评价函数、统计学评价函数和基于小波的清晰度评价函数^[5]。从算法成熟度、适用度和快速性的角度考虑,采用空域评价函数。

图 4 是分别用灰度方差函数、Brenner 函数、Roberts 函数、laplace 函数、改进的 laplace 函数、Tenengrad 函数、梯度平方函数、8 方向的 sobel 评价函数、Tenengrad 调焦评价函数对图像序列上初始坐标为 (200, 300) 的像素点进行调焦算法的结果。表 1 是上述评价函数处理一幅图像所花费的时间。由图 4 和表 1 可以看出, Tenengrad 函数峰顶宽度较窄,灵敏度高,适合小范围精确调焦,且运行速度较快。故选取 Tenengrad 函数作为本文的评价函数。

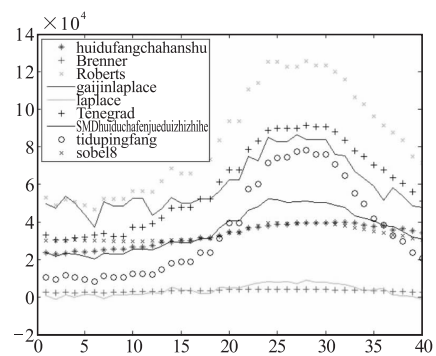


图 4 空间域调焦函数调焦结果比较

Tenengrad 梯度函数是基于 Sobel 边缘检测算子的调焦评价函数,通过 Sobel 算子与原图像卷积后得到梯度图像,该梯度图像像素的平方和即为 Tenengrad 函数值。Tenengrad 函数算法公式如式(2)、式(3)、式(4)所示,其中 T 为梯度阈值,越靠近正焦位置,物体越清晰,图像梯度越大。设置阈值 T 是为了减小噪声对调焦函数的影响。

$$G_x = f(x+1, y-1) + f(x+1, y+1) + 2f(x+1, y) - f(x-1, y-1) - f(x-1, y+1) - 2f(x-1, y) \quad (2)$$

$$G_y = f(x-1, y-1) + f(x+1, y-1) + 2f(x, y-1) - f(x-1, y+1) - f(x+1, y+1) - 2f(x, y+1) \quad (3)$$

$$Ten = \sqrt{\sum_{i=0}^M \sum_{j=0}^N (Gx^2 + Gy^2)} \quad (Ten > T) \quad (4)$$

表1 空间域调焦函数耗时比较 (s)

灰度方差	Brenner	Roberts	改进 laplace	laplace
2.433	1.092	1.158	1.155	1.059
Tenengrad	灰度差分 SMD	梯度平方	Sobel8	
1.10	1.076	1.075	6.201	

由上述 Tenengrad 算法得到每个像素在图像序列中的调焦函数值。快速准确地搜索到每个像素点在哪幅图像上最清晰是算法的关键,这实质上是关于极值的最优化问题。针对获取到的离散点对,常用的聚焦搜索方法有遍历搜索法、Fibonacci 与黄金分割法、曲线拟合、点扩散函数法和爬山搜索算法^[6]。遍历搜索法不受局部极值的影响,但是运算量大,精度取决于步距电机的步距;Fibonacci 和黄金分割法算法复杂,不具有实践意义;曲线拟合法在全局范围内拟合效果不好且耗时;爬山算法效率高,能准确找到局部极值点。通过对上述算法的分析与试验,本文提出一种结合爬山算法和曲线拟合的算法,充分结合爬山算法搜索局部极值的高效率和曲线拟合在局部的高精度优点。

爬山算法采取先大步距搜索锁定最值范围,然后再小步距进一步搜索,避免搜索到局部极值的情况。极值搜索算法的具体流程如下:

①确定搜索起点 s , 移动步长 L , 选择一个移动方向。若 $s+L$ 点的聚焦评价价值大于 s 点, 则方向正确, 继续向该方向移动; 否则, 向相反方向移动, 直至出现两次搜索到最大评价价值为同一点的情况, 则该点为初次搜索的极大值点 S' ;

②在 $[S'-L, S'+L]$ 的搜索范围内, 以 $S'-L$ 为新的起始点, l 为新的移动步长, 继续类似①的过程, 直至获得新的极值点 N' ;

③取 N' 左右 $(L+l)/2$ 的范围内各离散点及其对应的评价函数值, 使用 `fitype` 函数进行高斯曲线拟合, 并利用拟合出的高斯函数 $a \times \exp\{-[(x-b)/c]^2\}$ 中的 b 参数值作为该点取最大值时的近似插值的图像张数, 通过换算得到物体的实际高度或深度;

④对图像矩阵上的每个像素点均实施上述①、②、③算法。

4 超景深图像融合算法及分析

在获取的图像序列的每幅图像中, 被测物体只有一部分处于正焦位置, 能够清晰成像; 而采用图像

融合技术融合整理后, 可以提取各自清晰的信息综合成一幅新的图像。

常用的图像融合算法有简单的图像融合算法, 不对图像像素进行分解, 直接进行简单的像素点选择和运算; 基于塔形分解的图像融合算法, 先将融合的图像进行塔形分解, 进行融合运算后, 再进行逆塔形运算得到融合后的图像; 还有基于小波的图像融合算法, 把进行融合的图像进行多尺度图像分解, 在相应的分解层分别进行图像融合, 通过逆小波运算得到融合后的图像。本文前面已经求出了每个像素点的正焦位置, 直接提取出所有像素点的最清晰分量融合成一幅图像, 算法既简单, 融合速度又快。

试验系统硬件包括步进电机、步进电机驱动器、运动控制卡、光学镜头、黑白摄像机、图像采集卡、威海三丰光栅、光源和计算机。使用该试验系统对一元硬币上刻制的国字拍摄了 40 张图像, 拍摄时间 1s, 镜头移动 $20\mu\text{m}$ 。获取的图片尺寸 $768\text{dpi} \times 576\text{dpi}$, 图 5 为图像序列中第 1 幅和第 25 幅图。

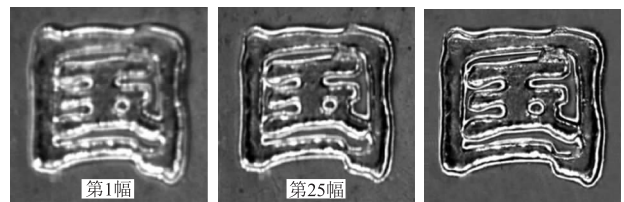


图5 图像序列

图6 全景深融合图像

为了避免硬币图像中背景的影响, 截取文字所在区域作为处理对象, 利用上述算法对图像序列进行一系列处理, 得到图 6 的全景深融合图像。通过 Meshlab 点云渲染也得到了不错的效果, 验证了算法的可行性和快速性。

5 结语

本研究还有待进一步完善。如提取的三维点中边界位置处存在一些杂乱的点, 针对该问题可以在进行算法处理前加一些滤波操作; 另外本文拍摄的是灰白图像, 可以进一步研究拍摄彩色图像, 利用色彩信息提高测量精度等。

参考文献

- [1] M S Muhammad, T S Choi. A novel method for shape from focus in microscopy using Bezier surface approximation[J]. *Microscopy Research and Technique*, 2010, 73 (2): 140 - 151.

基于贪心算法的多孔零件影像测量路径优化

阮小琪,曾志强,杜文华,王俊元

中北大学

摘要: 影像测量仪在工作时,测量顺序不同,工作台移动的路径也不相同。相同测量环境下,工作台移动路径越短,完成测量所用时间也越少。基于贪心算法对影像测量仪测量一种多孔零件时的测量路径进行优化,并与4种固定顺序的测量方案进行对比,分析了优化算法的有效性。结果表明:按行扫描和按列扫描的测量方案在某些情况下可以达到比较良好的运行效果,但不具有普遍性,按选择顺序进行测量的方案要想达到理想结果,对操作人员要求较高;贪心优化方案对测量路径的缩短效果明显,可有效减少测量时间,提高影像测量仪的测量效率。

关键词: 影像测量仪;贪心算法;路径优化;最短路径

中图分类号: TG806;TH741;TP391.41

文献标志码: A

Optimization of Image Measurement Path of Porous Parts Based on Greedy Algorithm

Ruan Xiaoqi, Zeng Zhiqiang, Du Wenhua, Wang Junyuan

Abstract: In the measurement work, the path of moving workbench for image measuring instrument is not the same in different measurement orders. In the same measurement conditions, the shorter the workbench moving path, the less time it takes to complete the measurement. The measurement path of image measuring instrument is optimized for the measurement of a porous parts that based on the greedy algorithm. Compared with four fixed-order path planning schemes, the effectiveness of the optimization algorithm is compared and analyzed. The results show that the press line scanning and press column scanning path planning in some cases can achieve good effect, but not universal. For the program in the order of selection, in order to achieve the desired results, the operator is selected to measure higher requirements. Greedy optimization scheme of measuring path to shorten the effect is very obvious, the measurement time is effectively reduced, and the measurement efficiency of the image measuring instrument is improved.

Keywords: image measuring instrument; path optimization; greedy algorithm; shortest path

1 引言

影像测量技术是通过 CCD(或 CMOS)相机与工业镜头配合,采集被测目标的图像信息,然后将图像信息转化成数字信号并传输到专用的影像测量系统中,通过影像测量系统对这些数字信号的进一步处理,获取被测目标的几何尺寸、公差等待测信息。随着工业生产自动化的发展,产品的生产效率逐渐提

高,工业应用对产品的质量要求也越来越挑剔,在保证产品测量精确的前提下,还需要尽可能地提高产品的测量速度,以进一步提高测量效率。除了测量软件本身的运行速度及算法质量外,仪器自身运动控制系统的性能也在很大程度上制约着影像测量仪的测量效率。

本文基于贪心算法在每一次运算中都会选取最优解的思想,在影像测量仪进行多孔零件二维几何量(圆心、半径)的测量过程中,对工作台的移动路径(即测量路径)进行优化,并通过与4种常规测量路径进行对比实验,分析验证了贪心算法在影像测

基金项目:山西省应用基础研究项目(201601D102025)

收稿日期:2017年11月

[2] R Danzl, F Helml, S Scherer. Focus variation-a new technology for high resolution optical 3d surface metrology: the 10th international conference of the sloveniansociety for non-destructive testing, 2009 [C]. Ljubljana, Slovenia: Application of Contemporary Non-Destructive Testing in Engineering, 2009.

[3] 陈振英. 基于数字图像相关法的应变测量研究[D]. 上海:上海交通大学, 2013.

[4] 张晶. 基于图像处理的自动调焦技术[D]. 北京:中国科

学院大学, 2016.

[5] 刘宝兴. 基于数字图像处理的自动对焦技术研究[D]. 绵阳:中国工程物理研究院, 2007.

第一作者:尹秋霞, 硕士研究生, 合肥工业大学仪器科学与光电工程学院, 230009 合肥市

First Author: Yin Qiuxia, Postgraduate, School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China