DOI: 10.3901/JME.2013.18.085

一种新颖的微机电系统微结构显微图像三维自动拼接方法*

陈晓辉¹ 刘晓军² 赵华东¹ 张军¹ 卢文龙²

(1. 郑州大学机械工程学院 郑州 450001;

2. 华中科技大学机械科学与工程学院 武汉 430074)

摘要: 提出一种基于白光垂直扫描显微镜(White-light vertical scanning interference microscopy, WVSIM)的微机电系统(Micro electro mechanical systems, MEMS)微结构三维自动拼接方法, 来获得包含完整 MEMS 信息的大视场、高分辨率的 MEMS 微结构显微图像, 以满足 MEMS 微结构功能特征分析、评定的需要。通过分析白光垂直扫描显微成像原理, 将 MEMS 微结构显微图像的三维拼接分解为 x - y 向拼接与 z 向高度校正。将二维图像配准的尺度不变特征变换特征匹配算法应用到 MEMS 微结构显微图像的三维拼接中, 实现 MEMS 微结构显微图像的智能、鲁棒三维自动拼接。试验表明, 该方法不需要超高精度的硬件, 解决了任意形状 MEMS 微结构显微图像的高精度三维自动拼接问题。横向拼接精度可达 $0.8\ \mu\text{m}$, 纵向拼接精度小于 $1\ \text{nm}$ 。

关键词: 微机电系统微结构 三维自动拼接 白光垂直扫描显微镜 尺度不变特征变换

中图分类号: TP391

Novel Method for Automatic Three-dimensional Stitching of Microscopic Images of MEMS Microstructure

CHEN Xiaohui¹ LIU Xiaojun² ZHAO Huadong¹ ZHANG Jun¹ LU Wenlong²

(1. School of Mechanical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001;

2. School of Mechanical Science and Engineering, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074)

Abstract: A novel method for automatic three-dimensional(3D) stitching of microscopic images of micro electro mechanical systems (MEMS) microstructure is proposed. After the microscopic images of MEMS microstructure are captured by white-light vertical scanning interference microscopy(WVSIM), the microscopic image of MEMS microstructure which contains complete information of MEMS microstructure with large field and high resolution is obtained by the proposed method. It could meet the demand of the analysis and evaluation of functional characteristics of MEMS microstructure. By analyzing the principle of WVSIM, the process of 3D stitching microscopic images of MEMS microstructure is decomposed to x - y stitching and height correction. Scale invariant feature transform(SIFT), which is frequently used for 2D image registration, is applied to 3D stitching of microscopic images of MEMS microstructure, so that it is smart and robust. The strict alignment is unnecessary and the problem of the automatic stitching of microscopic images of MEMS microstructure with arbitrary shape with high precision is solved by the method. The experiment result shows that the lateral accuracy could be reached $0.8\ \mu\text{m}$ and the vertical accuracy is smaller than $1\ \text{nm}$.

Key words: Micro electro mechanical systems(MEMS) microstructure Automatic three-dimensional(3D) stitching White-light vertical scanning interference microscopy(WVSIM) Scale invariant feature transform(SIFT)

0 前言

现阶段, 微机电系统(Micro electro mechanical

systems, MEMS)在航空^[1]、航天^[2]、汽车^[3]等领域中都有广阔的应用前景。MEMS 微结构^[4]功能特征(微台阶、微沟槽、微通道及表面形貌等特征)的精度是保证 MEMS 功能特性和器件互换性的基础。

目前 MEMS 微结构功能特征(如微沟槽、微台阶、微通道等)的精度主要通过工艺保证^[5]。MEMS

* 国家自然科学基金资助项目(51075169)。20121121 收到初稿, 20130325 收到修改稿

的工艺以及环境因素的微小扰动都会对 MEMS 的质量造成一定或者至关重要的影响^[6], 需要在加工工艺过程中对 MEMS 微结构进行测量与评定来保证其精度。

获得包含完整 MEMS 微结构信息的大视场、高分辨率的显微图像是 MEMS 微结构分析与评定的前提。正常条件下, 通过一次显微成像难以得到包含完整 MEMS 微结构信息的显微图像, 限制了对 MEMS 微结构功能特征的分析与评定。因此, 获得大视场、高分辨率的 MEMS 微结构显微图像对 MEMS 微结构功能特征的评定具有现实意义。

由于通过调整显微镜的放大倍数来获取较大视场必然会降低显微图像的分辨率, 因此, 目前常用拼接的方法来获得大视场、高分辨率的 MEMS 微结构显微图像。VLADIMIR 等^[7-8]提出了一种微结构显微图像的硬件拼接方法。通过利用纳米测量机(Nano-measuring machine, NMM)的高精度定位能力, 来获取微结构显微图像序列的空间位姿关系, 按照这些空间位姿关系直接完成微结构显微图像的拼接。这种方法虽然扩展了白光干涉仪的测量范围, 实现了对微结构近 4 倍于电荷耦合元件(Charge coupled device, CCD)视场的大范围测量, 但是, 对硬件精度要求过高, 不但需要昂贵的硬件成本, 而且对于 MEMS 微结构中功能特征的微小尺寸来说, 任何微小的来自于精密工作台的扰动都会带来很大的拼接误差。

在微结构显微图像的软件拼接方面, 天津大学的刘一等^[9]提出了一种基于相移显微干涉的微结构显微图像的拼接方法。通过将被测件划分成若干子区域, 分别测量得到显微图像, 而后对相邻显微图像重叠区域进行基于特征的模板匹配, 实现显微图像的对准, 最终完成拼接。但是, 该方法依赖于对明显特征的选择, 在划分子区域的时候, 需要保证重叠区域经过由明显特征的位置, 不具有通用性。在重叠区域比对的时候还需要人工介入进行明显特征的选择, 不能实现自动的拼接, 降低了拼接效率。

本文提出了一种基于白光垂直扫描显微镜的 MEMS 微结构三维自动拼接方法。将尺度不变特征变换(Scale invariant feature transform, SIFT)特征匹配算法应用到白光垂直扫描显微测量中, 实现 MEMS 微结构三维自动拼接, 从而获得包含完整微结构功能特征信息的大视场、高分辨率的微结构显微图像。该方法具有高精度、高鲁棒性, 不需要超高精度的硬件对准的特点, 解决了任意形状微结构的自动拼接问题。

1 白光垂直扫描显微测量原理

由于白光产生的两束相干光波间允许的光程差极小, 基本上在零光程差位置才会出现少量的几条干涉条纹, 干涉曲线如图 1 所示。可以看到, 干涉条纹的光强 I 在零光程差位置取极大值, 然后沿两边迅速衰减。

图1 白光相干光的干涉图

白光垂直扫描显微测量是利用白光干涉条纹的这种特殊性来进行 MEMS 微结构的测量。假设 P_1 与 P_2 为某微结构中处于不同高度的两点, P_2 比 P_1 高 H , 如图 2 所示。若在不同的高度分别对该微结构进行白光干涉检测, 则可得 P_2 的零光程差位置比 P_1 的高 H 。因此, 可根据 P_1 与 P_2 白光干涉零光程差的高度差来表征该微结构中 P_1 与 P_2 的高度差值。同样的, 若一幅扫描图像所有点都以 P_1 点做参考, 这些高度差值就构成了 MEMS 微结构的三维形貌。

图2 白光垂直扫描显微镜显微图像的测量原理

一次显微成像情况下, MEMS 微结构显微图像是整合坐标点 x - y 向坐标及其 z 向高度值而生成的。其中, x - y 向坐标是图 3 所示的图像分析系统通过定位白光干涉图中的干涉条纹极大值得到 z 向高度值是通过 z 向垂直位移工作台扫描并由 z 向垂直移

计量系统计算得到。也就是说,表征 MEMS 微结构的实际上是表征一个显微区域的数据矩阵,其中,每个 x - y 向坐标点的取值为该坐标点相对于扫描初始位置的 z 向相对高度值。

2 MEMS 微结构三维自动拼接方法

本文基于白光垂直扫描显微测量原理,将 MEMS 微结构的三维自动拼接分解为 x - y 向自动拼接与 z 向高度校正。由于包含多个区域的 MEMS 微结构显微图像序列均在同一工作台上进行,可以认为这些微结构显微图像序列间 z 向相对高度差为定值。因此, MEMS 微结构的三维自动拼接的难点在于 x - y 向自动拼接。

文献[10]提出的 SIFT 特征匹配算法是目前国内外特征匹配研究领域取得比较成功的一种算法,常用于二维的灰度图像间的匹配。它的理论基础是基于二维灰度图像极值点的确定与描述。虽然 MEMS 微结构显微图像一定程度上能够转化成灰度图像(如将其高度值看成灰度值),但是,这种灰度图像不包含能够作为特征点的极值点。这是由于通常灰度级图像是对某一场景的直接曝光的结果,包含了丰富的细节因素,因此,能够获得较多的 SIFT 特征点。而 MEMS 微结构显微图像是通过显微镜获取的表征该区域的相对高度值数据矩阵。因此, MEMS 微结构显微图像的三维特性,使得 SIFT 特征匹配算法难以直接应用其中。

为了在白光垂直扫描显微测量过程中应用 SIFT 特征匹配算法,需要相应改进白光垂直扫描显微镜硬件,其改进结构图如图 3 所示。其中,两个虚线框部分是为实现 MEMS 微结构显微图像的三维自动拼接而添加的两个模块:首先,通过驱动 x - y 向水平位移工作台模块来得到多个视场下的 MEMS 微结构显微图像序列;其次,通过抓取灰度图像模块驱动 CCD 抓取与 MEMS 微结构显微图像序列对应的灰度图像序列,灰度图像是在白光垂直扫描显微镜初始扫描位置抓取。

基于白光垂直扫描原理, MEMS 微结构三维自动拼接过程分为 6 步,流程图如图 4 所示。

(1) 得到 MEMS 显微图像序列和与之对应的灰度图像序列。通过驱动白光垂直扫描干涉显微镜中 x - y 水平位移工作台获取微结构显微图像序列以及分别在初始扫描位置驱动灰度图像抓取模块得到与之对应的灰度图像序列。

图3 白光垂直扫描显微镜改进结构图

图4 MEMS 微结构三维自动拼接流程图

(2) 计算并匹配 SIFT 特征点。计算灰度级图像序列的 SIFT 特征点并寻找相邻两幅图像的 SIFT 匹配特征点。

(3) SIFT 特征点坐标变换。虽然灰度图像与微结构显微图像在 x - y 向上对应,但是由于 CCD 上镜头放大倍数的影响使得灰度图像与微结构显微图像大小不一致。因此,必须将 SIFT 匹配特征点坐标转换到微结构显微图像坐标系中。假设灰度图像 f_h 大小为 $M_h \times N_h$, 与之对应的微结构显微图像 f_w 为 $M_w \times N_w$, 且 $P_h(x_h, y_h)$ 是 f_h 中找到的特征点, 则 f_w 中与之对应的特征点 $P_w(x_w, y_w)$ 可表示为

$$\begin{cases} x_w = x_h \left(\frac{N_w}{N_h} \right) \\ y_w = y_h \left(\frac{M_w}{M_h} \right) \end{cases} \quad (1)$$

式中, M_h 与 N_h 分别为 f_h 的高度与宽度、 M_w 与 N_w 分别为 f_w 的高度与宽度; x_w 与 y_w 分别为特征点 P_w 在微结构显微图像 f_w 中的横坐标与纵坐标。

(4) 微结构显微图像序列的 x - y 向校正。将转换

之后的特征点作为控制点计算微结构显微图像在 x - y 向的仿射变换矩阵^[11], 从而确立图像间的相对位置, 从而实现显微图像的 x - y 向校正。

(5) 微结构显微图像序列的 z 向校正。由于白光垂直扫描初始零位的变化会导致微结构显微图像特征点 z 向高度取值有所变化, 因此需要 z 向校正。校正的目的是保证微结构显微图像的特征点位置的 z 向高度值保持一致, 从而避免拼接结果存在 z 向的错位。假设 $P(x_p, y_p)$ 与 $Q(x_q, y_q)$ 为两个 MEMS 微结构显微图像中对应的特征点。其中, $P(x_p, y_p)$ 点取值为 z_p 、 $Q(x_q, y_q)$ 点取值 z_q 。则 $Q(x_q, y_q)$ 相对于 $P(x_p, y_p)$ 应校正的 z 向距离

$$z_{pq} = E_8(z_q) - E_8(z_p) \quad (2)$$

式中, $E_8(\bullet)$ 代表 8 邻域内 z 向高度值的期望, 目的是抑制噪声的影响。

假设共有 n 对特征点, 每对特征点间应校正的 z 向距离为 $z_k(k=1, 2, \dots, n)$, 又由于微结构显微图像序列均在 x - y 向水平位移工作台上获得, 可认为该图像序列在 z 向在只存在平移而没有转动。因此, 理论上 $z_k(k=1, 2, \dots, n)$ 是常量, 考虑到噪声等方面的影响, 这里取 $z_k(k=1, 2, \dots, n)$ 的期望 z_E 作为微结构显微图像整体 z 向校正的参量

$$z_E = \sum_{k=1}^n z_k / n \quad (3)$$

式中, $z_k(k=1, 2, \dots, n)$ 为第 k 个像素点应校正的 z 向距离; z_E 则是 n 个 z 向校正距离的期望值。

(6) 微结构显微图像序列在 x - y - z 向的三维拼接。综合步骤(4)、(5), 完成微结构显微图像序列在 x - y - z 向的三维拼接。

3 结果与分析

图 5 所示为驱动白光垂直扫描显微镜的 x - y 向位移工作台获取的 6 幅包含标准 MEMS 微结构不同区域的显微图像序列, 视场均为 282 像素×377 像素, 横向分辨率为 0.8 μm , 纵向分辨率为 1 nm。其中, 显微图像序列分别包含 MEMS 微结构局部区域 1(图 5a)、局部区域 2(图 5b)、局部区域 3(图 5c)、局部区域 4(图 5d)、局部区域 5(图 5e)、局部区域 6(图 5f), 且每相邻两幅微结构显微图像有一定的重合区域。

图 6 为驱动灰度抓取模块分别在扫描初始位置抓取的, 与图 5 所示 MEMS 微结构显微图像序列对应的 6 幅灰度图像序列, 大小均为 576 像素×768 像

素。它们同样包含与图 5 对应的局部区域 1(图 6a)、局部区域 2(图 6b)、局部区域 3(图 6c)、局部区域 4(图 6d)、局部区域 5(图 6e)、局部区域 6(图 6f)。

图 5 MEMS 微结构显微图像序列

图 6 与图 5 对应的灰度图像序列

为实现如图 5 所示 MEMS 微结构显微图像序列的三维自动拼接, 首先需计算如图 6 所示相邻灰度图像序列的 SIFT 特征点, 如图 7 所示。其中, 图 7a 是图 6b 与图 6a 的 SIFT 配准结果; 图 7b 是图 6c

与图 6a 的 SIFT 配准结果；图 7c 是图 6d 与图 6c 的 SIFT 配准结果；图 7d 是图 6e 与图 6c 的 SIFT 配准结果；图 7e 是图 6f 与图 6e 的 SIFT 配准结果。

(a) 图 6b 与图 6a 的 SIFT 配准结果

(b) 图 6c 与图 6a 的 SIFT 配准结果

(c) 图 6d 与图 6c 的 SIFT 配准结果

(d) 图 6e 与图 6c 的 SIFT 配准结果

(e) 图 6f 与图 6e 的 SIFT 配准结果

图 7 各相邻灰度图像的 SIFT 配准

这里，SIFT 计算与匹配过程中，高斯金字塔取

6 阶、每阶 5 层，因此获取的 DOG 有 6 阶、每阶 4 层。其中，每条黑线条的两个端点代表一对 SIFT 匹配特征点。

基于图 7 所得 SIFT 配准点，可以求得如图 5 所示 MEMS 微结构显微图像序列间的 x - y 向仿射变换矩阵，如式(4)~(8)所示

$$\mathbf{I}_A = \begin{pmatrix} 0.9995 & 0.0039 & 0 \\ -0.0001 & 1.0130 & 0 \\ 309.6068 & -5.4565 & 1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$\mathbf{I}_B = \begin{pmatrix} 1.0007 & 0.0015 & 0 \\ 0.0033 & 0.9999 & 0 \\ -4.0185 & 207.9344 & 1 \end{pmatrix} \quad (5)$$

$$\mathbf{I}_C = \begin{pmatrix} 1.0003 & -0.0054 & 0 \\ 0.0096 & 1.0012 & 0 \\ 312.0748 & -3.2719 & 1 \end{pmatrix} \quad (6)$$

$$\mathbf{I}_D = \begin{pmatrix} 1.0025 & 0.0011 & 0 \\ 0.0005 & 0.9989 & 0 \\ 1.8561 & 213.2766 & 1 \end{pmatrix} \quad (7)$$

$$\mathbf{I}_E = \begin{pmatrix} 1.0047 & 0.0043 & 0 \\ -0.0077 & 0.9998 & 0 \\ 312.3164 & 0.5235 & 1 \end{pmatrix} \quad (8)$$

式(4)所示 $\mathbf{I}_A$ 为图 6b 相对于图 6a 的 x - y 向仿射变换矩阵；式(5)所示 $\mathbf{I}_B$ 为图 6c 相对于图 6a 的 x - y 向仿射变换矩阵；式(6)所示 $\mathbf{I}_C$ 为图 6d 相对于图 6c 的 x - y 向仿射变换矩阵；式(7)所示 $\mathbf{I}_D$ 为图 6e 相对于图 6c 的 x - y 向仿射变换矩阵；式(8)所示 $\mathbf{I}_E$ 为图 6f 相对于图 6e 的 x - y 向仿射变换矩阵

各个 z 向高度校正值 z_E 如下：图 6b 相对于图 6a 为 0.108；图 6c 相对于图 6a 为 0.946；图 6d 相对于图 6c 为 0.152；图 6e 相对于图 6c 为 0.037；图 6f 相对于图 6e 为 -0.149。

结合以上数据，基于本文提出的 MEMS 微结构三维自动拼接方法，可将如图 5 所示 MEMS 微结构显微图像序列自动拼接为 MEMS 微结构显微全景图像，其视场为 690 像素×680 像素，横向分辨率为 0.8 μm ，纵向分辨率为 1 nm，如图 8 所示。

图 9 显示了 MEMS 微结构显微全景图像的精度分析。图 9a~9c 分别为 x 、 y 、 z 向精度分析图。

图8 MEMS 微结构显微全景图像

图9 全景图像的拼接精度分析

图9a为图8所示全景图像某拼接区域的 x - y 向投影,虚线代表拼接的位置。由拼接结果可得,该拼接区域宽度 b 为85像素,结合横向分辨率为 $0.8\text{ }\mu\text{m}$,可得测量的去接区域宽度 b 为 $68.0\text{ }\mu\text{m}$,与该区域标准宽度 $67.5\text{ }\mu\text{m}$ 的误差为 $0.5\text{ }\mu\text{m}$ 小于1像素,即 x 方向拼接精度小于 $0.8\text{ }\mu\text{m}$ 。

图9b为图9a所示拼接区域的 x - y 向投影的边界区域,黑色的虚线代表拼接的位置。由拼接结果可得,如图9b所示的拼接位置错位为1像素。考虑到与灰度渐变,可以认为 y 向拼接精度优于一个像素,即 $0.8\text{ }\mu\text{m}$ 。

图9c为图8所示全景图像的拼接截面图,黑色的虚线代表拼接的位置。由结果可知,拼接位置左

侧的 z 向高度值为 1.47 nm ,右侧的 z 向高度值为 1.26 nm 。 z 向(纵向)高度值跳变小于 1 nm 。

因此可得,横向拼接精度可以到达1像素的拼接精度,即为 $0.8\text{ }\mu\text{m}$;纵向拼接精度小于纵向分辨率,即小于 1 nm 。

4 结论

(1) 为保证 MEMS 微结构的制造精度,便于 MEMS 微结构的分析与评定,本文提出了一种应用于白光垂直扫描显微镜的 MEMS 微结构三维自动拼接方法。

(2) 将 SIFT 特征匹配算法应用到白光垂直扫描显微测量中,实现 MEMS 微结构三维自动拼接,从而获得包含完整微结构功能特征信息的大视场、高分辨率的微结构显微图像

(3) 试验证明,该方法不需要超高精度的硬件对准,具有较高的鲁棒性,能够实现较高的精度,解决了任意形状微结构的自动拼接问题

(4) 该方法的横向拼接精度可以到达一个像素的拼接精度,即为 $0.8\text{ }\mu\text{m}$,纵向拼接精度小于纵向分辨率,即小于 1 nm 。

参 考 文 献

- [1] 王立鼎,褚金奎,刘冲,等. 中国维纳制造研究进展[J]. 机械工程学报, 2008, 44(11): 2-12.
WANG Liding, CHU Jinkui, LIU Chong, et al. The wiener manufacturing research progress in China[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(11): 2-12.
- [2] LI Hongtao, LAI Xinmin, LI Chengfeng, et al. Development of meso-scale milling machine tool and its performance analysis[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(11): 162-167.
- [3] KRUEGER S, GRACE R. New challenges for microsystems technology in automotive applications[J]. Mstnews, 2001(1): 4-7.
- [4] SEHAQUI H, ALLAIS M, ZHOU Q, et al. Wood cellulose biocomposites with fibrous structures at micro and nanoscale[J]. Composites Science and Technology, 2011, 71(3): 382-387.
- [5] HEYL P, OLSCHESKI T, WIJNAENDTS R W. Manufacturing of 3D structures for micro-tools using laser ablation[J]. Microelectronic Engineering, 2001(57-58): 775-780.
- [6] LUND M D, PIAZOLO S, HARLEY S L. Ultrahigh

- temperature deformation microstructures in felsic granulites of the napier complex, antarctica[J]. Tectonophysics, 2006, 427(1-4): 133-151.
- [7] 郭彤, 袁方, 高顺民, 等. 基于白光干涉无重叠拼接的微结构表征方法[J]. 光电子·激光, 2010, 21(7): 1048-1052.
- GUO Tong, YUAN Fang, GAO Shunmin, et al. Micro-structures characterization by non-overlapping image stitching of white-light interference[J]. Journal of Optoelectronics-Laser, 2010, 21(7): 1048-1052.
- [8] 郭彤, 傅星, 陈津平, 等. 利用纳米测量机实现大范围的计量型原子力显微镜[J]. 计量学报, 2005, 26(1): 1-4.
- GUO Tong, FU Xing, CHEN Jinping, et al. Realization of a large range metrological AFM using NMM[J]. Acta Metrologica Sinica, 2005, 26(1): 1-4.
- [9] 刘一, 胡晓东, 邓淑娟, 等. 基于图像拼接的微表面三维测试系统的开发[J]. 电子测量技术, 2008, 31(9): 100-102.
- LIU Yi, HU Xiaodong, DENG Shujuan, et al. 3D system for surface topography measurement based on image mosaic[J]. Electronic Measurement Technology, 2008, 31(9): 100-102.
- [10] LOWE D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints[J]. International Journal of Computer Vision, 2004, 60(2): 91-110.
- [11] GONZALEZ R C, WOODS R E. 数字图像处理 (MATLAB 版)[M]. 北京: 电子工业出版社, 2007.
- GONZALEZ R C, WOODS R E. Digital image processing using MATLAB[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2007.
-
- 作者简介: 陈晓辉, 男, 1984 年出生, 博士, 讲师。主要研究方向为机器视觉与图像处理。
- E-mail: ahuihust@163.com
- 刘晓军(通信作者), 男, 1968 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为测试技术及仪器。
- E-mail: mexjl@hust.edu.cn