

文章编号 1004-924X(2018)05-1275-11

基于多图像融合的 MEMS 显微三维形貌重构

丁 汛^{1,2*}, 赵跃进¹, 丁玉奎³

(1. 北京理工大学 光电学院 精密光电测试仪器及技术北京市重点实验室, 北京 100081;

2. 北京圣非凡电子系统技术开发有限公司, 北京 102200;

3. 陆军工程大学 石家庄校区, 河北 石家庄 050003)

摘要:针对微型机电系统(MEMS)的三维测量,显微镜或光学轮廓干涉仪等传统方法存在显微测量精度低、设备成本高等问题,且当结构含有较多断裂面时,解包裹算法效果欠佳。本文提出一种基于多图像融合的 MEMS 显微三维测量方法。不同于多角度显微三维测量方法,本研究首先利用单目显微镜,通过单一轴向移动获取一系列测量目标深度信息的单一角度图像,并利用去雾算法对图像进行预处理,实现了去噪和有效信息提取的目的;然后通过聚焦测度算法获取待测对象的深度信息;最后利用数据处理软件进行三维拟合。基于上述原理,本文以焦平面阵列(FPA)作为待测目标进行了测量实验。本文提出的三维测量方法和图像处理算法可获得更准确的 FPA 形貌,可清晰显示反射面与支腿部分及反射面上的释放孔,测得 FPA 的支腿长度为 $110.6 \mu\text{m}$,每个反射面的像元尺寸为 $120.8 \mu\text{m} \times 70.8 \mu\text{m}$,与设计值基本吻合,解决了断裂面难以测量的问题,同时降低了微结构测量的难度和成本。单目显微镜单向移动的多图像融合测量技术对 MEMS 的三维形貌测量具有重要意义,去雾算法在图像融合与三维测量的图像处理也有很好的应用价值。

关键词:微机电系统(MEMS);三维形貌测量;显微镜;聚焦测度;去雾算法

中图分类号:TP391.41;TH742 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20182605.1275

Three-dimensional microscopic reconstruction of MEMS based on multi image fusion

DING Xun^{1,2*}, ZHAO Yue-jin¹, DING Yu-kui³

(1. *Beijing Key Laboratory for Precision Optoelectronic Measurement Instrument and Technology, School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;*

2. *Beijing Shengfeifan Electronic System Technology Development Co., Ltd., Beijing 102200, China;*

3. *The Army Engineering University of PLA, Shijiazhuang 050003, China*)

* *Corresponding author, E-mail: bxjxxdx@163.com*

Abstract: In order to realize the three-dimensional measurement of micro electro-mechanical systems (MEMS), it is usually necessary to use a microscope or an optical profilometer. However, the traditional method has problems such as low precision and high cost of detection equipment, and it cannot achieve good results for a MEMS structure with many fracture surfaces. A new method for 3D measurement and image processing was presented in this paper. Unlike the three-dimensional

收稿日期:2017-09-11;修订日期:2017-11-10.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61301190, No. 61377109, No. 61475018)

reconstruction measurement method of multi-angle microscopes, this study firstly used a monocular microscope to obtain a series of single point measurements of the target, thus acquiring the depth information through single axial images. Then, a defogging algorithm was adopted for image preprocessing, denoising, and achieving effective information extraction. Subsequently, the depth information of the object to be tested was obtained using a focus measure algorithm. Finally, 3D fitting was performed using the data processing software. Based on the above principle, the focal plane array (FPA) was taken as the target to be measured. The experimental results show that the proposed 3D reconstruction method and image processing algorithm can obtain a more accurate FPA morphology, and can clearly show the release hole reflecting surface and the leg part on the reflector. The leg length of the FPA is measured to be $110.6 \mu\text{m}$, and the pixel size of each reflector is about $120.8 \mu\text{m} \times 70.8 \mu\text{m}$, which is consistent with the design value. It solves the problem of measuring the fracture surface, and reduces the difficulty and cost of microstructure measurement. The multi-directional image-fusion measurement technology using a monocular microscope is of great significance for MEMS 3D profile measurement. The defogging algorithm has significant application value in image fusion and 3D measurement image processing.

Key words: Micro-electro-mechanical Systems (MEMS); 3D measurement; microscope; focus measurement; haze removal algorithm

1 引 言

物体表面的三维测量是现代测试技术的一个重要分支,随着现代科学技术的发展和现代制造业的进步,人们对物体表面的三维测量提出了越来越高的要求^[1]。二十多年来,随着光电技术、计算机、计算机视觉以及图像处理等高新技术的发展,三维曲面测量技术发展迅速,并在人体测量及医学诊断、生产过程检测及质量控制、交通监视及航空管理、运动分析、三维物体测量及三维重构以及复合材料变形等方面都得到了初步应用^[1-4]。

目前的材料检测技术大多采用显微镜进行检测^[5-6]。然而,由于物体表面结构的凹凸不平以及显微镜的景深限制,得到的图像存在局部离焦的情况,在观测较大视场时还需要对局部离焦部分进行测量。在解决上述问题时,通常依靠操作者主观测量模糊的局部,这大大增加了操作者的检测难度,并且难以避免地产生一定的人为误差,因而测量结果无法满足较高的测量精度要求^[6]。

一般显微镜采集得到的是二维散焦图片,因此当显微目标是三维复杂表面时,一般的显微镜则不足以达到观测要求^[5-6]。特别是一些具有断

裂面的复杂表面,干涉技术依然具有一定的局限性。而复杂表面的三维测量在逆向工程、计算机视觉、虚拟现实等领域具有重要的应用,该技术要求必须对工件表面做平整处理或多次调解显微镜高度,才能达到对工件表面的完整认识^[7-8]。为了重构三维物体的表面形状,必须事先得到物体表面的深度图像数据^[9-11]。其中,生物医学及材料科学领域显微镜不仅要具有切片级或体速级重建的功能,而且在更多情况下只能对显微目标进行无损分析,也就是说要在保证显微目标完好的情况下精确地重现显微样本的三维轮廓结构^[5-6]。而随着计算机和大容量信息快速处理技术的发展,显微物体二维图像的三维化在技术上成为可能。

然而,直接通过显微镜获取的二维散焦图像通常具有一定强度的噪声和干扰信息。为了降低图像噪声,增加可用信息,同时为后续的特征提取和图像配准提供优质的图像源,进一步实现三维测量,需要对显微散焦图像进行必要的图像预处理,如深度提取^[12-14]。

目前,常见的图像预处理过程如下:首先利用平滑滤波,如中值滤波、均值滤波等,去除二维图像中的部分噪声;然后进行非线性锐化滤波,如使

用拉普拉斯非线性微分滤波器,对图像的有用信息进行增强和边缘提取;最后再对图像直方图拉伸进行整体增强^[3,14]。然而,在对微悬臂梁式红外焦平面阵列(Focal Plane Arrays,FPA)进行三维重构时,这些方法存在的噪声无法完全滤除,后期三维重构时这些噪声会导致大量三维图形的凸起和峰值。

本文选用8释放孔玻璃衬底无超材料的微悬臂梁式红外FPA作为待测对象,实现了一种基于单目显微镜多图像融合的MEMS结构的显微三维测量技术。同时将去雾算法作为一种图像预处理手段,优化了FPA图像预处理的效果。

2 基于多图像融合的显微三维测量原理

由于显微视觉系统与宏观视觉系统硬件环境的差异,显微图像与宏观图像之间有着显著的区别。微观物体经显微镜放大后,由CCD图像传感器进行采集,再经过图像采集卡转化成数字信号输入计算机,并显示给终端用户,获得最终所要处理的显微图像。

由于显微镜景深有限,无法通过一幅图像得到完整清晰的物体表面信息,所以通过物体在Z轴的移动,显微镜对物体表面进行逐层扫描,得到显微序列图像,同时也得到每幅图像初步的Z轴值,然后提取出序列图像中每幅图像中的清晰区域,对每幅图像的清晰部分进行聚焦测度计算。

2.1 原理

在基于多图像融合的显微三维测量原理中,首先通过调整三维测量系统中显微镜的Z轴位置,以 Δd 为高度间隔,使用CCD图像传感器从顶部到底部对被测物体(FPA)进行图像采集,依次获取显微样本的多张序列图像,使整个序列图像覆盖物体在显微镜中全部的Z轴方向信息。为获取全部的Z轴方向信息,可适当增加移动高度的范围,即从高于顶部清晰处开始采集图像,直至低于底部清晰处采集完毕。每幅序列图像有聚

焦清晰区域和聚焦模糊区域,如图1所示。其中图1(a)为对FPA反射面部分聚焦,图1(b)为对支腿部分聚焦。

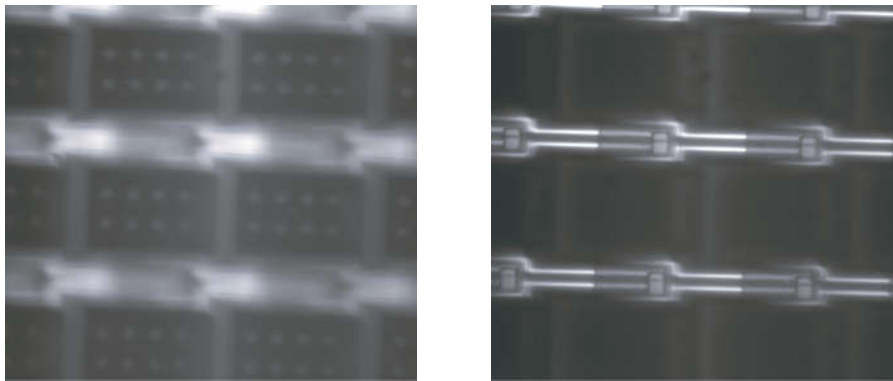
然后,在序列图像中通过聚焦测度算法获取每一个像素对应的聚焦清晰位置。本研究选用基于灰度方差的聚焦测度算法。由于方差反映了图像灰度相对于灰度平均值的离散情况,在某种程度上,方差也可以用来评价图像的反差。方差较大时,则图像灰度级分布分散,图像的反差大,可以看出更多的信息;若方差较小,则图像的反差小,对比度小,色调单一均匀,无法反映足够的图像信息。这种方法的计算量小,而且由于是直接选取清晰图像块进行融合,融合效果较好^[15-16]。简单地说,就是在一幅图像中,聚焦清晰的部位灰度方差值高,聚焦模糊的部位灰度方差值低,灰度方差的计算公式为:

$$D = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (Z(x_i, y_j) - \bar{z})^2 / (M \times N), \quad (1)$$

式中: $M \times N$ 为图像分块大小, $Z(x_i, y_j)$ 为每个像素点的灰度值, \bar{z} 为图像块的灰度平均值。

通过公式(1)可以获得某个聚焦清晰的部位位于整个序列图像中的层数信息,由于每层序列图像的高度差为 Δd ,即获得了此部位的Z轴高度,也就是深度信息。例如:在81幅序列图像中,通过聚焦测度算法获得的第21幅图为FPA支腿顶部聚焦清晰的图像,那么FPA支腿顶部的高度值就为 $(21-1) \times \Delta d \times l$,其中 l 为显微镜在Z轴方向的最小移动精度。

最后,将聚焦测度算法的计算结果存入一个三维矩阵。矩阵的第一、二维为每幅图像像素点的位置,第三维为其所在的序列高度,也就是层数。利用大小比较法挑选出每个三维高度值所对应的其第一、二维中图像像素点的聚焦清晰位置,并排除其余不清晰部位的图像像素点所在的三维高度值。通过上述原理和步骤,即可获得整个FPA的三维结构信息。图2为序列图像融合原理。



(a)对 FPA 反射面部分聚焦
(a)Partial focus on FPA reflector
(b)对 FPA 支腿部分聚焦
(b)Partial focus on FPA leg

图 1 显微镜聚焦图像

Fig. 1 Microscope focus images

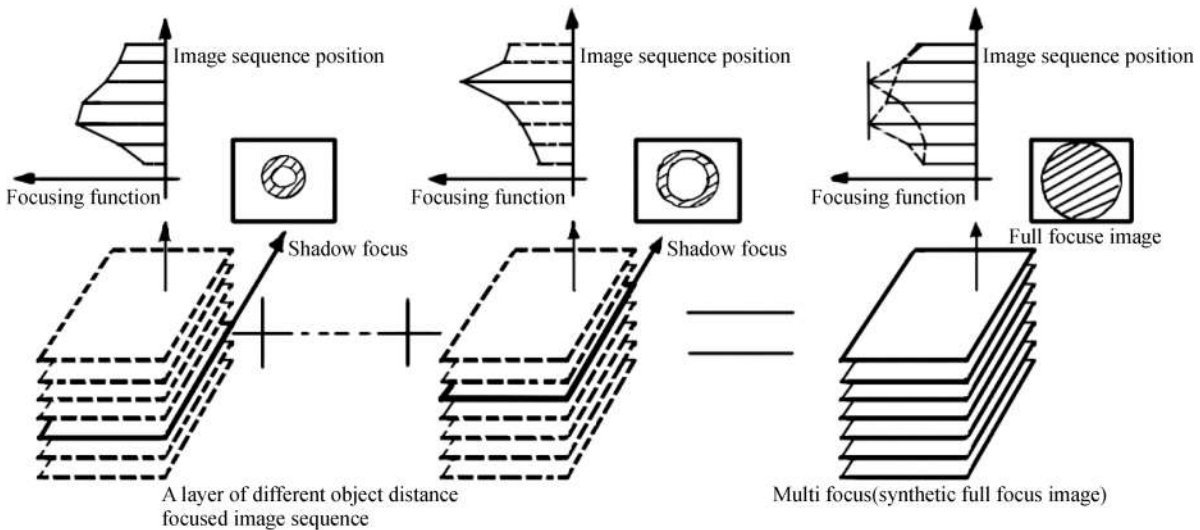


图 2 序列图像融合原理图

Fig. 2 Principle of sequence image fusion

2.2 实验系统与实验流程

本实验系统主要包含三部分:前端用于采集序列图像的光学显微镜;中部用于将光学图像转换为像素数据的 CCD 以及后端用于进行图像预处理;深度提取和三维拟合的计算机。图 3 为实验系统所对应的流程框图。



图 3 序列图像融合实验系统流程

Fig. 3 Flow chart of sequence image fusion experimental system

2.3 优势

目前,国内外使用的双目、多目三维测量较多,单目显微镜进行多角度图像获取的测量方法也得到了发展。例如市面上已有的利用多幅目镜采集到的聚焦图像进行三维融合的立体显微镜,其设计原理也是基于双目或多目立体视觉。但是,单目显微镜从单一方向进行图像获取、再根据聚焦测度进行三维测量的技术仍然不够成熟。

国内外多数关于显微测量的研究是在原有的微操作系统的基础上来增加视觉反馈环节,以实现自动化和实时控制的目的。但当仅需要测量 MEMS 三维重构的结构外观时,则并不需要太高的实时性操作,因此本文提出的序列图像融合技术使测量难度和成本大为降低。

显微镜最突出的特点是视觉景深短,因此所获取图像的一些部位会离焦。本研究利用显微镜的这一特点,并且景深越短,获取序列图像的数目越多,经过聚焦测度算法的计算后,MEMS 结构外观的重构效果越好。

3 去雾算法在显微图像预处理阶段的应用

3.1 基于暗通道先验理论的去雾算法

在绝大多数非天空的局部区域里,某一些像素所在的 RGB 三色通道中,总会有至少一个颜色通

道具有很低的值,甚至会接近于零。而相应地,这个区域的光强度最小值也是一个接近于零的值^[17]。

这里将这一现象定义为暗通道。对于一个任意的输入图像 J ,其暗通道 J^{dark} 可以用下式表达:

$$J^{\text{dark}}(x) = \min_{y \in \Omega(x)} \left(\min_{c \in \{r, g, b\}} J^c(y) \right), \quad (2)$$

其中: J^c 表示彩色 RGB 图像 J 的每一个通道, $\Omega(x)$ 表示以像素 x 为中心的一个窗口。

图 4(b)和图 4(c)分别为 He 给出的对 RGB 三通道图像求最小值以及对以像素 x 为中心的窗口求最小值的图像。需要特别指出的是,这两个最小值的计算是可以相互交换的。



(a)原始图
(a)Original image



(b)对 RGB 三通道图像求最小值
(b)Minimum value of image of RGB three channels



(c)对以像素 x 为中心的窗口求最小值
(c)For pixel x as center of window to find minimum value

图 4 暗通道计算图像

Fig. 4 Calculation of a dark channel

基于上述定义可以得到暗通道先验的概念,即^[18]:

$$J^{\text{dark}}(x) \rightarrow 0. \quad (3)$$

首先,在计算机视觉和计算机图形中,被广泛使用的雾图形成模型表示为^[19]:

$$\mathbf{I}(x) = \mathbf{J}(x)t(x) + A(1-t(x)), \quad (4)$$

其中: $\mathbf{I}(x)$ 是已经获得的图像,即待去雾图像,在本研究中表示的是 CCD 通过显微镜所采集到的 FPA 的原始二维序列图像; $\mathbf{J}(x)$ 是恢复得到的无雾图像,即图像预处理完成后用于图像配准和深度提取的二维序列图像; A 是全球大气光成分; $t(x)$ 为透射率。现在已知 $\mathbf{I}(x)$, 要求目标值 $\mathbf{J}(x)$, 显然,这是一个有多解的方程,因此,需要进行一些先验。

假设大气光成分 A 已知,透射率 $t(x)$ 在一个特定的窗口 $\Omega(x)$ 内是常数,定义它为 $\tilde{t}(x)$ 。通过暗通道计算和简单推导,可得到透射率 \tilde{t} 的估计值:

$$\tilde{t}(x) = 1 - \min_{y \in \Omega(x)} \left[\min_c \frac{I^c(x)}{A^c} \right]. \quad (5)$$

实际上,即使是在晴天白云时,空气中也存在一些颗粒,因此,看远处的物体还是能感受到雾的影响。更重要的是,雾的存在是人类探索景深的一种基本线索,这种现象被称为空中透视^[17]。如果彻底清除这些雾,图像看上去将会不自然,更严重会失去景深感。所以,有必要在式(8)中引入一个 $[0,1]$ 之间的因子 ω :

$$\tilde{t}(x) = 1 - \omega \min_{y \in \Omega(x)} \left[\min_c \frac{I^c(x)}{A^c} \right]. \quad (6)$$

在 He 的论文中,测试结果均基于 $\omega = 0.95$ 。

上述推论中都是假设全球大气光成分 A 是已知的,实际上,可以借助于暗通道图来直接获取 A 值。具体步骤如下:

(1) 从暗通道图中按照亮度的大小取前 0.1% 的像素。

(2) 在这些像素的位置中,在原始有雾图像 \mathbf{I} 中寻找对应的具有最高亮度的点的值,即为 A 值。

这时, t 和 A 均已获得,就可以进行无雾图像的恢复了。由式(4)可知, $\mathbf{J} = (\mathbf{I} - A)/t + A$, \mathbf{I} , t , A 均已得到。

当透射率 t 很小时,会导致 J 偏大,从而使得图像整体向白场过度,因此一般可设置一阈值 t_0 ,当 t 值小于 t_0 时,令 $t=t_0$,文中 t_0 均设为 0.1。

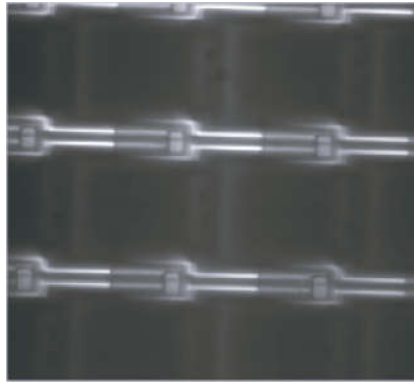
最终恢复得到的无雾图像公式如下:

$$J(x) = \frac{I(x) - A}{\max(t(x), t_0)} + A. \quad (7)$$

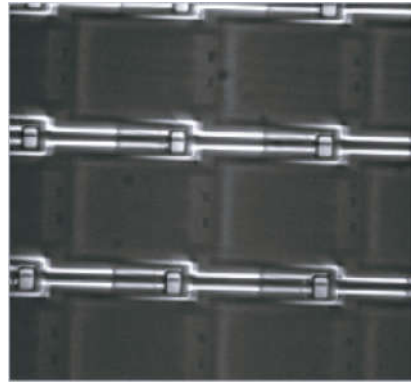
3.2 显微散焦图像与含雾图像的比较

根据第 3.1 节中基于暗通道先验的去雾算法

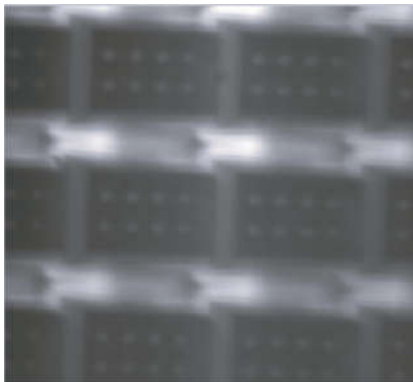
基本理论,来改善对显微散焦图像进行预处理的效果。图 5 为基于去雾算法对 FPA 的显微散焦图像进行预处理的结果,其中图 5(a)、5(b)分别为对 FPA 的支腿部分聚焦的原始图与预处理后的图像,图 5(c)、5(d)分别为对 FPA 的反射面部分聚焦的原始图与预处理后的图像。尤为明显地,对支腿部分聚焦的预处理图像中,原本图像中没有显露出来的释放孔在处理过后显露了出来。



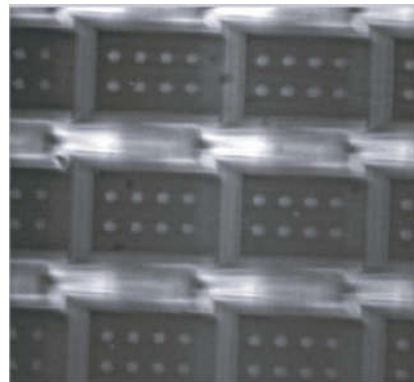
(a)对支腿部分聚焦的原始图
(a)Original image of leg part



(b)对支腿部分聚焦的预处理图
(b)Preprocessing image of partial focus on leg part



(c)对反射面部分聚焦的原始图
(c)Original image of reflection part



(d)对反射面部分聚焦的预处理图
(d)Preprocessing image of partial focus on reflection part

图 5 基于去雾算法的 FPA 显微散焦图像预处理

Fig. 5 Preprocessing of FPA micro images based on haze removal algorithm

这里需要指出的是,上述去雾算法虽然是基于 RGB 三色通道中求出的暗通道,但在阴影部位足够多时,同样可以用来处理灰度图像。这里只需忽略公式推导过程中的运算符 \min 即可^[17],在此不再进一步赘述。

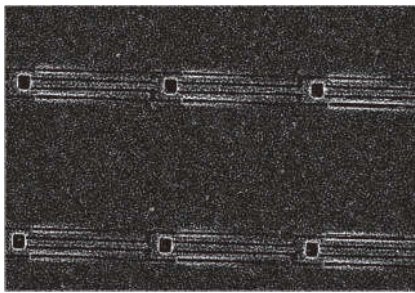
产生这一效果是因为 FPA 本身是一个具有深度距离的 MEMS,而经过显微镜的放大作用以及显微镜光源的光照,使实际 CCD 采集到的图像具有较长的隐含深度距离,能够模拟出实际应用中利用相机所拍摄的远景图片。可见显微镜的散焦效应模型与含雾图像模型具有一定的相似之处。

3.3 去雾算法与原有算法对显微散焦图像预处理的结果对比

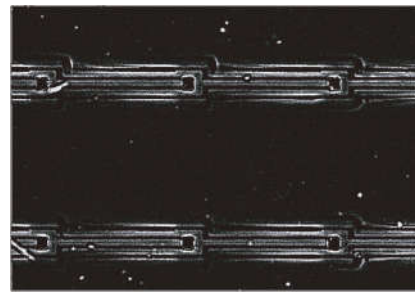
图 6 为使用拉普拉斯锐化与使用去雾算法对玻璃衬底的 FPA 进行预处理的效果对比图。为突出对比效果,实验采用了将超材料作为玻璃衬底的 FPA。图 6(a)、6(b)分别为对支腿部分聚焦的拉普拉斯锐化与去雾算法的结果,图 6(c)、6(d)分别为对反射面部分聚焦的拉普拉斯锐化与去雾算法的结果。从图中所示结果可以看出,由于本对比实验所采用的 FPA 样本含有超材料,超材料的影响在中值滤波中并未很好的消除,并

且在拉普拉斯锐化过程中更加明显,使图像预处理后的噪声比采集到的原有图像更多;而使用本文所提到的去雾算法,很好地避免了超材料对图像预处理后结果的影响,有用信息更加清晰。尤其从图 6(c)、6(d)中可以看出,传统图像预处理算法所得的结果图几乎已经被超材料引起的噪声

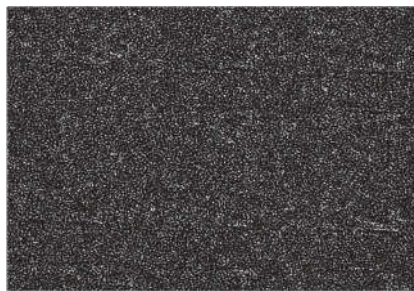
所占满,几乎看不到任何有用信息;而去雾算法的图像预处理结果中,不仅能看到 FPA 反射面的轮廓,甚至能看到反射面上部分释放孔,以及未被噪声所影响的超材料。因此,本文采用的去雾算法在去噪和提取有效信息方面都得到了较好的预处理效果。



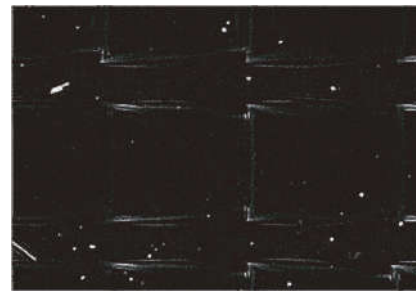
(a)对支腿部分聚焦的拉普拉斯锐化效果
(a)Laplace sharpening effect of image focused on leg part



(b)对支腿部分聚焦的去雾算法效果
(b)Defogging effect of image focused on leg part



(c)对反射面部分聚焦的拉普拉斯锐化效果
(c)Laplace sharpening effect of image focused on reflection part



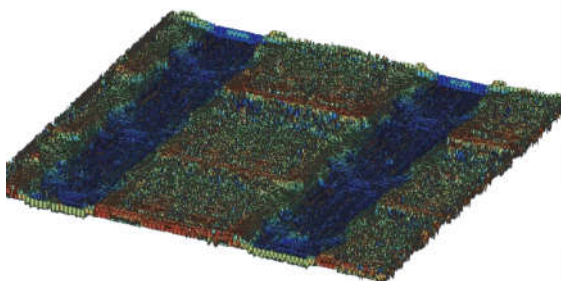
(d)对反射面部分聚焦的去雾算法效果
(d)Defogging effect of image focused on reflection part

图 6 基于拉普拉斯锐化与去雾算法的 FPA 显微散焦图像预处理对比图

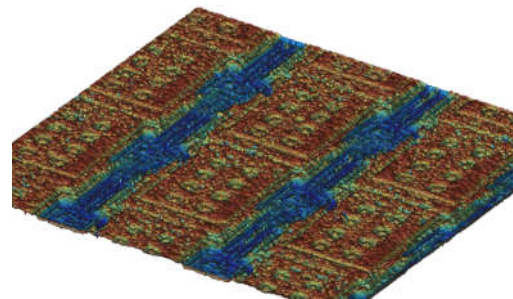
Fig. 6 Comparison of preprocessing of FPA microscopic defocus images based on different methods

图 7(a)为拉普拉斯锐化预处理后图像的三维合成效果图,图 7(b)为去雾算法预处理后图像的三维合成效果图。

通过比较可以看出,图 7(b)的信噪比明显低于图 7(a),且图 7(b)可以看到 FPA 反射面上的一些释放孔痕迹。



(a)拉普拉斯锐化的三维合成效果
(a)Three dimensional effect of Laplace sharpening



(b)去雾算法的三维合成效果
(b)Three dimensional effect of defogging algorithm

图 7 不同预处理方法进行三维合成后的效果图

Fig. 7 Effect of different preprocessing methods on 3D synthesis

3.4 雾图像模型与散焦图像模型的数学模型比较

本文通过建立数学模型对图 6 或图 7 中所示的显著差异进行理论分析。首先对含雾图像模型与散焦图像模型进行对比。在散焦成像的过程中,世界坐标内的物体可视为呈二维分布的许多点光源。通过成像系统,物体的最终成像由分布在空间的点扩散光斑叠加而成,因此成像系统可近似描述为一个线性移不变系统^[20]。

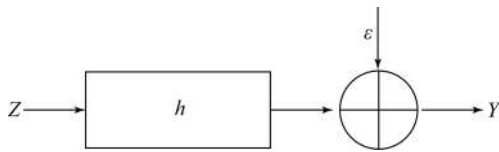


图 8 散焦模糊图像退化模型

Fig. 8 Degradation model of defocus blurred image

图 8 给出了散焦模糊图像的退化模型。将该退化模型描述为如下数学形式:

$$Y = h * Z + \epsilon, \quad (8)$$

式中: Y 为模糊图像, h 为成像系统的 PSF, $*$ 表示卷积运算, Z 为理想的清晰图像, ϵ 为加性观测噪

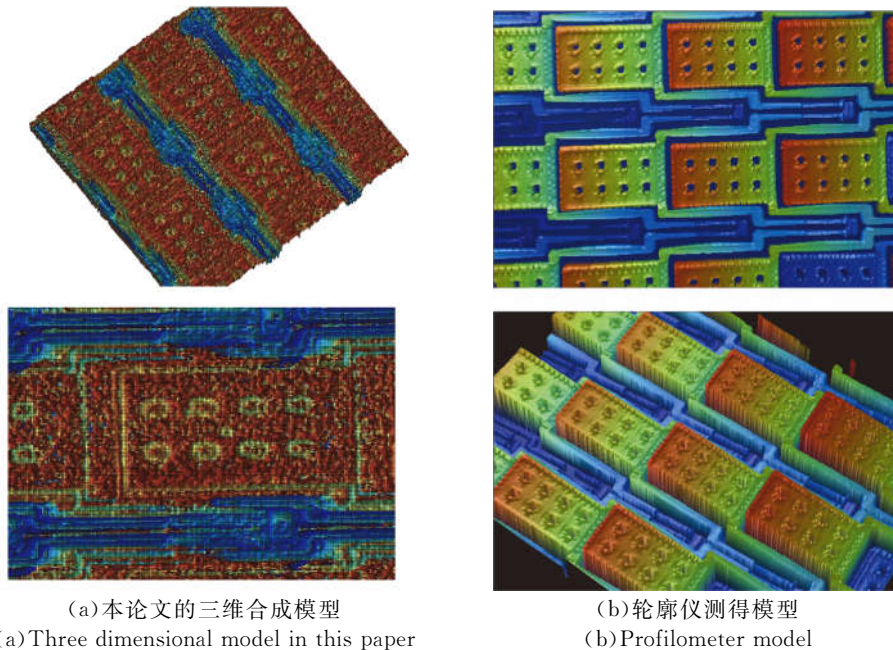
声。不难看出式(8)与式(4)的含雾图像模型具有相似的数学模型结构,其原因在于散焦图像是由分布在空间的点扩散光斑叠加而成,而含雾图像同样是由分布在空间的雾液滴或颗粒叠加形成。

4 FPA 结构的显微三维测量结果与分析

4.1 FPA 结构的显微三维测量结果

图 9 为 FPA 的三维结构展示。其中,图 9(a)为使用本论文提出的基于多图像融合的显微三维测量方法获得的三维模型,图 9(b)为通过干涉轮廓仪获得的 FPA 三维结构模型,均为 8 释放孔无超材料玻璃衬底的微悬臂梁式红外焦平面阵列。

从图 9 可以看出,与轮廓仪获得的三维结构效果相比,单显微镜多图像融合原理和去雾图像处理算法在进行微结构三维测量方面具有可行性和准确性。然而,该方法在信噪比方面还存在一定的差距,考虑可能是反射表面的颜色不同或反射表面粗糙导致的。



(a) 本论文的三维合成模型
(a) Three dimensional model in this paper

(b) 轮廓仪测得模型
(b) Profilometer model

图 9 FPA 的三维结构

Fig. 9 3D structure of FPA

4.2 测量结果与设计值的对比分析

图 10 和表 1 为 8 释放孔玻璃衬底 FPA 的设计值参数,其像素为 256 pixel×256 pixel,每个反射面的像元尺寸为 100 μm×60 μm,支腿长度为100 μm,宽度为 4 μm。通过本方法换算显微镜焦距值、CCD 像素尺寸以及显微镜与被测面的距离,所得长度信息作为三维拟合重构后的三维标尺,读取标尺刻度得到 FPA 的支腿长度为110.6 μm,每个反射面的像元尺寸为 120.8 μm×70.8 μm。由此可见,本显微三维测量方法得到的结果与设计值基本吻合。

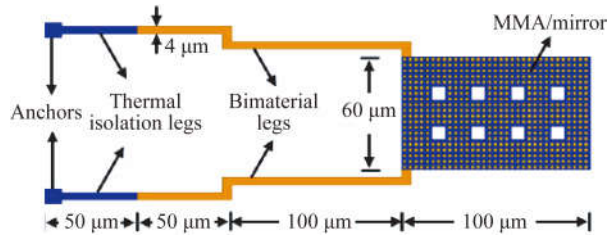


图 10 FPA 的参数设计值
Fig. 10 Design parameters of FPA

表 1 FPA 的参数设计值

Tab. 1 Parameters of FPA

(μm)

Pixel size	MMA/mirror size	Leg length	Leg width	SiN _x film thickness	Al film thickness	Au mirror thickness	Au resonator thickness
256×256	100×60	100	4	0.5	0.3	0.05	0.05

5 结 论

本文介绍了一种基于多图像融合的 MEMS 结构的三维测量方法。相比于干涉或其他非干涉测量方法,具有测量断裂面显著、测量方法简单、成本低等优势。本文以 8 释放孔无超材料玻璃衬底的微悬臂梁式红外 FPA 为测量目标,进行显微三维测量方法的设计与分析,测得 FPA 的支腿长度为 110.6 μm,每个反射面的像元尺寸为 120.8 μm×70.8 μm,与设计值基本吻合。该方法主要包括序列图像的采集、预处理、基于聚焦测度的深度信息提取以及三维重构等步骤。同时,在图像预处理过程中利用基于暗通道先验理论的去雾算法对显微镜所采集到的序列图像进行预处理,分析并证明了该算法相比于原有的图像去噪、滤波等预处理方法具有更明显的优势。由于使用去雾算法不需要均

值滤波、锐化增强等步骤,因此不仅减少了锐化过程中可能引入的噪声,同时也提高了整个程序的运行速度。实验结果表明,显微镜平移次数越多,被测目标的高度分辨率越高,三维重构精度越高。因此,进一步提高基于多图像融合的三维测量方法精度的手段是使用高精度的平移机构,如电动平移台进行程序移步控制,从而进行量级更小的平移采样。同时,提高显微镜的放大倍率,降低显微镜的景深长度,使采集到的一幅图像中含有更少的清晰信息和更多的模糊部分,以此来增加三维拟合过程中所使用的序列图像样本,从而达到提高精度的目的。

综上,利用单目显微镜的单方向移动进行多图像融合的三维测量,对 MEMS 等微型机电结构的三维形貌测量有着实际的研究意义;利用去雾算法进行图像融合和三维重构部分图像的预处理也具有显著的应用价值。

参考文献:

[1] 张爱华, 李金平, 林冬梅. 基于视觉测量的脉搏图像三维重构 [J]. 数据采集与处理, 2012, 27(5): 570-575.
ZHANG A H, LI J P, LIN D M. 3D Reconstruction of pulse image based on visual measurement [J]. *Journal of Data Acquisition & Processing*,

2012, 27(5):570-575. (in Chinese)
[2] 郭俊锋, 刘鹏, 焦国华, 等. 三维测量工业内窥镜的双目光学系统 [J]. 光学精密工程, 2014, 22(9):2337-2344.
GUO J F, LIU P, JIAO G H, et al.. Binocular optical system of industrial endoscope for three-dimensional measurement [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(9):2337-2344. (in Chinese)

- [3] 薛婷, 阮维鹏, 张少杰. 基于激光扫描的密集泡状流三维重建与优化 [J]. *光学精密工程*, 2017, 25(3):555-561.
XUE T, RUAN W P, ZHANG SH J. 3D reconstruction and optimization of dense bubbly flow based on laser scanning [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(3):555-561. (in Chinese)
- [4] 史金龙, 钱强, 庞林斌, 等. 大尺度钢板的三维测量和拼接 [J]. *光学精密工程*, 2014, 22(5):1165-1170.
SHI J L, QIAN Q, PANG L B, *et al.*. Three-dimensional measurement and registration for large scale plates [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(5):1165-1170. (in Chinese)
- [5] 陈国波. 基于散焦显微图像的三维重构方法研究 [D]. 杭州:浙江工业大学, 2007.
CHEN G B. *Reserch of Defouces Microscopy Image 3-D Surface Reconstruction* [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2007. (in Chinese)
- [6] 董鹤. 基于序列二维 ISAR 图像的目标三维重构方法的研究 [D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2011.
DONG H. *Three-dimensional Reconstruction Technique Based on 2-dimensional ISAR Image Sequence* [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011. (in Chinese)
- [7] 乌秀春. 反求工程中基于图像灰度信息的三维曲面重构研究 [D]. 大连:大连理工大学, 2002.
WU X CH. *Study on 3D Surface Reconstruction Based on 2D Gray Image in Reverse Engineering* [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2002. (in Chinese)
- [8] 郭东明, 乌秀春, 王小明, 等. 反求工程中基于图像灰度信息的三维曲面重构 [J]. *机械工程学报*, 2003, 39(1):47-50.
GUO D M, WU X CH, WANG X M *et al.*. 3D surface reconstruction based on gray image in reverse engineering [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2003, 39(1):47-50. (in Chinese)
- [9] 毛小俊. 单目多视角显微三维重建关键技术研究 [D]. 杭州:浙江工业大学, 2015.
MAO X J. *Multi-view 3D Reconstruction using Monocular Microscopic Images* [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2015. (in Chinese)
- [10] 林陶. 基于平移和旋转的单目视觉三维重建 [D]. 杭州:浙江工业大学, 2009.
LIN T. *3D Reconstruction of Monocular Vision Based on Translation and Rotation* [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2009. (in Chinese)
- [11] 王跃宗. SLM 显微立体视觉量化和三维数据重构研究 [D]. 大连:大连理工大学, 2003.
WANG Y Z. *Study on the Quantification of Micro Stereovision with a SLM and 3D Data Reconstruction* [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2003. (in Chinese)
- [12] 吕渭萍. 多视点深度图像的配准方法研究与实现 [D]. 成都:电子科技大学, 2008.
LÜ W P. *Research and Implementation of Multi View Depth Image Registration* [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2008. (in Chinese)
- [13] 乐静, 杨洁, 王建, 等. 基于多层序列图像的三维表面粗糙度检测 [J]. *仪器仪表学报*, 2010, 31(9):2036-2041.
LE J, YANG J, WANG J, *et al.*. Three-dimensional surface roughness measurement based on sequence multi-images [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2010, 31(9):2036-2041. (in Chinese)
- [14] 杨洁. 基于多层序列图像的三维粗糙度测量方法的研究 [D]. 西安:西安理工大学, 2010.
YANG J. *Research on Method of 3D Surface Roughness Measuring Based on Multi-sequence Images* [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2010. (in Chinese)
- [15] 张浩鹏, 王宗义. 基于灰度方差和边缘密度的车牌定位算法 [J]. *仪器仪表学报*, 2011, 32(5):1095-1102.
ZHANG H P, WANG Z Y. Car license plate location algorithm based on intensity variance and edge density [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2011, 32(5):1095-1102. (in Chinese)
- [16] 杨旭朗, 侯榆青, 陈桑, 等. 一种基于图像灰度和方差信息的图像分割方法 [J]. *量子电子学报*, 2010, 27(6):677-682.
YANG X L, HOU Y Q, CHEN SH, *et al.*. An image segmenting method based on image gray and variance information [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2010, 27(6):677-682. (in Chinese)
- [17] HE K M, SUN J, TANG X O. Single image haze removal using dark channel prior [C]. *Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, IEEE, 2009:1956-1963.
- [18] FU ZH ZH, YANG Y J, SHU CH, *et al.*. Improved single image dehazing using dark channel

- prior [J]. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2015, 26(5):1070-1079.
- [19] 李佳童, 章毓晋. 图像去雾算法的改进和主客观性能评价 [J]. *光学精密工程*, 2017, 25(3): 735-741.
- LI J T, ZHANG Y J. Improvements of image haze removal algorithm and its subjective and objective performance evaluation [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(3):735-741. (in Chinese)
- [20] 肖泉, 丁兴号, 廖英豪. 一种有效保持边缘特征的散焦模糊图像复原方法 [J]. *计算机科学*, 2010, 37(7):270-272.
- XIAO Q, DING X H, LIAO Y H. Novel edge-preserving algorithm for defocus blurred image restoration [J]. *Computer Science*, 2010, 37(7): 270-272. (in Chinese)

作者简介:



丁 汛(1991—),男,河北石家庄人,硕士,2015年于合肥工业大学获得学士学位,2017年于北京理工大学获得硕士学位,主要从事光学精密测量技术方面的研究。E-mail:bxjxxdx@163.com



赵跃进(1958—),男,河北涉县人,教授,博士生导师,1982年、1986年、1990年于北京理工大学光电工程系光学仪器专业分别获得学士、硕士、博士学位,现任“仪器科学与技术”一级学科和“精密仪器及机械”二级学科负责人,主要从事电子稳像、THz成像技术、基于MEMS的红外成像技术等方面的研究。E-mail:yjzhao@bit.edu.cn

(本栏目编辑:秦 思)