

文章编号:1007-2780(2023)11-1481-09

基于差动共焦的倾角测量传感器

王廷煜^{1,2,3}, 王之一^{1,2,3*}, 杨永强^{1,2}, 糜小涛^{1,2}, 王建立^{1,2,3*}, 姚凯男^{1,2,3}, 程雪^{4,5}

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 吉林省智能波前传感与控制重点实验室, 吉林 长春 130033;

4. 中国科学院 苏州生物医学工程技术研究所, 江苏 苏州 215163;

5. 济南国科医工科技发展有限公司, 山东 济南 250102)

摘要:为了解决传统激光差动共焦显微镜(LDCM)无法在测距的同时,进行高精度倾斜角度测量的问题,提出了一种基于差动共焦的倾角测量传感器。在对倾斜表面进行测量时,该传感器首先利用轴向扫描获取的差动响应信号精准定位其焦点位置,然后分析显微镜光瞳面场强分布并提取光斑图像的峰值位置,从而实现对倾角的精准测量。首先,建立聚焦光束经倾斜待测面反射后的光场分布模型,对不同倾斜角度下显微镜光瞳面的场强分布情况进行分析。然后,在分析倾斜光斑特征的基础上,提出了采用改进 Meanshift 算法进行光斑峰值位置提取的方法。最后,通过实验验证了传感器对倾角测量的有效性。实验结果表明,传感器对倾斜程度($0\sim 8^\circ$)测量平均误差为 0.011° ,对倾斜方向($0\sim 360^\circ$)的测量平均误差为 0.128° ,能够满足利用差动共焦非接触光学探针对三维表面进行检测的过程中,对待测表面倾斜角度测量的要求。该传感器为自由曲面的高精度轮廓测量提供了一种新的方法。

关键词:非接触光学探针;差动共焦;三维检测;倾斜测量;峰值提取

中图分类号:TH741 **文献标识码:**A **doi:**10.37188/CJLCD.2023-0045

Tilt sensor based on differential confocal microscope

WANG Ting-yu^{1,2,3}, WANG Zhi-yi^{1,2,3*}, YANG Yong-qiang^{1,2}, MI Xiao-tao^{1,2},
WANG Jian-li^{1,2,3*}, YAO Kai-nan^{1,2,3}, CHENG Xue^{4,5}

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,
Changchun 130033, China;

2. University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China;

3. Jilin Provincial Key Laboratory of Intelligent Wavefront Sensing and Control,
Changchun 130033, China;

4. Suzhou Institute of Biomedical Engineering and Technology, Chinese Academy of Sciences,
Suzhou 215163, China;

5. Jinan Guoke Medical Technology Development Co., Ltd., Jinan 250102, China)

Abstract: In order to solve the problem that traditional laser differential confocal microscope(LDCM) can not measure the angle of tilt with high precision while measuring the distance, a kind of angle measurement

收稿日期:2023-02-07;**修订日期:**2023-02-27.

基金项目:国家自然科学基金(No. 62005273, No. 12133009);山东省自然科学基金青年基金(No. ZR2020QF100);
Supported by National Natural Science Foundation of China(No. 62005273, No. 12133009); Natural Science
Foundation of Shandong Province, China(No. ZR2020QF100)

*通信联系人, E-mail: wangjianli@ciomp.ac.cn; wangzhiyi18@mails.ucas.edu.cn

sensor based on LDCM was proposed. When measuring the inclined surface, the sensor first uses the differential response signal obtained by axial scanning to accurately locate the focal position, and then analyzes the pupil field intensity distribution of the microscope and extracts the peak position of the spot image, so as to achieve the accurate measurement of the inclination. First, the field distribution model of the focused beam reflected by the tilted surface to be measured was established, and the field intensity distribution in the pupil plane of the microscope was analyzed at different tilt angles. Then, on the basis of analyzing the characteristics of slanting spot, a method of extracting the peak position of spot using improved Meanshift algorithm is proposed. Finally, the effectiveness of the sensor for tilt angle measurement is verified by experiments. The experimental results show that the average error of the sensor is 0.011° for the tilt degree ($0^\circ \sim 8^\circ$) and 0.128° for the tilt direction ($0^\circ \sim 360^\circ$), which can meet the requirements of measuring tilt angle of measuring surface in the process of detecting three-dimensional surface by using LDCM. The sensor provides a new method for high precision contour measurement of free-form surface.

Key words: non-contact optical probe; differential confocal; 3D detection; tilt measurement; peak extraction

1 引言

光学自由曲面一般具有不对称、不规则的形状特征^[1]。其相比于球面镜和非球面镜,形状更加复杂,在设计时有更大的自由度^[2],在诸多领域有着广泛的应用,如交通运输^[3]、遥感^[4]以及生物传感技术。但是受其检测难度的影响,尤其是缺乏有效的高精度检测手段,自由曲面的制造和大规模应用受到了限制^[5]。

轮廓仪是对大口径自由曲面进行面形检测的通用检测手段^[6],检测方式主要分为接触式测量和非接触式测量^[7]。接触式测量法利用触针与待测面之间的接触进行待测面位置的测量。非接触式测量法通常使用光学探针,由于其在测量时避免了与待测表面的接触,降低了划伤待测面的风险,在自由曲面测量领域获得了广泛应用^[8]。

差动共聚焦显微镜(LDCM)是一种理想的非接触式光学探针^[9]。LDCM起源于反射式共聚焦显微镜^[10],在保留共聚焦显微镜的非接触优势^[11]的同时,增强了系统的抗扰动能力以及轴向分辨率。在利用显微镜对待测面进行测量时,光束能够精准聚焦到待测面表面,即差动共焦传感器能够测量待测面的绝对位置,以及在线性区间内实现待测面跟踪。差动共聚焦显微镜利用差分信号过零点附近的轴向响应曲线,通过过零点的求解实时获取被测点的轴向位置。激光差动共聚焦显微技术相比于传统的共聚焦显微技术,对焦

点位置有更强的定位能力。

轮廓仪在进行数据采集的过程中,非接触式探针在多个维度的运动机构的携带下,对待测表面轮廓进行采样。Khairi等人^[12]使用五自由度相机,提取待测面法向量进行曲面重建。Pan等人^[13]利用空间位置和法向量对复杂曲面进行重构。相比于仅使用测量位置的三维坐标,使用待测面的法向量进行曲面重建,对于待测面上存在的微小缺陷有着更好的检测能力^[14]。

已有众多学者针对利用非接触光学探针进行待测面倾斜角度测量开展了相关研究。Wu等人^[15]利用衍射图像显微镜(DIM)收集不同表面方向的衍射图像,利用神经网络学习衍射图像与其相应的表面方向之间的映射关系。Pribosek等人^[16]提出了一种利用孔径编码的共聚焦显微镜测量倾斜表面时,样品表面的反射光束被设计的孔径部分阻挡,通过测量每个子孔径的能量比例获取待测面的倾斜角度。Wang等人^[5]在差动共聚焦显微镜系统中加入一对空间正交的双柱面镜结合线阵CCD的结构,将二维寻峰问题转化为一维数据的峰值提取问题。但是以上方法都存在结构复杂、系统装调难度大的问题,难以应用到实际生产中。

针对激光差动共焦显微技术无法在测距的同时测量待测面倾角的问题,本文提出了一种通过分析显微镜光瞳面光强分布获取待测面倾斜角度信息的方案。利用差动响应曲线过零点将待测面精确定位到显微镜焦点位置,使用面阵相机采集

显微镜光瞳面单帧光斑图像,采用峰值提取算法提取光斑峰值位置,建立峰值位置与待测面倾斜角度之间的映射关系。实验证明,本系统赋予了传统的差动共焦测距传感器测量倾角的能力,具有结构简单、测量速度快和检测精度高的特点。

2 系统构成及其工作原理

2.1 系统结构

系统在传统差动共焦测距显微镜的结构中

加入面阵相机,赋予其对待测面倾角进行测量的能力。图 1 为基于激光差动共焦显微技术的倾角测量传感器测量原理及其结构图。从激光器出射的平行光束通过偏振分束镜和 1/4 波片,再由显微物镜将光束聚焦到待测表面。显微镜可在物镜定位器携带下沿显微镜轴向移动,实现轴向扫描。经待测面反射的光束从显微镜光瞳面出射后,由非偏振分束镜以 1:1 的比例,分为两路光束,分别进入差动测距单元和倾角测量单元。

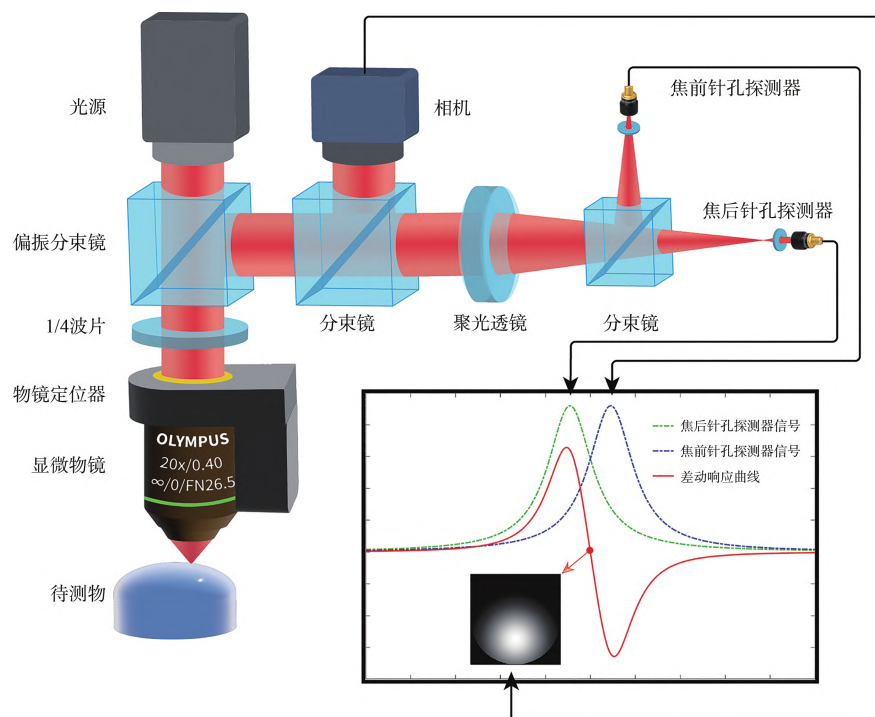


图 1 系统测量原理及其结构图

Fig. 1 Principle of the system measurement and its structure diagram

差分测距单元利用非偏振分束镜将聚光透镜出射的光束等分为两份,分别进入偏离聚光透镜焦平面相同距离的两个焦前针孔探测器和焦后针孔探测器,对光束能量进行测量^[17]。当待测面处在显微镜焦点位置时,两个探测器能量相等。利用物镜定位器轴向扫描,采集两个探测器的信号强度,得到差动响应曲线,如图 1 右下角所示。将显微镜移动到差动响应曲线的过零点,可以实现对待测面位置的精准定位。

倾角测量单元利用当待测面处在显微物镜焦点位置时,从显微镜光瞳面出射的光束为平行光束,使用面阵相机对光束的场强分布进行探

测。当待测面处于不同倾斜角度时,由于待测面上的反射光会从不同位置重新进入显微镜,相机端接收会采集到不同形状的光斑图像。利用光斑和倾斜角度之间的映射关系,对待测面倾斜角度进行检测。

2.2 系统的工作原理

为模拟系统工作原理,建立了菲涅尔衍射积分模型。设从光源出射的平行光束符合半径为 r (光束能量下降到中心强度 I_1 的 $1/e^2$ 处,距离光束中心的距离)的高斯分布。进入显微镜光瞳面平行光束光场分布 $U_1(x_1, y_1)$ 为:

$$U_1(x_1, y_1) = I_1 \times \exp\left(\frac{-2(x_1^2 + y_1^2)}{r^2}\right). \quad (1)$$

当待测面放置在偏离显微物镜焦点距离 u 处时,待测面上的光场分布 $U_2(x_2, y_2, u)$ 为:

$$U_2(x_2, y_2, u) = m_2 \times \iint_{-\infty}^{\infty} U_1(x_1, y_1) \times P_1(x_1, y_1) \times \exp\left(\frac{ik}{2f_1}(x_1^2 + y_1^2)\right) \times \exp\left(-\frac{ik}{2(f_1 + u)}\left(\frac{(x_2 - x_1)^2}{(y_2 - y_1)^2}\right)\right) dx_1 dy_1, \quad (2)$$

其中: m_2 为常数, f_1 为显微物镜的焦距, 光波数 $k = 2\pi/\lambda$, λ 为光源波长, $P_1(x_1, y_1)$ 为照明路径上显微镜的瞳函数。

聚焦光束经过倾斜待测面反射后,重新到达显微镜光瞳面。通过向待测面光场分布中加入不同的相位,改变波前形状来模拟倾斜反射。出射方向上,显微镜光瞳面光场分布 $U_3(x_3, y_3, \theta, \varphi)$ 为:

$$U_3(x_3, y_3, \theta, \varphi) = m_3 \times P_3(x_3, y_3) \times \exp\left(\frac{ik}{2f_1}(x_3^2 + y_3^2)\right) \times \iint_{-\infty}^{\infty} U_2(x_2, y_2, u) \times \exp(ik \times (x_2 \cos \varphi + y_2 \sin \varphi) \times \tan 2\theta) \times \exp\left(-\frac{ik}{2(f_1 + u)}\left(\frac{(x_3 - x_2)^2}{(y_3 - y_2)^2}\right)\right) dx_2 dy_2, \quad (3)$$

其中: m_3 为常数, θ 为待测面倾斜程度, φ 为待测面的倾斜方向, $P_3(x_3, y_3)$ 为检测路径上显微镜的瞳函数。

显微镜出瞳面的光束经过聚光透镜聚焦后,分别进入焦前针孔探测器和焦后针孔探测器。探测器上的光场分布 $U_4(x_4, y_4, -u_m)$ 和 $U_5(x_5, y_5, +u_m)$ 分别为:

$$U_4(x_4, y_4, -u_m) = m_4 \times \iint_{-\infty}^{\infty} U_3(x_3, y_3, \theta, \varphi) \times \exp\left(-\frac{ik}{2(f_2 - u_m)}\left(\frac{(x_4 - x_3)^2}{(y_4 - y_3)^2}\right)\right) dx_3 dy_3, \quad (4)$$

$$U_5(x_5, y_5, +u_m) = m_4 \times \iint_{-\infty}^{\infty} U_3(x_3, y_3, \theta, \varphi) \times \exp\left(-\frac{ik}{2(f_2 + u_m)}\left(\frac{(x_5 - x_3)^2}{(y_5 - y_3)^2}\right)\right) dx_3 dy_3, \quad (5)$$

其中: m_4 为常数, f_2 为聚光透镜的焦距, u_m 为针孔探测器的离焦量。

D_f 为焦前针孔探测器有效探测区域, D_b 为焦后针孔探测器有效探测区域。令焦后焦前针孔探测器信号强度作差,得到差动响应信号 $I_{\text{diff}}(u, u_m)$:

$$I_{\text{diff}}(u, u_m) = \iint_{D_b} U_5(x_5, y_5, +u_m) dx_5 dy_5 - \iint_{D_f} U_4(x_4, y_4, -u_m) dx_4 dy_4. \quad (6)$$

差动响应曲线在待测物处于显微物镜焦点位置时存在唯一的过零点。并且差动响应信号在过零点位置有极高的信噪比,信号在过零点附近保持良好线性,因此利用差动响应信号能够对待测面精确定位。利用轴向扫描装置,将待测面定位到显微镜焦点位置后,再利用相机采集检测路径上显微镜光瞳面上的光斑图像。

图2展示了不同倾斜角度下相机端的光斑图像。当待测面表面呈现不同倾斜角度时,采集光斑图像会呈现不同的形状,分析光斑图像的峰值位置,建立倾斜角度与光斑峰值位置间的对应关系。在实际测量时,利用采集单帧光斑图像,即可分析得到对应待测面的倾斜角度。

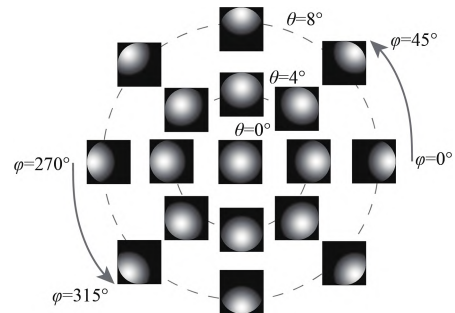


图2 不同倾斜角度下光斑峰值位置发生偏移示意图

Fig. 2 Changes of peak position of light spot at different tilt angles

3 改进 Meanshift 峰值提取算法

Meanshift 算法被广泛应用于目标跟踪、信号峰值提取领域中。使用可在图像空间中滑动的窗口,在移动过程中,通过概率密度估计,持续进行目标方向以及位置的预测,逐级定位图像中目标所在区域。相机端采集光斑图像,在光斑能量最强处存在唯一的峰值位置,可以采用 Meanshift

算法对峰值位置进行提取。

3.1 核函数

Meanshift算法通过核密度估计,指引滑动窗口移动到概率密度的极大值处。概率密度估计的方法分为有参数密度估计和非参数密度估计两种^[18]。有参数密度估计,需要根据检测目标的具体形式,设置密度估计模型中的未知参数。非参数密度估计采用包含核密度函数的滑动窗口去逼近目标位置^[19]。

核密度估计法属于非参数估计方法的一种。在对光斑峰值位置进行定位时,选用高斯核函数^[20],越接近滑动空间中心的数据,被赋予的权重值越高。而越远离滑动空间的中心数据,被赋予的权重值越低。设 (P_h, P_v) 为滑动窗口中心位置, h 为核函数半径,则图像中任意位置 (i, j) 数据权重值为:

$$G(i, j, P_h, P_v, h) = \exp\left(-\frac{(i - P_h)^2 + (j - P_v)^2}{2h^2}\right). \quad (7)$$

3.2 滑动窗口半径

滑动窗口的半径决定了滑动窗口的作用范围。选取的半径越大,滑动窗口所包含的数据量越大,鲁棒性越强,但是会导致峰值位置的定位精度不高。选取较小的半径,峰值位置定位准确,但是容易受到局部峰值的干扰,使滑动窗口收敛到错误的峰值位置。所以,本文提出了一种自适应调节滑动窗口的方法。先使用较大的滑动窗口初步定位峰值位置,再使用较小的滑动窗口精确定位光斑图像峰值位置。

采用公式(8),确定滑动窗口在本轮迭代中使用的窗口半径:

$$h = h_{\min} + (h_{\max} - h_{\min}) \times \frac{\Delta L}{h_{\max}}, \quad (8)$$

其中: ΔL 是上一轮迭代中滑动窗口的移动量, $h_{\min}$ 是设置的滑动窗口半径阈值下限, $h_{\max}$ 是设置的滑动窗口的半径阈值上限。利用上一轮滑动窗口的移动量作为度量滑动窗口与目标位置之间距离的指标,自适应调节滑动窗口半径。在 ΔL 较大时,窗口距离目标位置较远,会生成较大的核半径。在 ΔL 较小时,滑动窗口进入目标位置附近,会生成较小的核半径。滑动窗口的半径阈值上限 $h_{\max}$ 设置为光斑图像尺寸的1/2,滑动窗口的半径阈值下限 $h_{\min}$ 设置为光源准直光束束

腰半径的1/2。

3.3 光斑峰值位置提取算法流程

算法流程图如图3所示。首先选取图像的中心作为滑动窗口的初始位置。 $\{P_h(k), P_v(k)\}$ 为更新前滑动窗口的位置, $\{P_h(k+1), P_v(k+1)\}$ 为更新后滑动窗口的位置, k 为迭代次数, I 为采集到的光斑图像,图像尺寸为 $m \times m$ 。在循环迭代过程中,对滑动窗口范围内的数据,利用式(9)对滑动窗口的位置进行更新:

$$P_h(k+1) = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m i \times G(i, j, P_h(k), P_v(k), h) \times I(i, j)}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m G(i, j) \times I(i, j)}, \quad (9)$$

$$P_v(k+1) = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m j \times G(i, j, P_h(k), P_v(k), h) \times I(i, j)}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m G(i, j) \times I(i, j)}, \quad (10)$$

每轮迭代完成后,利用式(11)计算滑动窗口的移动量,并代入式(8)对滑动窗口的半径 r 进行更新:

$$\Delta L = \sqrt{(P_h(k+1) - P_h(k))^2 + (P_v(k+1) - P_v(k))^2}, \quad (11)$$

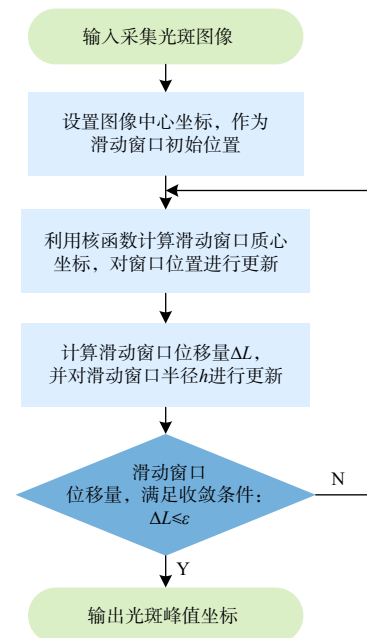


图3 改进的Meanshift峰值提取算法流程图

Fig. 3 Flow chart of the improved Meanshift peak extraction algorithm

不断执行上述过程,直到滑动窗口的移动量收敛于设定的阈值 ϵ ,即满足条件 $\Delta L \leq \epsilon$ 。

4 实验与结果

4.1 实验装置

实验装置如图 4 所示。在光纤激光器(LP642-PF20, 642 nm, 20 mW, Thorlabs, Newton, NJ, USA)输出端利用准直镜(F810FC-635, NA=0.25, $f=35.41$ mm)对光束进行准直,出射光束符合束腰半径为 3.2 mm 的高斯分布。准直光束通过分束镜、1/4 波片(WPQ05ME-633, $\varnothing=1/2"$, Thorlabs, Newton, NJ, USA)和显微物镜(LMPLFLN 20 $\times$, NA=0.4, $f=9$ mm, Olympus, Tokyo, Japan)后,汇聚于平面镜(GMH-11, HYGX, Guangzhou, China)表面,平面镜由六轴位移平台(H-811. I2, Power Integrations, San Jose, CA, USA)搭载。反射光重新进入显微物镜后,被分束镜分为两束光束。一束光进入面阵相机(QHY600Pro, 9 576 $\times$ 6 388 $\times$ 3.76 μm , 光速视觉(北京)有限公司)。另一束光经过平凸透镜(LA1207-A, $\varnothing=1/2"$, $f=100.0$ mm, Thorlabs, Newton, NJ, USA)聚焦后,由分束镜分为焦前测量光束和焦后测量光束,分别射入离焦量为 ± 650 μm 的针孔(SM05PD1B, $\varnothing=20$ μm , Thorlabs, Newton, NJ, USA)。增加了辅助成像装置,有助于在设备调校过程中寻找传感器的焦平面。使用的六轴位移台,最小运动增量为 2.5 μrad ,重复性为 ± 2 μrad ,能够满足本实验对倾斜角度的需求。

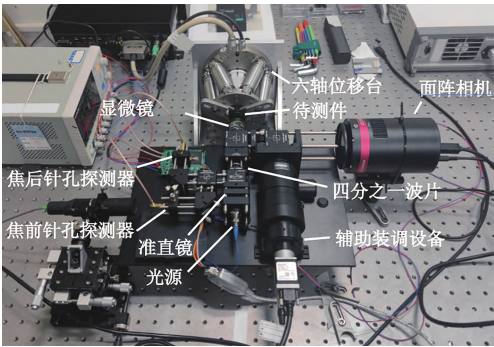


图 4 测量系统实验装置
Fig. 4 Experimental setup for the measurement system

4.2 实验结果

将待测面调整到不同倾斜角度下,传感器采

集到差分共焦曲线如图 5 所示。随着倾斜角度的增大,差动响应信号曲线的整体能量也随之降低,进而导致了差动响应信号过零点斜率降低。但是过零点位置不随倾斜角度改变,能够精确定位待测面位置。

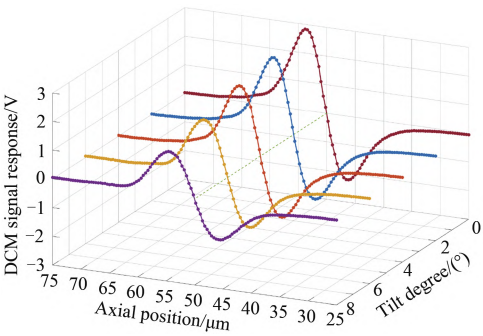


图 5 在不同倾斜角度下采集的差动响应信号曲线
Fig. 5 Differential signal curves collected at different tilt degrees

图 6 展示了改进 Meanshift 算法的峰值提取效果。随着不断的迭代更新,滑动窗口的尺寸开始逐渐缩小,并且越来越接近目标峰值位置。改进的 Meanshift 峰值提取算法在初始迭代阶段使用较大的窗口半径,相比于传统的 Meanshift 峰值提取算法,使用更少的迭代次数即可锁定峰值位置。

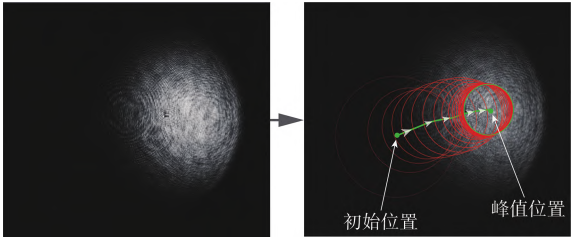
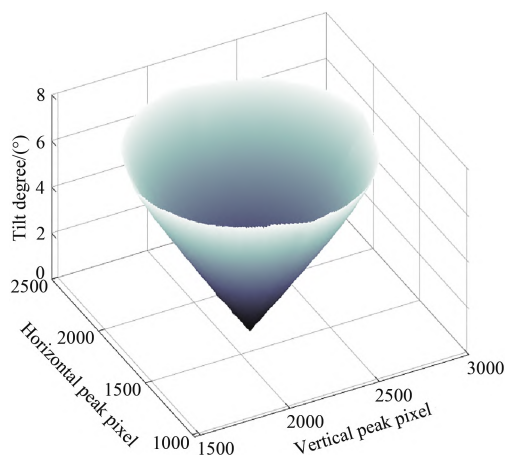
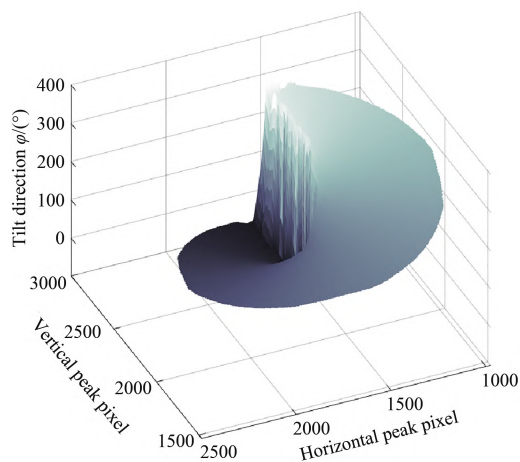


图 6 改进 Meanshift 算法提取采集的光斑图像峰值位置
Fig. 6 Peak position of the collected spot image extracted by improved Meanshift algorithm

在对设备的标校实验中,通过六轴位移台将平面镜旋转中心移动到传感器焦点位置,令平面镜围绕传感器焦点位置旋转,产生不同的倾斜角度,面阵相机采集对应的光斑图像。倾斜程度 θ 范围为 $0^\circ \sim +8^\circ$,以 0.1° 为增量,倾斜方向 φ 范围为 $0^\circ \sim 360^\circ$,以 3° 为增量,进行训练集数据采集,共采集到 19 320 组数据。此外,随机生成 4 000 组倾斜角度数据,用于测试集数据采集。图 7 和图 8 分

图 7 光斑峰值位置与倾斜程度 θ 的关系曲面Fig. 7 Relationship surface between the peak position of the facula and the tilt degree θ 图 8 光斑峰值位置与倾斜方向 φ 的关系曲面Fig. 8 Relationship surface between the peak position of the facula and the tilt direction φ

别展示了采用 Biharmonic(v4) 曲面插值算法,得到的图像峰值位置与倾斜程度 θ 以及倾斜方向 φ 的关系曲面。

图 9 展示了倾斜程度 θ 与倾斜方向 φ 的预测误差随着 θ 增大的变化情况。随着 θ 增大,倾斜方向 φ 的预测误差呈减小的趋势,而倾斜程度 θ 的预测误差以 5° 为分界,呈现先减小后增大的趋势。

使用不同的峰值提取算法,对比其测量精度和峰值提取速度。随机生成 4 000 组倾斜角度数据作为测试集数据,对其预测误差和平均耗时取加权平均。表 1 展示了改进的 Meanshift 算法与传统 Meanshift、质心法以及二维高斯拟合法的对比

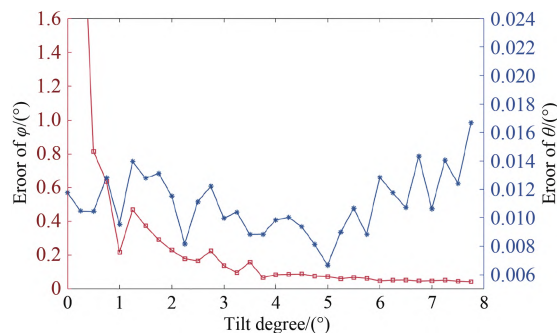


图 9 倾斜程度和方向的预测误差随倾斜程度的变化趋势

Fig. 9 Variation of prediction errors with tilt degree

表 1 不同峰值提取算法的测量精度与速度对比

Tab. 1 Measurement accuracy versus velocity contrast for different peak extraction algorithms

峰值提取方法	θ 平均预测 误差/($^\circ$)	φ 平均预测 误差/($^\circ$)	预测平均 耗时/s
改进 Meanshift	0.011	0.128	0.141
传统 Meanshift	0.012	0.131	0.215
质心法	0.034	0.214	0.003
二维高斯拟合法	0.015	0.142	3.024

比结果。实验结果表明,使用改进的 Meanshift 算法,测量精度能够和传统 Meanshift 算法保持一致,速度提升了 34%。并且,改进的 Meanshift 算法相比于质心法预测精度更高,相比于平均预测误差处于同一量级下的二维高斯拟合法,预测速度更快。选用改进 Meanshift 算法进行峰值提取,能够兼顾提取的精度与速度。

4.3 误差分析

传感器在检测过程中,将提取光斑图像的峰值位置映射为对应的测量倾斜角度。角度测量平均误差对应测量过程中光斑图像峰值误差,约为 0.958 个像元。本文对影响所提出传感器测量精度的因素进行了分析,主要包含如下部分:

(1) 差分测距单元过零点定位精度

测距单元的焦平面定位误差会影响从显微镜出瞳面出射光束的准直度。差动共焦测距显微镜通过差动响应曲线过零点对焦平面进行精确定位,轴向分辨率能够达到 10 nm。对出瞳面光强分布峰值位置进行估计,在倾斜角度为 10° 时,离焦量 10 nm 对应光斑峰值位置的最大偏移量为 $0.0036\text{ }\mu\text{m}$,约 0.001 个像元。

(2) 标定仪器精度

使用六轴位移平台对本传感器进行标定,标定设备的精确度直接影响了标定的准确性。产生待测面倾斜使用的六轴位移平台,最小倾斜增量为 $0.000\ 14^\circ$,重复性为 $\pm 0.000\ 11^\circ$ 。通过实验验证,本文所提出的传感器的平均测量误差为小数点后两位,传感器的标定以及测试精度需求可以得到保证。

(3) 数据处理引入误差

该误差主要是指结合使用算法对图像光斑峰值位置提取的误差。结合仿真分析,改进 Meanshift 峰值提取算法对光斑峰值位置的分辨力能够达到 0.1 个像元以下。

(4) 杂散光以及环境振动引入相机测量误差

由于待测平面不是绝对光滑,相机端探测图像会产生散斑现象。另外,在设备标定以及实际测量过程中,光源的不稳定性、实验环境的振动

均会引起光斑图像峰值位置的偏移,这些也是误差产生的主要来源。

5 结 论

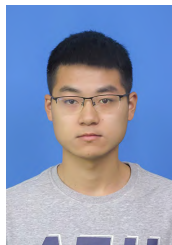
本文根据现代光学精密检测中对光学自由曲面表面位置和倾角进行实时同步测量的需求,提出了基于差动共焦的倾角测量结构及其测量方法。建立了倾斜衍射模型,对待测面呈不同倾斜角度时的光斑图像进行了分析。提出了改进 Meanshift 峰值提取算法,在保证提取精度的同时,提取速度提升了 34%。使用本文提出的传感器以及测量方法,对倾斜程度 ($0^\circ \sim 8^\circ$) 的测量平均误差为 0.011° ,对倾斜方向 ($0^\circ \sim 360^\circ$) 的测量平均误差为 0.128° 。该传感器为传统的差动共焦测距传感器赋予测量倾角的能力,在三维面型精密检测领域有着应用潜力。

参 考 文 献:

- [1] DUERR F, THIENPONT H. Freeform imaging systems: Fermat's principle unlocks "first time right" design [J]. *Light: Science & Applications*, 2021, 10(1): 95.
- [2] FALAGGIS K, ROLLAND J, DUERR F, *et al.* Freeform optics: introduction [J]. *Optics Express*, 2022, 30(4): 6450-6455.
- [3] WEI L D, LI Y C, JING J J, *et al.* Design and fabrication of a compact off-axis see-through head-mounted display using a freeform surface [J]. *Optics Express*, 2018, 26(7): 8550-8565.
- [4] REIMERS J, BAUER A, THOMPSON K P, *et al.* Freeform spectrometer enabling increased compactness [J]. *Light: Science & Applications*, 2017, 6(7): e17026.
- [5] WANG Z Y, WANG T Y, YANG Y Q, *et al.* Precise two-dimensional tilt measurement sensor with double-cylindrical mirror structure and modified Mean-shift algorithm for a confocal microscopy system [J]. *Sensors*, 2022, 22(18): 6794.
- [6] ZHOU H W, HUSSAIN M M R, BANERJEE P P. A review of the dual-wavelength technique for phase imaging and 3D topography [J]. *Light: Advanced Manufacturing*, 2022, 3(2): 314-334.
- [7] 朱日宏,孙越,沈华. 光学自由曲面面形检测方法进展与展望[J]. *光学学报*, 2021, 41(1): 0112001.
ZHU R H, SUN Y, SHEN H. Progress and prospect of optical freeform surface measurement [J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(1): 0112001. (in Chinese)
- [8] KIM M K. Phase microscopy and surface profilometry by digital holography [J]. *Light: Advanced Manufacturing*, 2022, 3(3): 481-492.
- [9] 王富生,谭久彬. 差动共焦式纳米级光聚焦探测系统的研究[J]. *光学技术*, 2001, 27(3): 232-234.
WANG F S, TAN J B. Optical focus detection system with nanometer resolution using differential confocal microscope [J]. *Optical Technique*, 2001, 27(3): 232-234. (in Chinese)
- [10] KIM C S, YOO H. Three-dimensional confocal reflectance microscopy for surface metrology [J]. *Measurement Science and Technology*, 2021, 32(10): 102002.
- [11] LI J X, GARFINKEL J, ZHANG X R, *et al.* Biopsy-free in vivo virtual histology of skin using deep learning [J]. *Light: Science & Applications*, 2021, 10(1): 233.

- [12] YUSUF K, EDI P, RADZI A, *et al.* Shape reconstruction of specular surface using normal vectors [C]//*Proceedings of the 2nd WSEAS International Conference on Engineering Mechanics, Structures and Engineering Geology*. Rhodes, Greece: WSEAS, 2009: 275-279.
- [13] PAN R J, MENG X X, WHANGBO T. Hermite variational implicit surface reconstruction [J]. *Science in China Series F: Information Sciences*, 2009, 52(2): 308-315.
- [14] HÄUSLER G, RICHTER C, LEITZ K H, *et al.* Microdeflectometry—a novel tool to acquire three-dimensional microtopography with nanometer height resolution [J]. *Optics Letters*, 2008, 33(4): 396-398.
- [15] WU G W, CHEN L C. Precise 3-D microscopic profilometry using diffractive image microscopy and artificial neural network in single-exposure manner [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2021, 147: 106732.
- [16] PRIBOŠEK J, DIACI J, SINZINGER S. Aperture-coded confocal profilometry [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(23): 5523-5526.
- [17] SHENG Z, WANG Y, ZHAO W Q, *et al.* Laser differential fitting confocal microscopy with high imaging efficiency [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(25): 6903-6909.
- [18] 朱鸿. 光谱共焦位移传感器信号处理与校准研究[D]. 武汉:华中科技大学,2019.
ZHU H. Research on signal processing and calibration of spectral confocal displacement sensor [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019. (in Chinese)
- [19] 王田,刘伟宁,韩广良,等. 基于改进 MeanShift 的目标跟踪算法[J]. 液晶与显示,2012,27(3):396-400.
WANG T, LIU W N, HAN G L, *et al.* Target tracking algorithm based on improved MeanShift [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2012, 27(3): 396-400. (in Chinese)
- [20] FERNÁNDEZ-DUQUE B, PÉREZ I A, GARCÍA M Á, *et al.* Annual and seasonal cycles of CO₂ and CH₄ in a Mediterranean Spanish environment using different kernel functions [J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2019, 33(3): 915-930.

作者简介:



王廷煜(1998—),男,四川眉山人,硕士研究生,2021年于哈尔滨工业大学获得学士学位,主要从事大口径光学自由曲面检测方面的研究。E-mail: wangtingyu21@mails.ucas.ac.cn



王建立(1971—),男,山东曲阜人,博士,研究员,2002年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事地基空间目标光学探测技术、光电精密跟踪控制技术、光电精密测量误差补偿技术、大口径望远镜总体技术、大型军用光电系统总体集成技术等方面的研究。E-mail: wangjianli@ciomp.ac.cn



王之一(1996—),男,吉林长春人,博士研究生,2018年于山东大学获得学士学位,主要从事大口径光学自由曲面精密检测、非接触式光学探针测量等方面的研究。E-mail: wangzhiyi18@mails.ucas.edu.cn