

三维形貌的线结构光精密旋转测量与误差补偿方法

刘祥^{1,2}, 王振亮³, 姚鹏^{1,2*}, 侯耀^{1,2}, 张贺永^{1,2}, 褚东凯^{1,2}, 屈硕硕^{1,2}

¹山东大学机械工程学院先进射流工程技术研究中心, 山东 济南 250061;

²高效洁净机械制造教育部重点实验室, 山东 济南 250061;

³中国重汽集团济南动力有限公司发动机制造公司, 山东 济南 250220

摘要 采用线激光轮廓仪测量工件表面三维形貌时,轮廓仪与工件通常需要作相对直线运动,这对线性运动平台的精度有较高要求,且系统占用空间大,不易实现在位精密测量。针对上述问题,提出了一种线激光轮廓仪旋转扫描的测量方法。通过图像识别方法拟合线结构光的运动轨迹,进而计算轮廓仪和转台旋转中心的偏心误差,采用 Matlab 和 Java 编程软件对测量数据进行三维合成和极坐标化处理,并对转台的跳动和偏心及线激光轮廓仪的倾斜误差进行补偿。球径、特征宽度和平面高度差等的测量结果验证了所提方法的有效性,测量误差 $<3\ \mu\text{m}$,已接近仪器测量精度的极限值。在被测工件或运动机构体积和重量较大、相对运动精度不高的情况下,所提方法能实现三维形貌的在位精密测量。

关键词 测量; 三维形貌; 线结构光; 旋转测量; 图像识别; 误差补偿

中图分类号 TP274

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL202249.2104004

1 引言

零件的表面形貌影响机械系统的摩擦磨损、疲劳强度、抗腐蚀性等性能,正确设计和控制表面形貌的作用不亚于采用新结构和新材料^[1],因此必须对表面形貌进行精密的测量。光学无损检测基于光的特性进行检测,具有非接触、大面积、高精度、高灵敏度、简便高效等优点,在表面形貌测量中得到了广泛的应用^[2-3]。其中,结构光测量基于光学三角法原理,将不同模式的光投射到被测物体表面,用相机拍摄畸变图像,实现三维形貌的重构^[4-5]。刘盼等^[6]以提高点激光在位测量的精度为出发点,研究了点激光传感器的坐标系转化与中心度校正,但是存在测量效率低、数据处理难度大等问题。詹坤烽等^[7]针对点激光测量存在的问题,提出了基于单相机和线激光系统的扫描测量方法,在同等精度下,显著提高了测量效率和点云密集度。张宗华等^[8]提出了一种基于线结构光投影和反射的方法,实现了漫反射表面和镜面反射表面同时存在的复合表面形貌的高精度快速测量。线结构光测量相比点结构光测量更加高效,相比面结构光测量结构更加紧凑,具有高精度、高稳定性等优点,是形貌测量中使用最多的方式之一。

线激光轮廓仪与精密运动平台组合,按照规划轨

迹运动,可实现目标区域的高效高精度三维形貌测量。Moreno-Oliva 等^[9]将整形后的线激光投射到涡轮叶片表面,利用直线运动装置带动轮廓仪运动,完成整个叶片的测量,测量分辨率为 0.1 mm。韩家杰等^[10]利用直线运动平台带动线激光轮廓仪对管道焊缝进行检测,通过改进中心提取算法和校正平台位姿,实现了表面形貌的拼接,但其异常点数据处理有待进一步优化。张鹏程等^[11]提出一种激光交叠式三维重建方法,利用计算机数字控制机床(CNC)运动平台带动线激光轮廓仪直线运动,完成对航空发动机叶片的测量,精度可达 10 μm 。丁红等^[12]将回转体工件放在转台上,在激光光条与回转轴线平行的条件下将线激光轮廓仪安装在水平运动机构上,利用数据拼接完成了样件的三维扫描,实现了雕刻艺术品的数字化生产。Huang 等^[13]利用步进电机驱动线激光轮廓仪旋转,保证激光光条与转轴平行,通过摄像机拍摄物体表面的激光条纹图像,进行图像处理和坐标变换,从而得到激光条纹上各点的空间三维坐标,该方式需要较为繁琐的标定,拍摄角度有限且设备占据了较大的空间。

综上所述,很多学者开展了基于线结构光的三维形貌测量技术研究,其中直线运动测量方法对线性运动平台的精度要求较高,旋转运动测量方法中的设备

收稿日期: 2021-12-27; 修回日期: 2022-02-03; 录用日期: 2022-03-08

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51875321)、山东省重点研发计划(2021CXGC010206)、国家重点研发计划(2017YFB1301903)

通信作者: *yaopeng@sdu.edu.cn

占据空间大且测量范围有限。本文提出一种基于线结构光的旋转测量方式,通过精密转台带动线激光轮廓仪做旋转运动,使用图像识别方法提取激光光条中心,通过校正线结构光测量起始端点与转台旋转轴线的偏心误差,实现旋转覆盖区域的完整测量,并对倾斜误差进行了补偿,最后通过测量典型特征验证了补偿算法的正确性。

2 原理

2.1 线结构光法的旋转测量原理

2.1.1 线结构光法的测量原理

线结构光法的光路图如图1(a)所示,激光器发出

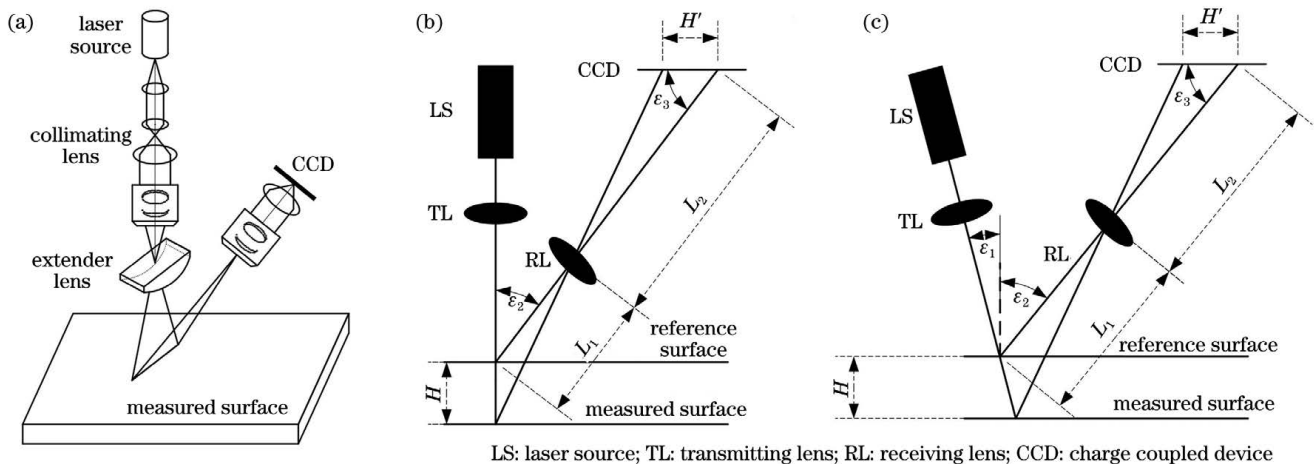


图1 结构光法的成像原理。(a)线结构光法的成像光路;(b)直射式激光三角法;(c)斜射式激光三角法

Fig. 1 Imaging principle of structured light method. (a) Imaging path of line structured light method; (b) direct-type laser triangulation method; (c) oblique-type laser triangulation method

表1 直射式与斜射式激光三角法的对比

Table 1 Comparison of direct-type and oblique-type laser triangulation

Critical information	Direct-type laser triangulation method	Oblique-type laser triangulation method
Satisfied condition	$\tan \epsilon_2 = \epsilon_0 \times \tan \epsilon_3$	$\tan(\epsilon_1 + \epsilon_2) = \epsilon_0 \times \tan \epsilon_3$
Formula	$H = \frac{L_1 H' \sin \epsilon_3}{L_2 \sin \epsilon_2 - H' \sin(\epsilon_2 + \epsilon_3)}$	$H = \frac{L_1 H' \sin \epsilon_3 \cos \epsilon_3}{L_2 \sin(\epsilon_1 + \epsilon_2) - H' \sin(\epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3)}$
Characteristic	High stability, wide measurement range, good flexibility, being suitable for surface with good scattering	High resolution, being suitable for smooth surface, but complicated operation and large space occupation

2.1.2 基于线结构光法的旋转测量

由于测量原理限制,基于线结构光的二维轮廓测量仪或待测工件须安装在具有相应精度的运动平台上,通过相对运动才能获取待测工件表面的完整三维形貌数据。目前最为常见的测量方式有三种:1)如图2(a)所示,轮廓仪被安装在线性运动平台上,待测工件保持静止,轮廓仪在运动平台带动下沿平台运动方向以一定的速率扫描待测工件表面,线结构光在待测工件表面形成带状测量区域;2)如图2(b)所示,若轮廓仪不便于安装在线性运动平台上,亦可将待测工件安装在线性运动平台上,轮廓仪保持静止,轮廓仪与

的光线首先通过准直镜进行准直,再通过扩束镜进行扩束,最后通过压缩扩束照射在被测工件表面并发生漫反射^[14],一部分漫反射光线经过成像系统会聚,在光敏元件上形成对应的像点,物点与像点之间有唯一的对应关系,建立数学模型后利用公式推导,可确定入射光产生的光斑位置与反射光产生的像点位置之间的函数关系式^[15-16]。

如图1(b)、(c)所示,线结构光法根据线状光束的入射角度可分为直射式和斜射式两种,对比如表1所示,其中 ϵ_0 为横向放大率。可以看出,直射式具有更高的稳定性和更简易的操作^[17],应用最为广泛,本研究也基于此方式开展。

待测工件之间产生相对平动,扫描区域与图2(a)中的相同;3)如图2(c)所示,当待测工件为回转件时,将待测工件放置于旋转工作台上,轮廓仪保持静止,待测工件随着转台旋转,轮廓仪激光光条掠过待测工件表面进行扫描,获得其表面形貌信息。

图2(a)、(b)所示测量方式适用于大部分工况,发展最为成熟、应用最为广泛,但是需要较大的运动空间,必须能进行精密的直线运动。图2(c)所示方式主要是针对圆柱体等回转工件的测量,然而,在被测工件尺寸较大、形状复杂时无法进行有效测量。如在航空航天领域,为了加工图3(a)、(b)所示的具

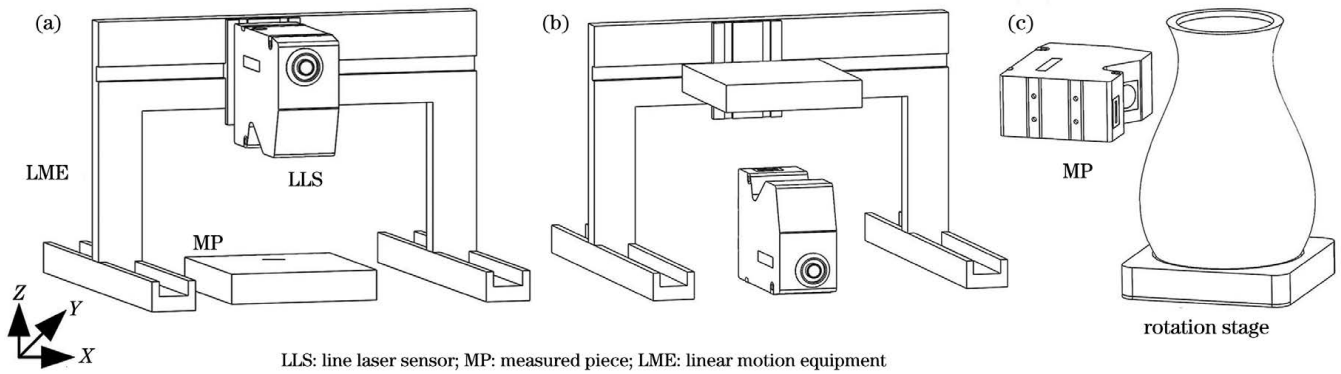


图2 常见的线激光轮廓仪测量方式。(a)激光轮廓仪平动;(b)被测工件平动;(c)被测工件旋转

Fig. 2 Common measurement methods based on line laser profilometer. (a) Translation motion of laser profilometer; (b) translation motion of measured workpiece; (c) rotational motion of measured workpiece

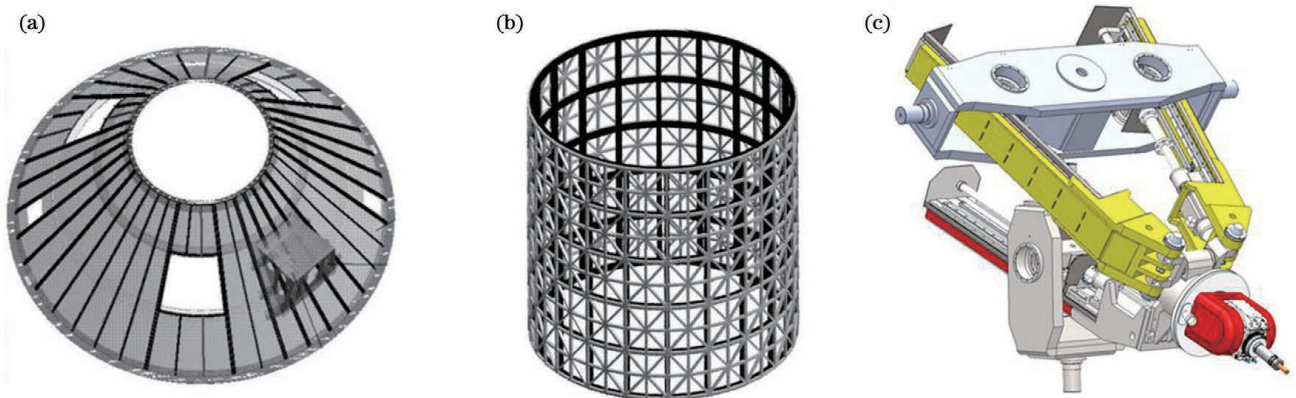
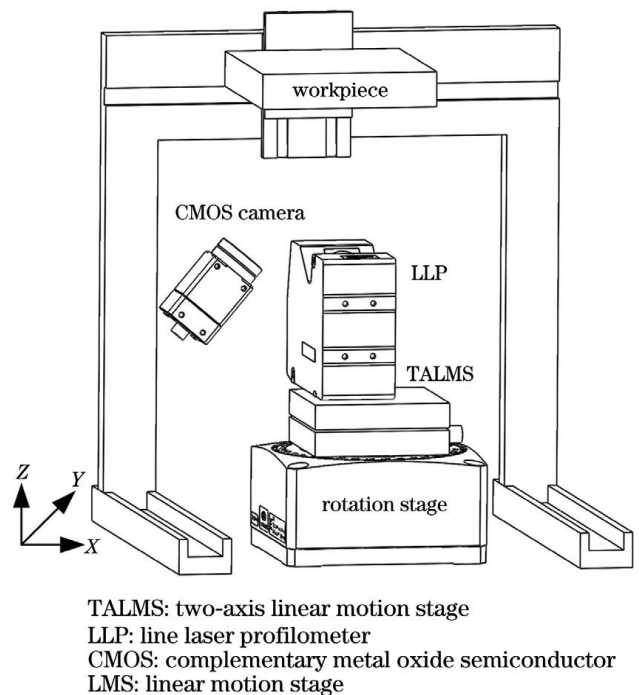


图3 航空航天领域的工件及加工机器人。(a)运载火箭支撑舱;(b)飞行器格栅支撑筒;(c)五自由度混联加工机器人

Fig. 3 Workpieces and machining robot in aerospace field. (a) Support bin of launch rocket; (b) grid support tube of aircraft; (c) five-degree-of-freedom hybrid machining robot

有较大尺寸和特殊结构的承力件、支撑舱等,往往采用图3(c)所示的混联加工机器人,同时,需要对加工结果进行精密的在位检测,保证加工质量。被测件往往尺寸较大,装夹复杂,难以移动;加工机器人的运动精度有限,且由于结构原因,无法在整个测量空间进行单独直线运动。此时,关键区域三维形貌的在位测量需要借助加工机器人携带测量设备进行,并且保证测量精度和路径不受机器人运动影响。

基于上述背景,本文研究了一种线激光轮廓仪旋转扫描的测量方式,搭建了图4所示的测量平台,将线激光轮廓仪和双向直线位移平台安装至旋转平台上,利用转台带动轮廓仪对目标区域进行旋转扫描,获取被测工件的形貌信息,其中双向位移平台可实现线结构光端点与其旋转运动中心的偏心误差调整,相机拍摄线结构光位置以计算其旋转运动偏心误差。如图5所示,将整个测量设备通过夹具安装到混联加工机器人前端,该检测方法可实现测量设备与多轴精密加工装备的集成,基于该方法的在位旋转测量可实现被测工件表面形貌的高精度检测,测量的精度不受设备运动精度的影响。



TALMS: two-axis linear motion stage
LLP: line laser profilometer
CMOS: complementary metal oxide semiconductor
LMS: linear motion stage

图4 基于线激光轮廓仪的旋转测量装置
Fig. 4 Rotation measuring device based on line laser profilometer

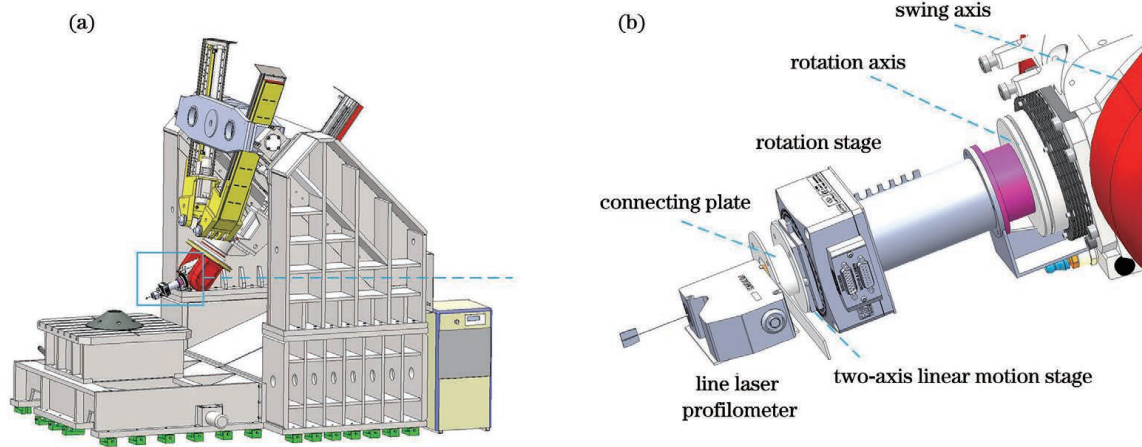


图5 旋转测量系统与五自由度混联加工机器人的集成图。(a)五自由度混联加工机器人模型;(b)旋转测量系统的集成区域
Fig. 5 Schematics of rotation measurement system integrated on five-degree-of-freedom hybrid processing robot. (a) 3D model of five-degree-of-freedom hybrid machining robot; (b) integrated parts of rotation measurement system

2.2 误差测量与补偿

2.2.1 偏心误差的测量方法

线激光轮廓仪测量工件表面时,仅可获取其基准面与被测工件表面之间沿激光光条发射方向的距离信息(Z 坐标),若要实现被测工件表面三维形貌的重构,必须对测量数据进行三维合成处理,即为所有测距信息赋予空间位置坐标。因测量路径为线结构光绕转台旋转轴作 360° 旋转运动,所以需要在极坐标系下计算数据坐标。

如图6所示,为了确保在旋转中心处没有数据缺失,实现线结构光有效测量区域覆盖其最远端测量点与转台旋转中心连线所在的整个圆形区域,须保证线激光轮廓仪发射的线结构光的测量起始端点位于旋转平台的旋转轴线上。然而,一方面激光光条与激光轮廓仪外壳之间的准确位置关系难以确定,另一方面相应工装夹具无法保证足够的精度,无法实现线激光轮廓仪与转台的精准对齐,因此需要在后续的数据处理过程中对该偏心误差进行测量和补偿。

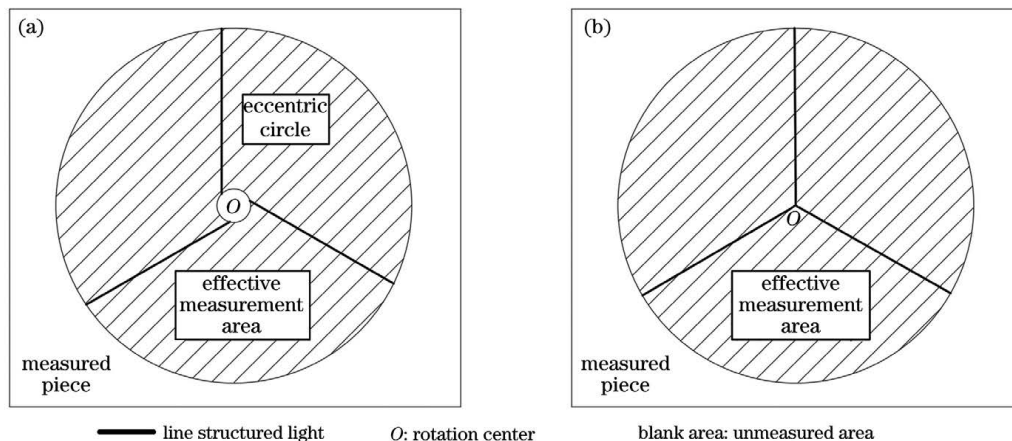


图6 线结构光与转台旋转中心的相对位置。(a)不完整测量区域;(b)完整测量区域

Fig. 6 Relative position of line structured light and rotation center of rotation stage. (a) Incomplete measurement area; (b) complete measurement area

如图4所示,本文使用CMOS相机拍摄线结构光在不同旋转角度时投射至标准平面的图像,由于拍摄时相机固定,可认为所有图像均处在同一相机坐标系中,因此可通过多幅图像拟合线结构光的测量起始端点做旋转运动的轨迹圆,该圆的半径即为所求的偏心误差。本文使用Matlab软件实现光条中心提取、运动轨迹拟合和误差计算等,具体步骤如图7所示。

2.2.1.1 激光光条中心的提取

传统的光条中心提取算法有极值法、灰度重心法、曲线拟合法、阈值法、边缘法、中心法、二值形态学细化

法、Steger算法、深度约束法等^[18]。激光光条在相机所拍摄的图像中有一定的宽度,而最关键的信息是光条的中心,因此快速、精确且鲁棒性好的光条中心提取算法是实现线结构光技术的关键^[19-20]。极值法对灰度分布满足理想高斯分布的光条中心具有非常好的提取效果。该方法可识别灰度的局部极大值,并将灰度值为极大值的点作为该条纹的中心点,提取速度快,操作简便,可实现亚像素精度的提取^[21]。本文基于极值法提取光条中心,测量时保证稳定、无杂光干扰的外部环境,同时采用适应激光轮廓仪激光波长的高分辨率

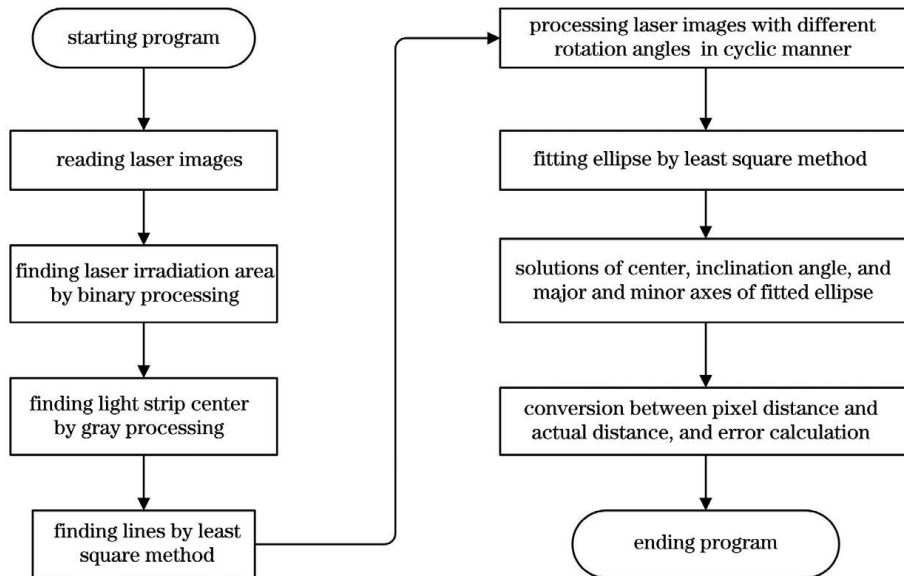


图7 偏心误差计算程序流程

Fig. 7 Flow chart of eccentric error calculation program

CMOS 相机, 确保足够小的噪声干扰, 以获取高信噪比的激光图像。

2.2.1.2 利用最小二乘法拟合直线和椭圆

为了确定线结构光的测量起始端点, 须对提取的光条中心进行直线拟合, 根据直线拟合方程确定该端点坐标。本文采用最小二乘法进行拟合^[22-23]。

由于无法保证相机光轴与线结构光投射平面垂直, 测量起始端点的圆形运动轨迹会畸变为椭圆, 该椭圆的中心与轨迹圆的圆心重合, 半长轴与轨迹圆半径相等, 利用最小二乘法拟合椭圆方程^[24], 通过求解可得到各参数^[25-26]:

$$x_0 = \frac{2BC - AD}{A^2 - 4B}, \quad (1)$$

$$y_0 = \frac{2D - AD}{A^2 - 4B}, \quad (2)$$

$$a = \sqrt{\frac{2(ACD - BC^2 - D^2 + 4BE - A^2E)}{(A^2 - 4B)[B - \sqrt{A^2 + (1-B)^2 + 1}]}} \quad (3)$$

$$b = \sqrt{\frac{2(ACD - BC^2 - D^2 + 4BE - A^2E)}{(A^2 - 4B)[B + \sqrt{A^2 + (1-B)^2 + 1}]}} \quad (4)$$

$$\beta = \arctan \sqrt{\frac{a^2 - b^2 B}{a^2 B - b^2}}, \quad (5)$$

式中: (x_0, y_0) 为拟合椭圆的中心坐标; a 为半长轴; b 为半短轴; β 为长轴偏角; A, B, C, D, E 为椭圆参数; $F(A, B, C, D, E)$ 为目标函数。

2.2.2 偏心误差的补偿方法

根据拟合计算得到的椭圆参数, 推导实际旋

转偏心误差 (e), 即椭圆的半长轴 a 。如图 8 所示, 连接旋转中心 (拟合椭圆的中心) 与第一条线结构光的测量起始端点构成一直线段, 以此直线段所在的直线为 X 轴, 以旋转中心为原点建立平面直角坐标系, 则第一条激光光条的端点坐标可完全确定为 $(e, 0)$ 。

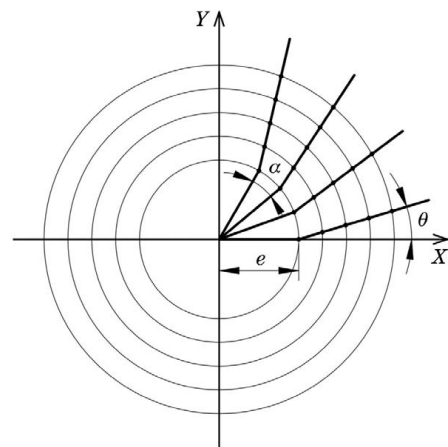


图8 基于线结构光旋转测量数据的坐标计算原理
Fig. 8 Calculation principle of coordinate based on data measured by rotating line structured light

通过计算直线段与第一条激光光条拟合直线的夹角 (θ), 可确定第一条直线段上所有点的坐标值。线结构光做旋转运动时采集数据, 采集时间间隔可通过计算得到, 配合旋转速度则可推导出下一采集位置的激光光条上各采集点的坐标值, 以此类推可计算出所有激光光条上各采集点的坐标值:

$$X = \sqrt{(e + m \times v \times \cos \theta)^2 + (m \times v \times \sin \theta)^2} \times \cos \left(\arctan \frac{m \times v \times \sin \theta}{e + m \times v \times \cos \theta} + u \times \alpha \right), \quad (6)$$

$$Y = \sqrt{(e + m \times v \times \cos \theta)^2 + (m \times v \times \sin \theta)^2} \times \sin \left(\arctan \frac{m \times v \times \sin \theta}{e + m \times v \times \cos \theta} + u \times \alpha \right), \quad (7)$$

$$\alpha = \frac{\omega}{f} \times \frac{\pi}{180}, \quad (8)$$

式中: X 和 Y 为计算所得的被测工件表面的二维坐标值; e 为激光光条端点与拟合椭圆中心的距离(在相同焦距下拍摄标准物体, 确定相机像素距离与实际距离之间的关系, 将实际的偏心距离计算出来); θ 为激光光条起始测量位置和激光光条端点与拟合椭圆中心连线的夹角; m 为激光点间距; ω 为旋转速度; f 为采样

频率; α 为两条激光光条之间的夹角; u 为激光光条相对初始位置转动的次数(即测量数据行数); v 为本条激光光条上第 v 个测量点(即测量数据列数)。

2.2.3 倾斜误差的补偿方法

如图 9(a)所示, 线激光轮廓仪与转台之间存在倾斜, 导致测量所得的数据存在倾斜误差。该误差会叠加至测量数据的 Z 值中, 最终影响测量精度, 因此需要对该倾斜误差进行补偿^[27-29]。

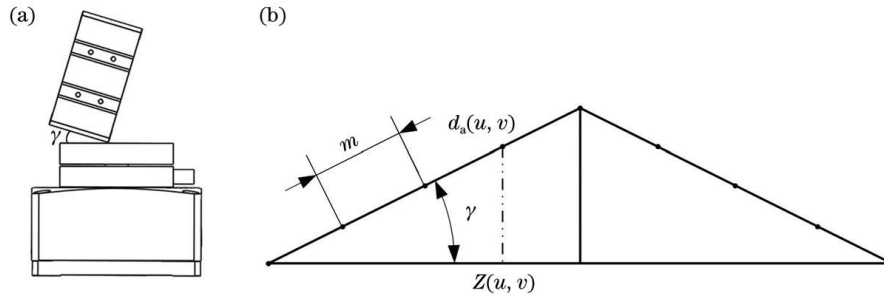


图 9 激光轮廓仪与旋转平台间的倾斜误差。(a) 误差原理; (b) 补偿原理

Fig. 9 Tilt error between laser profilometer and rotating stage. (a) Error principle; (b) compensation principle

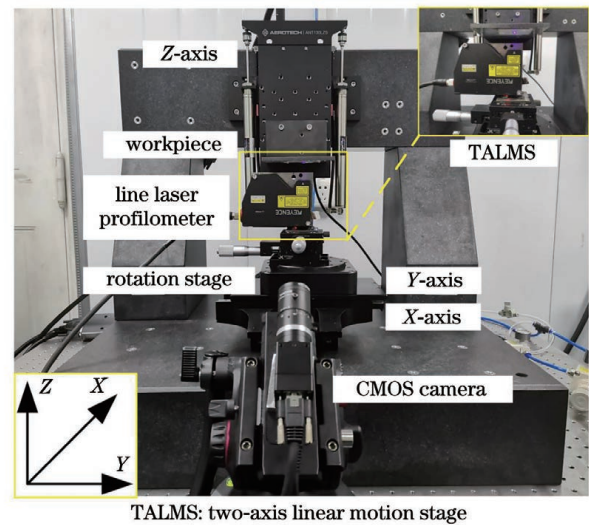
如图 9(b)所示, 在同一激光光条上的不同位置, 倾斜引起的测量误差不同, 导致中间位置出现极值且测量误差左右对称。通过测量倾斜表面与基准平面之间的夹角, 进行倾斜误差补偿, 可校正倾斜导致的测量误差:

$$Z(u, v) = d_a(u, v) - m \times v \times \sin \gamma, \quad (9)$$

式中: $Z(u, v)$ 为补偿后的被测工件表面高度值; $d_a(u, v)$ 为线激光轮廓仪测量得到的第 u 行第 v 列的数据值; γ 为倾斜表面与基准面之间的夹角。

3 实验与结果分析

搭建图 10 所示的测量平台, 从上至下分别为 Z 向运动平台(用于调整待测工件的高度, 使其位于线激光轮廓仪的量程内)、待测工件(随 Z 向运动平台运动)、线激光轮廓仪(用于测量待测工件表面与轮廓仪标准面之间的高度即 Z 坐标, 参数如表 2 所示, 其中 F. S. 指设备的全量程)、双向位移台(用于调整激光轮



TALMS: two-axis linear motion stage

图 10 线结构光旋转测量系统

Fig. 10 Line structured light rotation measurement system

表 2 线激光轮廓仪的部分参数

Table 2 Some parameters of line laser profilometer

Parameter	Content
Mounting condition	Diffuse reflection
Reference distance /mm	20
Height /mm	-2.6~+2.6(F. S. of 5.2)
Width on near side /mm	6.5
Reference distance /mm	7
Width on far side /mm	7.5
Repeatability of height / μm	0.2
Repeatability of width / μm	2.5
Linearity of height	$\pm 0.1\%$ F. S.
Profile data interval along X-axis / μm	10
Spot size /($\mu\text{m} \times \mu\text{m}$)	14 \times 35
Wavelength /nm	405

廓仪与旋转平台之间的位置关系)、精密转台(用于带动线激光轮廓仪做旋转运动,参数如表3所示)、CMOS相机(固定不动,用于拍摄线结构光旋转至不

同位置处的光条图像,计算旋转偏心误差,参数如表4所示)、两轴精密位移台(用于调整整套测量装置的位置,使待测工件位于检测区域)。

表3 精密旋转平台部分参数

Table 3 Some parameters of precision rotating stage

Parameter	Value
Travel range /($^{\circ}$)	360(continuous)
Accuracy /($''$)	3
Resolution /($''$)	0.01
Unidirectional repeatability /($''$)	0.5
Tilt error between synchronous motion and asynchronous motion /($''$)	10/3
Axial error between synchronous motion and asynchronous motion / μm	2
Radial error between synchronous motion and asynchronous motion / μm	3

表4 CMOS相机部分参数

Table 4 Some parameters of CMOS camera

Parameter	Value
Frame rate /($\text{frame} \cdot \text{s}^{-1}$)	9.2
Resolution /($\text{pixel} \times \text{pixel}$)	4000 \times 3000
Pixel size /($\mu\text{m} \times \mu\text{m}$)	1.85 \times 1.85
Image area /($\text{mm} \times \text{mm}$)	7.4 \times 5.55

3.1 不同位置处激光光条的拍摄

3.1.1 光条中心的提取方法

如图10所示,使用转台带动线激光轮廓仪旋转至不同角度,拍摄激光光条图像,提取光条中心并进行直线拟合。图11为激光光条在 125° 位置处的灰度值分布的高斯拟合图像。高斯拟合函数及其回归评价指标如表5所示,决定系数和校正决定系数均大于0.87,

表5 高斯拟合函数及其回归评价指标

Table 5 Gaussian fitting function and its regression evaluation indexes

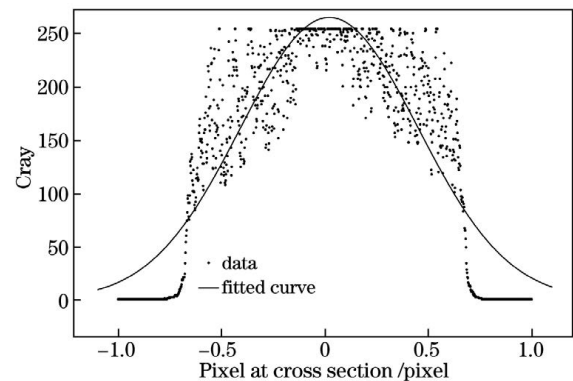
Parameter	Content
Gaussian fitting function	$f(x) = 262 \times \exp \frac{(x - 0.02803)^2}{0.5618^2}$
Sum of squared error (SSE) / pixel^2	1.304×10^6
Root mean square error (RMSE) / pixel	35.7424
Coefficient of determination (R^2)	0.8731
Adjusted coefficient of determination (R_{ADJ}^2)	0.8729

如表6所示,对不同角度下的激光光条进行直线拟合,提取该直线上的灰度分布并进行高斯拟合。回归评价指标决定系数(R^2)和校正决定系数(R_{ADJ}^2)最

表6 不同角度下激光光条的灰度分布的高斯拟合回归评价指标

Table 6 Regression evaluation indexes of Gaussian fitting for gray distribution of laser strips at different angles

Rotation stage angle /($^{\circ}$)	R^2	R_{ADJ}^2	Rotation stage angle /($^{\circ}$)	R^2	R_{ADJ}^2	Rotation stage angle /($^{\circ}$)	R^2	R_{ADJ}^2
0	0.7593	0.7590	110	0.8758	0.8756	240	0.7902	0.7900
15	0.7873	0.7870	120	0.8785	0.8783	250	0.7912	0.7910
30	0.7612	0.7610	125	0.8731	0.8729	280	0.8622	0.8620

图11 激光光条旋转至 125° 位置处时灰度值分布的高斯拟合图像Fig. 11 Gaussian fitting image of gray value distribution when laser stripe is rotated to 125° position

说明其灰度分布很好地满足高斯分布,因此可以使用极值法拟合光条中心。

小为0.7566,最大可达0.8785,这两个值表明各个角度的拟合效果较好。

续表

Rotation stage angle / (°)	R^2	R^2_{ADJ}	Rotation stage angle / (°)	R^2	R^2_{ADJ}	Rotation stage angle / (°)	R^2	R^2_{ADJ}
45	0.7569	0.7566	135	0.8732	0.8730	295	0.8615	0.8612
60	0.7916	0.7914	150	0.8718	0.8715	310	0.8698	0.8696
75	0.7983	0.7981	165	0.8261	0.8259	325	0.8680	0.8677
90	0.8069	0.8066	180	0.8149	0.8147	340	0.8608	0.8605
105	0.8555	0.8553	195	0.7828	0.7826	355	0.7936	0.7933

3.1.2 利用最小二乘法进行直线拟合

利用最小二乘法对极值法提取的光心进行直线拟合,不同角度下激光光条的拟合结果的评价指标如表7

表7 不同角度下激光光条最小二乘法直线拟合的回归评价指标

Table 7 Regression evaluation indexes of linear fitting for laser strips at different angles by least square method

Rotation stage angle / (°)	RMSE /pixel	R^2_{ADJ}	Rotation stage angle / (°)	RMSE /pixel	R^2_{ADJ}	Rotation stage angle / (°)	RMSE /pixel	R^2_{ADJ}
0	3.0528	0.9993	110	6.4290	0.9978	240	2.6408	0.9974
15	2.7930	0.9989	120	5.6574	0.9887	250	2.7710	0.9988
30	2.5141	0.9960	125	5.2381	0.8196	280	5.2130	0.9987
45	2.3881	0.8859	135	5.5422	0.9938	295	5.5347	0.9964
60	2.7347	0.9975	150	5.6315	0.9990	310	5.3335	0.9439
75	3.2607	0.9989	165	4.1523	0.9993	325	5.4857	0.9983
90	4.3018	0.9990	180	3.1183	0.9994	340	4.5075	0.9992
105	6.0104	0.9987	195	2.4413	0.9992	355	3.3165	0.9994

3.1.3 利用最小二乘法进行椭圆拟合与偏心误差计算

计算的激光光条长度结果如表8所示。激光光条的长度会发生明显变化,这是因为转台旋转至不同角度时,激光光条与相机光轴的夹角不同,拍摄的图像会发生畸变。如图12所示,拍摄的激光光条长度按一定

所示。校正决定系数超过0.99的占83.33%,均方根误差稳定,基于最小二乘法的直线拟合取得了很好的效果,保证了线结构光测量起始端点坐标的准确提取。

规律变化,当激光光条与相机光轴垂直(角度达到最大值)时,激光光条的长度最大,不发生畸变;当激光光条的长度最小时,激光光条与相机光轴的夹角达到最小值。如图13所示,椭圆的半长轴即为原圆形轨迹的半径,即偏心误差。

表8 不同角度激光光条长度

Table 8 Laser stripe lengths at different angles

Rotation stage angle / (°)	Laser stripe length /pixel	Rotation stage angle / (°)	Laser stripe length /pixel	Rotation stage angle / (°)	Laser stripe length /pixel
0	1307.313	40.5	1581.133	49.5	841.056
5	1356.549	41	1592.315	50	762.510
10	1434.167	41.5	1601.187	55	692.915
15	1486.129	42	1588.588	60	644.841
20	1534.052	42.5	1591.926	65	624.454
25	1564.608	43	1581.333	70	645.113
30	1589.003	43.5	1570.801	75	695.786
35	1607.934	44	1550.96	80	733.680
35.5	1587.285	44.5	1533.769	85	804.043
36	1601.389	45	1514.985	90	904.439

续表

Rotation stage angle / (°)	Laser stripe length / pixel	Rotation stage angle / (°)	Laser stripe length / pixel	Rotation stage angle / (°)	Laser stripe length / pixel
36.5	1592.984	45.5	1456.267	95	991.563
37	1604.624	46	1402.323	100	1063.748
37.5	1586.348	46.5	1311.365	105	1152.653
38	1594.162	47	1248.923	335	1234.443
38.5	1602.313	47.5	1166.271	340	1304.497
39	1602.046	48	1095.006	345	1375.174
39.5	1577.002	48.5	1004.367	350	1415.386
40	1579.027	49	911.964	355	1460.802

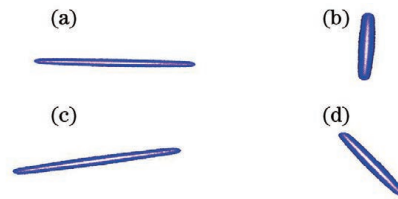


图12 转台在不同角度时相机拍摄的激光条图像。(a)40°; (b)125°; (c)240°; (d)330°

Fig. 12 Laser strip images taken by camera at different rotation stage angles. (a) 40°; (b) 125°; (c) 240°; (d) 330°

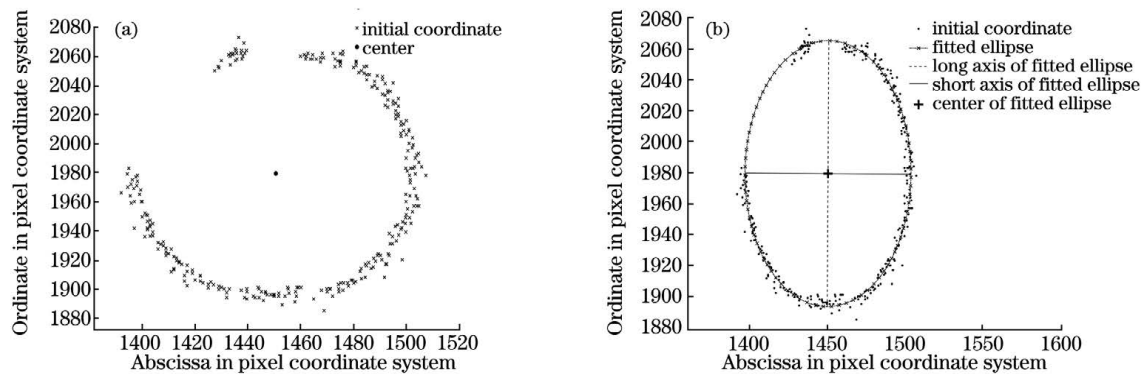


图13 线结构光运动轨迹拟合。(a)线结构光测量起始端点;(b)拟合椭圆

Fig. 13 Trajectory fitting of line structured light. (a) Measurement starting point using line structured light; (b) fitted ellipse

表9第一列为拟合椭圆在相机像素坐标系中的中心坐标,第二列和第三列为根据式(3)、(5)计算所得的偏心误差和偏转角度。第一行数据为粗对准,拟合误差达0.9838 mm。根据拟合结果调整双向位移台以

Table 9 Fitted results of eccentric error and deflection angle

Fitted ellipse center coordinate	Eccentric error / mm	Deflection angle / (°)
(1450.6028, 1979.3201)	0.9838	140.1801
(1562.8977, 1943.8902)	0.0642	122.1208
(1562.0212, 1943.1210)	0.0398	124.9813
(1561.9853, 1943.5147)	0.0389	139.7264
(1561.0801, 1945.9902)	0.0275	143.6845
(1561.3261, 1940.6634)	0.0397	100.8764
(1562.1362, 1942.8301)	0.0334	135.6443
(1562.3614, 1942.7806)	0.0346	148.6949
(1563.0726, 1942.9401)	0.0637	127.1804

缩小偏心误差,可见最小偏心误差为 0.0275 mm,已经接近仪器的测量极限值,偏心误差的校正取得了很好的结果。根据第一条线结构光的位置推导计算偏转角度,为其余点 X、Y 坐标的计算提供初始参考角度。

3.2 误差分析与补偿

根据偏心误差及偏转角度的拟合结果,结合式(6)~(8),可计算原始数据对应的 X、Y 坐标值。本文利用 Java 软件编程,根据公式计算 X、Y 坐标并将其与对应的 Z 坐标结合,组成激光测量区域所有点的三维坐标。

使用 MountainsMap8 软件处理数据,图 14 为经过三维合成和极坐标化后的陶瓷板表面的旋转测量结果。可以看出,由于偏心误差的存在,测量时线结构光的有效测量区域未能完整覆盖整个测量目标表面,因此重构表面出现圆形的数据缺失区域。同时由于线激光轮廓仪倾斜,误差叠加至表面,高度发生改变。因此需要对以上两种误差进行计算与补偿。

基于本文提出的偏心误差测量计算方法,通过调整激光轮廓仪与转台之间的位置关系,可确保目标区域形貌数据的完整测量,得到的测量结果如图 15(a)、(b)所示。使用软件自带的校平功能进行校平处理,

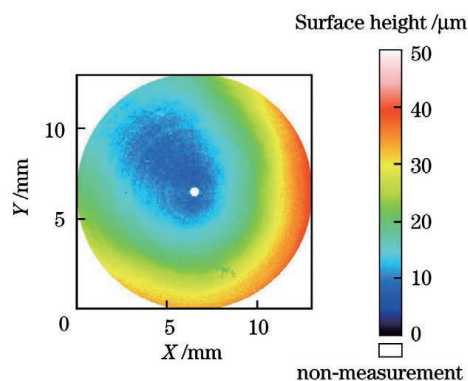


图 14 未去除偏心误差时测得的不完整三维形貌数据

Fig. 14 Incomplete 3D morphology data measured without removing eccentric error

得到图 15(c)所示的表面。对得到的三维重构表面进行分析,取其沿 Z 轴方向的截面轮廓,如图 15(d)所示,发现截面轮廓高度呈现出先减小后增大的趋势,在横坐标为 8 mm 左右处(即旋转轴线所处的位置)达到最小,说明激光光条并没有完全与转台旋转轴线垂直,线激光轮廓仪与旋转平面之间存在倾角,出现了图 9 所示的倾斜误差,需要进一步分析该误差并进行补偿。

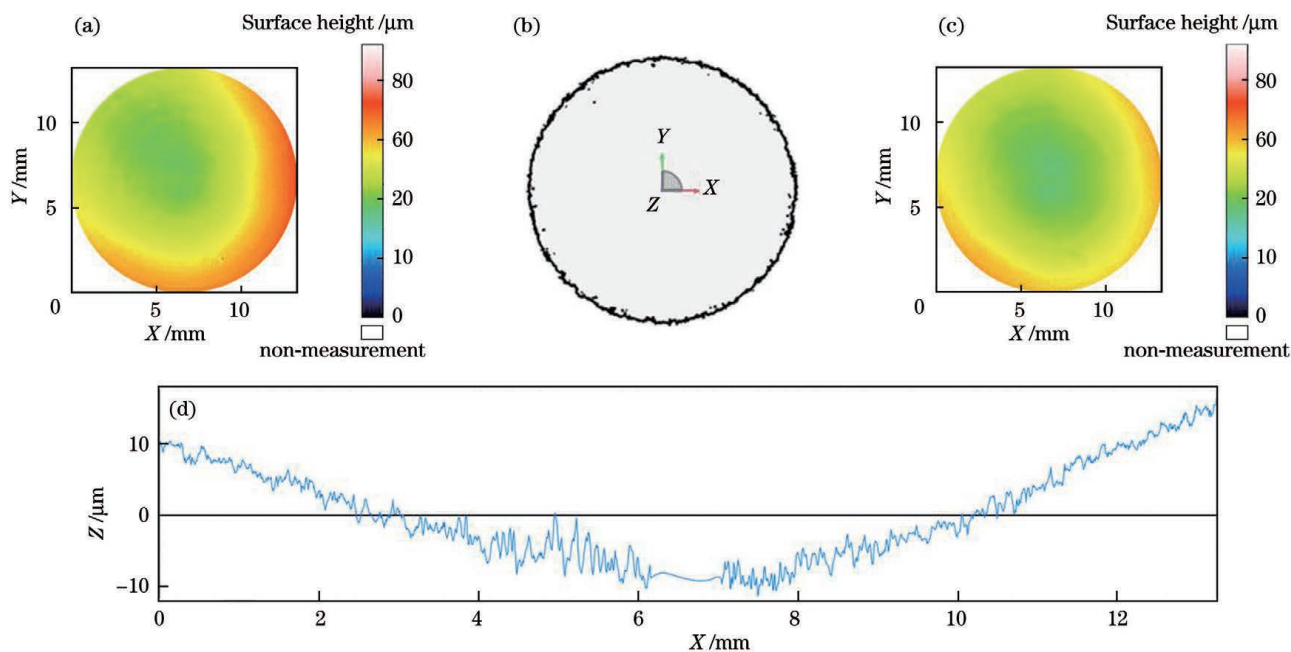


图 15 去除偏心误差后获得的完整三维形貌数据。(a)表面形貌图;(b)外围轮廓截面图;(c)校平的平面;(d)截面高度沿 Z 轴的变化

Fig. 15 Complete 3D morphology data measured after removing eccentric error. (a) Surface morphology; (b) sectional drawing of peripheral contour; (c) levelled surface; (d) section height change along Z axis

为了补偿倾斜误差,首先需要确定倾斜角度,可通过 MountainsMap8 软件重构数据表面,并分析截面倾角来获取该角度。然后利用式(9)进行误差补偿,结果如图 16 所示。可以看出,旋转测量结果经过坐标三维合成、极坐标化处理、偏心误差补偿、校平、倾斜误差补偿等步骤后,可获得理想的被测表面

重构信息。

如图 17(a)所示,使用接触式轮廓仪对同一块陶瓷板进行接触式测量,接触式探针沿着某一方向作直线运动划过被测表面,得到的探针接触区域表面的形貌如图 17(b)、(c)所示。可见经过误差补偿后,被测表面的测量高度跳动误差集中在 $4 \mu\text{m}$ 处,整体误差

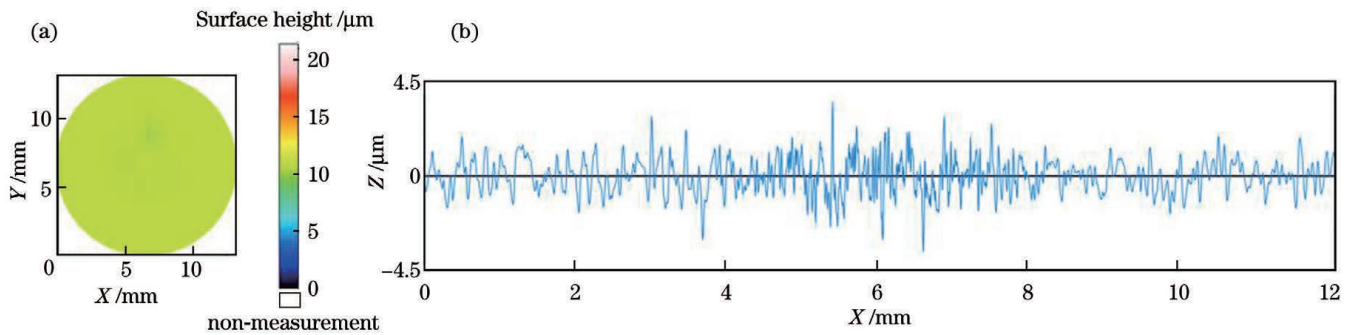


图 16 倾斜误差校正后的结果。(a)表面形貌图;(b)截面图

Fig. 16 Results after tilt error correction. (a) Surface morphology; (b) sectional profile

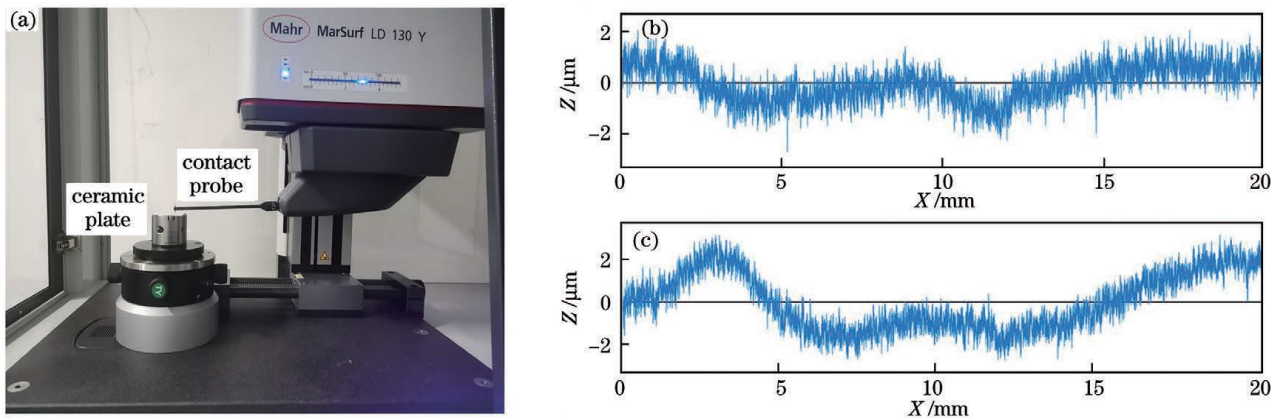


图 17 轮廓仪测量陶瓷板的现场图及结果。(a)现场图;(b)(c)不同方向测量得到的截面轮廓

Fig. 17 On-site photo and results of ceramic plate measurement with profilometer. (a) On-site photo; (b)(c) measured section profiles along different directions

不超过 $7 \mu\text{m}$ 。接触式轮廓仪在不同方向上的测量结果不同,但是跳动误差集中在 $4 \mu\text{m}$ 处,整体不超过 $6 \mu\text{m}$,与本文方法的测量结果相近,证明了本文误差补偿的有效性。

3.3 典型特征物体的旋转测量精度评价

第 3.2 节通过测量陶瓷板的截面高度跳动,验证了本文提出的误差补偿模型的有效性。本节拟对两种具有典型特性的物体进行线结构光旋转测量,并对数据进行误差补偿,通过对比其特征与标准数据,进一步验证本文所提方法的精度。

3.3.1 氧化锆陶瓷球的旋转测量精度验证

使用线激光轮廓仪对图 18(a)所示的氧化锆陶瓷球进行旋转测量。根据本文提出的方法,对测量数据进行三维合成、极坐标化处理与误差补偿,重构的氧

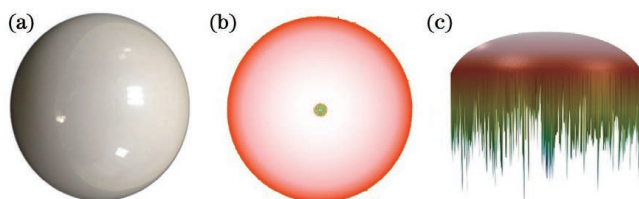


图 18 氧化锆陶瓷球测量结果。(a)实物图;(b)俯视图;(c)剖视图

Fig. 18 Measurement results of zirconia ceramic ball. (a) Physical photograph; (b) top view; (c) section view

化锆陶瓷球表面如图 18(b)、(c)所示。可见数据能够反映出被测物体的真实形貌信息,但是在球的最高点处出现部分数据变形和缺失。这是因为该处激光光条近乎平行照射,球表面非常光滑,线激光轮廓仪传感器很难接收到反射光,因此数据出现缺失。

使用 MountainsMap8 软件对本文所提旋转测量方式获取的数据进行拟合,所得的球体半径如表 10 第一列所示。图 19 为使用 MarSurf LD 130 接触式轮廓仪测量球体半径的现场图,使用相同软件对所得的数据进行处理,拟合半径表 10 第二列所示。本文方

表 10 氧化锆陶瓷球的拟合半径

Table 10 Fitted radii of zirconia ceramic ball

unit: mm		
Fitted radius obtained by proposed method	Fitted radius obtained by contact method	Average value
5.0011	5.0041	
5.0012	5.0033	
5.0014	5.0043	
5.0012	5.0043	
5.0009	5.0042	0.0029
5.0010	5.0037	
5.0008	5.0039	
5.0010	5.0041	
5.0000	5.0036	

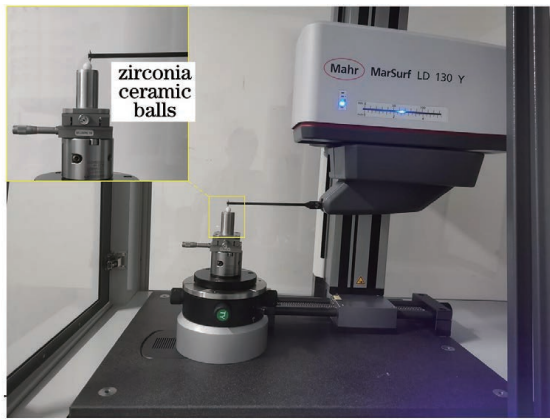


图19 轮廓仪测量球体现场图

Fig. 19 On-site photo of ball measurement with profilometer. 拟合的球半径的平均值为 5.0010 mm, 接触式轮廓仪测量拟合球的半径的平均值为 5.0039 mm, 误差 $< 3 \mu\text{m}$ 。考虑到使用线结构光测量光滑球体时存

在一定的困难,且球体本身各个方向的加工精度不均匀,本文提出的测量方法和数据处理方法具有较高的精度。

3.3.2 复杂三维形貌的测量验证

为了充分验证本文所提测量方法的精度和有效性,分别使用本文方法和激光共聚焦显微镜测量钥匙表面。该表面有诸多凸起特征和英文字母,形貌复杂,对关键特征进行比较,如图 20 所示,对比结果如表 11 所示,其中高度为凸起英文字母相对钥匙基准面的高度。可以看出,相对于共聚焦测量,本文方法的测量范围更大,测量效率更高,最大测量误差为 $4.2 \mu\text{m}$ 。钥匙表面图案加工的精度较低,且存在磨损、生锈腐蚀等情况,测量特征时边界不明显,测量精度受到一定的影响。本文方法在测量复杂形貌时,能够实现较大范围的高精度测量,相比共聚焦测量,具有更高的效率和更大的测量范围,且设备更为简单,可实现在位测量。

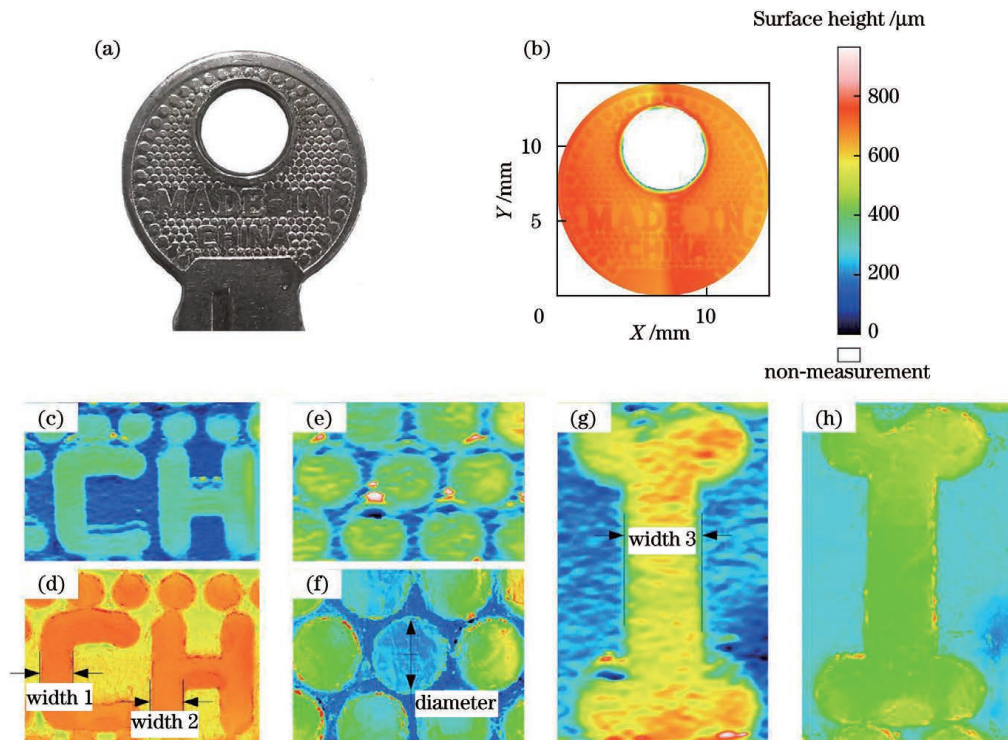


图 20 钥匙表面形貌测量结果。(a)实物图;(b)所提方法测量得到的完整三维形貌;(c)(e)(g)所提方法测量得到的局部形貌的放大图像;(d)(f)(h)共聚焦法测量得到的局部形貌的放大图像

Fig. 20 Measurement results of key surface morphology. (a) Physical picture; (b) complete 3D morphology by proposed method; (c)(e)(g) enlarged images of local topography measured by proposed method; (d)(f)(h) enlarged images of local topography measured by confocal method

表 11 不同方法测量的钥匙表面形貌特征参数的对比

Table 11 Comparison of characteristic parameters of key surface morphologies obtained by different methods units: mm

Characteristic parameter	Proposed method	Confocal method	Error
Width 1	0.3371	0.3346	0.0025
Width 2	0.3682	0.3663	0.0019
Width 3	0.3585	0.3618	0.0033
Diameter	0.4633	0.4591	0.0042
Height	0.2532	0.2504	0.0028

4 结 论

研究了线结构光旋转测量方法,利用高精度旋转平台带动线激光轮廓仪做旋转运动,同时进行三维表面形貌的在位检测。该方法适用于被测工件或运动机构体积和重量较大、相对运动精度不高的情况。

采用极值法对不同位置的激光图像进行处理,基于最小二乘法拟合求解旋转测量过程中线结构光的测量起始端点与转台旋转中心的偏心误差,通过调整激光轮廓仪的位置,该误差的最小值为 0.0275 mm。

提出了一种基于线结构光旋转测量的数据处理与误差补偿算法,对激光轮廓仪获取的测量数据进行三维合成、极坐标化处理以及误差补偿处理,得到的重构表面可完整准确地反映被测工件的尺寸、形状和表面形貌等信息。通过对比高精度接触式轮廓仪的测量结果,所提方法的测量精度可控制为 3 μm ,接近设备测量精度的极限值。与共聚焦测量方式相比,所提方法在测量复杂三维形貌时仍能保持较高的精度,且测量范围和效率更高。

受限于设备精度和线结构光测量技术在测量光滑物体时的缺陷,所提测量方式的精度尚有提升空间,对不同特征的适应性也有待进一步提高。

参 考 文 献

- [1] 冯秀, 顾伯勤. 表面形貌的研究现状及发展趋势[J]. 润滑与密封, 2006, 31(2): 168-170, 176.
Feng X, Gu B Q. The research status and development tendency of surface topography[J]. Lubrication Engineering, 2006, 31(2): 168-170, 176.
- [2] Zheng Y, Zhang X, Wang S D, et al. Similarity evaluation of topography measurement results by different optical metrology technologies for additive manufactured parts[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2020, 126: 105920.
- [3] Mettänen M, Hirn U. A comparison of five optical surface topography measurement methods[J]. TAPPI Journal, 2015, 14(1): 27-38.
- [4] Leach R. Optical Measurement of Surface Topography[M]. Heidelberg: Springer, 2011.
- [5] Zhang S, Huang P S. High-resolution, real-time three-dimensional shape measurement[J]. Optical Engineering, 2006, 45: 123601.
- [6] 刘盼, 刘劲涛. 点激光在机测量平面度的误差评定研究[J]. 沈阳工程学院学报(自然科学版), 2021, 17(2): 92-96.
Liu P, Liu J T. Research on the error evaluation of point laser in machine flatness measurement[J]. Journal of Shenyang Institute of Engineering (Natural Science), 2021, 17(2): 92-96.
- [7] 詹坤烽, 陈文建, 李武森, 等. 线激光三维场景重建系统及误差分析[J]. 中国激光, 2018, 45(12): 1204004.
Zhan K F, Chen W J, Li W S, et al. Line laser 3D scene reconstruction system and error analysis[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(12): 1204004.
- [8] 张宗华, 刘小红, 郭志南, 等. 基于结构光的镜面/漫反射复合表面形貌测量[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(3): 0303015.
Zhang Z H, Liu X H, Guo Z N, et al. Shape measurement of specular/diffuse complex surface based on structured light[J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(3): 0303015.
- [9] Moreno-Oliva V I, Román-Hernández E, Torres-Moreno E, et al. Measurement of quality test of aerodynamic profiles in wind turbine blades using laser triangulation technique[J]. Energy Science & Engineering, 2019, 7(5): 2180-2192.
- [10] 韩家杰, 周建平, 薛瑞雷, 等. 线结构光管道焊缝表面形貌重建与质量评估[J]. 中国激光, 2021, 48(14): 1402010.
Han J J, Zhou J P, Xue R L, et al. Surface morphology reconstruction and quality evaluation of pipeline weld based on line structured light[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(14): 1402010.
- [11] 张鹏程, 刘瑾, 杨海马, 等. 航空发动机损伤叶片的激光交叠式三维重建[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(16): 161504.
Zhang P C, Liu J, Yang H M, et al. Laser overlapping three-dimensional reconstruction of damaged aero engine blade[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(16): 161504.
- [12] 丁红, 徐永安. 三维旋转激光扫描测量系统的设计[J]. 现代电子技术, 2011, 34(8): 164-166.
Ding H, Xu Y A. Design of 3D rotary laser scanning and measuring system[J]. Modern Electronics Technique, 2011, 34(8): 164-166.
- [13] Huang K, Yang J, Xu D L, et al. Line laser based Researches on a Three-dimensional Measuring system[C]//2019 IEEE 3rd Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference, March 15-17, 2019, Chengdu, China. New York: IEEE Press, 2019: 657-660.
- [14] 相江. 三维显微光切法表面粗糙度的非接触测量技术[J]. 工具技术, 2019, 53(7): 96-99.
Xiang J. Non-contact measurement research of surface roughness by three-dimensional microscopic light cutting[J]. Tool Engineering, 2019, 53(7): 96-99.
- [15] 孙有春, 庞亚军, 白振旭, 等. 激光三角测量法应用技术[J]. 激光杂志, 2021, 42(4): 1-8.
Sun Y C, Pang Y J, Bai Z X, et al. Application technology of laser triangulation[J]. Laser Journal, 2021, 42(4): 1-8.
- [16] Schlarp J, Csencsics E, Schitter G. Design and evaluation of an integrated scanning laser triangulation sensor[J]. Mechatronics, 2020, 72: 102453.
- [17] 吴博文, 冯国强. 激光三角法测距原理研究[J]. 价值工程, 2020(22): 242-244.
Wu B W, Feng G Q. Research on principle of laser triangulation ranging[J]. Value Engineering, 2020(22): 242-244.
- [18] 冀振燕, 宋晓军, 付文杰, 等. 激光光条中心线提取研究综述[J]. 测控技术, 2021, 40(6): 1-8.
Ji Z Y, Song X J, Fu W J, et al. Review on centerline extraction for laser stripe[J]. Measurement & Control Technology, 2021, 40(6): 1-8.
- [19] 李伟明, 梅枫, 胡增, 等. 线激光光条中心内部推进提取算法[J]. 中国激光, 2021, 48(11): 1104002.
Li W M, Mei F, Hu Z, et al. Internal propulsion algorithm for extracting center of line laser stripe[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(11): 1104002.
- [20] 胡杨, 方素平. 线结构光条纹中心提取方法[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(1): 0112005.
Hu Y, Fang S P. Extraction method of light stripe center of linear structure[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(1): 0112005.
- [21] 李伟明, 彭国, 高兴宇, 等. 线激光光条中心快速提取算法[J]. 中国激光, 2020, 47(3): 0304002.
Li W M, Peng G, Gao X Y, et al. Fast extraction algorithm for line laser strip centers[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(3): 0304002.
- [22] 幸冬梅. 最小二乘法及其相关方法的数学原理与类比分析[J]. 理论数学, 2018(3): 230-238.
Xing D M. Mathematical theory and analogy analysis of least square method and its related methods[J]. Pure Mathematics, 2018(3): 230-238.
- [23] 丁克良, 沈云中, 欧吉坤. 整体最小二乘法直线拟合[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2010, 29(1): 44-47.
Ding K L, Shen Y Z, Ou J K. Methods of line-fitting based on total least-squares[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2010, 29(1): 44-47.

- [24] Mitchell D R G, van den Berg J A. Development of an ellipse fitting method with which to analyse selected area electron diffraction patterns [J]. *Ultramicroscopy*, 2016, 160: 140-145.
- [25] Hunyadi L, Vajk I. Constrained quadratic errors-in-variables fitting[J]. *The Visual Computer*, 2014, 30(12): 1347-1358.
- [26] 熊风光, 李希, 韩燮. 基于整体最小二乘的椭圆拟合方法[J]. *微电子学与计算机*, 2017, 34(1): 102-105.
- Xiong F G, Li X, Han X. A method of ellipse fitting based on total least squares[J]. *Microelectronics & Computer*, 2017, 34(1): 102-105.
- [27] Lu J, Cai Z Q, Yao B, et al. Error compensation and accuracy analysis of laser measurement system based on laser-beam calibration[J]. *Optik*, 2020, 200: 163272.
- [28] Wang L, Feng Q B, Li J K. Tilt error analysis for laser triangulation sensor based on ZEMAX[J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, 10846: 108460R.
- [29] Li S S, Yang Y P, Jia X T, et al. The impact and compensation of tilt factors upon the surface measurement error[J]. *Optik*, 2016, 127(18): 7367-7373.

Measurement and Error Compensation of 3D Morphology with Precision Rotation Line Structured Light

Liu Xiang^{1,2}, Wang Zhenliang³, Yao Peng^{1,2*}, Hou Yao^{1,2}, Zhang Heyong^{1,2},
Chu Dongkai^{1,2}, Qu Shuoshuo^{1,2}

¹Center for Advanced Jet Engineering Technologies, School of Mechanical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, Shandong, China;

²Key Laboratory of High Efficiency and Clean Mechanical Manufacture, Ministry of Education, Jinan 250061, Shandong, China;

³Engine Manufacturing Company, Sinostruk Jinan Power Co., Ltd., Jinan 250220, Shandong, China

Abstract

Objective Surface morphologies of workpieces affect the properties of mechanical system, such as friction and wear, fatigue strength, and corrosion resistance. Precise measurements of surface morphologies are of great significance, which can show the processing quality, guide processing and improve surface performance. The contact measurement method is inefficient, and may cause workpiece damage. Optical non-contact precision measurement methods are developed based on the properties of light, which have the advantages of non-destruction, large area, high precision, high sensitivity, simplicity and efficiency, so they are widely applied. The structured light measurement method is one of the most popular measurement methods, in which different lights with different modes are projected onto a object surface and the 3D morphology is reconstructed by shooting distorted images with a camera. However, when a line laser profilometer is used to measure the 3D morphology of a workpiece, a relatively linear motion is usually needed between them, so the system needs a linear motion module with high precision and occupies a large space. Therefore, it is difficult to achieve precision measurement. To solve these problems, a rotation scanning measurement method with a line laser profilometer is proposed in this paper.

Methods First, the line structured light rotation measurement system (Fig. 10) is built, which can project the laser stripe vertically onto a standard plane. Then, when the laser profilometer rotates with the rotation stage at different angles (Fig. 12), the fixed CMOS camera shoots images of line structured light. By the Matlab programming, the images are processed based on the extremum method, and the motion trajectory of the laser light strip (Fig. 13) is fitted based on the least square method. Then, the eccentricity error of rotation center of profilometer and rotation stage are calculated according to the fitted trajectory. In the next step, by the Java programming, 3D synthesis and polar processing of point cloud data are processed. The run-out and eccentricity errors of the rotation stage and the tilt error of the line laser profilometer are compensated. Finally, the effectiveness of the proposed method is verified by measuring the radius of a standard zirconia ceramic ball and the diameter, width and height of a key.

Results and Discussions The line structured light is shot by the CMOS camera, and the eccentric error is calculated by fitting the motion trajectory. After the relative position between the laser profilometer and the rotation stage is adjusted, the minimum error reaches 0.02752 mm (Table 9), which provides a good position for rotation measurement. A high-precision profilometer and the proposed method are used to measure the radius of the standard zirconia ceramic ball (Figs. 18 and 19), the average error of measurement results is 2.99 μm (Table 10). Due to the shortcoming of line structured light in measuring smooth surface, the non-measurement region appears in the spherical crown, but our method still presents high measurement accuracy. When a key surface is measured by the two methods, the measurement range of the proposed method is larger than that of the confocal measurement method. That is to say, when large size features are

measured, the confocal measurement method needs multiple measurements and data splicing, which reduces the measurement efficiency and accuracy. The deviations of the measured widths of the key surface at three different positions by the two methods are $2.9\ \mu\text{m}$, $1.9\ \mu\text{m}$, $3.3\ \mu\text{m}$, and the deviations of the measured diameter and height of the key surface by the two methods are $4.2\ \mu\text{m}$ and $2.8\ \mu\text{m}$ (Table 11), respectively. Due to the low machining accuracy and the abrasion and corrosion of the key surface, the large deviation appears in the measurement results.

Conclusions In this paper, a method for measurement and error compensation of 3D morphology with precision rotation line structured light is proposed. When the proposed method is used to measure the radius of the standard sphere, the error is smaller than $3\ \mu\text{m}$ compared with the measurement result by a precision profilometer, which is close to the limit of measurement accuracy of this instrument set. The CMOS camera is used to capture the images at different positions to fit the motion trajectory of the line structured light when the line structured light rotates with the rotation stage. In this process, it is necessary to keep the camera fixed and a stable lighting environment without stray light interference. After the laser stripe center is extracted by the extremum method, the least square method is used for trajectory fitting, then the relative position between the laser profilometer and the rotation stage is adjusted according to the fitting results. In this process, the gray distribution and fitting regression evaluation index are monitored to ensure the effectiveness of the fitting method. Compared with the confocal measurement method, our method has a larger measurement range and higher efficiency when measuring large features. Meanwhile, the minimum and maximum deviations between the two measurement results are $1.9\ \mu\text{m}$ and $4.2\ \mu\text{m}$, respectively, which proves the accuracy of the proposed method. The verified results indicate that the proposed method is suit for on-machine precision measurement of 3D workpiece morphologies when the workpiece or motion stage is too large and the precision of the relative motion is not high enough.

Key words measurement; 3D morphology; line structured light; rotation measurement; image recognition; error compensation